



Farklı Meşçere Tiplerinde Kızılçam (*Pinus Brutia*) Ormanları İçin Toprak Üstü Biyokütle Karbon Tahmini: Landsat 9 Uydu Verileri ile Makine Öğrenmesi Yaklaşımı

Esin KARAMANLI^{1*}

¹Çukurova Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 01790, Adana, Türkiye

Geliş Tarihi: 21.05.2024

Kabul Tarihi: 10.06.2025

Basım Tarihi: 31.07.2025

Atıf yapmak için: Karamanli, E. (2025). Farklı Meşçere Tiplerinde Kızılçam (*Pinus Brutia*) Ormanları İçin Toprak Üstü Biyokütle Karbon Tahmini: Landsat 9 Uydu Verileri ile Makine Öğrenmesi Yaklaşımı. *Anadolu Çev. Hay. Bil. Derg.*, **10**(4), 408-415. <https://doi.org/10.35229/jaes.1703797>

How to cite: Karamanli, E. (2025). Above Ground Biomass Estimation for Turkish Pine (*Pinus brutia*) Forests in Different Stand Types: A Machine Learning Approach with Landsat 9 Satellite Data. *J. Anatol. Env. Anim. Sci.*, **10**(4), 408-415. <https://doi.org/10.35229/jaes.1703797>

*ID: <https://orcid.org/0000-0003-0324-1486>

***Sorumlu yazar:**

Esin KARAMANLI
Çukurova Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi,
Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 01790, Adana,
Türkiye

✉: esin.karamanli@gmail.com

Öz: Orman Toprak Üstü Biyokütlesi (TÜB) orman ekosistemlerinin konumsal-zamansal değişimini gözlemlemek ve değerlendirmek için önemli biyofiziksel değişkenlerdir. Sürdürülebilir orman yönetim stratejilerini daha iyi destekleyebilmek için uzaktan algılama araçları ile sürekli ve doğru bir şekilde Toprak Üstü Biyokütle Karbon (TÜBK) tahmininin sağlanabilir olması gerekmektedir. Landsat 9 C2L1 uydu verileri ve makine öğrenmesi algoritmaları (Yapay Sinir Ağları (YSA), Rastal Orman Algoritması (ROA) ve Destek Vektör Makineleri (DVM)) bu çalışmada Adana ili "*Pinus brutia*" meşçerelerinde tutulan TÜBK miktarının tahmininde kullanılmıştır. Landsat 9 uydu verileri ile elde edilen spektral indisler Normalize Edilmiş Farklı Vegetasyon İndeksi (NFVI), İyileştirilmiş Vegetasyon İndeksi (İVI) ve Orman Kanopi Yoğunluk (OKY) altlığı bağımsız değişken kümesi olarak kullanılmıştır. Tahmin doğruluğunu arttırmak için birden fazla model kurulumu gerçekleştirilmiş ve en yüksek TÜBK tahmin Rastal Orman Algoritmaları (0,84 R²) aracılığıyla elde edilmiştir. İkinci en yüksek model tahmini, çapraz doğrulama uygulanarak hiperparametre optimizasyonu sağlanması hedeflenen veri seti kullanılarak Rastal Orman Algoritması (0,62 R²) ile elde edilmiştir. Üçüncü en yüksek model performansı ise veri setinin radyal düzlemde değerlendirildiği Destek Vektör Makineleri (0,61 R²) ile elde edilmiştir. Sonuçlar diğer makine öğrenmesi algoritmaları içerisinde hiperparametre optimizasyonu sağlanmamış veri seti ile kurulan Rastal Orman Algoritması model performansının oldukça önemli bir farkla TÜBK tahmininde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışma Orman Envanter Yönetimi çalışmaları için oldukça basit ve etkili bir yöntem aracı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Orman kanopi yoğunluğu, spektral indeksler, toprak üstü biyokütle karbon, makine öğrenmesi algoritmaları.

Above Ground Biomass Estimation for Turkish Pine (*Pinus brutia*) Forests in Different Stand Types: A Machine Learning Approach with Landsat 9 Satellite Data

Abstract: Forest Aboveground Biomass (AGB) is a crucial biophysical variable to observe and evaluate the spatial and temporal changes of forest ecosystems. In order to support sustainable forest management strategies, Aboveground Biomass Carbon (AGBC) estimation should be provided with remote sensing tools consistently and accurately. In this study, Landsat 9 C2L1 satellite data and machine learning algorithms (Artificial Neural Network (ANN), Random Forest (RF), and Support Vector Machine (SVM)) were used to estimate the amount of AGBC stored in the "*Pinus brutia*" stands of Adana province. Spectral indices (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI)) obtained with Landsat 9 satellite data and Forest Canopy Density (FCD) layers were used as independent variable set. In order to increase the prediction accuracy, more than one model was installed and the highest AGBC estimation was obtained through Random Forest Algorithm (0.84 R²). The second highest model estimation was obtained by the Random Forest Algorithm (0.62 R²) using the data set aimed to provide hyperparameter optimization by applying cross-validation. The third highest model performance was obtained by the Support Vector Machine (0.61 R²), in which the data set is evaluated in a radial plane. The results revealed that the model performance of the Random Forest Algorithm, which was established with a data set that was not hyperparameter optimized among other machine learning algorithms, can be used to estimate AGBC with a very significant difference. This study presents a straightforward and efficient way for Forest Inventory Management studies.

Keywords: Forest canopy density, spectral indices, aboveground biomass carbon, machine learning algorithms.

***Corresponding author's:**

Esin KARAMANLI
Çukurova University, Faculty of Architecture,
Department of Landscape Architecture, 01790,
Adana, Türkiye

✉: esin.karamanli@gmail.com

GİRİŞ

Ekosistemin düzenleyici kategorisinde değerlendirilen karbon depolama hizmeti (Budak vd., 2019; Ercanlı vd., 2023), bir kaynak alternatifi olarak orman ekosistemini kapsayan “orman biyokütlesi”nin tahmini ve değerlendirilmesine yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır. Orman ekosistemleri üzerine gerçekleştirilen biyokütle çalışmaları, son zamanlarda oldukça popüler olan küresel ısınma ve ısınmanın karbon döngüsü dengesine dayalı değişim eğilimine oldukça odaklanmış durumdadır (Çorbacı vd., 2024; Değermenci, 2023). Bu çalışmalar, karbon salınımindaki artışın küresel düzeyde ısı değişimine olan negatif yönlü etkisini elimine etmek için orman biyokütlesinin en geniş yutak potansiyellerinden biri olan doğal ve yapay meşçereler üzerinde popüler bir araştırma ilgisi yaratmıştır (Saraçoğlu, 1998). Küresel değişim ve ekosistem fonksiyonu için doğru biyokütle tahmini bu araştırmaların önemli adımlarından biri kabul edilmektedir (Ghosh & Behera, 2018; Lu vd., 2016). Farklı meşçere tiplerinin karbon tutumuna yönelik tahmin bilgisinin somutlaştırılması ve yönetim çevreleri için kullanıma hazır hale getirilmesi doğal kaynak yönetim süreçlerini kolaylaştırıcı faktör olarak değerlendirilmektedir (Anaya vd., 2009). Atmosferdeki toprak üstü karbon döngüsünü düzenlemede karbon havuz potansiyelinin arttırılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesi mevcut meşçere tiplerine ait yutak potansiyellerinin tespiti ile mümkün görülmektedir.

Gövde, kütük, dallar, kabuk, tohumlar ve yapraklar dahil toprak üzerinde yaşayan canlı biyokütlenin tümünü ifade eden Toprak Üstü Biyokütle'deki (TÜB) (Ravindranath & Ostwald, 2008) karbonun tahmini için en doğru metot alan ölçümlerine dayalı olarak geliştirilen çalışmalar olarak görülmektedir (Segura & Kanninen, 2005). Sürekli olarak gelişmekte ve değişmekte olan canlı biyokütlenin yutak miktarı potansiyelini saha çalışmaları ile güncel tutmak oldukça zor ve zaman alıcı bir çabayı gerekli kılar. Bu aşamada, uydu görüntüleri aracılığıyla bilgi çıkarımı yoğun emek gerektiren saha çalışması sürecini oldukça kolaylaştıran bir araç olarak karşımıza çıkar. Orman ekosistemleri için yer üstü biyokütlenin tahmininde uydu görüntülerini referans alan metotların kullanımı son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır (Lu vd., 2016). Süreç ve deneysel temelli birçok ekosistem tahmin modeli geliştirilmiş (Lu vd., 2012), çalışmalar orman kapalılık derecesini dikkate alarak tür bazında parametrelerin türetilmesini sağlamıştır. Bu kapsamda ülke sınırlarımız içerisinde, ağaç türlerinin canlı biyoküttelede hapsedebildiği karbon miktarlarının hesaplanmasına yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Durkaya vd., 2018). Bu çalışmalarda orman ekosistemlerinde yer alan herdem-yeşil ve yaprak döken ağaç türleri ayrıştırılarak toplam karbon stoğu (Tolunay & Çömez, 2008) ve farklı tür dağılımlarına göre Odun

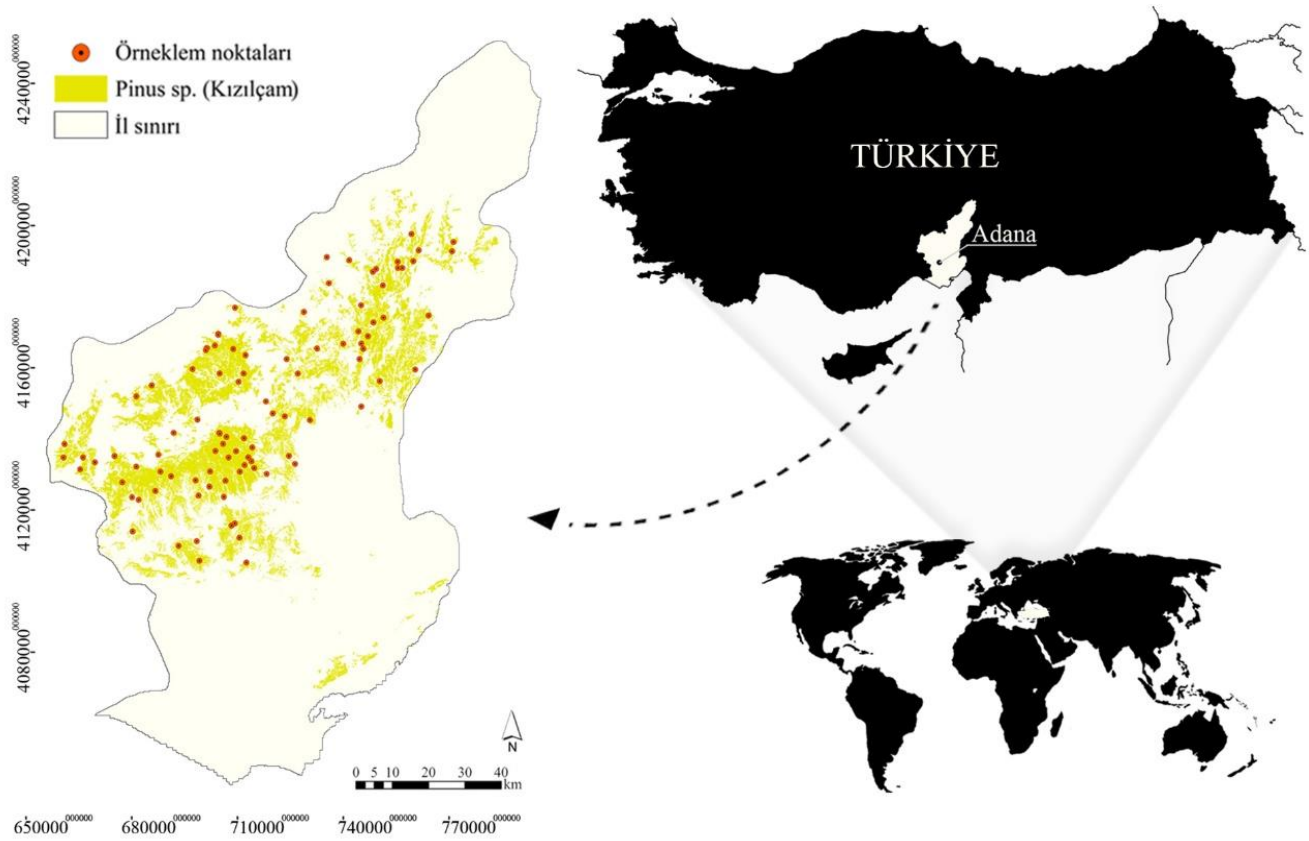
Yoğunluğu (OY), Biyokütle Genleşme Faktörü (BGF) ve Ticari Ağaç Hacmi (TAH) katsayıları (Saraçoğlu, 2000; Tolunay, 2011; Ünsal, 2007) hesaplanmıştır. Geliştirilen parametreler diğer birçok çalışmada referans gösterilerek TÜBK tahmininde kullanılmıştır (Akpınar, 2022; Kahyaoğlu vd., 2019). Ancak, her ne kadar anılan kapsamsaki çalışmalar tür bazına indirgenerek spesifik hale getirilse de canlı biyokütlenin gelişimini izleyerek toplam TÜBK miktarı üzerine sürekli bilgi sahibi olabilmek için yeterli düzeyde değildir. Uydu verilerine dayalı çalışmaların geliştirilmesi ve tahmin performanslarının gerçeğe yakın sonuçlar üretebilir hale getirilmesi veri güncelleme süreçlerinin kolaylaşması açısından oldukça önemli görülmektedir. Bu sebeple bu çalışma, Adana il sınırları içerisinde oldukça geniş bir yüzey alanı işgal eden “*Pinus brutia*” türüne ait farklı tip meşçerelerin TÜBK miktarının uydu verileri ile ne kadar doğru tahmin edilebileceği üzerine kurgulanmıştır.

Adana il sınırları içerisinde 451,270 ha yüzey alanına sahip orman alanlarının 214,121 ha'lık dilimini farklı tipte “*Pinus brutia*” meşçereleri oluşturmaktadır. 47,192,342 ton TÜBK barındıran tüm orman alanları içerisinde, bu miktarın 15,524,681 tonu “*Pinus brutia*” meşçerelerinde tutunmuş durumdadır (Karamanlı, 2024). Önemli bir karbon yutak hacmi potansiyeline sahip olması nedeni ile, bu çalışmada Adana ili Orman Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde yer alan tüm orman işletme şefliklerine ait denetim sahası içerisindeki “*Pinus brutia*” meşçerelerine ait toprak üstü biyokütle karbon miktarının Landsat 9 C2L1 uydu verileri ile tahminini hedeflemektedir. Bu doğrultuda, Adana ili amenajman planından alınan meşçere tipleri ile birim alan hacim değerleri üzerinden toprak üstü biyokütle karbon miktarları hesaplanmış ve uydu verileri referans alınarak makine öğrenmesi algoritmaları ile yürütülen tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Materyal:

Çalışma Alanı: İstatistikî Bölge Birimleri Sınıflandırmasına (İBBS) göre TR62 Bölgesinde yer alan Adana İli 1.409.680 ha yüzölçümü ile Türkiye yüzölçümünün %1.8'sini kapsamakta ve 36°30'-38°25' kuzey enlemleri ile 34°48'-36°41' doğu boylamları arasında yer almaktadır (Karamanlı, 2024). Türkiye'nin güneyinde Doğu Toroslarını içine alan Adana il sınırı, Akdeniz kıyılarından kuzeyde Toros Dağları'nın yüksek tepelerine kadar uzanmaktadır. Akdeniz ikliminin etkisi altında bulunan Adana ilinde yaz ayları sıcak ve kurak, kış ayları ise ılık ve yağışlıdır. Şekil 1 “*Pinus brutia*” türüne yönelik gerçekleştirilen bu çalışmada değerlendirmeye alınan meşçerelerin dünya ve ülke sınırları içerisindeki konumunu göstermektedir.



Şekil 1. Türkiye sınırları içerisinde çalışma alanının konumu / Adana ili.

Figure 1. Location of the study area within the boundary of Turkey / Adana province.

Veri Setinin Temini: Toprak Üstü Biyokütle Karbon (TÜBK) varlığının tahmini hedeflenen bu çalışmada 2023 yılı tarihli Landsat 9 C2L1 uydu verileri kullanılmıştır. TÜBK varlığının hesaplanabilmesi için gerekli meşçere haritası ve Adana ilini kapsayan 42 orman işletme şefliği için meşçere tipleri tanıtım tabloları Adana Orman Bölge Müdürlüğünden temin edilmiştir. Kullanılan veri setine ait detaylı bilgi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan veri seti özellikleri.

Table 1. Dataset specifications.

Ürün İsmi: LC09_L1TP_175034_20230917_20230917_02_T1				
Band	Tanım	Çözünürlük	Kaynak	
B ₂	Band 2 Visible Blue (0.450 - 0.51 µm)	30	(USGS,2025)	
B ₃	Band 3 Visible Green (0.53 - 0.59 µm)	30		
B ₄	Band 4 Red (0.64 - 0.67 µm)	30		
B ₅	Band 5 Near-Infrared (0.85 - 0.88 µm)	30		
B ₆	Band 6 SWIR 1(1.57 - 1.65 µm)	30		
B ₇	Band 7 SWIR 2 (2.11 - 2.29 µm)	30		
Sayısalastırılmış Adana ili Meşçere Haritası				

Metot:

Orman Kanopi Yoğunluğunun Hesaplanması:

Orman Kanopi Yoğunluk (OKY) altlığının hesaplanabilmesi için ham Landsat 9 uydu verilerinin Atmosfer Üstü Yansımaya (AÜY) (Top of Atmosphere (TOA)) dönüşümü (Watts/(m²*srad*µm)) Eşitlik 1 (Loi vd., 2017) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Bu eşitlikte M_L banda özgü çarpımsal yeniden ölçeklendirme faktörünü (REFLECTANCE_MULT_BAND), A_L banda özgü ilave yeniden ölçeklendirme faktörünü (REFLECTANCE_ADD_BAND), Q_{cal} niceliksel ve kalibre edilmiş standart ürün piksel değerini (Ham uydu verisi değeri: Digital Number (DN)) ifade eder. Elde edilen yansımaya verileri kullanılarak Gelişmiş Vejetasyon İndeksi (GVİ), Çıplak Toprak İndeksi (ÇTİ) ve Kanopi Gölge İndeksi (KGİ) hesaplanmıştır. Bu aşamada GVİ, ÇTİ ve KGİ için sırasıyla Eşitlik 2, 3 ve 4 (Bera vd., 2020) kullanılmıştır.

$$GVİ = [(B_5 + 1) * (65536 - B_4) * (B_5 - B_4)]^{1/3} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

$$ÇTİ = \frac{((B_6 + B_4)) - ((B_5 + B_2))}{((B_6 + B_4)) + ((B_5 + B_2))} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

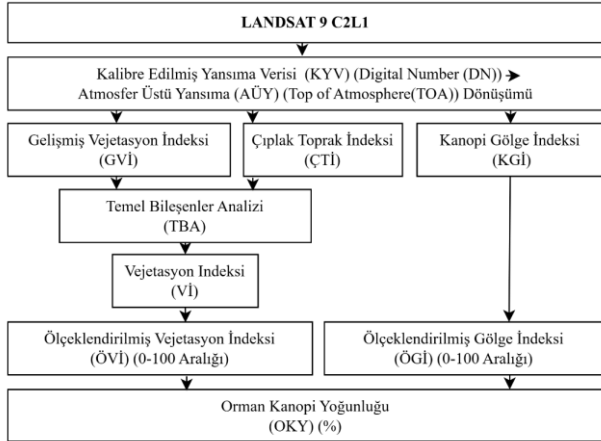
$$KGİ = [(1 - B_4) * (1 - B_3) * (1 - B_2)]^{1/3} \quad (\text{Eşitlik 4})$$

GVİ ve ÇTİ altlıklarına ArcGIS Pro yazılım ortamında Temel Bileşenler Analizi (TBA) uygulanarak Vejetasyon İndeksi (Vİ) altlığı elde edilmiştir. Elde edilen Vİ ve KGİ altlıkları yeniden ölçeklendirilerek sırasıyla 0-100 aralığında Ölçeklendirilmiş Vejetasyon İndeksi (ÖVİ) ve Ölçeklendirilmiş Kanopi Gölge İndeksi (ÖGİ) altlıklarına dönüştürülmüştür. ÖVİ ve ÖGİ altlıkları kullanılarak elde edilen Orman Kanopi Yoğunluğuna

(OKY) ait formülasyon (Abdollahnejad vd., 2017) Eşitlik 5'te paylaşılmıştır.

$$OKY (\%) = [SVI * SKGI + 1]^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (\text{Eşitlik 5})$$

OKY altlığının elde edilmesi için kullanılan yöntem akış grafiği Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Orman kanopi yoğunluğu altlığı için yöntem akış grafiği.
Figure 2. Method flowchart for forest canopy density layer.

Toprak Üstü Biyokütle Karbon Miktarının

Hesaplanması: Kyoto Protokolüne tâbi diğer tüm ülkeler gibi Türkiye’de Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından hazırlanan Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık için Pratik Rehber’i referans olarak TÜBK miktarını hesaplamaktadır. Bu kaynağa göre TÜBK Eşitlik 6’da verilen formül ile ifade edilir (IPCC, 2003).

$$TÜBK \left(\frac{mg}{ha} \right) = TAH \left(\frac{m^3}{ha} \right) * OY \left(\frac{mg}{m^3} \right) * BGF \quad (\text{Eşitlik 6})$$

Bu eşitliğe (6) göre ‘TAH’ ormanlık alanlardaki ağaç servet değerini ifade etmektedir (TAV, 2020). Adana Orman Bölge Müdürlüğü bünyesindeki 42 Orman İşletme Şefliğinin denetim sınırları içerisinde yer alan “*Pinus brutia*” meşçereleri için ağaç servet değeri ve ağaç artım değeri (m^3/ha cinsinden) meşçere haritası üzerinde sayısallaştırılmıştır. Burada ‘OY’ hacim ağırlıklı ortalama odun yoğunluğunu (mg/m^3), ‘BGF’ ise biyokütle genişleme faktörünü ifade etmektedir. ‘OY’ ve ‘BGF’ katsayıları, Tolunay (2008) tarafından gerçekleştirilen geniş kapsamlı literatür taramasının sonuçlarından elde edilmiştir. Çalışma, Türkiye için biyokütledeki ‘BGF’ ve ‘OY’ miktarlarını mg/m^3 cinsinden hesaplamaya yardımcı olan katsayıları tür bazında ortaya koymaktadır. Adana ili kapsamındaki “*Pinus brutia*” türlerine ait katsayılar bu çalışmadan derlenerek Tablo 2’de verilmiştir.

Toprak Üstü Biyokütle Karbonu (TÜBK) hesaplanırken biyokütlenin birim hektarda karbon miktarına dönüşüm oranı “*Pinus brutia*” gibi iğne yapraklı türler için 0.51, çarpımıyla (Yolasiğmaz vd., 2016) elde

edilmektedir. Bu katsayı kullanılarak TÜBK miktarı elde edilmiştir.

Tablo 2. “*Pinus brutia*” ağaçları için odun yoğunluk (OY) ve Biyokütle Genişleme Faktörü (BGF) katsayıları (Tolunay 2008).

Tablo 2. Wood Density (WD) ve biomass expansion factor (BEF) coefficients (Tolunay 2008) for “*Pinus brutia*” trees.

Tür Grubu	OY (mg/m^3)	BGF
“ <i>Pinus brutia</i> ”	0,478	1,225

İstatistiksel Analiz: TÜBK tahmininin açıklayıcıları olarak bu çalışmada NFVİ, İVİ ve OKY kullanılmıştır. NFVİ Eşitlik 7’de (Sun vd., 2023) ve İVİ (Matsushita vd., 2007) Eşitlik 8’de belirtilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$NFVİ = (B_5 - B_4) / (B_5 + B_4) \quad (\text{Eşitlik 7})$$

$$İVİ = G * \frac{B_5 - B_4}{B_5 + C_1 * B_4 - C_2 * B_2 + L} \quad (\text{Eşitlik 8})$$

Eşitlik 8’de ifade edilen ‘G’ kazanç faktörü (gain factor), ‘C₁’ ve ‘C₂’ atmosferik direnç katsayılarını (coefficient for atmospheric resistance, C₁:6 ve C₂:7,5) ifade etmektedir. ‘L’ ise yaprak kanopisinin doğrusal olmayan hizalamasını sağlar ve ‘1’ değerine eşittir. Bu aşamaya kadar belirtilen yöntem izlenerek elde edilen NFVİ, İVİ ve OKY altlıkları ROA, DVM ve YSA makine öğrenmesi algoritmaları ile TÜBK tahmininde kullanılmıştır. İstatistiksel analizler RStudio 4.4.2 yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada izlenen yöntem akış grafiği Şekil 3 üzerinde görülmektedir.



Şekil 3. TÜBK tahmininde kullanılan yöntem akış grafiği.

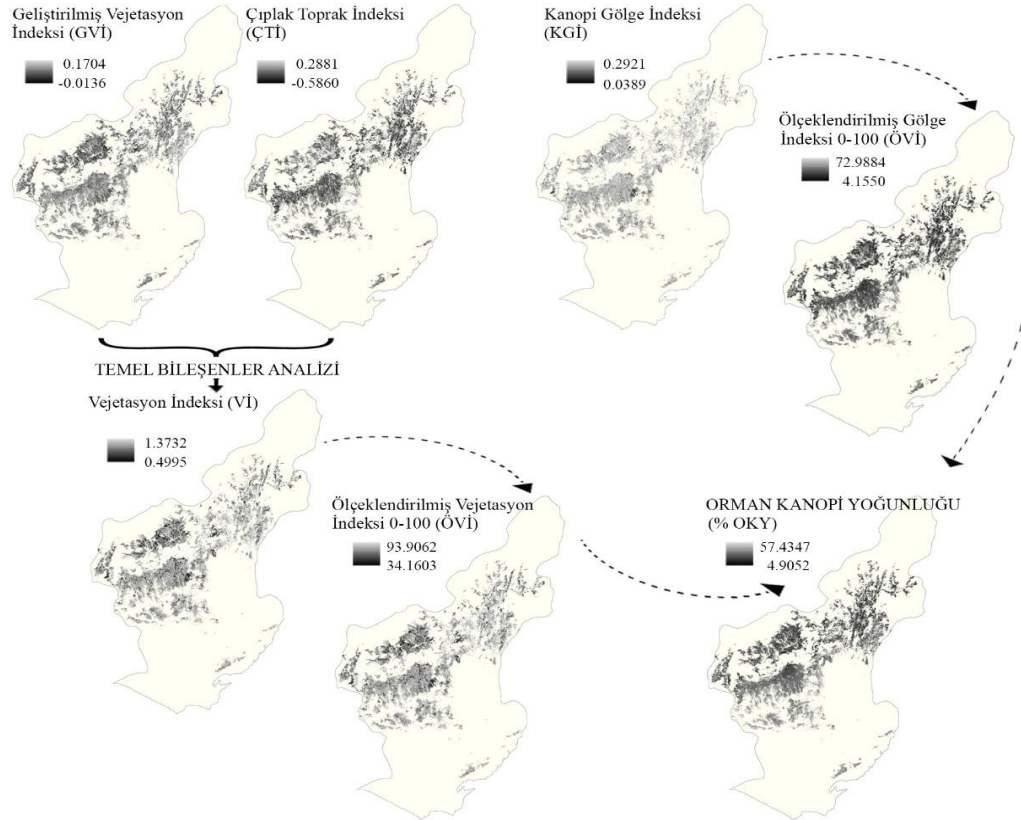
Figure 3. Flowchart of the method used in AGBC estimation.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kalibre edilmiş Landsat 9 uydu verileri (Tablo 1) kullanılarak elde edilen GVI ve ÇTİ altlıklarına TBA uygulanarak VI altlığı elde edilmiştir. TBA’nde GVI ve ÇTİ altlıkları için standart sapma değeri sırasıyla 0,1834 ve 0,0209 olarak gözlemlenmiştir. KGI ve VI altlıklarının Eşitlik 4’te paylaşılan formülde kullanılabilmesi için standardizasyonu sağlanmış ve 0-100 aralığına yeniden ölçeklendirilmiştir. Elde edilen ÖVİ ve ÖGI altlıkları Eşitlik 5’te ifade edilen formülde kullanılarak Adana ili “*Pinus brutia*” meşçerelerine ait OKY altlığı elde edilmiştir. Şekil 4’te görüldüğü gibi “*Pinus brutia*” meşçerelerinde yer alan ağaç topluluklarına ait kanopi yoğunluk yüzdesi maksimum %57,43 ve minimum %4,90 olarak hesaplanmıştır. Sonuç OKY katmanını incelendiğinde yoğun ve az yoğun meşçerelerin çalışma sahası içerisinde

homojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. 1300-1550 m yükseklikte ve tipik Akdeniz iklimi etkisi altında uygun yaşam koşullarına erişen kızılçam türleri (Keten & Gülsoy, 2020) için bu durum oldukça ideal kabul edilmektedir. Çalışmanın nihai hedefini oluşturan TÜBK tahmini için sadece orman kanopi yoğunluğunun değerlendirmeye alınması çalışma sahası içerisindeki karışık veya tek tip meşçere sınıflarındaki ağaç-ağaççıkların karakteristik özelliklerinin değerlendirmeye alınabilmesi için yeterli görülmemektedir. Benzer amaçla

yürütülen çalışmaların birçoğunda OKY altlığına ek olarak, bitki örtüsünün sağlıklı olup olmama durumunu ortaya koyan NFVİ ve bitki biyokütlesi hakkında bilgi sağlayan İVİ (Xie & Fan, 2021) altlıkları bir arada değerlendirilmektedir (Ahmad vd., 2021; Joshi vd., 2002; Zhang vd., 2024). Bu çalışmada da benzer bir yöntem izlenmiş ve Adana ili "*Pinus brutia*" meşçerelerinde hapsolan TÜBK tahmini için OKY, NFVİ ve İVİ altlıkları açıklayıcı değişken kümesi olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Sonuç orman kanopi yoğunluk altlığı ve ön hazırlık aşamaları.
Figure 4. Final forest canopy density layer and preliminary processes.

Son zamanlarda üstün tahmin yeteneği ile öne çıkan YSA, ROA ve DVM makine öğrenmesi algoritmaları (Kılıç vd., 2022) bu çalışmada da TÜBK tahmininde yordayıcı araç olarak kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te paylaşılmıştır. Bu sonuçlara göre ROA, YSA ve DVM algoritmasına göre oldukça anlamlı bir fark (0,84 R², 31,56 RMSE ve 26,91 MAE) ile en ideal tahmin modeli (modelRFtune1) kurulmasını sağlamıştır. ROA, son zamanlarda uydu verilerine dayalı yersel bilginin çıkarımında diğer doğrusal ve doğrusal olmayan makine öğrenmesi algoritmalarına göre oldukça anlamlı sonuçlar üreterek birçok çalışmada (Grimm vd., 2008; Li vd., 2022) başarısını kanıtlamış durumdadır. Bu çalışmada da benzer bir sonuca ulaşılmıştır. 0,84 R² değeri oldukça anlamlı bir tahmin modeli kurulduğuna işaret etmektedir.

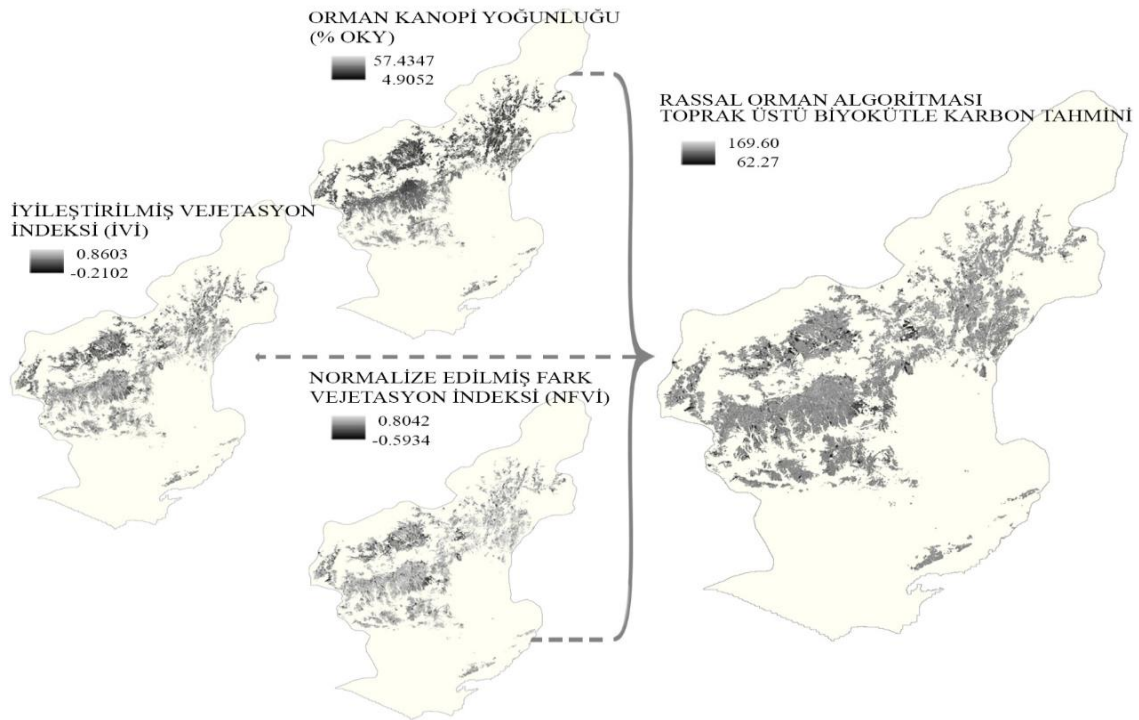
Tablo 3. Model tahmin sonuçları.

Table 3. Results of model estimation.

Model	R ²	RMSE	MAE	Model Kurulumu
DVM	0,61	54,15	44,43	type <- 'eps-regression', kernel <- 'radial'
	0,54	56,34	47,62	type <- 'eps-regression', kernel <- 'linear'
	0,52	133,5	98,89	type <- 'eps-regression', kernel <- 'sigmoid'
	0,46	59,65	48,01	type <- 'eps-regression', kernel <- 'polynomial'
	0,84	31,56	26,91	modelRFtune1 <- trainControl(method = "cv", number = 5, search = "grid")
ROA	0,62	40,10	33,02	modelRFtune2 <- train(tük ~., data = train_rf, method = "rf", tuneGrid = expand.grid(mtry=1:4), trControl = trControlRF2)
	0,52	0,806	0,676	model_Ann1 <- neuralnet(tük ~., data = train_ann, hidden=3, threshold = 0.03, learningrate = 0.05, linear.output = TRUE)
YSA	0,53	0,807	0,677	model_Ann2 <- neuralnet(tük ~., data = train_ann, hidden=3, threshold = 0.04, learningrate = 0.05, linear.output = TRUE)

Zhen vd., (2019) çalışmasında NFVI ve İVİ altlıklarını ROA ile yordayarak TÜBK tahmininde bulunmuş ve farklı model kurulum denemeleri neticesinde en yüksek 0,68 R^2 değerine ulaşmıştır. Burada OKY altlığının değerlendirmeye alınmamış olması, çalışmamız sunucunun (0,84 R^2) bu çalışmaya göre çok daha anlamlı bir sonuca ulaşmasının nedeni olarak düşünülmektedir. Wu vd. (2024) TÜBK tahmini için ROA ve Deneysel Bayesian Kriging Modeli (DBKM) bir arada kullanmış ve 0,78 R^2 değerine sahip model tahmin sonucu elde etmişlerdir. Bu çalışmada TÜBK tahminin açıklayıcısı olarak kullanılan değişkenler arasında arazi örtüsü-arazi kullanım bilgisine, spektral bazlı vejetasyon indekslerine (Toprak Bazlı Vejetasyon İndeksi (TBVİ), Yeşil Yaprak İndeksi (YYİ), Vejetasyon Oran İndeksi (VOİ) vb.) yer verilmiş ve oldukça kalabalık bir değişken kümesi hazırlanmıştır. Ancak spektral bilgiye dayalı çalışmalarda veri hassasiyetini göz ardı ederek birden fazla benzer amaçlı spektral yansıma bilgisi kullanımının veri

yorumlanabilirliğini zorlaştırdığı düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılan değişkenlerin anlamlı bir varyans ortaya koyabilmek için oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir. Lourenço vd. (2021) çalışmasında NFVI, Vİ ve uydu verilerine ait tekstür bilgilerini (homojenite, ortalama ve varyans) kullanarak ROA ile 0,82 R^2 değerine sahip TÜBK miktarı tahmini sağlamışlardır. Oldukça benzer bir çalışma doğruluğu sağlamış olduğumuz bu çalışmada İVİ algoritmasına yer verilmemesine rağmen benzer amaç gözetilen tekstür bilgisinin kullanılması neredeyse özdeş sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır. İncelenen örneklerde olduğu gibi benzer amaçlı çalışma bulgularına göre bu çalışmanın anlamlı düzeyde doğru TÜBK tahmini üretebildiği sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5’de Adana ili “*Pinus brutia*” meşçerelerine ait OKY, NFVI ve İVİ değişkenleri ve en yüksek tahmin doğruluğuna sahip model (Tablo 3: modelRFtune1) ile hazırlanmış TÜBK altlığı görülmektedir.



Şekil 5. Rassal orman algoritması ile elde edilen nihai toprak üstü biyokütle karbon altlığı.
Figure 5. Final aboveground biomass carbon layer obtained with random forest algorithm.

SONUÇ

Sonuç olarak bu çalışmada Adana ili “*Pinus brutia*” meşçerelerine ait Toprak Üstü Biyokütle Karbon (TÜBK) miktarı, Landsat 9 uydu verileri ($B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7$) kullanılarak elde edilen Orman Kanopi Yoğunluğu (OKY), Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (NFVI) ve İyileştirilmiş Vejetasyon İndeksi (İVİ) altlıkları ile Makine Öğrenmesi Algoritmaları (YSA, ROA ve DVM) kullanılarak tahmin

edilmiştir. İlgili literatür çalışmalarına paralel bir çıkarımla Rassal Orman Algoritması ile kurulan model (modelRFtune1) 0,84 R^2 , 31,56 RMSE ve 26,91 MAE değeri ile en yüksek doğruluğa sahip tahmin sonucuna ulaşmamızı sağlamıştır. Oldukça karmaşık ve çoklu değişken kümeleri ile kurulan model denemelerinin aksine sadece OKY, NFVI ve İVİ altlıkları ile gerçekleştirilen Rassal Orman Algoritması model denemeleri oldukça basit ve etkili bir sonuç elde edilmesi için yeterli olmuştur. Doğal ve/veya doğal olmaya sebepler ile sürekli değişim

dinamiğine sahip “*Pinus brutia*” meşçerelerinin TÜBK miktarına yönelik tahmin bilgisini sağlamada bu çalışma oldukça basit ve etkili bir yöntem ortaya koymuştur. Küresel ısınma ile mücadele için kara-atmosfer arasındaki karbon döngüsünün iyileştirilmesinde orman toprak üstü biyokütleri önemli bir paya sahiptir. Bu çalışmada “*Pinus brutia*” için gerçekleştirildiği gibi tür bazında karbon envanter analizinin sağlanması, emisyon azaltım stratejileri için ormanlaştırma aşamasında tür bazında potansiyel tutum tahmini, hasat planlarında karbon tutumunun izlenmesi (envanter niteliklerinin güncel tahmin kolaylığı), kitlesel tabanlı kaynak envanterinin yerini bitki örtüsüne yönelik kaynak envanterine dönüştürme gibi *Orman Envanter Yönetimini* kapsayan çalışmalarda bu yöntemin oldukça etkin bir şekilde kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdollahnejad, A., Panagiotidis, D., & Surovy, P. (2017). Forest canopy density assessment using different approaches – Review. *Journal of Forest Science*, 63(3), 107-116. DOI: 10.17221/110/2016-JFS
- Ahmad, A., Gilani, H., & Ahmad, S. R. (2021). Forest aboveground biomass estimation and mapping through high-resolution optical satellite imagery - A literature review. *Forests*, 12(7), 914, DOI: 10.3390/f12070914
- Akpınar, A. (2022). İnsansız hava aracı ile elde edilen görüntülerden ağaçların toprak üstü biyokütle tahmini ve karbon depolama kapasitesinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Uzaktan Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, Türkiye, 89s.
- Anaya, J. A., Chuvieco, E. & Palacios-Orueta, A. (2009). Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*, 257, 1237-1246, DOI: 10.1016/j.foreco.2008.11.016
- Başkent, E. Z. (2022). Principal components of carbon Dynamics in forest ecosystem and planning. *Journal of Architecture, Engineering & Fine Arts*, 4(1), 1-15.
- Bera, B., Saha, S. & Bhattacharjee, S. (2020). Estimation of forest canopy cover and forest fragmentation mapping using landsat satellite data of Silabati river basin (India). *KN-Journal of Cartography and Geographic Information*, 70, 181-197. DOI: 10.1007/s42489-020-00060-1
- Budak, M., Günal, H., Çelik, İ., & Acir, N. (2019). Ekosistem servislerinin haritalanması ve önemi. ISPEC, *International Conference on Agriculture, Animal Science And Rural Development-III*, 20-22 Aralık 2019, Van, Türkiye, 273-282.
- Çorbacı, Ö. L., Özçelik, A. E., Yüksek, F., Yüksek, T., & Öztekin Kara, C. (2024). Climate Change, Carbon Management and Green Space Systems in Architectural Sciences, Gül, A., Demirel, Ö. & Akten, S. (Ed.), *Determination of biomass and carbon sequestration capacity of urban trees: Rize province agricultural botanical park, 1st ed.*, 403-443p, IKSAD Uluslararası Yayın Evi, Adıyaman, Türkiye.
- Değermenci, A. S. (2023). Düzce ili karasal karbon kapasitesinin belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11, 99-110, DOI: 10.29130/dubited.1023712
- Durkaya, B., Durkaya, A., & Kaptan, S. (2018). Karbon Birikiminin Farklı Yöntemlerle Hesaplanması; Bartın Orman İşletme Müdürlüğü Örneği. 4th *International Symposium on Environment and Morals*, 27-29 Haziran 2018, Herzegovina, Bosnia, 1-8.
- Ercanlı, İ., Şenyurt, M., Günlü, A., Çakır, M., Bolat, F., & Bulut, S. (2023). ÇAKÜ araştırma ormanı karaçam meşçereleri için tek ve çift girişli toprak üstü ağaç biyokütle denklemlerinin geliştirilmesi. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 126-134, DOI: 10.53516/ajfr.1376635
- Ghosh, S.M., & Behera, M.D. (2018). Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*, 96, 29-40. DOI: 10.1016/j.apgeog.2018.05.011
- Grimm, R., Behrens, T., Märker M., & Elsenbeer, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island-Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146, 102-113, DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.05.008
- IPCC. (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, ipcc national greenhouse gas inventories programme, Chapter 4, Section 3, Intergovernmental Panel on Climate Change, Hayama, Japan, 590p.
- Joshi, C., Leeuw, J.D., Skidmore, A.K., van Duren, I.C., & van Oosten H. (2006). Remotely sensed estimation of forest canopy density: A comparison of the performance of four methods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(2006), 84-95, DOI: 10.1016/j.jag.2005.08.004
- Kahyaoğlu, N., Güvendi, E., & Kara, Ö. (2019). Saf doğu kayını meşçerelerinde topraküstü biyokütle miktarlarının belirlenmesi (Sinop-Türkeli Örneği). *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 79-85.
- Karamanlı, E. (2024). Karbon depolama kapasitesine dayalı arazi tahsis optimizasyonu. Doktora Tezi Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana, Türkiye, 136s.
- Keten, İ., & Gülsoy, S. (2020). Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) ormanlarında verimlilik ilişkileri. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 4(2), 88-102, DOI: 10.30516/bilgesci.740067
- Kılıç, M., Günal, H., & Budak, M. (2022). Toprak organik karbon içeriğinin tahmin ve

- haritalanmasında makine öğrenmesi tekniklerinin kullanımı. *1st International Conference on Engineering Natural and Social Sciences*, 20-23 December 2022, Konya, Türkiye, 211-217s.
- Li, Z., Bi, S., Hao, S., & Cui, Y. (2022).** Aboveground biomass estimation in forests with random forest and Monte Carlo-based uncertainty analysis. *Ecological Indicators*, **142**(109246),1-9, DOI: [10.1016/j.ecolind.2022.109246](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109246)
- Loi, D. T., Chou, T. Y., & Fang, Y. M. (2017).** Integration of GIS and remote sensing for evaluating forest canopy density index in Thai Nguyen Province, Vietnam. *International Journal of Environmental Science and Development*, **8**(8), 539-542. DOI: [10.18178/ijesd.2017.8.8.1012](https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.8.1012)
- Lourenço, P., Godinho, S., Sousa, A., & Gonçalves, A. C. (2021).** Estimating tree aboveground biomass using multispectral satellite-based data in Mediterranean agroforestry system using random forest algorithm. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **23**, 1-11, DOI: [10.1016/j.rsase.2021.100560](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100560)
- Lu, D., Chen Qi, Wang, G., Moran, E., Batistella, M., Zhang, M., Laurin, G.V., & Saah, D. (2012).** Aboveground forest biomass estimation with Landsat and LiDAR data and uncertainty analysis of the estimates, *International Journal of Forestry Research*, **2012**(1), 1-16, DOI: [10.1155/2012/436537](https://doi.org/10.1155/2012/436537)
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016).** A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, **9**(1), 63-105, DOI: [10.1080/17538947.2014.990526](https://doi.org/10.1080/17538947.2014.990526)
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qui, G. (2007).** Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density Cypress Forest. *Sensors*, **7**(11), 2636-2651, DOI: [10.3390/s7112636](https://doi.org/10.3390/s7112636)
- OBM. (2025).** Adana İli Orman Bölge Müdürlüğü İdaresi ve Planlama Şube Müdürlüğü (İç Yazışma Yoluyla). Adana, Türkiye.
- Ravindranath, N.H., & Ostwald, M. (2008).** Carbon Inventory Methods, Handbook for greenhouse gas inventory, Carbon mitigation and roundwood production projects, Methods for estimating above-ground biomass - Chapter 10, 113-147p, Springer Dordrecht, The Netherlands.
- Saraçoğlu, N. (1998).** Biomass tables of beech (*Fagus orientalis lipsky*). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, **22**(1), 93-100.
- Saraçoğlu, N. (2000).** Sakallı kızılğac (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn subsp. *barbata* (C.A. Mey.) Yalt.) biyokütle tabloları. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, **24**(2), 147-156.
- Segura, M., & Kanninen, M. (2005).** Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*, **37**(1), 2-8. DOI: [10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x)
- Sun, Y., Wang, B., Teng, S., Liu, B., Zhang, Z., & Li, Y. (2023).** Continuity of top-of-atmosphere, surface, and nadir BRDF-Adjusted Reflectance and NDVI between Landsat-8 and Landsat-9 OLI over China landscape. *Remote Sensing*, **15**(4948),1-17, DOI: [10.3390/rs15204948](https://doi.org/10.3390/rs15204948)
- TAV (Türkiye Orman Varlığı). (2020).** T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü Orman İdaresi ve Planlama Dairesi Başkanlığı, Türkiye Orman Varlığı Raporu, OGM Ofset, Ankara, Türkiye, 58p.
- Tolunay, D., & Çömez, A. (2008).** Türkiye ormanlarında toprak ve ölü örtüde depolanmış organik karbon miktarları. *Hava Kirliliği ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu 2008*, 22-25 Ekim 2008, Hatay, Türkiye, 750-765.
- Tolunay, D. (2011).** Total carbon stock and carbon accumulation in living tree biomass in forest ecosystems of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, **35**(3), 265-279, DOI: [10.3906/tar-0909-369](https://doi.org/10.3906/tar-0909-369)
- USGS. (2025).** Landsat 9. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9> (10 Mayıs 2025).
- Ünsal, A., (2007).** Adana Orman Bölge Müdürlüğü Karaisal Orman İşletme Müdürlüğü kızılçam biyokütle tablolarının düzenlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bartın, Türkiye, 62s.
- Wu, Z., Yao, F., Zhang, J., & Liu, H. (2024).** Estimating forest aboveground biomass using a combination of geographical random forest and empirical bayesian kriging models. *Remote Sensing*, **16**(11), 1-19, DOI: [10.3390/rs16111859](https://doi.org/10.3390/rs16111859)
- Xie, F., & Fan, H. (2021).** Deriving drought indices from MODIS vegetation indices (NDVI/EVI) and Land Surface Temperature (LST): Is data reconstruction necessary? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **101**, 1-16, DOI: [10.1016/j.jag.2021.102352](https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102352)
- Zhang, X., Shen, H., Huang, T., Wu, Y., Guo, B., Liu, Z., Luo, H., Tang, J., Zhou, H., Wang, L., Xu, W., & Ou, G. (2024).** Improved random forest algorithms for increasing the accuracy of forest aboveground biomass estimation using Sentinel-2 imagery. *Ecological Indicators*, **159**, 1-11, DOI: [10.1016/j.ecolind.2024.111752](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111752)
- Zeng, N., Ren, X., He, H., Zhang, L., Zhao, D., Ge, R., Li, P., & Niu, Z. (2019).** Estimating grassland aboveground biomass on the Tibetan Plateau using a random forest algorithm. *Ecological Indicators*, **102**, 479-487. DOI: [10.1016/j.ecolind.2019.02.023](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.02.023)