

**ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SAF KIZILÇAM MEŞCERELERİNDE UYDU GÖRÜNTÜLERİ
KULLANILARAK TOPRAKÜSTÜ BİYOKÜTLENİN TAHMİNİ (ÇETİBELİ
ORMAN İŞLETME ŞEFLİĞİ ÖRNEĞİ)**

Erhan YARTIM

ORMAN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇANKIRI
2025**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Erhan YARTIM tarafından hazırlanan “Saf Kızılçam Meşcerelerinde Uydu Görüntüleri Kullanılarak Topraküstü Biyokütlenin Tahmini (Çetibeli Orman İşletme Şefliği Örneği)” adlı tez çalışması **31/07/2025** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Sedat KELEŞ

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Sedat KELEŞ
Orman Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Fatih SİVRİKAYA
Orman Mühendisliği Anabilim Dalı
Kastamonu Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Sinan BULUT
Orman Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ersoy YILMAZ

Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum “**Saf Kızılçam Meşcerelerinde Uydu Görüntüleri Kullanılarak Topraküstü Biyokütlenin Tahmini (Çetibeli Orman İşletme Şefliği Örneği)**” konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan “Bilimsel İntihal Tespit Programı”yla tarandığını, “intihal içermediğini” beyan ederim. Çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (31/07/2025).

Erhan YARTIM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SAF KIZILÇAM MEŞCERELERİNDE UYDU GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK TOPRAKÜSTÜ BİYOKÜTLENİN TAHMİNİ (ÇETİBELİ ORMAN İŞLETME ŞEFLİĞİ ÖRNEĞİ)

Erhan YARTIM

Çankırı Karatekin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sedat KELEŞ

Bu çalışmanın amacı, Muğla Orman Bölge Müdürlüğü, Marmaris Orman İşletme Müdürlüğü, Çetibeli Orman İşletme Şefliği sınırlarında yayılış gösteren saf kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) meşcerelerinde topraküstü biyokütle miktarının Sentinel-2 uydu görüntülerinden hesaplanan değişkenlerle tahmin edilmesidir. Çalışmada toplam 156 adet örnek alan verisi kullanılmış, her bir örnek alanın topraküstü biyokütle miktarı hesaplanmış, Sentinel-2 uydu görüntüsünden bant reflektans, vejetasyon indis ve tekstür değerleri elde edilmiştir. Stepwise çoğul regresyon analizi ile geliştirilen dört farklı modelin performans değerlendirmelerinde düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{düz}$) ve standart hata ($Sy.x$) kriterleri kullanılmıştır. Sadece bant reflektans verilerinin kullanıldığı Model 1'de $R^2_{düz} = 0,218$ ve $Sy.x = 3,83$; sadece vejetasyon indislerinin kullanıldığı Model 2'de $R^2_{düz} = 0,328$ ve $Sy.x = 3,61$; tekstür verilerinin kullanıldığı Model 3'te $R^2_{düz} = 0,550$ ve $Sy.x = 2,91$; bant reflektans, vejetasyon indis ve tekstür verilerinin birlikte kullanıldığı Model 4'te ise en yüksek başarı $R^2_{düz} = 0,605$ ve $Sy.x = 2,72$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, tekstür özelliklerinin modele dahil edilmesinin tahmin doğruluğunu artırdığını ve uzaktan algılama verilerinin yersel ölçümlerle birlikte topraküstü biyokütle tahmininde etkin şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

2025, 51 sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Toprak Üstü Biyokütle, Sentinel 2 Uzaktan algılama, Modelleme

ABSTRACT

Master of Science Thesis

ESTIMATING ABOVEGROUND BIOMASS USING SATELLITE IMAGES IN PURE CALABRIAN PINE STANDS (A CASE STUDY IN ÇETİBELİ FOREST MANAGEMENT UNIT)

Erhan YARTIM

Çankırı Karatekin University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Forest Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sedat KELEŞ

The aim of this study is to estimate the aboveground biomass (AGB) of pure Turkish red pine (*Pinus brutia* Ten.) stands located within the boundaries of the Çetibeli Forest Enterprise Chiefdom, Marmaris Forest Enterprise Directorate, Muğla Regional Forestry Directorate, using variables derived from Sentinel-2 satellite imagery. A total of 156 sample plots were utilized, and the AGB for each plot was calculated. Band reflectance, vegetation indices, and texture values were extracted from Sentinel-2 imagery. Using stepwise multiple regression analysis, four different models were developed and evaluated based on adjusted coefficient of determination (adjusted R^2), and standard error (Sy.x). For Model 1, which used only band reflectance data, the results were adjusted $R^2=0.218$, and Sy.x=3.83; for Model 2, which used only vegetation indices, adjusted $R^2=0.328$, and Sy.x=3.61; for Model 3, which used band only texture variables, adjusted $R^2=0.550$, and Sy.x=2.91; and for Model 4, which incorporated band reflectance, vegetation indices, and texture variables, the highest performance was achieved with adjusted $R^2=0.605$, and Sy.x=2.72. These results indicate that the inclusion of texture variables significantly improves estimation accuracy and demonstrate that remote sensing data can be effectively used in conjunction with field measurements for estimating aboveground biomass in forestry planning and monitoring.

2025, 51 pages

Keywords: Above Ground Biomass, Sentinel 2, Remote sensing, Modeling

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

“Saf Kızılçam Meşcerelerinde Uydu Görüntüleri Kullanılarak Topraküstü Biyokütlenin Tahmini (Çetibeli Orman İşletme Şefliği Örneği)” adlı bu çalışma 2022-2025 yılları arasında hazırlanarak Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne “Yüksek Lisans Tezi” olarak sunulmuştur.

Öncelikle, tez danışman hocam sayın Prof. Dr. Sedat KELEŞ’ e, bu çalışmanın her aşamasında gösterdiği değerli rehberlik ve sabrı için minnettarım. Bilgi ve tecrübelerini bana aktarırken her zaman anlayışlı ve teşvik edici oldu. Ayrıca, bana yönelik eleştirileri ve yapıcı geri bildirimleriyle bu çalışmayı daha iyi bir noktaya getirmemde önemli bir rol oynamıştır.

Bu süreçte desteklerini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Alkan GÜNLÜ ‘ ye bilgilerini ve deneyimlerini benimle paylaştıkları için teşekkür ederim.

Son olarak, bu tezin hazırlanmasında yanımda olan, bana moral veren ve sürekli teşvik eden sevgili eşim Filiz YARTIM ve biricik oğlum Nail Kerem YARTIM’ a, desteğini, yardımını esirgemeyen, bilgilerini benimle paylaşan çok değerli kardeşim Orman Yük. Müh. Mustafa Kağan ÖZKAL’ a, yine bu süreçte yardımını ve desteğini esirgemeyen değerli abim Orman Yük. Müh. Fatih SARIÇAM’ a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Erhan YARTIM

Çankırı, Temmuz 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER DİZİNİ	v
KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
3. MATERYAL VE METOT	13
3.1Çalışma Alanının Tanıtımı.....	13
3.1.1 Çalışma Alanının Jeolojik ve Minerolojik Yapısı.....	14
3.1.2 İklim Durumu	15
3.2Materyal.....	16
3.3Yöntem.....	16
3.3.1 Örnek alan verilerine ilişkin değerlendirmeler	16
3.3.2 Sentinel-2 uydu görüntüsüne ilişkin değerlendirmeler	17
3.3.3 Sentinel-2 görüntüsünden tekstür değerlerinin elde edilmesi	22
3.3.4 İstatistiksel analiz	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	28
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	42
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ.....	51

SİMGELER DİZİNİ

m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
mm	Milimetre
cm	Santimetre
°C	Santigrat derece



KISALTMALAR DİZİNİ

FAO	Food and agriculture organization
Log	Logaritmik
OBM	Orman bölge müdürlüğü
OİM	Orman işletme müdürlüğü
OİŞ	Orman işletme şefliği



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Çalışma alanının konumu	14
Şekil 4.1 En iyi regresyon modeline göre hesaplanan toprak üstü biyokütle ile tahmin edilen toprak üstü biyokütle ilişkisi	35
Şekil 4.2 En iyi regresyon modelini esas alan modelle elde edilen hatalar-tahmini toprak üstü biyokütle ilişkisi.....	37



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Çetibeli Orman İşletme şefliğine ait alan bilgileri	14
Çizelge 3.2 Örnek Alanda Bulunan Ağaçlar ile ilgili Genel Bilgiler.....	17
Çizelge 3.3 Sentinel-2 uydu görüntüsüne ait bazı bilgiler	18
Çizelge 3.4 Çalışmada kullanılan vejetasyon indisleri	20
Çizelge 3.5 Çalışmada kullanılan bazı tekstür özelliklerinin sembolleri ve açıklamaları.....	24
Çizelge 4.1 Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 bant reflektans değerlerine göre tahmin eden en iyi model sonuçları.....	29
Çizelge 4.2 Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 vejetasyon indis değerlerine göre tahmin eden en iyi model sonuçları.....	30
Çizelge 4.3 Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 tekstür değerlerine göre tahmin edilen en iyi model sonuçları	32
Çizelge 4.4 Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 tabanlı bant reflektans değerleri, vejetasyon indeksleri ve tekstür değerlerine göre tahmin eden en iyi model sonuçları	34

1. GİRİŞ

Orman ekosistemleri, dünya genelinde biyolojik çeşitliliğin en yoğun şekilde görüldüğü yaşam alanları arasında yer almakta olup, aynı zamanda bir milyardan fazla insanın temel yaşam gereksinimlerini karşılayan kritik kaynakların temininde önemli bir rol oynamaktadır. Bu kaynaklar içerisinde odun ve odun dışı ürünlerin yanı sıra besin maddeleri ve biyoyakıtlar gibi unsurlar yer almakta, bu durum ormanların hem ekonomik hem de sosyal açıdan taşıdığı değeri açıkça ortaya koymaktadır (FAO 2020, Nesha *et al.* 2021). Öte yandan, ormanlar yaban hayatı için hayati habitatlar oluşturarak ekosistemin canlı çeşitliliğini desteklemekte (Gibson *et al.* 2011, Sasaki 2021), geniş bir bitki tür spektrumunun yayılımını ve üremesini kolaylaştırmakta (Sullivan *et al.* 2017, Sasaki 2021) ve atmosferdeki karbonu depolayarak küresel iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini hafifletme noktasında kritik bir ekolojik işlev üstlenmektedir (Pan *et al.* 2011, Nesha *et al.* 2021, Saranay Kayar vd. 2024). Ormanların bu çok boyutlu işlevleri, ekolojik dengenin korunması, biyolojik çeşitliliğin sürdürülmesi ve insan yaşam kalitesinin artırılması açısından sahip oldukları stratejik önemi gözler önüne sermektedir. Bununla birlikte, bu işlevlerin sürekliliğini sağlamak ve orman kaynaklarının sürdürülebilir şekilde yönetimini temin edebilmek amacıyla orman ekosistemlerinin yapısal özelliklerinin düzenli olarak gözlemlenmesi ve değerlendirilmesi büyük bir gereklilik arz etmektedir. Bu kapsamda, meşcere hacmi, göğüs yüzeyi alanı, ağaç sayısı ve ortalama çap gibi temel meşcere parametrelerinin doğru, hızlı ve güvenilir biçimde belirlenmesi, sürdürülebilir orman yönetimi ve etkin planlama süreçlerinin yürütülebilmesi için kritik bir öneme sahiptir (Bulut *et al.* 2023).

Orman ekosistemleri, yeryüzünün önemli bir bölümünü kaplayarak biyolojik çeşitliliğin sürdürülmesinde, karbon döngüsünün düzenlenmesinde ve iklim sisteminin dengesinin sağlanmasında kritik roller üstlenmektedir. Ormanlar yalnızca odun ve odun dışı ürünler, biyoyakıt ve besin gibi kaynaklarla insan yaşamını desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda atmosferdeki karbonun tutulması yoluyla iklim değişikliğiyle mücadelede vazgeçilmez bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Bu ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilir şekilde yönetilebilmesi ve orman kaynaklarının planlı kullanımının

sağlanabilmesi için ormanlık alanlarda biyokütlenin doğru ve etkin biçimde belirlenmesi gerekmektedir. Geleneksel yersel yöntemlerin maliyetli ve zaman alıcı olması, uzaktan algılama teknolojilerinin orman biyokütlesinin kestirilmesinde alternatif ve güçlü bir araç olarak kullanılmasını gündeme getirmiştir. Özellikle Sentinel-1 radar ve Sentinel-2 optik uydu verilerinin füzyonu, çeşitli istatistiksel ve makine öğrenmesi yöntemleriyle birlikte kullanıldığında, orman biyokütlesinin hızlı, güvenilir ve geniş alanlarda belirlenmesine imkân tanıyarak sürdürülebilir orman yönetimine katkı sunmaktadır (Özdemir, Demiralay ve Şahin 2023).

Biyokütle kavramı üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, terimin içeriği benzer olmakla birlikte farklı bakış açılarıyla çeşitli tanımlamalara yer verildiği görülmektedir. Örneğin, Sun ve arkadaşları (1980), biyokütleyi bir ağaçtan elde edilebilecek gövde, dal, yaprak, kabuk ve kök gibi bileşenlerin tamamının oluşturduğu ve bu ağaçlardan meydana gelen meşceredeki toplam kütle (ağırlık) miktarı olarak tanımlamaktadır. Saraçoğlu'na (1988) göre ise biyokütle, ekosistemlerde madde birikimi ve dönüşüm süreçlerini kapsamakta olup, ormanların sahip olduğu karbon stokları, yıllık karbon depolama potansiyelleri ve biyoenerji kapasitelerini ifade eden bir kavramdır. Dixon ve çalışma arkadaşları (1994) ise biyokütleyi, bitkiler ve ağaçlar tarafından oluşturulan tüm organik maddeleri kapsayan bir terim olarak tanımlamakta; fotosentez yoluyla güneş enerjisinin toplandığı ve depolandığı alanlar olarak biyokütlenin önemine vurgu yapmaktadır. Bu tanımlar, biyokütlenin hem orman ekosistemlerindeki ekolojik döngülerdeki yerini hem de enerji dönüşümü ve karbon depolama açısından taşıdığı kritik rolü farklı yönleriyle ortaya koymaktadır.

Topraküstü biyokütle, bir ekosistemdeki bitkilerin ve organik materyallerin yer yüzeyinde bulunan kısımlarının toplam biyolojik kütlelerini ifade etmektedir. Bu kapsamda, ağaçların gövde, dal, yaprak ve diğer bitkisel organlarının tamamı topraküstü biyokütle bileşenlerini oluşturmaktadır. Topraküstü biyokütle, ekosistemlerin karbon depolama potansiyelini belirlemesi ve ekosistem sağlığının izlenmesi açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, orman, tarım ve diğer doğal alanlardaki biyokütle miktarı, ekosistemler arası enerji ve madde akışlarının takibinde önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda fosil bazlı enerji kaynaklarının azalması ve atmosferdeki karbondioksit düzeylerinin artması, orman biyokütlesi gibi

yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynaklara olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Topraküstü biyokütle, geniş biyomlar olan orman ekosistemlerinde karbon depolama kapasitesinin hesaplanması, ekosistem hizmetlerinin değerlendirilmesi ve iklim değişikliği araştırmalarında sıklıkla başvurulmuş temel bir değişkendir. Bu doğrultuda, uzaktan algılama teknolojileri, geniş alanlarda hızlı ve maliyet etkin bir şekilde topraküstü biyokütle tahminlerinin yapılabilmesi için yaygın olarak kullanılan güçlü araçlar arasında yer almaktadır.

Son dönemde uzaktan algılama (UA) ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) alanlarında yaşanan teknolojik ilerlemeler, geleneksel ölçüm ve izleme yöntemlerine güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Roy *et al.* 2017, Zahriban Hesari *et al.* 2019, Ahmadi *et al.* 2020, Kumar *et al.* 2021). UA teknolojileri, geniş coğrafi alanların hızlı ve sistematik biçimde taranabilmesini sağlarken, ürettiği verilerin yüksek doğruluk, güvenilirlik ve kullanım pratikliği sunması sayesinde ormancılık, tarım ve çevre bilimleri gibi birçok disiplinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Grabska *et al.* 2019, Maponya *et al.* 2020, Ji *et al.* 2020). Özellikle meşcere parametrelerinin kestirilmesi noktasında, uzaktan algılama teknolojilerinin sağladığı yüksek çözünürlüklü veri setleri ve gelişmiş analiz yöntemleri küresel ölçekte dikkat çeken bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Asner *et al.* 2013, Duncanson *et al.* 2019). Bu teknolojiler sayesinde, uydu görüntülerinden elde edilen spektral yansıma değerleri, vejetasyon indeksleri, tekstür verileri ile eğim, bakı ve yükselti gibi topoğrafik parametrelerin bir arada değerlendirilmesi mümkün olmakta ve böylelikle orman ekosistemlerinin yapısal özelliklerinin daha bütüncül ve detaylı bir şekilde modellenmesine imkân tanımaktadır (Güverçin ve Günlü, 2023, Aksoy 2024).

Bu araştırmada, Muğla Orman Bölge Müdürlüğü'ne bağlı Marmaris Orman İşletme Müdürlüğü, Çetibeli Orman İşletme Şefliği sınırlarında bulunan saf kızılçam meşcerelerinde yersel ölçümlerle belirlenen toplam 156 örnek alandan ve bu örnek alanların içindeki toplam 2802 adet ağaçtan elde edilen topraküstü biyokütle değerleri ile Sentinel-2 uydu görüntülerinden ilgili örnek alanlara ait bant yansıma değerleri, vejetasyon indeksleri ve tekstür analizlerinden türetilen veriler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmada, yersel veriler ile uzaktan algılama yoluyla elde edilen parametreler arasındaki bağlantılar çoklu regresyon analizi yöntemi kullanılarak

modellenmiş, böylece geniş alanlarda topraküstü biyokütle tahminlerinin hızlı ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Çalışma konusu ile ilgili literatürde gerekli incelemeler yapılmış ve konu ile ilgili bazı literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Zheng *et al.* (2004), yapraklı orman ekosistemlerinde topraküstü biyokütlenin tahmin edilmesine yönelik olarak Landsat 7 ETM+ uydu verilerinden yararlanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, bant reflektans değerleri ve vejetasyon indekslerinin topraküstü biyokütle ile ilişkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bant reflektans verileri ile topraküstü biyokütle arasında $R^2 = 0,95$ gibi oldukça yüksek bir belirtme katsayısı elde edildiğini, vejetasyon indeksleri kullanıldığında ise $R^2 = 0,86$ seviyesinde güçlü bir ilişki bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, Landsat 7 ETM+ uydu verilerinin geniş alanlarda yapraklı orman biyokütlesinin kestiriminde yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir.

Sakıcı ve Ercanlı (2004)'te biyolojik enerji kaynaklarının temelini oluşturan orman ekosistemlerindeki biyokütle miktarının belirlenmesine yönelik kullanılan geleneksel yersel ölçüm yöntemleri ile son yıllarda hızla gelişen ve yaygın şekilde araştırılan uzaktan algılama temelli yöntemler ele alınmıştır. Literatürde, uzaktan algılama tekniklerinin geniş alanlarda biyokütle tahmininde sağladığı zaman ve maliyet avantajı sayesinde, klasik yöntemlere kıyasla daha pratik ve hızlı bir çözüm sunduğu vurgulanmaktadır. Ancak, tek ağaç düzeyinde gerçekleştirilen biyokütle kestirimlerinde uzaktan algılama tekniklerinin hata payının nispeten daha yüksek olduğu ve bu nedenle güvenilirlik düzeyinin yersel ölçümlere göre daha düşük kaldığı ifade edilmektedir. Bu durum, uzaktan algılama yöntemlerinin geniş ölçekli biyokütle haritalaması ve karbon stoklarının izlenmesinde avantajlı bir seçenek oluştururken, detaylı bireysel ağaç analizleri için yersel ölçümlerin hâlen önemli bir veri kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır.

Lu (2005), Landsat TM uydu verilerini kullanarak topraküstü biyokütlenin tahmin edilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, spektral bant değerleri, tekstür özellikleri ve spektral bantlar ile tekstür verilerinin kombinasyonu incelenmiş ve biyokütle tahminindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma bulgularına göre, spektral

bant verileri ile biyokütle arasındaki belirtme katsayısı $R^2 = 0,65-0,70$ aralığında, tekstür verileri için $R^2 = 0,23-0,71$ aralığında ve spektral bant ile tekstür kombinasyonu için $R^2 = 0,50-0,78$ aralığında bulunmuştur. Bu sonuçlar, tekstür verilerinin topraküstü biyokütle tahmininde önemli bir rol oynadığını göstermekte ve spektral bant verileri ile birlikte kullanıldığında kestirim modellerinin doğruluğunu artırabileceğini ortaya koymaktadır.

Ünsal (2007) tarafından yapılan çalışmada, Enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıtların çevresel etkilerinin belirginleşmesiyle birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik ilgi giderek artmaktadır. Bu kaynaklar arasında orman biyokütlesi, sürdürülebilirliği ve çevre dostu yapısı sayesinde öne çıkmaktadır. Orman biyokütlesi, bir ekosistem içerisindeki ağaçların gövde, dal, yaprak ve kök gibi bileşenlerinin kütle olarak toplamını ifade ederek, hem karbon depolama kapasitesinin belirlenmesi hem de ekosistemlerin verimliliğinin izlenmesi açısından önemli bir parametre oluşturmaktadır. Bu bağlamda, Adana Orman Bölge Müdürlüğü Karaisalı Orman İşletme Müdürlüğü sınırları içerisinde yer alan kızılçam meşcerelerinde yürütülen çalışmalar, göğüs çapı ile yaş ve kuru ağırlık arasındaki ilişkileri modelleyerek biyokütle tablolarının hazırlanmasına katkı sağlamaktadır. Orta ağaç yöntemi ve regresyon modelleme tekniklerinin kullanıldığı bu çalışmalar, bölgedeki kızılçam ormanlarının biyokütle potansiyelinin doğru ve hızlı bir şekilde belirlenmesine olanak tanımakta, sürdürülebilir orman yönetimi ve karbon stoklarının izlenmesi için sağlam bir zemin oluşturmaktadır.

Özdemir ve Mert (2007), saf kızılçam meşcerelerinde Quickbird uydu görüntülerinden elde edilen verileri kullanarak meşcere hacminin tahmin edilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, yersel ölçümlerle belirlenen meşcere hacmi ile uydu verilerinden türetilen parametreler arasındaki ilişki incelenmiş ve iki veri seti arasında $r = 0,40$ düzeyinde bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip uydu görüntülerinin orman alanlarında meşcere hacmi tahmininde kullanılabilirliğini gösterirken, ilişkinin orta düzeyde olması, tahminlerin hassasiyetinin artırılabilmesi için yöntemlerin geliştirilmesi gerekliliğini de ortaya koymaktadır.

Ateşoğlu (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı uzaktan algılama verileri ile orman meşcerelerinin bazı yapısal parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Araştırmada, Landsat 7 ETM+ uydu görüntülerinden elde edilen değişkenler kullanılarak göğüs yüzeyi alanı ve meşcere hacmi ile korelasyon analizi yapılmıştır. Sonuçlar, uydu verileri ile göğüs yüzeyi alanı arasında %78 düzeyinde güçlü bir ilişki olduğunu, buna karşın meşcere hacmi ile olan ilişkinin %52 seviyesinde gerçekleştiğini ortaya koymuştur.

Günlü vd. (2013), saf kayın meşcerelerinde Landsat 7 ETM+ ve Quickbird uydu görüntülerinden elde edilen verileri kullanarak meşcere hacminin tahminine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, uydu verilerinden türetilen değişkenler ile yersel ölçümlerle belirlenen meşcere hacmi arasındaki ilişkiler modellenmiş ve Landsat 7 ETM+ verileri kullanılarak oluşturulan modelin belirtme katsayısı (R^2) 0,54 olarak bulunmuştur. Quickbird uydu verileri ile yapılan modellemede ise belirtme katsayısı 0,70 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip Quickbird verilerinin meşcere hacmi tahmininde daha yüksek bir doğruluk sağladığını göstermekte, uzaktan algılama temelli biyokütle ve hacim kestirim çalışmalarında kullanılan uydu verisi türünün kestirim başarısını etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Günlü *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada, meşcere hacmi ve meşcere göğüs yüzeyi ile Pan-Sharpned IKONOS uydu görüntüsünden elde edilen değişkenler arasındaki ilişkileri modellemişlerdir. Meşcere hacmi için en yüksek R^2 değeri 0,55 ve meşcere göğüs yüzeyi için 0,59 olarak bulmuşlardır.

Özkal (2017), sahil çamı (*Pinus pinaster*) ve meşe (*Quercus spp.*) meşcerelerinde Göktürk-2 uydu görüntülerinden elde edilen değişkenleri kullanarak meşcere göğüs yüzeyi ve meşcere hacmi tahminine yönelik bir modelleme çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada, meşe meşcereleri için göğüs yüzeyi tahmininde belirtme katsayısı (R^2) 0,16, meşcere hacmi tahmininde ise 0,08 olarak bulunmuştur. Buna karşılık, sahil çamı meşcerelerinde göğüs yüzeyi için $R^2 = 0,27$, meşcere hacmi için ise $R^2 = 0,36$ seviyesinde değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Göktürk-2 uydu verilerinin meşcere parametrelerinin tahmininde tür bazında farklı performans gösterebildiğini ortaya koymakta, sahil çamı meşcerelerinde meşe meşcerelerine kıyasla daha yüksek kestirim başarısı sağladığını göstermektedir.

Bulut (2021), saf karaçam (*Pinus nigra J.F.Arnold subsp. pallasiana*) meşcerelerinde, Landsat 8 OLI ve Sentinel-2 uydu görüntülerinden elde edilen bant reflektans ve vejetasyon indeksi verileri ile meşcere göğüs yüzeyi ve meşcere hacmi arasındaki ilişkileri çoklu regresyon analizi yöntemiyle modellemiştir. Çalışmada, meşcere göğüs yüzeyi tahmininde Landsat 8 OLI bant reflektans değerleri için $R^2 = 0,34$, vejetasyon indisleri için $R^2 = 0,42$; Sentinel-2 bant reflektans değerleri için $R^2 = 0,41$, vejetasyon indisleri için $R^2 = 0,45$ olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, meşcere hacmi tahmininde Landsat 8 OLI bant reflektans değerleri ile $R^2 = 0,40$, vejetasyon indisleri ile $R^2 = 0,47$; Sentinel-2 bant reflektans değerleri ile $R^2 = 0,44$ ve vejetasyon indisleri ile $R^2 = 0,47$ değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Sentinel-2 ve Landsat 8 uydu verilerinin karaçam meşcerelerinde göğüs yüzeyi ve hacim tahmini için kullanılabilirliğini ortaya koyarken, vejetasyon indekslerinin bant reflektans değerlerine kıyasla daha yüksek belirtme katsayısı sağladığını göstermektedir.

Musthafa and Singh (2022), topraküstü biyokütle tahminine yönelik olarak C bantlı Radarsat-2, L bantlı ALOS-2 ve L bantlı PALSAR-2 uydu görüntülerinden elde edilen değişkenler ile GEDI verilerinden elde edilen meşcere boy bilgilerini kullanarak bir modelleme çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada, farklı bant ve polarizasyon kombinasyonlarının topraküstü biyokütle tahminindeki performansı değerlendirilmiş ve en yüksek model başarısı, L bantlı (HH, HV), C bantlı (HV) polarizasyon verileri ile GEDI meşcere boy verisinin bağımsız değişken olarak kullanıldığı modelde elde edilmiştir. Bu modelde belirtme katsayısı $R^2 = 0,81$ olarak bulunmuş olup, radar verileri ile GEDI verilerinin entegrasyonunun topraküstü biyokütle tahmininde yüksek doğruluk sağladığı ortaya konmuştur.

Atar (2023), Doğu Kayını (*Fagus orientalis* Lipsky.) meşcerelerinde farklı iklim senaryolarına göre biyokütle, hacim ve diğer yapısal özelliklerin tahmini ve simülasyonunu amaçlamıştır. Batı Karadeniz Bölgesi'ndeki 240 örnek alandan elde edilen verilerle yıllık sıcaklık ve yağış gibi iklim değişkenlerini içeren doğrusal olmayan regresyon modelleri geliştirilmiş; Gompertz ve Schnute modellerine dayalı boy ve ağaç sayısı denklemleri oluşturulmuştur. Geliştirilen alt modeller, bir büyüme simülatörü aracılığıyla entegre edilerek SSP 126, SSP 245 ve SSP 585 iklim senaryolarına göre

2027–2102 yılları arasındaki 16 dönem için meşcere biyokütlesi ve karbon stokları simüle edilmiştir. Sonuçlar, SSP 126 senaryosunun diğerlerine göre daha yüksek biyokütle değerleri ürettiğini ve iklim değişikliğinin biyokütle dinamikleri üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermiştir.

Şahan ve Günlü (2024), Sinop Orman Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde yer alan Boyabat Orman İşletme Müdürlüğü, Elekçamı Orman İşletme Şefliği'ndeki saf karaçam meşcerelerinde topraküstü karbon (TÜK) miktarının tahminine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, toplam 247 örnek alan verisi kullanılmış, envanter verileri yardımıyla her bir örnek alan için TÜK değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca Landsat 5 TM uydu görüntülerinden bant yansıma ve vejetasyon indeksleri, ALOS-PALSAR uydu verilerinden HH ve HV polarizasyonlarına ait parlaklık ve geri yansıtım değerleri ile eğim, bakı ve yükselti parametreleri hesaplanarak modele dâhil edilmiştir. TÜK değerleri ile bu değişkenler arasındaki ilişkiler çoklu regresyon analizi kullanılarak modellenmiş ve toplam 14 adet model geliştirilmiştir. Modellerin başarıları incelendiğinde, Landsat 5 TM vejetasyon indeksleri, ALOS-PALSAR parlaklık ve geri yansıtım verileri ile topoğrafik parametrelerin (eğim, bakı, yükselti) bağımsız değişken olarak kullanıldığı modelde düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{\text{düz}}$) 0,655 ve standart hata ($Sy.x$) 0,18147 olarak bulunmuş, bu modelin TÜK tahmininde yüksek bir doğruluk sağladığı ortaya konmuştur.

Ali *et al.* (2025) yaptıkları çalışmada topraküstü biyokütle (AGB) tahmini, ekolojik değerlendirme, karbon stoklarının hesaplanması ve orman yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmada, Sentinel-2 ve Landsat-9 uydularından elde edilen veriler kullanılarak XGBoost, Destek Vektör Makineleri (SVM) ve Rastgele Orman (RF) makine öğrenmesi algoritmalarının topraküstü biyokütle tahminindeki performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada, önemli spektral bantların ve vejetasyon indekslerinin AGB tahmin doğruluğuna etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Sentinel-2 verileri, daha yüksek mekânsal ve spektral çözünürlüğe sahip olması nedeniyle Landsat-9 verilerine kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir. Sentinel-2 verileriyle XGBoost algoritması en iyi performansı göstererek $R^2 = 0,82$ ve $RMSE = 0,73$ Mg/ha değerlerine ulaşmış, Landsat-9 verilerinde ise $R^2 = 0,80$ ve $RMSE$

= 0,71 Mg/ha değerleri elde edilmiştir. Çalışmada SVM algoritması da yüksek doğruluk göstermiş olup Sentinel-2 için $R^2 = 0,79$ ve $RMSE = 0,73$ Mg/ha, Landsat-9 için $R^2 = 0,76$ ve $RMSE = 0,80$ Mg/ha değerleri bulunmuştur. RF algoritması ise Sentinel-2 verileriyle $R^2 = 0,74$ ve $RMSE = 0,93$ Mg/ha, Landsat-9 ile $R^2 = 0,72$ ve $RMSE = 0,88$ Mg/ha değerlerine ulaşmıştır. Değişken önem analizleri, vejetasyon indekslerinin ve spektral bantların topraküstü biyokütle tahmininde önemli değişkenler olarak öne çıktığını göstermiştir. Bu çalışma, makine öğrenmesi algoritmalarının uzaktan algılama verileri ile entegrasyonunun topraküstü biyokütle tahmininde yüksek doğruluk ve etkinlik sağladığını ortaya koyarak, biyokütle araştırmalarında bu yöntemlerin potansiyelini göstermektedir.

Jiang *et al.* (2025) yaptıkları çalışmada Orman topraküstü biyokütlesinin (AGB) doğru tahmini, etkili orman kaynak yönetimi ve karbon stoklarının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak, sınırlı arazi ölçümleri ile tek bir veri kaynağı veya tahmin modeli kullanımının getirdiği kısıtlamalar, AGB tahmin doğruluğunu sınırlandırmaktadır. Bu soruna çözüm amacıyla gerçekleştirilen çalışmada, Sentinel-1 (S-1) ve Sentinel-2 (S-2) uydu verilerinin kullanıldığı çok kaynaklı veri entegrasyonuna dayalı bir çerçeve geliştirilmiştir. Çalışmada, sekiz farklı tahmin modeli (Çoklu Doğrusal Regresyon—MLR; Elastic-Net; lineer ve polinomial çekirdekli destek vektör regresyonu; k-en yakın komşu; geri yayılım yapay sinir ağı—BPNN; rastgele orman—RF; gradyan artırılmalı ağaç—GBT) kullanılmıştır. Lidar verileri kullanılarak elde edilen AGB değerleri referans alınarak üç aşamalı bir optimizasyon stratejisi uygulanmış; adım adım değişken seçimi (SFS), hiperparametre optimizasyonu ve çoklu karar vektörü füzyon (MDVF) modeli geliştirilmiştir. İlk aşamada, SFS yöntemi ile her model için en uygun değişken alt kümeleri belirlenmiş, ardından grid arama stratejisi ile hiperparametre optimizasyonu yapılmıştır. Son aşamada sekiz model değerlendirilmiş ve en iyi performans gösteren modellerin çıktılarının entegrasyonu için MDVF uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, lidar ile elde edilen AGB tahminlerinin yüksek doğruluk sağladığı ($R^2 = 0,89$, $RMSE = 20,27$ Mg/ha, $RMSEr = \%15,90$) ve özellikle envanter çalışmalarının zor olduğu subtropikal ormanlarda arazi ölçümlerine önemli bir katkı sunduğu belirlenmiştir. SFS yöntemi, farklı modeller için en uygun değişken alt kümelerini uyarlanabilir biçimde seçerek çoklu doğrusal bağlantı sorunlarını azaltmada etkili

olmuştur. Uydu verilerine dayalı AGB tahmininde MDVF modelinin kullanılması ile S-1 ve S-2 verilerinin sinerjisi sağlanarak güçlü sonuçlar elde edilmiş ($R^2 = 0,652$, $RMSE = 31,063$ Mg/ha, $RMSEr = \%20,4$) ve ikinci optimizasyon aşamasında en iyi dört model (BPNN, GBT, RF, MLR) ile karşılaştırıldığında R^2 değerinin $\%4,18-7,41$ oranında arttığı, $RMSE$ değerinin ise $\%3,55-5,89$ oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, aktif ve pasif uydu verilerinin lidar verileri ile entegrasyonunun, geniş ölçekli ve sürekli mekânsal topraküstü biyokütle haritalaması için maliyet etkin ve yüksek doğruluk sağlayan bir yaklaşım sunduğunu göstererek ekolojik izleme ve orman karbon muhasebesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Xu *et al.* (2025) yaptıkları çalışmada kıyı sulak alanlarında topraküstü biyokütlenin (AGB) mekânsal dağılımının ve belirsizliğinin doğru bir şekilde analiz edilmesi, sürdürülebilir mavi karbon yönetimi hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, Çin'in Sarı Nehir Deltası'ndaki (YRD) kıyı sulak alanlarında AGB tahmini için Sentinel-1 (S1), Sentinel-2 (S2) ve Landsat-8 (L8) verilerinin kullanılabilirliğini değerlendirmek üzere Extreme Gradient Boosting (XGBoost) yöntemi temel alınarak sekiz farklı model oluşturulmuştur. AGB'nin mekânsal belirsizliği ise Kuantil Regresyon Ormanı (QRF) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, S2 verilerine dayalı geliştirilen AGB modeli, L8 ($R^2 = 0,59$, $RMSE = 198,84$ g/m²) ve S1 ($R^2 = 0,43$, $RMSE = 219,60$ g/m²) verilerine dayalı modellere kıyasla daha yüksek performans göstermiş ($R^2 = 0,74$, $RMSE = 171,23$ g/m²) ve S2 verilerinin AGB modellemesinde daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. S1, S2, L8 verileri ile topoğrafik ve biyofiziksel değişkenlerin (S1S2L8plus) birlikte kullanıldığı model ise en yüksek performansı sergileyerek $R^2 = 0,80$ ve $RMSE = 154,98$ g/m² değerlerini elde etmiştir. Çalışmada, S2 verilerinden elde edilen kırmızı kenar spektral indekslerinin AGB modellemesinde önemli değişkenler olduğu belirlenmiştir. QRF yöntemi ile hesaplanan mekânsal belirsizlik analizinde, S1S2L8plus ve S2 verilerine dayalı modellerin tahmin belirsizliklerinin, S1 ve L8 verilerine dayalı modellere kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Bu çalışma, optik uzaktan algılama verilerinin, özellikle Sentinel-2 verilerinin, kıyı sulak alanlarında topraküstü biyokütle modellemesi için uygun bir araç olduğunu, Sentinel-1 verilerinin ise bu konuda daha sınırlı bir başarı sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca AGB'nin düzenli olarak modellenmesi, haritalanması ve belirsizlik

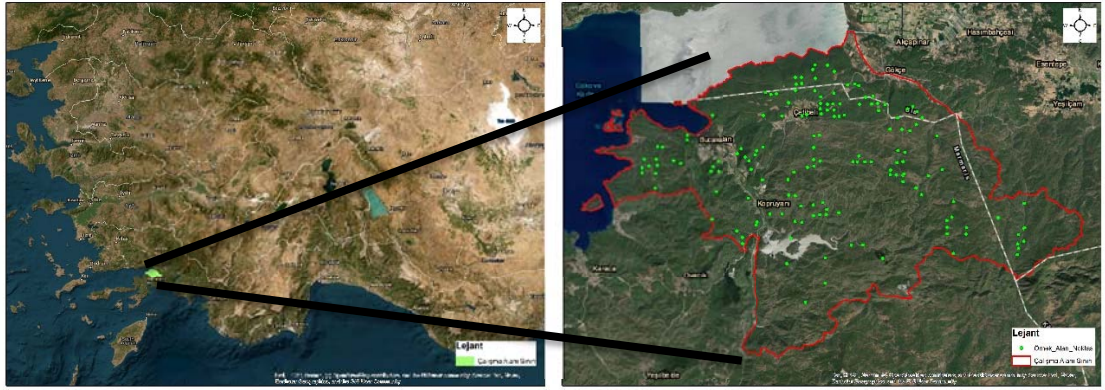
analizlerinin yapılmasının, kıyı sulak alanlarında sürdürülebilir mavi karbon yönetimi süreçlerine katkı sağlayabileceği vurgulanmaktadır.



3. MATERYAL VE METOT

3.1 Çalışma Alanının Tanıtımı

Çetibeli Orman İşletme Şefliği, Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde yer almakta olup, Aydın N20c3, N20c4, N20d3 ile Marmaris O20b1, O20b2 ve O20a2 memleket paftalarında konumlanmaktadır. Şeflik, 28°19'47'' – 28°17'35'' doğu boylamları ile 37°01'57'' – 36°53'43'' kuzey enlemleri arasında bulunmaktadır. Mülkiyet açısından Muğla ili Marmaris ilçesi sınırları içinde yer alan Çetibeli Orman İşletme Şefliği, idari olarak Muğla Orman Bölge Müdürlüğü'ne bağlı Marmaris Orman İşletme Müdürlüğü bünyesinde faaliyet göstermektedir. Şeflik, batıda Karaca, kuzeyde Gökova, doğuda Karabörtlen Orman İşletme Şeflikleri ve güneyde Marmaris Milli Park Şefliği ile sınır komşusudur. Plan ünitesi sınırları içerisindeki tüm orman alanları devlet mülkiyetinde olup, mülkiyet durumu planlamaya esas veri tabanında kayıt altına alınmıştır. Ayrıca plan ünitesi, Marmaris'e 18 km, Muğla'ya 48 km ve İzmir'e 247 km mesafede yer alarak önemli tüketim merkezlerine yakın bir konumda bulunmaktadır. Çetibeli Orman İşletme Şefliği plan ünitesi sınırları içerisinde farklı ağaç türleri yayılımı göstermektedir. Bu kapsamda, plan ünitesinde en yaygın türlerden biri kızılçam (Çz) olup, bölgenin orman dokusunu büyük ölçüde oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra fıstıkçamı (Çf), sığla (Sğ), okaliptüs (Ok), ardıç (Ar) ve servi (Sr) türleri de plan ünitesi içerisinde yayılımı göstermekte ve ekosistemin biyolojik çeşitliliğine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, Akdeniz bölgesinin karakteristik bitki örtüsünü temsil eden maki (Mak) toplulukları da plan ünitesinde yer almakta olup, bu türlerin varlığı bölgedeki ekolojik çeşitliliğin korunması açısından önem arz etmektedir (Anonim 2024). Çalışma alanının lokasyonu Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Çalışma alanının konumu

Tepe kapalılığı %10 ve daha düşük olan ormanlık alanlar “boşluklu kapalı orman”, %11 ve daha yüksek tepe kapalılığına sahip ormanlık alanlar ise “normal kapalı orman” olarak tanımlanmaktadır (Anonim 2024). Bu sınıflandırma, orman ekosistemlerinin yapısal durumunun belirlenmesi, alan yönetimi ve planlamasında önemli bir ölçüt oluşturmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda, Çetibeli Orman İşletme Şefliği sınırları içerisindeki ormanlık alanların tepe kapalılığına göre dağılım durumu Çizelge 3.1’de sunulmakta olup, alanın mevcut yapısal özelliklerinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Çizelge 3.1 Çetibeli Orman İşletme şefliğine ait alan bilgileri

Türü	Alan (ha)
Normal Kapalı Orman	11.983,1
Boşluklu Kapalı Orman	2.647,0
Toplam Ormanlık Alan	14.630,1
Genel Toplam (Ormanlık Alan + Ormansız Alan)	16.106,9

3.1.1 Çalışma Alanının Jeolojik ve Minerolojik Yapısı

Çalışma alanı, allokton ve otokton kaya birimlerinin yüzeyletiği bir jeolojik yapıya sahip olup, otokton konumlu Beydağları Otoktonu; Jura-Kretase yaşlı kireçtaşlarından oluşan Beydağları Formasyonu’na ait Tekkeköy Üyesi, Üst Paleosen-Orta Eosen yaşlı

mikritlerden oluşan Dişitaştepe Formasyonu ve Alt Miyosen yaşlı alglı kireçtaşı ile kilaşlarından meydana gelen Sinekçi Formasyonu ile temsil edilmektedir. Bölgede geniş alan kaplayan ve tektonik örtü niteliğinde bulunan Likya Napları, Tavas, Bodrum, Gülbahar ve Marmaris Ofiyolit napları olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. Tavas Napı, Karbonifer-Permiyen yaşlı kayalar, kuvarsitik kumtaşlarından oluşan Sarıtaş Formasyonu, kireçtaşlarından oluşan Karapınar Formasyonu, Belenkavak Formasyonu ile İncirbeleni Formasyonu gibi farklı istifleri içermekte olup, üzerine Resiyen-Alt Liyas yaşlı Çenger Formasyonu, Liyas yaşlı Ağaçalı Formasyonu, Dogger-Maestrihtiyen yaşlı Babadağ Formasyonu ve Üst Paleosen-Orta Eosen yaşlı Faralya Formasyonu'ndan oluşan Haticeana Serisi gelmektedir. Bodrum Napı ise Bozburun ve Çökek birimlerinden oluşmakta; Bayırköy, Güverdağı ve Karanasıflar formasyonları ile Kayaköy Dolomiti, Göçgediği ve Karaböğürtlen formasyonlarını içermektedir. Gülbahar Napı, Orta-Üst Triyas yaşlı Orluca Formasyonu, Çövenliayla Volkaniti ve Orhaniye Formasyonu ile temsil edilmekte olup, Marmaris Ofiyolit Napı altında tektonik dilimler halinde yer almaktadır. Marmaris Ofiyolit Napı ise Armutalanı Melanjı ve Marmaris Peridotiti'nden oluşmaktadır. Beydağları Otoktonu ile Likya Napları arasında yer alan Yeşilbarak Napı, Elmalı Formasyonu ile temsil edilen ara zon niteliğindedir. Ayrıca, Likya Napları üzerinde Üst Lütisiyen öncesi çökelmiş Bencik Formasyonu, Üst Lütisiyen-Priaboniyen yaşlı Varsakyayla Formasyonu ve Alt Miyosen yaşlı Kerme Formasyonu gibi örtü kaya birimleri bulunmaktadır. Bu jeolojik yapı, bölgedeki litolojik çeşitliliği, tektonik gelişimi ve stratigrafik karmaşıklığı ortaya koyarak, çalışma alanının ekolojik ve jeomorfolojik özelliklerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

3.1.2 İklim Durumu

Marmaris bölgesi, belirgin mevsimsel geçişlerin gözlemlendiği Akdeniz ikliminin etkisi altındadır. Bölgede sıcak mevsim yaklaşık 3,2 ay sürmekte olup 13 Haziran'da başlayarak 18 Eylül'e kadar devam etmektedir ve bu dönemde günlük ortalama en yüksek sıcaklık 29°C'nin üzerindedir. Yılın en sıcak ayı Temmuz olup, ortalama en yüksek sıcaklık 33°C, en düşük sıcaklık ise 23°C düzeyindedir. Serin mevsim ise yaklaşık 4 ay sürmekte ve 28 Kasım'da başlayarak 27 Mart'ta sona ermektedir; bu dönemde günlük ortalama en yüksek sıcaklık 18°C'nin altına düşmektedir. Ocak ayı bölgenin en soğuk ayı olup, ortalama en

düşük sıcaklık 7°C, ortalama en yüksek sıcaklık ise 14°C'dir. Marmaris'te gökyüzü yıl boyunca önemli ölçüde açık veya parçalı bulutlu olup, en açık dönem Mayıs sonu ile Ekim başı arasındadır. Yağışlı mevsim yaklaşık 5,5 ay sürmekte ve 1 Kasım'da başlayıp 16 Nisan'da sona ermektedir. Bu dönemde yağışlı gün olasılığı artmakta, en çok yağışlı gün görülen ay ise Aralık ayı olmaktadır. Kurak sezon ise yaklaşık 6,5 ay sürmekte ve genellikle Mayıs ortasında başlayıp Kasım başında sona ermektedir. Bölgedeki yağışlar ağırlıklı olarak yağmur şeklinde olup, kar yağışı nadiren görülmektedir. Bu iklim özellikleri, bölgedeki ekolojik süreçlerin yanı sıra orman ekosistemlerinin su dengesi, büyüme ve yangın rejimlerinin anlaşılması açısından önemli bir parametre oluşturmaktadır.

3.2 Materyal

Bu çalışma kapsamında, 2022 yılında Muğla Orman Bölge Müdürlüğü, Marmaris Orman İşletme Müdürlüğü, Çetibeli Orman İşletme Şefliği sınırları içerisinde yayılış gösteren saf kızılçam meşcerelerinde sistematik olarak 300 m x 300 m aralıklarla alınan 156 adet örnek alan verisi ve bu örnek alanlar içinde toplam 2802 adet ağaç kullanılmıştır. Ayrıca, uzaktan algılama verisi olarak 16.07.2022 tarihli Sentinel-2 uydu görüntüsü materyal olarak değerlendirilmiş ve örnek alan verileri ile entegrasyonu sağlanarak analizlerde kullanılmıştır.

3.3 Yöntem

3.3.1 Örnek alan verilerine ilişkin değerlendirmeler

Çetibeli Orman İşletme Şefliği sınırlarında, 2022 yılı içerisinde yürütülen orman amenajman planları kapsamında envanter çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, 156 adet saf kızılçam meşceresine ait örnek alan verileri elde edilmiştir. Her bir örnek alan için envanter karnelerinde kayıtlı ağaçların göğüs çapı ($d_{1,30}$) değerleri kullanılmış ve her ağacın topraküstü biyokütle (kg) miktarı Ünsal (2007) tarafından geliştirilen ve Denklem 3.1'de sunulan model kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, örnek

alanlar ile ilgili genel bilgiler Çizelge 3.2’de yer almaktadır. Örnek alan içerisindeki tüm ağaçların topraküstü biyokütle değerlerinin toplanması ile ilgili örnek alanın toplam topraküstü biyokütle miktarı belirlenmiştir. Ayrıca, örnek alan büyüklüklerinin (400 m², 600 m² ve 800 m²) dikkate alınması suretiyle biyokütle değerleri hektara dönüştürülerek hektar başına topraküstü biyokütle miktarı hesaplanmış ve analizlerde kullanılmak üzere hazırlanmıştır.

$$TÜB = 1,072 \times e^{-1,92352+2,243357 \times \ln(d1,3)} \quad (3.1)$$

TÜB (ton): Topraküstü biyokütle

d1.3: Envanter karnesinde alınan ağacın göğüs yüzeyindeki çapı (cm)

Çizelge 3.2 Örnek Alanda Bulunan Ağaçlar ile ilgili Genel Bilgiler

Örnek Alan Bilgisi	Değeri
Örnek Alan Sayısı	156
Örnek Ağaç Sayısı	2802
En Düşük Çap	8,0 cm
En Büyük Çap	80,0 cm
Ortalama Çap	23,17 cm
Standart Sapma	14,06
Varyans	197,68

3.3.2 Sentinel-2 uydu görüntüsüne ilişkin değerlendirmeler

Bu çalışmada kullanılan 16 Temmuz 2022 tarihli Sentinel-2 uydu görüntüsü, Sentinel Hub platformu üzerinden ücretsiz olarak temin edilmiştir. Sentinel-2, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından sağlanan ve özellikle tarım, orman yönetimi, çevresel izleme ile afet yönetimi gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılan bir uydu verisi kaynağıdır (Dereli 2019).

Çalışma kapsamında, Sentinel-2 uydu görüntüsüne ait konumsal çözünürlüğü 10 metre olan Bant 2 (B2), Bant 3 (B3), Bant 4 (B4) ve Bant 8 (B8) ile konumsal çözünürlüğü 20 metre olan Bant 5 (B5), Bant 6 (B6), Bant 7 (B7), Bant 8A (B8A), Bant 11 (B11) ve Bant 12 (B12) bantları analizlerde kullanılmıştır. Sentinel-2 görüntüsüne ilişkin teknik özellikler ve görüntüye ait detaylı bilgiler Çizelge 3.3'te sunulmakta olup, görüntü işleme ve analiz süreçlerinde bu bantlardan elde edilen veriler temel veri kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.3 Sentinel-2 uydu görüntüsüne ait bazı bilgiler

	Bantlar	Dalga boyu (nm)	Konumsal çözünürlük(m)
Sentinel-2	B2	458 – 523	10
	B3	543 – 578	10
	B4	650 – 680	10
	B5	698 – 713	20
	B6	733 – 748	20
	B7	773 – 793	20
	B8	785 – 900	10
	B8A	855 – 875	20
	B11	1565 – 1655	20
	B12	2100 – 2280	20

3.3.2.1 Sentinel-2 uydu görüntüsünden bant reflektans değerlerinin hesaplanması

Sentinel-2 uydu görüntüsü analiz sürecinden önce bazı ön işlemlerden geçirilmiş olup, bu süreçte özellikle atmosferik düzeltme işlemi uygulanmıştır. Atmosferik düzeltme, atmosferde bulunan su buharı, aerosoller ve çeşitli gazların görüntü üzerine etkilerini ortadan kaldırarak, yeryüzünden yansıyan gerçek yüzey reflektans değerlerinin elde edilmesini hedeflemektedir. Bu işlem, uydu görüntülerinde yer alan yanlış veya yanıltıcı verileri minimize ederek daha doğru ve güvenilir analiz sonuçlarının elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Torunlar vd. 2021).

Çalışmada kullanılan Sentinel-2 uydu görüntülerinin analizinde, atmosferik etkilerden arındırılmış verilerin tercih edilmesi, topraküstü biyokütle tahmin süreçlerinin doğruluk düzeyini artırmak amacıyla önemli bir adım olmuştur. Sentinel-2 uydu görüntüsünün kalibrasyonu ve yüzey reflektans değerlerinin elde edilmesi için QGIS Desktop 3.8.1 yazılımı kullanılmıştır. Görüntülere ait bantlar kalibre edildikten sonra, reflektans görüntüleri, tekstür verileri ve çeşitli vejetasyon indeksleri elde edilmiştir. Ardından, her bir örnek alan için Sentinel-2 uydu görüntüsüne ait bantlara ilişkin reflektans değerleri hesaplanmış ve bu hesaplama sırasında örnek alanlar etrafında belirlenen buffer zonlar kullanılmıştır. Buffer zonlar, örnek alan çevresinde belirli bir mesafede oluşturulan bölgeler olup, 400 m² büyüklüğündeki örnek alanlar için 11,28 m, 600 m² için 13,82 m ve 800 m² için 15,96 m çapında tanımlanmıştır. Buffer zon içinde yer alan piksellerin ortalama reflektans değerleri alınarak her bir örnek alanın ortalama reflektans değeri hesaplanmıştır. Bu işlemler, ArcGIS 10.6.1 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, analiz sürecinde elde edilen bu veriler biyokütle tahmin modellerinde girdi olarak kullanılmıştır.

3.3.2.2 Sentinel-2 uydu görüntüsünden vejetasyon indislerine ilişkin değerlerin hesaplanması

Örnek alanlara ilişkin hesaplanan ortalama reflektans değerleri kullanılarak, her bir örnek alan için çeşitli vejetasyon indeksleri belirlenmiştir. Bu indekslerin hesaplanması, örnek alanlardaki bitki örtüsünün yoğunluğu, canlılığı ve biyofiziksel özelliklerinin analiz edilmesine imkân tanıyarak, topraküstü biyokütle tahmin modellerinde kullanılacak önemli parametrelerin elde edilmesini sağlamıştır. Çalışma kapsamında hesaplanan ve kullanılan vejetasyon indekslerine ilişkin ayrıntılı bilgiler Çizelge 3.4'te sunulmakta olup, bu indeksler analiz sürecinde elde edilen reflektans verileri üzerinden hesaplanarak biyokütle tahmin süreçlerine entegre edilmiştir.

Çizelge 3.4 Çalışmada kullanılan vejetasyon indisleri

Vejetasyon İndisi	Formül	Kaynak
ARVI	$(B8 - (2 \times B4 - B2)) / (B8 + (2 \times B4 + B2))$	Kaufman and Tanre (1992)
EVI	$2.5 \times (B8 - B4) / (B8 + 6.0 \times B4 - 7.5 \times B2) + 1.0$	Liu and Huete (1995)
GCI	$(B8 / B3) - 1$	Gitelson, Gritz and Merlyak (2003)
GNDVI	$(B8 - B3) / (B8 + B3)$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
MSAVI	$[2 \times B8 + 1 - \sqrt{(2 \times B8 + 1)^2 - 8 \times (B8 - B4)}] / 2$	Qi <i>et al.</i> (1994)
NDRE	$(B8 - B5) / (B8 + B5)$	Gitelson and Merzlyak (1994)
NDVI	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
NDWI	$(B8 - B11) / (B8 + B11)$	Gao (1996)
RECI	$(B8 / B5) - 1$	Clevers and Gitelson
SAVI	$(1.0 + L) \times (B8 - B4) / (B8 + B4 + L)$	Huete (1988)

Bu çalışmada kullanılan vejetasyon indeksleri, bitki örtüsünün yoğunluğu, sağlığı, fotosentetik aktivitesi ve su durumu gibi biyofiziksel özelliklerinin belirlenerek topraküstü biyokütle tahmin süreçlerinin doğruluğunu artırmada önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index / Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi)**, bitki örtüsünün yeşil dokusunun yoğunluğunu ölçmek amacıyla kırmızı ve yakın kızılötesi bantlar arasındaki yansıma farkına dayanarak hesaplanır. Orman alanlarında, ağaç örtüsünün kapallılık derecesi ve canlı yeşil doku miktarının belirlenmesinde sıkça kullanılmakta, fotosentetik aktivitenin izlenmesine katkı sağlamaktadır.
- **EVI (Enhanced Vegetation Index / Geliştirilmiş Vejetasyon İndeksi)**, NDVI'dan farklı olarak atmosferik etkileri ve toprak arka plan yansımalarını azaltmaya yönelik geliştirilmiştir. Yoğun bitki örtüsünün bulunduğu alanlarda doygunluk sorununu azaltarak daha hassas ölçümler yapılmasına olanak tanır. Bu sayede ormanlık alanlarda ağaç sağlığı ve büyüme durumlarının hassas bir şekilde belirlenmesinde kullanılmaktadır.

- **SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index / Toprak Ayarlı Vejetasyon İndeksi)**, düşük bitki yoğunluğuna sahip alanlarda toprak yansımalarının etkisini azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu özellik, genç meşcerelerde veya seyreltik kapalı orman alanlarında bitki örtüsü tespitlerinin daha doğru yapılmasını sağlar.
- **GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index / Yeşil Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi)**, yeşil bant üzerinden hesaplanarak bitkilerin klorofil içeriğini ve fotosentetik aktivitesini değerlendirmede kullanılır. Orman ekosistemlerinde ağaçların beslenme durumu ve sağlığının değerlendirilmesine katkı sağlar.
- **ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index / Atmosfer Dirençli Vejetasyon İndeksi)**, mavi bant kullanımıyla atmosferik etkileri en aza indirerek bitki örtüsü izlemelerinde doğruluğu artırmaktadır. Yangın sonrası alanların izlenmesi veya tozlu atmosfer koşullarında yapılan analizlerde daha kararlı sonuçlar vermesi nedeniyle ormancılık çalışmalarında tercih edilmektedir.
- **MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index / Modifiye Edilmiş Toprak Ayarlı Vejetasyon İndeksi)**, toprak yansımalarının etkisini minimuma indirerek düşük bitki örtüsü kapalı alanlarda bile bitki yoğunluğunun daha hassas belirlenmesine imkân tanır. Özellikle genç fidanlık sahaları veya bozuk alanların izlenmesinde kullanılmaktadır.
- **NDRE (Normalized Difference Red Edge Index / Normalize Edilmiş Kırmızı Kenar Fark İndeksi)**, kırmızı kenar bantları kullanılarak bitkilerin klorofil içeriğinin belirlenmesinde etkili bir indekstir. Yüksek klorofil konsantrasyonuna sahip orman alanlarında ağaç sağlığı izlemelerinde kullanılmaktadır.
- **GCI (Green Chlorophyll Index / Yeşil Klorofil İndeksi)** ve **RECI (Red Edge Chlorophyll Index / Kırmızı Kenar Klorofil İndeksi)**, bitki örtüsündeki klorofil konsantrasyonunu belirlemek amacıyla kullanılır ve özellikle ağaçların büyüme

hızının ve sağlığının izlenmesinde biyokütle modellemelerinde önemli değişkenler olarak değerlendirilmektedir.

- **NDWI (Normalized Difference Water Index / Normalize Edilmiş Su İndeksi)** ise bitki örtüsünün su içeriğini belirlemek amacıyla geliştirilmiş olup, bitki su stresinin izlenmesi, kuraklık analizleri ve yangın riski değerlendirmelerinde kullanılmaktadır. Orman ekosistemlerinde ağaçların su stresine karşı tepkilerinin belirlenmesi ve biyokütle tahminlerinde hassasiyetin artırılmasına katkı sağlar.

Bu indeksler sayesinde Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen spektral bilgilerin daha anlamlı hale getirilmesi mümkün olmuş, meşcere parametrelerinin ve topraküstü biyokütlenin uzaktan algılama yoluyla hızlı, doğru ve maliyet etkin bir şekilde tahmin edilmesine katkı sağlamıştır.

3.3.3 Sentinel-2 görüntüsünden tekstür değerlerinin elde edilmesi

Bu çalışmada Sentinel-2 uydu görüntülerinin tekstür analizi, ormanlık alanlardaki topraküstü biyokütle tahmininde kullanılmak üzere önemli bir veri kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında yedi farklı tekstür özelliği hesaplanmış olup, bunlar variance (VAR / Varyans), homogeneity (HOM / Homojenlik), contrast (CON / Kontrast), dissimilarity (DIS / Farklılık), entropy (ENT / Entropi) ve correlation (COR / Korelasyon) şeklinde belirlenmiştir. Bu özellikler, gri seviye eş oluşum matrisi (GLCM) yöntemine dayanarak pikseller arasındaki gri tonlama ilişkilerini analiz etmekte ve görüntüdeki yüzey pürüzlülüğü, desen ve yapı farklılıklarının sayısal olarak ifade edilmesini sağlamaktadır.

Tekstür analizinde kullanılan mean, bir görüntüdeki piksellerin ortalama gri seviye değerini belirlerken; variance, gri tonlamadaki yayılımı göstererek alanın heterojenliğini ifade etmektedir. Homogeneity, benzer gri tonlara sahip komşu piksellerin oranını ölçerek yüzeyin düzgünlüğü hakkında bilgi verirken, contrast, gri ton farklarının büyüklüğünü hesaplayarak kenar yoğunluğunu yansıtmaktadır. Dissimilarity, komşu pikseller

arasındaki mutlak farkları ölçerek farklılık derecesini ortaya koyarken; entropy, görüntüdeki düzensizlik seviyesini ve bilgi içeriğini belirlemektedir. Correlation ise pikseller arasındaki lineer bağıntıyı ölçerek dokusal düzenliliğin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Uydu görüntüsünün her bir bandı için bu yedi tekstür özelliği ayrı ayrı hesaplanmış olup, analizlerin hassasiyetini artırmak amacıyla 3x3, 5x5, 7x7 ve 9x9 pencereler (kernel) kullanılmıştır. Bu pencereler, farklı mekânsal ölçeklerde tekstür değişkenliğinin incelenmesine olanak tanımış, böylece orman dokusunun hem mikro hem de makro düzeydeki yapısal özelliklerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Her bir örnek alan için tekstür değerleri, örnek alan sınırlarında oluşturulan buffer zonlar (koruma zonları) içerisindeki piksellerin ortalaması alınarak hesaplanmış ve her alan için tek bir değer olarak kaydedilmiştir.

Tüm bu işlemler, R programlama dilinde 'glm' kütüphanesi kullanılarak otomatikleştirilmiş bir iş akışı ile gerçekleştirilmiştir. Bu kütüphane, gri seviye eş oluşturma matrisi hesaplama ve farklı tekstür istatistiklerini üretme imkânı sağlamış, Sentinel-2 verilerinden yüksek doğrulukta tekstür verilerinin üretilmesine katkıda bulunmuştur. Çalışmada elde edilen tekstür verileri, biyokütle tahmin modellerinde bağımsız değişken olarak kullanılmış, tahmin süreçlerinin doğruluk düzeyini artırmada önemli bir girdi sağlamıştır. Çalışma kapsamında hesaplanan tekstür özelliklerine ilişkin ayrıntılı bilgiler Çizelge 3.5'te sunulmakta olup, analiz süreçlerinde referans alınmıştır.

Bu veriler Çetibeli OİŞ sınırlarına göre indirilerek örnek alan büyüklüklerine göre ArcGIS üzerinde kestirilmiştir.

Çizelge 3.5 Çalışmada kullanılan bazı tekstür özelliklerinin sembolleri ve açıklamaları

Tekstür Özelliği	Bantlar	Pencere Genişliği			
		3x3	5x5	7x7	9x9
Contrast	B2	B2_3x3_contrast	B2_5x5_contrast	B2_7x7_contrast	B2_9x9_contrast
Correlation	B3	B3_3x3_correlat	B3_5x5_correlat	B3_7x7_correlat	B3_9x9_correlat
Dissimilarity	B4	B4_3x3_dissim	B4_5x5_dissim	B4_7x7_dissim	B4_9x9_dissim
Entropy	B5	B5_3x3_entropy	B5_5x5_entropy	B5_7x7_entropy	B5_9x9_entropy
Homogeneity	B6	B6_3x3_hom	B6_5x5_hom	B6_7x7_hom	B6_9x9_hom
Variance	B7	B7_3x3_hom	B7_5x5_hom	B7_7x7_hom	B7_9x9_hom
B2_3x3_contrast: İkinci bantın 3x3 pencere genişliğinde contrast özelliği					
B3_3x3_correlat: Üçüncü bantın 3x3 pencere genişliğinde correlation özelliği					
B5_5x5_entropy: Beşinci bantın 5x5 pencere genişliğinde entropy özelliği					
B6_7x7_hom: Altıncı bantın 7x7 pencere genişliğinde homogeneity özelliği					

3.3.4 İstatistiksel analiz

Bu çalışma kapsamında istatistiksel analiz yöntemi olarak çoklu regresyon (stepwise) analizi kullanılmıştır. Modellerin geliştirilmesinde R programlama dili kullanılarak, model kurulumları ve istatistiksel testler gerçekleştirilmiştir. Çoklu regresyon analizinde tahmin edilmek istenen topraküstü biyokütle bağımlı değişken olarak değerlendirilmiş, Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen bant reflektans değerleri, tekstür özellikleri ve vejetasyon indeksleri ise bağımsız değişkenler olarak analize dâhil edilmiştir.

Stepwise regresyon, modele alınacak değişkenlerin seçiminde istatistiksel anlamlılık kriterlerine göre ileri (forward), geri (backward) veya hem ileri hem geri seçim (both) yöntemleri kullanarak modeli optimize etmekte, böylece biyokütle tahmin modellerinin en yüksek açıklayıcılık düzeyi ile oluşturulmasına imkân sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde bağımsız değişkenler arasındaki çoklu doğrusal bağlantıların etkisi azaltılarak modelde anlamlı olan değişkenlerin seçimi sağlanmıştır. Çalışmada geliştirilen modellerde belirtme katsayısı (R^2), düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{düz}$), standart hata ($Sy.x$) gibi istatistiksel performans kriterleri ile modellerin başarısı değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan regresyon analizine ilişkin model yapısı Denklem 3.2’de sunulmakta olup, bu yapı bağımsız değişkenlerin topraküstü biyokütle tahminindeki etkisini istatistiksel olarak açıklamak amacıyla kullanılmıştır.

$$\text{Toprak Üstü Biyokütle} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots \beta_n \cdot X_n + \varepsilon \quad (3.2)$$

Model yapısında, toprak üstü biyokütle (TÜB) bağımlı değişken olarak değerlendirilmiş olup, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ regresyon model katsayılarını; $X_1, X_2, \dots, X_n$ ise Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen bant reflektans değerleri, tekstür özellikleri ve vejetasyon indekslerini temsil eden bağımsız değişkenleri ifade etmektedir. Modelde yer alan ε , tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkı yansıtan model hata terimidir.

Bu yapı, Sentinel-2 verilerinden elde edilen spektral, tekstürel ve vejetatif değişkenlerin toprak üstü biyokütle tahminine katkısını istatistiksel olarak açıklamakta ve değişkenlerin TÜB üzerindeki etkilerinin nicel olarak belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Çalışma kapsamında stepwise çoklu regresyon yöntemi kullanılarak geliştirilen TUB tahmin modelleri aşağıda sunulmuş olup, bu modellerde kullanılan değişken kombinasyonları ile modellerin istatistiksel performans kriterleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

- Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 bant reflektans değerleri
- Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 vejetasyon indisleri
- Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 tekstür özellikleri
- Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 bant reflektans, vejetasyon indisleri ve tekstür özellikleri

Çalışma kapsamında kullanılan toplam 156 adet örnek alan sayısının düşük olması sebebiyle eğitim veri seti ve doğrulama veri setine ayrılması anlamlı bir sonuç vermeyeceğinden dolayı ayrılmamıştır.

Toprak üstü biyokütlenin tahmin edilmesine yönelik istatistiksel olarak anlamlı model seçenekleri stepwise çoklu regresyon yöntemi kullanılarak belirlenmiş, bağımsız değişkenlerin modele katkıları istatistiksel anlamlılık düzeyleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Model başarılarının değerlendirilmesinde iki temel performans kriteri kullanılmıştır. Bunlardan ilki, modelin açıklayıcılığını ve uyum düzeyini gösteren düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{düz}$) olup, Denklem (3.3) ile ifade edilmiştir. İkinci kriter ise, model tahminlerinin hassasiyetini gösteren standart hata ($Sy.x$) değeri olup, Denklem (3.4) ile verilmiştir. Bu iki ölçüt, modelin topraküstü biyokütle tahminindeki başarısını karşılaştırmalı olarak değerlendirmede temel kriterler olarak kullanılmıştır.

Model Belirtme Katsayısı:

$$R^2_{düz} = 1 - \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T\ddot{U}B_G - T\ddot{U}B_T)^2}{\sum_{i=1}^n (T\ddot{U}B_G - T\ddot{U}B_O)^2} \right) \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (3.3)$$

Formülde; $T\ddot{U}B$, Toprak Üstü Biyokütle'yi ifade etmektedir. $T\ddot{U}B_G$, $T\ddot{U}B_T$ ve $T\ddot{U}B_O$ sırasıyla gözlem, tahmin ve gözlemlerin ortalamasıdır. n ve p ise modelde kullanılan veri ve parametre sayılarıdır.

Tahminin Standart Hatası:

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (T\ddot{U}B_i - \widehat{T\ddot{U}B_i})^2}{N-p}} \quad (3.4)$$

Formülde; $T\ddot{U}B = i$. gözlem toprak üstü biyokütlesini, $\widehat{T\ddot{U}B} = i$. tahmin ilgili toprak üstü biyokütleyi, $T\ddot{U}B =$ Toprak üstü biyokütleyi, $p =$ parametre sayısı ve $N =$ gözlem sayısı

Çalışmada geliştirilen modeller arasından, düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{düz}$) ve standart hata ($Sy.x$) ölçütleri dikkate alınarak en yüksek performansa sahip model en

başarılı model olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu modelin, çalışma alanındaki saf kızılçam (*Pinus brutia Ten.*) meşcerelerinde kullanılabilirliğini test edilmiştir.

Modelin tahmin performansının değerlendirilmesinde, örnek alanlardan hesaplanan gerçek meşcere parametreleri ile model tarafından tahmin edilen meşcere parametre değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, eşlendirilmiş t-testi (paired t-test) kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiş olup, bu yöntemle model tahmin değerleri ile gerçek ölçüm değerleri arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı test edilmiştir (Kalıpsız 1984, Batu 1995).

Elde edilen test sonuçlarının yorumlanmasında; eğer $p > 0.05$ ise model ile gerçek değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığı kabul edilmiş ve model uygun olarak değerlendirilmiştir. Buna karşılık $p < 0.05$ olması durumunda, model tahmin değerleri ile gerçek değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu ve modelin uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu yöntem, geliştirilen modelin sahadaki uygulama potansiyelinin belirlenmesi ve modelin geçerliliğinin test edilmesi açısından önemli bir adım olarak çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında topraküstü biyokütle tahminine yönelik toplam dört adet istatistiksel olarak anlamlı çoklu regresyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde, bağımsız değişken olarak Sentinel-2 verilerinden elde edilen bant reflektans değerleri, tekstür özellikleri, vejetasyon indeksleri ayrı ayrı ve hepsi birden kullanılmış, bağımlı değişken ise topraküstü biyokütle olarak değerlendirilmiştir. Her bir model, farklı değişken kombinasyonları ile kurulmuş olup, modellerin performansları düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{düz}$) ve standart hata ($Sy.x$) ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Geliştirilen bu dört model, çalışma alanındaki saf kızılçam meşcerelerinde topraküstü biyokütle tahmininin doğruluk düzeyini artırmak, uzaktan algılama verilerinin biyokütle tahmininde kullanılabilirliğini test etmek ve ormancılık uygulamalarında karar destek süreçlerine katkı sağlamak amacıyla oluşturulmuştur.

Topraküstü biyokütle tahminine yönelik geliştirilen bu modellerin ayrıntılı parametre bilgileri, kullanılan bağımsız değişken kombinasyonları, katsayı değerleri, modelin belirtme katsayısı ve standart hata değerleri ile birlikte Çizelge 4.1 – Çizelge 4.4'te ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Bu çalışmada yapılan stepwise çoklu regresyon analizi kapsamında, yalnızca Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen bant reflektans değerleri kullanılarak topraküstü biyokütle tahmini gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde kullanılan bantlar B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B11 ve B12 olup, bu bantlar arasından yalnızca B11 bandı topraküstü biyokütle tahmininde istatistiksel olarak anlamlı bir değişken olarak belirlenmiştir. Modelin belirtme katsayısı (R^2) 0.2234, düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{düz}$) 0.2184 olarak hesaplanmış olup, model topraküstü biyokütle varyansının yaklaşık %21.8'ini açıklayabilmektedir. Modelin standart hata değeri ($Sy.x$) ise 3.829 olarak bulunmuştur.

Analiz sonuçlarına göre B11 bandının p değeri 0,000 olup, bu değer $p < 0.05$ anlamlılık düzeyinin oldukça altında kalarak değişkenin modele katkısının anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda elde edilen regresyon modeli Denklem (4.1)'de verilmiştir.

Bu modelde yalnızca bant reflektans değerlerinin kullanıldığı detaylar ve kullanılan değişkenlere ilişkin istatistiksel değerler Çizelge 4.1'de ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, çalışma alanındaki saf kızılçam meşcerelerinde Sentinel-2 B11 bandının toprak üstü biyokütle tahmininde kullanılabilirliğini göstermekte olup, uzaktan algılama verilerinin ormancılık uygulamalarında hızlı ve maliyet etkin tahminler yapabilmesine katkı sağlayacak niteliktedir.

Çizelge 4.1 Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 bant reflektans değerlerine göre tahmin eden en iyi model sonuçları

Bağımsız değişkenler	Regresyon katsayıları	Standart hata	t-istatistiği	p
Sabit Katsayısı	22,404180486	2,6355687054	8,500701	
B11	-0,006472189	0,0009723913	-6,655950	0,000
$R^2_{düz}=0.2184$ $Sy,x=3,8293$				
Toprak üstü biyokütle= $[22.4042 + (-0.0065 \times B11)]$				(4.1)

Yalnızca Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen vejetasyon indeksleri kullanılarak toprak üstü biyokütle tahmini amacıyla stepwise çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Analiz kapsamında kullanılan vejetasyon indeksleri ARVI, EVI, GCI, GNDVI, MSAVI, NDRE, NDVI, NDWI, RECI ve SAVI olup, bu değişkenlerden istatistiksel olarak anlamlı katkı sağlayanlar modele dâhil edilmiştir.

Analiz sonucunda EVI, GNDVI, NDVI, ARVI ve NDRE değişkenlerinin modele girdiği ve anlamlı olduğu belirlenmiştir. Modelin belirtme katsayısı (R^2) 0.3287, düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{düz}$) ise 0.3063 olarak hesaplanmış olup, model toprak üstü biyokütle varyansının yaklaşık %30.6'sını açıklayabilmektedir. Modelin standart hata değeri ($Sy.x$) ise 3.608 olarak bulunmuştur.

Modelde yer alan tüm değişkenler $p < 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (EVI: $p = 0.0025$, GNDVI: $p < 0.001$, NDVI: $p = 0.0048$, ARVI: $p = 0.0093$, NDRE: $p = 0.0398$). Ancak, VIF değerlerinin yüksek çıkması (ör. NDVI: 1025.13, ARVI: 999.13) değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantının bulunduğunu göstermekte olup, bu durum model yorumlamasında dikkatle değerlendirilmelidir. Bu kapsamda elde edilen regresyon modeli Denklem (4.2)'de verilmiştir.

Bu modelin ayrıntılı parametre bilgileri ve analiz sonuçlarına ilişkin detaylı veriler Çizelge 4.2'de sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Sentinel-2 verilerinden üretilen vejetasyon indekslerinin, saf kıızılçam meşcerelerinde toprak üstü biyokütle tahmininde kullanılabilir olduğunu göstermekte olup, uzaktan algılama verilerinin ormancılık alanında hızlı ve maliyet etkin biyokütle tahmini sağlama potansiyelini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.2 Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 vejetasyon indis değerlerine göre tahmin eden en iyi model sonuçları

Bağımsız değişkenler	Regresyon katsayıları	Standart hata	t-istatistiği	p
Sabit Katsayısı	-12,86308	9.384	-1.371	0.172507
EVI	14,95255	4.858	3.078	0.002478
GNDVI	-168,907	44.920	-3.760	0.000243
NDVI	300.747	104.978	2.865	0.004771
ARVI	-226.375	85.853	-2.637	0.009251
NDRE	50.438	24.317	2.074	0.039775

$$R^2_{\text{düz}}=0.3063 \quad S_{y,x}=3,608$$

$$\text{Toprak üstü biyokütle} = [-12.8631 + (14.9525 \times \text{EVI}) + (-168.9067 \times \text{GNDVI}) + (300.7473 \times \text{NDVI}) + (-226.3753 \times \text{ARVI}) + (50.4375 \times \text{NDRE})] \quad (4.2)$$

Yalnızca Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen tekstür verileri kullanılarak toprak üstü biyokütle tahminine yönelik stepwise çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Analiz kapsamında çeşitli bantlardan farklı pencere boyutlarında (3x3, 5x5, 7x7, 9x9) elde edilen kontrast, homojenlik, entropi, varyans ve dissimilarity gibi tekstür özellikleri bağımsız değişken olarak modele dahil edilmiştir.

Analiz sonucunda toplam 185 değişkenden 19 değişken modele girmiş olup 19 değişkenin tamamı $p < 0.05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Modelin belirtme katsayısı (R^2) 0.6048, düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{\text{düz}}$) ise 0.5496 olarak hesaplanmış, model topraküştü biyokütle varyansının yaklaşık %55'ini açıklayabilmiştir. Modelin standart hata değeri ($Sy.x$) ise 2.907 olarak bulunmuştur. Modelin genel anlamlılık testi de anlamlı çıkmış olup ($p < 0.001$), modelin güvenilir tahminler üretebildiğini göstermektedir. Bu kapsamda elde edilen regresyon denklemi Denklem (4.3)'te verilmiştir.

Kullanılan değişkenlere ilişkin ayrıntılı katsayı değerleri, anlamlılık düzeyleri ve istatistiksel sonuçlar Çizelge 4.3'te ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Bu sonuçlar, Sentinel-2 temelli tekstür verilerinin saf kıızılçam meşcerelerinde topraküştü biyokütle tahmininde kullanılabilirliğini ortaya koymakta ve uzaktan algılama temelli biyokütle modelleme çalışmalarında önemli bir katkı sağlamaktadır.

Çizelge 4.3 Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 tekstür değerlerine göre tahmin edilen en iyi model sonuçları

Bağımsız değişkenler	Regresyon katsayıları	Standart hata	t-istatistiği	p
Sabit Katsayısı	-4507.79	1542	-2.923	0.00406
B11_3x3_variance	-0.0975	0.0213	-4.586	0,000001
B7_5x5_entropy	-4.8569	1.764	-2.753	0.00671
B7_9x9_homogeneity	-27.4591	10.92	-2.515	0.01306
B8_9x9_homogeneity	-21.2139	8.95	-2.369	0.01924
B11_9x9_entropy	-4.2211	1.309	-3.226	0.00157
B11_9x9_dissimilarity	39.8207	6.711	5.933	0,000
B11_9x9_homogeneity	74.4275	16.43	4.529	0,000
B11_3x3_entropy	1.6403	0.764	2.146	0.03365
B3_5x5_contrast	-56.9243	13.85	-4.109	0,000
B4_7x7_variance	0.5802	0.331	1.754	0.08161
B2_3x3_contrast	21.8738	6.611	3.309	0.0012
B3_7x7_contrast	39.2286	13.47	2.911	0.00421
B2_9x9_homogeneity	4484.404	1537	2.917	0.00414
B7_3x3_entropy	3.1153	1.573	1.981	0.0496
B2_9x9_dissimilarity	2221.1	768.5	2.89	0.00448
B11_9x9_contrast	-2.626	0.578	-4.541	0,000
B8_7x7_entropy	-3.6735	1.46	-2.516	0.01304
B3_5x5_entropy	4.0126	2.418	1.66	0.09926
B7_7x7_homogeneity	16.3616	11.53	1.419	0.15805

$R^2_{düz}=0.5496$ $Sy,x=2,907$

$$\begin{aligned} \text{Toprak üstü biyokütle} = & [-4507.7895 + (-0.0975 \times B11_3x3_variance) + (-4.8569 \times \\ & B7_5x5_entropy) + (-27.4591 \times B7_9x9_homogeneity) + (-21.2139 \times \\ & B8_9x9_homogeneity) + (-4.2211 \times B11_9x9_entropy) + (39.8207 \times \\ & B11_9x9_dissimilarity) + (74.4275 \times B11_9x9_homogeneity) + (1.6403 \times \\ & B11_3x3_entropy) + (-56.9243 \times B3_5x5_contrast) + (0.5802 \times \\ & B4_7x7_variance) + (21.8738 \times B2_3x3_contrast) + (39.2286 \times \\ & B3_7x7_contrast) + (4484.4042 \times B2_9x9_homogeneity) + (3.1153 \times \\ & B7_3x3_entropy) + (2221.0999 \times B2_9x9_dissimilarity) + (-2.626 \times \\ & B11_9x9_contrast) + (-3.6735 \times B8_7x7_entropy) + (4.0126 \times \\ & B3_5x5_entropy) + (16.3616 \times B7_7x7_homogeneity)] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen bant reflektans değerleri, vejetasyon indeksleri ve tekstür özelliklerinin birlikte kullanılmasıyla toprak üstü biyokütle tahminine yönelik stepwise çoklu regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, çalışma alanındaki saf kızılçam meşcerelerinde en yüksek açıklama gücüne ulaşmak amacıyla tüm kullanılabilir veriler dâhil edilerek yapılmıştır.

Analiz sonucunda, toplam 199 değişkenden 21 değişkenin modele dâhil olduğu belirlenmiştir. Modelin belirtme katsayısı (R^2) 0.656, düzeltilmiş belirtme katsayısı ($R^2_{düz}$) ise 0.6051 olarak hesaplanmış olup, model topraküstü biyokütle varyansının yaklaşık %60.5'ini açıklayabilmiştir. Modelin standart hata değeri ($Sy.x$) ise 2.722 olarak bulunmuştur. Modelin genel anlamlılık testi anlamlı çıkmış ($p < 0.001$) ve modelin güvenilir tahminler sağladığını göstermiştir.

Analiz sonuçlarına göre modele giren değişkenlerin büyük çoğunluğu $p < 0.05$ düzeyinde anlamlı bulunmuş, yalnızca B11_3x3_variance ($p = 0.074$) ve B4_9x9_variance ($p = 0.072$) sınırda anlamlılık göstermiştir. Bununla birlikte, B2 değişkeni modele dâhil olmasına rağmen $p = 0.178$ ile anlamlılık düzeyinin üzerinde kalmıştır. Bu kapsamda elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.4'te verilmiştir.

Bu modelin ayrıntılı katsayı, standart hata, t-değeri ve p-değeri bilgileri Çizelge 4.4'te sunulmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, Sentinel-2 tabanlı bant reflektans değerleri, vejetasyon indeksleri ve tekstür verilerinin birlikte kullanılması ile topraküstü biyokütle tahmininde yüksek doğruluk düzeyine ulaşılabilceğini göstermekte olup, uzaktan algılama temelli orman biyokütle modelleme çalışmalarına katkı sağlayacak niteliktedir.

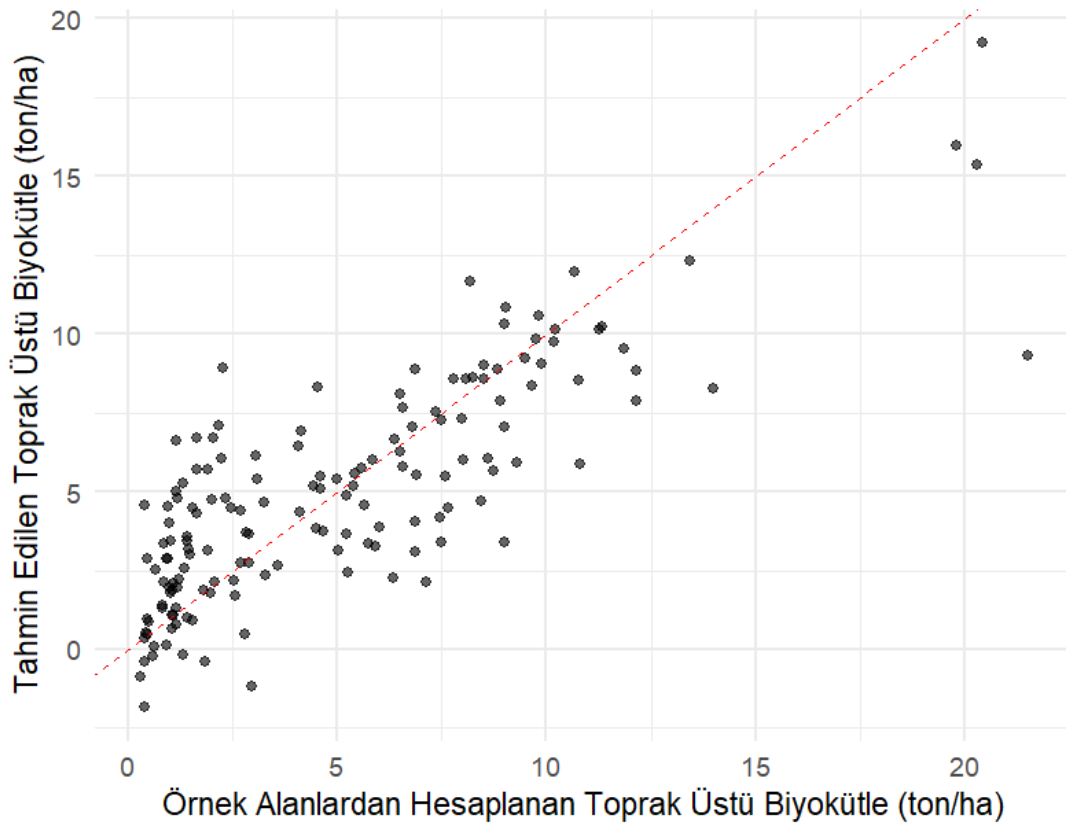
Çizelge 4.4 Toprak üstü biyokütle ile Sentinel-2 tabanlı bant reflektans değerleri, vejetasyon indeksleri ve tekstür değerlerine göre tahmin eden en iyi model sonuçları

Bağımsız değişkenler	Regresyon katsayıları	Standart hata	t-istatistiği	p
Sabit Katsayısı	-3.5028	43.8235	-0.0799	0.9364
B11_3x3_variance	0.0759	0.0422	1.7987	0.0743
B7_5x5_entropy	-5.6995	1.7535	-3.2503	0.0015
B7_9x9_homogeneity	124.3625	21.1967	5.867	0,0000
EVI	9.9577	1.8177	5.4781	0,0000
B4_3x3_variance	0.7654	0.3006	2.5461	0.012
GCI	-6.8575	1.9789	-3.4653	0.0007
B12_5x5_variance	-0.2625	0.0764	-3.4346	0.0008
B7_9x9_dissimilarity	66.0438	9.2047	7.175	0,0000
B7_9x9_contrast	-7.1319	1.0377	-6.8728	0,0000
B5_7x7_contrast	3.1403	1.0162	3.0902	0.0024
B6_9x9_entropy	-3.8316	1.297	-2.9541	0.0037
B11_9x9_entropy	-4.3572	1.1951	-3.6457	0.0004
B11_9x9_contrast	1.5125	0.5117	2.9561	0.0037
B11_5x5_entropy	2.4144	1.017	2.374	0.019
B7_7x7_entropy	5.6807	2.6619	2.134	0.0346
B4_7x7_homogeneity	-120.122	40.7937	-2.9446	0.0038
B4_7x7_dissimilarity	-53.8794	19.0838	-2.8233	0.0054
B5_5x5_homogeneity	10.9834	3.9372	2.7896	0.006
B4_9x9_variance	0.6362	0.3517	1.8085	0.0727
B2	-0.0091	0.0067	-1.3532	0.1782

$R^2_{düz}=0,6051$ $S_{y,x}=2,722$

$$\begin{aligned} \text{Toprak üstü biyokütle} = & [-3.5028 + (0.0759 \times B11_3x3_variance) + (-5.6995 \times \\ & B7_5x5_entropy) + (124.3625 \times B7_9x9_homogeneity) + (9.9577 \times EVI) \\ & + (0.7654 \times B4_3x3_variance) + (-6.8575 \times GCI) + (-0.2625 \times \\ & B12_5x5_variance) + (66.0438 \times B7_9x9_dissimilarity) + (-7.1319 \times \\ & B7_9x9_contrast) + (3.1403 \times B5_7x7_contrast) + (-3.8316 \times \\ & B6_9x9_entropy) + (-4.3572 \times B11_9x9_entropy) + (1.5125 \times \\ & B11_9x9_contrast) + (2.4144 \times B11_5x5_entropy) + (5.6807 \times \\ & B7_7x7_entropy) + (-120.122 \times B4_7x7_homogeneity) + (-53.8794 \times \\ & B4_7x7_dissimilarity) + (10.9834 \times B5_5x5_homogeneity) + (0.6362 \times \\ & B4_9x9_variance) + (-0.0091 \times B2)] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Çalışma kapsamında toprak üstü biyokütle tahmin edilmesine ilişkin geliştirilen 4 farklı çoğul regresyon modeli arasında en iyi tahmin sonucunu veren model 4 nolu modeldir (Çizelge 4.4). Bu modele göre tahmin edilen toprak üstü biyokütle ile örnek alanlardan hesaplanan toprak üstü biyokütleye göre değişimi Şekil 4.1’de verilmiştir. Toprak üstü biyokütleyi en iyi modele (Çizelge 4.4) göre tahmin eden modelle elde edilen hataların, tahmin edilen toprak üstü biyokütleye göre değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 En iyi regresyon modeline göre hesaplanan toprak üstü biyokütle ile tahmin edilen toprak üstü biyokütle ilişkisi

Toprak üstü biyokütlenin tahmini amacıyla oluşturulan farklı regresyon modelleri içerisinde en yüksek performansı sergileyen model Model 4.4 olmuştur. Bu modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla, modelin oluşturulmasında kullanılmayan bağımsız bir veri grubu ile dış geçerlilik testi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, model tarafından tahmin edilen toprak üstü biyokütlenin değerleri ile gerçek

(gözlenen) toprak üstü biyokütle değerleri arasındaki farkların anlamlılığı eşleştirilmiş t testi (Paired Samples t-test) kullanılarak analiz edilmiştir.

Eşleştirilmiş t testi, iki ilişkili örneklem (aynı örnek alanlarda hem tahmin edilen hem de gözlenen toprak üstü biyokütle değerleri) arasındaki farkların ortalamasının sıfırdan anlamlı biçimde farklı olup olmadığını test etmektedir. Diğer bir ifadeyle, bu test aracılığıyla modelin tahmin performansının örneklem düzeyinde anlamlı sapmalar içerip içermediği belirlenmiştir.

Model 4.4 için yapılan analiz sonucunda:

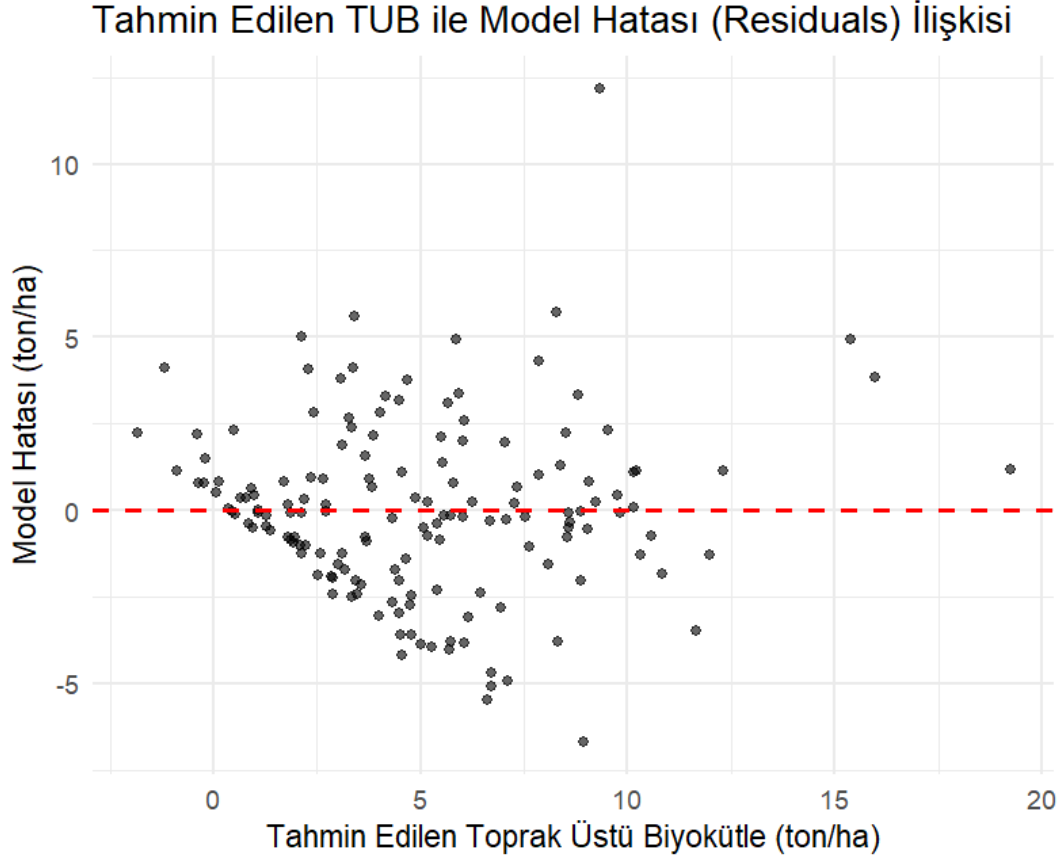
- t değeri = -0.0799
- p değeri = 0.9364
- Anlamlılık düzeyi (α) = 0.05

olarak hesaplanmıştır. Elde edilen p değeri, $\alpha = 0.05$ anlamlılık düzeyinin oldukça üzerinde olduğu için, H_0 : Tahmin edilen değerler ile gözlenen değerler arasında fark yoktur şeklindeki sıfır hipotezi reddedilememiştir. Bu sonuç, modelin tahmin ettiği değerlerle gözlenen değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir.

Bu bulgu, regresyon modeli tarafından yapılan tahminlerin doğruluğunun yüksek olduğunu ve modelin, yalnızca oluşturulduğu veri setinde değil, aynı zamanda aynı tür (*Pinus brutia* Ten.), aynı meşcere tipi ve benzer yetiştirme ortamı koşullarında bulunan farklı örnek alanlarda da geçerli olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, eşleştirilmiş t testi bulguları, Model 4.4'ün toprak üstü biyokütle tahmini amacıyla kullanılabilir güvenilir bir araç olduğunu, ayrıca bu modelin geliştirilme

sürecinde kullanılan saf kızılçam meşcerelerine benzer koşullara sahip diğer alanlara da genellenebilirlik taşıdığını göstermektedir.



Şekil 4.2 En iyi regresyon modelini esas alan modelle elde edilen hatalar-tahmini toprak üstü biyokütle ilişkisi

Uzaktan algılama verileri kullanılarak topraküstü biyokütle tahminine yönelik yapılan araştırmalar incelendiğinde, çeşitli modelleme yaklaşımlarının uygulandığı görülmektedir. Bu yaklaşımlar arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri regresyon analizidir (Baccini *et al.* 2008, Brice *et al.* 2013, Hirata *et al.* 2013, Günlü ve ark. 2014, Dube ve Mutanga 2015, Vafaei *et al.* 2018, Turgut 2019, Keleş ve ark. 2021, Güverçin 2022, Işık 2024, Sarıçam 2024, Su *et al.* 2025).

Literatürde farklı uzaktan algılama verileri kullanılarak topraküstü biyokütle tahminine yönelik pek çok araştırma gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Su *et al.* (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, orman ekosistemlerinin karmaşıklığı ve coğrafi çeşitliliğin geleneksel biyokütle tahmin yöntemlerinde oluşturduğu zorlukları aşmak amacıyla optimize edilmiş bir topraküstü biyokütle (AGB) tahmin çerçevesi geliştirilmiştir. Bu kapsamda, yersel ölçüm verileri, Ulusal Sürekli Orman Envanteri (NFCI) verileri ile aktif ve pasif uzaktan algılama verileri gibi heterojen veri kaynaklarının entegrasyonu hedeflenmiştir. Çin'in Fujian Eyaleti, Longyan Şehri çalışma alanı olarak seçilmiş ve makine öğrenmesine dayalı bir AGB tahmin çerçevesi oluşturularak, adım adım değişken seçimi, hiperparametre optimizasyonu ve veri kaynaklarının kademeli entegrasyonu yoluyla yüksek çözünürlüklü AGB mekânsal dağılım haritaları üretilmiştir. Çalışmada geliştirilen bu yaklaşımın etkinliği; korelasyon katsayısında (R^2) 0,67 artış, kök ortalama kare hata (RMSE) değerinde %43,57 azalma ve ortalama kare hata (MSE) değerinde %68,00 azalma sağlanarak ortaya konmuştur. Bu optimize edilmiş çerçeve, yalnızca AGB tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırmakla kalmamış, aynı zamanda üretilen mekânsal dağılım haritaları sayesinde ağaçlandırma için öncelikli alanların belirlenmesine de katkı sağlamıştır. Böylece, hedef odaklı orman yönetimi ve ekolojik restorasyon çalışmalarına bilimsel bir temel sunulmuştur.

Sarıçam (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Antalya Orman Bölge Müdürlüğü, Kaş Orman İşletme Müdürlüğü plan sınırları içinde kalan saf sedir meşcerelerinde topraküstü biyokütlenin Landsat 8 OLI uydu görüntüsü kullanılarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, amenajman planlarının güncellenmesi sürecinde sistematik olarak belirlenmiş 618 adet örnek alan kullanılmıştır. Yersel ölçümlerle koordinatları belirlenen bu örnek alanlar, Landsat 8 OLI uydu görüntüsüne aktarılmış; bant reflektans, vejetasyon indis değerleri ve tekstür değerleri hesaplanmıştır. Bant reflektans, tekstür ve vejetasyon indis değerleri arasındaki ilişkilerin incelenmesinde çoklu regresyon analizi kullanılmış ve topraküstü biyokütle miktarları ile olan modellemeler ortaya konulmuştur. Çalışmada bağımsız değişken olarak kullanılan Bant 2, Bant 5 ve Bant 7'nin regresyon denklemi ile topraküstü biyokütle arasında $R^2=0,186$ ve $Sy.x=78,5729$; NBR, VIS123, SARVI ve ND32 gibi vejetasyon indislerinin kullanıldığı modelde $R^2=0,181$ ve $Sy.x=77,5853$ değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, Bant 2

3x3 COR, Bant 3 5x5 M, Bant 4 7x7 CON, Bant 5 9x9 HOM, Bant 6 9x9 DİS ve Bant 7 9x9 ENT tekstür özelliklerinin kullanıldığı modelde ise $R^2=0,453$ ve $Sy.x=66,9189$ değerleri ile güçlü ilişkiler tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde tekstür özelliklerinin topraküstü biyokütle tahminlerinde yüksek doğruluk sağladığı ortaya konulmuştur.

Işık (2024) tarafından yapılan çalışmada Landsat 8 OLI verileri kullanılarak saf karaçam meşcerelerinde topraküstü meşcere karbon miktarı tahmin edilmiş ve bant reflektans değerleri için $R^2=0,593$, vejetasyon indisleri için $R^2=0,635$, tekstür özellikleri için ise $R^2=0,581$ bulunmuştur. Güverçin (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Landsat 8 OLI ve Sentinel 1A verileri kullanılarak allometrik denklemler yardımıyla topraküstü biyokütle değerleri tahmin edilmiş ve en yüksek belirtme katsayısı $R^2=0,509$ olarak elde edilmiştir. Keleş ve ark. (2021) tarafından Sentinel-1 ve Sentinel-2 verilerinin bir arada kullanıldığı çalışmada regresyon analizi, derin öğrenme ve destek vektör makineleri ile modellemeler yapılmış, en yüksek başarı destek vektör makinelerinde $R^2=0,877$, derin öğrenmede $R^2=0,85$, regresyon analizinde ise $R^2=0,748$ olarak kaydedilmiştir.

Turgut (2019) tarafından yapılan çalışmada, çoklu regresyon analizine dayalı topraküstü biyokütle tahmininde bant reflektans, vejetasyon indisi ve tekstür özellikleri için sırasıyla $R^2=0,445$, $R^2=0,387$ ve $R^2=0,552$ elde edilmiştir. Dube ve Mutanga (2015) tarafından yapılan çalışmada ise çam ve okaliptüs türleri için Landsat 7 ETM+ ve Landsat 8 verileri kullanılarak topraküstü biyokütle tahmini yapılmış, bant reflektans değerleri için Landsat 7 ETM+’de $R^2=0,21-0,43$, Landsat 8’de $R^2=0,30-0,47$; vejetasyon indislerinde ise Landsat 7 ETM+ için $R^2=0,33-0,47$, Landsat 8 için $R^2=0,36-0,58$ arasında değişen değerler bulunmuştur. Günlü ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, karaçam ormanlarında Landsat TM verileri kullanılarak yapılan tahminlerde bant reflektans için $R^2=0,465$, vejetasyon indisleri için ise $R^2=0,606$ elde edilmiştir.

Vafaei *et al.* (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Sentinel-2A ve ALOS-2 PALSAR-2 uydu görüntülerinin birlikte kullanımının topraküstü biyokütle (AGB) ölçüm doğruluğunu artırmadaki potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmanın uygulama alanı olarak İran’daki Hyrcanian ormanları seçilmiş ve alanda toplam 149 örnek alan yersel

ölçümlerle belirlenmiştir. Bu kapsamda üç farklı veri seti oluşturulmuştur: yalnızca Sentinel-2A verileri, yalnızca ALOS-2 PALSAR-2 verileri ve her iki veri setinin birleştirildiği Sentinel-ALOS veri seti. Topraküstü biyokütle tahmininde kullanılacak yönteme bağlı olarak farklı model başarıları elde edilebileceğinden, çalışmada dört farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler; Random Forests (RF), Support Vector Regression (SVR), Multi-Layer Perceptron Neural Networks (MPL Neural Nets) ve Gaussian Processes (GP) olarak belirlenmiştir. Modellerin başarıları belirtme katsayısı (R^2), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) kriterleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Sentinel-2A ve ALOS-2 PALSAR-2 verilerinin birlikte kullanıldığı modeller, yalnızca Sentinel-2A veya yalnızca ALOS-2 PALSAR-2 kullanılan modellere göre daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Kullanılan dört makine öğrenmesi algoritması arasında en yüksek başarı SVR modeli ile elde edilmiş ($R^2=0,73$; RMSE=38,68; MAE=32,28) olup, bunu GP modeli ($R^2=0,69$; RMSE=40,11; MAE=33,69), RF modeli ($R^2=0,62$; RMSE=43,13; MAE=35,83) ve MPL Neural Nets modeli ($R^2=0,44$; RMSE=64,33; MAE=53,74) takip etmiştir. Genel olarak Sentinel-2A verilerinin topraküstü biyokütle tahmininde makul bir sonuç verdiği, ALOS-2 PALSAR-2 verilerinin ise daha düşük doğruluk sağladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, Sentinel-2A ve ALOS-2 PALSAR-2 verilerinin birlikte kullanımı, yalnızca Sentinel-2A kullanımına kıyasla topraküstü biyokütle tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır.

Brice *et al.* (2013) tarafından lidar ve yüksek mekânsal çözünürlüklü veriler kullanılarak yapılan çalışmada, ormanlarda hacim, ağaç boyu ve biyokütle tahmin edilmiş; ağaç boyu için $R^2=0,76$, hacim için $R^2=0,94$ ve biyokütle için $R^2=0,92$ bulunmuştur. Hirata *et al.* (2013) tarafından QuickBird verileri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, yüksek çözünürlüklü uydu verileri ile orman kapalılığı arasındaki allometrik ilişki incelenmiş ve tahmin modelinin belirtme katsayısı $R^2=0,65$ olarak bulunmuştur. Baccini *et al.* (2008) tarafından MODIS verileri ile yapılan çalışmada ise Afrika tropikal ormanlarında topraküstü biyokütle varyansının %82'si açıklanmış, çapraz doğrulama yöntemi ile yükseklik ölçümleri kullanılarak tahmin edilen biyokütle için $R^2=0,90$ değeri elde edilmiştir.

Hirata *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada, yüksek konumsal çözünürlüğe sahip QuickBird uydu verileri ile orman kapalılığı arasındaki allometrik ilişki incelenmiş ve bu ilişkinin topraküstü biyokütle tahmininde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Yersel ölçümler ile uydu verileri karşılaştırılarak yapılan analiz sonucunda, geliştirilen modelin belirtme katsayısı $R^2=0,65$ olarak bulunmuştur. Bu durum, yüksek çözünürlüklü uydu verilerinin orman alanlarında topraküstü biyokütle tahmini için güvenilir bir kaynak olabileceğini göstermektedir.

Benzer şekilde, Baccini *et al.* (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Afrika'daki tropikal ormanlarda topraküstü biyokütlenin tahminini desteklemek amacıyla orta çözünürlüklü MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) uydu verileri kullanılmıştır. Çalışmada çapraz doğrulama yöntemi uygulanmış ve topraküstü biyokütle varyansının %82'sinin açıklanabildiği belirlenmiştir. Ayrıca yükseklik ölçümleri kullanılarak tahmin edilen topraküstü biyokütle miktarları ile geliştirilen model arasındaki belirtme katsayısı $R^2=0,90$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, orta çözünürlüklü verilerin geniş alanlarda biyokütle tahmini çalışmalarında yüksek başarı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Muğla Orman Bölge Müdürlüğü, Marmaris Orman İşletme Müdürlüğü, Çetibeli Orman İşletme Şefliği sınırlarında yer alan saf kızılçam meşcerelerinde, Sentinel-2 uydu görüntülerinden elde edilen bant reflektans, vejetasyon indisleri ve tekstür verileri ile yersel ölçülerden hesaplanan topraküstü biyokütle miktarı arasındaki ilişkilerin incelenmesi ve modelleme yoluyla tahmin edilmesi amacıyla yürütülmüştür. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda;

- Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen bant reflektans ve vejetasyon indislerinin, topraküstü biyokütle tahmininde anlamlı ilişkiler kurabildiği, ancak elde edilen belirtme katsayılarının (Örneğin, en iyi modelde $R^2 = 0,345$) düşük düzeyde kaldığı görülmüştür.
- Tekstür parametrelerinin kullanıldığı modellerin, bant reflektans ve vejetasyon indekslerine göre daha yüksek belirtme katsayıları sağlayarak (R^2 değerlerinin 0,45 seviyelerine kadar çıktığı), topraküstü biyokütle tahmininde daha güvenilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- Tekstür verilerinin dahil edilmesiyle standart hata değerlerinde azalma sağlandığı, bu durumun tahmin hassasiyetini artırdığı belirlenmiştir.
- Sentinel-2 uydu verileri ile yürütülen bu çalışmanın, saf kızılçam meşcerelerinde topraküstü biyokütle tahmininde uydu verileri kullanımının mümkün olduğunu ve planlama süreçlerine katkı sağlayabileceğini ortaya koyduğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışma sonucunda ulaşılan bulgular ışığında řu önerilerde bulunulması uygun görölmüştür:

- Gelecek çalışmalarda, tekstür parametrelerinin özellikle daha yoğun kullanılması, pencerelerin farklı boyutlarda denenmesi ve bant bazlı olarak en uygun parametrelerin belirlenmesi tahmin hassasiyetini artırabilecektir.
- Sentinel-2 verilerinin yanı sıra, GEDI lidar verileri gibi aktif uzaktan algılama verilerinin kullanılması, meşcerelerin dike yapısı hakkında bilgi sağlayarak modellerin açıklanma gücünü artırabilecektir.
- Çalışma alanının örneklem yoğunluğunun artırılması ve mevsimsel çekimlerin kullanılması, biyokütle tahminindeki duyarlılığı iyileştirebilir.
- Makine öğrenmesi algoritmalarının (Random Forest, SVM vb.) oklu regresyon analizine alternatif olarak kullanılması, model performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir.
- Uzaktan algılama yoluyla tahmin edilen biyokütle değerlerinin, yersel envanter çalışmalarını destekleyici bir çerçevede kullanılarak zamandan ve maliyetten tasarruf sağlayacağı, aynı zamanda karbon stok hesaplamaları ve yangın risk analizlerinde temel veri olarak katkı sunabileceği değerlendirilmiştir.
- řu an ki orman amenajman planlarında toprak üstü biyokütle hesaplanmakta olup harita bazında veriler sunulmamaktadır. Bu çalışmada kullanılan yöntemle birlikte gelecekte orman amenajman planlarında harita bazında bilgiler sunulabilir, böylelikle toprak üstü biyokütlenin fazla olduğu yerlerde yanıcı yük de fazla olacağından bu bölgelere silvikültürel müdahaleler önerilebilir, entegre bir yaklaşımla yangın risk haritaları oluşturulup orman amenajman planlarına entegre edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmadi, K., Kalantar, B., Saeidi, V., Harandi, E. K., Janizadeh, S., & Ueda, N. 2020. Comparison of machine learning methods for mapping the stand characteristics of temperate forests using multi-spectral sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12(18), 3019.
- Aksoy, H. 2024. Estimation stand volume, basal area and quadratic mean diameter using Landsat 8 OLI and Sentinel-2 satellite image with different machine learning techniques. *Transactions in GIS*, 28(8), 2687-2704.
- Ali, J., Haoran, W., Mehmood, K., Hussain, W., Iftikhar, F., Shahzad, F., & Zhongkui, J. 2025. Remote sensing and integration of machine learning algorithms for above-ground biomass estimation in *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantations: a case study using Sentinel-2 and Landsat-9 data in northern China. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1577298.
- Anonim 2024. Muğla Orman Bölge Müdürlüğü, Marmaris Orman İşletme Müdürlüğü, Çetibeli Orman İşletme Şefliği, Ekosistem Tabanlı Fonksiyonel Orman Amenajman Planı, Orman Genel Müdürlüğü, Orman İdaresi ve Planlama Dairesi, Ankara.
- Asner, G. P., Kellner, J. R., Kennedy-Bowdoin, T., Knapp, D. E., Anderson, C., & Martin, R. E. 2013. Forest canopy gap distributions in the southern Peruvian Amazon. *PloS one*, 8(4), e60875.
- Atar, D. 2023. Batı Karadeniz Bölgesi aynı yaşlı saf Doğu Kayını (*Fagus orientalis* Lipsky.) meşcerelerinin çeşitli iklim senaryolarına göre meşcere özelliklerinin tahmini ve simülasyonu [Doktora tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi]. Çankırı Karatekin Üniversitesi Tez Merkezi.
- Ateşoğlu, A. 2009. Farklı uydu görüntü verileri ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkilerin araştırılması (Bartın-Mugada Örneği). Doktora Tezi, Bartın Üniversitesi, 134 sayfa, Bartın.
- Baccini A., Laporte N., Goetz S J., Sun M. & Dong H. 2008. A First Map Of Tropical Africa's Above-Ground Biomass Derived From Satellite Imagery, *Environ. Res. Lett.* 3, 2008-045011 9pp.

- Brice M., Wulder M A., White J C. & Hobart G. 2013. “ Modeling Stand Height, Volume, and Biomass from Very High Spatial Resolution Satellite Imagery and Samples of Airborne LiDAR”, *Remote Sens.*, 5, 2308-2326; doi:10.3390/rs5052308.
- Bulut, S., Günlü. A. ve Keleş, S. 2016. Estimation of some stand parameters using Göktürk-2 satellite image. *Ist International Symposium of Forest Engineering and Technologies (FETEC 2016)*, Bursa.
- Bulut, S. 2021. Ankara Orman Bölge Müdürlüğü saf karaçam meşcerelerinde net birincil üretim ve yaprak alan indeksinin uzaktan algılama teknikleri ile modellenmesi. Doktora Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, 161 sayfa, Çankırı.
- Bulut, S., Günlü, A. ve Çakır, G. 2023. Modelling some stand parameters using Landsat 8 OLI and Sentinel-2 satellite images by machine learning techniques: a case study in Türkiye. *Geocarto International*, 38(1), 2158238.
- Clevers, J. G. P. W. and Gitelson, A. A. 2013. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 344-351.
- Dereli, M. A. 2019. Sentinel-2A uydu görüntüleri ile Giresun il merkezi için kısa dönem arazi örtüsü değişiminin belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 361-368.
- Dixon, R.K., Trexler, M.C., Wisniewski, J., Brown, S., Houghton, R.A., & Solomon, A.M. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185-190.
- Dube, T. And Mutanga, O. 2015. Evaluating the utility of the medium-spatial resolution Landsat 8 multispectral sensor in quantifying aboveground biomass in Umgeni catchment, South Africa. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101: 36-46.
- Duncanson, L., Kellner, J. R., Armston, J., Dubayah, R., Minor, D. M., Hancock, S., & Zraggen, C. 2022. Aboveground biomass density models for NASA’s Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112845.
- FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. Rome.

- Gao, B. C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266.
- Gibson, L., Lee, T. M., Koh, L. P., Brook, B. W., Gardner, T. A., Barlow, J., & Sodhi, N. S. 2011. Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. *Nature*, 478(7369), 378-381.
- Grabska, E. and Socha, J. 2021. Evaluating the effect of stand properties and site conditions on the forest reflectance from Sentinel-2 time series. *PLoS One*, 16(3), e0248459.
- Gitelson, A. A., Gritz †, Y., & Merzlyak, M. N. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 271-282.
- Gitelson, A. and Merzlyak, M. N. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves: Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143(3), 286-292.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 289-298.
- Günlü, A., Ercanlı, İ., Başkent, E.Z. ve Şenyurt, M. 2013. Qickbird ve Landsat 7 ETM+ uydu görüntüleri kullanılarak Ayancık-Göldağ Kayın (*Fagus Orientalis* Lipsky) meşcerelerinde hacim tahmini. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 14: 24-30.
- Günlü, A., Ercanlı, İ., Sönmez, T. ve Başkent, E.Z. 2014. Prediction of some stand parameters using pan-sharpened Ikonos Satellite image. *European Journal of Remote Sensing*, 47:329-342.
- Güverçin, İ. ve Günlü, A. 2023. Saf kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) meşcerelerinde aktif ve pasif uydu görüntüleri kullanılarak topraküstü biyokütlenin tahmin edilmesi (Anamur Orman İşletme Şefliği Örneği). *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 25(1), 177-191.

- Güverçin, İ. 2024 Saf Kızılçam Meşcerelerinde Sentinel-1A ve Landsat 8 OLI Uydu Görüntüsü Kullanılarak Topraküstü Biyokütlenin Tahmin Edilmesi Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Hirata Y., Tabuchi R., & Patanaponpaiboon P. 2014. “Estimation of Aboveground Biomass in Mangrove Forests Using High-Resolution Satellite Data” J For Res 19:34–41 DOI 10.1007/s10310-013-0402-5.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Işık, S. 2024. Saf Karaçam Ormanlarında Topraküstü Meşcere Karbon Miktarının Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi
- Ji, L., et al. 2020. Remote sensing in agriculture and forestry. *Sensors*, 20(5), 1345.
- Jiang, W., Zhang, L., Zhang, X., Gao, S., Gao, H., Sun, L., & Yan, G. 2025. Multi-Decision Vector Fusion Model for Enhanced Mapping of Aboveground Biomass in Subtropical Forests Integrating Sentinel-1, Sentinel-2, and Airborne LiDAR Data. *Remote Sensing*, 17(7), 1285.
- Kalıpsız, A. 1984. Dendrometri. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İ.Ü. Yayın No: 3194, O.F. Yayın No:354, İstanbul, 407 s.
- Karnieli, A., Kaufman, Y. J., Remer, L., & Wald, A. 2001. AFRI—Aerosol free vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 77(1), 10-21.
- Kaufman, Y. J. and Tanre, D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270.
- Keleş, S., Günlü, A. ve Ercanli, İ. 2021. Estimating aboveground stand carbon by combining Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite data: a case study from Turkey. In *Forest Resources Resilience and Conflicts* pp. 117-126, Elsevier
- Kumar, P., Krishna, A. P., Rasmussen, T. M., & Pal, M. K. 2021. Rapid Evaluation and validation method of above ground forest biomass estimation using optical remote sensing in tundi reserved forest area, India. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(1), 29.
- Liu, H.Q. and Huete, A.R. 1995. A feedback based modification of the NDV I to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33: 457-465.

- Lu, D. 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International journal of remote sensing*, 26(12):, 2509-2525.
- Maponya, M., Van Niekerk, A., & Mashimbye, Z. 2020. Applications of remote sensing in agriculture. *South African Journal of Geomatics*, 9(1), 45-60.
- Musthafa, M. and Singh, G. 2022. Improving forest above-ground biomass retrieval using multi-sensor L-and C-Band SAR data and multi-temporal spaceborne LiDAR data. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 822704.
- Nesha, M.K., Herold, M., De Sy, V., Duchelle, A.E., Martius, C., Branthomme, A., Garzuglia, M., Jonsson, O., & Pekkarinen, A., 2021. An assessment of data sources, data quality and changes in national forest monitoring capacities in the Global Forest Resources Assessment 2005-2020. *Environ. Res. Lett.* 16 (5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABD81B>
- Özdemir, E. G., Demiralay, A. ve Şahin, B. 2023. Bartın'daki sahil çamı (pinus pinaster ait.) ağaçlandırma alanlarında sentinel-1 ve sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak toprak üstü biyokütlenin kestirilmesi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, 5(1), 15-27.
- Özdemir, İ. ve Mert, A. 2007. Düzlerçamı kızılçam ormanında Qickbird uydu verileri kullanılarak gövde hacminin tahmini. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 2: 107-118.
- Özkal, M.K. 2017. Models of forest inventory for Istanbul forest using air borne Lidar and space borne imagery. MS Thesis, Michigan Technological University.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., & Hayes, D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *science*, 333(6045), 988-993.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2): 95-107.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H. A & Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119-126.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.
- Roy, D. P., Behera, M. D., & Srivastav, S. K. 2017. Advances in remote sensing for natural resource monitoring. *Current Science*, 112(6), 1135-1145.
- Sakıcı, O. E. ve Ercanlı, İ. 2004. Klasik biyokütle tahmin yöntemleri ve yeni yaklaşımlar.

- Sarıçam, F. 2024. Saf sedir meşcerelerinde Landsat 8 OLI uydu görüntüsü kullanılarak topraküstü biyokütlenin tahmin edilmesi (Kaş Orman İşletme Müdürlüğü örneği) [Yüksek lisans tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi]. Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sasaki, N. 2021. Forests as wildlife habitats. *Biodiversity and Conservation*, 30(4), 987-1002.
- Saraçoğlu, Ö. 1988. Karadeniz Yöresi Gökmar Meşcerelerinde Artım ve Büyüme. Orman Genel Müdürlüğü Yayınları, İstanbul, 312 sayfa, İstanbul.
- Saranay Kayar, S., Tekingündüz, G., Özkal, M. K. ve Kırkık Aydemir, P. 2024. Kampüs Orman Alanları Karbon Yutak Kapasitesinin Zamansal Değişimi; Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Örneği. *Düzce University Journal of Forestry/Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 20(2).
- Su, Y., Wu, Z., Zheng, X., Qiu, Y., Ma, Z., Ren, Y., & Bai, Y. 2025. Harmonizing remote sensing and ground data for forest aboveground biomass estimation. *Ecological Informatics*, 86, 103002.
- Sullivan, M. J., Talbot, J., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Qie, L., Begne, S. K., & Zemagho, L. 2017. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Scientific reports*, 7(1), 39102.
- Sun, O., Uğurlu, S. ve Özer, E. 1980. Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) Türüne Ait Biyolojik Kütlenin Saptanması, OAE Yayınları Teknik Bülten Serisi, No 104, 32 sayfa, Ankara.
- Şahan, E., ve Gunlu, A. 2024. Aktif ve Pasif Uydu Görüntüleri Kullanılarak Saf Karaçam Meşcerelerinde Topraküstü Karbonun Tahmin Edilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 26(4), 377-391. <https://doi.org/10.24011/barofd.1544831>
- Şenyurt, M., Yılmaz, C. ve Günlü, A. 2017. Landsat TM Uydu Görüntüsü Yardımıyla Bazı Meşcere Parametrelerinin Tahmin Edilmesi (Reşadiye Orman İşletme Şefliği Örneği). *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 200-209.
- Torunlar, H., Tuğaç, M. G. ve Duyan, K. 2021. Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yönteminde Sentinel-2A Uydu Görüntüleri Kullanılarak Tarımsal Ürün Desenlerinin Belirlenmesi; Konya-Karapınar Örneği. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, 3(2), 36-46.

- Turgut, R. 2019. LANDSAT 8 OLI Uydu Görüntüsü Kullanılarak Saf Karaçam Meşcerelerinde Topraküstü Biyokütlenin tahmin edilmesi Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ünsal, A. 2007. Adana Orman Bölge Müdürlüğü Karaisalı Orman İşletme Müdürlüğü Kızılçam Biyokütle Tablolarının Düzenlenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vafaei, S., Soosani, J., Adeli, K., Fadaei, H., Naghavi, H., Pham, T. D., & Tien Bui, D. 2018. Improving accuracy estimation of Forest Aboveground Biomass based on incorporation of ALOS-2 PALSAR-2 and Sentinel-2A imagery and machine learning: A case study of the Hyrcanian forest area (Iran). *Remote Sensing*, 10(2), 172.
- Xu, Y., Qin, Y., Li, B., & Li, J. 2025. Estimating vegetation aboveground biomass in Yellow River Delta coastal wetlands using Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 imagery. *Ecological Informatics*, 87, 103096.
- Zahriban Heasari, M., Fallah, A., Shataee, S., Kalbi, S., & Persson, H. 2019. Estimating the forest stand volume and basal area using pleiades spectral and auxiliary data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42: 1131-1136.
- Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le Moine, J., & Ryu, S. R. 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote sensing of environment*, 93(3): 402-411.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı ve Soyadı : Erhan YARTIM

Eğitim

Yüksek Lisans Çankırı Karatekin Üniversitesi 2023-Halen
Fen Bilimleri Enstitüsü
Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Lisans Zonguldak Karaelmas Üniversitesi 2001-2005
Bartın Orman Fakültesi
Orman Mühendisliği Bölümü

İş Deneyimi

Yıl	Kurum	Görev
2009 –Halen	Orman Genel Müdürlüğü	Başmühendis