

T.C.
ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ORMAN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE KIZILÇAM (*Pinus brutia*)
TÜRÜNDE YAPILAN TOHUM EKİM ÇALIŞMALARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Barış Umut GÜMRÜKCÜ

Danışman
Prof. Dr. Zafer ÖLMEZ

ARTVİN-2025

BİLİMSEL ETİK BEYANNAMESİ

Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “İnsansız Hava Araçları ile Kızılçam (*Pinus brutia*) Türünde Yapılan Tohum Ekim Çalışmalarının Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı;

☒ Baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Zafer ÖLMEZ’in sorumluluğunda tamamladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metin içerisinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı taahhüt ederim.

☐ Turnitin benzerlik programından alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranının % 7 olduğunu beyan ederim.

Aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Lisansüstü Eğitim-Öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

☐ Tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.

☐ Tezim sadece Artvin Çoruh Üniversitesi yerleşkelerinden erişime açılabilir.

☐ Tezimin ... ay süreyle erişime açılmasını istemiyorum. Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.

.... /.... /2025

Adı SOYADI

Barış Umut GÜMRÜKÇÜ

ORCID NO:0000-0002-6890-2874

İmza

T.C.
ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ORMAN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ORMAN MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE KIZILÇAM (*Pinus brutia*) TÜRÜNDE
YAPILAN TOHUM EKİM ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Barış Umut GÜMRÜKCÜ
ORCID NO: 0000-0002-6890-2874

Başkan : Prof. Dr. Zafer ÖLMEZ

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Ercan OKTAN

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Aşkın GÖKTÜRK

ONAY:

Bu Yüksek Lisans tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../2025 tarihinde oybirliği ile uygun görülmüş ve kabul edilmiştir.

.../.../2025

Prof. Dr. Kerem COŞKUN

Enstitü Müdürü

ÖN SÖZ

“İnsansız Hava Araçları ile Kızılçam (*Pinus brutia*) Türünde Yapılan Tohum Ekim Çalışmalarının Değerlendirilmesi” konusunda yapılan bu çalışma; Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Silvikültür Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmanın değerine ilk andan beri inanan, orman bilimine bakış açımı genişleten, çalışmalarımın her aşamasında yanımda olan, tecrübesi ve bilgi birikimi ile katkı sağlayan ve engin bilgilerinden yararlandığım tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Zafer ÖLMEZ’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü konuda yardımlarını esirgemeyen, mümkün olan her noktada bana destek olan, değerli öğretilerini her fırsatta benimle paylaşan ve yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Aydın TÜFEKÇİOĞLU’na ve Doç. Dr. Aşkın GÖKTÜRK’e gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Sürecin başında çalışmalarına inanan ve yardımlarını esirgemeyen Kütahya Orman Bölge Müdürü Erdal DİNGİL’e, bana inanmaya ve yardımcı olmaya devam eden Muğla Orman Bölge Müdür Yardımcısı Adnan GÜLLER’e, yardımlarını her fırsatta esirgemeyen Muğla Orman Bölge Müdürlüğü Silvikültür Şube Müdürü Melahat GEDİK’e ve çalışmaların tümünde emeği olan diğer tüm görevlilere çok teşekkür ederim.

Bu çalışmanın var olmasında büyük emek sahibi olan başta değerli arkadaşım Mert KARSLIOĞLU olmak üzere ecording ailesindeki tüm ekip arkadaşlarıma, ihtiyacım olan her noktada beni yalnız bırakmayan değerli orman mühendisi arkadaşım Koray ÖZDEN’e ve tezimin oluşum serüveninde bana her konuda destek olan kıymetli eşim Fatma GÜMRÜKÇÜ’ye teşekkürlerimi sunarım.

Barış Umut GÜMRÜKCÜ

Artvin - 2025

İÇİNDEKİLER

KISALTMA DİZİNİ	VII
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
TABLO LİSTESİ	IX
ÖZET	X
ABSTRACT	XII
1 GİRİŞ	1
1.1 Ormansızlaşma ve Ormanlaştırma Tanımları	3
1.2 İklim Krizine Karşı Ormanlaştırmanın Önemi	7
1.3 Kızılçam'ın (<i>Pinus brutia</i>) Genel Özellikleri	10
1.4 Çalışma Sahalarının Genel Özellikleri	12
1.4.1 Köyceğiz-Akköprü	12
1.4.2 Köyceğiz-Yangı	14
1.4.3 Milas-Karacahisar	16
1.4.4 Marmaris-Hisarönü	18
1.4.5 Marmaris-Aksaz	19
2 MATERYAL VE YÖNTEM	22
2.1 Materyal	22
2.1.1 ecoDrone'ların Genel Özellikleri	22
2.1.2 ecoDrone Re-Sense Genel Özellikleri	25
2.2 Yöntem	26
2.2.1 Tohum Özelliklerinin Belirlenmesi	26
2.2.2 Tohum Kaplama Malzemeleri, Oranları ve Boyutları	28
2.3 Verilerin Değerlendirilmesi	30
2.4 ecoDrone ve ecoDrone Re-Sense ile Çalışma Metodolojisi	30
2.4.1 Analiz	31
2.4.2 Ekim Sistematiği	32
2.4.2.1 Bitki Örtüsü Sınıflandırma ve Coğrafik Yapı Sınıflandırması	32
2.4.2.2 Segmentasyon	34

2.4.2.3 Saha Analizlerinin Sistematiği	35
2.4.3 İzleme ve Fidan Sayımı	36
3 BULGULAR	41
3.1 Köyceğiz-Akköprü Sahası	41
3.2 Köyceğiz-Yangı Sahası	41
3.3 Milas-Karacahisar Sahası	42
3.4 Marmaris-Hisarönü Sahası	42
3.5 Marmaris-Aksaz Sahası	42
3.6 Deney Ortamlarında Elde Edilen Bulgular	42
3.7 Tohum Kaplama Yöntemi Üzerine Bulgular	45
3.8 ecoDrone ile Tohum Ekim Çalışmaları Üzerine Bulgular	47
4 TARTIŞMA VE SONUÇ	48
KAYNAKLAR	56

KISALTMA DİZİNİ

FAO	Food and Agriculture Organization
GOFC-GOLD	The Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
İHA	İnsansız Hava Aracı
OBM	Orman Bölge Müdürlüğü
OGM	Orman Genel Müdürlüğü
OT	Orman Toprağı
UNDP	United Nations Development Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
YOLO	You Only Look Once
ZT	Zengin Toprak

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Yangın sonrasında Muğla kızılçam ormanlarının bir görüntüsü	6
Şekil 2. Köyceğiz-Akköprü mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü	13
Şekil 3. Köyceğiz-Yangı mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü	15
Şekil 4. Milas-Karacahisar mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü	17
Şekil 5. Marmaris-Hisarönü mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü	18
Şekil 6. Marmaris-Aksaz mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü	20
Şekil 7. Karla kaplanmış saha üzerindeki çalışmalardan bir görüntü	23
Şekil 8. Tohum kaplama yönteminin çimlenme deneylerinden bir görsel	29
Şekil 9. Re-Sense çalışma prensibinin canlandıran örnek bir görsel	33
Şekil 10. Ekim sonrası fidan sayımı için hava fotoğraflarından biri	37
Şekil 11. Marmaris-Hisarönü fotogrametri haritası örneklerinden bir görsel	39
Şekil 12. Kaplanmış tohumların çimlenmelerinden bir görsel	45
Şekil 13. Hisarönü sahası öncesi ve sonrası görseli	54

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Çalışma alan bilgileri	22
Tablo 2. Belirlenen tohum özellikleri	43
Tablo 3. Kızılcām tohumlarının varyans analizi sonuçları	43
Tablo 4. Kızılcām tohumlarının duncan testi sonuçları	44



İnsansız Hava Araçları ile Kızılçam (*Pinus brutia*) Türünde Yapılan Tohum Ekim Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Barış Umut GÜMRÜKCÜ

Bu araştırma kapsamında, Muğla Orman Bölge Müdürlüğü'nün farklı işletme birimlerinde yer alan sahalarda Kızılçam (*Pinus brutia*) tohumlarının “ecoDrone” olarak adlandırılan insansız hava araçları kullanılarak sahaya uygulanmasına yönelik ekim çalışmaları uygulanmıştır.

Çalışma alanları; Marmaris Orman İşletme Müdürlüğü bünyesinde bulunan Aksaz ve Hisarönü sahaları, Köyceğiz Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Yangı ve Sazak sahaları ile Milas Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Fesleğen sahasından oluşmaktadır.

Ekim uygulamaları dönemsel olarak farklı zaman aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Fesleğen, Yangı ve Akköprü sahalarındaki çalışmalar Ocak–Mart 2022 döneminde; Hisarönü sahasındaki uygulamalar Ekim–Aralık 2022 döneminde; Aksaz sahasındaki çalışmalar Ocak–Mart 2023 döneminde; Hisarönü ve Aksaz sahalarında Ekim–Aralık 2023 döneminde; Hisarönü sahasında Ocak–Mart 2024 döneminde; Aksaz ve Hisarönü sahalarında Ekim–Aralık 2024 döneminde ve son olarak Hisarönü sahasında Ocak–Mart 2025 döneminde insansız hava araçlarıyla gerçekleştirilmiştir.

Araştırmada yer alan tüm sahalarda geçmişte orman yangını geçirmiş alanlardan oluşmaktadır. Ekim faaliyetleri sonrasında, 298 ve 317 numaralı Tebliğlerde belirtilen esaslara uygun olarak Aralık 2022, Aralık 2023 ve Aralık 2024 tarihlerinde fidan sayımları yapılmıştır. Saha değerlendirmeleri her bir çalışma alanında en az 5 hektarlık bölümü kapsayacak şekilde yürütülmüştür.

Yapılan sayımlar sonucunda; Yangı sahasında %67, Fesleğen sahasında %64, Sazak sahasında %77, Hisarönü sahasında %68 ve Aksaz sahasında %64 oranında çimlenme başarı düzeyi elde edildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kızılçam, Muğla, İnsansız Hava Araçları, ecoDrone, Tohum Ekimi

Evaluation of Seed Sowing Practices Using Unmanned Aerial Vehicles in Turkish Red Pine (*Pinus brutia*)

Barış Umut GÜMRÜKCÜ

Within the scope of this research, sowing operations involving the application of Anatolian Red Pine (*Pinus brutia*) seeds to the field were carried out using unmanned aerial vehicles known as “ecoDrone” across various sites located within different administrative units of the Muğla Regional Directorate of Forestry. The study areas consist of the Aksaz and Hisarönü sites under the Marmaris Forest Management Directorate, the Yangı and Sazak sites under the Köyceğiz Forest Management Directorate, and the Fesleğen site under the Milas Forest Management Directorate.

The sowing operations were conducted during different periods. Activities in the Fesleğen, Yangı, and Akköprü sites were performed between January and March 2022; those in the Hisarönü site between October and December 2022; in the Aksaz site between January and March 2023; in the Hisarönü and Aksaz sites between October and December 2023; in the Hisarönü site between January and March 2024; in the Aksaz and Hisarönü sites between October and December 2024; and finally in the Hisarönü site between January and March 2025 using unmanned aerial vehicles.

All areas included in the study are sites previously affected by forest fires. Following the sowing operations, seedling counts were conducted in December 2022, December 2023, and December 2024 in accordance with the procedures outlined in Circulars No. 298 and 317. Field evaluations were carried out over a minimum area of 5 hectares in each study site.

Based on the seedling counts, germination success rates were determined to be 67% in the Yangı site, 64% in the Fesleğen site, 77% in the Sazak site, 68% in the Hisarönü site, and 64% in the Aksaz site.

Keywords: Red Pine, Muğla, ecoDrones, seed sowing, forest fire

Günümüzde küresel ortalama yüzey sıcaklıklarının, sanayi öncesi döneme kıyasla yaklaşık 1.0–1.1 °C yükselmiş olması, iklim sisteminde geri dönüşü zor bir krizin ortaya çıktığını göstermektedir. Birleşmiş Milletler’in Emissions Gap Report 2023 raporu, mevcut ısınma eğiliminin sürmesi halinde küresel iklim sisteminde bazı kritik eşiklerin aşılmasının muhtemel olduğunu ortaya koymaktadır (United Nations Environment Programme, Anonim, 2023). Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli’nin (IPCC) Special Report on Global Warming of 1.5°C başlıklı raporunda ise, küresel ortalama sıcaklık artışının 2030 itibarıyla 1.5 °C düzeyine ulaşmasının büyük ölçüde kaçınılmaz olduğu; ancak bu eşiğin ötesindeki etkileri sınırlandırmak için acil, kapsamlı ve koordineli iklim eylemlerinin zorunlu olduğu ifade edilmektedir (IPCC, Anonim, 2018).

Birleşmiş Milletler Sekreteryası’nın Climate Action Plan 2020–2030 belgesinde kurum içi iklim politikalarının, IPCC’nin 2018 raporunda ortaya konulan 1.5 °C hedefiyle uyumlu biçimde şekillendirildiği belirtilmektedir (UN Secretariat, 2019). İklim sistemindeki değişimlerin en belirgin sonuçlarından biri, orman ekosistemlerinde gözlenen bozulmalar ve ekolojik süreçlerdeki aksamalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Orman kayıpları ile ekosistem tahribatı, iklim krizi ile karşılıklı etkileşim içinde olup hem krizin tetikleyicisi hem de sonucu niteliğindedir. IPCC’nin AR4 Working Group III raporu, arazi kullanımı, arazi kullanım değişikliği ve orman tahribatı (LULUCF) kaynaklı sera gazı emisyonlarının küresel emisyonlar içinde önemli bir paya sahip olduğunu ortaya koymaktadır (IPCC, 2007). Bu bulgular, orman ekosistemlerinin korunması ve yeniden yapılandırılmasının iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir önem taşıdığını göstermektedir. Artan sıcaklıklar, orman ekosistemlerinin yeni iklim koşullarına uyum kapasitesini zayıflatmakta; bunun sonucunda ağaç ölümlerinde artış, türlerin dağılım alanlarında kaymalar, biyolojik çeşitlilik kaybı ve ekosistem işlevlerinde yeniden yapılanma gibi etkiler ortaya çıkmaktadır.

İklim krizinin yol açtığı daha sık ve daha yoğun sıcaklık–kuraklık dönemleri ile bu koşulların tetiklediği böcek salgınları ve orman yangınları, ağaç ölüm oranlarında belirgin artışlara neden olmakta; buna bağlı olarak tür bileşimini, ormanların karbon tutma

kapasitesini ve genel ekosistem direncini önemli ölçüde etkilemektedir (McDowell & Allen, 2015; Anderegg et al., 2013; Ruiz-Benito et al., 2017).

Restorasyon ekolojisi ve yeniden ormanlaştırma uygulamalarında karşılaşılan süreçsel karmaşıklık, çok katmanlı çevresel faktörler ve saha koşullarındaki belirsizlikler, teknoloji destekli yöntemlerin kullanımını giderek daha kritik hale getirmektedir. Yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama teknikleri, drone tabanlı görüntüleme sistemleri ve makine öğrenmesi tabanlı analizler; bozulmuş alanların durumunun değerlendirilmesi, müdahale gerektiren öncelikli bölgelerin belirlenmesi ve izleme çalışmalarının doğruluğunun artırılması için güçlü araçlar sunmaktadır. Bu teknolojiler, geleneksel yaklaşımlarla elde edilmesi güç olan mekânsal hassasiyetin sağlanmasına ve veriye dayalı karar süreçlerinin güçlendirilmesine imkân tanıyarak, restorasyon stratejilerinin daha bilimsel bir zeminde şekillenmesine katkıda bulunmaktadır (Reid et al., Restoration Ecology, 2019).

Son yıllarda hızla gelişen teknolojik yenilikler, ormancılık faaliyetlerinde hem operasyonel süreçlerin verimliliğini artırmakta hem de ekosistem yönetimini daha sistematik, ölçülebilir ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşturmaktadır. Bu yenilikler arasında özellikle insansız hava araçları (İHA'lar), orman yönetiminde önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Termal, multispektral ve yüksek çözünürlüklü optik sensörlerle donatılan İHA sistemleri; yangın sonrası zarar analizlerinden meşcere yapısının belirlenmesine, orman sağlığının izlenmesinden zararlı tespitine ve gençleştirme çalışmalarının başarısının değerlendirilmesine kadar pek çok temel faaliyet alanında ayrıntılı ve güvenilir veri sağlamaktadır.

İHA'ların hızlı, tekrarlanabilir ve yüksek çözünürlüklü veri üretme kapasitesi yalnızca erişimi zor alanlarda değil, tüm ormancılık uygulamalarında arazi gözlemlerinin sistematik biçimde yürütülmesine imkan tanımaktadır. Bu sayede geleneksel yöntemlerle elde edilmesi oldukça zaman alan bilgilerin çok daha kısa sürede ve düşük hata payıyla üretilmesi mümkün olmakta; planlama, izleme ve karar alma süreçlerinin bilimsel doğruluğu belirgin şekilde artmaktadır. Böylece sahaya bağlı kısıtlar, insan kaynaklı hatalar ve operasyonel gecikmeler büyük ölçüde azaltılmaktadır.

Bu çerçevede, insansız hava araçları (İHA) teknolojileri, ormancılık disiplinde yangın yönetimi, gençleştirme çalışmaları, ekosistem restorasyonu ve biyolojik çeşitlilik

izlemesi gibi çok çeşitli alanlarda stratejik katkılar sunmakta ve sürdürülebilir orman yönetimi hedeflerinin gerçekleştirilmesinde giderek daha kritik bir rol üstlenmektedir.

Bu amaç doğrultusunda, ecording tarafından geliştirilen “ecoDrone” adlı akıllı İHA sistemi, geniş saha alanlarında hızlı, etkili ve maliyet açısından verimli tohum ekimi gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır ve böylece ekosistem restorasyon çalışmalarını desteklemeyi hedeflemektedir. Ayrıca, ecording’in geliştirdiği “ecoDrone Re-Sense” yapay zeka modülü, topoğrafya, toprak özellikleri, nem rejimi, biyotik ve abiyotik baskılar ile iklimsel parametreler gibi çok boyutlu çevresel verileri işleyerek, alan bazlı optimum tohumlama stratejileri geliştiren bir modelleme altyapısı sunmaktadır.

Bu yaklaşım, saha verilerinden elde edilen büyük veri kümelerinin anlamlandırılmasını sağlayarak, restorasyon alanlarının önceliklendirilmesi, uygun türlerin seçimi ve ekim yoğunluklarının belirlenmesi gibi kritik planlama aşamalarında bilim temelli karar destek mekanizmalarının oluşturulmasına imkân tanımaktadır. ecoDrone sistemlerinin bu bütüncül kullanımı, ormansızlık ve iklim krizi arasındaki geri besleme döngüsünün kırılmasına katkıda bulunmakta; küresel ölçekte orman varlığının artırılması ve biyoçeşitliliğin güçlendirilmesi yönünde yenilikçi ve veri odaklı bir model sunmaktadır.

1.1 Ormansızlaşma ve Ormanlaştırma Tanımları

Dünya genelinde arazi bozulumu ve ekosistem kayıplarındaki artış, ağaçlandırma (afforestation) ve yeniden ağaçlandırma (reforestation) uygulamalarının çevresel politika ve bilimsel araştırmalardaki önemini önemli ölçüde artırmıştır. Bu kavramlar zaman zaman birbirinin yerine kullanılsa da, uluslararası literatürde her birinin farklı ekolojik, teknik ve yönetsel çerçevelere sahip olduğu vurgulanmaktadır. Özellikle doğal ormanların ortadan kalktığı bölgelerde gerçekleştirilen yeniden ağaçlandırma, ekosistemin önceki yapısına uygun türlerin yeniden kazandırılmasını ifade ederken; ağaçlandırma, daha önce orman örtüsüne sahip olmayan alanların ilk kez ağaçlık bir yapıya dönüştürülmesini kapsamaktadır. Bu ayrım, ekosistem dinamiklerini doğru bir şekilde değerlendirmek ve restorasyon stratejilerinin etkinliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir (Chazdon & Uriarte, 2016).

FAO, ağaçlandırmayı (afforestation) daha önce orman ekosistemi bulunmayan, tarihsel olarak orman niteliği taşımayan alanlara ilk kez orman kazandırılması olarak tanımlamaktadır (FAO, 2000). Buna karşılık, yeniden ormanlaştırma (reforestation), geçmişte orman örtüsüne sahip olan ancak çeşitli nedenlerle kapallılığı azalmış sahalara

yönelik uygulamaları ifade etmektedir. Bu ayrım, özellikle karbon muhasebesi ve iklim politikaları açısından kritik bir öneme sahiptir; zira afforestation yeni karbon yutakları oluştururken, reforestation mevcut ancak bozulmuş ekosistemlerin işlevlerini geri kazandırmayı amaçlamaktadır (IPCC, 2006).

Literatürde ayrıca, ormanlaştırma çalışmalarının yalnızca ağaç dikimi ile sınırlı kalmaması gerektiği; ekosistem restorasyonu, doğal yenilenmenin teşviki, toprak iyileştirme, hidrolojik süreçlerin bütünleştirilmesi ve yerel tür kompozisyonunun korunması gibi ekolojik prensiplere dayandırılmasının önemi vurgulanmaktadır (Chazdon, 2008; Lamb, Erskine & Parrotta, 2005). Bu bakış açısı, ormanlaştırma uygulamalarının yalnızca iklim politikalarıyla değil, aynı zamanda biyoçeşitlilik ve ekosistem işlevliliği açısından da merkezi bir rol üstlendiğini göstermektedir. Son dönemde gerçekleştirilen çalışmalar, özellikle teknoloji temelli yöntemlerin—uzaktan algılama, yapay zeka destekli mekânsal planlama, insansız hava araçlarıyla tohum atımı gibi—geleneksel yaklaşımları tamamladığını ve uygulamaların ölçeklenebilirliğini artırdığını ortaya koymaktadır (Ackerman et al., 2021; Zamora-Camacho et al., 2023). Bu bulgular, modern ormanlaştırma uygulamalarında doğa temelli çözümler ile teknoloji temelli yöntemlerin entegrasyonunun önemini ortaya koymaktadır.

Öte yandan, iklim krizinin başlıca tetikleyicilerinden biri olan ormansızlaşma (deforestation) kavramı, uluslararası kuruluşlar ve akademik çalışmalar arasında farklı şekillerde tanımlanmakta ve bu durum küresel ormansızlaşma verilerinin karşılaştırılabilirliğini zorlaştırmaktadır. FAO, ormansızlaşmayı bir orman alanının uzun süreli olarak orman dışı arazi kullanım türlerine dönüşmesi veya kapalılığın %10'un altına düşmesi olarak tanımlamaktadır (FAO, 2000). State of the World's Forests (2022) raporunda ise, dünya genelinde her yıl ortalama 5 milyon hektar orman alanının kaybedildiği belirtilmektedir (FAO, 2022). FAO'nun bu tanımı yalnızca insan kaynaklı müdahaleleri değil, aynı zamanda doğal afetler, zararlı organizmalar, kuraklık ve iklim değişikliğine bağlı ekolojik stresler gibi doğal süreçlerden kaynaklanan uzun süreli kapalılık azalmasını da kapsamaktadır.

Bu çerçevede, FAO'nun tanımında geçen “uzun dönem” ifadesi, genellikle 10 yıl ve üzeri süreleri kapsamaktadır. Ancak FAO, planlı ormancılık uygulamaları (örneğin gençleştirme kesimleri ve kontrollü üretim amaçlı kesimler) ile yangın sonrası doğal yenilenme süreçlerinden kaynaklanan geçici kapalılık düşüşlerini ormansızlaşma kapsamına dahil etmemektedir (FAO, 2000).

Buna karşılık, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), 2001 yılında aldığı karar ile ormansızlaşmayı, “orman alanlarının insan faaliyetleri sonucu orman olmayan arazi kullanım türlerine dönüştürülmesi” olarak tanımlamıştır (UNFCCC, 2001). Bu tanım, doğal süreçlerden kaynaklanan değişiklikleri kapsam dışı bıraktığı için, FAO’nun daha ekolojik temelli yaklaşımıyla önemli bir fark göstermektedir. Tolunay (2015), iki tanım arasındaki temel farklılığın, insan etkisinin tanımın merkezinde olup olmaması olduğunu vurgulamaktadır.

FAO’ya göre orman; en az 0,5 hektarlık alanı kapsayan, kapallığı %10’un üzerinde olan ve minimum 5 metre boyuna ulaşabilen ağaç türlerinin baskın olduğu alan olarak tanımlanmaktadır (FAO, 2000). Bununla birlikte, ulusal ormancılık mevzuatları arasında önemli tanım farklılıkları mevcuttur. Örneğin, Brezilya, Peru ve Meksika orman kapallık eşiğini %30 olarak belirlerken (Sasaki & Putz, 2009), Hindistan ve Gana’da bu oran %15 olarak uygulanmaktadır. Çin’de ise daha önce %30 olan kapallık sınırı, son envanter çalışmaları ile %20’ye düşürülmüştür (Shi et al., 2011). Bu tanımsal farklılıklar yalnızca kapallık eşiği ile sınırlı kalmayıp; minimum alan büyüklüğü, minimum ağaç boyu, doğal ve yapay orman ayrımı, ekosistem temelli tanımlar ve ulusal hukuki kriterler gibi çeşitli boyutlarda da değişkenlik göstermektedir. Chazdon et al. (2016) ve Tolunay (2017), bu çeşitliliğin küresel izleme çalışmalarında metodolojik tutarsızlıklara yol açtığını belirtmektedir.

Akademik literatürde, ormansızlaşmanın tanımına daha geniş kapsamlı yaklaşımlar da bulunmaktadır. Geist ve Lambin (2002), ormansızlaşmayı yalnızca biyofiziksel arazi kullanımı değişikliği olarak değil; aynı zamanda sosyoekonomik baskılar, piyasa dinamikleri, kurumsal yönetim eksiklikleri, tarımsal genişleme ve kırsal kalkınma politikaları gibi çok boyutlu süreçlerin bir sonucu olarak ele almaktadır. Benzer şekilde, Kissinger, Herold ve De Sy (2012), küresel ormansızlaşmanın temel itici güçlerini inceledikleri çalışmalarında, endüstriyel tarım, küçük ölçekli tarım, madencilik, altyapı gelişimi ve yasa dışı kesimler gibi etkenlerin rolünü ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Yangın sonrasında Muğla kızılçam ormanlarının bir görüntüsü

FAO tarafından belirlenen minimum alan (0,5 ha) ve ağaç boyu (5 m) kriterleri, farklı ülkelerde değişiklik göstermektedir. Örneğin, Türkiye’de bir alanın orman olarak kabul edilebilmesi için minimum alan büyüklüğü 3 ha olarak belirlenmiş olup, kapalılık açısından belirli bir sınır değeri tanımlanmamıştır (GOFC-GOLD, 2017). Kapalılığı %10’un altında olan alanlar daha önce bozuk orman veya verimsiz orman olarak sınıflandırılırken, 2015 yılından itibaren Orman Genel Müdürlüğü (OGM) bu alanları boşluklu kapalı orman olarak adlandırmaya başlamıştır. FAO tanımına göre ise, kapalılığı %5–10 arasında olan ve 5 metreden uzun ağaçların bulunduğu alanlar ile kapalılığı %10’un üzerinde olmasına rağmen daha çok çalı ve ağaççık türleri barındıran alanlar, “diğer ağaçlık alan” kategorisine dahil edilmektedir (FAO, 2000). Bu nedenle FAO’nun yayınladığı orman istatistiklerinde, Türkiye’deki verimli orman alanları orman kategorisinde, kapalılığı %10’un altında olan alanlar ise diğer ağaçlık alanlar kategorisinde gösterilmektedir. Ülkeden ülkeye değişen bu tanımlamalar göz önünde bulundurulduğunda, ormansızlaşma hesaplamalarında %10 kapalılık eşiği yerine ilgili ülkenin ulusal orman tanımında belirtilen kapalılık kriterlerinin esas alınması gerekmektedir (GOFC-GOLD, 2009; 2017). Ormansızlaşmaya ilişkin literatürde dolaylı olarak çeşitli kavramlar da ele alınmaktadır. Özellikle Kyoto Protokolü, Paris İklim

Anlaşması ve REDD+ gibi uluslararası süreçlerde, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik tartışmalarda öne çıkan kavramlardan biri, orman bozulması (forest degradation) olarak tanımlanmaktadır. Orman bozulması, mevcut kapalılık veya ağaç servetinde meydana gelen azalmayı ifade eder. Örneğin, aşırı odun üretimi, kaçak kesimler veya yangın gibi etmenler sonucunda kapalılık uzun süreli olarak düşebilir; ancak söz konusu alan başka bir arazi kullanımına dönüştürülmediği ve orman tanımındaki kriterleri koruduğu sürece, bu durum orman bozulması kapsamında değerlendirilir. Bu bağlamda “uzun süreli” kavramı, FAO’ya göre en az 10 yılı ifade etmektedir (FAO, 2000). Buna karşılık, orman ekosistemlerinde kapalılık veya ağaç servetinin artması, ormanın iyileşmesi veya gelişmesi (improvement) olarak tanımlanmaktadır. FAO, en az 10 yıldır orman niteliği taşımayan tarım, otlak, madencilik veya benzeri alanların, doğal süreçler veya silvikültürel müdahaleler yoluyla yeniden ormanlaştırılmasını (afforestation) ifade etmektedir (FAO, 2000). Türkiye’de terk edilmiş tarım alanlarının kendiliğinden ormana dönüşmesi bu tanım kapsamında değerlendirilmektedir. Öte yandan, UNFCCC ormanlaştırmayı farklı bir perspektifle ele almaktadır; bu tanıma göre, en az 50 yıldır orman niteliği taşımayan alanlar yalnızca insan eliyle orman haline getirildiğinde ormanlaştırma olarak kabul edilmektedir (UNFCCC, 2001). Son olarak, yeniden ormanlaştırma (reforestation) kavramı, insan etkisi veya doğal nedenlerle kapalılığı 10 yıldan kısa bir süre için %10’un altına düşen orman alanlarının kapalılığının yeniden %10’un üzerine çıkarılması sürecini ifade eder. Örneğin, tıraşlama kesimleri, yangınlar veya fırtına gibi doğal olaylar nedeniyle geçici olarak kapalılığı düşen alanlar, yeniden ormanlaştırma kapsamında değerlendirilmektedir (FAO, 2000).

1.2 İklim Krizine Karşı Ormanlaştırmanın Önemi

Orman ekosistemleri ve benzeri habitatlar, atmosferdeki karbonu tutarak iklim değişikliğinin etkilerinin hafifletilmesinde hayati bir işlev üstlenmektedir. FAO raporlarına göre, günümüzde dünya genelinde yıllık ortalama yaklaşık 5 milyon hektar ormanlık alan kaybedilmektedir (FAO, The State of the World's Forests, 2022). Ormanlar, atmosferden sera gazlarını emerek bu karbonu hem yerüstü ve yeraltı biyokütlelerinde hem de toprak yapılarında depolamakta ve okyanuslardan sonra en büyük doğal karbon yutakları olarak işlev görmektedir.

Birleşmiş Milletler, 2030–2052 döneminde küresel ölçekte yaklaşık 1 milyar hektarlık ormanlaştırma yapılması gerektiğini vurgulamaktadır (United Nations, Ecosystem

Restoration for People, Nature and Climate, 2021). Yükselen deniz seviyeleri, artan yağışlar ve sel ile fırtına gibi ekstrem hava olaylarının sıklık ve şiddetindeki artış, ormanlık alanların artırılmasının doğal bir iklim tamponu görevi görebileceğini göstermektedir. Ormanlaştırma faaliyetleri tek başına iklim krizine çözüm sunmasa da, alternatif ve tamamlayıcı bir strateji olarak kritik öneme sahiptir. İklim değişikliğine bağlı olarak artan orman yangınları ve diğer ekstrem olaylar, ormanların yenilenme kapasitesini sınırlandırmakta, aynı zamanda ormansızlaşma yangın riskini artırarak iklim krizinin olumsuz etkilerini pekiştirmektedir. Bu nedenle, ormansızlaşmanın durdurulması ve bozulmuş ormanların restorasyonu, küresel iklim eyleminin temel unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir. Modern teknolojilerin ormancılık uygulamalarına entegrasyonu da bu bağlamda önem taşımaktadır; özellikle insansız hava araçları ve drone tabanlı ağaçlandırma yöntemleri, geleneksel ormancılık kapasitesini güçlendirmektedir (United Nations, Action Plan for the UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030, 2023). Ağaçlandırma çalışmaları, sürdürülebilir ormancılık yönetiminin temel bileşenlerinden biridir. Bu faaliyetler, havza bazında doğal kaynakların korunmasına, toprak erozyonunun önlenmesine ve bitki örtüsü ile su kaynaklarının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Son yıllarda, küresel ölçekte iklim değişikliği, kuraklık ve arazi bozulumu gibi sorunların çözümü öncelikli bir hedef olarak benimsenmiştir. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde, ekosistemlerin korunmaması çölleşme riskini artırmaktadır; bu nedenle, biyolojik çeşitliliğin korunması ve bozulan doğal dengenin yeniden tesis edilmesi insanlık açısından öncelikli bir görev olarak görülmektedir. Bu kapsamda, söz konusu alanların ağaçlandırılması, temel ve öncelikli müdahaleler arasında yer almaktadır (Gülcü ve ark., 2016). Dünya topraklarının yaklaşık üçte biri kurak ve yarı kurak alanlardan oluşmaktadır. Yıllık yağışın 300 mm ve altında olduğu bölgeler kurak, 300–600 mm arasında olanlar ise yarı kurak olarak sınıflandırılmaktadır (Ürgeç, 1986). Kuraklık yalnızca yağış eksikliği ile tanımlanmayıp, su yetersizliği ve bu durumun sürekliliği ile karakterize edilmektedir (Uluocak, 1977). Türkiye'nin yaklaşık %40'lık yüzeyi kurak veya yarı kurak koşullar altında yer almakta olup, bu alanlarda en önemli sorunlar topraktaki kullanılabilir su miktarı ve bozulmuş toprak yapısının iyileştirilmesidir (Zoralioğlu, 2006).

Ağaçlandırma çalışmalarının başarısı, yetiştirme ortamının doğru analiz edilmesine, bölgeye uygun türlerin seçilmesine, arazi hazırlığının etkin yapılmasına ve bitkilendirme tekniklerinin uygun biçimde uygulanmasına bağlıdır (Kırdar ve ark., 2011). Özellikle

ülkemizde kurak ve yarı kurak alanlarda yürütülen erozyon kontrolü ve ağaçlandırma projelerinde, seçilecek türlerin yüksek adaptasyon kapasitesine sahip, toprağı iyileştirici ve ekosistemi destekleyici özelliklerde olması kritik öneme sahiptir (Yüksek vd., 2007). Toprak karbonundaki değişim, organik madde içeriğine bağlı olarak farklılık göstermektedir; düşük organik madde içeren topraklarda değişim sınırlı iken, organik madde içeriğı yüksek topraklarda karbon kaybı daha belirgin olabilmektedir. IPCC kılavuzları (1996, 2003, 2006) genel olarak, bir arazi kullanımındaki karbon stoklarının yaklaşık 20 yıl içinde dengeye ulaşacağını belirtmektedir. Ormansızlaşma ve orman bozulmasından en çok etkilenen vejetasyon formu da bu ekosistemlerdir. Tekil ağaçların göğüs çapı (1,3 m yükseklikten ölçülen) 10, 30, 50 ve 70 cm olduğunda, toprak üstü biyokütle değerleri sırasıyla yaklaşık 135, 2.250, 8.500 ve 20.000 kg d.m./ağaç düzeyindedir. Çap artışı ile toplam biyokütlerde önemli artışlar gözlenmektedir. Karışık tropikal ormanlarda, toprak üstü biyokütle ile toprak altı biyokütle oranı yaklaşık 4:1 iken; çok nemli ortamlarda bu oran 10:1'e, çok kurak koşullarda ise 1:1'e kadar düşebilmektedir. Bu bağlamda, orman ekosistemleri birim alandaki biyokütle artışıyla paralel olarak tüm karbon havuzlarında karbon depolama kapasitesini artırmaktadır (Serengil, 2018). Muğla ili, Türkiye'nin güneybatısında yer almakta olup Ege ve Akdeniz iklimlerinin geçiş kuşağında konumlanmaktadır. Bu jeoklimatik konum, bölgenin iklimsel ve çevresel karakteristiklerini belirgin biçimde şekillendirmektedir. Bölgedeki yazlar genellikle sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlıdır; özellikle kış ve geçiş mevsimlerinde yağış miktarı artarken, yaz aylarında belirgin bir kuraklık gözlenmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 16–18 °C arasında değişirken, yıllık toplam yağış miktarı 700–1.000 mm aralığındadır (Muğla İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2023). Bu iklimsel koşullar, bölgenin bitki örtüsü ve ekosistem yapısı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Muğla'nın orman ekosistemleri, biyolojik çeşitlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Kıyı bölgelerinde maki formasyonları yayginken, iç kesimlerde kızılçam (*Pinus brutia*) ormanları ve çeşitli meşe türleri hakimdir. Bölge ayrıca, endemik ve nadir türleri barındıran sığla (*Liquidambar orientalis*) ormanlarına ev sahipliğı yapmaktadır. Söz konusu sığla ormanları, dünya üzerinde yalnızca Güneybatı Anadolu Bölgesi'nde bulunmakta ve yaklaşık 60 milyon yıldır varlıklarını sürdürmektedir.

Bu bağlamda, sığla (*Liquidambar orientalis*) ormanları bölgenin ekosistem çeşitliliğı açısından kritik bir rol oynamaktadır (Orman Genel Müdürlüğü, 2022; Sevgili ve ark., 2018). Muğla'nın çevresel koşulları, doğal afetlere karşı yüksek bir hassasiyet

göstermektedir. Özellikle orman yangınları, ekosistem yapısında önemli bozulmalara yol açabilmektedir. Örneğin, 2021 yılında Muğla ili sınırları içinde meydana gelen büyük orman yangınları, toplam 55.764 hektarlık alanı etkilemiş ve özellikle Marmaris ile Köyceğiz ilçelerinde biyolojik çeşitlilik açısından ciddi kayıplara neden olmuştur (Doğa Koruma Merkezi, 2022). Yangın sonrası yürütülen ekosistem onarımı ve rehabilitasyon çalışmaları, biyolojik çeşitliliğin korunması ve ekosistem işlevlerinin yeniden sağlanmasını hedeflemektedir. Bu çalışmalar, hem doğal gençleştirme süreçlerini hem de insansız hava araçlarıyla desteklenen ağaçlandırma uygulamalarını kapsamaktadır (FAO, 2020; United Nations, 2021).

Muğla bölgesinde iklim ve topoğrafyanın oluşturduğu heterojen yapılar, ekosistem yönetimi ve ormancılık çalışmalarının alan temelli planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Arazi eğimi, toprak özellikleri ve mikroklimatik farklılıklar, özellikle kurak ve yarı kurak iç kesimlerde bitki türü seçimi ile restorasyon tekniklerinin belirlenmesinde kritik parametreler olarak öne çıkmaktadır (Kırdar ve ark., 2011; Gülcü ve ark., 2016). Bu nedenle, yangın riski yüksek ve ekosistem çeşitliliği zengin olan Muğla gibi bölgelerde, sürdürülebilir orman yönetimi ve iklim krizine odaklı ormanlaştırma stratejileri öncelikli olarak ele alınmalıdır.

1.3 Kızılçam'ın (*Pinus brutia*) Genel Özellikleri

Kızılçam (*Pinus brutia*), *Pinaceae* familyasına ait ve *Pinus* cinsinde sınıflandırılan bir ağaç türüdür. Genellikle 20 metreye kadar boylanabilen bu tür, kalın dallı ve geniş tepe çatılı bir morfolojik yapıya sahiptir. Genç sürgünleri koyu kırmızı renkte olup, türün adını da bu karakteristik özellik oluşturmaktadır. İğne yaprakları çoğunlukla 10–15 cm uzunluğunda olup nadiren 20 cm'ye kadar ulaşabilir (Anşin ve Özkan, 1993). Akdeniz havzasının önemli orman türlerinden biri olan kızılçam, en geniş yayılım alanını Anadolu'da gösterir ve Türkiye'de özellikle Akdeniz ile Ege Bölgelerinde yaygındır. Kızılçam (*Pinus brutia*), hızlı büyüme kapasitesine sahip bir tür olup özellikle gençlik döneminde yüksek oranda gelişim gösterir ve kuraklığa toleranslıdır. Sıcak ve ılıman iklimleri tercih eden tür, genellikle sahil kesimlerinde yaygın olmakla birlikte zaman zaman 1.200 metreye kadar yükseltilerde de görülebilir. Kurak ve verimsiz toprakların ağaçlandırılmasında sıkça tercih edilen kızılçam, coğrafi yayılımı bakımından Doğu Akdeniz bölgesini kapsar; Yunanistan'ın doğusundan başlayarak Girit, Kıbrıs, Türkiye, Suriye, Irak, Lübnan ve Ürdün'de bulunur. Türkiye, türün en geniş yayılım alanına sahip

ülke konumundadır (Boydak ve ark., 2006; Anşin ve Özkan, 1993). Ülkemizde kızılçamın yayılış alanı yaklaşık 5,2–5,4 milyon hektar olarak tahmin edilmektedir (Yaltırık ve Akkemik, 2011; Anonim, 2021; Anonim, 2024). Yükselti dağılımı açısından Akdeniz Bölgesi'nde 0–1.500 m, Marmara Bölgesi'nde 0–900 m ve Karadeniz Bölgesi'nde 0–600 m aralığında değişmektedir (Saatçioğlu, 1976; Yaltırık ve Boydak, 2000). Kızılçam, yaz kuraklıklarına uyum sağlayabilen bir türdür. Akdeniz Bölgesi'nde uzun süreli yaz kuraklıklarına rağmen varlığını sürdürebilirken, Karadeniz Bölgesi'nde nehir vadileri boyunca daha düşük kuraklık düzeyinde ormanlar oluşturabilmektedir (Yaltırık ve Akkemik, 2011). Türün dikey yayılımını sınırlayan temel faktör sıcaklıktır; Akdeniz Bölgesi'nde genellikle 1.300 metreye kadar uzanırken, bazı yörelerde 1.500–1.650 metreye kadar yükselebilir (Boydak ve ark., 2006). Karadeniz Bölgesi'nde ise kıyılardan vadiler boyunca iç kesimlere kadar yayılır ve 800–1.000 metre yükseltilere ulaşabilir. Düşük zonlarda kısa boylu ve dağınık tepeli bireyler görülürken, yüksek kesimlerde daha sivri tepeli, düzgün gövdeli ve ince dallı bireyler hakimdir (Anşin ve Özkan, 1993).

Türkiye'de kızılçam ormanlarının yaklaşık %40'ı Ege Bölgesi'nde yer almakta olup, Muğla Orman Bölge Müdürlüğü ülkemizdeki en geniş kızılçam ormanlarını barındırmaktadır. Ege'de dağ silsilelerinin kıyı şeridine dik uzanması, kızılçamın iç kesimlere kadar yayılmasına olanak sağlamaktadır (Neyişçi, 1987). Tür, Akdeniz ikliminin karakteristik sıcak ve kurak yazlarına ile ılık ve yağışlı kışlarına uyum göstermekte; yüksek sıcaklık isteğine sahip, donlara karşı hassas ve karasal iklimlerden kaçınan bir özellik sergilemektedir. Yıllık yağış miktarı yayılış alanlarında 400–2.000 mm arasında değişmekte olup, yağışların büyük bir kısmı kış aylarında gerçekleşmektedir (Boydak ve ark., 2006).

Kızılçam (*Pinus brutia*), hem saf ormanlar oluşturabilmekte hem de maki vejetasyonu ile karışık orman yapıları kurabilmektedir. Yüksek kesimlerde *Cupressus sempervirens*, *Juniperus excelsa*, *Juniperus foetidissima*, *Pinus nigra* ve *Cedrus libani* ile birlikte meşcereler oluştururken, Karadeniz Bölgesi'nde yapraklı türlerle karışık ormanlar meydana getirebilir (Yaltırık ve Akkemik, 2011). Çiçeklenme genellikle türün 2 yaşında başlar ve kozalaklar 4–7 yaşında olgunlaşır. Dişi çiçekler tepenin üst ve orta kısımlarında, erkek çiçekler ise alt ve orta dallarda yer alır. Kozalaklardan tohum dökümü üçüncü yılın başında, Haziran veya Temmuz aylarında başlar; ancak bazı kozalaklar açılmadan kalabilir. Tohum olgunluğu, fizyolojik ve anatomik olgunluk olmak üzere iki aşamada

gerçekleşir. Anatomik olgunluk, tohumun çimlenme yeteneğine erişmesini ifade ederken, fizyolojik olgunluk, kozalak neminin azalması ile tohumların kozalaklardan kolayca ayrılabilir hale gelmesini kapsar (Boydak ve ark., 2006).

Kızılçam tohumları, uygun çevresel koşullar altında 5–25 °C arasında çimlenebilir ve optimum çimlenme sıcaklığı 15–20 °C'dir. Soğuk saklama koşullarında (+4 °C) tohumlar 5–6 yıl boyunca çimlenme kapasitelerini büyük ölçüde korur (Aslan, 1972). Tohum çimlenmesi için gerekli sıcaklık (15–35 °C) ve yeterli nem (%70) koşullarının aynı anda sağlanması gerekmektedir; Akdeniz ve Ege bölgelerinde bu koşullar genellikle Şubat–Mayıs ayları arasında oluşur (Şefik, 1965; Ürgenç, 1977; Boydak ve ark., 2006).

Kızılçam ormanlarının doğal gençleşmesinde yangın temel rol oynamaktadır. Tür, yangına adaptasyon göstermekte ve yangın sonrası kozalaklardan dökülen tohumlar sayesinde geniş alanlarda aynı yaşlı ormanlar oluşturabilmektedir. Yangın şiddeti ve örtü koşullarına bağlı olarak tohumların bir kısmı toprağa ulaşmakta ve çimlenme yeteneğini korumaktadır (Thanos ve ark., 1989; Boydak ve Özhan, 1996; OGM, Anonim, 2024). Akdeniz ekosistemlerinde Kızılçam'ın yanma özellikleri ve yangın sonrası orman dinamiği kapsamlı biçimde incelenmiş, doğal gençleşme süreçleri detaylandırılmıştır (Naveh, 1974; Keeley, 1992; Thanos, 1999; Arianoutsou ve Thanos, 1996).

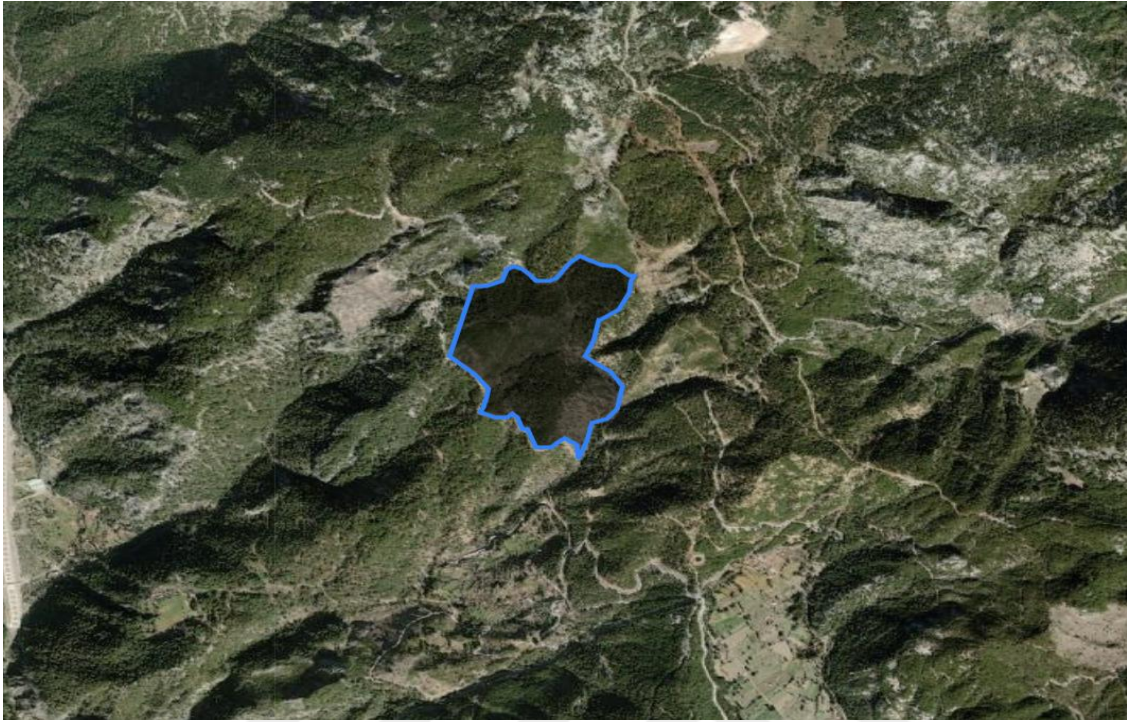
1.4 Çalışma Sahalarının Genel Özellikleri

1.4.1 Köyceğiz-Akköprü

Köyceğiz-Akköprü (Sazak) çalışma alanı, Ege–Akdeniz geçiş kuşağında yer almakta olup, çoklu yaşam ortamlarının kesişimini yansıtan model bir alan olarak değerlendirilebilir. Bölge, sulak alanlar, ırmak kenarları ve kıyı etkili Akdeniz ikliminin bir araya gelmesi sayesinde yüksek habitat heterojenliği ve ekosistem çeşitliliği sunmaktadır. Bu çeşitlilik, hem hidrolojik süreçlerin hem de iklimsel etkilerin ekosistem dinamikleri üzerindeki rolünün incelenmesi açısından bölgeyi kritik hâle getirmektedir.

Çalışma alanı, tipik Akdeniz iklimi koşulları sergiler; yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlıdır. Meteorolojik veriler, yaz aylarında belirgin kuraklık, kış ve erken bahar dönemlerinde ise yoğun yağış örüntülerinin olduğunu göstermektedir. Bu iklimsel dağılım, sulak alanların mevsimsel hidrolojisini ve maki ile sazlık alanların su rejimi arasındaki ilişkiyi doğrudan şekillendirmektedir. Dolayısıyla, ekosistemlerin mevsimsel

dinamikleri ve türlerin yaşam alanı tercihleri, iklimsel faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir.



Şekil 2. Köyceğiz-Akköprü mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü

Floristik açıdan, Köyceğiz-Akköprü alanı, endemik ve relik türler açısından zengin bir yapıya sahiptir. Özellikle *Oenanthe cyclocarpa* ve *Verbascum demirizianum* gibi yalnızca bu alana özgü taksonlar, bölgenin floristik değerini ve ekosistem işlevselliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bölgedeki ırmak kenarı ve nemli koridorlar, Anadolu sığlası (*Liquidambar orientalis*) popülasyonlarını barındırmakta olup, sığla ormanları ve ilişkili habitatlar, lokal endemizmin ve relik türlerin devamlılığında kritik rol oynamaktadır. Bu durum, alanın biyolojik çeşitlilik ve ekosistem bütünlüğü açısından korunması gereken stratejik bir bölge olduğunu göstermektedir. Faunistik açıdan, Köyceğiz Gölü ve çevresindeki sazlık ve bataklık kuşağı, çok sayıda su kuşu türü için hem üreme hem de kışlama alanı işlevi görmektedir. Bu alanlar, küçük karabatak (*Microcarbo pygmaeus*), kızıl kurbağa ördeği (*Netta rufina*) ve saz delicesi (*Circus aeruginosus*) gibi türlerin varlığı açısından önemlidir. Göl çevresi ve orman mozaiklerinde memeli ve sürüngen gruplarına ait gözlemler de kaydedilmiş olup, bölgenin yalnızca kuşlar için değil, genel faunistik çeşitlilik ve ekosistem bütünlüğü açısından da kritik bir habitat sağladığını göstermektedir.

Köyceğiz-Akköprü alanı, sulak alanlar, orman mozaikleri ve maki topluluklarının bir arada bulunması nedeniyle ekosistem hizmetlerinin sürekliliği ve biyolojik çeşitlilik açısından yüksek stratejik öneme sahiptir. Sulak alanlar, su kalitesinin korunmasına, erozyonun önlenmesine ve mikroklimanın düzenlenmesine katkı sağlarken; kızılçam ormanları ve maki alanları, karbon depolama, toprak stabilizasyonu ve biyoçeşitliliğin sürdürülmesi gibi ekosistem hizmetlerini desteklemektedir. Bölgedeki endemik ve relik türlerin korunması, ekosistem bütünlüğünün sürdürülebilirliği açısından kritik önem taşımakta olup, gelecekte gerçekleştirilecek koruma, izleme ve yönetim stratejilerinin bilimsel temellerle desteklenmesini gerektirmektedir.

1.4.2 Köyceğiz-Yangı

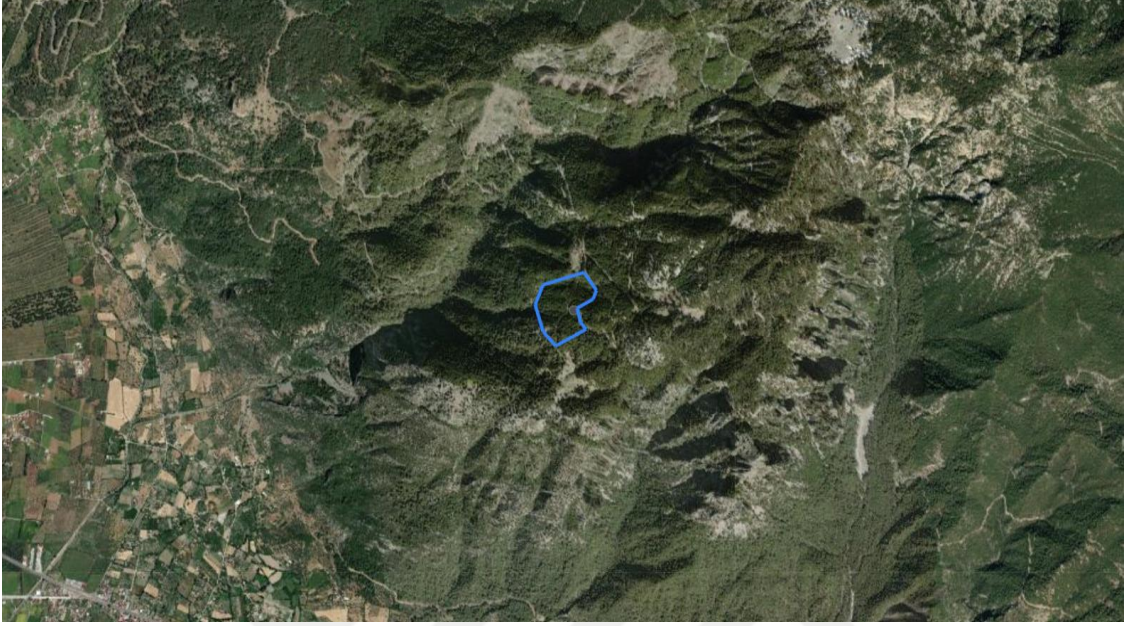
Köyceğiz–Merkez–Yangı çalışma alanı, Ege–Akdeniz geçiş kuşağında yer almakta olup tipik Akdeniz iklimi özellikleri sergiler; yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlıdır. Bu iklim, sulak alanların hidrolojik rejimini ve maki-orman-sazlık gibi farklı habitat tipleri arasındaki etkileşimi belirgin biçimde şekillendirmektedir. Bölgedeki habitat mozaik yapısı; göl, sulak alan, orman, maki ve geçiş habitatları gibi unsurlardan oluşmakta olup, bu çeşitlilik bitki ve hayvan topluluklarının farklı çevresel koşullara uyum sağlayabileceği dinamik bir ekosistem oluşturmaktadır.

Floristik açıdan, bu mozaik yapı hem yaygın Akdeniz bitkilerini hem de yerel adaptasyon göstermiş, potansiyel hassas veya relik türleri barındırmaktadır. Faunistik açıdan ise sulak alanlar, göl kıyıları ve orman/mozaik habitatlar, su kuşları, sucul ve kara memelileri, sürüngenler ve omurgasızlar için uygun yaşam alanları sağlamaktadır. Özellikle göl-kıyı ile orman mozaikleri arasındaki geçiş alanları, hem göç yolları hem de barınma ve üreme habitatları açısından önemli işlev taşımaktadır.

Bu yapı, alanın biyolojik çeşitlilik ve ekosistem hizmetleri (su rejimi, toprak koruma, habitat çeşitliliği vb.) açısından potansiyel yüksek değere sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, çalışma alanında gerçekleştirilecek kapsamlı floristik, faunistik ve ekosistem hizmetleri analizleri, habitat mozaiklerinin korunması ile sürdürülebilir ekosistem yönetimi, izleme ve koruma stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Faunistik açıdan, Köyceğiz–Merkez–Yangı alanı, sulak alanlar, orman mozaikleri ve maki alanlarının bir araya gelmesi sayesinde çeşitli kuş ve memeli türleri için üreme, beslenme ve kışlama habitatı sunmaktadır. Göl kıyısı, sazlık ve orman mozaiklerinin varlığı, hem sucul hem kara türleri için potansiyel yaşam alanları ve geçiş koridorları

oluşturmaktadır. Özellikle sulak alanlar ve sazlık kuşaklar, *Ixobrychus minutus* (küçük balaban), *Circus aeruginosus* (saz delicesi) ve çeşitli su kuşlarının beslenme ve üreme ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir.



Şekil 3. Köyceğiz-Yangı mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü

Alan, ekosistem bütünlüğü ve habitat çeşitliliği bakımından bölgenin biyolojik çeşitlilik açısından stratejik önemini ortaya koymaktadır. Bölgedeki habitat mozaikleri, ekosistem hizmetlerinin sürekliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sulak alanlar su kalitesinin korunmasına, erozyonun engellenmesine ve mikroklimanın düzenlenmesine katkı sağlarken, kızılçam ormanları ve maki alanları karbon depolama, toprak koruma ve biyoçeşitliliğin sürdürülmesi gibi ekosistem hizmetlerini desteklemektedir. Bu bütüncül yapı, alanda gerçekleştirilecek sürdürülebilir arazi yönetimi ve doğal yaşamın korunması çalışmalarını bilimsel ve uygulamalı açıdan güçlendirmektedir. Sonuç olarak, Köyceğiz–Merkez–Yangı alanı, floristik çeşitlilik, faunistik zenginlik ve ekosistem hizmetleri açısından yüksek öncelikli bir koruma ve araştırma alanı olarak değerlendirilebilir.

1.4.3 Milas-Karacahisar

Milas–Karacahisar–Fesleğen çevresi, Ege–Akdeniz geçiş kuşağında yer almakta olup, jeomorfolojik ve ekolojik çeşitliliği ile öne çıkan bir alan olarak değerlendirilmektedir. Bölge, Gökçeler Kanyonu ve çevresindeki topografik yapı, kaya formasyonları ve vadilerle karakterize edilmekte, bu doğal yapı farklı habitat tiplerinin bir arada bulunmasına olanak sağlamaktadır. Kanyon ve vadilerdeki mikrohabitatlar, hem maki

formasyonları ve kızılçam (*Pinus brutia*) ormanları hem de sulak alanlar ve kıyı habitatlarının mozaik biçimde bir arada yer almasına olanak tanımaktadır. Bu heterojen peyzaj, bölgenin biyolojik çeşitlilik açısından potansiyel bir öncelikli alan adayı olmasını sağlamaktadır. Flora açısından, bölge zengin bir ekosistem çeşitliliğine sahiptir. Kızılçam ormanları ve maki formasyonları, bölgedeki yaygın türler için uygun yaşam alanı sunarken, kanyon ve taşlık alanlardaki mikrohabitatlar, yalnızca bu alana özgü hassas ve relik bitki türlerinin gelişmesine olanak tanımaktadır. Bu çeşitlilik, bölgenin floristik değerini artırmakta ve yerel biyolojik çeşitliliğin korunmasında kritik rol oynamaktadır. Bölgede yürütülecek sürdürülebilir ormancılık uygulamaları, ekosistem hizmetlerinin devamlılığını desteklerken, relik ve endemik türlerin korunmasına katkı sağlayabilir. Faunistik açıdan da bölge oldukça önemlidir. Kanyonlar, orman mozaikleri ve sulak alanlar, çeşitli kuş ve memeli türleri için uygun yaşam alanları sunmaktadır. Bölgedeki sulak alanlar ve su kaynakları, özellikle su kuşları ve sucul memeliler için üreme, beslenme ve kışlama alanı olarak işlev görmektedir. Kızılçam ormanları ve maki alanları ise memeli türlerinin yaşam alanlarını desteklemekte, ekosistem hizmetlerinin sürekliliğini sağlamaktadır. Bu durum, bölgenin biyolojik çeşitlilik ve ekosistem bütünlüğü açısından stratejik önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4. Milas-Karachisar mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü

Bölgenin iklimi tipik Akdeniz özellikleri göstermektedir; yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlı geçmektedir. Bu iklimsel koşullar, bölgedeki ekosistemlerin mevsimsel dinamiklerini ve biyolojik çeşitliliğin dağılımını belirgin şekilde etkilemektedir. Bununla

birlikte, özellikle yaz aylarında meydana gelebilecek doğal veya insan kaynaklı orman yangınları, ekosistemler için ciddi bir risk oluşturmaktadır. Yangınlar hem orman örtüsünü hem de tarımsal alanları ve sulak habitatları etkileyebilir, ekosistem dengesini bozabilir ve biyolojik çeşitliliği olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, bölgede yangın risklerinin yönetimi, ekosistemlerin korunması ve sürdürülebilir arazi kullanım planlarının geliştirilmesi kritik öneme sahiptir.

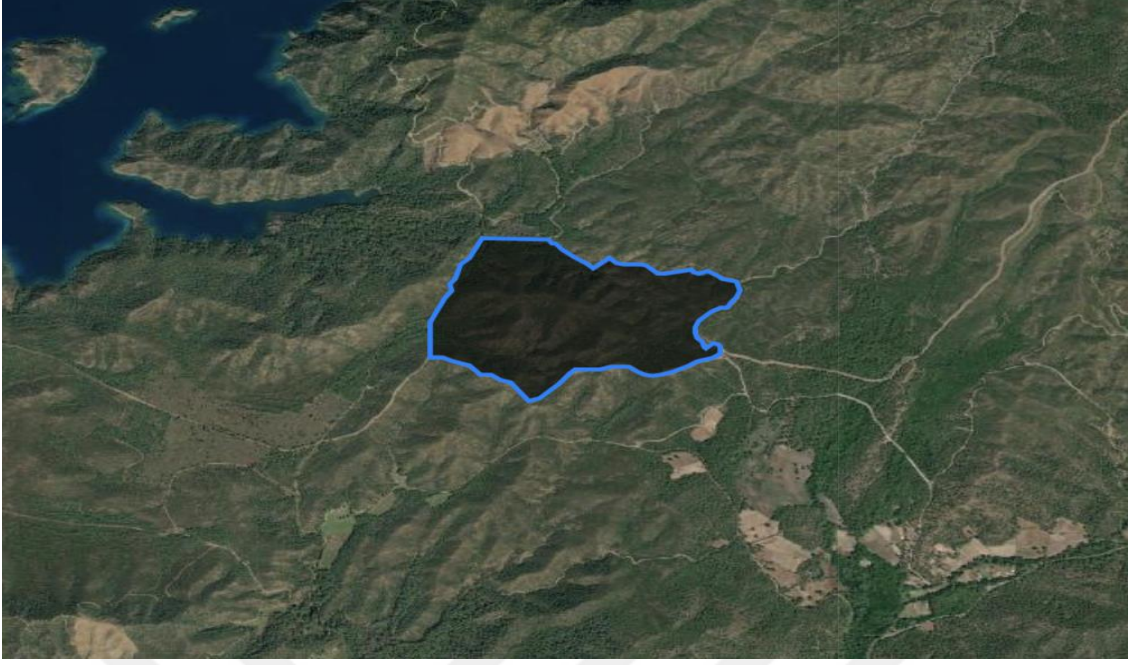
Sonuç olarak, Milas–Karacahisar–Fesleğen bölgesi, hem doğal peyzaj çeşitliliği hem de flora ve fauna açısından yüksek biyolojik potansiyele sahip bir alan olarak değerlendirilmektedir. Bölgede yapılacak kapsamlı floristik ve faunistik saha çalışmaları, ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilir kullanımı, yerel endemik türlerin korunması ve uzun vadeli izleme programlarının oluşturulması açısından temel oluşturacaktır. Alan, bütüncül bir ekosistem yönetimi yaklaşımıyla planlandığında, hem bilimsel araştırmalar hem de doğa koruma stratejileri için öncelikli bir referans alanı niteliği taşıyabilir.

1.4.4 Marmaris-Hisarönü

Marmaris Hisarönü–Bördübet bölgesi, Muğla il sınırları içinde yer almakta olup Akdeniz iklimi etkisi altında değerlendirilmektedir. Bölge, doğal sit alanı olmasının yanı sıra biyolojik çeşitlilik açısından da önem taşımaktadır. Topografyası ormanlık yamaçlar, kayaçlı zeminler ve kıyıya yakın alçak düzlüklerden oluşmakta olup, bu yapısı farklı mikrohabitatların bir arada bulunmasına olanak sağlamaktadır. Bölgenin bu özellikleri, ekosistem çeşitliliğinin korunması ve farklı türler için yaşam alanı sağlanması açısından önem arz etmektedir.

İklimsel açıdan Bördübet Bölgesi, tipik Akdeniz iklimi özelliklerini taşımakta olup yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılıman ve yağışlı geçmektedir. Marmaris Milli Parkı sınırları içinde yer alan Bördübet, parkın ekosistem çeşitliliğini yansıtarak farklı habitat tiplerinin bir arada bulunmasına imkan sağlamaktadır. Bu özellik, bölgenin hem biyolojik çeşitlilik hem de ekosistem bütünlüğü açısından önemini artırmaktadır.

Flora açısından, bölge Akdeniz iklimine özgü bitki türlerini barındırır. Çam ormanları, lavanta tarlaları ve kekik koruları, bölgenin zengin bitki örtüsünü oluştururken, ilkbahar aylarında çiçek açan yabani orkideler floristik çeşitliliği artırmaktadır. Bu bitki örtüsü, hem doğal koridor işlevi görür hem de lokal endemik türlerin korunmasına katkı sağlar.



Şekil 5. Marmaris-Hisarönü mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü

Fauna açısından, Marmaris Milli Parkı kapsamındaki Bördübet bölgesinde çok sayıda farklı tür grubu gözlenmektedir. Bölgede çeşitli böcekler, balıklar, memeliler, sürüngenler, amfibiler ve kuş türleri tespit edilmiştir. Bu durum, Bördübet'in ekosisteminin sağlıklı ve dengeli bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymakta ve bölgenin biyolojik çeşitlilik açısından stratejik önemini vurgulamaktadır. 2021 yılında yaşanan geniş çaplı orman yangınları, Bördübet ve Hisarönü bölgelerinde ekosistem üzerinde ciddi baskılar yaratmıştır. Yangın, başta kızılçam ormanları ve maki toplulukları olmak üzere bölgedeki habitat bütünlüğünü bozmuş, toprak yapısı ve su döngüsü üzerinde olumsuz etkiler doğurmuştur. Bu süreç, sürüngenler, memeliler ve kuşlar için geçici ve kalıcı yaşam alanı kayıplarına yol açarken, flora açısından bazı endemik ve hassas türlerin popülasyonlarında azalmalar gözlenmiştir.

Yangınların ve tohum serpmeye çalışmalarının ardından yapılan gözlemler, alanda doğal rejenerasyon süreçlerinin başladığını göstermektedir. Kızılçam ve maki alanlarında gözlenen çimlenme ve sürgünlenme olguları, ekosistemin kendini toparlama kapasitesini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, yangın sonrası sürecin ekolojik etkileri sadece bitki örtüsü ile sınırlı kalmamış, sucul ve karasal fauna türlerinin dağılımını da etkilemiştir. Özellikle küçük memeli türleri ve sürüngenler, yangın sonrası uygun mikrohabitat bulmakta zorlanmış, bazı türler bölgeyi geçici olarak terk etmek zorunda kalmıştır. Bu durum, Bördübet'in yangın sonrası ekosistem dinamiklerinin izlenmesinin ve uzun vadeli

restorasyon çalışmalarının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Yangın yönetimi ve ekosistem restorasyonu bağlamında, Bördübet bölgesinde uygulanacak stratejiler, sadece yangın sonrası ağaçlandırma ve bitki rejenerasyonu ile sınırlı kalmamalı, aynı zamanda habitat çeşitliliğinin korunmasına, toprak erozyonunun önlenmesine ve yerel flora-fauna popülasyonlarının izlenmesine odaklanmalıdır. Özellikle endemik bitki türleri ve hassas fauna gruplarının korunması, alanın biyolojik çeşitlilik değerinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, yangın sonrası ekosistem yönetimi planlarının bilimsel verilere dayalı olarak hazırlanması ve düzenli izleme programlarının yürütülmesi, Bördübet ve çevresindeki doğal yaşamın korunması için elzemdir.

1.4.5 Marmaris-Aksaz

Aksaz Bölgesi, Muğla il sınırlarında yer almakta olup, tipik Akdeniz iklimi özelliklerini göstermektedir. Bu iklim tipi, sıcak ve kurak yazlar ile ılıman ve yağışlı kışlarla karakterizedir. Yıllık ortalama sıcaklık 16–18°C arasında değişmekte olup, yaz aylarında sıcaklıklar 30°C'nin üzerine çıkabilirken, kış aylarında 10°C civarına düşmektedir. Yağışlar çoğunlukla kış aylarında yoğunlaşmakta olup, bu iklimsel koşullar bölgedeki bitki örtüsü ve ekosistem yapısının şekillenmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Flora açısından Aksaz Bölgesi, Akdeniz bitki örtüsünün tipik örneklerini barındırmakta ve yüksek biyolojik çeşitliliğe sahiptir. Yapılan floristik çalışmalarda çok sayıda bitki taksonu tespit edilmiş, endemik ve hassas türler bölge florasında yer almaktadır. Bölgede *Pinus brutia* (kızılçam), *Liquidambar orientalis* (sığla), *Pistacia terebinthus* (sandal), *Olea europaea* (zeytin), *Laurus nobilis* (defne), *Thymus vulgaris* (kekik), *Salvia officinalis* (adaçayı) ve *Ceratonia siliqua* (keçiboynuzu) gibi türler yaygın olarak bulunmaktadır. Ayrıca, *Muscari elmasii* (Elmas Sümbülü) gibi kritik tehlike altında ve endemik türler de alanın floristik zenginliğine katkı sağlamaktadır.



Şekil 6. Marmaris-Aksaz mevkiinde bulunan alanın uydu görüntüsü

Fauna açısından Aksaz Bölgesi, kara ve deniz ekosistemlerini kapsayan zengin bir biyolojik çeşitliliğe sahiptir. Ormanlık ve makilik alanlar, *Lutra lutra* (su samuru), *Rupicapra rupicapra* (yaban keçisi), *Caracal caracal* (karakulak) ve *Canis aureus* (çakal) gibi memeli türleri için önemli yaşam alanları sağlarken, deniz ekosistemi *Larus audouinii* (ada martısı), *Monachus monachus* (Akdeniz fokı) ve *Phalacrocorax aristotelis* (tepeli karabatak) gibi türler için kritik üreme ve beslenme alanı oluşturmaktadır.

Bölge, çeşitli çevresel tehditlerle karşı karşıyadır. Orman yangınları, habitat kaybı, kaçak ağaç kesimi ve erozyon ekosistemlerin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Özellikle 2022 yılında Aksaz Deniz Üssü yolu çevresinde meydana gelen yangın, maki ve kıvılcık toplulukları üzerinde önemli olumsuz etkilere yol açmıştır. Yangın sonrası yapılan gözlemler, bazı bitki türlerinin doğal rejenerasyon gösterdiğini ancak hassas ve endemik türlerin korunması için uzun vadeli izleme ve restorasyon çalışmalarının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Aksaz Bölgesinde uygulanacak ekosistem yönetimi ve yangın sonrası restorasyon stratejileri, biyolojik çeşitliliğin korunması ve ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

2.1 Materyal

Çalışmada materyal olarak, genel bilgilerde de verilen Muğla Orman Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde yer alan ve 2021 ile 2022 yıllarında gerçekleşen orman yangınlarından etkilenen alanlar kullanılmıştır (Tablo 1). Bu alanlarda yapılan çalışmalar kapsamında kızılçam (*Pinus brutia*) tohumları ve ecoDrone'lar materyal olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan materyaller, yangın sonrası ekosistem restorasyonu ve biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi amacıyla saha çalışmalarında ve pilot uygulamalarda temel araç ve kaynakları oluşturmaktadır.

Tablo.1 Çalışma Alan Bilgileri

ALAN BİLGİLERİ				
İŞLETME MÜDÜRLÜĞÜ	İŞLETME ŞEFLİĞİ	YER	TÜR	KONUM BİLGİSİ
Marmaris	Marmaris	Aksaz	Kızılçam	36°50'24"N 28°19'33"E
Milas	Milas	Karacahisar	Kızılçam	37° 04' 49.3800"N 027° 47' 25.4900"E
Köyceğiz	Köyceğiz	Yangı	Kızılçam	36° 59' 00.6200"N 028° 45' 00.2700"E
Marmaris	Hisarönü	Bördübet	Kızılçam	36° 51' 42.15"N 28° 04' 35.85"E
Köyceğiz	Akköprü	Sazak	Kızılçam	36° 59' 47.3700"N 028° 53' 21.3400"E
Marmaris	Bayır	Osmaniye	Kızılçam	36° 45' 37.6300"N 028° 10' 21.3200"E

2.1.1 ecoDrone'ların Genel Özellikleri

Havadan tohum serpmeye veya tohum atışı yöntemleri, silvikültürde doğal orman ekosistemlerinin çoğalma süreçlerini taklit ederek, çeşitli alanlarda orman ve ekosistem restorasyonunu desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu teknikler, yalnızca bozulmuş veya erişimi güç alanlarla sınırlı kalmayıp; yangından zarar görmüş, erozyona maruz kalmış, madencilik faaliyetleri sonucu tahrip olmuş, altyapı eksikliği nedeniyle ulaşımı zor, tarımsal veya kentsel baskıya uğramış, iklim krizi etkilerinin belirgin olduğu ve tohum kaynaklarının sınırlı olduğu geniş bir yelpazede uygulanabilir. Günümüzde insansız hava araçları (İHA'lar) ile yapılan havadan tohumlama, helikopter veya uçak gibi geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük maliyet, operasyonel esneklik ve güvenlik avantajı sunmaktadır.

Yapay zeka ve otonom navigasyon sistemleri ile entegrasyonu, hedef alanların hassas haritalanmasını, uygun ekim yoğunluğunun belirlenmesini ve çevresel koşullara duyarlı stratejik tohum atışlarını mümkün kılmakta; böylece restorasyonun etkinliği ve başarı

oranı önemli ölçüde artırılmaktadır. Bu yaklaşımlar, hem erişimi sınırlı hem de geniş ölçekli arazi çalışmalarında, silvikültürel ve ekosistem restorasyon faaliyetlerinin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini güçlendiren yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 7. Karla kaplanmış saha üzerindeki çalışmalardan bir görüntü

Özellikle büyük, dağlık, eğimli, yangınlar, erozyon, madencilik veya tarımsal baskı gibi nedenlerle bozulmuş alanlar, su tutma ve toprak koruma gereksinimi olan erozyon riski altındaki araziler, altyapı eksikliği nedeniyle manuel dikimin pratik olmadığı geniş kırsal alanlar, afet sonrası restorasyon alanları, kentsel yayılma baskısı altındaki çeper bölgeleri ile biyolojik çeşitliliğin yeniden tesis edilmek istendiği koridor veya ekolojik koruma alanları gibi çok yönlü kullanım sahaları bu teknolojiyle hedef alınabilir. Bu çeşitlilik, havadan tohum serpmenin, yalnızca klasik “orman yeniden tesis etme” değil aynı zamanda erozyon kontrolü, su rejimi iyileştirmesi, toprak stabilizasyonu, biyolojik çeşitlilik restorasyonu ve ekosistem rehabilitasyonu gibi bütünsel çevresel amaçlara hizmet edebileceğini göstermektedir. Modern sistemlerde, insansız hava araçlarının sunduğu esneklik; düşük işletme maliyetleri, hızlı uygulama, erişilemeyen veya riskli bölgelerde güvenlik, insan gücüne olan bağımlılığın azalması gibi avantajlarla birleşir. Daha da önemlisi; yapay zeka, hassas navigasyon (örneğin GPS/RTK), coğrafi veri analizleri, sensör temelli çevresel değerlendirme ve arazi haritalama gibi güncel teknolojik gelişmeler, bu yöntemin başarısını artıracak potansiyele sahiptir. Örneğin sensörler ve haritalama ile toprak yapısı, nem seviyesi, eğim ve topografya analiz

edilebilir; YZ algoritmaları bu analizleri kullanarak hedeflenen alanlarda optimum tohum dağılımını planlayabilir, tohum serpmeyi en uygun yoğunluk ve koordinasyonda gerçekleştirebilir. Böylece hem tohum israfı en aza indirgenir hem de ekim verimliliği ve çimlenme başarı oranı potansiyeli artar.

Elbette, bu yaklaşım doğaya tamamen müdahale anlamına geldiğinden, ekim öncesi arazi hazırlığı, uygun tür seçimi, tohumların yerel ekosistemle uyumu ve sonrasında izleme-denetim (monitoring) gibi adımlar titizlikle planlanmalıdır. Örneğin bir arazide toprak işlemesi gerekiyorsa, bu işlem hem maliyetleri artırır hem de doğal yapı üzerinde baskı oluşturabilir. Bu nedenlerle, drone ile tohum serpmeyi bir “ilk aşama veya destekleyici müdahale” olarak görmek, uzun vadeli ormancılık ve ekosistem restorasyonu stratejilerinde dengeli ve bilimsel bir yaklaşım gerektirir.

Ecording tarafından Türkiye’de üretilen ve kullanılan ecoDrone’lar, ortalama 1,3 metre kanat açıklığına sahip olup rüzgarlı ve yağışlı koşullarda dahi görev yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. 35 kilogramlık yük taşıma kapasitesine sahip bu dronelar, optimum koşullarda 5 dakika içinde yaklaşık 10.566 tohum topu atışı ve 11,57 kilogram tohum ekimi gerçekleştirebilmektedir. Üç kilometrekarelik bir alan içerisinde otonom uçuş gerçekleştirebilen dronelar, her uçuşun ortalama 15 dakika sürdüğü senaryoda, drone başına günlük ortalama 20 uçuş ile minimum 1.250.000 adet kızılçam tohumu serpmine imkan tanımaktadır. Ayrıca, dronelerin hız ve rota ayarlarının optimize edilmesi ile bu kapasitenin artırılması mümkündür; böylece geniş ölçekli alanlarda hızlı ve etkin ormanlaştırma ile ekosistem restorasyonu sağlanabilir.

Bu bağlamda, drone temelli bir havadan tohum/top atımı projesi (UNDP – DCRL) kapsamında Nepal’in Okhaldhunga ve Khotang ilçelerinde, dik eğimli, ormansızlaşmış ve çorak arazilerde seed-ball (tohum topu) kullanılarak hava yoluyla ağaçlandırma gerçekleştirilmiştir. Tohumlar, doğal gübre ve besin maddeleriyle birlikte kapsüllere yerleştirilmiş, özelleştirilmiş insansız hava araçları ile hedef alanlara bırakılmıştır. Proje raporları bu yöntemin, zor coğrafi koşullardaki arazilerde -ulaşımı güç alanlar, eğimli yamaçlar, geniş bozulmuş sahalar gibi- düşük maliyetli, geniş kapsamlı ve sürdürülebilir bir orman-restorasyon aracı olabileceğini göstermektedir. Bu örnek, drone-temelli tohum serpme stratejisinin, geleneksel dikim yöntemlerinin uygulanmasının zor olduğu durumlarda hızlı, etkili ve ekonomik bir alternatif sunduğunu kanıtlamaktadır (UNDP Nepal DCRL Projesi, 2024).

Türkiye, coğrafi çeşitlilik, eğimli araziler, yangına ve kuraklığa duyarlılık ile özellikle Ege ve Akdeniz bölgelerinde komşu ekosistemlere sahip olması nedeniyle, drone-temelli silvikültür uygulamaları açısından dikkat çekici bir potansiyele sahiptir. Muğla, İzmir, Antalya gibi illerde, çok sayıda kızılçam ormanı, maki formasyonu, yangın sonrası bozulmuş alan, dik yamaç ve ağır ulaşım kısıtlılığı bulunan sahalar mevcuttur. Bu tür bölgelerde drone ile havadan tohumlama, geleneksel dikim yöntemlerine kıyasla daha hızlı, düşük maliyetli ve geniş ölçekli bir ormanlaştırma yöntemi sunabilir.

Uygulama alanları arasında yangın sahalarının rehabilitasyonu, erozyon riskli alanların yeşillendirilmesi, biyolojik çeşitliliğin yeniden tesis edilmesi ve karbon yutaklarının artırılması gibi kritik ekolojik hedefler yer almaktadır. Bununla birlikte, potansiyel başarının güvenceye alınabilmesi için yerel ekosistem uyumu, uygun tür seçimi, sürdürülebilir tohum kaynakları, toprak analizi ve ekim sonrası bakım ile izleme-denetim planlarının dikkate alınması gereklidir. Aksi halde, yalnızca ekim yapılmış olması yeterli olmayacak; yüksek oranda tohum kaybı, düşük tutunma ve ekosistem açısından olumsuz etkiler riski devam edecektir.

Sonuç olarak, drone-temelli havadan tohumlama ve silvikültür yöntemleri, dünya genelindeki pilot uygulamalar, teknik gelişmeler ve ekolojik gereklilikler göz önünde bulundurulduğunda, geleneksel ormancılığı tamamlayan; ancak özellikle kriz, erozyon, yangın veya erişim zorluğu gibi koşulların bulunduğu sahalarda ekonomik, çevik ve ölçeklenebilir bir restorasyon aracı olarak değerlendirilebilir. Türkiye özelinde ise, Ege-Akdeniz kuşağı gibi hassas ve yüksek riskli ekosistemlerde, bu yöntem hem orman varlığını artırma hem de iklim krizi, biyoçeşitlilik kaybı ve arazi bozulumu gibi çok boyutlu tehditlere karşı etkin bir strateji sunma potansiyeline sahiptir.

2.1.2 ecoDrone Re-Sense Genel Özellikleri

Doğal ekosistemler, kendi dinamikleri içerisinde çok sayıda değişken ve karmaşık etkileşim barındırmakta olup, bu durum ormanlaştırma ve ekosistem restorasyonu çalışmalarında verimlilik ve başarı ölçütlerinin genellikle sınırlı alanlarda geçerli olmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, ecoDrone'lar ile yürütülen silvikültür uygulamalarının etkinliğini artırmak ve optimum tohumlama koşullarını belirlemek amacıyla Ecording tarafından geliştirilmiş olan ecoDrone Re-Sense yapay zeka modeli tasarlanmıştır. Modelin temel hedefi, çalışma alanlarındaki tüm çevresel ve operasyonel değişkenleri toplayarak verimli bir ekim algoritması oluşturmak ve bu algoritmayı geniş

alanlarda uygulayarak silvikültür çalışmalarının etkinliğini artırmaktır. ecoDrone Re-Sense tarafından geliştirilen algoritmalar, çimlenme verimliliğini etkileyen faktörlerin sistematik olarak belirlenmesine imkan tanır. Bu sayede, tohumların uygun ekim zamanları ve iklim koşullarında serilmesi, tohumların toprağa verimli şekilde ulaştırılması ve çimlenme engellerinin açık biçimde saptanması mümkün hale gelir. Her bir tohum türü için, ilgili ekim bölgesinin özgün arazi ve ekolojik koşullarına uygun parametrelerin belirlenmesi ile maksimum çimlenme başarısı sağlanabilir. Bu yaklaşım, aynı zamanda minimum tohum kullanımı, düşük işgücü ihtiyacı ve azalan maliyetlerle ekim faaliyetlerinin yürütülmesine olanak verir. Re-Sense modülü, ecoDrone'lara entegre sensörler ve dış veri kaynakları aracılığıyla saha parametrelerini toplamakta; bu veriler makine öğrenmesi teknikleriyle analiz edilerek geniş orman alanlarının restorasyonunun veriye dayalı, otonom ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Model, bugüne kadar ölçümü yapılmayan veya yapısal olarak takip edilemeyen tüm çevresel değişkenlerin tohum çimlenmesine etkisini değerlendirir ve etkileri matematiksel bir çerçevede anlamlandırır. Böylece, doğal sistemlerdeki büyük veri, silvikültür uygulamalarında doğrudan karar destek mekanizması olarak kullanılabilir. Sonuç olarak, ecoDrone Re-Sense ile geliştirilen yapay zeka temelli ekim modeli, orman varlığının artırılması, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi ve ekosistem restorasyonunun optimize edilmesinde teknolojinin kritik rolünü ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, iklim krizine karşı veriye dayalı, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir bir ekosistem restorasyon metodolojisi sunarak, doğal alanların yönetimi ve geleceğinin şekillendirilmesine önemli katkılar sağlayabilir.

2.2 Yöntem

2.2.1 Tohum Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan tohumların ölçülen ve tespit edilen özellikleri; tohum ağırlığı (1000 tane ağırlığı), doluluk oranı, nem içeriği, çimlenme yüzdesi, çimlenme hızı ve ortalama çimlenme süresidir. 1000 tane ağırlığının belirlenmesinde, rastlantısal olarak seçilen 100'lük 8 örnekten ortalama ağırlık ($\bar{X}$) hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Doluluk oranı ise, tohum ağırlığı ölçülen 100'er adetlik üç tohum grubundaki tohumların tek tek kesilerek belirlenmesi ile saptanmıştır. Normal tohum analizlerinin yanı sıra, çalışma kapsamında tohum kaplama metoduna ilişkin çimlenme deneyleri de yürütülmüştür.

Çalışmanın başlangıcında, tohum kaplama metoduna ilişkin deneylerin sera, fidanlık ve arazi koşullarında yapılması, laboratuvar ortamında ise yalnızca kontrol tohumlarının çimlendirme deneylerinin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Ancak uygulama sürecinde laboratuvar ortamında da tohum kaplama deneylerinin yürütülmesine karar verilmiş ve bu değişiklik doğrultusunda kullanılacak kaplanmış tohum sayıları, deney ortamlarının kapasitesi ve saha koşullarına göre yeniden düzenlenmiştir.

Tohumların çimlenme kalitesini belirlemek amacıyla çimlenme yüzdesi, çimlenme hızı ve ortalama çimlenme süresi ölçülmüştür. Bu değerler ve kullanılan hesaplama yöntemleri, kaplanan tohumların etkinliğinin değerlendirilmesinde de kullanılmıştır. 1000 tane ağırlığı (TA) ise rastlantısal olarak alınan 100'lük 8 örnekten hesaplanan ortalama ağırlık aşağıdaki formüller ile birlikte hesaplanmaktadır;

$$1000 \text{ TA} = 10 \cdot \bar{X} \quad \& \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

n= yineleme, X_i = yinelemelerin birim gram ağırlıkları (100 adet tohum için) ve $\bar{X}$ = ortalama 100 tane ağırlığıdır.

Çimlenme Yüzdesi: Tohumun çimlenme kabiliyeti çimlenme yüzdesi ile ifade edilir. Çimlenme yüzdesi aşağıdaki formüllerde ifade edildiği gibi belirlenmiştir.

$$\text{ÇY} = \frac{\text{ÇS}}{\text{ETS}} \times 100$$

ÇY: Çimlenme Yüzdesi

ÇS: Çimlenme Sayısı

ETS: Ekilen Tohum Sayısı

Çimlenme Hızı: Tohumların çabuk çimlenme kabiliyetine çimlenme hızı denir. Bu değer ilk 7 gün içinde çimlenen tohumların yüzde olarak ifadesidir. Fakat hassas hallerde 4, 7 ve 10. günde çimlenen tohumların sayısına göre bulunur. Bu çalışmada ilk 10 günde çimlenen tohumların oranı dikkate alınmıştır.

Ortalama Çimlenme Süresi: Elde edilen çimlenme oranlarının ortalama olarak kaç günde meydana geldiğinin ifade edilmesinde kullanılır.

Çimlenmenin geniş yapraklı türlerde ibreli türlere oranla daha geç başlaması ve daha geniş zaman aralığında meydana gelmesi nedeniyle, bu türlerde çimlenme hızının

ifadesinde de kullanılmaktadır. Ortalama çimlenme süresi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (Czabator, 1962; Edmond & Drapala, 1958; Ellis & Roberts, 1981).

$$O\dot{C}S = \frac{(n_1 \times t_1) + (n_2 \times t_2) + (n_3 \times t_3) + \dots + (n_i \times t_i)}{T}$$

OÇS : Ortalama Çimlenme Süresi

$n_1, \dots, n_i$: n. Günde Çimlenen Tohum Sayısı

$t_1, \dots, t_i$: Çimlenme Deneyinin Başlamasından İtibaren Çimlenme Kontrolünün Yapıldığı Zamana Kadar Geçen Gün Sayısı

T : Toplam Çimlenme Sayısı

2.2.2 Tohum Kaplama Malzemeleri, Oranları ve Boyutları

Çalışmanın ilk fazında, ekim bölgelerinden temin edilen orman toprağı (OT) ile organik madde açısından zengin toprak (ZT) kullanılmış ve malzeme oranlarına göre üç farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımların etkinliğini değerlendirebilmek amacıyla, orman toprağı ve zengin toprak kullanılarak tohum topları oluşturulmuştur. Toplam beş farklı içeriğe sahip tohum topu hazırlanmış ve hazırlanır hazırlanmaz çimlenme deneylerine başlanmıştır. Tohum kaplama malzemesi olarak OT ve ZT kullanılmıştır. Tohumlar, çaplarına göre büyük ve küçük olmak üzere iki grupta sınıflandırılmıştır. Hazırlanan tohum toplarının boyutları ve kuru ağırlıkları belirlenmiş olup, büyük tohumların çapları 11–13 mm, küçük tohumların çapları ise 5–7 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Büyük tohumların çap ölçümleri tek yönlü olarak gerçekleştirilirken, küçük tohumların ölçümleri iki yönlü (çap ve boy) olarak yapılmıştır. Tüm ölçümler milimetrik dijital kumpas kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tohum kaplama malzemesi oranları;

A % 100 ZT

B % 100 OT

C % 75 ZT + % 25 OT

Ç % 50 ZT + % 50 OT

D % 25 ZT + % 75 OT



Şekil 8. Tohum kaplama yönteminin çimlenme deneylerinden bir görsel

Çimlendirme deneyleri laboratuvar ortamında iklimlendirme dolabında 22 °C’de, sera ortamında ise yüksek ekim yastıklarında 20–24 °C’de gerçekleştirilmiştir. Tohumlar kaplandıktan sonra laboratuvar ortamında şeffaf plastik kapaklı saklama kaplarında, sera ortamında ise polietilen tüplerde çimlenmeye alınmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan ön denemelerde kaplanan tohumların petri kapları içerisinde erken kurduğu gözlemlenmiş ve bu durumu önlemek amacıyla plastik kapaklı sızdırmaz saklama kapları kullanılmıştır. Çimlendirme deneyinde kaplar içerisine 1–2 cm kalınlığında elenmiş torf konmuş ve tohum topları bu ortam içerisinde çimlenmeye bırakılmıştır. Laboratuvar deneylerinde, her bir tür ve karışım için tekrarda 25 adet olmak üzere toplam 100 adet tohum topu kullanılmıştır. Sera ortamında çimlendirme ortamı olarak, orman toprağı, torf, perlit ve yanmış koyun gübresi 5:1:1:1 oranında karıştırılarak hazırlanan karışım kullanılmıştır. Aynı karışım, açık alan ekimlerinde de uygulanmıştır. Açık alan çimlendirme deneyleri 45 derin gözlü tepsi saksılarda gerçekleştirilmiş ve her bir gözde bir adet tohum yerleştirilmiştir. Deneylerde, laboratuvar ve açık alan ortamlarında dört tekrarlı, sera ortamında ise üç rastlantı bloğu deneme deseni uygulanmıştır. Çimlendirme deneyleri başladıktan sonra 7., 10., 14., 21. ve 28. günlerde, ardından haftada bir kez kontrol edilerek çimlenmiş tohum sayımları yapılmıştır.

2.3 Verilerin Değerlendirilmesi

Değerlendirmelerde, tohum kaplama malzemesi olarak kullanılan karışımların tohumların çimlenme yüzdesi, çimlenme hızı ve ortalama çimlenme süresi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla SPSS 19 istatistik paket programı kullanılarak tek yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Tohum kaplama karışım oranlarının ANOVA sonucunda etkili olduğunun belirlenmesi durumunda, en iyi sonucun hangi karışım malzemesinden elde edildiğini tespit etmek için Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır ($\alpha \leq 0,05$).

2.4 ecoDrone ve ecoDrone Re-Sense ile Çalışma Metodolojisi

Re-Sense projesi, analiz, ekim ve izleme olmak üzere üç ana fazdan oluşan bütünsel bir ekosistem restorasyon modelidir. İlk faz olan analiz aşamasında, restore edilmesi hedeflenen ekosistemden elde edilen uydu görüntüleri, topoğrafik haritalar ve saha sensörleri aracılığıyla toplanan çevresel veriler yapay zeka tabanlı algoritmalar tarafından işlenir. Bu veriler, toprak özellikleri, eğim, nem durumu, ışık koşulları ve mevcut bitki örtüsü gibi faktörleri dikkate alarak, tohum ekimi için en uygun mikrohabitatların belirlenmesini sağlar. Analiz fazı, yalnızca ekim alanlarının optimizasyonunu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekosistem restorasyonunda başarıyı etkileyen çevresel değişkenlerin sistematik olarak tanımlanmasına da imkân tanır. İkinci faz olan ekim sürecinde, Re-Sense'in analiz çıktıları doğrultusunda belirlenen uçuş rotaları otonom şekilde oluşturulur. ecoDrone'lar, önceden tanımlanmış koordinatlarda kızılcım tohumlarını optimum yoğunlukta atar. Bu süreçte tohumların dağılımı, ekim alanının topoğrafik ve ekolojik özelliklerine göre ayarlanır. İHA tabanlı uygulamalar, geleneksel ağaçlandırma yöntemlerine kıyasla hem hız hem de maliyet açısından önemli avantajlar sunar. Özellikle erişimin güç olduğu, eğimli veya kayalık arazilerde, yangın sonrası bozulmuş alanlarda ve geniş ölçekli ekim çalışmalarında, drone tabanlı sistemler etkin ve ölçeklenebilir bir çözüm sağlar. Üçüncü faz olan izleme aşamasında ise ekim sonrası alanlar düzenli aralıklarla takip edilir. Tohumların çimlenme oranları, fidanların tutunma başarısı ve ekosistemin genel iyileşme düzeyi, hem sensör verileri hem de sahada yapılan gözlemsel çalışmalar aracılığıyla değerlendirilir. Re-Sense modeli, izleme verilerini yapay zeka algoritmaları ile analiz ederek sonraki ekim ve bakım stratejilerini optimize eder. Bu sayede ekim süreci sürekli olarak veriye dayalı bir biçimde yönlendirilir ve restorasyon başarısı artırılır. Bütünsel metodoloji, yalnızca yangın sonrası bozulmuş

alanlar için hızlı bir ekim çözümü sunmakla kalmaz; aynı zamanda sürecin bilimsel ve ölçülebilir bir temele dayalı olarak yönetilmesini sağlar. Re-Sense, ekosistem restorasyonunda klasik yöntemlerin sınırlılıklarını aşarak; mikrohabitat optimizasyonu, kaynakların etkin kullanımı, otomasyon ve veri temelli karar mekanizmalarını bir araya getirir. Bu yaklaşım, doğal sistemlerin simülasyonu yoluyla ekosistemlerin yeniden yapılandırılmasını mümkün kılar ve sürdürülebilir restorasyon hedeflerinin daha güvenilir bir biçimde gerçekleştirilmesine katkı sağlar. Ek olarak, Re-Sense modeli ile entegre edilen yapay zeka algoritmaları; farklı tohum türleri, iklim koşulları ve arazi tipleri için özel ekim stratejileri geliştirebilir. Bu sayede, belirli bir ekosistemdeki tohum başarısı ve fidan gelişimi sürekli olarak optimize edilir. Sistem, uzun vadede ekosistem sağlığını ve biyolojik çeşitliliği artırmak için planlı müdahaleler yapabilme yeteneğine sahiptir. Dolayısıyla, ecoDrone ve Re-Sense kombinasyonu, yalnızca teknik bir araç değil; aynı zamanda ekosistem restorasyonu için bütünsel, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir stratejik platform olarak değerlendirilebilir.

2.4.1 Analiz

Gerçekleştirilmesi planlanan ormanlaştırma ve ekosistem rehabilitasyonu çalışmalarının başarısının ölçülmesi, uygulanacak yöntemlerin etkinliğinin değerlendirilmesi ve gerekli iyileştirmelerin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, ormanlaştırılması ve biyolojik çeşitliliğin oluşturulması hedeflenen ekosistemlerin doğru bir biçimde tanınması, vejetasyon dönemleri içerisindeki mevsimsel değişimlerin dikkate alınması ve bölge arazisinin fiziki koşullarının ayrıntılı şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Ölçüm süreçleri, yalnızca arazi topoğrafyası ve toprak özelliklerini değil; aynı zamanda fidan sayımı, mevcut bitki örtüsünün sınıflandırılması, bitki örtüsü segmentasyonu ve saha sensörlerinden elde edilen çevresel verilerin toplanmasını da kapsamaktadır. Bu çok katmanlı veri toplama yaklaşımı, restorasyon çalışmalarının hem bilimsel olarak doğrulanabilir hem de tekrarlanabilir olmasını sağlamaktadır.

Re-Sense modülü, kızılçam tohumlarının ekim başarısını artırmaya yönelik olarak geliştirilmiş yapay zeka tabanlı bir analiz algoritması ile çalışmaktadır. Algoritmanın temel amacı, sahaya bırakılacak tohumların çimlenme ve tutunma olasılığını maksimize edecek mikrohabitat noktalarının belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda algoritma, farklı veri kaynaklarından elde edilen çok katmanlı çevresel girdileri sistematik olarak

işlemektedir. Kullanılan veri girdileri arasında yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden türetilen arazi örtüsü haritaları, dijital yükseklik modelleri üzerinden hesaplanan eğim ve bakı değerleri, saha sensörleri aracılığıyla ölçülen toprak nemi ve sıcaklık parametreleri ile yangın sonrası alanlarda toprak organik madde miktarı ve yüzey örtüsü yoğunluğu gibi parametreler yer almaktadır. Toplanan veriler, makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırma ve kümeleme algoritmaları kullanılarak analiz edilmekte ve her bir alt piksel ölçeğinde habitat uygunluk indeksleri oluşturulmaktadır. Bu indeksler, tohum bırakılacak alanların belirlenmesinde olasılık tabanlı karar mekanizmasına entegre edilmekte ve mekansal dağılım ile tohum yoğunluğunu optimize eden bir ekim stratejisi geliştirmektedir. Böylece Re-Sense algoritması, yalnızca uygun habitatları tanımlamakla kalmamakta, aynı zamanda ecoDrone uçuş rotalarının dinamik olarak planlanmasına ve tohum bırakma sıklığının çevresel koşullara göre optimize edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu metodoloji, sahadaki heterojen çevresel koşulların dikkate alınmasını mümkün kılmakta ve özellikle yangın sonrası toprak yapısında gözlenen düzensizliklerin ekim başarısına etkisini minimize etmeyi hedeflemektedir. Ayrıca, algoritmanın adaptif yapısı sayesinde, farklı iklim koşulları, arazi tipleri ve ekosistem varyasyonlarına uygun ekim stratejileri geliştirilebilmektedir. Bu durum, restorasyon çalışmalarının ölçeklenebilirliğini artırmakta, maliyet etkinliğini sağlamaktadır ve uzun vadede ekosistem sağlığının sürdürülebilir bir biçimde iyileştirilmesine katkı sunmaktadır.

2.4.2 Ekim Sistematiği

2.4.2.1 Bitki Örtüsü Sınıflandırma ve Coğrafi Yapı Sınıflandırması

Tohum ekimi yapılması planlanan arazinin ön keşfi, restorasyon çalışmalarının başarısını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir. Bölgenin belirlenmesi sürecinde, mevcut flora ve tür çeşitliliği ayrıntılı şekilde incelenir ve orijin türler tespit edilir. Tohum ekimi öncesinde arazi içerisinde belirlenen kriterlere göre farklı noktalardan toprak numuneleri alınır ve toprağın fiziksel ve kimyasal yapısı analiz edilir. Toprak yapısının belirlenmesi, tohumların toprakla doğru şekilde buluşması ve çimlenme potansiyelinin maksimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 9. Re-Sense çalışma prensibinin canlandıran örnek bir görsel

Buna ek olarak, bölgede mevcut türlerin davranışları, iklim koşullarına adaptasyonları ve çimlenme ortamları, ekim çalışmalarının başarısını belirleyen önemli biyolojik ve çevresel parametrelerdir. Arazi üzerindeki bitki örtüsünün yaş sınıflandırması ve yapısal analizi (bonitet) de ekosistem niteliğinin ve potansiyel restorasyon başarısının değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken unsurlardandır. Çimlenen bireylerin belirli bir yaştan sonra uygulanacak seyreltme kesimleri, saf veya karışık meşcere oluşumları, karbon depolama kapasitesi ve gövde çapı artışı gibi ölçümler de restorasyonun uzun vadeli etkinliğini belirleyen ekolojik göstergelerdir. Arazi eğimi, bakışı ve ışık alma koşulları da çimlenme ve genç fidan gelişimi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu nedenle hem tohumlama hem de izleme aşamalarında, bölgedeki ışık koşullarının ve mikrohabitat özelliklerinin takip edilmesi başarı açısından kritiktir. Örneğin, Akdeniz Bölgesi'nde iklim koşullarına uyum sağlamış ve yüksek ışık gereksinimi olan Kızılçam (*Pinus brutia*) yaygın bir şekilde bulunurken, Karadeniz Bölgesi'nde yarı gölge ortamları tercih eden Doğu Ladini (*Picea orientalis*) baskın tür olarak gözlemlenmektedir. Toprak numunelerinin laboratuvar ortamında incelenmesi haricindeki tüm analizler, ecoDrone'lar aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Arazi üzerinde belirli periyotlarla yapılan otonom görüntüleme uçuşları sayesinde, yüksek çözünürlüklü veriler üzerinden bitki örtüsü sınıflandırması, mevcut tür dağılımı ve habitat uygunluk analizleri yapılabilir. Bu yaklaşım, özellikle yüzlerce hatta binlerce hektarı bulan geniş alanlarda ekim ve izleme çalışmalarının ölçeklenebilirliğini artırmakta ve manuel saha çalışmalarıyla karşılaşılan lojistik ve zaman kısıtlarını minimize etmektedir. Sonuç

olarak, drone tabanlı gözlem ve veri toplama teknikleri, restorasyon projelerinin veriye dayalı, sistematik ve etkin bir şekilde planlanmasına olanak tanıyarak, geniş ölçekli ekosistem rehabilitasyon çalışmalarında kritik bir avantaj sağlamaktadır.

2.4.2.2 Segmentasyon

Tohum ekimi yapılması planlanan arazinin taş yoğunluğunun hesabı, ekilecek olan tohum miktarının belirlenmesinde öncelikli rol oynamaktadır. Türlerin özelliklerine göre bazı istisnalar bulunsa da, ekilen tohumların mümkün olduğunca toprak ile temas kurabilmesi en önemli unsurdur. Bu nedenle zemin üzerindeki toprak alanlarının ve genel alan üzerindeki toprak oranının bilinmesi, ekim başarısını doğrudan etkilemektedir. Mevcut saha keşfi sonuçlarına göre, ekim bölgesindeki zeminin toprak/taş oranı, bölge etrafındaki sulak arazilerin konumları ve tüm alan içerisindeki yoğunlukları gibi parametreler amenajman planlarına dahil edilmektedir (Boydak vd., 2003; Şevik & Ertürk, 2015). Örneğin bir çalışmada Kızılçam (*Pinus brutia*) orijinlerinin çimlenmesi üzerine ozmotik stresin etkisi incelenmiş, PEG-6000 eriyiği kullanılarak 0 ile -8 bar arasında stres düzeyleri oluşturulmuştur. Tohumlar $20 \pm 0,5$ °C sıcaklıkta, 12 saat ışık (1000 lüks) altında 28 gün boyunca çimlendirilmiştir. Ozmotik potansiyelin azalmasıyla çimlenme yüzdesi, çimlenme hızı ve çimlenme değeri tüm orijinlerde önemli ölçüde azalmış, ancak orijinler arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Yağışlı bölgelerden elde edilen orijinler yüksek strese karşı daha duyarlı olurken, az yağışlı bölgelerden gelen orijinler özellikle yüksek stres derecelerinde (-6 bar) daha yüksek çimlenme oranları göstermiştir. Bu farklılıklar, kuraklığın etkisiyle oluşan intraspesifik varyasyonlar ve doğal seleksiyon süreçlerinin bir sonucu olarak yorumlanmaktadır (Boydak vd., 2003; Şevik & Ertürk, 2015).

Bonitet, bir meşcerenin verim gücünü gösteren bir ölçüttür; iyi bonitet yüksek verim, kötü bonitet düşük verim anlamına gelir ve genellikle beş sınıfa ayrılır. Bölgedeki meşcerelerin bonitet sınıflarının belirlenmesi, ekim yapılan alandaki başarı durumunu doğrudan etkilemektedir. Meşcerenin bonitet sınıfının doğru tespit edilmesi, planlanan meşcerenin potansiyel bonitetinin tahmin edilmesi, ekilecek tohum miktarı ve tohumların çimlenme hızı gibi parametrelerin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Değişik bonitet sınıflarındaki alanlarda farklı verimler elde edilmektedir; bonitet iyileştikçe meşcereden alınan verim artmaktadır. Örneğin Türkiye'deki Kızılçam ormanları için idare süresi 60 yıl kabul edildiğinde, Alemdağ Kızılçam Normal Hasılat Tablosu'nda 60 yaş için yapılan

incelemelerde, iyi bonitetteki alanların ortalama bonitetli alanlara göre üç kat daha fazla odun verimi sağladığı görülmüştür (Boydak vd., 2003).

2.4.2.3 Saha Analizlerinin Sistematiği

İnsansız hava araçları (İHA) üzerine konumlandırılacak ve uçuş sırasında yere karşı 90° açıyla görüntü sağlayan yüksek çözünürlüklü kameralar ile gerçekleştirilecek olan izleme uygulaması, ekim sonrası başarı değerlendirmesinde önemli bir bileşen olarak planlanmaktadır. İHA'lar, arazi özelliklerine göre belirlenen uçuş hızlarında seyrederek geniş alanların yüksek çözünürlüklü fotoğraflarını kaydeder. Bu fotoğraflar, üç boyutlu mozaikleme (photogrammetric mosaicking) teknikleriyle birleştirilerek saha koordinatlarıyla eşleşen haritalar (geo-referanslı ortomozikler) oluşturulur (Colomina & Molina, 2014). Oluşturulan bu mozaik görüntüler üzerinde, çevrimdışı analizler aracılığıyla tohum ekimi sonrası çimlenen bireylerin tespiti yapılır; bu analizde nesne tanıma (object detection) algoritmaları uygulanır (Onishi & Ise, 2018).

Görüntüler üzerindeki her bir nesne (yeni filiz, fidan veya genç bitki) için geolocation (koordinat), pose ve size-estimation (boyut/tip tahmini) bilgisi çıkarılır. Size estimation (özellikle ekim sonrası gelişimin erken dönemlerinde) bitkinin kök-filiz tutunumu, boy/taç gelişimi gibi büyüme dinamiklerini izlemek açısından kritik bir parametredir (Ataş & Talay, 2022). Mozaiklenmiş görüntü üzerinde tespit edilen tüm bireylerin sayımı yapılır; her bir bitkinin koordinatı ve boyut bilgisi kaydedilir. Bu veriler, saha dağılımını görselleştiren “sıcaklık haritası” (density/distribution heat map) oluşturmak için kullanılabilir. Böylece, ekim sonrası nüfus yoğunluğu, başarı oranı ve mekânsal dağılım görselleştirilerek izleme süreci sistematik ve niceliksel hale gelir (Movchan et al., 2025). UAV-tabanlı uzaktan algılama ve fotogrametri teknikleri, ormancılık, ekosistem restorasyonu ve biyolojik çeşitliliğin izlenmesi alanında son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Standart RGB kameralar ile yapılan çalışmalarda, ağaç tür sınıflandırması ve birey sayımı (tree-crown segmentation and classification) başarıyla uygulanabilmiş; bu da nispeten düşük maliyetli ve ölçeklenebilir bir metodoloji sunmuştur (Onishi & Ise, 2018). Daha yeni çalışmalarda, RGB ve IR (kızılötesi) kanalları ile derin öğrenme temelli nesne tanıma modelleri geliştirilmiş; düşük görüş, duman veya sis gibi koşullarda bile yüksek doğrulukla bireylerin tespiti sağlanmıştır (Movchan et al., 2025).

Tüm bu bilgiler ışığında, önerilen metodoloji (yüksek çözünürlüklü kamera, geo-referanslı mozaik oluşturma, nesne tanıma, size estimation ve mekansal analiz)

yalnızca ekim sonrası çimlenme ve fidan tutunma başarısını izlemekle kalmaz; aynı zamanda geniş ölçekli arazi parçalarında zaman içinde izleme (multi-temporal monitoring), fidan yoğunluğu analizi, meşcere gelişim dinamiği ve biyolojik çeşitlilik dönüşümü gibi kriterlerin de objektif ve tekrarlanabilir bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanır (Colomina & Molina, 2014; Ataş & Talay, 2022). Bu da geleneksel saha araçlarının lojistik, işgücü ve zaman maliyetlerini azaltırken, ekosistem restorasyonunun bilimsel, sayısal ve izlenebilir temeller üzerine inşa edilmesini sağlar.

2.4.3 İzleme ve Fidan Sayımı

Türkiye’de ve dünyada ekim sonrası fidanların gelişimini takip etmek için kullanılan geleneksel fidan sayım yöntemi, Orman Genel Müdürlüğü’nün Silvikültürel Uygulamaların Teknik Esasları isimli 317 numaralı tebliğ içerisindeki fidan sayım yöntemidir. Bu yöntemde alan içerisinde homojen olarak insan gücü ile belirli aralıklara çiteler çakılır ve her çita etrafındaki 2 metrekarelik alan içerisinde görülen fidanlar sayım tutanaklarına işlenir. Hesaplama yöntemi ile de kısıtlı örnek alanlar üzerinden tüm alanın çimlenme başarısı tahmin edilmeye çalışılır. Bu yaklaşımın; işgücü ve zaman maliyeti, düşük doğruluk ve ölçeklenme sorunları, karbon ayak izi ve sürdürülebilirlik eksiklikleri göze çarpar. Geniş alanlarda yapılan çita bazlı sayımlar yoğun iş gücü gerektirir. Bir hektarlık alanın dahi sayılması, saha koşullarına bağlı olarak saatler sürebilir. Bu durum maliyetleri artırırken, insan kaynağının verimli kullanılmasını da engellemektedir. Geleneksel yöntem örnekleme temellidir. Sınırlı sayıda noktadan elde edilen veriler, tüm alanın başarı durumunu yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir. Bu durum özellikle yüzlerce hektarlık alanlarda hatalı tahminlere yol açabilmektedir. Sahada yoğun personel hareketliliği, arazi araçlarının kullanımı ve tekrarlanan operasyonlar, gereksiz karbon salımına yol açar. Bu da doğrudan ekolojik kazanımları azaltmaktadır. İklim krizinin hızla ilerlediği ve etkisini gün geçtikçe artırdığı bir noktada, daha sık ve daha geniş ölçekli ölçüm ve izleme yapılması gerekirken mevcut yöntem bu ihtiyacı karşılayamamaktadır.

Geleneksel ormancılık çalışmalarında fidan sayım tekniklerinde, ekim alanı içerisinde her bir 2 metrekarede 1 adet çimlenmiş tohum tespit edilmesi çimlenme başarısını belirlemektedir. Geleneksel sayım tekniği kapsamında, ekim alanı içerisinde homojen olmak koşulu ile kazıklar dikilmektedir ve bu kazıklar etrafındaki her 2 metrekarelik alan içerisinde çimlenme olup olmadığı gözlemlenmektedir. eCORDING, Re-Sense projesinin ölçüm fazında; fidan sayım tekniğini ecoDrone’ların yapay zeka destekli şekilde

kullanımı üzerine otonom bir şekilde uygulamaktadır. ecoDrone'lar, fidan sayımı yapılması planlanan araziye görüntüleme gereçlerini kullanarak taramaktadır ve elde edilen görüntüler sayesinde araziye daha erişilebilir bir hale getirmektedir. Arazinin burada oluşturulan dijital modeli üzerinde mevcut sistemin uyarlanması sayesinde teknolojik bir çözüm oluşturulmuş olur.



Şekil 10. Ekim sonrası fidan sayımı için hava fotoğraflarından biri

ecoDrone Re-Sense ile fidan sayımının gerçekleştirilmesinde, her bir hektar içerisindeki 2 metrekarelik alanlar içerisinde gerçekleşen çimlenmeler dikkate alınır. Kızılçam ve Karaçam türlerinin her ikisinde de her bir hektar içerisine minimum 5 kilogram tohum atışı gerçekleştirilmektedir. Bu miktar doğrultusunda; Kızılçam türünde bir hektar içerisine minimum 80.000 (16.000 tohum x 5 KG) adet tohum atışı gerçekleştirilmektedir. Bir hektarın 10.000 metrekare olması sonucunda, bir hektar içerisinde her biri 2 metrekare büyüklüğünde 5.000 adet alanın her biri içerisinde en az bir adet çimlenmiş tohum aranır.

Bu nedenlerle Re-Sense, Orman Genel Müdürlüğünün geleneksel fidan sayım yöntemini drone tabanlı görüntüleme ve yapay zeka destekli analizlerle taklit eden; daha hızlı, maliyet etkin, ölçeklenebilir ve düşük karbon ayak izine sahip bir çözüm olarak geliştirilmiştir.

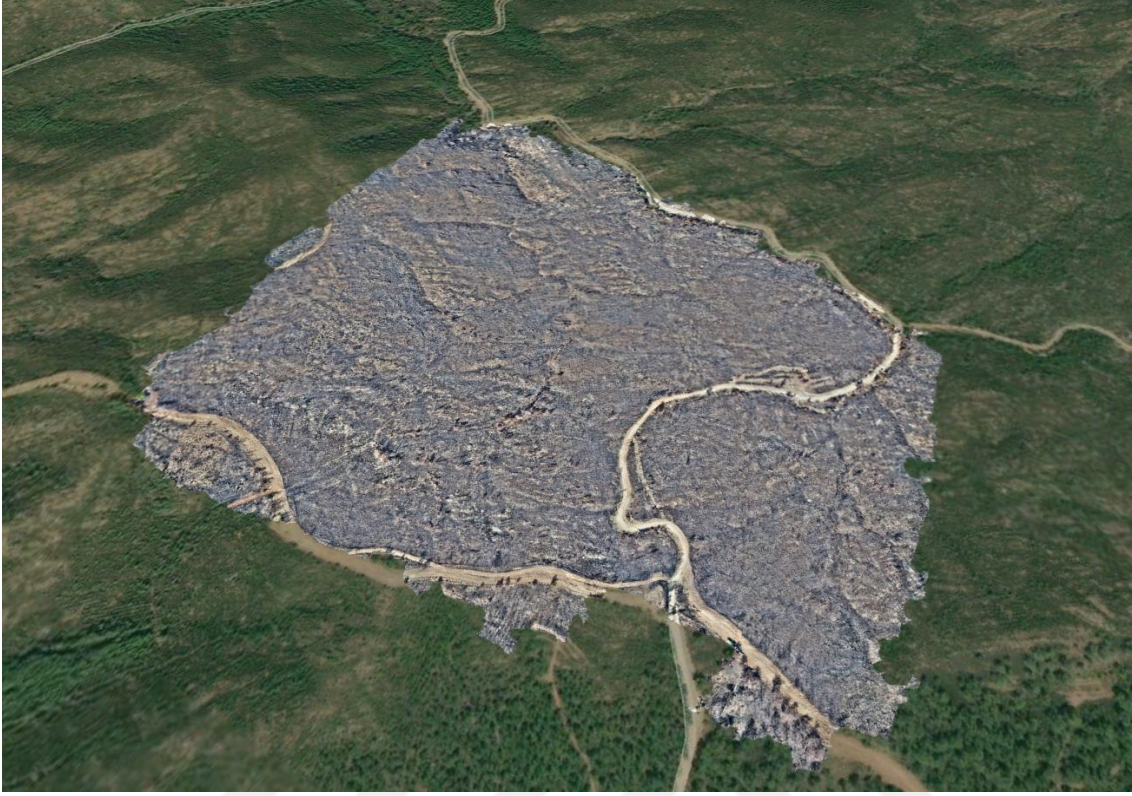
Veri toplama kısmında; ecoDrone'lar veya DJI Mavic 3 Pro / 3M gibi yüksek çözünürlüklü platformlar kullanılarak, 14–50 metre irtifadan 7x optik zoom ile görüntüler toplanır. Her bir kare, OGM'nin 2 m²'lik çıta alanını simüle eder. RGB ve multispektral kameralarla elde edilen veriler, NDVI ve LiDAR sensörleri ile desteklenerek araziye ilişkin hem görsel hem spektral veri elde edilir. YOLOv8 / YOLOv11 gibi derin öğrenme temelli nesne tanıma modelleriyle entegre edilmiş İHA görüntü analizi, geniş alanlarda otomatik fidan / ağaç tespiti, sayımı ve izleme yapılabilmesini mümkün kılmaktadır (Sengün vd., 2025). Benzer çalışmalarda, UAV tabanlı RGB veya multispektral kameralarla elde edilen görüntüler üzerinde ağaç tür tanımlaması ve fide / ağaç gövde / taç sınıflandırması başarıyla uygulanabilmiş; bu da iyi bir doğruluk (örneğin mAP @ 0.5 ünvanında %93–94) ve ölçeklenebilirlik göstermiştir (Wang vd., 2025).

Toplanan veriler, yapay zeka algoritmaları ile işlenir: YOLO v8 tabanlı nesne tespiti modeli, çimlenmiş tohumları %85+ mAP doğrulukla belirler. ResNet-50 tabanlı ikili sınıflandırma modeli, her 2x2 m² alanda en az bir fidan olup olmadığını %92+ doğrulukla tespit eder. NDVI maskeleye ile yabancı otlar ve arka plan gürültüsü filtrelenir, fidanlara odaklanılır. Düzenli aralıklarla yapılan uçuşlarla zaman serisi verileri oluşturulur. Böylece fidanların çimlenme oranı, tür bazlı başarı düzeyleri ve hektar bazında yoğunluk dağılımları belirlenir.

Ormancılık kapsamında, Kızılçam türü için iyi bir bonitet içerisinde 40 sene sonunda 1 hektarda 250 ağaç istenmesi kriteri doğrultusunda çimlenme başarısı raporlanır. Sonuçlar, web tabanlı CBS entegrasyonu ile görselleştirilir ve kullanıcıya dijital raporlar halinde sunulur. Re-Sense tüm bu prosesleri tam otonom bir şekilde gerçekleştirebilir. Drone uçuşları, rota planlama yazılımları (UGCS vb.) ile tamamen otomatik yapılır ve insan müdahalesi minimuma iner. RGB, multispektral, NDVI ve LiDAR verilerinin entegrasyonu ile hem fidan tespiti hem de sağlık/yoğunluk analizi yapılabilir. Toplanan veriler Google Cloud tabanlı altyapıda işlenerek, karar vericilere CBS tabanlı interaktif arayüzler üzerinden anlık olarak sunulur.

Örneğin, otomatik ağaç sayımı üzerine bir çalışmada, yüksek çözünürlüklü drone görüntülerinden ağaçların bounding-box ile tespiti yapılmış ve makine öğrenmesi sınıflandırıcısı kullanılarak yaklaşık %87 doğrulukla ağaç sayımı elde edilmiştir (Ataş & Talay, 2022). Başka bir çalışmada ise İHA fotogrametrisiyle üretilen ortomozaik ve nokta bulutu verilerinden ağaç gövde çapı ve boyu ölçülmüş; sonuçlar arazi ölçümleriyle yüksek korelasyon (boy için $r \approx 0.96$, çap için $r \approx 0.78–0.92$ aralığında) göstermiştir

(Durgun, Çoban & Eker, 2022).



Şekil 11. Marmaris-Hisarönü fotogrametri haritası örneklerinden bir görsel

Bu bulgular, İHA tabanlı yöntemlerin sadece sayım değil; hacim, biyokütle, karbon stok tahmini gibi ormancılık envanter parametreleri için de geçerli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, re-sense projesinin ölçüm fazında; geleneksel 2 m²'lik çıta temelli sayım yaklaşımı yerine, İHA ile yapılan otonom görüntüleme ve yapay zeka destekli analizler kullanılması planlanmaktadır. Her bir hektar içinde, manuel sayımda olduğu gibi çıta bazlı kontroller yerine; yüksek çözünürlüklü ortomozaikler ve segmentasyon/nesne tespiti algoritmaları ile tüm alan üzerinde sistematik ve tekrarlanabilir sayım yapılacaktır.

RGB, multispektral ve mümkünse LiDAR verilerinin entegrasyonu; yalnızca fidan / ağaç tespiti değil, aynı zamanda ataç (canopy), sağlık durumu, yoğunluk dağılımı, kök-fidan tutunumu gibi yapısal ve fonksiyonel verilerin de elde edilmesine olanak tanıyacaktır.

Bu yaklaşım, hem zaman ve maliyet açısından önemli tasarruf sağlar hem de büyük ölçekli, yüzlerce-hektar hatta binlerce-hektar büyüklüğündeki ekim sahalarında, sık dönemli izleme ve uzun vadeli başarı analizleri yapılabilmesini mümkün kılar. Ayrıca, bu metodoloji karbon ayak izini azaltır: saha ekipleri, araç kullanımı ve yaygın personel

hareketliliği yerine, periyodik drone uçuşları yeterli olacağından, operasyonel sera gazı salımı önemli ölçüde düşer.

Sonuç olarak, ekim sonrası fidan gelişimi, sık orman envanteri, biyokütle ve karbon stok takibi gibi ormancılık uygulamaları için; İHA + derin öğrenme + uzaktan algılama kombinasyonu (klasik yöntemlerin yerini almak üzere) hem teknik hem lojistik açıdan güçlü bir alternatif sunmaktadır. Re-Sense projesi, literatürdeki bu örnekleri referans alarak; geleneksel ormancılığı tamamlayan, ölçeklenebilir, veriye dayalı ve sürdürülebilir bir restoration/envanter platformu olarak konumlandırılabilir.



3.1 Köyceğiz - Akköprü Sahası

Çalışmalar, Köyceğiz Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Akköprü Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Sazak mevkiinde yürütülmüştür. Çalışma alanının büyüklüğü 10 hektar olup, arazi güney bakıya sahiptir ve ortalama rakımı 1.100 metredir. Söz konusu alanda 2021 yılında büyük bir orman yangını meydana gelmiştir. İnsansız hava araçlarıyla gerçekleştirilen tohum ekimleri, Ocak–Mart 2022 döneminde yapılmıştır. Aralık 2022 ve Aralık 2023 tarihlerinde, Orman Genel Müdürlüğü’nün 298 sayılı tebliğine uygun olarak yürütülen fidan sayımı çalışmalarında, alanın ortalama çimlenme başarısının %77 olduğu belirlenmiştir.

3.2 Köyceğiz - Yangı Sahası

Çalışmalar, Köyceğiz Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Köyceğiz Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Yangı mevkiinde yürütülmüştür. Çalışma alanları, birbirine yakın konumda yer alan iki ayrı parseldir ve her birinin büyüklüğü 5 hektar olmak üzere toplam 10 hektardır. Her iki alan da kuzey bakıya sahiptir ve ortalama rakımları sırasıyla 670 ve 880 metredir. Söz konusu alanlarda 2021 yılında büyük bir orman yangını meydana gelmiştir. İnsansız hava araçları ile gerçekleştirilen tohum ekimleri Ocak–Mart 2022 döneminde yapılmıştır. Aralık 2022 ve Aralık 2023 tarihlerinde yürütülen fidan sayımı çalışmalarında, her iki alanın ortalama çimlenme başarısının %67 olduğu belirlenmiştir.

3.3 Milas - Karacahisar Sahası

Çalışmalar, Milas Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Karacahisar Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Fesleğen mevkiinde yürütülmüştür. Çalışma alanı 5 hektar büyüklüğündedir ve güney bakıya sahiptir; ortalama rakımı 660 metredir. Söz konusu

alandaki 2021 yılında büyük bir orman yangını meydana gelmiştir. İnsansız hava araçları ile gerçekleştirilen tohum ekimleri Ocak–Mart 2022 döneminde yapılmıştır. Aralık 2022 ve Aralık 2023 tarihlerinde yürütülen fidan sayımı çalışmalarında, alanın ortalama çimlenme başarısının %64 olduğu belirlenmiştir.

3.4 Marmaris - Hisarönü Sahası

Çalışmalar, Marmaris Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Hisarönü Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Bördübet mevkiinde yürütülmüştür. Çalışma alanı 142,2 hektar büyüklüğünde olup güney bakıya sahiptir ve ortalama rakımı 200 metredir. Alanda 2021 ve 2022 yıllarında büyük orman yangınları meydana gelmiştir. İnsansız hava araçları ile tohum ekimleri Ekim 2022, Ekim 2023 ve Ekim 2024 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Aralık 2023 ve Aralık 2024 tarihlerinde yürütülen fidan sayımı çalışmalarında, alanın ortalama çimlenme başarısının %68 olduğu belirlenmiştir.

3.5 Marmaris - Aksaz Sahası

Çalışmalar, Marmaris Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Marmaris Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Aksaz mevkiinde yürütülmüştür. Çalışma alanı 107,8 hektar büyüklüğünde olup güney bakıya sahiptir ve ortalama rakımı 200 metredir. Alanda 2022 yılında büyük bir orman yangını meydana gelmiştir. İnsansız hava araçları ile tohum ekimleri Şubat 2023, Ekim 2023 ve Ekim 2024 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Aralık 2023 ve Aralık 2024 tarihlerinde yürütülen fidan sayımı çalışmalarında, alanın ortalama çimlenme başarısının %64 olduğu belirlenmiştir.

3.6 Deney Ortamlarında Elde Edilen Bulgular

Kızılçam türünde en yüksek çimlenme oranı %87 ile kontrol tohumlarında elde edilmiştir. En yüksek çimlenme hızı ise %53,50 ile yine kontrol tohumlarında gözlenmiştir. Tohum özelliklerine ilişkin tespit edilen değerler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Belirlenen Tohum Özellikleri

Tür	Kızılçam
Tohum Çapı (mm)	4,28
Tohum Boyu (mm)	6,97
1000 Tane Ağırlığı (gr)	48,03
Nem İçeriği (%)	5,03
Doluluk Oranı (%)	91
Çimlenme Yüzdesi (%)	75,50
Ort. Çimlenme Süresi (%)	18,04
Çimlenme Hızı (%)	41,75

Tablo 3. Kızılçam Tohumlarının Varyans Analizi Sonuçları

Değişken	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-Oranı	Önem Düze yi
Sera					
Çimlenme Yüzdesi (%)	3816,86	5	763,37	9,27	0,00
Ortalama Çimlenme Süresi (Gün)	287,74	5	57,55	3,19	0,05
Çimlenme Hızı (%)	441,11	5	88,22	7,32	0,00
Laboratuvar					
Çimlenme Yüzdesi (%)	8330,75	5	1666,15	10,77	0,00
Ortalama Çimlenme Süresi (Gün)	1023,17	5	204,63	5,73	0,00
Çimlenme Hızı (%)	4287,81	5	857,56	38,06	0,00
Fidanlık					
Çimlenme Yüzdesi (%)	10996,82	5	2199,36	59,24	0,00
Ortalama Çimlenme Süresi (Gün)	883,45	5	176,69	14,59	0,00
Çimlenme Hızı (%)	1229,77	5	245,95	9,48	0,00
Ortalama					
Çimlenme Yüzdesi (%)	11778,16	5	2355,63	25,14	0,00
Ortalama Çimlenme Süresi (Gün)	713,33	5	142,67	6,29	0,00
Çimlenme Hızı (%)	3056,68	5	611,34	28,98	0,00

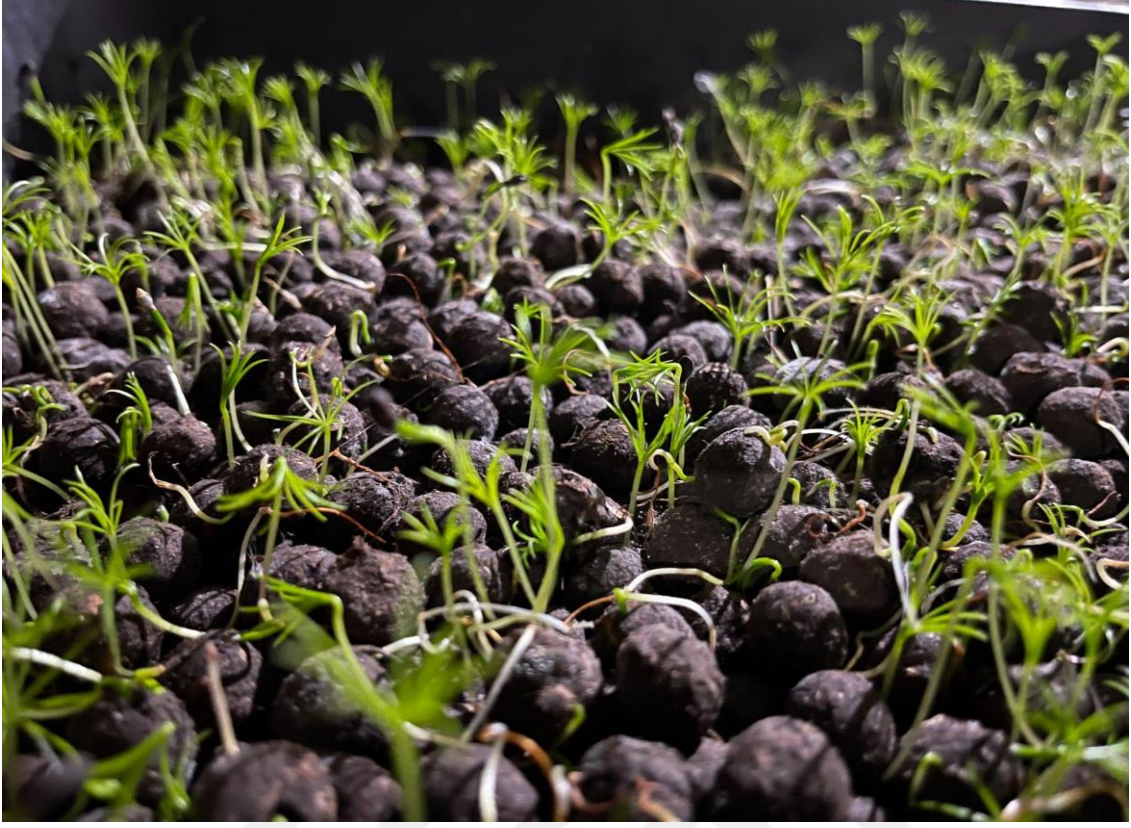
Tohum kaplama karışım malzemelerinin, Kızılçam tohumlarının çimlenme yüzdesi, çimlenme hızı ve ortalama çimlenme süresi üzerine etkili olup olmadığını belirlemek için

yapılan varyans analizi sonucunda hem sera, laboratuvar ve fidanlık ortamında hem de ortalama olarak farklılıkların anlamlı olduğu ($p<0.05$) belirlenmiştir.

Diğer bir ifadeyle sera, laboratuvar ve fidanlık ortamında tohum kaplama malzemesine göre tohumların çimlenme yüzdeleri, çimlenme hızları ve ortalama çimlenme süreleri istatistiksel olarak anlamlı ($p<0.05$) değişkenlik göstermektedir (Tablo 3).

Tablo 4. Kızılçam Tohumlarının Duncan Testi Sonuçları

Karışım	Çimlenme Yüzdesi (%)	Ortalama Çimlenme Süresi (gün)	Çimlenme Hızı (%)
Sera			
25ÇT75OT	84,85 a	31,18 ab	5,00 b
50ÇT50OT	73,48 b	32,01 ab	5,33 b
75ÇT25OT	67,42 bc	36,27 a	3,67 b
ÇT	52,27 cd	35,38 a	1,33 b
Kontrol	49,24 d	31,03 ab	0,00 b
OT	87,12 a	23,91 b	15,33 a
Laboratuvar			
25ÇT75OT	40,28 cd	29,03 b	14,83 c
50ÇT50OT	47,55 bc	31,97 ab	9,23 cd
75ÇT25OT	21,62 d	30,06 b	5,58 d
ÇT	30,04 cd	40,36 a	5,48 d
Kontrol	75,50 a	18,04 c	41,75 a
OT	64,17 ab	28,95 b	28,54 b
Fidanlık			
25ÇT75OT	34,17 b	28,08 b	8,33 b
50ÇT50OT	5,83 c	16,97 c	5,28 b
75ÇT25OT	10,56 c	33,52 a	1,67 b
ÇT	12,22 c	27,91 b	5,00 b
Kontrol	73,09 a	35,74 a	7,16 b
OT	40,00 b	22,69 b	23,89 a
Ortalama			
25ÇT75OT	50,21 b	29,27 bc	9,79 c
50ÇT50OT	39,45 c	26,52 c	6,73 cd
75ÇT25OT	30,09 d	33,01 ab	3,64 d
ÇT	29,63 d	34,47 a	4,18 d
Kontrol	66,90 a	27,25 c	18,85 b
OT	61,64 a	25,30 c	23,25 a



Şekil 12. Kaplanmış tohumların çimlenmelerinden bir görsel

Kontrol tohumlarının çimlenme yüzdeleri, sera ortamı hariç diğer ortamlarda kaplanmış tohumlardan daha yüksek çimlenme oranına sahiptir. Laboratuvar ortamında elde edilen çimlenme değerleri, kaplanmış tohumların çimlenme oranını düşürdüğü şeklinde yorumlanabilir. Ancak sera ortamında elde edilen çimlenme oranları tohumların kaplanmasının çimlenme başarısını artırdığını göstermektedir. Fidanlık ortamında ise; kontrol tohumlarında, kaplanmış tohumlardan daha yüksek çimlenme başarısı elde edilmesi, tohumların ekildikten sonra üzerlerinin kapatılmasından kaynaklanmaktadır.

3.7 Tohum Kaplama Yöntemi Üzerine Bulgular

Tohumların kaplanmalarından sonra, çimlendirme denemelerinin başladığı zamana kadar muhafaza edilmeleri ve çimlenmelerini geciktirmek amacı ile -20 °C soğutucuda saklanmalarının, tohumlarının çimlenmesi üzerine olumsuz etkisi olma ihtimali söz konusu olabilir. Bu nedenle, tohumların kaplanmalarından elde edilen çimlenmelerin kontrol tohumları ile kıyaslanması sonuçları tam olarak ortaya koymayabilir.

Saklama öncesinde kaplanmış tohumlarda, soğutucu dolaplara konulmalarından önce sınırlı da olsa çimlenmelerin başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum; tohumların

kaplanmalarının ardından, hazırlık sürecinden çimlenme ortamına aktarılma sürecine kadar ortam sıcaklığına ve tohumların nemli oluşuna bağlı olarak çimlenme sürecinin başladığını gösterir. Kaplanmış tohumların, saklama ortamına konması da çimlenme süreçlerinin tamamen durmasına veya sonlanmasına neden olmuş olabilir. Denemelerin yapıldığı bütün ortamlarda saklamadan kaynaklı bu olumsuz etkinin olma olasılığı vardır. Bu nedenle deneyler sonrasında, buradaki üretim ve kaplama sürecinde kaplanmış tohumların doğrudan soğutucu dolaplara konulması operasyonel olarak sağlanmıştır. Çalışmada tespit edilen diğer bir durum; kaplanan tohumlarda, çimlenmelerin ardından tohum kökçüğünün doğrudan toprağa ulaşamamasıdır. Kökçüğün, kaplanan tohumun toprağa temas eden noktasından çıkmaması durumunda toprağa ulaşmasına kadar geçen zamanda, arazi şartlarında güneşten ve rüzgardan etkilenme olasılığı yüksektir. Sera ortamında, koşullarında etkisi ile kökçüklerin toprağa doğru yöneldikleri görülmüştür. Diğer bir durum ise, kökçüğün toprağa ulaşmasından sonra kotiledonların tohum kaplama çeperi içerisinde kalması ve fideciğin kaplama materyalinin içerisinden çıkamaması durumudur. kaplanan tohumlar, nemli kaldıkları sürece fidecik kaplama materyalinden çıkabilmektedir. Ancak açık alan koşullarında kaplanan tohumların kuruması riski durumunda bu da mümkün olmayabilir. Bu nedenle tohumların etrafının daha ince kaplanmasına karar verilmiştir. Çimlenme için gerekli olan şartlardan herhangi birinin kısıtlılığı nedeniyle başlamış olan çimlenme sürecinin aksaması durumunda, çimlenmeler durmakta ve şartlar yeniden sağlansa bile çimlenme meydana gelmemektedir. Bu nedenle hazırlanan tohum kaplamalarının nemli olarak muhafazası çimlenme sürecini başlatacağından, ekim alanlarına atıldıkları ilk günlerde yüksek veya düşük sıcaklıklar, rüzgar ve yağışın olmaması gibi nedenlerle meydana gelen kurumlardan ötürü de çimlenmeleri tamamen sonlanabilir. Bu riskin azaltılması için, kaplanmış tohumların üretim sürecinde tohumların kaplama malzemesi içerisine yerleştirildikten sonra çimlenme sürecinin başlamasına fırsat vermeden gölge bir ortamda kurumaya bırakılması ve açık alanlara kuru olarak atılmaları da önerilebilir. Bu sayede tohum, kaplama malzemesi içerisinde nem aldığı süreç sonrasında çimlenmeye başlayabilir ve çimlenme başarısı daha yüksek olabilir. İlkbahar döneminde atılacak kaplanmış tohumlarda, tohumun çimlenme aşamasından sonra kotiledonların kaplama çeperinden rahatça çıkabilmeleri için tohumun kaplama malzemesi kalınlığının azaltılmasında ve toprak organik madde içeriğinin artırılmasında fayda olacağı değerlendirilmektedir.

3.8 ecoDrone ile Tohum Ekim Çalışmaları Üzerine Bulgular

Çalışma alanları; Muğla Orman Bölge Müdürlüğü, Marmaris Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı; Marmaris Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Aksaz sahasında ve Hisarönü Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Bördübet sahasında, Köyceğiz Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı; Köyceğiz İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Yangı sahasında ve Akköprü Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Sazak sahasında, Milas Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Karacahisar Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki Fesleğen sahasında, Kızılçam (*Pinus brutia*) ağacı tohumlarının “ecoDrone” adı verilen insansız hava araçları ile ekimleri yapılmıştır. Tohum ekim çalışmaları sırasıyla, Ocak - Mart 2022 tarihleri arasında; Fesleğen, Yangı ve Akköprü sahalarında, Ekim-Aralık 2022 tarihleri arasında Hisarönü sahasında, Ocak - Mart 2023 tarihleri arasında Aksaz sahasında, Ekim-Aralık 2023 tarihleri arasında Hisarönü ve Aksaz sahalarında, Ocak - Mart 2024 tarihleri arasında Hisarönü sahasında, Ekim-Aralık 2024 tarihleri arasında Aksaz ve Hisarönü sahalarında ve Ocak - Mart 2025 tarihleri arasında Hisarönü sahasında insansız hava araçları ile tohum ekimi çalışmaları yapılmıştır. Ekim sahalarının tamamı orman yangını geçirmiş alanlardır. Çalışmalarda her bir alanda, Muğla Orman Bölge Müdürlüğü'nün kendi çalışmalarında da uyguladığı şekilde hektar başına ortalama olarak 5 kg tohum atışı gerçekleştirilmiştir. Bazı spesifik arazi şartlarında gerekli görülen durumlarda hektar başına 10 kg tohum atışı da yapılmıştır. Kullanılan tohumlar bölge orijinli olarak temin edilmiştir. Çalışmaların neredeyse tamamı çıplak tohum serpmeye şeklinde uygulanmıştır. Tohum kaplama metodu yalnızca, kontrollü ortamlar ile açık alanların kıyaslanması açısından gözlemlenmek ve değerlendirilmek üzere çok küçük ve sınırlı alanlarda (1 hektarlık) tercih edilmiştir. İlgili metot üzerine daha kapsamlı ve daha geniş alanlarda bir çalışma yapılması ayrıca bir araştırma konusudur.

Ekim çalışmalarının ardından alanlarda, 317 numaralı tebliğ kapsamında Aralık 2022, Aralık 2023 ve Aralık 2024 tarihlerinde fidan sayımları gerçekleştirilmiştir. Tüm sahalarında fidan sayımı yapılan alan büyüklükleri minimum 5 hektardır. Bu doğrultuda Yangı sahasında %67, Fesleğen sahasında %64, Sazak sahasında %77, Hisarönü sahasında %68 ve Aksaz sahasında %64 oranlarında çimlenme başarısı tespit edilmiştir.

Tohumların çimlenme oranlarını etkileyen başlıca faktörler arasında, tohumların toplandığı alan, ağaçların genetik özellikleri, tohum toplama zamanı, saklama koşulları (nem, sıcaklık vb.), ekim öncesi uygulanan ön işlemler, tohum kalitesi (doluluk oranı, 1000 tane ağırlığı, çimlenme yüzdesi ve hızı vb.), ekim zamanı ve derinliği, ekim sonrası nem ve sıcaklık koşulları ile biyotik etkiler (fare, kuş gibi zararlılar) yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan tohumların temin edildiği süreçte, tohumların toplandığı alan, ağaçların kalitesi ve saklama koşulları ile ilgili değerlendirme yapılamamıştır; dolayısıyla bu faktörler çalışmanın çimlenme başarısının analizinde dikkate alınamamıştır. Buna karşın, tohumların temininden sonraki süreçte etkili olabilecek faktörler, çalışmanın başarı değerlendirmesinde göz önünde bulundurulmuştur.

Çalışma sahalarında kullanılacak tohumların ilgili bölge orijinli olmaları, başarılı bir ekim için kritik öneme sahiptir. Tohumların çimlenmesinde karşılaşılan başlıca etkenler, tohumların kalitesiz oluşu, düşük doluluk oranları, çimlenme ortamındaki nem durumu, tohumların güneşe maruz kalma süreleri, hava ve toprak sıcaklıkları, türlere özgü çimlenme engelleri, tohumların saklama koşulları ve kalitesi, tür ve bölgeye özgü ekim tarihleri, ekim anındaki çevresel koşullar, saha zeminindeki diri örtü ve ekim alanı ile çevresindeki canlıların etkisi olarak sıralanabilir. Ekim sahalarının önceden incelenmesi ve özelliklerinin belirlenmesi, başarılı bir çimlenme süreci için öncelikli bir adımdır. Bu kapsamda, saha toprak yapısı, hava ve toprak nemi, bölge iklimi, sıcaklık koşulları ve topraktaki besin ile organik madde miktarı gibi çevresel parametrelerin tespiti büyük önem taşımaktadır.

Kızılçam (*Pinus brutia*) türünde 1000 tohumun ortalama ağırlığı literatürde 62,96 g olarak bildirilmiştir (Saatçioğlu, 1967). Bu çalışmada kullanılan Kızılçam tohumlarının 1000 tane ağırlığı ise 48,03 g olarak belirlenmiştir. Bu değer, Saatçioğlu (1967) tarafından verilen ortalama değerlerin altında olmakla birlikte, uygulamada kabul edilebilir sınırlar içinde yer almaktadır. Ayrıca, boş tohumların önceden ayrılması sonrasında tohum doluluk oranı %90'ın üzerinde tespit edilmiştir.

Tohum kalitesi açısından çimlenme yüzdesi ve hızı temel ölçütler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan tohumların %75'in üzerinde çimlenme potansiyeline sahip olduğu ön analizlerle belirlenmiştir. Tohumların çimlenme hızının ise %41 oranında olduğu saptanmıştır. Tohum kalitesi değerlendirmesinde dikkate alınan diğer ölçütler temizlik ve halislik yüzdesidir. Temizlik yüzdesi, tohum içerisindeki kanat, karpel ve ibre parçaları gibi yabancı maddelerin oranını; halislik ise tohum içerisine karışmış diğer tür tohumlarının oranını ifade etmektedir. Bu çalışmada tohumlar kullanılmadan önce atıklardan temizlenmiş olup, farklı tür tohumlarına rastlanmamıştır. Sonuç olarak, çalışmada kullanılan Kızılçam tohumlarının kalite ölçütleri açısından kısmen yeterli olduğu söylenebilir.

Tohum kaplama metodunun çimlenme üzerine etkisi; ortamın nem, oksijen ve sıcaklık koşullarına, tohumun sağlık durumuna, kaplama malzemesinin kalınlığına ve hatta tohumun kaplama malzemesi içerisindeki konumuna göre değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle sonuçların değerlendirilmesinde, Duncan testi ile en yüksek etkiye sahip ve aynı grupta yer alan karışımlar birlikte ele alınmalıdır. Bu çalışmada söz konusu çimlenme üzerine etkili olabilecek tüm faktörlerin sabit ve aynı etkiye sahip olduğu kabul edilerek deneyler yürütülmüştür. Ancak tespit edilemeyen faktörlerin veya değişkenliklerin çimlenme üzerindeki etkisi göz ardı edilemez. Bu bağlamda, türler ve çimlenme değerleri bazında çoğunlukla etkili olduğu belirlenen ve aynı grupta yer alan işlem veya işlemler, çalışmanın sonucu olarak etkili ve kullanılabilir kabul edilebilir. Tohumların çimlenmesi ve fidan gelişiminde toprak asitliği (pH) önemli bir faktördür. Türlerle göre optimal pH seviyeleri farklılık göstermektedir; iğne yapraklı türler için 4.5–6.0, yapraklı türler için ise 7.0–8.0 aralığı ideal olarak kabul edilmektedir (Ölmez & Yahyaoğlu, 2003).

Çalışmada kullanılan malzemelerin pH değerleri, organik maddece zengin toprakta 7,37–7,49, orman toprağında ise 5,27–5,50 aralığında ölçülmüştür. Tohum kaplama metodunda, çimlenme oranları bakımından yüksek değerlerin elde edildiği orman toprağının pH değeri, Yahyaoğlu ve Ölmez (2003) tarafından ibreli türler için önerilen optimal pH aralığı içerisinde yer almaktadır. Bu durum, orman toprağının kaplanmış tohumlarda elde edilen çimlenme oranları üzerindeki etkisinin pH değeri ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Tohumlar çimlenme sürecinde gerekli nemi topraktan temin ederler. Toprakta yüksek kil içeriği bulunması durumunda, kilin ince yapısı suyun toprak içinden sızmasını zorlaştırabilir ve tohum bu sudan yeterince faydalanamayabilir; bu

durum çimlenme sürecini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, killi topraklar kuruma sonucunda daha fazla sertleşir ve sonrasında meydana gelen yağışlarla dahi suyun tohum tarafından alınması diğer toprak türlerine göre daha yavaş gerçekleşir. Dolayısıyla, kil oranı yüksek malzemelerle oluşturulan tohum topraklarının kuruduktan sonra tekrar su alarak çimlenmeye uygun hâle gelmesi daha güç olabilir. Bu bağlamda, orman toprağı ile hazırlanan tohum topraklarının başarısı, kum oranının kil oranına göre daha fazla olmasından etkilenebilir.

Bu çalışmada, tohumların kaplanması için kullanılan malzemelerin toprak türü açısından değerlendirilmesi sonucunda, orman toprağının kumlu kil, organik maddece zengin toprağın ise kumlu killi balçık veya kumlu balçık yapıda olduğu saptanmıştır. Hazırlanan karışımlar ise genel olarak kumlu killi balçık karakterindedir. Dolayısıyla, toprak türü bakımından tohum kaplamada kullanılan malzemelerin, Yahyaoğlu ve Ölmez (2003) tarafından belirtilen kriterlere göre tohum çimlenmesini engellemediği söylenebilir. Ayrıca, kuzeye bakan yamaçların güneşlenme süresi daha kısa olduğundan buharlaşma daha azdır ve toprağın nemi güney bakılı alanlara kıyasla daha yüksek kalır. Tohum kaplama metodunda nem, çimlenme için kritik bir faktör olduğundan, kuzey bakılı sahalarda elde edilen çimlenme sonuçlarında kaplama metodunun olumlu etkilerinin artabileceği değerlendirilmektedir.

Laboratuvar ve sera ortamlarında kontrol edilebilen nem oranları, arazi şartlarında sağlanamadığından bu alanlara oranla arazi koşullarından düşük sonuçların alınması beklenen bir durumdur. Ancak, tohum karışım malzemeleri ve oranları bakımından fark çıkmaması alanların bakışı ve rüzgar durumu ile ilgili olabilir. Çünkü bakı ve rüzgar durumu nem koşullarını etkileyen önemli faktörler arasında yer alırlar. Nitekim fidanlık koşullarında gerçekleştirilen deneylerde ekim alanlarının üzerinin açık bırakılması durumunda çimlenme meydana gelmemesi, ancak gölgeleme fileleri ile kapatılması durumunda çimlenme sağlanması, kaplanan tohumlardaki çimlenmelerin nem koşulları ile doğrudan ilgili olduğunu göstermiştir.

Tohum kaplama malzemesinin kalınlığına ve büyüklüğüne göre yapılan denemelerde, kızılçam tohumlarının çimlenme yüzdesinin tohum kaplama boyutundan etkilenmedikleri görülür. Yalnızca küçük boyutlarda kaplanmış tohumlarda, tohumların çimlenme hızının daha fazla olduğu ve ortalama çimlenme sürelerinin de büyük boyutlara kıyasla daha kısa olduğu belirlenmiştir. Çimlenme yüzdesinin değişmemesine rağmen çimlenme hızının daha fazla ve ortalama çimlenme süresinin daha kısa olması nedeniyle Kızılçam türünde küçük boyutlardaki tohum kaplama formu kullanılabilir.

Kil içeriği fazla olan topraklar ağır bünyeli, kum içeriği fazla olanlar ise hafif bünyeli toprak olarak ifade edilir. Fidanlıklarda ekimlerde tohumun toprak yüzeyine çıkabilmesi ve ekimlerin başarılı olması için eğer toprak ağır bünyeli ise sık ekim, hafif bünyeli ise derin ekim önerilmektedir (Yahyaoğlu ve Ölmez, 2003). Derin ve sık ekim koşullarının kaplanan tohum formlarının büyük ve küçük olması durumunda da benzerlik gösterdiği söylenebilir. Bu bağlamda kil içeriğinin fazla olması durumunda küçük boyutta kaplanan tohumların, az olması durumunda ise büyük boyutta kaplanan tohumların kullanılmasının yararlı olacağı söylenebilir.

Tohumların ekiminde genel kural, çimlenen tohumun toprak yüzeyine çıkabilmesi için tohum büyüklüğünün en fazla 3 katı kadar derine ekilmesidir (Yahyaoğlu ve Ölmez, 2003). Tohumların olması gerekenden derin ekilmesi durumunda, çimlenme meydana gelse bile kotiledonlar tohum üzerindeki toprak tabakasını kaldıramaz ve toprak yüzeyine çıkamazlar. Tohumların kaplama malzeme katmanının büyük olması ve parçalanamaması durumunda da benzer sorunla karşılaşılabilir.

Tohum kaplama yönteminin çimlenme üzerine etkisi, toprağın nem ve yapısı, pH değeri, sıcaklık koşulları, güneşlenme süresi, rüzgar durumu gibi çevresel faktörlerle yakından ilişkilidir. Bu çalışmada kullanılan orman toprağı ve organik maddece zengin toprak karışımlarının pH değerleri ve kum-kil oranları, kızılçam türüne uygun hazırlanmış, kaplama yönteminin çimlenme oranını engellemediği görülmüştür. Arazi koşullarında kuzeye bakan yamaçlarda daha düşük güneşlenme nedeniyle nemin korunması, kaplanan tohumların çimlenme performansını korumuş, bu da mikro-çevresel faktörlerin tohum kaplama yönteminin başarısındaki önemini ortaya koymuştur. Ayrıca, küçük boyutlu kaplanan tohumların çimlenme hızının daha yüksek ve ortalama çimlenme süresinin daha kısa olması, özellikle geniş alanlarda hızlı tohum serpmeye yapılabilmesi adına faydalıdır. Tohumların fiziksel ve biyolojik streslerden korunmasını sağlayarak çimlenme başarısını koruması, ekim sonrası çevresel değişkenlerin etkisini minimize etmekte ve fidan oluşumunda homojenliği desteklemektedir. Bununla birlikte yöntemin bazı sınırlılıkları da mevcuttur. Arazi koşullarında nem ve sıcaklık gibi parametrelerin kontrol edilememesi, kaplama materyali kalınlığının ideal seviyede olmaması durumunda çimlenme engellerinin oluşması gibi durumlar laboratuvar ve saha bulguları arasında farklılıkların ortaya çıkmasına neden olabilir. Ayrıca, geniş ölçekli uygulamalardaki işgücü ve maliyet gereksinimleri artmakta, bu durum uygulamanın yaygınlaştırılmasında bazı zorluklar teşkil eder.

Sonuç olarak tohum kaplama metodunun gerekliliği her bir saha, her bir saha içerisindeki gereksinim görülen alanlar ve çalışma özelinde belirlenmelidir. Tohum özelliklerinin belirlenmesinin ardından, saha özellikleri ve ihtiyaçları da doğru şekilde belirlenerek tohum kaplama metodunun uygulanmasına karar verilmelidir. Tohum kaplama metodunun özellikle Kızılçam türü ve yangın geçirmiş sahalar özelinde, arazi üzerinde ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılması daha faydalıdır. Örneğin; arazi yüzeyinde tohumun tutunma yeteneğinin daha az olduğu kısımlarda tercih edilirken, kalan kısımlarda tercih edilmeyebilir. Arazi geneli içerisinde; eğimin aşırı fazla olduğu kısımlar, toprak kayması görülen alanlar, anakayanın daha fazla olduğu bölgeler gibi durumlar buna örnek olarak sıralanabilir. Tohum kaplamadaki asıl amaç, tohumların çimlenme özelliklerini açık alanlarda koruyabilmesine veya kaybetmemesine destek olmaktır.

Bu şekilde yeni nesil ormancılık ve teknoloji destekli restorasyon uygulamaları için destekleyici bir araç olarak değerlendirilebilir. Ancak buradaki başarının; yalnızca kaplama materyalinin seçimi ve boyutuyla sınırlı olmayıp; tohum kalitesi, ekim derinliği, toprak yapısı, pH, nem ve sıcaklık gibi çevresel parametrelerin bütüncül yönetimi ile mümkün olduğu unutulmamalıdır. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak çalışmalarda tohum kaplama yönteminin farklı ekim sahalarında, farklı iklim ve toprak koşullarında uzun süreli izlenmesi, yöntemin avantaj ve sınırlılıklarının daha ayrıntılı bir şekilde ortaya konulmasını sürdürülmelidir. Ayrıca; kaplama materyallerinin biyolojik ve fiziksel özelliklerinin optimize edilmesi, maliyet-etkinlik analizlerinin yapılması ve otomasyon ile geniş alanlarda uygulanabilirliğinin araştırılması, bu yöntemin ormancılık uygulamalarında daha güvenilir ve sürdürülebilir bir araç haline gelmesini kolaylaştıracaktır.

Bu çalışmadaki asıl görülmesi ve ulaşılması istenen sonuç; insansız hava aracı ve bu alanda özelleştirilen diğer teknolojilerin ormancılık çalışmalarına olan katkısının belirlenmesidir. Bu çalışmada, kızılçam (*Pinus brutia*) türü başta olmak üzere orman ekosistemlerinin restorasyonu ve yangın sonrası rehabilitasyonu süreçlerinde, insansız hava araçları (drone) teknolojisi kullanılarak tohum serpmeye uygulamalarının etkinliği ve potansiyel katkıları incelenmiştir. Elde edilen bulgular, ecoDronelar ile yapılan tohumlama çalışmalarının, özellikle tohum ekimine uygun tüm alanlardaki ormancılık uygulamalarında yenilikçi, etkin ve sürdürülebilir bir yöntem olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. ecoDrone'ların çalıştıkları hiçbir alanda

toprak işleme uygulaması yapılmamasına rağmen başarılı sonuçlar elde edilmesi en önemli sonuçlardan birisidir. Ayrıca bu yöntemdeki diğer ana faydalardan birisi de, sahalarda aynı ölçeklerde hem çok daha az kişi ile hem de çok daha düşük karbon ayak izi ile çalışabilmesi olmuştur.

ecoDronelar ile gerçekleştirilen tohum serpmeye uygulamalarında; saha erişilebilirliği, topografik zorluklar ve insan gücü kısıtları önemli ölçüde minimize edilmektedir. Bu teknoloji, yangın sonrası alanlarda hızlı müdahale imkanı sağlayarak ekosistem restorasyonunun zamanında başlatılmasını mümkün kılmaktadır. Kızılçam gibi yangına duyarlı ve hızlı büyüyen türlerde, ekim zamanının optimizasyonu, tohumun çimlenme başarısı ve fidan oluşumunun sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

ecoDronelar ile tohum serpmeye ilişkin gözlemler, özellikle kuzey ve güney bakılı yamaçlar arasında nem ve güneşlenme farklılıklarının çimlenme başarısı üzerindeki etkilerini yönetilebilir hale getirmektedir. Drone tabanlı uygulamalar, tohumların dağılımını homojenleştirerek, yangın sonrası alanlarda fidan yoğunluğunun dengeli ve doğal ekosistem yapısına uygun biçimde oluşmasını desteklemektedir. Ayrıca, bu yöntem, geleneksel el ile ekim yöntemlerine kıyasla işgücü ve zaman tasarrufu sağlamakta, geniş alanlarda eş zamanlı ve kontrollü uygulama yapılabilmesine imkan tanımaktadır. Bununla birlikte geliştirilen yapay zeka modülü sayesinde, makine öğrenimi ve derin öğrenme ile görüntü işleme yöntemlerinin kullanılması; fidan sayımı, kozalak sayımı, orman sağlığının belirlenmesi gibi daha farklı alanlarda da ecoDrone'ların etki potansiyelinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 13. Hisarönü Sahası Öncesi ve Sonrası Görseli

Literatür açısından değerlendirildiğinde, ecoDronelar ile tohum serpmeye dayalı bu yaklaşım, klasik ormancılık uygulamalarında gözlemlenen bazı kısıtlılıkları da aşmaktadır. Özellikle yangın sonrası rehabilitasyon süreçlerinde, hızlı ve etkin bir müdahale ile erozyon kontrolü, toprak organik madde kaybının önlenmesi ve biyoçeşitliliğin korunması sağlanabilmektedir. Bu bağlamda, teknoloji destekli ekim yöntemlerinin, orman ekosistemlerinin dayanıklılığını ve restorasyon kapasitesini artırdığı, sürdürülebilir ormancılık literatürüne önemli bir katkı sağladığı söylenebilir. Bunun yanı sıra, drone tabanlı uygulamalar, farklı toprak yapıları, topografik koşullar ve mikro-iklim değişkenleri göz önünde bulundurularak tür-özü uygulama protokollerinin geliştirilmesine de olanak tanımaktadır. Özellikle; yangın geçirmiş orman alanlarındaki

tohum serpmeye çalışmalarının sonucunda gerçekleştirilen fidan sayım işlemlerinde tespit edilen çimlenmelerin konum tespitlerinin yapılabilmesi ve fidanlara bir nevi “ID” (kimlik) atanması, alandaki fidanların sonraki yıllarda ot baskısı gibi istenmeyen durumların yaşanması söz konusu olduğunda hangi fidanların hayatta kaldığını anlamamızı sağlayacaktır. Bununla birlikte hangi fidanın neden ve ne şekilde hayatta kaldığı, bu durum için etkili faktörlerin neler olduğu gibi konuların irdelenmesi kısmı da ayrıca incelenmesi ve değerlendirilmesi gereken bir konudur.

Öte yandan, yöntemin sınırlılıkları da dikkate alınmalıdır. Arazi koşullarındaki rüzgar, yağış ve sıcaklık değişkenleri, dronelar ile serpiştirilen tohumların hedeflenen noktaya ulaşımını ve çimlenme performansını etkileyebilir. Tohumların toplandıkları meşcerenin kalitesi, ilgili meşcerede herhangi bir böcek vb. bir zararlıının olup olmaması, tohumun; doluluk, çimlenme oranı, hızı vb. diğer özellikleri, tohumların toprak üzerindeki yoğunluğunun ekim alanına uygun şekilde belirlenmesi ve ekim çalışmalarının tarihleri ve koşulları da yöntemin başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, geniş ölçekli uygulamalarda maliyet, lojistik ve operasyonel planlama gereksinimleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, ecoDronelar ile tohum serpmeye dayalı uygulamalar, kızılçam ekosistemlerinin restorasyonu, yangın sonrası rehabilitasyonu ve geniş alanlı ekosistem yönetimi açısından yüksek potansiyele sahip yenilikçi bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Bu yöntem, klasik ormancılık teknikleri ile karşılaştırıldığında hızlı, etkili ve sürdürülebilir çözümler sunmakta; aynı zamanda literatüre, teknoloji destekli ekim yöntemlerinin ormancılıkta uygulanabilirliği ve ekosistem restorasyonu üzerindeki etkileri konusunda özgün ve değerli katkılar sağlamaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların, farklı iklim ve toprak koşullarında ecoDronelar ile gerçekleştirilecek uzun dönemli gözlemler ve kaplama materyali optimizasyonu üzerinden yöntemin etkinliğini artırması, ormancılık ve ekosistem restorasyonu alanında yeni standartların belirlenmesine öncülük edebilir.

KAYNAKLAR

- Ackerman, K., Egerer, M., & Putz, F. E., 2021. *Technological innovations in forest restoration: Drones, remote sensing, and AI applications*, Restoration Ecology, 29(5), e13487.
- Anderegg, W.R.L., Kane, J.M., Anderegg, L.D.L., 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress, Nature Climate Change, 3(1), 30–36.
- Anonim, 2021. *Türkiye Ormanları İstatistik Raporu*, Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Anonim, 2024. *Türkiye Ormanları 2024 Yılı Raporu*, Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Anşin, H., & Özkan, A., 1993. *Pinus brutia (Kızılçam) ve Türkiye'deki Yayılışı*, Ormancılık Araştırmaları Dergisi, 12(1), 45–52.
- Arianoutsou, M., & Thanos, C.A., 1996. Ecology and conservation of Mediterranean pine forests, Biological Conservation, 75, 17–27.
- Aslan, N., 1972. Kızılçam Tohumlarının Çimlenme Özellikleri, Orman Fakültesi Dergisi, 23(2), 45–56.
- Ataş, M., & Talay, A. (2022). Development of automatic tree counting software from UAV based aerial images with machine learning. *arXiv preprint arXiv:2201.02698*.
- Boydak, M., & Özhan, E., 1996. Kızılçam Ormanlarının Doğal Gençleşme Dinamikleri, Orman Araştırma Dergisi, 28(3), 45–58.
- Boydak, M., Dirik, H., Tilki, F. & Çalıkoğlu, M. (2003). Effects of water stress on germination in six provenances of *Pinus brutia* seeds from different bioclimatic zones in Turkey. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 27(2), 91–97.
- Boydak, M., Yaltırık, F., & Akkemik, Ü., 2006. Kızılçam (*Pinus brutia*) Biyolojisi ve Yayılışı, Orman Fakültesi Yayını, İstanbul.
- Boydak, M., Yaltırık, F., & Anonim, 2006. *Pinus brutia* Ekolojisi ve Büyüme Özellikleri, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayını, İstanbul.
- Boydak, M., Kaya, H., & Erkan, N., 2006. *Pinus brutia (Kızılçam) ve Ormancılık Uygulamaları*, Türkiye Ormancılık Araştırmaları, 18(2), 77–86.

- Chazdon, R. L., 2008. *Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands*, Science, 320(5882), 1458–1460.
- Chazdon, R. L., et al., 2016. *When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the context of forest and landscape restoration*, Ambio, 45, 538–550.
- Chazdon, R. L., & Uriarte, M. (2016). *Natural regeneration in the context of large-scale forest and landscape restoration: An overview*. Annual Review of Environment and Resources, 41, 425–452.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *Remote Sensing*, 6(6), 63–83.
- Czabator, F. J. (1962). Germination value: An index combining speed and completeness of pine seed germination. *Forest Science*, 8(4), 386–396.
- Demir, N. (2018). Using UAVs for detection of trees from digital surface models. *Journal of Forestry Research*, 29(3), 813–821.
- Doğa Koruma Merkezi, Anonim, 2022. *Muğla İli 2021 Orman Yangınları ve Ekosistem Etkileri Raporu*, Ankara, 10–18.
- Durgun, H., Çoban, H. O., & Eker, M. (2022). Estimating stem volume and measuring diameter and height of brutian pine trees from aerial photographs taken by unmanned aerial vehicle. *Turkish Journal of Forestry*, 23(4), 255–267.
- Edmond, J. B. & Drapala, W. J. (1958). The effects of temperature, sand and soil, and acetone on germination of okra seed. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 71, 428–434.
- Ellis, R.H. & Roberts, E.H. (1981). *The Quantification of Ageing and Survival in Orthodox Seeds*. Seed Science and Technology, 9(2), 373–409.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2000. *Global Forest Resources Assessment 2000: Definitions and Methodology*, Rome, Italy, 15.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2020. *Forest Restoration and Drone Applications*, Rome, 22–29.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2022. *State of the World's Forests 2022*, Rome, Italy, 48.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2022. *The State of the World's Forests 2022: Forest pathways to sustainable development*, Rome, Italy, 128.
- Geist, H. J., & Lambin, E. F., 2002. *Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation*, BioScience, 52(2), 143–150.
- GOFC-GOLD, 2009. *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests*, Natural Resources Canada, Alberta, Canada, 57.

- GOFC-GOLD, 2017. *Forest monitoring, land-use change, and greenhouse gas emissions: A sourcebook of methods and procedures*, GOFC-GOLD Report, Version 2.0, 63.
- Gülcü, S., Arslan, M., & Kaya, H., 2016. Muğla ili ve çevresinde sürdürülebilir ormancılık ve ağaçlandırma stratejileri, *Ege Ormancılık Araştırmaları*, 24(1), 12–23.
- Gülcü, S., Şahin, U., & Yılmaz, M., 2016. *Ağaçlandırma ve erozyon kontrolü uygulamaları*, *Ormancılık Araştırmaları Dergisi*, 8(2), 45–57.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1996. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Vol. 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use, Hayama, Japan, 112.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*, Hayama, Japan, 45.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Vol. 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use, Hayama, Japan, 78.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use*, Geneva, Switzerland, 7.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Fourth Assessment Report, Working Group III, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018. Global Warming of 1.5°C. Special Report, Geneva, Switzerland, 17.
- Keeley, J.E., 1992. Fire and the dynamics of Mediterranean-type ecosystems, in: *Ecology of Mediterranean-type Ecosystems*, Springer.
- Kırdar, S., Demir, N., & Yıldız, H., 2011. *Ağaçlandırma ve ekolojik uyum*, *Orman Fakültesi Yayınları*, 20(3), 112–123.
- Kırdar, A., Demir, F., & Yılmaz, B., 2011. *Kurak ve yarı kurak alanlarda ağaçlandırma teknikleri ve uygulama kriterleri*, *Orman Araştırmaları Dergisi*, 19(2), 55–67.
- Kissinger, G., Herold, M., & De Sy, V., 2012. *Drivers of deforestation and forest degradation: A synthesis report for REDD+ policymakers*, Lexeme Consulting, Vancouver, Canada, 45.
- Lamb, D., Erskine, P. D., Parrotta, J. A., 2005. *Restoration of Degraded Tropical Forest Landscapes*, *Science*, 310(5754), 1628–1632.
- McDowell, N.G., Allen, C.D., 2015. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming, *Nature Climate Change*, 5, 669–672.

- Movchan, D., Selvaraj, C., Xi, Z., Van Dongen, A., & Degenhardt, D. (2025). Collecting and processing drone-based remotely sensed data for use in forest rescue monitoring. *Journal of Visualized Experiments*.
- Muğla İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, Anonim, 2023. *Muğla İl Coğrafi ve İklim Verileri*, Muğla, 12–15.
- Naveh, Z., 1974. Fire ecology of the Mediterranean forest, Chap. 5 in *Mediterranean Ecosystems*, Elsevier.
- Neyişçi, B., 1987. Ege Bölgesi Ormanları ve Kızılçam Yayılışı, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayını, İstanbul.
- OGM (Orman Genel Müdürlüğü), Anonim, 2024. Türkiye Orman Varlığı ve Yangın Raporu, Ankara.
- Onishi, M., & Ise, T. (2018). Automatic classification of trees using a UAV onboard camera and deep learning. *arXiv preprint arXiv:1804.10390*.
- Orman Genel Müdürlüğü, Anonim, 2022. *Muğla İli Orman Ekosistemleri ve Tür Çeşitliliği Raporu*, Ankara, 23–28.
- Ölmez, Z., & Yahyaoğlu, Z. (2003). Tohum çimlenmesi ve fide yetiştirme teknikleri. *Tohum Teknolojisi ve Fidanlık Tekniği*, 45–52. Kafkas Üniversitesi Artvin Orman Fakültesi Yayınları.
- Reid, J. L., Chaves, R. B., Holl, K. D., & Zahawi, R. A. (2019). *Advancing forest restoration through the integration of remote sensing and ecological data*. *Restoration Ecology*, 27(4), 772–779.
- Ruiz-Benito, P., Ratcliffe, S., Zavala, M.A., Martínez-Vilalta, J., Vilà-Cabrera, A., Lloret, F., et al., 2017. Climate- and successional-related changes in functional composition of European forests are strongly driven by tree mortality, *Global Change Biology*, 23(10), 4162–4176.
- Saatçioğlu, F. (1967). *Orman ağacı tohumları: tohumun tedariki, saklanması, çimlenme fizyolojisi, kalite kontrolü ile önemli ağaç ve ağaçcık türlerinin tohum bakımından özellikleri*. İstanbul: Kutulmuş Matbaası, 236 s.
- Saatçioğlu, R., 1976. *Türkiye Ormanlarının Yükselti ve Ekolojik Özellikleri*, Ormancılık Araştırmaları Dergisi, 5(2), 23–35.
- Sasaki, N., & Putz, F. E., 2009. *Critical need for new definitions of “forest” and “forest degradation” in global climate change agreements*, *Conservation Letters*, 2(5), 226–232.
- Sengün, E., Aksoy, S., Sertel, E., & Fransson, J. E. S. (2025). Comparative analysis of YOLOv8 and YOLOv11 on tree detection using UAV RGB and laser scanning data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-2/W2, 173–179.

- Serengil, Y., 2018. *Tropikal ve nemli orman ekosistemlerinde karbon depolama kapasitesi ve biyokütle analizi*, Orman Bilimleri Dergisi, 20(3), 145–158.
- Sevgili, H., Demir, N., & Kaya, M., 2018. *Güneybatı Anadolu Bölgesi'ndeki sığla (Liquidambar orientalis) ormanları ve ekosistem özellikleri*, Ormanlık Araştırmaları Dergisi, 25(1), 45–59.
- Shi, C., Ma, H., & Li, X., 2011. Forest definitions and forest resources assessment in China, Journal of Forestry Research, 22(2), 165–172.
- Şefik, S., 1965. Türkiye'de Kızılçamın Tohum Çimlenme Özellikleri, İ.Ü. Orman Fakültesi Yayını, 101, 12–28.
- Şevik, H. & Ertürk, N. (2015). Effects of drought stress on germination in fourteen provenances of *Pinus brutia* Ten. seeds in Turkey. Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology, 3(5), 294–299.
- Thanos, C.A., Daskalakou, E., & Tsegas, G., 1989. Fire adaptations of *Pinus brutia* in the eastern Mediterranean, Forest Ecology and Management, 28, 271–281.
- Thanos, C.A., 1999. Seed ecology of *Pinus brutia*, in: Ecology and Management of Forest Trees in the Mediterranean, FAO.
- Tolunay, H., 2015. *Ormansızlaşma ve Karbon Emisyonları: Tanımsal Farklılıklar ve Etkileri*, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 65(1), 45–60.
- Tolunay, H., 2017. *Orman tanımları ve küresel izleme: Metodolojik farklılıklar*, Orman Fakültesi Dergisi, 67(2), 101–115.
- Uluocak, İ., 1977. *Kuraklık ve su kaynakları yönetimi*, Türkiye Tarım Araştırmaları Dergisi, 5(1), 15–27.
- UNDP Nepal DCRL Projesi. 2024. “Flying for the Forests in Nepal: Can Seeding Drones Save Degraded Areas?” UNDP.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2001. *Report of the Conference of the Parties on its Seventh Session*, Marrakech, Morocco, 6–14 November 2001, FCCC/CP/2001/13/Add.1, 22.
- United Nations Secretariat (UN Secretariat), 2019. Climate Action Plan 2020–2030, New York, USA, 4.
- United Nations, 2021. *Ecosystem Restoration for People, Nature and Climate*, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 64.
- United Nations, 2021. *Ecosystem Restoration for People, Nature and Climate*, New York, 35–42.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 2023. Emissions Gap Report 2023, Nairobi, Kenya, 10.

- United Nations, 2023. Action Plan for the UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 28.
- Ürgenç, İ., 1977. Kızılçam Tohumlarının Ekolojik İstekleri, Orman Araştırma Enstitüsü Yayını, 54, 33–49.
- Ürgenç, İ., 1986. *Kurak ve yarı kurak bölgelerde tarım ve ağaçlandırma*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara, 32.
- Wang, Q., Pu, Z., Luo, L., Wang, L., & Gao, J. (2025). A study on tree species recognition in UAV remote sensing imagery based on an improved YOLOv11 model. *Applied Sciences*, 15(16), 8779.
- Yaltırık, F., & Boydak, M., 2000. *Pinus brutia Ekolojisi ve Orman Yönetimi*, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayını, İstanbul.
- Yaltırık, F., & Akkemik, Ü., 2011. *Türkiye Orman Ağaçları ve Dağılımları*, Orman Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara.
- Yaltırık, F., & Akkemik, Ü., 2011. Türkiye Ormanları ve Kızılçam Yayılışı, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayını, İstanbul.
- Yüksek, S., Kaya, M., & Demir, H., 2007. *Kurak ve yarı kurak alanlarda erozyon kontrolü ve ağaçlandırma çalışmaları*, Orman ve Su İşleri Araştırma Dergisi, 14(2), 55–67.
- Zamora-Camacho, F. J., López-Sánchez, J. F., & Pérez-Ramos, I. M., 2023. *Scaling up forest restoration through drone-assisted seed dispersal and spatial modeling*, *Ecological Applications*, 33(2), e27109.
- Zoralioğlu, M., 2006. *Kurak ve yarı kurak alanlarda toprak yönetimi*, Tarım Bilimleri Dergisi, 12(2), 45–56.