

## Doğal karaçam meşcereleri için yöresel karışık etkili çap-boy modellerinin geliştirilmesi

Onur Alkan<sup>a,\*</sup> , Ramazan Özçelik<sup>a</sup> 

**Öz:** Bu çalışmada, Isparta-Eğirdir Yöresi doğal karaçam (*Pinus nigra* J. F. Arnold.) meşcereleri için doğrusal karışık etkili çap-boy modelleri geliştirilmiştir. 2021-2022 yılları arasında 135 örnek alandan elde edilen toplam 4271 adet örnek ağaç verisi, modelin parametre tahmini ve kalibrasyon testleri için kullanılmıştır. Model geliştirme grubunda çap ortalaması 34,35 cm, boy ortalaması 15,40 m olarak belirlenirken; test grubunda bu değerler sırasıyla 31,26 cm ve 14,07 m olarak hesaplanmıştır. Farklı kalibrasyon alternatifleri, tahmin performansını artırmak amacıyla 1 ila 10 ağaç kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar, özellikle 5 ve 10 ağaç kalibrasyonu ile modelin tahmin doğruluğunun arttığını göstermiştir. Sabit etkili modele kıyasla karışık etkili modelin hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE) değeri %32 oranında daha düşük bulunmuştur. Çalışma, önerilen modelin orman envanter çalışmalarında karaçam meşcerelerinin ağaç boyu tahmininde etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Boy tahmini, Tahmin performansı, Doğrusal regresyon, Kalibrasyon

## Development of regional mixed-effects height–diameter models for natural black pine stands

**Abstract:** In this study, linear mixed-effects height-diameter models were developed for natural black pine (*Pinus nigra* J. F. Arnold.) stands in the Isparta-Eğirdir region. Data collected from 135 sample plots between 2021 and 2022, consisting of 4,271 sample trees, were used for parameter estimation and calibration testing. The mean diameter and height in the model development group were 34.35 cm and 15.40 m, respectively, while in the test group, these values were 31.26 cm and 14.07 m. Various calibration alternatives, utilizing 1 to 10 trees, were tested to improve prediction performance. The results showed significant improvements in prediction accuracy of the models, especially with calibrations involving 5 or 10 trees. Compared to the fixed-effects model, the mixed-effects model achieved a 32% reduction in the root mean square error (RMSE). The findings suggest that the proposed model is highly suitable for forest inventory studies to predict tree heights in black pine stands.

**Keywords:** Height prediction, Prediction performance, Linear regression, Calibration

### 1. Giriş

Karaçam (*Pinus nigra* J. F. Arnold.), ülkemizde toprak ve su kaynaklarının korunması, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması ve biyolojik çeşitliliğin korunması gibi çevresel konularda kritik bir rol üstlenirken aynı zamanda ekonomik açıdan da büyük bir öneme sahip en değerli ağaç türleri arasında yer almaktadır. Ülkemizde karaçam ormanlarının sürdürülebilir yönetimi, türlerin büyüme-gelişim özelliklerine ilişkin güvenilir bilgilerin bulunmasını gerekli kılmaktadır. Ağaç türlerine ilişkin büyüme modellerinin önemli bileşenlerinden bir tanesi de çap-boy ( $h-d$ ) modelleridir. Ağaç boyu orman alanlarından yasa dışı yollarla kesilmiş ağaçların boy tahminlerinde (Peng vd., 2001) meşcere yapısının ve zamana bağlı değişiminin analizinde (Wykoff vd., 1982; Huang vd., 2009) üst boyun ve bonitet endeksinin tahmininde (Calama ve Montero, 2004) karbon tahmin modellerinin geliştirilmesinde (Newton ve Amponsah, 2007) temel bir değişken olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, tek ağaçlarda boy ölçüm işlemi göğüs çapı ölçümüne kıyasla daha zaman alıcı ve yüksek maliyetlidir. Bu nedenle ağaç boylarının tahmininde alt örnekleme

birimlerinden elde edilen boy ölçümleri ve boy tahmin modelleri kullanılarak meşceredeki ya da ilgili alandaki diğer ağaçların boyu tahmin edilmektedir (Alkan ve Özçelik, 2022; Bolat vd., 2022; Seki, 2022; Diamantopoulou vd., 2023; Özçelik vd., 2023; Sağlam ve Sakıcı, 2024).

Genel olarak yöresel  $h-d$  modellerinin geliştirilmesinde farklı temel  $h-d$  modellerinden (Chapman-Richards, Korf, Schnute, Gompertz, Üsssel vd.) yararlanılmaktadır. Bununla birlikte tek bir modelin her yörede ve her ağaç türünde başarılı sonuçlar üretmesinin mümkün olmayacağı düşüncesi ile temel  $h-d$  modellerinin tahmin performansının artırılması ya da iyileştirilmesi amacıyla meşcere yaşı, meşcere sıklığı, tepe tacı yarışma faktörleri (tepe tacı oranı vb.), bonitet endeksi, tür kompozisyonu ve üst boy gibi meşcere değişkenlerinin modele dahil edilmesiyle geliştirilmiş  $h-d$  modelleri de üretilmiştir (Huang ve Titus, 1994; Temesgen ve Gadwo, 2004; Adame vd., 2008; Crecente-Campo vd., 2009). Bu modellerin meşcerelere özgü değişkenleri de içermesi nedeniyle temel  $h-d$  modellerine göre boy tahminlerinde daha başarılı oldukları ifade edilmiştir.

✉ <sup>a</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, 32260, Isparta

@ <sup>\*</sup> **Corresponding author** (İletişim yazarı): onuralkan@isparta.edu.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 10.10.2024, **Accepted** (Kabul tarihi): 12.11.2024



**Citation** (Atf): Alkan, O., Özçelik, R., 2024. Doğal karaçam meşcereleri için yöresel karışık etkili çap-boy modellerinin geliştirilmesi. Turkish Journal of Forestry, 25(4): 399-407. DOI: [10.18182/tjf.1564710](https://doi.org/10.18182/tjf.1564710)

Bununla birlikte  $h-d$  modellerinin geliştirilmesi amacıyla günümüzde farklı modelleme teknikleri de yoğun olarak kullanılmaktadır (Çatal, 2012; Seki ve Sakıcı, 2022; Carus ve Çatal, 2017; Çatal ve Carus, 2018). Bunların başında da karışık-etkili modelleme tekniği gelmektedir. Bu kapsamda pek çok yöre ve ağaç türü için karışık-etkili modelleme tekniği kullanılarak  $h-d$  modelleri geliştirilmiştir (Calama ve Montero, 2004; Trincado vd., 2007; Adame vd., 2008; Temesgen vd., 2008; Huang vd., 2009; Crecente-Campo vd., 2009; Özçelik vd., 2013; Mehtatalo vd., 2015; Gomez-García vd., 2015; Özçelik vd., 2018; Ogana ve Gorgoso-Varela, 2020; Bronisz ve Mehtatalo, 2020; Ciceu vd., 2023; Sağlam ve Sakıcı, 2024). Karışık etkili modelleme yaklaşımı ile geliştirilen  $h-d$  modellerinin klasik yöntemlerle geliştirilen  $h-d$  modellerine göre en önemli üstünlüğü hem topluma özgü (sabit etkili) hem de örneğe özgü (tesadüfi etkili) parametreleri eş zamanlı tahmin edebilmesidir. Karışık-etkili modellerin diğer önemli bir üstünlüğü de ön bilgilerin bulunması durumunda, modelin tahmin performansının artırılması amacıyla kalibrasyonunun yapılabilmesine imkân sağlamasıdır. Yapılan çalışmalar, karışık-etkili modellerin ilave meşcere düzeyinde açıklayıcı değişken olmaksızın  $h-d$  değişkenliğini açıklama kapasitesinin yeterli olduğunu göstermiştir (Trincado vd., 2007; Huang vd., 2009; Temesgen vd., 2014).

Karışık-etkili modellerin kalibrasyonu amacıyla farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, farklı ağaç sayıları ve örnek ağaç seçim stratejileri test edilmiştir. Trincado vd. (2007), Castedo-Dorado vd. (2006) ve VanderSchaaf (2012; 2013) yaptıkları çalışmada karışık-etkili modelin kalibrasyonu için tesadüfi seçilen 3 ağacın yeterli olacağını ifade ederken Kalbi vd. (2018) ve Özçelik vd. (2018) 4 ağacın yeterli olacağını belirtmiştir. Yine Huang vd. (2009) ve Ciceu vd. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda modelin tahmin performansının iyileştirilmesi amacıyla yapılacak kalibrasyon işleminde tesadüfi seçilen 6 ağacın kullanılmasının yeterli olacağı ortaya konulmuştur. Raptis vd. (2021) ise kalibrasyon için kullanılan ağaç sayısının artmasına bağlı olarak modelin tahmin performansının iyileştiğini bununla birlikte Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE) değerlerindeki azalış oranları dikkate alındığında en başarılı sonuçların

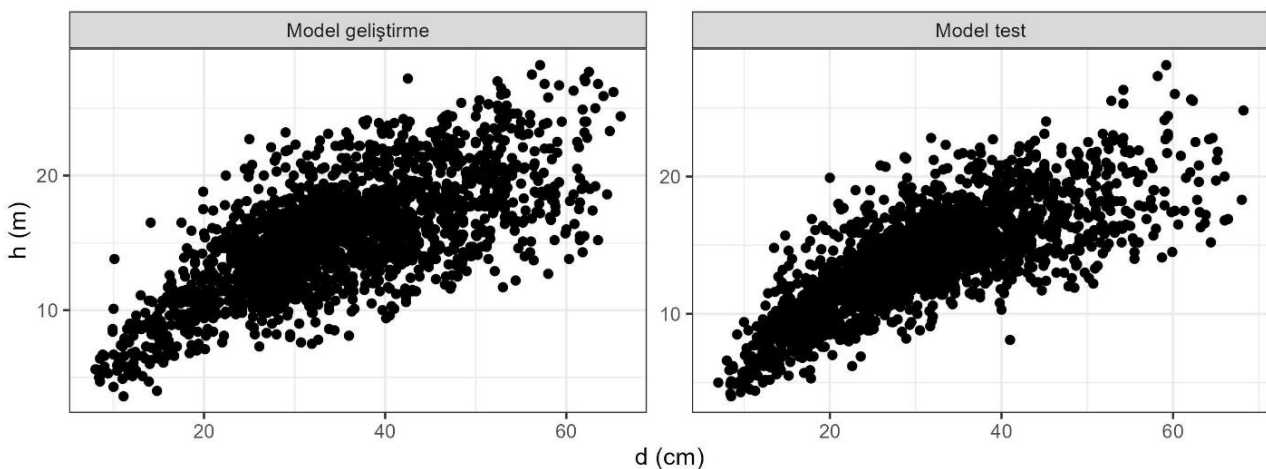
kalibrasyon amacıyla 2 ağaç kullanılması ile elde edildiğini ifade etmiştir. Bronisz ve Mehtatalo (2020) tarafından yapılan çalışmada, karışık-etkili modelin tahmin doğruluğu ve tutarlılığının hem kalibrasyon için kullanılan ağaç sayısına hem de örnek ağaç seçim stratejilerine bağlı olduğunu ifade etmiştir.

Bu çalışmada, Isparta-Eğirdir Yöresi doğal karaçam meşcereleri için doğrusal karışık etkili  $h-d$  modeli geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında modelin tahmin performansının iyileştirilmesi amacıyla farklı kalibrasyon alternatifleri de test edilmiştir. Bu amaçla her örnek alandan tesadüfi olarak seçilen 1-10 adet ağaç geliştirilen doğrusal karışık-etkili modelin kalibrasyonu için kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve yöntem

### 2.1. Materyal

Çalışma için gerekli örnek ağaç verileri, 2021-2022 yılları arasında Isparta Orman Bölge Müdürlüğü Eğirdir Orman İşletme Müdürlüğü sınırları içerisindeki doğal ve saf karaçam meşcerelerinden elde edilmiştir. Bu kapsamda 135 örnek alanda toplam 4271 adet örnek ağaçta çap ( $d$ ) ve boy ( $h$ ) ölçümleri yapılmıştır. Türün yetiştirme ortamı koşullarını ve farklı bonitet sınıflarını temsil edebilmek amacıyla, mümkün olduğunca örnek alanların farklı bonitet, bakı, yükselti ve gelişme çağlarından seçilmesine özen gösterilmiştir. Örnek alan büyüklükleri her örnek alana yaklaşık 30 ağaç girecek şekilde belirlenmiş olup 250 m<sup>2</sup> ile 1800 m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Örnek alanlarda, tüm ağaçların göğüs yüksekliği çapları elektronik çap ölçer yardımıyla 0,1 cm hassasiyetle, ağaç boyları ise lazer boy ölçer ile 10 cm hassasiyetle ölçülmüştür. Çalışma kapsamında ölçümü yapılan örnek alanlar eşit sayıda örnek alan içerecek şekilde tesadüfi olarak iki gruba ayrılmıştır. I grup veriler doğrusal karışık-etkili modellerin parametre tahminleri amacıyla; II. grup veriler ise geliştirilen modellerin model tahmin performansının artırılması amacıyla farklı kalibrasyon alternatiflerini test etmekte kullanılmıştır. Her iki gruba ilişkin  $h-d$  grafikleri Şekil 1'de; örnek ağaçlara ilişkin bazı tanımlayıcı istatistikleri ise Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Model geliştirme ve model test verilerinin çap-boy ilişkileri  
Figure 1. Diameter-height relationships for model development and test data

Çizelge 1. Çap-boy modellerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılan verilere ilişkin tanımlayıcı istatistikler  
Table 1. Descriptive statistics of the data used for the development of diameter-height models

Değişken	n	Ortalama	SD	Minimum	Maksimum
		Model geliştirme verisi			
d (cm)		34,35	11,16	8,00	66,00
h (m)		15,40	4,04	3,60	28,20
Alan (m <sup>2</sup> )	2152	889,29	360,28	250,00	1800,00
N (Ağaç ha <sup>-1</sup> )		461,00	264,44	100,00	1365,08
G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )		41,46	22,09	9,94	144,52
Model test verisi					
d (cm)		31,26	11,14	7,00	68,20
h (m)		14,07	3,62	4,00	28,10
Alan (m <sup>2</sup> )	2119	814,37	338,26	300,00	1800,00
N (Ağaç ha <sup>-1</sup> )		484,74	227,06	116,67	1244,44
G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )		34,65	11,87	16,18	78,63

d, kabuklu göğüs yüksekliği çapı; h, ağaç boyu; n, ağaç sayısı; SD, standart sapma.

## 2.2. Yöntem

Bu çalışmada,  $h$ - $d$  ilişkilerinin modellenmesi amacıyla Arabatzis ve Burkhardt (1992), tarafından önerilen ve bu amaçla yaygın olarak kullanılan üssel fonksiyon kullanılmıştır. Bu modelin matematiksel ifadesi, göğüs çapının bir fonksiyonu olarak aşağıda verilmiştir.

$$h = \beta_0 d^{\beta_1} \quad (1)$$

Bu formülde,  $h$  ağaç boyunu ve  $d$  ağacın göğüs yüksekliği çapını ifade etmektedir. Bu formüldeki  $\beta_0$  parametresi artış oranını ve  $\beta_1$  parametresi ise, bu eğrinin şeklini düzenlemektedir. Denklem (1) ile göğüs çapı  $d = 0$  olduğu zaman da ağaç boyunun tahmin edilebilmesi amacıyla aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$h = 1.30 + \beta_0 d^{\beta_1} \quad (2)$$

Model, denklemin her iki tarafının logaritması alınarak aşağıdaki doğrusal forma da dönüştürülebilir.

$$\ln(H) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \ln(d) \quad (3)$$

Denklemden  $H = h - 1.30$ 'a eşittir.

Denklem (3), karışık-etkili model formu içinde, model yapısı bozulmadan hem sabit etkili hem de tesadüfi etkili parametreleri birlikte içerecek şekilde aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$\ln(H_{ki}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_{ki}) + b_{0k} + b_{1k} \ln d_{ki} + \varepsilon_{ki} \quad (4)$$

Burada,  $H_{ki}$   $k$ . örnek alandaki  $i$ . ağacın 1.30 m'nin üstündeki boyunu,  $d_{ki}$  yine aynı  $k$ . örnek alandaki  $i$ . ağacın göğüs çapı,  $\beta_0$  ve  $\beta_1$  sabit etkili parametreleri (topluma özgü parametreleri) ve  $b_{0k}$  ve  $b_{1k}$  ise  $k$ . örnek alana ait tesadüfi etkili parametreleri (örnek alana özgü parametreleri),  $\varepsilon_{ki}$  ise tesadüfi hatayı ifade etmektedir. Çalışmada, toplam boy yerine 1.30 m'nin üstündeki boyun kullanılmasının temel nedeni, orman envanter çalışmalarında  $h$ - $d$  modellerinin geliştirilmesinde standart olarak bu ölçümün kullanılmasıdır. Göğüs yüksekliği (1,30 m) üzerinde kalan boy, hem modelleme çalışmalarında daha yaygın olarak tercih edilmekte hem de ölçüm kolaylığı ve veri tutarlılığı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, modeldeki değişkenler arasındaki ilişkilerin daha iyi açıklanmasına ve modelin

genellenebilirliğine katkı sunmaktadır. Ayrıca, göğüs yüksekliği altındaki boy kısmının, ağaçların farklı büyüme aşamalarında daha fazla varyasyon gösterdiği ve modelin tahmin performansını olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir (Calama ve Montero, 2004; Trincado vd., 2007).

Doğrusal karışık-etkili modelin genel formu aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir (Trincado vd. 2007; VanderSchaaf, 2014).

$$Y_i = X_i \beta + Z_i \beta_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

Bu genel model formu aşağıdaki matrisleri içermektedir.

$$Y'_k = [\ln(H_{k1}), \dots, \ln(H_{kn_k})]$$

$$X'_k = Z'_k = [1 \ln(d_{k1}), \dots, 1 \ln(d_{kn_k})]$$

$$\beta' = [\beta_0 \quad \beta_1]$$

$$b'_k = [b_{0k} \quad b_{1k}]$$

Buradaki bütün parametreler karışık etkili olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte  $X'_k = Z'_k$  olduğu, tesadüfi etkili parametreler için aşağıdaki varyans (var)-kovaryans (cov) yapısının ve tesadüfi hataların var olduğu da kabul edilmektedir.

$$D = \text{Var}[b_k] = \begin{pmatrix} \text{Var}(b_0) & \text{Cov}(b_0, b_1) \\ \text{Cov}(b_0, b_1) & \text{Var}(b_1) \end{pmatrix}$$

$$R_k = \text{Var}[\varepsilon_k] = \sigma^2 I_{n_k}$$

Bu varyans yapısı altında, tesadüfi hataların ilişkisiz ve sabit bir varyansa ( $\sigma^2$ ) sahip oldukları kabul edilmektedir. Bu formülde ye alan  $I_{n_k}$  boyutu  $n_k \times n_k$  olan birim matristir. Doğrusal karışık-etkili  $h$ - $d$  modeline ilişkin parametre tahminleri SAS programındaki PROC MIXED yaklaşım ile gerçekleştirilmiştir (SAS, 2011; Wang vd., 2020).

## 2.3. İstatistiksel değerlendirme

Geliştirilen doğrusal karışık-etkili model, model test grubundaki her bir örnek alan için sadece sabit etkili yanıtları (topluma özgü sonuçlar) ve tesadüfi parametrelerin tahmini

ile elde edilen daha karmaşık bir model (kalibre edilmiş sonuçlar) için değerlendirilmiştir. Tesadüfi parametrelerin tahmini ya da kalibrasyon alternatifleri, bir örnek alandan tesadüfi olarak seçilen örnek ağaç sayısına bağlı olarak ortaya konmuştur. Bu amaçla kalibrasyon işlemi için modelin test edilmesi amacıyla ayrılan örnek alanlardan tesadüfi olarak seçilen 1, 2, 3, 4, 5 ve 10 ağaç kullanılarak modellerin tahmin performanslarındaki değişim ortaya konmuştur. Modelin tahmin performanslarında farklı kalibrasyon alternatifleri için ortaya çıkan durumların değerlendirilmesi amacıyla Arabatzis ve Burkhart (1992) tarafından önerilen yöntem uygulanmıştır. Bu amaçla, bir örnek alandaki her bir ağaç için ölçülen ve tahmin edilen ağaç boyu farkları hesaplanmış daha sonra her bir örnek alan için ortalama hatalar ( $\bar{e}_k$ ) ve hataların örnek varyansı ( $v_k$ ) hesaplanmıştır. Bunlar hata ve doğruluğun tahmini olarak kabul edilmiştir. Hata kareler ortalaması ( $MS_k$ )'nın tahmini; hata ve doğruluk ölçülerinin birleştirilmesi ile ve aşağıdaki formül yardımı ile elde edilmiştir.

$$MS_k = \bar{e}_k^2 + v_k \quad (6)$$

Bu istatistiksel değerlendirmeler hem sadece sabit etkili parametreleri kullanan model için hem de sabit etkili ve tesadüfi etkili parametreleri birlikte kullanılarak geliştirilen karışık-etkili modeller için gerçekleştirilmiştir. Sabit etkili model ve farklı sayıda örnek ağaç kullanılarak kalibre edilen karışık etkili modellerin tahmin başarılarının karşılaştırılmasında, Poudel ve Cao (2013) tarafından

önerilen nispi sıralama yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, bir sabit etkili model ve 6 farklı kalibrasyon alternatifi içeren karışık etkili model ile toplam 7 farklı yöntemin tahmin başarıları değerlendirilmiştir. Nispi sıralama sistemine göre, en iyi ve en kötü yöntemler sırasıyla 1 ve 7 sıralarını alırken, diğer yöntemlerin sıraları 1 ile 7 arasında gerçek sayılar olarak belirlenmiştir. Bu yöntem, değerlendirme istatistiklerinin sadece sırasını değil, aynı zamanda büyüklüğünü de dikkate aldığı için geleneksel sıralamalardan daha fazla bilgi sunmaktadır (Özçelik vd., 2022).

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3.1. Sabit etkili ve karışık etkili model için parametre tahminleri

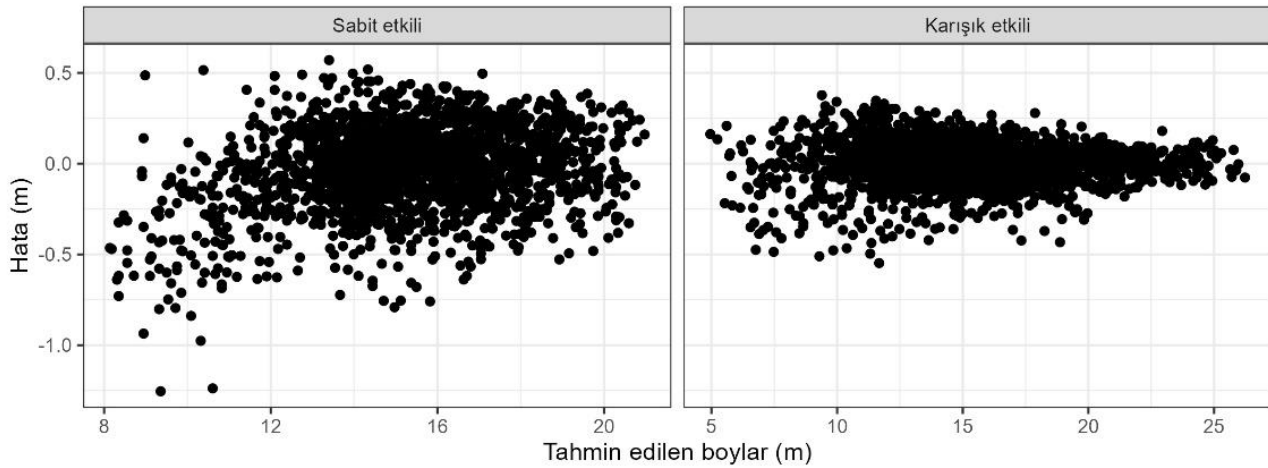
Karaçam için model geliştirme ya da diğer deyimle I. grup veriler ve doğrusal karışık-etkili model kullanılarak elde edilen parametre tahminleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bütün parametre tahminleri  $p < 0.0001$  önem düzeyinde anlamlıdır.

Şekil 2'de ise doğrusal karışık-etkili model ve sabit etkili model ile model geliştirme verileri için elde edilen hata dağılımları görülmektedir. Şekil 2 incelendiğinde, doğrusal karışık-etkili modeller ile elde edilen hata dağılımlarının sadece sabit etkili parametreler kullanılarak elde edilen tahminlerin hata dağılımlarına göre daha küçük ve daha homojen bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Özellikle ağaç boyunun artmasına bağlı olarak doğrusal karışık-etkili modelin tahmin performansının iyileştiği söylenebilir.

Çizelge 2. Parametre tahminleri ve uyum istatistikleri  
Table 2. Parameter estimates and goodness-of-fit statistics

	Parametreler						Uyum istatistikleri	
	$\beta_0$	$\beta_1$	Varyans Bileşenleri		$Cov(\beta_0, \beta_1)$	$\sigma^2$	-2LL	AIC
Tahmin	0,8816	0,5007	0,5355	0,02792	-0,1204	0,01649	-2369	-2361
SE	0,1003	0,2406	0,1178	0,00661	0,02769	0,00052		

SE, standart hata.



Şekil 2. Sabit etkili ve karışık etkili modeller için hataların tahmin edilen boy değerlerine göre dağılımı  
Figure 2. Scatter plots of residuals according to predicted heights for fixed- and mixed-effects models

### 3.2. Model kalibrasyonu ve kalibrasyon alternatifleri

Geliştirilen modelin tahmin performansının artırılması amacıyla farklı kalibrasyon alternatifleri test edilmiştir. Günümüze kadar yapılan benzer konudaki çalışmalar, ağaç boy tahminleri için, kalibre edilmiş sonuçların popülasyon ortalamalarının kullanımına göre daha doğru sonuçların alınmasına yardımcı olmuştur (Trincado vd., 2007; Huang vd., 2009; Özçelik vd., 2013; Gomez-García vd., 2015; Özçelik vd., 2018; Bronisz ve Mehtätalo, 2020; Ciceu vd., 2020). Bu amaçla her örnek alanda tesadüfi seçilen sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 10 adet örnek ağaç kullanılarak geliştirilen doğrusal karışık-etkili model kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon alternatiflerinden elde edilen sonuçlar aşağıda Çizelge 3'te ve Şekil 3 ve 4'te verilmiştir. Çizelge 3'ten de görülebileceği gibi, bütün kalibrasyon alternatifleri ile elde edilen boy tahminleri sabit etkili modele göre kullanılan model ölçüt değerleri itibariyle daha başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Sabit etkili model ve karışık-etkili modelin farklı kalibrasyon alternatifleri için ürettiği ortalama hata, hata varyansı ve Kök Ortalama Kare Hatası ölçütleri (RMSE) kullanılarak modellerin Poudel ve Cao (2013) tarafından önerilen yöntemle nispi sıraları belirlenmiştir. Sabit etkili model ve farklı kalibrasyon alternatifleri için elde edilen nisbi sıra değerleri de Çizelge 3'te verilmiştir. Farklı kalibrasyon alternatiflerinin nisbi sıra değerleri incelendiğinde; modellerin nisbi sıraları itibariyle en başarısız modelin sabit etkili parametreleri içeren model olduğu görülmektedir. 5 ve 10 tesadüfi ağaç kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işlemlerinin modelin tahmin performansları açısından en başarılı alternatifler olduğu görülmekle birlikte 5'ten fazla ağaç kullanılmasının modelin tahmin performansı üzerinde büyük etki yapmadığı görülmektedir. Envanter maliyetleri ile modelin tahmin performansı arasındaki fayda-maliyet dengesi düşünüldüğünde, model performansının artırılması amacıyla her örnek alanda en fazla tesadüfi seçilecek 5 ağacın kalibrasyon için yeterli olacağı değerlendirilmiştir. Benzer konuda yapılan diğer çalışmalarda da modelinin kalibrasyonu amacıyla 3-5 örnek ağacın yeterli olacağı ifade edilmektedir. Xie vd. (2022) tarafından belirtildiği gibi, önceden ölçülen örnek ağaçların sayısının belirlenmesi, orman envanteri maliyetleri ve zaman açısından kritik bir öneme sahiptir. Daha önceki çalışmalarda, örnekleme çalışmalarında kalibrasyon için kullanılacak olan ağaç sayısının artırılmasının, modelin tahmin başarısını olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir (Temesgen vd., 2008; Huang vd., 2009; Teshome vd., 2024). Bu çalışmada da farklı modelleme yaklaşımlarının kalibrasyonu için kullanılan örnek ağaç sayısının artmasıyla birlikte, modellerin ortalama hata ve RMSE değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Benzer çalışmalar incelendiğinde, model kalibrasyonu için Calama ve Montero (2004) 4 ağaç; Temesgen vd. (2008) 1-15 arasında değişen sayıda ağaç; Teshome vd. (2024) ve Huang vd. (2009) 1-9 ağaç kullanmayı tavsiye etmiştir. Xie vd. (2022) ile Ciceu vd. (2020) ise her örnek alandan seçilecek 6 ağacın farklı modelleme yaklaşımlarının kalibrasyonu için yeterli olacağını belirtmiştir. Diğer yandan, Trincado vd. (2007), her örnek alandan 3 ağacın kalibrasyon için yeterli olacağını ve daha fazla örnek ağacın kullanılmasının tahmin performansında anlamlı bir fark yaratmayacağını ifade etmiştir. Sharma ve Parton (2009) ise genel olarak model kalibrasyonu için modelin tahmin performansı ile veri toplama maliyeti arasındaki dengeyi göz önünde bulundurarak 4 ila 9 ağaç arasında seçim yapmanın uygun

olacağını belirtmiştir. Bu çalışmada ve Sharma ve Parton (2009) tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar arasında bir uyum olduğu görülmektedir. Model test verileri kullanarak sabit etkili model ile farklı kalibrasyon alternatifleri için elde edilen hata dağılımı grafikleri ise Şekil 4'te verilmiştir. Bu grafiklerin incelenmesinden de görüleceği gibi kalibrasyon için kullanılan ağaç sayısının artmasına bağlı olarak modelin hata dağılımları daha homojen bir hale dönüşmüştür. Bu iyileşme kalibrasyon için 5 ve 10 ağaç kullanılan durumlarda ise nispeten daha tedrici olmuştur. Elde edilen sonuçlardan genel bir değerlendirme yapılacak olursa; Trincado vd. (2007) ve VanderSchaaf (2014) tarafından da ifade edildiği gibi; kalibrasyon için sadece bir ağacın kullanılması durumunda dahi boy tahminlerinde önemli ölçüde iyileşme gözlenmektedir.

### 3.3. Karışık etkili modelleme tekniği ile ağaç boyunun tahminine ilişkin örnek uygulama

Karışık etkili *h-d* modeli hem tüm topluma ilişkin ortalama sonuçları hem de örneğe ilişkin özel sonuçları vermesi nedeniyle geleneksel en küçük kareler yöntemine göre önemli üstünlükler taşımaktadır. Aşağıda hem sabit etkili modelleme hem de karışık etkili modelleme yaklaşımı kullanılarak doğrusal model ile ağaç boyu tahmininin yapıldığı örneklenmiştir.

#### 3.3.1. Ortalama yanıt (sadece sabit etkili parametreler)

Bir örnek alan için toplum ortalamaları Denklem (4)'ün sadece sabit etkili kısmı ( $\beta_0$  ve  $\beta_1$ ) kullanılarak elde edilebilir.

Bu denklem Çizelge 2'deki parametre tahminleri ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\ln(H) = 0,8816 + 0,5007 \ln d \quad (7)$$

Bununla birlikte gerçek ağaç boyunun tahmin edilebilmesi için bu denklemden tahmin edilen değerlerin orijinal birimlerine dönüştürülmesi gereklidir. Bu dönüştürme sırasında ortaya çıkacak hata mutlaka göz önünde bulundurulmalı ve işleme dahil edilmelidir. Baskerville (1972), bu amaçla hatasız bir dönüştürme için bir düzeltme faktörü önermiştir.

Bu düzeltme faktörü, Çizelge 2'deki tahmin edilen hata varyansı kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu değer doğal karaçam meşcereleri için  $\sigma^2/2$  (0,01649/2=0,008245)'dir. Denklem düzeltme faktörünün eklenmesi ile aşağıdaki yapıya sahip olmaktadır.

$$\ln(H) = 0,8816 + 0,5007 \ln(d) + 0,008245 \quad (8)$$

Doğrusal formdaki denklem (8) aşağıdaki orijinal formuna dönüştürülebilmesi amacıyla denklemin sol tarafında yer alan  $h$  değerinin logaritmadan kurtarılması için gerekli işlemler yapıldığında aşağıdaki denklem elde edilmektedir. Bu denkleme boyu 1.30 olan ağaçlarında boyunun tahminine imkân sağlayacak şekilde 1.30 değeri de eklenmiştir.

$$h = 1,30 + 2,4549d^{0,5007} \text{ (Sabit etkili model)} \quad (9)$$

Çizelge 3. Farklı kalibrasyon alternatifleri için ortalama tahmin hatası ( $\bar{\epsilon}$ ), ortalama hata varyansı ( $v$ ) ve RMSE değerleri

Table 3. Mean prediction error ( $\bar{\epsilon}$ ), mean error variance ( $v$ ), and RMSE values for different calibration alternatives

Ağaç sayısı	Hata ( $\bar{\epsilon}$ )	Hata varyansı ( $v$ )	RMSE	Nispi sıra
0 (Sabit etkili)	-0,6316	2,4470	2,3223	7,00
1	-0,0856	2,4567	1,8447	3,89
2	-0,1393	2,4548	1,7367	3,71
3	-0,1500	2,4459	1,6790	3,19
4	-0,1418	2,4381	1,6262	2,65
5	-0,1106	2,4220	1,6155	1,78
10	0,1047	2,4082	1,5673	1,00

### 3.3.2. Kalibre edilmiş yanıtlar (sabit ve karışık etkili parametrelerin kombinasyonu)

Karışık etkili model, Denklem (4) için tesadüfi etkili parametrelerin tahmini ile herhangi bir örnek alan için ortalama yanıtların kalibrasyonuna izin vermektedir. Kalibre edilmiş yanıtların kullanımı herhangi bir örnek alan için tahmin edilen boy değerlerinin doğruluğunun artırılmasına imkân vermektedir. Tesadüfi parametrelerin tahmini aşağıdaki formül yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

$$\hat{b}_i = DZ_i'W_i(Y_i - X_i\hat{\beta}) \quad (10)$$

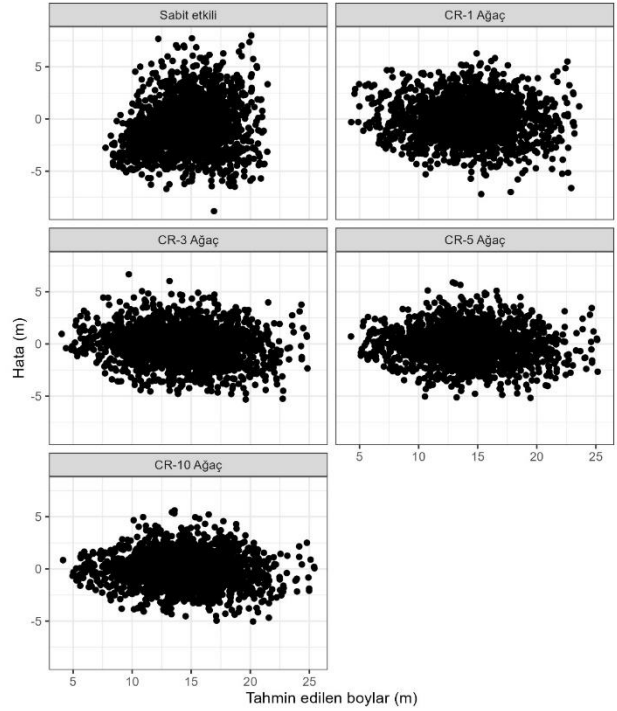
Burada,  $W_i = V^{-1} = [Z_i DZ_i' + R_i]^{-1}$  dir.

Boyutları gözlem sayısına eşit bir matrisin ters çevrilmesi gerekmektedir (Lappi, 1991). Tahmin hatalarının varyans-kovaryans matrisi  $Var[b_i - \hat{b}_i] = [Z_i'R_i^{-1}Z_i' + D_i^{-1}]^{-1}$  şeklinde yazılabilmektedir.

$$\hat{u}_k = \hat{D}Z_k'(\hat{R}_k + Z_k\hat{D}Z_k')^{-1}(Y_k - X_k\hat{\beta}) \quad (11)$$

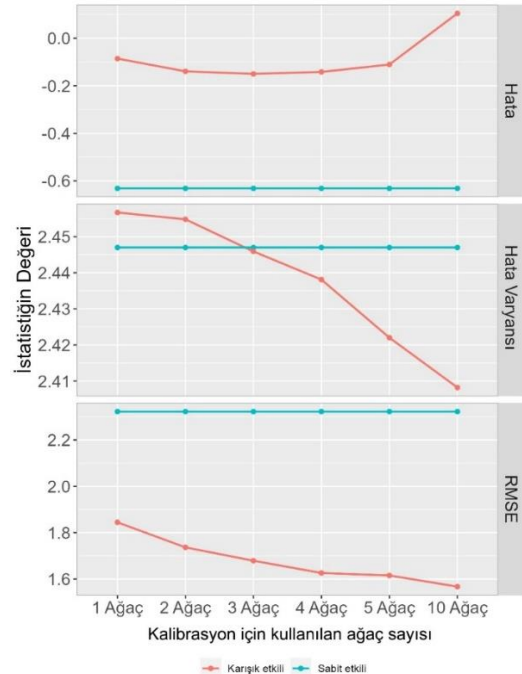
Burada,  $\hat{u}_k$   $2 \times 1$  her biri 2 boyutlu bir vektörden oluşan ve  $k$ . örnek alan için tahmin edilen tesadüfi etkileri ifade etmektedir. Bu vektör, örnek alana özgü iki farklı tesadüfi etkili parametreyi (örneğin,  $\beta_0$  ve  $\beta_1$ ) içermektedir.  $\hat{D}$  ise tesadüfi etkiler için tahmin edilmiş  $2 \times 2$  büyüklüğündeki bir varyans-kovaryans matrisi;  $Z_k$ ,  $k$ . örnek alanın ölçülmüş ağaç çaplarını içeren ( $n_k \times 2$ ) büyüklüğündeki tesadüfi etki matrisini,  $\hat{R}_k$  ise, tahmin edilen varyans-kovaryans tesadüfi hata matrisini ifade etmektedir. Bu formülde, her bir örnek alandaki tesadüfi etkilerin modele dahil edilmesine rağmen, örnek alanlar arasındaki varyansın sabit olduğu (homoskedastisite) varsayılmaktadır. Bu, modelin genel tahmin doğruluğunu artırmak ve matematiksel çözümleri basitleştirmek amacıyla yapılmıştır. Ancak, bu varsayımın geçerliliği modelin uyum istatistikleri ve artık analizleri ile doğrulanmalıdır. Ayrıca, örnek alanlar arasındaki varyansın sabit olmaması durumunda, heteroskedastik yapılar veya varyans-kovaryans matrisi içinde alternatif modelleme yaklaşımları kullanılabilir.

Tesadüfi etkili parametrelerin tahmini için her örnek alanda tesadüfi seçilen ağaçların  $h-d$  değerleri için kalibrasyon işlemi gerekmektedir. Bu amaçla 21 nolu örnek alandan tesadüfi olarak üç örnek ağaç seçilmiş ve bu ağaçların çap ve boy değerleri kullanılmıştır. Parametrelerin tahmin edilen varyans ve kovaryans değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu nedenle tesadüfi katsayıların varyans-kovaryans matrisi aşağıdaki oluşturulabilir.



Şekil 3. Farklı kalibrasyon alternatifleri ve sabit etkili model ile elde edilen hata değerlerinin tahmin edilen boy değerlerine göre dağılımı.

Figure 3. Distribution of error statistics obtained from different calibration alternatives and the fixed-effects model according to the predicted heights.



Şekil 4. Ortalama tahmin hatası, hata varyansı ve RMSE değerlerinin farklı kalibrasyon alternatifleri itibarıyla değişimi

Figure 4. Variation of mean prediction error, error variance, and RMSE values across different calibration alternatives

$$\text{Var}[b] = D = \begin{bmatrix} \sigma_0^2 & \sigma_{01} \\ \sigma_{01} & \sigma_1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5355 & -0,1204 \\ -0,1204 & 0,02792 \end{bmatrix}$$

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} 0,01649 & 0 & 0 \\ 0 & 0,01649 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01649 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8816 \\ 0,5007 \end{bmatrix}$$

$D$ ,  $\hat{R}$  ve  $\hat{\beta}$  için gerekli sayısal değerler Çizelge 2’de verilmiştir.

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & \ln(31,0 \text{ cm}) \\ 1 & \ln(25,4 \text{ cm}) \\ 1 & \ln(37,0 \text{ cm}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3,433987 \\ 1 & 3,234749 \\ 1 & 3,610918 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \ln(31,0 \text{ cm}) \\ 1 & \ln(25,4 \text{ cm}) \\ 1 & \ln(37,0 \text{ cm}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3,433987 \\ 1 & 3,234749 \\ 1 & 3,610918 \end{bmatrix}$$

$Z$  ve  $X$  de yer alan bütün değerler tesadüfi olarak seçilen üç örnek ağaç için belirli bir örnek alandan temin edilmiştir. Burada,  $\hat{R}$ ,  $Z$ ,  $X$  ve  $y$  matrislerinin boyutları modelin kalibrasyonu için seçilecek ağaçların sayısına göre değişebilmektedir.

$$Y = \begin{bmatrix} \ln(15,3 - 1,30) \\ \ln(14,2 - 1,30) \\ \ln(17,4 - 1,30) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,639067 \\ 2,557227 \\ 2,778819 \end{bmatrix}$$

$$(Y - X\hat{\beta}) = \begin{bmatrix} 2,639067 - (0,8816 + 0,5007x \ln(31,0)) \\ 2,557227 - (0,8816 + 0,5007x \ln(25,4)) \\ 2,778819 - (0,8816 + 0,5007x \ln(37,0)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,639067 - 2,600987 \\ 2,557227 - 2,501239 \\ 2,778819 - 2,689587 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,03808 \\ 0,05599 \\ 0,08923 \end{bmatrix}$$

Denklem (4)’te görüldüğü gibi, matris çözüldüğü zaman tesadüfi parametreler için aşağıdaki değerler elde edilmektedir.

$$\hat{u} = \begin{bmatrix} 0,14732 \\ -0,02785 \end{bmatrix}$$

Bu kalibrasyon işleminden sonra, tesadüfi ve sabit etkili parametreleri birlikte içeren doğrusal karışık etkili model aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\ln H = 0,8816 + 0,5007 * \ln(d) + 0,14732 - 0,02785 * \ln(d) \quad (12)$$

Model sabit etkili modelde olduğu gibi orijinal formuna dönüştürüldüğünde aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$h = 1,30 + 2,8212 * d^{0,4729} \quad (\text{Karışık etkili model}) \quad (13)$$

#### 4. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada, Isparta-Eğirdir yöresindeki doğal karaçam meşcereleri için doğrusal karışık-etkili modelleme yaklaşımı kullanılarak  $h-d$  modelleri geliştirilmiştir. Bu amaçla basit üssel fonksiyon kullanılarak model önce doğrusal forma dönüştürülmüş, ardından doğrusal karışık etkili modelleme tekniği ile  $h-d$  modelleri geliştirilmiştir. Tesadüfi etkili parametre tahmininde en iyi doğrusal yansız tahmin için (EBLUP) yöntemi uygulanmış ve tesadüfi olarak örnek alanların yarısı model geliştirmek diğer yarısı ise geliştirilen modellerin test edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Karışık etkili modelleme, her örnek alan için ortalama yanıtların ve topluma özgü parametrelerin kalibrasyonuna olanak tanıyarak, daha yüksek doğrulukta ağaç boyu tahminleri yapılmasına imkân sağlamaktadır. Bu çalışmada, 6 farklı kalibrasyon alternatifleri test edilmiş ve popülasyon ortalamalarına (sabit etkili model) göre daha başarılı tahminler elde edilmiştir. Farklı kalibrasyon alternatifleri arasında, en iyi sonuçlar 10 ağaç kullanıldığında elde edilmiştir. Ancak, sabit etkili modelle kıyaslandığında model performansındaki artışlar göz önünde bulundurulduğunda, 5 ve 10 örnek ağaç seçilerek yapılan kalibrasyon işlemlerinde modelin tahmin performansları arasında kullanılan ölçüt değerleri itibariyle önemli farklar görülmemiştir. Bu nedenle, karaçam meşcereleri için 5 ağaç ile yapılan kalibrasyon işleminin yeterli olduğu söylenebilir. Daha geniş alanlar söz konusu olduğunda ise 10 ve üzeri ağaç kullanımı önerilmektedir.

Bu çalışmada görüldüğü gibi,  $h-d$  modellerinin geliştirilmesinde karışık etkili modelleme tekniği kullanıldığında, model performansını veya tahmin doğruluğunu artırmak için ekstra değişken kullanımına gerek kalmayacağı düşünülmektedir. Bu da zaman ve maliyet açısından önemli tasarruflar sağlamaktadır.

#### Açıklama

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 120R080 ve 122R010 numaralı projeler kapsamında elde edilen verilerle gerçekleştirilmiştir.



**Kaynaklar**

- Adame, P., del Río, M., Canellas, I., 2008. A mixed nonlinear height–diameter model for pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Forest ecology and management*, 256(1-2): 88-98.
- Alkan, O., Özçelik, R., 2022. Eğirdir yöresi doğal karaçam meşcereleri için çap-boy modeli: Kantil regresyon yaklaşımı. *Turkish Journal of Forestry*, 23(3): 187-195.
- Arabatzis, A.A., Burkhart, H.E., 1992. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantations. *Forest Science*, 38(1): 192-198.
- Baskerville, G.L., 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 2(1): 49-53.
- Bolat, F., Ürker, O., Günlü, A., 2022. Nonlinear height-diameter models for Hungarian oak (*Quercus frainetto* Ten.) in Dumanlı Forest Planning Unit, Çanakkale/Turkey. *Austrian Journal of Forest Science*, 139(3): 199–220.
- Bronisz, K., Mehtätalo, L., 2020. Seemingly unrelated mixed-effects biomass models for young silver birch stands on post-agricultural lands. *Forests*, 11(4): 381.
- Calama, R., Montero, G., 2004. Interregional nonlinear height diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(1): 150-163.
- Carus, S., Çatal, Y., 2017. Comparison of some diameter-height models for brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) afforestations in Ağlasun region. *Turkish Journal of Forestry*, 18(2): 94-101.
- Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Anta, M.B., Rodríguez, M.S., von Gadow, K., 2006. A generalized height–diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3): 202-213.
- Ciceu, A., Chakraborty, D., Ledermann, T., 2023. Examining the transferability of height–diameter model calibration strategies across studies. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpad063.
- Ciceu, A., García-Duro, J., Seceleanu, I., Badea, O., 2020. A generalized nonlinear mixed-effects height–diameter model for Norway spruce in mixed-uneven aged stands. *Forest Ecology and Management*, 477: 118507.
- Crecente-Campo, F., Alboreca, A.R., Diéguez-Aranda, U., 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* L. in the major mountain ranges of Spain. *Annals of forest science*, 66(8): 808.
- Çatal, Y., Carus, S. 2018. A height-diameter model for brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) plantations in Southwestern Turkey. *Applied Ecology & Environmental Research*, 6(2): 1445-1459.
- Çatal, Y., 2012. Göller yöresinde Yalancı akasya, Anadolu karaçamı ve Toros sediri ağaç türleri için çap-boy modeli. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 13(2): 92-96.
- Diamantopoulou, M. J., Özçelik, R., Koparan, B., Alkan, O. 2023. Artificial intelligence as an alternative modelling strategy for reliable height-diameter predictions of mixed-oaks species. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47(2): 228-241.
- Gómez-García, E., Diéguez-Aranda, U., Cunha, M., Rodríguez-Soalleiro, R. 2016. Comparison of harvest-related removal of aboveground biomass, carbon and nutrients in pedunculate oak stands and in fast-growing tree stands in NW Spain. *Forest Ecology and Management*, 365: 119-127.
- Gomez-García, E., Fonseca, T.F., Crecente-Campo, F., Almeida, L. R., Dieguez-Aranda, U., Huang, S., Marques, C.P.: 2015. Height-diameter models for maritime pine in Portugal: a comparison of basic, generalized and mixed-effects models. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 9(1): 72.
- Huang, S., Titus, S.J., 1994. An age-independent individual tree height prediction model for boreal spruce–aspen stands in Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 24(7): 1295-1301.
- Huang, S., Wiens, D.P., Yang, Y., Meng, S.X., Vanderschaaf, C.L., 2009. Assessing the impacts of species composition, top height and density on individual tree height prediction of quaking aspen in boreal mixedwoods. *Forest ecology and management*, 258(7): 1235-1247.
- Kalbi, S., Fallah, A., Bettinger, P., Shataee, S., Yousefpour, R., 2018. Mixed-effects modeling for tree height prediction models of Oriental beech in the Hyrcanian forests. *Journal of Forestry Research*, 29: 1195-1204.
- Lappi, J., 1991. Calibration of height and volume equations with random parameters. *Forest Science*, 37(3): 781-801.
- Mehtätalo, L., de-Miguel, S., Gregoire, T.G., 2015. Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7): 826-837.
- Newton, P.F., Amponsah, I.G., 2007. Comparative evaluation of five height–diameter models developed for black spruce and jack pine stand-types in terms of goodness-of-fit, lack-of-fit and predictive ability. *Forest Ecology and Management*, 247(1-3): 149-166.
- Ogana, F.N., Gorgoso-Varela, J.J., 2020. A nonlinear mixed-effects tree height prediction model: Application to *Pinus pinaster* Ait in Northwest Spain. *Trees, Forests and People*, 1: 100003.
- Özçelik, R., Cao, Q. V., Kurnaz, E., Koparan, B., 2022. Modeling diameter distributions of mixed-oak stands in Northwestern Turkey. *CERNE*, 28: e102991.
- Özçelik, R., Diamantopoulou, M.J., Crecente-Campo, F., Eler, U., 2013. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models. *Forest Ecology and Management*, 306: 52-60.
- Özçelik, R., Cao, Q.V., Trincado, G., Göçer, N., 2018. Predicting tree height from tree diameter and dominant height using mixed-effects and quantile regression models for two species in Turkey. *Forest Ecology and Management*, 419: 240-248.
- Özçelik, R., Koparan, B., Fonseca, T.J.F., Baş, B., 2023. Characterization of the variability of the diameter distribution of natural Taurus cedar stands in Türkiye using Johnson's Sb distribution. *Cerne*, 29: e-103265.
- Peng, C., Zhang, L., Liu, J., 2001. Developing and validating nonlinear height–diameter models for major tree species of Ontario's boreal forests. *Northern Journal of Applied Forestry*, 18(3): 87-94.
- Poudel, K.P., Cao, Q.V., 2013. Evaluation of methods to predict Weibull parameters for characterizing diameter distributions. *Forest Science*, 59(2): 243-252.
- Raptis, D.I., Kazana, V., Kazaklis, A., Stamatou, C., 2021. Mixed-effects height–diameter models for black pine (*Pinus nigra* Arn.) forest management. *Trees*, 35: 1167-1183.
- Sağlam, F., Sakıcı, O.E., 2024. Ecoregional height–diameter models for Scots pine in Türkiye. *Journal of Forestry Research*, 35(1): 103.
- SAS Institute., 2011. *Sas/ETS 9.1 User's Guide*. SAS Institute, Cary, NC, USA
- Seki, M., Sakıcı, O.E. 2022. Ecoregion-based height-diameter models for Crimean pine. *Journal of Forest Research*, 27(1): 36-44.
- Seki, M., 2022. Height–diameter allometry of two commercial pine species located in low productive forest stands of northwestern Türkiye. *Austrian Journal of Forest Science*, 139(4): 265–288.
- Sharma, M., Parton, J., 2009. Modeling stand density effects on taper for jack pine and black spruce plantations using dimensional analysis. *Forest Science*, 55(3): 268-282.
- Temesgen, H., Monleon, V.J., Hann, D.W., 2008. Analysis and comparison of nonlinear tree height prediction strategies for Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(3): 553-565.
- Temesgen, H., v Gadow, K., 2004. Generalized height diameter models an application for major tree species in complex stands of interior British Columbia. *European Journal of Forest Research*, 123: 45-51.



- Temesgen, H., Zhang, C. H., Zhao, X.H., 2014. Modelling tree height–diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: A large observational study from Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 316: 78-89.
- Teshome, M., Braz, E.M., Torres, C.M.M.E., Raptis, D.I., de Mattos, P.P., Temesgen, H., Sileshi, G.W., 2024. Mixed-effects height prediction model for *Juniperus procera* trees from a dry afro-montane forest in Ethiopia. *Forests*, 15(3): 443.
- Trincado, G., VanderSchaaf, C.L., Burkhart, H.E., 2007. Regional mixed-effects height–diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations. *European Journal of Forest Research*, 126: 253-262.
- VanderSchaaf, C.L., 2012. Mixed-effects height-diameter models for commercially and ecologically important conifers in Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry*, 29(1): 15-20.
- VanderSchaaf, C.L., 2013. Mixed-effects height-diameter models for commercially and ecologically important hardwoods in Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry*, 30(1): 37-42.
- VanderSchaaf, C.L., 2014. Mixed-effects height–diameter models for ten conifers in the inland Northwest, USA. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 76(1): 1-9.
- Wang, Z., Wang, H., Wang, S., Lu, S., Saporta, G., 2020. Linear mixed-effects model for longitudinal complex data with diversified characteristics. *Journal of Management Science and Engineering*, 5(2): 105-124.
- Wykoff, W., Crookston, N.L., Stage, A.R., 1982. User's guide to the stand prognosis model (Vol. 133). US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, USA.
- Xie, L., Widagdo, F.R.A., Miao, Z., Dong, L., Li, F., 2022. Evaluation of the mixed-effects model and quantile regression approaches for predicting tree height in larch (*Larix olgensis*) plantations in northeastern China. *Canadian Journal of Forest Research*, 52(3): 309-319.