

Aktif ve Pasif Uydu Görüntüleri Kullanılarak Saf Karaçam Meşcerelerinde Topraküstü Karbonun Tahmin Edilmesi

Erdal Şahan¹, Alkan Günlü^{2,*}

¹ İstanbul Orman Bölge Müdürlüğü, İstanbul, Türkiye

^{2,*} Çankırı Karatekin Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Çankırı, Türkiye

Makale Tarihi

Gönderim: 09.09.2024

Kabul: 25.11.2024

Yayın: 25.12.2024

Araştırma Makalesi



Öz – Bu çalışma, Sinop Orman Bölge Müdürlüğü, Boyabat Orman İşletme Müdürlüğü, Elekçami Orman İşletme Şefliği sınırları içerisinde yayılış gösteren saf karaçam meşcerelerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında toplam 247 adet örnek alan verisi kullanılmıştır. Envanter verilerinden yararlanılarak her bir örnek alan için topraküstü karbon (TÜK) değerleri hesaplanmıştır. Her bir örnek alan için Landsat 5 TM bant yansıma ve vejetasyon indis, ALOS-PALSAR uydu görüntüsüne ait HH ve HV polarizasyonlarından parlaklık ve geri yansıtım ile örnek alanlara ilişkin eğim, bakı ve yükselti değerleri hesaplanmıştır. TÜK değerleri ile yukarıda açıklanan değişkenler arasındaki ilişkiler çoğul regresyon analizi ile modellenmiştir. Toplam 14 adet model geliştirilmiştir. Geliştirilen model başarıları incelendiğinde, Landsat 5 TM vejetasyon indis, ALOS-PALSAR parlaklık ve geri yansıtım değişkenleri ile eğim, bakı ve yükselti değerlerinin bağımsız değişkenler olarak yer aldığı modelde belirtme katsayısı ($R_{\text{düz}}^2=0.655$; $Sy.x=0.18147$) elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Landsat 5 TM, ALOS-PALSAR, çoğul regresyon analizi

Estimation of Aboveground Carbon Using Active and Passive Satellite Image in Pure Crimean Pine Stands

¹ İstanbul Regional Directorate of Forestry, İstanbul, Turkey

^{2,*} Çankırı Karatekin University, Faculty of Forestry, Department of Forest Engineering, Çankırı, Türkiye

Article History

Received: 09.09.2024

Accepted: 25.11.2024


Published: 25.12.2024

Research Article

Abstract – This study was conducted in pure Crimean stands located within the boundaries of Sinop Regional Directorate of Forestry, Boyabat Forest Enterprise, Elekçami Forest Planning Unit. A total of 247 sample plot inventory data were utilized. Using inventory data, aboveground carbon values were calculated for each sample plot. Then, for each sample plot, band brightness and vegetation indices obtained from the Landsat 5 TM satellite image, polarization (HH and HV) brightness and backscattering obtained from the ALOS-PALSAR satellite image, as well as slope, aspect, and elevation values, were calculated. The relationships between aboveground carbon values and the variables mentioned above were modeled using multiple regression analysis. A total of 14 models were developed. When examining the success of the developed models, the highest model accuracy ($R_{\text{adj}}^2=0.655$; $Sy.x=0.18147$) was achieved in the model that included vegetation indices from the Landsat 5 TM satellite image, brightness and backscattering values from the ALOS-PALSAR satellite image, along with slope, aspect, and elevation as independent variables.

Keywords – Landsat 5 TM, ALOS-PALSAR, multiple regression analysis

¹  sahanerdal@hotmail.com

²  alkangunlu@karatekin.edu.tr

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

Dünya genelinde insan popülasyonunun sürekli bir şekilde artması, buna bağlı olarak sanayileşme ve sanayileşmenin gelişmesiyle birlikte doğal kaynaklara olan talep gün geçtikçe çeşitlenerek sürekli bir artış göstermiştir. Ortaya çıkan bu taleplerin tedarik edilmesi aşamasında orman ekosisteminin yapısının bozulması, biyolojik çeşitliliğin azalması, kirlilik, çölleşme ve iklim değişikliği gibi sorunlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Ortaya çıkan bu sorunların başında gelen küresel iklim değişikliği son yüzyılda insanoğlunun karşılaştığı en önemli problemlerden birisi olmuştur. Küresel iklim değişikliğinin sebebi olarak gösterilen küresel ısınma orman ekosistemlerinin tahrip edilmesi ile arazi kullanım sınıflarında meydana gelen değişikliklerle birlikte sanayileşmenin sonucunda atmosferdeki CO₂ miktarının artması şeklinde ifade edilmektedir. Bu bağlamda, fosil yakıtların ısınmada ve araçlarda enerji kaynağı olarak kullanılması, tarım ve şehirleşme alanları için yeni alanların açılması bununla birlikte insanların yakacak odun ihtiyaçlarının karşılanması için orman ekosistemlerinin tahrip edilmesi neticesinde atmosferde CO₂ miktarı artmıştır (Sivrikaya ve Bozali, 2012).

Orman ekosistemleri fotosentez yoluyla atmosferdeki karbon döngüsünü etkilemekte ve bünyesinde (hem toprakaltı hem de topraküstü) depoladıkları karbon miktarıyla küresel iklim değişikliğinde büyük bir rol oynamaktadır (Muukkonen ve Heiskanen, 2007; Pachauri vd., 2014). Bu nedenle, orman ekosistemleri küresel iklim değişikliğinin olumsuz etkisini azaltarak gerek bölgesel gerekse de küresel ölçekte iklimin dengeli bir şekilde olmasına önemli katkılar sağlamaktadır (Hashimoto vd., 2000).

2022 yılı itibariyle Türkiye'nin sahip olduğu ormanlık alan miktarı 23.245.000 ha olup bu alanın Türkiye yüzölçümüne oranı %29.8 düzeyindedir. Bu ormanların sahip olduğu servet 1.736.402.000 m³ ve artım miktarı ise yıllık 47.800.000 m³'tür. Bununla birlikte ormanların tutmuş olduğu karbon miktarı ise yaklaşık olarak 2.041.071.796 tondur (Anonim, 2022). Orman ekosistemlerinin bünyelerinde tutmuş olduğu karbon miktarının doğru bir şekilde belirlenebilmesi ve planlamaya dahil edilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda önemli olmaya başlamıştır (Asan vd., 2002; Keleş ve Başkent, 2006; Sivrikaya vd., 2007; Sivrikaya ve Bozali, 2012; Değermenci ve Zengin, 2016; Seki vd., 2017; Başkent, 2022; Çelik ve Şahin, 2023; Değermenci, 2023).

Orman ekosisteminin depolamış olduğu karbon miktarının tespit edilebilmesi için öncelikle ormanlardaki biyokütlenin tespit edilmesi gerekmektedir. Biyokütle, orman ekosistemlerinin yapısında meydana gelen değişikliklerin değerlendirilmesi ve karbon tutma kapasitesinin belirlenmesi aşamasında kullanılan önemli bir özelliktir (Backéus vd., 2005). Orman ekosistemlerine ilişkin biyokütle miktarının belirlenmesinde farklı hesaplama yaklaşımları yer almaktadır. Bunlar, yersel ölçümler yapılarak ağaç türlerine ilişkin geliştirilen allometrik biyokütle denklemleri, ağaç hacmini dikkate alarak geliştirilen biyokütle genişletme faktörü (BEF) ve uzaktan algılama yaklaşımları şeklinde sıralanabilir (Asan, 1995; Günlü vd., 2014; Durkaya vd., 2017; Yolasiğmaz vd., 2016; Sakıcı vd., 2018; Varol vd., 2018; Günlü ve Ercanlı, 2020).

Topraküstü biyokütlenin (TÜB) ve buna bağlı olarak topraküstü karbon (TÜK) miktarının belirlenmesinde en güvenilir yöntemler yersel ölçümlerdir. Orman ekosistemlerinde yersel ölçümler yapılarak elde edilen allometrik biyokütle ve karbon denklemleri ile TÜB ve TÜK miktarı doğru bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Ancak bu yöntemin zaman alıcı, yoğun iş gücü gerektirmesi ve geniş ormanlık alanlarda uygulanabilmesi zordur (Lu, 2005; Güverçin ve Günlü, 2023). Buna karşın uzaktan algılama verileri ile geniş alanların izlenebilmesi, veri toplamanın daha kolay olması ve bu verilerin hızlı bir şekilde değerlendirilmesine imkân vermesi nedeniyle son zamanlarda gerek TÜB'in ve gerekse TÜK'un tahmin edilmesinde uzaktan algılama verilerinden (bant reflektans, vejetasyon indisleri, tekstür özellikleri, geri yansıtım değerleri vb.) yararlanılmaktadır (Günlü vd., 2014; Keleş vd., 2021; Dewantoro ve Jatmiko, 2021; Bulut vd., 2022; Sivrikaya ve Demirel, 2022; Turgut ve Günlü, 2022; Güverçin ve Günlü 2023; Bulut, 2023; Demirel vd., 2023).

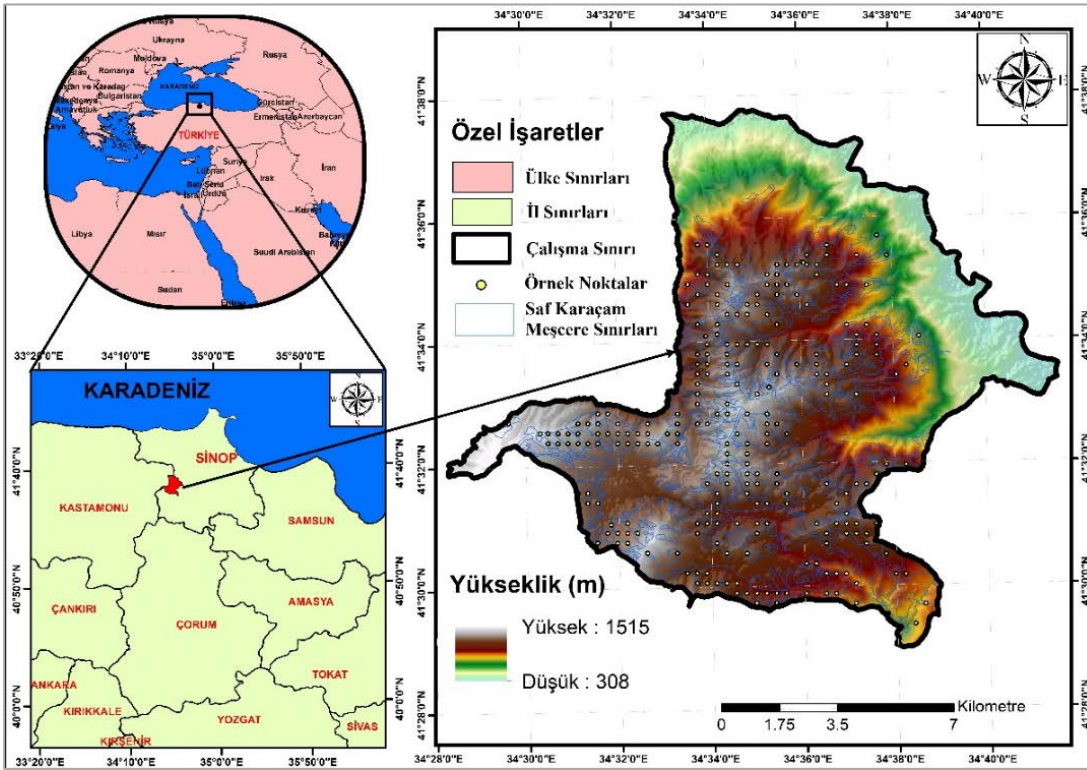
Bu çalışmada, saf karaçam meşcerelerinde 247 adet örnek alanda elde edilen envanter verilerden yararlanılarak; (i) her örnek alan için elde edilen hektardaki toplam TÜK değerleri ile Landsat 5 TM bant reflektans ve vejetasyon indis değerleri arasındaki istatistiksel ilişkiler, (ii) her örnek alan için elde edilen TÜK

değerleri ile ALOS-PALSAR uydu görüntüsüne ait HH ve HV polarizasyona ilişkin parlaklık ve geri yansıtım değerleri arasındaki istatistiksel ilişkiler, (iii) her örnek alan için elde edilen TÜK değerleri ile Landsat 5 TM ve ALOS-PALSAR uydu görüntülerinden elde edilen değişkenler (birlikte değerlendirilmiş) arasındaki ilişkiler ve (iv) her örnek alan için elde edilen TÜK değerleri ile Landsat 5 TM ALOS-PALSAR uydu görüntülerinden elde edilen değişkenler ile topoğrafik veriler (birlikte değerlendirilmiş) arasındaki ilişkilerin çoğul regresyon analizi ile modellenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanının Tanıtımı

Elekçamı Orman İşletme Şefliği; Sinop Orman Bölge Müdürlüğü, Boyabat Orman İşletme Müdürlüğü sınırlarında yer almaktadır. Elekçamı Şefliği WGS 1984 Zon 36, 41° 43' 01" - 41° 28' 59" kuzey enlemleriyle, 34° 41' 34" - 34° 28' 18" doğu boylamları arasında yer almaktadır. Denizden ortalama yüksekliği 920 m'dir. En yüksek noktası 1.538 m ile Dikmen tepe iken en alçak noktası 300 m ile Gökırmak havzasıdır. Çalışma alanının toplam alanı 13.301,4 hektar (ha) olup bu alanın 10806,7 ha ormanlık alan ve geriye kalan 2.494,7 ha alan ise ormansız alanlardan oluşmaktadır. Yıllık ortalama sıcaklığı 13,4°C ve ortalama yağışı ise 677,3 mm'dir. Karaçam, kızılçam, sarıçam, kayın, meşe, gürgen ile diğer yapraklı türler (akçaağaç, söğüt, karaağaç, kayacık ve kavak) çalışma alanında yer almaktadır (Anonim, 2012). Çalışma alanının konumu Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu

2.2 Materyal

Bu çalışmada, Elekçamı Orman İşletme Şefliğinin meşcere tipleri haritası, 15.09.2011 tarihli Landsat 5 TM ve 30.07.2011 tarihli ALOS-PALSAR uydu görüntüleri ile 247 örnek alan envanter karnesi verileri (2011 yılında Mayıs-Eylül ayları arasında alınmış) materyal olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan veriler, 2011 yılında Elekçamı Orman İşletme Şefliğinin orman amenajman planının yenilenmesi amacı ile envanter

aşamasında orman amenajman heyeti tarafından saf karaçam meşcerelerinden alınmış envanter karnesi verilmiştir.

2.3 Yöntem

2.3.1 Envanter Verilerine İlişkin Değerlendirmeler

Her bir örnek alanda yapılan envanter ile ölçülen ağaçların göğüs çapı ($d_{1.3}$) verileri kullanılarak her bir ağaç için topraküstü karbon (TÜK) miktarı (kg) hesaplanmıştır. Her bir ağacın TÜK miktarının hesaplanmasında Sakıcı vd. (2018) tarafından geliştirilen ve aşağıda yer alan denklem kullanılmıştır. Örnek alandaki ağaçların TÜK miktarları toplanarak, her bir örnek alanın toplam TÜK miktarları hesaplanmıştır. Daha sonra örnek alanın büyüklüğü (400, 600 ve 800 m²) dikkate alınarak her örnek alanın hektardaki TÜK miktarı hesaplanmıştır.

$$TÜK=0.054*dbh^{2.362} \quad (1)$$

Denklemin; $R^2=0.972$ ve $RMSE=40.772$ kg/ha

TÜK (kg): Topraküstü karbon

dbh: örnek alan içindeki her bir ağacın göğüs yüksekliğindeki çapı(cm)

2.3.2 Landsat 5 TM Uydu Görüntüsüne İlişkin Değerlendirmeler

Landsat 5 TM uydu görüntüsü <https://earthexplorer.usgs.gov> web adresinden ücretsiz olarak indirilmiştir. Landsat uydu görüntüsüne ait ve konumsal çözünürlüğü 30 m olan TM1, TM2, TM3, TM 4, TM 5 ve TM 7 bantları kullanılmıştır. Landsat 5 TM ait bazı bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1

Landsat 5 TM uydu görüntüsüne ait bazı bilgiler

	Bantlar	Dalga boyu (nm)	Konumsal çözünürlük(m)
Landsat 5 TM	TM 1(Blue)	0.45-0.52	30
	TM 2(Green)	0.52-0.60	30
	TM 3 (Red)	0.63-0.69	30
	TM 4 (NIR)	0.76-0.90	30
	TM 5 (SWIR 1)	1.55-1.75	30
	TM 7 (SWIR 2)	2.08-2.35	30

2.3.3 Landsat 5 TM Uydu Görüntüsünden Bant Parlaklık Değerlerinin Hesaplanması

Landsat 5 TM analize hazır hale getirmek için ön işleme (atmosferik düzeltme) tabii tutulmuştur. Çalışma kapsamında kullanılan 6 bantta ait görüntüler QGIS programı yardımıyla reflektans görüntüleri üretilmiştir. Hazır hale getirilen Landsat 5 TM uydu görüntüsüne ait bantlar üzerine örnek alanlar atılarak her örnek alan için bantlara ilişkin parlaklık değerleri hesaplanmıştır. Örnek alanların bant parlaklık değerleri örnek alanın büyüklüğüne bağlı olarak atılan buffer zon (400 m² için 11.28 m, 600 m² için 13.82 ve 800 m² için 15,96 m) içerisine düşen piksellerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu işlem ArcGIS 10.6.1 yazılım programı içerisinde yer alan ArcToolbox, Spatial Analyst Tools, Zonal, Zonal Statistic modülü ile yapılmıştır.

2.3.4 Landsat 5 TM Uydu Görüntüsünden Bant Parlaklık Değerlerinin Hesaplanması

Her bir bant için hesaplanan bantlara ilişkin reflektans değerleri kullanılarak örnek alanlara ilişkin Tablo 2’de yer alan vejetasyon indisleri hesaplanmıştır.

Tablo 2

Landsat 5 TM uydu görüntüsüne ait bazı bilgiler

Vejetasyon İndisi	Formül	Kaynak
NDVI	$(TM4-TM3)/(TM4+TM3)$	Rouse vd. (1974)
SR	$(TM4)/(TM3)$	Jordan (1969)
DVI	$(TM4)-(TM3)$	Clevers (1988)
SAVI	$(TM4-TM3)*(1+L)/(TM4+TM3+L)$	Huete (1988)
NDWI	$(TM4-TM5)/(TM4+TM5)$	Gao (1996)
IPVI	$(TM4)/(TM3+TM4)$	Crippen (1990)
EVI	$(TM4-TM3)/((TM4+(C1*TM4)-(C2*TM1)*(1+L)))$	Huete vd. (1999)
TVI	$(TM4-TM3)/(TM4+TM3+0.5)$	Deering vd. (1975)
ND32	$(TM3-TM2)/(TM3+TM2)$	Huete vd. (2002)
ND54	$(TM5-TM4)/(TM5+TM4)$	Huete vd.. (2002)
ND57	$(TM5-TM7)/(TM5+TM7)$	Huete vd.. (2002)
ND73	$(TM7-TM3)/(TM7+TM3)$	Huete vd.. (2002)
NLI	$(TM4*TM4-TM3)/(TM4*TM4+TM3)$	Goel ve Qin (1994)
GRVI	$(TM2-TM3)/(TM2+TM3)$	Tucker (1979)

2.3.5 ALOS-PALSAR Uydu Görüntüsüne İlişkin Değerlendirmeler

Bu çalışmada, ALOS-PALSAR L bantlı uydu görüntüsü <https://vertex.daac.asf.alaska.edu> web adresinden ücretsiz olarak adresinden indirilmiştir. ALOS-PALSAR uydu görüntüsüne ait HH ve VV polarizasyonlu görüntüler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan aktif uydu görüntüsüne ALOS-PALSAR ait bazı bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3

ALOS-PALSAR uydu görüntüsüne ait bazı bilgiler

	Polarizasyon	Bant	Konumsal çözünürlük (m)
ALOS-PALSAR	HH	L (23.6 cm)	10
	HV	L (23.6 cm)	10

2.3.6 ALOS-PALSAR Uydu Görüntüsünden Parlaklık ve Geri Yansıtım Değerlerinin Hesaplanması

ALOS-PALSAR uydu görüntüsünü analize hazır hale getirmek için bazı ön işlemler uygulanmıştır. Bu işlemler gürültü etkisinin giderilmesi, filtreleme ve kalibrasyon şeklindedir. Radar dalgaları, cisimle etkileşime girdikten sonra rastgele ve düzensiz yansımalar göstermektedir. Bu durum, görüntü üzerinde çok koyu ve çok parlak piksellerin oluşmasına neden olur. Görüntüde meydana gelen bu benekli yapıya "gürültü" denir ve gürültü etkisi objelerin ayırt edilebilirliğini zorlaştırır (Musaoğlu, 1999). Gürültü etkisi, filtreleme uygulanarak giderilebilmektedir. Uydu görüntüsündeki gürültü etkisini azaltmak için 3x3 medyan filtre işlemi uygulanmıştır. ALOS-PALSAR uydu görüntüsüne ait her iki polarizasyona (HH ve HV) göre her bir örnek alan için parlaklık değerleri hesaplanmıştır. Bant parlaklık değerlerinin hesaplanmasında; örnek alanın büyüklüğüne bağlı olarak atılan buffer zon (400 m² için 11.28 m, 600 m² için 13.82 ve 800 m² için 15.96 m) içerisine düşen piksellerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu işlem ArcGIS 10.6.1 yazılım programı içerisinde yer alan ArcToolbox, Spatial Analyst Tools, Zonal, Zonal Statistic modülü ile yapılmıştır. Her bir örnek alana ilişkin hesaplanan ortalama parlaklık değerleri kullanılarak aşağıda yer alan denklem (Rosenqvist, 2007) ile her bir örnek alanın geri yansıtım (dB) değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Geri yansıtım değeri (dB)} = 10 * \log_{10} * (DN^2) + CF \quad (2.2)$$

DN: dijital parlaklık değeri, CF: kalibrasyon faktörü (-83)

2.3.7 Örnek Alanlara İlişkin Topoğrafik Verilerin Hesaplanması

Örnek alanlara ilişkin topoğrafik (eğim, yükselti ve bakı) verilerin hesaplanmasında ALOS-PALSAR uydu görüntüsünden üretilen sayısal arazi yükseklik modeli kullanılmıştır. Öncelikli olarak örnek alanlar sayısal arazi yükseklik modeli üzerine atılmış ve örnek alanların yükselteleri hesaplanmıştır. Daha sonra sayısal arazi yükseklik modeli kullanılarak eğim ve bakı haritaları üretilmiştir. Üretilen eğim ve bakı haritaları üzerine örnek alanlar atılarak, örnek alanların eğimi (%) ve bakısı (derece) hesaplanmıştır. Bu işlemler için ArcGIS 10.6.1 yazılım programından yararlanılmıştır.

2.3.8 İstatistiksel Analiz

Bu çalışmada, örnek alanlara ilişkin TÜK değerleri ile Landsat 5 TM bant parlaklık değerleri-vegetasyon indis değerleri, ALOS-PALSAR uydu görüntüsüne ait HH ve HV polarizasyonlarına ait bant parlaklık-geri yansıtım değerleri ve topoğrafik veriler (yükselti, eğim ve bakı) arasındaki istatistiksel ilişkiler çoğul regresyon analizi ile modellenmiştir. Çoğul regresyon analizinde tahmin edilmek istenen bağımlı değişken TÜK iken, bağımsız değişken ise; Landsat 5 TM bant parlaklık-vegetasyon indis değerleri, ALOS-PALSAR bant parlaklık-geri yansıtım değerleri ve topoğrafik verilere ilişkin değerlerdir. TÜK, uydu görüntülerinden ve topoğrafik verilerden elde edilen değişkenlere göre tahmin eden çoğul regresyon model yapısı aşağıda verilmiştir.

$$\text{Topraküstü Karbon} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2.3)$$

Denklemden; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ denklem parametrelerini, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ Landsat 5 TM görüntüsü için her örnek alan için elde edilen parlaklık ile vegetasyon indis değerleri; ALOS-PALSAR uydu görüntüsüne ait HH ve HV polarizasyonlarından elde edilen ortalama bant parlaklık ile geri yansıtım değerleri ve topoğrafik veriler (eğim, bakı ve yükselti), ε ise model hatasını ifade etmektedir.

Modellerin parametrelerin tahmin edilmesinde ve çeşitli istatistiksel değerlerinin hesaplanmasında SPSS istatistik paket programı kullanılmıştır (SPSS 27.0 Inc. 2007). Çalışma kapsamında 247 adet örnek alan verisi kullanılmıştır. Bu nokta verileri rasgele ikiye ayrılmıştır. Birincisi örnek nokta verisinin yaklaşık %80'i (n=185) modellerin geliştirilmesinde ve ikincisi ise örnek alan verisinin yaklaşık %20'si (n=62) ise modellerin test edilmesinde kullanılmıştır. Landsat 5 TM, ALOS-PALSAR ve topoğrafik verilere bağlı olan farklı bağımsız değişkenlerden, %95 güvenle anlamlı değişkenlerin belirlenmesinde, Aşamalı (Stepwise) değişken seçimi yöntemi kullanılmıştır.

TÜK'un yukarıda ifade edilen değişkenlerle birlikte tahmin edilmesinde istatistiksel olarak anlamlı model seçenekleri belirlenmiştir. Model başarılarının değerlendirilmesinde düzeltilmiş R^2 ($R^2_{\text{düz}}$) ve standart hata ($S_{y,x}$) ölçütleri dikkate alınmıştır. Bu ölçütlere ilişkin formüller aşağıda verilmiştir.

Belirtme Katsayısı:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_g - y_t)^2}{\sum_{i=1}^n (y_g - y_{og})^2} \quad (2.4)$$

Tahminin Standart Hatası:

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (TÜK_i - \widehat{TÜK}_i)^2}{N - p}} \quad (2.5)$$

İlgili formüllerde; yg; gözlem, yt; tahmin, yog; ortalama gözlem, $T\ddot{U}K = i$. gözlem topraküstü karbon, $\widehat{T\ddot{U}K} = i$. tahmin topraküstü karbon, N=gözlem sayısı ve p=parametre sayısı

Bu çalışmada geliştirilen modellerden, düzeltilmiş R^2 ($R_{düz}^2$) ve standart hata ($Sy.x$) ölçütlerine göre en başarılı model belirlendikten sonra, bu modelin çalışma alanındaki meşcerelere uygunluğunun denetimi, toplam örnek alan verisin %20'sini oluşturan 62 örnek alan yardımıyla yapılmıştır. Seçilen en iyi modelin denetiminde kullanılan örnek alanların (62 adet) arazide ölçülen $T\ddot{U}K$ ile geliştirilen modelle tahmin edilen $T\ddot{U}K$ değerleri İki Eş Arasındaki Farkın Önemlilik Testi (Paired t test) kullanılarak karşılaştırılmıştır (Kalıpsız, 1984; Batu, 1995). İki farklı şekilde elde edilen $T\ddot{U}K$ değerleri arasında, birincide istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık yoksa ($p>0.05$), bu durumda modelin çalışma alanı için uygun olduğu, ikincide ise $T\ddot{U}K$ değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olması durumunda ise ($p<0.05$) uygun olmadığı sonucuna varılabilir.

3. Bulgular ve Tartışma

Her bir örnek alan için; Landsat 5 TM bant parlaklık ve vejetasyon indis değerleri, ALOS-PALSAR bant parlaklık ve geri yansıtım değerleri ve topografik veriler (eğim, bakı ve yükselti) ile topraküstü karbon ($T\ddot{U}K$) değerleri arasındaki ilişkiler çoğul regresyon analizi ile modellenmiştir. Toplam 14 adet regresyon modeli geliştirilmiştir. Bu modellere ilişkin detaylı bilgiler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4
Modellere ilişkin bağımlı ve bağımsız değişkenler

Modeller	Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişkenler
M1		Landsat 5 TM bant parlaklık değerleri
M2		Landsat 5 TM vejetasyon indis değerleri
M3		Landsat 5 TM bant parlaklık ve topografik değerler
M4		Landsat 5 TM vejetasyon indis ve topografik değerler
M5		Landsat 5 TM bant parlaklık ve vejetasyon indis değerleri
M6		Landsat 5 TM bant parlaklık, vejetasyon indis ve topografik değerler
M7		ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım değerleri
M8		ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık, geri yansıtım ve topografik değerler
M9	$T\ddot{U}K$	ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım ile Landsat 5 TM bant parlaklık değerleri
M10		ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım ile Landsat 5 TM vejetasyon indis değerleri
M11		ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım ile Landsat 5 TM bant parlaklık ve vejetasyon indis değerleri
M12		ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve Landsat 5 TM bant parlaklık ile topografik değerler
M13		ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım, Landsat 5 TM vejetasyon indis ile topografik değerler
M14		ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım, Landsat 5 TM bant parlaklık ve vejetasyon indis değerleri

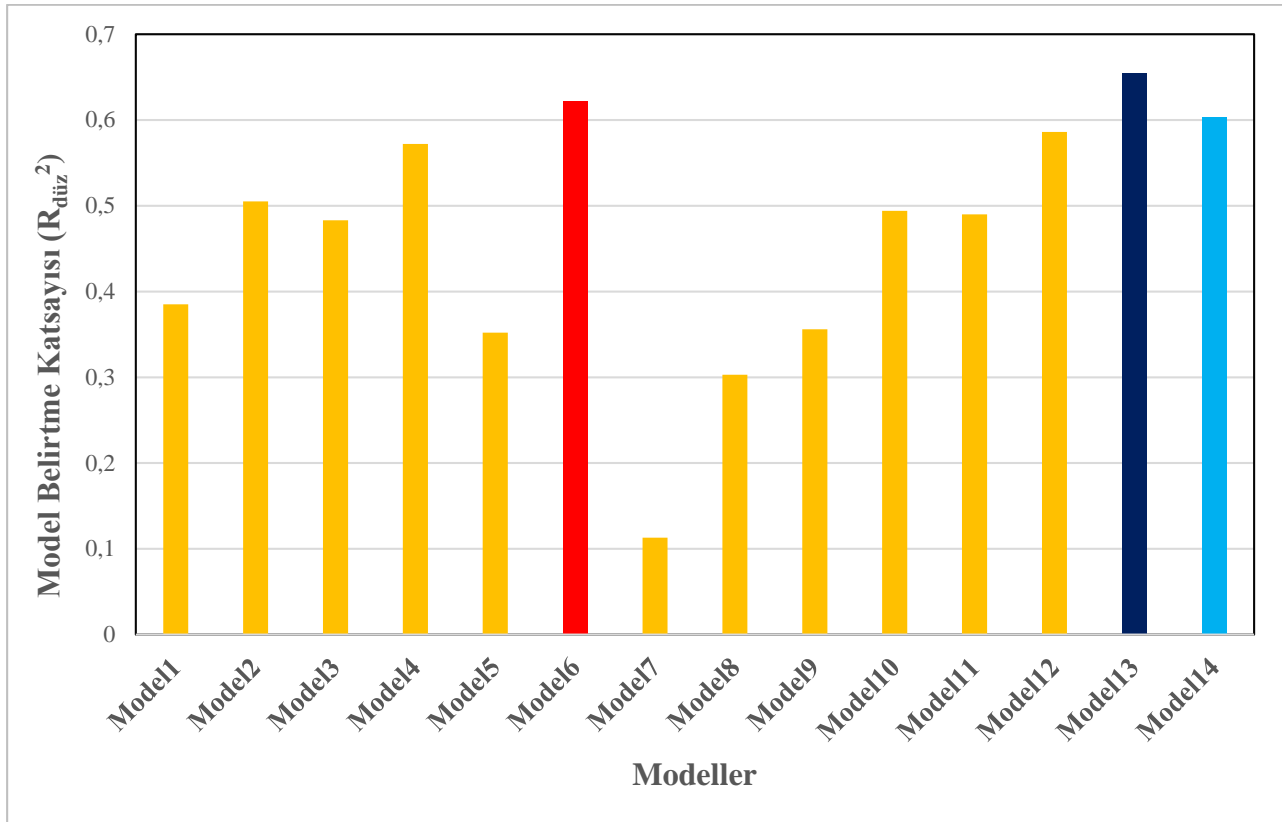
Çalışmadan elde edilen 14 farklı regresyon modelinin başarı düzeylerine gösterir grafik Şekil 2'de verilmiştir. Çalışmada geliştirilen 14 farklı çoğul regresyon modeli arasında en iyi tahmin sonucunu veren 13 nolu (M13) modeldir. Bu modele ilişkin ayrıntılı bilgiler Tablo 5'te verilmiştir. Bu modele göre tahmin edilen $T\ddot{U}K$ 'un envanter karnelerinden hesaplanan $T\ddot{U}K$ 'a göre değişimi Şekil 3'te verilmiştir. $T\ddot{U}K$ 'u en iyi modele (Tablo 5) göre tahmin eden modelle elde edilen hataların, tahmin edilen $T\ddot{U}K$ 'a göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 5

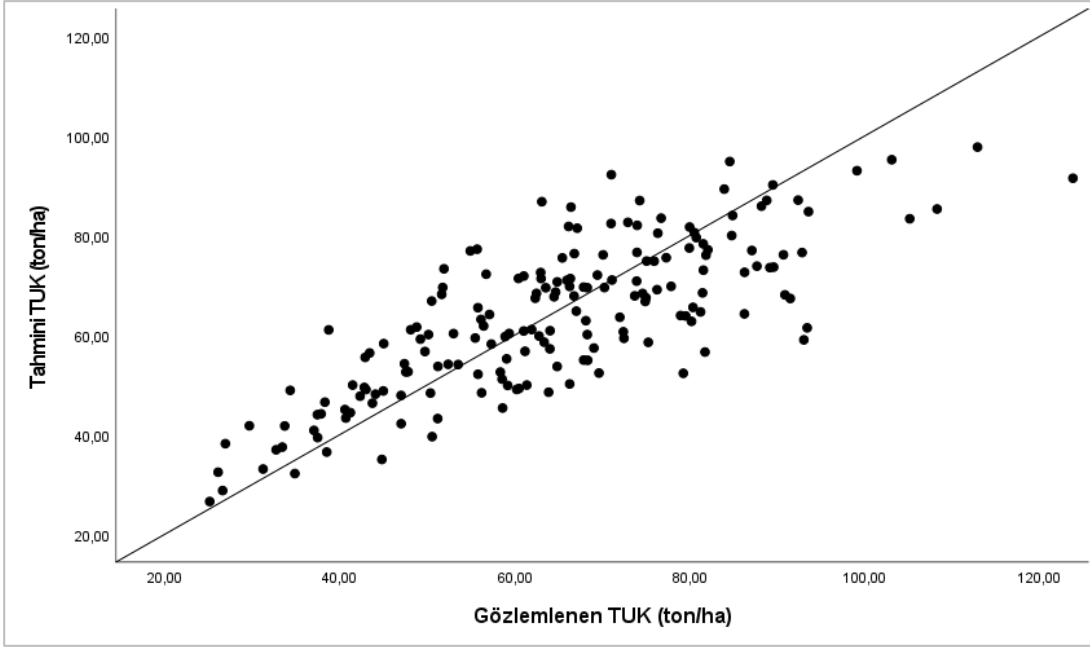
Topraküstü karbonu ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım, Landsat 5 TM vejetasyon indisleri ile topografik verilere göre tahmin eden en iyi model sonuçları

Bağımsız değişkenler	Regresyon katsayıları	Standart hata	t-istatistiği	p
	11.780	4.449	2.648	0.009
NDVI	-4.937	1.346	-3.668	0.000
ND57	-2.068	0.586	-3.529	0.001
ND32	-4.706	0.726	-6.486	0.000
ND73	1.512	0.290	5.208	0.000
EVI	2.848	1.095	2.602	0.010
Yükselti	0.000129	0.000	11.217	0.001
Bakı	0.000134	0.000	2.926	0.000
Eğim	0.000138	0.000	-3.097	0.000
HH	0.000059	0.000	-2.205	0.004
HV(dB)	-0.046	0.021	-2.162	0.002
HH(dB)	0.251	0.101	2.498	0.029

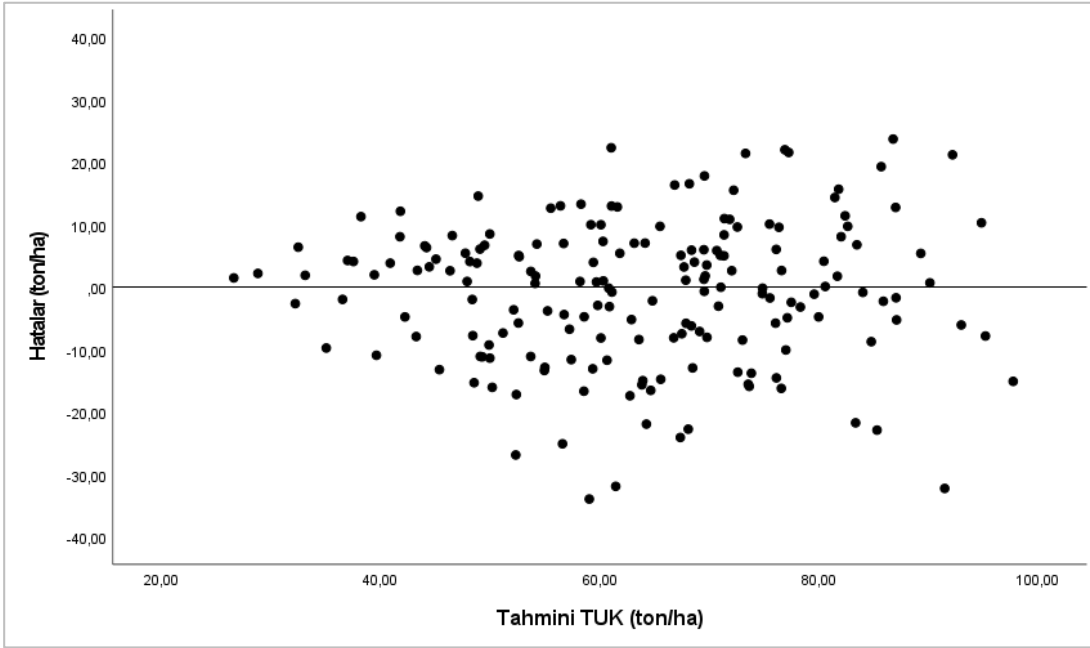
$R_{düz}^2=0.655$ Sy. x=0.18147



Şekil 2. Çalışmada geliştirilen modellere ilişkin model başarıları



Şekil 3. En iyi regresyon modeline (Model 13) göre hesaplanan topraküstü karbon ile tahmin edilen topraküstü karbon ilişkisi



Şekil 4. En iyi regresyon modelini (Model 13) esas alan modelle elde edilen hatalar-tahmini topraküstü karbon ilişkisi

TÜK'un tahmin edilmesinde geliştirilen modeller içerisinde en başarılı tahmin sonuçlarının elde edildiği TÜK modelinin, örneklenen topluma istatistiksel olarak uygunluğu bağımsız bir veri grubu ile test edilmiştir. Bu regresyon modeli ile elde edilen tahminler ve gözlem değerleri arasında farkın test edilmesinde Eşleştirilmiş t testi (Paired t test) kullanılmıştır. Eşleştirilmiş t testi sonuçlarına göre (en başarılı regresyon modeli için $t=0.421$, $p(=0.675)>0.05$) tahmin edilen TÜK değerleri ve gözlenen TÜK değerleri arasında $\alpha=0.05$ önem düzeyi ile istatistiksel olarak bir fark olmadığı sonucuna varılmıştır. Diğer bir ifadeyle bu çalışma kapsamında geliştirilen en iyi regresyon modeli, bu modelin geliştirilmesi aşamasında verilerin elde edildiği Elekçami orman işletme şefliği sınırları içerisinde yer alan saf karaçam meşcereleri için kullanılabilir olduğu söylenebilir.

Çalışmada, Landsat 5 TM bant parlaklık değişkeninin yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.385$ olarak bulunmuştur. Literatürde konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde; Lu (2005)

yaptığı çalışmada Landsat TM uydusundan elde edilen değişkenler ile TÜB çoğul regresyon analizi ile modellenmiş, en yüksek model belirtme katsayısı bant reflektans değişkenleri ile elde etmiştir. Günlü vd. (2014) yaptıkları çalışmada Landsat TM bant reflektans değerleri ile TÜB arasındaki ilişkiler çoğul regresyon analizi ile modellenmişler ve modelin belirtme katsayısını $R^2_{düz}=0.465$ olarak bulmuşlardır. Güverçin ve Günlü (2023) yaptıkları çalışmada ise Landsat 8 OLI bant reflektans değerleri ile TÜB arasındaki ilişkileri çoğul regresyon analizi ile modellenmişler ve modelin belirtme katsayısını $R^2_{düz}=0.295$ olarak bulmuşlardır. Günlü vd. (2021) yaptıkları çalışmada ise Landsat 8 OLI bant reflektans değerleri ile TÜK çoğul regresyon analizi ile modellenmişler ve modelin belirtme katsayısını 0.738 olarak belirtmişlerdir. Aksoy (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Landsat 8 ve Sentinel-2 bant reflektans değerleri ile TÜK arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hem Landsat 8 hem de Sentinel-2 uydu görüntüleri için $R^2_{düz}=0.41$ düzeyinde model belirtme katsayısı elde edilmiştir. Demirel vd. (2023) yaptıkları çalışmada saf sedir meşcerelerinde Sentinel-2 uydu görüntüsü kullanılarak TÜK tahmin edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde bant reflektans değeri ile $R^2_{düz}=0.456$ düzeyinde bir model belirtme katsayısı elde edilmiştir. Landsat 5 TM vejetasyon indis değişkenlerinin yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.505$ olarak bulunmuştur. Bant parlaklık değerlerine ilişkin elde edilen model belirtme katsayısı ile karşılaştırıldığında, vejetasyon indislerinin yer aldığı modelde daha başarılı sonuç elde edilmiştir. Literatürde konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde; Gaspari vd. (2010) yaptıkları çalışmada Landsat 7 ETM+ uydu görüntüsü kullanılarak TÜB modellenmiş ve vejetasyon indisleri ile daha başarılı model belirtme katsayısı elde edilmiştir. Benzer şekilde, Günlü vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada ise vejetasyon indisleri ile $R^2_{düz}=0.606$ düzeyinde bir model belirtme katsayısı elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda genellikle vejetasyon indisleri ile daha başarılı modeller elde edilmiştir. Situmorang vd. (2016) gerçekleştirilen çalışmada Landsat 8 NDVI ve EVI indisleri ile TÜK arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde EVI ile $R^2_{düz}=0.830$ ve NDVI ile $R^2_{düz}=0.728$ düzeyinde model belirtme katsayısı elde edilmiştir. Ancak bazı çalışmalarda ise bu çalışmaların aksine sonuçlar elde edilmiştir. Turgut ve Günlü (2022) yaptıkları Landsat 8 OLI bant reflektans ve vejetasyon indis değerleri ile TÜB ayrı ayrı modellenmiş ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde bant reflektans değerleri ile geliştirilen modelin başarısı $R^2_{düz}=0.445$ iken vejetasyon indislerine $R^2_{düz}=0.387$ göre daha yüksek bulunmuştur. Sivrikaya ve Demirel (2022) tarafından saf kızılçam meşcerelerinde yaptıkları çalışmada Landsat 9 uydu görüntüsünden elde edilen NDVI değerleri ile TÜK arasındaki ilişkiler modellenmiştir. Çalışmada elde edilen modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.623$ olarak bulunmuştur. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından yapılan çalışmada ise bant reflektans değerleri ile $R^2_{düz}=0.295$ bulunmuşken vejetasyon indisleri için ise $R^2_{düz}=0.192$ bulunmuştur. Aksoy (2023) yaptığı çalışmada ise Landsat 8 ve Sentinel-2 vejetasyon indisleri ile TÜK arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde Landsat 8 ile $R^2_{düz}=0.43$ ve Sentinel-2 ile $R^2_{düz}=0.64$ düzeyinde ilişkiler bulunmuştur. Demirel vd. (2023) saf sedir meşcerelerinde yaptıkları çalışmada Sentinel-2 uydu görüntüsü kullanılarak TÜK tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde vejetasyon indisleri ile $R^2_{düz}=0.488$ düzeyinde bir model belirtme katsayısı elde edilmiştir. Landsat 5 TM bant parlaklık ile topografik değişkenlerin yer aldığı modelde, model belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.483$ olarak bulunmuştur. Yalnızca bant parlaklık değerlerinin yer aldığı modele göre daha başarılı model sonucu elde edilmiştir. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından yapılan çalışmada bant reflektans ve topografik verilerin birlikte değerlendirildiği modelde, modelin belirtme katsayısı ($R^2_{düz}=0.366$), yalnızca bant reflektans değişkenlerinin yer aldığı modele ($R^2_{düz}=0.295$) göre daha başarılı model sonucu elde edilmiştir. Landsat 5 TM vejetasyon indis ile topografik değişkenlerin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı ($R^2_{düz}=0.572$) olarak bulunmuştur. Yalnızca vejetasyon indislerinin yer aldığı modele göre daha başarılı model sonucu elde edilmiştir. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından yapılan çalışmada elde edilen model belirtme katsayısı ($R^2_{düz}=0.388$) bizim çalışmamıza göre daha düşük bulunmuştur. Landsat 5 TM bant parlaklık ve vejetasyon indis değişkenlerinin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.352$ olarak bulunmuştur. Elde edilen model belirtme katsayısı hem bant parlaklık hem de vejetasyon indis değişkenlerinin ayrı ayrı değerlendirildiği modellere göre daha düşük model belirtme katsayısı bulunmuştur. Literatürde konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde genellikle daha yüksek model başarılarının elde edildiği görülmüştür. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından yapılan çalışmada bant reflektans ve vejetasyon indislerinin birlikte değerlendirildiği modelde bizim çalışmamızın aksine daha başarılı model sonuçları $R^2_{düz}=0.325$ elde edilmiştir. Demirel vd. (2023) yaptıkları çalışmada saf sedir meşcerelerinde Sentinel-2 görüntüsü kullanılarak TÜK modellenmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde bant reflektans ile vejetasyon indisleri birlikte değerlendirilmiş ve modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.488$ olarak bulunmuştur. Landsat 5 TM bant parlaklık, vejetasyon indis ve topografik değişkenlerin

birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.622$ olarak bulunmuştur. Elde edilen modelin belirtme katsayısı çalışma kapsamında geliştirilen 14 model içerisinde en iyi ikinci model olmuştur.

Güverçin ve Günlü (2023) tarafından yapılan çalışmada bant parlaklık, vejetasyon indis ve topografik değişkenlerin birlikte değerlendirildiği modelde modelin belirtme katsayısı bizim çalışmamıza göre oldukça düşük ($R^2_{düz}=0.379$) bulunmuştur. ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım değişkenlerinin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı ($R^2_{düz}=0.113$) olarak bulunmuştur. ALOS-PALSAR görüntüsünün değişkenlerinden elde edilen modelin belirtme katsayısı 14 model içerisinde en düşük değere sahiptir. Literatürde konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde, Aksoy (2023) yaptığı çalışmada Sentinel-1 bant parlaklık ve geri yansıtım değerlerini kullanılarak saf sarıçam meşcerelerinde TÜK tahmin etmeye çalışmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bizim çalışmamıza göre oldukça düşük model başarılarının elde edildiği görülmüştür. Suman Sinha vd. (2016) yaptıkları çalışmada ALOS-PALSAR görüntüsünden elde edilen değişkenleri kullanarak TÜB tahmin etmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde HH polarizasyonunda elde edilen veriler ile $R^2_{düz}=0.868$ düzeyinde model belirtme katsayısı elde edilmiştir. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından saf kızılçam meşcerelerinde yapılan çalışmada Sentinel-1 aktif uydusundan elde edilen değişkenlerle birlikte değerlendirildiği modelde, model belirtme katsayısı oldukça düşük ($R^2_{düz}=0.053$) bulunmuştur. Ali ve Khati (2024) tarafından yapılan çalışmada ALOS-PALSAR görüntüsünden elde edilen geri yansıtım değerleri ile TÜB arasındaki ilişkiler modellenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, HH polarizasyonundaki ortalama değer ile $R^2_{düz}=0.52$, HV polarizasyonundaki ortalama değer ile $R^2_{düz}=0.51$ ve VV polarizasyonundaki ortalama değer ile $R^2_{düz}=0.48$ düzeyinde model başarıları elde edilmiştir. ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık, geri yansıtım ve topoğrafik değişkenlerin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı ($R^2_{düz}=0.303$) olarak bulunmuştur. Sadece ALOS-PALSAR uydu görüntüsünden elde edilen değişkenlerle geliştirilen model belirtme katsayısına göre daha başarılı model elde edilmiştir. Model belirtme katsayısının iyileşmesinde, yükseltinin önemli bir etkisi olmuştur. Bizim çalışmamızın aksine Güverçin ve Günlü (2023) tarafından saf kızılçam meşcerelerinde Landsat 8 ve Sentinel-1 uydu görüntülerinden elde edilen değişkenlerle birlikte değerlendirildiği modelde daha düşük model belirtme katsayısı ($R^2_{düz}=0.10$) bulunmuştur. ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık-geri yansıtım ile Landsat 5 TM bant parlaklık değişkenlerinin yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.356$ olarak çalışma kapsamında en yüksek model belirtme katsayısı olarak bulunmuştur. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından saf kızılçam meşcerelerinde Landsat 8 ve Sentinel-1 uydularından elde edilen değişkenlerle birlikte değerlendirildiği modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.313$ olarak bulunmuştur. ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık-geri yansıtım ile Landsat 5 TM vejetasyon indis değişkenlerinin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.494$ olarak bulunmuştur. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından saf kızılçam meşcerelerinde yapılan çalışmada Landsat 8 ve Sentinel-1 uydularından elde edilen değişkenlerle birlikte değerlendirildiği modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.292$ olarak bulunmuştur. ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ve geri yansıtım ile Landsat 5 TM bant parlaklık ve vejetasyon indis değişkenlerinin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.490$ olarak bulunmuştur. Elde edilen model belirtme katsayısı, sadece ALOS-PALSAR ve sadece Landsat 5 TM uydu görüntülerinden elde edilen değişkenlerin yer aldığı modellerdeki model başarılarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Kumaar vd. (2016) ALOS-2 ve Landsat 8 OLI uydu görüntülerini kullanarak TÜB tahmin etmeye çalışmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde Landsat 8 OLI ile $R^2_{düz}=0.788$, ALOS-2 ile $R^2_{düz}=0.742$ ve iki görüntüden elde edilen değişkenlerin kullanıldığı modelde ise $R^2_{düz}=0.859$ düzeyinde model başarıları elde edilmiştir. Nuthammachot vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında Sentinel-2 ve Sentinel-1 (aktif) uydu görüntülerinden elde edilen değişkenler kullanılarak TÜB tahmin edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Sentinel-1 geri yansıtım değerleri ile $R^2_{düz}=0.34$, Sentinel-2 görüntüsünden elde edilen değişkenlerle $R^2_{düz}=0.82$ ve Sentinel-1 ile Sentinel-2 uydu görüntülerinden elde edilen değişkenlerin birlikte değerlendirilmesiyle model belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.84$ olarak bulunmuştur. ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık ile Landsat 5 TM bant parlaklık ve topografik değişkenlerin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.586$ olarak bulunmuştur. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından saf kızılçam meşcerelerinde Landsat 8 ve Sentinel-1 uydu görüntülerinden elde edilen değişkenlerle, topografik verilerin birlikte değerlendirilmiş ve modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.389$ olarak bulunmuştur. ALOS-PALSAR polarizasyon parlaklık-geri yansıtım, Landsat 5 TM vejetasyon indis ve topoğrafik değişkenlerin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R^2_{düz}=0.655$ olarak çalışma kapsamında en yüksek model belirtme katsayısı bulunmuştur.

Güverçin ve Günlü (2023) tarafından saf kızılçam meşcerelerinde Landsat 8 ve Sentinel-1 uydu görüntülerinden elde edilen değişkenlerle, topoğrafik veriler birlikte değerlendirilmiş ve modelin belirtme katsayısı $R_{düz}^2=0.389$ olarak bulunmuştur. ALOS-PALSAR geri yansıtım, Landsat 5 TM bant parlaklık-vegetasyon indis ve topoğrafik değişkenlerin birlikte yer aldığı modelde, modelin belirtme katsayısı $R_{düz}^2=0.603$ olarak bulunmuştur. Güverçin ve Günlü (2023) tarafından saf kızılçam meşcerelerinde Landsat 8 ve Sentinel-1 uydu görüntülerinden elde edilen değişkenlerle, topoğrafik veriler birlikte değerlendirilmiş ve modelin belirtme katsayısı $R_{düz}^2=0.337$ olarak bulunmuştur.

4. Sonuçlar

Toplam 14 adet çoğul regresyon modeli geliştirilmiştir. Elde edilen modellerin başarıları $R_{düz}^2=0.303$ ile $R_{düz}^2=0.655$ arasında değişmektedir. En başarılı model sonuçları (Model 13) ($R_{düz}^2=0.655$) Landsat 5 TM bant parlaklık ve vegetasyon indis, ALOS-PALSAR uydu görüntüsünün HH polarizasyonundan elde edilen parlaklık, HV ve HH polarizasyonlarından elde edilen geri yansıtım ile eğim, bakı ve yükseltinin bağımsız değişkenler olarak yer aldığı modelde bulunmuştur. En başarılı ikinci model sonuçları (Model 6) ($R_{düz}^2=0.622$) Landsat 5 TM bant parlaklık ve vegetasyon indis ile yükseltinin bağımsız değişkenler olarak yer aldığı modelde bulunmuştur. En başarılı üçüncü model sonuçları (Model 14) ($R_{düz}^2=0.603$) ise Landsat 5 TM bant parlaklık ve vegetasyon indis, ALOS-PALSAR uydu görüntüsünün HV polarizasyonundan elde edilen geri yansıtım ile yükseltinin bağımsız değişkenler olarak yer aldığı modelde bulunmuştur. Buna karşın en başarısız model sonuçları (Model 7) ($R_{düz}^2=0.113$) ise ALOS-PALSAR'a ait polarizasyon parlaklık ve geri yansıtımın bağımsız değişkenler olarak yer aldığı modelde bulunmuştur. Landsat 5 TM ve ALOS-PALSAR uydu görüntülerinden elde edilen değişken ya da değişkenlerin yer aldığı modellerin başarısı, bu değişkenlere eğim, yükselti ve bakının birlikte ya da en az birinin yer aldığı modellere göre daha düşük bulunmuştur. Diğer bir ifadeyle uydu görüntülerinden elde edilen değişkenlere eğim, yükselti ve bakı değişkenlerinin ilave edilmesi modellerin başarısını artırdığı görülmüştür. Çalışmadan elde edilen en başarılı model, çalışma alanına yakın yerlerde benzer orman ekosistemlerinde kullanılabilir. Farklı uydu (Sentinel-1, Sentinel-2, Göktürk, İnsansız Hava Aracı, LİDAR vb.) görüntüleri ile farklı modelleme tekniklerinin (Yapay sinir ağları, derin öğrenme, destek vektör makineleri, çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri vb.) kullanılması TÜK'un tahmin edilmesine yönelik ileriye dönük yapılacak çalışmalarda modelin belirtme katsayısını artırabilir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında, gerekli verilerin (envanter karnesi verileri ve orman amenajman planı) sağlanmasında katkı sağlayan Orman Genel Müdürlüğü, Orman İdaresi ve Planlama Dairesi Başkanlığı'na çok teşekkür ederiz. Ayrıca istatistiksel analizlerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. İlker ERCANLI'ya teşekkür ederiz.

Yazar Katkıları

Bu makale; Prof. Dr. Alkan Günlü danışmanlığında Orman Yüksek Mühendisi Erdal Şahan tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Erdal Şahan: Verilerin temin edilmesi ve makalenin yazım aşamasında katkı sağlamıştır.

Alkan Günlü: Uydu görüntülerinin temin edilmesi, analiz edilmesi ve makalenin yazımında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Kaynaklar

- Aksoy, H. (2023). *Sinop Orman Bölge Müdürlüğü saf sarıçam meşcerelerinde farklı uzaktan algılama verileri kullanılarak bazı meşcere parametrelerinin modellenmesi* (Doktora tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Ali, N. and Khati, U. (2024). Forest aboveground biomass and forest height estimation over a sub-tropical forest using machine learning algorithm and synthetic aperture radar data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1-16.

- Anonim (2012). Kastamonu Orman Bölge Müdürlüğü, Boyabat Orman İşletme Müdürlüğü, Elekeçanı orman işletme şeflikliği, fonksiyonel orman amenajman planı, Orman Genel Müdürlüğü, Orman İdaresi ve Planlama Dairesi, Ankara.
- Anonim (2022). Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Asan, Ü. Destan, S. ve Özkan, U.Y. (2002). İstanbul korularının karbon depolama, oksijen üretime ve toz tutma kapasitelerinin kestirilmesi, Orman Amenajmanında Kavramsal Açılımlar ve Yeni Hedefler Sempozyumu, İstanbul, ss. 194-202.
- Asan, Ü. (1995). Global iklim değişimi ve Türkiye ormanlarında karbon birikimi. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 45(1-2): 23-38.
- Backeus, S., Wikström, P. ve Lämås, T. 2005. A model for regional analysis of carbon sequestration and timber production. *Forest Ecology and Management*, 216, 28–40.
- Batu, F. (1995). Uygulamalı istatistik yöntemler, K.T.Ü. Orman Fakültesi, Genel Yayın No:179, Fakülte Yayın No: 22, K.T.Ü. Basımevi, Trabzon.
- Başkent, E.Z. (2022). Karbon tutulumunun orman amenajman planlarına entegrasyonu. *ArtGRID*, 4(2), 324-342.
- Bulut, S. (2023). Machine learning prediction of above-ground biomass in pure calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) stands of the mediterranean region, Türkiye. *Ecological Informatics*, 74, 101951.
- Bulut, S., Sivrikaya, F. ve Günlü, A. (2022). Evaluating statistical and combine method to predict stand above-ground biomass using remotely sensed data. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 1-14.
- Clevers, J.G.P.W. (1988). The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, 25, 53–70.
- Crippen, R.E. (1990). Calculating the vegetation index faster, *Remote Sensing of Environment*, 34, 71-73.
- Çelik, D.A. ve Şahin, A. (2023). Çaltepe orman planlama birimindeki karbon depolamasının zamansal ve kumsal değişimi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 4(2), 224-233.
- Deering, D.W., Rouse, J.J.W., Haas, R.H. ve Schell J.S. (1975). Measuring forage production of grazing units hom Landsat MSS data, Proceedings 10th International Symposium Remote Sensing Environment, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp.1169-1178.
- Değermenci, A. S. ve Zengin, H. (2016). Ormanlardaki karbon birikiminin kumsal ve zamansal değişiminin incelenmesi: Daday planlama birimi örneği. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 17 (2), 177-187.
- Değermenci, A.S. (2023). Düzce ili karasal karbon kapasitesinin belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(1), 99-110.
- Demirel, D., Günlü, A. ve Sakıcı, O.E. (2023). Estimating above-ground carbon of taurus cedar stands using Sentinel-2 satellite image: a case study of Elmalı forest enterprise. In 3rd International Congress on Engineering and Life Science, Trabzon, pp.119-128.
- Dewantoro, B. E. B., ve Jatmiko, R. H. (2021). Estimation of aboveground carbon stock using SAR Sentinel-1 imagery in samarinda city. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 18(1), 103-116.
- Durkaya, B., Durkaya, A. ve Kocaman, M. (2017). Carbon stock change; Bolu sarıalan forest enterprise. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1), 268-275.
- 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.
- Gasparri, N.I., Parmuchi, M.G., Bono, J., Karszenbaum, H. ve Montenegro, C.L. (2010). Assessing multi-temporal Landsat 7 ETM+ images for estimating above-ground biomass in subtropical dry forests of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1262-1270.
- Goel, N.S., ve Qin, W. (1994). Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: A computer simulation. *Remote Sensing Reviews*, 10(4), 309-347.
- Günlü, A. ve Ercanlı, İ. (2020). Artificial neural network models by ALOS PALSAR data for aboveground stand carbon predictions of pure beech stands: a case study from northern of Turkey. *Geocarto International*, 35(1), 17–28.
- Günlü, A., Ercanlı, İ., Şenyurt, M. ve Keleş, S. (2021). Estimation of some stand parameters from textural features from WorldView-2 satellite image using the artificial neural network and multiple regression methods: a case study from Turkey. *Geocarto International*, 36(8), 918-935.

- Günlü, A., Ercanli, I., Başkent, E. Z. ve Çakır, G. (2014). Estimating aboveground biomass using Landsat TM imagery: A case study of Anatolian Crimean pine forests in Turkey. *Annals of Forest Research*, 289-298.
- Günlü, A., Keleş, S., Ercanli, İ. ve Şenyurt, M. (2021). Estimation of aboveground stand carbon using Landsat 8 OLI satellite image: a case study from Turkey. *Spatial Modeling in Forest Resources Management: Rural Livelihood and Sustainable Development*, pp.385-403.
- Güvercin, 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.
- Hashimoto, T., Kojima, K., Tange, T. ve Sasaki, S. (2000). Changes in carbon storage in fallow forests in the tropical lowlands of Borneo. *For Ecol Manage*, 126, 331-337.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Huete, A.R., Justice, C. ve van Leeuwen W. (1999). MODIS vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document (ATBD) Version 3.0, EOS Project Office, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD2.
- Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. ve Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213.
- Jordan, C.F. (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666.
- Kalipsız, A. (1984). Dendrometri. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İ.Ü. Yayın No: 3194, O.F. Yayın No:354, İstanbul, 407 s.
- Keleş, S. ve Başkent, E.Z. (2006). Orman ekosistemlerindeki karbon değişiminin orman amenajman planlarına yansıtılması: kavramsal çerçeve ve bir örnek uygulama (1.Bölüm), *Orman ve Av Dergisi*, 83(2), 36-41.
- Keleş, S., Günlü, A. ve Ercanli, İ. (2021). Estimating aboveground stand carbon by combining Sentinel-1 and Sentinel-2satellite data: A case study from Turkey. In P. Kumar Shit, H. R. Pourghasemi, P. P. Adhikary, G. S. Bhunia & V.P. Sati (Eds.), *Forest resources resilience and conflicts*, pp. 117-126.
- Kumar, K.K., Nagai, M., Witayangkurn, A., Kritiyutanant, K. ve Nakamura, S. (2016). Above ground biomass assessment from combined optical and SAR remote sensing data in Surat Thani Province, Thailand. *Journal of Geographic Information System*, 8(04), 506.
- Lu, D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon Basin. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 2509-2525.
- Musaoğlu, N. 1999. Elektro-optik ve aktif mikrodalga algılayıcılardan elde edilen uydu verilerinden orman alanlarında meşcere tiplerinin ve yetiştirme ortamı birimlerinin belirlenme olanakları, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Muukkonen, P. ve Heiskanen, J. (2007). Biomass estimation over a large area based on standwise Forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 617-624.
- Nuthammachot, N., Askar, A., Stratoulis, D. ve Wicaksono, P. (2022). Combined use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improving above-ground biomass estimation. *Geocarto International*, 37(2), 366-376.
- Pachauri, R.K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R. ve van Ypserle, J.P. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (p. 151). Ipcc.
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N. ve Watanabe, M. (2007). ALOS PALSAR: a Pathfinder mission for Global-Scale Monitoring of the environment. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 45, 3307-3316.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Shell, J.A. ve Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS-1. *Proceedings, 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, 1: 309-317.
- Sakici, O.E., Seki, M. ve Sağlam, F. (2018). Above-ground biomass and carbon stock equations for Crimean pine stands in Kastamonu region of Turkey. *Fresenius Environ Bull.* 27(10), 7079-7089.
- Seki, M., Sakıcı, O., Büyükerzi, M. ve Sağlam, F. (2017). Temporal changes in carbon stock of Taşköprü forest enterprise forests. In *Proceeding in International Taşköprü Pompeiopolis Science Culture Research Symposium*, pp. 10-12.

- Situmorang, J. P., Sugianto, S. ve Darusman, D. (2016). Estimation of carbon stock stands using EVI and NDVI vegetation index in production forest of lembah seulawah sub-district, Aceh Indonesia. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 5(3), 126-139.
- Sivrikaya, F. ve Demirel, D. (2022). Estimation of aboveground carbon storage based on remote sensing and inventory data: A case study from Türkiye. *Journal of Biometry Studies*, 2(2), 78-86.
- Sivrikaya, F. ve Bozali, N. (2012). Karbon depolama kapasitesinin belirlenmesi: Türkoğlu planlama birimi örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 14(1), 69-76.
- Sivrikaya, F., Keleş, S. ve Çakır, G. (2007). Spatial distribution and temporal change of carbon storage in timber biomass of two different forest management units. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132, 429-438.
- SPSS Institute Inc., (2007). SPSS Base 270 User's Guide, 770 s.
- Suman Sinha, S.S., Jeganathan, C., Sharma, L. K., Nathawat, M. S., Das, A. K. ve Shiv Mohan, S.M. (2016). Developing synergy regression models with space-borne ALOS PALSAR and Landsat TM sensors for retrieving tropical forest biomass. *J. Earth Syst. Sci.*, 725-735.
- Turgut, R. ve Günlü, A. (2022). Estimating aboveground biomass using Landsat 8 OLI satellite image in pure Crimean pine (*Pinus nigra* JF Arnold subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe) stands: a case from Turkey. *Geocarto International*, 37(3), 720-734.
- Varol, T., Durkaya, B. ve Okan, E. 2018. Biyokütle denklemleri ve biyokütle genişletme faktörü (BEF) ile karbon hesabı; Amasra orman işletme şefliği örneği. 4th International Symposium on Environment and Morals, Bosnia and Herzegovina, pp. 63-70.
- Yolasığmaz, H.A., Çavdar, B., Demirci, U. ve Aydın, İ. 2016. İki farklı yöntemle göre karbon birikiminin tahmin edilmesi: Artvin Orman İşletme Şefliği örneği. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 17(1), 43-51.