



AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ



SEÇKİN ÇAKMAK

YANGIN SONRASI UYGULANAN FARKLI REHABİLİTASYON ÇALIŞMALARININ
EROZYON SÜREÇLERİ, SU KALİTESİ VE TOPRAK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE OLAN
ETKİLERİ: 2021 MANAVGAT YANGIN SAHASI ÖRNEĞİ

Coğrafya Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Antalya, 2025



AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ



SEÇKİN ÇAKMAK

YANGIN SONRASI UYGULANAN FARKLI REHABİLİTASYON ÇALIŞMALARININ
EROZYON SÜREÇLERİ, SU KALİTESİ VE TOPRAK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE OLAN
ETKİLERİ: 2021 MANAVGAT YANGIN SAHASI ÖRNEĞİ

Danışman

Prof. Dr. Tuncer DEMİR

İkinci Danışman

Dr. Hüseyin YILMAZ

Coğrafya Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Antalya, 2025

Bu tez, 122O979 numaralı 1001 projesi kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

T.C.
Akdeniz Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğüne,

Seçkin ÇAKMAK'ın bu çalışması, jürimiz tarafından Coğrafya Anabilim Dalı Doktora Programı tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Tolga GÖRÜM (İmza)

Üye (Danışman) : Prof. Dr. Tuncer DEMİR (İmza)

Üye : Prof. Dr. Hasan ÖZDEMİR (İmza)

Üye : Prof. Dr. Cemali SARI (İmza)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Çağlar ÇAKIR (İmza)

Tez Başlığı: Yangın Sonrası Uygulanan Farklı Rehabilitasyon Çalışmalarının Erozyon Süreçleri, Su Kalitesi ve Toprak Özellikleri Üzerine Olan Etkileri: 2021 Manavgat Yangın Sahası Örneği

Onay: Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Tez Savunma Tarihi : 03/06/2025

Mezuniyet Tarihi : 26/06/2025

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yangın Sonrası Uygulanan Farklı Rehabilitasyon Çalışmalarının Erozyon Süreçleri, Su Kalitesi ve Toprak Özellikleri Üzerine Olan Etkileri: 2021 Manavgat Yangın Sahası Örneği” adlı bu çalışmanın, akademik kural ve etik değerlere uygun bir biçimde tarafımdan yazıldığını, yararlandığım bütün eserlerin kaynakçada gösterildiğini ve çalışma içerisinde bu eserlere atıf yapıldığını belirtir; bunu şerefimle doğrularım.

Seçkin ÇAKMAK



T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ



19/06/ 2025

TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU BEYAN BELGESİ

Öğrenci Bilgileri	
Adı-Soyadı	Seçkin ÇAKMAK
Öğrenci Numarası	20195276002
Anabilim Dalı	Coğrafya
Programı	Doktora
Danışman Öğretim Üyesi Bilgileri	
Unvanı, Adı-Soyadı	Prof. Dr. Tuncer DEMİR
Doktora Tez Başlığı	Yangın Sonrası Uygulanan Farklı Rehabilitasyon Çalışmalarının Erozyon Süreçleri, Su Kalitesi ve Toprak Özellikleri Üzerine Olan Etkileri: 2021 Manavgat Yangın Sahası Örneği
Turnitin Bilgileri	
Ödev Numarası	2677435898
Rapor Tarihi	19/06/2025
Benzerlik Oranı	Alıntılar hariç: %4 Alıntılar dahil: %4
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE, Yukarıda bilgileri bulunan öğrenciye ait tez çalışmasının a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana Bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 305 sayfalık kısmına ilişkin olarak Turnitin adlı intihal tespit programından Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esaslarında belirlenen filtrelemeler uygulanarak yukarıdaki detayları verilen ve ekte sunulan rapor alınmıştır. Danışman tarafından uygun olan seçenek işaretlenmelidir: (X) Benzerlik oranları belirlenen limitleri aşmıyor ise: Yukarıda yer alan beyanın ve ekte sunulan Tez Çalışması Orijinallik Raporunun doğruluğunu onaylarım. () Benzerlik oranları belirlenen limitleri aşıyor, ancak tez/dönem projesi danışmanı intihal yapılmadığı kanısında ise: Yukarıda yer alan beyanın ve ekte sunulan Tez Çalışması Orijinallik Raporunun doğruluğunu onaylar ve Uygulama Esaslarında öngörülen yüzdeler sınırlarının aşılmasına karşın, aşağıda belirtilen gerekçe ile intihal yapılmadığı kanısında olduğumu beyan ederim.	
Gerekçe:	
Benzerlik taraması yukarıda verilen ölçütlere uygun olarak tarafımca yapılmıştır. İlgili tezin orijinallik raporunun uygun olduğunu beyan ederim.	
Danışman Öğretim Üyesi Prof. Dr. Tuncer DEMİR	

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	viii
FOTOĞRAFLAR LİSTESİ	ix
KISALTMALAR LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
ÖNSÖZ	xviii
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM

ARAŞTIRMA SAHASININ FİZİKİ COĞRAFYA ÖZELLİKLERİ

1.1. Araştırma Sahasının Jeomorfolojik Özellikleri	75
1.1.1. Araştırma Sahasının Yükselti Özellikleri	75
1.1.2. Araştırma Sahasının Eğim Özellikleri	76
1.1.3. Araştırma Sahasının Bakı Özellikleri	77
1.2. Araştırma Sahasının Jeolojik Özellikleri	79
1.3. Araştırma Sahasının Toprak Özellikleri	81
1.4. Araştırma Sahasının Hidrografya Özellikleri	83
1.5. Araştırma Sahasının Arazi Kullanımı Özellikleri	85
1.6. Araştırma Sahasının İklim Özellikleri	87
1.6.1. Sıcaklık Özellikleri	88
1.6.2. Yağış Özellikleri	89
1.6.3. İklim Sınıflandırması	92

İKİNCİ BÖLÜM

ARAŞTIRMANIN MATERYAL VE METODU

2.1. Araştırma Sahasında Yangın Dönemi ve Sonrasında Yapılan Düzenlemeler.....	94
2.1.1. Orman Yangını Dönemi (28.07.2021).....	94

2.1.2. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	99
2.1.3. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	104
2.2. Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi	109
2.3. Meteorolojik Parametrelerin Ölçülmesi	114
2.4. Hidrolojik Parametrelerin Ölçülmesi.....	117
2.5. Sediman Taşınım Süreçlerinin Belirlenmesi	119
2.5.1. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonlarının Belirlenmesi.....	119
2.5.2. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Süspanse Sediman (Askıda Katı Madde, AKM) Konsantrasyonunun Belirlenmesi.....	121
2.5.3. Yatak Yükü Taşınımı	122
2.5.3.1. Sediman Tuzaklarının Kurulumu	122
2.5.3.2. Tane Boyutu Analizi.....	125
2.5.3.3. Sediman İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonlarının Belirlenmesi.....	126
2.6. Yüzeysel Akış Suyundaki Su Kalitesi Parametrelerinin Belirlenmesi	127
2.7. İstatistiksel Analizler	129

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMANIN BULGULARI

3.1. Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	131
3.2. Yağış, Yüzeysel Akış ve Akım Miktarları	139
3.2.1. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	139
3.3. Sediman Taşınım Süreçleri.....	151
3.3.1. Sediman Miktarı ve Oranları	151
3.3.1.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	151
3.3.1.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	154
3.3.2. Tane Boyutu Özellikleri	164
3.3.2.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	164

3.3.2.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	169
3.3.3. Sediman İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonu	176
3.3.3.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	176
3.3.3.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	180
3.3.4. Sediman İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Miktar ve Oranları	186
3.3.4.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	186
3.3.4.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	191
3.3.5. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonu	195
3.3.5.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	195
3.3.5.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	198
3.3.6. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Miktar ve Oranları	203
3.3.6.1. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	203
3.4. Yüzeysel Akışın Su Kalitesi Özellikleri	207
3.4.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	207
3.4.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	209

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TARTIŞMA

4.1. Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	213
4.2. Yağış, Yüzeysel Akış ve Akım Miktarları	217
4.2.1. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	217
4.3. Sediman Taşınım Süreçleri.....	220
4.3.1. Sediman Miktarı ve Oranları	220
4.3.1.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	220
4.3.1.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	224
4.3.2. Sediman İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Miktarları.....	228
4.3.2.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	228
4.3.2.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	229

4.3.3. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Miktarı	231
4.3.3.1. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	231
4.4. Yüzeysel Akışın Su Kalitesi Özellikleri	234
4.4.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023).....	234
4.4.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)	237
SONUÇ VE ÖNERİLER	240
KAYNAKÇA.....	245
ÖZGEÇMİŞ.....	280



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 Araştırma Sahasının Lokasyon Haritası	74
Şekil 1.1 Araştırma Sahasının Yükselti Basamakları Haritası	76
Şekil 1.2 Araştırma Sahasının Eğim (%) Haritası	77
Şekil 1.3 Araştırma Sahasının Bakı Haritası	79
Şekil 1.4 Araştırma Sahasının Jeoloji Haritası	81
Şekil 1.5 Araştırma Sahasının Büyük Toprak Grupları (BTG) Haritası	83
Şekil 1.6 Araştırma Sahasının Hidrografi Haritası	85
Şekil 1.7 Araştırma Sahasının Arazi Kullanımı (SAK) Haritası	87
Şekil 1.8 Manavgat/Taşağöl İstasyonuna ait 2013-2023 Yılları Arası Aylık Ortalama Sıcaklık, Maksimum Sıcaklık ve Minimum Sıcaklık Değerleri	89
Şekil 1.9 Manavgat/Taşağöl İstasyonuna Ait Aylık Ortalama Yağışlı Gün Sayısı (2013-2023).....	90
Şekil 1.10 Manavgat/Taşağöl İstasyonuna Ait Aylık Toplam Yağış Miktarı (2013-2023).....	91
Şekil 1.11 Manavgat/Taşağöl İstasyonuna Ait Yağışların Mevsimsel Dağılımı (2013-2023) .	92
Şekil 1.12 Manavgat-Taşağöl İstasyonu (2013-2023) Thornthwaite Su Bilançosu.....	93
Şekil 2.1 Araştırma Sahaları ve Çevresinin Yangın Şiddeti Haritası	99
Şekil 2.2 Akım Gözlem İstasyonlarının (AGİ) Boyutlandırılmasının Şematik Gösterimi.....	117
Şekil 3.1 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemi (Mart 2023) İle Rehabilitasyon Döneminde Ölçülen İnfiltrasyon Oranı ve Hidrolik İletkenlik Değerleri (cm/h).....	136
Şekil 3.2 Rehabilitasyonun Döneminde Haftalık Olarak Ölçülen Toprak Nemi (%) ve Toprak Sıcaklığı Değerleri (°C).....	137
Şekil 3.3 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Havzalara Ait Ortalama Toprak Nemi (%) ve Toprak Sıcaklığı Değerleri (°C).....	138
Şekil 3.4 Rehabilitasyon Dönemi Su Seviyesi ile Akım Anahtar Eğrileri: (a) YADD-H1, (b) YADG-H2, (c) YAYG-H3, (d) Kontrol Sahası.....	140
Şekil 3.5 Rehabilitasyon Döneminin İlk Yılında Ölçülen Anlık Akım (15 Dakika) ve Yağış Miktarı (30 Dakika).....	142
Şekil 3.6 Rehabilitasyonun Birinci Yılında 16 Farklı Örnekleme Dönemlerinde Ölçülen Yağış (mm) ve Akım (mm) Miktarları	144
Şekil 3.7 Rehabilitasyonun Birinci Yılında Örnek Dönemlerinde Belirlenen Ortalama Yüzeysel Akış (mm) ve Yağış Miktarları (mm)	145
Şekil 3.8 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Ölçülen 15 Dakikalık Akım Değerleri (m ³ /sn) ve 30 Dakikalık Yağış Miktarları (mm)	147

Şekil 3.9 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Örnekleme Döneminde Ölçülen Yüzeysel Akış ve Yağış Miktarları (mm)	149
Şekil 3.10 Rehabilitasyonun İkinci Yılında 12 Farklı Yağışlı Örnekleme Dönemlerinde Ölçülen Ortalama Yüzeysel Akış (mm) ve Yağış Miktarları (mm).....	150
Şekil 3.11 Üretim faaliyeti (Salvage Logging) dönemi boyunca Dokuz Farklı Yağış Olayı Döneminde Tuzaklarda Biriken Sediman Miktarları (kg).....	152
Şekil 3.12 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemi Havzalara Göre Taşınan Ortalama Sediman Miktarı (kg/tuzak).....	153
Şekil 3.13 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemindeki Toplam Yağış (mm) ve Tuzaklarda Biriken Sediman Miktarı (kg)	154
Şekil 3.14 Rehabilitasyonun Birinci Yılında 16 Farklı Yağışlı Olay Döneminde Taşınan Süspanse Sediman (kg/ha), Akım (m^3/ha) ve Yağış Miktarları (mm)	156
Şekil 3.15 Rehabilitasyon Döneminin İlk Yılında 16 Yağışlı Örnekleme Döneminde Taşınan Yatak Yükü (kg/ha), Akım (m^3/ha) ve Yağış Miktarı (mm)	158
Şekil 3.16 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Örnekleme Döneminde Taşınan Süspanse Sediman (kg/ha), Akım (m^3/ha) ve Yağış Miktarı (mm).....	160
Şekil 3.17 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Örnekleme Döneminde Ölçülen Yatak Yükü (kg/ha), Akım (m^3/ha) ve Yağış Miktarları (mm).....	163
Şekil 3.18 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Örnekleme Döneminde Havzalara Göre Taşınan Ortalama Süspanse Sediman ve Yatak Yükü Miktarı (kg/ha).....	164
Şekil 3.19 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Dokuz Farklı Yağışlı Dönemde Taşınan Sedimanın Tane Boyutu Dağılımı (%)	166
Şekil 3. 20 Üretim Faaliyetleri Döneminde Sediman Tuzağında Tutulan Toplam Sediman İçerisindeki Tane Boyutu Miktarı (kg) (a) ve Havzadaki Tane Boyutu Dağılımı (b).....	169
Şekil 3.21 Rehabilitasyon Döneminin İlk Yılında Sediman Tuzağında Tutulan Toplam Sediman İçerisindeki Tane Boyutu Miktarı (kg/ha) (a) ve Havza İçerisindeki Tane Boyutu Dağılımı (b)	172
Şekil 3.22 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Sediman Tuzağında Tutulan Toplam Sediman İçerisindeki Tane Boyutu Miktarı (kg/ha) (a) ve Havza İçerisindeki Tane Boyutu Dağılımı (b)	175
Şekil 3.23 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Organik Karbon (OC) ve Toplam Azot (TN) Değeri (%)	177
Şekil 3.24 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonları (mg/l)	180

Şekil 3.25 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Organik Karbon ve Toplam Azot Değeri (%)	181
Şekil 3.26 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonu (mg/l)	183
Şekil 3.27 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Organik Karbon ve Toplam Azot Değerleri (%)	184
Şekil 3.28 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonları (mg/l)	186
Şekil 3.29 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Sediman İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarları (mg/tuzak).....	189
Şekil 3.30 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemi Boyunca Sediman İçerisinde Taşınan Toplam Bitki Besin Maddesi Miktarı (mg)	191
Şekil 3.31 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Sediman İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarı (gram/ha)	193
Şekil 3.32 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Sediman İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarı (gram/ha)	195
Şekil 3.33 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemi Boyunca Yüzeysel Akış İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonları (mg/l)	198
Şekil 3.34 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Yüzeysel Akış İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonu (mg/l)	200
Şekil 3.35 Rehabilitasyonun İkinci Yılında Yüzeysel Akış İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Konsantrasyonu (mg/l)	203
Şekil 3.36 Rehabilitasyonun Birinci Yılında Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarları (gram/ha)	205
Şekil 3.37 Rehabilitasyonun İkinci Yılında Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarı (gram/ha).....	207

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Akdeniz Havzası Ülkelerindeki Orman Yangını Sayıları ve Yanık Alanlar (2004-2021)	12
Tablo 2.1 Yangın Şiddeti Sınıflandırması	95
Tablo 2.2 USGS FIREMON Standartlarına Göre dNBR Yangın Şiddeti Sınıfları	97
Tablo 2.3 Dört Havzada Belirlenen Sabit Toprak Örneklem Noktalarının Koordinatları	110
Tablo 2.4 Yüzeysel Akış Örneklerinde Belirlenen Parametreler ve Analiz Metotları	120
Tablo 3.1 Orman Yangını, Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) ve Rehabilitasyon Dönemine Ait Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	134
Tablo 3.2 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Havzalarda Taşınan Ortalama Tane Boyutu Miktarları (kg/tuzak)	167
Tablo 3.3 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında 16 Farklı Yağış Olayı Döneminde Tuzakta Tutulan Sedimanın Ortalama Tane Boyutu Miktarı (kg/tuzak)	171
Tablo 3.4 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Yağış Olayı Döneminde Tuzakta Tutulan Sedimanın Ortalama Tane Boyutu Miktarı (kg/tuzak)	174
Tablo 3.5 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Yüzeysel Akışta Ölçülen Ortalama Su Kalitesi Parametreleri	208
Tablo 3.6 Rehabilitasyonun İlk Yılında Yüzeysel Akışta Ölçülen Ortalama Su Kalitesi Parametreleri	210
Tablo 3.7 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Yüzeysel Akışta Ölçülen Ortalama Su Kalitesi Parametreleri	212

FOTOĞRAFLAR LİSTESİ

Fotoğraf 2.1 Araştırma Sahasına Ait Orman Yangını Esnasındaki Yanmış Ağaçlardan, Orman Altı Örtüsünden ve Kül Birikimi olan Üst Topraktan Bir Görünüm.....	96
Fotoğraf 2.2 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemine Ait Görseller: (a) Havza 1, (b) Havza 2, (c) Havza 3 ve (d) Yangın Geçirmemiş Kontrol Sahası.....	100
Fotoğraf 2.3 Üretim Faaliyetleri Yapılan Havzalarda (Havza 1, Havza 2, Havza 3) Yeni Açılan Orman Yollarından Görseller	101
Fotoğraf 2.4 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Havza 1'deki Akarsu Yatağı ve Orman Yoluna Ait Bir Görünüm.....	102
Fotoğraf 2.5 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Havza 2'deki Akarsu Yatağı ve Orman Yoluna Ait Bir Görünüm.....	102
Fotoğraf 2.6 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Havza 3'teki Akarsu Yatağı ve Orman Yoluna Ait Bir Görünüm.....	103
Fotoğraf 2.7 Üretim Faaliyetleri Döneminde Havza 1'de ve Rehabilitasyon Sürecinde Doğal Haline Bırakılan (YADD-H1) Sahada Orman Yolu ile Akarsu Arasında Gelişen Vejetasyon (Riperyan) Zonuna Ait Bir Görünüm	104
Fotoğraf 2.8 Rehabilitasyon Döneminin Birinci ve İkinci Yıllarında Doğal Haline Bırakılan Havza (YADD-H1) İçerisinde Aynı Noktalardan Alınan Karşılaştırmalı Görseller	105
Fotoğraf 2.9 Rehabilitasyon Döneminin Birinci ve İkinci Yıllarında Tohumlanan ve Dal Serilen Havza (YADG-H2) İçerisinde Aynı Noktalardan Alınan Karşılaştırmalı Görseller .	106
Fotoğraf 2.10 Rehabilitasyon Döneminin Birinci ve İkinci Yıllarında Sürülen ve Fidan Dikilen Havza (YAYG-H3) İçerisinde Aynı Noktalardan Alınan Karşılaştırmalı Görseller	107
Fotoğraf 2.11 Yangın Geçirmemiş Kontrol Sahasından Bir Görünüm	108
Fotoğraf 2.12 Toprak Örneklemesi Esnasından Bir Görünüm.....	111
Fotoğraf 2.13 Doğal Yapısı Bozulmuş (a) ve Doğal Yapısı Bozulmamış (b) Toprak Örneklerine Ait Görseller	112
Fotoğraf 2.14 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) ve Rehabilitasyon Döneminde İnfiltrasyon Hızı ve Hidrolik İletkenlik Ölçümlerinden Bir Görünüm	113
Fotoğraf 2.15 Rehabilitasyon Döneminde Sabit Örneklem Noktalarında Toprak Nemi ve Toprak Sıcaklığı Ölçümlerinden Bir Görünüm	114
Fotoğraf 2.16 Yağış Örnekleyici Kapların Şematik Çiziminden ve Arazideki Kurulumundan Bir Görünüm.....	115
Fotoğraf 2.17 Havzalara Yerleştirilen Yağmur Suyu Örnekleyici Kaplardan Bir Görünüm .	116

Fotoğraf 2.18 Doğal Haline Bırakılan Havzaya (a) ve Kontrol Sahasına (b) Kurulan Otomatik Meteoroloji İstasyonundan Bir Görünüm.....	116
Fotoğraf 2.19 Akım Gözlem İstasyonlarına (AGİ) Ait Görseller: (a) YADD-H1, (b) YADG-H2, (c) YAYG-H3, (d) Kontrol Sahası.....	118
Fotoğraf 2. 20 Yağış Olayının Ardından Elektromanyetik Muline ile Su Hızı Ölçümünden Bir Görünüm.....	119
Fotoğraf 2.21 Yüzeysel Akış Örneklerinin Süzülmesi (Filtrasyon) Aşamasından Bir Görünüm	120
Fotoğraf 2.22 Yüzeysel Akış Örneklerinin Saklanma Koşullarından ve Spektrofotometrik Analiz Aşamasından Bir Görünüm.....	121
Fotoğraf 2.23 Yüzeysel Akış Örneklerinde Süspanse Sediman Konsantrasyonun Belirlenmesi Aşamasından (Filtrasyon, Kurutma ve Tartma) Bir Görünüm.....	122
Fotoğraf 2.24 Akarsu Yatağının Yüzeyine Yerleştirilen Sediman Tuzaklarından Bir Görünüm	123
Fotoğraf 2.25 Akarsu Yatağına Gömülü Olarak Yerleştirilen Sediman Tuzaklarından Bir Görünüm.....	124
Fotoğraf 2.26 Yağış Olaylarının Ardından Sediman Tuzaklarından Alınan Sedimanlardan (Kurutulmuş hali) Bir Görünüm.....	125
Fotoğraf 2.27 Alınan Sediman Örneklerinin Tane Boyutu Analizi Aşamasından Bir Görünüm	126
Fotoğraf 2.28 Laboratuvar Ortamında Analiz Aşamasından Görseller; (a) Fosfor Tayini, (b) Spektrofotometrik Analiz Aşaması, (c) Alev Fotometresi Ölçümü, (d) Atomik Absorpsiyon Cihazı Analizi	127
Fotoğraf 2.29 Akarsu Yatağına Yerleştirilen Yüzeysel Akış Örnekleme Kapları	128
Fotoğraf 4.1 Tohumlama ve Dal Serme (YADG-H2) Uygulaması Yapılan Yamaçlardan Bir Görünüm.....	218
Fotoğraf 4.2 Sürüm ve Fidan Dikimi Uygulaması Yapılan Havzaya (YAYG-H3) Ait Görseller: (a) İlk Sürüm Esnasından, (b) Sürümün ikinci yılından, (c ve d) Sürümün İkinci Yılındaki Oyuntu (Gully) ve Parmak (Rill) Erozyonu Görseli	219
Fotoğraf 4.3 Üretim (Salvage Logging) Faaliyetleri Döneminde Havza 1’de Akarsu Yatağı Boyunca Oluşan Sediman Birikim Alanlarının Temsili Görünümü	222
Fotoğraf 4.4 Üretim (Salvage Logging) Faaliyetleri Döneminde Havza 2’de Akarsu ile Orman Yolu Arasındaki Mesafenin ve Orman Yolundaki Erozyonun Gözlemlendiği Görseller.....	223

Fotoğraf 4.5 Üretim Faaliyetleri Kapsamında Oluşturulan Yol Yarmalarındaki Şev Çökmesi ile Orman Yolu ile Akarsu Arasındaki Hidrolojik Bağlantıyı Gösteren Görseller (YADG-H2)	225
Fotoğraf 4.6 Doğal Haline Bırakılan Havzada (YADD-H1) Orman Yolu ile Akarsu Arasında Gelişen Vejetasyon Zonundan Rehabilitasyon Dönemine Ait Görseller	226
Fotoğraf 4.7 Sürüm ve Fidan Dikim Uygulamasında (YAYG-H3) Rehabilitasyonun İkinci Yılında Gelişen Gully ve Rill Erozyonlarından Bir Görünüm	227



KISALTMALAR LİSTESİ

AGİ	: Akım gözlem istasyonu
AKM	: Askıda katı madde (süspanse sediman)
AS	: Agregat stabilitesi
C/N	: Karbon-azot oranı
Ca ⁺²	: Kalsiyum
Cu	: Bakır
ÇO	: Çözünmüş oksijen
dNBR	: Farklandırılmış normalleştirilmiş yanma oranı
DOC	: Çözünmüş organik karbon
EC	: Elektrik iletkenlik
FAO	: Gıda ve tarım örgütü
Fe	: Demir
HA	: Hacim ağırlığı
ha	: Hektar
HGM	: Harita genel müdürlüğü
I	: İnfiltrasyon hızı
IPCC	: Hükûmetler arası iklim değişikliği paneli
K+	: Potasyum
kg	: kilogram
Ksat	: Hidrolik iletkenlik
Mg ⁺²	: Magnezyum
mm	: milimetre
Mn	: Manganez
Na+	: Sodyum
NBR	: Normalleştirilmiş yanma indeksi
NBRpost	: Yangın sonrası normalleştirilmiş yanma oranı
NBRpre	: Yangın öncesi normalleştirilmiş yanma oranı
NH ₄ ⁺ -N	: Amonyum azotu
NIR	: Yakın kızılötesi
NO ₃ ⁻ N	: Nitrat azotu
OGM	: Orman genel müdürlüğü
ORP	: Oksidasyon indirgeme potansiyeli

P	: Fosfor
PAH	: Polisiklik aromatik hidrokarbon
PET	: Potansiyel buharlaşma-terleme
pH	: Toprak reaksiyonu
PO ₄ -P	: Ortofosfat fosforu
S	: Kükürt
SDA	: Suyu dayanıklı agregat
SL	: Salvage logging (üretim faaliyetleri)
SOM	: Toprak organik maddesi
SPAR	: Sodyum ve potasyum adsorpsiyon oranı
SWIR	: Kısa dalga kızılötesi
SWR	: Toprak su geçirimsizliği
TC	: Toplam karbon
TDS	: Toplam çözünmüş sediman
TN	: Toplam azot
TOC	: Toprak organik karbon
TP	: Toplam fosfor
YADD	: Yanmış alanın doğal haline bırakılması
YADG	: Yanmış alanın doğal gençleştirilmesi (tohumlama+dal serme)
YAYG	: Yanmış alanın yapay gençleştirilmesi (sürüm+fıdan dikme)
Zn	: Çinko

ÖZET

Türkiye ormanlarının yaklaşık %64'ü yüksek yangın riski altındadır. 2017–2021 yılları arasında toplam 189.443 hektar ormanlık alan yanmış olup, özellikle 2021 yılı, Türkiye Cumhuriyeti tarihinin en büyük orman yangınlarıyla kayıtlara geçmiştir. Yangın sonrası bozulan ekosistemlerin eski işlevlerini yeniden kazanabilmesi için ilk olarak üretim faaliyetleri (salvage logging) yürütülmekte, ardından doğal gençleştirme, yapay gençleştirme ya da doğal haline bırakma gibi çeşitli rehabilitasyon yaklaşımları uygulanmaktadır. Ancak bu rehabilitasyon çalışmalarının toprak özellikleri, sediman taşınımı, hidrolojik dinamikler ve ekosistem işleyişi üzerindeki etkileri henüz yeterince araştırılmamıştır.

Bu çalışmada, orman yangını sonrası yürütülen üretim faaliyetleri ile farklı rehabilitasyon uygulamalarının, mikro havza ölçeğinde toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerine, yüzeysel akışa, sediman taşınımına, taşınan bitki besin maddelerine ve yüzey sularının su kalitesi parametrelerine etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, 2021 yılında gerçekleşen Manavgat Orman Yangını sahasında benzer jeomorfolojik ve klimatolojik özelliklere sahip üç yangın geçirmiş mikro havza (Havza 1, Havza 2 ve Havza 3) ile bir kontrol sahası seçilmiştir. 2022 Ekim–2023 Mayıs döneminde, yangın geçirmiş bu üç havzada eş zamanlı olarak ağır iş makineleriyle ağaç kesimi, sürütme, nakliye işlemleri gerçekleştirilmiş ve yeni orman yolları açılmıştır. 2023 Mayıs itibarıyla Havza 1 doğal haline bırakılmış (YADD-H1), Havza 2'de doğal gençleştirme (tohumlama ve dal serme, YADG-H2), Havza 3'te ise yapay gençleştirme (sürüm ve fidan dikimi, YAYG-H3) uygulanmıştır.

Yangın sonrası üretim ve rehabilitasyon dönemlerinde her havzadan ve kontrol sahasından düzenli aralıklarla toprak örnekleme yapılmış; yağışlı dönemlerde ise yüzeysel akış miktarı, taşınan sediman miktarı, su ve sediman içeriğindeki bitki besin maddeleri ile su kalitesi parametreleri belirlenmiştir. Üretim faaliyetleri döneminde, Havza 1'de yer alan ve orman yolu ile akarsu arasında gelişmiş vejetasyonla kaplı riperyan zonun, taşınan sediman ve besin maddesi miktarlarını belirgin şekilde azalttığı belirlenmiştir. Rehabilitasyon döneminde, YADG-H2'de artan infiltrasyon hızına bağlı olarak ikinci yıl yüzeysel akış, sediman taşınımı ve bitki besin kayıplarında azalma; su kalitesi parametrelerinde ise iyileşme kaydedilmiştir. YAYG-H3'te ise ilk yıl infiltrasyonun artması nedeniyle yüzeysel akış ve sediman taşınımı sınırlı kalmışken, ikinci yıl infiltrasyon hızının düşmesi ve gelişen rill ile gully oluşumları nedeniyle sediman ve besin maddesi taşınımı katlanarak artmış; buna bağlı olarak da su kalitesinde bozulma meydana gelmiştir. YADD-H1'de ise yıllar arasında yüzeysel akış, sediman taşınımı ve su kalitesi bakımından anlamlı bir iyileşme gözlenmemiştir.

Sonuç olarak, üretim faaliyetleri döneminde riperyan zonun varlığı sediman ve bitki besin taşınımını azaltıcı bir etki göstermiştir. Rehabilitasyon uygulamaları açısından değerlendirildiğinde ise doğal gençleştirme yöntemi (YADG-H2), ikinci yıl itibarıyla toprak özellikleri, sediman taşınımı, besin maddesi kaybı ve su kalitesi bakımından en olumlu sonuçları ortaya koyarken; yapay gençleştirme yöntemi (YAYG-H3) ise aynı dönem itibarıyla bu parametreler açısından en olumsuz sonuçları göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Orman Yangını, Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging), Rehabilitasyon Yöntemleri; Yüzeysel Akış, Toprak Erozyonu



SUMMARY

EFFECTS OF DIFFERENT POST-FIRE REHABILITATION PRACTICES ON EROSION PROCESSES, WATER QUALITY, AND SOIL PROPERTIES: THE CASE OF THE 2021 MANAVGAT FIRE AREA

Approximately 64% of Turkey's forested areas are classified as high-risk zones for wildfires. Between 2017 and 2021, wildfires burned a total of 189.443 hectares, with 2021 marking the most extensive fire season in the country's history. Following such events, salvage logging is commonly conducted to prepare the site for ecological rehabilitation. Subsequently, various restoration strategies are applied, including natural regeneration, artificial regeneration, or passive recovery. However, the ecological impacts of these post-fire practices remain insufficiently studied.

This study investigates the effects of salvage logging and different rehabilitation treatments on soil properties, surface runoff, sediment and nutrient transport, and water quality at the micro-watershed scale. The study area is located in the Manavgat region, severely affected by the 2021 wildfire. Three burned micro-watersheds (Watersheds 1, 2, and 3), with similar geomorphological and climatic characteristics, and an unburned control watershed were selected. From October 2022 to May 2023, salvage logging operations—tree felling, skidding, transport, and forest road construction—were conducted simultaneously in all burned watersheds. In May 2023, rehabilitation methods were implemented: Watershed 1 was left to regenerate naturally (YADD-H1), Watershed 2 underwent seeding and mulching (YADG-H2), and Watershed 3 was treated with contour tilling and afforestation (YAYG-H3).

During both the salvage logging and rehabilitation period, soil samples were collected periodically from each watershed. Additionally, runoff, sediment yield, nutrient concentrations (in water and sediment), and water quality parameters were monitored during rainy seasons. In the salvage logging phase, the presence of a vegetated riparian zone in Watershed 1 significantly reduced sediment and nutrient transport compared to the other two watersheds. During the rehabilitation period, YADG-H2 showed improved infiltration in the second year, leading to decreased runoff, sediment transport, and nutrient losses, along with improved water quality. In contrast, although YAYG-H3 initially exhibited low runoff and sediment yield, a decline in infiltration during the second year and the development of rills and gullies resulted in sharply increased sediment and nutrient transport and water quality degradation. No substantial changes in runoff, sediment yield, or water quality were observed in YADD-H1.

In conclusion, riparian vegetation effectively reduced sediment and nutrient export during salvage logging. Among the rehabilitation methods, YADG-H2 yielded the most favorable outcomes by the second year. In contrast, YAYG-H3 produced the least favorable results due to increased erosion and declining infiltration.

Key Words: Forest Fire, Salvage Logging, Post-fire Rehabilitation, Runoff, Soil Erosion



ÖNSÖZ

Orman ekosistemleri, biyolojik çeşitliliği koruma, karbon döngüsünü dengeleme, su kaynaklarını düzenleme ve toprak erozyonunu önleme gibi hayati işlevlere sahip olan karmaşık ve hassas sistemlerdir. Ancak son yıllarda artan sıcaklık, azalan nem oranları ve insan kaynaklı etkiler nedeniyle orman yangınları, bu ekosistemlerin bütünlüğünü tehdit eden başlıca çevresel felaketlerden biri haline gelmiştir. Özellikle Akdeniz ikliminin etkili olduğu bölgelerde sık ve yüksek şiddetli yangınların görülmesi, yangın sonrası arazi kullanımına yönelik kararların ekosistem sağlığı üzerindeki belirleyici rolünü daha da önemli kılmıştır.

Orman yangınlarının ardından uygulanan üretim faaliyetleri (salvage logging), ekonomik değer taşıyan odun materyalinin toplanmasını ve yangın sonrası zararın azaltılmasını hedeflese de bu müdahaleler çoğu zaman toprak bütünlüğü, su kalitesi, erozyon oranları ve biyolojik iyileşme süreçleri üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu nedenle, yangın sonrası yapılan müdahalelerin sadece ekonomik değil, aynı zamanda ekolojik boyutlarıyla da değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, rehabilitasyon yöntemleri, yangınla bozulan ekosistemlerin iyileştirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Türkiye’de yanmış alanlar, tohumlama ve dal serme, sürüm ve fidan dikimi, eğimli arazilerin teraslanarak ağaçlandırılması ve sınırlı sayıda da olsa doğal haline bırakma gibi farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Ancak bu yöntemlerin yüzeysel akış, toprak erozyonu, sediman ve bitki besin taşınımı ve su kalitesi üzerine yapılan bilimsel çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu çalışma, orman yangınlarının ardından uygulanan üretim faaliyetlerinin ve farklı rehabilitasyon yöntemlerinin kısa ve uzun vadeli çevresel etkilerini disiplinler arası bir yaklaşımla ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda Ekim 2022 ile Mart 2025 tarihleri arasında yoğun bir arazi çalışma süreci yürütülmüştür. Araştırma sahalarına 24 adet yağış örnekleyici kap yerleştirilmiştir. Bu sahalara 4 adet akım gözlem istasyonu, 2 adet otomatik meteoroloji istasyonu kurulmuştur. Üç yılda yaklaşık olarak 100’ün üzerinde arazi çalışması gerçekleştirilmiş ve alınan örnekler laboratuvar ortamında analiz edilmiştir. Ortalama her hafta 24 farklı toprak örnekleme noktasında toprak nemi ve toprak sıcaklığı ölçülmüştür. Bu çalışma sonucunda toprak özelliklerine, erozyon miktar ve oranlarına, yüzeysel akış miktarlarına, toprak nemi ve sıcaklığına hem yüzeysel akış hem de sediman içerisinde taşınan bitki besin maddesi miktarlarına ilişkin önemli veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışmada elde edilen bulgular, yangın sonrası sürdürülebilir arazi yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemekte ve hem akademik dünyaya hem de sahada görev yapan uygulayıcılara yönelik kapsamlı bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Bu çalışmanın başarıyla yürütülmesinde, arazinin planlanması ve düzenlenmesi, araştırma sahalarına cihazların kurulması, ulaşım olanaklarının sağlanması ve alınan örneklerin laboratuvar ortamında analiz edilebilmesi aşamalarında birçok kurum, araştırmacı ve akademisyenin değerli katkıları olmuştur.

Öncelikle, bu çalışma TÜBİTAK 1001 programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No:122O979). Araştırma sahalarının silvikültür planlamasına alınması ve düzenlenmesi sürecinde verdikleri destekten dolayı Antalya Orman Bölge Müdürlüğü'ne ve dönemin Bölge Müdürü Sayın Vedat DİKİCİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Arazi çalışmalarında ulaşım ve teknik destek sağlayan, ayrıca laboratuvar olanaklarını sunan Batı Akdeniz Ormancılık Araştırma Enstitüsüne ve Enstitü Müdürü Sayın Neşe CILIZ'a teşekkür ederim.

TÜBİTAK 1001 projesinin yürütücülüğünü üstlenen, aynı zamanda bu çalışmada eş danışmanlık görevini de yürüten ve tüm araştırma sürecinde bilgi ve deneyimiyle yanımda olan Dr. Hüseyin YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik yaşamım boyunca bana yol gösteren ve her zaman desteğini hissettiren danışmanım Prof. Dr. Tuncer DEMİR'e, ayrıca bilgi ve birikimleriyle çalışmama önemli katkılar sağlayan Prof. Dr. Tolga GÖRÜM'e gönülden teşekkür ederim. Tez İzleme Komitesi'nde yer alan ve çalışmama değerli katkılarda bulunan Prof. Dr. Hasan ÖZDEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Çağlar ÇAKIR'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Arazi çalışmaları ve laboratuvar analizleri sırasında verdikleri teknik destek için Çevre Mühendisi Ahmet BORAN'a, kimya teknikerleri Ömer Han KARAYANIK ve Melike GİRGİN'e teşekkür ederim. Arazi çalışmaları sırasında başta ulaşım ve cihaz kurulumu konusunda yardımlarını esirgemeyen Yaşar USLU, Tekin CİLASIN ve Abdullah AKSOY'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her daim hissettiren babam İsmail ÇAKMAK, annem Hatice ÇAKMAK, abilerim Ali ÇAKMAK ve Doç. Dr. Soner ÇAKMAK'a sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreçte bana her koşulda destek olan, yoğun arazi ve laboratuvar çalışmalarım nedeniyle yeterince vakit ayıramadığım sevgili eşim Sabire ÇAKMAK'a en derin şükranlarımı sunarım.

Seçkin ÇAKMAK

Antalya, 2025

GİRİŞ

Dünya genelinde özellikle Avrupa, Amerika, Avustralya ve Akdeniz Havzası'nda orman yangınlarından etkilenen alanların oldukça geniş olduğu bilinmektedir (Blake vd., 2009). Nitekim her yıl dünya genelinde yaklaşık 4 milyon hektar ormanlık alan yangınlardan etkilenmekte olup, bunun yaklaşık 500 bin hektarı yalnızca Akdeniz Havzası'nda gerçekleşmektedir (Doğan, 2009). Akdeniz Havzası'nda orman yangınlarının bu denli sık görülmesinin başlıca nedenleri arasında, bölgenin yarı kurak iklim özellikleri (yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem, kurutucu rüzgârlar) ve dal, ibre, kozalak ve yoğun orman altı örtüsü gibi yangın esnasında kolaylıkla tutuşabilen bitki örtüsü (özellikle *Pinus brutia* Ten.) yer almaktadır (Outeiro vd., 2008; Alcañiz vd., 2016). Türkiye'de kızılçam ormanları yaklaşık 5,2 milyon hektarlık bir alan kaplamakta olup, bu tür başta Ege ve Akdeniz bölgeleri olmak üzere, Akdeniz ikliminin hâkim olduğu alanlarda yayılış göstermektedir (OGM, 2021). Akdeniz Bölgesi ve dolayısıyla kızılçam ormanları hem Türkiye'de hem de benzer iklim kuşaklarında yer alan diğer ülkelerde, orman yangınlarının en yoğun şekilde görüldüğü alanlar arasında yer almaktadır. Bazı araştırmacılar, kızılçam ormanlarında yangının doğal döngünün bir parçası olduğunu ve bu türün yangına uyum sağlayan özellikler taşıdığını belirtmektedir (Boydak, 2004; Eron, 1987; Tavşanoğlu ve Gürkan, 2009; Türkmen ve Düzenli, 2011). Ancak Türkiye'de çıkan yangınların büyük bir kısmı insan kaynaklı olup, bunlar çoğunlukla kasıtlı ya da bilinçsiz insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır (OGM, 2021). Orman Genel Müdürlüğü verilerine göre, yalnızca 2016-2021 yılları arasında Türkiye'de 13.592 adet orman yangını meydana gelmiş; bu yangınlarda toplam 198.599 hektar ormanlık alan zarar görmüştür. Bu alanın 139.503 hektarı, yalnızca 2021 yılı içerisinde yanan alanlara karşılık gelmektedir (OGM, 2021). 2021 yılında yanan alanların bölgesel dağılımına bakıldığında, toplam yanan alanın 103.458 hektarlık kısmı Antalya ve Muğla Orman Bölge Müdürlükleri sınırları içerisinde, daha çok kızılçam ekosistemlerinde meydana geldiği görülmektedir (OGM, 2021).

İklim değişikliğinin etkisiyle sıcaklıkların artması ve kuraklık olaylarının sıklaşması, bu bölgelerdeki orman yangınlarının sayısında ve şiddetinde gelecek yıllarda önemli artışlara neden olacağı yönünde bilimsel öngörülerle desteklenmektedir (Türkeş vd., 2000; Lindner vd., 2010). Özellikle Akdeniz Havzası'nda yangın dinamikleri üzerine yapılan projeksiyonlar, sıcaklık artışlarının ve kurak periyotların uzamasının, mevcut yangın önleme stratejelerini yetersiz hale getirebileceğini göstermektedir (Turco vd., 2017). Bu bağlamda, yalnızca yangınları önlemeye yönelik değil, aynı zamanda yangının doğal kaynaklar üzerindeki etkilerin belirlenmesi ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik uygulamaların geliştirilmesi de büyük önem

taşımaktadır (Wittenberg vd., 2020; De Girolamo vd., 2022). Orman yangınları, yalnızca yanan alanlardaki can ve mal kaybına ya da bitki örtüsü (USDA Forest Service, 2000; Kavgacı ve Tavşanoğlu, 2010), toprak (Şengönül, 1984; Neyişçi, 1989; Tavşanoğlu ve Gürkan, 2010; Yıldız vd., 2010) ve fauna toplulukları üzerindeki doğrudan etkilerle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda ekosistem düzeyinde hidrolojik, biyolojik ve kimyasal süreçleri de önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Yangınlar, toprağın fiziksel yapısında bozulmaya, erozyonun artmasına, besin maddelerinin kaybına ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olarak, toprak verimliliğinde ve ekosistem işlevlerinde ciddi kayıplar yaratmaktadır (Zema, 2021; Wagenbrenner vd., 2021; Smith vd., 2011). Yapılan birçok çalışma, orman yangınlarının akarsu sistemlerinin fiziksel ve kimyasal su kalitesini bozduğunu (Dahm vd., 2015; Dunham vd., 2007; Rust vd., 2018), hem yüzey hem de yer altı sularında kalıcı etkiler oluşturduğunu (Bladon vd., 2014; Robinne vd., 2018) ve bölgedeki ekosistem yapılarını dönüştürebildiğini göstermektedir (Rust vd., 2019a; 2019b). Özellikle şiddetli yangınlarda bitki örtüsünün tamamen tahrip olması sonucunda, açıkta kalan toprak yüzeyi kısa süreli sağanak yağışlara karşı savunmasız hale gelmekte ve yüzeysel akış yoluyla erozyon hızla artmaktadır. Ayrıca yangın sonrası topraklarda oluşan su itici (hidrofobik) özellikleri ile birlikte yanmış vejetasyonun oluşturduğu kül tabakası, toprağın üst katmanlarındaki (özellikle 0–5 cm) gözenekleri tıkayarak infiltrasyon ve hidrolik iletkenliği azaltmakta, bu da yüzeysel akış miktarını belirgin şekilde artırmaktadır (DeBano, 1981; 2000). Yangın geçirmiş yamaçlardan yüzeysel akışa karışan kül ve sedimanlarla birlikte, organik madde (OM), organik karbon (OC), toplam azot (TN) (Earl ve Blinn, 2003; Lane vd., 2008; Rhoades vd., 2011), ayrıca kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), potasyum (K) ve sodyum (Na) gibi önemli değişebilir katyonlar (Chanasyk vd., 2003) ve bazı kirleticiler yer altı ve yüzey sularına taşınmaktadır (Reiman ve Clayton, 1997; Bowman ve Boggs, 2006). Bu süreçler sonucunda, yangın sonrası gerçekleşen kısa süreli ve şiddetli yağışlar, suya karışan süspanse sediman, bitki besin maddeleri ve kirletici yükünü artırmakta; bu da akarsu ve kaynak sularında bulanıklık, çözünmüş madde ve besin elementleri gibi parametrelerde ani artışlara neden olmaktadır (Burke vd., 2013; Coombs ve Melack, 2013; Mast ve Clow, 2008). Böylece hem yüzeysel akış suları hem de yer altı suları, su kalite standartlarında belirtilen eşik değerlerin üzerine çıkabilmektedir (YSKY, 2021). Tüm bu etkiler, yangın sonrası orman ekosistemlerinde yalnızca biyotik bileşenleri değil, aynı zamanda hidrolojik işleyişi de bozan karmaşık süreçleri tetiklemektedir. Bu nedenle, yangın sonrası toprak ve su kaynaklarının korunmasına yönelik rehabilitasyon uygulamalarının, özellikle erozyon riski yüksek alanlarda bilimsel temellere dayalı olarak planlanması büyük önem taşımaktadır (Vieira vd., 2014). Orman ekosistemlerinin sürdürülebilirliği için gerekli olan işlevlerin devamı, büyük ölçüde bu temel doğal kaynakların

korunmasına bağlıdır (Weil ve Brady, 2017). Bu bağlamda, orman yangınları sonrasında toprak ve su kaynaklarının korunması, yangına duyarlı ekosistemlerin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir (Girona-Garcia vd., 2021).

Son yıllarda giderek artan orman yangınlarının, ülkelerin ekonomik, sosyal ve çevresel süreçleri üzerindeki olumsuz etkileri; yerel, bölgesel ve küresel ölçekte ciddi endişelere yol açmaktadır (Bowman vd., 2017; Schoennagel vd., 2017; Stevens-Rumann vd., 2018). Özellikle önemli bir gelir kaynağı olan çam ormanlarında, yangın sonrası kereste üretiminden kaynaklanan ekonomik kayıpların azaltılması, alanın yeniden ağaçlandırılmasının kolaylaştırılması ve zararlı böcek istilalarının önlenmesi gibi gerekçelerle üretim faaliyetleri (salvage logging) yaygın biçimde uygulanmaktadır. Aynı zamanda bu faaliyetlerin, yangınla birlikte oluşan yakıt birikimini azaltarak, gelecekte meydana gelebilecek yangınların şiddetini ve riskini düşürmeye yönelik önleyici bir işlevi olduğu da öne sürülmektedir (Shakesby vd., 1996; Keyser vd., 2009). ABD, Portekiz, İspanya, İtalya ve Fransa gibi ülkelerde olduğu gibi, Türkiye’de de orman yangınlarının ardından yanan ağaçların kesilmesi, işlenmesi ve taşınmasını içeren üretim faaliyetleri rutin olarak yürütülmektedir. Ancak bu faaliyetlerin orman ekosistemleri üzerindeki etkileri, özellikle orta ve yüksek şiddetteki yangınlardan sonra uygulandığında, bilimsel çalışmalarda tartışmalı bir konu olmaya devam etmektedir (Beschta vd., 2004; Wagenbrenner vd., 2015; Leverkus vd., 2018). Bazı araştırmalar, yanmış ağaçların ormandan çıkarılması sırasında toprak yüzeyinin yeterince bozulması durumunda, yangınla birlikte oluşan suyun toprak içerisine sızmasını engelleyen geçirimsiz bir tabakanın (hidrofobik katman) kırılarak suyun toprağa sızmasının kolaylaşabileceğini ve bu nedenle üretim faaliyetlerinin hidrolojik süreçler açısından faydalı etkiler doğurabileceğini belirtmiştir (Poff, 1989; McIver ve Starr, 2001). Ayrıca, bu faaliyetlerin orman ürünleri ekonomisine katkı sağladığı ve bazı durumlarda yangın sonrası toprak koşullarının iyileşmesine yardımcı olabileceği de rapor edilmiştir (Lindenmayer ve Noss, 2006; Lindenmayer vd., 2012). Bununla birlikte, farklı iklim ve topografik koşullarda yapılan çok sayıda araştırma, yangın sonrası gerçekleştirilen üretim faaliyetlerinin sediman taşınımı üzerindeki etkilerinin düşük olabileceğini ya da yer yer erozyonu azaltabileceğini ileri sürmektedir (Spanos vd., 2005; Malvar vd., 2017; James ve Krumland, 2018; Lucas-Borja vd., 2019; Fernandez vd., 2021). Bu bulgulara rağmen, özellikle ağır iş makinelerinin kullanıldığı, orman yollarının açıldığı ve kesilen ağaçların sürütülerek taşındığı uygulamalarda, toprak bozulması, yüzeysel erozyon ve sediman veriminde artış sıklıkla gözlenmektedir (Fernandez ve Vega, 2016b; Prats vd., 2019; Robichaud vd., 2021; Wittenberg vd., 2020). Çok sayıda çalışma, üretim faaliyetlerinin toprak üzerinde fiziksel baskı oluşturarak toprak sıkışmasına, bunun sonucunda ise hacim ağırlığında

artış, infiltrasyon hızında ve hidrolik iletkenlikte azalma, ayrıca toprak agregat stabilitesinde bozulma gibi olumsuz etkiler yarattığını bildirmiştir (García-Orenes vd., 2017; Malvar vd., 2017; Pereira vd., 2018; Nazari vd., 2021). Özellikle eğimi yüksek arazilerde, kesilen ağaçların makineyle veya elle taşındığı durumlarda, yoğun kullanım sonucu oluşan sıkıştırılmış yollar, toprak gözenekliliğinin azalmasına ve dolayısıyla sızma oranının düşmesine, yüzey akış ve erozyonun artmasına neden olmaktadır (Wagenbrenner vd., 2016). Ayrıca, bazı çalışmalar bu faaliyetlerin yangın sonrası doğal gençleşme süreçlerini ve fidan gelişimini olumsuz etkileyebileceğini, bitki örtüsünün toparlanmasını geciktirdiğini ortaya koymuştur (Leverkus vd., 2014; Morgan vd., 2015; Knapp ve Ritchie, 2016).

Genel olarak, üretim faaliyetlerinin (salvage logging) bitki örtüsünün yeniden büyümesi ve yenilenmesi, toprak sıkışması, sızma kapasitesi, toprağın kimyasal ve mikrobiyal özellikleri ile erozyon süreçleri üzerindeki etkilerine ilişkin olarak farklı iklim bölgelerinde çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Ancak bu çalışmaların sonuçları, çoğu zaman birbirleriyle çelişmekte veya tutarsızlık göstermektedir (Ginzburg ve Steinberger, 2012; García-Carmona vd., 2020; Lucas-Borja vd., 2020). Özellikle bu faaliyetler, havza yamaçlarında veya orman yolları ile akarsular arasında koruyucu amaçla oluşturulabilecek vejetasyon (riperyan) tampon zonları tesis edilmeden uygulandığında, toprak ve besin maddesi kayıplarını artırarak daha zararlı etkiler doğurabilmektedir (Lowrance vd., 1984; Mayer vd., 2007). Diğer taraftan, yangınla zarar görmüş alanların rehabilitasyonu hem gelecekteki yangın risklerinin ve zararlı organizma istilalarının azaltılması hem de odun üretimine dayalı ekonomik gerekçelerle üretim faaliyetlerini birçok ülkede zorunlu hale getirmektedir (Shakesby vd., 1996; Sessions vd., 2004; Santolamazza-Carbone vd., 2011). Türkiye’de ise, bu gerekçelere ek olarak, Orman Kanunu gereği yangınla tahrip olmuş orman alanlarının, üretim faaliyetlerinin ardından hızlıca ağaçlandırılması zorunlu kılınmaktadır (OGM, 2021). Bu Orman Kanunu gereği, yanmış alanların rehabilite edilmesi için yapılan üretim faaliyetlerinin toprak özellikleri, sediman taşınım süreçleri ve su kaynakları üzerindeki olumsuz etkilerinin nasıl azaltılabileceği sorusu öne çıkmakta ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik yapılacak olan bilimsel çalışmalara duyulan ihtiyaç artmaktadır.

Yangın sonrası üretim faaliyetlerinin yürütülebilmesi amacıyla yaygın olarak yeni orman yolları inşa edilmektedir. Ancak yapılan bu orman yollarının havzadaki akarsulara göre konumları sediman taşınımı ve su kalitesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle akarsulara yakın konumlandırılan yollar, birer sediman ve besin maddesi kaynağı haline gelerek yangın sonrası artan erozyonla birlikte toprak ve besin kayıplarını daha da şiddetlendirebilmektedir (Zhao vd., 2022; Yu vd., 2024). Bu nedenle, orman yolları ile

akarsular arasında vejetasyonla kaplı tampon bölgeler bırakılması hem yamaçlardan hem de yeni açılan orman yollarından akarsuya dahil olan sedimanı önemli oranda engelleyebilmektedir. Ancak, vejetasyonla kaplı riperyan bölgelerin ideal genişliği konusunda literatürde hâlâ tam olarak görüş birliği bulunmamaktadır. Örneğin, Sweeney ve Newbold (2014), ormanlık havzalardaki akarsuların fiziksel, kimyasal ve biyolojik bütünlüğünü koruyabilmek için en az 30 metre veya daha geniş vejetatif tampon zonları önerirken; Sirabahenda vd., (2020), akarsu kenarlarında 15 metreden 100 metreye kadar artan tampon zon genişliğinin taşınan sediman miktarını anlamlı düzeyde azalttığını bildirmiştir. Benzer şekilde, Oldén vd. (2019), tampon bölgelerin 30 metreden daha geniş olması gerektiğini ve bu genişliğin üretim faaliyetlerinin yoğunluğuna göre artırılması gerektiğini önermiştir. Zhao vd. (2022) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, optimum tampon zon genişliği 64 metre olarak tavsiye edilmiştir. Sediman taşınımı üzerindeki etkilerinin yanı sıra, bu tampon bölgelerin yüzeysel akışla taşınan bitki besin maddeleri üzerindeki etkileri de çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Ancak, tampon bölgelerin özellikle sediman içinde taşınan besin maddeleri üzerindeki etkileri henüz yeterince araştırılmamış ve literatürde bu konuya ilişkin sınırlı bilgi bulunmaktadır. Bu durum, orman yangınları sonrası üretim faaliyetlerinin su kalitesi üzerindeki etkilerinin daha bütüncül bir şekilde değerlendirilebilmesi için riperyan tampon bölgelerin hem fiziksel hem de kimyasal su kalitesi bileşenleri üzerindeki etkilerinin birlikte ele alındığı çok parametrelili saha çalışmalarına ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Birçok ülkede, yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri (salvage logging) uygulanmış orman alanlarının, kısa sürede yangın öncesi ekolojik koşullara döndürülmesi amacıyla çeşitli rehabilitasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Bu kapsamda; yeni bitki türlerinin dikilmesi, yamaçların eş yükselti eğrilerine paralel şekilde sürülmesi, doğal veya yapay yollarla ağaçlandırma, yamaçların teraslandırılarak ağaçlandırılması, erozyon önleyici çitlerin kurulması, yanmış ağaçların erozyon bariyerlerine dönüştürülmesi ve yamaç yüzeyinin saman, gübre veya dal örtüsüyle kaplanması (malçlama) gibi pek çok farklı yöntem kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin, erozyon ve yüzeysel akış süreçleri başta olmak üzere hidrolojik döngünün çeşitli bileşenlerini olumlu ya da olumsuz yönde etkilediği konusunda saha çalışmalarına dayalı sistematik (analitik) araştırmalar oldukça sınırlıdır (Shakesby vd., 1993; Shakesby vd., 2002; Fernández vd., 2004; 2007; Martins vd., 2013). Örneğin, Vieira vd., (2016), sürülerek rehabilite edilen bir yanmış alanda, sürülmemiş alana kıyasla daha fazla yüzeysel akış (865 mm) ve sediman (%14) taşınımı ölçmüştür. Benzer şekilde, Kore'nin doğu kıyısında yapılan bir başka çalışmada, orman yangınından üç yıl sonra uygulanan farklı rehabilitasyon yöntemleri arasında yalnızca doğal malzeme ile yapılan malçlama

uygulamasının yüzeysel akış ve sediman taşınımını anlamlı şekilde azalttığı; yerli bitki türleriyle tohumlama ve ağaç devirerek erozyon bariyeri oluşturma gibi yöntemlerin ise etkisiz kaldığı belirlenmiştir (Kim vd., 2008). Wittenberg vd., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada ise, yangın sonrası uygulanan üretim faaliyetlerinin erozyon süreçlerini hızlandırdığı; buna karşılık ağaç devirme yoluyla oluşturulan erozyon bariyerlerinin yüzeysel akış ve sediman taşınımını azalttığı gösterilmiştir. Aynı çalışmada, yamaçların sürülerek fidan dikilmesi (yapay gençleştirme) uygulamasının toprağın homojenliğini artırarak fiziksel stabilite sağladığı da ifade edilmiştir. Öte yandan, bazı araştırmalar yapay gençleştirme, eş yükselti eğrilerine yanmış ağaçların devrilmesi gibi rehabilitasyon yöntemlerinin bitki örtüsünün doğal yenilenme süresini uzattığını, aynı zamanda zamanla yüzeysel akış ve sediman taşınımını artırdığını bildirmektedir (Zituni vd., 2019). Buna karşılık, toprak yüzeyinin doğal veya yapay malzemelerle kaplanması, yanmış dal örtüsü kullanımı ve doğal gençleştirme gibi uygulamaların gerekliliği ve etkinliği çeşitli çalışmalarla vurgulanmıştır (Wagenbrenner vd., 2015; Fernández ve Vega, 2016; García-Orenes vd., 2017; Keesstra vd., 2017).

Türkiye'de ise Orman Genel Müdürlüğü, Anayasa'nın 169. maddesi gereğince, yanan orman alanlarında tarım ve hayvancılık yapılmasına izin verilmemekte ve bu alanların tekrar ormanlaştırılması zorunlu tutulmaktadır. Bu doğrultuda, yangın sonrası alanlarda üretim faaliyetlerini (salvage logging) takiben, genellikle üç temel rehabilitasyon yöntemi tercih edilmektedir: (1) Doğal gençleştirme (tohumlama + dal serme), (2) Yapay gençleştirme (eş yükselti eğrilerine paralel sürüm + fidan dikimi), (3) Alanda hiçbir işlem yapılmadan doğal haline bırakma. Ancak yangın sonrası hangi uygulamanın tercih edilmesi gerektiği konusunda hem uygulayıcılar hem de araştırmacılar arasında çeşitli görüş ayrılıkları bulunmaktadır. Bunların temelinde, Türkiye'de yangın sonrası yapılan rehabilitasyon uygulamalarının etkilerine yönelik arazi çalışmalarının yetersizliği yatmaktadır. Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı ya parsel ölçeğinde yapılmış (Parlak, 2015) ya da sınırlı sayıda örnekle bitki örtüsü gelişimi odaklı olarak yürütülmüştür (Ürker vd., 2018; Tavşanoğlu ve Pausas, 2022). Örneğin Parlak (2015), 0.0625 m²'lik parsellerde yağış simülatörü kullanarak yüzeysel akış ve sediman verimini ölçmüş; ancak bu tür mikro ölçekte yapılan çalışmaların yangın sonrası hidrolojik süreçleri tam olarak yansıtamayacağını ve havza ölçeğinde izleme çalışmaları yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu bağlamda, rehabilitasyon yöntemlerinden hangisinin hidrolojik iyileşmeyi en kısa sürede sağlayabileceği sorusu da güncel olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Türkiye'de bu konu üzerine yapılan birçok çalışma, yangın sonrası uygulamaların bitki örtüsünün gelişimi üzerindeki etkilerine odaklanmıştır (Kavgacı ve Tavşanoğlu, 2010; Kavgacı vd., 2017). Oysa bir alanın gerçek anlamda rehabilite edilebilmesi için sadece dikilen fidanların

tutması yeterli değildir; bunun yanında toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, erozyon süreçleri ve hidrolojik dinamikler gibi faktörlerin de birlikte değerlendirilmesi gereklidir. Bu nedenle, yangın sonrası yapılan uygulamaların etkinliğinin değerlendirilebilmesi için, rehabilitasyon çalışmaları mutlaka havza ölçeğinde, farklı disiplinleri kapsayacak şekilde ve yersel ölçümlere dayalı verilerle yürütülmelidir (Wagenbrenner vd., 2021).

Birçok ülkede yangınla tahrip olmuş alanlarda, çoğu zaman üretim faaliyetleri (salvage logging) uygulanmakta, ardından bu sahaların iyileştirilmesine yönelik çeşitli rehabilitasyon yöntemleri devreye sokulmaktadır. Benzer süreçler, Türkiye'de de Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından yürütülmektedir.

Bu konuda yapılan çalışmalardan anlaşılabileceği üzere yangın sonrası yapılan üretim faaliyetlerinin ve ardından uygulanan rehabilitasyon yöntemlerinin havza ölçeğinde toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, sediman taşınım süreçleri ve su kalitesi parametreleri üzerine olan etkilerine yönelik hala bir belirsizlik vardır. Bu belirsizliğin giderilmesi hususunda bu çalışmada orman yangını sonrasında gerçekleştirilen üretim faaliyetleri ve farklı rehabilitasyon uygulamalarının, havza ölçeğinde toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzeysel akış ve sediman taşınım süreçleri, taşınan bitki besin maddeleri ile yüzey sularının su kalitesi parametreleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Türkiye'de yaygın olarak uygulanan ancak etkileri yeterince araştırılmamış olan rehabilitasyon yöntemlerinden hangilerinin, yangın sonrası bozulan toprak özelliklerinin, erozyon süreçlerinin ve hidrolojik dinamiklerin daha hızlı toparlanmasına katkı sağladığı belirlenmeye çalışılacaktır. Araştırma kapsamında elde edilen bulgular, yanmış alanların eski ekolojik koşullarına dönüp dönmediğinin anlaşılmasında temel bir gösterge olan hidrolojik iyileşme (hydrologic recovery) süreçlerinin belirlenmesine olanak tanıyacaktır. Böylece hem üretim faaliyetlerinin hem de rehabilitasyon uygulamalarının erozyon süreçleri, hidrolojik yanıtlar, su kalitesi ve besin maddesi taşınımı üzerindeki etkileri bilimsel olarak ortaya konulacaktır.

Çalışmanın Amaçları ve Hipotezleri

2021 yılı Temmuz ayında Antalya'nın Manavgat ilçesinde başlayan ve hemen sonrasında Akseki'de çıkan ve şiddetlenen poyraz rüzgarlarının etkisiyle Gündoğmuş, İbradı ve Alanya ilçelerine yayılan büyük bir orman yangını meydana gelmiştir. Cumhuriyet tarihinin en büyük yangını olarak ifade edilen bu felakette, 7 kişi hayatını kaybetmiş ve özellikle kızılçam ormanlarının hâkim olduğu yaklaşık 76.660 hektarlık alan zarar görmüştür. Yangının ardından, yanan alanların rehabilitasyon sürecine hazırlanması amacıyla ağır iş makineleriyle yapılan üretim faaliyetleri sırasında çok sayıda orman yolu ve sürütme yolu açılmıştır. 8 aylık süre

boyunca (Ekim 2022- Mayıs 2023) yanmış ağaçların kesilmesi ve tomrukların çıkarılmasının ardından araziler rehabilitasyona hazır hale getirilmiştir. Antalya Orman Bölge Müdürlüğü tarafından, bu sahalarda üç farklı rehabilitasyon yöntemi uygulanmıştır: doğal gençleştirme ve malçlama (tohumlama ve dal serme), yapay gençleştirme (sürüm ve kızılçam fidan dikimi) ve arazinin doğal haline bırakılması. Bu uygulamalar, sadece 2021 Manavgat Orman yangınına özgü olmayıp, daha önceki yangınlarda da benzer şekilde uygulanmıştır.

Bu çalışma, orman yangınının ve sonrasındaki üretim faaliyetlerinin (salvage logging) ve rehabilitasyon yöntemlerinin, toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzeysel akış, sediman taşınım süreçleri, taşınan bitki besin maddeleri ve yüzey suyu kalitesi üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, yangın, üretim faaliyetleri ve rehabilitasyon olmak üzere üç döneme ayrılmıştır. Bu bağlamda, 2021 Temmuz ayı orman yangını dönemi, 01.10.2022- 25.05.2023 arasındaki üretim faaliyetleri (salvage logging) dönemi ve 25.05.2023- 29.03.2025 arasındaki rehabilitasyon dönemi incelenmiştir.

Çalışmanın hipotezleri şu şekilde belirlenmiştir:

Orman yangını dönemi (2021 yılının Temmuz ayı)

- Orman yangınları, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde önemli değişikliklere yol açar.

Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

- Üretim faaliyetleri (salvage logging), toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkiler.
- Üretim faaliyetleri, erozyon miktarını ve oranlarını, taşınan sedimanın tane boyutunu ve içinde taşınan besin maddelerinin miktarını ve konsantrasyonunu değiştirir.
- Üretim faaliyetleri, yüzeysel akışa geçen suyun su kalitesi parametrelerini etkiler.

Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

- Üç farklı rehabilitasyon yöntemi (doğal gençleştirme, yapay gençleştirme ve arazinin doğal haline bırakılması), toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından farklar gösterir.
- Üç farklı rehabilitasyon yöntemi arasında erozyon miktarı ve oranları, taşınan sedimanın tane boyutu ve içindeki besin maddelerinin miktarı ve konsantrasyonu açısından farklar bulunur.
- Üç rehabilitasyon yöntemi arasında yüzeysel akış miktarı ve yüzeysel akışa geçen suyun su kalitesi parametrelerinde farklılıklar gözlemlenir.

Literatür Taraması

Orman yangını, ülkemizde doğal süreçler veya insan etkisiyle meydana gelen ve bitki örtüsünün yanmasını ifade eden bir terimdir. Uluslararası literatürde farklı kıtalarda ve ülkelerde farklı isim ve anlamlarla kullanılmaktadır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde "wildfire", yerleşim olmayan ormanlık alanlarda çıkan yangınları tanımlar (Ulusal Orman Yangını Koordinasyon Grubu, 2011). Avustralya'da "bush fire" terimi, herhangi bir bitki örtüsü yangını için kullanılır (AFAC, 2010). Avrupa'da ise "forest fire" terimi, genel olarak orman yangınlarını ifade eder (Avrupa Komisyonu, 2010).

Orman yangınlarının tarihsel gelişimi oldukça eskiye dayanır. Akdeniz çevresi ve Atlas Okyanusu kıyılarında Geç Kuvaterner dönemine ait orman yangınlarına dair kanıtlar bulunmuş ve birçok endemik bitki türünün yangına karşı geliştirdiği adaptasyonlar, bu alandaki yangın geçmişinin uzunluğunu gösterir (Carrión vd., 2003; Pausas, 2004; Pausas ve Verdú, 2005; Pausas vd., 2008). Günümüzde orman yangınları yalnızca yerel bir sorun olmaktan çıkmış ve küresel bir tehdit halini almıştır. Küresel ölçekte orman yangınlarının etkilediği alanlar ve yangın sayıları her geçen yıl artmaktadır (yaklaşık 300-450 milyon hektar) (Bandon, 2014). 1960-2013 yılları arasında ABD'de ortalama yıllık 1,8 milyon hektar, Kanada ve Avustralya'da ise sırasıyla 2,1 milyon ve 0,8 milyon hektar alan orman yangınlarından etkilenmiştir (Bandon, 2014). 1975-2014 yılları arasında Portekiz, 4,5 milyon hektarlık alan ile orman yangınlarından en çok etkilenen Avrupa ülkesi olmuştur (Rego vd., 2013). 2017'de, Haziran ve Ekim ayında iki büyük yangın, yaklaşık 4400 km²'lik bir alanı etkileyerek Portekiz'deki toplam yangın alanının %51'ini oluşturmuş, bu yangınlar 115 kişinin ölümüne yol açmıştır (Viegas vd., 2019).

Akdeniz'in Avrupa kesiminde, son 20 yılda 10,6 milyon hektar orman yangınlarından etkilenmiş ve bunların %40'ı (4,2 milyon hektar) İspanya'da gerçekleşmiştir (Benito vd., 1991). Ayrıca, Kaliforniya, Şili, Güney Afrika, Avustralya gibi Akdeniz iklimine sahip bölgelerde ve Kayalık Dağları gibi dağlık alanlarda da yangın sayılarında artış gözlemlenmiştir (Evans vd., 1999; Martin ve Moody, 2001; Scott, 1993). Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), hava sıcaklıklarındaki artışların orman yangını riskini artırmaya devam edeceğini belirtmiştir. Bu, Kanada, Batı ABD, Güney Amerika, Orta Asya, Güney Avrupa, Güney Afrika ve Avustralya'da daha sık ve büyük yangınların çıkacağına dair tahminlerle tutarlıdır (Bandon, 2014).

Son yıllarda küresel iklim değişiklikleri, artan kuraklıklar, ormanlardaki yüksek yakıt yükü birikimi ve insan kaynaklı sebepler, orman yangınlarının başlıca nedenleri arasında yer almaktadır (Bowman vd., 2017; Jolly vd., 2015). Bu faktörlerin birleşimi, "mega orman yangınları" (mega-fires) olarak adlandırılan yeni bir orman yangını sınıfının ortaya çıkmasına

neden olabilmektedir (Stephens vd., 2014). Mega orman yangınları, geniş alanları etkileyen ve genellikle düşük şiddetteki yangınlardan daha az sayıda olmasına rağmen, yangınlardan etkilenen toplam alanın büyük bir kısmını (yaklaşık %90–95) oluşturur (Flannigan vd., 2009; Tedim vd., 2018). Örneğin, Kuzey Amerika ve Avustralya'daki mega yangınlar, toplam yangınların yalnızca çok küçük bir bölümünü (<%1) oluşturmalarına rağmen, bu yangınlar yangınlardan etkilenen alanların büyük bir kısmını kapsamaktadır (Boer vd., 2009). Mega yangınlar; birçok yerleşim yerini, flora ve fauna topluluklarını olumsuz etkileyerek büyük ekonomik ve ekolojik kayıplara yol açmaktadır. 2009 yılında Avustralya'da meydana gelen "Black Saturday" yangını yaklaşık yarım milyon hektarlık bir alanı etkilemiş, 173 kişinin hayatını kaybetmesine ve 5.500'den fazla yapının yıkılmasına neden olmuştur. Benzer şekilde, Kanada'da 2011 yılında çıkan Slave Lake mega yangını yaklaşık 700 milyon dolarlık ekonomik kayba yol açmıştır (Stocks vd., 2013). Yunanistan, Rusya, Güney Afrika, Güneydoğu Asya ve Güney Amerika'daki son mega yangınlar da 30 milyon hektardan fazla ormanlık alanı etkileyerek bu ülkelerdeki en büyük çevresel felaketlerden bazılarını oluşturmuştur (San-Miguel-Ayanz vd., 2013; Bowman vd., 2017).

Akdeniz Havzası Orman Yangınları

Yüksek hava sıcaklıkları, düşük nem koşulları ve şiddetli rüzgarlar gibi doğal faktörler ve insan etkileriyle meydana gelen orman yangınları, Akdeniz ikliminin görüldüğü ve benzer bitki örtüsüne sahip bölgelerin önemli sorunlarından biridir. Kaliforniya kıyıları, Orta Şili, Güney Afrika, Portekiz, İspanya, Fransa ve Güneybatı Avustralya bu sorundan en çok etkilenen yerler arasındadır (Blake vd., 2009). Bu bölgelerde artan ekstrem kuraklık ve azalan yağışlar, orman yangınlarının sıklığını artırmıştır (Lindner vd., 2010). Yangınların hızla yayılmasına neden olan bir diğer faktör ise bitki örtüsüdür. Gençleştirme yapılmamış ve bakımsız ormanlar, yangının hızlıca yayılmasına neden olan kuru dal ve gövde birikimlerine sahiptir. Bu tür alanlarda, en küçük bir kıvılcım bile büyük ve söndürülmesi zor yangınlara yol açabilir (Outeiro vd., 2008; Alcañiz vd., 2016).

Akdeniz Havzası'nda her yıl yaklaşık 50.000 orman yangını meydana gelmekte ve bu yangınlar 600.000 hektar alanı etkilemektedir (Lloret vd., 2009). Bu yangınların yıllık maliyeti yaklaşık 775 milyon Euro'dur (FAO, 2001). Güney Avrupa'da ise ortalama olarak 500.000 hektar orman yangından etkilenirken (San-Miguel-Ayanz vd., 2013), bu yangınların büyük kısmı Portekiz'de (100.000 hektar) meydana gelmiştir (Pereira vd., 2005). Orman yangınları, sadece ekosistemleri değil, aynı zamanda çok sayıda insanın hayatını da kaybetmesine neden

olmaktadır. Portekiz’de 1966 yılından bu yana yaklaşık 79, Katalonya’da ise 1970’ten günümüze kadar 50 kişi orman yangınları nedeniyle hayatını kaybetmiştir (Lloret vd., 2009).

2004–2021 yılları arasında Akdeniz Havzası’nda yer alan Portekiz, İspanya, Fransa, İtalya, Yunanistan ve Türkiye’de meydana gelen orman yangınlarına ilişkin veriler, bölgenin yangına duyarlılığını açık biçimde ortaya koymaktadır (Tablo 1). Bu dönemde toplam 6.420.838 hektarlık alan yanmış ve 797.774 adet yangın kaydedilmiştir. Bu büyüklük, Akdeniz ikliminin karakteristik özellikleri olan sıcak ve kurak yaz dönemleriyle birlikte, antropojenik etkiler ve arazi kullanım baskılarının yangın rejimini önemli ölçüde şekillendirdiğini göstermektedir (San-Miguel-Ayanz vd., 2022).

Verilere göre, Portekiz, yanmış alanların %32,9’unu ve toplam yangın sayısının %40,3’ünü oluşturarak hem yangın sıklığı hem de etkilenen alan bakımından ilk sırada yer almaktadır (Tablo 1). Portekiz’i alan bakımından %27,4 ile İspanya, %20,9 ile İtalya izlemektedir. Türkiye ise yangınların %4,6’sı ve yangın sayısının %5,4’ü ile alt sıralarda görünmekle birlikte, 2021 yılında yaşanan büyük yangın felaketiyle öne çıkmaktadır.

Türkiye, Akdeniz iklimi ve orman yangınlarına yüksek risk taşıyan bir ülke olup, son yıllarda özellikle kurak yaz dönemlerinde, Akdeniz ve Ege kıyıları başta olmak üzere çeşitli bölgelerde çok sayıda yangın meydana gelmektedir. Türkiye’de toplamda 22.933.000 hektar ormanlık alan bulunmaktadır ve bu alanın %32’si geniş yapraklı, %48’i iğne yapraklı ormanlarla kaplıdır. Orman Genel Müdürlüğü verilerine göre son 18 yılda 43.241 orman yangını yaşanmıştır. Özellikle 2017-2021 yılları arasında toplam 189.443 hektar alan yanmış ve 2021 yılı, Türkiye Cumhuriyeti tarihinin en büyük orman yangınları dönemini oluşturmuştur. Bu dönemde, Manavgat ve çevresinde meydana gelen yangınlar, çok sayıda kızılçamdan oluşan ormanları etkileyerek büyük bir felakete yol açmıştır (OGM, 2021). Bu yılda Türkiye’de 139.503 hektar alan yanmış ve bu değer ülkenin 2004–2021 dönemi yıllık ortalamasının yaklaşık dokuz katına ulaşmıştır.

Yıllar itibarıyla değerlendirildiğinde, 2017 yılı, tüm havza için kritik bir eşik noktasıdır. Bu yıl boyunca toplam 932.615 hektar ormanlık alan yanmış ve bu değer tüm dönem içinde en yüksek seviyeyi temsil etmektedir. 2017 yılı, aynı zamanda sıcaklık rekorlarının kırıldığı ve nem seviyelerinin düşerek yangına elverişli koşulların olduğu bir yıl olarak öne çıkmaktadır. Benzer şekilde 2005 yılı, yangın alanı (592.380 ha) ve yangın sayısı (74.855 adet) açısından yüksek değerlere sahiptir.

Tüm dönem boyunca yıllık ortalama olarak 356.713 hektarlık alanın yandığı ve ortalama 44.321 yangının meydana geldiği hesaplanmaktadır. Bu durum, Akdeniz Havzası’nda neredeyse her gün 121 yangının çıktığı ve yaklaşık 977 hektarlık alanın günlük olarak

kaybedildiği anlamına gelmektedir. Bu veriler ışığında, Akdeniz Havzası'nın yangın rejiminin, yalnızca doğal iklimsel döngülerle değil; aynı zamanda kentleşme, tarım alanı genişlemesi, turizm baskısı ve ormancılık politikalarıyla da doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir. Ayrıca, iklim değişikliği etkisiyle yaz mevsiminin uzaması, ekstrem sıcaklık artışları, düşük bağıl nem oranları ve ani rüzgârların daha sık yaşanması, yangın riskini artıran başlıca dinamikler arasında yer almaktadır.

Tablo 1. Akdeniz Havzası Ülkelerindeki Orman Yangını Sayıları ve Yanık Alanlar (2004-2021)

Yıllar	Akdeniz Havzası Ülkeleri													
	Portekiz		İspanya		Fransa		İtalya		Yunanistan		Türkiye		Toplam	
	Alan	Sayı	Alan	Sayı	Alan	Sayı	Alan	Sayı	Alan	Sayı	Alan	Sayı	Alan	Sayı
2004	129652	21891	134171	21394	12500	2028	60176	6428	10267	1748	4876,2	1762	351642,2	55251
2005	338262	35698	179929	26261	17356	1871	47575	7951	6437	1544	2821	1530	592380	74855
2006	75510	19929	148827	16355	7500	4100	39946	5634	12661	1417	7761,6	2227	292205,6	49662
2007	31450	18722	82048	10915	8570	3364	227729	10639	225734	1983	11664,4	2829	587195,4	48452
2008	17244	13832	39895	11612	6001	2781	66329	6486	29152	1481	29749	2135	188370	38327
2009	87416	26119	110783	15391	17000	4800	73355	5422	35342	1063	4679	1793	328575	54588
2010	133090	22026	54770	11475	10300	3900	46537	4884	8967	1052	3317	1861	256981	45198
2011	73813	25221	84490	16028	9630	4500	72004	8181	29144	1613	3612	1954	272693	57497
2012	110231	21176	209855	15902	8600	4105	130814	8252	59924	1559	10454	2450	529878	53444
2013	152756	19291	58985	10626	3608	2223	29076	2936	46676	862	11456	3755	302557	39693
2014	19929	7067	46721	9771	7493	2778	36125	3257	25846	552	3117	2149	139231	25574
2015	64443	15851	103200	11928	11160	4440	41511	5442	7096	510	3219	2150	230629	40321
2016	161522	13261	65817	8817	16093	4285	47926	4793	26540	777	9156	3188	327054	35121
2017	540630	21002	178234	13793	26378	4403	161987	7855	13393	1083	11993	2411	932615	50547
2018	44578	12273	25162	7143	5124	3005	19481	3220	15464	793	5644	2167	115453	28601
2019	42084	10832	83963	10883	23477	5435	36034	4351	9153	657	11332	2688	206043	34846
2020	67170	9619	65923	7745	17077	7372	55656	4865	9300	1060	20971	3399	236097	34060
2021	28360	8186	87880	8780	15114	4739	151964	5989	108418	1250	139503	2793	531239	31737
Ortalama	117674,4	17889	97814	13045	12388	3896	74679	5921	37751	1167	16407	2402	356713,2	44321
Toplam	2118140	321996	1760653	234819	222981	70129	1344225	106585	679514	21004	295325	43241	6420838	797774
Yüzde (%)	32,9	40,3	27,4	29,4	3,4	8,7	20,9	13,3	10,5	2,6	4,6	5,4	-	-

Kaynak: (San-Miguel-Ayanz vd., 2022)

Orman Yangınlarının Doğal Kaynaklar Üzerindeki Etkileri

Orman Yangınlarının Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri Üzerine Etkileri

Orman yangınları, biyoçeşitliliği ve bitki örtüsü dinamiklerini, orman ekosistemlerini, topraktaki karbon depolarını ve besin döngülerini ve atmosferdeki karbon salımı başta olmak üzere hem küresel iklim değişikliğini hem de su kaynaklarının kalitesini olumsuz bir şekilde

etkileyen küresel bir sorundur (Ibanez vd., 2022; Santín ve Doerr, 2016). Özellikle Akdeniz Havzası'nda önemli ekolojik, ekonomik ve sosyal sorunlara neden olan ve orman ekosistemlerini tehdit eden ana faktörler arasındadır (Moya vd., 2021).

Orman yangınları toprağın biyolojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Pereira vd., 2012; Úbeda ve Outeiro, 2009). Bu yangınlar, başta toprağın koruyucu örtüsü olan bitki örtüsünü kısmen veya tamamen ortadan kaldırması sonucunda üst toprağın erozyona uğramasını kolaylaştırır (Sanchez vd., 1994; Shakesby, 2011). Yangının bu etkileri toprak ve bitki örtüsünün türüne, yangının şiddetine, yoğunluğuna ve tekrarına, toprak yüzeyindeki külün türüne, sahanın topografya özelliklerine, yangın sırasında ve sonrasındaki meteorolojik koşullara bağlı olarak değişmektedir (Bodí vd., 2014; Mataix-Solera vd., 2009; Francos vd., 2018a). Yangının toprak özelliklerine olan doğrudan veya dolaylı etkisi büyük ölçüde yangınların şiddetine ve sıklığına bağlıdır (Pellegrini vd. 2018; Pérez-Izquierdo vd., 2021). Yüksek şiddetli orman yangını, üst topraktaki toplam karbon (C), nitrojen (azot) ve kükürt (S) gibi önemli bitki besin maddelerinin buharlaşması yoluyla daha ciddi toprak bozulmasına yol açar (Hebel vd., 2009). Nitekim toplam azot (TN) ve kükürt (S), yüksek sıcaklıklara en duyarlı olan bitki besin maddelerindendir (DeBano, 1990). Fosfor (P) ve potasyum (K) orta derecede (eşik sıcaklık değeri, 774°C) (Raison vd., 1985), kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) ise yüksek sıcaklıklara (eşik sıcaklık değeri sırasıyla 1484°C ve 1107°C) karşı daha fazla dirençlidir (DeBano, 1990). Çok sayıda çalışmada kalsiyum (Ca^{2+}), magnezyum (Mg^{2+}), potasyum (K^{+}) ve sodyum (Na^{+}) başta olmak üzere değişebilir katyonların orman yangınlarından sonra arttığı tespit edilmiştir (Shrestha ve Chen 2010; Elliott vd., 2013; Rahimi vd., 2020). Alcaniz vd., (2016) tarafından İspanya (Girona)'da kontrollü bir yangının ardından kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), potasyum (K) ve fosfor (P) konsantrasyonlarının arttığı tespit edilmiştir. Francos vd., (2019) tarafından İber Yarımadası'nın kuzeydoğusunda çıkan orman yangınından hemen sonra yüzey toprağından (0-5 cm) alınan örneklerde kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) konsantrasyonunun arttığı belirlenmiştir. Yangının ardından değişebilir katyonlardaki bu artışlar, bitki örtüsünün yanması sonucunda toprağı külün dahil olması (Switzer vd., 2012; Lucas-Borja vd., 2021) ve yüksek sıcaklıklara karşı daha fazla dirençli olmasından kaynaklanmaktadır (Zhang ve Biswas, 2017). Yangından sonra üst topraktaki değişebilir katyonlar zamanla azalmaktadır. Topraktaki değişebilir katyonların bu azalışı ise zamanla gelişen bitki örtüsünün değişebilir katyonları bünyesine alması, külün erozyona uğraması ve katyonların yağış ve yüzeysel akışla yıkanmasından kaynaklanabilir (Caon vd., 2014). Bunun dışında yüksek şiddetli orman yangınlarından hemen sonra toprağın organik maddesi (SOM) genel olarak azalırken, düşük şiddetli yangınlar ise tamamen

yanmamış olan bitki örtüsünün toprağa dahil olması nedeniyle toprağın organik maddesini arttırmaktadır (Zhan vd., 2020; Merino vd., 2018). Farklı olarak Francos vd., (2018c) tarafından İber Yarımadası'nın kuzeybatısında yapılan bir çalışmada düşük ve yüksek şiddetli yanmış parsellerin her ikisinde de toprağın organik maddesi (SOM) yangın geçirmemiş parsele oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada, İspanya'da Halep çamı orman ekosisteminde yüksek şiddetli yangından sonra toprağın ilk 1 cm'sinde organik madde (SOM) yaklaşık olarak %27,9 oranında azaldığı belirlenmiştir (Badia vd., 2014). Benzer bir şekilde, İspanya'da Halep çamı ekosisteminde orta ve yüksek şiddetli yangından sonra organik maddenin (%21) azaldığı tespit edilmiştir (Moya vd., 2019).

Topraktaki toplam azot (TN), genellikle düşük şiddetli orman yangınından hemen sonra artarken, yüksek şiddetli orman yangınında sonra ise azalır (Wan vd., 2001). Yangın esnasında 550 °C'den daha yüksek toprak sıcaklıklarında organik karbon (OC) ve toplam azot (TN) tamamen kaybolur (Gray ve Dighton, 2006). Bunun yanında yangından sonra artan erozyon oranları ve üst topraktaki sızma sonucunda da hem organik karbon (OC) hem de toplam azot (TN) değerleri azalabilir (Qiu vd., 2021). Bazı çalışmalar ise orman yangınlarının topraktaki toplam azot (TN) üzerindeki etkilerine ilişkin çelişkili sonuçlar sunmaktadır (Agbeshie vd., 2022). Nitekim Fernandez-Garcia vd., (2019) tarafından İber Yarımadası'nda çam ekosistemlerinde yapılan bir çalışmada yangından üç yıl sonra toprağın organik karbon (OC) ve toplam azot (TN) değerlerinde herhangi bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir. Yine Akburak vd., (2018) tarafından Türkiye'de Belgrad ormanlarında yapılan bir başka çalışmada düşük şiddetli kontrollü orman yangınından sonra organik karbon (OC) ve toplam azot (TN) değerlerinde herhangi bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir.

Bitkilerin gelişimi için gerekli olan bitki besin maddelerinden biri de fosfor (P) konsantrasyonudur. Orman yangınları sırasında, üst toprağın içerisindeki organik maddedeki organik fosfor, bitkiler tarafından kullanılabilmesi için mevcut ortofosfatı (PO_4^{3-}) oluşturmak üzere mineralize olur (Zhang ve Biswas, 2017). Francos vd., (2019) tarafından Kuzeybatı İspanya'da Halep çamı ve Pınal meşesi ekosistemlerinde yapılan bir çalışmada kontrollü bir yangının uzun yıllık toprak özelliklerine olan etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna göre yangının ilk yılındaki bitkiler tarafından kullanılabilir fosfor (P), 13. yılından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde birçok çalışma, toprağın kullanılabilir fosfor (P) konsantrasyonunun yangın şiddetiyle doğru orantılı olarak artabileceğini ortaya koymuştur (Dzwonko vd., 2015; Heydari vd., 2017). Topraktaki kullanılabilir fosfordaki bu artışlar, yangın esnasında ölü örtü, toprak organizmaları ve bitki örtüsünün organik fosforu ortofosfata dönüştürmesine (Knicker, 2007), yangından sonrasında külün üst toprağa dahil olmasına ve çok

daha yüksek sıcaklıklarda buharlaşabileceğine bağlanmıştır (Caon vd., 2014; Alcañiz vd., 2016; Zhang ve Biswas, 2017).

Orman yangınlarının toprağın kimyasal özellikleri üzerine olan etkilerinden birisi üst toprağın reaksiyonu (pH) ve elektriksel iletkenlik değeridir. Bu konuda yapılan bazı çalışmalar, yangından kısa bir süre sonra toprağın reaksiyonunda (pH) ve elektriksel iletkenlik (EC) değerinde açık bir artış olduğunu göstermiştir (Pardini vd., 2004; Knelman vd., 2015; Heydari vd., 2017; Alcaniz vd., 2018; Francos vd., 2019). Özellikle bu çalışmalarda yanma şiddetinin 450 °C'den daha yüksek olduğu topraklarda toprak reaksiyon (pH) değerinin arttığı ifade edilmiştir (Knicker, 2007). Yüksek şiddetli yangınlardan sonra toprak pH'ındaki bu artış, organik maddelerin yanmasından sonra besin açısından zengin külün (baz katyonlar) eklenmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Alcañiz vd., 2018). Toprağın pH değerindeki bu artışlar, toprak içerisindeki bitki besin maddelerini de etkilemektedir. Buna göre toprak pH'ındaki bu artışlar, kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na) ve potasyum (K) gibi bazı katyonların hızlı bir şekilde çözünmesini hızlandırmaktadır (Escudey vd., 2015). Bunun haricinde yangın sonrasında organik iyonların ve küllerin toprak profiline dahil olması nedeniyle üst topraktaki elektrik iletkenlik (EC) de artma eğilimindedir (Certini, 2005). Buna karşılık yapılan bazı çalışmalar ise orman yangını ardından toprak pH'ının ve elektriksel iletkenliğinin (EC) değişmediğini ortaya koymuştur. Nitekim Fernandez-Garcia vd., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, 2012 yılının yazında İber Yarımadası'nda Sahil çamı ekosisteminde çıkan orman yangınından üç yıl sonra toprağın pH, elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinde bir değişim olmadığı belirlenmiştir. Badia vd., (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada, Kuzeydoğu İspanya'da (Ebro Havzası) Halep çamı ekosisteminde çıkan orman yangınından bir hafta ve bir yıl sonra yanmış ve yanmamış saha arasında toprak pH ve elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinde bir fark olmadığı bulunmuştur. Fernandez vd., (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada, Kuzeybatı İspanya'da çıkan orman yangının ardından toprağın pH değerlerinde bir değişim olmadığı ifade edilmiştir. Bunun yanında Fultz vd., (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, ABD'nin Teksas Eyaleti'nde 2012 yılının yaz ayında çıkartılan kontrollü bir yangının ardından toprak pH'ının değişmediği tespit edilmiştir.

Toprak tekstürünü oluşturan kum, kil ve silt boyutundaki malzemeler, yüksek sıcaklıklara karşı daha fazla dirençli olduğu için orman yangınlarından kolayca etkilenmeyebilir (Alcañiz vd. 2016; Badía ve Martí, 2019).). Kil için sıcaklık eşiği (400–800 °C), kum ve silt boyutundan (1414 °C) daha düşük olduğu için tekstür içerisinde kil tanecikleri orman yangınlarından daha fazla etkilendiği (Neary vd., 2005; Granged vd., 2011) ve özellikle 700 ile 900°C sıcaklık aralığında tamamen yok olduğu belirtilmiştir (Jiménez-Pinilla vd.,

2016). Granged vd., (2011) tarafından Güneybatı İspanya'da (Cadiz) kontrollü yangın çıkartılan parsel ölçeğinde yapılan çalışmada, yangından hemen sonra üst topraktaki kum oranı artarken, kil boyutundaki malzemeler azalmış ve üst toprağın tekstürü daha kaba bir hale gelmiştir. Inbar vd., (2014) tarafından yapılan bir başka araştırmada İsrail'de Halep çamı ve kızılçam ekosistemlerinde orman yangını sonrasında yangın geçirmemiş toprağa nazaran yanmış toprakta kum ve kil içeriğinin azaldığı, silt boyutundaki malzemelerin ise arttığı belirlenmiştir. Heydari vd., (2017) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise İran Zagros meşe ormanlarında 2012 yılında çıkan orman yangınlarından bir yıl sonra alınan toprak örneklerinde en yüksek kum boyutundaki malzemelerin yüksek şiddetli yanmış alanlarda arttığı; ancak kil içeriğinin ise düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca toprak tekstürünün düşük şiddette yanmış alanlar ile yanmamış alanlarda benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Buna karşılık yapılan bazı çalışmalarda ise orman yangınlarının toprağın tekstür özelliklerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı sonucuna varılmıştır (Moya vd., 2019).

Orman yangınlarının toprağın fiziksel özelliklerine etkilerinden biri, toprağın hacim ağırlığıdır (HA). Bu konuda yapılan bazı çalışmalarda orman yangını sonrasında üst toprağın hacim ağırlığının arttığını tespit etmiştir (Heydari vd., 2017; Granged vd., 2011; Verma vd., 2019). Yangından sonra toprak kütle yoğunluğundaki artış, toprak agregasyonunun çökmesinin ve organik maddenin yanmasının bir sonucu olduğu ifade edilmiştir (Alcañiz vd., 2018). Buna karşılık bazı çalışmalarda orman yangını sonrasında üst topraktaki hacim ağırlığının azaldığı (Chief vd., 2012; Downing vd., 2017), diğer çalışmalarda ise orman yangınlarının toprağın hacim ağırlığında herhangi bir değişimin olmadığı belirtilmiştir (Goberna vd., 2012; Meira-Castro vd., 2015).

Orman yangınlarının toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerine olan etkileri üzerine yapılan özellikle uluslararası literatürde çok sayıda çalışma vardır. Bu konuya ilişkin yapılan çalışmalar, üretim faaliyetlerine (salvage logging) ve farklı rehabilitasyon uygulamalarına nazaran çok daha fazladır. Yangınların toprağın fiziksel özelliklerine olan etkileri üzerine yapılan birçok araştırma genellikle üst toprağın toprak tekstürü, hacim ağırlığı, agregat stabilitesi, su geçirimsizliği ve gözeneklilik özelliklerine odaklanmıştır. Yangınların toprağın kimyasal özelliklerine olan etkileri üzerine yapılan çalışmalarda ise daha çok üst toprağın toprak reaksiyonu (pH), elektriksel iletkenliği (EC), fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), potasyum (K) ve sodyum (Na) konsantrasyonlarının değişimleri belirlenmiştir (Inbar vd., 2014).

Verma ve Jayakumar (2012) orman yangınlarının toprak üzerindeki fiziksel (renk, doku, pH, yoğunluk, geçirgenlik) ve kimyasal (organik madde, besin elementleri) özellikler

üzerindeki karmaşık etkilerini derleyen bir çalışmada incelemiştir. Şiddetli yangınların toprağın rengini değiştirdiği, pH'ı kül nedeniyle artırdığı ve poroziteyi azaltarak geçirgenliği düşürdüğü belirtilmiştir. Organik madde miktarı yangın şiddetine bağlı olarak artabilir veya azalabilirken, azot gibi bazı besin maddeleri buharlaşma yoluyla kaybolabilir; amonyum gibi bazı formlarda ise artış gözlenebilir. Çalışma, yangınların hem olumlu hem olumsuz etkileri olabileceğini vurgulayarak, bu etkilerin daha iyi anlaşılması için ek araştırmalara ihtiyaç olduğunu belirtmiştir.

Inbar vd., (2014) İsrail'in kuzeyindeki yarı kurak Akdeniz iklimine sahip bir bölgede, doğal orman yangını, yanmamış toprak ve laboratuvar ortamında 300 °C'de ısıtılmış rendzina topraklarının fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özelliklerini karşılaştırmıştır. Bulgulara göre, ısıtılmış toprakta organik madde, kil ve katyon değişim kapasitesi (CEC) önemli ölçüde azalırken; doğal yangına maruz kalan toprakta, kısmen yanmış bitki kalıntıları nedeniyle organik madde içeriği ve CEC değerleri daha yüksektir. Isıtma işlemi, kil minerallerinin yapısını bozarak daha fazla silt oluşumuna neden olmuş ve elektriksel iletkenlik (EC) ile kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeriğini artırmıştır. Sonuç olarak, yangın türüne bağlı olarak toprak özelliklerinde farklı yönlerde değişiklikler meydana gelmiş; laboratuvar ortamında yakılan toprakta fiziksel yapı bozulurken, doğal yangın sonrası bazı toprak özelliklerinde kısmi iyileşmeler gözlenmiştir. Ancak bu değişikliklerin uzun vadede ekosistem sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği vurgulanmıştır.

Memoli vd., (2022) tarafından yapılan bir başka çalışmada Akdeniz havzasında ağaç ve çalı formasyonunda meydana gelen orman yangınların toprak özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Vezüv Milli Parkı'nda, üç yıl önce yangın geçirmiş ve yangın geçirmemiş alanlardan yüzey toprak örnekleri alınmıştır. Toprak örneklerinde, pH, su içeriği, karbon, azot, fosfor değerleri analiz edilmiştir. Buna göre yangın sonrası ağaç formasyonlarında (yangından önce 7,43, yangından sonra 7,07) pH değerinin azaldığı, çalı formasyonlarında ise pH değerinin (yangından önce 6,90, yangından sonra 6,91) önemli bir değişim göstermediği belirlenmiştir. Ağaç formasyonlarında toplam karbon ve organik karbon düzeyleri yangından öncesi (TC: %6,20; OC: %4,02) ve sonrasında (TC: %6,76; OC: %3,74) önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. Çalı formasyonunda ise yangın sonrası karbon düzeyi artış göstermiştir. Ağaç alanlarında azot düzeyi yangın sonrası artarken, çalı formasyonun benzer bir artış gözlemlenmemiştir. Ağaç formasyonlarında amonyum düzeyi yangından sonra azalmış, fakat çalı formasyonunda böyle bir değişim gözlemlenmemiştir.

Alcaniz vd., (2016) İspanya'nın Katalonya bölgesindeki Montgrí masifinde potansiyel büyük yangınları önlemek amacıyla 2006 yılında gerçekleştirilen kontrollü yangının toprak

kimyası üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkilerini incelemiştir. Yangından önce, hemen sonra, bir yıl sonra ve dokuz yıl sonra olmak üzere dört farklı zaman noktasında 42 örnekleme yapılmış; pH, elektriksel iletkenlik (EC), toplam karbon (C), toplam azot (N), mevcut fosfor (P), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{2+}) ve magnezyum (Mg^{2+}) gibi parametreler analiz edilmiştir. Yangın sonrası pH ve EC değerleri başlangıçta artmış, ancak zamanla dalgalanarak dokuzuncu yılda başlangıç düzeylerinin altına inmiştir. Toplam C ve N yangından hemen sonra artarken, bir yıl sonra N azalmış, dokuz yıl sonra ise her iki değer başlangıç seviyesinin altına düşmüştür. Fosfor ve diğer makro besin maddeleri yangın sonrası kısa vadede artış gösterse de uzun vadede genel olarak azalmıştır. Sonuçlar, kontrollü yangının toprak kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerinin zamanla değişkenlik gösterdiğini ve iyileşme sürecinin uzun vadeye yayıldığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, kontrollü yangınların etkilerinin uzun süreli izlenmesinin önemini ve bu uygulamanın orman yönetiminde dikkatle değerlendirilmesi gereken bir araç olduğunu vurgulamaktadır.

Lucas-Borja vd., (2018) İspanya'nın Mallorca adasındaki terk edilmiş tarımsal teraslarda meydana gelen orman yangınlarının toprak özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışmada, teraslı ve terassız, yanmış ve yanmamış olmak üzere altı farklı mikro alan belirlenmiş; 0–15 cm derinlikten alınan toprak örneklerinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik analizler yapılmıştır. Bulgulara göre, yangın geçirmemiş alanlarda organik madde miktarı daha yüksek bulunurken, özellikle yangın geçirmiş teraslı alanlarda bu oran düşmüştür. Yangın geçirmemiş teraslı alanlar en iyi toprak kalitesine sahipken, yangın sonrası C/N oranı artmış, bu da toprak kalitesinin bozulduğunu göstermiştir. Yangınların toprak besin elementleri (Mg, Na, K) üzerinde önemli bir etkisi gözlenmezken, teraslama temel katyon içeriğinde değişikliklere yol açmıştır. Yangın sıklığı, özellikle terk edilmiş teraslarda toprak bozulmasını artırmış; bu alanlar, yangın geçirmemiş alanların toprak kalitesine erişememiştir. Sonuç olarak çalışma, yangın ve teraslamanın Akdeniz toprakları üzerinde uzun vadeli etkiler yarattığını ve toprak iyileşmesi ile arazi yönetimi açısından dikkatle ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Granged vd., (2011) Avustralya'nın Namadgi Ulusal Parkı yakınlarındaki okaliptüs ormanlarında, farklı yakıt yüklerine bağlı olarak değişen yangın şiddetlerinin toprak fizikokimyasal özellikleri üzerindeki kısa dönem etkilerini incelemiştir. Dört farklı yakıt yükü (0, 2, 4 ve 8 kg/m²) ile uygulanan yangınların ardından yedi ay boyunca aylık toprak ölçümleri yapılmıştır. Bulgulara göre, yangın sonrası toprak pH'ı yakıt yüküne bağlı olarak artmış; pH değeri kontrol parselinde 4,6 iken, en yüksek yakıt yükünde 6,6'ya yükselmiştir. Organik madde içeriği düşük yakıt yükünde hafif artarken (%6,4), orta ve yüksek yakıt yüklerinde

sırasıyla %3,7 ve %2,0'ye düşmüştür. Su geçirgenliği düşük yakıt yükünde azalırken, daha yüksek yakıt yüklerinde geçirimsizlik etkisi kaybolmuştur. Ayrıca, organik madde kaybına bağlı olarak toprak agregat stabilitesinde azalma görülmüştür. Çalışma, yangın şiddeti arttıkça toprak yapısında bozulmaların ve olumsuz etkilerin belirginleştiğini, düşük şiddetli yangınların ise bazı toprak özelliklerinde geçici iyileşmelere yol açabileceğini ortaya koymuştur.

Strydom vd., (2019) Güney Afrika'daki Kruger Ulusal Parkı'nda farklı kontrollü yangın sıklıklarının toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yıllık, 2–4 yılda bir ve 60 yıldır yangın uygulanmayan alanlarda toprakların doymuş (Ksat) ve doymuş olmayan (Kunsat) hidrolik iletkenliği, toplam karbon (TC), toplam azot (TN) ve toprak su potansiyeli analiz edilmiştir. Bulgular, yangın sıklığının Kunsat üzerinde doğrudan etkili olmadığını; ancak yangından sonra geçen sürenin Kunsat üzerinde daha belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Kontrollü yangın uygulanmayan alanlarda TC ve TN değerleri daha yüksek bulunmuş, su potansiyeli de bu alanlarda daha iyi su tutma kapasitesi göstermiştir. Sonuç olarak, sık kontrollü yangın uygulamalarının kısa vadede toprak hidrolik özelliklerini olumsuz etkileyebileceği, ancak uzun vadede toprakların bu etkilerden toparlanabileceği; ayrıca yangınların karbon ve azot döngüleri üzerinde önemli etkiler yarattığı vurgulanmıştır.

Heydari vd., (2017) İran'daki Zagros meşe (*Quercus brantii*) ormanlarında gerçekleştirilen bu çalışmada, farklı yangın şiddetlerinin toprak fiziksel ve biyokimyasal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ilam Eyaleti'nde, 110 hektarlık bir alanda yürütülen çalışmada yangın şiddeti dört kategoriye ayrılmıştır: yanmamış (UB), düşük (LS), orta (MS) ve yüksek (HS). Toprak örnekleri 0–20 cm derinlikten alınmış ve doymuş nem, doku bileşenleri, pH, elektriksel iletkenlik (EC), organik karbon, erişilebilir fosfor ve potasyum analiz edilmiştir. Yanmamış ve düşük şiddetli yangın alanlarında doymuş nem değerleri daha yüksek, kum oranı düşük bulunmuştur. Buna karşılık, yüksek şiddetli yangın alanlarında kum oranı artmış, silt ve kil azalmıştır. Yangın şiddeti arttıkça pH ve EC değerleri yükselmiş, fosfor ve potasyum birikimi artarken organik karbon miktarı azalmıştır. Sonuç olarak, yangın şiddeti toprak özellikleri üzerinde belirleyici olmuş; düşük şiddetli yangınlar sınırlı etki gösterirken, orta ve yüksek şiddetli yangınların toprak verimliliği üzerinde olumsuz etkiler yarattığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, düşük şiddetli yangınların Zagros meşe ormanlarında sürdürülebilir yönetim aracı olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Agbeshie vd., (2022) tarafından yapılan bu derleme çalışmasında, orman yangınları ile kontrollü yangınların orman topraklarının biyolojik, fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve mevcut araştırmaların bulguları özetlenmiştir. Verilere göre, düşük şiddetli yangınlar toprak yüzeyinde kül birikimi sayesinde bitki besin maddelerinin miktarını

ve konsantrasyonunu artırırken, yüksek şiddetli yangınlar organik maddelerin tamamen yanmasına neden olarak besin kaybına yol açmaktadır. Yüksek şiddetli yangınların ayrıca besinlerin buharlaşmasına, toprak agregat stabilitesinin bozulmasına, kütle yoğunluğunun artmasına, hidrofobikliğin yükselmesine ve biyolojik aktivitenin azalmasına neden olduğu vurgulanmıştır. Özellikle toprak sıcaklığının 120 °C'yi aşması, fiziksel ve biyolojik toprak özellikleri için zararlı kabul edilmektedir. Sonuç olarak, yangınların toprak üzerindeki etkilerinin yangın şiddeti ve sıklığına bağlı olarak değiştiği, düşük şiddetli yangınların bazı olumlu etkileri olabileceği, yüksek şiddetli yangınların ise kalıcı zararlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca, yakıt yükünü azaltmak ve büyük yangınları önlemek amacıyla düşük şiddetli kontrollü yangınların orman yönetiminde etkili ve önerilen bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

Hrelja vd., (2020) tarafından yapılan derleme çalışmasında, orman yangınlarının toprak fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkileri çeşitli kaynaklardan elde edilen verilerle değerlendirilmiştir. Yangın sırasında ulaşılan sıcaklığın, topraktaki değişimlerin temel belirleyicisi olduğu; yüksek sıcaklıkların organik madde ve besin maddelerinin buharlaşmasına, düşük sıcaklıkların ise genellikle geçici etkilere neden olduğu vurgulanmıştır. Yangının süresi ve şiddeti, özellikle organik madde kaybı, pH artışı ve besin elementlerinin (azot, fosfor, kükürt) buharlaşması gibi süreçlerde kalıcı etkiler yaratabilmektedir. Toprak pH'ındaki artış, kül ve mineral bileşenlerin etkisiyle kısa vadede görülse de zamanla eski düzeye dönebilir. Yangınların toprak yapısını bozarak erozyon ve verimlilik kaybına yol açabileceği, bu etkilerin iklim değişikliği bağlamında ekosistem yönetimi açısından kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir.

Faboya vd., (2020) tarafından yürütülen ilgili bir çalışmada ise Nijerya'nın Oye-Ekiti bölgesindeki tropikal ormanlarda, yangınların topraklardaki poliaromatik hidrokarbon (PAH) birikimi ve karbon izotop ($\delta^{13}\text{C}$) değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yangın etkisi altındaki topraklarda PAH konsantrasyonları 104,36–1.868,93 ng/g arasında değişmiş ve ortalama 713,36 ng/g ile oldukça yüksek bulunmuştur. Ayrıca yangına maruz kalan toprakların $\delta^{13}\text{C}$ değerleri (‰-17,7 ila ‰-20,8) kontrol örneklerine göre daha zenginleşmiş ve toplam organik karbon içeriği %5,21–12,95 arasında ölçülmüştür (kontrol örneklerinde %0,85–1,72). Bu bulgular, yangınların hem toprak kirliliğini hem de karbon yapısını değiştirdiğini, PAH birikiminin ise ekosistem sağlığı ve insan sağlığı açısından ciddi riskler taşıdığını göstermektedir.

Arunrat vd., (2022) Kuzey Tayland'daki Ban Mae Pok bölgesinde, farklı dinlendirme sürelerine sahip rotasyonel tarım alanlarında meydana gelen yangınların toprak organik karbon (OC) ve toplam azot (TN) üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sekiz farklı uygulama alanında,

yangın öncesi, yangın sonrası ve hasat sonrası (9 ay) olmak üzere üç farklı zamanda 0–30 cm derinlikte toprak örnekleri alınmıştır. En uzun dinlendirme süresine sahip alanlarda (7 yıl), en yüksek OC (134,33 mg C/ha) ve TN değerleri gözlemlenirken, en kısa süreli dinlendirme alanlarında (1 yıl) bu değerler en düşük seviyede bulunmuştur (73,18 mg C/ha). Yangın sonrası OC değerlerinde genel bir düşüş izlenmiş, ancak bazı sahalarda (3 ve 7 yıl dinlendirme) hasat sonrası dönemde OC artışı gözlenmiştir. Yangın, toprak pH'ını ve elektriksel iletkenliği (EC) anlamlı şekilde artırmış, ancak OC ve TN üzerinde istatistiksel olarak belirgin bir etki yaratmamıştır. Çalışma, düşük yoğunluklu ve kısa süreli kontrollü yangınların toprak üzerindeki etkilerinin sınırlı olduğunu; OC kayıplarını önlemek için yangın sıcaklığının 380 °C'nin altında tutulması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca, dinlendirme süresinin artırılması ve yangınların dikkatle yönetilmesi, toprak verimliliğini korumada kritik öneme sahiptir.

Outeiro vd., (2008) İber Yarımadası'nda 108 m²'lik bir alanda çıkarılan kontrollü yangının toprak katyonları (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) üzerindeki mekânsal etkilerini değerlendirmiştir. Toprak örnekleri yangın öncesi ve sonrası olmak üzere altı farklı dönemde toplanmış; özellikle yangın sonrası 1.315 mm'lik yağışın bu katyonların dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgulara göre, Ca²⁺ ve Mg²⁺ zamanla yangın öncesi seviyelere dönerken, K⁺ yangından hemen sonra artış göstermiş ancak üç yıl sonra yangın öncesi seviyesinin yarısına kadar düşmüştür. Ca²⁺ ve Mg²⁺ daha homojen bir dağılım sergilerken, K⁺ mekânsal olarak daha heterojen dağılmıştır. Yağışlar, katyonların dağılımında belirleyici rol oynamıştır. Çalışma, kontrollü yangınların toprak besin döngüsü üzerindeki etkilerini anlamada jeoistatistiksel analizlerin önemini vurgulamış ve elde edilen verilerin arazi yönetimi ile ekosistem restorasyonu açısından uygulanabilir bilgiler sunduğu sonucuna varmıştır.

Francos vd., (2016) Kuzeydoğu İspanya'nın Girona bölgesinde Akdeniz iklimine sahip bir ormanlık alanda, 2013 yılında meydana gelen yüksek şiddetli bir yangın sonrası yoğun yağışın toprak kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yangından üç gün sonra 72 m²'lik bir deneysel alan kurulmuş ve toprak örnekleri yangın öncesi, yağış sonrası ve bir yıl sonra olmak üzere üç farklı zamanda toplanmıştır. Bulgulara göre, yangın sonrası agregat stabilitesi başlangıçta korunmuş, ancak bir yıl içinde belirgin şekilde azalmıştır. Bu durum, başlangıçta kül tabakasının toprak yüzeyini koruyucu etkisine bağlanmıştır. Yağış, toplam azot ve karbon üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmazken, organik karbon içeriği yağış sonrası dönemde en yüksek düzeyde ölçülmüştür. pH ve elektriksel iletkenlik ise yağış sonrası anlamlı şekilde düşmüştür. Çözünabilir kalsiyum, magnezyum ve mevcut fosfor düzeyleri yağış sonrası artış göstermiştir. Çalışma, yangın sonrası yoğun yağışların toprak özellikleri üzerinde zamanla değişen, karmaşık etkiler yarattığını ve bu süreçlerin agregat stabilitesi, pH ve bitki gelişimiyle

yakından ilişkili olduğunu ortaya koyarak, toprak yönetimi ve ekosistem iyileşme süreçlerine dair önemli bilgiler sunmuştur.

Francos vd., (2018b) İber Yarımadası'nın doğusundaki Cadiretes Kütlesi'nde 1994 yılında meydana gelen farklı şiddetlerdeki orman yangınının toprak özellikleri üzerindeki uzun dönem etkilerini incelemiştir. Yangından hemen sonra, 7 yıl sonra ve 18 yıl sonra olmak üzere üç farklı örnekleme döneminde toplam azot (TN), toplam karbon (TC), C/N oranı, organik madde (OM) ve çözünebilir makro besin elementleri (Ca, Mg, Na, K) analiz edilmiştir. Bulgulara göre, TN ve TC yangın sonrası kısa dönemde yüksek düzeyde ölçülmüş ancak zamanla azalmıştır. C/N oranı ilk etapta düşmüş, 18 yıl sonunda ise eski seviyelere yaklaşmıştır. Organik madde içeriği zamanla belirgin şekilde azalmış, bu durum bitki örtüsünün yavaş toparlanmasıyla ilişkilendirilmiştir. Düşük şiddetli yangın alanlarında çözünen makro elementler (Ca, Mg, Na, K) kontrol alanlarına göre daha yüksek kalmışken, yüksek şiddetli yangın alanlarında bu değerler azalmıştır. Sonuç olarak, yangının uzun vadeli etkileri yangın şiddeti, erozyon ve bitki örtüsünün iyileşme hızıyla ilişkili bulunmuş; yüksek şiddetli yangınların toprak besin döngüsü üzerinde kalıcı olumsuz etkiler bıraktığı, düşük şiddetli yangınlarda ise toparlanmanın daha hızlı gerçekleştiği belirlenmiştir.

Pereira vd., (2012) Portekiz'de farklı yangın şiddetlerinin külün kimyasal bileşimi üzerindeki etkilerini incelemiş ve kül rengini yangın şiddetinin bir göstergesi olarak kullanmıştır. Üç farklı yangın sahasından toplanan 102 kül örneği, çok koyu kahverengi (düşük şiddet) ile açık gri (yüksek şiddet) arasında sınıflandırılmıştır. Bulgulara göre kül rengi ile kalsiyum karbonat (CaCO_3), pH, toplam karbon (TC), toplam azot (TN) ve C/N oranı gibi kimyasal özellikler arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler bulunmuştur. Yangın şiddeti arttıkça CaCO_3 içeriği ve pH değeri artarken, TC ve TN azalmıştır. Örneğin, çok koyu kahverengi külde TC %46,04 iken açık gri külde %17,82 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, suyla çözünebilir Ca, Mg, Na ve K gibi elementlerin konsantrasyonları yangın şiddetine bağlı olarak değişmiş; en yüksek kalsiyum seviyesi siyah kül örneklerinde tespit edilmiştir. Toplam fosfor (TP) artarken, toplam sülfür (TS) azalmış; silika (Si) ise daha koyu kül örneklerinde daha yüksek bulunmuştur. Sonuç olarak, yangın şiddetinin kül kimyasını önemli ölçüde etkilediği ve külün, yangın sonrası toprak besin döngüsü ve bitki gelişimi için kritik bir kaynak olduğu vurgulanmıştır.

Pereira vd., (2013) 4 Nisan 2010 tarihinde Litvanya'da meydana gelen bir orman yangınının ardından düz ve eğimli arazilerde kül kalınlığının zamansal ve mekânsal değişimini incelemiştir. Yangın sonrası dört farklı zamanda (4, 16, 34 ve 45. günlerde) 1 metrelik aralıklarla iki transekt boyunca ve 40 örnek noktasında kül kalınlığı ölçülmüş, yağış verileri de

eş zamanlı kaydedilmiştir. Bulgulara göre, yangın şiddeti kül kalınlığını doğrudan etkilemiş; düz alanda en yüksek kül kalınlığı 4. günde gözlemlenirken, izleyen günlerde özellikle yağışların etkisiyle belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Eğimli alanda kül kalınlığı daha düzensiz dağılmış ve erozyon nedeniyle zamanla daha fazla değişiklik göstermiştir. Özellikle ilk yağıştan sonra (8. gün) kül tabakasında önemli incelemeler yaşanmış, 16–34. günler arasında en büyük kayıplar görülmüştür. Çalışma, kül kalınlığının topografya, yağış ve erozyon süreçleriyle yakından ilişkili olduğunu ve yangın sonrası toprak koruma stratejilerinde dikkate alınması gereken kritik bir parametre olduğunu ortaya koymuştur.

Pereira vd., (2014a) Litvanya’da düşük şiddetteki bir bahar ot yangınının ardından toprak özelliklerinde meydana gelen kısa dönemli değişiklikleri incelemiştir. 5 Nisan 2011’de Vilnius yakınlarında gerçekleşen bu insan kaynaklı yangından dört gün sonra yanmış ve yanmamış alanlarda toprak örnekleri alınmış; Munsell renk değeri, organik madde içeriği (OM) ve su geçirimsizliği (SWR) analiz edilmiştir. Bulgulara göre, yanmış alanlarda toprak rengi belirgin şekilde koyulaşmış; bu durum, yangın sonrası toprağa karışan kül ve kömür parçacıklarına bağlanmıştır. Yanmış topraklarda OM içeriği ilk iki ay boyunca daha yüksek bulunmuş, ancak 5. aydan itibaren bu fark ortadan kalkmıştır. Su geçirimsizliği yangından hemen sonra ve ilk iki ayda daha yüksekken, zamanla azalmış; 5 ve 7. aylarda ise yanmamış alanda daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Ayrıca toprak rengi ile OM ve SWR arasında anlamlı negatif korelasyonlar saptanmıştır. Çalışma, yangının toprak fiziksel ve kimyasal özelliklerinde kısa vadeli ancak geçici değişikliklere yol açtığını, özellikle ilk aylarda organik maddenin bu süreçlerde belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir.

Pereira vd., (2014b) Portekiz’de bir sahil çamı (*Pinus pinaster*) ormanında meydana gelen yangının, kül içerisindeki suyla çözünebilen elementler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yangın sonrası alınan kül örnekleri, yanmamış ölü örtü örnekleriyle karşılaştırılmış ve pH, elektriksel iletkenlik (EC) ile çeşitli besin elementleri analiz edilmiştir. Bulgulara göre, kül örneklerinde pH ve EC değerleri belirgin şekilde daha yüksek bulunmuş, külün daha alkaline ortam oluşturduğu tespit edilmiştir. Suyu çözünebilen Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , S ve Si düzeyleri külde önemli ölçüde artarken, Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} ve Zn^{2+} gibi ağır metallerin çözünürlüğü azalmıştır. Fosfor (P) düzeylerinde ise istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Yangın, küldeki besin elementlerinin kimyasal dağılımını ve varyansını artırmış, bu durumun bitki iyileşmesi üzerinde dengesiz besin alımı gibi olası etkiler yaratabileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, yangın külün kimyasal bileşimini önemli ölçüde değiştirmiş ve bu değişimlerin toprak sağlığı ile bitki beslenmesi açısından dikkate alınması gereken uzun vadeli etkiler doğurabileceği vurgulanmıştır.

Pereira vd., (2015) yangın sonrası toprak yüzeyinde oluşan külün ekolojik ve fiziksel işlevlerini değerlendiren editoryal nitelikte bir çalışmada, külün yangın geçirmiş alanlardaki en yaygın kalıntı olduğunu ve bitki materyalinin yanmasıyla oluşan mineral ve kömürleşmiş organik bileşenleri içerdiğini belirtmiştir. Kül rengi yangın şiddetinin bir göstergesi olarak değerlendirilmiş; siyah kül düşük-orta şiddetli, gri ve beyaz kül ise yüksek şiddetli yangınlarla ilişkilendirilmiştir. Yangın sıcaklığı, külün kütlesini ve parçacık boyutunu etkileyerek, yüksek sıcaklıklarda daha ince parçacıklı ve düşük organik içerikli kül oluşumuna neden olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda üretilen kül, su geçirimsizliği açısından daha riskli olabilir. Kül tabakasının yüzeyssel akışı ve infiltrasyonu hem artırıcı hem azaltıcı yönde etkileyebildiği, bu etkinin saha koşullarına bağlı olarak değiştiği vurgulanmıştır. Ayrıca kül, özellikle düşük şiddetli yangınlarda, toprak organik maddesini ve bazı besin elementlerini artırarak bitki yeniden büyümesini destekleyebilirken, yüksek şiddetli yangınlarda bu etki tersine dönebilir. Külün bazı besin elementlerini artırması mikrobiyal aktiviteyi ve tohum çimlenmesini etkileyebilmektedir. Sonuç olarak çalışma, külün yangın sonrası toprak özellikleri ve erozyon süreçleri üzerindeki etkilerinin karmaşık ancak ekolojik açıdan kritik olduğunu vurgulamıştır.

Pereira vd., (2017) 5 Nisan 2011’de Litvanya’da gerçekleşen düşük şiddetli bir bahar otlak yangınının toprak kimyası üzerindeki kısa vadeli etkilerini incelemiştir. Yangından dört gün sonra yanmış ve yanmamış alanlarda 400 m²’lik örnekleme sahaları oluşturulmuş; 0, 2, 5, 7 ve 9. aylarda toprak örnekleri alınarak pH, elektriksel iletkenlik (EC), temel besin elementleri (Ca, Mg, Na, K) ve bazı iz elementler (Al, Mn, Fe, Zn) analiz edilmiştir. Bulgulara göre, yangın sonrası ilk ayda pH düşük olmakla birlikte sonraki aylarda yükselmiş; EC ise ilk iki ay yüksek kalmış, ardından normale dönmüştür. Ca, Mg ve özellikle K düzeyleri yangın sonrası yanmış alanda daha yüksek bulunurken, Na’da anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Al ve Mn konsantrasyonları ise yangın sonrası azalmıştır. Ayrıca, Ca/Mg oranı düşerken, Ca/Al oranındaki artış, toprağın asidik baskısında azalma olduğunu göstermiştir. Genel olarak, yangın sonrası toprak kimyasında ilk iki ayda belirgin değişimler yaşanmış, ancak bu etkiler zamanla azalmıştır. Çalışma, düşük şiddetli bahar yangınlarının toprak özellikleri üzerindeki etkilerinin geçici olduğunu ve bu tür yangınlara karşı ekosistemlerin belirli bir toparlanma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Bulgular, yangın sonrası toprak süreçlerini anlamak ve etkili yangın yönetimi stratejileri geliştirmek açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Murphy vd., (2006) 2002 yılında Nevada’daki Lake Tahoe Bölgesi’nde meydana gelen Gondola yangınının, daha önce belirlenmiş bir araştırma alanında orman ölü örtüsü ve toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. 1950–2100 m rakımda yer alan Jeffrey çamı ve beyaz ladin ağırlıklı orman ekosisteminde 16 araştırma parselinden 9’u yangından etkilenmiş

ve bu alanlardan toprak örnekleri farklı horizonlardan (A11, A12, AC, C) alınarak analiz edilmiştir. Yangın sonrası ölü örtüdeki besin maddelerinde büyük kayıplar meydana gelmiş; karbon, azot, fosfor, kükürt, potasyum, kalsiyum ve magnezyum düzeylerinde sırasıyla %94, %92, %76, %84, %53, %90 ve %90 oranında azalma tespit edilmiştir. Yüzey toprakta (A11) azot miktarında azalma ve pH seviyesinde artış gözlemlenmiştir. İlk kış döneminde, yangın sonrası toprak infiltrasyon oranları artmış; mineral azot kaybı ise ölü örtüdeki kayıplara kıyasla daha düşük kalmıştır. Ayrıca, yangın sonrası besin maddelerinin sulara geçişinde artış yaşanmış, bu durum su kalitesi açısından risk oluşturmuştur. Özellikle kükürt ve azotun suda çözünmüş formlarındaki artışlar, ekosistem döngüleri üzerinde etkili olmuştur. Çalışma, yangının hem kısa vadeli (suda çözünebilen besin maddelerinin artışı) hem de uzun vadeli (orman ölü örtüsündeki besin kaybı) etkilerini ortaya koyarak, yangınların toprak ve su kalitesi üzerindeki çok boyutlu etkilerini vurgulamıştır.

Pardini vd., (2004) İspanya'nın kuzeydoğusundaki Cap de Creus Yarımadası'nda 2000 yılında gerçekleşen orman yangınının farklı arazi kullanım geçmişine sahip Akdeniz ortamlarında toprak özellikleri ve erozyon süreçleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, meşe ormanları (E1), zeytinlikler (E2), terk edilmiş teraslar üzerindeki çalılıklar (E3), fundalıklar (E4) ve üzüm bağları (E5) olmak üzere beş farklı sahada yürütülmüştür. Yangın öncesi dönemde E1 sahasında en yüksek toprak nemi ve organik madde içeriği belirlenmiş, yangın sonrası ise bu sahada nem oranı %4,96'ya düşerken organik madde içeriği kül birikimi nedeniyle artmıştır. Yangın sonrası çözünmüş organik karbon (DOC) düzeyi E2 sahasında en yüksek değere ulaşmış, diğer sahalarda ise daha düşük kalmıştır. Tüm ortamlarda yangın sonrası toprak pH'ı artarken, özellikle üzüm bağı alanlarında bu artış belirgin olmuştur. Ayrıca yangın sonrası özellikle kalsiyum gibi bazı besin elementlerinin seviyelerinde artış gözlenmiş ve bu durum mineralizasyon süreçleriyle ilişkilendirilmiştir. Çalışma, yangının toprak nemi, pH, organik madde ve besin elementleri gibi temel özellikleri önemli ölçüde değiştirdiğini ve bu değişimlerin erozyon riskini artırarak bitki örtüsünün yeniden gelişimi üzerinde belirleyici etkiler yarattığını ortaya koymuştur.

Kutiel ve Naveh (1987) İsrail'deki Karmel Dağı'nda yüksek yoğunluklu bir orman yangını sonrası toprak besin maddelerinde meydana gelen değişimleri ve bunun bitki örtüsü gelişimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. 1985'te yaklaşık 7000 m²'lik bir alanı etkileyen yangından sonra, Eylül 1985-Mayıs 1986 arasında her iki ayda bir yanmış ve yanmamış alanlardan alınan toprak örneklerinde toplam ve mevcut azot, fosfor, pH ve elektriksel iletkenlik analiz edilmiştir. Bulgulara göre yangın sonrası toplam azotun %25'i kaybolmuş, ancak birkaç ay içinde yanmamış alanlarla benzer seviyelere ulaşmıştır; bu iyileşme, azot bağlayıcı

mikroorganizmaların etkisine bağlanmıştır. Toplam fosfor %300 oranında artmış, bu artış kül formundaki fosfor birikimiyle açıklanmış, ancak yağışlarla birlikte bu seviyeler hızla düşmüştür. Suda çözünebilen fosfor da benzer bir artış-azalma döngüsü izlemiştir. Toprak pH'ı ve elektriksel iletkenlik yangın sonrası artış göstermiş, bu durum kül kaynaklı çözünür kationların etkisiyle ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak, yangın topraktaki mineral besin maddelerinde kısa süreli bir zenginleşmeye yol açmış, bu da bitkilerin yeniden büyümesi için elverişli koşullar oluşturmuştur. Çalışma, yangın sonrası oluşan küllü toprak katmanının besin döngüsünü hızlandırarak ekosistem dengesinin yeniden kurulmasında önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Hernandez vd., (1997) İspanya'nın güneydoğusunda Akdeniz iklimine sahip bir çam ormanında meydana gelen yangından 9 ay sonra toprakların kimyasal ve biyolojik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Yapılan analizlerde, yanmış toprakların elektriksel iletkenliğinin yanmamış topraklara göre daha yüksek olduğu ve bunun çözünür inorganik iyonların artışından kaynaklandığı belirlenmiştir. Nitrat ve amonyum gibi azot bileşenlerinin seviyeleri yanmış topraklarda belirgin şekilde daha yüksek çıkmış, bu da artan nitrifikasyon potansiyeline işaret etmiştir. Fosfor düzeyleri de genellikle daha yüksek ölçülmüş ancak toplam fosfor içeriği değişmemiştir. Buna karşılık, toplam organik karbon (OC), çözünür karbon ve humik asit miktarları yangın sonrası önemli ölçüde azalmıştır. Mikrobiyal biyokütle, yanmamış topraklara göre %50-79 daha düşük bulunmuş ve temel mikrobiyal aktiviteler (solunum, dehidrogenaz, üreaz, proteaz ve fosfataz enzim aktiviteleri) ciddi oranda azalmıştır. Yangın, kısa vadede besin maddelerinde geçici artışlara yol açsa da, toprak organik maddesi ve mikrobiyal fonksiyonlar üzerinde olumsuz etkiler oluşturmuştur. Özellikle yarı kurak koşullarda organik madde kaybı hızlanmış ve toprakların biyolojik iyileşme süreci ciddi ölçüde sekteye uğramıştır.

Ponder vd., (2009) Missouri'deki Sinkin Deneyisel Ormanı'nda meşe-ceviz, meşe-ceviz-çam ve çam savanalarında uygulanan kontrollü yangınların toprak ve yüzey ölü örtüsündeki besin maddeleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Nisan aylarında iki yıl boyunca gerçekleştirilen kontrollü yangınların ardından, 0–5 cm derinlikten toprak ve ölü örtü örnekleri alınmış ve kimyasal analizler yapılmıştır. Bulgulara göre, yüzey ölü örtüsünde potasyum (K) ve bor (B) seviyeleri yanmamış alanlarda daha yüksek bulunurken, toprakta kalsiyum (Ca), bor (B) ve pH değeri yanmış alanlarda daha yüksek ölçülmüştür. Kükürt (S) ise yalnızca çam savanasındaki yanmamış alanlarda daha yüksek düzeyde tespit edilmiştir. Araştırma, kontrollü yangınların toprak ve ölü örtüdeki besin maddeleri ile mikrobiyal topluluk yapısı üzerinde orta

düzeyde etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, yangının uzun vadeli etkilerinin netleşmesi için daha fazla izleme çalışmasına ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Ubeda vd., (2009) Akdeniz bölgesinde yangınlara sıkça maruz kalan mantar meşesi (*Quercus suber*) ormanlarından toplanan yüzey ölü örtüsünün farklı sıcaklıklardaki ısıtma işlemle besin maddeleri ve kimyasal özelliklerindeki değişimlerini incelemiştir. İspanya'daki Mas Bassets ve Portekiz'deki Albufeira bölgelerinden alınan ölü örtü örnekleri, 150°C ile 550°C arasında ısıtılmış ve ardından kül rengi, kütle kaybı, CaCO_3 içeriği, pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve ana katyonlar (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) analiz edilmiştir. Bulgulara göre Albufeira örneklerinde daha yüksek kütle kaybı ve CaCO_3 oluşumu gözlemlenmiş, kül renginin sıcaklığa bağlı olarak sarıdan gri/beyaza değiştiği tespit edilmiştir. pH ve EC değerleri düşük sıcaklıklarda düşüktür, ancak sıcaklık arttıkça özellikle Albufeira örneklerinde yükselmiştir. Katyon konsantrasyonları orta sıcaklıklarda artmış, yüksek sıcaklıklarda azalmıştır. Potasyum ve sodyum ise özellikle orta sıcaklıklarda zirve yapmıştır. Yüksek sıcaklıklar, ölü örtüde yüksek kütle kaybına neden olarak toprağı erozyona daha açık hale getirebilirken, artan pH ve katyon salınımı toprak kimyasını ve bitki örtüsünün iyileşmesini olumsuz etkileyebileceği ifade edilmiştir. Çalışma, düşük sıcaklıklı kontrollü yangınların ölü örtünün fiziksel ve kimyasal yapısını daha az bozduğunu ve toprak sağlığı açısından daha sürdürülebilir olabileceğini vurgulamıştır.

Fairman vd., (2022) Güneydoğu Avustralya'daki yangına dayanıklı okaliptüs ormanlarında, tek bir yüksek şiddetli yangın ile altı yıl içinde meydana gelen iki yüksek şiddetli yangının toprak karbon stokları üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Araştırmada, 2013'teki tek yangın ile 2007 ve 2013 yıllarında ardışık olarak meydana gelen iki yangının ardından, canlı ağaç karbonu, ölü ağaç karbonu, yaprak döküntüsü ve toprak organik maddesi olmak üzere dört farklı karbon havuzu değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, tek yangın sonrası canlı karbon oranı %76'dan %62'ye düşerken, iki yangın geçiren alanlarda bu oran %47'ye kadar azalmıştır. Ölü ağaç karbonu, yangın geçirmemiş alanlarda %11 iken, iki yangın sonrası %42'ye yükselmiştir. Toprak karbon stoklarında da belirgin bir azalma görülmüş ve bu durum yangına bağlı toprak erozyonu ile ilişkilendirilmiştir. Bu bulgular, yangın sonrası orman ekosisteminin karbon geri kazanım kapasitesinin azaldığını ve üretkenliğin gecikebileceğini göstermektedir. Sonuç olarak çalışma hem tekil hem de ardışık yangınların okaliptüs ormanlarının karbon stoklarını ciddi biçimde azaltabildiğini ve iklim değişikliği bağlamında bu ekosistemlerin karbon dengesinin daha da kırılgan hale geldiğini ortaya koymuştur.

Raiesi ve Pejman (2021) Orta İran'daki yarı kurak dağlık meralarda yangın sonrası toprak kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla bir Toprak Kalite İndeksi (SQI) geliştirerek,

yangından iki yıl sonra altı farklı merada yanmış ve yanmamış alanlardan alınan toprak örnekleri üzerinde 22 farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellik analiz etmiştir. Bulgulara göre yangın, toprak kalitesinde ortalama %28 oranında azalmaya yol açmış ve iki yıl geçmesine rağmen toprak tam olarak iyileşmemiştir. Mikrobiyal solunum (%36), organik karbon (%22), mikrobiyal biyokütle karbonu (%15), mevcut fosfor (%15) ve alkali fosfataz aktivitesi (%12) toprak kalitesi üzerindeki en belirleyici faktörler olarak öne çıkmıştır. Çalışma, yangın sonrası toprak bozulmasının, uzun süren kuraklıklar ve yoğun otlatma baskısıyla birlikte toprağın biyolojik işlevlerini ve kimyasal dengesini olumsuz etkilediğini göstermiştir.

Certini (2005) tarafından yapılan derleme çalışmasında, orman yangınlarının toprak üzerindeki etkilerinin yangın şiddetine bağlı olarak değiştiği vurgulanmıştır. Düşük ve orta şiddetli yangınların genellikle geçici etkiler yarattığı, pH ve bazı besin maddelerinde artışa neden olarak bitki örtüsünün yenilenmesine katkı sağladığı belirtilmiştir. Ancak bu yangınlar, yüzeyde su geçirmez hidrofobik tabakalar oluşturarak suyun sızmasını engelleyip erozyon riskini artırabilir. Yüksek şiddetli yangınlar ise organik maddenin büyük kısmını yok ederek toprak yapısını ve porozitesini bozmakta, ciddi besin kayıplarına yol açmaktadır. Ayrıca mikrobiyal topluluklarda önemli değişimler meydana gelirken, bazı durumlarda bitki örtüsünün hızlı geri dönüşüyle toprak özelliklerinde iyileşme gözlemlenebilir. Yangın sonrası pH değerlerinde artış, organik asitlerin denatürasyonu ve külün etkisiyle ortaya çıkmakta; bu da toprağın alkali hale gelmesine neden olabilmektedir. Organik azot kaybına karşın, inorganik azot formları (amonyum ve nitrat) artabilirken, fosfor organik formdan ortofosfata dönüşerek bitkiler için daha ulaşılabilir hale gelmektedir. Çalışma, yangınların toprak özellikleri üzerindeki etkilerinin çok boyutlu ve karmaşık olduğunu, bu etkilerin yangın şiddeti, çevresel koşullar ve bitki örtüsü gibi faktörlerle belirlendiğini ortaya koymuştur.

DeBano (2000) tarafından yapılan derleme niteliğindeki çalışmada, yangınların ve toprak ısisının orman ekosistemlerindeki toprak geçirimsizliği (hidrofobiklik) üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Çalışmaya göre yangın sırasında toprak yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklıklar, organik bileşiklerin ve suyun buharlaşmasına yol açarak, toprak parçacıklarının hidrofobik bir yapıyla kaplanmasına neden olmaktadır. Bu durum özellikle 175–200 °C aralığında su geçirimsizliğini artırırken, 280–400 °C sıcaklık aralığında bu özellik kaybolmaktadır. Yangın sonrası gelişen geçirimsiz katmanlar genellikle yüzeyin hemen altında yer almakta ve bu, yağışla birlikte yüzey akışını ve erozyonu artırmaktadır. Çalışma, ABD, Yeni Zelanda ve Japonya gibi farklı ekosistemlerde de yangın sonrası hidrofobik toprak koşullarının yaygın olarak gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, organik maddenin yanmasıyla ortaya çıkan bileşiklerin toprak gözeneklerini tıkayarak suyun infiltrasyonunu

engellediği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, yangın sonrası oluşan hidrofobik katmanlar, su döngüsü süreçlerini değiştirerek erozyon riskini artırmakta ve su kalitesini tehdit etmektedir. Bu nedenle, yangın sonrası toprak yönetiminde su geçirimsizliğini dikkate alan stratejilerin geliştirilmesi zorunlu görülmektedir.

Doer ve Thomas (2000) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, Portekiz'deki kumlu-killi orman topraklarında su geçirimsizliği (hidrofobiklik) ile toprak nemi arasındaki etkileşimi incelemiştir. Araştırma, toprakların kuruluk durumuna bağlı olarak hidrofobik özelliklerinin değiştiğini ve en yüksek seviyeye kuru koşullarda ulaştığını, nem arttıkça bu özelliğin azaldığını ortaya koymuştur. Toprak neminin %28'in üzerine çıktığı durumlarda hidrofobikliğin ortadan kalktığı gözlemlenmiş, ancak toprak tekrar kurduğunda bu özelliğin hemen geri dönmediği ve belirli bir zaman gerektirdiği belirtilmiştir. Ayrıca, farklı toprak tiplerinde hidrofobikliğin ortaya çıktığı kritik nem eşiklerinin değişkenlik gösterdiği ve bu durumun özellikle organik madde içeriğiyle ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bazı örneklerde nem seviyesi yüksek olmasına rağmen hidrofobikliğin devam ettiği, bu bulgunun literatürdeki yaygın kanıyla çeliştiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, hidrofobikliğin sadece nem düzeyine değil, aynı zamanda mikrobiyal faaliyetler ve toprak bileşimine de bağlı olarak ortaya çıktığı ve bu özelliğin toprak yönetimi ile tarım uygulamaları açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Özellikle uzun süreli kuraklık dönemlerinden sonra gelen ilk yağışlarda toprak su iticiliğinin kalıcılığı, erozyon ve su tutma kapasitesi açısından kritik öneme sahiptir.

Martin ve Moody (2001) tarafından New Mexico ve Colorado'daki dağlık havzalarda yapılan çalışmada, yüksek şiddetli yangınlar sonrası yanmış ve yanmamış volkanik ve granitik toprakların infiltrasyon oranları karşılaştırılmıştır. Taşınabilir yağmur simülatörü kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler, ponderosa çamı ve karma konifer örtüsüne sahip sahalarda yürütülmüş ve yanmış alanlarda infiltrasyon oranlarının belirgin biçimde azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle yanmış volkanik topraklarda infiltrasyon oranı, yanmamış alanların yalnızca %15'i kadar olurken, granitik topraklarda bu oran %38 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, toprak dokusunun (volkanik topraklarda daha ince) yangın sonrası su geçirgenliği üzerinde belirleyici bir etken olduğu vurgulanmıştır. Deneyler sırasında suyun yayılma biçimleri de gözlemlenmiş; bazı alanlarda yatay yayılma, bazılarında ise dikey penetrasyon baskın olmuştur. Sonuç olarak, yangın sonrası infiltrasyon oranlarındaki düşüşün erozyon riski ve su yönetimi açısından ciddi sonuçlar doğurabileceği belirtilmiş ve bu durumun özellikle topografyası eğimli ve toprak yapısı hassas alanlarda dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Keizer vd., (2008) tarafından Portekiz'in kuzey ve orta kesimindeki okaliptüs plantasyonlarında yürütülen bu çalışmada, yangın sonrası toprak su geçirimsizliğinin (hidrofobikliği) zamansal ve mekânsal değişimleri incelenmiştir. Aynı yangından etkilenmiş, biri bozulmamış (Açores1), diğeri ise sürülmüş (Açores2) iki komşu havzada toplam 1125 su geçirimsizlik ve 861 toprak nemi ölçümü yapılmıştır. Sonuçlara göre, kurak dönemlerde toprak hidrofobikliği belirgin şekilde artarken, yağışlardan sonra azalmıştır. Bozulmamış alanda su geçirimsizliği daha yüksek düzeylerde görülürken, sürülmüş alanda bu özellik daha uzun süre devam etmiştir. Su geçirimsizliği mevsimsel olarak yaz aylarında artmış, kış aylarında ise düşmüştür. Toprak nemi ile su geçirimsizliği arasında kısmi bir ilişki gözlenmiş olsa da, toprak nemi tek başına su geçirimsizliğini açıklamada yetersiz kalmıştır. Bu çalışma, yangın sonrası toprakların hidrofobik özelliklerinin saha koşullarına ve toprak işleme geçmişine bağlı olarak farklılaştığını ortaya koymuştur

Malvar vd., (2016) tarafından Kuzey-Orta Portekiz'de yanmış okaliptüs (eucalypt) plantasyonlarında gerçekleştirilen bu çalışmada, yangın sonrası toprak su geçirimsizliğinin (SWR) mekânsal ve zamansal değişimleri incelenmiştir. 2005 ve 2006 yıllarında, yangından etkilenmiş altı farklı alanda yapılan araştırma, yangın öncesinde farklı toprak yönetimi uygulamalarına (sürülmüş ve sürülmemiş) tabi tutulmuş sahaları kapsamıştır. SWR analizleri, toprak yüzeyinden başlayarak 2–3 cm, 7–8 cm ve 14–16 cm derinliklerde yapılmıştır. Bulgular, kül tabakasının genellikle ıslak kaldığını, ancak 3 cm derinlikten itibaren toprağın güçlü ve aşırı geçirimsizlik seviyelerine sahip olduğunu göstermiştir. Derinlik arttıkça geçirimsizlik şiddeti azalmıştır. Eğim boyunca örnekleme yapılan günlerin yarısında belirgin mekânsal farklılıklar tespit edilmiş ve bu durum, genel olarak aşırı geçirimsiz koşullar altında bile yer yer ıslak alanların bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, toprak geçirimsizliği zamansal olarak yüksek duyarlılık göstermiş, önceki yağış miktarları ve toprak nemi ile ters orantılı bir ilişki sergilemiştir. SWR seviyelerindeki dikkate değer değişimler yalnızca birkaç hafta içinde meydana gelmiş ve bu, yangın sonrası hidrofobik koşulların hem kısa sürede hem de mekânsal olarak hızla değişebileceğini ortaya koymuştur.

Martins vd., (2020) tarafından yapılan çalışmada, yangınların ve yamaç bakı koşullarının Portekiz'in kuzeyindeki Akdeniz iklimine sahip eukaliptüs plantasyonlarında toprak su geçirimsizliği (SWR) üzerindeki etkileri incelenmiştir. 2010 yılında meydana gelen bir yangının ardından, biri yanmamış (U-SE, güneydoğu bakılı) ve ikisi yanmış (B-SE, güneydoğu; B-NW, kuzeybatı bakılı) olmak üzere üç farklı alanda 2010–2012 yılları arasında her 1–2 haftada bir SWR ve toprak nemi (SMC) ölçümleri yapılmıştır. Bulgulara göre, yanmamış alandaki SWR değerleri sürekli olarak çok yüksek düzeyde kalırken, yangın

geçirmiş alanlarda yangın sonrası SWR bir kademe düşmüştür. Özellikle kurak dönemlerde, yanmamış alanlarda daha yüksek SWR değerleri kaydedilmiş, nemli dönemlerde ise bu fark azalmıştır. Yamaçların yönü yıllık ortalamada belirgin bir etki göstermese de, kuzeybatı yönlü alanların, güneydoğuya göre daha fazla su geçirimsizliği sergilediği görülmüştür. Yangın sonrası bakı koşullarının SWR üzerindeki etkisi özellikle kurak sezonlarda daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca yağışlarla artan toprak neminin, SWR ile ters yönde ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak çalışma, yangınların ve topografik faktörlerin SWR üzerindeki etkileşimlerini ortaya koyarak, yangın sonrası toprak su dinamiklerini anlamada önemli katkılar sağlamıştır.

Mataix- Solera vd., (2013) tarafından yapılan çalışmada, 2008 yazında İspanya'nın Alicante bölgesi ve İsrail'in Carmel bölgesinde meydana gelen yangınların ardından toprak su geçirimsizliğinin (SWR) değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Beş farklı sahada yürütülen çalışmada hem yanmış hem de yanmamış alanlardan 0–2,5 cm derinlikte alınan toprak örnekleri üzerinde WDPT (Water Drop Penetration Time) testi uygulanmış; pH, elektriksel iletkenlik, organik karbon ve mineralojik bileşim gibi özellikler analiz edilmiştir. Ayrıca yangın sıcaklıkları, NIR (yakın kızılötesi) spektroskopisi kullanılarak tahmin edilmiştir. Bulgular, yangınların toprak su geçirimsizliği sıklığını belirgin şekilde artırdığını ortaya koymuş; kontrol alanlarında SWR oranı %14 iken, yanmış alanlarda bu oran %54'e yükselmiştir. Toprak organik madde içeriğinin SWR gelişimi üzerinde belirleyici olduğu, yüksek organik maddeye sahip topraklarda geçirimsizlik oranının daha düşük seyrettiği tespit edilmiştir. Ayrıca, mineralojik yapı da etkili bulunmuş; örneğin, kaolinit içeriği yüksek olan topraklarda SWR daha az görülmüştür. Saha ölçümleri ile laboratuvar sonuçları arasında orta düzeyde bir korelasyon ($R^2=0,549$) bulunmuş, ancak saha verilerinin genellikle daha yüksek SWR değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Bu fark, laboratuvar da kullanılan bozulmuş örneklerin saha koşullarını tam olarak yansıtmamasından kaynaklanmıştır. Sonuç olarak çalışma, yangın sonrası toprak su geçirimsizliğinin hem sıklık hem de şiddet açısından arttığını göstermiş; bu etkinin toprak özellikleriyle güçlü biçimde ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

Mataix-Solera vd., (2011) tarafından yapılan derleme niteliğindeki çalışmada, orman yangınlarının toprak özellikleri üzerindeki etkileri, özellikle de toprak agregat stabilitesi (AS) üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Yangınların toprak yapısı üzerindeki etkilerinin yangın şiddeti, süresi, toprak tipi ve yangın öncesi saha koşulları gibi çok sayıda faktöre bağlı olduğu vurgulanmıştır. Yüksek sıcaklıklar, organik madde ve besin maddelerinde kayba neden olarak toprak yapısını bozabilmekte; bu da özellikle yüksek şiddetli yangınlarda agregatların parçalanmasına yol açabilmektedir. Ancak bazı durumlarda, yüksek sıcaklıkta

demir ve alüminyum gibi minerallerin yeniden kristalleşmesi sonucu agregat stabilitesinde artış da gözlenebilmektedir. Düşük şiddetli yangınların genellikle agregat stabilitesi üzerinde belirgin bir etkisi olmamakla birlikte, hidrofobik tabaka oluşumu gibi dolaylı yollarla agregat stabilitesinde artışa neden olabileceği belirtilmiştir. Çalışmada, yangın şiddeti ile agregat stabilitesi arasındaki ilişkinin karmaşık ve bağlama özgü olduğu vurgulanmış; bu nedenle yangın sonrası toprak sisteminin davranışını tam olarak anlayabilmek için organik madde miktarı, mikrobiyal biyokütle, su geçirimsizliği, toprak dokusu ve yangın şiddeti gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Varela vd., (2010) tarafından Galiçya'daki çam ormanlarında gerçekleştirilen bu çalışmada, yangınların toprak agregat stabilitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; bu süreçte litolojik farklılıklar, organik madde içeriği ve su geçirimsizliğinin rolü incelenmiştir. Yanmış ve yanmamış komşu sahalardan 18 çift örnek alınarak karşılaştırmalı analizler yapılmış; ayrıca bazı örnekler laboratuvar ortamında 25 °C ile 460 °C arasında ısıtılarak yangın şiddetinin etkileri test edilmiştir. Bulgular, düşük sıcaklıklarda (≤ 220 °C) agregat stabilitesinin ya değişmediğini ya da arttığını, ancak 380 °C ve üzeri sıcaklıklarda organik maddenin yanması nedeniyle belirgin bir stabilite kaybı yaşandığını göstermiştir. Yangın sonrası topraktaki organik madde miktarı bazı alanlarda artarken bazı alanlarda azalmıştır; bu farklılığın litolojik yapıdan kaynaklandığı belirlenmiştir. Özellikle metamorfik kayalar üzerinde agregat stabilitesinde artış gözlenmiştir. Çalışma, yangınların toprak yapısı üzerindeki etkilerinin hem yangın şiddetine hem de ana kaya türüne bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur.

Türkiye'de orman yangınlarının toprak üzerindeki etkilerine dair araştırmaların sınırlı sayıda olması dikkat çekerken, Yıldız vd. (2010) tarafından Batı Akdeniz Bölgesi'nde, Fethiye Orman İşletme Müdürlüğü sınırlarında gerçekleştirilen çalışmada, yangın sonrası farklı zaman dilimlerinde (iki hafta, bir yıl, iki yıl ve sekiz yıl) yanmış alanlardan alınan toprak örnekleriyle fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Buna göre, yangın sonrası 0–20 cm derinlikte toprak organik karbon (C) ve kation değişim kapasitesinde (CEC) %40 oranında azalma gözlenmiş, ancak bu azalma bir yıl içinde eski seviyelerine dönmüştür. Yeni yanmış topraklarda magnezyum (Mg) konsantrasyonu da belirgin şekilde düşmüş; buna karşın bir yıl içinde bu değer de toparlanmıştır. Toplam azot (N) konsantrasyonları yangından bir ve iki yıl sonra diğer alanlara göre %90 daha yüksek bulunmuş; toplam fosfor (P) konsantrasyonu ise yeni yanmış alanlarda, diğer alanların ortalamasının dokuz katı kadar artmıştır. Çalışma, yangınların kısa vadede bazı bitki besin maddelerinde artışa neden olurken, aynı zamanda toprak organik maddesinin ve besin havuzlarının kaybıyla uzun vadede toprak verimliliğini olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymuştur. Yangınların etkilerinin yangın şiddeti, sıklığı ve

toprak özelliklerine bağlı olarak değiştiği; dolayısıyla bu etkilerin mutlak anlamda faydalı mı zararlı mı olduğuna dair genel bir yargıya varmanın güç olduğu vurgulanmıştır.

Ekinci (2006) tarafından yürütülen çalışmada, 2002 yılında Çanakkale'nin Lâpseki ilçesinde meydana gelen orman yangınının ardından yanmış ve yanmamış alanlardan toplanan toprak örnekleriyle, yangının toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yangından sonraki iki hafta içinde alınan örneklerde yapılan analizler sonucunda, yanmış topraklarda pH (5,88), elektriksel iletkenlik (576,67 $\mu\text{mhos/cm}$), toplam organik azot (%0,57), mevcut fosfor (51,74 mg/kg) ve potasyum (194,15 mg/kg) değerlerinin yanmamış alanlara göre belirgin şekilde yüksek olduğu; buna karşılık kation değişim kapasitesi (CEC), toplam porozite (%48,52), su geçirgenliği (5,47 cm/h), toplam organik karbon (%7,14) ve toprak su içeriğinde azalma olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, yangının kısa vadede bazı besin maddelerinde artışa neden olmakla birlikte, genel olarak toprak yapısını olumsuz etkilediğini ve özellikle su tutma kapasitesi ile geçirgenlik gibi fiziksel özellikleri zayıflattığını ortaya koymuştur.

Esen vd., (2023) tarafından Türkiye'nin Akdeniz iklim bölgesinde yer alan Adrasan-Kumluca yöresinde gerçekleştirilen çalışmada, 2016 yılında meydana gelen orman yangınının ardından yaklaşık üç yıl sonra (2019) farklı yangın şiddeti seviyelerine göre toplanan toprak örneklerinde, bazı element konsantrasyonlarının değişimi nötron aktivasyon analizi (NAA) yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bulgular, özellikle yanmış alanlarda kobalt (Co), krom (Cr), demir (Fe), magnezyum (Mg), manganez (Mn), nikel (Ni) ve çinko (Zn) elementlerinin konsantrasyonlarında belirgin artışlar olduğunu göstermiştir. En çarpıcı artışlar, 9,000 mg/kg'a kadar çıkan krom (Cr) ve 3,440 mg/kg'a ulaşan nikel (Ni) konsantrasyonlarında gözlemlenmiştir. Bu artışların, yangın sırasında bitki örtüsünün yanması ve mineralizasyon süreçleri ile doğrudan, ayrıca külün toprakla etkileşimi yoluyla dolaylı olarak gerçekleştiği belirtilmiştir. Araştırma, yangın sonrası bu toksik elementlerin toprakta birikiminin çevresel kirlilik riski taşıdığını, özellikle Cr ve Ni gibi potansiyel olarak toksik elementlerin insan sağlığı açısından ciddi tehdit oluşturabileceğini vurgulamıştır. Sonuç olarak çalışma, Türkiye'de orman yangınlarının toprak element dinamiklerine etkilerini inceleyen araştırmaların sınırlı olduğunu hatırlatmakta ve yangın sonrası toprak kalitesi ile halk sağlığı açısından daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

Orman Yangınlarının Yüzeysel Akış ve Erozyon Süreçlerine Olan Etkileri

Orman yangınları Akdeniz Havzası'nda yer alan Portekiz, İspanya, Fransa, Yunanistan ve Türkiye başta olmak üzere birçok ülkenin karşı karşıya kaldığı önemli bir sorundur. Bunun

dışında Akdeniz ikliminin görüldüğü Avustralya, ABD'nin Kaliforniya kıyıları, Orta Şili ve bazı Güney Afrika ülkeleri için de büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu yangınlar, yangına meyilli olan özellikle Akdeniz ikliminin görüldüğü sahalarda bitki örtüsünün ekolojik koşullarını ve yayılış alanlarını değiştiren doğal bir süreçtir (Trabaud, 2002). Ayrıca orman yangınlarının toprak erozyonu hızlandıran ve arazinin doğal yapısının bozulmasına yol açan ana nedenlerinden biri olduğu bilinmektedir (Shakesby, 2011). Doğal ve antropojenik sebepler sonucunda çıkan orman yangınlarının, iklim ve arazi kullanımındaki değişiklikler nedeniyle gelecekteki ekosistemler ve toplumlar üzerindeki etkilerinin artması beklenmektedir (Moritz vd., 2014).

Orman yangını geçirmiş sahaların en karakteristik özellikleri arasında yangına bağlı olarak bitki örtüsünün ve orman altı örtünün ortadan kalkması ve toprak yüzeyinde bir kül tabakasının oluşumu ile kendini belli eder. Orman yangınlarının ekosistem üzerindeki bu etkileri, bitki örtüsü tipine, topografya özelliklerine, toprak tipi ve nem içeriğine, yangın yoğunluğuna, şiddetine ve yangın sonrasındaki meteorolojik koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Certini, 2005; Zituni vd., 2019).

Yangın geçirmiş sahalarda bitki örtüsünün ortadan kalması sonucunda toprağın koruyucu örtüsü azalır. Yangın sonrasında bitki örtüsünden yoksun olan çıplak toprak yüzeyindeki gözenek ve boşluklar, şiddetli yağmurlar esnasında, çarpan yağmur taneleri ile hızla kapanmakta ve bu durum zeminin geçirgenliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Sonuçta zemine sızma imkânı bulamayan sular hızla yüzeysel akışa geçerek başlangıçta parmak (rill) erozyonu ve sonrasında ise gelişen oyuntu (gully) erozyonu şeklinde yüzeysel erozyonu hızlandırmış olur (DeBano, 2000; DeBano vd., 1998; Robichaud vd., 2000).

Orman yangınlarının arazi üzerindeki etkilerinden biri de toprak yapısında meydana getirdiği değişikliklerdir. Yangın sonucunda toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde oluşabilecek muhtemel değişiklikler daha çok yangının yoğunluğuna ve şiddetine bağlıdır. Genellikle orta ila yüksek şiddetteki orman yangınları organik madde ve mineral bağların yok edilmesiyle toprak yapısını değiştirebilir (Fernandez vd., 2010; Larsen ve MacDonald, 2007; Parsons vd., 2010).

Yangın geçirmiş sahalarda; özellikle eğimin yüksek olduğu dik yamaçlarda yağışlarla birlikte çok sayıda organik ve inorganik maddelerin taşınması kendi içerisinde farklı sonuçları doğurmaktadır. Yangın esnasında orman ve orman altı bitki örtüsünün yanması, makro ve mikro besin maddeleri bakımından zengin olan üst toprağın zarar görmesine sebep olur ve bunun sonucunda toprak verimliliği önemli oranda azalabilir. Ayrıca erozyon sonucunda yanmış sahalardan taşınan makro ve mikro besin maddeleri akarsulara, göl ve göletlere ulaşarak sucul

ekosistemlerde suyun kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirir ve su kirliliğinin artmasına neden olmaktadır (Reiman ve Clayton, 1997; Bowman ve Boggs, 2006).

Orman yangınlarının bölgenin ekosistem özelliklerine, toprak yapısına ve erozyon süreçlerine etkisini belirleyen faktörlerden biri de yangından sonra geçen süredir. Bu konu üzerine yapılan çalışmalar, orman yangınlarından hemen sonra erozyon miktar ve oranlarının ani bir şekilde artma eğiliminde olduğunu, ancak yangından sonra taşınan sediman miktarlarının zamanla azaldığını göstermiştir (Sevink vd., 1989; Shakesby vd., 1993).

Orman yangını geçirmiş sahalarda yüzeysel akış ve erozyon süreçlerini etkileyen diğer faktör ise yangın sonrasında bölgenin yağış özellikleridir. Çünkü bitki örtüsünün kısmen veya tamamen yandığı sahalarda erozyona açık hale gelen toprak katmanı (Shakesby ve Doerr, 2006) yağışın süresi, karakteri, yoğunluğu ve şiddetine bağlı olarak erozyon miktar ve oranları farklılık göstermektedir (Çakmak vd., 2021a, Çakmak vd., 2021b). Nitekim Shakesby ve Doerr (2006) ve Shakesby (2011) tarafından yapılan bir çalışmada Portekiz’de orman yangını sonrasındaki ilk sağanak karakterli yağışlarla yüzeysel akış, erozyon miktar ve oranlarının arttığı belirlenmiştir. Bu durumun nedenleri olarak bitki örtüsünün ve orman altı örtüsünün kısmen veya tamamen yanması (Varela vd., 2010; Mataix-Solera vd., 2011), toprak geçirimsizliğinin artması (Scott vd., 1998) ve toprak özelliklerinde yangın kaynaklı değişiklikler gösterilmiştir (Keizer vd., 2008). Yangın sonrasında ilerleyen yıllara bağlı olarak bitki örtüsünün kendini yenilemeye başlamasıyla yüzeysel akış ve erozyon miktarları, azalma eğiliminde olmuştur (Prosser ve Williams, 1998).

Shakesby (2011) tarafından yapılan kapsamlı bir derleme çalışmasında, orman yangınlarının Akdeniz bölgesinde toprak erozyonu üzerindeki etkileri ele alınmış ve bu alandaki literatürün önemli bir bilgi birikimi oluşturduğu vurgulanmıştır. Çalışmaya göre, 1960’lardan bu yana orman yangınlarının sıklığı ve şiddeti artış göstermiş; bu durum küresel ısınma, kuraklık eğilimleri, kırsal alanların terk edilmesi, arazi kullanımındaki değişiklikler ve yangıcı türlerle yapılan ağaçlandırmalar gibi sosyo-ekonomik faktörlerle ilişkilendirilmiştir. Yangın sonrası erozyon süreçlerine ilişkin araştırmaların özellikle 1980’lerde İspanya’da başladığı ve zamanla diğer Akdeniz ülkeleri ile İsrail’e yayıldığı belirtilmiştir. Toprak kayıpları yerel ölçekte ilk yıl içerisinde ortalama 45–56 ton/ha gibi yüksek değerlere ulaşabilse de bazı sahalarda bu miktarın 1 ton/ha’dan düşük olduğu, bu farklılığın toprak yapısı (ince tekstürlü ve taşlı zeminler) ile yeniden gelişen bitki örtüsüne bağlı olduğu açıklanmıştır. Yangın sonrası toprak tekstüründe bozulma ve organik madde kaybı, yüzey akışı artırarak erozyon riskini yükseltirken; özellikle güneye bakan yamaçlarda bu riskin daha belirgin olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak, yangın sonrası erozyonun şiddeti; iklim, topografya, toprak özellikleri, yangın

şiddeti ve bitki örtüsünün yeniden gelişimi gibi faktörlerin etkileşimiyle belirlendiği vurgulanmıştır.

Mayor vd. (2007) tarafından İspanya'nın Akdeniz iklim kuşağında yer alan Alicante bölgesinde gerçekleştirilen bir çalışmada, 1998 yılında meydana gelen bir orman yangınının ardından yüzeysel akış ve sediman verimi üzerindeki orta vadeli etkiler değerlendirilmiştir. Yanmış (2,1 ha) ve yanmamış (22,9 ha) olmak üzere iki komşu havzada yedi yıl boyunca yürütülen gözlemler sonucunda, yangın sonrası toplam yüzeysel akışın (35 mm) ve sediman veriminin (4.563 kg/ha), yanmamış havzaya (0,03 mm ve 0,12 kg/ha) kıyasla dramatik biçimde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu etkilerin yangından sonraki ilk birkaç yılda belirgin şekilde arttığı, ancak üçüncü yıldan itibaren azalmaya başladığı görülmüştür. Beş yıl sonra bile, yanmış ve yanmamış havzalar arasında yüzeysel akış ve sediman üretimi açısından iki katı aşan farkların sürdüğü, bunun da bitki örtüsünün toparlanmasındaki yavaşlıktan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Çalışma, Akdeniz ekosistemlerinde yangın sonrası erozyon riskinin yalnızca kısa vadeyle sınırlı kalmadığını, özellikle kurak iklim koşullarında bu etkilerin uzun yıllar devam edebileceğini ortaya koymuş; ayrıca, yangın sonrası rehabilitasyon stratejilerinin planlanmasında bu uzun vadeli etkilerin mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Prosser ve Williams (1998) tarafından Sydney çevresindeki okaliptüs ormanlarında yapılan bir çalışmada, 1994 yılında meydana gelen büyük yangınların ardından yüzeysel akış ve erozyon üzerindeki etkiler 10 ay boyunca izlenmiştir. Yanmış ve yanmamış alanlar karşılaştırılarak toprak su geçirimsizliği (hidrofobiklik), yüzeysel akış ve sediman taşınımı gibi parametreler analiz edilmiştir. Yangın sonrası, toprakta organik bileşiklerin buharlaşarak yüzeyde hidrofobik bir tabaka oluşturduğu ve bunun özellikle kumlu yapıli topraklarda suyun infiltrasyonunu engelleyerek yüzeysel akışı artırdığı belirlenmiştir. Bitki örtüsünün yok olmasıyla birlikte yanmış alanlarda yüzeysel akışın, yanmamış alanlara göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde arttığı tespit edilmiştir. Ancak erozyonun toplam sediman verimi açısından daha lokal ve sınırlı kaldığı, belirgin sediman taşınımı için yılda en az bir kez yoğun yağış gerektiği, fakat çalışmanın yürütüldüğü sürede böyle bir yağış gerçekleşmediği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, yangın sonrası özellikle bitki örtüsünün kaybı ve toprağın suyu geçirme kapasitesindeki azalma nedeniyle yangın sonrası dönemde yüzeysel akışın belirgin biçimde arttığı ortaya konmuştur.

Reneau vd., (2007) tarafından yapılan bir derleme çalışmasında, 2000 yılında New Mexico'daki Cerro Grande yangını sonrasında Los Alamos Rezervuarına taşınan sediman miktarları ve tane boyutu dağılımları beş yıllık süreçte değerlendirilmiştir. Yangının yaklaşık 17.400 hektarlık bir alanı etkileyerek vejetasyonu tahrip etmesiyle birlikte, toprak yüzeyinde

oluşan hidrofobik katmanlar yüzeysel akışı ve erozyonu artırmıştır. İlk yıl rezervuara taşınan sedimanın %90'ından fazlası kül içerirken, bu etki ikinci yılın sonunda belirgin biçimde azalmış ve askıda taşınan sedimanlardaki kül oranı önemsiz düzeye gerilemiştir. İlk yıl taşınan sedimanların %70'ini ince taneli fraksiyonlar oluşturmuş, bu fraksiyonun %19'u kül içermiştir. Beş yıl boyunca ince taneli sediman miktarı yangın öncesi seviyelere kıyasla yüksek kalmış olsa da ikinci yıldan itibaren düşüş göstermiştir. Buna karşılık iri taneli sediman taşınımı kar erimeleriyle tetiklenen düzensiz bir desen sergilemiş ve özellikle 4. ve 5. yıllarda artış göstermiştir. ¹³⁷Cs izotopu kullanılarak kül taşınımı takip edilmiş ve sediman dinamiklerinin hem tane boyutuna hem de mevsimsel hidrometeorolojik koşullara bağlı olduğu gösterilmiştir. Çalışma, yangın sonrası ilk yıllarda su kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerin büyük ölçüde ince taneli ve kül içeren sedimanlarla sınırlı kaldığını, uzun vadede ise iri taneli sedimanların taşınımının daha etkili hale geldiğini vurgulamaktadır.

Lane vd., (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, 2003 yılında Güneydoğu Avustralya'da meydana gelen büyük bir orman yangınının ardından dağlık havzalarda akım ve sediman taşınımındaki değişimler analiz edilmiştir. Yangın yaklaşık 1 milyon hektarlık ormanlık alanı etkilemiş ve inceleme için iki yangın etkili havza (Slippery Rock Creek ve Springs Creek) ile bir kontrol havzası (West Kiewa Nehri) belirlenmiştir. 15 dakikalık aralıklarla yapılan ölçümlere göre, yangını izleyen ilk iki su yılı boyunca Slippery Rock Creek'te aım %65–75, Springs Creek'te ise 2003–2004 ve 2004–2005 yıllarında sırasıyla %40 ile %76–94 oranlarında artmıştır. Kontrol havzası olan West Kiewa Nehri'nde ise bu tür belirgin artışlar gözlemlenmemiştir. Sediman verimleri yangından sonra ciddi şekilde artış göstermiş; yangının ilk yılı boyunca yangın etkili havzalarda sediment miktarları 8–9 kat artarken, ikinci yılda bu artış 2–4 kat arasında devam etmiştir. Çalışma, yangının akarsu sistemlerinde hem akım rejimi hem de sediman taşınımı açısından belirgin ve hızlı etkiler yarattığını ortaya koymuştur.

Cerda ve Lasanta (2005) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, İspanya'nın Merkez Pirene Dağları'nda yangınların yüzeysel akış ve sediman taşınımı üzerindeki uzun vadeli etkileri değerlendirilmiştir. 1991'de biri kontrol (çalı ve otlarla kaplı) diğeri ise tamamen yanmış iki deneysel parsel oluşturulmuş, 1993'te ise ek olarak bir yanmış parsel (Yanmış-2) daha dahil edilmiştir. İlk iki yıl boyunca, Yanmış-1 parselinde yüzeysel akış katsayısı %7 olarak hesaplanmış, bu oran kontrol parselinde %4,2 bulunmuştur. Yanmış-2 parselinde ise yüzeysel akış kontrol parseline göre iki kat fazla olup, sediman konsantrasyonu 649 mg/l ve erozyon oranı 566 kg/ha/yıl olarak ölçülmüştür. Yangın sonrası bitki örtüsünün geri kazanımı oldukça hızlı olmuş; Yanmış-1 parselinde bu süreç iki yıl sürerken, Yanmış-2 parselinde yedi yıl

boyunca yüksek erozyon değerleri devam etmiştir. Bu bulgular, yangının etkilerinin yangın sonrası bitki örtüsü gelişimine ve arazi yönetimine bağlı olarak uzun vadeli olabileceğini ortaya koymuştur.

Benavides-Solorio ve MacDonald (2005) tarafından yapılan bir başka çalışmada ABD'nin Colorado Front Range bölgesindeki orman yangınlarının toprak erozyonunu üzerindeki etkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, yüksek, orta ve düşük şiddetteki üç doğal ve üç kontrollü yangın alanlarında yaz aylarında ve kar erimeleri sırasında taşınan sediman miktar ve oranları ölçülmüştür. Buna göre yüksek şiddetteki yangın alanlarından elde edilen sediman oranları $0,2-1,0 \text{ kg/m}^2/\text{yıl}$ arasında değişirken, orta şiddetteki alanlarda bu oran $0,02 \text{ kg/m}^2/\text{yıl}$, düşük şiddetteki alanlarda ise $0,005 \text{ kg/m}^2/\text{yıl}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu sedimanın %90'ından fazlası ise yaz aylarındaki konvektif karakterli sağanak yağışlar esnası taşındığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda düşük şiddetteki yangınlardan elde edilen sediman oranları, yüksek şiddetteki yangınlara göre belirgin şekilde daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

Moody ve Martin (2001) tarafından yapılan bir çalışmada Batı ABD'deki üç dağlık havzada, orman yangınlarının ardından meydana gelen yağışlar ile en yüksek (pik) debi değerleri arasındaki ilişkileri incelenmiştir. Bu çalışma üç farklı yangın sonrası havzada (Black Hills, Güney Dakota; Buffalo Creek, Colorado; Cerro Grande, New Mexico) gerçekleştirilmiştir. Buna göre yangın sonrası yıllarda, en yüksek (pik) debilerinin yıllık akışa göre çok daha fazla arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, Bear Gulch bölgesinin maksimum akımı, 10 yıllık bir yağış olayında $3,2 \text{ m}^3/\text{saat/km}^2$ olarak ölçülürken, Spring Creek'te ise bu değer 100 yıllık bir yağış olayında $24 \text{ m}^3/\text{saat/km}^2$ olarak kaydedilmiştir. Rendija Canyon'da ise maksimum değer $50 \text{ m}^3/\text{saat/km}^2$ olarak belirlenmiştir. Özellikle, yağış yoğunluğunun 10 mm/saat ın üzerine çıkması durumunda, maksimum akımların büyüklüğündeki artışın daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir.

Blake vd., (2009) tarafından Güneydoğu Avustralya'da yapılan bir çalışmada, 2001-2002 yıllarında 89 hektarlık bir su havzasında gerçekleşen orta şiddetteki bir orman yangınının ardından sediman taşınımını incelemek amacıyla radyoizotop izleyicileri (^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ve ^{137}Cs) kullanılmıştır. Bulgular, ^7Be ve $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 'nin kül, ölü örtü ve organik maddeyle güçlü ilişkili olduğunu, ^{137}Cs 'nin ise daha derin mineral toprakları temsil ettiğini ortaya koymuştur. Erozyonun en yoğun olduğu bölgeler dik yamaçlar olarak tanımlanmış ve bu alanlarda erozyonun temel olarak yüzey kütle hareketlerinden kaynaklandığı ve geçirimsizlik etkisiyle arttığı belirlenmiştir. Yangın sonrası tahmini sediman verimi $58 \pm 25 \text{ ton/km}^2$ olarak hesaplanmış; ayrıca yanmış alanlardaki partikül fosfor taşınımı, yanmamış alanlara göre 10 kat daha yüksek bulunmuştur. Çalışma, yangınların uzun dönemli sediman ve fosfor taşınımı

üzerinde ciddi etkiler yarattığını vurgularken, bu durumun su kalitesi açısından önemli riskler taşıdığına dikkat çekmiş ve radyoizotop izleme tekniklerinin bu tür araştırmalarda etkili bir araç olduğunu göstermiştir.

Thomas vd., (1999) tarafından Kuzey Portekiz'in nemli Akdeniz iklimine sahip bölgelerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, 1992 yılında okaliptüs (*Eucalyptus globulus*) ve sahil çamı (*Pinus pinaster*) ormanlarında meydana gelen yangınların ardından besin maddesi kayıpları incelenmiştir. Yanmış ve yanmamış dört araştırma sahasında kurulan sediment tuzakları aracılığıyla yapılan ölçümler, yangın sonrası toplam azot, değiştirilebilir potasyum ve özellikle mevcut fosfor kayıplarının 3–4 kat arttığını ortaya koymuştur. İlk dokuz ay boyunca erozyon hızları yüksek seyretmiş, zamanla azalma eğilimi göstermiştir. Erozyonla birlikte taşınan ince parçacıklar ve organik madde, besin maddelerince zengin sedimanların kaybına neden olmuştur. Okaliptüs ormanlarında organik madde içeriğinin yüksek olması, bu sahalardaki besin kaybını çam ormanlarına göre daha belirgin hale getirmiştir. Çalışma, özellikle mevcut fosfor kayıplarının orman ekosistemlerinin uzun vadeli verimliliği açısından kritik bir tehdit oluşturduğunu vurgulamıştır.

Hueso-Gonzalez vd., (2018) tarafından İspanya'nın güneyindeki El Pinarillo bölgesinde yürütülen bir çalışmada, 2011 yılında çıkarılan kontrollü yangının yüzeysel akış ve erozyon üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkileri değerlendirilmiştir. Akdeniz iklim koşullarında gerçekleşen bu uygulamanın ardından, ilk iki yıl boyunca yüzeysel akış ve sediman taşınımında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Bu artışlar, bitki örtüsünün azalması ve toprak yüzeyinin açıkta kalmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ancak yangından beş yıl sonra, yüzeysel akış ve sediman taşınımı değerleri yangın öncesi seviyelere dönmüş ve bu toparlanma, bitki örtüsünün yeniden gelişmesiyle açıklanmıştır. Çalışma, kontrollü yangınların kısa vadede yüzeysel süreçleri olumsuz etkileyebileceğini, ancak vejetasyonun toparlanmasıyla birlikte bu etkilerin zamanla azalabileceğini ortaya koymuştur.

Smith ve Dragovich (2008) tarafından Güneydoğu Avustralya'daki Kosciuszko Ulusal Parkı'nda yürütülen bir diğer çalışmada, 2003 yılında meydana gelen büyük bir orman yangınının yamaç erozyonuna etkileri değerlendirilmiştir. Derin vadiler ve dik yamaçlardan oluşan Snowy Mountains bölgesinde gerçekleştirilen araştırmada, yanmış ve yanmamış alanlarda erozyon pinleri aracılığıyla üç dönem boyunca (0–59 gün, 59–359 gün, 359–795 gün) yüzey değişimleri izlenmiştir. Sonuçlara göre, yanmış yamaçlarda ortalama yüzey kaybı 6,7 mm ile yanmamış yamaçlardaki 4,9 mm'ye göre daha fazla olmuş, özellikle alt yamaçlar yüksek eğim ve düşük bitki örtüsü nedeniyle en fazla erozyon kaybı göstermiştir. Üst yamaçlarda ise daha düşük erozyon oranları kaydedilmiştir. Yangın sonrası meydana gelen ilk

yağışların bazı bölgelerde anında, bazı bölgelerde ise gecikmeli olarak erozyon tepkisini tetiklediği, bu farklılığın ise toprak nemi ve yüzey özelliklerinin değişimine bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, yangın sonrası topografya ve bitki örtüsünün erozyon dinamikleri üzerindeki belirleyici etkilerini ortaya koymuştur.

Mastrolonardo vd., (2024) tarafından yapılan bir başka çalışmada 2018 yılında İtalya'nın Pisa Dağları'nda meydana gelen büyük bir orman yangını sonrası toprak erozyonu ve sediman miktar ve oranlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yangın, yaklaşık 1,000 hektarlık alanı etkilemiş ve ilk yağışların ardından meydana gelen erozyon olaylarını değerlendirmek amacıyla bir hidrolik model geliştirilmiştir. Araştırma, uzaktan algılama ile yangın şiddetinin haritalanması ve yangının ardından meydana gelen sedimanın bir kontrol barajı önünde örneklenmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. İlk yağışların, öncelikle organik olmayan ve açık renkli sedimanları taşıdığı, sonraki yağışların ise zengin organik madde içeren malzemeler getirdiği gözlemlenmiştir. Buna göre erozyon miktarı, toplam 7.85 ton/ha olarak hesaplanmış ve bu değer, yanmamış koşullarda havzanın ortalama yıllık potansiyel erozyon oranının %42'sine karşılık geldiği belirlenmiştir. Bu oran, havzadaki toprakların ince ve taşlı yapısından kaynaklanmasından dolayı diğer Akdeniz bölgesinde yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında daha düşük bir seviyede bulunmuştur.

Ryan vd., (2011) tarafından Wyoming'deki Little Granite Creek havzasında gerçekleştirilen bir başka çalışmada, 2000 yılında meydana gelen bir orman yangınının yüzeysel akış ve sediman taşınımı üzerindeki etkileri, yangın öncesinde 13 yıl boyunca toplanan verilerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yangından sonraki ilk üç yıl, sıcak ve kurak iklim koşullarının yanı sıra düşük kar örtüsü ve az sayıda sağanak yağışla geçmesine rağmen, sediman verimi yangın öncesine kıyasla yaklaşık beş kat artış göstermiştir. Sediman taşınımının %54'ü kar erimesi döneminde, %44'ü ise yaz sağanakları sırasında meydana gelmiştir. Ancak zamanla bu değerler düşüş göstermiş ve sediman verimi yangın öncesi düzeylere yaklaşmıştır. Yangın sonrası bazı orta şiddetli yağışlar önemli sediman artışlarına yol açmamış, bu durum yangının etkisinin diğer bölgelerdeki yüksek erozyon ve taşkın olaylarına kıyasla daha sınırlı olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışma, orman yangınlarının akarsu sistemlerinde sediman taşınımı ve yüzeysel akış üzerinde belirgin ancak geçici etkiler yarattığını ve bu etkilerin büyük ölçüde iklim koşulları ile mevsimsel süreçlere bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Shakesby ve Doer (2006) tarafından yapılan bir derleme çalışmada, son yirmi yılda Akdeniz Havzası, Avustralya ve Güney Afrika'da gerçekleştirilen araştırmalar temel alınarak, orman yangınlarının toprak, yüzeysel akış ve erozyon süreçleri üzerindeki etkileri kapsamlı

şekilde incelenmiştir. Çalışmada, yangınların doğrudan etkileri arasında kaya yüzeylerinin hızla aşınması ve yangının toprağın fiziksel yapısını bozarak infiltrasyon oranlarını azaltması veya artırması gibi süreçler yer almaktadır. Dolaylı etkiler ise bitki örtüsünün yok olmasıyla başlayan azalan yeraltı suyu sızması, artan yüzeysel akış ve erozyon süreçlerindeki hızlanma şeklinde tanımlanmıştır. Özellikle küçük ölçekli alanlarda yüksek toprak kayıpları gözlenirken, daha geniş ölçeklerde bu kayıpların seyrelerek gerçekleştiği ifade edilmiştir. Yangın sonrası yüzeysel akış artışı, yamaç erozyonunu tetikleyerek akarsu kanal yapılarında kalıcı değişimlere yol açabilir. Bu etkilerin şiddeti, yangının şiddetine ve toprak özelliklerine bağlıdır. Çalışma, yangın sonrası toprak kayıplarının genellikle ilk birkaç yıl içinde en yüksek düzeyde gerçekleştiğini ve bu dönemin ekosistem yönetimi açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Sheridan vd., (2007) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, 2003 yılında Avustralya'nın Victoria bölgesinde çıkan büyük bir orman yangını sonrasında okaliptüs ormanlarındaki eğimli arazilerde yüzeysel akış ve erozyon süreçleri incelenmiştir. Yangın sonrası 27 farklı eğimli arazide, parmak erozyonu (rill erozyonu) oranı 540 kat artarken, bu artış iki yıl içinde yangın öncesi düzeylere geri dönmüştür. Eğimli alanlarda toprak doygunluğunun yüksek olması, yüzey akışını sınırlandırmış ve hidrolik iletkenlik (Ksat) değerleri 100–1.000 mm/saat arasında değişmiştir. Bu yüksek iletkenlik değerleri, yağış sularının hızla toprağa sızmasını sağlamıştır. Ancak, yangın sonrası ilk altı ayda yüzeysel akış oranı %65'e, sediman konsantrasyonu ise 10 katına çıkmıştır. Erozyonun büyük kısmı, akarsu kenarındaki birkaç metrelik alanda ve parmak erozyonu süreçleriyle gerçekleşmiştir. Yangın sonrası erozyon riski, özellikle ilk kışta zirveye ulaşmış; erozyon oranları yangından hemen sonra 18 kat, altı ay içinde 2.240 kat artarken, bir yıl sonra yalnızca 2,5 kat fazla olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, yangın sonrası ilk yılın erozyon açısından kritik dönem olduğunu vurgulamıştır.

Kutiel ve Inbar (1993) tarafından İsrail'in Yoqneam Ormanı'nda yapılan çalışmada, Akdeniz iklim koşullarında meydana gelen düşük şiddetli bir orman yangınının ardından toprak besin maddeleri, yüzeysel akış ve sediman taşınımı üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. Yanmış ve yanmamış iki parsel karşılaştırıldığında, yangın sonrası özellikle amonyum ($\text{NH}_4\text{-N}$) ve nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$) düzeylerinde anlamlı artışlar tespit edilmiştir. Toplam azot miktarı başlangıçta %24 oranında azalsa da, beş ay içinde bu fark ortadan kalkmıştır. Fosfor (P) konsantrasyonu ise yangından sonraki ilk ayda 15 kat artmıştır. Toprak pH'ında değişim gözlenmezken, elektriksel iletkenlik (EC) yanmış parselde belirgin şekilde yükselmiştir. Her iki parselde de yüzeysel akış ve erozyon oranları düşük kalmış, üstelik yanmış parselde infiltrasyon kapasitesi daha yüksek olduğu için toplam akış miktarı daha az gerçekleşmiştir. Sonuç olarak bu çalışma, düşük şiddetli yangınların toprak besin maddelerinde geçici artışlar

sağlayarak toprak verimliliğini artırabileceğini, ancak yüzeysel akış ve erozyon üzerinde olumsuz etkiler yaratmadığını ortaya koymuştur.

Wagenbrenner ve Robichaud (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, orman yangınlarından sonra oluşan yatak yükü sediman taşınımı oranları analiz edilmiş ve bu oranların mekânsal ölçeklerle ilişkisi incelenmiştir. Araştırma, Colorado, Washington, Utah, Montana ve Arizona gibi farklı bölgelerdeki altı orman alanı ile iki yeni saha verisine dayanmaktadır. Bulgulara göre, yangın sonrası sediman verimi, yanmamış ormanlara kıyasla ortalama üç kat daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, sediman verimi alan büyüklüğüyle ters orantılı olarak azalmış ve yıllık sediman taşınım oranları (SDR) 0,0089 ile 1,15 arasında değişmiştir. Sediman taşınım oranları, en güçlü şekilde alan uzunluğu oranıyla ilişki göstermiştir. Diğer yandan, sediman verimleri üzerinde yağış özellikleri, eğim, alan büyüklüğü ve zemin örtüsü gibi yerel çevresel faktörlerin etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle yağış yoğunluğu (I_{10}), sediman taşınımını etkileyen en belirleyici faktör olarak öne çıkmıştır. Bu çalışma, yangın sonrası sediman taşınım süreçlerinin ölçek bağımlı olduğunu ve yağış dinamiklerinin bu süreçler üzerinde önemli rol oynadığını ortaya koymuştur.

Orman yangınlarının erozyon miktar ve oranlarının belirlenmesinde farklı yöntemlerin karşılaştırıldığı Salesa vd., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada İber Yarımadası'nın doğusundaki Llutxent bölgesinde, 2018 yılında meydana gelen bir orman yangını sonrası kesit alan metodu (CSA), hava fotogrametrisi (insansız hava araçları- UAV) ve yer fotogrametrisi yöntemleriyle belirlenen erozyon miktar ve oranlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmanın bulguları, üç yöntemle elde edilen toprak kaybı değerlerinin benzer olduğunu göstermiştir. Ortalama toprak kaybı, kesit alan metodu (CSA) yöntemiyle 1,404 mg/ha, hava fotogrametrisi (insansız hava araçları- UAV) ile 1,287 mg/ha ve akıllı telefonlarla (yer fotogrametrisi) 1,333 mg/ha olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, kesit alan (CSA) yönteminin hem uygulanabilirliği hem de maliyet etkinliği açısından hala en uygun yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, fotogrametrik yöntemler daha ayrıntılı topografik haritalar ve veri setleri sunma potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır.

Orman Yangınlarının Su Kaynakları Üzerine Etkileri

Ormanların geniş alanlar kapladığı akarsu havzaları, dünya genelindeki tatlı su temininin önemli bir bölümünü karşılamaktadır (Dudley & Stolton, 2003; Rockström vd., 2014). Su kaynakları açısından kritik öneme sahip olan bu ormanlık alanlar, günümüzde hem doğal hem de antropojenik tehditlerle karşı karşıyadır. Özellikle dünya nüfusunun sürekli artması ve Sanayi Devrimi'nden sonra hız kazanan kentleşme süreci, orman alanlarının

yerleşim ve altyapı ihtiyaçları doğrultusunda dönüştürülmesine neden olmuştur. Bunun yanı sıra ormanların tarım arazilerine çevrilmesi, madencilik faaliyetlerinin yaygınlaşması ve diğer arazi kullanım değişiklikleri de bu ekosistemler üzerindeki baskıyı artıran başlıca insan kaynaklı müdahaleler arasında yer almaktadır.

Tüm bu müdahalelere ek olarak, doğal ya da insan kaynaklı olarak meydana gelen orman yangınları da su kaynakları üzerinde ciddi etkiler yaratmaktadır (Pausas, 2004). Orman yangınları, her yıl dünya genelinde yaklaşık 300 ila 450 milyon hektar arasında bir alanı etkilemektedir (van der Werf vd., 2006). 1960–2013 yılları arasında ABD'de yıllık ortalama 1,8 milyon hektar, Kanada'da yaklaşık 2,1 milyon hektar ve Avustralya'da ise 0,8 milyon hektar orman yangınlarından etkilenmiştir (Canadian Council of Forest Ministers, 2013).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), küresel ısınmanın orman yangınlarının sıklığını ve şiddetini artırmaya devam edeceğini öngörmektedir (IPCC, 2013). Bu öngörüler, Kanada, Batı ABD, Güney Amerika, Orta Asya, Güney Avrupa, Güney Afrika ve Avustralya gibi bölgelerde daha sık ve daha büyük çaplı yangınların meydana geleceğine ilişkin modellemelerle de desteklenmektedir (Wotton vd., 2010). Orman yangınları, karasal ve sucul ekosistemler üzerinde uzun vadeli etkileri olan hem doğal hem de antropojenik bir bozulma göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Niemeyer, 2020). Aktif yangın sürecinde ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar, sucul organizmaların yaşamsal faaliyetlerini olumsuz etkileyerek içme suyu kaynaklarının kalitesini de düşürmektedir (Dunham vd., 2003; Bladon vd., 2014; Emelko vd., 2011; Smith vd., 2011).

Yangınlar, akarsulardaki fiziksel ve kimyasal su kalitesini azaltmakta (Dahm vd., 2015; Rust vd., 2018), hem yüzey hem de yeraltı su kaynaklarını olumsuz yönde etkilemekte (Bladon vd., 2014; Robinne vd., 2018) ve bölgenin ekosistem işleyişinde yapısal değişikliklere neden olabilmektedir (Rust vd., 2019a, 2019b). Yangının şiddetine ve yangın sonrası yağış rejimine bağlı olarak, yanmış yamaçlardan erozyon yoluyla kül ve sedimanlar (Moody & Martin, 2001; Silins vd., 2009), organik madde ve besin elementleri (Lane vd., 2008; Rhoades vd., 2011) ile birlikte önemli iyonlar ve ağır metaller (Reiman & Clayton, 1997; Bowman & Boggs, 2006) yüzey ve yeraltı sularına taşınabilmektedir.

Özellikle yangın sonrası kısa süreli fakat yüksek şiddetli sağanak yağışlar, erozyon süreçlerini hızlandırarak akarsularda askıda katı madde, besin elementi ve ağır metal (kirleticisi) konsantrasyonlarında kayda değer artışlara yol açmaktadır (Burke vd., 2013). Orman yangınlarının sucul ekosistemler üzerindeki etkileri arasında en çarpıcı göstergelerden biri, su ortamlarındaki ağır metal seviyelerinde gözlemlenen yükselişlerdir. Nitekim 2018 yılında Colorado'nun güneybatısında meydana gelen bir orman yangını sonucunda 21.000 hektarlık

kamu ve özel mülk alanı zarar görmüştür. Bu yangını takip eden şiddetli yağışlar, Hermosa Deresi ve Animas Nehri'ne yoğun erozyonla birlikte taşınan alüminyum (Al), kadmiyum (Cd), demir (Fe), kurşun (Pb), manganez (Mn) ve çinko (Zn) gibi ağır metallerin konsantrasyonlarında yangın öncesine kıyasla dramatik artışlara neden olmuştur. Örneğin, toplam alüminyum konsantrasyonu yangın sonrası 18,0 µg/L'den 5.900 µg/L'ye yükselmiş ve çoğu metalin konsantrasyonu su kalitesi standartlarının üzerinde seyrederek sucul yaşam için ciddi riskler oluşturmuştur (Rust vd., 2022).

Rust vd., (2019b) tarafından yapılan çalışmada, 2013 yılında Colorado'da meydana gelen orta ve yüksek şiddetli orman yangınının su kalitesi, makroinvertebrat çeşitliliği ve alabalık popülasyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yangın sonrası üç yıl boyunca yapılan izlemelerde, bulanıklık seviyeleri 3000 NTU'ye kadar yükselmiş, sucul ortamda metal ve besin maddesi konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiştir. Ancak bu etkilerin çoğu kısa vadeli olmuş ve üç yıl içinde su kalitesi ile biyolojik göstergelerin büyük ölçüde yangın öncesi düzeylere geri döndüğü belirlenmiştir. Çalışma, sucul ekosistemlerin yangın sonrası toparlanma kapasitesine ve geçici bozulmalara karşı gösterdiği dirençliliğe dikkat çekmektedir.

Rust vd., (2018) tarafından yapılan derleme çalışmasında, 1984-2015 yılları arasında Batı ABD'de meydana gelen 24.000'den fazla yangından elde edilen veriler kullanılarak orman yangınlarının su kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. 159 yangın ve 153 yanmış havzaya ait veriler ışığında, yangın sonrası ilk beş yıl içinde azot, fosfor, ana iyonlar ve bazı metallerin konsantrasyonlarında önemli artışlar gözlemlenmiştir. Çözünmüş maddelerin konsantrasyonu zamanla azalırken, parçacık halinde taşınan maddelerin artmaya devam ettiği belirlenmiştir. Ayrıca ilk iki yıl boyunca sediman taşınımında belirgin artış yaşanmış ve bu durum su kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir. Çalışma, yangınların ardından sucul ortamlarda hem kimyasal hem de fiziksel kirleticilerin taşınımında önemli değişimler olduğunu ortaya koymuştur.

Brito vd., (2021) tarafından yapılan bir çalışmada Brezilya'nın tropikal savanalarında (Cerrado) meydana gelen büyük yangınların su kalitesi üzerindeki kısa dönem etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Federal Bölge'deki bir Cerrado alanında, yangın sonrası toplanan kül örneklerinin su üzerindeki kimyasal değişiklikler laboratuvar ortamında araştırılmıştır. Kül, su ile 1:10 oranında karıştırılarak fiziksel parametreler üzerinde etkileri değerlendirilmiş ve deney süresince (15 gün) suyun pH, çözünmüş oksijen, toplam çözünmüş katı madde ve elektriksel iletkenlik gibi fizikokimyasal parametreleri ölçülmüştür. Buna göre külün su ile etkileşime girdiğinde çözünür elementlerin (K^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , PO_4^{3-} , Na^+ ve Mg^{2+}) toplam çözünmüş katı madde ve elektriksel iletkenlikte artışa, pH'ta yükselmeye ve çözünmüş oksijen

seviyesinde azalmaya yol açmıştır. Özellikle çözünmüş oksijen seviyesi, su kalitesine zarar verecek düzeye düşmüştür.

Emerton vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada Batı Kanada'nın Boreal orman bölgesinde 2016 yılındaki Fort McMurray yangınının büyük nehirlerdeki su kalitesi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna göre yangın geçirmiş Athabasca, Clearwater ve Hangingstone nehirlerinde ve yanmamış kontrol (yangın görmemiş) sahasında askıda katı madde, besin maddeleri (azot, fosfor) ve ağır metal konsantrasyonları belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre yangın sonrası, nehirlerde yangınla ilişkili malzemelerin (örneğin, kül) belirli sürelerle (saatler ile günler) tespit edilebildiği ve askıda katı madde ve besin maddeleri, yangın görmemiş bölgelere göre 1,2 ile 10 kat arttığı tespit edilmiştir. Bu artışların özellikle 10 mm'den daha fazla olduğu yağış olaylarında gözlemlendiği ifade edilmiştir.

Hampton vd., (2022) tarafından yapılan bir başka çalışmada dünya genelinde 121 lokasyondan yangın sonrası su kalitesi parametrelerine ait olan veriler meta-analiz yöntemi ile incelemiştir. Yangın sonrası su kalitesi parametreleri için 34 farklı çalışmadan veri toplanmıştır. Bu farklı çalışmalar, yangın sonrası birinci ve beşinci yıllar arasında askıda katı madde, azot, fosfor ve karbon türlerinin konsantrasyonlarındaki değişiklikleri içermiştir. Buna göre yangın sonrası, azot ve fosfor gibi besin maddelerinin konsantrasyonlarında %40-60 arasında artış gözlemlenmiştir. Özellikle çözünür inorganik azot (N) ve fosfor (P) oranları artarken, karbon azot oranı (C/N) ve karbon fosfor oranı (C/P) oranları önemli ölçüde azalmıştır. Özellikle azot ve fosfor gibi bitki besin maddelerinin konsantrasyonları arasındaki pozitif korelasyonlar, bu bitki besin maddesi döngülerinin yangın ile sıkı bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir.

Rhoades vd., (2011) tarafından yapılan çalışmada, 2002 yılında Colorado'da meydana gelen yüksek şiddetli bir orman yangınının ardından su kalitesi, sediman miktarı ve su sıcaklığı üzerindeki etkiler beş yıl boyunca izlenmiştir. 558 km²'lik bir alanı etkileyen yangın, özellikle Denver'in içme suyu kaynağı açısından kritik öneme sahip alanlarda incelenmiştir. Bulgular, yangın sonrası yüksek şiddette yanmış havzalarda nitrat konsantrasyonlarının yanmamış havzalara göre iki kat arttığını ve içme suyu standartlarının %23'üne ulaştığını göstermiştir. Ayrıca suyun bulanıklık seviyesi dört kat artarken, ortalama su sıcaklığı 4,0°C yükselmiş ve bu durum sucul ekosistemler üzerinde olumsuz etkilere yol açmıştır. Artan sediman yükü su kalitesini düşürmüştür; bitki örtüsünün yavaş toparlanması nedeniyle havzaların ve su kalitesinin iyileşmesinin uzun yıllar sürebileceği vurgulanmıştır.

Sequeira vd., (2020) tarafından yapılan bir başka çalışmada 2017 yılında Portekiz'in merkezi bölgesinde orman alanlarının %40-60'ını yok eden kırsal yangınların yüzey suyu kalitesi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Bu çalışmada Mondego bölgesindeki 20 km² ile 160

km² arasında değişen beş küçük farklı havzada yüzey sularının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin zaman içindeki değişimleri izlenmiştir. İzleme programı, yangından bir ay sonra Kasım 2017'de başlamış ve Haziran 2018'e kadar sürmüştür. Buna göre suyun bulanıklığında, alüminyum (Al), demir (Fe), manganez (Mn) ve arsenik (As) gibi elementlerin konsantrasyonlarında artış olduğu belirlenmiştir. Özellikle yanmış alanlardaki yüzey sularında bu elementlerin seviyeleri, yangın öncesi değerlerle kıyaslandığında yükselmiş ve su sıcaklığı, hava sıcaklığı ile paralellik gösterirken, pH değerlerinde büyük değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu çalışmada sonuç olarak kırsal yangınların yüzey suyu kalitesi üzerindeki etkilerin uzun vadeli olabileceği ifade edilmiştir.

Bilgin vd., (2016) tarafından yayınlanan derleme niteliğindeki bir çalışmada orman yangınlarının su kaynakları üzerindeki uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yayınlanan makalelerdeki orman yangınlarının ardından ölçülen su kalitesi verileri baz alan bu çalışmada yangın sonrası azot (N), fosfor (P), potasyum (K), magnezyum (Mg), sodyum (Na), kalsiyum (Ca), manganez (Mn) ve klor (Cl) gibi elementlerin miktarının 2-100 kat artabileceği ifade edilmiştir. Bu elementlerin bir kısmı su kaynaklarına çözülmüş halde suya karışırken, diğerleri ise sediman taşınımını yoluyla dahil olabileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, orman yangınlarının hem yerel hem de küresel ölçekte su kaynakları üzerinde ciddi etkileri olduğu sonucuna varılmıştır. Ormanların korunması ve su kalitesinin iyileştirilmesi için stratejik yaklaşımlar geliştirilmesi gerektiği vurgulanmış ve su kalitesini izleme, yönetim modelleri geliştirme ve yangın öncesi planlamalar yapmanın önemi üzerinde durulmuştur.

Dahm vd., (2015) tarafından yapılan bir çalışmada 2011 yılında New Mexico'da meydana gelen Las Conchas orman yangınının su kalitesi üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Las Conchas yangını, yaklaşık 634 km²'lik bir alanı etkileyerek, orman ekosisteminde büyük değişikliklere neden olmuş ve yangın, özellikle yüksek ve orta şiddette yanmış bölgelerin çoğunu kapsamakta, bu da su kalitesi üzerinde ciddi sonuçlar doğurmuştur. Araştırmada, NOAA'nın Next Generation Radar (NEXRAD) verileri kullanılarak, yangın sonrası Rio Grande üzerindeki dört farklı noktada yer alan sensörlerle, su sıcaklığı, özgül iletkenlik, pH, bulanıklık ve çözülmüş oksijen gibi parametreler sürekli olarak izlenmiştir. Yangın sonrası, özellikle bulanıklık değerleri 2500 NTU'ya kadar yükselmiş, çözülmüş oksijen seviyeleri 0,0 mg L⁻¹'ye kadar düşmüş ve pH değerlerinde yaklaşık 0,75 birimlik azalmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, bölgedeki ekosistem sağlığı açısından ciddi endişelere yol açmıştır.

Santin vd., (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2013 yılında Avustralya'nın Sydney bölgesinde meydana gelen Balmoral yangınının farklı şiddet seviyelerinde (düşük,

yüksek, aşırı) oluşan kül miktarı ve bu külün su kirliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, yangın şiddeti arttıkça kül yükü de artmış; düşük şiddetli alanlarda 6 mg/ha, yüksek şiddetli alanlarda 16 mg/ha, aşırı şiddetli alanlarda ise 34 mg/ha kül birikmiştir. Küllerde arsenik (As), bor (B) ve fosfor (P) gibi kirletici elementler tespit edilmiştir. Bu elementlerin konsantrasyonları görece düşük olmasına rağmen, suya taşınmaları durumunda belirli bir kirlilik riski oluşturabileceği belirtilmiştir. Küllerin çözünabilirlik oranı çoğunlukla %10'un altında kalmıştır; bu durum, bazı bileşenlerin rüzgâr erozyonu ile yağış öncesi taşınmış olabileceğine işaret etmektedir. Ancak bazı alanlarda artan erozyon, yaklaşık 4 Mg külün fosforla birlikte su kaynaklarına taşınmasına neden olabileceği potansiyel bir risk olarak belirlenmiştir.

Santos vd., (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada Portekiz'in Beça Nehri havzasında 1990-2013 yılları arasında meydana gelen orman yangınları sonrasında akarsu içerisindeki çözünmüş fosfor konsantrasyonları incelenmiş, yangın alanı ve akarsu debisinin bu konsantrasyonlar üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu çalışmada, 2000 yılında yaşanan nemli bir su yılı ile 2005 yılında yaşanan kurak bir su yılı karşılaştırılmıştır. Nemli bir su yılı olan 2000'de, 16,3 km²'lik bir alan yanmışken, fosfor konsantrasyonu 0,02 mg/l olarak belirlenirken, kurak bir su yılı olan 2005'te ise, 24,4 km²'lik yanmış havzadaki fosfor konsantrasyonu 0,57 mg/l'e yükseldiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, orman yangınları su kalitesini olumsuz yönde etkileyerek ekosistem ve insan sağlığı açısından ciddi sorunlar yarattığı ve bu nedenle, etkili bir orman yönetimi ve yangın öncesi önlemler almak büyük önem taşıdığı ifade edilmiştir.

Smith vd., (2011) tarafından yapılan derleme bir çalışmada orman yangınlarının su kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu konuda yapılan yayınlara ait verileri kullanarak akarsuların askıda katı madde, besin maddeleri (nitrojen ve fosfor), iz elementler ve organik karbon konsantrasyon değerleri baz alınmıştır. Buna göre yangın sonrası ilk yıl içinde, yanmış havzalardaki askıda katı madde konsantrasyonlarının yanmamış alanlara göre 1-1.459 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, toplam askıda katı madde konsantrasyonları 11 mg/l'den 500.000 mg/l'ye kadar çıkabildiği ve ayrıca nitrat ve fosfor gibi besin maddelerinin taşınımının da önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında demir, manganez, arsenik, krom ve kurşun gibi bazı elementlerin konsantrasyonları, içme suyu standartlarını aşabildiği tespit edilmiştir.

Raelison vd., (2023) tarafından gerçekleştirilen derleme çalışmasında, 44 farklı araştırmadan elde edilen veriler analiz edilerek orman yangınlarının su kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, yangın sonrası su kaynaklarındaki bazı kirletici

konsantrasyonları iki katına kadar artış göstermektedir. Bu artışlar; örnekleme zamanı, yangının kapsadığı alan büyüklüğü ve yüzey akışı debisi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Toplam süspanse sediman (TSS) konsantrasyonlarının, yanmış alanın büyüklüğü ve düşük debili akışlarla birlikte arttığı; ancak yüksek debilerde seyreltici etkiyle azaldığı belirlenmiştir. Besin maddeleri ve askıda katı maddelerdeki artışlar genellikle yangından sonraki ilk yıl içinde ortaya çıkarken, ağır metallerin en yüksek seviyeleri genellikle bir ila iki yıl sonra gözlenmektedir. Bu durum, ağır metallerin sızma sürecinin daha uzun sürdüğünü göstermektedir. Ayrıca, polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) konsantrasyonlarının yangından sonraki bir yıl içinde zirveye ulaştığı; ancak yüzey suyu kalite standartlarını aşmadığı ifade edilmiştir.

Emelko vd., (2016) tarafından yapılan çalışmada, Kanada'nın Alberta bölgesinde 2003 yılında gerçekleşen Lost Creek yangınının ardından Crowsnest ve Castle Nehir havzalarında su kalitesi üzerine etkiler araştırılmıştır. 2009–2010 yıllarında yürütülen izleme çalışmasında, yanmış ve yanmamış alanlardan alınan askıda taşınan sediman örnekleri kullanılarak toplam parçacık fosfor (TPP), inorganik ve organik fosfor ile denge fosfor konsantrasyonu (EPC₀) analiz edilmiştir. Bulgular, yangın sonrası TPP ve EPC₀ seviyelerinin yanmamış referans sahalara göre anlamlı şekilde yüksek olduğunu ve bu artışların yangından 6–7 yıl sonra bile devam ettiğini ortaya koymuştur. Bu durum, yangının uzun vadeli fosfor birikimine neden olduğunu göstermektedir. Özellikle askıda katı maddeler yoluyla taşınan fosforun su kalitesi ve içme suyu temini açısından önemli riskler taşıdığı vurgulanmıştır.

Burke vd., (2013) tarafından yapılan çalışmada, 2009 yılında Güney Kaliforniya'daki Arroyo Seco havzasında meydana gelen bir orman yangınının ardından yüzey sularındaki kirlilik düzeyleri incelenmiştir. Yangın öncesi (2009) ve sonrası (2010) yağışlı dönemlerde sekiz farklı yağış olayı sırasında su örnekleri toplanmış ve temel katyonlar, iz metaller ile toplam süspanse sediman (TSS) konsantrasyonları analiz edilmiştir. Bulgular, yangın sonrası yüzeysel akış miktarlarının yangın öncesine kıyasla 15 kat arttığını ve TSS konsantrasyonlarının 10 kata kadar yükseldiğini göstermiştir. Özellikle bazı sahanaklarda TSS seviyeleri 80.500 mg/l'ye ulaşmıştır. Kurşun (Pb) ve kadmiyum (Cd) gibi iz metallerin konsantrasyonları da yangın sonrası dönemde belirgin biçimde artmış ve bu metallerin taşınım yükleri yangın öncesine göre yaklaşık üç kat fazlaşmıştır. Ayrıca, kimyasal parametrelerin maksimum değerlerinin, maksimum yüzeysel akışla eş zamanlı olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, orman yangınlarının ardından artan yüzey akışı ve sediman taşınımının, sucul sistemlerde ağır metal kirliliği riskini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymuştur.

Son vd., (2015) tarafından yapılan bir çalışmada 2012 yılında Colorado'da meydana gelen High Park yangını sonrası nehir su kalitesi ve nehir yatağındaki fosfor dinamikleri incelenmiştir. Bu çalışmada, yangın öncesi ve sonrası dönemde toplam fosfor (TP) ve toplam azot (TN) ölçümleri içeren 16 su kalitesi ve 11 sediman örnekleme gerçekleştirilmiştir. Yangın sonrası su sıcaklığı ve pH'ta önemli artışlar gözlemlenmiştir. Özellikle, pH ortalaması 7.9'dan 8.5'e yükselmiştir. Yangın sonrası ilk yağışla birlikte, nehirdeki toplam fosfor ve toplam azot yüklerinde dramatik artışlar kaydedilmiştir. Toplam fosfor ve toplam azot miktarları, yangından önceki dönemdeki değerlere göre sırasıyla 390 kat ve 6 kat artış göstermiştir. Yangın sonrası çözünür reaktif fosfor (SRP), yangın öncesi dönemde baskın olan çözünmüş organik fosfor (DOP) türünü geçerek sucul ortama hâkim olmuştur. Yağış sonrası, nehirdeki fosfor (PP) konsantrasyonları, yangın öncesi ortalamaların çok üzerinde çıkmıştır. Nehir yatağındaki silt-kil oranının arttığı, özellikle yangından etkilenen bölgelerde belirginleştiği bulunmuştur. Bu durum, yüzey akışıyla birlikte taşınan ince taneli sedimanlarla ilişkilendirilmiştir.

Mansilha vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada, 2013 yılında Portekiz'in Caramulo Dağları'nda meydana gelen büyük bir orman yangınının, yer altı ve yüzey suyu kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yangından etkilenen ve etkilenmeyen alanlardan toplanan su örneklerinde, özellikle polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), besin maddeleri (nitrat, fosfor) ve ağır metallerin (Fe, Mn, Pb) konsantrasyonları analiz edilmiştir. Bulgular, PAH bileşiklerinden 14'ünün yangın sonrası su örneklerinde tespit edildiğini ve naftalin ile benzo(ghi)perilen gibi bileşiklerin seviyelerinin yağışlarla birlikte arttığını göstermiştir. Ayrıca, pH, alkalinite, bulanıklık ve elektriksel iletkenlik gibi fiziksel-kimyasal parametrelerde de yangın sonrası belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Bu değişikliklerin, artan yüzeysel akış ve yer altı suyu seviyeleri ile bağlantılı olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak, yangın sonrası su kalitesinde kısa vadeli bozulmalar tespit edilmiş; ancak bazı kirleticilerin (örneğin PAH'lar ve ağır metaller) potansiyel olarak uzun süreli etkiler yaratabileceği vurgulanmıştır.

Noske vd., (2010) tarafından yapılan çalışmada, Avustralya'nın Victoria eyaletinde 2003 yılında gerçekleşen bir orman yangınının ardından iki dağlık havzada (Slippery Rock Creek ve Springs Creek) toplam fosfor (TP) taşınımındaki değişim üç yıl boyunca izlenmiştir. Yüzeysel akış, bulanıklık ve kaba malzeme taşınımı düzenli olarak ölçülmüş; bu malzemelerin TP içerikleri laboratuvar ortamında analiz edilmiştir. Bulgulara göre yangından sonraki üç yıl içinde kaba malzeme ve toplam fosfor miktarında sırasıyla %53 ve %62 oranında azalma gözlemlenmiştir. TP taşınımının büyük ölçüde askıda katı sedimanla gerçekleştiği belirlenmiş, iri boyutlu yatak yükü ve çözünmüş fosfor, toplam taşınımın yalnızca yaklaşık %10'unu

oluşturmuştur. Zaman içinde taşınan malzeme miktarlarının yangın öncesi seviyelere yaklaştığı tespit edilmiş, bu da yangının etkilerinin kademeli olarak azaldığını göstermiştir.

Oliver vd., (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, 2007 yazında Kaliforniya'nın Lake Tahoe havzasında meydana gelen en büyük ve en şiddetli orman yangını olan Angora yangınının Angora Deresi üzerindeki hidrolojik özelliklerde ve su kalitesindeki değişikliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırma, Angora Deresi boyunca dört farklı noktada yürütülmüş olup, yangın sonrası iki yıl boyunca 246 adet su örneği toplanmıştır. Yangın sonrası yapılan analizlerde, yanmış bölgelerde toplam azot (TN) ve amonyum seviyeleri zirve yapmıştır. Yanmamış derelerde ise nitrat, toplam fosfor ve diğer bazı parametreler en yüksek değerlerine ulaşmıştır. İkinci yıl, özellikle yağışların ardından besin maddelerinin konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiştir. Yangın sonrası ilk üç ay boyunca (Temmuz-Eylül 2007) yağış olmamış ve bu nedenle önemli bir besin taşınımı gerçekleşmemiştir. Ancak 2008 ve 2009 yıllarında besin miktarları hesaplanmış ve yangın geçirmiş havzalarda en yüksek besin taşınımı görülmüş ve özellikle, en yüksek azot ve fosfor miktarları belirlenmiştir.

Rust vd., (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2018 yılında Colorado'da meydana gelen 416 Yangını'nın, daha önce maden kirliliğine maruz kalmış Animas Nehri havzasındaki iz metal kirliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sekiz örnekleme noktasında yapılan ölçümler, yangın sonrası erozyonla birlikte alüminyum, demir, kurşun ve manganez gibi metallerin konsantrasyonlarında ciddi artışlar olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, alüminyum konsantrasyonu yangın öncesi 18 µg/l iken, yangın sonrasında 5.900 µg/l'ye çıkmış, bu artış 2019 ve 2020 yıllarında da devam etmiştir. Benzer şekilde demir, kurşun ve manganez konsantrasyonları da yangın sonrası yıllarda yüksek seviyelerde seyretmiş, ancak zamanla azalma göstermiştir. Çalışma, orman yangınlarının maden kaynaklı iz metal kirliliğini önemli ölçüde artırabildiğini ve bu etkinin birkaç yıl sürebildiğini vurgulamaktadır.

Tecle ve Neary (2015) tarafından gerçekleştirilen derleme çalışmasında, ABD'nin güneybatısında meydana gelen büyük orman yangınlarının – özellikle Arizona'daki Rodeo-Chediski ve Wallow yangınlarının – su kalitesi üzerindeki etkileri ve bu etkilere karşı geliştirilen yönetim stratejileri ele alınmıştır. Çalışmaya göre, yangınların bitki örtüsünü yok etmesi toprağın erozyona uğramasına neden olmakta; bu durum yüzeysel akışı, sediman taşınımını ve suyun bulanıklığını artırmaktadır. Ayrıca, bitki örtüsü kaybı sonucu artan su sıcaklığı, sucul yaşamı olumsuz etkilemektedir. Yangın sonrası toprak ve bitki materyalinin parçalanması, azot ve fosfor gibi besin maddelerinin suya karışmasını kolaylaştırarak ötrofikasyon riskini artırmakta; aynı zamanda kurşun ve arsenik gibi iz metallerin de suya taşınmasına neden olmaktadır. Bu kirleticiler, içme suyu standartlarının aşılmasına yol açarak

halk sağığı açısından risk oluşturabilmektedir. Çalışma, Wallow Yangını sonrasında meydana gelen balık ölümleri örneğıyle, yangın kaynaklı su kalitesi bozulmasının ekosistem üzerindeki ciddi etkilerine dikkat çekmektedir.

Townsend ve Douglas (2000), Kuzey Avustralya'nın Kakadu Ulusal Parkı'nda üç farklı yangın rejiminin (erken kurak sezon yangınları, geç kurak sezon yangınları ve yangın geçirmemiş alanlar) su kalitesi ve taşınan sediman miktarları üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Üç yıl süren araştırmada toplam askıda katı madde (TSS), azot, fosfor, demir ve manganez gibi parametreler analiz edilmiştir. Bulgulara göre, geç sezon yangınları ağağ örtüsünde %50 azalmaya neden olmuş ve bu da erozyon riskini artırarak sediman taşınımını yükseltmiştir. Özellikle kısa süreli sağanaklar sırasında TSS, Fe ve Mn konsantrasyonları, diğer alanlara göre 2–5 kat daha yüksek ölçülmüştür. Su verimi üzerinde yangınların etkisi sınırlı kalmakla birlikte, geç dönemde yanan alanlarda TSS değerleri %240 daha fazla bulunmuştur. Arazi eğiminin düşük olması, taşınan sediman miktarlarının genel olarak düşük olmasına neden olmuştur.

Üretim Faaliyetlerinin (Salvage Logging) Doğal Kaynaklar Üzerindeki Etkileri

Üretim Faaliyetlerinin (Salvage Logging) Toprak Özellikleri Üzerine Olan Etkileri

Orman yangını riskinin yüksek olduğu ABD, İspanya, Portekiz ve Türkiye gibi ülkelerde yangının ardından üretim faaliyetleri yaygın olarak yapılmaktadır. Bu faaliyetler esnasında manuel veya ağır makineler yardımıyla yanmış ağağlar araziden temizlenmektedir. Bu üretim faaliyetleri, arazide tekrar yangın oluşturabilecek yakıt yükünün ortadan kaldırılması, yanmış ağağlarda oluşabilecek çürüme ve hastalıkların yeni filizlenen bitki topluluklarına bulaşmasının önlenmesi, yanmış ağağların devrilmesi ve yan yatması sonucunda oluşabilecek zararların önlenmesi, arazinin bitki örtüsü açısından tekrar yangın öncesi döneme dönüştürülebilmesi için arazinin hazırlanabilmesi, ülkelerin yanmış ağağlardan odun üretimi açısından gelir elde edebilmesi gibi nedenlerle yaygın olarak yapılmaktadır. Bu üretim faaliyetleri içerisinde yanmış ağağların kesilmesinin yanı sıra kesim sonrasında hazırlanan tomrukların araziden çıkarılması için açılan yeni orman yolları, yanmış ağağ köklerinin halat yardımıyla yamaçlardan çıkarılması esnasında oluşan ağağ sürütme yolları da yer almaktadır.

Francos vd., (2018a), 2015 yılında İspanya'nın Katalonya bölgesinde meydana gelen büyük bir yangının ardından uygulanan üç farklı üretim yönteminin toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmada; kesilen ağağların manuel olarak çıkarıldığı, yerinde bırakıldığı ve hiç müdahale yapılmayan alanlar karşılaştırılmıştır. Toprak örnekleri yangından 2 ve 10 ay sonra alınmış; pH, EC, agregat stabilitesi, organik madde, toplam azot,

C/N oranı ve besin elementleri analiz edilmiştir. Kesilen ağaçların çıkarıldığı sahalarda agregat stabilitesi, organik madde ve azot daha yüksek bulunmuş, tüm uygulamalarda pH ve bazı besin elementleri yangından kısa süre sonra artış göstermiştir. Ancak genel olarak müdahale yapılmayan sahalarla karşılaştırıldığında, manuel uygulamaların toprak sağlığı üzerindeki etkileri sınırlı bulunmuş; ayrıca bu uygulamaların mekanik müdahalelere göre daha az zararlı olduğu belirlenmiştir.

Francos vd., (2019), İspanya'nın Girona iline bağlı Colomers bölgesinde yaklaşık 550 hektarı etkileyen bir orman yangını sonrası meydana gelen yağışlar ve ardından yürütülen üretim faaliyetlerinin toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yangından hemen sonra ve şiddetli yağış sonrası yapılan örneklemelerde toprak su geçirimsizliğinin yağışla birlikte azaldığı, organik madde ve toplam azotun ise arttığı belirlenmiştir. Üretim faaliyetleri (salvage logging) sonrası toprak agregat stabilitesi, organik madde ve azot değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. pH, yangın sonrası yükselmiş, yağışlarla düşmüştür. Kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve bazı iz elementler (Al, Mn, Fe, Zn, Cr) yangın sonrası ve yağışla birlikte artış göstermiş; ancak üretim faaliyetleri sonrası bu değerlerde genel olarak düşüş yaşanmış, bazıları dört yıl sonra kısmen toparlanmıştır. Çalışma hem yangın hem de sonrasındaki insan müdahalelerinin toprak kimyası ve yapısı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Ginzburg ve Steinberger (2012), İsrail'deki Byria Ormanı'nda 2006 yazında meydana gelen yangın sonrası uygulanan üretim faaliyetlerinin ve doğal yenilenmenin toprak özellikleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Üç yıl boyunca yürütülen çalışmada, toprak nemi, organik karbon, çözülmüş organik karbon (DOC), toplam çözümlü azot ve mikrobiyal aktivite gibi parametreler analiz edilmiştir. Üretim faaliyeti yapılan alanlarda toprak nemi sürekli olarak daha düşük ölçülmüş ve mikrobiyal biyokütle, doğal yenilenme gösteren alanlara kıyasla %18 daha düşük bulunmuştur. Organik karbon ve DOC değerlerinde üretim sonrası kısa süreli artış gözlemlenmiş ancak bu artış kalıcı olmamıştır. Toprak solunumu, kesim yapılmayan alanlarda daha yüksek tespit edilmiştir. Genel olarak, doğal yenilenmenin toprak kalitesi açısından daha olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Garcia-Orenes vd., (2017), İspanya'nın doğusundaki Sierra de Mariola Doğal Parkı'nda 2012 yılında gerçekleşen büyük bir orman yangınından sonra uygulanan üretim faaliyetlerinin toprak özellikleri ve bitki örtüsüne etkilerini değerlendirmiştir. Üretim yapılan alanlarda toprak yoğunluğu artmış, agregat stabilitesi %20 azalmış, organik madde ve azot içeriği belirgin şekilde düşmüştür. Su tutma kapasitesi azalmış, mikrobiyal biyokütle ve solunum aktivitesi zayıflamıştır. Fosfor düzeylerinde anlamlı fark gözlenmemiştir. Bitki tür zenginliği benzer olsa

da, kontrol alanlarında birey sayısı ve eşitlik oranı daha yüksek bulunmuştur. Genel sonuçlar, yangın sonrası üretim faaliyetlerinin toprak sağlığı ve ekosistem iyileşmesini olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Ampoorter vd., (2007) tarafından yapılan bu çalışma, Hollanda'nın Putte bölgesinde iki farklı kumlu orman toprağında ağır iş makineleriyle gerçekleştirilen mekanize üretim faaliyetlerinin toprak sıkışmasına etkilerini incelemiştir. Farklı kesim uygulamaları (biçerdöver [H], biçerdöver + ağaç toplayıcı [H+F], her iki makinenin birden fazla geçişi [Max]) 6 ha'lık bir çam plantasyonunda uygulanmış ve 0–50 cm derinlikte toprak yoğunluğu ile penetrasyon direnci ölçülmüştür. Sonuçlar, özellikle tekerlek izleri içinde H uygulamasında belirgin sıkışma olduğunu; Max uygulamasında ise penetrasyon direncinin 40–60 cm derinlikte 3.5–4 MPa'ya ulaştığını ortaya koymuştur. H+F uygulamasında tekerlek izleri arasında dahi yüksek yoğunluk gözlenmiştir. Arazi koşulları ve makine geçiş sayısı, sıkışma düzeyini önemli ölçüde etkilemiştir. Çalışma, kumlu toprakların sıkışmaya karşı hassas olduğunu ve bu tür üretim faaliyetlerinde ekosistem üzerindeki olumsuz etkilerin önlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Spanos vd., (2005), Yunanistan'da Halep çamı (*Pinus halepensis*) ormanında yangın sonrası uygulanan üretim faaliyetlerinin toprak ve bitki örtüsü üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Yanmamış, üretim yapılmamış ve farklı taşıma yöntemleri (hayvan ve traktör) uygulanan alanlar karşılaştırılmıştır. Toprak pH'ında anlamlı bir değişiklik gözlenmezken, organik madde içeriği üretim yapılan alanlarda geçici olarak azalmış; toprak nemi ve bitki örtüsünde ilk yıl farklılıklar görülmüş, ancak zamanla bu farklar azalmıştır. En yüksek erozyon traktör kullanılan ve üretim yapılmamış yanmış alanlarda tespit edilmiştir. Bitki örtüsü zamanla tüm alanlarda gelişmiş, Halep çamı fidanları tüm gruplarda benzer başarıyla büyümüştür. Genel olarak, üretim faaliyetlerinin kısa vadeli olumsuz etkileri olsa da bu etkilerin zamanla azaldığı ve bitki örtüsü gelişimiyle erozyon riskinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Francos vd., (2018c) 2015 yılında İspanya'nın Odena bölgesinde meydana gelen orman yangını sonrası farklı orman yönetim uygulamalarının toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmada yangın öncesi ve sonrası farklı müdahale düzeylerine sahip dört saha karşılaştırılmıştır: 2005'te üretim yapılmış (M05B), yangından iki ay önce üretim yapılmış (M15B), müdahale edilmemiş (NMB) ve yangından etkilenmemiş kontrol alanı. Bulgulara göre, müdahale edilmeyen (NMB) sahada toplam azot ve organik madde en yüksek seviyedeysen, M05B sahasında yangın şiddetine bağlı olarak pH, iletkenlik ve inorganik karbon daha yüksektir. Mikrobiyal biyokütle ve toprak solunumu yanan alanlarda azalmış; en yüksek biyolojik aktivite kontrol sahasında gözlemlenmiştir. Sonuçlar, yangın öncesi doğru

zamanlamayla yapılan üretimlerin (M15B) toprak üzerindeki etkilerini azaltabileceğini ve müdahale edilmeyen alanların toprak sağlığı açısından en avantajlı olduğunu göstermektedir.

Jennings vd., (2012), Oregon'daki 2003 B&B orman yangınından sonra yürütülen mekanik üretim faaliyetlerinin toprak özellikleri ve mikrobiyal topluluklara etkilerini incelemiştir. Çalışmada toprak sıkışması, alt tabaka açma (subsoiling) ve müdahale edilmemiş toprak koşulları karşılaştırılmıştır. Bulgulara göre, toprak sıkışması bitki için kullanılabilir azotu %27, alt tabaka açma ise fosforu %26 oranında azaltmıştır. Mikrobiyal çeşitlilikte anlamlı bir fark bulunmasa da zamanla topluluk bileşimlerinde değişimler gözlenmiştir. Sıkıştırma poroziteyi azaltarak olumsuz etkiler yaratırken, alt tabaka açma bu etkileri kısmen azaltmıştır. Sonuç olarak, mekanik müdahaleler kısa vadede besin kayıplarına yol açsa da, mikrobiyal dayanıklılık ve zamanla iyileşme, yangın sonrası toprak yönetimi açısından dikkate alınması gereken unsurlardır.

Poirier vd. (2014), Kanada'nın Quebec bölgesinde 2005–2007 yıllarında gerçekleşen orman yangınlarından sonra uygulanan üretim faaliyetlerinin toprak organik karbonu (C) ve toplam azot (N) depolaması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kontrol (CTR), yalnızca yangın görmüş (B-NL) ve yangın + kesim uygulanmış (B-L) sahalar karşılaştırılmıştır. Yangın, organik katmandaki C ve N depolamasını azaltmış, toprak yoğunluğunu artırmıştır. B-L sahalarında organik C %12 azalmış; buna karşın alt mineral toprakta C ve N içerikleri belirgin şekilde artmıştır. Toplam profil incelendiğinde, yangın ve kesimin toplam C ve N üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamış; ancak B-L sahalarında C ve N depolaması B-NL'ye göre sırasıyla %20 ve %30 daha yüksek tespit edilmiştir.

Serrano-Ortiz vd., (2011) İspanya'nın Sierra Nevada Ulusal Parkı'nda 2005 yılındaki bir orman yangını sonrası uygulanan iki farklı orman yönetimi stratejisinin karbon dengesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ağaçların kesildiği üretim faaliyeti yapılan alan ile ağaçların bırakıldığı alan karşılaştırılmıştır. 2009 yılında yapılan ölçümler, üretim yapılan alanın 120 g C/m² daha fazla CO₂ salınımına neden olduğunu, ağaçların bırakıldığı alanın ise yıl boyunca net karbon yutak işlevi gördüğünü ortaya koymuştur. Sonuç olarak, üretim faaliyetlerinin karbon salımını artırarak iklim değişikliği hedefleriyle çeliştiği, doğal bırakılan alanların ise karbon tutma kapasitesini desteklediği belirlenmiştir.

Simard vd., (2001) Quebec boreal ormanlarında 1997 yazında meydana gelen bir yangın sonrası, yangın geçirmiş, ağaç kesimi yapılmış ve bozulmamış kontrol alanlarındaki toprak özelliklerini karşılaştırmıştır. Yangın sonrası alanlarda pH ve bazı besin maddeleri (Ca, Mg, P) düzeyleri yüksek bulunmuştur. Ağaç kesimi yapılan alanlarda ise organik madde ve toplam besin içeriği daha yüksek, potansiyel mineralize edilebilir azot seviyeleri daha fazladır. Yangın

sonrası genç alanlarda azot ve potasyum kaybı görülmüş, ancak fosfor miktarı diğer alanlara kıyasla dört kat daha fazla olmuştur. Kesim uygulamaları, uzun vadede toprak asiditesini artırarak ekosistem süreçlerini etkileyebileceği belirtilmiştir.

Johnson vd., (2005) Sierra Nevada Dağları'nda 1981 yılında gerçekleşen bir orman yangınının ardından yangın, üretim faaliyetleri ve bitki örtüsü gelişiminin topraktaki besin elementleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre en fazla karbon kaybı üretim faaliyetleri sırasında, azot kaybı ise buharlaşma yoluyla meydana gelmiştir. Çalı alanlarında karbon seviyesi daha düşük, azot seviyesi ise daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca bu alanlarda toprak pH'ı ve kalsiyum, potasyum, magnezyum gibi besin elementleri daha yüksek düzeyde ölçülmüştür. Bu bulgular, çalı ekosistemlerinin yangın sonrası toprak besin dengesini iyileştirme potansiyelini ortaya koymuştur.

Rhoades vd., (2004) Missouri'deki meşe ormanlarında yangın sonrası üretim faaliyetleri sırasında kütüklerin yakıldığı alanlarda toprak özelliklerini incelemiştir. Bu alanlarda pH değeri artmış, fosfor, potasyum ve kalsiyum seviyeleri yaklaşık iki kat yükselmiştir. Nitrat düzeyinde artış görülürken, toplam azot ve amonyum düzeylerinde anlamlı bir değişiklik saptanmamıştır. C/N oranındaki artış organik maddenin niteliğinde değişimi göstermiştir. Ayrıca, toprak gözenekliliği azalarak su tutma kapasitesinin düşmesine neden olmuş ve bitki gelişimi olumsuz etkilenmiştir. Sonuç olarak, bu değişimlerin uzun süreli ekosistem etkileri olabileceği belirtilmiştir.

Üretim Faaliyetlerinin (Salvage Logging) Yüzeysel Akış ve Sediman Taşınım Süreçlerine Olan Etkileri

Üretim faaliyetleri (salvage logging) yangın sonrası yaygın olarak yapılmaktadır. Bu faaliyetlerin sediman taşınım süreçlerine olan etkilerine ilişkin özellikle uluslararası literatürde çok sayıda yayın olmasına rağmen, bu uygulamanın erozyon miktarı ve oranları üzerindeki olumlu ve/veya olumsuz etkileri konusunda hala bir fikir birliği yoktur. Ayrıca üretim faaliyetlerinin yangından sonra uygulanması hala tartışma konusudur.

Fernandez vd. (2021), İspanya'nın kuzeybatısındaki karışık çam ormanlarında 2015 yazındaki yangın sonrası üretim faaliyetlerinin toprak kaybı ve erozyon üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yangından yaklaşık 9 ay sonra yapılan üretim faaliyetleriyle, toprak kaybı yangın öncesine göre önemli ölçüde azalmış (2,4 kat daha düşük) ve kesilen ağaç kalıntılarının toprak yüzeyine serilmesinin erozyon miktarını azalttığı bulunmuştur. Ayrıca, yapılan üretim faaliyetlerinin toprak özellikleri ve bitki örtüsüne olumsuz etkisi olmadığı vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, ağaç kesim artıklarının toprak yüzeyine serilmesi, yangın sonrası erozyonun kontrolü için etkili bir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

James ve Krumland (2018) tarafından yapılan bir başka çalışmada orman yangınlarından sonra yapılan üretim faaliyetlerinin (salvage logging) toprak erozyonu ve sediman taşınımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kaliforniya'daki Ponderosa Yangınının ardından, 4 yıl boyunca 10 adet havza hendeklerinde gerçekleştirilmiştir. İlk yıl boyunca, kontrol grubu olan üretim faaliyetleri yapılmayan hendeklerin sediman verimleri, üretim faaliyetleri yapılan hendeklere göre 2,8 ila 27 kat daha fazla bulunmuştur. Zamanla, üretim faaliyetleri yapılan hendeklerin sediman verimleri, kontrol grubuna göre belirgin bir şekilde daha düşük kalmış ve dördüncü yıl sonunda, sediman taşınımı neredeyse yok olmuştur. Sonuç olarak yüksek şiddetli orman yangınlarının etkilediği orta eğimli alanlarda, yangın sonrasında yapılan üretim faaliyetlerinin erozyonu önemli ölçüde azaltılabileceği ve orman yöneticilerinin yangından sonra hızlı kararlar alması gerektiği vurgulanmıştır.

Olsen vd., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada Kaliforniya'nın Sierra Nevada bölgesinde meydana gelen 2013 Rim Yangını sonrası üretim faaliyetlerinin toprak erozyonu ve sediman taşınımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yangın ve üretim faaliyetleri sonrası taşınan sediman miktarını belirlemek için 0,09 ile 0,81 hektar arasında dokuz alanda ölçümler yapılmıştır. Üretim faaliyeti yapılan alanlarda ortalama %31 oranında toprak bozulması gözlemlenmiştir. Üretim faaliyetleri yapılmayan kontrol alanlarında ortalama sediman taşınımı 0,11 ile 11,8 mg/ha arasında değişirken, üretim faaliyetleri yapılan alanlarda bu değer 1,1 ile 3,2 mg/ha arasında bulunmuştur. Özellikle sediman taşınım alanları olarak üretim faaliyetleri yapılan yollardaki parmak (rill) erozyon yoğunluğundan kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Wagenbrenner vd., (2015) Batı ABD iç bölgelerinde yangın sonrası yapılan üretim faaliyetlerinin ve toprak yol tedavisinin etkilerini incelemiştir. Ağaç kütüklerinin çıkarılması için açılan yollar ile toprak örtüsü, toprak özellikleri ve sediman üretimi karşılaştırılmıştır. Ağaçların sürütülerek çıkarıldığı yollar ve üretim yapılan yollar, toprak örtüsünü sıkıştırmış ve bu alanlarda suyun toprak içine sızma kapasitesinin azaldığını ve bitki örtüsünün daha yavaş geliştiğini göstermiştir. Ayrıca, ağaçların sürütülerek çıkarıldığı alanlarda sediman üretimi kontrol alanlarına göre 10-100 kat daha fazla olmuştur. Kesim artıklarının yol yüzeyine serilmesi, yüzey örtüsünü %20-30 artırmış ve sediman üretimini 5-50 kat azaltmıştır. Sonuç olarak, kesim artıklarının yol yüzeyine serilmesi, sediman miktarını azaltmış ve bitki gelişimini hızlandırmıştır.

Wagenbrenner vd., (2016) tarafından ABD'nin Montana, Washington ve British Columbia bölgelerinde çıkan yüksek şiddetli yanmış ormanlarında yapılan üretim faaliyetlerinin (salvage logging) parmak (rill) erozyonu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Farklı ağaç kesme ekipmanları, açılan yollardaki trafik seviyesi ve yanmış ağaçların kesimi sonrası odun atıklarının yüzeye serilmesinin etkilerini değerlendirmek için kontrol edilen parmak (rill) erozyonu deneyleri gerçekleştirmiştir. Bulgular ağır ekipman kullanılarak yapılan üretim faaliyetlerinin toprağı sıkıştırdığını, bitki örtüsünü azalttığını göstermiştir. Ayrıca parmak (rill) erozyonu ve sediman taşınım oranları, üretim faaliyetleri yapılan alanlarda kontrol alanlarına göre önemli ölçüde artmıştır (%5 ila %1.900 oranında). Sonuçlar ise üretim faaliyetlerinin sedimentasyon riskini artırdığını ve bu etkilerin azaltılması için özel yönetim uygulamalarının gerektiğini vurgulamaktadır.

Silins vd., (2009) Alberta'daki Oldman Nehri Havzası'nda 2003'teki orman yangını ve sonrasındaki üretim faaliyetlerinin sediman miktarı ve oranları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırma, yangın sonrası ilk yıllarda yanmış ve üretim yapılan havzalarda sediman konsantrasyonlarının, yanmamış havzalara kıyasla 8 kat ve 9 kat arttığını göstermiştir. Sediman miktarı, hidrolojik süreçler ve topografik özellikler tarafından etkilenmiş; yangın, toprak su tutma kapasitesini azaltarak yüzey akışını artırmış ve sediman taşınımını hızlandırmıştır. Üretim faaliyetleri ise bu etkileri daha da artırmıştır. İlk iki yıl boyunca sediman konsantrasyonlarında önemli farklılıklar gözlemlenmiş, ancak bu fark zamanla azalmıştır. Bu bulgular, artan yangın sıklığı ve şiddeti göz önüne alındığında arazi yönetimi için kritik öneme sahiptir.

Malvar vd., (2017), Portekiz'deki bir okaliptüs ormanında yangın sonrası farklı şiddette mekanik üretim faaliyetlerinin erozyon ve yüzeysel akış üzerindeki kısa vadeli etkilerini değerlendirmiştir. Yangın sonrası ortalama şiddette yangın geçiren alanlarda, farklı yoğunluktaki mekanik üretim faaliyetleri yapılan alanlar ile kontrol sahaları karşılaştırılmıştır. Araştırma bulguları, iş makineleri kullanılarak yapılan üretim faaliyetlerinin toprak yoğunluğunu artırdığını ancak toprak nemi veya zemin örtüsü üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Düşük yoğunlukta yapılan üretim faaliyetleri ve kontrol alanlarındaki yıllık yüzeysel akış miktarları benzerken, toprak daha fazla bozulduğunda sediman üretimi artmıştır. Kontrol alanlarında erozyon oranları daha düşük bulunmuş, ancak üretim faaliyetlerinin erozyon miktarı ve sediman üretimi üzerinde önemli bir artışa yol açtığı, zamanla bitki örtüsünün gelişmesiyle bu artışın azaldığı sonucuna varılmıştır.

Lucas-Borja vd., (2019), İspanya'nın Liétor bölgesinde, 2016 yılı orman yangınının ardından, erozyon ve yüzeysel akışı kontrol etmek amacıyla saman malçlama ve üretim

faaliyetlerinin etkilerini incelemiştir. Araştırma kapsamında, dört farklı uygulama tipi (malçlama + üretim faaliyetleri, yalnızca malçlama, yalnızca üretim faaliyetleri ve her ikisinin yapılmadığı kontrol parselleri) ile 12 deneysel parsel oluşturulmuştur. Malçlama uygulanan parsellerde, malçlama uygulanmayan parsellerle karşılaştırıldığında süspanse ve eriyik sediman miktarlarının belirgin şekilde daha düşük olduğu bulunmuştur. Ancak malçlamanın yüzeysel akım miktarına etkisi olmamıştır. Üretim faaliyetlerinin toprak erozyonunu artırmadığı, ancak makinelerin türü ve uygulama şeklinin erozyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Prats vd., (2021), Kaliforniya'da 2015'te 30.000 hektar alanı etkileyen vadi yangınının ardından üretim faaliyetleri uygulanan sahalarda yağış simülasyonlarıyla toprak sıkışması, çıplak toprak ve ağaç kesim artıklarıyla kaplanmış alanlardaki yüzeysel akış ve erozyon miktarlarını incelemiştir. Çıplak topraklarda yüzeysel akış, sıkışma durumuna bakılmaksızın benzerken, ağaç kesim artıklarıyla kaplanmış alanlarda yüzeysel akış belirgin şekilde daha düşüktür. Üretim faaliyetleri sırasında toprak sıkışması erozyonu iki kat artırırken, ağaç kesim artıkları toprağı kapladığında yüzeysel akışı azaltarak erozyonun önemli ölçüde azalmasına yardımcı olmuştur. Sıkışmamış ve sıkışmış çıplak topraklarda toplam sediman verimi sırasıyla 460 gram/m² ve 818 gram/m² iken, ağaç kesim artıklarıyla kaplı sahada bu değer %71 oranında azalmıştır. Sonuç olarak, ağaç kesim artıklarıyla kaplama, yangın ve üretim faaliyetlerinin etkilerini azaltma potansiyeline sahiptir.

Prats vd., (2019) tarafından yapılan bir başka çalışmada yüksek şiddetli bir yangından sonra yapılan üretim faaliyetlerinin yapıldığı sahalarda farklı sıkışma seviyeleri (0,9 ve 1,1 gram/cm³) ve yüzey örtüsü oranları (0% ve 60%) kullanılarak, yağmur simülasyonları ile yüzeysel akış, sızma (infiltrasyon) ve erozyon miktarı ölçümleri yapılmıştır. Buna göre toprağın daha fazla gözenekli halde olduğu bitki örtüsünden yoksun çıplak alanlarda sızma oranı 7 mm, üretim faaliyetleri esnasında çok fazla sıkıştırılan alanlarda ise sadece 1 mm olarak kaydedilmiştir. Toprak yüzeyinin ağaç kesim artıklarıyla kaplandığı sahalarda, sıkışmamış topraklarda damla erozyonunu 10 grama ve yüzeysel akışı ise 184 gram/m²'ye düşürmüştür. Toprağın daha fazla rahatsız edildiği sıkışmış topraklarda bu değerler 19 gram/m² ve 431 gram/m² olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak ağaç kesim artıklarıyla toprak yüzeyinin kaplanması, yüzey örtüsünün artırılması yoluyla toprak erozyonunu azaltmada etkili olduğu belirtilmiştir.

Pagter vd., (2023), İspanya'nın yarı-kurak iklimine sahip çam ormanlarında meydana gelen şiddetli bir orman yangını sonrası uygulanan üretim faaliyetlerinin damla erozyonu üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, yangın sonrası ağır iş makineleri kullanılmadan manuel olarak ve makinelerle yapılan ağaç kesimi ile yangın görmemiş kontrol alanları

karşılaştırılmıştır. Üretim faaliyetleri yapılan alanlardaki yüzeysel akışın yangın görmemiş alanlara göre %150 ila %220 arttığı, ağır makinelerle kesim yapılan alanlarda ise toprak kaybının %750 oranında arttığı bulunmuştur. Yangının, üretim faaliyetlerinden çok daha fazla toprak bozulmasına yol açtığı ve bu artışın toprak sıkışması ve bitki örtüsünün kaybı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, yangın sonrası toprak erozyonunu azaltmak için manuel üretim faaliyetlerinin ve kesim sırasında odun artıklarıyla toprak yüzeyinin örtülmesinin önerildiği vurgulanmıştır.

Neimeyer vd., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, 1970'te meydana gelen bir yangının ardından, üç deneysel havzada (Burns, McCrea ve Fox Dereleri) yangın ve yangın sonrası uygulanan üretim faaliyetlerinin yüzeysel akış üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkileri incelenmiştir. İlk yedi yıl içinde, tüm havzalarda yıllık akışta %150-202, maksimum akışlarda %234-283 ve düşük akışlarda %42-81 artış gözlemlenmiştir. Ancak, üretim faaliyetleri yapılan havzalarda 35-41 yıl sonra akış seviyeleri eski düzeylere dönmüştür. Buna karşın, herhangi bir işlem yapılmayan yanmış Fox Deresi havzasında akış oranları yüksek kalmaya devam etmiştir. Bu durum, üretim faaliyetleri ve işlem yapılmayan havzada bitki örtüsünün geri kazanımındaki gecikmelerle açıklanmıştır. Çalışma, yangın sonrası toprak yönetimi uygulamalarının uzun vadeli hidrolik iyileşmeyi sağlamak için kritik olduğunu vurgulamış ve elde edilen verilerin, gelecekteki orman yönetimi stratejilerine katkı sağlayacağını belirtmiştir.

McIver ve McNeil (2006) tarafından yapılan bir çalışmada 1996 yılında gerçekleşen Summit Yangını sonrası, iki yıl sonra yapılan üretim faaliyetleri uygulamasının toprak bozulması ve sediman taşınımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kontrol sahası, bütün yanmış ağaçların çıkarılmasını kapsayan ticari ağaç kesimi ve gövde çapı 10 cm'den büyük olan ağaçların kesimini içeren yakıt azaltma hasadı olmak üzere üç farklı ağaç üretim faaliyetleri uygulanmıştır. Buna göre yakıt azaltma hasadı alanında ortalama %19,4, ticari hasat yapılan alanlarda ise %15,2 toprak bozulması gözlemlenmiştir. Kontrol sahasında ise erozyon miktar ve oranlarının daha az olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak üretim faaliyetlerinin toprak bozulması üzerindeki etkilerinin yangın şiddetinden daha belirgin olduğu ifade edilmiştir. Özellikle üretim faaliyetleri esnasında kısa vadede, mevcut yol sisteminin çoğu sediman taşınımının başlıca sorumlusu olduğu sonucuna varılmıştır.

Fernandez ve Vega (2016b) tarafından yapılan çalışmada, 2013 yazında İspanya'nın kuzeybatısında çıkan şiddetli orman yangınından sonra okaliptüs ağaç kabuklarıyla toprak yüzeyinin malçlanması ve üretim faaliyetlerinin erozyon miktarları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, yangın sonrası okaliptüs ağaç kabuklarıyla toprak yüzeyinin kaplandığı ve üretim faaliyetlerinin yapıldığı, sadece üretim faaliyetleri yapılan ve

hiçbir işlem yapılmayan kontrol sahası olmak üzere üç farklı yönetim uygulaması içeren üç alanda toplam 36 deneysel parsel oluşturulmuştur. Bulgular, yangın sonrası ilk altı ayda, okalıptüs ağaç kabuklarıyla yapılan malçlamanın toprak kaybını %84 oranında azalttığını göstermiştir. Ayrıca, üretim faaliyetleri sonrası yapılan malçlama uygulamasında toprak kaybı 2,3 mg/ha olarak ölçülürken, sadece üretim faaliyetleri yapılan parsellerde bu değer 8,7 mg/ha olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, malçlama uygulamasının yangın sonrası toprak erozyonunu önemli ölçüde azalttığı ve üretim faaliyetleriyle birlikte yapılmasının erozyon miktarlarını önemli ölçüde düşürebileceği vurgulanmıştır.

Fernandez vd., (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, Kuzeybatı İspanya'nın Galisya bölgesindeki sahil çamı (*Pinus pinaster*) ormanlarında yangın sonrası üretim faaliyetlerinin ve bu esnada yanmış ağaç artıkları yönetiminin toprak erozyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, yangından sonra 15 deneysel parsel oluşturulmuş ve bu parsellerde toprak erozyonu, yağış miktarı ve yoğunluğu ile birlikte ölçülmüştür. Yangın sonrası 13. ayda, üretim faaliyetleri yapılmayan parsel (yangından kalmış ağaçlar), ağaç kesimi yapılan ve toprak yüzeyine yığılan ağaç artıkları, ağaç kesimi yapılan ve doğranan ağaç artıkları olmak üzere üç farklı yöntem karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, yangın sonrası ilk yıl boyunca toprak erozyonu oranlarının oldukça düşük olduğu belirlenmiş ve bu durum, yangının etkisinin sınırlı olması ve yağışların düşük olması ile ilişkilendirilmiştir. Üretim faaliyetleri sonrası uygulanan yöntemlerle, toprak kaybı daha da azalmıştır. Bu azalma, az sayıda mineral toprağın açığa çıkmasının ve düşük erozyon potansiyeli taşıyan yağışların etkisiyle açıklanmıştır. Elde edilen veriler, üretim faaliyetleri ve bu esnada makinelerin kullanımının toprakta değişiklikler meydana getirdiğini, ancak bu değişikliklerin erozyon üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermiştir.

Keyser vd. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, 2000 yılında Güney Dakota'daki Black Hills bölgesinde meydana gelen Jasper Yangını sonrasında yapılan kurtarma kesiminin, ponderosa çamı ormanlarındaki doğal yenilenme, yüzey yakıt birikimi ve alt katman bitki gelişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, orta ve yüksek yangın şiddetine maruz kalmış alanlarda üretim yapılan ve yapılmayan sahalara beş yıl boyunca karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, üretim yapılmayan alanlarda yangın sonrası ağaç ölümleri büyük bir yüzey yakıt yükü oluşturmuş; bu alanlarda ince odun (FWD) miktarı %1380, kalın odun (CWD) miktarı ise %980 oranında artmıştır. Buna karşın, üretim yapılan alanlarda ince odun artışı yalnızca %110 seviyesinde gerçekleşmiş, kalın odun birikimi ise 16 mg/ha ile sınırlı kalmıştır. Bu bulgular, üretim faaliyetlerinin yüzey yakıt yükünü belirgin şekilde azalttığını göstermektedir. Orta şiddetli yangına maruz kalan alanlarda, üretim yapılan sahalarda doğal

yenilenme oranı, bırakılan ağaç sayısının azlığı nedeniyle %75 daha düşük bulunmuştur. Yüksek şiddetli yangına maruz kalan alanlarda ise yenilenme oranı her iki durumda da düşük kalmış ve üretim faaliyetlerinin bu alanlarda sınırlı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Alt katman bitki örtüsü açısından, beş yıl boyunca üretim faaliyetlerinin anlamlı bir etkisi tespit edilmemiş; toplam bitki örtüsü örtüşü ve yabancı tür bolluğu açısından üretim yapılan ve yapılmayan alanlar arasında fark bulunmamıştır. Alt katman bitki örtüsünün üretim sonrası hızlı bir toparlanma gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, üretim faaliyetlerinin orta şiddetli yanık alanlarda doğal yenilenmeyi olumsuz etkileyebileceği, ancak alt katman bitki örtüsü üzerinde uzun vadeli belirgin bir olumsuzluk oluşturmadığı sonucuna varılmıştır.

Slekas vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, 2002 yılında Oregon'un güneyinde meydana gelen Timbered Rock yangını sonrası uygulanan üretim faaliyetlerinin erozyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, üretim yapılmış özel araziler ile üretim yapılmamış kamu arazilerindeki erozyon oranlarını karşılaştırmıştır. 2004–2005 döneminde erozyon, üretim yapılan alanlarda 0,05 mg/ha/yıl, yapılmayan alanlarda ise 0,02 mg/ha/yıl olarak ölçülmüştür. 2005–2006 döneminde ise bu oranlar sırasıyla 0,14 mg/ha/yıl ve 0,04 mg/ha/yıl olarak kaydedilmiştir. Üretim faaliyetleri yapılan sahalarda bitki örtüsü %5–20 arasında, üretim yapılmayan sahalarda ise %70–80 arasında değişmiş, bu da üretim uygulamalarının bitki örtüsünü önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bitki örtüsü ile erozyon arasında negatif bir ilişki tespit edilmiş; bitki örtüsündeki azalma, özellikle ilk yıl boyunca erozyon artışına neden olmuştur. Erozyondaki bu artış, aynı zamanda yağış miktarındaki artış ve sağanak yağış sıklığıyla da ilişkilendirilmiştir. 2005–2006 döneminde yağışlı gün sayısı önceki döneme göre iki kat artmış ve bu durum, erozyon oranlarını yükseltmiştir. Sonuç olarak çalışma, yangın sonrası üretim faaliyetlerinin erozyon süreçleri üzerindeki etkilerinin çok boyutlu ve koşullara bağlı olduğunu ortaya koymuş; bu etkilerin azaltılabilmesi için yerel çevresel koşullara uygun, sürdürülebilir arazi yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Safari vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, İran'ın kuzeyindeki Hyrcanian ormanlarında üretim faaliyetleri sırasında oluşturulan kaydırma yollarının (skid trails) yüzeysel akış ve toprak erozyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Darab Kola ormanlarında gerçekleştirilen çalışmada, yağmur simülasyonu yöntemiyle tekerlek izleri, merkezi alanlar ve bozulmamış orman zeminlerinde yüzeysel akış ve erozyon miktarları karşılaştırılmıştır. Simülasyon deneylerinde 20 dakika boyunca 54 mm/saat şiddetinde yağış uygulanmış ve toprak örnekleri 0–20 cm derinlikten alınmıştır. Bulgulara göre, tekerlek izlerinde ortalama %9,63, merkezi alanlarda %7,64 ve bozulmamış orman zeminlerinde yalnızca %0,49 oranında yüzeysel akış gözlemlenmiştir. Tekerlek izlerinde akış başlama süresi ortalama 2,41 dakika ile

bozulmamış zeminlerden çok daha kısa sürmüştür. Erozyon oranı ise tekerlek izlerinde 3.101,65 g/m²/saat, merkezi alanlarda 262,44 g/m²/saat, bozulmamış zeminlerde ise yalnızca 21,83 g/m²/saat olarak ölçülmüştür. Tekerlek izleri ve merkezi alanların toprak özellikleri benzerlik gösterirken, bozulmamış orman zeminleri daha yüksek organik madde içeriği, nem oranı ve daha uygun pH değerleri ile belirgin şekilde daha sağlıklı toprak özelliklerine sahiptir. Bu durum, bozulmamış zeminlerin suyu daha iyi tutma kapasitesine sahip olduğunu ve bu sayede erozyon riskini büyük ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, üretim faaliyetleri sırasında açılan kaydırma yollarının ormanda yüzeysel akışı ve toprak erozyonunu önemli ölçüde artırdığı, bu etkinin hem yerel çevre hem de aşağı havzalarda su kalitesi ve toprak kaybı açısından olumsuz sonuçlar doğurduğu belirtilmiştir. Çalışma, özellikle eğimli ve hassas orman arazilerinde bu yolların uygun erozyon kontrol önlemleri ile desteklenmesi gerektiğini ve sürdürülebilir orman yönetimi kapsamında bu konunun göz ardı edilmemesi gerektiğini vurgulamıştır.

Üretim Faaliyetlerinin (Salvage Logging) Su Kalitesi Özelliklerine Etkisi

Üretim faaliyetlerinin su kalitesi parametreleri ve yüzeysel akış içerisinde taşınan bitki besin maddeleri üzerine yapılan çalışmalar, erozyon üzerine yapılan çalışmalara oranla daha azdır. Nitekim orman yangınları, üretim faaliyetleri (salvage logging) ve rehabilitasyon yöntemlerini konu alan çalışmaların büyük bir bölümü erozyon ve sediman taşınım süreçlerine odaklanmıştır.

Ensing ve Malling (2001) tarafından yapılan çalışmada, Kuzey Karolina Eyaleti'nde 1998 yılında gerçekleştirilen orman üretim faaliyetlerinin (salvage logging) akarsu su kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Goshen Swamp ve kontrol sahası olarak belirlenen Six Runs Creek'te su sıcaklığı, çözülmüş oksijen (DO), toplam askıda katı madde (TSS), azot (TN), fosfor (TP), ortofosfat fosforu, pH ve elektriksel iletkenlik ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, üretim sonrası Goshen Swamp'ta su sıcaklığının 15,9°C'den 19,0°C'ye yükseldiği, ancak bu artışın anlamlı olmadığı bulunmuştur. Çözülmüş oksijen seviyesi ise 6,3 mg/l'den 4,7 mg/l'ye düşerek belirgin bir azalma göstermiştir. Bu düşüş, alg patlamaları nedeniyle oluşan biyokimyasal oksijen tüketimiyle ilişkilendirilmiştir. Üretim sonrası dönemde, Goshen Swamp'ta toplam askıda katı madde (TSS) miktarı önemli ölçüde artarak 3 mg/l'den 10 mg/l'ye yükselmiş, kontrol sahasında ise bu değer 2 mg/l olarak ölçülmüştür. Yağış sonrası taşınan yüzey akışının bu artışla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, toplam azot ve fosfor seviyeleri, özellikle Ekim 1998'de, kesim öncesine göre belirgin artışlar göstermiştir. Bu bulgular, üretim faaliyetlerinin kısa vadede suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerinde bozulmalara yol açtığını,

özellikle sediman yükü ve besin elementlerinin taşınımını artırarak su kalitesini olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Smith vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, Avustralya'nın güneydoğusunda yer alan Cropper Creek havzalarında 2006 yılında gerçekleşen orman yangınının ve ardından yapılan üretim faaliyetlerinin su kalitesi ve bitki besin maddelerinin taşınımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. 2007–2009 yılları arasında haftalık olarak ve yüzeysel akış miktarına göre su örnekleri toplanmış ve alınan su örneklerinde toplam askıda katı madde (TSS), bulanıklık, partikül fosfor (P), fosfor, kükürt, klor, sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum değerleri analiz edilmiştir. Çalışma bulgularına göre, üretim faaliyetleri yapılan havzada toplam sediment taşınımı (TSS + yatak yükü) 3 yılda 31,1 ton/ha olarak hesaplanmış ve bu, kontrol sahasına göre yaklaşık 173 kat daha fazla sediman taşınımı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, toplam fosfor miktarı, üretim faaliyetleri yapılan havzada kontrol sahasına oranla yaklaşık 126 kat artmıştır. Nitrat azotu, potasyum, kalsiyum ve magnezyum miktarları ise kontrol sahasına kıyasla yaklaşık 2 ile 4 kat arasında artış göstermiştir. Sonuç olarak, orman yangınından sonra yapılan üretim faaliyetleri, özellikle taşınan sediman miktarını önemli ölçüde artırmış ve fosfor taşınımını yükseltmiştir. Bununla birlikte, nitrat azotu, potasyum, kalsiyum ve magnezyum miktarındaki artışlar, taşınan sediman ve fosfor miktarına kıyasla daha düşük olmuştur.

Lewis vd., (2019) tarafından Kuzey Kaliforniya'daki Battle Creek havzasında yapılan bir çalışmada yangının ardından uygulanan üretim faaliyetlerinin akarsudaki bulanıklık değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bulanıklık ölçümleri, 2009–2015 arasında 13 istasyonda yapılmıştır. Bu çalışmada bulanıklık değerleri, analiz süresi boyunca 10 istasyonda anlamlı şekilde artmıştır. Buna göre bulanıklık değerleri, kontrol sahasına göre yangın sonrası birinci yılında %5, üretim faaliyetlerinin ilk 9 ayında ortalama %11,6, üretim faaliyetleri sonrası 10-18 ay arasında ise %6 oranında artmıştır. Bu veriler, yangından çok üretim faaliyetlerinin bulanıklığı daha fazla etkilediğini göstermiştir. Nitekim yangın öncesinde maksimum bulanıklık 81 NTU iken, üretim faaliyetleri sonrasında bulanıklık değeri 1.000 NTU'ya kadar çıkmıştır. Sonuç olarak üretim faaliyetleri, özellikle ilk kış döneminde, bulanıklık değerini belirgin şekilde arttırmış olup, bu artış, yangının kendisinden bile daha fazladır. Bulanıklık artışları hem orman yolları hem de yamaçların bozulmasından kaynaklandığı ifade edilmiş ve bu iki faktör birbirinden bağımsız olarak ayrıştırılamadığı sonucuna varılmıştır.

Üretim faaliyetlerinin su kalitesi üzerine etkilerinin sınırlı olduğu konusunda yapılan az sayıda çalışma da vardır. Georgiev vd., (2021) tarafından Almanya'nın Bavyera Ulusal Orman Parkı'nda yapılan bir çalışmada, yangının ve üretim faaliyetlerinin su kalitesi üzerindeki

etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için 1985-2018 yılları arasında yapılan akarsulardaki su kalitesi izleme verileri değerlendirilmiştir. Buna göre üretim faaliyetleri, nitrat ve çözünmüş organik karbon (DOC) konsantrasyonları üzerinde ek bir etki yaratmamıştır. Bu durum, üretim faaliyetlerinin akarsuyun su kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını göstermiştir.

Son olarak Bren ve Ryan (2024) tarafından Avustralya'nın doğusunda yapılan bir çalışmada uygulanan üretim faaliyetlerinin su kalitesi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada 32 farklı akarsuda haftalık olarak su sıcaklığı, bulanıklık ve çözünmüş oksijen düzeyleri ölçülmüştür. Bu izleme, iki ila üç yıl süresince gerçekleştirilmiştir. Buna göre üretim faaliyetleri yapılan havzalarda ortalama bulanıklık 2,4 NTU, üretim faaliyetleri yapılmamış olan kontrol havzalarında ise 3 NTU olarak ölçülmüştür. Benzer olarak üretim faaliyetleri yapılmış olan havzalarda ortalama çözünmüş oksijen 11 mg/l, kontrol havzalarında ise ortalama çözünmüş oksijen 10,8 mg/l olarak belirlenmiştir. Bu değerler, yerel akarsuların yüksek oksijen seviyelerine sahip olduğunu göstermiştir. Son olarak akarsuların ortalama sıcaklığı, üretim faaliyetleri yapılan havzalarda 9,4 °C, kontrol havzasında ise 9,8 °C olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklıklar, bölgedeki su sıcaklık standartları açısından kabul edilebilir seviyelerde kalmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, üretim faaliyetlerinin su kalitesi üzerindeki etkilerinin genellikle küçük ve geçici olduğunu göstermiştir. Su kalitesi, üretim faaliyetleri yapılan akarsularda iyi düzeyde kalmış, bu da üretim faaliyetlerinin su kalitesini olumsuz etkilemediğini göstermiştir.

Farklı Rehabilitasyon Yöntemlerinin Doğal Kaynaklar Üzerindeki Etkileri

Orman yangınları, toprak özellikleri, su kaynakları ve erozyon süreçleri üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu alanlardaki ana zorluk, orman yangınlarının bitki örtüsü, toprağın fiziksel ve kimyasal yapısı, su kaynakları, yüzeysel akış ve erozyon süreçleri üzerindeki olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi ve yangınla zarar gören alanların en kısa sürede doğal işlevlerini yeniden kazanacak şekilde rehabilite edilmesidir.

Yangın sonrası rehabilitasyon uygulamaları, yangınla tahrip olan bitki örtüsünün etkisiyle artan yüzeysel akış ve toprak erozyonunu azaltmayı amaçlayan yaygın yöntemlerdir (Shakesby vd., 1996; Vega vd., 2014). Bu amaçla uygulanan toprak koruma stratejileri arasında şunlar yer almaktadır: (a) yağış sularının toprak içine sızmasını artırarak erozyonu azaltmak için yanmış alanların otsu bitkilerle tohumlanması ve gübrelenmesi; (b) yangın sonrası açıkta kalan toprak yüzeyinin organik materyallerle örtülmesi (malçlama) – örneğin saman, talaş veya odun artıkları kullanılarak zemin örtüsünün artırılması (Robichaud, 2005; Kim vd., 2008;

Fernández vd., 2012); (c) toprak yüzeyinin sentetik polimerlerle kaplanarak erozyona karşı direncinin artırılması (hidromalç uygulamaları) (Ben-Hur, 2006; Inbar vd., 2015); (d) yüzeysel akışı ve toprak kaybını azaltmak amacıyla yanmış ağaç kütüklerinin eş yükselti eğrilerine paralel olarak yerleştirilmesi (Robichaud vd., 2000) gibi yöntemler.

Türkiye’de ise yangın sonrası rehabilitasyon çalışmaları kapsamında en yaygın uygulamalar, (1) yanmış alanların tohumlanması ve dal serilmesiyle malçlama yapılması (doğal gençleştirme, tohumlama + dal serme), (2) bu alanların eş yükselti eğrilerine paralel olarak sürülmesi ve ardından fidan dikimi (yapay gençleştirme). (3) Daha az sıklıkla ise sahaların doğal gelişimine bırakılması tercih edilmektedir.

Yangın sonrası uygulanan farklı rehabilitasyon yöntemlerine dair yapılan araştırmalar genellikle yüzeysel akış ve erozyon süreçlerine odaklanmaktadır. Bununla birlikte, rehabilitasyon yöntemlerinin toprak özellikleri, yüzeysel akış ve erozyon, su kalitesi parametrelerine olan etkileriyle ilgili çalışmalar ise sınırlıdır. Bu nedenle, rehabilitasyon yöntemlerinin doğal kaynaklar üzerindeki etkilerine dair mevcut çalışmalar tek bir başlık altında değerlendirilmiştir.

Portekiz, İspanya, İtalya ve Fransa başta olmak üzere Akdeniz ülkeleri ve ABD’de yangın sonrasında ağırlıklı olarak saman veya odun artıklarının toprak yüzeyini kaplayacak bir şekilde koruyucu örtülerin uygulanması (toprak yüzeyinin malçlanması), maliyet ve kolaylıkla uygulanabilirliği açısından yangın sonrası toprak erozyonunun azaltılması için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Robichaud vd., 2000; 2013a). Bu malçlama işleminde en yaygın olarak uygulanan saman malçları, buğday, arpa veya çavdardan elde edilen tarımsal artıklardan oluşur. Öte yandan, odun kalıntısı, parçalanmış veya doğranmış ağaç kabukları, ağaç dallarından ve/veya kütüklerinden elde edilen, yerinde üretilen ve parçalama şeklinde uygulanabilen talaşlar, iplik veya cips boyutunda daha heterojen bir dizi malzemeyi içerir. Malçlama uygulamaları, damla erozyonu etkisini azaltan, suyun toprak içerisine sızmasını kolaylaştıran, infiltrasyonu arttıran ve yüzeysel akışı yavaşlatan bir örtü sağladığından, toprak erozyon oranlarını ve yüzey akışı miktarını azaltmak için önemli bir faktördür (Smets vd.,2008).

Diaz-Ravina vd., (2012) tarafından İspanya’nın kuzeybatısından 2010 yılında çıkan yüksek şiddetli bir orman yangının ardından yanan alanların samanla yüzeyin kaplanması (malçlama) ile tohumlamanın erozyon üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaya göre; çavdar ile yanmış alanların tohumlanması, dört aylık bir dönem boyunca sediman verimini %34-42 oranında, saman ile toprak yüzeyinin kaplanması ise aynı dönemde sediman verimini %73-94 oranında önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak saman malçlaması, yangının hemen ardından toprak erozyonunu azaltmada tohumlamaya kıyasla önemli ölçüde

daha etkili olduğu ifade edilmiş ve yanmış sahaların rehabilite edilmesinin ise oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır.

Robichaud vd. (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, 1998 yılında Washington Eyaleti'ndeki orman yangınından sonra tohumlama ve gübrelemenin erozyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yangın sonrası 4x9 m boyutlarında parsellerde kışlık buğday ve amonyum nitrat-gübre karışımı kullanılmış, ayrıca kontrol parselleri de oluşturulmuştur. Dört yıl süren ölçümlerde, toplam yağış miktarının genellikle düşük olduğu, ancak erozyona neden olan yağışların kısa süreli sağanak karakterde olduğu gözlemlenmiştir. İlk yıl ortalama erozyon oranı 16 mg/ha/yıl olarak hesaplanmış, ikinci yıl ise 0,66 mg/ha/yıl'a düşmüştür. Tohumlama ve gübrelemenin erozyon oranı üzerinde belirgin bir fark yaratmadığı, çünkü ilk yıl zemin örtüsünün %60-70 seviyelerine ulaşmadığı ve erozyonun etkili şekilde önlenemediği belirtilmiştir.

Robichaud vd. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, Montana'nın batısında 2000 yılında meydana gelen Valley Complex Yangını sonrası yüzeysel akış ve erozyon miktarlarını azaltmak amacıyla farklı rehabilitasyon yöntemlerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Eş yükselti eğrilerine paralel serilen ağaç kütükleri, samanla yüzey kaplama ve el ile kazılmış hendekler uygulamaları yapılmış, her bir uygulama için kontrol parselleri de oluşturulmuştur. Yağış simülasyonu sırasında her parsel bir saat boyunca saatte 26 mm yağış almıştır. Sonuçlar, eş yükselti eğrilerine paralel serilen kütükler (0,58 mm) ve samanla kaplanan parsellerdeki yüzeysel akışın (0,40 mm), kontrol parsellerine (2,0 mm) göre önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermiştir. Hendek açılan parsellerdeki yüzeysel akış (1,3 mm) ise kontrol parselleriyle benzer seviyelerde bulunmuştur. Sediman üretimi açısından, samanla kaplanan parsellerde (0,21 mg/ha) anlamlı bir azalma gözlemlenirken, diğer uygulamalarda (kütükler: 0,58 mg/ha, hendekler: 2,5 mg/ha) farklar istatistiksel olarak anlamlı olmamıştır. Özellikle şiddetli sağanaklar sırasında erozyon bariyerlerinin ve hendeklerin hızla sedimanla dolduğu ve bariyerler yarıya kadar dolmuş olsa bile sedimanın taşınmaya devam ettiği tespit edilmiştir.

Wagenbrenner vd., (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, tohumlama, saman malçlama ve eş yükselti eğrilerine paralel olarak yerleştirilen ağaç kütüklerinin erozyon oranlarını azaltmada ne kadar etkili olduğunu değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında 12 yanmış ve işlem görmemiş kontrol parseli ile 22 yanmış ve rehabilitasyon uygulanmış parsellerinde sediman verimi ölçülmüştür. Buna göre tohumlamanın sediman veriminde belirgin bir etkisi olmadığını, Samanla malçlamanın ise 2001, 2002 ve 2003 yıllarında kontrol alanlarına kıyasla sediman verimini %95 oranında azaltmıştır. Eş yükselti eğrilerine paralel olarak yerleştirilen ağaç kütüklerinin ise kurulum kalitesine bağlı olarak

değişkenlik göstermiş, kuvvetli sağanak karakterli yağışın ardından erozyon oranlarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak samanla malçlamanın yüzey örtüsünü arttırması sayesinde erozyon miktar ve oranlarını düşüren en iyi yöntem olduğu ifade edilmiştir.

Fernandez vd., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada İspanya'nın kuzeybatısında 2015 yılında gerçekleşen bir orman yangınından sonra toprak erozyonunu azaltmada saman malçlama ve toprak yüzeyinin çam iğneleriyle kaplanması yöntemlerinin etkinliği karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada yangından sonraki iki yıl boyunca 30 parselde toprak erozyon miktar ve oranları ölçülmüştür. Buna göre hem saman malçlama hem de toprak yüzeyinin çam iğneleriyle kaplanması toprak kaybını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Saman malçlama yöntemi, yanmış toprak üzerinde %90 oranında bir kaplama sağlamış ve toprak kaybını %97 oranında azaltmıştır. Toprak yüzeyinin çam iğneleriyle kaplanması da benzer bir etki göstermiştir. Bu iki yöntemin benzer etkinliğe sahip olması, her ikisinin de toprak yüzeyini benzer oranda kaplamasıyla açıklanmıştır. Sonuç olarak özellikle yangın sonrasında toprak yüzeyinin çam iğneleriyle kaplı olmasının oldukça etkili olduğu ve bu yöntemin uygulanabileceği yerlerde acil toprak erozyonunu azaltıcı müdahalelere gerek olmadığı vurgulanmıştır.

Fernandez vd., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada İspanya'nın kuzeybatısındaki bir ormanlık alanda yangın sonrası toprak erozyonunu etkileyen faktörler incelenmiştir. Araştırmanın amacı, iki farklı mekanik alan hazırlığı tekniği (delik açarak dikim ve eş yükselti eğrilerine paralel olarak sürme) ile erozyon üzerindeki etkileri değerlendirmektir. Son olarak, başlangıçta delik dikimi ve eş yükselti eğrilerine paralel olarak sürme ile oluşturulan yanmış alanlara yerleştirilen erozyon bariyerlerinin etkinliği değerlendirildi. Çalışma, yangından hemen sonra seçilen iki alanda 30 deneme parseli kurulmuş ve bu parsellerde toprak özellikleri (karbon içeriği, yoğunluk, vb.) ölçülerek erozyon bariyerlerinin erozyon miktarlarına etkisi araştırılmıştır. Bulgular, eş yükselti eğrilerine paralel olarak sürülen alanlardaki toprak kaybının, delik açarak dikim yapılan (6,7 mg/ha) ve müdahale edilmeyen alanlara (4,9 mg/ha) göre anlamlı şekilde daha düşük olduğunu göstermiştir (0,7 mg/ha). Sonuç olarak erozyon bariyerleri, yangın sonrası erozyonu azaltmada etkili olmamış ve erozyon miktarları beklentinin altında kalmıştır. Ayrıca, toprak kaybı, toprak yanma şiddeti ile ilişkilendirilmiş, ancak toprak özellikleri ile erozyon arasında belirgin bir ilişki bulunamamıştır.

Fernandez ve Vega (2016a) tarafından yapılan bir çalışmada İspanya'nın kuzeybatısındaki yüksek şiddetteki bir yangın sonrası toprak erozyonunu kontrol etmek amacıyla erozyon bariyerleri ve samanla malçlama yöntemlerinin etkinliği araştırılmıştır. Çalışma, 2010 yazında meydana gelen bir yangının ardından, 1,5 mg/ha oranında samanla

malçlama uygulaması ve erozyon bariyerleri ile yapılan 12 deneme parseli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yangın sonrası toprak kaybı, kontrol parsellerine göre malçlama ile %38 ve erozyon bariyerleri ile %26 oranında azalmıştır. Ancak, ilk iki yıl boyunca toprak kaybı oldukça yüksek seyretmiştir; bu durum, bölgedeki yağışların yoğunluğuyla ilişkilendirilmiştir. Erozyon bariyerleri, beklenenin aksine, yüksek yağış alanlarında etkili olmamıştır. Malçlama uygulaması, ilk aylarda toprak kaybını %70 oranında azaltmasına rağmen, zamanla etkinliği azalmış ve ortalama %53'lük bir koruma sağlamıştır. Sonuç olarak, erozyon bariyerlerinin ve düşük oranlı saman malçlamanın, yüksek yağış bölgelerinde toprak kaybını önlemedeki etkinliği sınırlı kalmıştır. Ayrıca, yangın sonrası vejetasyon örtüsünün toprak kaybını azaltmadığı görülmüştür.

Badia ve Marti (2000) tarafından yapılan bir çalışmada İspanya'nın Orta Ebro Vadisi'nde, yanmış iki farklı toprak tipinde (jipsli ve kireçli) tohumlama (seeding) ve malçlama (mulching) işlemlerinin erozyon kontrolü üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırmada, kontrol, sadece tohumlama ve tohumlama ile malçlama yapılan üç farklı uygulama için dört tekrarlı parsel oluşturulmuştur. Tohumlama oranı 30 gram/m², malçlama ise 100 gram/m² olarak uygulanmıştır. İlk yıl boyunca, tohumlanan türler bitki örtüsünü %30 oranında artırmış, ancak ikinci yılda bu türlerin çoğu hayatta kalamamıştır. Kontrol parsellerinde çıplak toprak oranı, uygulamalı parsellerden önemli ölçüde daha yüksektir. Malçlama ve tohumlama uygulamaları, erozyon kontrolünde etkili olmuş ve toprak kaybını azaltmıştır. Ayrıca Jipsli topraklarda, kireçli topraklara göre daha fazla toprak kaybı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak orman yangınlarının bitki örtüsü ve toprak özellikleri üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için tohumlama ve malçlama uygulamalarının faydalarını vurgulamaktadır. Bu yöntemler, doğal bitki yenilenmesini destekleyerek, erozyon riskini azaltmaya yardımcı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Marques ve Mora (1998) tarafından yapılan bir çalışmada Katalonya, İspanya'da 1986 yılında meydana gelen bir orman yangınından sonra yanmış ağaçların hemen kesilerek çıkartılması ve yanmış ağaçların yerinde bırakılmasını içeren iki farklı uygulamanın erozyon miktar ve oranlarına olan etkileri araştırılmıştır. İki farklı yön (kuzey ve güney) ile farklı eğimlerde 200 m² boyutunda deneysel parseller kurulmuş ve erozyon ölçümleri, yağış sonrası toplanan su ve sediman miktarı ile belirlenmiştir. Araştırma bulguları, yangından hemen sonra ağaçların kesilerek çıkartılması (clear-cutting) işlemi uygulanan parsel ile yanmış ağaçların yerinde bırakılan parselin erozyon oranlarının benzer olduğu ifade edilmiştir. Nitekim en yoğun yağışta (182 mm), ağaç kesilen alanda 347 gram/m², doğal bırakılan alanda ise 350 gram/m² erozyon meydana geldiği belirlenmiştir. Zamanla, her iki parselde de doğal bitki örtüsü gelişmiş

ve bu da erozyon oranlarını azaltmış ve özellikle kuzey bakılı parsellerde, doğal bitki örtüsünün sağladığı koruma, toprak kaybını minimize ettiği görülmüştür. Sonuç olarak ağaç kesim uygulaması, erozyon oranlarını arttırmada etkili olmamakla birlikte ağaç kesimi ile ilgili tüm işlemlerin dikkatlice planlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Prosdoci mi vd., (2016) tarafından yapılan derleme bir çalışmada farklı oranlarda uygulanan malçlama tekniklerinin tarım arazileri, yangın sonrası alanlar, mera arazileri ve insan etkisi altındaki bölgelerde toprak ve su kaybını azaltmadaki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yazarlar, 23 deneysel çalışmadan veri toplayarak 296 kayıtlı bir veri tabanı oluşturmuş ve bu veriler, alan ölçeği, ölçüm yöntemleri ve toprak koruma teknikleri gibi çeşitli değişkenleri içermektedir. Çalışmalar, kontrol ve malçlama uygulanmış parsellerin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu veriler doğrultusunda malçlama uygulamalarının tüm incelenen ortamlarda su ile toprak erozyonunu azaltmada faydalı olduğunu, Ortalama tortu konsantrasyonu, toprak kaybı ve yüzey akışı miktar ve oranlarında bazı durumlarda yaklaşık %90 oranında azalma sağladığı ifade edilmiştir. Malçlama uygulamalarının etkinliğini artırmak için malç uygulama oranı, kaplama yüzdesi ve malçlama türü gibi faktörlerin çok önemli olduğu ve toprak ve su kalitesini koruma açısından daha koruyucu bir toprak yönetimi uygulaması olduğu sonucuna varılmıştır.

Zituni vd., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada İsrail'in Carmel Dağı'nda 2010 yılında çıkan şiddetli bir yangınının ardından uygulanan farklı orman yönetim uygulamalarının, yangından 3 ve 4 yıl sonra toprak erozyon oranları üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada a) Koruma Yönetimi (PM)- yanmış alana ağaç kesim artıklarının serilmesi; (b) Ağaç Temizleme Yönetimi (TCM)- yanmış ağaçların kesilip çıkarılması; (c) Sürütme Yolu Oluşumu (ST)- ağaçların taşınması sırasında oluşan geçici yollar olmak üzere üç farklı uygulama değerlendirilmiştir. İki su yılı boyunca (2013-14, 2014-15) yağış olaylarından sonra toplanan sedimanların analizi ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre yanmış ağaçların kesilip çıkarılmasını kapsayan üretim faaliyetleri ve ağaçların taşınması sırasında oluşan geçici yolların yanmış alana ağaç kesim artıklarının serilmesine göre anlamlı şekilde daha yüksek toprak erozyon oranlarına yol açtığını göstermiştir. Ağaç kesim artıklarıyla yapılan malçlama uygulaması, toprak üzerindeki olumlu etkisi belirgin olmuştur. Tüm bu yönetim uygulamaları, bitki yenilenmesini ve ekosistem rehabilitasyonunu olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

Robichaud vd., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada Colorado bölgesinde 2002 Hayman yangınından ardından uygulanan farklı rehabilitasyon çalışmalarının sediman taşınması ve erozyon azaltma etkinliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada yangın sonrasında el ile eş yükselti eğrilerine paralel bir şekilde sürme, üst toprağın samanla

malçlanması, ağaç kesim artıklarıyla malçlanması, yanmış kontrol sahası ve yanmamış referans parselleri gibi çeşitli rehabilitasyon yöntemleri test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yanmış ama bir işlem yapılmamış kontrol ve el ile sürüm yapılan parsellerin, saman ve ahşap malçlama uygulamalarından daha fazla sediman taşınımı gösterdiği tespit edilmiştir. Malçlama tedavileri, akış hızını ve sediman konsantrasyonunu azaltmış ve yangından sonraki 10. yılda, ahşap malçlama tedavisinin sediman miktar ve oranlarının, yanmamış koşullara en yakın seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Sonuç olarak yangın sonrası sediman taşınma oranlarını ve acil durum erozyon azaltma tedavilerinin etkinliğini anlamak için önemli bilgiler sunduğu ve çeşitli tedavi yöntemlerinin etkinlikleri, uzun dönemli etkilerinin değerlendirilmesi açısından önem taşıdığı vurgulanmıştır.

Robichaud vd., (2013a) tarafından yapılan bir çalışmada 2009 yılında Britanya Kolombiyası'ndaki (Kanada) Terrace Dağı yangınından sonra ağaç kesim artıklarıyla ve tarımsal samanla uygulanan malçlamanın erozyon miktarını azaltmadaki etkinliği değerlendirilmiştir. Araştırma 1 m²'lik alanlarda yağmur simülasyonları, 9 m uzunluğundaki yoğun akış simülasyonları ve 30 m²'lik doğal yağmur alanlarında olmak üzere üç deneysel parsel üzerinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre hem odun parçaları hem de tarımsal saman malçlarının, kontrol gruplarına kıyasla sediman verimlerini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Malç uygulamaları, yüzeysel akış hızını azaltırken, toprakta infiltre olan su oranını artırmıştır. Ayrıca, bitki örtüsündeki artış, zamanla sediman verimlerinin azalmasında rol oynayan önemli bir faktör olmuştur. Her iki rehabilitasyon uygulamaları da erozyon miktar ve oranlarını azaltmada benzer bir şekilde etkili olmuş ve bu nedenle, yangın sonrası malç uygulaması için tarımsal saman veya odun parçalarının seçiminde, maliyet, dayanıklılık ve yerel ihtiyaçlar gibi özelliklerin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Robichaud vd., (2013b) tarafından yapılan bir başka çalışmada 2002 ve 2005 yılları arasında ABD'nin dört farklı yerinde (Hayman (Colorado), Hot Creek ve Myrtle Creek (Idaho), ve School (Washington)) yüksek şiddetli bir orman yangınından sonra uygulanan buğday artıklarıyla, odun lifleriyle yapılan malçlama ve hidromalç işlemlerinin erozyon ve yüzeyse akış miktar ve oranlarını azaltmadaki verimliliği değerlendirilmiştir. Buna göre malç uygulamaları, toplam toprak örtüsünü %60'ın üzerine çıkarmış ve bu da erozyonun azalmasına katkı sağlamıştır. Odun lifleri en uzun süre kalıcı iken, buğday samanı daha hızlı bir şekilde bozulmuş ve hidromalç uygulaması ise sadece ilk yıl boyunca etkili olmuştur. Farklı yangınlar için malçların erozyon üzerindeki etkisi değişiklik göstermiştir. Odun lifleri, 2 yangında sediman verimlerini azaltırken, buğday samanı sadece 4 yangından 2'sinde etkili olmuştur. Genel olarak, malç türlerinin erozyonu azaltmadaki verimliliği, yangın sonrası koşullara bağlı olarak değişim

göstermiştir. Sonuç olarak farklı malçlama uygulamalarının erozyon miktarlarını azaltmada etkili olduğu ve bu tür malç uygulamalarının, özellikle giderek artan yangın riskleri ve iklim değişikliği göz önünde bulundurulduğunda, önemli bir yönetim aracı olabileceği belirtilmiştir.

Robichaud vd., (2013c) tarafından yapılan bir başka çalışmada 2002 Hayman Yangını ve 2003 Cedar Yangını sonrası uygulanan buğday malçlaması ve hidromalçın erozyon miktarı ve yüzeysel akış süreçleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Toprak yüzeyine serilen buğday samanı malçının, Hayman Yangını'nda zirve akış hızlarını ve sediman verimlerini önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur. İlk iki yıl boyunca buğday samanı uygulanan havzada, kontrol havzasına kıyasla akış hızları ve sediman verimleri yarıdan fazla azalmıştır. Hidromalç uygulamasının etkisi, her iki yangında da sınırlı kalmış ve toprak yüzeyine uygulanan hidromalç işlemi kısa sürede etkisini yitirmiştir. Sonuç olarak bu çalışma yangın sonrası malç uygulamalarının uzun vadeli etkilerini ve etkinliklerini değerlendirmek için önemli bir katkı sağladığı ifade edilmiştir.

Robichaud vd., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada 2010 yılında Utah'ta meydana gelen Twitchell Canyon Yangını'ndan sonra yüksek şiddette yanmış bölgelerde saman balyası kontrol barajları kullanarak yangın sonrası sediman veriminin azaltılmasındaki verimliliği değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları, ilk yağış olayları sırasında, saman balyası barajları hızla dolmuş ve bu durum, yıllık sediman verimlerini istatistiksel olarak azaltmamıştır. Tedavi edilen havzalardaki yıllık sediman verimleri, 19,6 ila 25,7 mg/ha arasında değişmiş olup, barajlar dolduktan sonra ise 3,8 ila 13,1 mg/ha sedimanın geçmesine neden olmuştur. Saman balyasından yapılan küçük barajların ortalama sediman tutma kapasitesi, 1,3 mg olarak hesaplanmış ve toplam sedimanın %50'sinden azını tuzaklayabildiği görülmüş ve sediman tuzak verimliliği zamanla düşmüştür. Araştırma, saman balyası kontrol barajlarının yüksek yoğunluklu yağış ve erozyon hızının yüksek olduğu toprak koşullarında etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, oluşturulan küçük barajların sayısının artırılmasıyla tuzak verimliliğinin artırılabilirliği düşünülmektedir.

Vieira vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, 2008'de Portekiz'in Góis bölgesinde meydana gelen orman yangını sonrasında üç farklı arazi yönetimi uygulamasının yüzeysel akış ve erozyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yangın sonrası, eş yükselti eğrilerine paralel sürülen alanlar ile kontrol edilen diğer alanlar karşılaştırılmıştır. İlk yıl yüzeysel akış oranları %8–17 arasında değişirken, ikinci yıldan itibaren bu oranlar artmış ve dördüncü yıl sonunda yüzeysel akış, eş yükselti eğrilerine paralel sürülen alanda 503 mm, sürülmeyen alanda ise 459 mm olarak ölçülmüştür. Sediman taşınımı, ilk yıl eş yükselti eğrilerine paralel sürülen alanda 0,55 mg/ha/yıl iken, dördüncü yıl 0,74 mg/ha/yıl'a çıkmıştır. Zemin örtüsünün %30'un altına

düşmesiyle erozyon arttığı ve yüzey akışının yağış miktarı, toprak geçirimsizliği gibi faktörlerle ilişkili olduğu bulunmuştur. Bu bulgular, yangın sonrası yüzeysel akış ve erozyon süreçlerinin, arazi yönetimi stratejilerine göre değiştiğini ve uygun toprak koruma yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır.

Keizer vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, 2015'te Portekiz'in Vale de Colmeias bölgesinde gerçekleşen orman yangınının ardından malçlamanın erozyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, kontrol parselleri, düşük oranlı malç (2,6 mg/ha) ve yüksek oranlı malç (8,0 mg/ha) uygulanan parseller arasında yapılmıştır. Bulgular, malçlamanın sediman kaybını %86–96 oranında azalttığını, kontrol parsellerinde ortalama 8,0 mg/ha olan sediman kaybının, düşük ve yüksek oranlı malç uygulanan parsellerde sırasıyla 1,1 mg/ha ve 0,3 mg/ha'ya düştüğünü göstermiştir. Ayrıca, malçlama organik madde kaybını da önemli ölçüde azaltmıştır. Toprak nemi, malç uygulanan alanlarda kontrol parsellerinden %3–4 daha yüksek bulunmuş ve yüksek oranlı malçlama ile nemin daha fazla korunduğu tespit edilmiştir. Çalışma, malçlamanın yangın sonrası erozyon kontrolünde etkili olduğunu ve daha düşük malç oranlarının bile kabul edilebilir erozyon sınırlarını sağladığını vurgulamıştır. Sonuç olarak, düşük malç oranlarıyla daha geniş alanların korunabileceği ve bu uygulamanın sürdürülebilir bir çözüm sunduğu ifade edilmiştir.

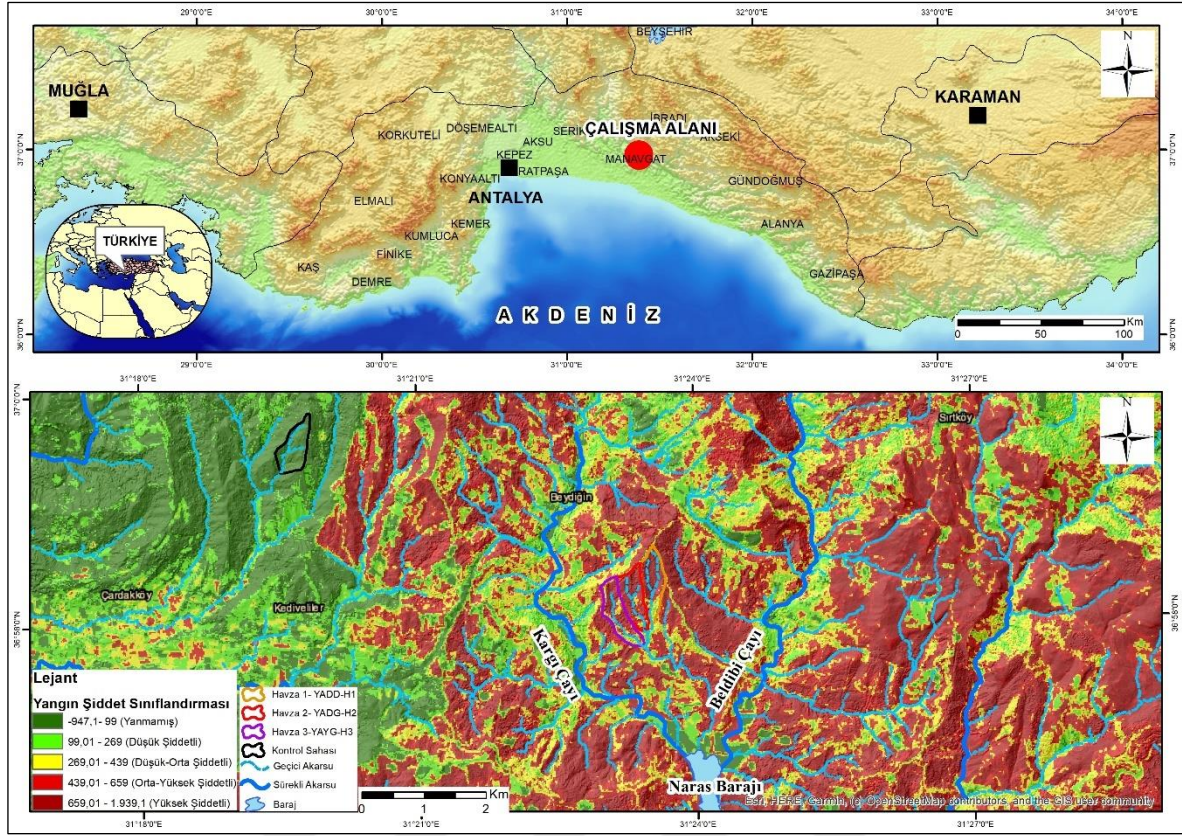
Girona-Garcia vd., (2021) tarafından yapılan derleme niteliğindeki bir çalışmada orman yangını sonrasında uygulanan farklı rehabilitasyon yöntemlerinin erozyon üzerindeki etkileri bu zamana kadar yapılan yayınların erozyon verileri karşılaştırılmıştır. Çalışmada, 34 yayın üzerinden 53 çift yangın sonrası doğal haline bırakılmış ve 222 çift farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış gözlem sahaları oluşturulmuştur. Farklı tedavi türlerinin etkinliği; malçlama bazlı (saman, kesim artıkları, hidromalç), erozyon bariyerleri, tohumlama ve kimyasal tedaviler olarak dört grupta incelenmiştir. Buna göre tüm tedavi yöntemleri, yangın sonrası toprak erozyonunu önemli ölçüde azaltmıştır. Sadece malçlama ve erozyon bariyeri uygulamaları, yangın sonrası yüzeysel akış miktarını azaltmada etkili bulunmuştur. Malçlama uygulamaları arasında, saman ve kesim artıkları ile toprak yüzeyinin kaplanması, hidromalç uygulamasından daha etkili sonuçlar vermiştir. Samanla toprak yüzeyinin kaplanması (saman malçlama), uygulama oranına bağlı olarak değişmiş olup, 200 gram/m² altında daha az etkili bulunmuştur. Sonuç olarak yangın sonrası erozyon kontrol tedavileri, genel olarak "hiçbir şey yapmamaktan" daha etkili bir seçenek olarak değerlendirilmiştir.

Vega vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, Kuzeybatı İspanya'nın Galisya bölgesindeki yüksek şiddetli bir yangın sonrası toprak erozyonunu azaltmak amacıyla saman malçlama + tohumlama (2,5 mg/ha + 3 g/m²) ve yalnızca tohumlama (3 g/m²) yöntemlerinin

etkinliği, işlenmemiş kontrol grubuyla karşılaştırılarak incelenmiştir. Araştırma, yangın sonrası ilk iki yıl boyunca tedavi uygulamalarının sediman verimine etkisini takip etmiştir. Sonuçlara göre, saman malçlama + tohumlama tedavisi, erozyonu kontrol grubuna göre %93 oranında azaltmıştır. Ancak, yalnızca tohumlama uygulanan alanlardaki sediman verimi, kontrol grubuyla neredeyse aynı kalmıştır (27,6 mg/ha ve 27,3 mg/ha). Erozyon kayıplarının %81'i yangından sonraki ilk yıl içinde gerçekleşmiş ve bu dönemde yağış yoğunluğu ile toprak kaybı arasında anlamlı bir ilişki bulunmuştur. Saman malçlama, tohumlanan otların gelişimini ve yerel bitki örtüsünün toparlanmasını desteklemişken, yalnızca tohumlama uygulamasının bitki örtüsüne katkısı sınırlı kalmıştır. Sonuç olarak, çalışma saman malçlama + tohumlama uygulamasının yangın sonrası erozyonu azaltmada etkili olduğunu, ancak bitki örtüsü gelişiminin erozyonla ilişkisinin karmaşık ve sınırlı olduğunu göstermiştir.

Araştırma Sahasının Yeri ve Sınırları

Manavgat orman yangını, 28 Temmuz 2021 tarihinde Antalya Orman Bölge Müdürlüğü sınırları içinde meydana gelmiş ve yaklaşık 76.660 hektarlık bir alanı etkilemiştir. Bu çalışmada, yangından etkilenen alanda, birbirine bitişik üç mikro havza (Havza 1-YADD-H1, Havza 2-YADG-H2 ve Havza 3-YAYG-H3) belirlenmiştir. Bu havzalar, Manavgat Çayı Havzası'nın güneybatısında, Antalya ilinin Manavgat ilçesine bağlı Taşağıl ve Beydiğın yerleşim yerlerine yakın konumda bulunmaktadır. Ayrıca, yangın geçirmemiş bir kontrol sahası da bu havzalara yaklaşık 5 km mesafede, Manavgat ilçesine bağlı Çardak köyü yakınında yer almaktadır (Şekil 1). Hem yangından etkilenen üç mikro havza hem de kontrol sahası yaklaşık olarak 30 hektar büyüklüğündedir. Bu havzalar toprak, jeoloji ve iklim özellikleri bakımından benzer fiziki coğrafi özelliklere sahiptir. Araştırma sahalarının matematiksel konumu ise 36° 58' 41"- 36° 57' 42" kuzey enlemleri ve 31° 22' 58"- 31° 23' 51" doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1 Araştırma Sahasının Lokasyon Haritası

BİRİNCİ BÖLÜM

ARAŞTIRMA SAHASININ FİZİKİ COĞRAFYA ÖZELLİKLERİ

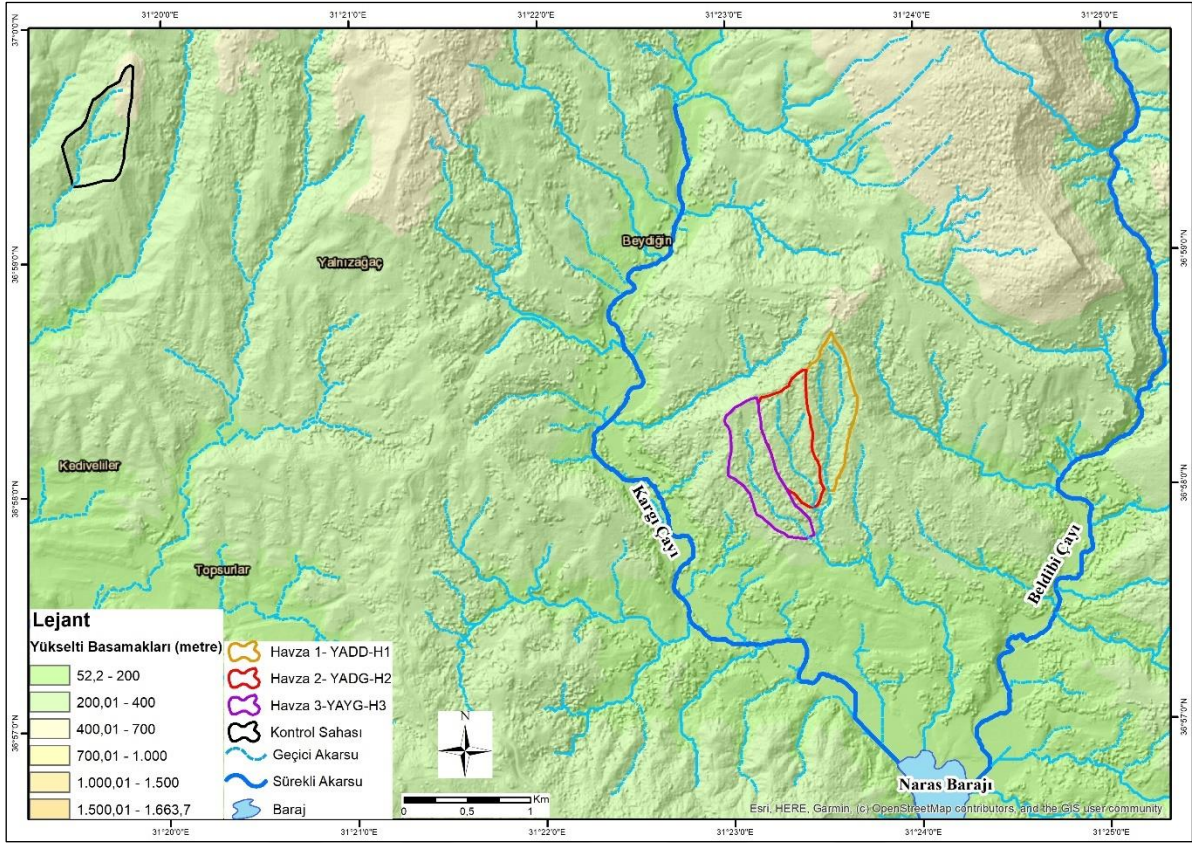
1.1. Araştırma Sahasının Jeomorfolojik Özellikleri

1.1.1. Araştırma Sahasının Yükselti Özellikleri

Araştırma sahaları belirlenirken, yükselti özellikleri önemli kriterlerden biri olarak dikkate alınmıştır. Genel olarak, araştırma sahaları Manavgat Çayı Havzası'nın güneybatısında yer almaktadır. Bu havzaların güneyinde Akdeniz, kuzeyinde ise doğu-batı doğrultusunda uzanan Toroslar bulunmaktadır. Yükselti, Akdeniz'den kuzeye doğru, Toroslara doğru kademeli olarak artmaktadır. Araştırma havzaları, Torosların güneyinde ve Manavgat ilçe merkezinin kuzeyinde, kıyıya yakın bir konumda yer almaktadır.

Orman yangını geçiren üç bitişik havza ve kontrol sahasının ortalama yükseltileri birbirine benzerdir (Şekil 1.1). Üretim faaliyetleri döneminde Havza 1 olarak adlandırılan ve rehabilitasyon döneminde yangın sonrası doğal haline bırakılan havzanın (YADD-H1) alanı 32,9 hektar (0,329 km²) olup, ortalama yükseltisi 324,7 metredir. Bu havzada yükselti değerleri 227 metre ile 400 metre arasında değişmektedir. Havza 2, rehabilitasyon döneminde yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen sahadır (YADG-H2). Bu havzanın alanı ise 32,4 hektar (0,324 km²) olup, ortalama yükseltisi 291,4 metredir ve yükselti değerleri 202 metre ile 392,2 metre arasında değişmektedir. Üretim faaliyetleri sonrası sürülen ve fidan dikilen Havza 3'ün (YAYG-H3) alanı ise 32,7 hektar (0,327 km²) olup, ortalama yükseltisi 280,3 metredir. Bu havzada yükselti değerleri 191 metre ile 363 metre arasında değişmektedir (Şekil 1.1). Çalışma sahasının yükselti verileri Harita Genel Müdürlüğünden alınan 5 metre çözünürlüklü sayısal yükselti modelinden (SYM) üretilmiştir (HGM, 2024)

Kontrol sahası, yangın geçirmiş olan üç havzaya yaklaşık 5 km mesafede olmasına rağmen, alan büyüklüğü, yükselti özellikleri ve bakı koşulları açısından diğer havzalarla benzerlik göstermektedir. Kontrol sahasının alanı ise 30,1 hektar (0,303 km²) olup, ortalama yükseltisi 350,3 metredir.



Şekil 1.1 Araştırma Sahasının Yükselti Basamakları Haritası

1.1.2. Araştırma Sahasının Eğim Özellikleri

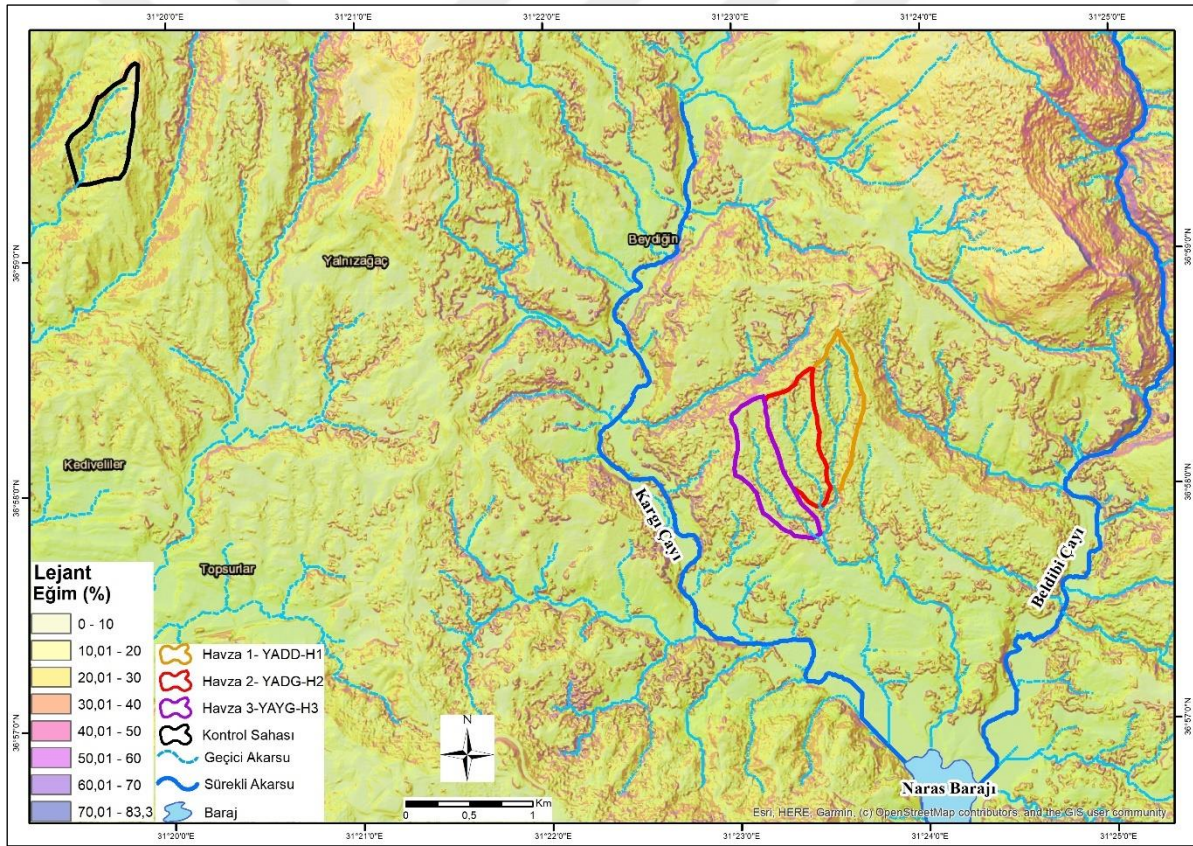
Yamaç eğimi, erozyon süreçlerinin ve toprak kaybının belirlenmesinde temel bir topografik parametre olarak kabul edilmektedir. Özellikle yangın sonrası bitki örtüsünün kısmen ya da tamamen ortadan kalkması, eğimli alanlarda toprak yüzeyini doğrudan yağış etkisine açık hale getirmekte ve yüzey akışını artırarak erozyon riskini ciddi şekilde yükseltmektedir (Shakesby & Doerr, 2006). Eğim değerinin artması, suyun akış hızını ve taşıma kapasitesini doğrudan etkilediğinden, yüksek eğimli sahalarda hem yüzeysel akış hacmi hem de sediman taşınımı önemli ölçüde artış gösterebilir (Wischmeier & Smith, 1978).

Yangın sonrası çıplak kalan toprak yüzeylerinde, eğimin etkisiyle hızla akan su kütleleri, toprağın üst katmanlarını kısa sürede taşıyabilmekte, bu da özellikle ince dokulu ve yapısal olarak zayıflamış topraklarda ciddi kayıplara yol açabilmektedir (DeBano, 2000). Bu nedenle, yangın sonrası uygulanan rehabilitasyon stratejilerinde eğim değerleri kritik bir ölçüt olarak öne çıkmaktadır.

Araştırma sahalarının ortalama eğim değerleri birbirine yakındır. Üretim faaliyetleri yapılan ve ardından rehabilitasyon sürecinde doğal haline bırakılan Havza 1 (YADD-H1), ortalama %21,1 eğim değerine sahiptir. Yangın sonrası tohumlama ve dal serme işlemleri uygulanan Havza 2 (YADG-H2) ise ortalama %20,2 eğim değerine sahipken, üretim

faaliyetlerinin ardından sürülen ve fidan dikimi yapılan Havza 3 (YAYG-H3), ortalama %20,6 eğim değerine ulaşmaktadır. Kontrol sahasında ise ortalama eğim değeri %19,8 olarak belirlenmiştir (Şekil 1.2).

Bu sahaların tamamında, özellikle akarsu yataklarında eğim değerlerinin düşük olduğu, buna karşın havza yamaçlarında eğim değerlerinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yamaçlarda eğim değeri arttıkça, yüzeysel akış hızlanarak erozyon riskini yükseltmektedir. Bu eğim değişimleri hem üretim faaliyetlerinde hem de rehabilitasyon süreçlerinde erozyonun kontrol altına alınabilmesi için stratejik alanların belirlenmesinde kritik bir faktör olarak rol oynamaktadır. Eğim değerleri yüksek olan yamaçlar, suyun hızla akmasına neden olarak, erozyonun şiddetini artırmakta ve toprak kayıplarını hızlandırmaktadır. Bu da özellikle yangın sonrası rehabilitasyon sürecinde, erozyonla mücadele yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 1.2 Araştırma Sahasının Eğim (%) Haritası

1.1.3. Araştırma Sahasının Bakı Özellikleri

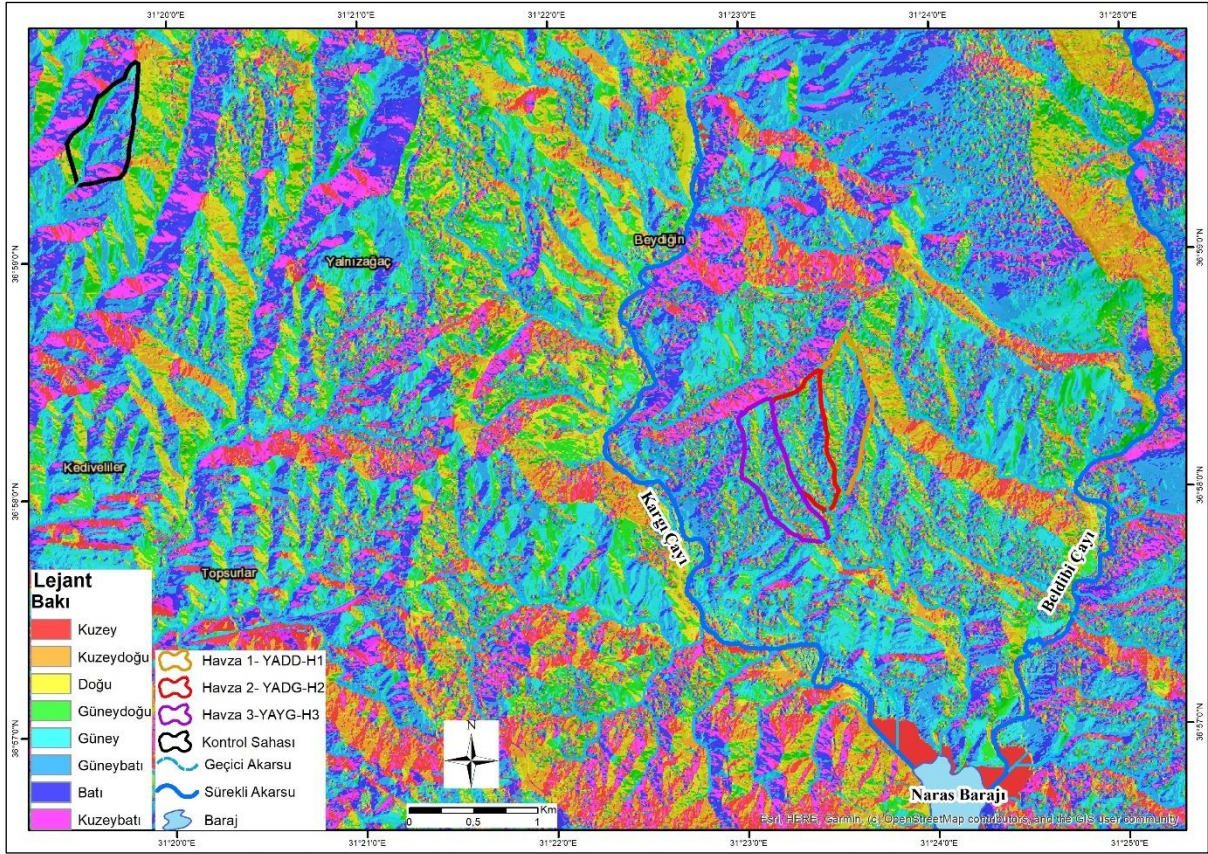
Bakı, erozyon süreçleri ile toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleyen temel çevresel faktörlerden biridir. Özellikle Akdeniz ikliminin hâkim olduğu bölgelerde, iklimsel ve meteorolojik koşullar bakı yönüne bağlı olarak önemli ölçüde değişmekte; bu durum, yağışın zamansal ve mekânsal dağılımını etkilemektedir (Cerdà, 1998; Özcan & Yıldız, 2017).

Bölgedeki atmosferik dolaşımın etkisiyle, batı ve doğu yamaçlar arasında belirgin yağış farklılıkları görülebilmekte; bu farklılıklar, bakı yönünün hem ekolojik süreçler hem de hidrolojik döngü üzerindeki etkisini artırmaktadır (Moore vd., 1993).

Bakı yönüne bağlı olarak değişen güneşlenme süresi, ısınım şiddeti, toprak sıcaklığı ve nem içeriği, yüzey akışı ve buharlaşma oranları üzerinde önemli etkiler yaratmakta; dolayısıyla toprak nemi, bitki örtüsünün gelişimi ve erozyon potansiyeli bu faktörlere doğrudan bağlı hale gelmektedir (Geiger vd., 2003). Akdeniz iklim bölgelerinde bakıya bağlı mikroklimatik farklılıklar, erozyon kontrolü açısından kritik öneme sahiptir (Cerdà, 1998).

Bu çalışmada, yangın sonrası etkilenen üç mikro havza (Havza 1-YADD-H1, Havza 2-YADG-H2, Havza 3-YAYG-H3) genel olarak kuzey-güney doğrultusunda uzanmaktadır (Şekil 1.3). Bu havzalarda, yükselti değerlerinin genel eğilimi, kaynak kısmından (yukarı çıkır) ağız kısmına (aşağı çıkır) doğru azalma göstermektedir. Bu yapısal eğilim, havzaların topografik özellikleriyle ilişkilidir ve suyun hareketi, bitki örtüsü ve erozyon süreçleri üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Diğer yandan, kontrol sahası, genellikle kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda uzanmakta olup, burada da yükselti, kaynak bölümünden ağız kısmına doğru azalmaktadır (Şekil 1.3).

Yangın geçiren havzalarda, yamaçlar genellikle doğu ve batı bakılıdır. Doğü-güneydoğu ve batı bakılı yamaçlar, genellikle güneş ışınlarının geliş açısına bağlı olarak farklı sıcaklık ve nem koşullarını barındırmaktadır. Bu farklılık, erozyon oranlarını ve toprak özelliklerini değiştirebilir. Kontrol sahasında ise, havza yamaçları yangın geçirmiş havzalara benzer şekilde güneydoğu-doğu ve batı bakılıdır.



Şekil 1.3 Araştırma Sahasının Bakı Haritası

1.2. Araştırma Sahasının Jeolojik Özellikleri

Bölgenin jeolojik özellikleri, toprak oluşumu, toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile hidrolojik süreçler üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Araştırma sahasının jeolojik özellikleri toprak tekstürü, geçirgenlik, gözeneklilik ve mineral bileşimi gibi temel toprak özelliklerini şekillendirerek, suyun hareketi ve bitki besin maddelerinin taşınımı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Jenny, 1994). Bu etki, özellikle yangın sonrası çıplak kalan yüzeylerde su rejimi ve sediman hareketleri açısından daha da belirgin hale gelir (White, 2006).

Manavgat Çayı Havzası'nın tabanında, Jura–Kretase dönemine ait kireçtaşı ve şistlerden oluşan kayaçlar yer almaktadır. Bu birimleri, havzaların kuzey, batı ve doğu kesimlerinde Alt Miyosen dönemine ait konglomeralardan oluşan Tepekli Formasyonu aşıl uyumsuzlukla örtmektedir. Tepekli Formasyonu özellikle batıdaki Taşağıl çevresinde geniş yayılım göstermektedir. Bu birimi, Orta Miyosen dönemine ait kumtaşı ve çamurtaşı ardalanmasından oluşan Karpuzçay Formasyonu; doğu kesimlerde ise yine Orta Miyosen dönemine ait Oymapınar Kireçtaşı Formasyonu uyumlu olarak örtmektedir (Yılmaz, 2022). Bu çalışma kapsamında, hem yangın geçirmiş olan üç mikro havzada (Havza 1 - YADD-H1, Havza 2 - YADG-H2, Havza 3 - YAYG-H3) hem de kontrol sahasında kıltaşı/silttaşı-kumtaşı-konglomera ardalanması ile karakterize edilen türbiditik ve kalın bir istifli içeren Karpuzçay

Formasyonu yer almaktadır (Şekil 1.4). Bu formasyon tabanda Oymapınar Kireçtaşı formasyonunu uyumlu bir şekilde örtmektedir (Şenel, 2010; Yılmaz, 2022). Bu litolojik birimlerin ardalanması, havza içerisindeki morfolojik ve jeolojik çeşitliliği yansıtarak, bölgedeki toprak oluşumu ve su dinamikleri üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Özellikle orman yolları ve havza yamaçları arasındaki yol yarmalarında bu litolojik ardalanma oldukça belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.

Araştırma sahalarının üst yamaçlarında, eğim değerlerinin artmasıyla birlikte toprak kalınlığının belirgin şekilde azalması, anakaya olarak bilinen kumtaşlarının yüzeye çıkmasına yol açmıştır. Üst yamaçlardaki toprak katmanlarının incelenmesi, suyun yüzeysel akışını hızlandırarak erozyon risklerini artırır (Wischmeier & Smith, 1978). Bu durum, özellikle yangın geçirmiş sahalarda, toprak erozyonunun daha da belirginleşmesine neden olabilmektedir. Bunun yanında, akarsu yataklarının bazı bölgelerinde de geçirimsiz anakayanın yüzeye çıkması, akarsuda hem yüzeysel akışı hem de taşınan sediman miktarını arttıran bir faktördür. Akarsuyun yatağındaki bu yüzeylemiş geçirimsiz anakaya birimleri, suyun taşıdığı sediman miktarının yanı sıra, bölgedeki erozyon dinamiklerini şekillendiren etkenlerden biridir (Knighton, 1998).

Bölgedeki jeolojik yapının dikkat çeken bir diğer özelliği, çevresindeki litolojik formasyonların çeşitliliğidir. Araştırma sahalarının çevresinde, Orta Miyosen dönemine ait kumtaşı ve çamurtaşı birimlerinin yaygın olarak bulunduğu görülmektedir (Şekil 1.4). Yangın geçirmiş mikro havzaların hem kuzey kesimlerinde hem de Karpuzçay formasyonunun altında yine Orta Miyosen dönemine ait kireçtaşı formasyonlarına rastlanmaktadır. Kireçtaşı, çözünür yapısı sayesinde suyun pH düzeyini, kalsiyum ve bikarbonat konsantrasyonlarını etkileyerek suyun hidrojeokimyasal süreçlerini yönlendiren önemli bir kayaç türüdür (Drever, 1997). Bu nedenle, çalışma alanlarında yürütülen su kalite analizlerinde, kireçtaşı varlığı çevresel bir kontrol faktörü olarak dikkate alınmalıdır.

Kargı Çayı'nın kaynak kısmına doğru ise, akarsu yatağında Kuvaterner dönemine ait alüvyal birimler yer almaktadır (Şekil 1.4). Alüvyal birimler, akarsuyun taşıdığı sedimanların birikmesiyle oluşur ve bu birimler, akarsuyun taşıyabileceği sediman miktar ve oranları hakkında önemli bilgiler verir. Akarsu yataklarındaki bu alüvyal birimler, özellikle yangın sonrası toprak kayıplarının, sediman taşınımının ve erozyon oranlarının arttığı bölgelerde, toprak yönetimi ve rehabilitasyon stratejilerinin oluşturulmasında önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

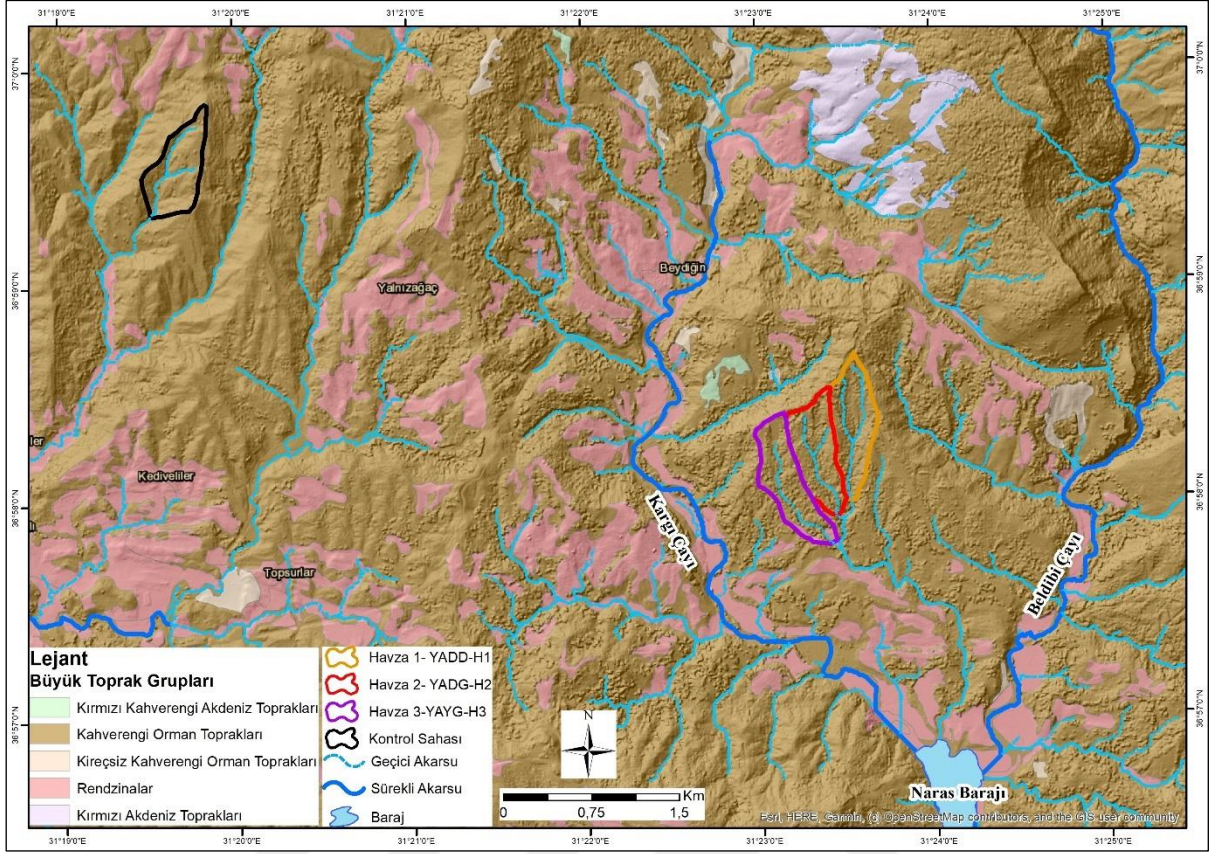
Sonuç olarak, araştırma sahalarının jeolojik yapısı, bölgedeki su hareketlerini, toprak özelliklerini, erozyon süreçlerini ve bitki örtüsü gelişimini doğrudan etkileyen temel bir

havzada da büyük toprak grubu olarak kahverengi orman toprakları yaygın şekilde görülmektedir (Şekil 1.5). Bu topraklar, bölgedeki hâkim litoloji olan kumtaşı ve çamurtaşı birimleri üzerinde gelişmiş olup, fiziksel özellikleri bakımından benzer karakteristikler sergilemektedir. Bu toprakların fiziksel özellikleri genellikle killi tın, kumlu tın veya kil tekstürlü olup, su tutma kapasiteleri yüksektir ve drenaj açısından iyi yapıdadırlar (Erpul vd., 1991; Özcan, 2005). Kimyasal olarak organik madde, toplam azot ve değişebilir katyonlar bakımından zengindirler. Araştırma sahasında üst toprakların tekstürü killi balçık özelliğindedir. Toprak içerisindeki kalsiyum karbonat (CaCO_3) oranı ise yüksektir (%15-18).

Araştırma sahalarının morfolojik yapısı dikkate alındığında, toprak kalınlığı alt yamaçlardan üst yamaçlara doğru belirgin şekilde azalmaktadır. Üst yamaçlarda toprağın horizon kalınlığı azalır ve genellikle kumtaşı ana kayasının yüzeylemesine neden olmaktadır. Bu durum, toprak oluşum süreçlerinin topografik değişimlere karşı duyarlılığını ortaya koymaktadır.

Çalışma sahalarının çevresinde, benzer şekilde kahverengi orman topraklarının bölge genelinde geniş alanlara yayıldığı görülmektedir (Şekil 1.5). Bu toprak grubu, Akdeniz orman ekosistemleri için tipik özellikler gösterirken, bölgedeki iklimsel koşullar ve jeolojik yapı ile uyumlu bir toprak gelişimini yansıtmaktadır. Bunun yanı sıra, araştırma sahalarının çevresinde büyük toprak grupları içerisinde kahverengi orman topraklarından sonra en yaygın olarak gözlemlenen diğer bir toprak tipi ise rendzinalardır (Şekil 1.5). Rendzinalar, genellikle kireçtaşı gibi karbonatlı ana kaya üzerinde gelişen, ince profilli ve yüksek taşlılık içeren topraklardır.

Sonuç olarak, araştırma sahalarında gözlemlenen toprak özellikleri, hem yangın öncesi ve sonrası süreçlerin değerlendirilmesinde hem de farklı rehabilitasyon uygulamalarının etkilerinin karşılaştırılmasında önemli bir temel teşkil etmektedir. Toprağın fiziksel ve kimyasal yapısına dair bu veriler, havza yönetimi, erozyon kontrolü ve sürdürülebilir arazi kullanımı gibi konularda alınacak kararlarda bilimsel bir zemin oluşturacaktır.



Şekil 1.5 Araştırma Sahasının Büyük Toprak Grupları (BTG) Haritası

Kaynak: Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, 1993

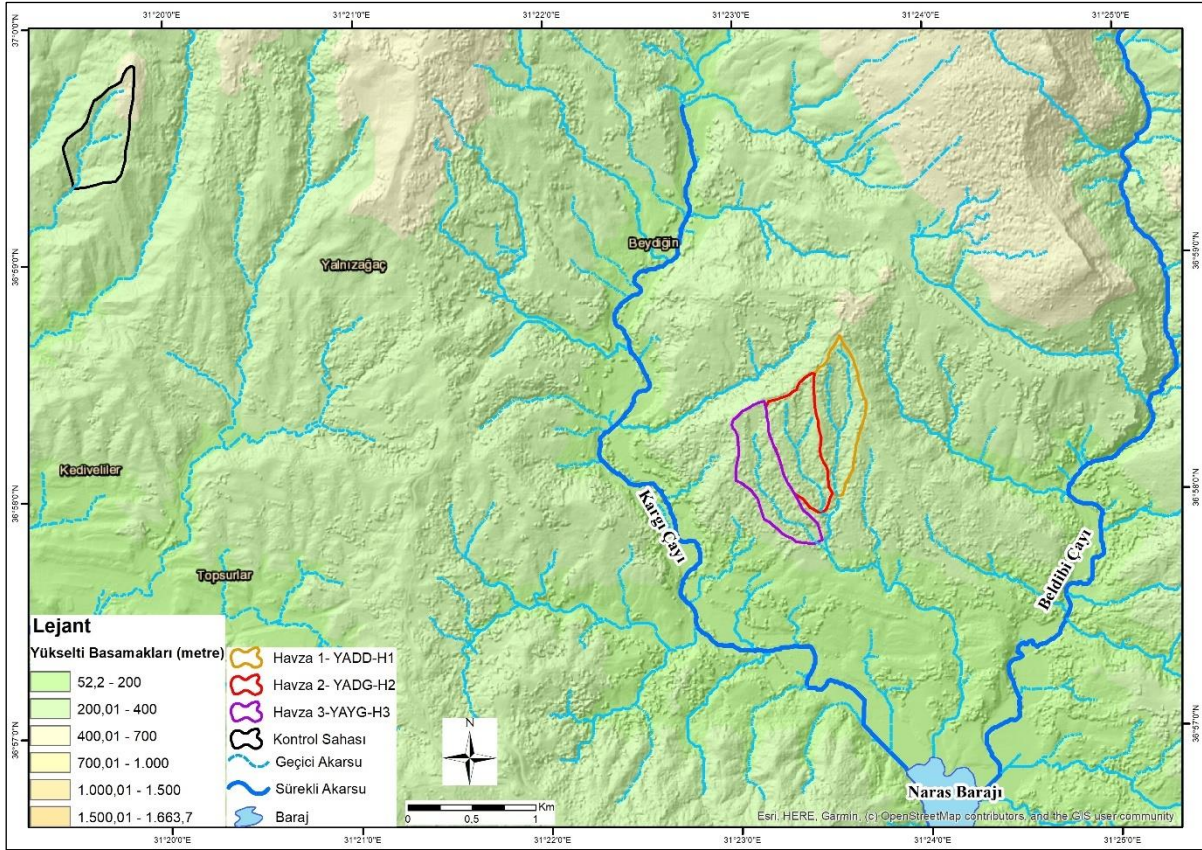
1.4. Araştırma Sahasının Hidrografiya Özellikleri

Akarsu akış dinamikleri, bir havzanın hidrolojik özelliklerini şekillendiren temel özelliklerinden biri olup, yüzeysel akışın süresi, hızı ve miktarı doğrudan erozyon potansiyelini belirlemektedir. Özellikle eğimli ve bitki örtüsünden yoksun alanlarda, ani ve şiddetli akış koşulları, toprağın kohezyonunu zayıflatarak toprak erozyonunun artmasına, sediman taşınımı ve akarsu yatağı morfolojisinde değişimlere neden olmaktadır (Knighton, 1998; Prosser vd., 2001). Akışın sürekliliği, akım miktarındaki değişimler ve akarsuyun taşıma kapasitesi, erozyonun şiddeti üzerinde belirleyici olup, geçici akarsuların etkin olduğu bölgelerde bu etki daha kısa süreli ama daha yıkıcı olabilmektedir (Morgan, 2005). Ayrıca, taşkın karakterli akış rejimlerinde, yamaçlardaki üst toprak kolayca yerinden koparılarak taşınır ve bu da havzanın aşağı çıkışında sedimentasyon riskini beraberinde getirir. Bu bağlamda, akarsuyun akış dinamiklerinin belirlenmesi, erozyon kontrolü ve toprak koruma uygulamaları açısından kritik önem taşımaktadır.

Bu çalışmada incelenen üç yangın geçirmiş mikro havza (Havza 1 – YADD-H1, Havza 2 – YADG-H2 ve Havza 3 – YAYG-H3) ile karşılaştırma amacıyla seçilen kontrol sahasında yer alan akarsular, sürekli akış göstermeyen geçici akarsu niteliği taşımaktadır (Şekil 1.6). Bu akarsuların akışı, büyük ölçüde yağış olaylarına bağlı olarak kısa süreli gerçekleşmekte olup,

yağış sona erdikten sonra akarsu yatağı tekrar kurumaktadır. Özellikle aralık, ocak ve şubat aylarında etkili olan cephesel yağışların yoğunluk kazandığı dönemlerde, yağışlı gün sayısının ve toplam yağış miktarının artmasına bağlı olarak akarsularda daha sürekli ve kesintisiz akış gözlemlenmektedir. Ancak bu dönemler dışında, akış yalnızca yağış süresince oluşmakta ve ardından hızla kesilmektedir. Bu mikro havzalarda yer alan akarsular, kaynak noktasından havzanın çıkış noktasına kadar ortalama 1,4 kilometre uzunluğa sahip olup, bu akarsuların yatak genişlikleri ortalama olarak 2 metre civarındadır (Şekil 1.6). Havza 1 (YADD-H1) ve Havza 2 (YADG-H2) içerisinde güney yönlü akış gösteren akarsular, havzaların çıkış noktasından sonra birleşerek daha büyük bir akarsu hattı oluşturmaktadır. Bu birleşim, Havza 3 (YAYG-H3) çıkışında gelen akarsu ile tamamlanmakta ve bu noktadan itibaren daha geniş bir akarsu ağına dönüşmektedir. Yan kolların da katılımıyla birleşen bu akarsu, havzaların güneyinde yer alan Naras Barajı'na drene olmaktadır (Şekil 1.6).

Naras Barajı, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü tarafından 2010 yılında inşa edilmeye başlanmış ve 2014 yılında işletmeye alınmıştır. Baraj alanı, deniz seviyesinden yaklaşık 78 metre yükseklikte olup, bölgedeki 71.420 dekar tarım arazisinin sulanmasına olanak sağlamaktadır. Barajın su kaynağını, yangın geçirmiş mikro havzaların doğu ve batısında yer alan Kargı Çayı ve Beldibi Çayı oluşturmaktadır. Kargı Çayı, Beydiğin yerleşimi yakınlarından itibaren sürekli akış özelliği göstermektedir. Beldibi Çayı ise ana akarsu yatağı ve ona bağlı yan kolları ile birlikte sürekli akış özelliğindedir. Her iki çay da akış rejimi bakımından bölgenin ikliminden etkilenmektedir. Özellikle kış aylarında yağışların artmasıyla birlikte akım miktarında belirgin bir yükselme gözlemlenmekte, yaz dönemlerinde ise yağış azlığına bağlı olarak akışlar zayıflamaktadır. Bu iki akarsu havzaları da 2021 yılında meydana gelen Manavgat orman yangınından doğrudan etkilenmiştir.



Şekil 1.6 Araştırma Sahasının Hidrografi Haritası

1.5. Araştırma Sahasının Arazi Kullanımı Özellikleri

Bu çalışmada araştırma sahalarının belirlenmesinde dikkate alınan temel kriterlerden biri, sahaların arazi örtüsü ve arazi kullanım özelliklerinin benzerliğidir. 2021 yılında meydana gelen ve Türkiye'nin en büyük orman yangınlarından biri olarak kayıtlara geçen Manavgat orman yangını, büyük ölçüde kızılçam (*Pinus brutia*) ormanlarından oluşan geniş alanları etkilemiştir. Yangın, doğal bitki örtüsünü tahrip etmekle kalmamış, aynı zamanda bölgedeki ekosistem süreçlerini, toprak yapısını ve hidrolojik dengeyi de önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu bağlamda, çalışmada yer alan üç yangın geçirmiş mikro havza (YADD-H1, YADG-H2, YAYG-H3) ile yangın geçirmemiş olan kontrol sahasının seçimi hem yangın öncesi hem de mevcut arazi örtüsü ve kullanım biçimleri açısından karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla titizlikle gerçekleştirilmiştir.

Yangın geçirmiş olan üç mikro havza ile kontrol sahası, orman alanı statüsünde yer almakta olup, bu statü yangın öncesinde de geçerlidir (Şekil 1.7). Yangından önce, yangın geçirmiş üç mikro havza da kontrol sahasında olduğu gibi yaklaşık 50 yıllık kızılçam ağaç topluluklarıyla kaplıydı. Söz konusu ormanlık alanlarda, kızılçam ağaçlarının ortalama kapalılık oranı yaklaşık %70 olup, bu oran, toprak yüzeyinin doğrudan güneş ışınlarına ve yağışa maruz kalmasını büyük ölçüde sınırlayan bir örtü sağlamaktadır. Ayrıca bu ağaçlardan

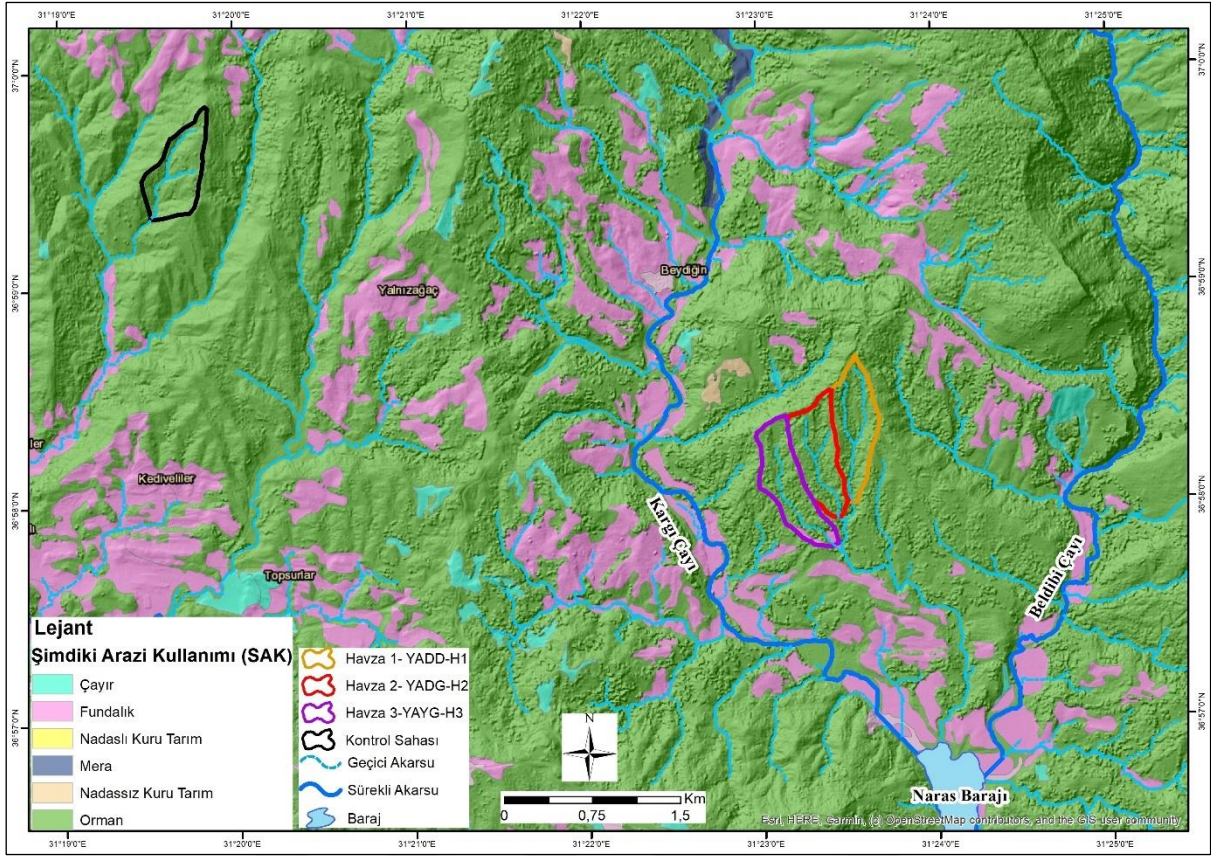
dökülen ibreler, orman üst toprağında yaklaşık 5 cm kalınlığında bir organik örtü oluşturarak, toprak yüzeyinde buharlaşmayı azaltmaktadır. Bu organik katman, aynı zamanda yangın öncesi dönemde toprak neminin korunmasına ve mikrobiyal faaliyetlerin desteklenmesine katkı sağlamaktaydı.

Araştırma sahalarının orman altı vejetasyonu, tipik Akdeniz maki formasyonlarına uygun bir şekilde gelişmiş olup, özellikle *Quercus coccifera* (kermes meşesi), *Arbutus unedo* (sandal) ve *Pistacia terebinthus* (menengiç) gibi türler yaygın olarak gözlemlenmektedir. Bu çalı formundaki bitki türleri, toprak erozyonunu azaltan kök sistemlerine sahip olmaları bakımından ekosistem açısından önemli roller üstlenmektedir.

Çalışma kapsamında incelenen dört mikro havzanın tamamı, orman alanı statüsünde yer almakta olup, havza sınırları içerisinde hiçbir yerleşim birimi bulunmamaktadır (Şekil 1.7). Ayrıca bu sahalarda tarım, sanayi, madencilik, hayvancılık gibi herhangi bir beşerî faaliyet yürütülmemektedir. Bu durum, çalışmanın doğrudan doğal süreçleri izleyebilme ve insan müdahalesinden arındırılmış bir karşılaştırma zemini oluşturma açısından önemini artırmaktadır. Yangın geçirmiş sahalarda, yangın sonrası süreçte de yasal olarak orman alanı statüsünü korumaktadır.

Arazi kullanım sınıflandırmasına göre, araştırma sahalarının çevresindeki geniş alanlar da benzer biçimde orman statüsünde yer almaktadır. Ormanlık alanların ardından en yaygın arazi örtüsü tipi, genellikle rendzina topraklarının görüldüğü bölgelerde dağılım gösteren fundalık alanlardır (Şekil 1.7). Bu fundalıklar, doğal olarak gelişen ikincil bitki örtüsü birimleridir. Çayır alanları ise araştırma sahalarının çevresinde daha parçalı ve sınırlı bir dağılım sergilemektedir. Mera statüsündeki alanlar ise yalnızca Kargı Çayı'nın kaynak kısmına doğru, Beydiğin yerleşmesinin kuzeyinde küçük bir lokal alanla sınırlıdır. En az yer kaplayan arazi kullanım tipi ise nadassız kuru tarım alanlarıdır (Şekil 1.7). Nitekim araştırma sahalarının tamamının orman statüsünde olması nedeniyle, tarım faaliyetlerine ayrılmış alanların miktarı oldukça sınırlıdır.

Sonuç olarak hem çalışma sahalarının hem de çevresinin arazi örtüsü ve kullanımı tiplerinin büyük ölçüde benzer olması, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin etkilerini karşılaştırmaya yönelik analizlerde dışsal değişkenlerin etkisini standart hale getirip azaltmakta ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır.



Şekil 1.7 Araştırma Sahasının Arazi Kullanımı (SAK) Haritası

Kaynak: Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, 1993

1.6. Araştırma Sahasının İklim Özellikleri

Orman yangınları, özellikle Akdeniz iklim bölgelerinde sıklıkla meydana gelen, doğal süreçleri ve ekosistem dengesini önemli ölçüde etkileyen çevresel olaylardır (Cerdà ve Lasanta, 2005; Esen vd., 2023; García-Orenes vd., 2017; Pausas, 2004). Akdeniz Havzası'nda orman yangınlarının tekrarlanabilirliği, bölgenin kendine özgü iklimsel özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Yüksek yaz sıcaklıkları, uzun süren kuraklık dönemleri, düşük bağıl nem oranı ve aniden başlayan kuvvetli rüzgârlar, bu bölgede yangınların hem çıkışını hem de hızlı yayılımını kolaylaştıran temel iklimsel faktörlerdir (Pausas & Keeley, 2009; Moriondo vd., 2006).

Son yıllarda küresel iklim değişikliğine bağlı olarak gözlemlenen yağışlardaki azalma ve sıcaklıklardaki artış (Abatzoglou ve Kolden, 2013), özellikle Akdeniz iklim bölgelerinde orman yangınlarının hem sıklığını hem de şiddetini artırmaktadır (Bowman vd., 2017). Örneğin, 2017 yangın sezonunda Fransa, İtalya, Portekiz ve İspanya gibi Güney Avrupa ülkelerinde, ekstrem sıcak hava dalgaları ve uzun süren kuraklıklarla ilişkili olarak çok sayıda büyük çaplı orman yangını meydana gelmiştir (Turco vd., 2017). Benzer şekilde 2021 yılında başta Türkiye olmak üzere İtalya, Yunanistan ve İspanya gibi Akdeniz ülkelerinde çok geniş alanlar orman yangınlarından etkilenmiştir. Türkiye'de 2021 yangın sezonu boyunca toplam

2.793 orman yangını kaydedilmiş ve bu yangınlar neticesinde yaklaşık 139.503 hektarlık alan zarar görmüştür (San-Miguel-Ayanz vd., 2022).

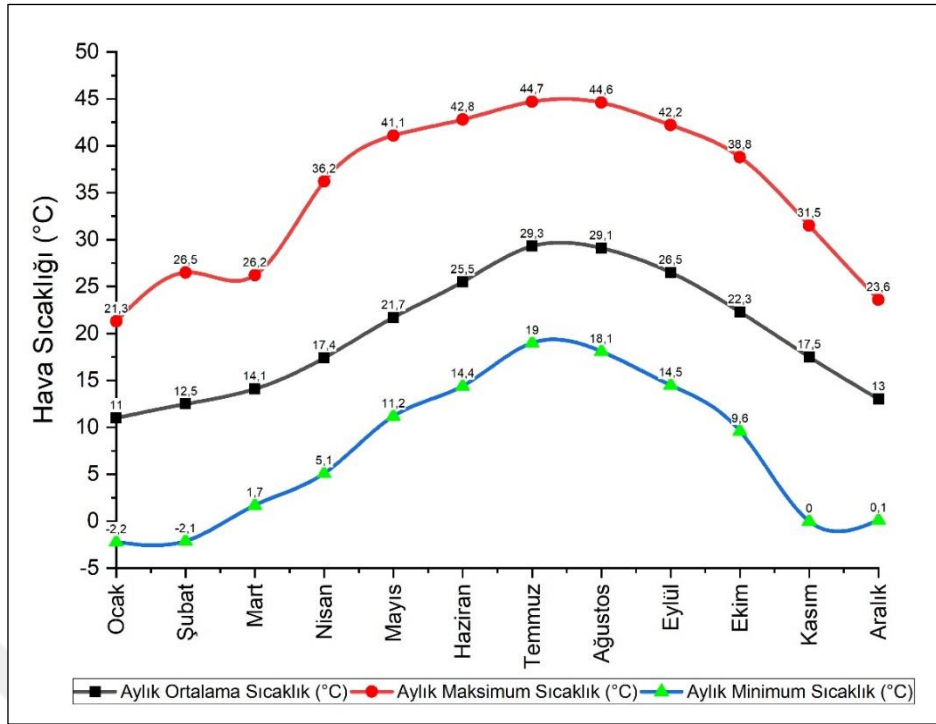
1.6.1. Sıcaklık Özellikleri

Bölge genelinde yaz aylarında yüksek sıcaklıklar ve kuraklık, kış aylarında ise görece daha düşük sıcaklıklar ile cephesel (frontal) yağışlar baskındır (Türkeş, 2010: 381). Bölgenin yağış rejimi büyük ölçüde atmosferik sirkülasyon sistemleriyle ilişkilidir. Yaz dönemlerinde, bölgede subtropikal yüksek basınç merkezlerinin etkisi belirgin olup, bu durum kuraklığı pekiştirmektedir. Öte yandan, kış aylarında polar ve tropikal kökenli hava kütlelerinin karşılaşması sonucu oluşan orta enlem siklonları, kasım ve nisan ayları arasında yoğunlaşan yağışların ana kaynağını oluşturmaktadır (Türkeş, 2010: 382).

Araştırma sahasının klimatolojik verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne bağlı 17917 numaralı Manavgat/Taşağıl Orman Sahası Meteoroloji İstasyonu'ndan (36°88'86" Kuzey Enlemi, 31°24'94" Doğu Boylamı; rakım: 38 m) elde edilmiştir. İlgili istasyon, araştırma sahasına yakınlığı ve benzer topografya ve iklimik koşulları paylaşması nedeniyle çalışma alanını temsil etme açısından uygun bir konuma sahiptir. 2013–2023 yılları arasındaki ölçüm dönemi verilerine göre, istasyonda ölçülen yıllık ortalama sıcaklık 20 °C'dir (Şekil 1.8). Aylık ortalama sıcaklık değerleri, yıl içinde belirgin değişim göstermektedir. En düşük aylık ortalama sıcaklıklar, aralık (13 °C), ocak (11 °C) ve şubat (12,5 °C) aylarında; en yüksek ortalama sıcaklıklar ise haziran (25,5 °C), temmuz (29,3 °C) ve ağustos (29,1 °C) aylarında kaydedilmiştir. Aylık ortalama sıcaklıklar, ocak ayından temmuz ayına kadar artış eğilimi göstermekte, sonrasında ise kademeli olarak azalmaktadır (Şekil 1.8).

İstasyon verilerine göre, kaydedilen en yüksek sıcaklık değeri 2 Temmuz 2017 tarihinde 44,7 °C olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, en düşük sıcaklık değeri ise 2 Ocak 2016 tarihinde -2,2 °C olarak belirlenmiştir (Şekil 1.8). Bu ekstrem değerler, araştırma sahasında zaman zaman görülebilecek iklimsel uç noktaları da yansıtmaktadır.

Bu iklimik koşullar, orman yangınlarının çıkış riskini doğrudan etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle yaz aylarında artan sıcaklıklar ve düşen bağıl nem oranı, doğal ve antropojenik kaynaklı yangınların oluşumunu kolaylaştırmakta; kurak dönemlerin uzunluğu ise yangınların kontrol altına alınmasını güçleştirmektedir.



Şekil 1.8 Manavgat/Taşağıl İstasyonuna ait 2013-2023 Yılları Arası Aylık Ortalama Sıcaklık, Maksimum Sıcaklık ve Minimum Sıcaklık Değerleri

Kaynak: MGM,2023

1.6.2. Yağış Özellikleri

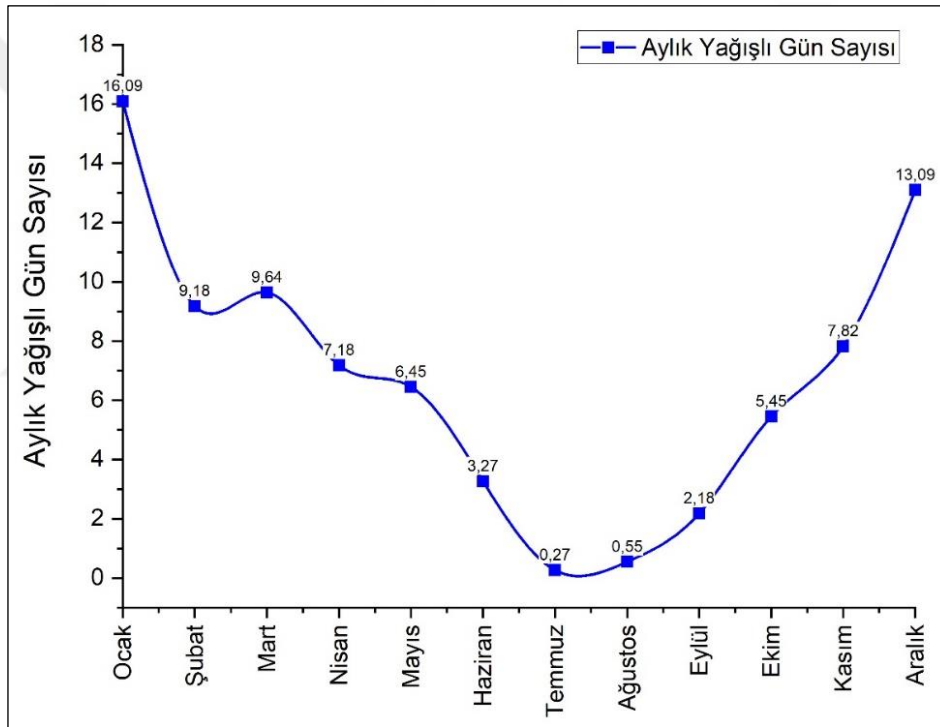
Araştırma sahasının iklimsel özelliklerini yansıtan Manavgat/Taşağıl Orman Sahası Meteoroloji İstasyonu verilerine göre, yağışlı günlerin tamamı yağmur şeklindeki yağışlara karşılık gelmektedir. Bu istasyonda on yıllık dönem ortalamasına (2013–2023) göre yıllık toplam yağışlı gün sayısı 81,17 gün olarak belirlenmiştir. Bu değer aynı zamanda yıllık ortalama yağmur yağışlı gün sayısını da ifade etmektedir; çünkü bu dönemlerde kar yağışları kaydedilmemiştir.

Yağışlı günlerin mevsimsel ve aylık dağılımı, Akdeniz iklim tipine özgü özellikler göstermektedir. Yılın en yağışlı ayları olan kış mevsiminde, ocak ve aralık ayları öne çıkmaktadır. Ocak ayında ortalama 16,09 gün, aralık ayında ise ortalama 13,09 gün yağışlı geçmektedir (Şekil 1.9). Bu durum, bölgedeki cephesel yağış sistemlerinin kış aylarında daha etkin olduğunu ortaya koymaktadır.

İlkbahar mevsiminde, özellikle mart ayından itibaren yağışlı gün sayısında belirgin bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Mart–temmuz dönemi boyunca yağışlı gün sayısı kademeli olarak düşmekte, yaz mevsimine gelindiğinde ise minimum düzeye ulaşmaktadır. Bu çerçevede, temmuz ayında ortalama yağışlı gün sayısı yalnızca 0,27 gün, ağustos ayında ise 0,55 gün olarak ölçülmüştür (Şekil 1.9). Bu değerler, yaz mevsiminin tipik olarak sıcak ve kurak geçtiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Mevsimsel geçiş dönemleri de yağışlı gün sayısı bakımından farklılık göstermektedir. Bu bağlamda, sonbahar aylarındaki ortalama yağışlı gün sayısı, ilkbahar mevsimine kıyasla daha düşük düzeydedir. Bu durum, sonbahar mevsiminin Akdeniz ikliminde daha geç başlayan yağış rejimi ile karakterize edilmesinden kaynaklanmaktadır. İlkbaharda ise kış mevsiminin etkileri bir süre daha devam etmekte, bu da yağışlı gün sayısının sonbahara göre görece daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Manavgat/Taşağıl İstasyonu verileri, araştırma sahasında yağışların mevsimsel olarak düzensiz dağıldığını ve özellikle yaz aylarında uzun süreli kurak dönemlerin hâkim olduğunu göstermektedir. Bu durum, bölgedeki toprak su dengesi, erozyon riski ve yangın potansiyeli gibi çevresel dinamikler üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

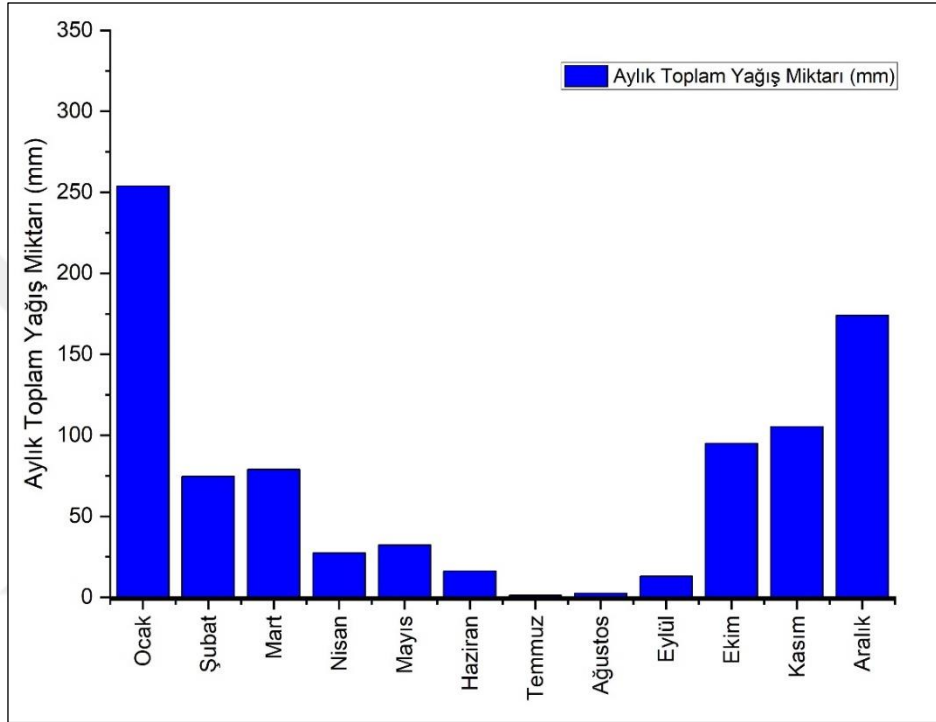


Şekil 1.9 Manavgat/Taşağıl İstasyonuna Ait Aylık Ortalama Yağışlı Gün Sayısı (2013-2023)

Kaynak: MGM,2023

Manavgat/Taşağıl İstasyonu verilerine (2013-2023) göre araştırma sahalarına yıllık ortalama toplam düşen yağış miktarı 874,1 mm'dir. Yağışların aylara göre dağılımı, bölgenin tipik Akdeniz iklim özelliklerini açıkça yansıtmaktadır (Şekil 1.10). En yüksek yağış miktarları kış aylarında gerçekleşmektedir. Özellikle ocak ayında yaklaşık 250 mm, aralık ayında ise yaklaşık 180 mm yağış kaydedilmiştir. Bu durum, bölgedeki yağış rejiminin büyük lde kış mevsimine bağlı olduğunu göstermektedir. İlkbahar aylarında (mart, nisan, mayıs) yağış miktarında belirgin bir azalma gözlenmektedir. Mart ayında yaklaşık 80 mm olan yağış miktarı, mayıs ayına gelindiğinde 30 mm'ye kadar düşmektedir. Bu düşüş, kış mevsiminden ilkbahara

geçişte yaşanan yağış azlığını ortaya koymaktadır. Yaz ayları (haziran, temmuz, ağustos) ise oldukça kurak geçmektedir. Bu dönemde yağış miktarı minimum seviyelere inmektedir; temmuz ve ağustos aylarında neredeyse hiç yağış görülmemektedir. Bu sonuç, yaz aylarının sıcak ve kurak geçtiği Akdeniz ikliminin belirgin bir özelliğidir. Sonbahar aylarında ise yağış miktarı yeniden artış göstermektedir. Eylül ayında oldukça düşük olan yağış miktarı, Ekim ayında yaklaşık 90 mm'ye, Kasım ayında ise 110 mm'ye ulaşmaktadır. Bu artış, kış mevsimine geçiş sürecinde yağışlı havalara yeniden etkili olmaya başladığını göstermektedir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Manavgat/Taşagıl İstasyonuna Ait Aylık Toplam Yağış Miktarı (2013-2023)

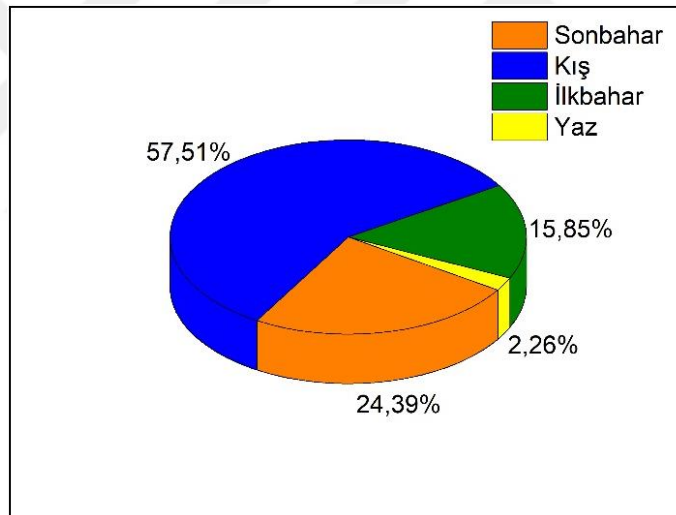
Kaynak: MGM,2023

Manavgat/Taşagıl Orman Sahası Meteoroloji İstasyonu verilerine göre, araştırma sahasında ölçülen yağış miktarı yıl içinde belirgin bir mevsimsellik göstermektedir. Akdeniz iklim bölgesinin tipik bir özelliği olarak, yıllık toplam yağışın büyük bir bölümü kış mevsiminde kaydedilmektedir. 2013–2023 dönemine ait uzun yıllar ortalamaları dikkate alındığında, yıllık yağış miktarının yaklaşık %57,5'i kış aylarında (Aralık, Ocak, Şubat) gerçekleşmektedir (Şekil 1.11). Bu durum, bölgedeki yağış rejiminin cephesel sistemlerle ilişkili olarak kış mevsiminde yoğunlaştığını göstermektedir. Buna karşılık, yaz mevsimi (haziran, temmuz, ağustos) oldukça kurak geçmekte olup, yıllık toplam yağışın yalnızca %2,26'sı bu dönemde düşmektedir (Şekil 1.11). Yaz aylarında etkili olan subtropikal yüksek basınç sistemleri ve yüksek sıcaklıklar hem buharlaşma oranlarını artırmakta hem de yağış oluşumunu azaltmaktadır. Bu durum, toprak nemi ve bitki örtüsü üzerinde önemli kısıtlamalar

yaratmakta; yangın riski, kuraklık ve toprak erozyonu gibi süreçlerin tetikleyici bir faktörü haline gelmektedir.

Yağışların mevsimsel geçiş dönemlerinde gösterdiği dağılım da hidrolojik açıdan dikkate değerdir. İlkbahar mevsiminde (mart, nisan, mayıs) yıllık toplam yağışın yaklaşık %15,8'i düşerken, sonbahar aylarında (eylül, ekim, kasım) bu oran %24,3'e ulaşmaktadır (Şekil 1.11). Bu geçiş dönemleri, akarsu akış rejimlerinin yeniden şekillendiği, yüzeysel akışın oluşmaya başladığı ve erozyonun önemli ölçüde hız kazandığı zaman dilimlerini temsil etmektedir. Özellikle sonbahardan kışa geçişte, ilk kuvvetli yağışlar yaz boyunca kurumuş toprak yüzeyinde hızla yüzeysel akışı artırmakta ve taşkın riskini yükseltmektedir (Nunes vd., 2011).

Sonuç olarak, araştırma sahasında yağışın mevsimsel dağılımı, bölgenin hidrolojik ve jeomorfolojik süreçlerini doğrudan etkilemekte; bu durum erozyon, akarsu hidrolojisi, toprak-su dengesi ve yangın rejimleri gibi çevresel süreçlerin yönetimi açısından kritik önem taşımaktadır.



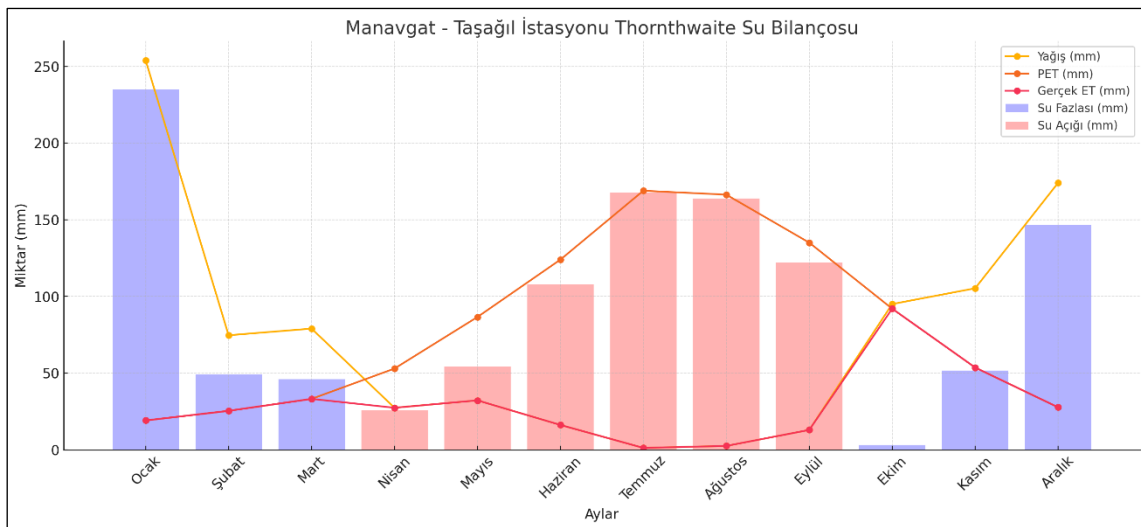
Şekil 1.11 Manavgat/Taşağıl İstasyonuna Ait Yağışların Mevsimsel Dağılımı (2013-2023)

1.6.3. İklim Sınıflandırması

Manavgat/Taşağıl Orman Sahası Meteoroloji İstasyonu'na ait 2013–2023 dönemine ilişkin aylık ortalama sıcaklık ve aylık toplam yağış verileri kullanılarak, araştırma sahasının iklim özellikleri Thornthwaite yöntemine göre değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme kapsamında, bölgeye ait su bilançosu tablosu oluşturulmuş (Şekil 1.12) ve buna bağlı olarak iklim sınıfı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, araştırma sahası C1sB'3 iklim sınıfında yer almakta olup, bu sınıf yarı nemli, yaz kuraklığı belirgin ve sıcak mezotermal özellikler göstermektedir (Thornthwaite, 1948).

Thornthwaite su bilançosuna göre Manavgat – Taşağıl istasyonunun tipik bir Akdeniz iklimi özellikleri gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu iklim tipinde olduğu gibi, bölgede yıllık yağışın büyük kısmı kış aylarında yoğunlaşmakta; yaz aylarında ise belirgin bir su açığı görülmektedir. Buna göre aralık, ocak, şubat ve mart aylarında yağış miktarlarının potansiyel buharlaşma-terleme (PET) değerlerinin üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 1.12). Bu aylarda yağış fazlası oluşmakta ve bu su, toprak neminin yeniden dolmasına ve yer altı suyu rezervlerinin beslenmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle ocak ayında yaklaşık 254 mm yağışın, sadece 19 mm’lik PET’in çok üzerinde olduğu ve ciddi bir su fazlası (yaklaşık 235 mm) yarattığı görülmektedir (Şekil 1.12). Bu durum, bölgedeki toprakların su ile doyma ihtimalini güçlendirmekte ve erozyon riski olan eğimli arazilerde yüzey akışına neden olabilecek fazlalığı işaret etmektedir.

Buna karşılık, nisan ayından itibaren PET değerleri hızla artmakta ve düşen yağış miktarlarını geçmektedir. Özellikle haziran–eylül döneminde, PET değerlerinin 120–170 mm arasında değiştiği, ancak yağışın bu aylarda genellikle 10 mm’nin altında kaldığı görülmektedir (Şekil 1.12). Bu aylar boyunca şiddetli su açığı ortaya çıkmakta, örneğin temmuz ayında sadece 1,17 mm yağış gerçekleşirken PET değeri 170 mm’nin üzerine çıkmaktadır. Bu dönem, tarımsal faaliyetler ve doğal ekosistemler açısından hidrolojik stresin en yoğun hissedildiği zaman dilimidir. Su açığı, toprakta kalan nemin buharlaşarak hızla kaybolmasına, bitki gelişiminin baskılanmasına ve yangın riski gibi çevresel tehditlerin artmasına yol açmaktadır. Ekim ayından itibaren ise PET değerlerinde düşüş gözlenirken yağışlar tekrar artmaya başlamakta ve kış aylarına doğru su dengesi yeniden pozitif yönde değişmektedir (Şekil 1.12). Bu geçiş dönemi, toprağın neminin artmaya başladığı, ancak su açığının hâlâ etkili olabileceği bir dönemdir.



Şekil 1.12 Manavgat-Taşağıl İstasyonu (2013-2023) Thornthwaite Su Bilançosu

Kaynak: MGM,2023

İKİNCİ BÖLÜM

ARAŞTIRMANIN MATERYAL VE METODU

2.1. Araştırma Sahasında Yangın Dönemi ve Sonrasında Yapılan Düzenlemeler

2.1.1. Orman Yangını Dönemi (28.07.2021)

Cumhuriyet tarihinin en büyük orman yangınlarından biri olan 2021 yılı Temmuz ayında meydana gelen Manavgat Orman Yangını, yaklaşık 76.600 hektarlık bir alanı etkileyerek, başta kızılçam (*Pinus brutia*) orman ekosistemleri olmak üzere geniş doğal habitatları ciddi düzeyde tahrip etmiştir. Yangın, yalnızca doğal ekosistemler üzerinde değil, aynı zamanda insan yerleşim alanlarında da yıkıcı etkilere yol açmış; Manavgat ilçesine bağlı Taşağıl, Beydiğin, Tilkiler, Yaylaalan, Sırtköy ve Sevinçköy başta olmak üzere birçok köy ve mahallede can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Ayrıca Naras, Oymapınar ve Manavgat barajları ile bu barajları besleyen akarsu havzaları da yangının etkilediği kritik hidrolojik birimler arasında yer almıştır.

Yangının ardından gerçekleştirilen detaylı arazi çalışmaları kapsamında, yangına maruz kalmış sahaların batı sınırında, Naras Barajı'nın kuzeyinde, birbirine bitişik ve yangından etkilenmiş üç mikro havza belirlenmiştir. Bu mikro havzalar, çalışmada sırasıyla doğudan batıya doğru Havza 1 (YADD-H1), Havza 2 (YADG-H2) ve Havza 3 (YAYG-H3) olarak adlandırılmıştır. Yangından etkilenmemiş olan bir kontrol sahası ise bu üç mikro havzanın yaklaşık 5 km batısında konumlanmıştır. Kontrol sahasının bu şekilde konumlandırılmasının temel nedeni, 2021 yangınının çok geniş bir alanı kapsaması sebebiyle yanık sahalar arasında yangından tamamen etkilenmemiş benzer özellikte başka mikro havzaların bulunamamasıdır.

Yangına maruz kalmış mikro havzalar ile yangından etkilenmeyen kontrol sahasının seçiminde, çevresel ve fiziksel faktörler göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda seçilen araştırma havzalarının yüzölçümleri, eğim dereceleri, bakı yönleri, ortalama yükselti değerleri, yangın öncesindeki bitki örtüsü durumu, yangın şiddetleri, litolojik özellikleri, toprak tipleri ve profilleri, akarsu morfolojileri ve hidrografik yapıları ile meteorolojik koşullar açısından birbirine yakın değerlere sahip olmasına dikkat edilmiştir.

Manavgat Orman Yangını gerek etkilediği alan büyüklüğü gerekse yangının şiddeti açısından, ekosistem dinamikleri üzerinde uzun vadeli etkiler yaratabilecek nitelikte bir olaydır. Literatürde de belirtildiği üzere, orman yangınları sonrasında, arazi örtüsü tipi, bitki örtüsü yoğunluğu, topografik özellikler ve yangının ilerleme yönüne olan uzaklık gibi değişkenlere bağlı olarak farklı yangın şiddetine sahip heterojen yanık alanlar oluşmaktadır. Bu bağlamda,

çalışmada yangın şiddetinin belirlenmesinde, Keeley (2009) ile Ryan vd., (2012) tarafından geliştirilmiş ve orman yangınlarının ekosistem üzerindeki etkilerini sınıflandırmak için yaygın olarak kullanılan yangın şiddeti değerlendirme kriterleri esas alınmıştır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Yangın Şiddeti Sınıflandırması

Sınıf	Açıklama
0 Yanmamış	Bitkinin bütün kısımları yeşil, hiç değişmeden durmakta, ısıdan doğrudan etkilenmemiş. Yanmamış fakat yayılan ısıdan dolayı kavrulan yapraklarda kayıplar mevcut.
1 Hafif	Ağaçların tepe tacı kısımları yeşil, gövdesi kavrulmuş. Yüzeydeki döküntü, yosun ve otlar kömürleşmiş ve tükenmiş. Orman altındaki organik tabaka bozulmamış, birkaç mm derinliğe kadar kömürleşmiş.
2 Orta	Ağaçların tepe tacının bir kısmı ölmüş ama ibreler tamamen tüketilmemiş. Ara ve alt tabakadaki bütün bitkiler yanmış ve tüketilmiş. Yangın öncesi toprakta bulunan organik tabaka büyük ölçüde tüketilmiş
3 Derin	Ölmüş ağaçlar ve tüketilmiş ibreler. Yüzeydeki tüm ebatlardaki döküntü ve organik tabaka büyük oranda tüketilmiş. Beyaz kül birikimi ve birkaç cm derinlikteki kömürleşmiş organik madde

Kaynak: Keeley, 2009; Ryan vd, 2012

Yangının hemen ardından gerçekleştirilen arazi gözlemleri sırasında, yangın geçirmiş üç mikro havzanın (Havza 1, Havza 2 ve Havza 3) tamamında yüzey topraklarının belirgin şekilde etkilendiği tespit edilmiştir. Araştırma bulgularına göre, bu sahalarda üst topraktaki tüm boyutlardaki organik döküntü tabakası (litter) ile organik madde açısından zengin olan humus katmanı büyük ölçüde yanarak tükenmiştir. Toprak yüzeyinde yaygın olarak beyaz kül birikimi gözlemlenmiş, bu kül tabakasının hemen altında ise yaklaşık 1–2 cm kalınlığında kömürleşmiş organik madde tabakasının bulunduğu belirlenmiştir (Fotoğraf 2.1). Bu gözlemler, yangının toprak yüzeyinde yüksek şiddette bir termal etki oluşturduğunu ve biyolojik aktivitenin yoğun olduğu üst katmanların büyük ölçüde tahrip olduğunu ortaya koymaktadır.

Söz konusu fiziksel ve görsel göstergeler, Keeley (2009) ile Ryan vd., (2012) tarafından geliştirilen yangın şiddeti sınıflandırması çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeye göre, üç mikro havzanın tamamı "derin" (high severity) yangın sınıfında yer almakta olup, yangının toprağın fiziksel ve biyokimyasal yapısı üzerinde kalıcı etkiler oluşturabilecek düzeyde olduğu kanaatine varılmıştır. Yangının bu derece yoğun yaşanmış olması, özellikle toprak nemi, toprak sıcaklığı, hacim ağırlığı, geçirgenliği, infiltrasyon hızı, hidrolik iletkenliği ve erozyon potansiyeli gibi toprak fonksiyonları üzerinde uzun süreli etkiler doğurabileceğini göstermektedir.



Fotoğraf 2.1 Araştırma Sahasına Ait Orman Yangını Esnasındaki Yanmış Ağaçlardan, Orman Altı Örtüsünden ve Kül Birikimi olan Üst Topraktan Bir Görünüm

Bu çalışmada yangın şiddetinin belirlenmesinde yalnızca arazi gözlemlerine ve Keeley (2009) ile Ryan vd., (2012) tarafından geliştirilen yangın şiddeti sınıflandırmasına değil, aynı zamanda uydu görüntülerinden elde edilen uzaktan algılama verilerine de başvurulmuştur. Günümüzde yangın sonrası değerlendirmelerde yangın şiddeti haritalarının oluşturulmasında uydu görüntüleri, hızlı ve etkili bir yöntem olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellikle geniş alanları etkileyen yangınlarda, arazi gözlemleriyle elde edilmesi zor olan mekânsal değişimlerin ve yangın şiddeti mozaiklerinin belirlenmesinde uzaktan algılama verileri büyük avantaj sağlamaktadır.

Bilindiği üzere yangınlar, çoğunlukla homojen olmayan, farklı yangın şiddetlerinin bir arada bulunduğu mozaik yapılar oluşturur. Bu nedenle, bir bölgedeki yangın şiddetinin mekânsal dağılımını doğru şekilde belirlemek amacıyla, çeşitli spektral indekslerden yararlanılmaktadır (French vd., 2008). Bu indekslerin başında, yakın kızılötesi (Near Infrared - NIR) ve kısa dalga kızılötesi (Shortwave Infrared - SWIR) bantlarını temel alan Normalleştirilmiş Yanma Oranı (Normalized Burn Ratio - NBR) ile yangın öncesi ve sonrası NBR değerlerinin farkına dayanan Normalleştirilmiş Yanma İndeksi Farkı (Differenced Normalized Burn Ratio - dNBR) gelmektedir (Key ve Benson, 2006). Bu indeksler,

vejetasyonun yapısal değişimlerini ve toprak yüzeyinde yangın etkisini yansıtmaya kapasitesi sayesinde yangın şiddetinin mekânsal analizinde güvenilir sonuçlar vermektedir.

Çalışma kapsamında yangın şiddeti haritasının oluşturulmasında Sentinel-2A uydusuna ait çok bantlı görüntüler kullanılmıştır. Araştırma sahalarını kapsayan yangın öncesi tarihli (10 Haziran 2021) ve yangın sonrası tarihli (20 Ağustos 2021) Sentinel-2A uydu görüntüleri, Avrupa Birliği Uzay Programı kapsamında hizmet veren Copernicus açık erişim platformundan ücretsiz olarak temin edilmiştir. NBR hesaplamalarında Sentinel-2A uydu görüntülerindeki 8. bant (yakın kızılötesi) ile 12. bant (kısa dalga kızılötesi) kullanılmıştır (Key ve Benson, 2006). NBR ve dNBR algoritmalarıyla elde edilen spektral veriler aracılığıyla, yangının araştırma sahalarındaki etkisi mekânsal olarak analiz edilmiştir.

$$NBR = \frac{Yakın\ kızılötesi\ bant - Kısa\ dalga\ kızılötesi\ bant}{Yakın\ kızılötesi\ bant + kısa\ dalga\ kızılötesi\ bant}$$

$$dNBR = (NBR_{pre} - NBR_{post}) * 1000$$

Bu çalışmada kullanılan dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio – Farklandırılmış Normalleştirilmiş Yanma Oranı) indeksi, yangın öncesi ve sonrası yanma oranı değerleri arasındaki farkın ölçülmesine dayanmaktadır. Burada kullanılan dNBR, yangın öncesi normalleştirilmiş yanma oranı (NBR_{pre}) ile yangın sonrası normalleştirilmiş yanma oranı (NBR_{post}) arasındaki farkın alınması ve bu farkın bir ölçeklendirme katsayısı olan 1000 ile çarpılmasıyla elde edilmektedir (Key ve Benson, 2006).

Bu işlem sonucunda, elde edilen dNBR değerleri kullanılarak yangın şiddeti sınıflandırması yapılmıştır. Sınıflandırma, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) tarafından geliştirilen ve geniş çapta kabul gören FIREMON protokolüne (Key ve Benson, 2006) dayanmaktadır. Bu protokole göre yangın şiddeti, dNBR değerlerine göre beş farklı kategoriye ayrılmaktadır (Tablo 2.2). Bu kategoriler, yangının vejetasyon üzerindeki etkisinin derecesini belirlemede ve ekosistem tahribat düzeyinin mekânsal olarak analizinde kullanılmaktadır.

Tablo 2.2 USGS FIREMON Standartlarına Göre dNBR Yangın Şiddeti Sınıfları

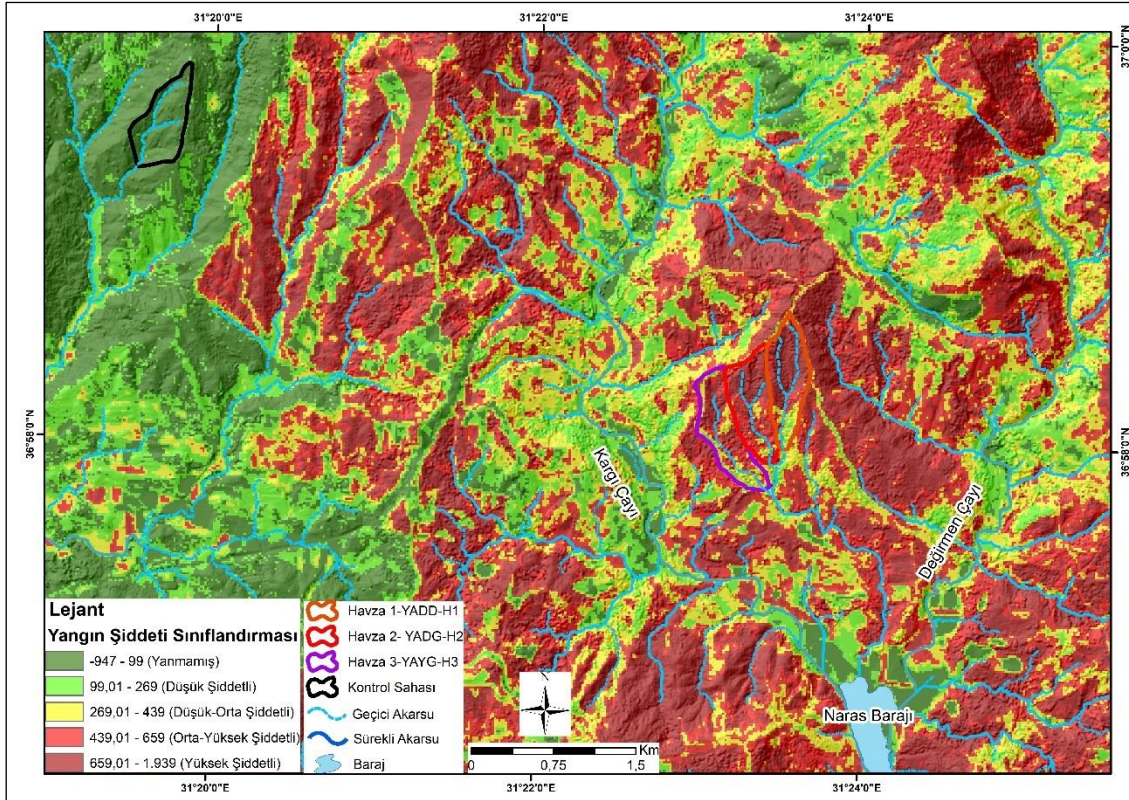
Yangın şiddeti	dNBR aralığı (1000 ile ölçeklendirilmiş)
Yanmamış	-100'den +99'a
Düşük şiddetli	99,01'den +269'a
Düşük-orta şiddetli	269,01'den +439'a
Orta-yüksek şiddetli	+439,01'den +659'a
Yüksek-orta şiddetli	+659,01<

Kaynak: Key ve Benson, 2006

Yangın şiddeti haritası incelendiğinde, Kargı Çayı ve Değirmen Çayı'nın kaynak bölgesinden Naras Barajı'na kadar olan alanda, akarsu yatakları boyunca yangın şiddetinin düşük olduğu ya da hiç etkilenmemiş alanların varlığı dikkati çekmektedir. Yangından etkilenen üç mikro havza (Havza 1-YADD-H1, Havza 2-YADG-H2, Havza 3-YAYG-H3) ise yangın şiddeti sınıflandırmasına göre büyük ölçüde orta-yüksek ve yüksek şiddetli arazilerle kaplanmıştır (Şekil 2.1). Bu alanlarda özellikle, mikro havzaların kaynak kısımlarına doğru yangın şiddetinin arttığı gözlemlenmiştir. Yangından sonra yapılan arazi çalışmaları sırasında, Havza 1 olarak tanımlanan ve rehabilitasyon sürecinde doğal bırakılan havzanın (YADD-H1) doğu yamacının ağız kısmında düşük ve düşük-orta şiddetli yanık alanların mevcut olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.1).

Yangın geçirmiş mikro havzaların çevresindeki alanlarda da yangından etkilenen bölgeler geniş bir alana yayılmaktadır. Bu durum, çalışmada belirlenen kontrol sahasının yangın geçirmiş mikro havzaların bitişiğinde ya da yakınında seçilememiş olmasının nedenini açıkça ortaya koymaktadır. Kontrol sahasının 2021 yılında meydana gelen Manavgat orman yangınından etkilenmemesi, yangının bu alanın batısında yer alan havzanın doğu bakılı yamacında durması ve bu hat üzerinden kontrol sahasına ilerlememesi ile açıklanabilir (Şekil 2.1).

Son olarak, yangın sonrası yapılan arazi çalışmalarında, yangın geçirmiş üç mikro havzanın yangın şiddeti, Keeley (2009) ve Ryan vd., (2012) tarafından geliştirilen yangın şiddeti sınıflandırmasına göre "derin" olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, USGS FIREMON (Key ve Benson, 2006) standartlarına uygun olarak uydu görüntüleri kullanılarak oluşturulan yangın şiddeti sınıflandırmasına göre, yangından etkilenen bu üç mikro havzada orta-yüksek ve yüksek şiddetli arazilerin geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.1).

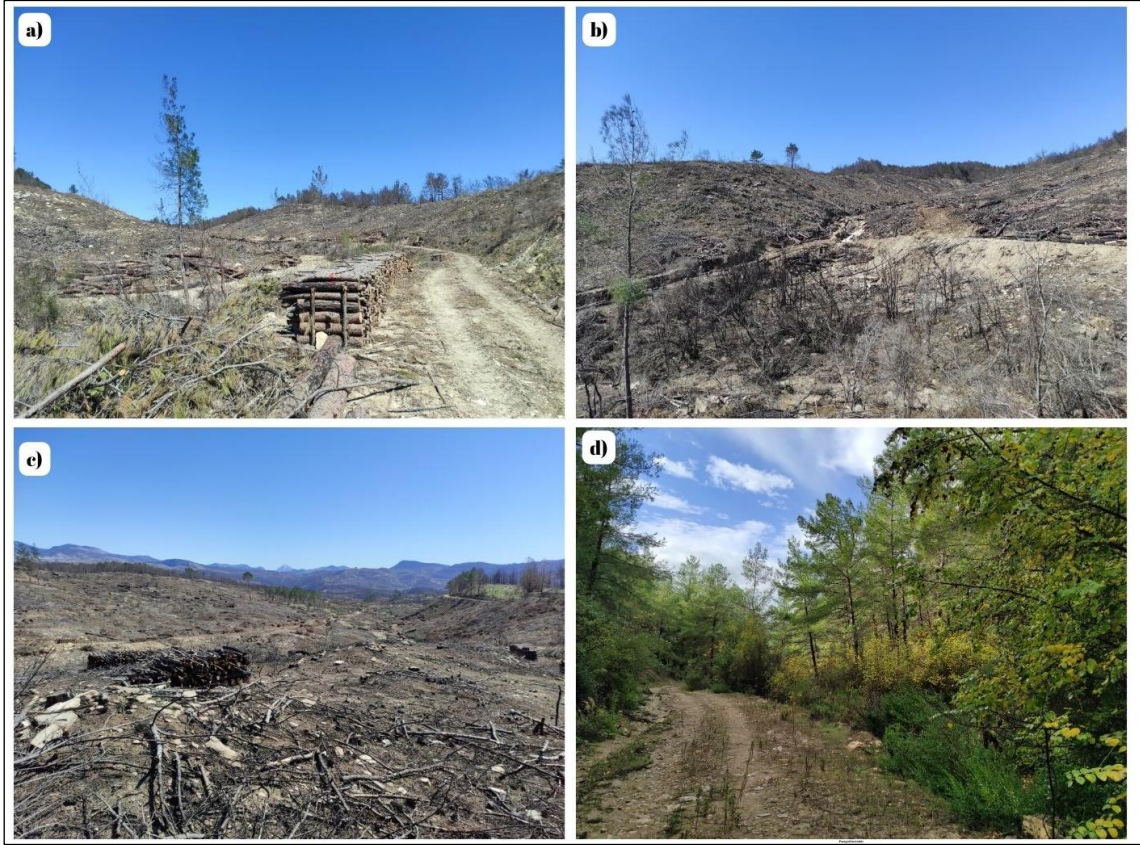


Şekil 2.1 Araştırma Sahaları ve Çevresinin Yangın Şiddeti Haritası

2.1.2. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

Yangın sonrasında yanmış sahaların, özellikle bitki örtüsü açısından yangın öncesi duruma geri dönebilmesi amacıyla yaygın olarak ön hazırlık çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalar kapsamında, yangın sonucu zarar görmüş ağaç gövdeleri, dal ve tomruklar genellikle ağır iş makineleri yardımıyla sahadan çıkarılmaktadır. İlk olarak, yanmış ağaç gövdeleri, odun, tomruk ve dallar kesilerek, halat yardımıyla toprak yüzeyi boyunca sürüklenir ve nakliye için yeni açılan orman yollarında depolanır. Yeni orman yollarının, traktör yollarının ve ağaç sürütme yollarının açılmasını, yanmış ağaçların kesim, sürütme ve nakliyesini kapsayan tüm bu uygulamalara üretim faaliyetleri (salvage logging) adı verilmektedir.

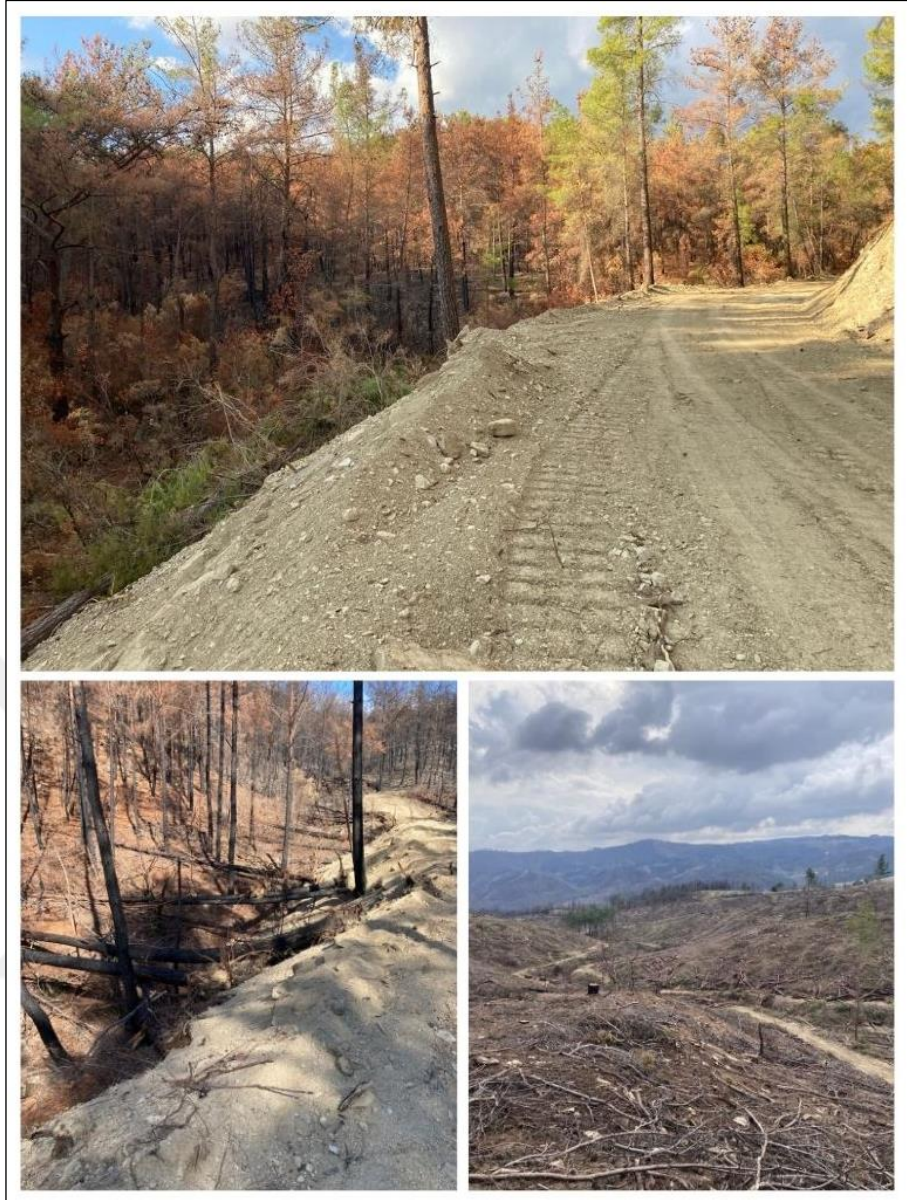
Türkiye’de, Orman Genel Müdürlüğü tarafından Anayasa’nın 169. maddesinde yer alan "Yanan ormanların yerinde yeni orman yetiştirilir, bu yerlerde başka çeşit tarım ve hayvancılık yapılamaz" hükmü doğrultusunda, orman yangınlarından sonra sahaların rehabilitasyona hazırlanabilmesi için üretim faaliyetleri (salvage logging) sıklıkla yapılmaktadır. Bu çalışmada, yangın geçirmiş Havza 1, Havza 2 ve Havza 3’te üretim faaliyetleri, 01.10.2022 ile 25.05.2023 tarihleri arasında, ağır iş makineleri kullanılarak eş zamanlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 2.2).



Fotoğraf 2.2 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemine Ait Görseller: (a) Havza 1, (b) Havza 2, (c) Havza 3 ve (d) Yangın Geçirmemiş Kontrol Sahası

Yangın sonrası, Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'teki yanmış ağaçların kesilmesi ve bu ağaçların havza yamaçlarından taşınabilmesi için yeni orman yolları inşa edilmiştir. Bu yolların açılmasından önce, yangından etkilenmemiş olan kontrol sahasında mevcut yol yoğunluğu ve yol uzunluğu detaylı bir şekilde ölçülmüştür. Kontrol sahasında, orman yolları, havzanın kaynak kısmından ağız kısmına kadar devam etmekte olup, bu yol akarsu yatağına paralel bir şekilde toplamda 2,5 km uzunluğunda ve 5 m genişliğinde bir yol ağı bulunmaktadır. Ayrıca, kontrol sahasında ara yollar da dahil edilerek toplam yol yoğunluğu 150 metre/ha, yol uzunluğu ise 4,5 km olarak hesaplanmıştır.

Yangın geçirmiş Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te ise yeni açılan orman yollarının, kontrol sahasındaki yol yoğunluğu ve uzunluğuyla eşit olacak şekilde düzenlenmesi sağlanmıştır. Bu doğrultuda, her üç havzada da kaynak bölümünden ağız kısmına doğru, ana dereye paralel olarak paletli dozer (ön bıçak genişliği: 4,4 m) ile yollar açılmıştır (Fotoğraf 2.3). Ayrıca, üst yamaçtaki yanmış ağaçların çıkarılabilmesi için havzanın enine kesitlerinde lastik tekerlekli traktörler kullanılarak sürütme yolları oluşturulmuştur.



Fotoğraf 2.3 Üretim Faaliyetleri Yapılan Havzalarda (Havza 1, Havza 2, Havza 3) Yeni Açılan Orman Yollarından Görşeller

Üretim faaliyetleri (salvage logging) sürecinde, yangından etkilenmiş olan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3 arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar, genellikle yeni açılan orman yollarının akarsuya olan mesafesi ile orman yolları ile akarsu yatağı arasındaki vejetasyon zonun, yani riperyan zonun olup olmaması gibi ilişkiden kaynaklanmaktadır. Üretim faaliyetleri esnasında, yanmış ağaçlardan elde edilen tomrukların kamyon ve tırlar aracılığıyla taşınmasında orman yolları yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yollar, her üç havzanın kaynak bölgesinden çıkış noktasına kadar akarsu yatağına paralel olarak açılmıştır. Ancak, bu orman yollarının akarsu yatağına olan mesafeleri ve akarsu yatağının talveg noktasına göre yükseltileri arasında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Yeni açılan orman yollarının akarsuya olan mesafeleri ve akarsu yatağı ile orman yolu arasında gelişen vejetasyonla kaplı riperyan zonun

olup olmaması, havzalar arasında sediman taşınım süreçleri açısından bazı farklılıklara neden olduğu düşünülmektedir.

Havza 1'de, üretim faaliyetleri sırasında en sık kullanılan orman yolunun akarsuya olan mesafesi ortalama olarak 11 metre civarındadır. Ayrıca, bu yolun akarsuyun talveg noktasına göre yüksekliği ise yaklaşık olarak 1,5 metredir (Fotoğraf 2.4). Bu havzada, akarsu banklarının diğer havzalara kıyasla nispeten daha az tahrip olduğu gözlemlenmiştir.



Fotoğraf 2.4 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Havza 1'deki Akarsu Yatağı ve Orman Yoluna Ait Bir Görünüm

Havza 2'de kullanılan orman yolu ile akarsu yatağı arasında belirgin bir mesafe farkı bulunmamaktadır (Fotoğraf 2.5). Bu havzada yeni orman yolları açılırken, akarsuyun bankları büyük ölçüde tahrip olmuş ve akarsu yatağı ile orman yolu tamamen birleşmiştir. Bu durum, yol açma işlemlerinin akarsu yatağına yakın bir mesafede gerçekleştirilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.



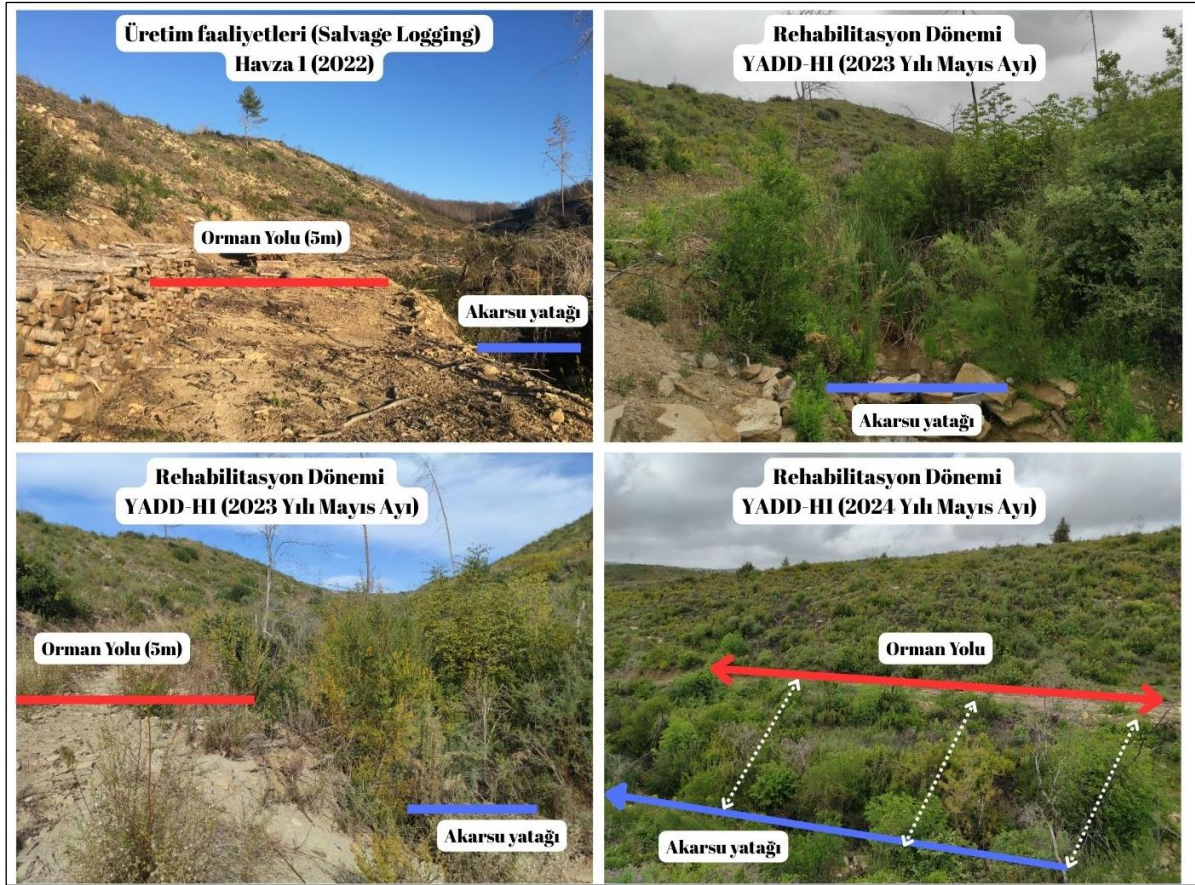
Fotoğraf 2.5 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Havza 2'deki Akarsu Yatağı ve Orman Yoluna Ait Bir Görünüm

Havza 3'te, üretim faaliyetleri dönemi boyunca yoğun olarak kullanılan orman yolu ile akarsu yatağı arasındaki mesafe, diğer havzalara kıyasla çok daha fazla olmuştur. Bu havzada, orman yolu ile akarsu yatağı arasındaki ortalama mesafe yaklaşık olarak 50 metreye ulaşmaktadır (Fotoğraf 2.6).



Fotoğraf 2.6 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Havza 3'teki Akarsu Yatağı ve Orman Yoluna Ait Bir Görünüm

Üretim faaliyetleri dönemi (salvage logging) sırasında havzalar arasında gözlemlenen bir diğer fark, orman yolları ile akarsu yatağı arasında gelişen vejetasyon zonunun (riperyan zon) varlığıdır. Bu vejetasyon zonu, akarsuyun akış dinamiklerinden sürekli olarak etkilenen sucul ekosistem ile kara ekosistemi arasındaki yarı sucul/yarı kara ekosistemi olarak kabul edilir. Genellikle akarsu banklarından başlayarak havza yamaçlarının kenarlarına kadar uzanır (Decamps vd., 2009). Üretim faaliyetleri döneminde, yalnızca Havza 1'de orman yolu ile akarsu yatağı arasında yaklaşık olarak 11 metre genişliğinde bir vejetasyon zonu gelişmiştir (Fotoğraf 2.7). Bu vejetasyonla kaplı riperyan tampon bölge, Havza 1'de üretim faaliyetleri sonrasında uygulanan rehabilitasyon sürecinde (YADD-H1) de doğal haline bırakılmış olan alanda varlığını sürdürmüştür.



Fotoğraf 2.7 Üretim Faaliyetleri Döneminde Havza 1’de ve Rehabilitasyon Sürecinde Doğal Haline Bırakılan (YADD-H1) Sahada Orman Yolu ile Akarsu Arasında Gelişen Vejetasyon (Riperyan) Zonuna Ait Bir Görünüm

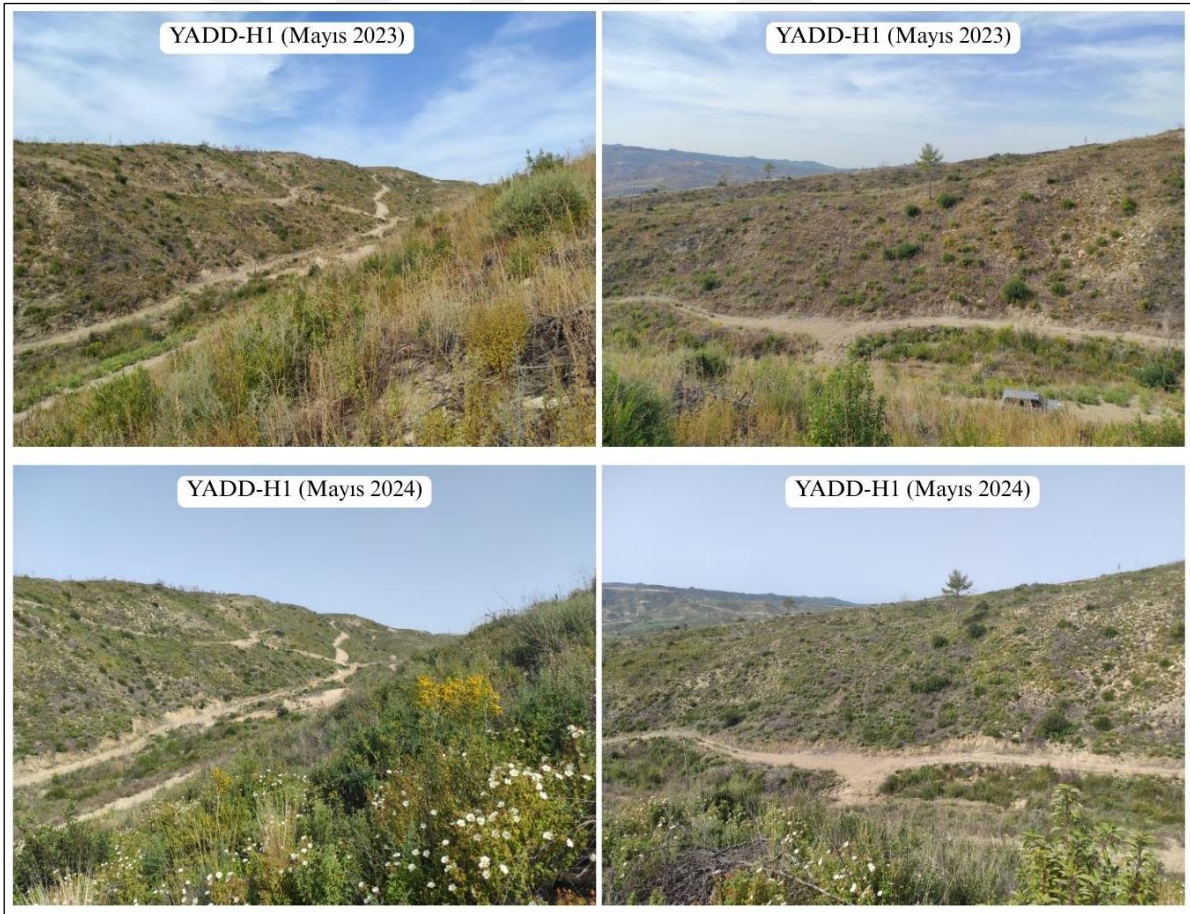
2.1.3. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Yangın riski yüksek olan birçok ülkede, yangın sonrası yanmış alanların rehabilitasyona hazırlanması amacıyla üretim faaliyetleri (salvage logging) sıklıkla gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte karşılaşılan en büyük zorluk, üretim faaliyetlerinin (salvage logging) ardından temizlenen yanmış alanların, yangın öncesindeki koşullara geri döndürülmesi, yani bu alanların etkin bir şekilde rehabilite edilmesidir. Dünyada, rehabilitasyon yöntemleri arasında erozyon çitleri kurulması, eş yükselti eğrilerine paralel olarak ağaçların devrilmesi, alanların tohumlanması, sürülerek fidan dikimi yapılması, yanmış ağaç dalları, saman, talaşlar veya kimyasal polimerlerin toprak yüzeyine serilmesi gibi çeşitli uygulamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ABD, Portekiz ve İspanya gibi ülkelerde, saman, talaş ve kimyasal polimerlerin toprak yüzeyine serilmesi, yani malçlama uygulamaları son dönemde çok sayıda çalışmanın konusu olmuştur. Bu yöntemle ilgili olarak, hektar başına düşen malçlama oranları ise tartışma konusu olmaktadır. Türkiye’de ise üretim faaliyetlerinin ardından yapılan rehabilitasyon çalışmaları, yanmış alanların tohumlanması, toprak yüzeyine yanmış ağaç dallarının serilmesi, alanların eş yükselti eğrilerine paralel olarak sürülmesi ve sonrasında fidan

dikilmesi, özellikle eğimli alanların teraslandırılması ve fidan dikilmesi gibi yöntemleri içermektedir. Ayrıca, çok nadir de olsa bazı durumlarda yanmış alanların tamamen doğal haline bırakılması tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, yangın sonrası eş zamanlı olarak üretim faaliyetlerinin yapıldığı Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te, Mayıs 2023 tarihinde her bir havzada farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmıştır. Çalışma süresi boyunca Mayıs 2023 ile Mart 2023 arasındaki dönem, rehabilitasyon dönemi olarak adlandırılmıştır.

Bu dönemde, Havza 1'de üretim faaliyetlerinin ardından herhangi bir iyileştirme veya rehabilitasyon çalışması yapılmamıştır. Havza 1'de yanmış ağaçlar tamamen çıkarılmış ve alan doğal haline bırakılmıştır (Fotoğraf 2.8). Bu alan, rehabilitasyon dönemi boyunca "Yanmış Alanın Doğal Haline Bırakılması" (YADD-H1) olarak isimlendirilmiştir. Havza 1'deki bu yaklaşım, ülkemizdeki diğer rehabilitasyon yöntemlerine kıyasla daha az yaygın olarak uygulanmaktadır ve bu durum, ülke genelinde rehabilitasyon yöntemlerinin çeşitliliğini ve etkilerini değerlendiren çalışmalara önemli bir katkı sağlamaktadır.

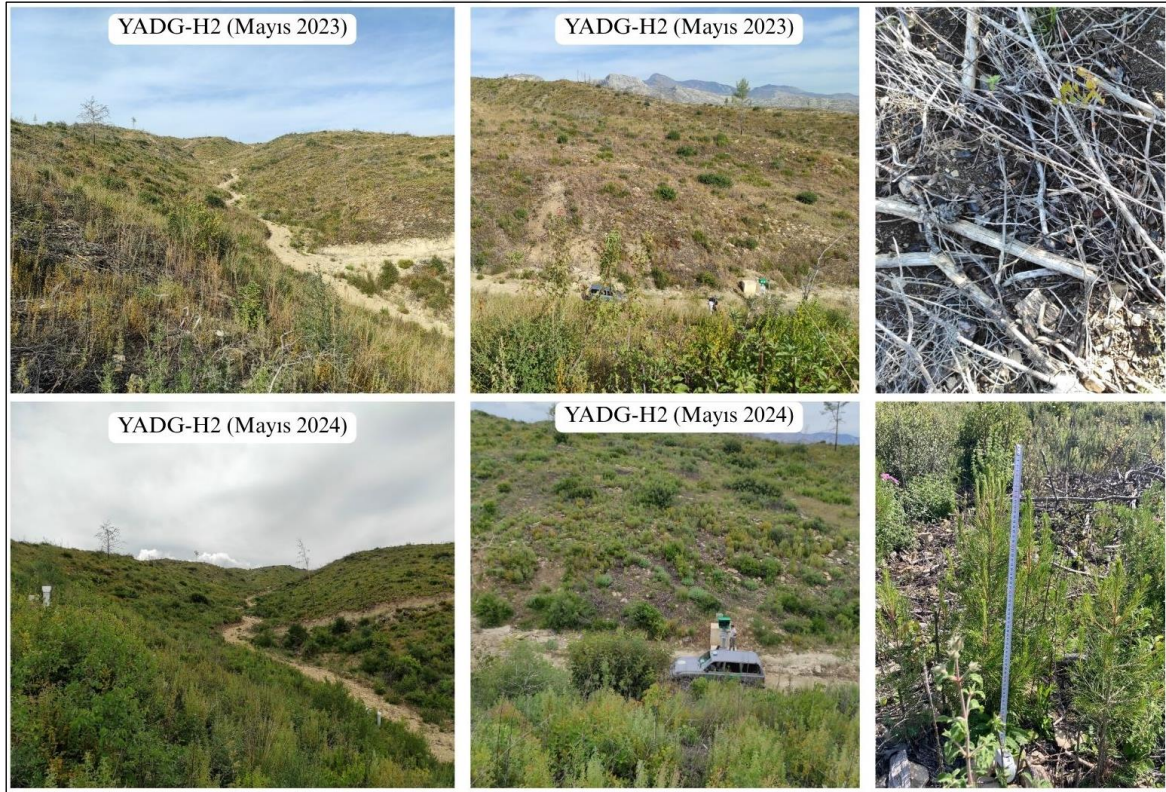


Fotoğraf 2.8 Rehabilitasyon Döneminin Birinci ve İkinci Yıllarında Doğal Haline Bırakılan Havza (YADD-H1) İçerisinde Aynı Noktalardan Alınan Karşılaştırmalı Görseller

Havza 2'de, yanmış ağaçlar havzadan çıkarılmadan ve üretim faaliyetleri başlamadan önce 5 kg/ha oranında kıvılcım tohumu atılmıştır. Bu tohumlama işlemi, yangın geçirmiş diğer

havzalarla eş zamanlı olarak yapılan üretim faaliyetlerinden önce gerçekleştirilmiştir. Üretim faaliyetlerinin tamamlanmasının ardından, aynı miktarda (5 kg/ha) tohumlama işlemi tekrar uygulanmış ve toprak yüzeyine, üretim faaliyetleri sırasında bırakılan ince dal, talaş, kozalak ve ibreler homojen bir şekilde serilmiştir. Bu rehabilitasyon yöntemi, ülkemizde *doğal gençleştirme* olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu uygulama dışarıdan müdahale ile gerçekleştirilen tohumlama işlemi nedeniyle uluslararası literatürde "doğal gençleştirme" olarak nitelendirilmez. Bu uygulama uluslararası literatürde "*tohumlama ve malçlama*" (*seeding + mulching*) olarak ifade edilmektedir (Robichaud vd., 2013c; Ravina vd., 2012).

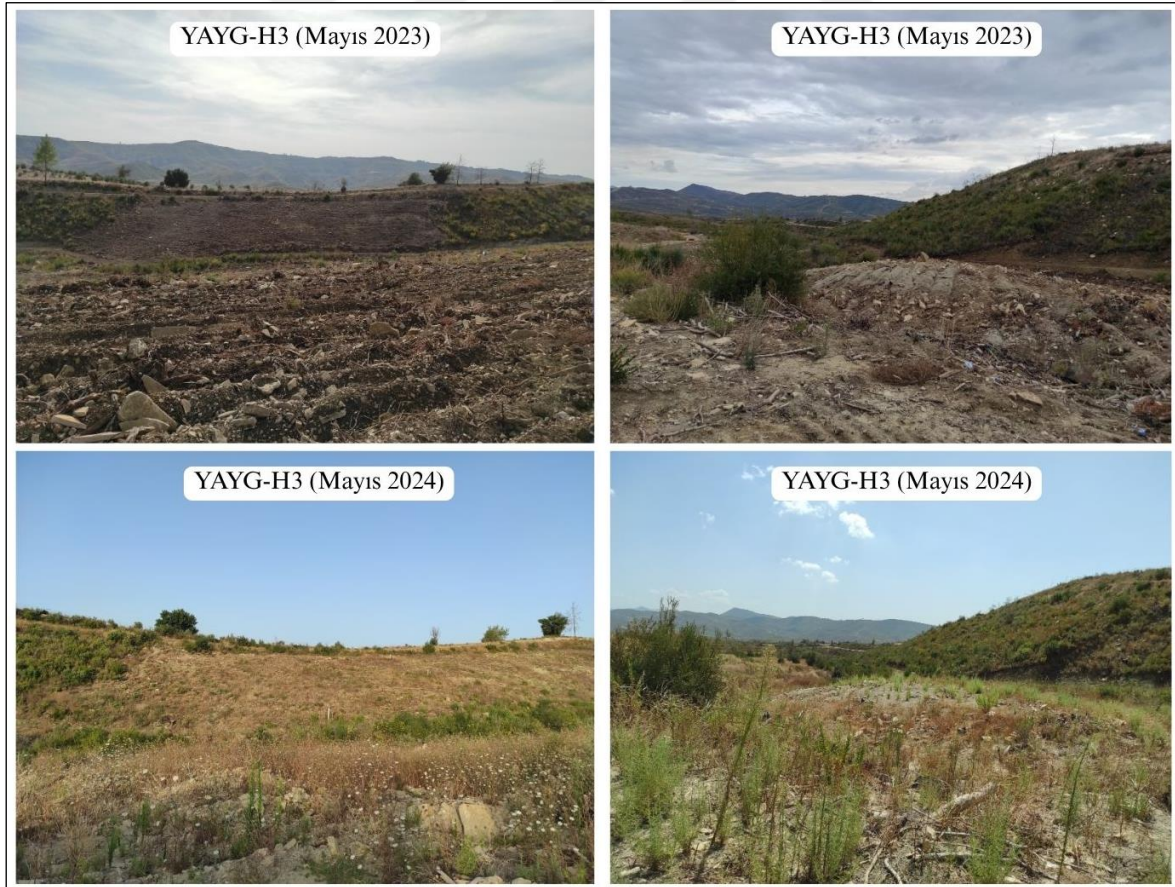
Bu uygulamada, kızılçam tohumlarının atılması, yanmış sahaların tekrardan kızılçam orman ekosistemine dönmesini amaçlamaktadır. Aynı zamanda, toprak yüzeyine serilen ince dal, talaş, kozalak ve ibrelerin oluşturduğu malç tabakası, toprak yüzeyini erozyona karşı koruyarak, toprak nemini muhafaza etmeye yardımcı olacağı ve doğal koşulların daha hızlı bir şekilde yeniden sağlanmasına katkı sağlayacağı beklenmektedir (Ravina vd., 2012) (Fotoğraf 2.9). Bu rehabilitasyon yöntemi, özellikle yangın sonrası bozulan ekosistemlerin yeniden yapılandırılması için önemli bir adım teşkil etmektedir (Robichaud vd., 2013c). Havza 2, rehabilitasyon dönemi boyunca "Yanmış Alanın Doğal Gençleştirilmesi (Tohumlama ve Dal Serme)" (YADG-H2) olarak isimlendirilmiştir (Fotoğraf 2.9).



Fotoğraf 2.9 Rehabilitasyon Döneminin Birinci ve İkinci Yıllarında Tohumlanan ve Dal Serilen Havza (YADG-H2) İçerisinde Aynı Noktalardan Alınan Karşılaştırmalı Görseller

Havza 3'te, tıpkı Havza 1 ve Havza 2'de olduğu gibi yangın sonrası aynı dönemde üretim faaliyetleri uygulanmış ve sahadaki yanmış ağaçlar tamamen çıkarılmıştır. Üretim faaliyetleri sonrasında geriye kalan yanmış ağaç artıkları, özellikle ince dal ve ağaç gövdeleri toplanmış ve bu materyaller, havzanın eş yükselti eğrilerine paralel bir şekilde, paletli traktör (dozer) ile üçlü ripper kullanılarak 60-80 cm derinliğinde sürülmüştür. Toprak işleminin ardından, rehabilitasyon sürecinin son aşamasında çıplak köklü kızılçam fidanları, 3 x 2 m aralık mesafelerine dikkat edilerek alana dikilmiştir.

Havza 3'te uygulanan bu toprak işleme ve fidan dikimi faaliyetleri, Orman Genel Müdürlüğü'nün 298 numaralı tamiminde belirtilen teknik esaslara uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, toprak işleme ve fidan dikimini kapsadığı için "yapay gençleştirme" olarak adlandırılmaktadır. Yapay gençleştirme, özellikle yangın gibi afetlerin ardından orman ekosistemlerinin yeniden yapılandırılmasında yaygın bir rehabilitasyon yöntemi olarak kullanılmaktadır. Havza 3, rehabilitasyon dönemi boyunca "Yanmış Alanın Yapay Gençleştirilmesi (Sürüm ve Fidan Dikimi)" (YAYG-H3) olarak isimlendirilmiştir (Fotoğraf 2.10).



Fotoğraf 2.10 Rehabilitasyon Döneminin Birinci ve İkinci Yıllarında Sürülen ve Fidan Dikilen Havza (YAYG-H3) İçerisinde Aynı Noktalardan Alınan Karşılaştırmalı Görseller

Kontrol sahası, fiziki coğrafya özellikleri açısından, yangın geçirmiş olan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3 ile benzerlik göstermektedir. Her üç alanda da mevcut olan topografya, vejetasyon ve ekolojik özellikleri bakımından önemli bir benzerlik gösterir. Bununla birlikte, kontrol sahasının yangın geçirmemiş olması, bu alanın çevresel ve ekolojik özelliklerinin yangından etkilenmeden doğal halini sürdürmesine olanak tanımıştır. Kontrol sahasında, yangın sonrası üretim faaliyetleri, rehabilitasyon uygulamaları ve herhangi bir ormancılık müdahalesi (örneğin, yol yapımı, bakım çalışmaları, ağaç aralama veya odun üretimi) yapılmamıştır. Ayrıca, bu alanın doğal yapısını bozan hiçbir dış etken söz konusu değildir (Fotoğraf 2.11).

Yangın geçirmiş olan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te olduğu gibi, kontrol sahasında da tarımsal faaliyetler, yerleşim alanları ve hayvancılık faaliyetleri bulunmamaktadır. Bu durum, sahadaki doğal ekosistemin insanlar tarafından değiştirilmediğini ve bu bölgenin, çevresindeki yangın geçiren alanlarla karşılaştırıldığında insan etkinliklerinden etkilenmeden kalmış bir bölge olduğunu göstermektedir (Fotoğraf 2.11). Sonuç olarak, kontrol sahası, diğer yangın geçirmiş havzalarla kıyaslandığında, herhangi bir ormancılık faaliyeti veya insan müdahalesi olmaksızın, doğal ekosistem süreçlerinin devam ettiği bir alan olarak tanımlanabilir.



Fotoğraf 2.11 Yangın Geçirmemiş Kontrol Sahasından Bir Görünüm

2.2. Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi

Orman yangınları, ardından yapılan üretim faaliyetleri (salvage logging) ve bu faaliyetlerin ardından uygulanan çeşitli rehabilitasyon yöntemleri, toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu alandaki mevcut literatürün büyük bir kısmı, orman yangınlarının toprak özellikleri üzerindeki etkilerine odaklanmışken, yangın sonrasında gerçekleştirilen üretim faaliyetlerinin (salvage logging) ve ardından uygulanan rehabilitasyon yöntemlerinin toprak özelliklerine olan etkilerini inceleyen çalışmalar daha sınırlıdır. Orman yangınları, üretim faaliyetleri ve rehabilitasyon yöntemlerinin genellikle toprak yüzeyinin (0-5 cm derinlik) fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilediği bilinmektedir (Francos vd., 2018).

Bu bağlamda yapılan çalışmalarda, toprağın üst kısmının (0-5 cm derinlik) fiziksel özelliklerine odaklanılmış ve bu özellikler arasında özellikle toprak tekstürü, hacim ağırlığı (HA), toprak nemi, toprak sıcaklığı, agregat stabilitesi (AS), infiltrasyon hızı (I) ve hidrolik iletkenlik gibi parametreler incelenmiştir. Bunun yanı sıra, toprak yüzeyinin kimyasal özelliklerine ilişkin olarak ise genellikle toprak reaksiyonu (pH), elektriksel iletkenlik (EC), fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na) ve potasyum (K) gibi parametreler değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, orman yangını, yangın sonrası üretim faaliyetlerini ve rehabilitasyon dönemlerini temsil etmek amacıyla, her yıl periyodik olarak 0-5 cm derinliğindeki toprağın üst kısmından örnekler alınmıştır. Yangın geçirmiş olan Havza 1 (YADD-H1), Havza 2 (YADG-H2) ve Havza 3 (YAYG-H3) olmak üzere üç farklı havza ile yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında yapılan bu örneklemeler, her bir havzanın ekolojik özellikleri ve çevresel koşulları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Her bir havzada, havzanın yükseltisi, bakı koşulları, erozyon sahaları ve toprak kalınlığı gibi faktörler dikkate alınarak, toplamda 24 sabit toprak örnekleme noktası belirlenmiştir (Tablo 2.3). Bu örnekleme noktaları, her bir havzanın doğu ve batı yamaçlarında, alt, orta ve üst yamaçları temsil edebilecek şekilde homojen bir biçimde belirlenmiştir. Bu sayede, yangın ve rehabilitasyon süreçlerinin toprak özellikleri üzerindeki etkilerini daha doğru ve kapsamlı bir şekilde değerlendirmek mümkün olmuştur.

Tablo 2.3 Dört Havzada Belirlenen Sabit Toprak Örnekleme Noktalarının Koordinatları

Havza No/İşlem	Konumu	Toprak Örnekleme Noktaları	Koordinatlar (UTM)	
			X	Y
Havza 1 (YADD-H1)	Doğu Yamacı	1	384567	4493711
		2	384607	4493676
		3	384642	4493640
	Batı Yamacı	4	384796	4494186
		5	384755	4494219
		6	384704	4494256
Havza 2 (YADG-H2)	Doğu Yamacı	7	392441	4499054
		8	392438	4499098
		9	392420	4499152
	Batı Yamacı	10	392587	4499191
		11	392612	4499141
		12	392632	4499094
Havza 3 (YAYG-H3)	Doğu Yamacı	13	397603	4499831
		14	397599	4499884
		15	397591	4499930
	Batı Yamacı	16	397727	4499856
		17	397701	4499814
		18	397701	4499814
Kontrol Sahası	Doğu Yamacı	19	397603	4499831
		20	397599	4499884
		21	397591	4499930
	Batı Yamacı	22	397727	4499856
		23	397701	4499814
		24	397701	4499814

Orman yangınına ait üst toprak örnekleri, ilk olarak 2021 yılının Eylül ayında alınmıştır. Üretim faaliyetlerini temsil eden toprak örnekleri ise ilk olarak 2023 yılının Mayıs ayında alınmış, rehabilitasyon döneminin birinci yılındaki toprak örnekleri ise yine ilk olarak 2024 yılının Mayıs ayında toplanmıştır (Fotoğraf 2.12). Her bir dönemde, yangın geçirmiş olan Havza 1 (YADD-H1), Havza 2 (YADG-H2) ve Havza 3 (YAYG-H3) olmak üzere üç farklı havzadan toplamda 18 farklı örnekleme noktası belirlenmiş, yangın geçirmemiş kontrol sahasından ise 6 farklı örnekleme noktası seçilmiştir. Her bir örnekleme noktasında, üst toprak (0-5 cm derinlik) seviyesinden toplamda 24 adet doğal yapısı bozulmuş toprak örneği ile 72 adet doğal yapısı bozulmamış (her biri 3 tekerrürlü, silindir hacmi: 100 cm³) toprak örneği alınmıştır (Fotoğraf 2.12).



Fotoğraf 2.12 Toprak Örneklemesi Esnasından Bir Görünüm

Bu doğrultuda, orman yangını, yangın sonrası üretim faaliyetleri ve rehabilitasyon dönemlerinde toplamda 72 adet doğal yapısı bozulmuş toprak örneği (3 örnekleme dönemi x 24 nokta), 216 adet doğal yapısı bozulmamış toprak örneği (3 dönem x 3 tekerrür x 24 nokta) alınmıştır (Fotoğraf 2.13). Alınan bu toprak örnekleri, polietilen torbalara yerleştirilerek Batı Akdeniz Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'ne getirilmiştir (Fotoğraf 2.13). Toprak ve Ekoloji Laboratuvarı'nda yapılan analizler sonucunda, her bir örneğin fiziksel ve kimyasal özellikleri (hacim ağırlığı, toprağın pH değeri, elektriksel iletkenlik, organik karbon, toplam azot, fosfor, kalsiyum, magnezyum, potasyum, sodyum) detaylı bir şekilde incelenmiş ve yangın, üretim faaliyetleri ve rehabilitasyon süreçlerinin toprak üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



Fotoğraf 2.13 Doğal Yapısı Bozulmuş (a) ve Doğal Yapısı Bozulmamış (b) Toprak Örneklerine Ait Görseller

Doğal yapısı bozulmuş toprak örnekleri, üst toprağın ilk 5 cm’de kürek yardımıyla yamaçlardaki toprak katmanını yapısı bozularak alınan örnekleri temsil etmektedir. Toprak örnekleme esnasında toprağın ilk 5 cm’deki toprak katmanını bozularak dağınık bir yapıda el küreği yardımıyla alınmış ve poşetlenmiştir. Doğal yapısı bozulmuş toprak örnekleri, analiz için hazırlanırken ilk olarak 2 mm’lik eleklerden elenmiştir. Bu işlemin ardından, toprak örnekleri üzerinde çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Toprak reaksiyonu (pH) ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri, Thermo Orion Star marka masa tipi pH ve elektriksel iletkenlik problemleriyle ölçülmüştür (Thomas, 1996; Rhoades, 1996). Organik karbon, Walkley-Black metoduyla ve toplam azot ise Kjeldahl metoduyla belirlenmiştir. Fosfor konsantrasyonu, manuel spektrofotometrik (Thermo Genesys 10S Uv-Vis) metoduyla ölçülmüştür (Bray ve Kurtz, 1945). Kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonları, atomik absorpsiyon spektrofotometresi (ASS-Shimatsu AA6601F) ile ölçülürken, sodyum ve potasyum konsantrasyonları alev fotometresi (flame fotometre, Janway-FF200 marka) ile belirlenmiştir (Kacar, 1994). Ayrıca organik karbon ve toplam azot, yeni alınan (2025 yılı) CNS cihazı (Leco CNS928 marka) ile tekrar ölçülerek değerler test edilmiştir.

Doğal yapısı bozulmamış toprak örnekleme, üst toprağın ilk 5 cm'sine yamaçlardaki toprak yapısını bozmadan, 100 cm³'lük bir silindir yardımıyla karot şeklinde alınan toprak örneklerini temsil etmektedir. Doğal yapısı bozulmamış toprak örneklerinde ise 100 cm³ hacmindeki silindire alınan toprak örnekleri kullanılarak toprak hacim ağırlığı belirlenmiştir.

Üretim faaliyetleri (salvage logging) ve rehabilitasyon döneminde, sabit toprak örnekleme noktalarındaki üst toprak (0-5 cm derinlik) üzerinde infiltrasyon hızı (I) ve hidrolik iletkenlik (K_{sat}) mini disk infiltrometresiyle arazide ölçülmüştür (Fotoğraf 2.14). Üretim faaliyetleri döneminde infiltrasyon hızı (I) ve hidrolik iletkenlik değerleri (K_{sat}), rehabilitasyon yöntemleri uygulanmadan önce ve üretim faaliyetlerinin sonunda toprak örneklerinin alımı sırasında ölçülmüştür. Rehabilitasyon döneminde, sabit toprak örnekleme noktalarındaki infiltrasyon hızı (I) ve hidrolik iletkenlik (K_{sat}) ölçümleri, arazide uygulanan rehabilitasyon yöntemlerinden hemen sonra (2023 Mayıs) ve rehabilitasyon dönemi birinci yılında (2024 Mayıs) gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 2.14).



Fotoğraf 2.14 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) ve Rehabilitasyon Döneminde İnfiltrasyon Hızı ve Hidrolik İletkenlik Ölçümlerinden Bir Görünüm

Toprak nemi ve toprak sıcaklığı, rehabilitasyon döneminin birinci yılından itibaren (25.05.2023) her hafta ortalama olarak sabit toprak örnekleme noktalarında toprağın ilk 5 cm'sinde Spectrum-Fieldscout marka ve TDR-150 model cihazla ölçülmüştür (Fotoğraf 2.15).

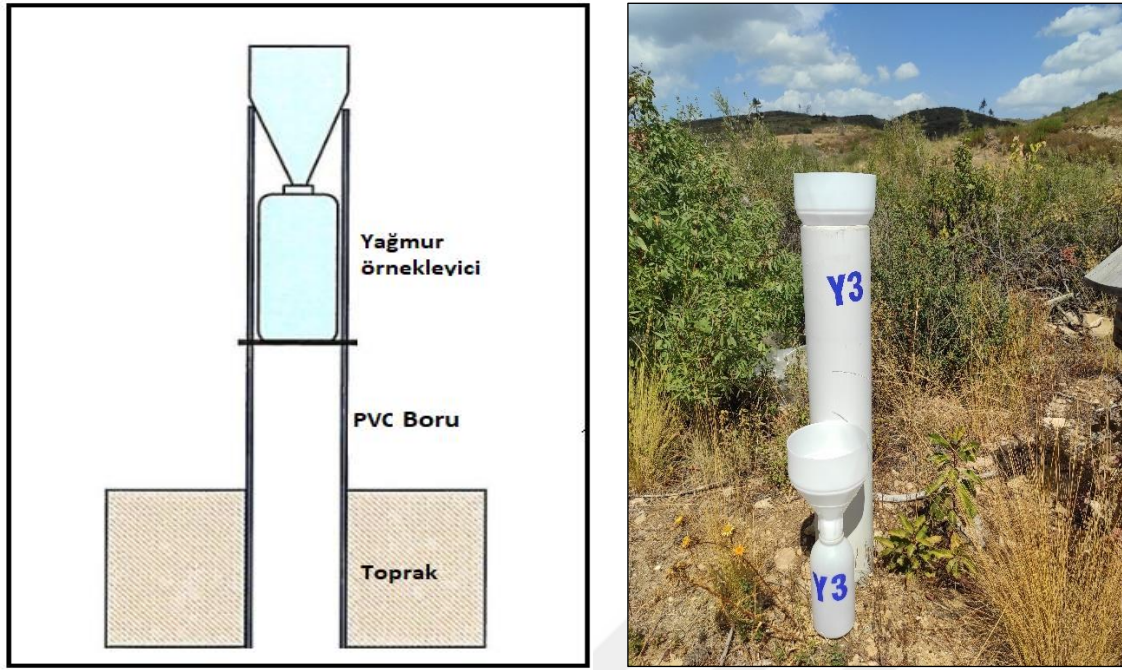
Toprak nemi ve toprak sıcaklığı ölçümleri, rehabilitasyon dönemi süresince, ikinci yıla kadar (29.03.2025) düzenli olarak devam etmiştir.



Fotoğraf 2.15 Rehabilitasyon Döneminde Sabit Örneklem Noktalarında Toprak Nemi ve Toprak Sıcaklığı Ölçümlerinden Bir Görünüm

2.3. Meteorolojik Parametrelerin Ölçülmesi

Bu çalışmada, toprak yüzeyine düşen yağış miktarının belirlenebilmesi için üretim faaliyetleri döneminden itibaren yangın geçirmiş olan havzalarda (Havza 1 (YADD-H1), Havza 2 (YADG-H2), Havza 3 (YAYG-H3)) ve yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında sabit toprak örneklem noktalarına toplamda 24 adet yağmur suyu örnekleyici kap yerleştirilmiştir (Fotoğraf 2.16). Bu 24 örneklem noktasına, her birine yaklaşık 1 metre toprağın üzerinde olacak şekilde 1,5 metrelik PVC borular yerleştirilmiştir. Örneklem dönemlerinde, havzalara düşen yağış miktarları ise boruların üst kısımlarına yerleştirilen yaklaşık 4000 ml hacmindeki yağmur suyu örnekleyici kaplarıyla ölçülmüştür (Fotoğraf 2.16).



Fotoğraf 2.16 Yağış Örnekleyici Kapların Şematik Çiziminden ve Arazideki Kurulumundan Bir Görünüm

Bu çalışmada, üretim faaliyetleri (salvage logging) ve rehabilitasyon dönemi boyunca her bir yağışlı dönemde havzalara düşen yağış miktarları ayrı olarak belirlenmiştir. Yağışlı olaylar sırasında, yağmur suyu örnekleyici kaplarında biriken yağış miktarları, her havza için ortalama değerler alınarak hesaplanmıştır. Üretim faaliyetleri döneminde ise yağış miktarları, yalnızca havzalardaki yağış örnekleyici kaplardan elde edilen verilerle belirlenmiştir (Fotoğraf 2.17). Bu dönemde hem yanmış sahaları hem de kontrol sahasını temsil eden otomatik meteoroloji istasyonu henüz kurulmamıştı, bu nedenle yağış ölçümleri sadece yerleştirilen yağmur suyu örnekleyici kapları aracılığıyla yapılmıştır.

$$\text{Yağış miktarı (mm)} = \text{Yağış kabında biriken su miktarı (ml)} * (\pi r^2) * 1000$$

Burada π bilindiği üzere sabit bir değer (3,14), r^2 , yağış kabının üzerinde yer alan huninin yarı çapının karesidir ($0,115^2$) ve son olarak 1000 değeri ise mm dönüşümüdür.



Fotoğraf 2.17 Havzalara Yerleştirilen Yağmur Suyu Örnekleyici Kaplardan Bir Görünüm

Rehabilitasyon döneminin birinci yılından itibaren (25.05.2023), yanmış alanı temsil eden (YADD-H1) ve yangın geçirmemiş kontrol sahasını temsil eden bir adet olmak üzere toplamda iki otomatik meteoroloji istasyonu kurulmuştur (Fotoğraf 2.18). Bu sayede, rehabilitasyon dönemi boyunca, birinci ve ikinci yıl boyunca yağış miktarları 30 dakikalık periyotlarla anlık olarak ölçülmüştür. Otomatik meteoroloji istasyonları tarafından ölçülen yağış verileri, her bir havzada 6 adet olmak üzere toplamda 24 farklı sabit örnekleme noktasındaki yağış kaplarında biriken yağış miktarlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, otomatik ölçüm sistemlerinin doğruluğunu değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

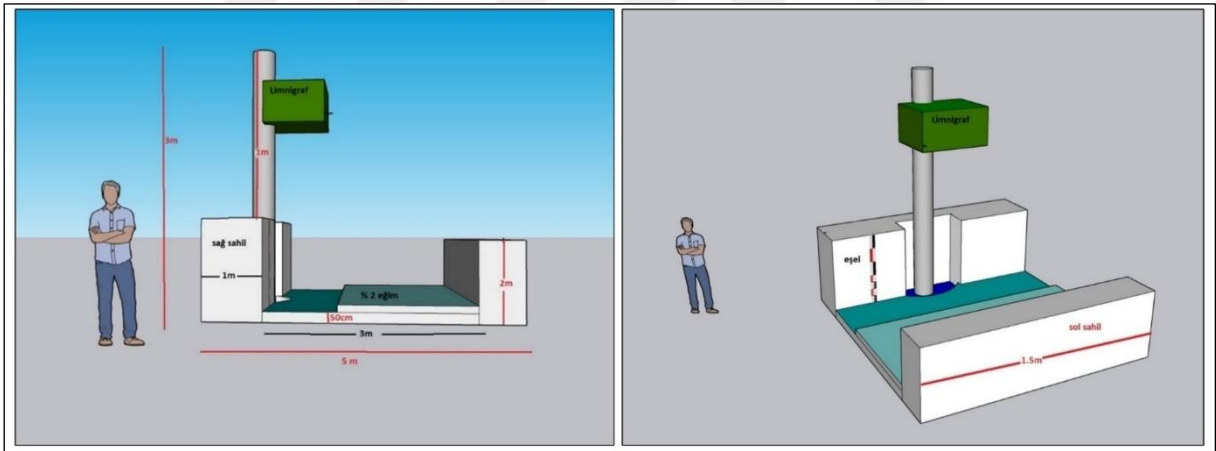


Fotoğraf 2.18 Doğal Haline Bırakılan Havzaya (a) ve Kontrol Sahasına (b) Kurulan Otomatik Meteoroloji İstasyonundan Bir Görünüm

2.4. Hidrolojik Parametrelerin Ölçülmesi

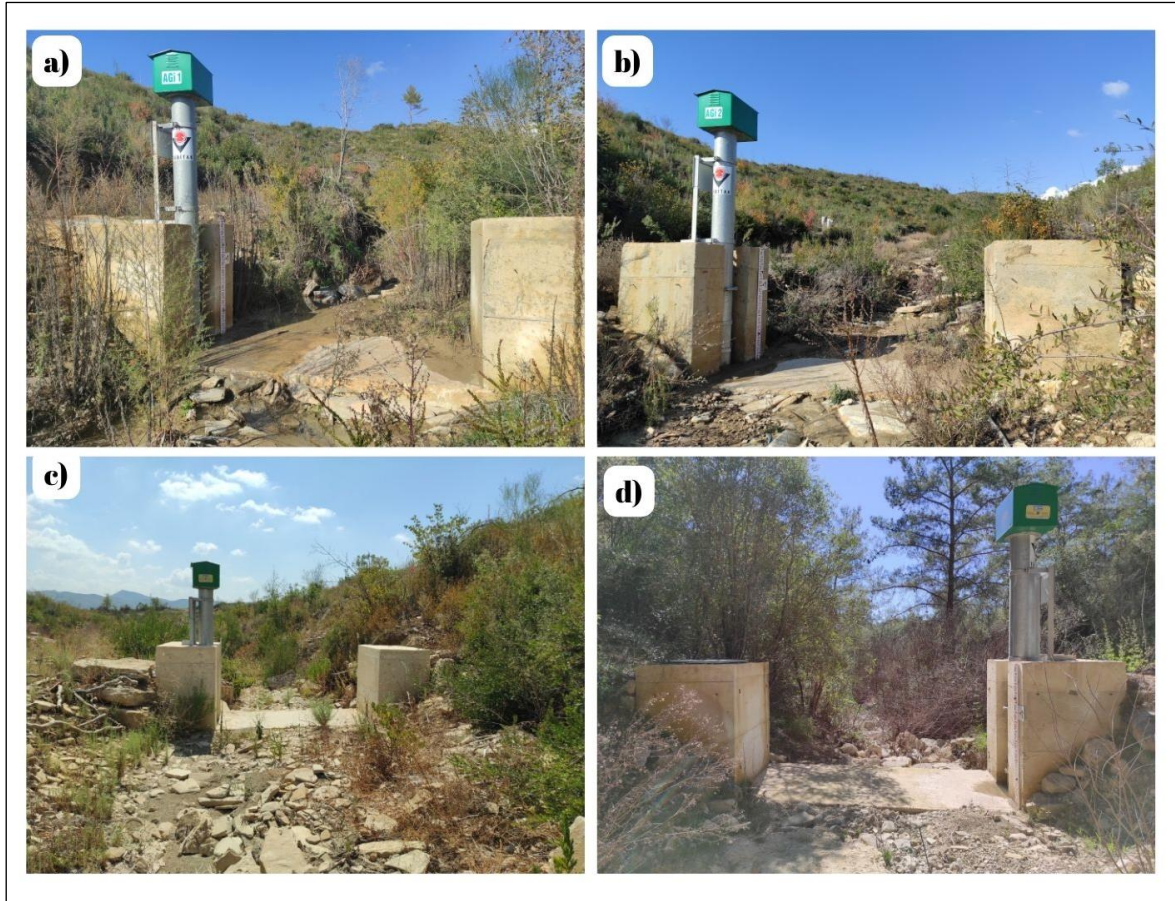
Bu çalışmada, rehabilitasyon döneminin birinci yılından itibaren (25.05.2023), yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile yangın geçirmemiş kontrol sahası olmak üzere toplamda dört adet Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) kurulmuştur. Arazi çalışmaları sırasında akarsuyun boyuna profili boyunca detaylı bir inceleme yapılmış olup, akarsuyun ağız kısmında yatak genişliğinin nispeten daha dar olduğu, mendereslenmeden uzak ve daha çok lineer akışa sahip olduğu, ayrıca akarsuyun bank stabilitesinin yüksek olabileceği noktalar tespit edilmiştir.

Ön arazi etütleri sırasında belirlenen bu noktalarda, nivelman ve mira yardımıyla akarsu enkesit genişlikleri ve akarsuyun bank yükseklikleri ölçülmüş ve Akım Gözlem İstasyonlarının (AGİ) boyutlandırılması yapılmıştır (Şekil 2.2). Bu istasyonlarda, akarsuyun enine kesitinin zamanla erozyon ve yüzeysel akış ile değişmemesi ve bank erozyonuna maruz kalmaması amacıyla, 3 metre genişliğinde betonarme savaklar inşa edilmiştir. Bu savaklar, akarsuyun yatak stabilitesinin korunmasına ve akım ölçümlerinin doğruluğunun sağlanmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 2.2 Akım Gözlem İstasyonlarının (AGİ) Boyutlandırılmasının Şematik Gösterimi

Havzalara kurulan dört adet Akım Gözlem İstasyonunda (AGİ), muhafaza kutuları içerisinde OEL marka şamandıralı elektronik limnigraf (veri kaydedici sistem/data logger) yerleştirilmiştir (Fotoğraf 2.19). Rehabilitasyon döneminin birinci yılından itibaren (25.05.2023), yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahasında bulunan bu şamandıralı elektronik limnigraf sayesinde, her 15 dakikada bir su seviyesi ölçülerek sürekli olarak kayıt altına alınmıştır (Fotoğraf 2.19). Bu ölçümler, akarsu debisi ve su seviyelerindeki değişiklikleri izleyebilmek için kullanılmış ve rehabilitasyon sürecinin etkilerini değerlendirirken önemli bir veri kaynağı oluşturmuştur.



Fotoğraf 2.19 Akım Gözlem İstasyonlarına (AGİ) Ait Görseller: (a) YADD-H1, (b) YADG-H2, (c) YAYG-H3, (d) Kontrol Sahası

Havzalarda, 15 dakikada bir ölçülen anlık su seviyesi verileri, her ay düzenli olarak akım gözlem istasyonlarından alınmıştır. Meteorolojik koşullara bağlı olarak her yağışlı dönemde, periyodik olarak akım gözlem istasyonlarına (AGİ) kurulan betonarme savak eşik kesitinde, suyun hızları Valeport Model 801 Flowmeter marka elektromanyetik muline cihazıyla ölçülmüştür. Bu cihaz, Faraday kanununa göre çalışan düz sensörlü elektromanyetik muline teknolojisini kullanarak, düşük akımlarda bile, yani su seviyesinin 1 cm olduğu durumlarda dahi su hızı ölçümü yapabilme imkânı sağlamaktadır.

Rehabilitasyon döneminin birinci ve ikinci yılında, yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahasında ayrı ayrı olarak, su seviyelerinin en düşük olduğu 1 cm'den en yüksek seviyelere kadar olan aralıkta su hızı ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler, akarsuyun hidrolojik özelliklerini izlemek ve rehabilitasyon faaliyetlerinin su akışına etkilerini değerlendirmek amacıyla kaydedilmiştir.



Fotoğraf 2. 20 Yağış Olayının Ardından Elektromanyetik Muline ile Su Hızı Ölçümünden Bir Görünüm

2.5. Sediman Taşınım Süreçlerinin Belirlenmesi

2.5.1. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Üretim faaliyetleri (salvage logging) ve rehabilitasyon dönemlerinde, her bir yağış döneminin ardından yüzeysel akış örnekleri, 1 litrelik propilen özellikte plastik numune kaplarıyla alınmış ve soğuk zincir yoluyla Antalya Batı Akdeniz Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Laboratuvarı'na iletilmiştir. Laboratuvara getirilen su örnekleri, ilk olarak 0,45 μm gözenek çapına sahip ISOLAB marka filtre kâğıdı kullanılarak süzölmüş ve ardından analize uygun hale getirilmiştir (Fotoğraf 2.21). Bu süreç, su örneklerinin kirleticilerden arındırılmasını ve daha hassas analizlerin yapılabilmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Fotoğraf 2.21 Yüzeysel Akış Örneklerinin Süzülmesi (Filtrasyon) Aşamasından Bir Görünüm

Analize hazır haline getirilen yüzeysel akış örneklerinde, hem üretim faaliyetleri (salvage logging) hem de rehabilitasyonun birinci ve ikinci yılında her yağışlı dönemin ardından alınan yüzeysel akış örneklerinde amonyum azotu ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrat azotu ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), ortofosfat fosforu ($\text{PO}_4\text{-P}$), magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), sodyum (Na), potasyum (K), kükürt (S), demir (Fe), manganez (Mn), çinko (Zn) ve bakır (Cu) konsantrasyonları belirlenmiştir (Tablo 2.4).

Tablo 2.4 Yüzeysel Akış Örneklerinde Belirlenen Parametreler ve Analiz Metotları

Parametre	Analiz Metodu	Standart No
Amonyum Azotu ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	Manuel Spektrofotometrik Metot	TS 7159 (ISO 7150-1)
Nitrat Azotu ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	Nitrat Azotu Spektrofotometrik Tespiti	TS EN ISO 13395
Ortofosfat Fosforu ($\text{PO}_4\text{-P}$)	Kalay II klorür metodu (Spektrofotometrik)	TS 7889
Magnezyum (Mg)	Atomik Absorbsiyon (AAS)	ISO 7980
Kalsiyum (Ca)		
Sodyum (Na)	Alev Fotometresi Metodu	Standart Metot 3500-Na B
Potasyum (K)		
Kükürt (S)	ICP-OES Metodu	
Demir (Fe)		
Manganez (Mn)		
Çinko (Zn)		
Bakır (Cu)		

Çalışma süresi boyunca alınan yüzeysel akış örneklerinin laboratuvara taşınması ve saklanması sırasında soğuk zincir kullanımı büyük önem taşımaktadır ($+4^\circ\text{C}$ 'de saklanması gerekmektedir) (Fotoğraf 2.22). Alınan su örneklerinde amonyum azotu ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrat azotu ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), ortofosfat fosforu ($\text{PO}_4\text{-P}$) konsantrasyonu spektrofotometrik yöntemle (Fotoğraf 2.22), sodyum (Na) ve potasyum (K) alev (flame) fotometresi metoduyla, kalsiyum (Ca) ve

magnezyum (Mg) atomik absorpsiyon (AAS) yöntemiyle ve son olarak kükürt (S), demir (Fe), manganez (Mn) ve çinko (Zn) ise ICP-OES yöntemiyle belirlenmiştir.



Fotoğraf 2.22 Yüzeysel Akış Örneklerinin Saklanma Koşullarından ve Spektrofotometrik Analiz Aşamasından Bir Görünüm

2.5.2. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Süspanse Sediman (Askıda Katı Madde, AKM) Konsantrasyonun Belirlenmesi

Bu çalışmada üretim faaliyetleri (salvage logging) ve rehabilitasyon dönemi boyunca her bir yağışlı örnekleme döneminde yüzeysel akış suyunda süspanse sediman (askıda katı madde, AKM) konsantrasyonları belirlenmiştir. Süspanse sediman konsantrasyonları, süzme ve buharlaştırma yöntemi ile tayin edilmiştir (TS EN 872). Bu analiz sırasında 47 mm filtre çapına ve 0,45 μm gözenek çapına sahip filtre kağıtları kullanılmıştır. İlk olarak boş filtre kağıtları, 105 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ayarlanmış olan etüvde 1 saat kadar kurutulmuş ve ardından çıkartılarak boş ağırlıkları oda sıcaklığına geldiğinde tartılmıştır (Fotoğraf 2.23). Vakum pompasından oluşan filtrasyon düzeneği yardımıyla 0,1 litre örnek hacminde yüzeysel akış suyu, sırasında 47 mm filtre çapına ve 0,45 μm gözenek çapına sahip filtre kağıtlarından süzölmüştür. Filtre kağıdının üzerinde kalan süspanse sediman filtre kağıdıyla beraber 1 saat 105 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ayarlanmış olan etüvde 1 saat kadar kurutulmuştur (Fotoğraf 2.23). Son olarak oda sıcaklığına gelince tartılarak süspanse sediman konsantrasyonları belirlenmiştir.



Fotoğraf 2.23 Yüzeysel Akış Örneklerinde Süspanse Sediman Konsantrasyonun Belirlenmesi Aşamasından (Filtrasyon, Kurutma ve Tartma) Bir Görünüm

2.5.3. Yatak Yükü Taşınımı

2.5.3.1. Sediman Tuzaklarının Kurulumu

Akarsularda taşınan kum, çakıl ve blok boyutundaki iri malzemeler, akarsuyun yatak yükünü oluşturur (Knighton, 1998). Akarsuyun taşıdığı sedimanların tane boyutu, akarsuyun akış hızı, yüzeysel akış miktarı ve diğer hidrolojik özellikleri, akarsuyun sediman taşınım süreçleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Petts, 1983). Akarsu yatağında taşınan sedimanların büyük bir kısmı, havzada meydana gelen parmak (rill) ve oyuntu (gully) erozyonu sonucunda akarsu yatağına ulaşır. Ayrıca, akarsu bankalarının veya yatağının korrozyon ve korrazyon süreçleri nedeniyle erozyona uğramasıyla taşınan malzemeler de bu sürece dahil olur. Literatürde genellikle akarsularda taşınan sedimanın %80-90'ının süspanse sediman (askıda katı madde, AKM) olduğu kabul edilse de yatak yükünün sediman taşınım süreçlerinin belirlenmesindeki rolü büyük önem taşımaktadır (Meade ve Stevens, 1990).

Akarsularda yatak yükünün örneklenmesi için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında sediman karot alımı, shovel metodu, Gerlach yöntemi ve Helley-Smith yöntemi gibi akarsu yatağına gömülen veya yatağın yüzeyine sabitlenen sediman tuzakları yer almaktadır (Hedrick vd., 2013). Bu çalışmada, yatak yükü örneklemede hem akarsu yatağının yüzeyine

sabitlenen hem de akarsu yatağına gömülen sediman tuzakları kullanılmıştır. Bu tuzaklar, düşük (baseflow) ve yüksek akımlar esnasında taşınan, iri boyutlardaki (kum, çakıl, blok) malzemelerin örneklenmesini sağlamıştır.

Akarsu yatağının yüzeyine sabitlenen sediman tuzakları, 60 cm uzunluk, 50 cm genişlik, 25 cm yükseklik ve 0.5 mm gözenek çapına sahip galvanizli kalın sacdan yapılmıştır (Fotoğraf 2.24). Bu tuzakların, bitki besin maddesi konsantrasyonları analiz edileceği için uzun süre su içerisinde kalabilmesi, paslanmaması ve farklı sıcaklık ile nem koşullarına dayanıklı olması gereklidir. Tuzağın alt kısmı, sağ ve sol kenarları kapalı olacak şekilde, akarsuyun akış yönündeki kısmı ise taşınan malzemenin tuzak içerisine girmesini sağlayacak şekilde açık bırakılmıştır. Akış halindeki suyun tuzak içerisinde göllenmesini önlemek ve sadece yatak yükünün birikmesini sağlamak amacıyla tuzakların arka kısmına delikli bir elek yerleştirilmiştir. Bu sediman tuzakları, yangın geçirmiş üç havzada ve kontrol sahasında bulunan akarsu yataklarına birer adet olmak üzere toplamda 4 adet yerleştirilmiştir (Fotoğraf 2.24). Bu tuzaklardan yalnızca, taşınan bitki besin maddesi konsantrasyonlarının belirlenebilmesi için yatak yükü örnekleri alınmıştır.



Fotoğraf 2.24 Akarsu Yatağının Yüzeyine Yerleştirilen Sediman Tuzaklarından Bir Görünüm

Akarsu yatağında taşınan yatak yükünü temsil edebilmesi için sediman tuzaklarının akarsuyun en kesit genişliğinin yaklaşık %20 ile %40'ını kapatacak şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir (Yang ve Gao, 1998). Bu bağlamda, üretim faaliyetleri döneminden itibaren yangın geçirmiş havzalarda yer alan akarsuyun ağız kısmına, akarsu yatağına gömülü olarak 3'er adet, kontrol sahasında ise 2 adet sediman tuzağı yerleştirilmiştir (Fotoğraf 2.25). Bu düzenlemeye göre, yangın geçirmiş havzalarda sediman tuzağının yerleştirildiği akarsuyun yatak genişliği 3 metre, kontrol sahasında ise yatak genişliği 2 metredir.

Akarsu yatağının içerisine kazılarak yerleştirilen sediman tuzakları, 50 cm genişliğinde, 50 cm uzunluğunda ve 40 cm derinliğindedir. Yatak yükünün tuzak içerisinden çıkarılabilmesi amacıyla, tuzakların içerisine propilen özellikte poşetler yerleştirilmiştir. Sediman tuzaklarının her biri, tamamen yatak yüküyle dolduğunda ortalama olarak 70 kg malzeme depolamaktadır (Fotoğraf 2.25). Ancak, taşınan yatak yükünün tane boyutu özelliklerine bağlı olarak bu miktar değişiklik göstermektedir.

Üretim faaliyetleri döneminde (salvage logging) ve rehabilitasyonun birinci ve ikinci yılında, her yağışlı örnekleme döneminde sediman tuzakları düzenli olarak kontrol edilmiştir (Fotoğraf 2.25). Her bir havzada yer alan tuzaklardaki yatak yükü miktarları ise ayrı ayrı el kantarıyla tartılmış ve ağırlıkları, ilgili ölçüm karnelerine kaydedilmiştir. Bu süreç, her havzadaki yatak yükü taşınımının izlenmesini ve değerlendirilmesini sağlamıştır.

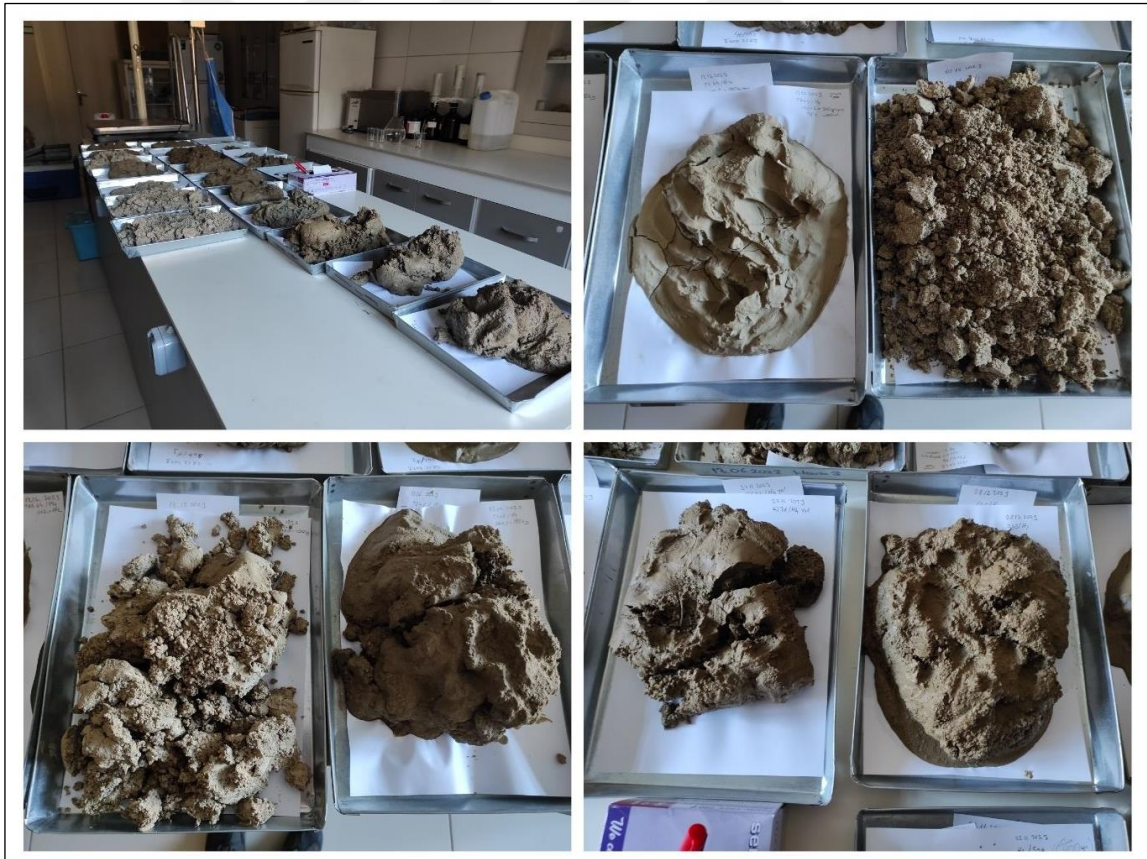


Fotoğraf 2.25 Akarsu Yatağına Gömülü Olarak Yerleştirilen Sediman Tuzaklarından Bir Görünüm

2.5.3.2. Tane Boyutu Analizi

Bu çalışmada, üretim faaliyetleri dönemi (01.10.2022-25.05.2023), rehabilitasyonun birinci yılı (25.05.2023-31.05.2024) ve ikinci yılı (01.06.2024-29.03.2025) boyunca, yangın geçirmiş havzalarda (Havza 1 (YADD-H1), Havza 2 (YADG-H2), Havza 3 (YAYG-H3)) ve kontrol sahasında her bir yağışın ardından sediman tuzaklarındaki sediman miktarları belirlenmiştir. Yağışın ardından yapılan her bir arazi çalışması sırasında, havzaların akarsu yataklarında üçer adet bulunan sediman tuzaklarında biriken sediman miktarları ayrı ayrı el kantarıyla tartılmış ve sediman örnekleme yapılmıştır.

Her yağış olayından sonra sediman tuzaklarından alınan sediman örnekleri, Batı Akdeniz Ormancılık Araştırma Enstitüsü, Toprak ve Ekoloji Laboratuvarı'na getirilmiştir. Bu örnekler, 105 °C sıcaklığa ayarlanmış etüvde kurutularak toplam yatak yükü ağırlıkları belirlenmiştir (Fotoğraf 2.26). Bu işlemler, akarsuyun taşıdığı yatak yükünün zamana bağlı olarak değişimini takip etmeye ve rehabilitasyon sürecindeki etkilerini incelemeye olanak tanımaktadır.



Fotoğraf 2.26 Yağış Olaylarının Ardından Sediman Tuzaklarından Alınan Sedimanlardan (Kurutulmuş hali) Bir Görünüm

Bu çalışmada, akarsularda taşınan yatak yükü örneklerinin tane boyutu sınıflandırması için Wentworth tane boyutu skalası kullanılmıştır (Wentworth, 1922). Yatak yükü örneklerinin ağırlıkları belirlendikten sonra, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm ve 64 mm gözenek çapına sahip

eleklerle eleme işlemi yapılmıştır (Fotoğraf 2.27). Eleme işlemi sırasında, her bir gözenek çapına sahip eleklerin üzerinde biriken sedimanlar tartılmış ve ağırlıkları ilgili ölçüm karnelerine kaydedilmiştir (Ryan vd., 2005).

Bu eleme işlemi ile yatak yükü miktarları, farklı tane boyutlarına göre sınıflandırılmıştır (Fotoğraf 2.27). Bu sınıflandırma, iri taneli kumdan daha ince ($<0,5$ mm) olan materyaller (orta, ince kum, silt ve kil), iri taneli kum (0,5 mm-1 mm), çok iri taneli kum (1 mm- 2 mm) çok küçük çakıl (2 mm- 4 mm), ince çakıl (4 mm – 64 mm) ve kaba çakıl ve blok (>64 mm) olmak üzere daha iri tane boyutlarına sahip materyaller olarak yapılmıştır. Bu yöntem, akarsuyun taşıdığı sedimanların dağılımını ve taşınım süreçlerini incelemeye yardımcı olmaktadır.

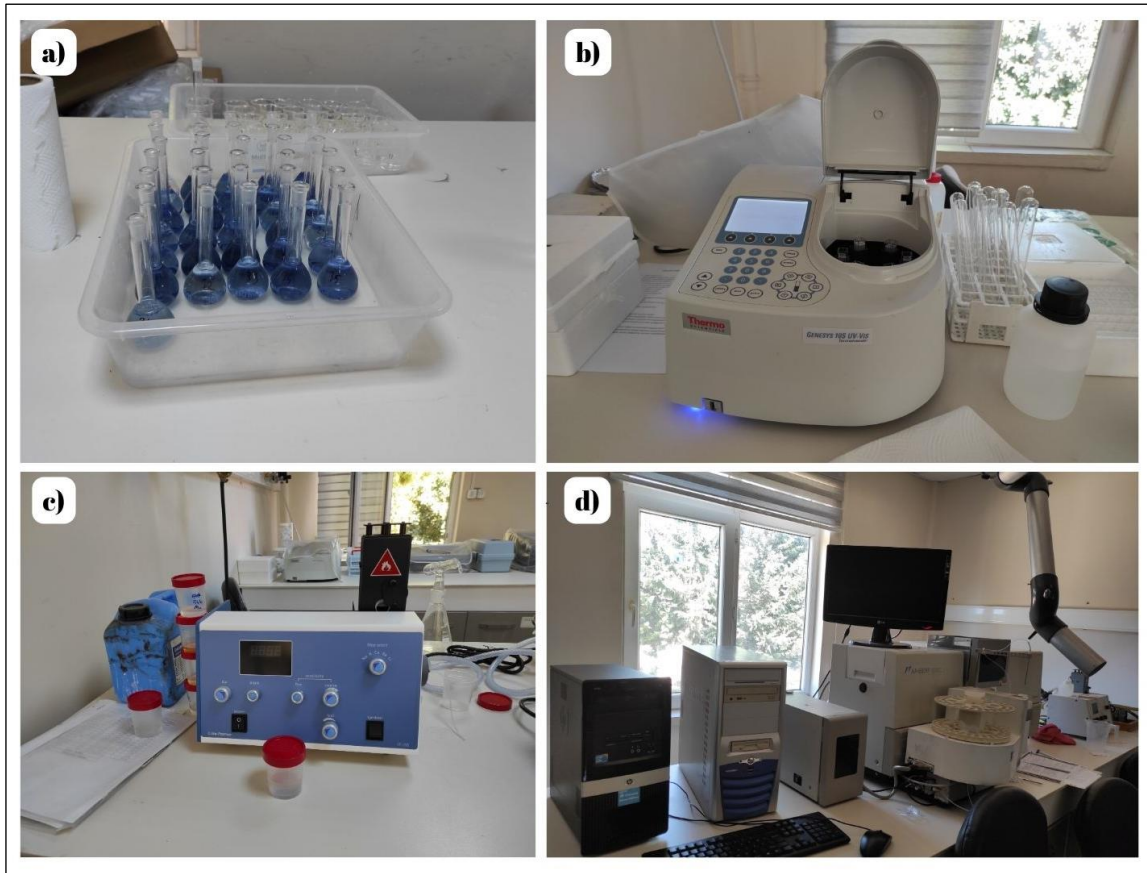


Fotoğraf 2.27 Alınan Sediman Örneklerinin Tane Boyutu Analizi Aşamasından Bir Görünüm

2.5.3.3. Sediman İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Üretim faaliyetleri döneminde, rehabilitasyon döneminin birinci ve ikinci yılında her bir yağışlı olay döneminde ayrı olarak alınan sediman örnekleri ilk olarak altı farklı tane boyutuna göre (>64 mm, 4-2 mm, 2-1 mm, 1-0,5 mm ve $<0,5$ mm) elenmiştir. Buna göre 2 mm gözenek çapına sahip eleğin altında kalan 1 mm, 0,5 mm ve $<0,5$ mm tane boyutuna sahip toplam sediman içerisindeki bitki besin maddesi konsantrasyonları belirlenmiştir. Sediman içerisindeki bitki besin konsantrasyonunu belirlemek için kullanılan yöntemler toprak analizlerindeki

yöntemlerle aynıdır. Buna göre sediman içerisindeki organik karbon Walkley-Black metodu ve toplam azot ise Kjeldahl metodu ile belirlenmiştir. Ayrıca organik karbon ve toplam azot, 2025 yılında yeni alınan CNS cihazıyla (Leco CNS928 marka) tekrarlanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fosfor konsantrasyonu manuel spektrofotometrik (Thermo Genesys 10S Uv-Vis) metoduyla ölçülmüştür (Bray ve Kurtz, 1945) (Fotoğraf 2.28). Kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonu atomik absorpsiyon (ASS-Shimatsu AA6601F), sodyum ve potasyum konsantrasyonu ise alev fotometresi (flame fotometre) (Janway-FF200 marka) metodu ile ölçülmüştür (Kacar, 1994) (Fotoğraf 2.28).



Fotoğraf 2.28 Laboratuvar Ortamında Analiz Aşamasından Görseller; (a) Fosfor Tayini, (b) Spektrofotometrik Analiz Aşaması, (c) Alev Fotometresi Ölçümü, (d) Atomik Absorpsiyon Cihazı Analizi

2.6. Yüzeysel Akış Suyundaki Su Kalitesi Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, üretim faaliyetleri dönemi ve rehabilitasyonun birinci ile ikinci yılında, yangın geçirmiş üç havza ile kontrol sahasında yer alan akarsuların tamamı, sürekli akışı olmayan geçici akarsu özelliği göstermektedir. Kış aylarının belirli dönemleri dışında (Aralık, Ocak ve Şubat), sonbahar, ilkbahar ve yaz aylarında bu akarsular sadece yağış esnasında yüzeysel akış oluşturmaktadır ve ardından akarsu yatakları tamamen kurumaktadır. Bu durum, her yağışlı olay döneminin ardından yapılan arazi çalışmalarında yüzeysel akış suyu örneklemesini engellemektedir.

Bu sorunu aşabilmek için hem üretim faaliyetleri döneminde hem de rehabilitasyon döneminde, yüzeysel akış örneklemesinin yapılabilmesi amacıyla akarsuların yatağına 5 litre hacmine sahip yüzeysel akış örnekleme kapları yerleştirilmiştir (Fotoğraf 2.29). Bu kaplar, havzaların tamamındaki geçici akarsuların ağız kısımlarına yerleştirilmiştir. Yatak yükü malzemesinin birikmemesi için, yüzeysel akışın giriş yaptığı bölüme 0,5 mm'den daha ince gözenek çapına sahip tel elekler dahil edilmiştir. Bu düzenek sayesinde, her yağış döneminin ardından yapılan arazi çalışmasında, akarsu yatağında halihazırda yüzeysel akış olmasa dahi, yağışlı dönemlerdeki yüzeysel akışı temsil eden su örnekleri bu örnekleme kaplarında depolanmıştır (Fotoğraf 2.29). Bu yöntem, geçici akarsularda bile yüzeysel akışın analiz edilebilmesine olanak sağlamaktadır.



Fotoğraf 2.29 Akarsu Yatağına Yerleştirilen Yüzeysel Akış Örnekleme Kapları

Üretim faaliyetleri döneminde (Havza 1, Havza 2, Havza 3 ve kontrol sahası), rehabilitasyonun birinci ve ikinci yılında (YADD-H1, YADG-H2, YAYG-H3 ve kontrol sahası) her bir yağışlı dönemin ardından yapılan arazi çalışmaları esnasında yüzeysel akış örneklerinde çözülmüş oksijen (ÇO, %), pH, elektriksel iletkenlik (EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$), su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), toplam çözülmüş sediman (TDS, mg/l), tuzluluk (‰) ve oksidasyon indirgeme potansiyeli (ORP, Mv) değerleri Hack Lange marka portatif çözülmüş oksijen, oksidasyon indirgeme potansiyeli, elektriksel iletkenlik ve pH problemleriyle ölçülmüştür. Bu ölçümler her bir

örnekleme döneminde arazide sürekli olarak tekrarlanmış ve su kalitesi parametresi değerleri ise ilgili ölçüm kartlarına işlenmiştir.

2.7. İstatistiksel Analizler

Bu çalışmada, üretim faaliyetleri döneminde (01.10.2022–25.05.2023) 9, rehabilitasyonun birinci yılında (25.05.2023–31.05.2024) 16 ve ikinci yılında (01.06.2024–29.03.2025) 12 yağışlı olay sırasında toplanan veriler kullanılarak, taşınan sediman miktarları, sedimanın tane boyutu dağılımı, sediman içerisindeki bitki besin maddelerinin konsantrasyonları ve miktarları ile su kalitesi parametreleri havzalar arasında istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Sediman miktarları ve tane boyutları ile rehabilitasyon sürecinde (birinci ve ikinci yıl) ölçülen yüzeysel akış verileri, Shapiro-Wilk testi sonuçlarına göre normal dağılım göstermemiştir ve Levene's testi sonuçlarına göre varyansların homojen olmadığı belirlenmiştir ($p < 0,05$). Bu nedenle, yüzeysel akış, sediman miktarı ve tane boyutuna ilişkin havzalar arası farkların belirlenmesinde parametrik olmayan Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır. Anlamlı fark gözlenen durumlarda, bu farkın hangi havzadan kaynaklandığını ortaya koymak amacıyla non-parametrik çoklu karşılaştırma testi olan Dunnett's testi kullanılmıştır.

Üretim faaliyetleri ve rehabilitasyonun birinci yılına ait sediman ve su içerisindeki bitki besin maddesi konsantrasyonları ile miktarları da normal dağılım göstermemiştir (Shapiro-Wilk testi, $p < 0,05$). Bu değişkenler için de havzalar arasındaki farkların analizinde Kruskal-Wallis testi tercih edilmiş ve anlamlı fark saptanan durumlarda yine Dunnett's testi ile çoklu karşılaştırmalar yapılmıştır.

Su kalitesi parametrelerinden oksidasyon indirgeme potansiyeli (ORP) üretim faaliyetleri döneminde, pH ise rehabilitasyonun birinci yılında normal dağılım göstermiş ($p > 0,05$) ve Levene's testi sonuçlarına göre bu parametreler için varyansların eşit olduğu belirlenmiştir. Bu iki parametreye ilişkin havzalar arası karşılaştırmalarda varyans analizi (ANOVA) uygulanmış ve farkın hangi havzadan kaynaklandığını belirlemek amacıyla Tukey testi kullanılmıştır.

Rehabilitasyonun ikinci yılında, sediman içerisindeki magnezyum, sodyum ve demir konsantrasyonları ile su kalitesi parametrelerinden çözünmüş oksijen ve oksidasyon indirgeme potansiyeli normal dağılım göstermiştir (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$). Aynı dönemde, sediman içerisindeki fosfor ve manganez konsantrasyonları ile su içerisindeki ortofosfat fosforu konsantrasyonu ve sediman içerisindeki manganez dışındaki tüm besin maddeleri, ayrıca su kalitesi parametrelerinden oksidasyon indirgeme potansiyeli, sıcaklık ve bulanıklık değerleri

log10 dönüşümü sonrası normal dağılım özelliği kazanmıştır. Bunun dışında kalan tüm değişkenlerin dağılımları normal değildir ($p < 0,05$).

Yangın, üretim ve rehabilitasyon dönemlerinde alınan toprak örneklerine ilişkin tüm verilerin normal dağılım gösterdiği tespit edilmiştir ($p > 0,05$). Bu veriler için havzalar arası farkların analizinde varyans analizi (ANOVA), anlamlı farkın kaynağını belirlemek amacıyla ise Tukey testi uygulanmıştır ($p < 0,05$).

Çalışma kapsamında yürütülen tüm istatistiksel analizler IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (IBM Corp., 2015). Elde edilen istatistiksel bulgular, çalışmanın sonuçlar bölümünde tablo ve grafiklerle sunulmuş, farklı harflerle yapılan gösterimler ile istatistiksel farklılıklar belirtilmiştir. Aynı harf ile gösterilen havzalar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmazken, farklı harflerle gösterilen havzalar arasında anlamlı fark olduğu ifade edilmektedir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMANIN BULGULARI

3.1. Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bu çalışma, orman yangını, üretim faaliyetleri ve rehabilitasyon dönemlerinin toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, orman yangını döneminde, üretim faaliyetleri döneminde ve rehabilitasyon döneminin birinci yılında, yüzeyden (0-5 cm derinlik) alınan toprak örneklerinde çeşitli fiziksel ve kimyasal parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler arasında hacim ağırlığı (HA, g/cm³), toprak reaksiyonu (pH), elektriksel iletkenlik (EC, dS/m), toplam organik karbon (TOC, %), toplam azot (TN, %), fosfor (P, mg/kg), kalsiyum (Ca, mg/kg), magnezyum (Mg, mg/kg), sodyum (Na, mg/kg) ve potasyum (K, mg/kg) yer almaktadır (Tablo 3.1).

Bu çalışma, benzer fiziki coğrafya özelliklerine sahip üç havzayı (Havza 1, Havza 2 ve Havza 3) incelemiştir. Bu havzalarda, hem orman yangını aynı anda meydana gelmiş hem de yangın sonrasında üretim faaliyetleri eş zamanlı olarak yapılmıştır. Bu nedenle, yangın dönemi ve üretim faaliyetleri dönemi boyunca Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te belirlenen toprak özelliklerinin ortalaması alınmış ve bu veriler, yangın geçirmemiş kontrol sahasıyla karşılaştırılmıştır.

Rehabilitasyon dönemi ise yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri yapılmış olan bu üç havzada farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulanmasıyla devam etmiştir. Bu nedenle, rehabilitasyon döneminde her bir havza için (yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3)) toprak özellikleri ayrı olarak değerlendirilmiş ve bu toprak özellikleri, havzalar arasında karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada orman yangının toprak üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için ilk toprak örnekleri 2021 yılının Temmuz ayında çıkan orman yangının hemen ardından (Eylül 2021) alınmıştır. Bu dönemde orman yangını toprakta ölçülen birçok parametreyi önemli oranda değiştirmiştir. Orman yangını üst topraktaki fosfor, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum konsantrasyonu ile hacim ağırlığı, elektriksel iletkenlik ve pH değerlerini arttırmıştır. Özellikle yangın sahasında ölçülen hacim ağırlığı, pH değerleri ile fosfor ve sodyum konsantrasyonu istatistiksel açıdan yangın geçirmemiş olan kontrol sahasından farklıdır ($p < 0,05$). Yangın geçirmiş üst topraktaki hacim ağırlığı 1,15 g/cm³, pH değeri 7,72, elektriksel iletkenlik ise 0,964 dS/m olarak ölçülürken, kontrol sahasında ölçülen hacim ağırlığı 0,96 g/cm³, pH değeri 7,38 ve elektriksel iletkenlik ise 0,332 dS/m'dir (Tablo 3.1). Orman yangını bitki besin maddeleri arasında en çok fosfor ve sodyum konsantrasyonunu

etkilemiştir. Orman yangını üst topraktaki fosfor konsantrasyonunu 2,1 kat, sodyum konsantrasyonunu ise yaklaşık olarak 1,4 kat arttırmıştır. Buna karşılık yangın üst topraktaki kalsiyum, magnezyum ve potasyum konsantrasyonunu arttırmasına rağmen, yangın sahası ile yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında ölçülen kalsiyum magnezyum ve potasyum konsantrasyonları istatistiksel olarak birbirine benzerdir ($p>0,05$). Orman yangını genel olarak üst topraktaki birçok bitki besin maddesi konsantrasyonunu arttırmıştır. Ancak orman yangını sadece toplam organik karbon ve toplam azot değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Nitekim yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında toplam organik karbon ve toplam azot değerleri sırasıyla %5,47 ve %0,47 olarak ölçülürken, orman yangını sonrasında toplam organik karbon ve toplam azot sırasıyla %4,17 ve %0,36 seviyesine düşmüştür. Kontrol sahası ile yangın sahasında ölçülen toplam organik karbon ve toplam azot değerleri istatistiksel açıdan da farklıdır ($p<0,05$) (Tablo 3.1).

Üretim faaliyetleri (salvage logging) döneminde, yangın dönemine kıyasla tüm toprak parametrelerinde azalmalar gözlemlenmiştir, sadece hacim ağırlığı değerinde bir artış olmuştur. Elektriksel iletkenlik, toplam organik karbon, toplam azot, fosfor, sodyum ve potasyum konsantrasyonlarında, yangın dönemi ile üretim faaliyetleri dönemi arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır ($p<0,05$). Üretim faaliyetleri döneminde ölçülen elektriksel iletkenlik 0,452 dS/m, toplam organik karbon %3,35, toplam azot %0,30, fosfor konsantrasyonu 8,19 mg/kg, sodyum konsantrasyonu 661,1 mg/kg ve potasyum konsantrasyonu ise 356,6 mg/kg değerine düşmüştür. Bunun dışında pH değeri (7,64), kalsiyum konsantrasyonu (11.156 mg/kg) ve magnezyum konsantrasyonu (267,8 mg/kg) yangın dönemine göre azalmasına rağmen, yangın dönemi ile üretim faaliyetleri dönemi arasında pH, kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamıştır ($p<0,05$) (Tablo 3.1). Ayrıca, üretim faaliyetleri döneminde ölçülen pH, elektriksel iletkenlik ve fosfor değerleri, yangın dönemine göre azalmasına rağmen kontrol sahasından hala daha yüksek seviyelerde olmuştur. Diğer taraftan, üretim faaliyetleri döneminde kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum konsantrasyonları yangın dönemine göre azalmış ve kontrol sahasından daha düşük seviyelere inmiştir. Toplam organik karbon ve toplam azot ise yangın döneminde kontrol sahasından düşük seviyelerde olduğu için, üretim faaliyetleri döneminde daha da azalmış ve kontrol sahasına göre çok daha düşük seviyelere gerilemiştir.

Üretim faaliyetleri (salvage logging) dönemi, yangın dönemine kıyasla sadece üst toprağın hacim ağırlığında artışa neden olmuştur. Yangın döneminde üst toprağın hacim ağırlığı 1,15 g/cm³ iken, üretim faaliyetleri dönemi sonunda bu değer 1,19 g/cm³ olarak ölçülmüştür.

Ancak, yangın dönemi ile üretim faaliyetleri dönemi arasındaki hacim ağırlığı farkı istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p < 0,05$) (Tablo 3.1).

Rehabilitasyon dönemi birinci yılında, yangın sonrası farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanan üç havza için toprak örnekleri 2024 yılının Mayıs ayında alınmıştır. Bu dönemde, yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) ve yangın geçirmemiş olan kontrol havzalarından alınan örneklerde pH ve elektriksel iletkenlik değeri ile kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonu bakımından istatistiksel fark gözlemlenmemiştir ($p > 0,05$). Üç havzada ölçülen pH ve elektriksel iletkenlik değerleri hem kontrol sahasından daha yüksek hem de kontrol sahasıyla istatistiksel olarak farklıdır ($p < 0,05$) (Tablo 3.1).

Toplam organik karbon, toplam azot, fosfor, sodyum ve potasyum konsantrasyonu açısından havzalar arasında daha belirgin farklar gözlemlenmiştir. Tüm bu parametreler, farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanan üç havzada kontrol sahasından daha düşük seviyelerde bulunmuştur. Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) arasında, toplam organik karbon, toplam azot, fosfor, sodyum ve potasyum konsantrasyonları bakımından anlamlı farklar vardır ($p < 0,05$) (Tablo 3.1).

Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1), toplam organik karbon ve toplam azot değerleri sırasıyla %3,38 ve %0,28, %3,20 ve %0,25 olarak ölçülürken, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) bu değerler sırasıyla %1,96 ve %0,17 olarak belirlenmiştir. Fosfor, sodyum ve potasyum konsantrasyonları, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) sırasıyla 6,63 mg/kg, 585 mg/kg ve 356,6 mg/kg ile 5,65 mg/kg, 521,6 mg/kg ve 321,3 mg/kg olarak ölçülürken, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise sırasıyla 2,89 mg/kg, 403,3 mg/kg ve 220,6 mg/kg olarak belirlenmiştir (Tablo 3.1). Fosfor konsantrasyonu, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) kontrol sahasından düşük olmasına rağmen, her iki havza da kontrol sahasıyla benzer fosfor konsantrasyonu göstermiştir ($p > 0,05$). Bunun aksine, sodyum konsantrasyonu bakımından ise sadece yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) kontrol sahasıyla istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p > 0,05$) (Tablo 3.1).

Bu dönemde hacim ağırlığı en yüksek olan havza, yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) olup $1,08 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) hacim ağırlığı $1,01 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Bu iki havzada ölçülen hacim ağırlığı istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuş ($p > 0,05$) ve her iki havza

da hem yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzadan (YAYG-H3) hem de kontrol sahasından daha yüksek hacim ağırlığına sahiptir (Tablo 3.1). Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise hacim ağırlığı $0,90 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüş ve kontrol sahasından daha düşüktür ($0,96 \text{ g/cm}^3$). Hacim ağırlığı açısından, yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) ile yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) arasında istatistiksel fark bulunmamış ($p>0,05$), ancak bu iki havza yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzadan (YAYG-H3) farklıdır ($p<0,05$). Ayrıca sadece yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) istatistiksel olarak kontrol sahasıyla benzerlik göstermiştir ($p>0,05$) (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 Orman Yangını, Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) ve Rehabilitasyon Dönemine Ait Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Toprak Özellikleri	Rehabilitasyon Dönemi					
	Yangın D.	SL. Dönemi	YADD-H1	YADG-H2	YAYG-H3	Kontrol Sahası
	Ort. Std.hata	Ort. Std.hata	Ort. Std.hata	Ort. Std.hata	Ort. Std.hata	Ort. Std.hata
HA g/cm^3	1,15 ^{ab} ±0,01	1,19 ^a ±0,009	1,08 ^b ±0,03	1,01 ^{cb} ±0,05	0,90 ^d ±0,01	0,96 ^{cd} ±0,03
pH	7,72 ^a ±0,02	7,64 ^a ±0,04	7,61 ^a ±0,03	7,64 ^a ±0,03	7,70 ^a ±0,03	7,38 ^b ±0,03
EC	0,964 ^a ±0,04	0,452 ^b ±0,01	0,505 ^b ±0,01	0,507 ^b ±0,01	0,512 ^b ±0,01	0,332 ^c ±0,007
Organik Karbon (%)	4,17 ^a ±0,10	3,35 ^b ±0,24	3,20 ^b ±0,27	3,38 ^{ab} ±0,11	1,96 ^c ±0,15	5,47 ^d ±0,16
Toplam Azot (%)	0,36 ^a ±0,008	0,30 ^b ±0,01	0,25 ^b ±0,01	0,28 ^b ±0,01	0,17 ^c ±0,01	0,47 ^d ±0,01
Fosfor (P) mg/kg	15,08 ^a ±0,24	8,19 ^b ±0,29	5,65 ^c ±0,53	6,63 ^c ±0,16	2,89 ^d ±0,09	7,02 ^{cb} ±0,24
Kalsiyum (Ca) mg/kg	12346 ^a ±299,5	11156 ^{ab} ±232	10724 ^b ±349	11756 ^{ab} ±441	10491 ^b ±159	11567 ^{ab} ±187
Magnezyum (Mg) mg/kg	329,62 ^a ±16,4	267,83 ^a ±24	265,54 ^a ±14,2	291,95 ^a ±38,6	249,66 ^a ±14,5	320,6 ^a ±36,6
Sodyum (Na) mg/kg	943,3 ^a ±11,1	661,1 ^b ±24,1	521,6 ^c ±18,6	585 ^{bc} ±12	403,3 ^d ±28,9	668,3 ^b ±8,7
Potasyum (K) mg/kg	485 ^a ±38	356,6 ^b ±27	321,3 ^b ±27,3	356,6 ^b ±10,8	220,6 ^c ±12,2	452,5 ^a ±25,2

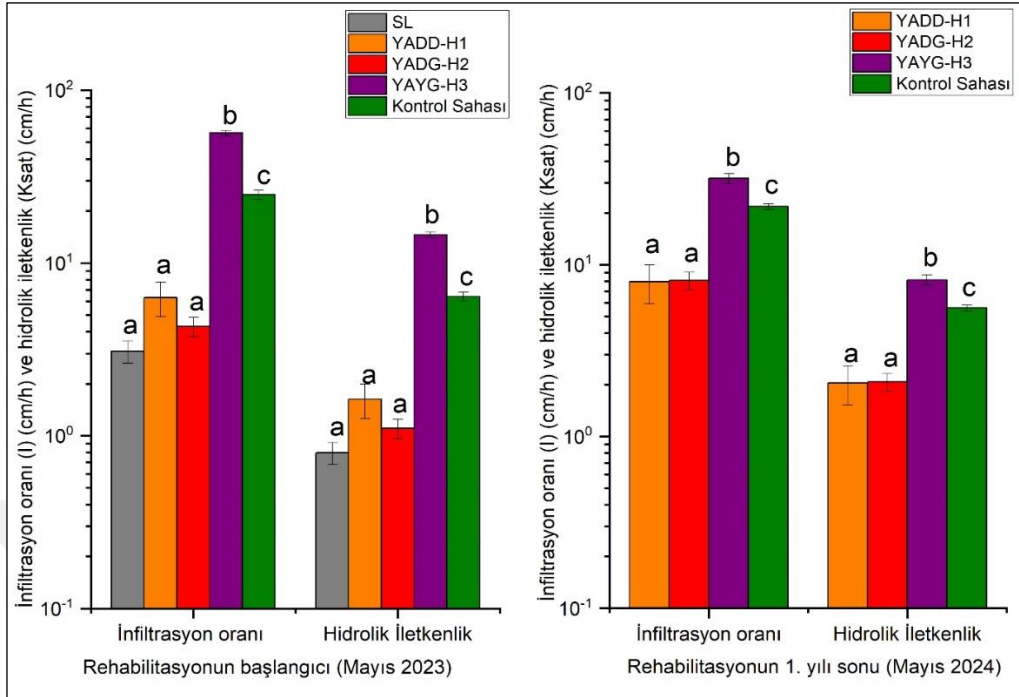
Çalışma süresince üst toprakta infiltrasyon oranı ve hidrolik iletkenlik ölçümleri; üretim faaliyetleri döneminde (Nisan 2023), rehabilitasyonun başlangıcında (Mayıs 2023) ve rehabilitasyonun birinci yılı sonunda (Mayıs 2024) gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Elde edilen bulgular, hem üretim faaliyetleri ile farklı rehabilitasyon yöntemleri arasında hem de yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahası arasında infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerlerinde anlamlı farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 3.1).

Rehabilitasyon işlemlerinin uygulanmasının hemen ardından yapılan ölçümlerde, üretim faaliyetleri dönemi ile YADD-H1 ve YADG-H2 havzalarında ölçülen infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerleri istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$) (Şekil 3.1). Ancak bu üç alanın değerleri, YAYG-H3 havzası ve kontrol sahasına göre anlamlı derecede daha düşüktür. Üretim faaliyetleri döneminde infiltrasyon oranı 3,09 cm/saat ve hidrolik iletkenlik 0,79 cm/saat olarak ölçülürken; YADD-H1 havzasında bu değerler sırasıyla 6,31 cm/saat ve 1,62 cm/saat, YADG-H2 havzasında ise 4,29 cm/saat ve 1,10 cm/saat olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1). En yüksek değerler ise YAYG-H3 havzasında ölçülmüş olup infiltrasyon 56,62 cm/saat, hidrolik iletkenlik ise 14,45 cm/saat olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlara göre, YAYG-H3 havzasındaki infiltrasyon oranı, üretim faaliyetleri dönemine kıyasla 18,2 kat, YADD-H1'e göre 8,9 kat, YADG-H2'ye göre 13,1 kat ve kontrol sahasına göre yaklaşık 2,2 kat daha fazladır (Şekil 3.1).

Rehabilitasyonun birinci yılı sonunda yapılan ölçümler de benzer bir dağılım göstermiştir. YADD-H1 ve YADG-H2 havzalarındaki infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerleri birbiriyle istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$) ve YAYG-H3 havzasına kıyasla anlamlı derecede daha düşüktür ($p<0,05$) (Şekil 3.1). Bu dönemde de en yüksek infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerleri YAYG-H3 havzasında ölçülmüş olup, bu değerler YADD-H1'e göre 3,99 kat, YADG-H2'ye göre 3,93 kat ve kontrol sahasına göre yaklaşık 1,45 kat daha yüksektir. Öte yandan kontrol sahasında ölçülen infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerleri, YADD-H1 ve YADG-H2'ye kıyasla daha yüksek, YAYG-H3'e kıyasla ise daha düşük olup, istatistiksel olarak tüm rehabilitasyon havzalarından farklılık göstermektedir ($p<0,05$) (Şekil 3.1).

Rehabilitasyon döneminin başlangıcı ile birinci yılın sonu arasında havzaların kendi içindeki değişim eğilimleri de dikkat çekicidir. YADD-H1 havzasında infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerleri başlangıçta sırasıyla 6,31 cm/saat ve 1,62 cm/saat iken, birinci yılın sonunda sırasıyla 7,95 cm/saat ve 2,04 cm/saat olarak ölçülmüş ve bu değerler arasında kayda değer bir artış görülmemiştir (Şekil 3.1). YADG-H2 havzasında ise rehabilitasyon sürecinde infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerlerinde yaklaşık 1,88 katlık bir artış gözlemlenmiş ve bu havzada birinci yılın sonunda ölçülen değerler YADD-H1'e kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık, YAYG-H3 havzasında bu dönemde infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerlerinde önemli bir azalma olmuştur. Başlangıçta 56,62 cm/saat olan infiltrasyon oranı bir yıl sonunda 31,77 cm/saat'e, 14,56 cm/saat olan hidrolik iletkenlik ise 8,17 cm/saat'e düşmüştür (Şekil 3.1). Ancak bu düşüşe rağmen, YAYG-H3 havzası diğer tüm havzalardan daha yüksek değerlere sahiptir. Kontrol sahasında ise rehabilitasyonun başlangıcı ile birinci yılın sonu arasında ölçülen

infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerleri arasında anlamlı bir değişiklik kaydedilmemiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemi (Mart 2023) İle Rehabilitasyon Döneminde Ölçülen İnfiltrasyon Oranı ve Hidrolik İletkenlik Değerleri (cm/h)

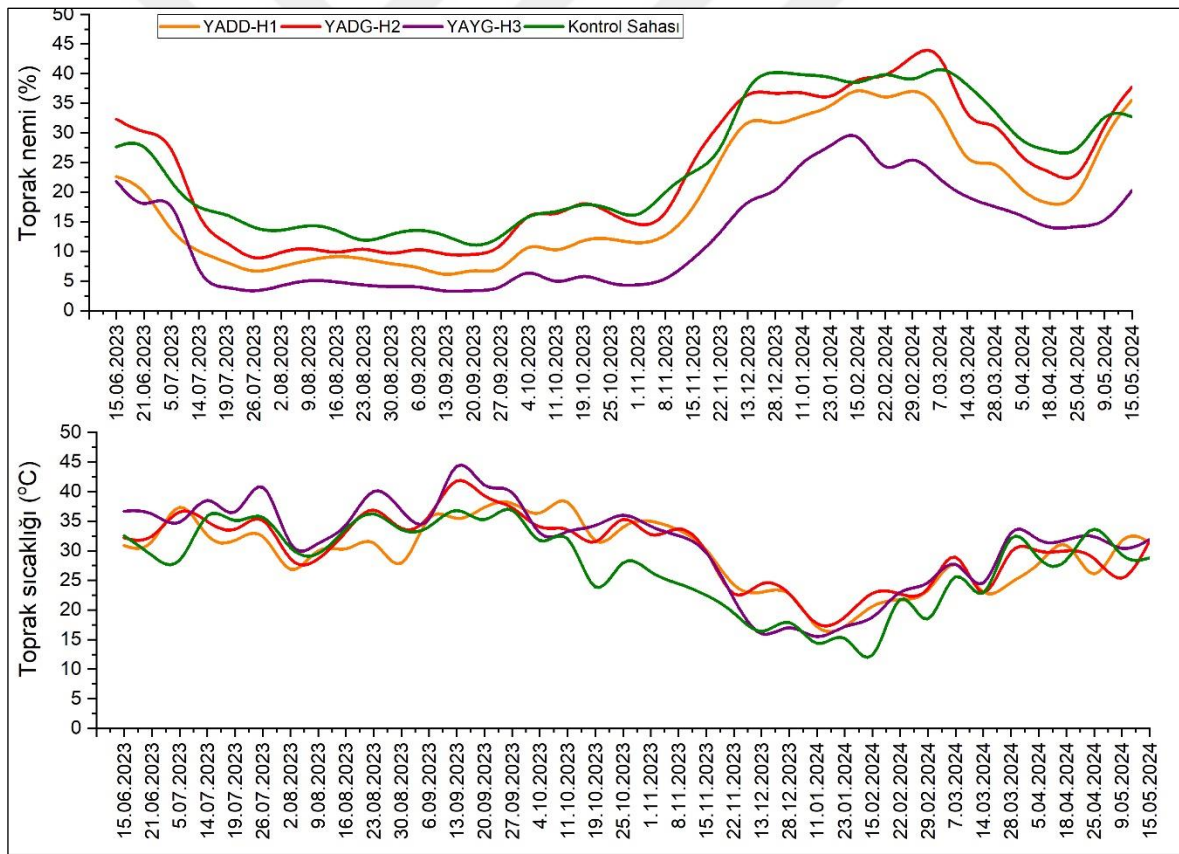
Şekil 3.2 rehabilitasyon sürecinin birinci yılı boyunca farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç ayrı havzada ve yangından etkilenmemiş kontrol sahasında, yüzey toprağında (0–5 cm derinlik) haftalık olarak ölçülen toprak nemi (%) ve toprak sıcaklığı (°C) değerlerini göstermektedir. Yangın sonrası doğal sürece bırakılan (YADD-H1), tohumlanan ve dal örtüsü uygulanan (YADG-H2), sürülerek fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahasında ölçülen toprak nemi ve sıcaklık değerleri, bölgenin iklimsel özellikleri ve mevcut meteorolojik koşullar ile doğrudan ilişkilidir.

Toprak nemi ve sıcaklığı, tüm havzalarda belirgin dönemsel değişimler göstermiştir. Genel olarak, 2023 yılının Temmuz ayından Kasım ayına kadar olan dönemde ölçülen toprak nemi değerleri, kış aylarında ölçülen değerlere kıyasla belirgin şekilde daha düşüktür (Şekil 3.2). 8 Kasım 2023 tarihinden itibaren toprak neminde artış eğilimi gözlenmiş; özellikle Ocak ve Şubat aylarında yapılan ölçümlerde en yüksek nem değerlerine ulaşılmıştır. Nisan ve Mayıs aylarında ölçülen toprak nemi, kış aylarına kıyasla daha düşük olmasına rağmen, yaz aylarında (Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim) elde edilen değerlerden daha yüksektir (Şekil 3.2).

Toprak sıcaklığı ise beklendiği üzere toprak nemiyle ters orantılı bir seyir izlemektedir. Yaz aylarında yüzey toprağında ölçülen sıcaklık, kış aylarında kaydedilen sıcaklıklardan çok daha yüksek değerler göstermiştir (Şekil 3.2). 15 Haziran 2023 ile 8 Kasım 2023 tarihleri arasında ölçülen toprak sıcaklığı 25 °C ile 45 °C arasında değişirken, 22 Kasım 2023 ile 29

Şubat 2024 tarihleri arasında bu değerler 25 °C'nin altına düşmüştür. 7 Mart 2024 tarihinden itibaren toprak sıcaklıkları tekrar artış eğilimi göstermiş; ancak bu dönemde kaydedilen sıcaklıklar yaz aylarındaki değerlere kıyasla daha düşük seviyelerde kalmıştır (Şekil 3.2).

Rehabilitasyon sürecinin ilk yılında, toprak nemi ve sıcaklığı açısından rehabilitasyon yöntemi uygulanan üç havza ile kontrol sahası arasında anlamlı farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu fark, özellikle toprak nemi açısından daha belirgindir (Şekil 3.2). Yangın sonrası sürülerek fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ölçülen toprak nemi değerleri, genel olarak diğer havzalara kıyasla daha düşüktür. Yangın sonrası doğal sürece bırakılan havzada (YADD-H1) kaydedilen toprak nemi değerleri, YAYG-H3 havzasına göre daha yüksek; ancak tohumlama ve dal serme uygulanan YADG-H2 havzası ile kontrol sahasından daha düşüktür (Şekil 3.2). Öte yandan, YADG-H2 havzasında ölçülen toprak nemi değerleri, hem YAYG-H3 hem de YADD-H1 havzalarına kıyasla daha yüksek olup, kontrol sahasında kaydedilen değerlere en yakın seviyededir.



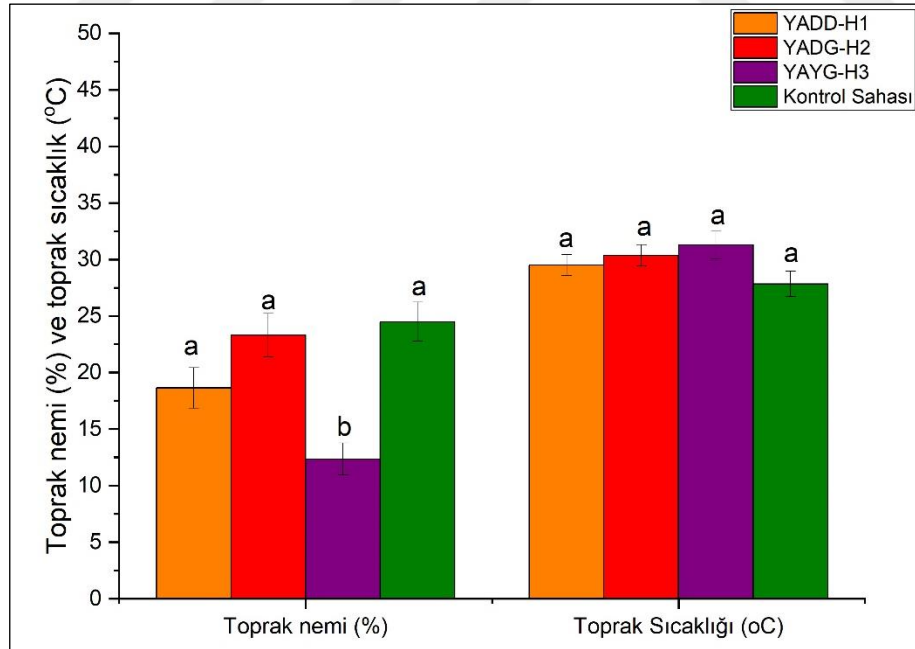
Şekil 3.2 Rehabilitasyonun Döneminde Haftalık Olarak Ölçülen Toprak Nemi (%) Ve Toprak Sıcaklığı Değerleri (°C)

Rehabilitasyon sürecinin birinci yılında, havzalar arasında ortalama toprak nemi değerleri, toprak sıcaklığına kıyasla daha belirgin farklılıklar göstermiştir (Şekil 3.3). Bu dönemde en yüksek ortalama toprak nemi, %24,49 ile yangından etkilenmemiş kontrol sahasında ölçülmüştür. Bu değere en yakın sonuç ise yangın sonrası tohumlama ve dal serme

uygulanması yapılan YADG-H2 havzasında elde edilmiştir (%23,30). Yangın sonrası doğal sürece bırakılan YADD-H1 havzasında ölçülen ortalama toprak nemi değeri (%18,65), kontrol sahası ve YADG-H2 havzasına kıyasla daha düşük olmakla birlikte, yangın sonrası sürülerek fidan dikilen YAYG-H3 havzasından daha yüksektir. Tüm havzalar arasında en düşük ortalama toprak nemi, %12,35 ile YAYG-H3 havzasında kaydedilmiştir (Şekil 3.3).

İstatistiksel analizler sonucunda, ortalama toprak nemi açısından YADD-H1, YADG-H2 ve kontrol sahası arasında anlamlı bir fark bulunmamış; bu alanların benzer özellikler sergilediği belirlenmiştir ($p > 0,05$). Buna karşın, YAYG-H3 havzasında ölçülen ortalama toprak nemi değerleri, diğer tüm havzalardan istatistiksel olarak anlamlı şekilde farklılık göstermiştir ($p < 0,05$) (Şekil 3.3).

Rehabilitasyon döneminin ilk yılı boyunca havzalarda ölçülen ortalama toprak sıcaklığı değerleri ise toprak nemine göre birbirine daha yakın sonuçlar vermiştir. Buna göre ortalama toprak sıcaklığı YADD-H1’de 29,5 °C, YADG-H2’de 30,3 °C, YAYG-H3’te 31,2 °C ve kontrol sahasında 27,8 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.3). Bu değerlere dayanarak yapılan istatistiksel analizler sonucunda, havzalar arasında ortalama toprak sıcaklığı açısından anlamlı bir fark olmadığı, yani ölçümlerin istatistiksel olarak birbirine benzer olduğu tespit edilmiştir ($p > 0,05$).



Şekil 3.3 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Havzalara Ait Ortalama Toprak Nemi (%) ve Toprak Sıcaklığı Değerleri (°C)

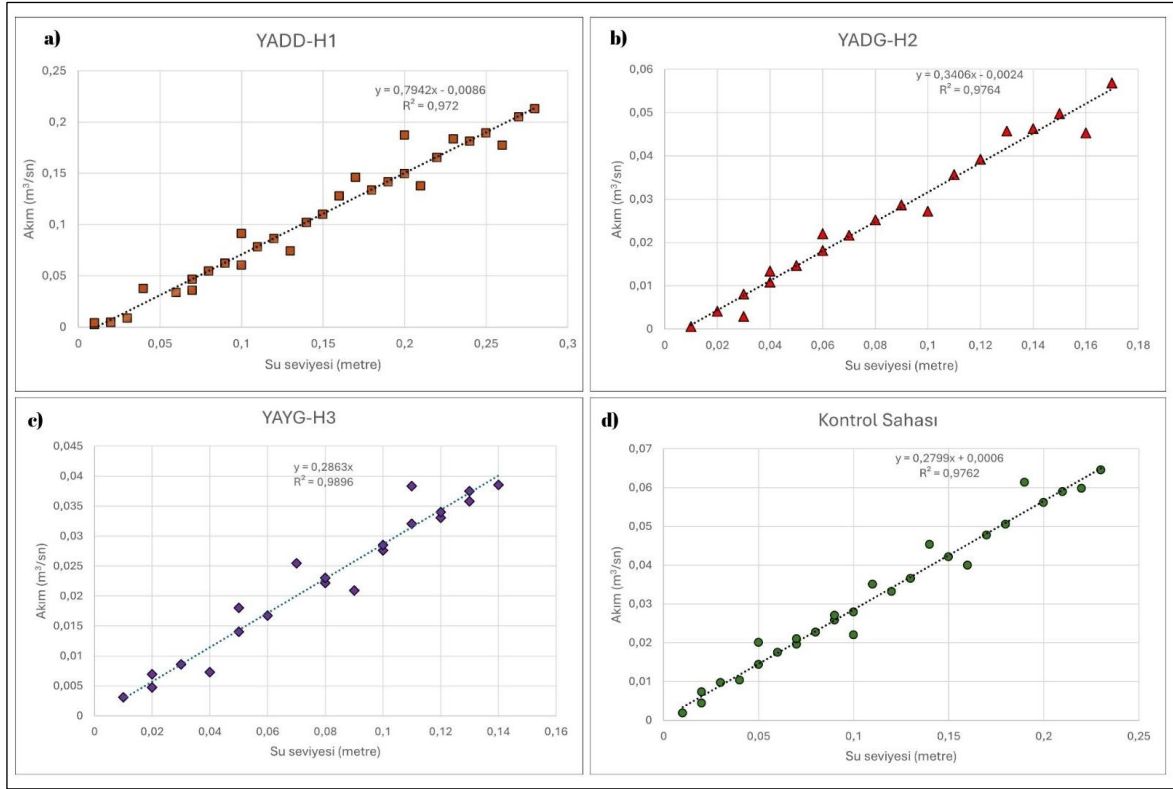
3.2. Yağış, Yüzeysel Akış ve Akım Miktarları

3.2.1. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Rehabilitasyon döneminde, yangın sonrası doğal sürece bırakılan (YADD-H1), tohumlama ve dal serme yöntemi uygulanan (YADG-H2), sürüm ve fidan dikimi yapılan (YAYG-H3) havzalar ile yangın geçirmemiş kontrol sahasında, farklı su seviyelerinde periyodik olarak yapılan hız ölçümleriyle akım miktarları belirlenmiştir. Bu ölçümler doğrultusunda, her bir havza için su seviyesi ile akım arasındaki ilişki tanımlanarak su seviyesi–akım anahtar eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 3.4).

Tüm havzalarda su seviyesi ile akım arasında doğrusal ve pozitif yönde bir ilişki saptanmıştır. YADD-H1 havzasında, en düşük su seviyesi olan 0,01 m ile en yüksek değer olan 0,28 m arasında farklı dönemlerde ölçülen akımlar doğrultusunda oluşturulan eğri, yüksek bir korelasyon katsayısı ile ($R^2 = 0,972$) su seviyesi ile akım arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, tohumlama ve dal serme uygulamasının yapıldığı YADG-H2 havzasında 0,01–0,17 m aralığında ölçülen su seviyeleri için belirlenen akım değerleri, su seviyesi ile akım arasında yüksek düzeyde bir doğrusal ilişki bulunduğunu göstermiştir ($R^2 = 0,976$). Sürüm ve fidan dikimi uygulanan YAYG-H3 havzasında ise, 0,01–0,14 m aralığındaki su seviyelerine karşılık gelen akım ölçümleri doğrultusunda su seviyesi ile akım arasında pozitif bir doğrusal ilişki belirlenmiştir ($R^2 = 0,989$). Kontrol sahasında da farklı yağışlı olay dönemlerinde belirlenen su seviyesi ve akım değerleri doğrultusunda oluşturulan anahtar eğri, diğer havzalarla benzer şekilde yüksek bir korelasyon göstermektedir ($R^2 = 0,976$) (Şekil 3.4).

Oluşturulan bu su seviyesi–akım anahtar eğrileri sayesinde, her bir havzada belirli yağışlı olay dönemlerine ait anlık akım (m^3/ha) ve yüzeysel akış (mm/ha) miktarları hesaplanmıştır. Bu kapsamda, rehabilitasyonun birinci yılında 16, ikinci yılında ise 12 yağışlı olay dönemine ilişkin akım ve yüzeysel akış verileri elde edilerek analiz edilmiştir.



Şekil 3.4 Rehabilitasyon Dönemi Su Seviyesi ile Akım Anahtar Eğrileri: (a) YADD-H1, (b) YADG-H2, (c) YAYG-H3, (d) Kontrol Sahası

Rehabilitasyon döneminin ilk yılı olan 25 Mayıs 2023 ile 31 Mayıs 2024 tarihleri arasındaki dönemde, herhangi bir müdahale yapılmadan doğal sürece bırakılan havza (YADD-H1), yangın sonrası tohumlama ve dal serme uygulanan havza (YADG-H2), yangın sonrası sürüm yapılarak fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile yangından etkilenmemiş doğal orman sahası olan kontrol havzasında 15 dakikalık aralıklarla akım miktarları ile 30 dakikalık periyotlarla yağış miktarları belirlenmiştir (Şekil 3.5).

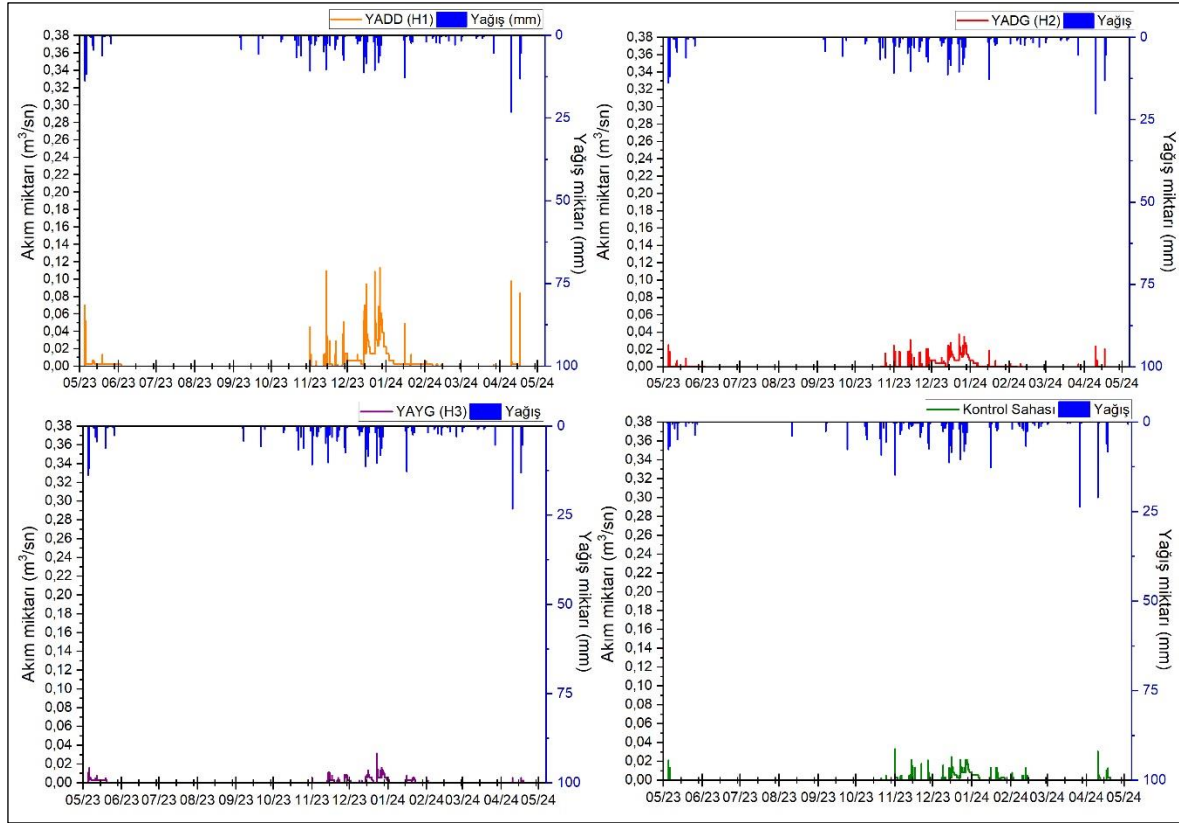
Yangın sonrası farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalar ile kontrol sahası arasında yüzeysel akış yönünden bazı benzerlikler gözlemlenmiştir. Tüm havzalarda yer alan akarsular, yalnızca meteorolojik yağışlarla beslenen, sürekli akış göstermeyen ve bu nedenle geçici nitelikte olan akarsulardır. Rehabilitasyon döneminin ilk yılında, her dört havzada da Haziran ayının sonu ile Eylül ayının sonu arasındaki dönemde hiç yağış meydana gelmemiştir (Şekil 3.4). Bu kurak dönemde havzaların tamamındaki akarsularda yüzeysel akış gözlenmemiştir. Buna karşın, genellikle yağışlı gün sayısının arttığı Kasım ayı ile Şubat ayının sonuna kadar olan dönemde, yağışlara bağlı olarak akarsuların akışları sürekli hale gelmiştir. Ayrıca 2023 yılının Mayıs ayında ve 2024 yılının ilkbahar döneminde ise akarsularda yalnızca yağışlı günlerde belirgin bir akış artışı gözlenmiş; yağışların sona ermesinden kısa bir süre sonra ise akarsular tamamen kurumuştur (Şekil 3.5).

Rehabilitasyonun ilk yılına ait veriler, yangın sonrası doğal sürece bırakılan (YADD-H1), tohumlama ve dal serme yoluyla uygulanan (YADG-H2), sürüm ve fidan dikimi uygulanan (YAYG-H3) havzalar ile yangından etkilenmemiş kontrol sahası arasında akım miktarları açısından belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 3.5). Yağışlı dönemlerde, yangın sonrası doğal sürece bırakılan havzada (YADD-H1) ölçülen akım miktarları; hem doğal gençleştirme (YADG-H2) hem yapay gençleştirme (YAYG-H3) yapılan havzalardan hem de kontrol sahasının ölçümlerinden anlamlı düzeyde daha yüksek olmuştur. Rehabilitasyonun ilk yılı içerisinde gerçekleşen ilk yağışlı dönem olan 29 Mayıs–30 Mayıs 2023 tarihleri arasında toplam 101,2 mm yağış kaydedilmiştir (Şekil 3.5). Bu tarihlerde YADD-H1’de ölçülen anlık en yüksek akım miktarı $0,0780 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak belirlenmiştir. Aynı dönemde doğal gençleştirme uygulanan YADG-H2’de $0,0287 \text{ m}^3/\text{sn}$, yapay gençleştirme uygulanan YAYG-H3’te ise $0,0167 \text{ m}^3/\text{sn}$ ’lik anlık en yüksek akım miktarları ölçülmüştür. Yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında ise aynı günlerde 107,1 mm toplam yağış meydana gelmiş ve bu sahada ölçülen anlık en yüksek akım miktarı $0,0225 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.5).

Rehabilitasyonun birinci yılı boyunca anlık en yüksek akım değerlerinin genellikle Aralık, Ocak ve Mayıs ayında ölçüldüğü görülmektedir. Bu bağlamda, doğal sürece bırakılan YADD-H1’de en yüksek akım miktarları 8 Aralık 2023, 16 Ocak 2024, 20 Ocak 2024 ve 4 Mayıs 2024 tarihlerinde $0,117 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 3.4). Doğal gençleştirme uygulanan YADG-H2’de ise 8 Aralık 2023, 16 Ocak 2024, 20 Ocak 2024 ve 29 Mayıs 2024 tarihlerinde sırasıyla $0,0322 \text{ m}^3/\text{sn}$, $0,0392 \text{ m}^3/\text{sn}$, $0,0357 \text{ m}^3/\text{sn}$ ve $0,0287 \text{ m}^3/\text{sn}$ değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.4). Yapay gençleştirme uygulanan YAYG-H3’te ise en yüksek akım miktarları 16 Ocak 2024 tarihinde $0,0330 \text{ m}^3/\text{sn}$; 20 Ocak ve 30 Mayıs 2024 tarihlerinde ise $0,0167 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak ölçülmüştür. Yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında ise en yüksek akım değerleri 25 Kasım 2023, 8 Aralık 2023, 9 Ocak 2024 ve 4 Mayıs 2024 tarihlerinde sırasıyla $0,0337 \text{ m}^3/\text{sn}$, $0,0225 \text{ m}^3/\text{sn}$, $0,0253 \text{ m}^3/\text{sn}$ ve $0,0281 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak belirlenmiştir (Şekil 3.5).

Son olarak, yangın sonrası doğal sürece bırakılan (YADD-H1), doğal gençleştirme yapılan (YADG-H2) ve yapay gençleştirme yapılan (YAYG-H3) havzalarda rehabilitasyonun ilk yılı içerisinde toplam 973,7 mm yağış meydana gelmiştir (Şekil 3.4). Bu süreçte YADD-H1’de ölçülen yıllık ortalama akım miktarı $0,00241 \text{ m}^3/\text{sn}$ olup, bu değer diğer tüm havzaların yıllık ortalama akım miktarlarından kayda değer biçimde yüksektir. Aynı dönemde doğal gençleştirme yapılan YADG-H2’de yıllık ortalama akım miktarı $0,00126 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak belirlenmiştir. Rehabilitasyonun birinci yılında yapay gençleştirme uygulanan YAYG-H3’te yıllık ortalama akım miktarı $0,000635 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak ölçülmüş olup, bu miktar yangın

geçirmemiş olan kontrol sahasında ölçülen yıllık ortalama akım miktarından ($0,000817 \text{ m}^3/\text{sn}$) daha düşük düzeydedir.



Şekil 3.5 Rehabilitasyon Döneminin İlk Yılında Ölçülen Anlık Akım (15 Dakika) ve Yağış Miktarı (30 Dakika)

Rehabilitasyon sürecinin birinci yılı içerisinde gerçekleştirilen 16 farklı örnekleme döneminde, su ve sediman örneklerinin alındığı zaman dilimine ait toplam yağış miktarları (mm) ve yüzeyel akış miktarları (mm) belirlenmiştir (Şekil 3.5). Dört farklı havzada, yangın sonrası herhangi bir müdahale yapılmadan doğal sürece bırakılan havza (YADD-H1), yangın sonrası tohumlama ve dal serme yoluyla doğal gençleştirme uygulanan havza (YADG-H2), yangın sonrası sürüm ve fidan dikimi ile yapay gençleştirme uygulanan havza (YAYG-H3) ve yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında yüzeyel akış miktarları, genellikle yağışların arttığı Aralık, Ocak ve Şubat aylarındaki örnekleme dönemlerinde artış göstermiştir (Şekil 3.6).

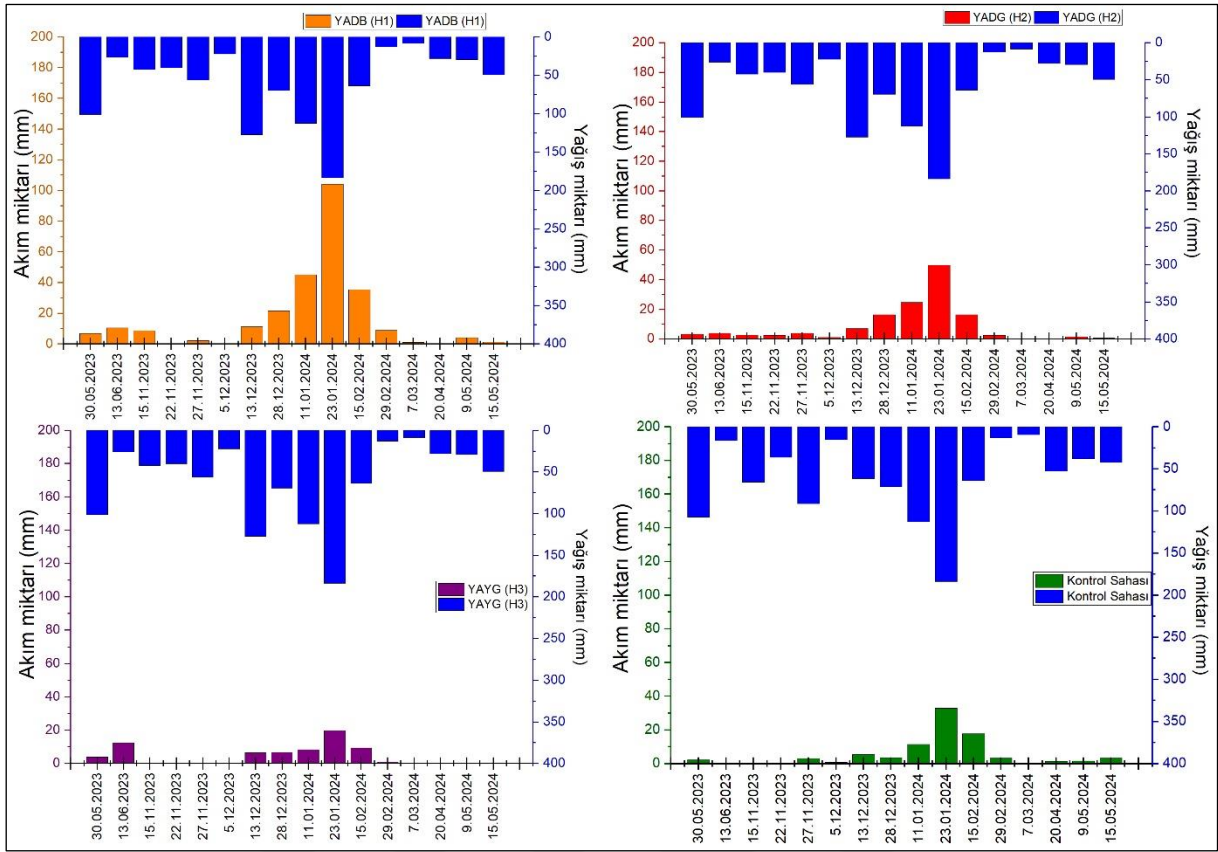
Yağış miktarları benzer olmasına rağmen yüzeyel akış miktarları havzalar arasında belirgin farklılık göstermektedir. Örnekleme dönemlerinde benzer yağış değerlerinin kaydedildiği durumlarda dahi, en yüksek yüzeyel akış miktarları yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1) havzada gözlemlenmiştir (Şekil 3.5). Bu havzada yalnızca 22 Kasım 2023 tarihinde $40,2 \text{ mm}$ 'lik yağış gerçekleşmiş olmasına rağmen yüzeyel akış oluşmamıştır. Bunun dışındaki 15 örnekleme döneminde ise yağışlarla birlikte yüzeyel akış da meydana gelmiştir. Özellikle 13 Aralık 2023 ile 23 Ocak 2024 tarihleri arasında yüzeyel akış miktarında

düzenli bir artış kaydedilmiştir. Bu dönemde, 12 Ocak ile 23 Ocak 2024 tarihleri arasında toplam 183,7 mm yağış meydana gelmiş ve buna karşılık yaklaşık 103,9 mm yüzeysel akış oluşmuştur. Takip eden dönemde, yani 20 Nisan 2024 tarihine kadar olan zaman diliminde ise hem yağış hem de yüzeysel akış miktarlarında düzenli bir azalma gözlenmiştir (Şekil 3.6).

Rehabilitasyonun birinci yılı içerisinde, yangın sonrası tohumlama ve dal serme işlemi yapılan (YADG-H2) havzada örnekleme dönemlerinde ölçülen yüzeysel akış miktarı, doğal sürece bırakılan YADD-H1 havzasına kıyasla daha düşük, ancak yapay gençleştirme uygulanan YAYG-H3 havzası ile kontrol sahasına göre daha yüksek düzeydedir (Şekil 3.6). Bu havzada, her örnekleme döneminde kaydedilen yağışlar sonucunda yüzeysel akış meydana gelmiştir. YADD-H1 havzasında olduğu gibi, YADG-H2 havzasında da yüzeysel akış miktarı 31 Aralık 2023 örnekleme tarihinden 23 Ocak 2024 tarihine kadar düzenli olarak artış göstermiş, bu tarihten itibaren 20 Nisan 2024'e kadar olan dönemde ise azalmıştır. Bu havzada ölçülen en yüksek yüzeysel akış miktarı, 23 Ocak 2024 tarihinde gerçekleşen 187,7 mm'lik yağışla birlikte 49,7 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.6).

Yapay gençleştirme uygulanan, yani yangın sonrası sürüm yapılmış ve fidan dikilmiş olan (YAYG-H3) havzada, kontrol sahası da dahil olmak üzere en düşük yüzeysel akış miktarları kaydedilmiştir. Bu havzada 15 Kasım 2023, 22 Kasım 2023, 5 Aralık 2023, 7 Mart 2024 ve 20 Nisan 2024 tarihlerinde yağış gerçekleşmiş olmasına rağmen yüzeysel akış oluşmamıştır (Şekil 3.5). Bununla birlikte, 13 Aralık 2023 tarihinden 23 Ocak 2024 tarihine kadar olan örnekleme döneminde yüzeysel akış miktarı düzenli olarak artış göstermiş ve bu tarihten itibaren 7 Mart 2024 örnekleme dönemine kadar kademeli olarak azalmıştır. 23 Ocak 2024 tarihinde gerçekleşen 183,7 mm yağış sonucunda bu havzada ölçülen en yüksek yüzeysel akış miktarı 19,7 mm olmuştur (Şekil 3.6).

Rehabilitasyon sürecinin ilk yılına ait bulgulara göre, kontrol sahasında ölçülen yüzeysel akış miktarı, yangın sonrası yapay gençleştirme uygulanan YAYG-H3 havzasına göre daha yüksek, ancak doğal sürece bırakılan (YADD-H1) ve doğal gençleştirme yapılan (YADG-H2) havzalara göre daha düşük düzeydedir. Kontrol sahasında yalnızca 13 Haziran 2023 tarihli örnekleme döneminde yüzeysel akış meydana gelmemiştir; diğer tüm dönemlerde akış gözlemlenmiştir (Şekil 3.5). Diğer havzalardan farklı olarak, kontrol sahasında yüzeysel akış miktarı 28 Aralık 2023 örnekleme tarihinden 23 Ocak 2024 tarihine kadar düzenli olarak artmış ve bu tarihten itibaren 7 Mart 2024 tarihine kadar düzenli bir azalma göstermiştir. Bu sahada ölçülen en yüksek yüzeysel akış miktarı, 183,7 mm yağışın düştüğü 23 Ocak 2024 tarihinde 32,8 mm olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Rehabilitasyonun Birinci Yılında 16 Farklı Örnekleme Dönemlerinde Ölçülen Yağış (mm) ve Akım (mm) Miktarları

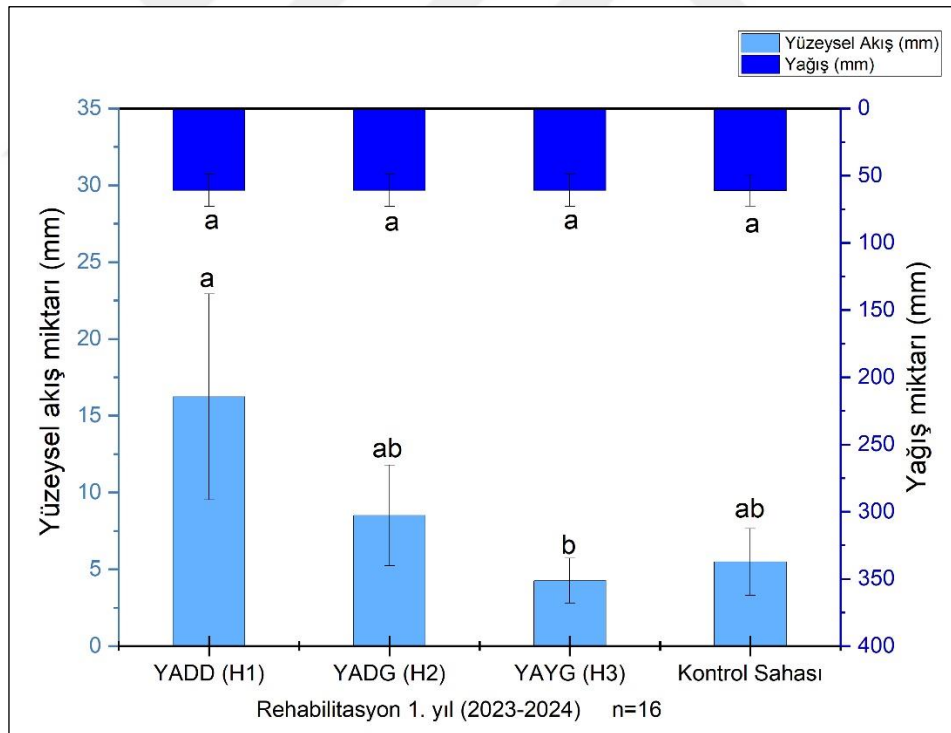
Şekil 3.7 rehabilitasyon sürecinin ilk yılında yapılan 16 farklı su ve sediman ölçümüne dayalı örnekleme dönemlerinin her birine ait ortalama yüzeysel akış (mm) ve yağış miktarlarını (mm) göstermektedir. Rehabilitasyonun birinci yılında gerçekleştirilen 16 örnekleme döneminde ölçülen ortalama yağış miktarları açısından havzalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır ($p>0,05$). Yangın sonrası doğal bırakılan havza (YADD-H1), tohumlama ve dal serme yapılan havza (YADG-H2), sürüm ve fidan dikimi yapılan havza (YAYG-H3) ve kontrol sahasına düşen ortalama yağış miktarı sırasıyla 60,85 mm ve 61,17 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.7). Bu bulgu, yağış miktarlarının havzalar arasında benzer olduğunu, ancak yüzeysel akışa geçen su miktarında rehabilitasyonun birinci yılı itibarıyla farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır.

Özellikle, yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1) ve tohumlama yapılan, dal serme uygulanan (YADG-H2) havzalarda ortalama yüzeysel akış miktarları, kontrol sahasına göre daha yüksektir. Kontrol sahasında, örnekleme dönemlerine göre ortalama 61,17 mm yağışın yaklaşık olarak ortalama 5,48 mm'si yüzeysel akışa dönüşürken, yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1) havzada bu miktar 16,22 mm, tohumlama ve dal serme yapılan (YADG-H2) havzada ise 8,5 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.7). Ancak, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzada ölçülen ortalama yüzeysel akış miktarı, kontrol sahasından daha

düşüktür. Bu havzada, aynı 60,85 mm yağış miktarının sadece 4,26 mm'si yüzeysel akışa dönüşmüştür.

Yangın sonrası doğal bırakılan havza (YADD-H1) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) arasındaki ortalama yüzeysel akış miktarları istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$). Bununla birlikte, her iki havzada ölçülen yüzeysel akış miktarı, kontrol sahası ve tohumlama ile dal serme yapılan (YADG-H2) havzaya göre istatistiksel olarak benzerlik göstermektedir ($p>0,05$) (Şekil 3.7).

Son olarak, rehabilitasyonun birinci yılı itibarıyla yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), tohumlama yapılan ve dal serilen (YADG-H2), sürüm ve fidan dikimi yapılan (YAYG-H3) havzalara toplamda 973,7 mm yağış düşerken, kontrol sahasına 978,8 mm yağış düşmüştür. Yağışa karşılık olarak, rehabilitasyonun ilk yılında yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) toplamda yaklaşık 259,59 mm, yangın sonrası tohumlama yapılan ve dal serme uygulanan havzada (YADG-H2) toplamda 136,07 mm, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) toplamda 68,18 mm ve kontrol sahasında ise toplamda 87,71 mm yüzeysel akış gözlemlenmiştir.



Şekil 3.7 Rehabilitasyonun Birinci Yılında Örnek Dönemlerinde Belirlenen Ortalama Yüzeysel Akış (mm) ve Yağış Miktarları (mm)

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında (01.06.2024-29.03.2025) yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile yangın geçirmemiş kontrol sahasında 15 dakikalık akım miktarı (m^3/sn) ve 30 dakikalık yağış miktarı belirlenmiştir (Şekil 3.8). Bu

dönemde farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalar ile kontrol sahası arasında anlık akım ve yağış miktarları bakımından bazı benzerlikler gözlemlenmiştir.

Havzaların tamamında, 01.06.2024 ile 29.09.2024 tarihleri arasında herhangi bir yağış meydana gelmemiş ve bu dönemde akarsularda akış gözlemlenmemiştir. İlk yağış, 30.09.2024 tarihinde meydana gelmiş ve bu yağış sırasında yılın ilk yüzeysel akışı oluşmuştur. Ancak, dört havzaya düşen bu yağıştan kısa bir süre sonra akarsular tekrar kurumuş ve bu dönemde akışlarda süreklilik gözlemlenmemiştir (Şekil 3.8). Rehabilitasyon dönemi boyunca özellikle Aralık, Ocak ve Şubat aylarında yağışlı gün sayısında artış olmuş ve yağışlarda süreklilik sağlanmıştır. Bu döneme bağlı olarak, dört havzada da Aralık ayının sonlarından Şubat ayının ilk haftasına kadar olan süreçte akım miktarlarında süreklilik gözlenmiş ve en yüksek akım değerleri bu dönemde ölçülmüştür (Şekil 3.8). 06.02.2024 tarihinden sonra ise akışlar sadece yağış esnasında oluşmuş ve yağışlardan sonra akarsular tamamen kurumuştur. Şubat ayı sonu ile Mart ayı içerisinde herhangi bir yağış olayı yaşanmamış ve bu dönemde dört havzadaki akarsular tamamen kurumuştur.

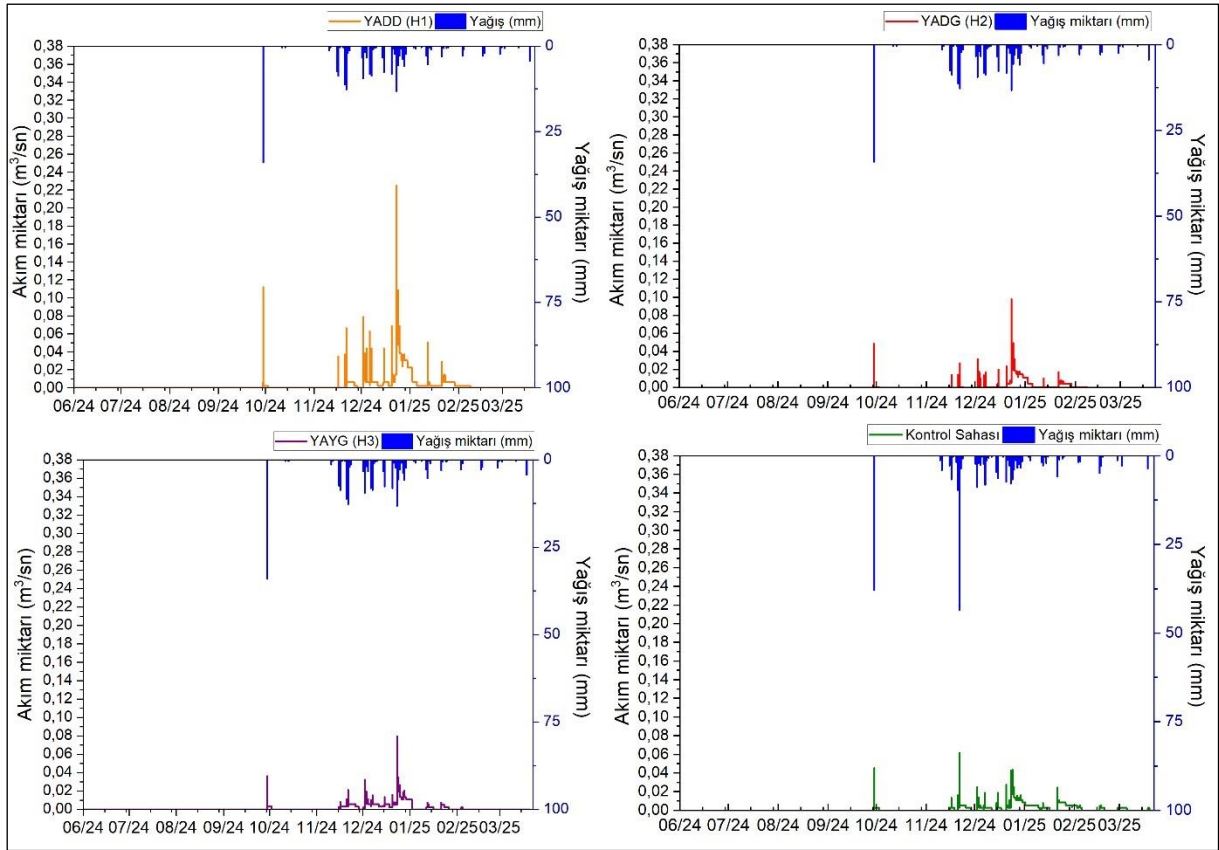
Rehabilitasyon dönemi boyunca (01.06.2024-29.03.2025) yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) ile diğer rehabilitasyon uygulamaları yapılmış havzalar ve kontrol sahasında ölçülen anlık akım miktarlarında bazı farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.7). Yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) ölçülen anlık akım miktarları, diğer havzalara ve kontrol sahasına göre çok daha yüksek olmuştur. YADD-H1 havzasında, 24.12.2024 tarihinde düşen 101,8 mm yağış sırasında anlık en yüksek akım miktarı $0,244 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak ölçülmüştür. Ardından, 30.09.2024 tarihinde ölçülen $0,125 \text{ m}^3/\text{sn}$ 'lik akım değeri bir diğer yüksek akım miktarıdır. Ayrıca, 03.12.2024 tarihinde $0,085 \text{ m}^3/\text{sn}$, 22.11.2024, 07.12.2024, 25.12.2024 ve 26.12.2024 tarihlerinde ise $0,070 \text{ m}^3/\text{sn}$ 'lik akım değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.8).

Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) ölçülen anlık akım miktarları, yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) ile karşılaştırıldığında daha düşük, ancak yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ve kontrol sahasından daha yüksektir. YADG-H2 havzasındaki en yüksek anlık akım miktarı, yine 24.12.2024 tarihinde düşen 101,8 mm yağış sırasında $0,109 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 3.7). Bunun dışında, 30.09.2024 tarihinde $0,056 \text{ m}^3/\text{sn}$, 25.12.2024 tarihinde $0,049 \text{ m}^3/\text{sn}$, 03.12.2024 ve 26.12.2024 tarihlerinde ise $0,032 \text{ m}^3/\text{sn}$ 'lik akım değerleri kaydedilmiştir.

Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ölçülen anlık en yüksek akım miktarı, diğer iki havzaya göre daha düşüktür. YAYG-H3 havzasındaki en yüksek anlık akım miktarı, yine 24.12.2024 tarihinde düşen 101,8 mm yağış sırasında $0,084 \text{ m}^3/\text{sn}$ olarak ölçülmüştür. Ardından, 30.09.2024 tarihinde $0,038 \text{ m}^3/\text{sn}$, 25.12.2024 tarihinde $0,034 \text{ m}^3/\text{sn}$,

03.12.2024 tarihinde 0,033 m³/sn, 26.12.2024 tarihinde 0,026 m³/sn ve son olarak 22.12.2024 tarihinde 0,022 m³/sn'lik akım değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.8).

Yangın geçirmemiş kontrol sahasında ölçülen anlık akım miktarları, rehabilitasyon uygulamaları yapılan havzalarla benzer şekilde, Eylül ayı sonunda, Ekim ve Aralık aylarında en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Kontrol sahasında, 22.11.2024 tarihinde düşen 103,8 mm yağış sırasında anlık en yüksek akım miktarı 0,064 m³/sn olarak belirlenmiştir. Ardından, 30.09.2024, 24.12.2024 ve 25.12.2024 tarihlerinde 0,044 m³/sn'lik akım değerleri ölçülmüştür. Son olarak, 03.12.2024 tarihinde 0,025 m³/sn'lik bir akım miktarı kaydedilmiştir.



Şekil 3.8 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Ölçülen 15 Dakikalık Akım Değerleri (m³/sn) ve 30 Dakikalık Yağış Miktarları (mm)

Rehabilitasyonun ikinci yılında (01.06.2024-29.03.2025) yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahasında, 03.10.2024 ile 19.12.2024 tarihleri arasındaki ilk altı örneklem dönemindeki yüzeysel akış miktarları, 26.12.2024, 31.12.2024 ve 17.01.2025 tarihleri arasındaki örneklem dönemlerine kıyasla daha düşük olmuştur (Şekil 3.9). Özellikle rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalarda, 26.12.2024 tarihindeki örneklem döneminde en yüksek yüzeysel akış miktarı ölçülmüş, bu tarihten itibaren ise yüzeysel akış düzenli olarak azalmıştır. Ayrıca, 20.02.2025 örneklem

tarihinde yangın sonrası farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç havzada yüzeysel akış oluşmamışken, kontrol sahasında bu tarihte yüzeysel akış gözlemlenmiştir (Şekil 3.8).

Rehabilitasyonun ikinci yılında, 03.10.2024 ile 19.12.2024 tarihleri arasındaki dönemde akarsulardaki yüzeysel akış, yalnızca yağış esnasında oluşmuş ve yağış sonrası akarsular tamamen kurumuştur. Bu dönemde yüzeysel akış miktarları, 26.12.2024 ile 17.01.2025 arasındaki örnekleme dönemlerine göre daha düşüktür. 26.12.2024 tarihinden sonra, yağışlı gün sayılarındaki artışla birlikte yüzeysel akış miktarlarında da bir artış gözlemlenmiş ve yağıştan sonra akarsularda temel akış (baseflow) seviyesinde devam edilmiştir. Bu nedenle, 26.12.2024 ile 17.01.2025 tarihleri arasındaki örnekleme dönemlerinde yüzeysel akış miktarları diğer döneme göre daha yüksek olmuştur (Şekil 3.9).

Rehabilitasyonun ikinci yılında, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1), diğer rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalara ve kontrol sahasına kıyasla daha yüksek yüzeysel akış miktarları gözlemlenmiştir. 03.10.2024 ile 19.12.2024 tarihleri arasında YADD-H1 havzasındaki yüzeysel akış miktarları daha düşüktür (Şekil 3.8). Bu dönemde, 19.11.2024 tarihinde 68,6 mm yağış esnasında en düşük yüzeysel akış (0,90 mm) ölçülürken, 29.11.2024 tarihinde ise 100,8 mm yağışla en yüksek yüzeysel akış (14,4 mm) meydana gelmiştir. YADD-H1 havzasında, 26.12.2024 tarihinde 233 mm yağış ile en yüksek yüzeysel akış (60,4 mm) kaydedilmiş ve bu tarihten sonra yüzeysel akış miktarları düzenli olarak azalmıştır (Şekil 3.9).

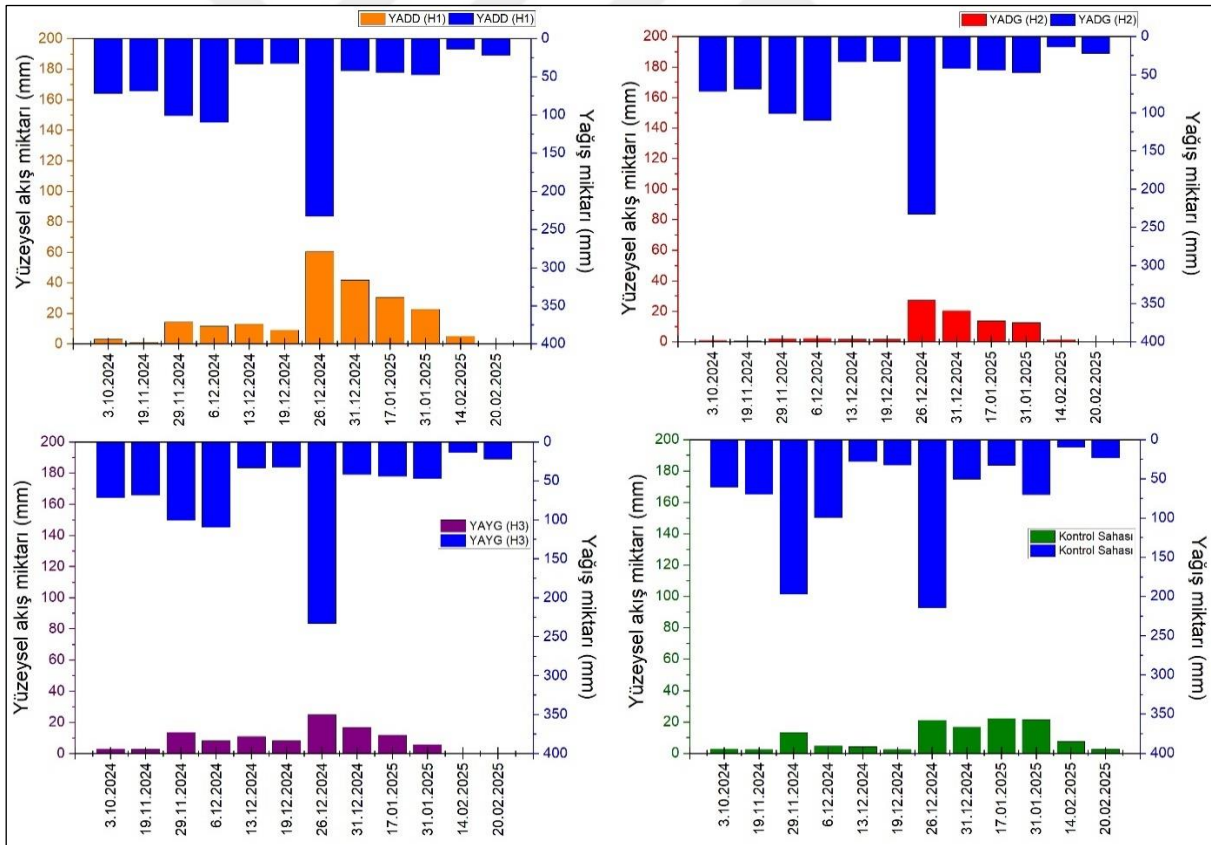
Yan sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3), 03.10.2024 ile 19.12.2024 tarihleri arasındaki yüzeysel akış miktarları, 26.12.2024 ve 31.12.2024 tarihleri arasındaki örnekleme dönemlerine göre daha düşüktür (Şekil 3.8). Bu dönemde, YAYG-H3'te yüzeysel akış miktarları, YADD-H1 ile birbirine yakındır ancak YADG-H2'ye göre daha yüksektir. En yüksek yüzeysel akış miktarı, 29.11.2024 tarihinde 100,8 mm yağışla 13,5 mm olarak ölçülmüştür. YAYG-H3'te, 26.12.2024 tarihinde en yüksek yüzeysel akış (24,8 mm) gözlemlenmiştir ve bu tarihten sonra yüzeysel akış düzenli olarak azalmıştır (Şekil 3.9). 26.12.2024 ile 14.02.2025 tarihleri arasında YAYG-H3'teki yüzeysel akış miktarı, YADD-H1 ve YADG-H2 havzalarına göre daha düşüktür.

Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2), 03.10.2024 ile 19.12.2024 tarihleri arasındaki yüzeysel akış miktarları, diğer havzalara kıyasla daha düşüktür. Bu dönemde, YADG-H2'deki en yüksek yüzeysel akış, 06.12.2024 tarihinde 109,7 mm yağışla 2,03 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.9). En düşük yüzeysel akış ise 19.11.2024 tarihinde 0,52 mm olmuştur. YADG-H2'de, 26.12.2024 tarihinde 233 mm yağış ile en yüksek yüzeysel akış (27,3 mm) gözlemlenmiştir. Ancak, YADG-H2 havzasındaki yüzeysel akış miktarı 26.12.2024

ile 14.02.2025 tarihleri arasında YAYG-H3'e göre daha yüksektir (Şekil 3.8). Bu dönemde, YADG-H2'de ölçülen yüzeysel akış, sırasıyla 31.12.2024, 17.01.2025, 31.01.2025 ve 14.02.2025 tarihlerinde 20,2 mm, 13,5 mm, 12,5 mm ve 1,43 mm olarak kaydedilmiştir.

Kontrol sahasında, 03.10.2024 ile 19.12.2024 tarihleri arasındaki yüzeysel akış miktarları, diğer örnekleme dönemlerine göre daha düşüktür. Kontrol sahasında, 29.11.2024 tarihinde yaklaşık 89 mm daha fazla yağış düşmüş ve 13,1 mm yüzeysel akış ölçülmüştür (Şekil 3.8). 26.12.2024 ile 31.01.2025 tarihleri arasında, kontrol sahasında yüzeysel akış miktarlarında ani artışlar veya azalışlar gözlemlenmemiştir. Kontrol sahasında, bu dönemde ölçülen yüzeysel akış miktarları sırasıyla 21,08 mm, 16,8 mm, 22,09 mm ve 21,5 mm olmuştur. Ayrıca, 20.02.2025 tarihindeki 23,5 mm yağışla yüzeysel akış gözlemlenmiştir (Şekil 3.9).

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında, toplam 819,3 mm yağış yangın sonrası rehabilite edilen havzalara düşerken, kontrol sahasına 888,7 mm yağış düşmüştür. Yangın sonrası doğal bırakılan havza (YADD-H1) 212,9 mm yüzeysel akış üretirken, YADG-H2 havzası 84 mm, YAYG-H3 havzası 106 mm ve kontrol sahası 122 mm yüzeysel akış üretmiştir.

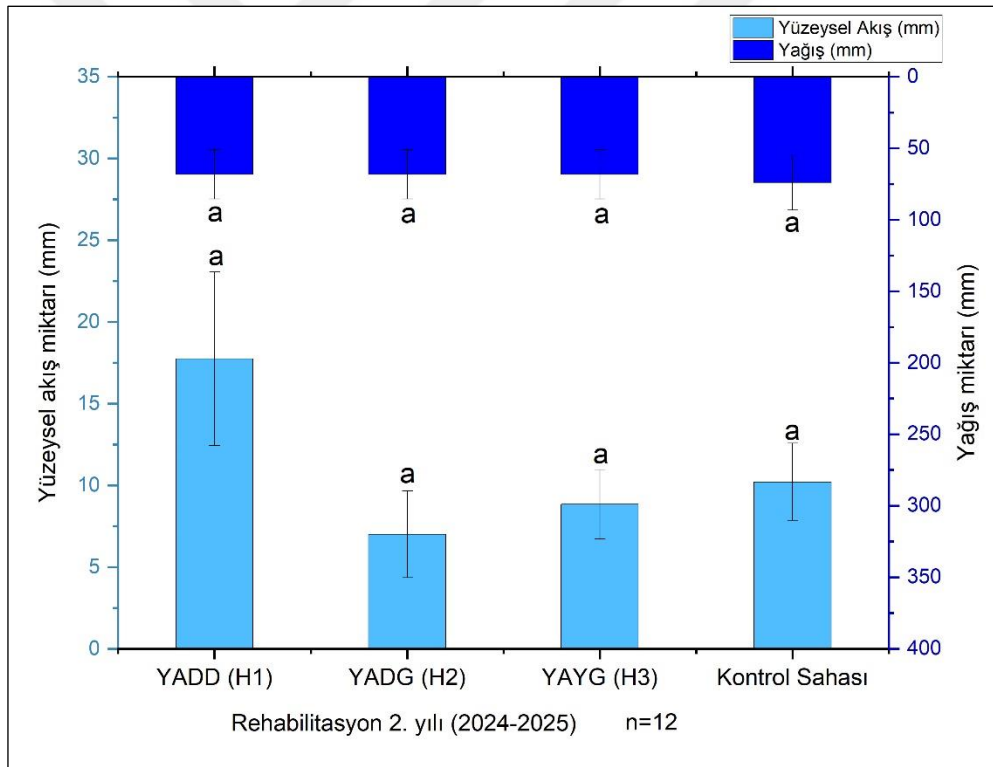


Şekil 3.9 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Örnekleme Döneminde Ölçülen Yüzeysel Akış ve Yağış Miktarları (mm)

Rehabilitasyonun ikinci yılında, dört farklı alanda yapılan 12 yağışlı örnekleme döneminin ortalama yüzeysel akış (mm) ve yağış (mm) miktarları belirlenmiştir (Şekil 3.9). Bu dönemde, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç havzaya ortalama 68,2 mm yağış

düşerken, kontrol sahasında bu değer 74,05 mm olarak ölçülmüştür. İstatistiksel olarak, yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahası arasındaki ortalama yağış miktarları benzer bulunmuştur ($p>0,05$) (Şekil 3.10).

Rehabilitasyonun ikinci yılı boyunca, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalar ve kontrol sahası arasında, ortalama yağış miktarları benzer olmakla birlikte, yüzeysel akış miktarları farklılık göstermektedir (Şekil 3.10). Bu dönemde ortalama en yüksek yüzeysel akış miktarı, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) 17,74 mm olarak ölçülmüştür. Bu havzayı, ortalama 10,21 mm ile kontrol sahası takip etmektedir. Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ve yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) sırasıyla ortalama 7 mm ve 8,83 mm yüzeysel akış miktarına sahip olmuştur. Bu iki havzada ölçülen ortalama yüzeysel akış miktarları, hem YADD-H1 hem de kontrol sahasından daha düşüktür (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Rehabilitasyonun İkinci Yılında 12 Farklı Yağışlı Örnekleme Dönemlerinde Ölçülen Ortalama Yüzeysel Akış (mm) ve Yağış Miktarları (mm)

3.3. Sediman Taşınım Süreçleri

3.3.1. Sediman Miktarı ve Oranları

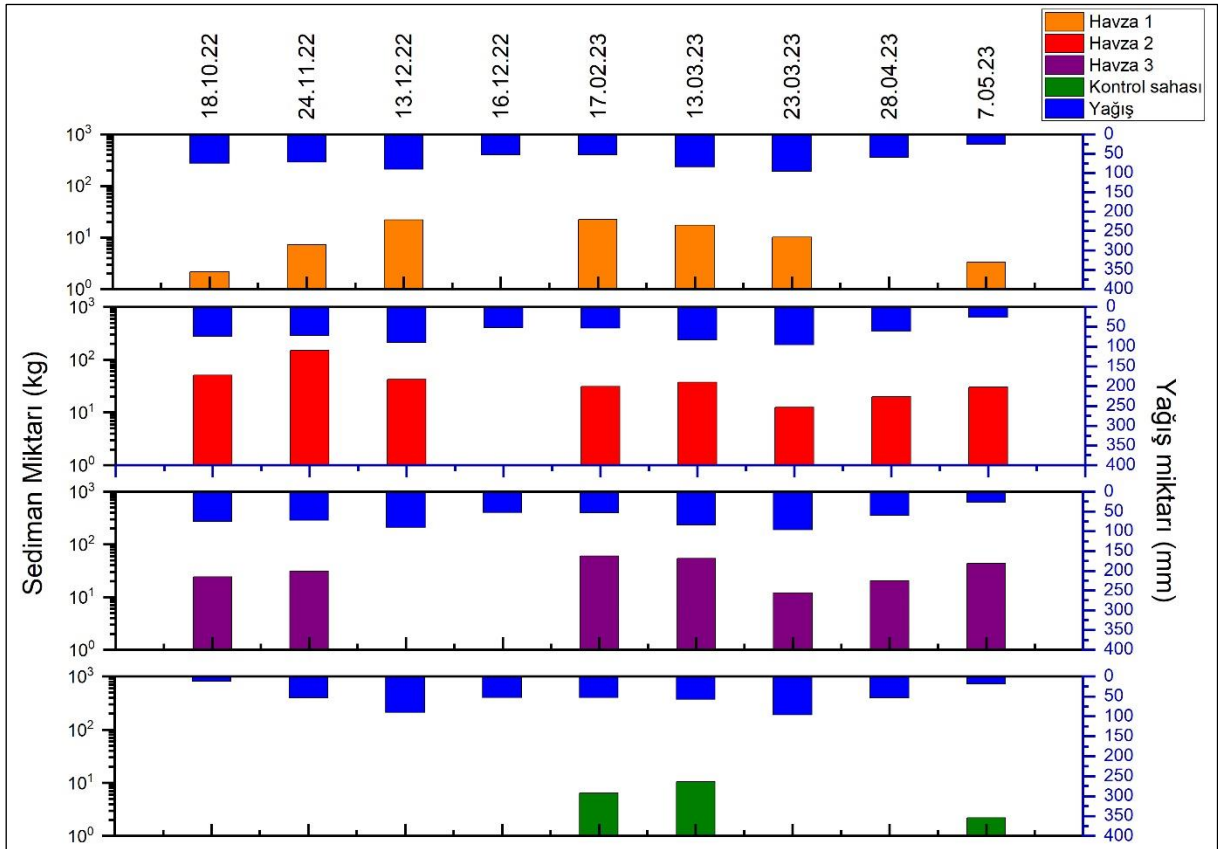
3.3.1.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

Üretim faaliyetleri (salvage logging) dönemi boyunca, her yağış olayından sonra Havza 1, Havza 2, Havza 3 ve kontrol sahasında yer alan akarsuların yataklarına üçer adet yerleştirilen sediman tuzaklarından malzemeler toplanmış ve her havzanın toplam sediman miktarları belirlenmiştir. Şekil 3.11, sekiz aylık dönem boyunca üretim faaliyeti yapılan havzalar ile yangın geçirmemiş kontrol sahasında oluşan dokuz farklı yağış olayını ve bu yağışlar sırasında taşınan sediman miktarlarını göstermektedir.

Bu dönemde taşınan sediman miktarları havzalara göre belirgin bir farklılık göstermiştir. Yağışlı dönemler arasında yağış miktarları nispeten benzer olmasına rağmen taşınan sediman miktarları oldukça farklıdır. Örneğin, Havza 1 ve Havza 3'te en fazla sediman taşınan yağış dönemi 17.02.2023 tarihinde olmuştur. Bu dönemde Havza 1 ve Havza 3'te sırasıyla 52,9 mm ve 53,2 mm yağış düşmüş ve sırasıyla 22,2 kg ve 59,7 kg sediman taşınmıştır. Havza 2'de ise 24.11.2022 tarihinde 72,5 mm yağışla 149,8 kg sediman taşınmıştır. Kontrol sahasında ise en fazla taşınan sediman 13.03.2023 tarihinde 57,7 mm yağışla 10,5 kg olarak ölçülmüştür (Şekil 3.11).

Bazı yağışlı dönemlerde, özellikle 16.12.2022 tarihinde dört havzada da 52,9 mm yağış meydana gelmesine rağmen sediman taşınımı olmamıştır. Ayrıca, Havza 1'de 28.04.2023 tarihinde 60,1 mm yağış olmasına rağmen sediman taşınımı olmamıştır. Havza 2'de 16.12.2022 dışında her yağışlı dönemde sediman taşınımı gerçekleşmiştir, ancak 23.03.2023 tarihinde 95,9 mm yağışla en düşük taşınan sediman miktarı 12,4 kg olmuştur (Şekil 3.11).

Havza 3'te 13.12.2022 ve 16.12.2022 tarihlerinde yağış olmasına rağmen sediman taşınımı olmamıştır. Diğer dönemlerde ise en düşük taşınan sediman miktarı, 23.03.2023 tarihinde 96 mm yağışla 12 kg olarak ölçülmüştür. Yangın geçirmemiş ve üretim faaliyeti yapılmayan kontrol sahasında ise yalnızca 17.02.2023, 13.03.2023 ve 07.05.2023 tarihlerinde sediman taşınmıştır. En düşük taşınan sediman miktarı 07.05.2023 tarihinde 19,2 mm yağışla 2,2 kg olarak ölçülmüştür. En yüksek yağışın olduğu 13.12.2022 ve 23.03.2023 tarihlerinde ise kontrol sahasındaki sediman tuzaklarında herhangi bir sediman birikimi olmamıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Üretim faaliyeti (Salvage Logging) dönemi boyunca Dokuz Farklı Yağış Olayı Döneminde Tuzaklarda Biriken Sediman Miktarları (kg)

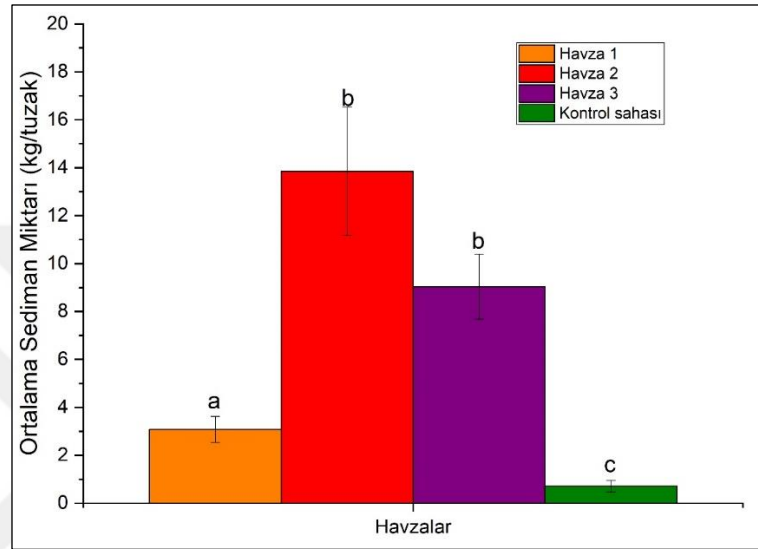
Üretim faaliyeti (salvage logging) dönemi boyunca, dokuz farklı yağışlı dönemde her havzaya ait sediman tuzakları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve her bir tuzak başına düşen ortalama sediman miktarları hesaplanmıştır (Şekil 3.12). Her havza için 9 yağışlı dönem ve 3 adet sediman tuzağı üzerinden yapılan değerlendirmelere göre, toplamda 27 sediman değeri üzerinden ortalama sediman miktarları hesaplanmış ve havzalar arasında istatistiksel karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bulgulara göre, üretim faaliyetleri süresince her bir tuzak başına düşen ortalama sediman miktarları bakımından havzalar arasında anlamlı farklar gözlemlenmiştir. En yüksek ortalama sediman miktarı Havza 2'de ölçülmüş olup, bu miktar 13,8 kg/tuzak olarak belirlenmiştir. Havza 3'te ise bu miktar 9 kg/tuzak olarak ölçülmüş ve Havza 2 ile Havza 3 arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır ($p>0,05$) (Şekil 3.12).

Diğer yandan, üretim faaliyetleri uygulanan havzalar arasında en düşük ortalama sediman miktarı Havza 1'de kaydedilmiştir (3 kg/tuzak). Havza 1'deki taşınan ortalama sediman miktarı, hem Havza 2'den hem de Havza 3'ten istatistiksel olarak daha düşük ve bu fark anlamlıdır ($p<0,05$). Ancak, Havza 1'de taşınan ortalama sediman miktarı, kontrol sahasında taşınan ortalama sediman miktarına göre daha yüksektir. Bu nedenle, Havza 1 ile

kontrol sahası arasındaki ortalama sediman miktarları arasında da istatistiksel fark vardır ($p<0,05$) (Şekil 3.12).

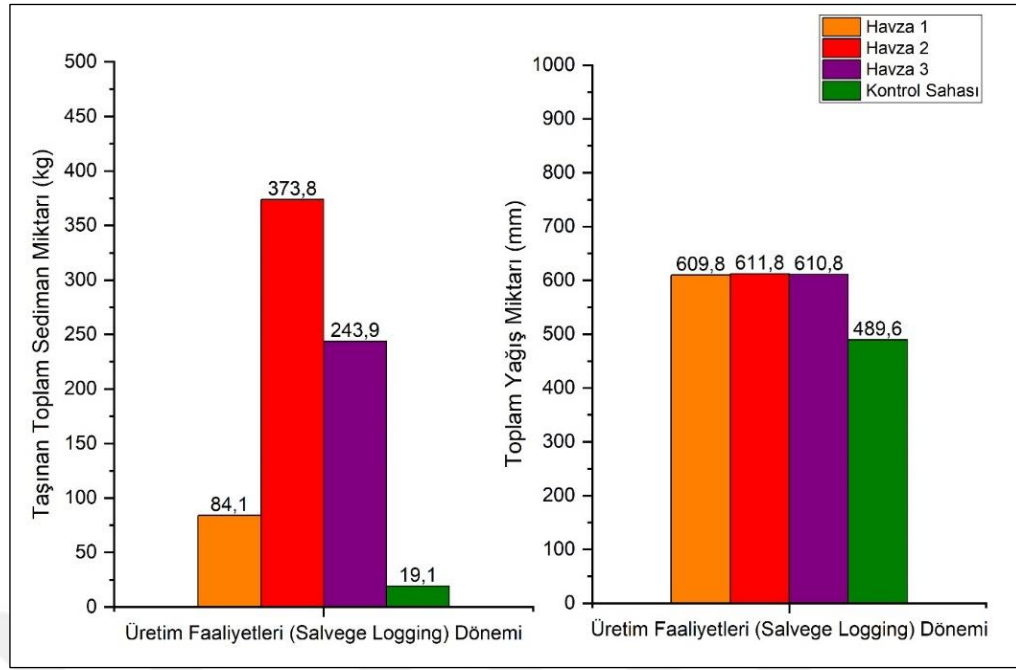
Kontrol sahasında ise en düşük taşınan sediman miktarı 0,7 kg/tuzak olarak ölçülmüştür. Kontrol sahasındaki taşınan ortalama sediman miktarı, üretim faaliyetleri yapılan havzalara göre çok daha düşüktür ve istatistiksel açıdan anlamlı bir fark gösterir ($p<0,05$). Ancak, Havza 1 ile kontrol sahası arasındaki taşınan ortalama sediman miktarı birbirine daha yakın olsa da yine de bu iki havza arasında istatistiksel fark bulunmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemi Havzalara Göre Taşınan Ortalama Sediman Miktarı (kg/tuzak)

Sekiz aylık üretim faaliyetleri (salvage logging) dönemi boyunca, havzalar arasında taşınan sediman miktarlarında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.13). Yangın geçirmiş ve ardından üretim faaliyetleri uygulanan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te taşınan toplam sediman miktarları, yangın geçirmemiş kontrol sahasına kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olmuştur. Bu dönemde, Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'e toplamda sırasıyla 609,8 mm, 611,8 mm ve 610,8 mm yağış düşerken, kontrol sahasında bu değer 489,6 mm olarak ölçülmüştür. Yağışa bağlı olarak taşınan toplam sediman miktarları ise sırasıyla Havza 1'de 84,1 kg, Havza 2'de 373,8 kg, Havza 3'te 243,9 kg ve kontrol sahasında 19,1 kg olarak belirlenmiştir (Şekil 3.13).

Bu veriler ışığında, taşınan sediman miktarları, kontrol sahasına kıyasla Havza 1'de 4,4 kat, Havza 2'de 19,5 kat ve Havza 3'te 12,7 kat daha fazla olmuştur (Şekil 3.13). Sonuç olarak, sekiz aylık süreç boyunca taşınan toplam sediman miktarları en yüksekten en düşüğe doğru Havza 2, Havza 3, Havza 1 ve kontrol sahası şeklinde sıralanmıştır. Beklenildiği gibi, yangın geçirmemiş ve üretim faaliyeti uygulanmamış olan kontrol sahasında taşınan sediman miktarı en düşük seviyede kalmıştır.



Şekil 3.13 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemindeki Toplam Yağış (mm) ve Tuzaklarda Biriken Sediman Miktarı (kg)

3.3.1.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Rehabilitasyon döneminin birinci yılında, 16 farklı yağışlı dönemde ölçülen yüzeysel akım miktarları (m^3/ha) ve taşınan askıda katı madde miktarları (kg/ha), yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile yangın geçirmemiş kontrol sahaları arasında anlamlı farklılıklar göstermiştir (Şekil 3.14).

Havzalar arasında ortak gözlemlerden biri, 05.12.2023 tarihinden itibaren akım miktarlarında kısmi bir artış eğiliminin başlamasıdır. Bu artış, 23.01.2024 tarihinde tüm havzalarda zirveye ulaşmış, ardından ise genel olarak bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Öte yandan, yangın sonrası müdahale edilen havzalarda en yüksek süspanse sediman taşınımı 13.12.2023 ve 28.12.2023 tarihlerinde kaydedilmiştir (Şekil 3.14).

Yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1), rehabilitasyonun ilk yılında ölçülen akım değerleri, diğer havzalara kıyasla belirgin biçimde yüksektir. Bu havzada, 22.11.2023 tarihi dışındaki tüm örnekleme dönemlerinde süspanse sediman taşınımı meydana gelmiştir. Özellikle 27.11.2023, 13.12.2023 ve 28.12.2023 tarihlerinde sediman taşınımı oldukça yüksektir (Şekil 3.14). Bu tarihlerde ölçülen akım değerleri sırasıyla $21 m^3/ha$, $110,75 m^3/ha$ ve $213,89 m^3/ha$; taşınan süspanse sediman miktarları ise sırasıyla $36,99 kg/ha$, $360,99 kg/ha$ ve $502,08 kg/ha$ 'dır. Ancak, en yüksek akımın gerçekleştiği dönemlerde taşınan sediman miktarının bu düzeye ulaşmadığı görülmüştür. Nitekim 11.01.2024, 23.01.2024 ve 15.02.2024 tarihlerinde ölçülen akım miktarları sırasıyla $449,64 m^3/ha$, $1.039,56 m^3/ha$ ve $354,45 m^3/ha$

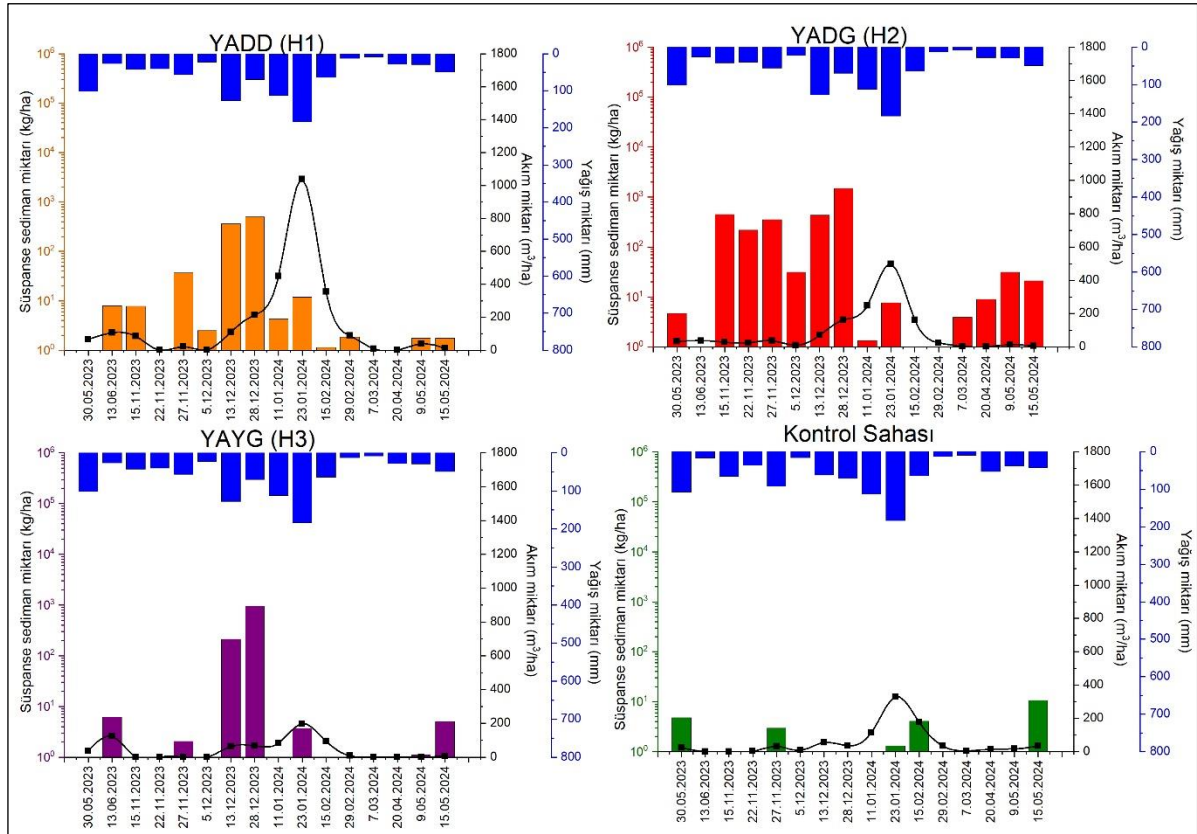
iken, bu dönemlerde taşınan sediman miktarları sadece 4,26 kg/ha, 11,88 kg/ha ve 1,137 kg/ha olarak ölçülmüştür (Şekil 3.14).

Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2), tüm örnekleme dönemlerinde hem yüzeysel akış hem de süspanse sediman taşınımı gözlenmiştir. Bu havzada akım miktarları, YADD-H1'e göre daha düşük olmasına rağmen, yağışlı dönemlerde taşınan askıda sediman miktarları genellikle daha yüksektir. Özellikle Kasım ve Aralık ayları süspanse sediman taşınımı açısından kritik dönemlerdir. Bu aylarda, akım değerleri Ocak ve Şubat aylarına kıyasla düşük olmasına rağmen sediman taşınımı oldukça fazladır. Yaz dönemi sonrası ilk üç yağışlı günde (15.11.2023, 22.11.2023 ve 27.11.2023) sırasıyla 27,71 m³/ha, 25,11 m³/ha ve 38,02 m³/ha akım ölçülmüş; taşınan sediman miktarları ise 447,43 kg/ha, 220,01 kg/ha ve 355,08 kg/ha olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.14). Akım miktarları 05.12.2023'ten itibaren 23.01.2024'e kadar düzenli olarak artarken, en yüksek sediman taşınımı 28.12.2023 tarihinde gerçekleşmiş ve bu tarihte 162,53 m³/ha akıma karşılık 1.492,96 kg/ha sediman taşınmıştır. Ancak, 11.01.2024'te akım artmasına rağmen taşınan sediman miktarında keskin bir azalma olmuştur. Bu durum 11.01.2024, 23.01.2024 ve 15.02.2024 tarihlerinde de devam etmiş; yüksek akımlara rağmen düşük sediman taşınımı gözlenmiştir. 07.02.2024–15.05.2024 arasındaki dönemde ise akım değerleri kış aylarına göre düşük olsa da sediman taşınımında artış eğilimi gözlenmiştir. Bu dönemlerde taşınan sediman miktarı kış aylarına göre daha yüksek, ancak kasım ve aralık aylarına kıyasla daha düşüktür (Şekil 3.14).

Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3), 15.11.2023, 22.11.2023, 05.12.2023, 07.03.2024 ve 20.04.2024 tarihlerindeki yağışlara rağmen yüzeysel akış ve sediman taşınımı gözlenmemiştir (Şekil 3.14). Benzer şekilde, yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) ve kontrol sahasında yalnızca bir örnekleme döneminde yağış olmasına karşın yüzeysel akış ve sediman taşınımı meydana gelmemiştir. YAYG-H3'te en yüksek sediman taşınımı 13.12.2023 ve 28.12.2023 tarihlerinde kaydedilmiştir. 13.12.2023 tarihinde yaklaşık 63,3 m³/ha yüzeysel akış ile 213,45 kg/ha sediman taşınırken, 28.12.2023 tarihinde 66,81 m³/ha akım karşılığında 956,59 kg/ha sediman taşınmıştır. Bu sediman miktarı, akım miktarının YADD-H1'e göre daha düşük olmasına rağmen daha yüksek olmuştur. Ayrıca, diğer rehabilitasyon uygulanan havzalarda olduğu gibi 11.01.2024, 23.01.2024 ve 15.02.2024 tarihlerinde akım miktarlarında artış görülmesine rağmen sediman taşınımı belirgin şekilde azalmıştır (Şekil 3.14).

Yangın geçirmemiş kontrol sahasında, rehabilitasyon döneminin ilk yılında taşınan süspanse sediman miktarları, diğer havzalara kıyasla genel olarak daha düşüktür. Bu sahada 13.06.2023 tarihinde yağış gerçekleşmesine rağmen yüzeysel akış ve sediman taşınımı

meydana gelmemiştir. Ayrıca, örnekleme dönemleri arasında taşınan sediman miktarlarının hem düşük hem de birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Kontrol sahasında en yüksek sediman taşınımı 30.05.2023, 27.11.2023, 15.02.2024 ve 15.05.2024 tarihlerinde ölçülmüştür. Bu tarihlerdeki akım miktarları sırasıyla 23,31 m³/ha, 30,84 m³/ha, 177,33 m³/ha ve 33,36 m³/ha; taşınan sediman miktarları ise sırasıyla 4,79 kg/ha, 2,95 kg/ha, 4,07 kg/ha ve 10,58 kg/ha'dır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Rehabilitasyonun Birinci Yılında 16 Farklı Yağışlı Olay Döneminde Taşınan Süspansed Sediman (kg/ha), Akım (m³/ha) ve Yağış Miktarları (mm)

Rehabilitasyon döneminin birinci yılında, 16 farklı yağışlı olay süresince her bir havzada akarsu yataklarına yerleştirilen sediman tuzaklarında biriken yatak yükü (0,5 mm'nin üzerindeki taneler; iri kum, çakıl ve blok boyutu) miktarları belirlenmiştir (Şekil 3.15). Elde edilen bulgulara göre, dört havzanın tamamında taşınan yatak yükü miktarları, süspansed sedimanlara kıyasla oldukça düşüktür. Rehabilitasyonun ilk yılında taşınan yatak yükünün toplam sediman içerisindeki oranı, yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) %0,05, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) %0,048, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) %0,002 ve yangın geçirmemiş kontrol sahasında %0,091 olarak hesaplanmıştır.

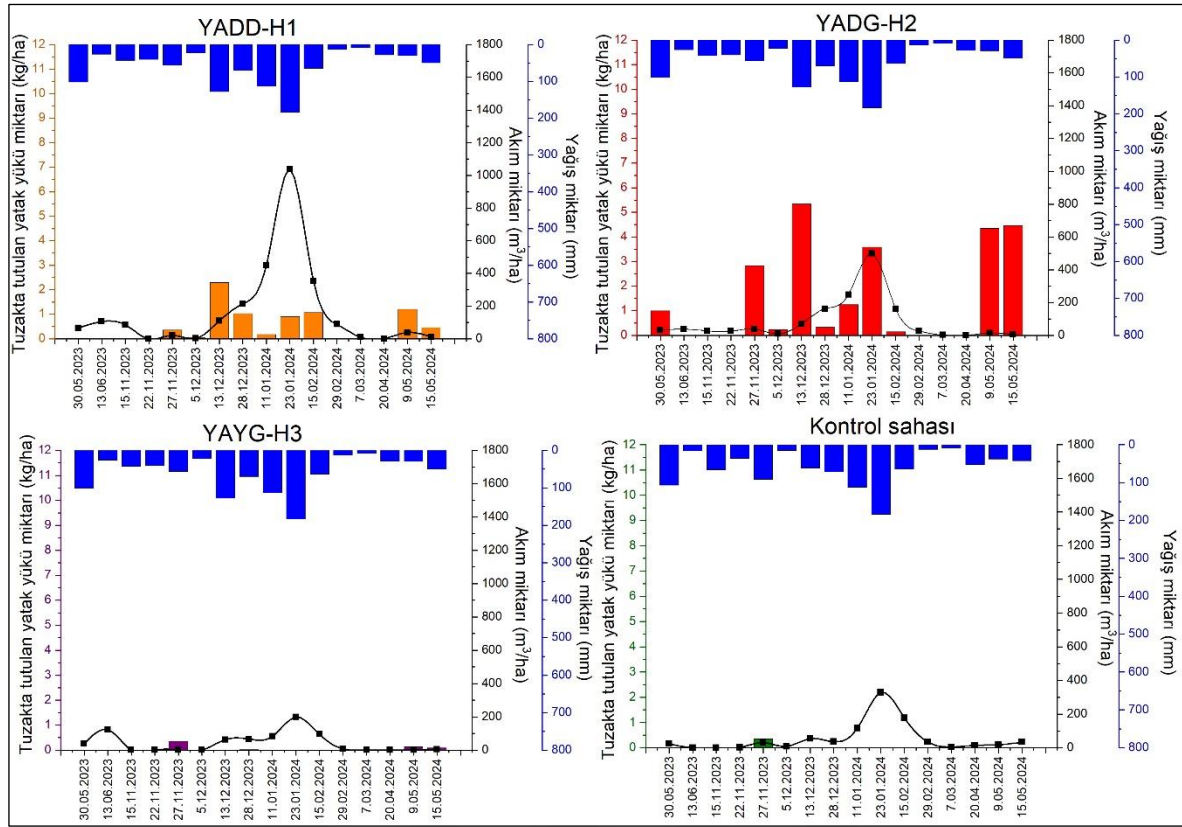
Yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1), taşınan yatak yükü miktarı süspansed sediman miktarına benzer şekilde, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya

(YADG-H2) göre daha düşük, ancak sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile kontrol sahasına göre daha yüksektir (Şekil 3.15). Bu havzada toplamda sekiz farklı yağışlı olayda yatak yükü taşınmış olup, 27.11.2023 ile 15.02.2024 tarihleri arasındaki dönemde yatak yükü taşınımı süreklilik göstermiştir. Buna karşılık, 13.06.2023–22.11.2023 ve 29.02.2024–20.04.2024 tarihleri arasında herhangi bir yatak yükü taşınımı kaydedilmemiştir. En yüksek yatak yükü miktarı 13.12.2023 tarihinde, 110,75 m³/ha’lık akım sırasında 2,25 kg/ha olarak ölçülmüştür (Şekil 3.15).

Bu dönemde havzalar arasında en yüksek yatak yükü miktarı, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) kaydedilmiştir. Bu havzada yaklaşık 11 farklı örnekleme döneminde yatak yükü taşınımı gözlenmiştir. Özellikle 22.11.2023–15.02.2024 tarihleri arasında taşınım süreklilik göstermiştir. En yüksek yatak yükü, 13.12.2023 tarihinde 5,33 kg/ha olarak ölçülmüş, bu tarihten itibaren 23.01.2024’e kadar hem akım hem de yatak yükü miktarlarında düzenli bir artış izlenmiştir. Ayrıca, 09.05.2024 ve 15.05.2024 tarihlerinde taşınan yatak yükü miktarları sırasıyla 4,34 kg/ha ve 4,46 kg/ha’dır (Şekil 3.15).

Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3), ölçülen yatak yükü miktarı rehabilitasyon uygulanan diğer iki havzaya kıyasla daha düşük, ancak kontrol sahasına göre daha yüksektir. Bu havzada toplamda yedi farklı örnekleme döneminde yatak yükü taşınmıştır. Diğer havzaların aksine, bu havzada yatak yükü taşınımı süreklilik göstermemiştir. En yüksek yatak yükü miktarı 27.11.2023 tarihinde, 0,80 m³/ha’lık akım esnasında 0,34 kg/ha olarak ölçülmüştür. Bunun dışında, 09.05.2024 ve 15.05.2024 tarihlerinde sırasıyla 0,131 kg/ha ve 0,08 kg/ha yatak yükü taşınmıştır (Şekil 3.15).

Kontrol sahasında taşınan yatak yükü miktarı, diğer tüm havzalardan daha düşük düzeydedir. Bu sahada toplam sekiz farklı örnekleme döneminde yatak yükü taşınımı gözlenmiştir. En yüksek yatak yükü, 27.11.2023 tarihinde 30,84 m³/ha’lık akım sırasında 0,349 kg/ha olarak kaydedilmiştir. 13.06.2023, 15.11.2023, 05.12.2023 ve 23.01.2024–20.04.2024 tarihleri arasında ise herhangi bir yatak yükü taşınımı gerçekleşmemiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Rehabilitasyon Döneminin İlk Yılında 16 Yağışlı Örneklem Döneminde Taşınan Yatak Yükü (kg/ha), Akım (m³/ha) ve Yağış Miktarı (mm)

Şekil 3.16, rehabilitasyonun ikinci yılında yangın sonrası farklı müdahalelerin uygulandığı üç havza (YADD-H1: doğal bırakılan, YADG-H2: tohumlanan ve dal serilen, YAYG-H3: sürülen ve fidan dikilen) ile kontrol sahasında 12 farklı örneklem dönemine ait yağış, akım ve taşınan süspanse sediman miktarlarını göstermektedir. Genel olarak, dört havzada da 26.12.2024 ve 31.12.2024 tarihlerinde akım miktarında artış gözlenmiştir; bu artışa paralel olarak taşınan sediman miktarları da artmıştır. Rehabilitasyon uygulanan üç havzada, 20.02.2024 tarihinde yağış olmasına rağmen yüzeysel akım oluşmamıştır. Buna karşın kontrol sahasında her örneklem döneminde akış meydana gelmiştir; ancak yalnızca 20.02.2024 tarihinde süspanse sediman taşınımı gözlenmemiştir.

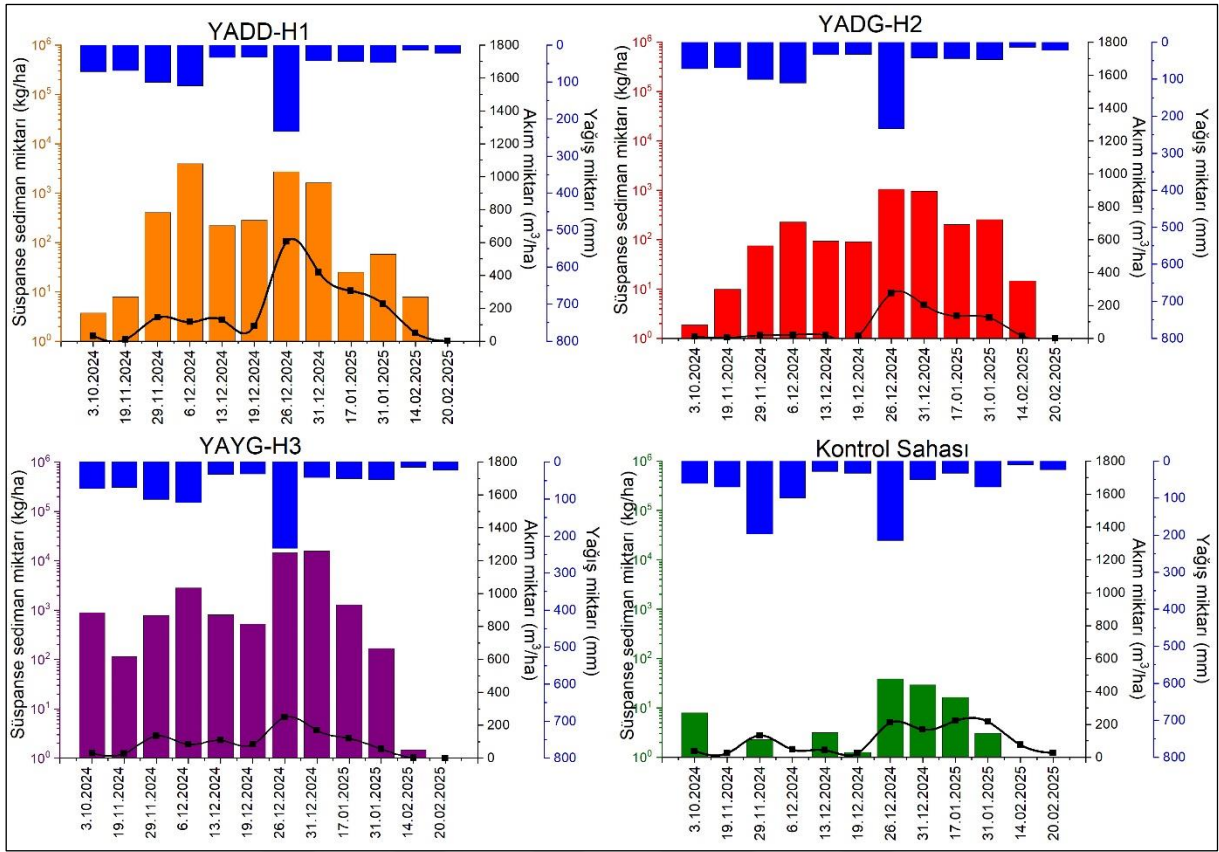
Örneklem dönemlerinde havzalara düşen yağış miktarları benzer olmasına rağmen, akım ve taşınan sediman miktarları arasında belirgin farklar tespit edilmiştir (Şekil 3.16). YAYG-H3'te, 14.02.2024 hariç neredeyse tüm örneklem dönemlerinde diğer havzalardan çok daha fazla süspanse sediman taşınmıştır. Özellikle ilk yağışlı dönem olan 03.10.2024 tarihinde 30,1 m³/ha akım ile yaklaşık 892,5 kg/ha süspanse sediman taşınmıştır. Bu havzada 19.11.2024–06.12.2024 tarihleri arasında akım miktarı önemli ölçüde değişmemiş olmasına rağmen taşınan sediman miktarı artarak sırasıyla 114,1, 771,5 ve 2804,5 kg/ha olarak

kaydedilmiştir. En fazla sediman taşınımı ise 26.12.2024 (14.510,1 kg/ha) ve 31.12.2024 (15.597,9 kg/ha) tarihlerinde gerçekleşmiştir (Şekil 3.16).

YADD-H1’de ölçülen akım değerleri genel olarak diğer havzalardan yüksektir. Ancak taşınan sediman miktarı YAYG-H3’e göre düşük, YADG-H2’den ve kontrol sahasından ise yüksektir. Bu havzada sediman taşınımı YADG-H2 ile benzer bir seyir izlese de, artış oranları daha yüksektir. Örneğin 03.10.2024 ve 19.11.2024 tarihlerinde akım miktarları sırasıyla 31,4 ve 9,06 m³/ha, taşınan sediman miktarları ise 3,75 ve 7,78 kg/ha iken, 29.11.2024 ve 06.12.2024 tarihlerinde sırasıyla 144,4 ve 116,4 m³/ha akıma karşılık 407,4 ve 3931,2 kg/ha sediman taşınmıştır. 06.12.2024 tarihinde akımın zirve yapmamasına rağmen en fazla sediman taşınımı bu tarihte gerçekleşmiştir (Şekil 3.16).

YADG-H2’de taşınan sediman miktarları genel olarak YAYG-H3 ve YADD-H1’den düşük, kontrol sahasından ise yüksektir. İlk altı örnekleme döneminde (03.10.2024–19.12.2024) akım miktarları diğer üç havzaya kıyasla daha düşüktür. Ancak bu dönemde taşınan sediman miktarları kontrol sahasına göre oldukça yüksektir. Sediman taşınımı 03.10.2024’ten 06.12.2024’e kadar artış göstermiştir; ancak artış oranı YADD-H1’e kıyasla düşüktür. Örneğin 03.10.2024 ve 19.11.2024 tarihlerinde 10,83 ve 5,20 m³/ha akıma karşılık 1,85 ve 9,80 kg/ha sediman taşınmıştır. 26.12.2024 ve 31.12.2024 tarihlerinde akım miktarları sırasıyla 273,8 ve 202,7 m³/ha, taşınan sediman miktarları ise 1.059,8 ve 961,5 kg/ha’dır. Bu tarihlerde YAYG-H3’e göre akım daha yüksek olmasına rağmen sediman miktarı daha düşüktür (Şekil 3.16).

Kontrol sahasında ise sediman taşınımı diğer üç havzaya kıyasla oldukça düşüktür. Özellikle 03.10.2024 (7,97 kg/ha) ile 26.12.2024, 31.12.2024 ve 17.01.2025 gibi yüksek akım gözlenen dönemlerde (örneğin 26.12.2024’te 210,8 m³/ha akıma karşılık 38,7 kg/ha sediman) belirgin taşınım artışı olmuştur (Şekil 3.16). Ancak 29.11.2024’te diğer havzalardan yaklaşık 89 mm daha fazla yağış düşmesine rağmen sadece 2,28 kg/ha sediman taşınmıştır. Genel olarak bu havzada, 26.12.2024’ten itibaren akım düzenli azalmamasına rağmen sediman taşınımı azalmıştır.



Şekil 3.16 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Örnekleme Döneminde Taşınan Süspansed Sediman (kg/ha), Akım (m^3/ha) ve Yağış Miktarı (mm)

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında 12 farklı yağışlı olay döneminde havzalardaki akarsuların yatağındaki sediman tuzaklarında tutulan yatak yükü miktarları (kg/ha), akım miktarları (m^3/ha) ve yağış miktarları (mm) belirlenmiştir (Şekil 3.17). Bu dönemde yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2) ve yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzalarda (YAYG-H3) ortak olarak 17.01.2025, 14.02.2025 ve 20.02.2025 tarihlerinde yatak yükü taşınmamıştır. Kontrol sahasında ise 06.12.2024, 13.12.2024, 19.12.2024, 17.01.2025, 14.02.2025 ve 20.02.2025 tarihleri olmak üzere toplamda altı örnekleme döneminde yatak yükü taşınmamıştır (Şekil 3.17). Genel olarak havzalarda taşınan yatak yükü miktarları, süspansed sediman miktarlarına çok daha düşüktür. Buna göre yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) taşınan toplam sediman içerisindeki yatak yükünün oranı %0,12, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) taşınan toplam sediman içerisindeki yatak yükünün oranı %1,22, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) bu oran %0,08 ve son olarak kontrol sahasında taşınan toplam sediman içerisindeki yatak yükünün oranı ise %8,5'tir.

Bu dönemde örnekleme dönemlerinde taşınan yatak yükü miktarları bakımından havzalar arasında önemli farklar vardır. Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) örnekleme

dönemlerinde taşınan yatak yükü miktarları, hem yangın sonrası doğal haline bırakılan havzaya (YADD-H1) hem de kontrol sahasına göre çok daha fazladır. Havzalar arasında taşınan en düşük yatak yükü miktarı ise kontrol sahasındadır (Şekil 3.17).

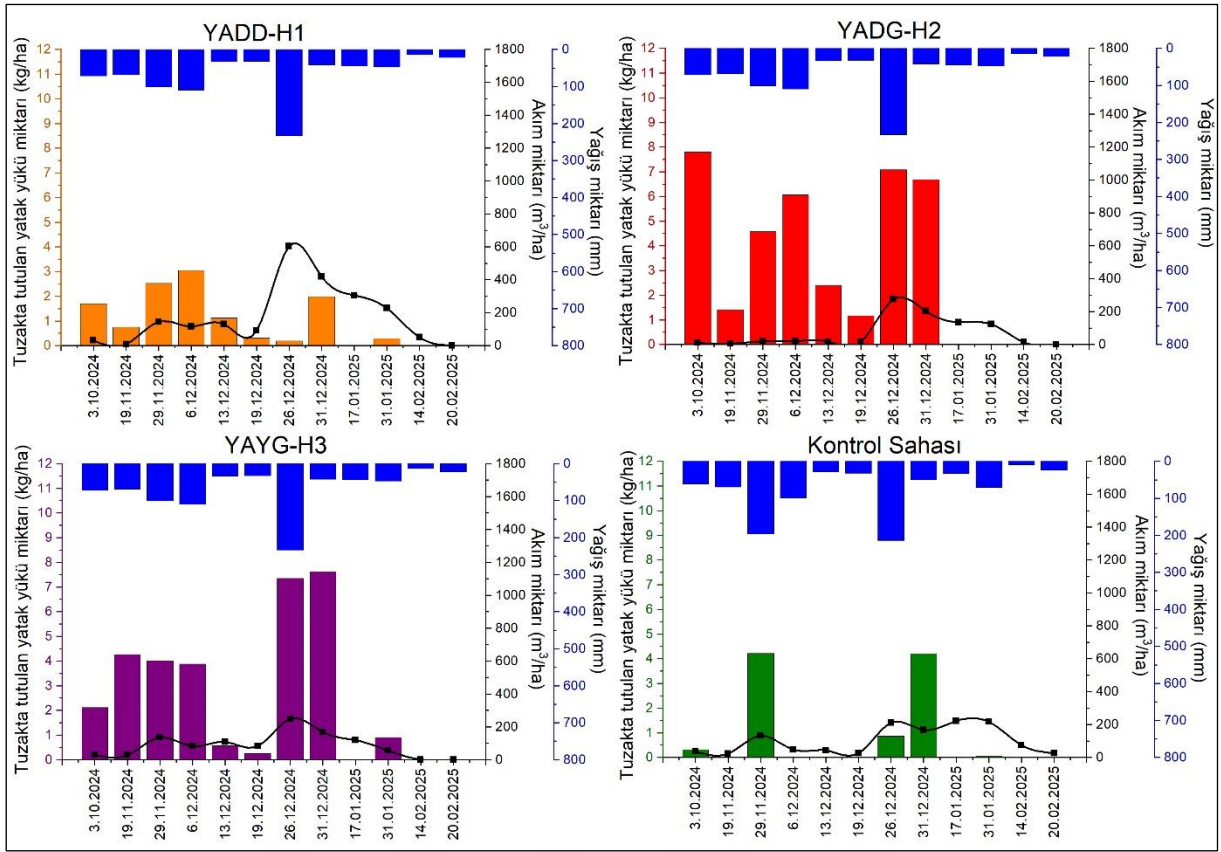
Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 03.10.2024, 26.12.2024 ve 31.12.2024 örnekleme tarihlerinde en yüksek yatak yükü miktarları ölçülmüştür. Buna göre 03.10.2024, 26.12.2024 ve 31.12.2024 tarihlerindeki akım miktarları sırasıyla 10,8 m³/ha, 273,8 m³/ha ve 202,7 m³/ha olup, bu örnekleme dönemlerinde taşınan yatak yükü miktarı sırasıyla 7,8 kg/ha, 7,08 kg/ha ve 6,67 kg/ha'dır. 19.12.2024 tarihinden 06.12.2024 tarihine kadar olan dönemde yatak yükü miktarı düzenli olarak artmıştır. 06.12.2024 tarihinden 19.12.2024 tarihine kadar olan dönemde ise taşınan yatak yükü miktarı düzenli olarak azalmıştır (Şekil 3.17).

Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 19.11.2024 tarihinden 06.12.2024 tarihini de içerisine alan örnekleme dönemlerinde taşınan yatak yükü miktarları birbirine nispeten benzerdir (Şekil 3.17). Buna göre 19.11.2024, 29.11.2024 ve 06.12.2024 tarihlerinde ölçülen akım miktarları sırasıyla 28,3 m³/ha, 135,1 m³/ha ve 82,9 m³/ha olup, bu dönemde taşınan yatak yükü miktarı ise sırasıyla 4,26 kg/ha, 4,01 kg/ha ve 3,88 kg/ha'dır. Ardından gelen 13.12.2024 ve 19.12.2024 örnekleme tarihlerinde taşınan yatak yükü miktarları önemli oranda azalmıştır. Bu havzada en fazla yatak yükü miktarı ise akımın en yüksek olduğu 26.12.2024 ve 31.12.2024 tarihlerinde taşınmıştır. Bu tarihlerde akım miktarı sırasıyla 248,5 m³/ha ve 168,5 m³/ha olarak ölçülmüş ve bu dönemde taşınan yatak yükü miktarı ise sırasıyla 7,35 kg/ha ve 7,62 kg/ha'dır. Bu havzada 03.10.2024 tarihinden 19.12.2024 örnekleme tarihi de dahil olmak üzere bu sürede taşınan yatak yükü miktarı, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) göre daha azdır. Ancak bu havzada akımın arttığı 26.12.2024 ve 31.12.2024 örnekleme tarihlerinde taşınan yatak yükü miktarı, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzadan (YADG-H2) daha fazladır (Şekil 3.17).

Yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) örnekleme dönemlerinde ölçülen akım miktarları fazla olmasına rağmen, taşınan yatak yükü miktarları ise yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzadan (YAYG-H3) daha düşük, kontrol sahasından ise daha fazladır. Bu havzada 19.11.2024 tarihinden 06.12.2024 tarihine kadar olan dönemde, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) benzer şekilde düzenli olarak artmıştır (Şekil 3.17). Ancak bu artış miktarı, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) oranla çok daha düşük seviyededir. 06.12.2024 tarihinde taşınan en yüksek yatak yükü miktarı, bu tarihten 26.12.2024 örnek tarihine kadar düzenli olarak azalmıştır. Bu havzada 19.12.2024, 29.11.2024

ve 06.12.2024 tarihlerinde ölçülen akım miktarları 9,06 m³/ha, 144,4 m³/ha ve 116,4 m³/ha olup, bu tarihlerde taşınan yatak yükü miktarı ise sırasıyla 0,74 kg/ha, 2,52 kg/ha ve 3,04 kg/ha'dır. Bunun haricinde 31.12.2024 tarihinde akımın miktarı artmış (418,5 m³/ha) ve bu örnekleme tarihinde taşınan yatak yükü miktarı ise 1,98 kg/ha'dır (Şekil 3.17).

Kontrol sahasında örnekleme dönemlerinde taşınan yatak yükü miktarları genel olarak farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalardan daha düşüktür. Bu havzada toplamda 6 örnekleme döneminde yatak yükü taşınmıştır. 03.10.2024, 29.11.2024, 26.12.2024 ve 31.12.2024 örnekleme tarihlerinde taşınan yatak yükü miktarları ön plana çıkmaktadır (Şekil 3.17). Buna göre 03.10.2024 tarihinde 37,86 m³/ha'lık akım esnasında yaklaşık olarak 0,31 kg/ha yatak yükü taşınmıştır. 29.12.2024 örnekleme tarihinde farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış üç havzadan yaklaşık olarak 89 mm daha fazla yağış meydana gelmiş ve bu dönemde taşınan yatak yükü miktarı (4,22 kg/ha), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ve yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile benzer; fakat yangın sonrası doğal haline bırakılan havzadan (YADD-H1) daha yüksektir. Bunun haricinde 26.12.2024 ve 31.12.2024 tarihlerinde taşınan yatak yükü miktarı ise sırasıyla 0,86 kg/ha ve 4,21 kg/ha'dır. Bu iki dönemde taşınan yatak yükü miktarı, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ve yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzadan (YAYG-H3) çok daha düşük; ancak yangın sonrası doğal haline bırakılan havzadan (YADD-H1) ise daha yüksektir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Örnekleme Döneminde Ölçülen Yatak Yükü (kg/ha), Akım (m³/ha) ve Yağış Miktarları (mm)

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında, 12 farklı örnekleme döneminde farklı müdahale türlerinin uygulandığı üç havza ile kontrol sahasında taşınan ortalama süspansediman ve yatak yükü miktarları (kg/ha) belirlenmiştir (Şekil 3.18). Bu dönemde tüm havzalarda taşınan süspansediman miktarları, yatak yükü miktarlarına kıyasla oldukça yüksektir. Ayrıca süspansediman miktarları açısından havzalar arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir.

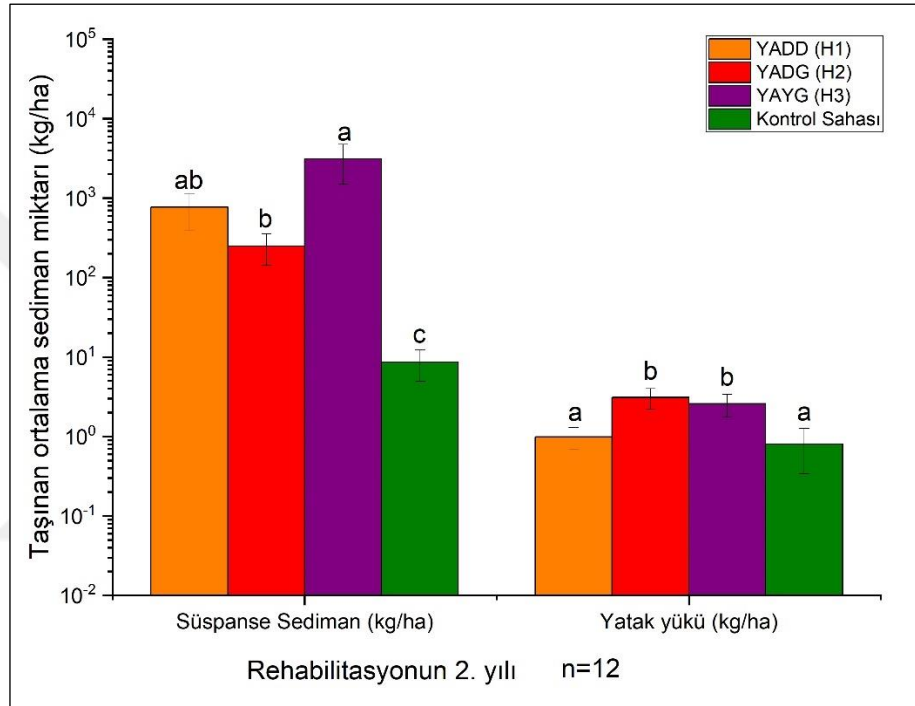
En yüksek ortalama süspansediman miktarı, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 3.122,2 kg/ha olarak ölçülmüştür. Bu havzayı, doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) 769,6 kg/ha ile takip etmiştir. En düşük değer ise yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 249,2 kg/ha olarak kaydedilmiştir. Kontrol sahasında ise ortalama süspansediman taşınımı yalnızca 8,67 kg/ha'dır (Şekil 3.18).

Bu bulgular, rehabilitasyon uygulanan üç havzada taşınan ortalama süspansediman miktarlarının kontrol sahasına kıyasla anlamlı derecede yüksek olduğunu göstermektedir ($p < 0,05$). Müdahale türleri karşılaştırıldığında ise YAYG-H3, YADD-H1 ile istatistiksel olarak benzer ($p > 0,05$), ancak YADG-H2'den anlamlı derecede farklıdır ($p < 0,05$) (Şekil 3.18).

Yatak yükü açısından bakıldığında, sediman taşınımındaki sıralama süspansedimandan farklılık göstermektedir. En yüksek ortalama yatak yükü miktarı, yangın sonrası

tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 3,1 kg/ha olarak belirlenmiştir. Bunu, sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) 2,58 kg/ha ile takip etmiştir. Bu iki havza arasında istatistiksel fark bulunmamaktadır ($p > 0,05$); ancak her ikisi de hem doğal bırakılan havzadan (YADD-H1, 0,99 kg/ha) hem de kontrol sahasından (0,80 kg/ha) istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklıdır ($p < 0,05$) (Şekil 3.18).

Yatak yükü açısından YADD-H1 ve kontrol sahası arasında istatistiksel fark bulunmazken ($p > 0,05$), her iki havza da YADG-H2 ve YAYG-H3'e kıyasla anlamlı şekilde daha düşük taşınım göstermektedir ($p < 0,05$).



Şekil 3.18 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Örnekleme Döneminde Havzalara Göre Taşınan Ortalama Süspansed Sediman ve Yatak Yükü Miktarı (kg/ha)

3.3.2. Tane Boyutu Özellikleri

3.3.2.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

Üretim faaliyetleri (salvage logging) dönemi boyunca meydana gelen dokuz yağış olayında, Havza 1, Havza 2, Havza 3 ve kontrol sahasında kurulu sediman tuzaklarında biriken materyaller, tane boyutuna göre >64 mm, 64–4 mm, 4–2 mm, 2–1 mm, 1–0,5 mm ve $<0,5$ mm olmak üzere altı sınıfa ayrılmıştır (Şekil 3.19). Taşınan sedimanların tane boyutu dağılımı, zaman içinde belirgin değişiklikler göstermiştir. Sediman özellikleri dikkate alındığında, taşınım dinamikleri üç dönem şeklinde sınıflandırılabilir.

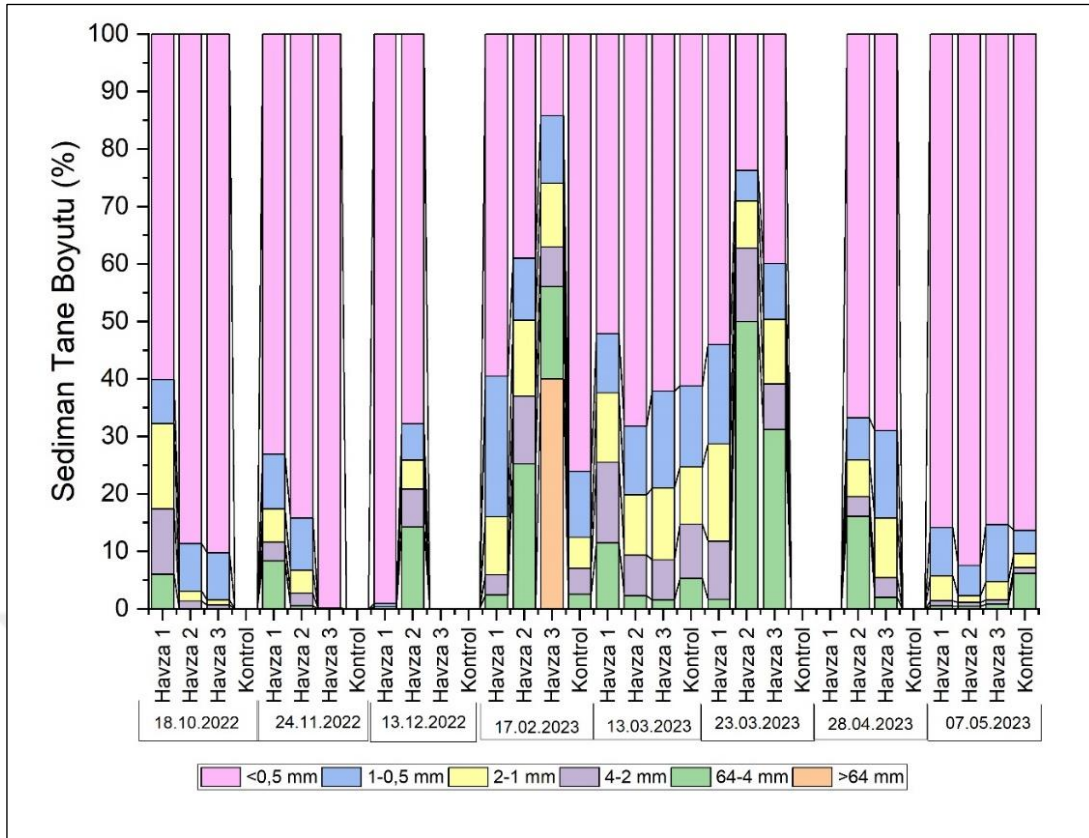
Yağışların başladığı ilk dönem olan 18.10.2022 tarihinden 13.12.2022 tarihine kadar gerçekleşen ilk üç örnekleme döneminde, yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri yapılmış olan

üç havzada (Havza 1, Havza 2 ve Havza 3) sediman taşınımı gözlenmiştir (Şekil 3.19). Bu dönemde taşınan sedimanlar daha çok ince tane boyutundaki materyallerden oluşmuş; $<0,5$ mm ve $0,5-1$ mm boyutundaki, toplam sediman içinde yüksek oranlarda temsil edilmiştir. Bu dönemde kontrol sahasında ise anlamlı bir sediman taşınımı gerçekleşmemiştir.

İkinci dönemi oluşturan 17.02.2023–23.03.2023 tarihleri arasında ise hem taşınan sediman miktarı hem de tane boyutu bakımından farklılıklar gözlenmiştir (Şekil 3.19). Bu süreçte tüm havzalarda taşınan sedimanların ortalama tane boyutları belirgin biçimde artmış, özellikle iri tane boyutlarına ($2-4$ mm, $4-64$ mm ve >64 mm) ait oranlar yükselmiştir. Sadece Havza 3'te >64 mm boyutundaki iri sediman taşınmış olup, bu durum sahada yapılan üretim faaliyetlerinin yüzey özelliklerine olan etkisiyle ilişkilendirilebilir. Aynı dönemde $<0,5$ mm boyutundaki ince tane boyutunun oranı tüm havzalarda belirgin şekilde azalmıştır. Bu değişim, yamaçlardaki koruyucu örtünün kaybı ve ağır iş makineleriyle yapılan müdahalelerin yamaç stabilitesini azaltmasıyla açıklanabilir.

Üçüncü dönem olan 28.04.2023–07.05.2023 tarihleri arasında gerçekleşen iki örnekleme döneminde ise hem üretim yapılan havzalarda hem de kontrol sahasında taşınan sedimanların tane boyutu önceki döneme kıyasla yeniden küçülmüştür (Şekil 3.19). Bu dönemde $<0,5$ mm ve $0,5-1$ mm tane boyutları yeniden baskın hale gelmiş, sediman tane boyutu dağılımı bakımından ilk örnekleme dönemlerine benzer bir yapı sergilenmiştir. Bu durum, yağışların şiddet ve süresindeki değişikliklerle ilişkili olabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, üretim faaliyetleri dönemi boyunca sediman tane boyutu dağılımı, zamansal olarak anlamlı değişiklikler göstermiştir. Bu değişimler, hem yangın sonrası yapılan müdahalelerin etkisini hem de yağış karakteristiklerinin taşınım süreçleri üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.



Şekil 3.19 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Dokuz Farklı Yağışlı Dönemde Taşınan Sedimanın Tane Boyutu Dağılımı (%)

Üretim faaliyetlerinin (salvage logging) yürütüldüğü sekiz aylık süreçte gerçekleşen dokuz yağış dönemine ait veriler kullanılarak, taşınan sedimanın tane boyutu miktarları bakımından havzalar arasındaki farklılıkları ortaya koymak amacıyla istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.2). Bu analizlerde, her bir yağış döneminde sediman tuzaklarında toplanan materyalin tane boyutu sınıflarına (kg/tuzak) göre dağılımı belirlenmiş ve her havzada yer alan üç sediman tuzağından elde edilen veriler ortalama alınarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, 64–4 mm, 4–2 mm ve 1–0,5 mm tane boyutundaki sedimanların taşınım miktarları açısından Havza 1 ile yangın geçirmemiş kontrol sahası arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p>0,05$) (Tablo 3.2). Buna karşın Havza 1’de 2–1 mm ve <0,5 mm tane boyutlarındaki ortalama sediman miktarı, Havza 2 ve Havza 3’e kıyasla daha düşük, kontrol sahasına göre ise daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, Havza 1’de söz konusu iki tane boyutu grubunda taşınan ortalama sediman miktarı hem diğer üretim yapılan havzalarla hem de kontrol sahasıyla istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0,05$) (Tablo 3.2).

Havza 2, tüm tane boyutu sınıflarında taşınan ortalama sediman miktarı bakımından hem Havza 1 hem de kontrol sahasından istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$). Ayrıca Havza 2, <0,5 mm ve 64–4 mm tane boyutları dahil olmak üzere tüm tane boyutu sınıflarında ortalama

olarak en yüksek sediman miktarına sahip havza olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, Havza 2 ile Havza 3 arasında taşınan sedimanın ortalama miktarları bakımından altı farklı tane boyutu grubunun tamamında istatistiksel bir farklılık bulunmamaktadır ($p>0,05$), bu da bu iki havzanın benzer taşınım özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir (Tablo 3.2).

Havza 3 özelinde değerlendirildiğinde, $<0,5$ mm ve $0,5-1$ mm boyutundaki sedimanların taşınımı açısından sadece Havza 2 ile benzerlik gösterdiği görülmektedir ($p>0,05$) (Tablo 3.2). Bununla birlikte $1-2$ mm fraksiyonunda taşınan sediman miktarı bakımından Havza 3, hem Havza 1 hem de Havza 2 ile benzerlik göstermektedir ($p>0,05$). $2-4$ mm ve $4-64$ mm tane boyutlarındaki sediman taşınımı açısından ise Havza 3, Havza 1, Havza 2 ve kontrol sahası ile istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$). En iri boyut sınıfı olan >64 mm tane boyutuna ait sediman yalnızca Havza 3'te gözlenmiş olup, bu durum diğer havzalarda bu büyüklükte taşınım gerçekleşmediğini ortaya koymaktadır.

Yangın geçirmemiş ve üretim faaliyetlerine maruz kalmamış kontrol sahasında, $<0,5$ mm ile $4-64$ mm arasındaki tüm tane boyutlarında taşınan ortalama sediman miktarları, diğer havzalara kıyasla en düşük düzeyde ölçülmüştür (Tablo 3.2). Kontrol sahasında $<0,5$ mm ve $1-2$ mm fraksiyonlarındaki ortalama sediman taşınımı, tüm diğer havzalardan istatistiksel olarak farklı ve daha düşük bulunmuştur ($p<0,05$). Buna karşın, $0,5-1$ mm fraksiyonunda taşınan ortalama sediman miktarı açısından Havza 1 ile istatistiksel benzerlik göstermekte ($p>0,05$), ancak Havza 2 ve Havza 3'ten farklılık arz etmektedir ($p<0,05$). Ayrıca $2-4$ mm ve $4-64$ mm fraksiyonları açısından kontrol sahası, Havza 1 ve Havza 3 ile benzerlik gösterirken ($p>0,05$), Havza 2'den istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$) (Tablo 3.2).

Tablo 3.2 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Havzalarda Taşınan Ortalama Tane Boyutu Miktarları (kg/tuzak)

Tane boyutu	Havza 1	Havza 2	Havza 3	Kontrol Sahası
	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata
>64 mm (kg/tuzak)	-----	-----	$1 \pm 0,55$	-----
$4-64$ mm (kg/tuzak)	$0,127^a \pm 0,39$	$0,929^b \pm 0,19$	$0,649^{ba} \pm 0,19$	$0,0317^a \pm 0,01$
$2-4$ mm (kg/tuzak)	$0,175^a \pm 0,05$	$0,579^b \pm 0,08$	$0,414^{ba} \pm 0,09$	$0,048^a \pm 0,02$
$1-2$ mm (kg/tuzak)	$0,253^a \pm 0,05$	$0,722^b \pm 0,12$	$0,716^{ba} \pm 0,16$	$0,053^c \pm 0,02$
$0,5-1$ mm (kg/tuzak)	$0,37^a \pm 0,103$	$1,186^b \pm 0,25$	$1,035^b \pm 0,19$	$0,085^a \pm 0,03$
$<0,5$ mm (kg/tuzak)	$2,15^a \pm 0,43$	$10,43^b \pm 2,36$	$6,525^b \pm 0,82$	$0,488^c \pm 0,15$
<2 mm (kg/tuzak)	$2,77^a \pm 0,51$	$12,34^b \pm 2,68$	$8,275^b \pm 0,95$	$0,627^c \pm 0,20$

Sekiz aylık ölçüm süresi boyunca dört farklı havzada taşınan toplam sediman miktarları ve bu sedimanların tane boyutu dağılımları arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir (Şekil

3.20). Havza 1’de taşınan toplam sediman miktarı 84,15 kg olarak ölçülmüş, bu miktarın yaklaşık %69,8’ini (58,1 kg) en ince tane boyutu sediman olan $<0,5$ mm’den oluşturmuştur. Bunu sırasıyla 0,5–1 mm (10 kg), 1–2 mm (6,85 kg), 2–4 mm (4,73 kg) ve 4–64 mm (3,43 kg) tane boyutları takip etmiş, bu havzada >64 mm boyutundaki sediman taşınımı ise gözlenmemiştir. Bu veriler, Havza 1’de taşınan sedimanın tane boyutu arttıkça miktarının düzenli olarak azaldığını göstermektedir (Şekil 3.20).

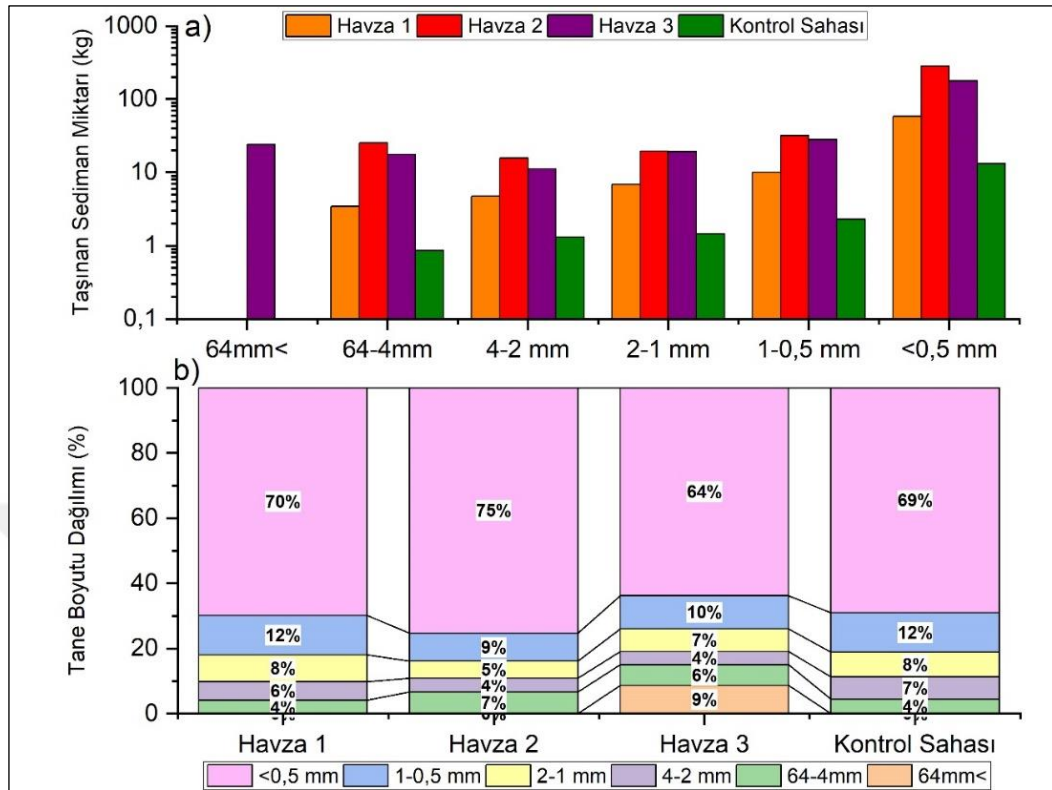
Havza 2’de toplam sediman taşınımı 373,8 kg’a ulaşmış olup, bunun %75,3’ünü oluşturan 281,6 kg’lık kısmı yine $<0,5$ mm tane boyutundaki sedimandan oluşmuştur. Diğer fraksiyonlara ait taşınan sediman miktarları sırasıyla 0,5–1 mm için 32,02 kg, 1–2 mm için 19,52 kg, 2–4 mm için 15,65 kg ve 4–64 mm için 25,1 kg olarak belirlenmiştir. Bu havzada da >64 mm boyutundaki sediman taşınımı gerçekleşmemiştir. Ancak, tane boyutu dağılımı düzenli bir azalma göstermemekte, 2–4 mm’den 4–64 mm’ye geçişte miktarda artış gözlenmektedir (Şekil 3.20).

Havza 3’te ölçülen toplam sediman miktarı 243,9 kg olup, bunun %63,8’lik kısmına karşılık gelen 176,1 kg’ı $<0,5$ mm fraksiyonundadır. Diğer tane boyutlarına ait taşınan miktarlar sırasıyla 0,5–1 mm için 27,9 kg, 1–2 mm için 19,3 kg, 2–4 mm için 11,1 kg, 4–64 mm için 17,53 kg ve >64 mm için 23,88 kg olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.20). Havza 3, >64 mm tane boyutundaki sediman taşınımının gerçekleştiği tek havza olarak dikkat çekmektedir. Bu durum, söz konusu havzanın en iri sediman tane boyutunun taşınmasına elverişli bir akarsu yatağı morfolojisine veya akış rejimine sahip olduğunu göstermektedir.

Yangın geçirmemiş ve herhangi bir üretim faaliyetine maruz kalmamış olan kontrol sahasında ise sadece üç yağışlı dönemde sediman taşınımı gözlenmiş ve toplamda 19,1 kg sediman birikmiştir. Bu miktarın %69’u (13,9 kg) $<0,5$ mm tane boyutuna ait olup, diğer tane boyutlarına ait miktarlar sırasıyla 0,5–1 mm için 2,3 kg, 1–2 mm için 1,44 kg, 2–4 mm için 1,3 kg ve 4–64 mm için 0,85 kg olarak belirlenmiştir (Şekil 3.20). Kontrol sahasında da Havza 1’e benzer şekilde, tane boyutu arttıkça taşınan sediman miktarında düzenli bir azalma gözlenmiştir. Bu sahada >64 mm boyutunda herhangi bir sediman taşınımı olmamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, dört havzanın tamamında taşınan sedimanın büyük çoğunluğu $<0,5$ mm tane boyutuna aittir. Ancak tane boyutlarının dağılım eğilimleri havzalar arasında farklılık göstermektedir. Havza 1 ve kontrol sahasında tane boyutu arttıkça sediman miktarının düzenli biçimde azalması dikkat çekerken, Havza 2 ve Havza 3’te $<0,5$ mm’den 2–4 mm’ye kadar olan tane boyutlarında azalma görülmekte, ancak 4–64 mm tane boyutunda tekrar bir artış söz konusu olmaktadır (Şekil 3.20). Ayrıca yalnızca Havza 3’te >64 mm tane

boyutunda sediman taşınımı gerçekleşmiş olması, bu havzanın iri taneli sedimanların taşınmasına diğer havzalara göre daha elverişli olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. 20 Üretim Faaliyetleri Döneminde Sediman Tuzağında Tutulan Toplam Sediman İçerisindeki Tane Boyutu Miktarı (kg) (a) ve Havzadaki Tane Boyutu Dağılımı (b)

3.3.2.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Rehabilitasyonun birinci yılı boyunca, 16 farklı yağışlı olay döneminde yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile yangın geçirmemiş kontrol sahasında yer alan üçer sediman tuzağında taşınan sedimanın tane boyutu dağılımı belirlenmiştir (Tablo 3.3). Bu dönemde, su içerisinde asılı halde taşınan sediman miktarları, yüzeysel akış içerisindeki süspanse sediman konsantrasyonlarından hesaplanmıştır. Ancak, su içinde taşınan kil, silt ve ince kum (<0,5 mm) boyutundaki sedimanlar aynı zamanda sediman tuzağında da birikmiş ve bu miktar süspanse sediman olarak dahil edilmiştir. Diğer yandan, 0,5 mm üzerindeki tane boyutuna sahip sedimanlar yatak yükü olarak değerlendirilmiştir.

Rehabilitasyonun birinci yılında, altı farklı tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarları havzalar arasında farklılık göstermiştir (Tablo 3.3). En fazla sediman taşınımı yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen YADG-H2’de ölçülürken, en düşük taşınım yangın geçirmemiş kontrol sahasında gözlemlenmiştir. Yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1) ve sürülen fidan dikilen (YAYG-H3) havzalarda taşınan sediman miktarları kontrol sahasına göre daha yüksek, ancak YADG-H2’ye göre daha düşüktür. YADG-H2’de, tüm tane boyutları

bakımından taşınan sediman miktarları istatistiksel olarak diğer havzalardan anlamlı şekilde farklıdır ($p < 0,05$). YADD-H1 ve YAYG-H3'te ise taşınan sediman miktarları istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuş, ancak her iki havza YADG-H2'den ve kontrol sahasından farklıdır ($p < 0,05$) (Tablo 3.3).

Tane boyutlarına göre taşınan sediman miktarları incelendiğinde, sadece YADG-H2 havzasında 64 mm ve üzeri boyutta sediman taşınmıştır (0,785 kg/tuzak), diğer havzalarda ise bu boyutta taşınım gerçekleşmemiştir. YADD-H1 ve kontrol sahasında, 4–64 mm arasındaki tane boyutundan daha ince tane boyutlarına doğru taşınan sediman miktarı düzenli olarak artmıştır. Ancak YADG-H2 ve YAYG-H3 havzalarında, 2–4 mm arasındaki tane boyutlarından daha ince boyutlara doğru taşınan sediman miktarı artarken, 4–64 mm arasında taşınan miktar yeniden artmıştır (Tablo 3.3).

4–64 mm arasındaki tane boyutunda taşınan sediman miktarındaki fark, havzalar arasında en belirgin şekilde gözlemlenmiştir. YADG-H2'de , bu boyut aralığında taşınan sediman miktarı YADD-H1'e göre 10,3 kat, YAYG-H3'e göre 5,4 kat ve kontrol sahasına göre yaklaşık 147,8 kat daha fazladır. YADG-H2 havzasında, 2–4 mm ve daha ince tane boyutlarında taşınan sediman miktarı ise YADD-H1 ve YAYG-H3'e göre yaklaşık olarak 2 kat daha fazladır (Tablo 3.3).

Son olarak, rehabilitasyonun ilk yılında, YADD-H1 ve YAYG-H3 havzalarında tüm tane boyutlarında taşınan sediman miktarları istatistiksel olarak birbirine yakın bulunmuş, ancak YADD-H1'de taşınan sediman miktarı genel olarak YAYG-H3'e kıyasla biraz daha yüksek olmuştur. Sadece 4–64 mm arasındaki ve $<0,5$ mm tane boyutunda taşınan sediman miktarları bakımından YAYG-H3'e ve YADD-H1'e göre daha fazla sediman taşımıştır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında 16 Farklı Yağış Olayı Döneminde Tuzakta Tutulan Sedimanın Ortalama Tane Boyutu Miktarı (kg/tuzak)

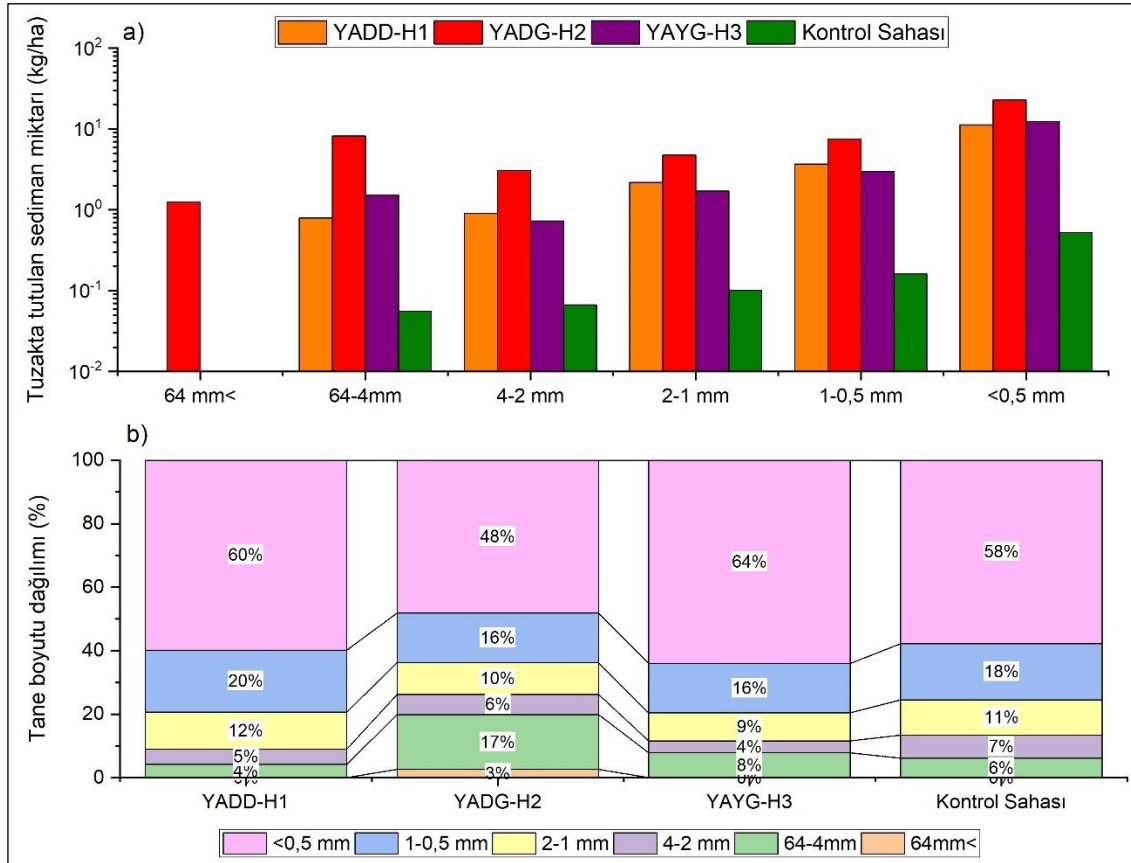
Tane boyutu	YADD-H1	YADG-H2	YAYG-H3	Kontrol Sahası
	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata
>64 mm (kg/tuzak)	-----	0,785 $\pm$ 0,36	-----	-----
4-64 mm (kg/tuzak)	0,49 ^a $\pm$ 0,10	5,14 ^b $\pm$ 1,35	0,95 ^a $\pm$ 0,25	0,03 ^c $\pm$ 0,01
2-4 mm (kg/tuzak)	0,56 ^a $\pm$ 0,12	1,91 ^b $\pm$ 0,41	0,45 ^a $\pm$ 0,09	0,04 ^c $\pm$ 0,02
1-2 mm (kg/tuzak)	1,36 ^a $\pm$ 0,28	2,98 ^b $\pm$ 0,59	1,07 ^a $\pm$ 0,19	0,06 ^c $\pm$ 0,03
0,5-1 mm (kg/tuzak)	2,30 ^a $\pm$ 0,46	4,67 ^b $\pm$ 0,86	1,88 ^a $\pm$ 0,37	0,10 ^c $\pm$ 0,05
<0,5 mm (kg/tuzak)	7,03 ^a $\pm$ 1,42	14,37 ^b $\pm$ 2,42	7,75 ^a $\pm$ 1,97	0,32 ^c $\pm$ 0,12
<2 mm (kg/tuzak)	10,70 ^a $\pm$ 2,14	22,03 ^b $\pm$ 3,64	10,71 ^a $\pm$ 2,44	0,49 ^c $\pm$ 0,21

Rehabilitasyonun ilk yılında, 16 farklı yağış olayında, havzalardaki akarsu yatağında yer alan üçer adet sediman tuzağında tutulan sedimanların tane boyutlarına göre miktarları (kg/ha) ve bu sedimanların tane boyutu dağılımları (%) belirlenmiştir (Şekil 3.21). Sediman tuzaklarında tutulan toplam sediman miktarları havzalara göre farklılık göstermiştir. En fazla sediman miktarı yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 47,79 kg/ha olarak ölçülürken, yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzadaki (YAYG-H3) sediman miktarları birbirine yakın olup, sırasıyla 18,82 kg/ha ve 19,39 kg/ha olarak bulunmuştur. Bu miktarlar, kontrol sahasındaki 0,91 kg/ha'lık miktardan çok daha yüksektir (Şekil 3.21).

Sediman tuzağında tutulan sedimanların tane boyutlarına göre miktarları, havzalar arasında belirgin farklılıklar göstermektedir (Şekil 3.21). 64 mm üzerindeki tane boyutunda taşınan sediman miktarı yalnızca YADG-H2'de (1,25 kg/ha) ölçülmüştür. YADD-H1'de ve kontrol sahasında ise, sediman miktarları düzenli bir şekilde tane boyutu küçüldükçe artmıştır; yani 64–4 mm'den <0,5 mm'ye doğru bir artış gözlemlenmiştir. Buna karşılık, YADG-H2 ve YAYG-H3 havzalarında 4–2 mm'den <0,5 mm'ye doğru sediman miktarları artarken, 64–4 mm arasındaki tane boyutlarında farklı bir eğilim gözlenmiştir. YADG-H2'de, 64–4 mm arasındaki tane boyutundaki sediman miktarı (8,22 kg/ha), <0,5 mm dışında diğer tüm tane boyutlarından daha fazladır. YAYG-H3'te ise 64–4 mm tane boyutundaki sediman miktarı, 4–2 mm boyutundan daha fazladır (Şekil 3.21).

Sediman tuzaklarında tutulan sedimanların tane boyutu dağılımına bakıldığında, tüm havzalarda en fazla biriken sediman boyutu <0,5 mm'dir. YADD-H1, YAYG-H3 ve kontrol sahasında, >0,5 mm tane boyutunun dağılımı sırasıyla %60, %64 ve %58 iken, YADG-H2

havzasında bu oran yaklaşık olarak %48'dir (Şekil 3.21). 64–4 mm ve >64 mm tane boyutları arasında havzalar arasında daha belirgin bir farklılık gözlemlenmiştir. YADD-H1 ve kontrol sahasında 64–4 mm boyutundaki sedimanın dağılımı sırasıyla %4 ve %6 iken, YADG-H2 ve YAYG-H3 havzalarında bu oran sırasıyla %17 ve %8'dir. Ayrıca, >64 mm tane boyutunda sediman dağılımı yalnızca YADG-H2'de görülmüş ve bu oran %3 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Rehabilitasyon Döneminin İlk Yılında Sediman Tuzağında Tutulan Toplam Sediman İçerisindeki Tane Boyutu Miktarı (kg/ha) (a) ve Havza İçerisindeki Tane Boyutu Dağılımı (b)

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalarda ve kontrol sahasında yer alan akarsuların yataklarına kurulan üçer adet sediman tuzağında, 12 farklı yağış olayı döneminde biriken sedimanların altı farklı tane boyutu sınıfına göre ortalama miktarları belirlenmiştir.

Bu dönemde, sediman tuzaklarında biriken sedimanların ortalama tane boyutu miktarları havzalar arasında farklılık göstermiştir. En iri tane boyutuna sahip >64 mm tane boyutundaki sedimanlar, yalnızca yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) taşınmıştır. Bu kapsamda, >64 mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarı, YADG-H2'de 8,3 kg/tuzak, YAYG-H3'te ise 3,96 kg/tuzak olarak ölçülmüştür. Bu iki havza istatistiksel olarak birbirine benzemektedir ($p>0,05$).

Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile kontrol sahasında, tuzaklarda en fazla 64–4 mm tane boyutunda sediman birikmiştir. Bu oran, YADG-H2’de 15,57 kg/tuzak, kontrol sahasında ise 7,56 kg/tuzak olarak ölçülmüştür. 64–4 mm arasındaki ortalama sediman miktarı, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) 1,56 kg/tuzak, YAYG-H3’te ise 11,18 kg/tuzak olarak belirlenmiştir. Bu duruma göre, 64–4 mm tane boyutunda biriken ortalama sediman miktarı bakımından YADD-H1 ile kontrol sahası istatistiksel olarak birbirine benzer ($p>0,05$); ancak bu iki havza YADG-H2 havzasından farklıdır ($p<0,05$). YAYG-H3 ise, diğer rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalar ve kontrol sahası ile istatistiksel olarak benzerlik göstermektedir ($p>0,05$). Benzer bir durum, 4–2 mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarı için de geçerlidir.

Bu dönemde, 4–2 mm tane boyutunda taşınan en yüksek ortalama sediman miktarı YADG-H2’de (4,92 kg/tuzak) ölçülürken, bunu YAYG-H3 (2,57 kg/tuzak) takip etmiştir. YADD-H1’de ise bu miktar 1,28 kg/tuzak, kontrol sahasında ise 1,47 kg/tuzak olarak belirlenmiştir. Bu durumda, 4–2 mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarı bakımından YADG-H2 ve YAYG-H3 istatistiksel olarak benzer ($p>0,05$). YADD-H1 ve kontrol sahası ise hem birbirine benzer hem de YAYG-H3 havzası ile istatistiksel olarak benzerdir ($p>0,05$).

2–1 mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarının en yüksek değeri YAYG-H3 havzasında (5,81 kg/tuzak) ölçülürken, bu değere en yakın miktar YADG-H2 havzasında (5,13 kg/tuzak) gözlemlenmiştir. YADD-H1’de 2–1 mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarı 2,20 kg/tuzak, kontrol sahasında ise 0,93 kg/tuzak olarak belirlenmiştir. 2–1 mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarı bakımından YAYG-H3, YADG-H2’ye istatistiksel olarak benzemektedir ($p>0,05$). Ayrıca, YADD-H1 hem kontrol sahasıyla hem de YADG-H2 ile istatistiksel olarak benzerlik göstermektedir ($p>0,05$).

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında, tuzaklarda biriken 1–0,5 mm, <0,5 mm ve <2 mm tane boyutu gruplarındaki ortalama sediman miktarları, havzalar arasında benzer değişim göstermiştir. Bu üç tane boyutu grubunda taşınan ortalama sediman miktarı bakımından, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalar birbirine benzer ($p>0,05$); ancak kontrol sahasından istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$). Ayrıca, kontrol sahasından farklı olarak, yangın sonrası rehabilitasyon yöntemleri uygulanan üç havzada 4–2 mm tane boyutundan daha ince tane boyutuna doğru ortalama sediman miktarı düzenli olarak artmıştır. Bu dönemde, 1–0,5 mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarı, YADD-H1’de 8,16 kg/tuzak, YADG-H2’de 7,40 kg/tuzak ve YAYG-H3’te 10,88 kg/tuzak olarak ölçülmüştür. Kontrol sahasında ise bu miktar 0,77 kg/tuzak ile diğer havzalardan çok daha düşük bulunmuştur.

Rehabilitasyonun ikinci yılında, farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanan havzalarda, en ince tane boyutunda ($<0,5$ mm) taşınan ortalama sediman miktarları en yüksek seviyede ölçülmüştür. Bu şekilde, $<0,5$ mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarı, YADD-H1’de 25,66 kg/tuzak, YADG-H2’de 14,44 kg/tuzak ve YAYG-H3’te ise 16,91 kg/tuzak olarak belirlenmiştir. Kontrol sahasında bu miktar ise yalnızca 1,40 kg/tuzak olarak ölçülmüştür. Aynı durum, <2 mm tane boyutunda taşınan ortalama sediman miktarı için de geçerlidir.

Tablo 3.4 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında 12 Farklı Yağış Olayı Döneminde Tuzakta Tutulan Sedimanın Ortalama Tane Boyutu Miktarı (kg/tuzak)

Tane boyutu	YADD-H1	YADG-H2	YAYG-H3	Kontrol Sahası
	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata	Ortalama $\pm$ std.hata
>64 mm (kg/tuzak)	-----	8,30 ^a $\pm$ 3,7	3,96 ^a $\pm$ 2,63	-----
4-64 mm (kg/tuzak)	1,56 ^a $\pm$ 0,95	15,57 ^b $\pm$ 5,53	11,18 ^{ba} $\pm$ 5,8	7,56 ^a $\pm$ 4,46
2-4 mm (kg/tuzak)	1,28 ^a $\pm$ 0,50	4,92 ^b $\pm$ 1,16	2,57 ^{ba} $\pm$ 0,74	1,47 ^a $\pm$ 0,86
1-2 mm (kg/tuzak)	2,20 ^{ac} $\pm$ 0,74	5,13 ^{ba} $\pm$ 1,06	5,81 ^b $\pm$ 1,74	0,93 ^c $\pm$ 0,50
0,5-1 mm (kg/tuzak)	8,16 ^a $\pm$ 2,75	7,40 ^a $\pm$ 1,69	10,88 ^a $\pm$ 2,83	0,77 ^b $\pm$ 0,37
$<0,5$ mm (kg/tuzak)	25,66 ^a $\pm$ 8,13	14,44 ^a $\pm$ 3,56	16,91 ^a $\pm$ 4,7	1,40 ^b $\pm$ 0,63
<2 mm (kg/tuzak)	36 ^a $\pm$ 9,73	26,97 ^a $\pm$ 5,56	33,6 ^a $\pm$ 8,46	3,12 ^b $\pm$ 1,47

Rehabilitasyonun ikinci yılında, 12 farklı yağışlı örnekleme döneminde, havzalardaki akarsu yatağında yer alan üçer adet sediman tuzağında biriken sedimanların altı farklı tane boyutuna göre miktarları (kg/ha) ve bu sedimanların havza içerisindeki tane boyutu dağılımı (%) incelenmiştir (Şekil 3.22). Bu dönemde sediman tuzaklarında biriken toplam sediman miktarı en fazla yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 50,2 kg/ha olarak ölçülmüştür. Ardından yangın sonrası sürülen ve dal serilen havzada (YAYG-H3) tuzaklarda biriken toplam sediman miktarı 46,2 kg/ha olmuştur. Yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) ise bu miktar 34,98 kg/ha olarak belirlenmişken, kontrol sahasında 10,94 kg/ha ile en düşük değeri almıştır.

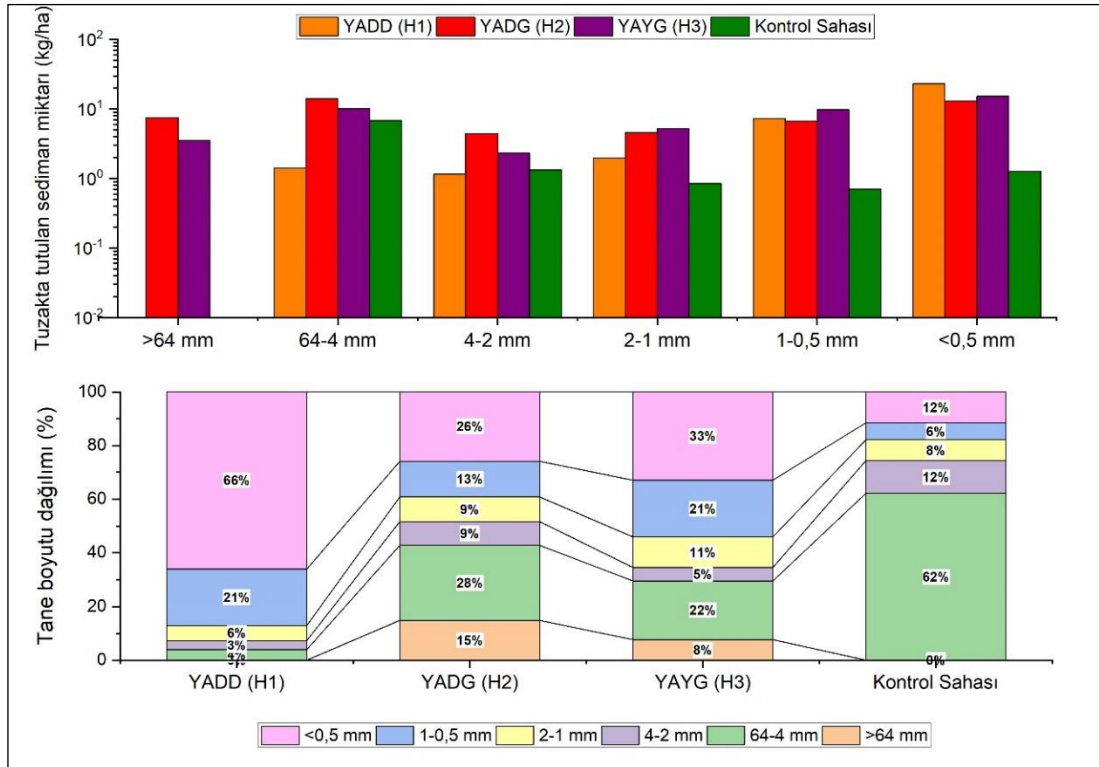
Sediman tuzaklarında biriken altı farklı tane boyutu grubundaki sediman miktarları bakımından havzalar arasında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.22). Bu dönemde, yalnızca yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 64 mm’den büyük tane boyutunda sediman birikmiştir. 64 mm’den büyük tane boyutundaki sediman miktarı, YADG-H2 havzasında 7,47 kg, YAYG-H3 havzasında ise 3,56 kg olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) ve kontrol sahasında bu tane boyutunda sediman taşınmamıştır.

64-4 mm tane boyutunda taşınan sediman miktarı, YADD-H1’de 1,4 kg, YADG-H2’de 14,01 kg, YAYG-H3’te 10,06 kg ve kontrol sahasında 6,80 kg olarak belirlenmiştir. 64-4 mm tane boyutunun, tuzaklarda biriken toplam sediman içerisindeki oranı, YADG-H2’de %28, YAYG-H3’te %22, kontrol sahasında ise %62 olarak belirlenirken, YADD-H1’de bu oran yalnızca %3’tür (Şekil 3.22).

4-2 mm tane boyutuna sahip sediman miktarı, YADD-H1’de 1,15 kg, YADG-H2’de 4,43 kg, YAYG-H3’te 2,32 kg ve kontrol sahasında ise 1,33 kg olarak ölçülmüştür. Farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanan üç havzada, tane boyutunun büyüklüğüyle birlikte sediman miktarlarında bir artış gözlemlenirken, kontrol sahasında 4-2 mm tane boyutundan en ince tane boyutuna doğru sediman miktarı düzenli olarak azalmıştır (Şekil 3.22).

2-1 mm ve 1-0,5 mm tane boyutlarındaki sediman miktarları, sırasıyla YADD-H1’de 1,98 kg ve 7,34 kg, YADG-H2’de 4,62 kg ve 6,66 kg, YAYG-H3’te 5,23 kg ve 9,79 kg olarak ölçülmüştür. Kontrol sahasında ise bu tane boyutlarındaki sediman miktarı sırasıyla 0,84 kg ve 0,69 kg’dır (Şekil 3.22).

Son olarak, tuzaklarda biriken <0,5 mm tane boyutundaki sediman miktarı, YADD-H1’de 23,09 kg, YADG-H2’de 12,99 kg, YAYG-H3’te 15,22 kg ve kontrol sahasında ise 1,26 kg olarak belirlenmiştir. En ince tane boyutunun toplam sediman miktarı içerisindeki oranı, YADD-H1’de %66, YADG-H2’de %26, YAYG-H3’te %33 ve kontrol sahasında ise %12 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.22 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Sediman Tuzağında Tutulan Toplam Sediman İçerisindeki Tane Boyutu Miktarı (kg/ha) (a) ve Havza İçerisindeki Tane Boyutu Dağılımı (b)

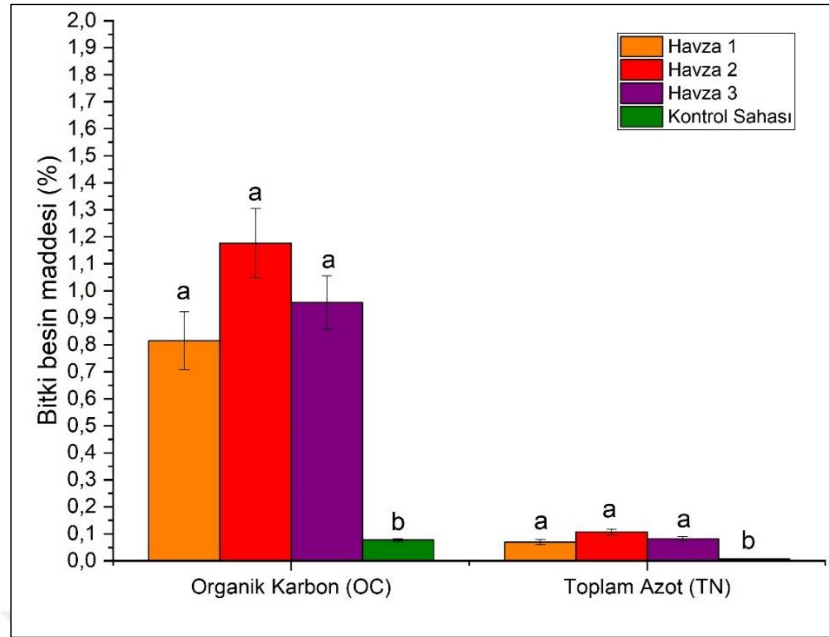
3.3.3. Sediman İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonu

3.3.3.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

2022 yılının Ekim ayından 2023 yılının Mayıs ayına kadar olan üretim faaliyetleri döneminde, meydana gelen 9 farklı yağış olayında her bir havzada yer alan sediman tuzaklarından ayrı ayrı sediman örnekleme yapılmıştır. Alınan örneklerde toprak olarak kabul edilen 2 mm tane boyutunun altındaki sedimanların içerisindeki organik karbon (OC), toplam azot (TN), fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), demir (Fe), manganez (Mn), çinko (Zn) ve bakır (Cu) gibi bitki besin maddesi konsantrasyonları ölçülmüştür. Organik karbon (OC) ve toplam azot (TN) yüzde (%) olarak ifade edilirken, fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), demir (Fe), manganez (Mn), çinko (Zn) ve bakır (Cu) konsantrasyonları mg/l (ppm) olarak belirlenmiştir.

Üretim faaliyetleri döneminde yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri yapılan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te ölçülen ortalama organik karbon (%) ve toplam azot (%) değerleri, kontrol sahasına göre belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur (Şekil 3.23). Bu dönemde ölçülen ortalama organik karbon (%) değeri Havza 1'de %0,81, Havza 2'de %1,17, Havza 3'te %0,95, kontrol sahasında ise %0,07 olarak belirlenmiştir. Ortalama toplam azot (%) değeri ise Havza 1'de %0,06, Havza 2'de %0,1, Havza 3'te %0,08 ve kontrol sahasında %0,006 olarak ölçülmüştür.

Buna göre, yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri yapılan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3 arasında hem ortalama organik karbon (%) hem de ortalama toplam azot (%) değerleri istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuş ($p>0,05$), ancak bu havzalardaki değerler kontrol sahasından anlamlı şekilde farklıdır ($p<0,05$) (Şekil 3.23). Ölçülen ortalama organik karbon (%) ve toplam azot (%) değerleri sırasıyla en yüksekten en düşüğe doğru Havza 2 > Havza 3 > Havza 1 > Kontrol sahası olarak sıralanmıştır.



Şekil 3.23 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Organik Karbon (OC) ve Toplam Azot (TN) Değeri (%)

Üretim faaliyetleri (salvage logging) dönemi süresince, sediman içerisindeki ortalama fosfor (P), sodyum (Na), potasyum (K), demir (Fe) ve manganez (Mn) konsantrasyonları, yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri yapılmış olan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3 arasında istatistiksel açıdan benzer bulunmuştur ($p>0,05$) (Şekil 3.24). Bununla birlikte, her üç havzada da sediman içerisindeki bu besin maddelerinin ortalama konsantrasyonları, kontrol sahasında ölçülen değerin üzerinde olup, istatistiksel olarak kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$).

Sediman içerisindeki ortalama fosfor (P) konsantrasyonu Havza 1’de 5,04 mg/l, Havza 2’de 4,16 mg/l, Havza 3’te ise 5,38 mg/l olarak ölçülürken, kontrol sahasında bu değer 2,01 mg/l olarak belirlenmiştir. Sediman içerisindeki ortalama sodyum (Na) konsantrasyonları ise fosfora oranla daha yüksek olup, üretim faaliyetleri dönemi boyunca Havza 1, Havza 2 ve Havza 3’te sırasıyla 350,6 mg/l, 369,2 mg/l ve 371,1 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.24). Fosforda olduğu gibi, üretim faaliyetleri yapılmış olan bu üç havza arasındaki ortalama sodyum konsantrasyonları istatistiksel açıdan birbirine benzerken ($p>0,05$), yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında ortalama sodyum konsantrasyonu çok daha düşük bir değerde, 115,5 mg/l olarak belirlenmiştir.

Sediman içerisindeki ortalama potasyum (K) konsantrasyonu, benzer şekilde fosfor (P) ve sodyum (Na) değerlerinde olduğu gibi, Havza 1, Havza 2 ve Havza 3’te istatistiksel açıdan birbirine benzer bulunmuştur. Ortalama potasyum konsantrasyonu Havza 1’de 161,1 mg/l, Havza 2’de 180,9 mg/l ve Havza 3’te 185,2 mg/l olarak ölçülürken, kontrol sahasında en düşük ortalama potasyum konsantrasyonu 52,7 mg/l olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.24). Kontrol

sahasında ölçülen ortalama potasyum konsantrasyonu, yangın ve üretim faaliyeti yapılmış havzalar arasında istatistiksel açıdan fark göstermektedir ($p<0,05$).

Yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri yapılmış olan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'teki taşınan sediman içerisindeki ortalama demir (Fe) konsantrasyonları, yanmamış ve üretim faaliyeti yapılmamış olan kontrol sahasına oranla çok daha yüksek bulunmuştur. Üretim faaliyetleri yapılan havzalar arasında en yüksek ortalama demir (Fe) konsantrasyonu Havza 2'de 4,59 mg/l, ardından sırasıyla Havza 3'te 3,28 mg/l ve Havza 1'de 2,5 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.24). Kontrol sahasında ise ortalama demir (Fe) konsantrasyonu, diğer havzalara göre oldukça düşük, 0,39 mg/l olarak belirlenmiştir. Yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri yapılmış havzalarda ölçülen ortalama demir konsantrasyonları istatistiksel olarak birbirine benzerken ($p>0,05$), kontrol sahasındaki demir konsantrasyonu istatistiksel olarak daha düşük ve anlamlı fark göstermektedir ($p<0,05$).

Taşınan sediman içerisindeki ortalama manganez (Mn) konsantrasyonu, Havza 1'de 30,9 mg/l, Havza 2'de 35,3 mg/l ve Havza 3'te 35,5 mg/l olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama manganez konsantrasyonu ise kontrol sahasında, Havza 4'te 12,7 mg/l olarak tespit edilmiştir. Kontrol sahasında ölçülen ortalama manganez konsantrasyonu, yangın geçirmiş ve üretim faaliyeti yapılmış havzalardan anlamlı şekilde farklıdır ($p<0,05$). Ortalama manganez konsantrasyonları, en yüksekten en düşüğe sırasıyla Havza 3 > Havza 2 > Havza 1 > Kontrol sahası olarak sıralanmıştır (Şekil 3.24).

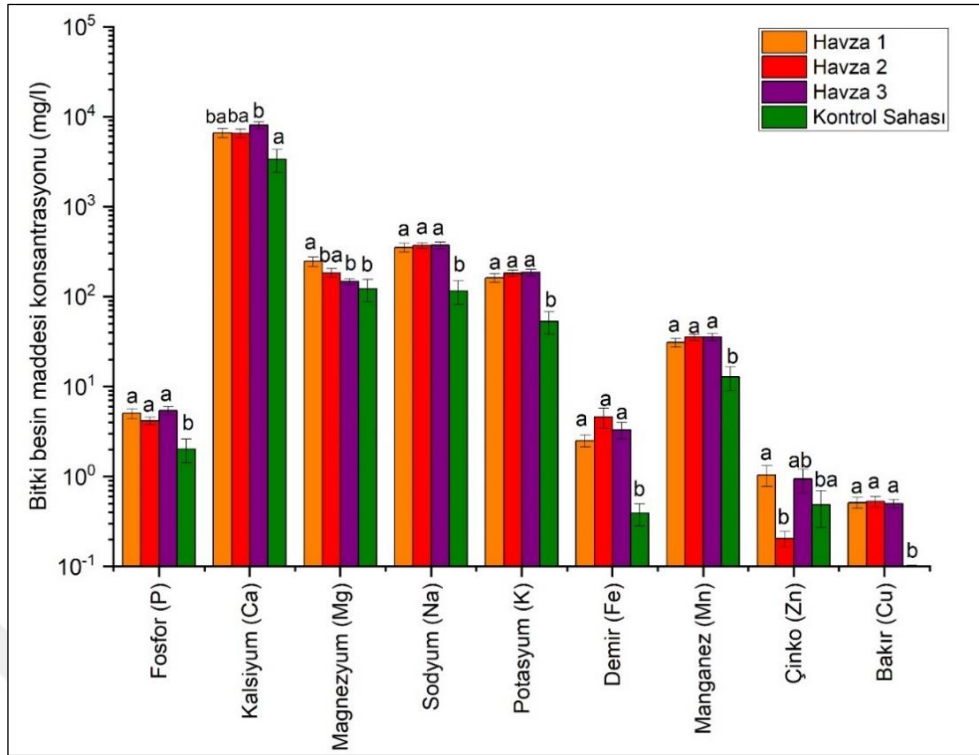
Bakır (Cu), ölçüm süresince taşınan sediman içerisindeki en düşük ortalama konsantrasyona sahip bitki besin maddelerinden biridir. Yangın sonrası üretim faaliyetleri yapılmış olan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te ölçülen ortalama bakır konsantrasyonları istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuştur ($p>0,05$) (Şekil 3.24). Havzalar arasında en düşük ortalama bakır konsantrasyonu, kontrol sahasında (0,08 mg/l) ölçülmüş olup, kontrol sahasında ölçülen ortalama bakır konsantrasyonu istatistiksel olarak yangın sonrası üretim faaliyetleri yapılmış olan havzaların tamamından daha düşük ve farklıdır ($p<0,05$).

Kalsiyum (Ca), bitki besin maddeleri arasında sediman içerisinde en yüksek konsantrasyona sahip olup, üretim faaliyetleri yapılan havzalarda ölçülen ortalama kalsiyum konsantrasyonları, yangın geçirmemiş kontrol sahasına göre daha yüksektir. Ortalama kalsiyum konsantrasyonu Havza 1'de 6.580 mg/l, Havza 2'de 6.486,9 mg/l, Havza 3'te 8.000,1 mg/l ve kontrol sahasında ise 3.350,3 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.24). İstatistiksel açıdan, üretim faaliyeti yapılan havzalar arasında ortalama kalsiyum konsantrasyonları birbirine benzer bulunmuşken ($p>0,05$), Havza 3 ile kontrol sahası arasındaki fark anlamlıdır ($p<0,05$). Havza

3'te ölçülen ortalama kalsiyum konsantrasyonu, kontrol sahasından yaklaşık 2,38 kat daha fazla olup, bu fark sadece Havza 3 ile kontrol sahası arasında belirginleşmiştir.

Magnezyum (Mg), bitki gelişimi için önemli olan makro besin maddelerindendir ve üretim faaliyetleri dönemi boyunca alınan sediman içerisindeki ortalama magnezyum konsantrasyonları havzalar arasında farklılık göstermiştir. Ortalama magnezyum konsantrasyonu, Havza 1'de 245,2 mg/l, Havza 2'de 182,8 mg/l ve Havza 3'te 146,7 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.24). En düşük ortalama magnezyum konsantrasyonu ise kontrol sahasında 121,1 mg/l olarak belirlenmiştir. Havza 1'de ölçülen ortalama magnezyum konsantrasyonu, istatistiksel açıdan Havza 3 ve kontrol sahasından farklı bulunmuş ($p<0,05$), ancak Havza 2 ile benzerlik göstermektedir. Havza 3 ile kontrol sahasında ölçülen magnezyum konsantrasyonları ise istatistiksel açıdan birbirine benzer bulunmuştur ($p>0,05$).

Diğer bitki besin maddelerinden farklı olarak, ortalama en düşük çinko (Zn) konsantrasyonu Havza 2'de ölçülmüştür (0,2 mg/l). Havza 2'deki ortalama çinko konsantrasyonu, kontrol sahasından bile daha düşük bir seviyedeysen, ortalama en yüksek çinko konsantrasyonu Havza 1'de 1,04 mg/l olarak belirlenmiştir (Şekil 3.24). Havza 1 ve Havza 2'de ölçülen ortalama çinko konsantrasyonu istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0,05$). Ortalama çinko konsantrasyonu, Havza 3'te 0,93 mg/l, kontrol sahasında ise 0,48 mg/l olarak ölçülmüştür. Bu durumda, taşınan ortalama çinko konsantrasyonları en yüksekten en düşüğe doğru sırasıyla Havza 1 > Havza 3 > Havza 4 > Havza 2 olarak sıralanmıştır. İstatistiksel olarak, ortalama çinko konsantrasyonu açısından Havza 3 ve kontrol sahası hem birbiriyle hem de Havza 1 ve Havza 2 ile benzer bulunmuştur ($p>0,05$) (Şekil 3.24).

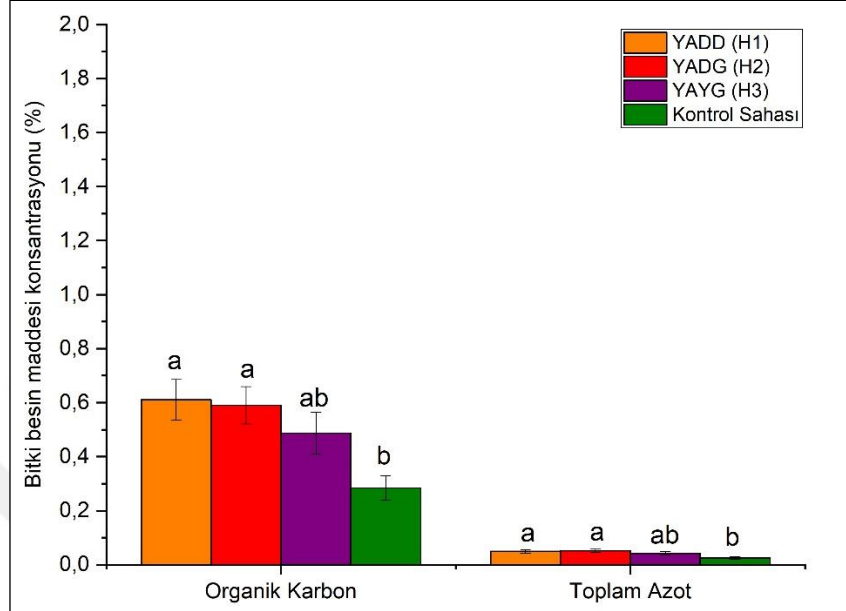


Şekil 3.24 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonları (mg/l)

3.3.3.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

2023 yılının Mayıs ayından 2024 yılının Mayıs ayına kadar süren rehabilitasyonun birinci yılında, akarsuların yatağına kurulan sediman tuzaklarından toplamda 16 farklı örnekleme döneminde alınan sediman örneklerinde organik karbon (OC) ve toplam azot (TN) değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.25). Bu dönemde, yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1) ve yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2) havzalarda taşınan sediman içerisindeki organik karbon ve toplam azot değerleri, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havza ve kontrol sahasından daha yüksek bulunmuştur. Yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) ortalama organik karbon %0,61, toplam azot %0,054 olarak ölçülürken, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) bu değerler sırasıyla %0,59 ve %0,051 olarak belirlenmiştir. Bu iki havza arasındaki organik karbon ve toplam azot değerleri istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuş ($p>0,05$). Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise ortalama organik karbon %0,48 ve toplam azot %0,041 olarak ölçülmüş olup, bu değerler hem rehabilitasyon uygulanmış diğer iki havza ile hem de kontrol sahasıyla istatistiksel açıdan benzerlik göstermiştir ($p>0,05$). Kontrol sahasında ise organik karbon %0,28 ve toplam azot %0,024 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.25). Bu değerler, yalnızca yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile benzerlik göstermiştir ($p>0,05$). Bu bulgular, yangın sonrası yapılan rehabilitasyon uygulamalarının taşınan sediman

içerisindeki organik karbon ve toplam azot miktarını artırdığını, ancak her uygulamanın etkisinin farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yangın sonrası doğal bırakılan ve tohumlanan ve dal serilen havzalarda organik karbon ve azot seviyelerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Organik Karbon ve Toplam Azot Değeri (%)

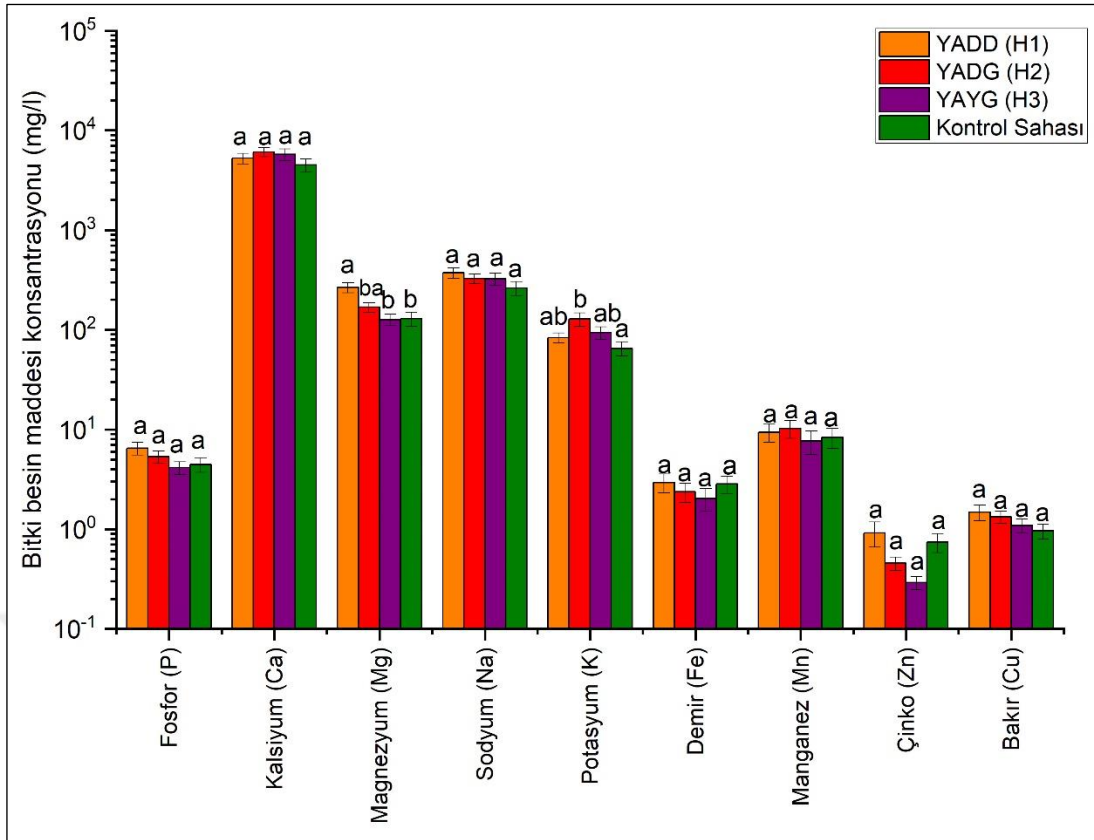
Rehabilitasyonun birinci yılı itibariyle yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) ile kontrol sahasında taşınan sediman içerisindeki ortalama kalsiyum, sodyum, magnezyum ve potasyum konsantrasyonları, ortalama manganez, fosfor, demir, bakır ve çinko konsantrasyonlarına oranla çok daha yüksek bulunmuştur (Şekil 3.26). Özellikle sediman içerisindeki ortalama kalsiyum konsantrasyonları diğer bitki besin maddelerinden önemli ölçüde ayrılmıştır.

Rehabilitasyonun birinci yılına ait 16 farklı örnekleme döneminde, taşınan sediman içerisindeki ortalama bitki besin maddesi konsantrasyonları, havzalar arasında hem benzerlik hem de farklılıklar göstermiştir. Bu dönemde, yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) ile kontrol sahasında taşınan sediman içerisindeki ortalama kalsiyum, sodyum, manganez, fosfor, demir, bakır ve çinko konsantrasyonları istatistiksel olarak birbirine benzerdir ($p>0,05$). Örneğin, yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) ve kontrol sahasında taşınan sediman içerisindeki ortalama kalsiyum konsantrasyonları

sırasıyla 5.254,7 mg/l, 6.084,4 mg/l, 5.759,4 mg/l ve 4.509,8 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.26).

Rehabilitasyonun birinci yılında havzalar arasında taşınan ortalama bitki besin maddesi konsantrasyonu açısından en belirgin fark magnezyum ve potasyumda görülmüştür. Bu dönemde en yüksek ortalama magnezyum konsantrasyonu, yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) 265,98 mg/l olarak ölçülmüştür. Bu havzaya en yakın ortalama magnezyum konsantrasyonu ise yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 168,99 mg/l olarak belirlenmiştir. Yangın sonrası doğal bırakılan havzadaki (YADD-H1) ortalama magnezyum konsantrasyonu istatistiksel olarak yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) benzerken ($p>0,05$), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile kontrol sahasından istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$). Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzadaki (YADG-H2) ortalama magnezyum konsantrasyonu ise istatistiksel olarak hem yangın sonrası doğal bırakılan havza (YADD-H1) hem de yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ve kontrol sahası ile benzerlik göstermiştir ($p>0,05$). Kontrol sahasına en yakın ortalama magnezyum konsantrasyonu yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ölçülmüştür. Bu havzaya ait ortalama magnezyum konsantrasyonu 126,28 mg/l olarak belirlenmiş olup, kontrol sahasında bu değer 129,38 mg/l'dir (Şekil 3.26).

Rehabilitasyonun birinci yılında havzalar arasında ortalama bitki besin maddesi konsantrasyonu açısından istatistiksel farkın belirgin olduğu bir diğer besin maddesi potasyumdur. Havzalar arasında en yüksek ortalama potasyum konsantrasyonu, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 128,04 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.26). Bu havzada ölçülen ortalama potasyum konsantrasyonu, kontrol sahasından daha yüksek olup, istatistiksel açıdan kontrol sahasındaki ortalama potasyum konsantrasyonundan farklıdır ($p<0,05$). Yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1) ve yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalarda ölçülen ortalama potasyum konsantrasyonu sırasıyla 83,33 mg/l ve 93,62 mg/l olarak belirlenmiş olup, her iki havza da istatistiksel açıdan hem yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) hem de kontrol sahasına benzerdir ($p>0,05$). Kontrol sahasında ise ortalama potasyum konsantrasyonu 65,02 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.26).



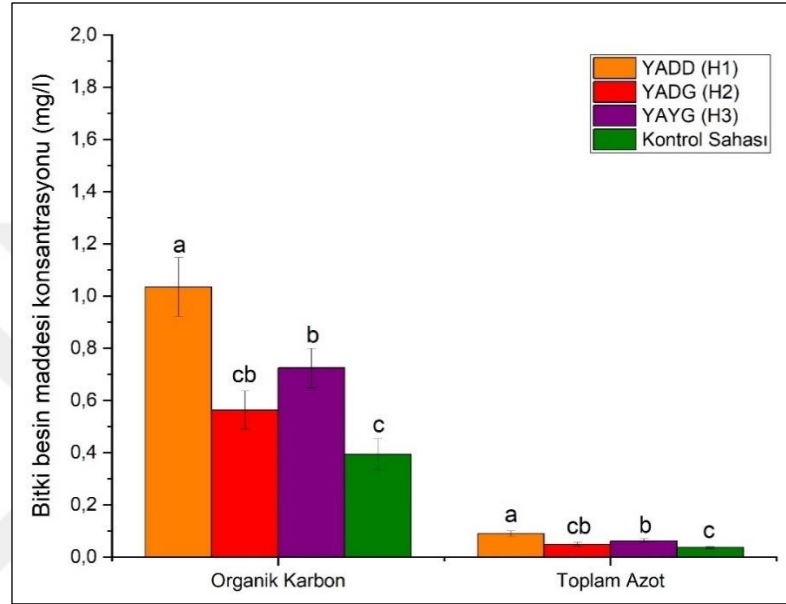
Şekil 3.26 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonu (mg/l)

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında, 12 farklı yağışlı örneklem döneminde, yangın sonrası farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç havza ile kontrol sahasında taşınan sediman içerisindeki ortalama organik karbon (OC) ve toplam azot (TN) değerleri yüzdelik olarak belirlenmiştir (Şekil 3.27). Bu dönemde, taşınan sediman içerisindeki ortalama organik karbon ve toplam azot değerleri açısından havzalar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulunmuştur ($p < 0,05$).

Yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) en yüksek ortalama organik karbon ve toplam azot değerleri sırasıyla %1,03 ve %0,08 olarak ölçülmüştür. Bunu takiben, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3), ortalama organik karbon ve toplam azot değerleri sırasıyla %0,72 ve %0,06 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.27). Diğer rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalar arasında en düşük ortalama organik karbon ve toplam azot değerleri, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) sırasıyla %0,56 ve %0,04 olarak ölçülmüştür. Kontrol sahasında ise en düşük ortalama organik karbon ve toplam azot değerleri sırasıyla %0,39 ve %0,03 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.27).

Sonuç olarak, farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış havzalar ile kontrol sahası arasında, ortalama en yüksek organik karbon ve toplam azot değerleri yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) ölçülmüş ve bu havza (YADD-H1) istatistiksel olarak

diğer havzalardan farklıdır ($p<0,05$). Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ölçülen ortalama organik karbon ve toplam azot değerleri ise, istatistiksel olarak yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) benzerken ($p>0,05$), hem yangın sonrası doğal bırakılan havzadan (YADD-H1) hem de kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$). Farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalar arasında, sadece yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) istatistiksel olarak kontrol sahasıyla benzerdir ($p>0,05$) (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Organik Karbon ve Toplam Azot Değerleri (%)

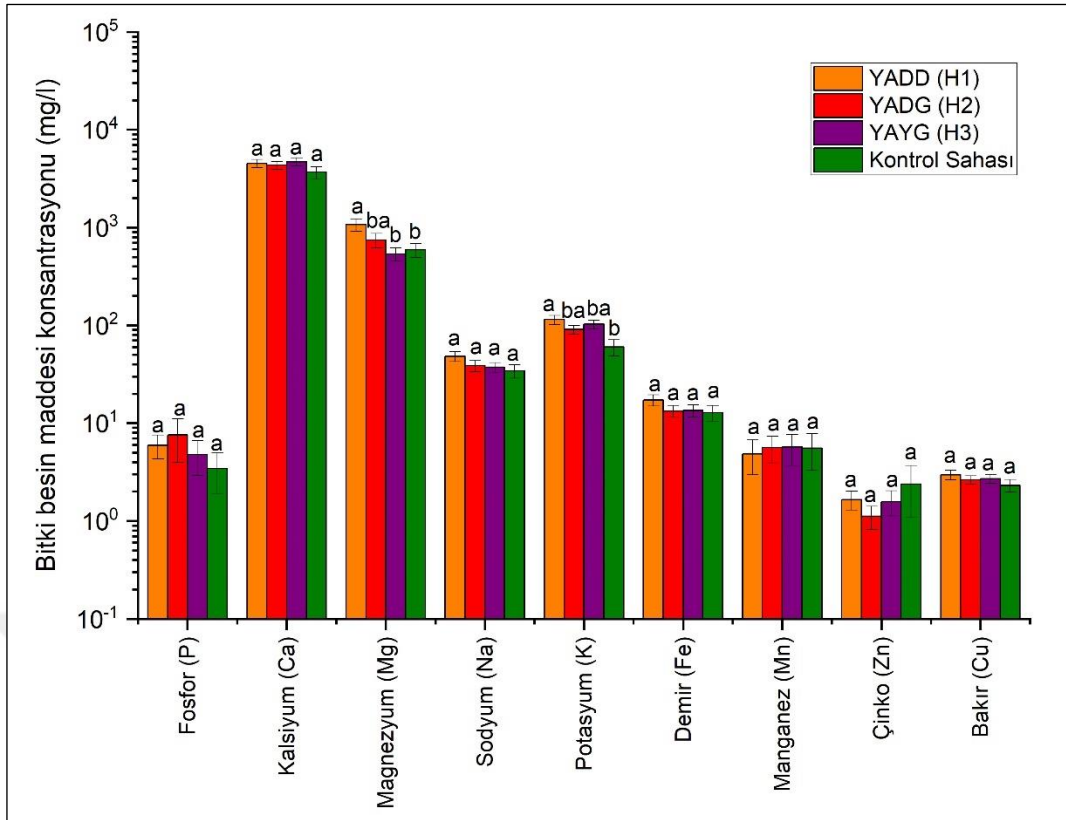
Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında, 12 farklı örnekleme döneminde, havzalara göre taşınan sediman içerisindeki ortalama fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), demir (Fe), manganez (Mn), çinko (Zn) ve bakır (Cu) konsantrasyonları belirlenmiştir (Şekil 3.28). Bu dönemde, taşınan sediman içerisindeki ortalama kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonları diğer bitki besin maddelerine göre daha yüksek bulunmuş; kalsiyum ve magnezyumdan sonra potasyum ve sodyum konsantrasyonları gelmiştir. Fosfor, demir, manganez, bakır ve çinko konsantrasyonları ise diğer bitki besin maddelerine oranla daha düşük seviyelerde ölçülmüştür.

Sediman içerisindeki ortalama bitki besin maddesi konsantrasyonları bakımından havzalar arasında benzerlikler ve farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.28). Ortalama kalsiyum, sodyum, fosfor, demir, manganez, bakır ve çinko konsantrasyonları bakımından, hem farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış üç havza hem de kontrol sahası istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Örneğin, sediman içerisindeki ortalama kalsiyum konsantrasyonu, yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) 4518,8 mg/l, yangın

sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 4332,8 mg/l, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 4701,8 mg/l ve kontrol sahasında ise 3676,1 mg/l olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, ortalama sodyum konsantrasyonları, yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) 48,1 mg/l, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 38,6 mg/l, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 37,2 mg/l ve kontrol sahasında ise 34,1 mg/l olarak belirlenmiştir (Şekil 3.28). Bu durum, taşınan sediman içerisindeki ortalama fosfor, demir, manganez, bakır ve çinko konsantrasyonları için de geçerlidir.

Rehabilitasyonun ikinci yılında, taşınan sediman içerisindeki ortalama magnezyum ve potasyum konsantrasyonları bakımından havzalar arasında istatistiksel olarak farklar gözlemlenmiştir ($p < 0,05$). En yüksek ortalama magnezyum konsantrasyonu, yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) 1071,5 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.28). Bunu takiben, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) ortalama magnezyum konsantrasyonu 743 mg/l olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, yangın sonrası doğal bırakılan havza (YADD-H1) ortalama magnezyum konsantrasyonu açısından istatistiksel olarak yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) benzerken ($p > 0,05$), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile kontrol sahasından ise istatistiksel olarak farklıdır ($p < 0,05$). Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile kontrol sahasında ölçülen ortalama magnezyum konsantrasyonu sırasıyla 536,7 mg/l ve 590,5 mg/l olarak belirlenmiştir ve bu iki havza istatistiksel olarak hem birbiriyle hem de yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) benzerdir ($p > 0,05$) (Şekil 3.28).

Taşınan sediman içerisindeki ortalama potasyum konsantrasyonu, yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) 114,4 mg/l, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 90,5 mg/l, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 102,7 mg/l ve kontrol sahasında ise 60,04 mg/l olarak ölçülmüştür. Bu verilere göre, ortalama potasyum konsantrasyonu bakımından farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış üç havza arasında istatistiksel olarak benzerlik bulunmuştur ($p > 0,05$). Ancak, bu havzalar arasında yalnızca yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) kontrol sahasıyla istatistiksel olarak benzerlik göstermektedir ($p > 0,05$) (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Taşınan Sediman İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonları (mg/l)

3.3.4. Sediman İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Miktar ve Oranları

3.3.4.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

2022 yılının Ekim ayında başlayıp 2023 yılının Mayıs ayında sona eren üretim faaliyetleri (salvage logging) süresince, Havza 1, Havza 2, Havza 3 ve kontrol sahasında yer alan her bir tuzakta taşınan ortalama bitki besin maddesi miktarları belirlenmiştir (Şekil 3.29). Bu süreç boyunca havzalarda taşınan en fazla bitki besin maddelerinin organik karbon (OC), kalsiyum (Ca) ve toplam azot (TN) olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan, taşınan en az bitki besin maddeleri ise fosfor (P), demir (Fe), çinko (Zn) ve bakır (Cu) olmuştur. Ölçülen bitki besin maddelerinin taşınım miktarları bakımından yangın geçirmemiş kontrol sahası, üretim faaliyetleri yapılan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'e göre belirgin farklar göstermektedir. Kontrol sahasında taşınan tüm bitki besin maddelerinin miktarları, üretim faaliyetleri yapılan havzalara kıyasla daha düşüktür ve çinko (Zn) ile bakır (Cu) dışında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar görülmüştür ($p < 0,05$).

Üretim faaliyetleri süresince taşınan bitki besin maddeleri açısından Havza 1, Havza 2 ve Havza 3 arasında da önemli farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.29). Genel olarak, Havza 1'de taşınan bitki besin maddelerinin miktarları Havza 2 ve Havza 3'e göre daha düşüktür.

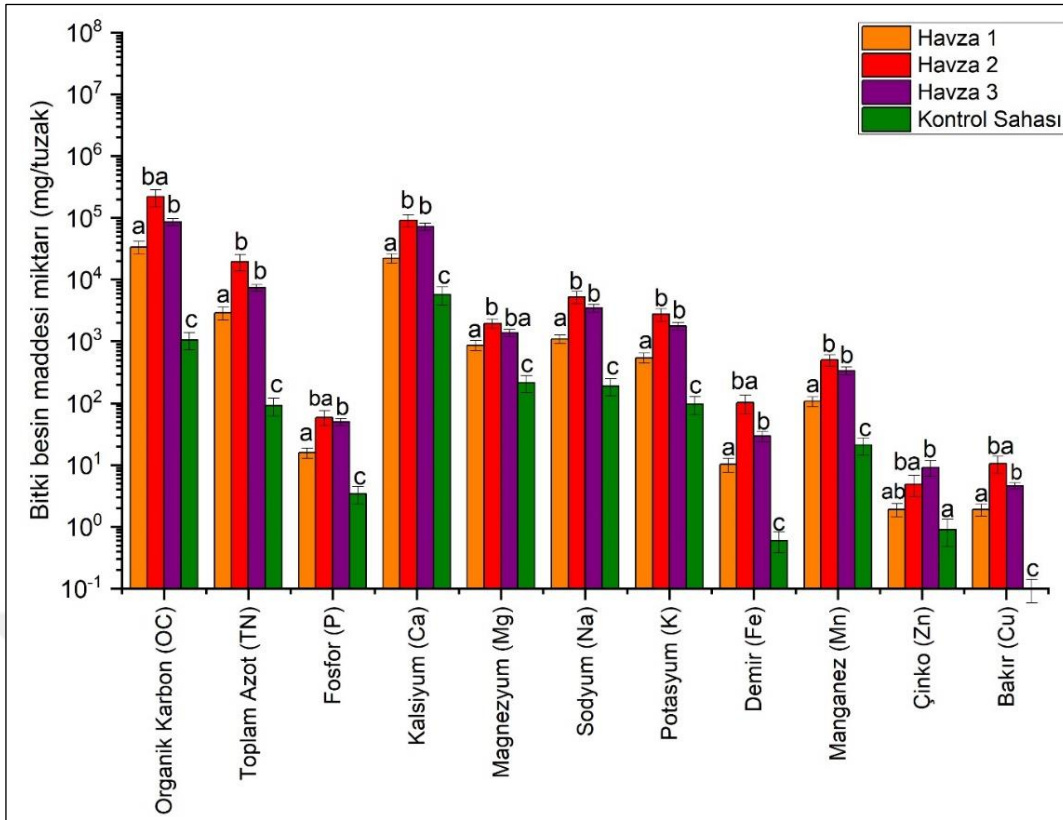
Çinko (Zn) dışında, Havza 2’de taşınan bitki besin maddesi miktarları hem Havza 1’den hem de Havza 3’ten daha fazladır. Havza 3’te ise, taşınan çinko miktarı en yüksek bulunmuş, diğer bitki besin maddelerinin çoğunda ise, kontrol sahası ve Havza 1’den daha yüksek, Havza 2’den ise daha düşük değerler gözlemlenmiştir.

Havzalar arasında taşınan bitki besin maddelerinin miktarları açısından istatistiksel benzerlikler ve farklılıklar tespit edilmiştir (Şekil 3.29). Havza 2 ve Havza 3’te taşınan ortalama toplam azot (TN), kalsiyum (Ca), sodyum (Na), potasyum (K) ve manganez (Mn) miktarları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmazken ($p>0,05$), Havza 1 ve kontrol sahasından bu besin maddeleri açısından anlamlı farklar görülmüştür ($p<0,05$). Örneğin, Havza 2’de taşınan ortalama toplam azot 19.543,3 mg/tuzak, kalsiyum 91.919,5 mg/tuzak, sodyum 5.271,9 mg/tuzak, potasyum 2.753,2 mg/tuzak ve manganez 500,7 mg/tuzak olarak ölçülmüştür. Bu değerler, Havza 1’e oranla sırasıyla 6,7 kat, 4,1 kat, 4,7 kat, 5 kat ve 4,6 kat daha fazladır (Şekil 3.29). Havza 3’te ise taşınan ortalama toplam azot 7.419,9 mg/tuzak, kalsiyum 72.628,3 mg/tuzak, sodyum 3.490,4 mg/tuzak, potasyum 1.784,2 mg/tuzak ve manganez 336,3 mg/tuzak olarak ölçülmüştür. Bu değerler, Havza 1’e göre sırasıyla 2,5 kat, 3,2 kat, 3,1 kat, 3,2 kat ve 3,1 kat daha fazladır. Her ne kadar Havza 1’de taşınan ortalama toplam azot, kalsiyum, sodyum, potasyum ve manganez miktarları Havza 2 ve Havza 3’e göre daha düşük olsa da, kontrol sahasına kıyasla bu miktarlar çok daha yüksektir. Havza 1’de taşınan ortalama toplam azot 2.908,9 mg/tuzak, kalsiyum 22.095,3 mg/tuzak, sodyum 1.102,4 mg/tuzak, potasyum 545,2 mg/tuzak ve manganez 107,2 mg/tuzak olup, bu miktarlar kontrol sahasına göre sırasıyla 31,8 kat, 3,8 kat, 5,7 kat, 5,6 kat ve 5 kat daha fazladır (Şekil 3.29).

Üretim faaliyetleri süresince taşınan organik karbon (OC), fosfor (P), demir (Fe) ve bakır (Cu) miktarları arasında, Havza 1, Havza 2 ve Havza 3’teki ölçümler, kontrol sahasından istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar göstermiştir ($p<0,05$) (Şekil 3.29). Ancak, Havza 1 ile Havza 3 arasında istatistiksel fark bulunurken ($p<0,05$), Havza 2’nin daha çok Havza 3’e benzer olduğu ve istatistiksel olarak Havza 1 ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir ($p>0,05$). Bu sürede, Havza 1’de taşınan ortalama organik karbon 33.680,7 mg/tuzak, fosfor 15,8 mg/tuzak, demir 10,2 mg/tuzak ve bakır 1,91 mg/tuzak olarak ölçülmüştür (Şekil 3.29). Havza 2 ve Havza 3’te ise taşınan organik karbon sırasıyla 218.935,6 mg/tuzak ve 86.149 mg/tuzak, fosfor sırasıyla 58,9 mg/tuzak ve 49,6 mg/tuzak, demir sırasıyla 102,1 mg/tuzak ve 29,2 mg/tuzak ve bakır sırasıyla 10,5 mg/tuzak ve 4,58 mg/tuzak olmuştur. Kontrol sahasında ise taşınan organik karbon, fosfor, demir ve bakır miktarları sırasıyla 1.056,9 mg/tuzak, 3,4 mg/tuzak, 0,69 mg/tuzak ve 0,13 mg/tuzak olarak ölçülmüştür (Şekil 3.29).

Magnezyum (Mg) miktarları açısından Havza 1’de taşınan ortalama magnezyum, Havza 2 ve kontrol sahasından farklı ($p<0,05$), ancak Havza 3 ile benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Havza 3’te taşınan ortalama magnezyum, Havza 2 ile daha çok benzerken, Havza 1 ile de benzerlik göstermektedir ($p>0,05$) (Şekil 3.29). Kontrol sahasında taşınan ortalama magnezyum miktarı ise üretim faaliyetleri yapılan havzalara göre istatistiksel olarak anlamlı farklar göstermektedir ($p<0,05$). Havza 2’de taşınan ortalama magnezyum miktarı 1.956,6 mg/tuzak, Havza 3’te ise 1.393 mg/tuzak olarak ölçülmüştür. Havza 1’de taşınan ortalama magnezyum miktarı ise 871,6 mg/tuzak olup, bu değer Havza 2 ve Havza 3’ten düşük, ancak kontrol sahasından (215,7 mg/tuzak) daha yüksektir (Şekil 3.29).

Üretim faaliyetleri süresince taşınan ortalama çinko (Zn) miktarı açısından, Havza 1, Havza 2 ve Havza 3 arasında istatistiksel açıdan fark bulunmamıştır ($p>0,05$). Ancak, Havza 1 ve Havza 2’de taşınan çinko miktarı, Havza 3’e ve kontrol sahasına benzerken, sadece Havza 3’te taşınan çinko miktarı kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$). Havza 1’de taşınan ortalama çinko 1,93 mg/tuzak, Havza 2’de 4,9 mg/tuzak, Havza 3’te ise 9,19 mg/tuzak olarak ölçülmüştür (Şekil 3.29). Kontrol sahasında ise taşınan ortalama çinko miktarı 0,94 mg/tuzak olmuştur. Üretim faaliyetleri süresince taşınan bakır (Cu) miktarı, Havza 1 ve Havza 2’de benzerken ($p>0,05$), Havza 3 ile kontrol sahası arasında önemli farklar bulunmuştur ($p<0,05$). Bu sürede taşınan ortalama bakır miktarı, Havza 1’de 1,91 mg/tuzak, Havza 2’de 10,50 mg/tuzak, Havza 3’te ise 4,58 mg/tuzak olarak ölçülmüştür (Şekil 3.29).



Şekil 3.29 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Sediman İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarları (mg/tuzak)

Şekil, üretim faaliyetleri (salvage logging) dönemi boyunca farklı havzalarda taşınan bitki besin maddesi miktarlarını (mg) göstermektedir (Şekil 3.30). Bu dönemde gerçekleşen dokuz farklı yağış olayının sonucunda taşınan toplam organik karbon, azot, fosfor, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, demir, manganez, çinko ve bakır miktarları, havzalara göre taşınan sediman miktarları ile doğru orantılıdır. Sediman miktarında olduğu gibi, taşınan bitki besin maddelerinin tamamında (organik karbon, azot, fosfor, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, demir, manganez, çinko ve bakır) havzalar arasında sırasıyla en yüksekten en düşüğe doğru sıralama şu şekilde belirlenmiştir: Havza 2 > Havza 3 > Havza 1 > Kontrol sahası.

Havzalar arasında dikkat çeken bir diğer ortak özellik, kontrol sahası da dahil olmak üzere en fazla taşınan bitki besin maddelerinin organik karbon, toplam azot ve kalsiyum olduğu, en az taşınanların ise çinko, bakır, demir ve fosfor olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.30). Üretim faaliyetleri süresince, yangın geçirmiş ve üretim faaliyetleri yapılmış olan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te taşınan bitki besin maddesi miktarları, kontrol sahası olan Havza 4'ten çok daha yüksektir. Ancak, benzer üretim faaliyetleri uygulanan Havza 1, Havza 2 ve Havza 3'te taşınan bitki besin maddesi miktarları arasında önemli farklar da bulunmaktadır. Sediman taşıma miktarında olduğu gibi, çinko hariç diğer bitki besin maddelerinin tamamı en fazla Havza 2'de taşınmıştır (Şekil 3.30).

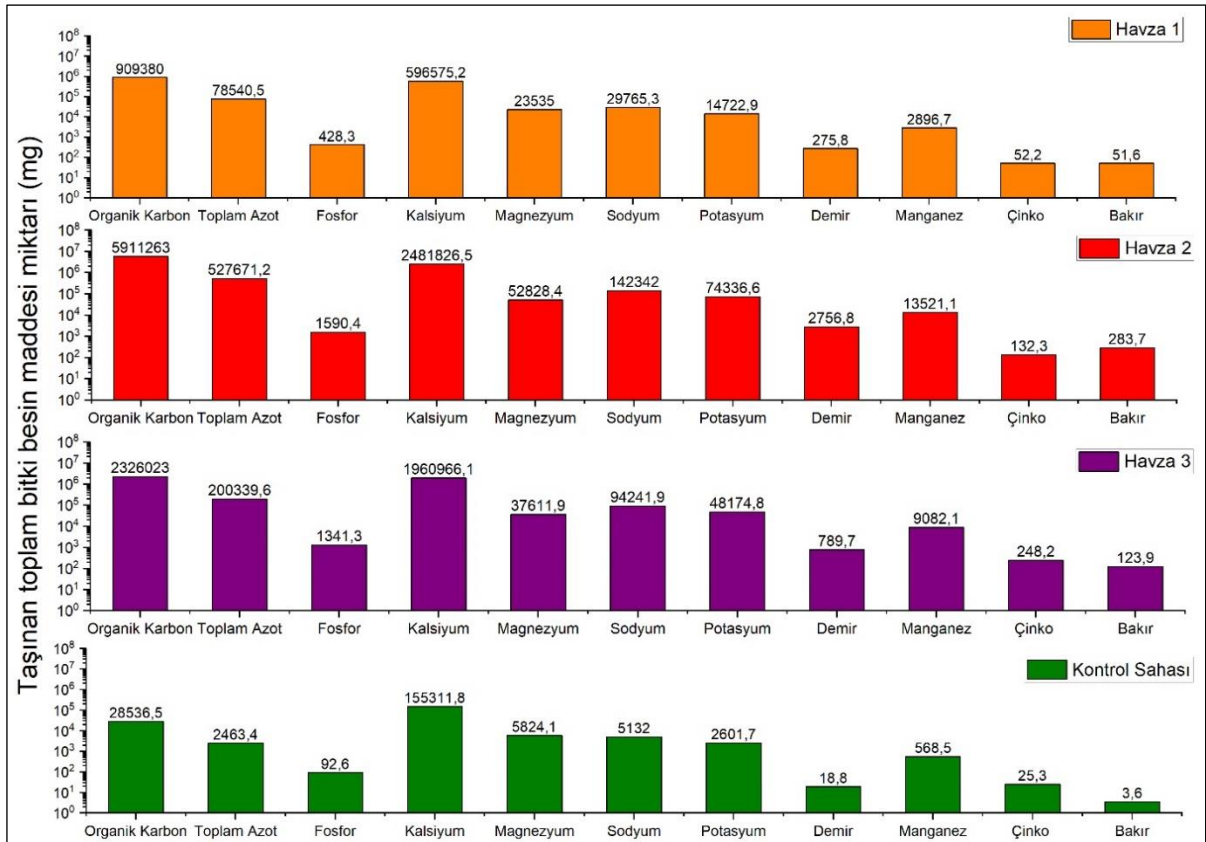
Havza 2'de taşınan bitki besin maddeleri arasında en fazla organik karbon taşınmıştır (5.911.263 mg). Bu miktar, Havza 1'den 6,5 kat, Havza 3'ten 2,5 kat ve kontrol sahasından ise yaklaşık 207,1 kat daha fazladır. Organik karbondan sonra en fazla taşınan bitki besin maddesi kalsiyumdur (2.481.826,5 mg). Bu miktar, Havza 1'den 4,1 kat, Havza 3'ten 1,2 kat ve kontrol sahasından ise yaklaşık 15,9 kat daha fazladır. Kalsiyumdan sonra en fazla taşınan bitki besin maddesi toplam azottur (527.671,2 mg). Bu miktar, Havza 1'den 6,7 kat, Havza 3'ten 2,6 kat ve kontrol sahasından ise yaklaşık 214,1 kat daha fazladır. Havza 2'de taşınan sodyum miktarı 142.342 mg, toplam potasyum miktarı 74.336 mg ve toplam magnezyum miktarı ise 52.828,4 mg'dır. En az taşınan bitki besin maddeleri sırasıyla çinko (132,3 mg), bakır (283,7 mg), fosfor (1.590,4 mg), demir (2.756,8 mg) ve manganezdır (13.521,1 mg) (Şekil 3.30).

Havza 3'te taşınan bitki besin maddelerinin tamamında, çinko hariç, miktar olarak Havza 2'den daha azdır. Ancak Havza 1 ve kontrol sahasına göre daha fazladır. En fazla taşınan bitki besin maddesi organik karbondur (2.326.023,3 mg), bu miktar, Havza 1'den 2,5 kat, kontrol sahasından ise 81,5 kat daha fazladır. Organik karbondan sonra en fazla taşınan bitki besin maddesi kalsiyumdur (1.960.966,1 mg). Bu miktar, Havza 1'den 3,2 kat, kontrol sahasından ise 12,6 kat daha fazladır. Havza 3'te taşınan toplam azot miktarı 200.339,6 mg olup, bu miktar Havza 1'den 2,5 kat, kontrol sahasından ise 81,3 kat daha fazladır. Havza 3'te taşınan sodyum miktarı 94.241,9 mg, potasyum 48.174,8 mg, magnezyum 37.611,9 mg'dır. Havza 3'te en fazla taşınan çinko miktarı ise 248,2 mg'dır. Manganez miktarı 9.082,1 mg, demir 789,7 mg ve bakır ise 123,9 mg'dır (Şekil 3.30).

Üretim faaliyetleri süresince yangın geçirmiş havzalar arasında en az bitki besin maddesi taşınan saha Havza 1'dir. Havza 1'de taşınan sediman ve bitki besin maddesi miktarı, Havza 2 ve Havza 3'e göre daha az olsa da yangın geçirmemiş kontrol sahasına göre daha fazladır. Havza 1'de en fazla taşınan bitki besin maddesi organik karbondur (909.380 mg), bu miktar kontrol sahasından yaklaşık 31,8 kat daha fazladır. Organik karbondan sonra en fazla taşınan bitki besin maddesi kalsiyumdur (596.575,2 mg), bu miktar kontrol sahasından yaklaşık 3,8 kat daha fazladır. Toplam azot miktarı 78.540,5 mg, sodyum 29.765,3 mg, magnezyum 23.535 mg ve potasyum 14.722,9 mg'dır. Manganez 2.896,7 mg, fosfor 428,3 mg, demir 275,8 mg, çinko 52,2 mg ve bakır 51,6 mg'dır (Şekil 3.30).

Kontrol sahasında ise yangın geçirmemiş ve üretim faaliyetleri yapılmamış bir alanda, taşınan bitki besin maddesi miktarları daha düşüktür. Kontrol sahasında en fazla taşınan bitki besin maddesi kalsiyumdur (155.311,8 mg). Ardından organik karbon (28.536,5 mg) ve toplam azot (2.463,4 mg) taşınmıştır. Kontrol sahasında taşınan magnezyum miktarı 5.824,1 mg, sodyum 5.132 mg, potasyum 2.601,7 mg, manganez 568,5 mg, fosfor 92,6 mg, çinko 25,3 mg,

demir 18,8 mg ve bakır 3,6 mg'dır (Şekil 3.30). Sonuç olarak, kontrol sahasında taşınan bitki besin maddesi miktarları yangın sonrası üretim faaliyetleri yapılmış olan havzalara göre çok daha düşüktür.



Şekil 3.30 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemi Boyunca Sediman İçerisinde Taşınan Toplam Bitki Besin Maddesi Miktarı (mg)

3.3.4.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

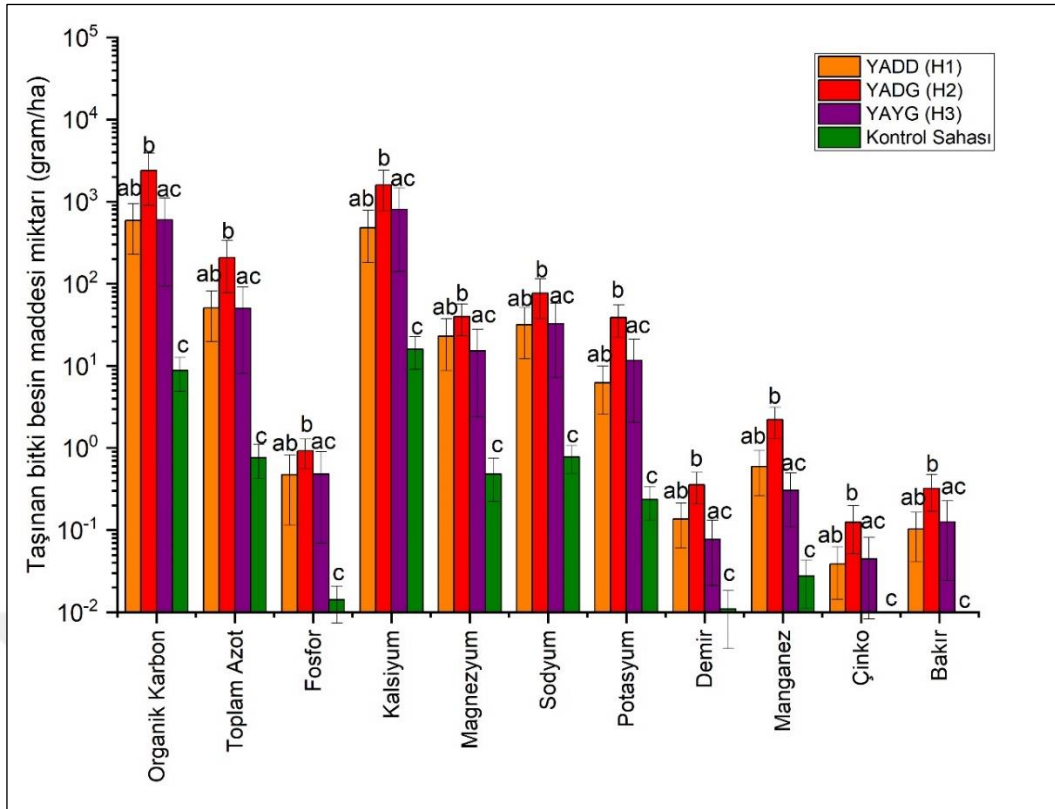
Rehabilitasyon döneminin birinci yılında, yüzeysel akış sonucu taşınan sedimanla birlikte taşınan organik karbon (OC), toplam azot (TN), fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), demir (Fe), manganez (Mn), çinko (Zn) ve bakır (Cu) miktarları (gram/ha) belirlenmiştir (Şekil 3.31). Havzalar arasında taşınan bitki besin maddesi miktarları bakımından bazı benzerlikler ve farklılıklar gözlemlenmiştir. Tüm havzalarda, kalsiyum, organik karbon, toplam azot, sodyum, magnezyum ve potasyum taşınan sediman içerisindeki miktarları diğer besin maddelerine göre daha yüksek iken, çinko, demir, bakır, fosfor ve manganez daha düşük seviyelerde taşınmıştır (Şekil 3.31).

Taşınan bitki besin maddesi miktarları açısından en yüksek taşınım, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) gerçekleşmiştir. Bu havzada taşınan bitki besin maddelerinin miktarları, yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1) havza ile benzerken ($p>0,05$), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havza ve kontrol sahasından istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$). YADD-H1 ile YAYG-H3 havzalarındaki taşınım

miktarları ise birbirine yakındır (Şekil 3.31). Taşınan sediman miktarı da bu ilişkilerle paralellik göstermektedir. Rehabilitasyonun birinci yılı itibariyle, YADG-H2’de ortalama taşınan sediman miktarı 192,80 kg/ha iken, YADD-H1 ve YAYG-H3 havzalarında sırasıyla 59,31 kg/ha ve 74,44 kg/ha olarak belirlenmiştir. Kontrol sahasında ise taşınan sediman miktarı yalnızca 1,67 kg/ha’dır (Şekil 3.31).

Özellikle organik karbon, kalsiyum ve toplam azot taşınımı açısından en fazla taşınım YADG-H2’de gerçekleşmiştir. YADG-H2’de taşınan organik karbon miktarı, YADD-H1’den 4,08 kat, YAYG-H3’ten 3,99 kat ve kontrol sahasından ise 272,9 kat daha fazladır. Benzer şekilde, taşınan kalsiyum ve toplam azot miktarları da en yüksek YADG-H2 havzasında gözlemlenmiştir. YADD-H1 ve YAYG-H3 havzalarında taşınan organik karbon, toplam azot, sodyum ve fosfor miktarları birbirine yakın değerler gösterirken, YADD-H1’de taşınan magnezyum, demir ve manganez miktarları YAYG-H3’ten daha yüksek olmuştur (Şekil 3.31). Buna karşılık, YAYG-H3’te taşınan kalsiyum, potasyum, çinko ve bakır miktarları daha yüksek bulunmuştur. Kontrol sahasında ise taşınan bitki besin maddesi miktarları rehabilitasyon uygulanan havzalara göre oldukça düşüktür ve özellikle çinko, bakır, demir ve fosfor miktarları en düşük seviyelerde ölçülmüştür (Şekil 3.31).

Sonuç olarak, rehabilitasyon dönemi birinci yılında, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2), diğer tüm havzalara göre en fazla bitki besin maddesi taşımış ve taşınım miktarları bakımından belirgin farklar gözlemlenmiştir. Bu bulgular, rehabilitasyon uygulamalarının bitki besin maddesi taşınımı üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 3.31 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Sediman İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarı (gram/ha)

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında, yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahasında sediman içerisinde taşınan organik karbon (OC), toplam azot (TN), fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), demir (Fe), manganez (Mn), çinko (Zn) ve bakır (Cu) miktarları (gram/ha) belirlenmiştir (Şekil 3.32). Bütün havzalarda, sediman içerisinde taşınan organik karbon, kalsiyum, toplam azot, magnezyum, sodyum ve potasyum miktarları, diğer bitki besin maddelerine göre daha yüksek bulunmuş, buna karşılık demir, fosfor, manganez, çinko ve bakır miktarları daha düşük olmuştur.

Taşınan bitki besin maddesi miktarları açısından, rehabilitasyonun ikinci yılında havzalar arasında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.32). Kontrol sahasında taşınan ortalama bitki besin maddesi miktarları, rehabilitasyon uygulanan üç havzadan belirgin şekilde daha düşük olmuştur. Öte yandan, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3), taşınan ortalama bitki besin maddesi miktarları, hem yangın sonrası doğal bırakılan havzadan (YADD-H1) hem de yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzadan (YADG-H2) daha fazla bulunmuştur. YADD-H1'de ise taşınan bitki besin maddesi miktarları, YAYG-H3'ten daha düşük ancak YADG-H2'den daha yüksek olmuştur. YADG-H2'de taşınan bitki besin maddesi miktarları ise, YAYG-H3 ve YADD-H1'den daha düşük olmasına rağmen,

kontrol sahasından daha yüksektir. Bu bulgular, taşınan bitki besin maddesi miktarlarının genel olarak taşınan sediman miktarıyla doğru orantılı olduğunu göstermektedir (Şekil 3.32).

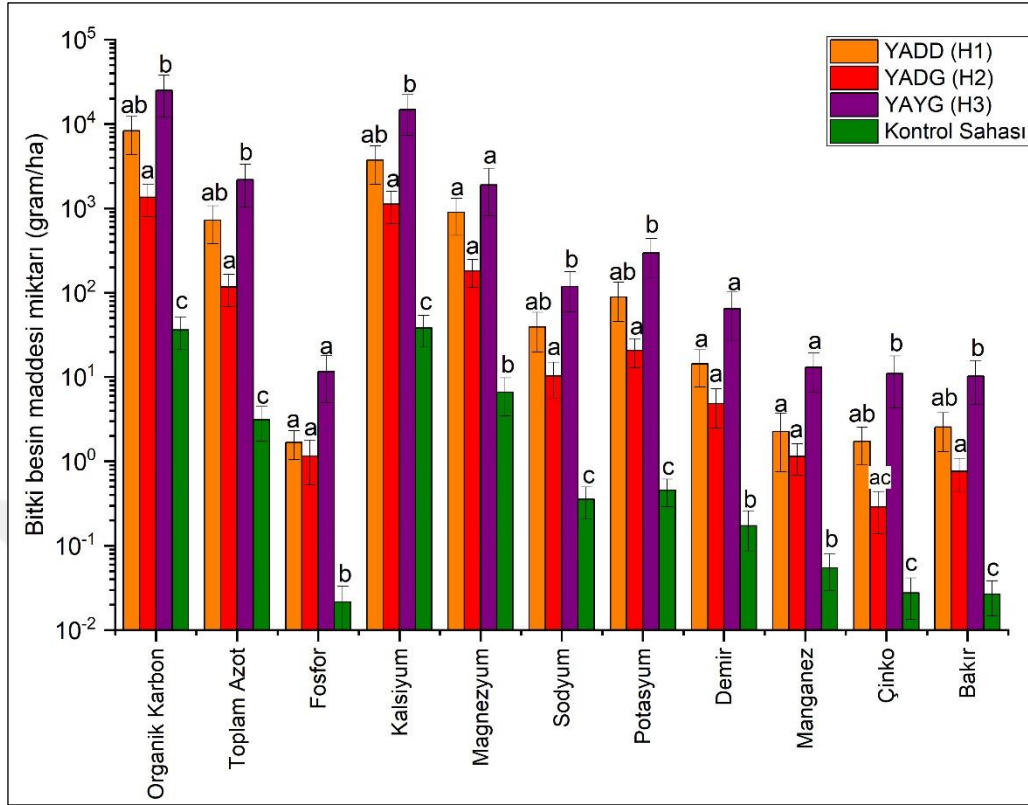
Sediman içerisinde taşınan ortalama organik karbon, toplam azot, kalsiyum, sodyum, potasyum, çinko ve bakır miktarları, istatistiksel olarak YAYG-H3 havzasında diğer havzalara göre daha yüksektir. Ancak, YAYG-H3'te taşınan bu besin maddelerinin miktarları, YADD-H1 ile benzerken ($p>0,05$), YADG-H2 ve kontrol sahasından istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$) (Şekil 3.32). Örneğin, YAYG-H3'te taşınan ortalama organik karbon ve kalsiyum miktarları sırasıyla 24.994,1 gram/ha ve 8.259,8 gram/ha, YADD-H1'de ise 14.716,3 gram/ha ve 3.703 gram/ha olarak belirlenmiştir. YADG-H2 ve kontrol sahasında ise bu değerler sırasıyla 1.349 gram/ha ve 36,25 gram/ha ile 1.120,5 gram/ha ve 38,16 gram/ha'dır. YADG-H2'de taşınan organik karbon ve kalsiyum miktarları, YAYG-H3 ve YADD-H1'den çok daha düşük olmasına rağmen, kontrol sahasından belirgin şekilde daha yüksektir. Bu sonuç, YADG-H2'de taşınan ortalama bitki besin maddesi miktarlarının, çinko dışında, kontrol sahasından istatistiksel olarak farklı olduğunu göstermektedir ($p<0,05$) (Şekil 3.32).

YADD-H1 ve YAYG-H3'te taşınan ortalama fosfor, magnezyum, demir ve manganez miktarları da benzer düzeyde olup, her üç havza da kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$). YAYG-H3'te taşınan bu besin maddeleri miktarları, YADD-H1 ve YADG-H2'den daha yüksek olmuştur. Örneğin, YAYG-H3'te taşınan ortalama toplam azot, magnezyum, fosfor, demir ve manganez miktarları sırasıyla YADD-H1'e göre 3 kat, YADG-H2'ye göre ise 18 kat daha fazladır. Bu farklar, taşınan organik karbon, toplam azot, kalsiyum ve diğer besin maddeleri ile karşılaştırıldığında daha düşük seviyelerde kalmıştır (Şekil 3.32).

Çinko miktarları, diğer bitki besin maddelerinden farklı olarak havzalar arasında daha büyük farklılıklar göstermektedir. YAYG-H3'te taşınan ortalama çinko miktarı 11,01 gram/ha, YADD-H1'de 1,72 gram/ha, YADG-H2'de ise 0,28 gram/ha olarak belirlenmiştir. Kontrol sahasında taşınan çinko miktarı ise 0,027 gram/ha'dır. YAYG-H3'te taşınan çinko miktarı, YADD-H1 ile benzerken ($p>0,05$), YADG-H2 ve kontrol sahasından istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$). YADD-H1'de taşınan çinko miktarı, YADG-H2 ve kontrol sahasına kıyasla daha yüksek olmasına rağmen ($p<0,05$), YADG-H2 ile kontrol sahası arasında çinko taşınımı açısından istatistiksel fark yoktur ($p>0,05$) (Şekil 3.32).

Sonuç olarak, rehabilitasyonun ikinci yılında, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) taşınan bitki besin maddesi miktarları açısından, diğer rehabilitasyon yöntemlerinden daha düşük, ancak kontrol sahasına göre daha yüksektir (Şekil 3.32). YAYG-H3'te ise taşınan besin maddeleri miktarı, genel olarak diğer havzalardan daha yüksektir ve

taşınan çinko miktarı dışında diğer bitki besin maddeleri bakımından daha belirgin farklar gözlemlenmiştir.



Şekil 3.32 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Sediman İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarı (gram/ha)

3.3.5. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonu

3.3.5.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

Üretim faaliyetleri (salvage logging) süresince oluşan dokuz farklı yağışlı dönemde yangın sonrası üretim faaliyetleri yapılmış olan Havza 1, Havza 2, Havza 3 ve yangın geçirmemiş olan kontrol sahasından alınan yüzeysel akış örneklerinde ortalama fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), bor (B), manganez (Mn), bakır (Cu), kükürt (S), amonyum azotu (NH_4^+) ve nitrat azotu (NO_3^-) konsantrasyonu belirlenmiştir (Şekil 3.33).

Bu dönemde havzalar arasında ortalama bitki besin maddesi konsantrasyonları açısından benzerlikler ve farklılıklar göze çarpmaktadır. Nitekim yangın sonrası üretim faaliyetleri yapılmış olan Havza 1, Havza 2, Havza 3 ve yangın geçirmeyen kontrol sahasında ortalama fosfor, bakır ve amonyum azotu konsantrasyonlarında istatistiksel açıdan bir fark yoktur ($p>0,05$). Nitekim ortalama fosfor konsantrasyonu Havza 1’de 0,17 mg/l, Havza 2’de 0,08 mg/l, Havza 3’te 0,05 mg/l ve kontrol sahasında ise 0,05 mg/l olarak belirlenmiştir (Şekil 3.33). Her ne kadar su içerisindeki ortalama fosfor konsantrasyonu en yüksek Havza 1’de

ölçülmesine rağmen, istatistiksel açıdan dört havza da ortalama fosfor konsantrasyonu bakımından birbirine benzerdir ($p>0,05$). Su içerisinde ölçülen bitki besin maddeleri arasında en düşük konsantrasyona sahip bakırdır. Ortalama bakır konsantrasyonu Havza 1 ve Havza 2’de 0,0008 mg/l, Havza 3 ve kontrol sahasında ise sırasıyla 0,0007 mg/l ve 0,0006 mg/l olarak belirlenmiş olup, her dört havzada da ölçülen bakır konsantrasyonu istatistiksel açıdan birbirine benzerdir ($p<0,05$) (Şekil 3.33). Her ne kadar ortalama konsantrasyon değeri en yüksek Havza 2’de olmasına rağmen, istatistiksel açıdan her dört havzada da benzer olan bir diğer bitki besin maddesi ise amonyum azotudur. Buna göre ortalama amonyum azotu Havza 1’de 0,06 mg/l, Havza 2’de 0,33 mg/l, Havza 3’te 0,10 mg/l ve kontrol sahasında 0,07 mg/l olarak belirlenmiştir (Şekil 3.33).

Üretim faaliyetleri (salvage logging) dönemi boyunca havzalar arasında ortalama magnezyum, bor ve kükürt konsantrasyonları havzalar arasında benzer değişim göstermiştir (Şekil 3.33). Havza 1 ve Havza 2 ölçülen ortalama magnezyum, bor ve kükürt konsantrasyonları Havza 3 ve kontrol sahasından hem daha yüksek hem de istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$). Havza 3 ve kontrol sahasında ölçülen ortalama magnezyum, bor ve kükürt konsantrasyonları ise istatistiksel olarak birbirine benzerdir ($p>0,05$). Magnezyum ve kükürt en yüksek konsantrasyona sahip bitki besin maddelerindendir. Buna göre Havza 1 ve Havza 2’de ölçülen ortalama magnezyum konsantrasyonu sırasıyla 29,4 mg/l ve 20,1 mg/l iken, Havza 3 ve kontrol sahasında ölçülen ortalama magnezyum konsantrasyonu ise sırasıyla 3,43 mg/l ve 6,29 mg/l’dir. Ortalama kükürt konsantrasyonu Havza 1’de 25,28 mg/l, Havza 2’de 15,35 mg/l olarak ölçülürken, Havza 3’te ve kontrol sahasında sırasıyla 3,57 mg/l ve 2,37 mg/l olarak belirlenmiştir. Bor ise en düşük konsantrasyon değerlerine sahip bitki besin maddelerinden biridir. Ortalama bor konsantrasyonu Havza 1 ve Havza 2’de sırasıyla 0,055 mg/l olarak ölçülmüştür. Havza 3 ve kontrol sahasında ölçülen ortalama bor konsantrasyonu ise sırasıyla 0,018 mg/l ve 0,012 mg/l’dir (Şekil 3.33).

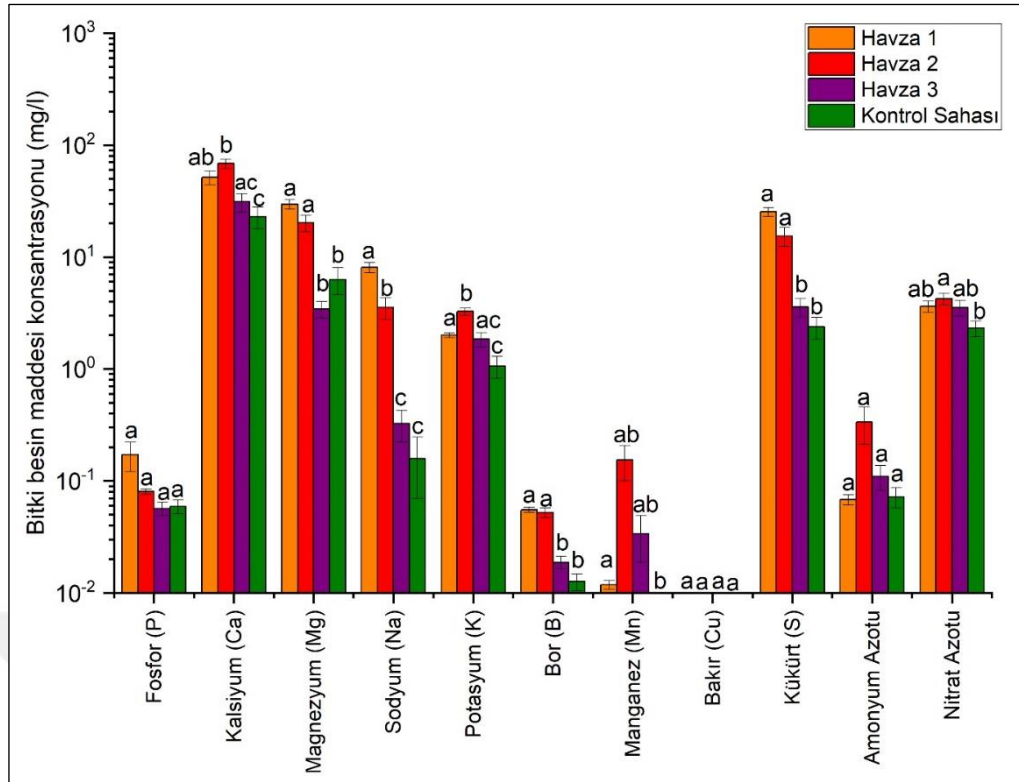
Kalsiyum, üretim faaliyetleri dönemi boyunca su içerisinde en yüksek konsantrasyona sahip bitki besin maddelerindendir (Şekil 3.33). Havzalar arasında ortalama en yüksek kalsiyum konsantrasyonu Havza 2’de 68,1 mg/l olarak ölçülmüştür. Bu havzadan sonra ortalama en yüksek kalsiyum konsantrasyonu Havza 1’de belirlenmiştir (51,5 mg/l). Havza 2’de ölçülen ortalama kalsiyum konsantrasyonu istatistiksel olarak sadece Havza 1 ile benzerlik göstermiştir ($p>0,05$). Havza 3’te ölçülen ortalama kalsiyum konsantrasyonu 31,08 mg/l, kontrol sahasında ölçülen kalsiyum konsantrasyonu ise 22,99 mg/l’dir. Buna göre Havza 1’de ölçülen ortalama kalsiyum konsantrasyonu Havza 3 ile benzerken, kontrol sahasından ise farklıdır ($p<0,05$).

Üretim faaliyetleri yapılmış olan havzalar arasında kontrol sahasına istatistiksel olarak sadece Havza 3 benzerlik göstermiştir ($p>0,05$) (Şekil 3.33).

Üretim faaliyetleri döneminde ortalama en yüksek sodyum konsantrasyonu Havza 1’de 8,08 mg/l olarak ölçülmüştür. Havza 2’de ise ölçülen ortalama sodyum konsantrasyonu 3,55 mg/l’dir. Nitekim Havza 1 ve Havza 2’de ölçülen ortalama sodyum konsantrasyonu bakımından birbirinden ve diğer havzalardan istatistiksel açıdan farklıdır ($p<0,05$). Havza 3 ve kontrol sahasında ölçülen ortalama sodyum konsantrasyonları ise istatistiksel açıdan birbirine benzerdir ($p>0,05$). Nitekim Havza 3 ve kontrol sahasında ölçülen ortalama sodyum konsantrasyonu sırasıyla 0,32 mg/l ve 0,15 mg/l’dir (Şekil 3.33).

Havzalar arasında ortalama en yüksek potasyum konsantrasyonu Havza 2’de 3,25 mg/l olarak ölçülmüştür. Havza 2’de ölçülen ortalama potasyum konsantrasyonu hem Havza 1 ve Havza 2’den hem de kontrol sahasından daha yüksektir (Şekil 3.33). Havza 2’de ölçülen bu değer istatistiksel olarak diğer havzalardan farklıdır ($p<0,05$). Havza 1, Havza 3 ve kontrol sahasında ölçülen ortalama potasyum konsantrasyonu ise sırasıyla 2 mg/l, 1,84 mg/l ve 1,06 mg/l’dir. Havza 1’de ölçülen ortalama potasyum konsantrasyonu istatistiksel olarak Havza 3 ile benzerken, kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$). Üretim faaliyetleri yapılmış olan havzalar arasında ortalama potasyum konsantrasyonu bakımından kontrol sahasına sadece Havza 3 benzerlik göstermiştir (Şekil 3.33).

Ölçüm süresince ortalama nitrat azotu konsantrasyon değerleri havzalar arasında nispeten birbirine daha yakındır. Buna göre ortalama nitrat azotu konsantrasyonu Havza 1’de 3,62 mg/l Havza 2’de 4,24 mg/l, Havza 3’te 3,53 mg/l ve kontrol sahasında ise 2,32 mg/l olarak belirlenmiştir (Şekil 3.33). Ortalama nitrat konsantrasyonu bakımından üretim faaliyetleri yapılmış havzalar istatistiksel açıdan birbirine benzerdir ($p>0,05$). Bunun yanında Havza 2 haricinde sadece Havza 1 ve Havza 3 aynı zamanda kontrol sahasıyla istatistiksel olarak benzerlik göstermiştir ($p>0,05$).



Şekil 3.33 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Dönemi Boyunca Yüzeysel Akış İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonları (mg/l)

3.3.5.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Rehabilitasyonun birinci yılı itibariyle, yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) ve yangın geçirmemiş kontrol sahalarından alınan yüzeysel akış örneklerindeki ortalama ortofosfat fosforu (PO_4^{3-}), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), manganez (Mn), bakır (Cu), kükürt (S), amonyum azotu (NH_4^+) ve nitrat azotu (NO_3) konsantrasyonları belirlenmiştir (Şekil 3.34). Rehabilitasyonun ilk yılı itibariyle, havzalarda su içerisinde taşınan bitki besin maddesi konsantrasyonları, sediman içerisindeki konsantrasyonlara kıyasla daha düşük düzeyler göstermektedir. Genel olarak, havzalardan alınan su örneklerinde ortalama kalsiyum, magnezyum, kükürt, sodyum ve potasyum konsantrasyonları, diğer bitki besin maddelerinin konsantrasyonlarına göre daha yüksektir. Ancak, bu dönemde yüzeysel akışla taşınan ortalama manganez ve bakır konsantrasyonları, diğer bitki besin maddelerine kıyasla çok daha düşüktür (Şekil 3.34).

Rehabilitasyonun birinci yılı boyunca alınan 16 farklı örnekleme dönemine göre, yüzeysel akışla taşınan ortalama bitki besin maddesi konsantrasyonları, uygulanmış olan rehabilitasyon yöntemleri ve kontrol sahası arasında bazı farklılıklar ve benzerlikler göstermiştir (Şekil 3.34). Özellikle, yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen

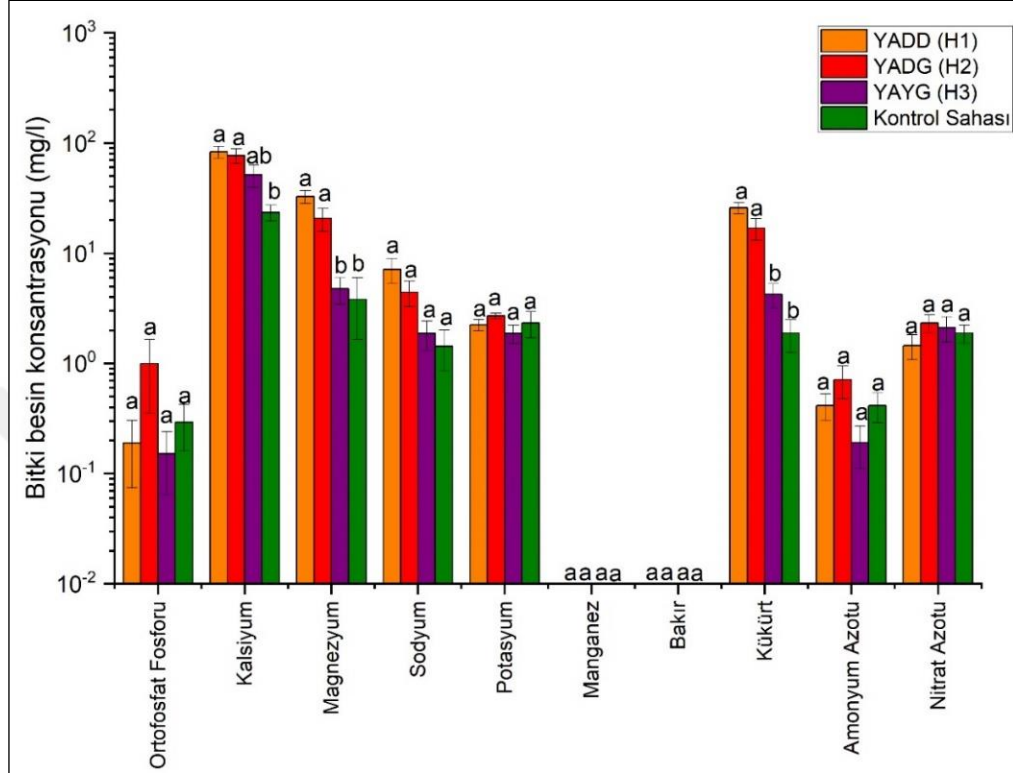
(YAYG-H3) ve yangın geçirmemiş kontrol havzalarında ölçülen ortalama ortofosfat fosforu, sodyum, potasyum, manganez, bakır, amonyum azotu ve nitrat azotu konsantrasyonları istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Bu bitki besin maddelerinin taşınması açısından, rehabilitasyon yöntemlerinin etkileri sınırlı kalmış, ancak bazı besin maddelerinde farklılıklar gözlemlenmiştir.

Buna karşılık, ilk yıl itibarıyla taşınan ortalama kalsiyum, magnezyum ve kükürt konsantrasyonları, rehabilitasyon uygulamaları ve kontrol sahası arasında belirgin farklılıklar göstermiştir. Yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1) ve yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2) havzalarda, ortalama kalsiyum konsantrasyonu hem yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havza hem de kontrol sahasına göre daha yüksek bulunmuştur (Şekil 3.34). Yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1) havzada ortalama kalsiyum konsantrasyonu 83 mg/l, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2) havzada ise 76,68 mg/l olarak ölçülmüştür. Bu iki havza arasında taşınan kalsiyum konsantrasyonu bakımından istatistiksel olarak önemli bir fark yokken ($p>0,05$), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzadaki ortalama kalsiyum konsantrasyonu 51,34 mg/l ve kontrol sahasında ise 23,39 mg/l olarak belirlenmiştir. Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada kalsiyum konsantrasyonu, diğer rehabilitasyon havzalarına ve kontrol sahasına göre daha düşük bulunmuş, ancak istatistiksel olarak diğer havzalarla benzerlik göstermiştir ($p>0,05$). Kontrol sahasında en düşük ortalama kalsiyum konsantrasyonu ölçülürken, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havza ile benzerlik göstermiştir, ancak yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1) ve yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2) havzalardan anlamlı şekilde farklıdır ($p<0,05$) (Şekil 3.34).

Magnezyum ve kükürt konsantrasyonları da benzer bir dağılım göstermiştir. Yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1) ve yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2) havzalarda, ortalama magnezyum ve kükürt konsantrasyonları hem birbirine yakın hem de yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havza ile kontrol sahasından daha yüksek bulunmuştur. Yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada ortalama magnezyum ve kükürt konsantrasyonları sırasıyla 32,69 mg/l ve 25,75 mg/l olarak ölçülürken, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada sırasıyla 20,63 mg/l ve 16,87 mg/l bulunmuştur. Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzada ise ortalama magnezyum ve kükürt konsantrasyonları sırasıyla 4,73 mg/l ve 4,20 mg/l olarak ölçülmüştür. Kontrol sahasında ise bu değerler sırasıyla 3,80 mg/l ve 1,88 mg/l olarak belirlenmiştir (Şekil 3.34).

Sonuç olarak, rehabilitasyonun ilk yılında yüzeysel akış içerisinde taşınan bitki besin maddelerinin konsantrasyonları, rehabilitasyon yöntemlerinin etkilerini yansıtarak, belirli besin

maddelerinin taşınmasında önemli farklılıklar ortaya koymuştur. Kalsiyum, magnezyum ve kükürt gibi bitki besin konsantrasyonları, yangın sonrası yapılan rehabilitasyon uygulamalarıyla artarken, diğer besin maddesi konsantrasyonlarındaki değişiklikler daha sınırlı kalmıştır.



Şekil 3.34 Rehabilitasyon Döneminin Birinci Yılında Yüzeysel Akış İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Maddesi Konsantrasyonu (mg/l)

Rehabilitasyonun ikinci yılı itibarıyla, yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahasında 12 farklı örneklem döneminde yüzeysel akış sırasında alınan su içerisindeki ortalama ortofosfat fosforu (PO_4^{3-}), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), manganez (Mn), bakır (Cu), kükürt (S), amonyum azotu (NH_4^+) ve nitrat azotu (NO_3) konsantrasyonları belirlenmiştir (Şekil 3.35). Bu dönemde, hem farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç havzada hem de kontrol sahasında, yüzeysel akış örneklerinde manganez ve bakır konsantrasyonlarına rastlanmamıştır. Genel olarak, havzalarda oluşan yüzeysel akışta kalsiyum, magnezyum ve kükürt konsantrasyonları, diğer bitki besin maddelerine kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Bunları potasyum ve nitrat azotu konsantrasyonları takip ederken, en düşük konsantrasyona sahip bitki besin maddeleri ise amonyum azotu ve ortofosfat fosfordur. Rehabilitasyonun birinci yılında su içerisinde tespit edilen manganez ve bakır konsantrasyonları, ikinci yılda hiçbir örneklem döneminde tespit edilmemiştir (Şekil 3.35).

İkinci yılda, yüzeysel akış içerisindeki bitki besin maddesi konsantrasyonları bakımından havzalar arasında bazı benzerlikler ve farklılıklar gözlemlenmiştir. Kontrollü saha da dahil olmak üzere dört havzada ölçülen ortalama nitrat azotu konsantrasyonu, istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Bunun dışında, kontrol sahasında ölçülen ortalama ortofosfat fosforu dışındaki tüm bitki besin maddesi konsantrasyonları, rehabilitasyon uygulanan diğer üç havzadan daha düşük seviyelerde ölçülmüştür (Şekil 3.35).

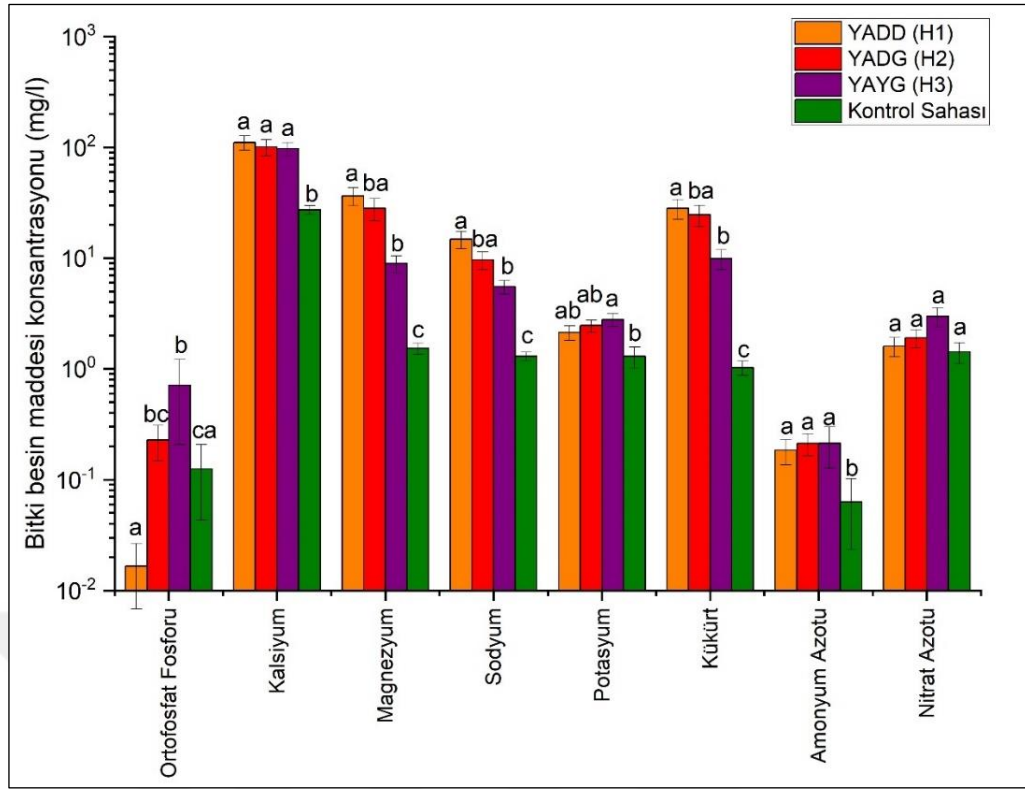
Bu dönemde su içerisinde en yüksek konsantrasyona sahip bitki besin maddesi, kalsiyum iken en düşük konsantrasyona sahip olan ise amonyum azotudur. Havzalar arasında, kalsiyum ve amonyum azotu konsantrasyonlarında benzer bir değişim gözlemlenmiştir. Yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2) ve yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalardaki ortalama kalsiyum ve amonyum azotu konsantrasyonları istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuştur ($p>0,05$), ancak kontrol sahasından hem daha yüksek hem de istatistiksel olarak farklıdır ($p<0,05$). Ortalama kalsiyum konsantrasyonu, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) 110,4 mg/l, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 100,3 mg/l, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise 97,4 mg/l olarak ölçülmüştür. Kontrol sahasında ise ortalama kalsiyum konsantrasyonu 27,15 mg/l olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, ortalama amonyum azotu konsantrasyonu, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalarda sırasıyla 0,18 mg/l, 0,21 mg/l ve 0,21 mg/l olarak ölçülmüş, kontrol sahasında ise bu değer 0,06 mg/l olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.35).

Rehabilitasyonun ikinci yılında, yüzeysel akış içerisindeki ortalama magnezyum, kükürt ve sodyum konsantrasyonları bakımından, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç havza ile kontrol sahası arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulunmuştur ($p<0,05$). En yüksek ortalama magnezyum, kükürt ve sodyum konsantrasyonları, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) sırasıyla 36,3 mg/l, 28 mg/l ve 14,8 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.35). Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) ortalama magnezyum, kükürt ve sodyum konsantrasyonu sırasıyla 28,1 mg/l, 24,5 mg/l ve 9,63 mg/l, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzadan (YADD-H1) daha düşük ancak yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havza ve kontrol sahasından daha yüksek bulunmuştur. Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise ortalama magnezyum, kükürt ve sodyum konsantrasyonu sırasıyla 8,92 mg/l, 9,86 mg/l ve 5,5 mg/l olarak ölçülmüştür. Bu değerler kontrol sahasından daha yüksek olmuştur. Yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) ölçülen ortalama magnezyum, kükürt ve sodyum konsantrasyonları,

yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzaya (YADG-H2) benzer bulunmuş ($p>0,05$), ancak hem yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzadan (YAYG-H3) hem de kontrol sahasından farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ise diğer iki rehabilitasyon havzasına istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Son olarak, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç havzada ölçülen ortalama magnezyum, kükürt ve sodyum konsantrasyonları, kontrol sahasından istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$) (Şekil 3.35).

Bu dönemde ölçülen ortalama ortofosfat fosforu konsantrasyonu, diğer bitki besin maddelerine göre çok daha düşük olmuştur. Yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) ortalama ortofosfat fosforu 0,016 mg/l ile, diğer rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış havzalar ve kontrol sahasından daha düşük bulunmuştur. En yüksek ortofosfat fosforu ise yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 0,709 mg/l olarak ölçülmüştür (Şekil 3.35). Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) ile kontrol sahasında ise sırasıyla 0,22 mg/l ve 0,12 mg/l olarak ölçülen ortalama ortofosfat fosforu konsantrasyonları birbirine daha yakındır. Sonuç olarak, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) ölçülen ortalama ortofosfat fosforu, istatistiksel olarak farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış diğer havzalardan farklıdır ($p<0,05$), ancak kontrol sahasına benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile kontrol sahası ise istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuştur (Şekil 3.35).

Son olarak, bu dönemde ortalama potasyum konsantrasyonu bakımından, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç havza istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuştur ($p>0,05$). Ancak, yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1) ve yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2) havzalarda ölçülen ortalama potasyum konsantrasyonu sırasıyla 2,13 mg/l ve 2,45 mg/l olup kontrol sahasına (1,29 mg/l) istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ($p>0,05$) (Şekil 3.35). Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise ortalama potasyum konsantrasyonu 2,77 mg/l olarak ölçülmüş olup, bu değer kontrol sahasından çok daha yüksek ve istatistiksel olarak farklı bulunmuştur ($p<0,05$).



Şekil 3.35 Rehabilitasyonun İkinci Yılında Yüzeysel Akış İçerisindeki Ortalama Bitki Besin Konsantrasyonu (mg/l)

3.3.6. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Miktar ve Oranları

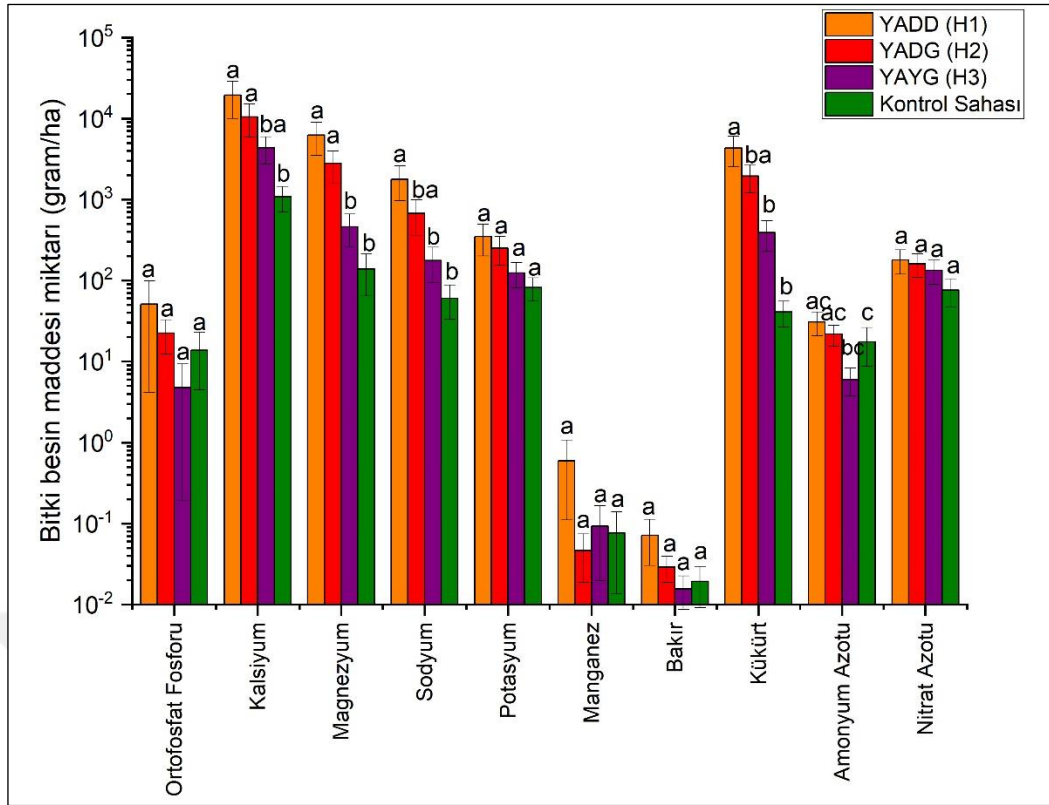
3.3.6.1. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Rehabilitasyon döneminin birinci yılında, yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahasında, yüzeysel akışla taşınan bitki besin maddelerinin ortalama miktarları diğer besin maddelerine kıyasla belirgin farklılıklar göstermektedir (Şekil 3.36). YADD-H1 havzasında taşınan ortalama kalsiyum, magnezyum, kükürt ve potasyum miktarları, diğer bitki besin maddelerine oranla daha fazladır. Bu besin maddelerinin taşınımını, sırasıyla nitrat azotu, amonyum azotu ve ortofosfat fosforu takip etmektedir. Manganez ve bakır ise taşınan besin maddeleri arasında en düşük miktarlara sahiptir. Bu dönemde, taşınan bitki besin maddelerinin miktarları, sedimanla taşınan maddelerden farklılıklar göstermektedir. YADD-H1’de taşınan ortalama bitki besin maddesi miktarları, diğer havzalara oranla daha yüksektir. YADG-H2’de, manganez dışında tüm bitki besin maddeleri, YADD-H1’e göre daha düşük miktarda taşınmakta olup, YAYG-H3 ve kontrol sahasına göre daha yüksektir (Şekil 3.36). YAYG-H3’te taşınan ortalama bitki besin maddeleri, genel olarak kontrol sahasına göre daha fazla, diğer rehabilitasyon uygulamalarına göre ise daha azdır. YAYG-H3’te yalnızca ortofosfat fosforu, amonyum azotu ve bakırın taşınım miktarları, kontrol sahasından daha

yüksektir. Diğer havzalarda taşınan bitki besin maddelerinin miktarları ise kontrol sahasına göre daha düşüktür (Şekil 3.36).

Havzalar arasında taşınan ortalama bitki besin maddesi miktarları, istatistiksel olarak farklılıklar göstermektedir. Magnezyum, kalsiyum, sodyum, kükürt ve amonyum azotu taşınım miktarlarında en belirgin farklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.36). YADD-H1 ve YADG-H2’de taşınan ortalama magnezyum miktarları sırasıyla 6.208,28 gram/ha ve 2.771,44 gram/ha olarak belirlenirken, YAYG-H3 ve kontrol sahasında bu miktarlar sırasıyla 458,83 gram/ha ve 138,81 gram/ha olarak ölçülmüştür. Doğal haline bırakılan (YADD-H1) ve tohumlama ve dal serme (YADG-H2) uygulamalarında taşınan magnezyum miktarları birbirine yakın olup ($p>0,05$), diğer havzalardan anlamlı derecede farklıdır ($p<0,05$). Kalsiyum taşınımında ise YADD-H1’de 19.362,35 gram/ha, YADG-H2’de 10.473,67 gram/ha, YAYG-H3’te 4.338,14 gram/ha ve kontrol sahasında 1.070,88 gram/ha olarak ölçülmüştür (Şekil 3.36). YADD-H1 ile diğer havzalar arasında anlamlı farklar bulunurken, YAYG-H3’ün taşınım miktarları kontrol sahasına daha yakın ($p>0,05$) olmuştur. Taşınan kükürt ve sodyum miktarları da benzer şekilde, YADD-H1’de sırasıyla 4.291,61 gram/ha ve 1.773,86 gram/ha, YADG-H2’de 1.949,47 gram/ha ve 673,74 gram/ha, YAYG-H3’te 388,54 gram/ha ve 175,58 gram/ha, kontrol sahasında ise 40,98 gram/ha ve 60,38 gram/ha olarak ölçülmüştür. YADD-H1 ile YADG-H2 arasındaki kükürt ve sodyum miktarları birbirine yakın iken, YADD-H1, YAYG-H3 ve kontrol sahasından farklıdır. YADG-H2 ise taşınan bu besin maddeleri açısından, diğer havzalara benzer seviyelerde taşınım göstermektedir (Şekil 3.36).

Amonyum azotu ise YADD-H1’de 30,7 gram/ha, YADG-H2’de 21,75 gram/ha, YAYG-H3’te 5,98 gram/ha ve kontrol sahasında ise 17,47 gram/ha taşınmıştır. YADD-H1 ve YADG-H2’de taşınan amonyum azotu miktarı kontrol sahasına benzerken, YAYG-H3 ile farklılık göstermektedir. YAYG-H3’te taşınan ortalama amonyum azotu miktarı, YADD-H1 ve YADG-H2’den farklıdır ($p<0,05$), ancak kontrol sahasıyla benzer düzeydedir ($p>0,05$) (Şekil 3.36). Diğer taraftan, ortofosfat fosforu, nitrat azotu, manganez ve bakır taşınım miktarları açısından en yüksek değerler YADD-H1 havzasında ölçülmüş olmakla birlikte, tüm havzalarda bu besin maddelerinin taşınım miktarları istatistiksel olarak birbirine benzer ($p>0,05$). Son olarak, YAYG-H3 havzasında taşınan ortofosfat fosforu, amonyum azotu ve bakır miktarları kontrol sahasından daha düşüktür (Şekil 3.36).



Şekil 3.36 Rehabilitasyonun Birinci Yılında Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarları (gram/ha)

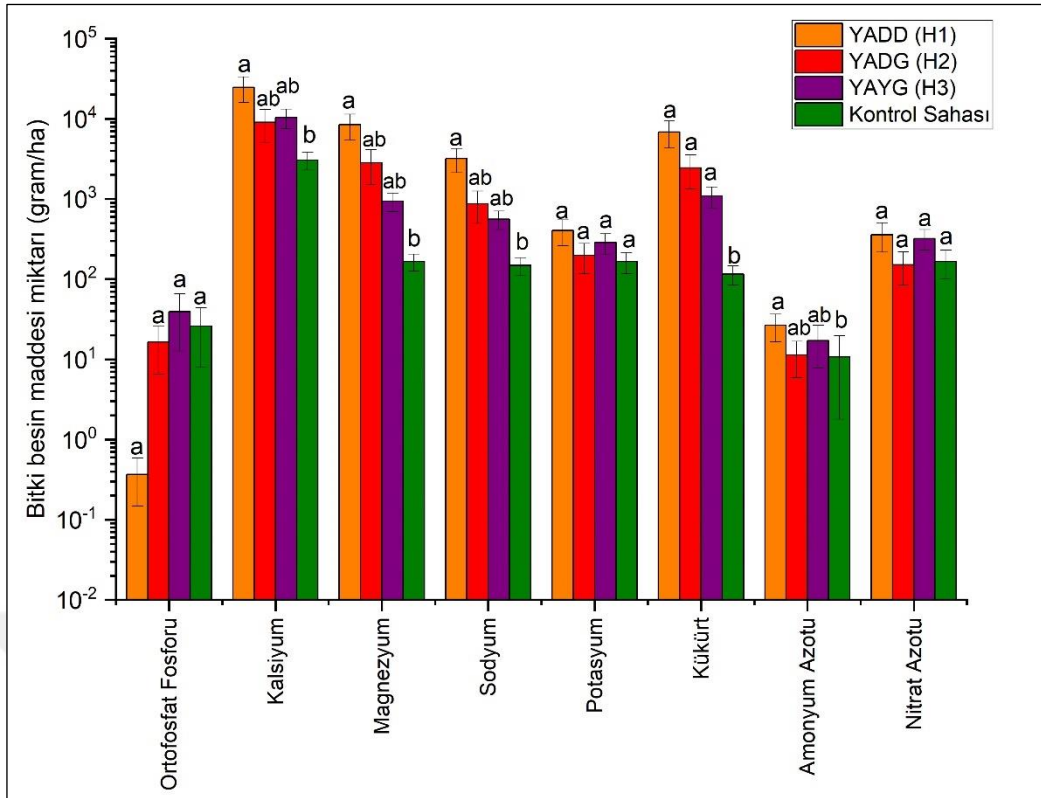
Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında havzalarda 12 farklı örnekleme döneminde taşınan ortalama kalsiyum, magnezyum, sodyum ve kükürt miktarları (gram/ha) diğer bitki besin maddelerine oranla daha yüksektir (Şekil 3.37). Bu bitki besin maddelerinin ardından ortalama potasyum ve nitrat azotu miktarları gelmektedir. Havzalarda ortalama ortofosfat fosforu ve amonyum azotu miktarları ise diğer bitki besin maddelerine oranla daha az taşınmıştır.

Rehabilitasyonunun ikinci yılında yüzeysel akış içerisinde taşınan bitki besin maddesi miktarları bakımından havzalar arasında bazı benzerlik ve farklılıklar vardır. Buna göre farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı havzalar ile kontrol sahası arasında taşınan ortalama ortofosfat fosforu, potasyum ve nitrat azotu miktarları (gram/ha) bakımından istatistiksel açıdan anlamlı bir fark yoktur ($p>0,05$) (Şekil 3.37).

Bu dönemde taşınan ortalama kalsiyum, magnezyum, sodyum ve amonyum azotu miktarları (gram/ha) havzalar arasında istatistiksel açıdan benzer değişim göstermiştir. Havzalar arasında yüzeysel akışla birlikte en fazla taşınan bitki besin maddesi kalsiyumdur. Yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) taşınan ortalama kalsiyum miktarı 24.678,4 gram/ha olup, bu miktar hem farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış diğer iki havzadan (YADG-H2 ve YAYG-H3) hem de kontrol sahasından daha yüksektir. Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) ve yangın sonrası sürülen ve fidan

dikilen havzada (YAYG-H3) taşınan ortalama kalsiyum miktarı ise sırasıyla 9.047,8 ve 10.400,8 gram/ha'dır (Şekil 3.37). Havzalar arasında taşınan ortalama en düşük kalsiyum miktarı ise kontrol sahasında 3058,4 gram/ha olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde taşınan ortalama magnezyum miktarı, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) 8.439,3 gram/ha, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 2.822,1 gram/ha, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 938,5 gram/ha ve son olarak kontrol sahasında ise 165,3 gram/ha olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte taşınan ortalama en yüksek sodyum miktarı, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) 3.180,8 gram/ha olarak ölçülürken, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) taşınan ortalama sodyum miktarları ise nispeten birbirine daha yakındır (sırasıyla 870,3 gram/ha ve 560,8 gram/ha) (Şekil 3.37). Kontrol sahasında taşınan ortalama sodyum miktarı ise 147,5 gram/ha olup, bu değer diğer havzalardan çok daha düşüktür. Buna göre yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) taşınan ortalama kalsiyum, magnezyum, sodyum ve amonyum azotu miktarları, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı diğer iki havzaya istatistiksel olarak benzerken ($p>0,05$), kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$). Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) taşınan ortalama kalsiyum, magnezyum, sodyum ve amonyum azotu miktarları ise hem yangın sonrası doğal bırakılan havzaya (YADD-H1) hem de kontrol sahasına istatistiksel olarak benzemektedir ($p>0,05$) (Şekil 3.37).

Son olarak bu dönemde kalsiyum ve magnezyumdan sonra havzalarda en fazla taşınan bitki besin maddesi kükürttür. Havzalar taşınan ortalama en yüksek kükürt miktarı, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) 6.843,3 gram/ha olarak ölçülmüştür. Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) taşınan ortalama kükürt miktarı sırasıyla 2.431,3 gram/ha ve 1.084,7 gram/ha olup, bu iki havzada taşınan ortalama kükürt miktarı kontrol sahasından çok daha fazladır (115,4 gram/ha). Buna göre farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış üç havzada taşınan ortalama kükürt miktarları istatistiksel olarak birbirine benzer ($p>0,05$); fakat üç havza da kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$) (Şekil 3.37).



Şekil 3.37 Rehabilitasyonun İkinci Yılında Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Ortalama Bitki Besin Maddesi Miktarı (gram/ha)

3.4. Yüzeysel Akışın Su Kalitesi Özellikleri

3.4.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

Üretim faaliyetleri dönemi boyunca, 9 farklı yağışlı olay sırasında havzalardan alınan yüzeysel akış örneklerinde, çözülmüş oksijen (%), pH, elektriksel iletkenlik (EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$), toplam çözülmüş sediman konsantrasyonu (TDS, mg/l), tuzluluk (%), oksidasyon indirgeme potansiyeli (mV) ve bulanıklık (NTU) gibi çeşitli parametreler ölçülmüştür (Tablo 3.5). Çözülmüş oksijen, pH ve oksidasyon indirgeme potansiyeli değerleri açısından, Havza 1, Havza 2, Havza 3 ve kontrol sahası arasında istatistiksel bir fark bulunmamıştır ($p>0,05$). En yüksek çözülmüş oksijen değeri kontrol sahasında %103,7 olarak ölçülürken, en düşük değer Havza 2’de %81,64 olmuştur. Havza 1’de ölçülen ortalama çözülmüş oksijen değeri ise %101,5 ile üretim faaliyetleri yapılan havzalar arasında en yüksek değere sahiptir. Havza 3’te ölçülen çözülmüş oksijen değeri, Havza 2’den daha yüksek ancak Havza 1 ve kontrol sahasından daha düşüktür. Üretim faaliyetleri döneminde, pH değerleri havzalar arasında oldukça yakın olup, Havza 1’de 7,93, Havza 2’de 8,08, Havza 3’te 8,00 ve kontrol sahasında ise 7,92 olarak belirlenmiştir. Oksidasyon indirgeme potansiyeli değerleri de benzer şekilde havzalar arasında değişmiş ve istatistiksel fark bulunmamıştır ($p>0,05$) (Tablo 3.5).

Elektriksel iletkenlik, toplam çözünmüş sediman konsantrasyonu ve tuzluluk açısından ise havzalar arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. En yüksek elektriksel iletkenlik (450,71 $\mu\text{S}/\text{cm}$), toplam çözünmüş sediman (219,84 mg/l) ve tuzluluk (‰0,21) değerleri Havza 2’de ölçülürken, bu değerlere en yakın sonuçlar Havza 1’de sırasıyla 402,44 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 195,55 mg/l ve ‰0,19 olarak belirlenmiştir (Tablo 3.5). Havza 1 ve Havza 2’de ölçülen bu parametreler arasında istatistiksel olarak fark yoktur ($p>0,05$). Havza 3’te ise elektriksel iletkenlik, toplam çözünmüş sediman ve tuzluluk değerleri, diğer üretim uygulanan havzalardan daha düşük; ancak kontrol sahasından daha yüksek bulunmuştur. Bu açıdan, Havza 3, istatistiksel olarak Havza 1 ve kontrol sahasına benzerken ($p>0,05$), Havza 2’den farklıdır ($p<0,05$). En düşük elektriksel iletkenlik (169,01 $\mu\text{S}/\text{cm}$), toplam çözünmüş sediman (80,92 mg/l) ve tuzluluk (‰0,07) değerleri ise kontrol sahasında ölçülmüştür (Tablo 3.5).

Bulanıklık parametresi bakımından, üretim faaliyetleri dönemi boyunca en belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. En yüksek ortalama bulanıklık değeri Havza 2’de 1215 NTU olarak ölçülürken, bu değere en yakın sonuç Havza 1’de 441,26 NTU olarak belirlenmiştir. Üretim faaliyetleri yapılan havzalar arasında ortalama en düşük bulanıklık değeri ise Havza 1’de 62,22 NTU olarak ölçülmüştür. Kontrol sahasında ise ortalama bulanıklık değeri 16,52 NTU’dur (Tablo 3.5).

Tablo 3.5 Üretim Faaliyetleri (Salvage Logging) Döneminde Yüzeysel Akışta Ölçülen Ortalama Su Kalitesi Parametreleri

Parametre	Dönem	N (Olay)	Havza 1	Havza 2	Havza 3	Kontrol Sahası
			Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata
ÇO (%)	SL	9	101,5 ^a ± 1,86	81,64 ^a ± 14,23	96,28 ^a ± 5,78	103,7 ^a ± 2,31
pH	SL	9	7,93 ^a ± 0,11	8,08 ^a ± 0,18	8,00 ^a ± 0,12	7,92 ^a ± 0,10
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SL	9	402,44 ^{ab} ± 47,73	450,71 ^b ± 81,13	238,07 ^{ca} ± 51,28	169,01 ^c ± 48,71
TDS (mg/l)	SL	9	195,55 ^{ab} ± 23,56	219,84 ^b ± 40,39	114,35 ^{ca} ± 24,71	80,92 ^c ± 23,58
Tuzluluk (‰)	SL	9	0,19 ^{ab} ± 0,03	0,21 ^b ± 0,04	0,11 ^{ca} ± 0,02	0,07 ^c ± 0,04
ORP (mV)	SL	9	193,15 ^a ± 5,03	198,63 ^a ± 3,73	179,91 ^a ± 5,23	180,75 ^a ± 7,21
Bulanıklık (NTU)	SL	9	68,22 ^a ± 24,75	1215,5 ^b ± 665,62	441,26 ^{ab} ± 315,18	16,52 ^a ± 6,53

3.4.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Rehabilitasyon döneminin ilk yılında, yangın sonrası doğal haline bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) ile kontrol sahasından alınan yüzeysel akış örneklerinde, çözünmüş oksijen (Ç.O. %), pH, elektriksel iletkenlik (EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$), su sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), toplam çözünmüş sediman (TDS, mg/l), tuzluluk (%) ve oksidasyon indirgeme potansiyeli (ORP, mV) gibi parametreler ölçülmüştür (Tablo 3.6). Bu dönemde, çözünmüş oksijen, pH ve oksidasyon indirgeme potansiyeli açısından havzalar arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir ($p>0,05$). Çözünmüş oksijen açısından, en yüksek değer %105,76 ile kontrol sahasında, en düşük değer ise %101 ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ölçülmüştür. Kontrol sahasına en yakın değer ise %104,16 ile yangın sonrası doğal haline bırakılan havzaya (YADD-H1) aittir. pH değerleri ise, Havza 1’de 8,01, Havza 2’de 7,92, Havza 3’te 8,04 ve kontrol sahasında 8,04 olarak belirlenmiştir. Bu verilere göre, havzalar arasında pH bakımından da istatistiksel açıdan anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p>0,05$). Aynı şekilde, oksidasyon indirgeme potansiyeli değerleri de havzalar arasında benzer şekilde değişmiş ve anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir (Tablo 3.6).

Elektriksel iletkenlik, toplam çözünmüş sediman konsantrasyonu ve tuzluluk değerlerinde ise havzalar arasında daha belirgin farklar görülmüştür. En yüksek ortalama elektriksel iletkenlik ($771,28 \mu\text{S}/\text{cm}$), toplam çözünmüş sediman ($378,36 \text{ mg}/\text{l}$) ve tuzluluk (%0,37) değerleri, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) ölçülmüştür (Tablo 3.6). Bu değerlere en yakın ölçümler, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) sırasıyla $601,04 \mu\text{S}/\text{cm}$, $294,91 \text{ mg}/\text{l}$ ve %0,29 olarak belirlenmiştir. Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise bu parametrelerin değerleri, rehabilitasyon uygulanan diğer havzalara kıyasla daha düşük, ancak kontrol sahasından daha yüksektir. Kontrol sahasında ise bu parametrelerin en düşük ortalama değerleri sırasıyla $281,22 \mu\text{S}/\text{cm}$, $135,96 \text{ mg}/\text{l}$ ve %0,13 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) ile yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) arasında elektriksel iletkenlik, toplam çözünmüş sediman ve tuzluluk açısından istatistiksel fark bulunmamışken ($p>0,05$), bu değerler yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) ile kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$) (Tablo 3.6). Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ise, hem yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) hem de yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile benzer değerler gösterirken, kontrol sahasından farklıdır. Rehabilitasyon uygulamaları yapılan havzalar arasında, sadece yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) ile kontrol sahası elektriksel

iletkenlik, toplam çözünmüş sediman ve tuzluluk açısından istatistiksel olarak benzerlik göstermektedir ($p>0,05$) (Tablo 3.6).

Son olarak, yüzeysel akış suyunun ortalama sıcaklığı rehabilitasyon yöntemleri uygulanmış havzalar arasında istatistiksel olarak benzer bulunmuş ve bu değerler, kontrol sahasından yaklaşık olarak 5 °C daha yüksek olmuştur (Tablo 3.6).

Tablo 3.6 Rehabilitasyonun İlk Yılında Yüzeysel Akışta Ölçülen Ortalama Su Kalitesi Parametreleri

Parametre	Yıl	N (Olay)	YADD (H1)	YADG (H2)	YAYG (H3)	Kontrol Sahası
			Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata
ÇO (%)	1	16	104,16 ^a ± 1,78	102,45 ^a ± 1,08	101 ^a ± 1,91	105,76 ^a ± 1,53
pH	1	16	8,01 ^a ± 0,06	7,92 ^a ± 0,07	8,04 ^a ± 0,10	8,04 ^a ± 0,07
EC (µS/cm)	1	16	771,28 ^a ± 70,89	601,04 ^{ab} ± 89,72	416,4 ^{bc} ± 59,05	281,22 ^c ± 91,14
Sıcaklık (°C)	1	16	18,26 ^a ± 1,16	18,55 ^a ± 0,82	18,05 ^a ± 1,26	13,37 ^b ± 1,25
TDS (mg/l)	1	16	378,36 ^a ± 35,32	294,91 ^{ab} ± 44,14	201,03 ^{bc} ± 28,88	135,96 ^c ± 42,27
Tuzluluk (‰)	1	16	0,37 ^a ± 0,03	0,29 ^{ab} ± 0,04	0,20 ^{bc} ± 0,02	0,13 ^c ± 0,04
ORP (mV)	1	16	204,50 ^a ± 4,43	203,15 ^a ± 3,59	192,36 ^a ± 5,14	184,16 ^a ± 12,45
Bulanıklık (NTU)	1	16	305,97 ^a ± 181,25	2264,24 ^b ± 1349,82	1182,5 ^b ± 698,19	38,88 ^c ± 15,0

Rehabilitasyon döneminin ikinci yılında (01.06.2024-29.03.2025), yangın sonrası doğal bırakılan (YADD-H1), yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen (YADG-H2), yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen (YAYG-H3) havzalar ile kontrol sahasında, 12 farklı örnekleme döneminde oluşan yüzeysel akış esnasında çözünmüş oksijen (Ç.O., %), pH, elektriksel iletkenlik (EC, µS/cm), su sıcaklığı (°C), toplam çözünmüş sediman (TDS, mg/l), tuzluluk (‰) ve oksidasyon indirgeme potansiyeli (ORP, mV) değerleri belirlenmiştir (Tablo 3.7). Bu dönemde, yüzeysel akış suyunda ölçülen ortalama su kalitesi parametrelerinde bazı benzerlikler ve farklılıklar gözlemlenmiştir.

Kontrol sahası dahil olmak üzere, tüm havzalarda ölçülen ortalama çözünmüş oksijen değerleri istatistiksel olarak birbirine benzerdir ($p>0,05$). Buna göre, ortalama çözünmüş oksijen değeri yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) %99,14, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) %99,86 ve yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) %98,53 olarak ölçülmüştür. En yüksek çözünmüş oksijen değeri kontrol sahasında %102,85 olarak belirlenmiş, ancak bu değer, farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanan diğer üç havzadan istatistiksel olarak farklı değildir ($p>0,05$) (Tablo 3.7).

Rehabilitasyonun ikinci yılında ölçülen ortalama elektriksel iletkenlik (EC), tuzluluk (‰), toplam çözünmüş sediman (TDS) ve su sıcaklığı (°C) değerleri de benzer şekilde havzalar arasında istatistiksel açıdan benzer farklılıklar göstermektedir (Tablo 3.7). Farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanan havzalarda, bu parametrelerin değerleri istatistiksel olarak birbirine benzerken ($p>0,05$), kontrol sahasından belirgin şekilde farklıdır ($p<0,05$). Kontrol sahasında ölçülen ortalama elektriksel iletkenlik (EC) 156,25 $\mu\text{S/cm}$, tuzluluk (‰) ‰0,07, toplam çözünmüş sediman (TDS) 74,08 mg/l ve su sıcaklığı 12,25 °C iken, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) sırasıyla 637,65 $\mu\text{S/cm}$, ‰0,31, 310,68 mg/l ve 15,63 °C, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 552,64 $\mu\text{S/cm}$, ‰0,26, 267,12 mg/l ve 14,90 °C, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise 426,99 $\mu\text{S/cm}$, ‰0,20, 208,67 mg/l ve 15,63 °C olarak belirlenmiştir (Tablo 3.7).

Bu dönemde ölçülen ortalama pH ve oksidasyon indirgeme potansiyeli (ORP) değerleri bakımından havzalar arasında istatistiksel olarak fark gözlemlenmiştir ($p<0,05$). Farklı rehabilitasyon yöntemlerinin uygulandığı üç havzada, bu parametreler arasında istatistiksel fark bulunmamıştır ($p>0,05$) (Tablo 3.7). Ancak yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) ile yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) ölçülen ortalama pH ve oksidasyon indirgeme potansiyeli değerleri, istatistiksel olarak kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$), sadece yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ölçülen bu değerler istatistiksel olarak kontrol sahasına benzemektedir ($p>0,05$). Bu verilere göre, yangın sonrası doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) ortalama pH değeri 7,89, oksidasyon indirgeme potansiyeli ise 195,42 mV, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) ise sırasıyla 7,93 ve 186,89 mV olarak ölçülmüştür. Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ortalama pH ve oksidasyon indirgeme potansiyeli ise sırasıyla 8,10 ve 182,95 mV, kontrol sahasında ise 8,25 ve 173,17 mV olarak belirlenmiştir (Tablo 3.7).

Son olarak, bu dönemde ölçülen ortalama bulanıklık değerleri bakımından havzalar arasındaki fark, diğer su kalitesi parametrelerine oranla çok daha belirgindir. Ortalama en yüksek bulanıklık değeri, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) 2.479,3 NTU olarak ölçülmüştür (Tablo 3.7). Ardından en yakın değer, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) 1.309,35 NTU olarak belirlenmiştir. Yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) ölçülen ortalama bulanıklık değeri ise 333,3 NTU olup, hem yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzadan (YADG-H2) hem de yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzadan (YAYG-H3) çok daha düşük; ancak kontrol sahasından daha yüksektir. Sonuç olarak, ortalama bulanıklık açısından yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen

havza (YADG-H2) ile yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3) istatistiksel olarak birbirine benzerken ($p>0,05$), hem yangın sonrası doğal bırakılan havzadan (YADD-H1) hem de kontrol sahasından farklıdır ($p<0,05$) (Tablo 3.7).

Tablo 3.7 Rehabilitasyon Döneminin İkinci Yılında Yüzeysel Akışta Ölçülen Ortalama Su Kalitesi Parametreleri

Parametre	Yıl	N (Olay)	YADD (H1)	YADG (H2)	YAYG (H3)	Kontrol Sahası
			Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata	Ort.±Std. hata
ÇO (%)	2	12	99,14 ^a ± 1,58	99,86 ^a ± 0,93	98,53 ^a ± 1,31	102,85 ^a ± 1,16
pH	2	12	7,89 ^a ± 0,04	7,93 ^a ± 0,04	8,10 ^{ba} ± 0,06	8,25 ^b ± 0,09
EC (µS/cm)	2	12	637,65 ^a ± 94,4	552,64 ^a ± 85,3	426,99 ^a ± 52,5	156,25 ^b ± 10,4
Sıcaklık (°C)	2	12	15,63 ^a ± 1,01	14,90 ^a ± 1,03	15,63 ^a ± 0,95	12,25 ^b ± 0,91
TDS (mg/l)	2	12	310,69 ^a ± 46,9	267,12 ^a ± 43,08	208,67 ^a ± 25,1	74,08 ^b ± 5,00
Tuzluluk (‰)	2	12	0,31 ^a ± 0,04	0,26 ^a ± 0,04	0,20 ^a ± 0,02	0,07 ^b ± 0,004
ORP (mV)	2	12	195,42 ^a ± 4,14	186,89 ^a ± 3,59	182,95 ^{ba} ± 3,68	173,17 ^b ± 2,64
Bulanıklık (NTU)	2	12	333,30 ^a ± 181,25	1309,35 ^b ± 301,95	2479,30 ^b ± 1050,6	30,33 ^c ± 8,29

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TARTIŞMA

4.1. Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bu çalışmada orman yangının, üretim faaliyetlerinin ve farklı rehabilitasyon yöntemlerinin toprak özelliklerine olan etkileri, hacim ağırlığı (HA, g/cm³), toprak reaksiyonu (pH), elektriksel iletkenlik (EC, dS/m), toplam organik karbon (TOC, %), toplam azot (TN, %), fosfor (P, mg/kg), kalsiyum (Ca, mg/kg), magnezyum (Mg, mg/kg), sodyum (Na, mg/kg) ve potasyum (K, mg/kg) değerleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Orman yangınları, üst toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen ana faktörlerden biridir (Pereira vd., 2012; Úbeda ve Outeiro, 2009). Bu çalışmada orman yangını üst topraktaki hacim ağırlığının artmasına neden olmuştur. (0,96 g/cm³'ten 1,15 g/cm³). Hacim ağırlığı, toprak gözenekliliği ile ilişkili olup, toprağın infiltrasyon oranını ve hidrolik iletkenliğini etkiler. Bu konuda yapılan bazı çalışmalar benzer şekilde orman yangını sonrasında toprağın hacim ağırlığının arttığını tespit etmiştir (Heydari vd., 2017; Granged vd., 2011; Verma vd., 2019). Yangından sonra hacim ağırlığındaki bu artış, toprak içerisindeki boşlukların yangın esnasında oluşan kül tarafından dolmasından kaynaklanmıştır (Certini, 2005; Alcañiz vd., 2018).

Orman yangını, üst toprağın toprak reaksiyonunu (pH) ve özellikle elektriksel iletkenliğini (EC, dS/m) önemli oranda arttırmıştır. Buna göre yangın sonrasında toprak pH'ı 7,38'den 7,72 seviyelerine yükselmiştir. Ayrıca elektriksel iletkenlik ise yaklaşık 2,9 kat artmıştır (0,332 dS/m'den 0,964 dS/m'ye yükselmiştir). Farklı çalışmalar, benzer şekilde yangından kısa bir süre sonra toprağın pH ve elektriksel iletkenliğinde bariz bir artış olduğunu göstermiştir (Pardini vd., 2004; Knelman vd., 2015; Heydari vd., 2017; Alcaniz vd., 2018; Francos vd., 2019). Özellikle yüksek yangın şiddetine (sıcaklıklar > 450 °C) maruz kalan topraklarda pH değerinin arttığı ifade edilmiştir (Knicker 2007). Toprak pH değerindeki bu artış, yangın esnasında ağaç formasyonunun ve orman altı örtünün yanması sonucunda bitki besin maddesi açısından zengin olan külün (bazik özellikli katyonların) üst toprağa eklenmesinden kaynaklanmıştır (Alcaniz vd., 2018). Benzer şekilde yangın esnasında organik iyonların salınması ve bitkilerin yanması sonucunda oluşan küllerin toprak profiline dahil olması nedeniyle yangın sonrasında üst toprağın elektrik iletkenliğini (EC) arttırmıştır (Certini, 2005). Ayrıca yangın sonrasında artan toprak pH'ı, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum gibi bazı katyonların hızlı bir şekilde çözünmesine neden olmuştur (Escudey vd., 2015).

Toprak içerisindeki fosfor, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum gibi değişebilir katyonlar, bitki gelişimi için önemlidir. Yangının toprak içerisindeki bitki besin maddesine olan doğrudan veya dolaylı etkisi büyük ölçüde yangınların şiddetine ve sıklığına bağlıdır (Pellegrini vd., 2018). Nitekim potasyum (K) (774°C) orta derecede (Raison vd., 1985), kalsiyum (Ca) (1484°C) ve magnezyum (Mg) (1107°C) ise yüksek sıcaklıklara daha fazla dirençlidir (DeBano, 1990). Bu konuda yapılan birçok çalışmada, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum gibi değişebilir katyonların orman yangınlarından sonra arttığı belirtilmiştir (Shakesby vd., 2015). Alcaniz vd., (2016) tarafından İspanya (Girona)'da kontrollü bir yangının ardından kalsiyum, magnezyum, potasyum ve fosfor seviyelerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca Francos vd., (2019) tarafından yapılan bir başka çalışmada İber Yarımadası'nın kuzeydoğusunda çıkan orman yangından hemen sonra yüzey toprağından (0-5 cm) alınan örneklerde kalsiyum ve magnezyum değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, diğer çalışmalara benzer bir şekilde orman yangınından sonra üst topraktaki fosfor, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum konsantrasyonları (mg/kg), yangın geçirmemiş olan kontrol sahasına göre artmıştır. Yangın sonrasında fosfor 2,14 kat, sodyumu ise 1,41 kat artmıştır. Değişebilir katyonlardaki bu artışlar, bitki örtüsünün yanması sonucunda toprağı külün eklenmesinden (Switzer vd., 2012; Lucas-Borja vd., 2021) ve buharlaşma eşiklerinin yüksek olması nedeniyle buharlaşma kayıplarına karşı daha fazla dirençli olmasından kaynaklanmaktadır (Zhang ve Biswas, 2017). Ayrıca yangının etkisiyle yarı yanmış organik materyalin toprağı karışması da bitki besin maddesi artışları üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir (Certini, 2011; Francos vd., 2018a).

Toprak içerisindeki organik karbon (OC) ve toplam azot değerleri, karbon ve azot döngüsü için önemlidir. Topraktaki organik karbon (OC) ve toplam azot (TN), yangın esnasında yüksek sıcaklıklara en duyarlı olanlardır (DeBano, 1990). Yangın esnasında toprak sıcaklıkları 550 C'den yüksek değerlere ulaştığında, organik karbon ve toplam azot tamamen kaybolur (Gray ve Dighton, 2006). Genellikle orta ila yüksek şiddetteki orman yangınları organik maddenin yok edilmesiyle toprak yapısını değiştirebilir (Fernandez vd., 2010; Larsen ve MacDonald, 2007; Parsons vd., 2010). Bu çalışmada yangın sonrası organik karbon (OC) %1,3 ve toplam azot (TN) ise %0,11 oranında azalmıştır. Yanmış toprakta organik karbon ve toplam azot miktarındaki bu azalış oranı, yanmamış olan kontrol sahasına göre istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermiştir ($p<0,05$).

Üretim faaliyetleri (salvage logging), orman yangını sonrasında ülkemizde yaygın olarak yapılmaktadır. Bu faaliyetler esnasında ağır iş makineleri kullanılarak yanmış ağaçlar araziden temizlenmektedir. Yanmış ağaçların araziden çıkartılması ve nakliyesi için sürütme

yolları ve orman yolları açılmaktadır. Bu çalışmada 2022 yılının Ekim ayından 2023 yılının Mayıs ayına kadar olan süre boyunca üretim faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Üretim faaliyetlerinin (salvage logging) toprak özelliklerine olan etkileri ise orman yangınındaki benzer toprak özellikleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Üretim faaliyetleri (salvage logging) toprak özelliklerini önemli oranda etkilemiştir. Bu faaliyetlerin toprağın fiziksel özellikleri üzerine olan etkilerinden biri toprağın hacim ağırlığıdır. Hacim ağırlığı aynı zamanda toprağın gözenekliliğini, su geçirimsizliğini, infiltrasyon hızını ve hidrolik iletkenliğini etkiler (Wagenbrenner vd., 2015; 2016). Bu konuda yapılan birçok çalışma, ağır iş makineleri kullanılarak uygulanan üretim faaliyetlerinin toprak bozulmasını, toprak erozyonunu ve sediman verimlerini artırabileceğini ortaya koymaktadır (Fernández vd., 2007; Prats vd., 2019; Robichaud vd., 2021). Bu işlem esnasında ağır iş makinelerinin üst toprağın sıkışmasına neden olduğu (Pereira vd., 2018), toprağın hacim ağırlığını arttırarak, hidrolik iletkenliğini ve infiltrasyon oranını azalttığı belirlenmiştir (Nazari vd., 2021; García-Orenes vd., 2017; Malvar vd., 2016). Bu çalışmada toprağın hacim ağırlığı yangın dönemine göre artmıştır ($1,19 \text{ g/cm}^3$). Bu işlem sırasında üst toprağın sıkışmasına bağlı olarak literatürle benzer şekilde hem infiltrasyon hızı hem de hidrolik iletkenlik değeri önemli oranda azalmıştır. Buna göre yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında infiltrasyon hızı ve hidrolik iletkenlik değerleri sırasıyla $21,76 \text{ cm/h}$ ve $5,59 \text{ cm/h}$, bu değer üretim faaliyetleri döneminde çok daha düşüktür (sırasıyla $3,09 \text{ cm/h}$ ve $0,79 \text{ cm/h}$).

Üretim faaliyetleri (salvage logging) döneminde toprak pH'ı yangın dönemine göre 7,72'den 7,64'ye azalmış; ancak üretim faaliyetleri dönemindeki toprak pH'ı hala kontrol sahasından daha yüksektir (kontrol sahası: 7,38). Nitekim yangın alanlarının daha fazla mevcut bitki besin maddesi (Ca, Mg, P) içermesi sebebiyle üretim faaliyetleri yapılmış olan sahalara ve kontrol alanlarına göre daha yüksek pH seviyelerine sahip olduğu belirlenmiştir (Simard vd., 2011). Bu dönemde üst topraktaki elektriksel iletkenlik (EC), yangın dönemine oranla önemli oranda yaklaşık olarak 2,13 kat azalmıştır ($0,964 \text{ dS/m}$ 'den $0,452 \text{ dS/m}$). Pereira vd., (2017) tarafından yapılan bir çalışmada toprağın elektriksel iletkenlik değeri, yangın sonrası ilk iki ayda yanmış alanda yüksekken, üst topraktaki bitki besin maddelerinin erozyona uğraması sonucunda 5, 7 ve 9. aylarda tekrar normale döndüğü tespit edilmiştir.

Üretim faaliyetleri (salvage logging) döneminde organik karbon, toplam azot, fosfor, kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum olmak üzere üst topraktaki bitki besin maddelerinin tamamı azalmıştır. Bu dönemde organik karbon ve toplam azot değerleri yangın döneminde sırasıyla %4,17 ve %0,36 iken, üretim faaliyetleri sonunda organik karbon ve toplam azot değeri sırasıyla %3,35 ve %0,30 değerine düşmüştür. Garcia-Orenes vd., (2017)

tarafından yapılan bir başka çalışmada üretim faaliyetleri sonunda toplam azot değerindeki düşüşün %50 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca Jennings vd., (2012) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise bitki için kullanılabilir azot seviyelerinin ortalama %27 oranında azaldığı belirlenmiştir. Poirier vd., (2014) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise üretim faaliyetleri sonunda yanmış alanlardaki üst toprakta (organik katmanda) organik karbon (OC) değerinin %12 oranında azalttığı ifade edilmiştir. Bu dönemde üst toprakta yangın dönemine göre en belirgin düşüşlerden biri fosforda belirlenmiştir. Yangın döneminde ölçülen fosfor konsantrasyonu (15,08 mg/l), üretim faaliyetlerinin sonunda 8,19 mg/l değerine düşmüştür. Bu konuda yapılan bir başka çalışmada benzer şekilde fosfor konsantrasyonunun üretim faaliyetleri sonunda hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir (Francos vd., 2019). Bunun haricinde yangın döneminde üst toprakta artan kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum konsantrasyonları, üretim faaliyetlerinin sonunda yangın geçirmeyen kontrol sahasından daha düşük bir seviyeye gerilemiştir. Üretim faaliyetleri (Salvage logging) esnasında özellikle ağır iş makineleriyle geçtiği alanlarda üst toprağın sıkışması sonucunda (Ampoorter vd., 2007), toprağın hacim ağırlığı artmış ve hem hidrolik iletkenlik hem de infiltrasyon hızı düşmüştür (Nazari vd., 2021; García-Orenes vd., 2017; Wagenbrenner vd., 2016). Bunun sonucunda üretim faaliyetleri (salvage logging) döneminde üst toprakta kül içerisinde toprağa dahil olan bitki besin maddeleri artan yüzeysel akışla birlikte önemli oranda erozyona uğramıştır (Fernández vd., 2007; Prats vd., 2019; Robichaud vd., 2020; Silins vd., 2009; Wittenberg vd., 2020).

Rehabilitasyon döneminde toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde en belirgin farklılık yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) görülmüştür. Bu havzada sürüm işlemi nedeniyle üst toprağın hacim ağırlığı ($0,90 \text{ g/cm}^3$), hem yangın sonrası doğal haline bırakılan havzadan (YADD-H1, $1,08 \text{ g/cm}^3$) ve yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzadan (YADG-H2, $1,01 \text{ g/cm}^3$) hem de kontrol sahasından ($0,96 \text{ g/cm}^3$) daha düşüktür. Sürüm esnasında üst toprak yüzeyinin kabartılması nedeniyle hacim ağırlığı önemli oranda azalmıştır. Nitekim bu durum toprak gözenekliliğinin artması nedeniyle infiltrasyon hızının ve hidrolik iletkenliğin artışıyla doğrulanmıştır. Bu havzada üst toprağın sürülmesi aynı zamanda başta organik karbon, toplam azot, fosfor, sodyum ve potasyum konsantrasyonlarını diğer rehabilitasyon yöntemleri yapılan havzalara ve kontrol sahasına göre oldukça azalmıştır. Bu havzada yamaçların eş yükselti eğrilerine paralel bir şekilde sürülmesi nedeniyle alt toprakla üst toprak karışmış ve bu durum bitki besin maddesinin konsantrasyonlarını belirgin bir şekilde düşürmüştür (Girona-García vd., 2021). Yangın sonrası doğal haline bırakılan havza (YADD-H1) ile yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzanın (YADG-H2) üst topraktaki fiziksel ve kimyasal özellikleri nispeten birbirine daha yakındır. Özellikle üretim faaliyetleri döneminde

başta erozyon nedeniyle bu havzalardaki bitki besin konsantrasyonları azalmıştır. Ancak rehabilitasyon döneminde her ne kadar istatistiksel olarak anlamlı fark olmasa da yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzanın (YADG-H2) organik karbon, toplam azot ve fosfor başta olmak üzere bitki besin maddesi konsantrasyonları yangın sonrası doğal bırakılan havzadan (YADD-H1) biraz daha yüksektir. Bu durum, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) toprağın üzerine serilen tam olarak yanmamış veya yarı yanmış ağaç dalları, ağaç kabukları, ibreler ve kozalaklar tarafından üst toprağa bitki besin maddesi eklenmesinden kaynaklanmaktadır (Mastrolonardo, 2015).

4.2. Yağış, Yüzeysel Akış ve Akım Miktarları

4.2.1. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

2021 yılında Manavgat'ta meydana gelen büyük orman yangını sonrası uygulanan farklı rehabilitasyon yöntemlerinin hidrolojik süreçler üzerindeki etkisi, izleyen iki yıl boyunca incelenmiş ve yöntemler arası belirgin farklar ortaya konmuştur. Rehabilitasyon döneminde bütün havzalarda düşen yağış miktarları benzer olmasına rağmen, yüzeysel akış ve akım değerlerinde gözlenen farklılıklar, yalnızca meteorolojik faktörlerle değil, aynı zamanda yangının, üretim faaliyetlerinin ve ardından uygulanan farklı rehabilitasyon yöntemleriyle de yakından ilişkilidir (Shakesby, 2011; Moody vd., 2013).

Doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1), her iki yıl boyunca en yüksek yüzeysel akış ve akım değerleri ölçülmüştür. Birinci yıl yüzeysel akış 259,5 mm'ye ulaşmış, ikinci yılda ise %17,9'luk bir azalma ile 212,9 mm'ye gerilemiştir. Ancak bu azalmaya rağmen, yüzeysel akış miktarları diğer tüm havzalardan yüksektir. Yangın ve üretim faaliyetleri sonrasında havzanın doğal haline bırakılması, yüzeysel akış bakımından kısa vadede etkili olmamıştır. Bu yöntem yangın sonrası toprak yüzeyinin uzun süre çıplak kalmasına ve erozyonda belirgin bir şekilde azalma olmadan devam etmesine neden olmuştur. Ayrıca bu havzada infiltrasyon hızı (6,31–7,95 cm/h) ve hidrolik iletkenlik değeri ($K_{sat}=1,62$ cm/h'den 2,04 cm/h) iki yılda da fazla bir değişim göstermemiştir. Bu da yağışın büyük kısmının yüzeysel akışa dönüşmesini açıklamaktadır. Literatürde, yangın sonrası havzaların doğal haline bırakılmasının etkili olabilmesi için zamanla bitki örtüsünün yeniden oluşması gerektiği, ancak şiddetli yangınlarda bu sürecin daha uzun zaman alabileceği belirtilmektedir (Fernández & Vega, 2016; Shakesby, 2011).

Tohumlama ve dal serilen havzada (YADG-H2) yüzeysel akış ve akım değerlerinde ikinci yılda ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. Birinci yılda 136 mm olan yüzeysel akış, ikinci yıl %38,2 azalarak 84 mm'ye azalmıştır. Bu havzada aynı zamanda infiltrasyon hızı artmıştır

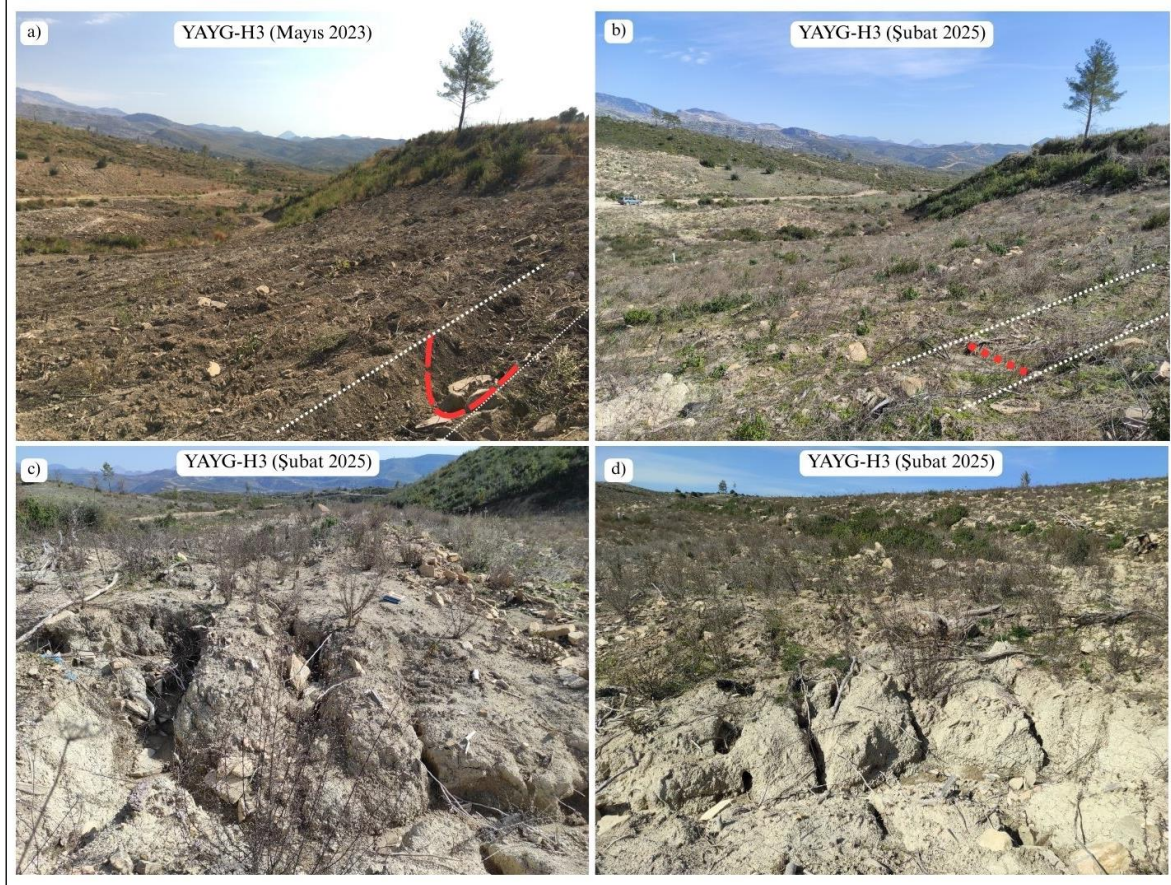
(4,29'ten 8,08 cm/h'ye). Buna paralel olarak hidrolik iletkenlik değerleri de ilk yılda 1,10 cm/h iken, ikinci yılda 2,07 cm/h'ye yükselmiştir. Ancak hem hidrolik iletkenlik hem de infiltrasyon hızı hala kontrol sahasından çok uzaktır. Bu sonuçlar, malçlamanın (ağaç dalları, ibreler ve kozalaklar) toprağı koruyarak yağmur damlalarının doğrudan üst toprağı temasını engellediğini, böylece hem toprağın fiziksel yapısının korunmasını hem de suyun yüzeysel akışa geçmeden infiltrasyon yoluyla toprağın altına geçmesini kolaylaştırdığını göstermektedir (Robichaud vd., 2000; Larsen vd., 2009) (Fotoğraf 4.1). Ayrıca toprak yüzeyine serilen ağaç dalları, ibreler ve kozalaklar, üst toprağın sıcaklıklarını düşürerek topraktaki nemin buharlaşmasını azaltmakta ve bitki gelişimini desteklemektedir. Bu bulgular, literatürde malçlamanın hem erozyonu hem de yüzeysel akışı azaltmada etkili bir yöntem olduğunu savunan çalışmaları desteklemektedir (Fernández vd., 2010; Vega vd., 2015; Díaz-Raviña vd., 2012; Badía & Martí, 2000).



Fotoğraf 4.1 Tohumlama ve Dal Serme (YADG-H2) Uygulaması Yapılan Yamaçlardan Bir Görünüm

Sürülen ve fidan dikimi yapılan havzada (YAYG-H3), rehabilitasyonun ikinci yılında yüzeysel akış ve akım değerlerinde ciddi artışlar yaşanmıştır. Yüzeysel akış miktarı birinci yıl 68,1 mm iken, ikinci yıl %55,6 artarak 106 mm'ye yükselmiştir. Akım miktarı da benzer şekilde artmıştır. İlk yıl üst toprağın sürülmesi nedeniyle infiltrasyon artırmış olsa da ikinci yıl sürüm esnasında oluşan olukların sedimanla dolması, toprağın sıkışmasını arttırarak infiltrasyonu azaltmış ve yüzey akışı yükseltmiştir. Bu süreçte infiltrasyon hızı azalmış (56,62'den 31,77 cm/h'ye), ve hidrolik iletkenlik değerleri de belirgin şekilde gerilemiştir (14,56 → 8,17 cm/h). Bu sonuçlar, toprak işleme faaliyetlerinin toprağın yapısını bozarak geçici olarak infiltrasyonu artırsa da uzun vadede bu etkinin giderek azalacağını göstermektedir (Bautista vd., 2009). Ayrıca yamaçların eş yükselti eğrilerine paralel olarak 60-80 cm derinlikte sürülmesi sırasında yapılan sırt ve oluk oluşturma uygulamaları, zamanla aşınarak yağış sularının doğrudan yüzeysel akışa dönüşmesine katkı sağlamaktadır (Fotoğraf 4.2). Bu durum, sürüm esnasında

yapılan uygulamanın, yüzeysel akışı zamanla olumsuz etkileyebileceğini ve özellikle eğimli arazilerde erozyon riskini artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca, sırt oluşturma ve şerit açma gibi işlemler zamanla hem oyuntu (gully) ve rill (parmak) erozyonunu hem de yüzeysel akışı arttırabilmektedir (Neris vd., 2013; Prats vd., 2016) (Fotoğraf 4.2).



Fotoğraf 4.2 Sürüm ve Fidan Dikimi Uygulaması Yapılan Havzaya (YAYG-H3) Ait Görseller: (a) İlk Sürüm Esnasından, (b) Sürümün ikinci yılından, (c ve d) Sürümün İkinci Yılındaki Oyuntu (Gully) ve Parmak (Rill) Erozyonu Görseli

Genel olarak değerlendirildiğinde, iki yıl boyunca rehabilitasyon yöntemleri hidrolojik süreçler üzerinde belirgin etkiler yaratmıştır. Doğal haline bırakılan rehabilitasyon yöntemi kısa vadede olumlu bir etki yaratmazken, tohumlama ve dal serme (malçlama) yöntemi yüzeysel akışı azaltma, infiltrasyonu artırma ve toprak nemini koruma açısından ikinci yılda en başarılı yöntem olmuştur. Sürüm ve fidan dikme uygulaması ise uzun vadeli etkileri dikkatle değerlendirilmelidir; çünkü bu uygulamanın olumsuz etkileri zamanla katlanarak artış göstermektedir.

4.3. Sediman Taşınım Süreçleri

4.3.1. Sediman Miktarı ve Oranları

4.3.1.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

Yangın sonrası sekiz aylık üretim faaliyetleri (salvage logging) süresince, üç yangın geçirmiş havzada (Havza 1, Havza 2, Havza 3) ve yangın geçirmemiş kontrol sahasında toplam dokuz yağışlı örnekleme döneminde sediman tuzaklarında biriken sediman miktarları belirlenmiştir. Bu süreçte akım gözlem istasyonları kurulamamış olduğundan, yüzeysel akış ve akım verileri elde edilememiş ve özellikle akarsularda taşınan malzemenin önemli bir bölümünü oluşturan süspanse sediman (askıdaki yük) doğrudan ölçülememiştir. Dolayısıyla, havzalar arası karşılaştırma yalnızca sediman tuzaklarında biriken sediman miktarları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu durum, birçok çalışmada vurgulandığı gibi, akarsularda taşınan toplam sediman yükünün eksik değerlendirilmesine yol açabilecektir (Benda vd., 2003; Shakesby, 2011).

Üç havzada eş zamanlı yürütülen üretim faaliyetleri süresince Havza 1'e 609,8 mm, Havza 2'ye 611,8 mm ve Havza 3'e 610,8 mm toplam yağış düşerken; kontrol sahasında bu miktar 489,6 mm olarak kaydedilmiştir. Yağışın miktar olarak benzer olması, sediman taşınımındaki farklılıkların meteorolojik faktörlerin etkisinden çok, akarsu ile yol arasındaki vejetasyon örtüsü (riperyan zon) ve yolun akarsuya olan uzaklığına bağlı olduğunu göstermektedir (Moody & Martin, 2001; Larsen vd., 2009).

Orman yangını, orman altı ölü örtünün ve bitki örtüsünün büyük ölçüde yanmasına neden olmuş; bu da toprağın doğrudan yağışın etkisine açık hâle gelmesine yol açmıştır. Yangından sonra gerçekleştirilen üretim faaliyetleri (salvage logging), toprak gözenekliliğini azaltmış, yüzeydeki organik maddeyi ortadan kaldırmış ve toprağın hacim ağırlığında artışa neden olmuştur. Nitekim yangın geçirmiş havzalarda üst toprakta ölçülen ortalama hacim ağırlığı 1,15 g/cm³ iken, bu değer üretim faaliyetleri sonrasında 1,19 g/cm³'e yükselmiştir. Buna karşın kontrol sahasında ölçülen değer 0,96 g/cm³'tür. Literatürde de benzer şekilde, özellikle ağır iş makineleriyle yapılan üretim faaliyetlerinin toprak sıkışmasını artırdığı ve infiltrasyon kapasitesini azalttığı gösterilmiştir (Robichaud vd., 2000).

İnfiltrasyon hızı ve hidrolik iletkenlik değerleri de üst topraktaki bozulmayı desteklemektedir. Üretim faaliyetleri süresince üst toprakta ortalama infiltrasyon hızı 3,09 cm/h, hidrolik iletkenlik ise 0,79 cm/h olarak ölçülmüştür. Yangın geçirmemiş olan kontrol sahasında bu değerler sırasıyla 24,87 cm/h ve 6,39 cm/h'dir. Bu bulgular, yangın ve sonrası yapılan müdahalelerin, suyun yüzeysel akışa geçişini artırarak erozyon potansiyelini

güçlendirdiğini göstermektedir (Cerdà & Doerr, 2005; Shakesby, 2011). Yangın sonrası üst toprakta yer yer varlığını sürdüren kül tabakası da kısa süreli suyun toprak içerisine sızmasını engelleyen bir katman (hidrofobiklik) oluşturarak bu etkiyi güçlendirmiş olabilir (Doerr vd., 2000).

Bu koşullar altında, yangın geçirmiş havzalarda yüzeysel akışın artmasıyla birlikte sediman taşınımında da belirgin bir artış gözlenmiştir. Sediman tuzaklarında biriken sediman miktarı verileri, bu dönemde kontrol sahasına kıyasla Havza 1’de 4,4 kat, Havza 2’de 19,5 kat ve Havza 3’te 12,7 kat daha fazla sediman taşınımı gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Ancak, üretim faaliyetleri yapılan üç havzada ölçülen toprak özellikleri benzer olmasına rağmen, taşınan sediman miktarları arasında önemli farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıklar, esasen akarsu ile orman yol arasında gelişen vejetasyon zonun (riperyan zon) varlığı ve yol ile akarsu arasındaki ilişkiyle açıklanabilir (Gomi vd., 2005; Oldén vd., 2019; Sirabahenda vd., 2020).

Havza 1’de toplam 84,1 kg sediman birikmiştir ve bu değer, yangın geçirmiş diğer havzalara göre anlamlı biçimde düşüktür. Bunun temel nedeni, akarsu yatağı ile orman yolu arasında uzanan yaklaşık 11 metrelik, iyi gelişmiş bir vejetasyon zonun (riperyan zonun) bulunmasıdır. Bu vejetasyon zonu, yamaçlardan ve yollardan gelen malzemelerin büyük bir bölümünü engellemiş ve akarsu yatağında taşınan sediman miktarını azaltmıştır. Ayrıca bu zon, akarsu bank stabilitesini korumuştur. Akarsuyun banklarında gelişen vejetasyon zonu, akarsuya dahil olan sedimanı azalttığı ve akarsuyun bank stabilitesini koruduğuna ilişkin birçok çalışmada vurgulanmıştır (Lowrance vd., 1984; Vidon & Hill, 2004; Ferreira vd., 2012). Ayrıca, akarsuyun boyuna profili boyunca çok sayıda geçici sediman depolama alanı tespit edilmiştir (Fotoğraf 4.3). Bu da taşınan sedimanın bir kısmının kanal içinde tutulduğunu göstermektedir (Benda vd., 2003). Bu alanlar, akarsu yatağındaki eğim kırıklarının hemen gerisinde ve kesim artıklarının vejetasyon zonuna tutunarak akarsu yatağını tıkadığı yerlerde yaygın olarak görülmüştür (Fotoğraf 4.3).



Fotoğraf 4.3 Üretim (Salvage Logging) Faaliyetleri Döneminde Havza 1’de Akarsu Yatağı Boyunca Oluşan Sediman Birikim Alanlarının Temsili Görünümü

Havza 2’de ölçülen sediman miktarı 373,8 kg’dır ve bu değer Havza 1’e kıyasla yaklaşık dört kat fazladır. Bu artış, doğrudan orman yolu ile akarsu yatağı arasındaki bağlantıdan kaynaklanmaktadır (Fotoğraf 4.4). Havza 2’de, orman yolu inşası sırasında akarsu kenarındaki doğal tampon bölge tahrip edilmiş ve yol ile akarsu yatağı arasında fiziksel bir engel kalmamıştır. Bu durum, yüzeysel akışla taşınan sedimanın doğrudan akarsuya ulaşmasına neden olmuş, orman yolu adeta bir sediman iletim hattı işlevi görmüştür (Fotoğraf 4.4). Literatürde, orman yolları ile akarsu yatağı arasındaki bağlantının, akarsu yatağında taşınan sedimana olan etkisi detaylı şekilde ortaya konmuştur (Croke vd., 2005; Coe, 2006).



Fotoğraf 4.4 Üretim (Salvage Logging) Faaliyetleri Döneminde Havza 2’de Akarsu ile Orman Yolu Arasındaki Mesafenin ve Orman Yolundaki Erozyonun Gözlemlendiği Görseller

Havza 3’te biriken toplam sediman miktarı 243,9 kg’dır. Bu değer Havza 1’e kıyasla belirgin biçimde yüksek; ancak Havza 2’ye göre daha düşüktür. Bu farkın başlıca nedeni, orman yolu ile akarsu arasındaki yaklaşık 50 metrelik mesafenin varlığıdır. Ancak, bu alan içinde sedimanı filtreleyebilecek bir vejetasyon zonunun bulunmaması, yüzeysel akışla taşınan materyalin akarsuya ulaşmasını engelleyememiştir. Bu bulgu, akarsu yatağı ile orman yolu arasındaki mesafenin tek başına yeterli olmadığını, akarsuyun banklarında etkili bir vejetasyon zonu (riperyan zon) ile birlikte daha başarılı bir sonuç verebileceğini göstermektedir (Wemple vd., 2001; Lane vd., 2006).

Sonuç olarak, üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü sekiz aylık süreçte sediman taşınım miktarları, yalnızca toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleriyle değil; aynı zamanda orman yollarının konumu ve vejetasyon zonun (riperyan zon) varlığıyla belirlenmiştir. Özellikle Havza 1’de olduğu gibi akarsu ile orman yolu arasındaki doğal tampon bölgeler, akarsu yatağındaki sediman taşınımını sınırlamaktadır.

4.3.1.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Bu çalışma, yangın sonrası uygulanan üç farklı rehabilitasyon yönteminin (doğal bırakma, tohumlama + dal serme ve sürüm + fidan dikimi) ilk iki yıl boyunca süspanse sediman ve yatak yükü taşınımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Kurulan akım gözlem istasyonları sayesinde, birinci yılda 16, ikinci yılda 12 örnekleme döneminde elde edilen akım ve sediman verileri, yangın sonrası rehabilitasyon süreçlerinin etkilerini ortaya koymak açısından oldukça değerlidir (Moody & Martin, 2001; Robichaud vd., 2000).

Rehabilitasyonun birinci yılı itibarıyla, yangın geçirmiş tüm havzalarda taşınan süspanse sediman miktarının, yangın geçirmemiş kontrol sahasına kıyasla oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir. Doğal bırakılan havzada (YADD-H1) bu artış 35,6 kat, tohumlama ve dal serme uygulanan havzada (YADG-H2) 115,8 kat ve sürülerek fidan dikimi yapılan havzada (YAYG-H3) 45 kat olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, yangın sonrası ilk yıl boyunca rehabilitasyon uygulamalarının henüz kontrol sahası kadar yamaç stabilitesini sağlayamadığını göstermektedir. Literatürde de benzer şekilde, yangın sonrası ilk yıllarda sediman taşınımının yüksek olduğu ve rehabilitasyon yöntemlerinin belirgin etkisinin ise zamanla değiştiği belirtilmektedir (Shakesby, 2011).

Rehabilitasyon yöntemleri arasında da belirgin farklar tespit edilmiştir. YADG-H2’de ölçülen ortalama süspanse sediman miktarı (191,3 kg/ha), YADD-H1 (58,8 kg/ha) ve YAYG-H3 (74,4 kg/ha) havzalarına kıyasla anlamlı düzeyde yüksektir. Bu durum, tohumlama ve dal serme uygulamasının ilk yıl itibarıyla toprak erozyonunu engellemede yeterince etkili olmadığını ortaya koymaktadır. Ek olarak, bu havzada orman yolu ile akarsu yatağı arasındaki doğrudan bağlantı, yüzeysel akış miktarının düşük olmasına rağmen (136 mm), akarsu yatağına sediman girişini artırmıştır (Fotoğraf 4.5). Bu konuda yapılan çalışmalarda, üretim faaliyetleri esnasında açılan orman yollarının sediman kaynak alanlarından biri olduğu vurgulanmıştır (Croke vd., 2005; Coe, 2006). Yola dahil olan sedimanların bir bölümü yamaç ile yol arasında bulunan yol yarmalarının çökmesinden kaynaklanmaktadır (Fotoğraf 4.5).



Fotoğraf 4.5 Üretim Faaliyetleri Kapsamında Oluşturulan Yol Yarmalarındaki Şev Çökmesi ile Orman Yolu ile Akarsu Arasındaki Hidrolojik Bağlantıyı Gösteren Görseller (YADG-H2)

Sürüm yapılan ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3, yüzeysel akış miktarı (68,8 mm) düşük olmasına karşın, taşınan süspanse sediman miktarı görece yüksektir. Özellikle 28 Aralık 2023 tarihindeki yüksek yağışlı olayda toplam süspanse sediman taşınımının yaklaşık %80'inin gerçekleşmiş olması, bu işlem grubunda yağış yoğunluğunun kısa süreli yüksek sediman taşınımına neden olabileceğini göstermektedir. Literatürde de yangın sonrasında kısa süreli sağanak karakterli yağış olaylarının sediman taşınımında önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir (Moody & Ebel, 2012).

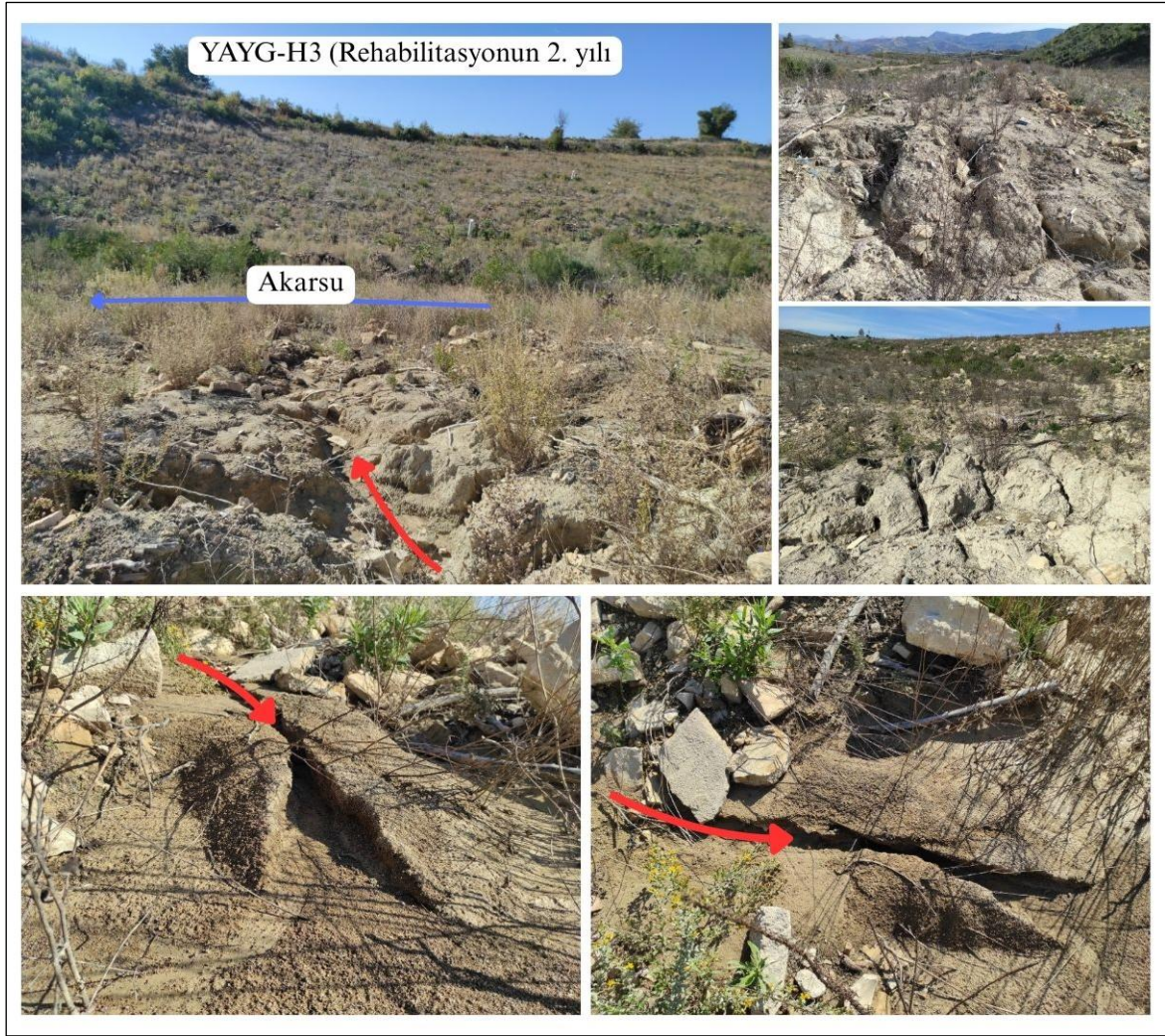
Doğal haline bırakılan havzada (YADD-H1) rehabilitasyonun birinci yılında diğer havzalara göre taşınan ortalama en düşük süspanse sediman miktarı ölçülmüştür (58,8 kg/ha). Bu durum, akarsu ile orman yolu arasındaki yaklaşık 11 metrelik doğal vejetasyon zonunun sedimanı engelleme etkisini ortaya koymaktadır. Bu vejetasyon zonlarının (riperyan zonlar), yüzeysel akışla taşınan sedimanın tutulmasında ve akarsuyun yatak stabilitesinin korunmasında etkili tampon bölgeler olarak işlev görmektedir (Lowrance vd., 1984; Vidon & Hill, 2004) (Fotoğraf 4.6).



Fotoğraf 4.6 Doğal Haline Bırakılan Havzada (YADD-H1) Orman Yolu ile Akarsu Arasında Gelişen Vejetasyon Zonundan Rehabilitasyon Dönemine Ait Görseller

Rehabilitasyonun ikinci yılına gelindiğinde, yangın geçirmiş havzalarda taşınan süspanse sediman miktarının hâlâ kontrol sahasına kıyasla oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Doğal bırakılan havzada (YADD-H1) 88,7 kat, YADG-H2’de 28,7 kat ve YAYG-H3’te 359,9 kat daha fazla süspanse sediman taşınmıştır. Bu yüksek değerler, toplam yağış miktarının azalmasına rağmen yağış yoğunluğundaki artışla ilişkilendirilebilir. Dört havzanın tamamına düşen yıllık yağışın %50’sinden fazlası sadece üç örnekleme döneminde (29.11.2023, 06.12.2023 ve 26.12.2024) gerçekleşmiştir. Bu durum, yağış yoğunluğunun toplam yağış miktarına göre sediman taşınımında daha belirleyici olduğunu göstermektedir (Lopez-Vicente & Navas, 2010).

Sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3), ikinci yıl boyunca taşınan ortalama süspanse sediman miktarı (3.122 kg/ha), birinci yıla göre 41,9 kat artmıştır. Bu büyük artış, havza yamaçlarında gelişen oyuntu (gully) ve parmak (rill) erozyonuyla doğrudan ilişkilidir. Zamanla derinliği azalan ve sedimanla dolan sürülmüş oluklarda birikmiş sedimanın, yağış esnasında akarsuya taşınmasını kolaylaştırmıştır (Thomas vd., 2020; Larsen vd., 2009; Martins vd., 2013) (Fotoğraf 4.7).



Fotoğraf 4.7 Sürüm ve Fidan Dikim Uygulamasında (YAYG-H3) Rehabilitasyonun İkinci Yılında Gelişen Gully ve Rill Erozyonlarından Bir Görünüm

Bu dönemde en düşük süspanse sediman taşınımı tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) ölçülmüştür (249,2 kg/ha). Malçlama uygulamasının etkisinin zamanla arttığı ve infiltrasyon kapasitesinde iki kata yakın iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Bu durum hem yüzeysel akışı hem de taşınan süspanse sediman miktarını azaltmıştır (Robichaud vd., 2013; Groen & Woods, 2008).

Yatak yükü taşınımı hem birinci hem de ikinci yılda süspanse sediman miktarına göre oldukça düşük kalmıştır. Ancak yatak yükü, sedimanın kaynak bölgeleri hakkında ipuçları sunmaktadır. İkinci yıl itibarıyla tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) yatak yükü (3,10 kg/ha), diğer havzalardan yüksek olmasına rağmen süspanse sediman miktarı oldukça düşüktür. Bu çelişki, üst toprağın malçlama sayesinde etkin biçimde korunmasına karşın, orman yolu ile akarsu yatağı arasındaki doğrudan bağlantıların iri sediman taşınımını kolaylaştırdığını göstermektedir (Megahan & Kidd, 1972; Gomi vd., 2005).

YADD-H1’de, riperyan zonun etkisi ile iri sedimanların akarsuya ulaşması büyük oranda engellenmiştir. Aynı şekilde, YAYG-H3’te de yüzeysel akış miktarı yüksek olmasına rağmen yatak yükü taşınımı, orman yolunun akarsuya olan mesafesi nedeniyle sınırlı kalmıştır.

Genel olarak, rehabilitasyonun ikinci yılında sediman taşınımını en başarılı şekilde azaltan yöntem, tohumlama ve dal serme uygulaması olmuştur. Malçlama, infiltrasyon kapasitesini artırarak yüzeysel akışı sınırlandırmış ve taşınan süspanse sediman miktarını önemli ölçüde düşürmüştür. Ancak orman yollarının konumu ve vejetasyon zonun varlığı, başta yatak yükünü oluşturan iri malzemeler olmak üzere sediman taşınım süreçlerinde etkili olmaktadır.

4.3.2. Sediman İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Miktarları

4.3.2.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

2022 yılı Ekim ayı ile 2023 yılı Mayıs ayı arasındaki üretim faaliyetleri süresince üç yangın geçirmiş havzada (Havza 1, Havza 2 ve Havza 3) ve yangın geçirmemiş kontrol sahasında taşınan bitki besin maddesi miktarları, sadece yangın sonrası toprak fiziksel ve kimyasal özellikleri değil, aynı zamanda havza içi morfolojik unsurların taşınım süreçlerine etkisini de açıkça ortaya koymaktadır. Bulgular, taşınan sediman miktarlarıyla doğrudan ilişki göstermekte olup, özellikle orman yollarının akarsuya olan mesafesi ve akarsu yatağı ile orman yolu arasındaki vejetasyon zonun (riperyan zon) varlığı gibi faktörlerin besin maddesi taşınımında belirleyici olduğunu göstermektedir.

Havza 1’de, akarsu boyunca korunan dar bir riperyan zonun bulunması (yaklaşık olarak ortalama 11 m genişlikte), sediman taşınımını ve dolayısıyla bitki besin maddesi miktarını kısıtlayıcı bir tampon işlevi görmüştür. Riperyan zonların bu tür tamponlama etkisi, yüzeysel akışla taşınan besin maddelerinin ve sedimanın tutulmasında oldukça etkilidir (Lowrance vd., 1984; Mayer vd., 2007). Nitekim Havza 1’de taşınan ortalama toplam azot (2.908,9 mg/tuzak), kalsiyum (22.095,3 mg/tuzak) ve organik karbon (33.680,7 mg/tuzak) miktarlarının hem Havza 2 hem de Havza 3’e kıyasla oldukça düşük olması, bu vejetasyon zonun varlığıyla ilişkilidir. Ayrıca, bu havzada orman yolları akarsu yatağına doğrudan bağlanmamış ve dolayısıyla yol kaynaklı sedimanın akarsuya dahil olmasını sınırlandırılmıştır. Bu durum, vejetasyonla kaplı tampon bölgelerin özellikle yangın sonrası bozulan toprak yapısında besin taşınımını azaltıcı rolünü bir kez daha ortaya koymaktadır (Vidon vd., 2010).

Buna karşılık, Havza 2’de yol ağının akarsuya doğrudan bitişik olması, akış yoluyla taşınan sedimanın filtrelenmeden doğrudan akarsuya ulaşmasına neden olmuş, bu da taşınan bitki besin maddesi miktarlarında çarpıcı bir artışla sonuçlanmıştır. Özellikle toplam azot

(19.543,3 mg/tuzak), kalsiyum (91.919,5 mg/tuzak) ve organik karbon (218.935,6 mg/tuzak) gibi besin maddeleri Havza 1'e göre sırasıyla 6,7, 4,1 ve 6,5 kat daha fazla taşınmıştır. Literatürde, yol yoğunluğunun ve yolun akarsu yatağına göre konumu, sediman üretiminde ve besin taşınımında önemli bir etken olduğu sıklıkla vurgulanmaktadır (Sheridan vd., 2007). Özellikle yolların akarsuya çok yakın yer alması, doğrudan yüzeysel akışla birlikte sediman ve besin maddelerinin derelere aktarılmasına neden olmaktadır (Grace III, 2002).

Havza 3'te ise yol ile akarsu arasında yaklaşık 50 metre mesafe bulunmakta olup, bu alan boyunca hem yüzeysel akışın hem de sedimanın akarsu yatağına ulaşması için daha uzun mesafe katetmesi gerekmektedir. Bu durum, Havza 3'te taşınan besin maddesi miktarlarının Havza 2'ye göre daha düşük, ancak Havza 1'e göre daha yüksek olmasını açıklamaktadır. Örneğin, Havza 3'te taşınan toplam azot miktarı 7.419,9 mg/tuzak ile Havza 1'e kıyasla 2,5 kat daha fazla iken, Havza 2'ye göre yaklaşık 2,6 kat daha azdır. Bu sonuçlar, akarsu ile yollar arasında bırakılan tampon bölgelerin ve uzun yüzey akış mesafesinin sedimanla birlikte taşınan besin yükünü önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir (Wemple vd., 2001).

Ayrıca, özellikle organik karbon, azot ve kalsiyum gibi mobilitesi yüksek elementlerin taşınım miktarlarının, fiziksel engellerin varlığına doğrudan bağlı olduğu görülmektedir. Havza 2'de taşınan toplam organik karbon miktarı (218.935,6 mg/tuzak), Havza 1'e kıyasla 6,5 kat ve kontrol sahasına kıyasla 207 kat daha fazladır. Bu dramatik fark, yangın sonrası açıkta kalan toprak yüzeylerinden, doğrudan akarsuya akan akımla taşınan sedimanın içinde çözünmüş ve partiküler organik madde yükünü yansıtmaktadır (DeBano, 2000).

Sonuç olarak, üretim faaliyetleri döneminde taşınan bitki besin maddesi miktarları, sadece yangının doğrudan etkilerinden değil, aynı zamanda orman yolunun, riperyan zonun varlığı ve akarsuya olan mesafeden kaynaklanan faktörlerden de doğrudan etkilenmektedir. Yangın sonrası üretim uygulamalarında, bu tür alanlarda yolların planlanmasında riperyan zonların korunması, yol ile akarsu arasındaki tampon mesafelerin bırakılması, taşınan sediman ve besin maddesi miktarlarını önemli ölçüde azaltacaktır (Beschta vd., 2004; MacDonald & Coe, 2007).

4.3.2.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Bu çalışmada yangın sonrası uygulanan farklı rehabilitasyon yöntemlerinin, sedimanla taşınan bitki besin maddeleri üzerinde belirgin etkileri olduğu açıkça ortaya konmuştur. Rehabilitasyon sürecinin hem birinci hem de ikinci yılında elde edilen bulgular, taşınan bitki besin maddesi miktarlarının uygulanan rehabilitasyon yöntemine ve sediman dinamiklerine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Genel olarak, tüm havzalarda sedimanla taşınan kalsiyum (Ca), organik karbon (OC), toplam azot (TN), magnezyum (Mg), sodyum (Na) ve potasyum (K) miktarlarının yüksek, çinko (Zn), demir (Fe), fosfor (P), bakır (Cu) ve manganez (Mn) miktarlarının ise daha düşük düzeylerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu durum, yangın sonrası üst toprakta mikro besin maddelerine oranla daha fazla bulunan makro bitki besin maddelerinin varlığına işaret etmektedir (DeBano, 2000; Certini, 2005).

Rehabilitasyonun ilk yılında, tohumlama ve dal serme yöntemi uygulanan YADG-H2 havzasında, taşınan bitki besin maddesi miktarları diğer havzalara göre en yüksek düzeyde kaydedilmiştir. Bu sonuç, yüzeydeki dal seriminin toprağı doğrudan örtmesine rağmen, mineralize olmuş kül tabakası üzerinde gelişen üst toprağın taşınmasından kaynaklanabilir. Nitekim, malçlama veya dal serimi uygulamalarının kısa vadede yüzeysel akışı sınırlamak yerine bazı durumlarda toprağın su tutma kapasitesini artırarak sediman taşınımını tetikleyebildiği literatürde de belirtilmiştir (Cerdà & Doerr, 2008; Robichaud vd., 2013). YADG-H2’de taşınan organik karbon miktarı, YADD-H1’den 4,08 kat, YAYG-H3’ten 3,99 kat ve kontrol sahasından yaklaşık 273 kat daha fazladır. Benzer şekilde, taşınan toplam azot ve kalsiyum miktarları da en yüksek bu havzada kaydedilmiştir. Bu durum, yüzeysel akışla birlikte taşınan ince partikül tane boyutlarının (kil, silt) zengin içerikli besin maddelerini taşıdığı gerçeğiyle açıklanabilir (Wagenbrenner vd., 2015). Tohumlama ile birlikte uygulanan dal serme işleminin kısa vadede yüzey örtüsünü artırsa da yeterince üst toprağın stabilizasyonu sağlanamadan yağış olaylarıyla besin kaybı yaşanmış olabilir.

İkinci yıl bulguları aynı zamanda, YADG-H2’de bir önceki yıla kıyasla belirgin bir düşüş olduğunu göstermektedir. Bu durum, tohumlama ve dal seriminin ikinci yıl itibarıyla üst toprağın stabilitesini artırarak erozyon ve besin taşınımını azaltmaya başladığını göstermektedir. Literatürde de malçlama ve benzeri yüzey uygulamalarının etkisinin zamanla arttığı, ilk yıl yüksek taşınım potansiyelinden sonra özellikle ikinci yılda taşınım oranlarının düştüğü rapor edilmiştir (Robichaud vd., 2000).

YADD-H1 (doğal haline bırakılan) ile YAYG-H3 (sürüm + fidan dikimi) arasında taşınan toplam sediman ve bitki besin maddesi miktarları açısından benzerlikler görülmüştür. Her iki yöntem de kısa vadede üst toprağı koruması açısından sınırlı etkiye sahip olup, özellikle sürümün toprağı gevşetmesi ve bitki örtüsünün henüz gelişmemiş olması nedeniyle YAYG-H3’te taşınan kalsiyum, potasyum, çinko ve bakır miktarları daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, toprağın fiziksel yapısının bozulmasının besin taşınımına olan katkısını göstermektedir (Shakesby & Doerr, 2006).

Rehabilitasyonun ikinci yılında elde edilen bulgular, birinci yıldan farklı olarak YAYG-H3'te taşınan besin maddesi miktarlarının en yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir. Örneğin, YAYG-H3'te taşınan ortalama organik karbon miktarı 24.994,1 g/ha iken, bu değer YADD-H1'de 14.716,3 gram/ha, YADG-H2'de yalnızca 1.349 gram/ha ve kontrol sahasında 1.120,5 gram/ha olarak belirlenmiştir. Benzer değişimler toplam azot, kalsiyum, potasyum ve sodyum gibi bitki besin maddeleri için de geçerlidir. Bu, üst toprakta gelişen bitki örtüsünün henüz yetersiz olduğu, toprağın fiziksel olarak zayıf durumda bulunduğu ve azalan infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik nedeniyle besin elementlerinin taşınımını artırdığını göstermektedir (Larsen vd., 2009). Bu havzada sürüm yapılan yamaçlar ile akarsu yatağı arasında bağlantının bir bölümü oyuntu (gully) ve parmak (rill) erozyonu yoluyla gerçekleşmiştir.

Kontrol sahasında ise sediman ve bitki besin maddesi taşınımı diğer havzalara göre son derece düşük düzeydedir. Bu, iyi gelişmiş bitki örtüsünün ve bozulmamış toprak yapısının erozyonu doğal olarak sınırlandırdığı bilinen bir durumdur (Neary vd., 2005).

Her iki yıl boyunca gözlemlenen sonuçlar, rehabilitasyon yöntemlerinin zaman içinde değişen etkilerini ve yüzey koşullarındaki iyileşme hızlarını yansıtmaktadır. İlk yıl, tohumlama + dal serme yöntemi (YADG-H2) en fazla besin taşınımına neden olurken, ikinci yıl bu yöntemle taşınan besin miktarlarında belirgin bir azalma gözlenmiştir. Buna karşılık, sürüm + fidan dikimi yöntemi (YAYG-H3) ikinci yıl en yüksek taşınım değerlerine ulaşmıştır. Doğal bırakılan havzada (YADD-H1) ise kısa vadede yeterince bir iyileşme olmadan her iki yıl boyunca görece birbirine yakın sediman taşınımı gerçekleşmiştir.

4.3.3. Yüzeysel Akış İçerisinde Taşınan Bitki Besin Maddesi Miktarı

4.3.3.1. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Yangın sonrası uygulanan rehabilitasyon yöntemlerinin, yüzeysel akış ve bununla taşınan bitki besin maddesi miktarları üzerindeki etkisi bu çalışmada iki yıllık ölçüm sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Bulgular, farklı rehabilitasyon yöntemlerinin yalnızca sediman taşınımını değil, aynı zamanda hem yüzeysel akışı hem de bununla taşınan bitki besin maddesi miktarlarını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Ayrıca rehabilitasyon yöntemlerinin sadece uygulandığı dönemde değil, sonraki yıllarda da yüzeysel akış ve bitki besin maddesi taşınımını üzerinde belirleyici etkiler yaratmaktadır.

Her iki yıl boyunca, yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1) yüzeysel akış ve akım miktarlarının genellikle diğer havzalara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle rehabilitasyonun ikinci yılında da bu havzada ölçülen yüzeysel akış değerlerinin diğer iki rehabilitasyon yöntemiyle kıyaslandığında daha yüksek olması, yangın ve üretim faaliyetleri

esnasında bozulan toprak yüzeyinin yeterince iyileşmediği ve bitki örtüsünün yeterli düzeyde oluşmamasının etkili olduğunu göstermektedir. Literatürde bu durum, yangın sonrası yüzeysel su tutma kapasitesinin azalması ve infiltrasyon oranlarının düşmesiyle açıklanmaktadır (DeBano, 2000; Shakesby, 2011). Birinci ve ikinci yılda hem infiltrasyon hızı hem de hidrolik iletkenlik değeri birbirine nispeten yakındır. Yüzeysel akışın artması, beraberinde toprağın üst katmanındaki zengin besin maddelerinin (örneğin Ca, Mg, S, Na) taşınmasını kolaylaştırmıştır. Her iki yıl boyunca yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1), sediman içerisindeki kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), kükürt (S) ve sodyum (Na) miktarlarının diğer havzalara kıyasla genellikle daha yüksek olduğu görülmüştür. YADD-H1’de özellikle kalsiyum (24.678,4 g/ha), magnezyum (8.439,3 g/ha), sodyum (3.180,8 g/ha) ve kükürt (6.843,3 g/ha) miktarlarının yüksek olması, bu durumla doğrudan ilişkilidir. Örneğin, rehabilitasyonun ikinci yılında YADD-H1’de taşınan ortalama kalsiyum miktarı 24.678,4 g/ha iken, bu değer YADG-H2 ve YAYG-H3’te sırasıyla 9.047,8 ve 10.400,8 g/ha olarak ölçülmüştür. Bu fark, yangın ve üretim faaliyetleri sonrası toprak yüzeyinin korumasız bırakılmasının yüzeysel akış içerisinde çözünmüş haldeki besin taşınımını artırabileceğini göstermektedir (Shakesby, 2011). Ayrıca yol ile akarsu arasında gelişen 11 metrelik vejetasyon zonu, yatak yükünün akarsuya girişini engellerken hem yüzeysel akışı hem de yüzeysel akış içerisinde çözünmüş halde taşınan bitki besin maddesini filtreleyemediği görülmektedir.

Tohumlama ve dal serme yöntemi uygulanan havzada (YADG-H2), ilk yılın sonuçları incelendiğinde yüzeysel akış miktarlarının YADD-H1’e göre daha düşük olduğu ancak YAYG-H3’ten daha yüksek olduğu görülmüştür. Rehabilitasyonun birinci yılında bu havzada taşınan birçok bitki besin maddesi (özellikle kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve kükürt), yangın sonrası doğal bırakılan havzaya (YADD-H1) kıyasla daha düşük olsa da sürülen ve fidan dikilen havzadan (YAYG-H3) ve yangın geçirmemiş kontrol sahasından belirgin şekilde daha yüksek düzeylerde gerçekleşmiştir. Birinci yıl boyunca YADG-H2’de taşınan ortalama kalsiyum miktarı 10.473,7 g/ha, magnezyum 2.771,4 g/ha, sodyum 673,7 g/ha ve kükürt 1.949,5 g/ha olarak ölçülmüş; bu değerler YAYG-H3’e göre sırasıyla yaklaşık 2,4, 6,0, 3,8 ve 5 kat daha fazladır. Bu durum, rehabilitasyon uygulamasının doğal bırakılan havzaya (YADD-H1) oranla yüzey koşullarını stabilize etmeye başladığını, ancak henüz kontrol sahasın seviyesine ulaşmadığını göstermektedir (Robichaud vd., 2000; Vega vd., 2015). Rehabilitasyonun ikinci yılında yüzeysel akış miktarı ciddi oranda azalmıştır. Bu azalma, yüzeysel akış içerisinde çözünmüş halde taşınan bazı bitki besin maddelerinin de düşmesine neden olmuştur. Özellikle kalsiyum (Ca) taşınımı birinci yılda 10.473,7 gram/ha iken, ikinci yılda 9.047,8 gram/ha olarak ölçülmüş; yaklaşık %13,6’lık bir azalma gerçekleşmiştir. Benzer

şekilde amonyum azotu (NH_4^+-N) 21,75 gram/ha'dan 11,31 gram/ha'a; Nitrat azotu (NO_3^--N) miktarı da 160,5 gram/ha'dan 151 gram/ha'a düşmüş ve potasyum (K) miktarı 250,8 gram/ha'dan 197,7 gram/ha'a gerilemiştir., bu da yaklaşık %21'lik bir azalmaya karşılık gelmektedir. Bu azalmalar, yamaçlardaki üst toprağın birinci yıla göre daha stabil hale gelmesi ve infiltrasyon kapasitesinin artmasıyla ilişkilidir. Dal serme uygulaması ikinci yıl itibariyle yüzeysel akışa geçen su miktarını azaltmakta ve böylece besin taşınımını sınırlamaktadır (Díaz-Raviña vd., 2012; Vega vd., 2015).

Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havza (YAYG-H3), ilk yıl boyunca hem yüzeysel akış hem de taşınan besin maddesi miktarları açısından diğer rehabilitasyon havzalarına göre daha düşük değerler göstermiştir. Sürüm uygulaması toprağı ilk aşamada gevşeterek hem infiltrasyon hızını hem de hidrolik iletkenliği arttırmıştır. Ancak ikinci yıl itibariyle yüzeysel akış miktarlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Literatürde de belirtildiği gibi, toprağın mekanik olarak bozulmasının kısa vadede yüzeysel akışı azaltsa da zamanla erozyon potansiyelinin yeniden arttığını göstermektedir (Johansen vd., 2001). Bu artış, yüzeysel akışla birlikte çözünmüş halde taşınan bitki besin maddelerine de yansımıştır. Özellikle kalsiyum taşınımı ikinci yılda 10.400,8 gram/ha'ya ulaşmış, bu değer birinci yıldan (4.338,1 gram/ha) yaklaşık %140 daha fazlasıdır. Benzer şekilde magnezyum, 458,8 gram/ha'dan 938,5 gram/ha'ya çıkarak %104 oranında artış göstermiştir. Sodyum miktarı 175,6 gram/ha'dan 560,8 gram/ha'ya yükselmiş ve bu artış yaklaşık %219 oranındadır. Kükürt taşınımı da dikkat çekici şekilde artmış, birinci yıldaki 388,5 gram/ha değerinden ikinci yılda 1.084,7 gram/ha'a ulaşarak yaklaşık %179'luk bir artış göstermiştir. Bu tarz sürülen ve fidan dikimi yapılan sahalarda kısa vadede gözlenen su tutma kapasitesi, ikinci yıl itibarıyla zayıflayabilmekte ve bu da taşınım süreçlerini hızlandırabilmektedir (Fernández & Vega, 2014). Yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3), yüzeysel akış içerisinde çözünmüş halde taşınan ortalama bitki besin maddesi, yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havza (YADG-H2) ile istatistiksel olarak benzerlik göstermiştir. Ancak, taşınan bu bitki besin maddelerinin zamana bağlı olarak değişimleri farklıdır. Yangın sonrası tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) hem yüzeysel akış hem de bununla taşınan çözünmüş bitki besin maddesi ikinci yıl itibariyle azalış eğilimindeyken, yangın sonrası sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ise hem yüzeysel akış hem de taşınan çözünmüş bitki besin maddesi katlanarak artış eğilimindedir.

Bu sonuçlar, YAYG-H3'te ikinci yılda gözlenen artışlar, özellikle sürüm işleminin daha uzun vadede yüzeysel akışı ve taşınan çözünmüş sedimanı azaltabileceğini, YADG-H2'de ise

ikinci yıl itibarıyla gözlenen azalma eğilimi, tohumlama ve dal sermenin daha kısa zaman içinde havzayı iyileştirebilme eğiliminde olduğunu göstermektedir.

4.4. Yüzeysel Akışın Su Kalitesi Özellikleri

4.4.1. Üretim Faaliyetleri Dönemi (01.10.2022-25.05.2023)

Orman yangınlarını takip eden üretim faaliyetlerinin su kalitesi üzerindeki etkileri, yangın sonrası ekosistem dinamiklerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir (Neary vd., 2005; Certini, 2005). Üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü alanlarda su kalitesine yönelik etkilerin büyüklüğü, sadece müdahale yoğunluğuna değil, aynı zamanda akarsu ile orman yolu arasındaki mesafe ve vejetasyonla kaplı tampon bölgelerin varlığı gibi morfolojik ve ekolojik tampon unsurların mevcudiyetine de doğrudan bağlıdır (MacDonald & Coe, 2007; Gomi vd., 2005). Bu çalışmada, üretim faaliyetleri döneminde gerçekleşen dokuz yağışlı olay sırasında dört farklı havzada ölçülen su kalitesi parametreleri, yangın sonrası yapılan bu müdahalelerin hidrolojik sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

Havza 1, diğer üretim sahalarından farklı olarak, orman yolu ile akarsu yatağı arasında yer alan yaklaşık 11 metre genişliğinde vejetasyonla kaplı bir zon (riperyan zon) ile karakterize edilmiştir. Bu zon, havza yamaçlarından ve özellikle orman yollarından gelen sedimanın doğrudan akarsuya ulaşmadan önce bitki örtüsü ve toprak tarafından tutulmasına olanak tanımaktadır. Bu dönemde Havza 1’de sediman tuzaklarında biriken sediman miktarı (81,4 kg), Havza 2 ve Havza 3’e oranla çok daha düşüktür. Havza 1’de ölçülen su kalitesi parametreleri, özellikle sediman kaynaklı etkiler açısından bu vejetasyon zonunun yarattığı birtakım değişiklikler vardır. En yüksek ortalama çözünmüş oksijen (ÇO) değeri (%101,5) üretim faaliyetleri yapılan havzalar arasında Havza 1’de ölçülmüş ve kontrol sahasına daha yakın değerler göstermiştir. Bu durum, yüksek sediman yüküne sahip sistemlerde görülen çözünmüş oksijen düşüşünün burada daha sınırlı olduğunu ve dolayısıyla sedimanı filtreleme süreçlerinin etkinliğini göstermektedir (Meyer vd., 2005).

En dikkat çekici farklardan biri, bulanıklık parametresinde görülmektedir. Havza 1’de ölçülen ortalama bulanıklık değeri 68,22 NTU ile Havza 2’ye kıyasla yaklaşık %94 oranında daha düşük, Havza 3’e göre ise yaklaşık %85 oranında azdır. Bu fark, riperyan zonun akarsuya yatağına dahil olan sedimanı etkili bir şekilde tutma kapasitesine işaret etmektedir.

Havza 1’de akarsu ile orman yolu arasında yer alan vejetasyon zonu, toplam çözünmüş sediman (TDS) konsantrasyonu, tuzluluk ve elektriksel iletkenlik üzerinde sınırlı etkiler yaratmıştır. Buna göre toplam çözünmüş sediman (TDS) konsantrasyonu (195,55 mg/l), tuzluluk (‰0,19) ve elektriksel iletkenlik (402,44 µS/cm) gibi parametreler Havza 2’ye kıyasla

daha düşük seviyelerde seyretmiş, ancak istatistiksel olarak benzer bulunmuştur. Bu durum, vejetasyon zonunun katı halde taşınan sediman girişini engellediği ve katı sediman kaynaklı (süspanse sediman ve yatak yükü) değişebilen bulanıklık ve çözünmüş oksijen değerlerini düşürdüğü görülmektedir. Ancak bu zon, su içerisinde çözünmüş halde bulunan çözünmüş toplam sediman (TDS) konsantrasyonu, tuzluluk ve elektriksel iletkenlik gibi parametreler üzerinde daha sınırlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Havza 2’de, orman yolu ile akarsu yatağının doğrudan bitişik olması ve bu iki alan arasında vejetasyonla kaplı (riperyan zon) tampon bölgenin bulunmaması, yüzeysel akışla taşınan sedimanın ve çözünmüş maddenin doğrudan akarsuya ulaşmasına neden olmuştur. Bu özelliklerin sonucu olarak, Havza 2’de ölçülen su kalitesi parametreleri, diğer havzalarla karşılaştırıldığında ciddi bozulmalar göstermiştir. En yüksek elektriksel iletkenlik (450,71 $\mu\text{S}/\text{cm}$), toplam çözünmüş sediman (TDS; 219,84 mg/l) ve tuzluluk (‰0,21) değerleri bu havzada ölçülmüş ve bu farklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Bu yüksek değerler, yüzeysel akışın doğrudan akarsuya yönelmesiyle taşınan çözünmüş iyon yükünün artışı yansıtmaktadır. Orman yolundan gelen akış, özellikle yoğun kullanım ve yamaçlardaki toprak bozulmasının olduğu alanlarda, çözünmüş tuzlar, mineraller ve ince partiküller açısından zengin olabilmektedir (Croke & Hairsine, 2006; Sheridan vd., 2006). Bu bileşiklerin süzülmeden doğrudan akarsuya ulaşması, elektriksel iletkenlik ve TDS değerlerinin yükselmesine neden olmaktadır.

Bulanıklık değerleri ise, Havza 2’nin en çarpıcı su kalitesi sorunu olarak öne çıkmaktadır. Ortalama 1215 NTU olarak ölçülen bu değer, diğer üretim havzalarının yaklaşık 2 ila 5 katı, kontrol sahasının ise neredeyse 74 katıdır. Bu durum akarsu yatağına dahil olan ve taşınan sediman miktarının ciddi oranda arttığını göstermektedir. Bulanıklıkta görülen bu artışın temel nedenlerinden biri, riperyan zonun yokluğu nedeniyle yüzeysel akışın hiçbir fiziksel veya biyolojik filtreleme sürecine uğramadan doğrudan akarsuya ulaşmasıdır (Lowrance vd., 1997). Literatürde riperyan zonların akarsuya ulaşan sediman miktarını azaltabildiği belirtilmektedir (Dosskey vd., 2010; Mayer vd., 2007). Bu doğal filtre sisteminin yokluğu, özellikle yol yüzeyi ve üretim faaliyetleri sonucunda bozulmuş toprak alanlardan kaynaklı sedimanın akarsuya taşınmasını hızlandırmaktadır (Wemple vd., 2001). Bu durum, sadece sediman değil, aynı zamanda nitrat, fosfat, ağır metaller ve kirleticilerin de su sistemine taşınmasını kolaylaştırır (Gomi vd., 2005; MacDonald & Coe, 2007). Aynı zamanda, yüksek sediman yüküyle birlikte gelen organik madde, su içinde çözünmüş oksijenin mikrobiyal tüketimini artırarak oksijen seviyesini daha da düşürebilir (Neary vd., 2005).

Havza 3, yol ile akarsu arasında yaklaşık 50 metrelik bir mesafeye sahip olmasına rağmen, bu alan içerisinde vejetasyonla kaplı bir zonun (riperyan zonun) bulunmaması, su kalitesinin korunmasında sınırlı bir tampon işlevi yaratmaktadır. Bu durum, Havza 3'ün su kalitesi parametrelerine hem Havza 1 (daha korunaklı) hem de Havza 2 (daha doğrudan etkili) arasında bir geçiş özelliği kazandırmıştır.

Havza 3'te ölçülen ortalama bulanıklık değeri 441,26 NTU olup, Havza 1'e kıyasla yaklaşık 6,5 kat daha fazla, Havza 2'ye kıyasla ise yaklaşık %63 oranında daha düşüktür. Bu bulgu, 50 metrelik mesafenin, özellikle yağış sonrası taşınan sedimanın doğrudan akarsuya ulaşmasını kısmen geciktirerek, taşınan sedimanın bir kısmının çökmesine olanak sağladığını göstermektedir (Croke & Hairsine, 2006; Sheridan vd., 2006). Ancak bu mesafenin, etkili bir riperyan tampon zon ile desteklenmemesi, sediman yükünün önemli bir kısmının akarsuya taşınmasına yine de engel olamamıştır.

Havza 3'te ölçülen elektriksel iletkenlik (238,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$), toplam çözünmüş sediman (TDS; 114,35 mg/l) ve tuzluluk (%0,11) değerleri, hem Havza 1 hem de Havza 2'ye kıyasla belirgin biçimde daha düşük, ancak kontrol sahasından anlamlı düzeyde daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, yüzeysel akışın taşıdığı çözünmüş madde yükünün Havza 3'te sınırlı kaldığını, ancak tamamen filtrelenemediğini göstermektedir. Bu bağlamda, yol ile akarsu arasındaki 50 metrelik fiziksel mesafenin, çözünmüş maddelerin kısmen çökmesine olanak sağlayarak suya taşınan yükü bir miktar azalttığı, ancak riperyan zonun eksikliği nedeniyle biyolojik ve fiziksel filtrasyonun etkin olamadığı söylenebilir (Dosskey vd., 2010; Lowrance vd., 1997).

Yangının ardından yapılan üretim faaliyetleri, yüzeysel akışa geçen suyun kalitesini olumsuz bir şekilde etkilemiştir. Buna göre üretim faaliyetleri yapılan havzaların su kalitesi parametrelerinin tamamı, istatistiksel olarak anlamlı bir fark olsun veya olmasın kontrol sahasına göre daha olumsuz değerler göstermiştir. Havza 2'deki değerlerin diğer havzalara kıyasla yüksekliği, bu sahada yapılan uygulamaların su kalitesi üzerinde daha olumsuz etkiler yarattığını işaret etmektedir. Bu durum, yangın sonrası müdahale yöntemlerinin seçimi ve uygulanma biçiminin, erozyon, sediman taşınımı ve su kalitesi üzerindeki etkilerini belirgin şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır (Robichaud vd., 2000; Moody & Martin, 2001). Havza 1'in diğer üretim sahalarına kıyasla daha iyi su kalitesi değerleri göstermesi, büyük ölçüde akarsu ile orman yolu arasında gelişen vejetasyon zonunun varlığına bağlanabilir. Havza 3 ise özellikle sediman kaynaklı bazı su kalitesi parametreleri (bulanıklık, çözünmüş oksijen) bakımından Havza 1 ile Havza 2 arasında bir geçiş özelliği gösterirken, çözünme süreçleri (TDS, EC ve tuzluluk) bakımından diğer havzalardan daha düşük değerler ölçülmüştür.

4.4.2. Rehabilitasyon Dönemi (25.05.2023-29.03.2025)

Yangın sonrası farklı rehabilitasyon uygulamalarının su kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmeye yönelik bu çalışmada, farklı rehabilitasyon yöntemleri uygulanan havzalarda ve yangın geçirmemiş kontrol sahasında iki yıl boyunca su kalitesi parametreleri analiz edilmiştir. Bulgular, su kalitesinin yalnızca uygulanan rehabilitasyon türüne değil, aynı bu uygulamaların yüzeysel akış ve sediman miktarına olan etkileri ve zaman içindeki değişiminden de etkilendiğini göstermektedir.

İlk yıl itibarıyla, yüzeysel akış miktarı yangın sonrası doğal bırakılan havzada YADD-H1 diğer havzalara kıyasla belirgin şekilde yüksek ölçülmüştür. Bu yüksek yüzeysel akış, aynı zamanda bu havzada ölçülen yüksek elektriksel iletkenlik (771,28 $\mu\text{S/cm}$), toplam çözünmüş sediman (378,36 mg/l) ve tuzluluk (%0,37) gibi çözünmüş madde yüküne ilişkin parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Bu durum, yüzeysel akışın artmasıyla birlikte toprak yüzeyinden daha fazla çözünmüş iyon taşındığını ve bu nedenle suyun kimyasal yükünün arttığını göstermektedir (Shakesby & Doerr, 2006). Benzer şekilde, tohumlama ve dal serme işlemi uygulanan havzada (YADG-H2) da ilk yıl yüzeysel akış görece yüksektir ve buna paralel olarak EC (601,04 $\mu\text{S/cm}$), TDS (294,91 mg/l) ve tuzluluk (%0,29) değerleri de yüksektir. Öte yandan, sürüm ve fidan dikimi uygulanan havzada (YAYG-H3) birinci yıl elektriksel iletkenlik (416,40 $\mu\text{S/cm}$), toplam çözünmüş sediman (201,03 mg/l) ve tuzluluk (%0,20) değerleri, YADD-H1 ve YADG-H2'ye göre daha düşük ancak kontrol sahasından daha yüksektir. Bu durum, yangın sonrası yapılan sürüm ve dikim müdahalesinin, ilk yılda yüzeysel akış miktarını azalttığını ve bu sadece üst topraktan akarsuya dahil olan çözünmüş madde taşınımını daha düşük seviyede tuttuğunu göstermektedir.

Rehabilitasyonun birinci yılında su kalitesi parametreleri açısından en belirgin fark bulanıklık değerinde gözlenmiştir. Bu dönemde en yüksek ortalama bulanıklık, tohumlama ve dal serme yöntemi uygulanan havzada (YADG-H2) ölçülmüş olup 2264,24 NTU olarak kaydedilmişti. Tohumlama ve dal serme işlemi birinci yılda üst toprağın korunmasını tam olarak sağlayamamış, diğer havzalardan daha yüksek oranda taşınan sediman miktarı, yüzey suyunun bulanıklığını yükseltmiştir. Sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) ölçülen bulanıklık değeri (1182,5 NTU), YADD-H1'den daha düşük olup YADG-H2'den daha yüksektir. Sürüm ve dikim faaliyetleri, birinci yılda yüzeysel akış miktarını azaltmış ancak toprağın stabilitesini bozarak YADD-H1'e göre daha fazla süspanse sedimanın taşınmasına sebep olmuştur. Bu durum, sürüm ve dikim yapılan havzada (YAYG-H3) bulanıklık değeri, tohumlanan ve dal serilen havzadan (YADD-H1) daha yüksek, doğal bırakılan havzadan (YADD-H1) ise daha düşük ölçülmüştür.

Rehabilitasyonun ilk yılında, çözünmüş oksijen, pH ve oksidasyon indirgeme potansiyeli değerleri açısından YADD-H1 (doğal bırakılan), YADG-H2 (tohumlama + dal serme), YAYG-H3 (sürüm + fidan dikimi) ve kontrol sahası arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p>0,05$). Bu benzerlik, özellikle biyokimyasal süreçlerin henüz rehabilitasyonun ilk yılında baskın su kalitesi parametreleri üzerinde belirgin bir değişime yol açmadığını göstermektedir.

İkinci yıl verileri, rehabilitasyon uygulamalarının su kalitesi üzerindeki etkilerinin zamanla farklılaştığını göstermektedir. Doğal bırakılan havzada (YADD-H1) yüzeysel akış miktarı birinci yıla göre %18 oranında azalmıştır (259,5 mm'den 212,9 mm). Bu dönemde TDS ortalaması 310,69 mg/l, EC 637,65 μ S/cm ve tuzluluk ‰0,31 düzeyine gerilemiştir. Bu değişim, yüzeysel akış miktarına benzer olarak yaklaşık %16–18 oranında bir azalmaya karşılık gelmektedir. Ancak bu havzada ölçülen yüzeysel akış, TDS, EC ve tuzluluk diğer havzalara göre hala en yüksektir. YADG-H2'de yüzeysel akış miktarı birinci yıla göre önemli oranda azalmıştır (136 mm'den 84 mm'ye). TDS değeri 267,12 mg/l, EC 552,64 μ S/cm ve tuzluluk ise ‰0,26 düzeyine gerilemiştir. Bu değişim, yaklaşık %8–10 oranında bir düşüşe karşılık gelmektedir. İkinci yıl itibarıyla tohumlanan ve dal serilen havzada (YADG-H2) birinci yıla göre TDS, EC ve tuzluluk değeri yüzeysel akışa oranla (%38,2) daha az bir düşüş göstermiştir. Sürülen ve fidan dikilen havzada (YAYG-H3) yüzeysel akış miktarı 68,1 mm'den 106 mm'ye yükselmiştir (%55 oranında artış). İkinci yılda yüzeysel akışta yaşanan artış, toprakta biriken çözünmüş maddelerin yüzeysel akışla daha fazla taşınmasına neden olmuş ve TDS ile EC değerlerinde hafif bir artışa yol açmıştır. Tuzluluk değeri ise her iki yılda da ‰0,20 düzeyinde sabit kalmıştır.

En dikkat çekici farklılık ise her iki yılda da bulanıklık değerlerinde gözlemlenmiştir. Birinci yılda en yüksek bulanıklık YADG-H2'de (2264,24 NTU) ölçülmüştür. Ancak ikinci yılda bu havzada azalan yüzeysel akış sonucunda bulanıklık değeri yaklaşık %42 oranında azalarak 1309,35 NTU seviyesine gerilemiştir. Bu durum, dal serme işleminin dal serme uygulamasının zamanla sediman taşınımını azaltmaya başladığını ve fiziksel su kalitesinde iyileşmeye yol açtığını göstermektedir. Sürüm ve fidan dikme faaliyetleri yapılan havzada (YAYG-H3), ikinci yıl itibarıyla yüzeysel akış belirgin şekilde artmış ve bulanıklık değeri dramatik bir artışla 2479,30 NTU seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, yaklaşık %110'luk bir yükselişe karşılık gelmektedir. Bu durum, yangın sonrası yapılan sürüm işleminin toprağın fiziksel yapısını bozarak suya karşı daha hassas hâle getirdiğini ve yağışlarla birlikte toprak partiküllerinin kolaylıkla askıya geçip taşındığını göstermektedir. Yüzey stabilitesinin

yetersizliği ve bitki örtüsünün tam gelişmemiş olması, özellikle ince partiküllerin taşınımını artırarak suyun fiziksel kalitesini ciddi biçimde düşürmüştür.

Sonuç olarak, yangın sonrası rehabilitasyon yöntemlerinin su kalitesi üzerindeki etkileri parametre bazında farklılık göstermektedir. Elektriksel iletkenlik, TDS ve tuzluluk gibi çözünmüş madde yoğunluğuna bağlı parametrelerde, doğal bırakılan ve tohumlanan alanlarda yüksek değerler korunurken, tohumlama ve dal serme (YADG-H2) ile sürüm ve fidan dikme (YAYG-H3) alanlarında bu etkiler zamanla daha dengelenmiştir. Buna karşın, bulanıklık gibi fiziksel taşınımına bağlı parametrelerde, toprak yüzeyine yapılan müdahalelerin etkisi daha belirgin olmuş, sürüm ve dikim yapılan alanlarda bulanıklık önemli ölçüde artmıştır. Buna göre yüzeysel akışla taşınan sedimanlar, su kalitesi üzerinde hem fiziksel hem kimyasal etkiler yaratmaktadır; ancak bu etkilerin ortaya çıkma hızları ve süreklilikleri, su içerisinde belirlenen parametrenin özelliğine göre farklılık göstermektedir. Bulanıklık gibi fiziksel parametreler, doğrudan taşınan sediman miktarına bağlı olarak kısa vadeli ve ani değişimlere hızlı tepki verirken; çözünmüş toplam sediman (TDS), elektriksel iletkenlik (EC) ve tuzluluk gibi çözünmüş madde yükünü yansıtan parametreler, kimyasal çözünme, yüzey ve yüzey altı akış ve toprak ile su arasındaki etkileşim gibi süreçlere bağlı olduğundan daha yavaş ve zamana yayılmış tepkiler verebilmektedir (Shakesby & Doerr, 2006; Certini, 2005).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, orman yangını, ardından yapılan üretim faaliyetleri (salvage logging) ve uygulanan farklı rehabilitasyon yöntemlerinin; toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, akarsu hidrolojisi, sediman taşınım süreçleri ve yüzey suyu kalitesi üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bulgular hem doğrudan müdahalelerin hem de uygulanan rehabilitasyon yöntemlerinin zaman içerisinde etkilerinin doğal kaynaklar üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, sonuç ve öneriler hem yangın ve üretim faaliyetleri (salvage logging) hem de rehabilitasyon dönemi bağlamında iki ana başlık altında sunulmuştur.

Orman Yangının ve Ardından Yapılan Üretim Faaliyetlerinin (Salvage Logging) Toprak Özellikleri, Sediman Taşınım Süreçleri ve Su Kalitesi Üzerindeki Etkileri

Orman yangınının toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde ciddi bozulmalara neden olduğu belirlenmiştir. Yangın, toprakta hacim ağırlığını artırarak gözenekliliği azaltmış, bu durum infiltrasyon kapasitesinin ve hidrolik iletkenliğin düşmesine neden olmuştur. Aynı zamanda pH ve elektriksel iletkenlik değerlerinde artışlar gözlenmiş; bazı besin elementleri (Ca, Mg, K, P) yangınla birlikte artarken, organik karbon ve toplam azot gibi toprak verimliliği göstergelerinde önemli düşüşler meydana gelmiştir. Yangından sonra gerçekleştirilen üretim faaliyetleri (salvage logging), toprağın daha da sıkışmasına, su geçirgenliğinin azalmasına ve özellikle fosfor, potasyum ve sodyum gibi besin elementlerinin erozyon yoluyla kaybına neden olarak bu olumsuz etkileri derinleştirmiştir.

Üretim faaliyetleri döneminde bozulan toprak yapısı, artan hacim ağırlığı ve azalan infiltrasyon kapasitesi ile sediman taşınımında belirgin bir artışa neden olmuştur. Ancak sadece toprak özellikleri değil, orman yollarının akarsuyla olan bağlantısı ve riperyan zonun varlığı da sediman taşınımını belirleyen temel etkenler arasında yer almaktadır. Akarsu ile orman yolu arasında iyi gelişmiş vejetasyon zonlarının bulunduğu alanlarda (örneğin Havza 1) sediman taşınımı sınırlı kalırken; doğrudan yol-akarsu bağlantısının bulunduğu alanlarda (örneğin Havza 2) sediman taşınımı maksimum düzeye çıkmıştır. Akarsu ile yol arasında belirli oranda mesafe bırakılması (ortalama 50 m), yol ile akarsu arasında etkili bir vejetasyon zonunun bulunmaması, sediman taşınımını engelleyememiştir. Bu durum, yalnızca fiziksel mesafenin değil, nitelikli bitki örtüsüyle kaplı riperyan tampon alanlarının da kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Yüzeysel akışın su kalitesi özellikleri, taşınan sediman miktarıyla benzer bir değişim göstermiştir. Vegetasyonla kaplı tampon zon (ortalama 11 metre genişliğinde), sediman taşınımını sınırlandırmış ve buna bağlı olarak çözünmüş oksijen, bulanıklık ve diğer fiziksel-kimyasal parametreler açısından kontrol sahasına daha yakın, olumlu sonuçlar doğurmuştur. Özellikle bulanıklıkta ve çözünmüş oksijen düzeylerinde gözlenen bu iyileştirici etki, riperyan zonların doğal filtreleme kapasitesini ortaya koymuştur. Buna karşılık, akarsu ile yol arasında vegetasyonla kaplı bir zonun bulunmaması ve orman yolunun doğrudan akarsu yatağına açılması, sediman ve çözünmüş madde taşınımını maksimum düzeye çıkarmış; elektriksel iletkenlik, tuzluluk, toplam çözünmüş sediman ve bulanıklık gibi parametrelerde ciddi bozulmalara neden olmuştur. Bu durum, doğrudan bağlantılı yol-akarsu etkileşiminin, su kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini açıkça göstermektedir. Orman yolu ile akarsu arasında 50 metrelik fiziksel mesafe olmasına rağmen, etkili bir vegetasyon zonun (riperyan zon) yokluğu nedeniyle su kalitesi üzerinde sınırlı bir tampon işlevi göstermiştir.

Bu doğrultuda şu öneriler sunulmaktadır:

- Yangın sonrası yapılacak üretim faaliyetleri mümkün olduğunca sınırlı ve kontrollü biçimde, erozyon riski gözetilerek yürütülmelidir. Bu esnada potansiyel erozyon alanları belirlenmeli ve ağır iş makineleri bu alanlardan uzakta çalıştırılmalıdır.
- Yangın sonrasında bitki besin maddesi bakımından zengin olan külün üst toprakta kalabilmesi için üretim faaliyetlerinden önce toprak yüzeyinin yarı yanmış ağaç dalları, ibrelerle kaplanması başta olmak üzere toprak yüzeyini koruyucu önlemler (malçlama uygulamaları) alınmalıdır.
- Yangın sonrasında açılan orman yolları, akarsuya sediman aktaran potansiyel erozyon alanlarından biridir. Bu yollar da rehabilite edilebilecek öncelikli alanlar arasında yer almalıdır.
- Yangın sonrası üretim faaliyetleri planlanırken, orman yollarının akarsularla doğrudan bağlantı kurması engellenmeli, yollar ile akarsular arasında tampon bölgeler bırakılmalı ve mümkünse bu alanlar doğal vegetasyonla desteklenmelidir.
- Üretim faaliyetleri esnasında üst yamaçtan alt yamaca doğru sürütme yolları açılmamalıdır. Bu yollarda başta parmak (rill) ve oyuntu (gully) erozyonunun meydana gelebileceği potansiyel alanlardır. Bu alanlarda, diğer bölgelere oranla bitki gelişimi çok daha uzun sürede sağlanabilmektedir.
- Riperyan zonların korunması, sadece sediman taşınımını değil, aynı zamanda akarsu yataklarının morfolojik stabilitesini de korumaktadır. Bu nedenle bu zonların tahrip

edilmesinden kaçınılmalı, sadece yamaçlar değil aynı zamanda tahrip edilmiş alanlar olan akarsu ise öncelikli olarak rehabilite edilmelidir.

- Sediman yönetimi açısından, üretim faaliyetleri öncesi mikrotopografik analizlerle riskli bölgeler ve potansiyel sediman kaynak alanları tespit edilmeli ve bu alanlarda öncelikli koruyucu uygulamalar (örneğin sediman önleme çitleri, erozyon kontrol malçları) devreye alınmalıdır.
- Elde edilen bulgular, yangın ve üretim faaliyetlerinin doğal kaynaklar üzerindeki etkilerinin birbirini tetiklediği ve bu tarz çalışmaların toprak, su kaynakları ve erozyon süreçlerine ilişkin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.
- Gelecekte yapılacak çalışmalarda, yüzeysel akış ve süspanse sedimanın da ölçüldüğü bütüncül bir izleme yaklaşımı benimsenmeli, böylece toplam sediman yükü daha doğru biçimde değerlendirilmelidir.

Rehabilitasyon Yöntemlerinin Toprak Özellikleri, Yüzeysel Akış Miktarları, Sediman Taşınım Süreçleri ve Yüzeysel Akışın Su Kalitesi Parametreleri Üzerindeki Etkileri

Rehabilitasyon yöntemleri arasında toprağı en az rahatsız edici etki, tohumlama + dal serme uygulamasında (YADG-H2) görülmüştür. Bu yöntemin, toplam azot ve organik karbon başta olmak üzere bitki besin maddelerinin korunmasına katkı sunduğu belirlenmiştir. Ayrıca tohumlama + dal serme yöntemi (YADG-H2), toprak yüzeyine bırakılan yanmamış veya yarı yanmış organik materyallerin, toprak kalitesinin yeniden kazanımına katkı sağlamıştır. Rehabilitasyon yöntemleri arasında en radikal değişim, sürüm ve fidan dikimi uygulamasında (YAYG-H3) gözlenmiştir. Sürüm işlemi toprağın hacim ağırlığını azaltmakla birlikte, alt ve üst toprak karışımı nedeniyle bitki besin elementlerinin konsantrasyonunu düşürmüş, bu durum toprak verimliliği açısından potansiyel bir risk olarak değerlendirilmiştir. Doğal haline bırakılan yöntemde ise toprak özellikleri, sürüm+ fidan dikimi yöntemine göre daha iyi, ancak tohumlama+dal serme işlemine göre daha olumsuz bir etki göstermiştir. Bu yöntemle toprak özelliklerinin daha uzun bir sürede eski haline dönebileceği konusunda önemli bir göstergedir.

Farklı rehabilitasyon yöntemleri, iki yıllık dönemde hidrolojik süreçler üzerinde belirgin ve farklı etkiler yaratmıştır. Yangın sonrası doğal bırakılan havzada (YADD-H1), bitki örtüsü gelişimi yavaş ilerlediğinden, yüzeysel akış miktarları her iki yılda da yüksek seyretmiş ve infiltrasyon değerlerinde sınırlı bir iyileşme gözlenmiştir. Bu durum, doğal sürecin kısa vadede etkili bir iyileşme sağlamadığını göstermektedir. Tohumlama ve dal serme uygulaması yapılan havzada (YADG-H2) ise toprak yüzeyine serilen dallar, ibreler ve kozalaklar başta olmak üzere

yarı-yanmış malzemelerin (malçlama uygulaması) etkisiyle hem yüzeysel akış azalmış hem de infiltrasyon ve hidrolik iletkenlik değerlerinde zamanla artış sağlanmıştır. Bu yöntem, özellikle ikinci yılda havzanın su tutma kapasitesini artırarak toprak nemini koruma ve erozyonu azaltma açısından en başarılı uygulama olmuştur. Buna karşın, sürüm ve fidan dikimi uygulanan havzada (YAYG-H3), rehabilitasyonun ikinci yılında yüzeysel akışta ve akım miktarında ciddi artışlar kaydedilmiştir. Sürüm sonrası oluşan sırt ve olukların zamanla dolması, infiltrasyonu azaltarak yüzeysel akışı arttırmış ve uzun vadeli riskleri beraberinde getirmiştir.

Rehabilitasyonun ilk yılında, tohumlama + dal serme yöntemi (YADG-H2) ikinci yıl itibarıyla aynı havzada taşınan besin miktarlarının önemli ölçüde azalması, dal seriminin zamanla toprak stabilizasyonuna katkı sunduğunu ve erozyon ile taşınımı sınırlamaya başladığını göstermektedir. Sürüm + fidan dikimi yöntemi (YAYG-H3) ise rehabilitasyonun ikinci yılında en yüksek taşınım değerlerine ulaşmıştır. Toprağın fiziksel yapısının bozulması, infiltrasyonun azalması ve yetersiz bitki örtüsü bu artışın başlıca nedenleri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle oyuntu (gully) ve parmak (rill) erozyonu gibi süreçler, üst topraktaki zengin besin içeriğinin doğrudan taşınımını artırmıştır. Bu bulgu, sürüm işleminin sediman taşınım açısından kısa vadede olumlu bir etki yaratsa da uzun vadede dikkatli şekilde yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Doğal bırakılan havzada (YADD-H1), her iki yıl boyunca taşınan besin miktarları görece sabit kalmış ve zamanla belirgin bir azalma eğilimi göstermemiştir. Bu durum, bitki örtüsünün yavaş geliştiği ve toprak stabilitesinin henüz yeterli düzeye ulaşmadığı, doğal sürecin kısa vadede etkili bir iyileşme sağlamadığını göstermektedir.

Rehabilitasyon sürecinin su kalitesi üzerindeki etkileri incelendiğinde, İlk yıl verileri, özellikle doğal bırakılan (YADD-H1) ve tohumlama + dal serme (YADG-H2) havzalarında yüksek yüzeysel akışa bağlı olarak elektriksel iletkenlik (EC), toplam çözünmüş sediman (TDS) ve tuzluluk değerlerinin yüksek olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, yüzeysel akışla taşınan çözünmüş iyonların artmasıyla suyun kimyasal yükünün yükseldiğini göstermektedir. Tohumlama + dal serme uygulamasının ikinci yılda çözünmüş madde ve bulanıklık parametrelerinde anlamlı iyileşmelere yol açtığı belirlenmiştir. Sürüm + fidan dikimi uygulanan havzada (YAYG-H3) ise bu parametreler ilk yılda daha düşük seviyelerde kalmıştır. Buna karşın, sürüm yapılan alanlarda toprak stabilitesinin zamanla bozulması nedeniyle suyun fiziksel kalitesinde ciddi bozulmalar gözlemlenmiştir. Özellikle bulanıklık değerindeki dramatik artış, toprağın infiltrasyon kapasitesindeki düşüş ve havza içerisinde geçici depolanan sedimanların artan yüzeysel akışla birlikte taşınmaya başlamasıyla doğrudan ilişkilidir. Doğal bırakılan havzada (YADD-H1), bitki örtüsü gelişimi yavaş ilerlediğinden, birinci yıl ve ikinci yıl arasında su kalitesi parametreleri birbirine yakındır.

Bu bulgular doğrultusunda şu öneriler geliştirilmektedir:

- Malçlama uygulamalarında, ikinci yıl havza yamaçlarının daha stabil hale gelmesinin ilk yılda da sağlanabilmesi için, malç uygulama oranları artırılmalı ve bu oranların optimum düzeyi araştırılarak sahaya özgü değerler belirlenmelidir.
- Sürüm + fidan dikimi yöntemi, yangın sonrasında özellikle eğimli ve erozyona duyarlı alanlarda kontrollü ve sınırlı biçimde uygulanmalıdır. Bu yöntemle birlikte ek önlem olarak malç uygulaması yapılması, besin kayıplarını azaltabilir.
- Doğal bırakılan alanlar için bitki gelişimini destekleyici geçici önlemler (saman, talaş veya yerel bitki artıkları ile organik yüzey örtüsü) uygulanmalıdır. Bu yöntemin tek başına kullanılması, havzaların rehabilite süresini uzatabilmektedir.
- Rehabilitasyon uygulamaları, kısa dönemli izleme verilerine dayanılarak değerlendirilmemeli; en az iki yıllık ölçümler ile havzaların iyileşme dinamikleri izlenmelidir. Toprak özellikleri açısından çok daha uzun bir süreye ihtiyaç vardır.
- Yangın sonrası sadece havza yamaçları değil aynı zamanda akarsu yatağı boyunca vejetasyon gelişimi için de yeni rehabilitasyon yöntemleri geliştirilmelidir.
- Bütüncül yaklaşımlar benimsenerek, rehabilitasyon yöntemleri arasında farklar yalnızca sediman tuzakları değil, süspanse sediman, yüzeysel akış ve su kalitesi parametreleri de bütünleşmiş biçimde değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Abatzoglou, J. T., Kolden, C. A. (2013). Relationships between climate and macroscale area burned in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 22, 1003–1020. <https://doi.org/10.1071/WF13019>.
- AFAC (Australasian Fire and Emergency Service Authorities Council). (2010). *Bushfire glossary*. <https://www.afac.com.au>
- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(4), 1419–1441. [https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4\(ncsffm.bicfri.in\)](https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4(ncsffm.bicfri.in))
- Akburak, S., Son, Y., Makineci, E., & Çakir, M. (2018). Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a *Quercus frainetto* forest. *Journal of forestry research*, 29, 687–696.
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2016). Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *Science of the Total Environment*, 572, 1329–1335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.115>
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, 613–614, 944–957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
- Ampoorter, E., Goris, R., Cornelis, W. M., & Verheyen, K. (2007). Impact of mechanized logging on compaction of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*, 241(1–3), 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.019>
- Arunrat, N., Pumijumnong, N., & Khaenkaew, S. (2022). Effects of fire on soil organic carbon, soil total nitrogen, and soil properties under rotational shifting cultivation in northern Thailand. *Journal of Environment Management*, 302, 113978. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113978>
- Avrupa Komisyonu. (2010). *Forest fires in Europe 2010: Report No. 11*. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. <https://effis.jrc.ec.europa.eu>
- Badía, D., & Martí, C. (2000). Seeding and mulching treatments as conservation measures of two burned soils in the Central Ebro Valley, NE Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14(3), 219–232. <https://doi.org/10.1080/089030600406635>
- Badía, D., Martí, C., Aguirre, A. J., Aznar, J. M., González-Pérez, J. A., De la Rosa, J. M., & Echeverría, T. (2014). Wildfire effects on nutrients and organic carbon of a Rendzic

- Phaeozem in NE Spain: Changes at cm-scale topsoil. *Catena*, 113, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.002>
- Badía, D., Sánchez, C., Aznar, J. M., & Martí, C. (2015). Post-fire hillslope log debris dams for runoff and erosion mitigation in the semiarid Ebro Basin. *Geoderma*, 237, 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.004>
- Bautista, S., Robichaud, P. R., & Bladé, C. (2009). Post-fire mulching. In *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 369-388). CRC press.
- Benavides-Solorio, J. D., & MacDonald, L. H. (2005). Measurement and prediction of post-fire erosion at the hillslope scale, Colorado Front Range. *International Journal of Wildland Fire*, 14(4), 457–474. <https://doi.org/10.1071/WF05042>
- Benda, L., Miller, D., Bigelow, P., & Andras, K. (2003). Effects of post-wildfire erosion on channel environments, Boise River, Idaho. *Forest Ecology and Management*, 178(1-2), 105-119.
- Benda, L., Miller, D., Bigelow, P., & Andras, K. (2003). Effects of post-wildfire erosion on channel environments, Boise River, Idaho. *Forest Ecology and Management*, 178(1-2), 105-119.
- Ben-Hur, M. (2006). Using synthetic polymers as soil conditioners to control runoff and soil loss in arid and semi-arid regions—a review. *Soil Research*, 44(3), 191-204.
- Benito, J. L., Vallejo, V. R., & Trabaud, L. (1991). The effects of fire on vegetation in Mediterranean ecosystems. In L. Trabaud (Ed.), *Fire in Mediterranean ecosystems* (pp. 143–170). Springer.
- Beschta, R. L., Rhodes, J. J., Kauffman, J. B., Gresswell, R. E., Minshall, G. W., Karr, J. R., ... & Frissell, C. A. (2004). Postfire management on forested public lands of the western United States. *Conservation Biology*, 18(4), 957–967. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00495.x>
- Bilgin, A., Aybar, M., & Sağlam, B. (2016). Effects of forest fires on water sources. *Celal Bayar University Journal of Science*, 12(2), 173-177.
- Birkeland, P. W. (1999). *Soils and geomorphology* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Bladon, K. D., Emelko, M. B., Silins, U., & Stone, M. (2014). Wildfire and the future of water supply. *Environmental Science & Technology*, 48(16), 8936–8943. <https://doi.org/10.1021/es500130g>
- Blake, W. H., Wallbrink, P. J., Wilkinson, S. N., Humphreys, G. S., Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Tomkins, K. M. (2009). Deriving hillslope sediment budgets in wildfire-affected

- forests using fallout radionuclide tracers. *Geomorphology*, 104(1–2), 105–116.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.004>
- Bodí, M. B., Martin, D. A., Balfour, V. N., Santín, C., Doerr, S. H., Pereira, P., ... & Mataix-Solera, J. (2014). Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects. *Earth-Science Reviews*, 130, 103–127.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.007>
- Boer, M. M., Sadler, R. J., Wittkuhn, R. S., McCaw, W. L., & Grierson, P. F. (2009). Long-term impacts of prescribed burning on regional extent and incidence of wildfires—Evidence from 50 years of active fire management in SW Australian forests. *Forest Ecology and Management*, 259(1), 132–142.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.005>
- Bowman, D. M. J. S., & Boggs, G. S. (2006). Fire ecology. *Progress in Physical Geography* 30, 2, 245–257
- Bowman, D. M. J. S., Moreira-Muñoz, A., Kolden, C. A., Chávez, R. O., Muñoz, A. A., Salinas, F., & Abatzoglou, J. T. (2017). Human–environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. *Ambio*, 48, 350–362.
<https://doi.org/10.1007/s13280-018-1084-1>
- Boydak, M. (2004). Silvicultural characteristics and natural regeneration of pinus brutia ten. a review. *Plant Ecology*, 171, 153–163.
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39–45.
- Bren, L., & Ryan, M. (2024). An examination of stream water quality data from monitoring of forest harvesting in the Eastern Highlands of Victoria. *Land*, 13(8), 1217. 7.
<https://doi.org/10.3390/land13081217>
- Brito, D. Q., Santos, L. H., Passos, C. J. S., & Oliveira-Filho, E. C. (2021). Short-term effects of wildfire ash on water quality parameters: A laboratory approach. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 107, 500–505.
<https://doi.org/10.1007/s00128-021-03220-9>
- Burke, M. P., Hogue, T. S., Kinoshita, A. M., Barco, J., Wessel, C., & Stein, E. D. (2013). Pre- and post-fire pollutant loads in an urban fringe watershed in Southern California. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 10131–10145.
- Canadian Council of Forest Ministers. (2013). *National Forest Inventory of Canada: Forest fire statistics*. <https://cfs.nrcan.gc.ca>

- Caon, L., Vallejo, V. R., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 139, 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.001>
- Carrión, J. S., Sánchez-Gómez, P., Mota, J. F., Yll, R., & Chaín, C. (2003). Holocene vegetation dynamics, fire and grazing in the Sierra de Gádor, southern Spain. *The Holocene*, 13(6), 839-849.
- Cerdà, A. (1998). The influence of aspect and vegetation on seasonal changes in erosion under rainfall simulation on a clay soil in Spain. *Canadian Journal of Soil Science*, 78(2), 321–330. <https://doi.org/10.4141/S97-060>
- Cerdà, A., & Doerr, S. H. (2005). Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire*, 14(4), 423-437.
- Cerdà, A., & Lasanta, T. (2005). Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees: 1. Water and sediment yield. *Catena*, 60(1), 59-80.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*, 143(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Chanasyk, D. S., Whitson, I. R., Mapfumo, E., Burke, J. M., & Prepas, E. E. (2003). The impacts of forest harvest and wildfire on soils and hydrology in temperate forests: A baseline to develop hypotheses for the Boreal Plain. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(S1), 51-62.
- Chief, K., Young, M. H., & Shafer, D. S. (2012). Changes in soil structure and hydraulic properties in a wooded-shrubland ecosystem following a prescribed fire. *Soil Science Society of America Journal*, 76(6), 1965-1977.
- Coe, D. B. R. (2006). *Sediment production and delivery from forest roads in the Sierra Nevada, California* (Doctoral dissertation, Colorado State University).
- Coombs, J. S., & Melack, J. M. (2013). Initial impacts of a wildfire on hydrology and suspended sediment and nutrient export in California chaparral watersheds. *Hydrological Processes*, 27(26), 3842-3851.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Croke, J. C., & Hairsine, P. B. (2006). Sediment delivery in managed forests: a review. *Environmental Reviews*, 14(1), 59-87.

- Croke, J., Mockler, S., Fogarty, P., & Takken, I. (2005). Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology*, 68(3-4), 257-268.
- Çakmak, S., Demir, T., & Aytaç, A. S. (2021a). Korkuteli Çayı'nda taşınan eriyik sediman konsantrasyonları ve verimlerinin tahmin edilmesi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (7), 19–29.
- Çakmak, S., Demir, T., Canpolat, E., & Aytaç, A. S. (2021b). Evaluation of the effects of precipitation and flow characteristics on suspended sediment transport in mountain-type Mediterranean climate: Korkuteli Stream sample, Antalya, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 2053. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07947-z>
- Dahm, C. N., Candelaria-Ley, R. I., Reale, C. S., Reale, J. K., & Van Horn, D. J. (2015). Extreme water quality degradation following a catastrophic forest fire. *Freshwater Biology*, 60(12), 2584-2599.
- De Girolamo, A. M., Cerdan, O., Grangeon, T., Ricci, G. F., Vandromme, R., & Porto, A. L. (2022). Modelling effects of forest fire and post-fire management in a catchment prone to erosion: Impacts on sediment yield. *Catena*, 212, 106080. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106080>
- DeBano, L. F. (1981). Water repellent soils: a state-of-the-art (Vol. 46). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.
- DeBano, L. F. (1990). The effect of fire on soil properties. *USDA Forest Service General Technical Report INT-280*, 151–156.
- DeBano, L. F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: A review. *Journal of Hydrology*, 231–232, 195–206. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-3)
- DeBano, L. F., Neary, D. G., & Ffolliott, P. F. (1998). *Fire's effects on ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Díaz-Raviña, M., Martín, A., Barreiro, A., Lombao, A., Iglesias, L., Díaz-Fierros, F., & Carballas, T. (2012). Mulching and seeding treatments for post-fire soil stabilisation in NW Spain: short-term effects and effectiveness. *Geoderma*, 191, 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.003>
- Doerr, S. H., & Thomas, A. D. (2000). The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*, 231, 134-147.

- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsh, R. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51(1-4), 33-65.
- Doğan, N. (2009). Orman yangın yönetimi ve yangın silvikültürü. *OGM yayınları*.
- Dosskey, M. G., Vidon, P., Gurwick, N. P., Allan, C. J., Duval, T. P., & Lowrance, R. (2010). The role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in streams 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(2), 261-277.
- Downing, T. A., Imo, M., Kimanzi, J., & Otinga, A. N. (2017). Effects of wildland fire on the tropical alpine moorlands of Mount Kenya. *Catena*, 149, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.003>
- Drever, J. I. (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Dudley, N., & Stolton, S. (2003). *Running pure: the importance of forest protected areas to drinking water*. Washington, DC: World Bank/WWF Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use.
- Dunham, J. B., Rosenberger, A. E., Luce, C. H., & Rieman, B. E. (2007). Influences of wildfire and channel reorganization on spatial and temporal variation in stream temperature and the distribution of fish and amphibians. *Ecosystems*, 10(2), 335-346.
- Dunham, J. B., Young, M. K., Gresswell, R. E., & Rieman, B. E. (2003). Effects of fire on fish populations: landscape perspectives on persistence of native fishes and nonnative fish invasions. *Forest Ecology and Management*, 178(1-2), 183-196.
- Dzwonko, Z., Loster, S., & Gawroński, S. (2015). Impact of fire severity on soil properties and the development of tree and shrub species in a Scots pine moist forest site in southern Poland. *Forest Ecology and Management*, 342, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.01.013>
- Earl, S. R., & Blinn, D. W. (2003). Effects of wildfire ash on water chemistry and biota in South-Western USA streams. *Freshwater Biology*, 48(6), 1015-1030.
- Ekinçi, H. (2006). Effect of forest fire on some physical, chemical and biological properties of soil in Çanakkale, Turkey. *International Journal of Agriculture and Biology*, 8(1), 102-106.
- Elliott, E. A., Monbureau, E., Walters, G. W., Elliott, M. A., McKee, B. A., & Rodriguez, A. B. (2017). A novel method for sampling the suspended sediment load in the tidal

- environment using bi-directional time-integrated mass-flux sediment (TIMS) samplers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 199, 14-24.
- Emelko, M. B., Silins, U., Bladon, K. D., & Stone, M. (2011). Implications of land disturbance on drinking water treatability in a changing climate: Demonstrating the need for “source water supply and protection” strategies. *Water research*, 45(2), 461-472. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.051>
- Emelko, M. B., Stone, M., Silins, U., Allin, D., Collins, A. L., Williams, C. H., ... & Bladon, K. D. (2016). Sediment-phosphorus dynamics can shift aquatic ecology and cause downstream legacy effects after wildfire in large river systems. *Global Change Biology*, 22(3), 1168-1184.
- Emmerton, C. A., Cooke, C. A., Hustins, S., Silins, U., Emelko, M. B., Lewis, T., ... & Orwin, J. F. (2020). Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales. *Water Research*, 183, 116071. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116071>
- Ensign, S. H., & Mallin, M. A. (2001). Stream water quality changes following timber harvest in a coastal plain swamp forest. *Water Research*, 35(14), 3381-3390.
- Eron Z. (1987). Ecological factors restricting the regeneration of *Pinus brutia* in Turkey. In: *Ecologia Mediterranea*, Tome 13 N°4, 1987. Influence of Fire on The Stability of Mediterranean Forest Ecosystems. Giens (France)
- Erpul, G., Akıncı, H., & Bayramın, I. (1991). Türkiye topraklarının sınıflandırılması ve özellikleri. *Toprak İlmi Dergisi*, 2(1), 45–53. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/154090>
- Escudey, M., Arancibia-Miranda, N., Pizarro, C., & Antilén, M. (2015). Effect of ash from forest fires on leaching in volcanic soils. *Catena*, 135, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.006>
- Esen, A. N., Yushin, N., Grozdov, D., Yıldız, C., Zinicovscaia, I., Hacıyakupoglu, S., ... & Gorum, T. (2023). Effect of wildfire on soil element concentrations in Mediterranean Türkiye. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 332(11), 4667-4676. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08894-5>
- Evans, K. G., Saynor, M. J., & Willgoose, G. R. (1999). Changes in hydrology, sediment loss and microtopography of a vegetated mine waste rock dump impacted by fire. *Land Degradation & Development*, 10(6), 507-522.
- Faboya, O. L., Sojinu, S. O., Oguntuase, B. J., & Sonibare, O. O. (2020). Impact of forest fires on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations and stable carbon isotope

- compositions in burnt soils from tropical forest, Nigeria. *Scientific African*, 8, e00331. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00331>
- Fairman, T. A., Nitschke, C. R., & Bennett, L. T. (2022). Carbon stocks and stability are diminished by short-interval wildfires in fire-tolerant eucalypt forests. *Forest Ecology and Management*, 505, 119919. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119919>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2001). *Forest fires in Europe: Current situation and perspectives*. FAO Forestry Paper No. 145. <https://www.fao.org>
- Fernandez, C., & Vega, J. A. (2014). Efficacy of bark strands and straw mulching after wildfire in NW Spain: Effects on erosion control and vegetation recovery. *Ecological Engineering*, 63, 50-57.
- Fernández, C., & Vega, J. A. (2016a). Are erosion barriers and straw mulching effective for controlling soil erosion after a high severity wildfire in NW Spain?. *Ecological Engineering*, 87, 132-138.
- Fernández, C., & Vega, J. A. (2016b). Effects of mulching and post-fire salvage logging on soil erosion and vegetative regrowth in NW Spain. *Forest Ecology and Management*, 375, 46-54.
- Fernández, C., Fontúrbel, T., & Vega, J. A. (2019). Effects of pre-fire site preparation and post-fire erosion barriers on soil erosion after a wildfire in NW Spain. *Catena*, 172, 691-698. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.038>
- Fernández, C., Fontúrbel, T., & Vega, J. A. (2021). Cumulative effects of salvage logging and slash removal on erosion, soil functioning indicators and vegetation in a severely burned area in NW Spain. *Geoderma*, 393, 115004. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115004>
- Fernández, C., Vega, J. A., & Fontúrbel, T. (2020). Comparison of the effectiveness of needle cast and straw helimulching for reducing soil erosion after wildfire in NW Spain. *Journal of Soils and Sediments*, 20(1), 535-541. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02419-y>
- Fernández, C., Vega, J. A., & Vieira, D. C. S. (2010). Assessing soil erosion after fire and rehabilitation treatments in NW Spain: performance of RUSLE and revised Morgan–Morgan–Finney models. *Land degradation & development*, 21(1), 58-67.
- Fernández, C., Vega, J. A., Fonturbel, T., Pérez-Gorostiaga, P., Jiménez, E., & Madrigal, J. (2007). Effects of wildfire, salvage logging and slash treatments on soil degradation. *Land Degradation & Development*, 18(6), 591-607.

- Fernández, C., Vega, J. A., Gras, J. M., Fonturbel, T., Cuiñas, P., Dambrine, E., & Alonso, M. (2004). Soil erosion after *Eucalyptus globulus* clearcutting: differences between logging slash disposal treatments. *Forest Ecology and Management*, 195(1-2), 85-95.
- Fernández-García, V., Suárez-Seoane, S., & Fernández-González, F. (2019). Long-term impact of wildfire on soils exposed to different fire severities in *Pinus pinaster* ecosystems in NW Spain. *Science of the Total Environment*, 662, 913–926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.278>
- Ferreira, A., de Paula, F. R., de Barros Ferraz, S. F., Gerhard, P., Kashiwaqui, E. A., Cyrino, J. E., & Martinelli, L. A. (2012). Riparian coverage affects diets of characids in neotropical streams. *Ecology of Freshwater Fish*, 21(1), 12-22.
- Flannigan, M. D., Stocks, B. J., Turetsky, M. R., & Wotton, B. M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, 15(3), 549–560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
- Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., & Úbeda, X. (2018a). Post-wildfire management effects on short-term evolution of soil properties (Catalonia, Spain, SW-Europe). *Science of the Total Environment*, 633, 285-292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.195>
- Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Mataix-Solera, J., & Úbeda, X. (2016). Impact of an intense rainfall event on soil properties following a wildfire in a Mediterranean environment (North-East Spain). *Science of the Total Environment*, 572, 1353-1362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.145>
- Francos, M., Pereira, P., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Alcaniz, M., & Úbeda, X. (2018c). How clear-cutting affects fire severity and soil properties in a Mediterranean ecosystem. *Journal of Environmental Management*, 206, 625-632.
- Francos, M., Úbeda, X., & Pereira, P. (2019). Impact of torrential rainfall and salvage logging on post-wildfire soil properties in NE Iberian Peninsula. *Catena*, 177, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.014>
- Francos, M., Úbeda, X., Pereira, P., & Alcañiz, M. (2018b). Long-term impact of wildfire on soils exposed to different fire severities. A case study in Cadiretes Massif (NE Iberian Peninsula). *Science of the Total Environment*, 615, 664-671.
- Fultz, L. M., Moore-Kucera, J., Dathe, J., Davinic, M., Perry, G., Wester, D., ... & Rideout-Hanzak, S. (2016). Forest wildfire and grassland prescribed fire effects on soil biogeochemical processes and microbial communities: Two case studies in the semi-arid Southwest. *Applied Soil Ecology*, 99, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.023>

- García-Carmona, M., Arcenegui, V., García-Orenes, F., & Mataix-Solera, J. (2020). The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage logging management. *Journal of Environmental Management*, 262, 110287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110287>
- García-Orenes, F., Arcenegui, V., Chrenková, K., Mataix-Solera, J., Moltó, J., Jara-Navarro, A. B., & Torres, M. P. (2017). Effects of salvage logging on soil properties and vegetation recovery in a fire-affected Mediterranean forest: a two year monitoring research. *Science of the Total Environment*, 586, 1057-1065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.090>
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (2003). *The climate near the ground* (6th ed.). Rowman & Littlefield.
- Georgiev, K. B., Beudert, B., Bässler, C., Feldhaar, H., Heibl, C., Karasch, P., ... & Thorn, S. (2021). Forest disturbance and salvage logging have neutral long-term effects on drinking water quality but alter biodiversity. *Forest Ecology and Management*, 495, 119354. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119354>
- Ginzburg, O., & Steinberger, Y. (2012). Salvage logging versus natural regeneration post-fire practices in a forest: soil chemical and microbial aspects. *Open Journal of Ecology*, 2(1), 29-37.
- Girona-García, A., Vieira, D. C., Silva, J., Fernández, C., Robichaud, P. R., & Keizer, J. J. (2021). Effectiveness of post-fire soil erosion mitigation treatments: A systematic review and meta-analysis. *Earth-Science Reviews*, 217, 103611. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103611>
- Goberna, M., García, C., Insam, H., Hernández, M. T., & Verdú, M. (2012). Burning fire-prone Mediterranean shrublands: immediate changes in soil microbial community structure and ecosystem functions. *Microbial Ecology*, 64, 242-255.
- Gomi, T., Dan Moore, R., & Hassan, M. A. (2005). Suspended sediment dynamics in small forest streams of the Pacific Northwest 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(4), 877-898.
- Grace III, J. M. (2002). Effectiveness of vegetation in erosion control from forest road sideslopes. *Transactions of the ASAE*, 45(3), 681.
- Granged, A. J., Zavala, L. M., Jordán, A., & Bárcenas-Moreno, G. (2011). Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: A 3-year study. *Geoderma*, 164(1-2), 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.05.017>

- Gray, D. M., & Dighton, J. (2006). Mineralization of forest litter nutrients by heat and combustion. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6), 1469-1477.
- Groen, A. H., & Woods, S. W. (2008). Effectiveness of aerial seeding and straw mulch for reducing post-wildfire erosion, north-western Montana, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 17(5), 559-571.
- Hampton, T. B., Lin, S., & Basu, N. B. (2022). Forest fire effects on stream water quality at continental scales: a meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 17(6), 064003.
- Harita Genel Müdürlüğü (HGM) (2023). *Antalya paftası 5 metrelik sayısal yükselti modeli haritası*. <https://www.hgk.msb.gov.tr>
- Hebel, C. L., Smith, J. E., & Cromack Jr, K. (2009). Invasive plant species and soil microbial response to wildfire burn severity in the Cascade Range of Oregon. *Applied Soil Ecology*, 42(2), 150-159.
- Hedrick, L. B., Anderson, J. T., Welsh, S. A., & Lin, L. S. (2013). Sedimentation in mountain streams: a review of methods of measurement. *Natural Resources*, 4(1), 92-104.
- Hernández, T., Garcia, C., & Reinhardt, I. (1997). Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 25, 109-116.
- Heydari, M., Rostamy, A., Najafi, F., & Dey, D. C. (2017). Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests in Iran. *Journal of Forestry Research*, 28, 95-104.
- Hrelja, I., Šestak, I., & Bogunović, I. (2020). Wildfire impacts on soil physical and chemical properties-a short review of recent studies. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 85(4), 293-301.
- Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J. F., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2018). Prescribed fire impacts on soil properties, overland flow and sediment transport in a Mediterranean forest: A 5 year study. *Science of the Total Environment*, 636, 1480-1489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.004>
- Ibáñez, T. S., Rütting, T., Nilsson, M. C., Wardle, D. A., & Gundale, M. J. (2022). Mid-term effects of wildfire and salvage logging on gross and net soil nitrogen transformation rates in a Swedish boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 517, 120240. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120240>
- IBM Corp. (2015). *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0* [Computer software]. IBM Corp.

- Inbar, A., Ben-Hur, M., Sternberg, M., & Lado, M. (2015). Using polyacrylamide to mitigate post-fire soil erosion. *Geoderma*, 239, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.026>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- James, C. E., & Krumland, B. (2018). Immediate post-forest fire salvage logging, soil erosion, and sediment delivery. *Forest Science*, 64(3), 246-267.
- Jennings, T. N., Smith, J. E., Cromack, K., Sulzman, E. W., McKay, D., Caldwell, B. A., & Beldin, S. I. (2012). Impact of postfire logging on soil bacterial and fungal communities and soil biogeochemistry in a mixed-conifer forest in central Oregon. *Plant and Soil*, 350, 393-411.
- Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. Dover Publications. (Orijinal çalışma 1941'de yayımlanmıştır)
- Jiménez-Pinilla, P., Lozano, E., Mataix-Solera, J., Arcenagui, V., Jordán, A., & Zavala, L. M. (2016). Temporal changes in soil water repellency after a forest fire in a Mediterranean calcareous soil: Influence of ash and different vegetation type. *Science of the Total Environment*, 572, 1252-1260.
- Johansen, M. P., Hakonson, T. E., & Breshears, D. D. (2001). Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands. *Hydrological processes*, 15(15), 2953-2965.
- Johnson, D. W., Murphy, J. F., Susfalk, R. B., Caldwell, T. G., Miller, W. W., Walker, R. F., & Powers, R. F. (2005). The effects of wildfire, salvage logging, and post-fire N-fixation on the nutrient budgets of a Sierran forest. *Forest Ecology and Management*, 220(1-3), 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.011>
- Jolly, W. M., Cochrane, M. A., Freeborn, P. H., Holden, Z. A., Brown, T. J., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6(1), 7537.
- Kacar, B., (1994). *Toprak analizleri, bitki ve toprağın kimyasal analizleri III*. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Eğitim Araştırma ve Geliştirme Vakfı, Yayın No:3, ISBN: 975-7717-04-5, Ankara.
- Kavgacı A., & Tavşanoğlu Ç., (2010). Akdeniz Tipi Ekosistemlerde Yangın Sonrası Vegetasyon Dinamiği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 2, 149-166.

- Kavgacı, A., Silc, U., Başaran, S., Marinsek, A., Başaran, M. A., Kosir, P., Balpınar, N., Arslan, M., Ergüler, Ö., Carni, A. (2017). Classification of plant communities along postfire succession in *Pinus brutia* (Turkish red pine) stands in Antalya (Turkey). *Turkish Journal of Botany*, 41 (3), 8. <https://doi.org/10.3906/bot-1609-34>
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126.
- Keesstra, S., Wittenberg, L., Maroulis, J., Sambalino, F., Malkinson, D., Cerdà, A., & Pereira, P. (2017). The influence of fire history, plant species and post-fire management on soil water repellency in a Mediterranean catchment: the Mount Carmel range, Israel. *Catena*, 149, 857-866. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.006>
- Keizer, J. J., Doerr, S. H., Malvar, M. C., Prats, S. A., Ferreira, R. S. V., Oñate, M. G., ... & Ferreira, A. J. D. (2008). Temporal variation in topsoil water repellency in two recently burnt eucalypt stands in north-central Portugal. *Catena*, 74(3), 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.01.004>
- Keizer, J. J., Silva, F. C., Vieira, D. C., González-Pelayo, O., Campos, I. M. A. N., Vieira, A. M. D., ... & Prats, S. A. (2018). The effectiveness of two contrasting mulch application rates to reduce post-fire erosion in a Portuguese eucalypt plantation. *Catena*, 169, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.029>
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment (LA). In: Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi, Larry J. 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55, 164.
- Keyser, T. L., Smith, F. W., & Shepperd, W. D. (2009). Short-term impact of post-fire salvage logging on regeneration, hazardous fuel accumulation, and understory development in ponderosa pine forests of the Black Hills, SD, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4), 451-458.
- Kim, C. G., Shin, K., Joo, K. Y., Lee, K. S., Shin, S. S., & Choung, Y. (2008). Effects of soil conservation measures in a partially vegetated area after forest fires. *Science of the total Environment*, 399(1-3), 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.034>
- Knapp, E. E., & Ritchie, M. W. (2016). Response of understory vegetation to salvage logging following a high-severity wildfire. *Ecosphere*, 7(11), e01550.
- Knelman, J. E., Graham, E. B., Prevéy, J. S., Robeson, M. S., Kelly, P., Hood, E., ... & Schmidt, S. K. (2015). Fire severity shapes plant colonization effects on bacterial community

- structure, microbial biomass, and soil enzyme activity in secondary succession of a burned forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 90, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.004>
- Knicker, H. (2007). How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry*, 85(1), 91–118. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9104-4>
- Knighton, D. (1998). *Fluvial form and processes: A new perspective* (1st ed., p. 383). Wiley.
- Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü (KHGM) (1993). *Antalya ili 1/100.000 ölçekli arazi varlığı haritası*. Ankara
- Kutiel, P., & Inbar, M. (1993). Fire impacts on soil nutrients and soil erosion in a Mediterranean pine forest plantation. *Catena*, 20(1-2), 129-139.
- Kutiel, P., & Naveh, Z. (1987). The effect of fire on nutrients in a pine forest soil. *Plant and Soil*, 104, 269-274.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lane, P. N., Sheridan, G. J., & Noske, P. J. (2006). Changes in sediment loads and discharge from small mountain catchments following wildfire in south eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 331(3-4), 495-510. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.035>
- Lane, P. N., Sheridan, G. J., Noske, P. J., & Sherwin, C. B. (2008). Phosphorus and nitrogen exports from SE Australian forests following wildfire. *Journal of Hydrology*, 361(1-2), 186-198.
- Larsen, I. J., & MacDonald, L. H. (2007). Predicting postfire sediment yields at the hillslope scale: Testing RUSLE and Disturbed WEPP. *Water Resources Research*, 43(11). <https://doi.org/10.1029/2006WR005560>
- Larsen, I. J., MacDonald, L. H., Brown, E., Rough, D., Welsh, M. J., Pietraszek, J. H., ... & Schaffrath, K. (2009). Causes of post-fire runoff and erosion: Water repellency, cover, or soil sealing?. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4), 1393-1407.
- Lasanta, T., & Cerdà, A. (2005). Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees: 2. Solute release. *Catena*, 60(1), 81-100.
- Leverkus, A. B., Rey Benayas, J. M., Castro, J., Boucher, D., Brewer, S., Collins, B. M., ... & Gustafsson, L. (2018). Salvage logging effects on regulating and supporting ecosystem services—A systematic map. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(9), 983-1000. [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2018-0114](https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0114)

- Leverkus, A.B., Lorite, J., Navarro, F.B., Sánchez-Cañete, E.P., & Castro, J. (2014). Post-fire salvage logging alters species composition and reduces cover, richness, and diversity in Mediterranean plant communities. *Journal of Environment Management*, 133, 323–331. doi:10.1016/j.jenvman.2013.12.014. PMID:24412981
- Lewis, J., Rhodes, J. J., & Bradley, C. (2019). Turbidity responses from timber harvesting, wildfire, and post-fire logging in the Battle Creek Watershed, Northern California. *Environmental Management*, 63(3), 416-432. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1036-3>
- Lindenmayer, D. B., & Noss, R. F. (2006). Salvage logging, ecosystem processes, and biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 20(4), 949-958.
- Lindenmayer, D. B., Franklin, J. F., Löhmus, A., Baker, S. C., Bauhus, J., Beese, W., ... & Gustafsson, L. (2012). A major shift to the retention approach for forestry can help resolve some global forest sustainability issues. *Conservation letters*, 5(6), 421-431. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00257.x>
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., ... & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Lloret, F., Piñol, J., Castellnou, M. (2009). Wildfires. In: Woodward, J. (Ed.), *The Physical Geography of the Mediterranean*. Oxford University Press, Oxford, pp. 541–560.
- López-Vicente, M., & Navas, A. (2010). Relating soil erosion and sediment yield to geomorphic features and erosion processes at the catchment scale in the Spanish Pre-Pyrenees. *Environmental Earth Sciences*, 61, 143-158.
- Lowrance, R., Altier, L. S., Newbold, J. D., Schnabel, R. R., Groffman, P. M., Denver, J. M., ... & Robinson, J. L. (1997). Water quality functions of riparian forest buffers in Chesapeake Bay watersheds. *Environmental management*.
- Lowrance, R., Todd, R., Fail Jr, J., Hendrickson Jr, O., Leonard, R., & Asmussen, L. (1984). Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds. *BioScience*, 34(6), 374-377.
- Lucas-Borja, M. E., Calsamiglia, A., Fortesa, J., García-Comendador, J., Guardiola, E. L., García-Orenes, F., ... & Estrany, J. (2018). The role of wildfire on soil quality in abandoned terraces of three Mediterranean micro-catchments. *Catena*, 170, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.014>

- Lucas-Borja, M. E., Delgado-Baquerizo, M., Muñoz-Rojas, M., Plaza-Álvarez, P. A., Gómez-Sánchez, M. E., González-Romero, J., ... & de las Heras, J. (2021). Changes in ecosystem properties after post-fire management strategies in wildfire-affected Mediterranean forests. *Journal of Applied Ecology*, 58(4), 836-846.
- Lucas-Borja, M. E., González-Romero, J., Plaza-Álvarez, P. A., Sagra, J., Gómez, M. E., Moya, D., ... & de Las Heras, J. (2019). The impact of straw mulching and salvage logging on post-fire runoff and soil erosion generation under Mediterranean climate conditions. *Science of the Total Environment*, 654, 441-451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.161>
- Lucas-Borja, M. E., Ortega, R., Miralles, I., Plaza-Álvarez, P. A., González-Romero, J., Peña-Molina, E., ... & De las Heras, J. (2020). Effects of wildfire and logging on soil functionality in the short-term in *Pinus halepensis* M. forests. *European Journal of Forest Research*, 139, 935-945. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01296-2>
- MacDonald, L. H., & Coe, D. (2007). Influence of headwater streams on downstream reaches in forested areas. *Forest Science*, 53(2), 148-168.
- Malvar, M. C., Prats, S. A., Nunes, J. P., & Keizer, J. J. (2016). Soil water repellency severity and its spatio-temporal variation in burnt eucalypt plantations in North-Central Portugal. *Land Degradation & Development*, 27(5), 1463-1478.
- Malvar, M. C., Silva, F. C., Prats, S. A., Vieira, D. C., Coelho, C. O., & Keizer, J. J. (2017). Short-term effects of post-fire salvage logging on runoff and soil erosion. *Forest ecology and management*, 400, 555-567.
- Mansilha, C., Duarte, C. G., Melo, A., Ribeiro, J., Flores, D., & Marques, J. E. (2019). Impact of wildfire on water quality in Caramulo Mountain ridge (Central Portugal). *Sustainable Water Resources Management*, 5, 319-331. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0171-y>
- Marques, M. A., & Mora, E. (1998). Effects on erosion of two post-fire management practices: clear-cutting versus non-intervention. *Soil and Tillage Research*, 45(3-4), 433-439. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(97\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(97)00039-1)
- Martin, D. A., & Moody, J. A. (2001). Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Processes*, 15(15), 2893-2903.
- Martins, M. A., Machado, A. I., Serpa, D., Prats, S. A., Faria, S. R., Varela, M. E., ... & Keizer, J. J. (2013). Runoff and inter-rill erosion in a Maritime Pine and a Eucalypt plantation following wildfire and terracing in north-central Portugal. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(4), 261.

- Martins, M. A., Verheijen, F. G., Malvar, M. C., Serpa, D., González-Pelayo, O., & Keizer, J. (2020). Do wildfire and slope aspect affect soil water repellency in eucalypt plantations?—A two-year high resolution temporal dataset. *Catena*, 189, 104471.
- Mast, M. A., & Clow, D. W. (2008). Effects of 2003 wildfires on stream chemistry in Glacier National Park, Montana. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(26), 5013-5023.
- Mastrolonardo, G., Castelli, G., Certini, G., Maxwald, M., Trucchi, P., Foderi, C., ... & Preti, F. (2024). Post-fire erosion and sediment yield in a Mediterranean forest catchment in Italy. *International Journal of Sediment Research*, 39(3), 464-477. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.008>
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Tessler, N., Zornoza, R., Wittenberg, L., Martínez, C., ... & Jordán, M. M. (2013). Soil properties as key factors controlling water repellency in fire-affected areas: Evidences from burned sites in Spain and Israel. *Catena*, 108, 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.12.006>
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. M. (2011). Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews*, 109(1-2), 44-60. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002>
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G. M., Torres, M. P., & Barcenas, M. (2009). Forest fire effects on soil microbiology. *Fire effects on soils and restoration strategies*, 5, 133-175.
- Mayer, P. M., Reynolds Jr, S. K., McCutchen, M. D., & Canfield, T. J. (2007). Meta-analysis of nitrogen removal in riparian buffers. *Journal of environmental quality*, 36(4), 1172-1180.
- Mayor, A. G., Bautista, S., Llovet, J., & Bellot, J. (2007). Post-fire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics. *Catena*, 71(1), 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.10.006>
- McIver, J. D., & McNeil, R. (2006). Soil disturbance and hill-slope sediment transport after logging of a severely burned site in northeastern Oregon. *Western Journal of Applied Forestry*, 21(3), 123-133.
- McIver, J. D., & Starr, L. (2001). A literature review on the environmental effects of postfire logging. *Western Journal of Applied Forestry*, 16(4), 159-168.
- Meade, R. H., & Stevens Jr, H. H. (1990). Strategies and equipment for sampling suspended sediment and associated toxic chemicals in large rivers—with emphasis on the Mississippi River. *Science of the Total Environment*, 97, 125-135.

- Megahan, W. F., & Kidd, W. J. (1972). Effects of logging and logging roads on erosion and sediment deposition from steep terrain. *Journal of Forestry*, 70(3), 136-141.
- Meira-Castro, A., Shakesby, R. A., Espinha Marques, J., Doerr, S. H., Meixedo, J. P., Teixeira, J., & Chaminé, H. I. (2015). Effects of prescribed fire on surface soil in a *Pinus pinaster* plantation, northern Portugal. *Environmental Earth Sciences*, 73, 3011-3018. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3516-y>
- Memoli, V., Santorufo, L., Santini, G., Ruggiero, A. G., Giarra, A., Ranieri, P., ... & Maisto, G. (2022). The combined role of plant cover and fire occurrence on soil properties reveals response to wildfire in the Mediterranean basin. *European Journal of Soil Biology*, 112, 103430. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103430>
- Merino, A., Fonturbel, M. T., Fernández, C., Chávez-Vergara, B., García-Oliva, F., & Vega, J. A. (2018). Inferring changes in soil organic matter in post-wildfire soil burn severity levels in a temperate climate. *Science of the Total Environment*, 627, 622-632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.189>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2023). Meteorolojik veriler. <https://www.mgm.gov.tr>
- Meyer, J. L., Paul, M. J., & Taulbee, W. K. (2005). Stream ecosystem function in urbanizing landscapes. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 602-612.
- Moody, J. A., & Ebel, B. A. (2012). Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire. *Catena*, 93, 58-63.
- Moody, J. A., & Martin, D. A. (2001). Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado Front Range. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(10), 1049–1070. <https://doi.org/10.1002/esp.253>
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., & Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-science reviews*, 122, 10-37.
- Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A., & Peterson, G. A. (1993). Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2), 443–452. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x>
- Morgan, P., Moy, M., Droske, C. A., Lewis, S. A., Lentile, L. B., Robichaud, P. R., ... & Williams, C. J. (2015). Vegetation response to burn severity, native grass seeding, and salvage logging. *Fire Ecology*, 11, 31-58. 10.4996/fireecology.1102031
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing.

- Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., & Corte-Real, J. (2006). Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Climate Research*, 31(1), 85–95. <https://doi.org/10.3354/cr031085>
- Moritz, M. A., Batllori, E., Bradstock, R. A., Gill, A. M., Handmer, J., Hessburg, P. F., ... & Syphard, A. D. (2014). Learning to coexist with wildfire. *Nature*, 515(7525), 58-66.
- Moya, D., Fonturbel, M. T., Lucas-Borja, M. E., Peña, E., Alfaro-Sanchez, R., Plaza-Álvarez, P. A., ... & de Las Heras, J. (2021). Burning season and vegetation coverage influenced the community-level physiological profile of Mediterranean mixed-mesogean pine forest soils. *Journal of Environmental Management*, 277, 111405. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111405>
- Moya, D., González-De Vega, S., Lozano, E., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Lucas-Borja, M. E., & de Las Heras, J. (2019). The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and mid-terms after wildfire. *Journal of Environmental Management*, 235, 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029>
- Murphy, J. D., Johnson, D. W., Miller, W. W., Walker, R. F., Carroll, E. F., & Blank, R. R. (2006). Wildfire effects on soil nutrients and leaching in a Tahoe Basin watershed. *Journal of Environmental Quality*, 35(2), 479-489.
- National Wildfire Coordinating Group. (2011). *Glossary of wildland fire terminology*. <https://www.nwcg.gov/glossary/a-z>
- Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M. A., Bilyera, N., & Zamanian, K. (2021). Impacts of logging-associated compaction on forest soils: a meta-analysis. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 780074.
- Neary, D. G., Ryan, K. C., & DeBano, L. F. (2005). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p., 42.
- Neris, J., Tejedor, M., Rodríguez, M., Fuentes, J., & Jiménez, C. (2013). Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena*, 108, 50-57.
- Neyişçi, T. (1989). Kızılçam orman ekosistemlerinde denetimli yakmanın toprak kimyasal özellikleri ve fidan gelişimi üzerine etkileri. *Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları Teknik Bülten Serisi*, 205, Ankara.

- Niemeyer, R. J., Bladon, K. D., & Woodsmith, R. D. (2020). Long-term hydrologic recovery after wildfire and post-fire forest management in the interior Pacific Northwest. *Hydrological Processes*, 34(5), 1182-1197.
- Noske, P. J., Lane, P. N., & Sheridan, G. J. (2010). Stream exports of coarse matter and phosphorus following wildfire in NE Victoria, Australia. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(11), 1514-1529.
- Nunes, J. P., Keizer, J. J., Doerr, S. H., & Shakesby, R. A. (2011). Effects of fire-induced soil water repellency on overland flow and erosion under simulated rainfall. *Catena*, 85(3), 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.006>
- OGM (Orman Genel Müdürlüğü). (2021). *2021 yılı orman yangınları raporu*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Orman Genel Müdürlüğü. <https://www.ogm.gov.tr>
- Oldén, A., Peura, M., Saine, S., Kotiaho, J. S., & Halme, P. (2019). The effect of buffer strip width and selective logging on riparian forest microclimate. *Forest Ecology and Management*, 453, 117623. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117623>
- Oliver, A. A., Reuter, J. E., Heyvaert, A. C., & Dahlgren, R. A. (2012). Water quality response to the Angora fire, Lake Tahoe, California. *Biogeochemistry*, 111, 361-376.
- Olsen, W. H., Wagenbrenner, J. W., & Robichaud, P. R. (2021). Factors affecting connectivity and sediment yields following wildfire and post-fire salvage logging in California's Sierra Nevada. *Hydrological Processes*, 35(1), e13984.
- Outeiro, L., Asperó, F., & Úbeda, X. (2008). Geostatistical methods to study spatial variability of soil cations after a prescribed fire and rainfall. *Catena*, 74(3), 310-320. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.019>
- Özcan, H. (2005). Kahverengi orman topraklarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. *Orman Fakültesi Dergisi*, 55(2), 89–98.
- Özcan, M., & Yıldız, D. (2017). Bakı faktörünün erozyon üzerindeki etkisinin CBS ve uzaktan algılama yöntemleriyle incelenmesi: Karasu havzası örneği. *Türk Coğrafya Dergisi*, 68, 45–53. <https://doi.org/10.17211/tcd.331897>
- Pagter, T., Lucas-Borja, M. E., Navidi, M., Carra, B. G., Baartman, J., & Zema, D. A. (2023). Effects of wildfire and post-fire salvage logging on rainsplash erosion in a semi-arid pine forest of Central Eastern Spain. *Journal of Environmental Management*, 329, 117059. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117059>
- Pardini, G., Gispert, M., & Dunjó, G. (2004). Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Science of*

- the total Environment*, 328(1-3), 237-246.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.01.026>
- Parlak M. (2015). Effects of wildfire on runoff and soil erosion in the Southeastern Marmara Region, Turkey. *Ekoloji*, 24(94), 43-48.
- Parsons, A., Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Napper, C., & Clark, J. T. (2010). Field guide for mapping post-fire soil burn severity. *General Technical Report RMRS-GTR-243*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
<https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-243>
- Pausas, J. G. (2004). Changes in fire and climate in the Eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin). *Climatic Change*, 63(3), 337–350.
<https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000018508.94901.9c>
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2009). A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience*, 59(7), 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>
- Pausas, J. G., & Verdú, M. (2005). Plant persistence traits in fire-prone ecosystems of the Mediterranean Basin: A phylogenetic approach. *Oikos*, 109(1), 196–202.
<https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13596.x>
- Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A., & Vallejo, R. (2008). Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin?—A review. *International Journal of wildland fire*, 17(6), 713-723.
- Pellegrini, A. F., Ahlström, A., Hobbie, S. E., Reich, P. B., Nieradzik, L. P., Staver, A. C., ... & Jackson, R. B. (2018). Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*, 553(7687), 194-198.
<https://doi.org/10.1038/nature24668>
- Pereira, M. G., Trigo, R. M., da Camara, C. C., Pereira, J. M., & Leite, S. M. (2005). Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1-2), 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.007>
- Pereira, M. G., Trigo, R. M., DaCamara, C. C., Pereira, J. M. C., & Leite, S. M. (2006). Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1–2), 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.007>
- Pereira, P., Cerda, A., Martin, D., Úbeda, X., Depellegrin, D., Novara, A., ... & Miesel, J. (2017). Short-term low-severity spring grassland fire impacts on soil extractable elements and soil ratios in Lithuania. *Science of the Total Environment*, 578, 469-475.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.210>
- Pereira, P., Cerdà, A., Martin, D., Úbeda, X., Depellegrin, D., Novara, A., Martínez-Murillo, J. F., Brevik, E. C., Menshov, O., Comino, J. R., & Miesel, J. (2017). Short-term low-

- severity spring grassland fire impacts on soil extractable elements and soil ratios in Lithuania. *Science of the Total Environment*, 578, 469–475.
- Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Martin, D., Jordán, A., & Burguet, M. (2013). Spatial models for monitoring the spatio-temporal evolution of ashes after fire—a case study of a burnt grassland in Lithuania. *Solid Earth*, 4(1), 153-165.
- Pereira, P., Francos, M., Brevik, E. C., Úbeda, X., & Bogunovic, I. (2018). Post-fire soil management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.002>
- Pereira, P., Jordán, A., Cerdà, A., & Martin, D. (2015). The role of ash in fire-affected ecosystems. *Catena*, 135, 337-339.
- Pereira, P., Úbeda, X., & Martin, D. A. (2012). Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements. *Geoderma*, 191, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.005>
- Pereira, P., Úbeda, X., Martin, D., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., & Burguet, M. (2014b). Wildfire effects on extractable elements in ash from a *Pinus pinaster* forest in Portugal. *Hydrological Processes*, 28(11), 3681-3690.
- Pereira, P., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Oliva, M., & Novara, A. (2014a). Short-term changes in soil Munsell colour value, organic matter content and soil water repellency after a spring grassland fire in Lithuania. *Solid Earth*, 5(1), 209-225.
- Pérez-Izquierdo, L., Clemmensen, K. E., Strengbom, J., Granath, G., Wardle, D. A., Nilsson, M. C., & Lindahl, B. D. (2021). Crown-fire severity is more important than ground-fire severity in determining soil fungal community development in the boreal forest. *Journal of Ecology*, 109(1), 504-518.
- Pett, G. E. (1983). *Sources and methods in geography*. Butterworths.
- Poff, R. J. (1989). Compatibility of timber salvage operations with watershed values. In: Berg, N. H. (Tech. Coord.), *Proceedings of the Symposium on Fire and Watershed Management*. USDA Forest Service General Technical Report PSW-109.
- Poirier, V., Paré, D., Boiffin, J., & Munson, A. D. (2014). Combined influence of fire and salvage logging on carbon and nitrogen storage in boreal forest soil profiles. *Forest Ecology and Management*, 326, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.021>
- Ponder Jr, F., Tadros, M., & Loewenstein, E. F. (2009). Microbial properties and litter and soil nutrients after two prescribed fires in developing savannas in an upland Missouri Ozark Forest. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 755-763. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.009>

- Prats, S. A., Malvar, M. C., & Wagenbrenner, J. W. (2021). Compaction and cover effects on runoff and erosion in post-fire salvage logged areas in the Valley Fire, California. *Hydrological Processes*, 35(1), e13997.
- Prats, S. A., Malvar, M. C., Coelho, C. O. A., & Wagenbrenner, J. W. (2019). Hydrologic and erosion responses to compaction and added surface cover in post-fire logged areas: Isolating splash, interrill and rill erosion. *Journal of Hydrology*, 575, 408-419.
- Prats, S. A., Wagenbrenner, J. W., Martins, M. A. S., Malvar, M. C., & Keizer, J. J. (2016). Mid-term and scaling effects of forest residue mulching on post-fire runoff and soil erosion. *Science of the Total Environment*, 573, 1242-1254.
- Prosdocimi, M., Tarolli, P., & Cerdà, A. (2016). Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 161, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.006>
- Prosser, I. P., & Williams, L. (1998). The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest. *Hydrological processes*, 12(2), 251-265.
- Prosser, I. P., Rustomji, P., Young, W. J., Moran, C. J., & Hughes, A. O. (2001). Constructing river basin sediment budgets for the National Land and Water Resources Audit. *Technical Report 15/01*, CSIRO Land and Water.
- Qiu, J., Wang, H., Shen, W., Zhang, Y., Su, H., & Li, M. (2021). Quantifying forest fire and post-fire vegetation recovery in the daxin'anling area of northeastern China using landsat time-series data and machine learning. *Remote sensing*, 13(4), 792. <https://doi.org/10.3390/rs13040792>
- Raiesi, F., & Pejman, M. (2021). Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index. *Catena*, 201, 105202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105202>
- Raison, R. J., Khanna, P. K., & Woods, P. V. (1985). Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 15(1), 132–140.
- Raoelison, O. D., Valenca, R., Lee, A., Karim, S., Webster, J. P., Poulin, B. A., & Mohanty, S. K. (2023). Wildfire impacts on surface water quality parameters: Cause of data variability and reporting needs. *Environmental Pollution*, 317, 120713. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120713>

- Rego, F., Louro, G., & Constantino, L. (2013). The impact of changing wildfire regimes on wood availability from Portuguese forests. *Forest Policy and Economics*, 29, 56-61. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.11.010>
- Reiman, B. E., & Clayton, J. L. (1997). Wildfire and native fish: Issues of forest health and conservation of sensitive species. *Fisheries*, 22(11), 6–15.
- Reneau, S. L., Katzman, D., Kuyumjian, G. A., Lavine, A., Malmon, D. V. (2007). Sediment delivery after a wildfire. *Geology*, 35 (2), 151-154 doi: 10.1130/G23288A.
- Rhoades, C. C., Entwistle, D., & Butler, D. (2011). The influence of wildfire extent and severity on streamwater chemistry, sediment and temperature following the Hayman Fire, Colorado. *International Journal of Wildland Fire*, 20(3), 430–442. <https://doi.org/10.1071/WF09086>
- Rhoades, C. C., Meier, A. J., & Rebertus, A. J. (2004). Soil properties in fire-consumed log burnout openings in a Missouri oak savanna. *Forest Ecology and Management*, 192(2-3), 277-284. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.012>
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods* (SSSA Book Series No. 5, pp. 417–436). Soil Science Society of America.
- Robichaud, P. R. (2000). Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology*, 231, 220-229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00196-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00196-7)
- Robichaud, P. R. (2005). Measurement of post-fire hillslope erosion to evaluate and model rehabilitation treatment effectiveness and recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 14(4), 475-485.
- Robichaud, P. R., Bone, E. D., Lewis, S. A., Brooks, E. S., & Brown, R. E. (2021). Effectiveness of post-fire salvage logging stream buffer management for hillslope erosion in the US Inland Northwest Mountains. *Hydrological Processes*, 35(1), e13943.
- Robichaud, P. R., Jordan, P., Lewis, S. A., Ashmun, L. E., Covert, S. A., & Brown, R. E. (2013a). Evaluating the effectiveness of wood shred and agricultural straw mulches as a treatment to reduce post-wildfire hillslope erosion in southern British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 197, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.024>
- Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Wagenbrenner, J. W., Ashmun, L. E., & Brown, R. E. (2013b). Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation: Part I: Effectiveness at reducing hillslope erosion rates. *Catena*, 105, 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.015>

- Robichaud, P. R., Lillybridge, T. R., & Wagenbrenner, J. W. (2006). Effects of postfire seeding and fertilizing on hillslope erosion in north-central Washington, USA. *Catena*, 67(1), 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.001>
- Robichaud, P. R., Pierson, F. B., Brown, R. E., & Wagenbrenner, J. W. (2008). Measuring effectiveness of three postfire hillslope erosion barrier treatments, western Montana, USA. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(2), 159-170.
- Robichaud, P. R., Storrar, K. A., & Wagenbrenner, J. W. (2019). Effectiveness of straw bale check dams at reducing post-fire sediment yields from steep ephemeral channels. *Science of the Total Environment*, 676, 721-731.
- Robichaud, P. R., Wagenbrenner, J. W., Lewis, S. A., Ashmun, L. E., Brown, R. E., & Wohlgemuth, P. M. (2013c). Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation Part II: Effectiveness in reducing runoff and sediment yields from small catchments. *Catena*, 105, 93-111. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.016>
- Rockström, J., Falkenmark, M., Allan, T., Folke, C., Gordon, L., Jägerskog, A., ... & Varis, O. (2014). The unfolding water drama in the Anthropocene: towards a resilience-based perspective on water for global sustainability. *Ecohydrology*, 7(5), 1249-1261.
- Rust, A. J., Hogue, T. S., Saxe, S., & McCray, J. (2018). Post-fire water-quality response in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 27(3), 203-216. <https://doi.org/10.1071/WF17115>
- Rust, A. J., Randell, J., Todd, A. S., & Hogue, T. S. (2019b). Wildfire impacts on water quality, macroinvertebrate, and trout populations in the Upper Rio Grande. *Forest Ecology and Management*, 453, 117636.
- Rust, A. J., Roberts, S., Eskelson, M., Randell, J., & Hogue, T. S. (2022). Forest fire mobilization and uptake of metals by biota temporarily exacerbates impacts of legacy mining. *Science of the Total Environment*, 832, 155034. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155034>
- Rust, A. J., Saxe, S., McCray, J., Rhoades, C. C., & Hogue, T. S. (2019a). Evaluating the factors responsible for post-fire water quality response in forests of the western USA. *International Journal of Wildland Fire*, 28(10), 769-784.
- Ryan, S. E., Dwire, K. A., & Dixon, M. K. (2011). Impacts of wildfire on runoff and sediment loads at Little Granite Creek, western Wyoming. *Geomorphology*, 129(1-2), 113-130. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.01.017>

- Ryan, S. E., Porth, L. S., & Troendle, C. A. (2005). Coarse sediment transport in mountain streams in Colorado and Wyoming, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30 (3), 269-288. doi:10.1002/esp.1128
- Safari, A., Kavian, A., Parsakhoo, A., Saleh, I., & Jordán, A. (2016). Impact of different parts of skid trails on runoff and soil erosion in the Hyrcanian forest (northern Iran). *Geoderma*, 263, 161-167. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.010>
- Salesa, D., Amodio, A. M., Rosskopf, C. M., Garfi, V., Terol, E., & Cerdà, A. (2020). Three topographical approaches to survey soil erosion on a mountain trail affected by a forest fire. Barranc de la Manesa, Llutxent, Eastern Iberian Peninsula. *Journal of Environmental Management*, 264, 110491. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110491>
- Sánchez, J. R., Mangas, V. J., Ortiz, C., & Bellot, J. (1994). Forest fire effect on soil chemical properties and runoff. Soil erosion as a consequence of forest fires, *Geoderma, ediciones Logroño, España*, 53-65.
- San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Libertà, G., Artés Vivancos, T., Costa, H., ... & Schmuck, G. (2022). *Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2021*. Publications Office of the European Union.
- San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J. M., & Camia, A. (2013). Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *Forest Ecology and Management*, 294, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050>
- Santín, C., & Doerr, S. H. (2016). Fire effects on soils: The human dimension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 371(1696), 20150171. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0171>
- Santín, C., Doerr, S. H., Otero, X. L., & Chafer, C. J. (2015). Quantity, composition and water contamination potential of ash produced under different wildfire severities. *Environmental Research*, 142, 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.041>
- Santolamazza-Carbone, S., Pestana, M., & Vega, J. A. (2011). Post-fire attractiveness of maritime pines (*Pinus pinaster* Ait.) to xylophagous insects. *Journal of Pest Science*, 84(3), 343-353.
- Santos, R. M. B., Fernandes, L. S., Pereira, M. G., Cortes, R. M. V., & Pacheco, F. A. L. (2015). A framework model for investigating the export of phosphorus to surface waters in forested watersheds: Implications to management. *Science of the Total Environment*, 536, 295-305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.058>

- Schoennagel, T., Balch, J. K., Brenkert-Smith, H., Dennison, P. E., Harvey, B. J., Krawchuk, M. A., ... & Whitlock, C. (2017). Adapt to more wildfire in western North American forests as climate changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(18), 4582-4590.
- Scott, D. F. (1993). The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. *Journal of Hydrology*, 150(2-4), 409-432.
- Scott, D. F., Versfeld, D. B., & Lesch, W. (1998). Erosion and sediment yield in relation to afforestation and fire in the mountains of the Western Cape Province, South Africa. *South African Geographical Journal*, 80(1), 52-59.
- Sequeira, M. D., Castilho, A. M., Tavares, A. O., & Dinis, P. (2020). Assessment of superficial water quality of small catchment basins affected by Portuguese rural fires of 2017. *Ecological Indicators*, 111, 105961. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105961>
- Serrano-Ortiz, P., Marañón-Jiménez, S., Reverter, B. R., Sánchez-Cañete, E. P., Castro, J., Zamora, R., & Kowalski, A. S. (2011). Post-fire salvage logging reduces carbon sequestration in Mediterranean coniferous forest. *Forest Ecology and Management*, 262(12), 2287-2296. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.023>
- Sessions, J., Bettinger, P., Buckman, R., Newton, M., & Hamann, J. (2004). Hastening the return of complex forests following fire: the consequences of delay. *Journal of Forestry*, 102(3), 38-45.
- Sevink, J., Imeson, A. C., & Verstraten, J. M. (1989). Humus form development and hillslope runoff, and the effects of fire and management, under Mediterranean forest in NE-Spain. *Catena*, 16(4-5), 461-475.
- Shakesby, R. A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 71-100. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>
- Shakesby, R. A., & Doerr, S. H. (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74(3-4), 269-307. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.006>
- Shakesby, R. A., Bento, C. P., Ferreira, C. S., Ferreira, A. J., Stoof, C. R., Urbanek, E., & Walsh, R. P. (2015). Impacts of prescribed fire on soil loss and soil quality: An assessment based on an experimentally-burned catchment in central Portugal. *Catena*, 128, 278-293. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.012>
- Shakesby, R. A., Boakes, D. J., de OA Coelho, C., Gonçalves, A. B., & Walsh, R. P. (1996). Limiting the soil degradational impacts of wildfire in pine and eucalyptus forests in

- Portugal: a comparison of alternative post-fire management practices. *Applied Geography*, 16(4), 337-355.
- Shakesby, R. A., Coelho, C. O. A., Ferreira, A. J. D., & Walsh, R. P. D. (2002). Ground-level changes after wildfire and ploughing in eucalyptus and pine forests, Portugal: implications for soil microtopographical development and soil longevity. *Land Degradation & Development*, 13(2), 111-127.
- Shakesby, R. A., Coelho, C. O. A., Ferreira, A. J. D., Terry, J. P., & Walsh, R. P. D. (1993). Wildfire impacts on soil erosion and hydrology in wet Mediterranean forest, Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 3(2), 95-110.
<https://doi.org/10.1071/WF9930095>
- Sheridan, G. J., Lane, P. N., & Noske, P. J. (2007). Quantification of hillslope runoff and erosion processes before and after wildfire in a wet Eucalyptus forest. *Journal of Hydrology*, 343(1-2), 12-28.
- Sheridan, G. J., Noske, P. J., Whipp, R. K., & Wijesinghe, N. (2006). The effect of truck traffic and road water content on sediment delivery from unpaved forest roads. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(8), 1683-1699.
- Shrestha, B. M., & Chen, H. Y. (2010). Effects of stand age, wildfire and clearcut harvesting on forest floor in boreal mixedwood forests. *Plant and Soil*, 336, 267-277.
- Silins, U., Stone, M., Emelko, M. B., & Bladon, K. D. (2009). Sediment production following severe wildfire and post-fire salvage logging in the Rocky Mountain headwaters of the Oldman River Basin, Alberta. *Catena*, 79(3), 189-197.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.04.001>
- Simard, D. G., Fyles, J. W., Paré, D., & Nguyen, T. (2001). Impacts of clearcut harvesting and wildfire on soil nutrient status in the Quebec boreal forest. *Canadian Journal of Soil Science*, 81(2), 229-237.
- Sirabahenda, Z., St-Hilaire, A., Courtenay, S. C., & Van Den Heuvel, M. R. (2020). Assessment of the effective width of riparian buffer strips to reduce suspended sediment in an agricultural landscape using ANFIS and SWAT models. *Catena*, 195, 104762.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104762>
- Slesak, R. A., Schoenholtz, S. H., & Evans, D. (2015). Hillslope erosion two and three years after wildfire, skyline salvage logging, and site preparation in southern Oregon, USA. *Forest Ecology and Management*, 342, 1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.01.007>

- Smets, T., Poesen, J., & Knapen, A. (2008). Spatial scale effects on the effectiveness of organic mulches in reducing soil erosion by water. *Earth-Science Reviews*, 89(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.001>
- Smith, H. G., & Dragovich, D. (2008). Post-fire hillslope erosion response in a sub-alpine environment, south-eastern Australia. *Catena*, 73(3), 274–285. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.11.003>
- Smith, H. G., Sheridan, G. J., Lane, P. N. J., Nyman, P., & Haydon, S. (2012). Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. *Journal of Hydrology*, 396(1–2), 170–192. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.043>
- Smith, H. G., Sheridan, G. J., Lane, P. N., Nyman, P., & Haydon, S. (2011). Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. *Journal of Hydrology*, 396(1–2), 170–192.
- Son, J. H., Kim, S., & Carlson, K. H. (2015). Effects of wildfire on river water quality and riverbed sediment phosphorus. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, 1–13.
- Spanos, I., Raftoyannis, Y., Goudelis, G., Xanthopoulou, E., Samara, T., & Tsiontsis, A. (2005). Effects of postfire logging on soil and vegetation recovery in a *Pinus halepensis* Mill. forest of Greece. *Plant and Soil*, 278, 171–179.
- Stephens, S. L., Burrows, N., Buyantuyev, A., Gray, R. W., Keane, R. E., Kubian, R., ... & Morgan, P. (2014). Temperate and boreal forest mega-fires: Characteristics and challenges. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(2), 115–122. <https://doi.org/10.1890/120332>
- Stevens-Rumann, C. S., Kemp, K. B., Higuera, P. E., Harvey, B. J., Rother, M. T., Donato, D. C., ... & Veblen, T. T. (2018). Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change. *Ecology letters*, 21(2), 243–252.
- Stocks, B. J., Mason, J. A., Todd, J. B., Bosch, E. M., Wotton, B. M., Amiro, B. D., ... & Martell, D. L. (2013). Large forest fires in Canada, 1959–1997. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D1). <https://doi.org/10.1029/2001JD000484>
- Strydom, T., Riddell, E. S., Rowe, T., Govender, N., Lorentz, S. A., le Roux, P. A., & Wigley-Coetsee, C. (2019). The effect of experimental fires on soil hydrology and nutrients in an African savanna. *Geoderma*, 345, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.027>
- Sweeney, B. W., & Newbold, J. D. (2014). Streamside forest buffer width needed to protect stream water quality, habitat, and organisms: A literature review. *Journal of the*

American Water Resources Association, 50(3), 560–584.
<https://doi.org/10.1111/jawr.12203>

- Switzer, J. M., Hope, G. D., Grayston, S. J., & Prescott, C. E. (2012). Changes in soil chemical and biological properties after thinning and prescribed fire for ecosystem restoration in a Rocky Mountain Douglas-fir forest. *Forest Ecology and Management*, 275, 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.025>
- Şenel, M. (2010). 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Isparta-N26 Paftası. Maden Tetkik Arama, Ankara.
- Şengönül. K. (1984). Marmara Bölgesi- Armutlu Yarımadası- koşullarında güç ıslanan toprakların oluşumu üzerinde etkili olan faktörler. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 363, 3203.
- Tavşanoğlu Ç., & Gürkan B. (2009). Post-fire regeneration of a *Pinus brutia* (Pinaceae) Forest in Marmaris National Park, Turkey. *International Journal Of Botany*, 5, 107-111.
- Tavşanoğlu Ç., & Pausas J.G. (2022). Turkish postfire action overlooks biodiversity. *Science*, 375 (6579), 391. DOI: 10.1126/science.abn5645
- Tavşanoğlu, Ç., & Gürkan, B. (2010). Physical and chemical properties of the soils at burned and unburned *Pinus brutia* Ten. forest sites in the Marmaris region. *Hacettepe Journal of Biological Chemistry*, 38: 71-76.
- Teague, B., Pascoe, S., & McLeod, R. (2010). The 2009 victorian bushfires royal commission final report: summary.
- Tecle, A., & Neary, D. (2015). Water quality impacts of forest fires. *Journal of Pollution Effects & Control*, 3(2), 1-7.
- Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., Bouillon, C., Coughlan, M. R., Delogu, G. M., ... & Xanthopoulos, G. (2018). Defining extreme wildfire events: Difficulties, challenges, and impacts. *Fire*, 1(1), 9.
- Thomas, A. D., Walsh, R. P., & Shakesby, R. A. (1999). Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal. *Catena*, 36(4), 283-302. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00051-X)
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In J. M. Bartels (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods* (SSSA Book Series No. 5, pp. 475–490). Soil Science Society of America.

- Thomas, K., Chen, W., Lin, B. S., & Seeboonruang, U. (2020). Evaluation of the sediment delivery distributed (SEDD) model in the Shihmen reservoir watershed. *Sustainability*, 12(15), 6221.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94.
- Tóth, G., Jones, A., & Montanarella, L. (2013). *The LUCAS topsoil survey: Methodology, data and results*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/97922>
- Townsend, S. A., & Douglas, M. M. (2000). The effect of three fire regimes on stream water quality, water yield and export coefficients in a tropical savanna (northern Australia). *Journal of Hydrology*, 229(3–4), 118–137. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00165-7)
- Trabaud, L. (2002). Effects of fire on mediterranean plants and ecosystems. *Corso di Cultura in Ecologia*, 49, 49.
- Turco, M., von Hardenberg, J., AghaKouchak, A., Llasat, M. C., Provenzale, A., & Trigo, R. M. (2017). On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. *Scientific reports*, 7(1), 81.
- Türkeş, M. (2010). *Klimatoloji ve meteoroloji*. Kriter Yayınevi.
- Türkeş, M., Sümer, U.M., & Çetiner, G. (2000). Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri, Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları, Ankara.
- Türkmen, N., & Düzenli, A. (2011). Early post-fire changes of Pinus brutia Forests (Amanos Mountains, Turkey), *Acta Botanica*, 70, 1.
- Úbeda, X., & Outeiro, L. R. (2009). Physical and chemical effects of fire on soil. In *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 105-132). CRC Press.
- Úbeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., & Martin, D. A. (2009). Effects of fire temperature on the physical and chemical characteristics of the ash from two plots of cork oak (*Quercus suber*). *Land Degradation & Development*, 20(6), 589-608.
- USDA Forest Service. (2000). *Wildfire effects on forest ecosystems*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Ürker, O., Tavsanoğlu, Ç., & Gürkan B. (2018). Post-fire recovery of the plant community in Pinus brutia forests: active vs. indirect restoration techniques after salvage logging. *iForest* 11, 635-642. doi:10.3832/ifor2645-011

- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S., & Arellano Jr, A. F. (2006). Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11), 3423-3441.
- Varela, M. E., Benito, E., & Keizer, J. J. (2010). Effects of wildfire and laboratory heating on soil aggregate stability of pine forests in Galicia: The role of lithology, soil organic matter content and water repellency. *Catena*, 83(2-3), 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.001>
- Vega, J. A., Fernández, C., & Fonturbel, T. (2015). Comparing the effectiveness of seeding and mulching+ seeding in reducing soil erosion after a high severity fire in Galicia (NW Spain). *Ecological Engineering*, 74, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.019>
- Vega, J. A., Fernandez, C., Fonturbel, T., Gonzalez-Prieto, S., & Jimenez, E. (2014). Testing the effects of straw mulching and herb seeding on soil erosion after fire in a gorse shrubland. *Geoderma*, 223, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.014>
- Verma, S., & Jayakumar, S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2(3), 168.
- Verma, S., Singh, D., Singh, A. K., & Jayakumar, S. (2019). Post-fire soil nutrient dynamics in a tropical dry deciduous forest of Western Ghats, India. *Forest Ecosystems*, 6, 1-9.
- Vidon, P. G., & Hill, A. R. (2004). Landscape controls on nitrate removal in stream riparian zones. *Water Resources Research*, 40(3).
- Vidon, P., Allan, C., Burns, D., Duval, T. P., Gurwick, N., Inamdar, S., ... & Sebestyen, S. (2010). Hot spots and hot moments in riparian zones: potential for improved water quality management 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(2), 278-298.
- Viegas, D. X., Ribeiro, L., Almeida, M., & Raposo, J. (2019). Analysis of the October 2017 wildfires in Portugal using satellite data and fire behavior modeling. *Forest Systems*, 28(1), e003. <https://doi.org/10.5424/fs/2019281-13901>
- Vieira, D. C. S., Malvar, M. C., Fernández, C., Serpa, D., & Keizer, J. J. (2016). Annual runoff and erosion in a recently burn Mediterranean forest–The effects of plowing and time-since-fire. *Geomorphology*, 270, 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.042>
- Vieira, D. C. S., Malvar, M. C., Martins, M. A. S., Serpa, D., & Keizer, J. J. (2018). Key factors controlling the post-fire hydrological and erosive response at micro-plot scale in a

- recently burned Mediterranean forest. *Geomorphology*, 319, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.014>
- Vieira, D. C. S., Prats, S. A., Nunes, J. P., Shakesby, R. A., Coelho, C. O. A., & Keizer, J. J. (2014). Modelling runoff and erosion, and their mitigation, in burned Portuguese forest using the revised Morgan–Morgan–Finney model. *Forest Ecology and Management*, 314, 150-165. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.006>
- Wagenbrenner, J. W., & Robichaud, P. R. (2014). Post-fire bedload sediment delivery across spatial scales in the interior western United States. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(7), 865-876.
- Wagenbrenner, J. W., Ebel, B. A., Bladon, K. D., & Kinoshita, A. M. (2021). Post-wildfire hydrologic recovery in Mediterranean climates: A systematic review and case study to identify current knowledge and opportunities. *Journal of Hydrology*, 602, 126772.
- Wagenbrenner, J. W., MacDonald, L. H., & Rough, D. (2006). Effectiveness of three post-fire rehabilitation treatments in the Colorado Front Range. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(14), 2989-3006.
- Wagenbrenner, J. W., MacDonald, L. H., Coats, R. N., Robichaud, P. R., & Brown, R. E. (2015). Effects of post-fire salvage logging and a skid trail treatment on ground cover, soils, and sediment production in the interior western United States. *Forest Ecology and Management*, 335, 176-193. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.09.016>
- Wagenbrenner, J. W., Robichaud, P. R., & Brown, R. E. (2016). Rill erosion in burned and salvage logged western montane forests: Effects of logging equipment type, traffic level, and slash treatment. *Journal of Hydrology*, 541, 889-901. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.049>
- Wan, S., Hui, D., & Luo, Y. (2001). Fire effects on nitrogen pools and dynamics in terrestrial ecosystems: a meta-analysis. *Ecological Applications*, 11(5), 1349-1365.
- Weil, R.R., & Brady, N. C. (2017). The nature and properties of soils, fifteenth ed. Pearson, Harlow, England, p. 1104. ISBN: 978-0-13-325448-8
- Wemple, B. C., Swanson, F. J., & Jones, J. A. (2001). Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(2), 191-204.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of Geology*, 30(5), 377-392.
- White, R. E. (2006). *Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource* (4th ed.). Blackwell Publishing.

- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agriculture Handbook No. 537). United States Department of Agriculture.
- Wittenberg, L., van der Wal, H., Keesstra, S., & Tessler, N. (2020). Post-fire management treatment effects on soil properties and burned area restoration in a wildland-urban interface, Haifa Fire case study. *Science of the Total Environment*, 716, 135190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135190>
- Wotton, B. M., Nock, C. A., & Flannigan, M. D. (2010). Forest fire occurrence and climate change in Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 19(3), 253-271.
- Yang, X. Q., & Gao, H. J. (1998). Development of AYT gravel bed-load sampler and method for bed-load measurement. In *Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millennium* (IAHS Publication No. 249, pp. 345–354). International Association of Hydrological Sciences (IAHS).
- Yıldız, O., Esen, D., Sarginci, M., & Toprak, B. (2010). Effects of forest fire on soil nutrients in Turkish pine (*Pinus brutia*, Ten) Ecosystems. *Journal of Environmental Biology*, 31(1-2), 11-13.
- Yılmaz, Y. E. (2022). *Manavgat Havzası (Antalya, Türkiye) Tortoniyen yaşlı Karpuzçay formasyonu'nun litho-biyostratigrafisi ve Manavgat Havzası'nın yapısal unsurları* (Yüksek lisans tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- YSKY (Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği). (2021). *Su kalitesi standartları*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- Yu, Z., Zhao, Q., Liu, Y., Yu, J., Wang, A., & Ding, S. (2024). Soil erosion associated with roads—A global review and statistical analysis. *Land Degradation & Development*, 35(11), 3509-3522.
- Zema, D. A. (2021). Postfire management impacts on soil hydrology. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21, 100252.
- Zhan, Y., Liu, F., Peng, X., & Wang, G. (2020). The effects of different burning intensities on soil properties during recovery stage of forests in subtropical China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 166-176.
- Zhang, Y., & Biswas, A. (2017). The Effects of Forest Fire on Soil Organic Matter and Nutrients in Boreal Forests of North America: A Review. In: Rakshit, A., Abhilash, P., Singh, H., Ghosh, S. (eds) *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_21

- Zhao, S., Wang, X., Pan, H., Wang, Y., & Zhu, G. (2022). High N₂O reduction potential by denitrification in the nearshore site of a riparian zone. *Science of The Total Environment*, 813, 152458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152458>
- Zituni, R., Wittenberg, L., & Malkinson, D. (2019). The effects of post-fire forest management on soil erosion rates 3 and 4 years after a wildfire, demonstrated on the 2010 Mount Carmel fire. *International Journal of Wildland Fire*, 28(5), 377-385.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve SOYADI	Seçkin ÇAKMAK
EĞİTİM DURUMU	
Lise	Kandıra Anadolu Listesi (Kocaeli)
Lisans	Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü (2009-2013)
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı (2015-2019)
Tez Konusu	Korkuteli Çayı’nda Sediman Taşınım Süreçleri
Doktora	Akdeniz Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı (2019-2025)
Tez Konusu	Yangın Sonrası Uygulanan Farklı Rehabilitasyon Çalışmalarının Erozyon Süreçleri, Su Kalitesi ve Toprak Özellikleri Üzerine Olan Etkileri: 2021 Manavgat Yangın Sahası Örneği
Yabancı Dil / Diller	İngilizce
İŞ DENEYİMİ	
2020-Devam Ediyor	Akdeniz Üniversitesi, Araştırma Görevlisi (35. Madde) (Antalya)
2017-2020	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Araştırma Görevlisi (Hatay)
YAYINLAR	
Yılmaz, H., Kavgacı, A., Çakmak, S., Gökbülak, F., Demir, T., Dikici, V., Öktüren Asri, F., & Yenilmez, F. (2025, Nisan–Mayıs). Effects of post-fire silvicultural treatments on vegetation dynamics of Pinus brutia Ten. forests. 33rd European Vegetation Survey: Vegetation of Europe: Diversity, Dynamics, Conservation, and Restoration, 28 April – 2 May, Hotel Giò Wine e Jazz Area, Perugia, Italy. Çakmak, S., Yılmaz, H., Demir, T., & Gökbülak, F. (2024, Ekim 17–18). Yangın sonrası uygulanan üretim faaliyetlerinin sediman taşınım süreçlerine olan etkilerinin belirlenmesi: 2021 Manavgat orman yangını örneği. <i>Uluslararası Jeomorfoloji Sempozyumu 2024 Özet Bildiriler Kitabı</i> (ss. 98–99). Antalya, Türkiye.	

- Ure, A. J., Bridgland, D. R., Tunstall, N., Westaway, R., Çakmak, S., & Demir, T. (2024). Kaş Bay: Evidence of a 20 km-diameter complex impact structure on the Turkey-Greece frontier. *Airbursts and Cratering Impacts*, 2(1), 20240002.
- Yılmaz, H., Çakmak, S., & Demir, T. (2022). Akdeniz havzası orman yangınları ve doğal kaynaklar üzerindeki etkileri. In E. Kaynak Iltar (Ed.), *Bütün yönleriyle Akdeniz* 2(ss. 137–169). Arkeoloji ve Sanat Yayınları.
- Çakmak, S., Demir, T., Canpolat, E., & Aytaç, A. S. (2021). Evaluation of the effects of precipitation and flow characteristics on suspended sediment transport in mountain-type Mediterranean climate; Korkuteli Stream sample, Antalya, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2053. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08458-5>
- Çakmak, S., Demir, T., & Aytaç, A. S. (2021). Korkuteli Çayı’nda taşınan eriyik sediman konsantrasyonları ve verimlerinin tahmin edilmesi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 7, 19–29. <https://doi.org/10.46453/jader.893216>
- Demir, T., Çakmak, S., & Berberoğlu, E. (2021). Akdeniz Havzası’nın fiziki coğrafyası. In E. Kaynak Iltar & H. H. Aygün (Eds.), *Bütün yönleriyle Akdeniz* (ss. 79–130). Arkeoloji ve Sanat Yayınları.
- Çakmak, S., Demir, T., & Aytaç, A. S. (2018, Ekim 3–6). Korkuteli Çayı Havzasında erozyon materyallerinin taşınım süreçleri. *TÜCAUM 30. Yıl Uluslararası Coğrafya Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 1108–1122.