

Sinop Yöresi Saf ve Doğal Sarıçam Meşcereleri için Çap-Boy Modellerinin Geliştirilmesi

Hasan Aksoy^{1,3}, Alkan Günlü^{2*}, Ferhat Bolat²

¹ Sinop Üniversitesi, Ayancık Meslek Yüksekokulu, Ormancılık Bölümü, Sinop, Türkiye

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

³ Natural Resources Institute Finland (LUKE), Yliopistokatu 6B, FI-80100 Joensuu, Finland.

Makale Tarihi

Gönderim: 24.08.2025

Kabul: 03.11.2025

Yayın: 15.12.2025

Araştırma Makalesi



Öz – Bu çalışmada, Sinop yöresi doğal Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcereleri için çap (D)-boy (H) modelleri geliştirilmiştir. Model geliştirme aşamasında, 184 örnek alandan elde edilen toplam 904 adet D ve H verisi kullanılmıştır. Bununla birlikte çeşitli meşcere değişkenleri de ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında sadece çap değişkeni ve çap ile birlikte meşcere değişkenlerini içeren çeşitli model formları dikkate alınmıştır. Geliştirilen modellerin başarısı ve tahmin davranışı çeşitli hata ölçütleri, tahmin-gözlem ve tahmin-hata grafikleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, sadece çap değişkenini içeren model ölçülen boy değerlerindeki varyansın önemli bir kısmını açıklasa da hatalarda değişen varyans problemi göstermiştir (Model belirtme katsayısı=0.90). Çap ile birlikte çeşitli meşcere değişkenlerini içeren genelleştirilmiş H-D modelleri ise hem daha iyi bir varyans açıklama değerine sahip (Model belirtme katsayısı=0.94) hem de hatalarda sabit bir varyans göstermiştir. İstatistiksel ve grafiksel değerlendirmelerin sonucu olarak, genelleştirilmiş H-D modellerinin Sinop yöresinde yayılış yapan doğal Sarıçam meşcerelerinde güvenle kullanılabileceği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler – Allometrik ilişkiler, orman envanteri, sarıçam

Developing Height-Diameter Models for Natural Scots Pine Stands in Sinop Region

¹ Sinop University, Program of Forestry and Forest Products, Department of Forestry, Vocational School of Ayancık, Sinop, Türkiye

² Çankırı Karatekin University, Faculty of Forestry, Department of Forest Engineering, Çankırı, Türkiye

Article History

Received: 24.08.2025

Accepted: 03.11.2025

Published: 15.12.2025

Research Article

Abstract – In this study, diameter (D)-height (H) models were developed for natural Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Sinop region. In the model development phase, a total of 904 D and H data obtained from 184 sample plots were used. In addition, various stand variables were measured and calculated. Within the scope of the study, various model forms including only diameter variable and diameter and stand variables were considered. The success and prediction behavior of the developed models were evaluated through various error criteria, prediction-observation and prediction-error graphs. According to the findings, the model including only diameter variable explained a significant part of the variance in measured height values, but showed a problem of varying variance in errors (Model coefficient of determination=0.90). The generalized H-D models including diameter and various stand variables were found to have a better variance explanation value (Model coefficient of determination=0.94) and showed a constant variance in errors. As a result of statistical and graphical evaluations, it was concluded that generalized H-D models can be used with confidence in pure and natural Scots pine stands in Sinop region.

Keywords – Allometric relationships, forest inventory, scots pine

¹  haksoy@sinop.edu.tr

²  alkangunlu@karatekin.edu.tr

²  fbolat@karatekin.edu.tr

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

Karasal ekosistemler içinde önemli bir yer tutan ormanlar, küresel ölçekte insanlığın ekonomik, ekolojik ve sosyo-kültürel ihtiyaçlarını karşılayan doğal kaynaklardır (FAO, 2020; Nesha vd., 2021; Aksoy, 2024). Özellikle karbon depolama kapasiteleri sayesinde, küresel iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılmasında kritik bir rol üstlenmektedirler (Nesha vd., 2021). Çeşitli ürün ve hizmetlerin sağlandığı bu ekosistemlerin sürekli ve sürdürülebilir şekilde yönetilebilmesi için, meşcere yapısına ilişkin özelliklerin zamansal ve mekânsal olarak doğru bir biçimde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Vanclay, 1994).

Ormancılık planlamasında temel ağaç özelliklerinden olan çap ve boy ölçümleri, ağaç serveti ve artım envanteri çalışmalarında elde edilmektedir. Örnek alanlardaki çap ölçümleri kolay, pratik ve hassas bir şekilde yapılabilirken, ağaç boyunun ölçülmesi teknik bilgi gerektiren ve zaman alan bir süreçtir. Bu nedenle birçok orman envanterinde, ağaç boyları doğrudan ölçülmek yerine, çap-boy (H-D) modelleri aracılığıyla tahmin edilmekte; böylece hem zaman hem de iş gücü açısından verimlilik sağlanmaktadır. Ağaç boyu, hacim hesaplamaları, artım ve büyüme tahminleri, bonitet indeksi belirleme ve orman ekosistemlerindeki bitkisel biyokütle hesaplanması gibi birçok ormancılık uygulaması için kritik bir değişkendir (Huang vd., 1994; Yuancai & Parresol, 2001; Adame vd., 2008; Mehtätalo vd., 2015).

H-D modelleri genel olarak doğrusal ve doğrusal olmayan biçimlerde sınıflandırılmaktadır (Huang vd., 2000; Lei vd., 2009). Geçmişte çoğunlukla doğrusal modeller tercih edilirken, günümüzde modern istatistiksel yaklaşımların gelişmesiyle doğrusal olmayan modellerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Nitekim çeşitli araştırmalar, doğrusal olmayan modellerin, benzer sayıda parametreye sahip doğrusal modellere kıyasla ağaç boyundaki değişkenliği daha başarılı şekilde açıklayabildiğini ortaya koymaktadır (Huang vd., 1992). Literatürde, bu modellerin büyüme ve artım verilerindeki varyasyonu etkili bir şekilde temsil ettiği, biyolojik olarak anlamlı parametrelere sahip olduğu ve bu nedenle pek çok modelleme çalışmasında güvenle kullanılabileceği belirtilmektedir (Archontoulis & Miguez, 2015). Bu üstünlükleri nedeniyle doğrusal olmayan H-D modelleri, hem ülkemizde hem de uluslararası çalışmalarda yaygın şekilde tercih edilmektedir (Bolat vd., 2022; Seki & Sakıcı, 2022; Sağlam & Sakıcı, 2024; Sağlam & Sakıcı, 2025; Şahin, 2025).

H-D modellemesi kapsamında, kullanılan modelin yapısı; örnek alanlarda toplanan verilerin detay düzeyine bağlı olarak değişmektedir. Sadece çap ve sınırlı sayıda boy ölçümünün bulunduğu durumlarda, çapın fonksiyonu olan basit H-D modelleri kullanılmaktadır (Atar & Bolat, 2025). Öte yandan, meşcere özelliklerine ilişkin ek verilerin mevcut olduğu örnek alanlarda, genelleştirilmiş modeller geliştirilmekte ve tercih edilmektedir (Sağlam & Sakıcı, 2025). Ancak, boydaki varyasyonun yüksek olduğu durumlarda, basit modeller yeterli doğruluğu sağlayamayabilir. Bu gibi durumlarda, genelleştirilmiş modeller farklı meşcere yapılarında boy varyasyonunu daha etkin biçimde açıklayabilmektedir.

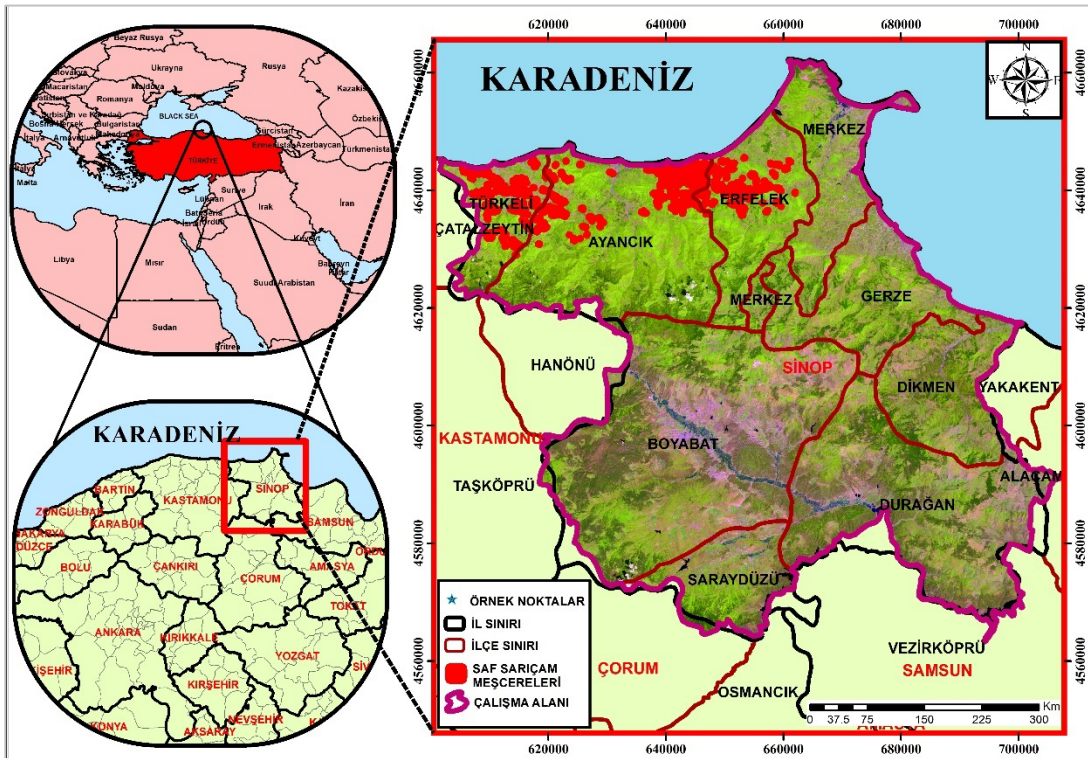
Yöresel koşullar, ağaçların morfolojik özelliklerinde (çap, boy, yaprak alanı vb.) önemli farklılıklara yol açabilmektedir. Bu nedenle, ağaçların çeşitli özelliklerini tahmin etmeye yönelik yöreye özgü modellerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amaçları;

- (1) Yöresel saf Sarıçam meşcereleri için basit ve genelleştirilmiş H-D modellerinin geliştirilmesi ve,
- (2) İstatistiksel hata ölçütleri ve grafiksel değerlendirmeler yoluyla en uygun H-D büyüme modelinin belirlenmesi şeklindedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

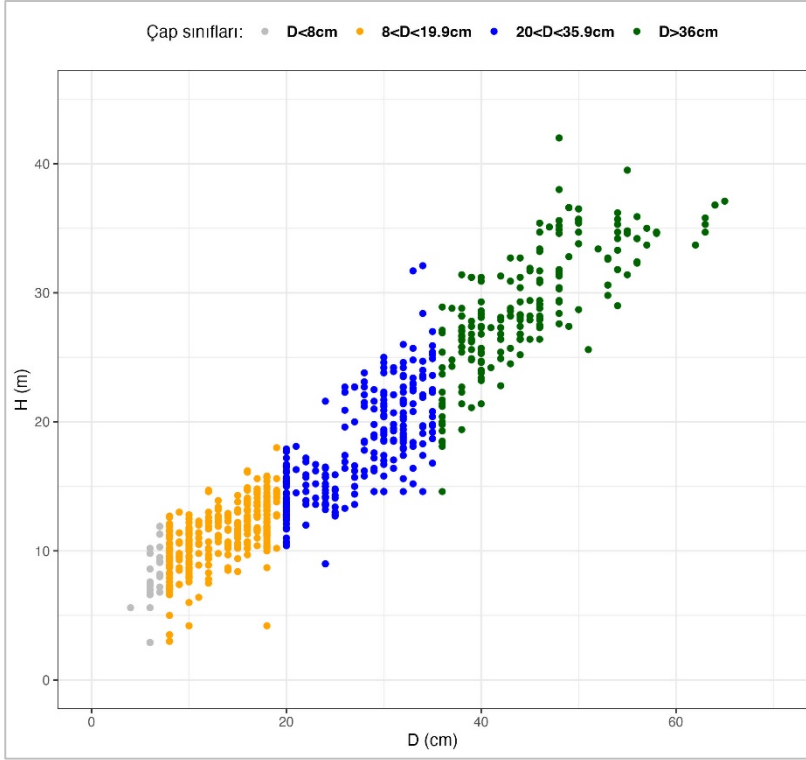
Bu çalışma Sinop Orman Bölge Müdürlüğü (OBM) sınırları içerisinde yayılış gösteren saf Sarıçam meşcerelerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı konum itibarıyla 601590-707391 doğu boylamları ile 4662313-4563463 kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. Çalışmanın gerçekleştirildiği toplam alan 556.275,50 ha olup araştırmanın yapıldığı saf Sarıçam meşcerelerinin toplam alanı ise 7.548,49 ha'dır. Çalışma alanı en fazla yağışı ekim ayında, en az yağışı ise mayıs ayında almakta olup yıllık ortalama yağış miktarı 685,7 mm'dir. Yıllık ortalama sıcaklık 14 °C'dir. Çalışma alanında sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ile birlikte yayılış gösteren ağaç türleri ise karaçam (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe), göknar (*Abies nordmanniana* (Steven) Spach), doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky.), gürgen (*Carpinus betulus* L.), meşe (*Quercus* sp.), ardıç (*Juniperus* sp. L.), dişbudak (*Fraxinus excelsior* L.), karaağaç (*Ulmus* sp.) ve titrek kavak (*Populus tremula* L.) şeklindedir (OGM, 2022; Aksoy and Günlü, 2024). Çalışma alanının konumunu gösterir harita şekil 1'de verilmiştir.



2.2. Örnek Alan Ölçümleri

Bu çalışmada 4 farklı gelişim çağı (a, b, c ve d gelişim çağları), 3 farklı kapalılık (1 kapalı: %11-%40, 2 kapalı: %41-%70, 3 kapalı: >%71) ve Şenyurt (2011)'in sınıflamasını dikkate alarak 5 farklı bonitet sınıfından (I. Bonitet: 30m-34m, II. Bonitet: 25m-29m, III. Bonitet: 20m-24m, IV. Bonitet: 15m-19m ve V. Bonitet: 10m-14m) olmak üzere 3 tekerrürlü ölçüm yapılarak (4 x 3 x 5 x 3) rasgele seçilen 180 örnek alanda envanter ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ancak envanter aşamasında fazladan 4 örnek alan daha alınarak toplamda 184 örnek alanda ölçümler gerçekleştirilmiştir (Aksoy, 2022). Örnek alan ölçümlerinde göğüs çapı 8 cm ve üstü olan tüm canlı ağaçların yerden 1.3 m yüksekliğindeki çapları ölçülmüştür. Boylanma eğrisi denklemini geliştirmek amacıyla çap ölçümüne ek olarak her örnek alanda farklı çap sınıflarında yer alan 6-8 adet ağaçta boy ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerde, gövde formu düzgün olmayan ve tepesi kırık ağaçların örneklenmemesine dikkat edilmiştir. Çap ve boy ölçümleriyle birlikte, meşcere verim gücünü belirlemek

amacıyla hektarda yüz ağaç yöntemine göre belirli sayıda en boylu ağacın yaşı ve boyu ölçülmüştür. Ayrıca, meşcere yaşını belirlemek amacıyla orta çapa yakın 4 ağacın yaşı ölçülmüştür. Ölçülen çap ve boy değişkenlerine ilişkin dağılım grafiği Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Sinop yöresi doğal sarıçam meşcerelerinde H-D dağılımı

2.3. Meşcere Özelliklerin Hesaplanması

Örnek alan ölçümlerinden yararlanarak, $D_q(cm) = \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}}$ (D: Göğüs çapı) formülü ile meşcere orta çapı hesaplanmıştır. Daha sonra, meşcere göğüs yüzeyini hesaplamak amacıyla $G(m^2 ha^{-1}) = \frac{10000}{\bar{O}_{AB}} \sum g_i$ (g_i : örnek alanın toplam göğüs yüzeyi) formülü kullanılmıştır. Meşcere ağaç sayısı, $N(adet ha^{-1}) = \frac{10000}{\bar{O}_{AB}} \sum n_i$ (n_i : örnek alanda ölçülen toplam ağaç sayısı) formülü ile hesaplanmıştır. Boylanma eğrisi denklemlerinde önemli açıklayıcı değişkenlerden birisi olan (Sağlam & Sakıcı, 2025) meşcere üst boyu (H_{100}) ise Hektarda Yüz Ağaç Yöntemine göre seçilen belirli sayıdaki en boylu ağaçların boy ortalaması olarak hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen veri setine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1
Örnek alanlara verilerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişken	n	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std. Sapma
D (cm)	904	4.0	65.0	25.9	14.0
H (m)	904	2.9	42.0	18.0	8.2
D _q (cm)	184	5.6	56.0	26.1	13.1
G (m ² , ha ⁻¹)	184	4.2	87.1	29.0	19.7
N (adet, ha ⁻¹)	184	100	2800	718	560
H ₁₀₀ (m)	184	4.2	37.6	17.9	8.0
Yaş (yıl)	184	7	172	59	44

2.4. Boylanma Eğrisi Denklemlerinin Geliştirilmesi

Meşcere boylanma eğrilerinin oluşturulmasında, sadece çapın fonksiyonu olan basit H-D modelleri (Bolat vd., 2022) ile çap ile birlikte çeşitli meşcere özelliklerini içeren genelleştirilmiş H-D modelleri (Şahin, 2025) kullanılabilir. Bu çalışmada, Tablo 2’de verilen H-D modelleri dikkate alınmıştır. Ormancılık planlama ve yönetim faaliyetlerinde meşcere verimliliği, meşcere yapısı ve sıklığı hakkındaki bilgiler oldukça önemlidir. Bu nedenle, model belirleme aşamasında söz konusu değişkenlerden en az ikisini içeren modeller seçilmiştir. Bununla birlikte, modellerin artım ve büyüme çalışmalarındaki başarısı da dikkate alınmıştır. Gompertz ve Richards Büyüme Modelleri, farklı ağaç türlerinden elde edilen çeşitli artım ve büyüme verilerindeki varyasyonu iyi bir şekilde açıklayabilmektedir. Mirkovich (1958) ve Sharma ve Parton (2007) tarafından önerilen H-D modelleri ise Sağlam ve Sakıcı (2024) ve Sağlam ve Sakıcı (2025) tarafından Sarıçam ve Kızılcım ağaç türlerinin H-D ilişkisini açıklamada oldukça başarılı bulunmuştur.

Tablo 2

Sinop yöresi Sarıçam meşcereleri için dikkate alınan H-D modelleri

Model	Model Formu	Referans	
M1	$H = 1.3 + b_1 \exp(-b_2 \exp(-b_3 D))$	Gompertz (1825)	(2.1)
M2	$H = 1.3 + b_1 (\exp(1 - \exp(-b_2 D)))^{b_3}$	Richards (1959)	(2.2)
M3	$H = 1.3 + (b_1 + b_2 H_{100} + b_3 D_q) \exp\left(-\frac{b_4}{D}\right)$	Mirkovich (1958)	(2.3)
M4	$H = 1.3 + (b_1 H_{100}^{b_2}) \left(1 - \exp\left(-b_3 \left(\frac{N}{G}\right)^{b_4} D\right)\right)^{b_5}$	Sharma and Parton (2007)	(2.4)

2.5. Model Başarılarının Test Edilmesi

Aşağıda verilen model değerlendirme ölçütleri dikkate alınarak, geliştirilen H-D modellerinin başarısı değerlendirilmiştir (Denklem 5-7). Bununla birlikte, tahmin-gözlem ve tahmin-hata grafikleri üzerinden H-D modellerinin tahmin başarısı ayrıca incelenmiştir. Ormancılık verilerinde hatalarda değişen varyans problemi sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Yanlı tahminler olarak ifade edebileceğimiz bu istatistiksel olguyu, daha basit bir ifade ile şu şekilde açıklayabiliriz; geliştirilen modellerin hata değerleri tahmin değerinin büyümesi ile birlikte artabilmekte ya da belirli veri aralıklarında (küçük ya da büyük çap sınıflarında) veri noksanlığı nedeniyle büyük hatalar elde edilebilmektedir. Böyle bir durumla karşılaşılması durumunda, geliştirilen modellerin daha kararlı davranabilmesi amacıyla $1/e$, $1/|e|$, $1/e^2$, $1/\text{Tahmin}$ ve $1/\text{Tahmin}^2$ gibi ağırlıklandırma faktörü olarak dikkate alınmaktadır. Mevcut çalışmada benzer bir yol izlenmiştir. Bütün istatistiki analizlerde ve grafiklerin çiziminde R Studio istatistiksel çözümleme aracı kullanılmıştır (R Core Team, 2022).

Belirtme Katsayısı (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} \quad (2.5)$$

Karesel Ortalama Hata Yüzdesi (KOH%):

$$\text{KOH}\% = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i - \hat{H}_i}{H_i}\right)^2} \times 100 \quad (2.6)$$

Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi (OMH%):

$$\text{OMH}\% = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{H_i - \hat{H}_i}{H_i} \right| \quad (2.7)$$

Bu eşitliklerde, H_i : Gözlem değerleri, $\hat{H}_i$: Tahmin değerleri, $\bar{H}$: Gözlemlerin ortalaması ve n: veri sayısıdır.

3. Bulgular ve Tartışma

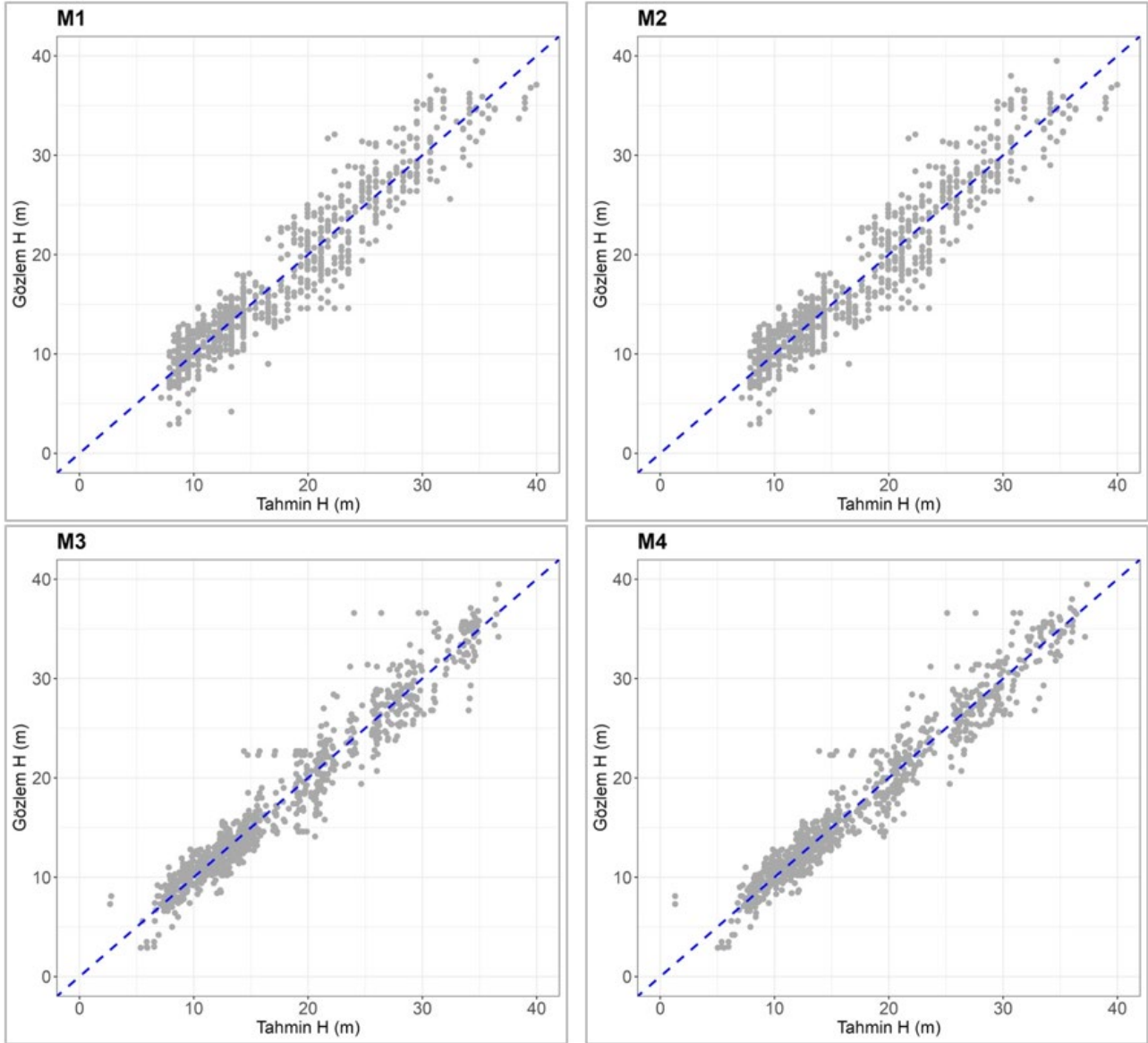
Geliştirilen H-D modellerine ilişkin parametre tahminleri ve başarı ölçüt değerleri Tablo 3'te verilmektedir. Tablo 3 incelendiğinde, H-D modellerine ait parametreler %5 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Ancak, M4'ün iki parametresi ağırlıklandırma faktörü modele dahil edilmediğinde anlamsız bulunmuştur. Tüm H-D modelleri boydaki varyansı iyi bir şekilde açıklayabilmiştir ($R^2 \geq 0.90$, $10\% < \text{KHO}\% < 20\%$). Ancak, R^2 ve KHO% ölçütüyle birlikte OMH% ölçütünü de dikkate aldığımızda genelleştirilmiş H-D modelleri tüm başarı koşullarını sağlamıştır ($\text{OMH}\% < 10$).

Tablo 3

Geliştirilen H-D modellerinin parametre değerleri ve performans sonuçları

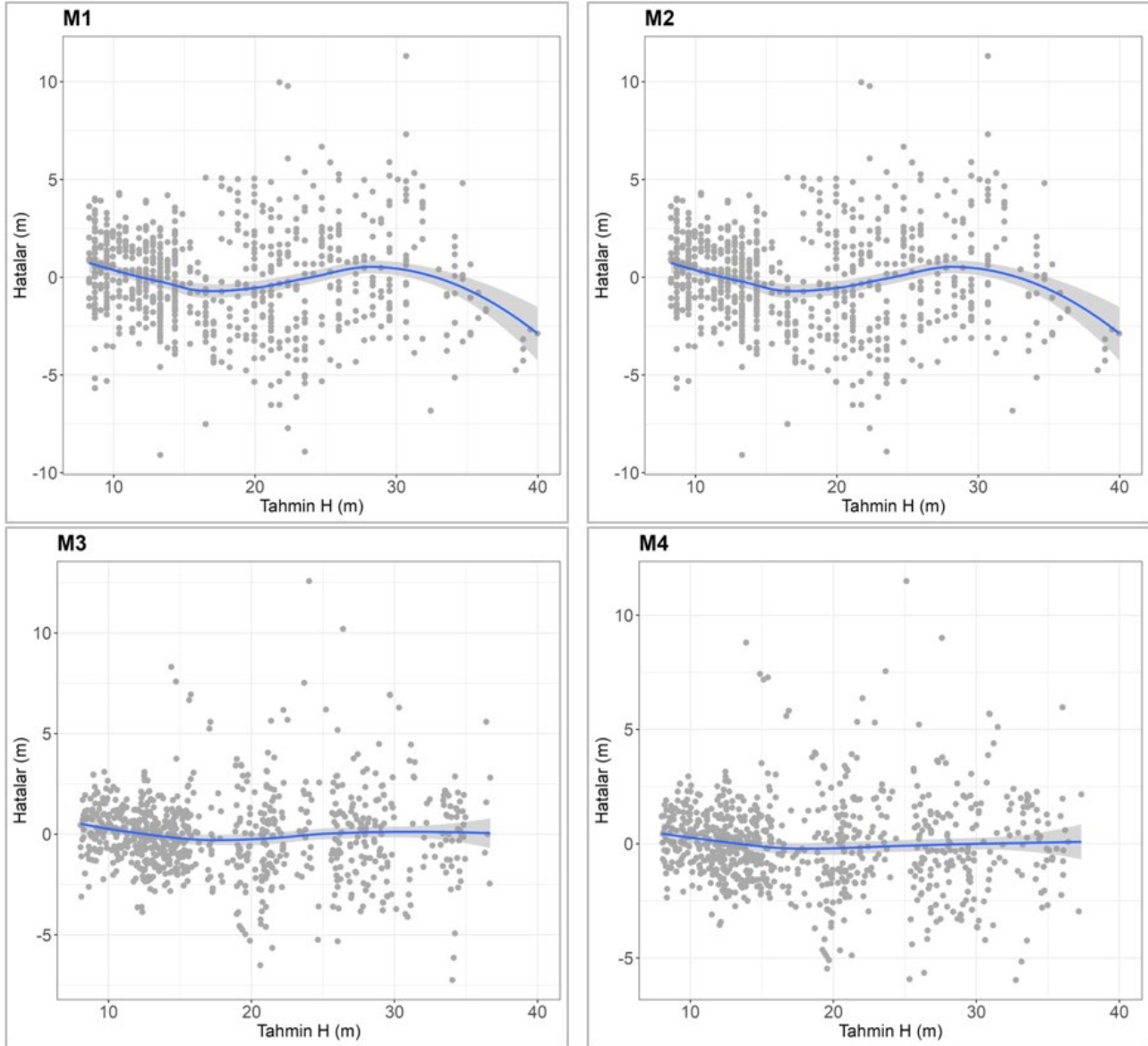
Model	Para- metre	Tahmin	Std.Hata	<i>t</i>	<i>p</i>	R^2	KHO%	OMH%	Ağırlık- landırma Faktörü
M1	b ₁	64,274	4,8471	13,26	<0,001	0,9	14,21	13,43	1/e ²
	b ₂	2,6547	0,0489	54,28	<0,001				
	b ₃	0,0254	0,0017	15,28	<0,001				
M2	b ₁	4,5196	0,1932	23,39	<0,001	0,9	14,21	13,43	1/e ²
	b ₂	0,0254	0,0017	15,28	<0,001				
	b ₃	2,6547	0,0489	54,28	<0,001				
M3	b ₁	1,9303	0,0226	85,55	<0,001	0,94	11,07	9,3	1/e ²
	b ₂	0,8675	0,0011	755,6	<0,001				
	b ₃	0,0558	0,0007	75,01	<0,001				
	b ₄	2,9251	0,0176	166,7	<0,001				
M4	b ₁	2,8411	0,0679	41,84	<0,001	0,94	10,68	8,97	1/e ²
	b ₂	0,8125	0,0019	429,91	<0,001				
	b ₃	0,0047	0,0003	13,73	<0,001				
	b ₄	0,1386	0,0019	74,46	<0,001				
	b ₅	0,3187	0,0011	286,2	<0,001				

Model sonuçları ayrıca tahmin-gözlem ve tahmin-hata grafikleri üzerinden analiz edilmiştir. Gözlem-tahmin grafikleri şekil 3'te ve tahmin-hata grafikleri ise Şekil 4'te verilmektedir. Şekil 3 incelendiğinde, genelleştirilmiş H-D modellerinin (M3 ve M4) tahminleri ile gözlemlenen boy değerlerinin daha iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



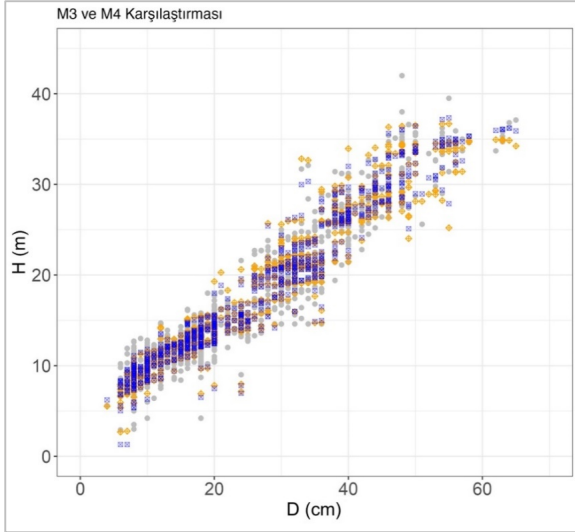
Şekil 3. Geliştirilen H-D modellerinin tahmin-gözlem dağılımı

Tahmin-hata grafikleri incelendiğinde (Şekil 4), basit H-D modellerinin hata dağılımında belirgin şekilde değişen varyans probleminin olduğu görülmektedir. Özellikle uzun boylu ağaçların boy tahmininde basit H-D modelleri önemli oranda yanlış tahminlere sebep olmuştur. Ancak, genelleştirilmiş H-D modellerinin hata dağılımındaki değişen varyans problemi gözlemlenmemiştir.



Şekil 4. Geliştirilen H-D modellerinin tahmin-hata dağılımları

Yukarıda verilen bulguları dikkate alınarak, M1 ve M2 modellerinin boy tahmininde kullanılamayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle sadece M3 ve M4 modellerine odaklanılarak bu modellerin gözlem değerleriyle nasıl bir uyum içinde olduğu ayrıca araştırılmıştır. Şekil 5'te gözlem değerleri ile birlikte M3 ve M4 modellerinin tahminleri verilmiştir. Şekil 5'e göre, her iki model benzer tahminler sunmuştur.



Şekil 5. M3 ve M4 modellerinin boy tahminleri (Gri renk: Gözlemler, Turuncu renk: M3 modeli ve Mor renk: M4 modelini göstermektedir)

Ülkemizde çeşitli ağaç türleri için H-D modelleri geliştirilmiştir. Çatal (2012) Isparta Göller yöresi Yalancı Akasya (*Robinia pseudoacacia* L.), Anadolu Karaçamı ve Toros Sediri (*Cedrus libani* A.Rich.) meşcereleri için, Carus ve Akguş (2018) Tarsus yöresi Fıstık Çamı (*Pinus pinea* L.) meşcereleri için, Özçelik ve Çapar (2014) Antalya yöresi doğal Kızılçam meşcereleri için, Seki ve Sakıcı (2022) Kastamonu Yöresi Anadolu Karaçamı (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe) meşcereleri için, Bolat vd., (2022) Çanakkale yöresi Macar Meşesi (*Quercus frainetto* Ten.) meşcereleri için, Sağlam ve Sakıcı (2025) Adana-Karaisali yöresi doğal Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) meşcereleri ve Şahin (2025) Artvin Yöresi Doğu Kayını (*Fagus orientalis* Lipsky.) meşcereleri için H-D modelleri geliştirmişlerdir. Tarihsel bir sıralama gözetilerek verilen yukarıdaki çalışmalar H-D modellemesinin güncelliğini koruduğunu ve ormancılık çalışmaları açısından önemli bir konu olduğunu göstermektedir.

HD modellemesinin orman yönetiminde çok önemli bir yeri olması nedeniyle bu çalışmada, Sinop Yöresi Sarıçam meşcereleri için H-D modellerinin geliştirilmesini amaçlamıştır. Ölçümü yapılmayan ağaç boylarını tahmin etmek amacıyla sadece çap ve çap ile birlikte bazı meşcere değişkenlerini içeren çeşitli H-D modelleri kıyaslanmıştır. Model sonuçları, H-D ilişkilerinin açıklanmasında meşcere özelliklerinin önemine dikkat çekmektedir. Meşcere özelliklerinin H-D modellerine dahil edilmesiyle, model başarısı önemli ölçüde iyileşmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular, literatürdeki birçok H-D çalışmanın sonuçlarını desteklemektedir. Sakıcı ve Sağlam (2025)'in çalışmasında sadece çapın fonksiyonu olan H-D modellerinin zayıf bir tahmin sunduğu (%RMSE>%20), genelleştirilmiş H-D modellerin ise iyi bir boy tahmini sunduğu (%RMSE<%10) açıkça gösterilmiştir. Benzer bulguları Şahin (2025)'in çalışmasında da görmek mümkündür. Meşcere özelliklerinin dahil edilmesiyle %RMSE değeri %23.02'den %1.0'a gerilemiştir. Bu sonucun olası nedeni olarak yüksek orandaki çap-boy değişkenliği gösterilebilir. Sağlam ve Sakıcı (2025) ile Atar ve Bolat (2025) sadece çapın fonksiyonu olan H-D modellerinin zayıf bir tahmin performansına sahip olmasının olası nedenlerine çeşitli açıklamalar getirmişlerdir. Sağlam ve Sakıcı (2025)'e göre H-D modellerindeki zayıf performansı meşcere ve yetişme ortamı koşullarındaki farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Atar ve Bolat (2025) ise zayıf model performansının ölçüm hatalarından kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir (McRoberts & Westfall, 2014; Zobel, 2024). Ancak bazı H-D verilerinde, meşcere değişkenlerini dikkate almadan başarılı, istatistiksel ölçütler açısından kabul edilebilir (%10<%RMSE<%20) modeller geliştirilebilmektedir (Carus & Akguş, 2018; Bolat vd., 2022). Bu sonucun olası nedenleri yukarıda verilen açıklamalar ışında değerlendirilebilir.

Başka bir açıdan değerlendirildiğinde, yanlış model formunun seçimi ya da veriye uygun olmayan modelin seçimi de H-D modellemesinde başarıyı önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Örneğin, Gompertz büyüme

modelinin literatürde birçok varyantı bulunmaktadır (Bolat vd., 2023; Tjørve & Tjørve, 2017). Bu nedenle hangi model varyantının, daha doğrusu veriye uygun model varyantının seçimi oldukça önemlidir. Bolat (2024) parametre etkili eğrisellik konusu üzerinden model formunun tahminler üzerindeki etkisini araştırmış ve yanlış model formunun %20'den daha fazla hatalı tahminlere sebep olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, Bolat (2023) farklı model varyantları arasında hangisinin veriye daha uygun olduğunu belirlemek amacıyla eğrisellik ölçütleri ve yeniden örneklem yönteminin kullanılmasını önermektedir (Fischer & Schönfelder, 2017). Yukarıda yapılan tartışmalar ışığında, H-D verisindeki değişkenliğin, ölçüm hatalarının ve seçilen model formunun H-D modellemesinde belirleyici etkisi olduğu görülmektedir.

Meşcere değişkenleri arasında, Dq, G ve H_{100} değişkenleri diğer değişkenlere (örn. ağaç sayısı ve ağaçlar arası rekabet indeksi, BAL gibi) kıyasla daha fazla ön plana çıkmaktadır (Mirkovich, 1958; Sharma & Parton, 2007). Bu değişkenlerin seçilmesinin olası nedenleri şu şekilde açıklanabilir; söz konusu değişkenler meşceredeki yapısal ve biyolojik çeşitlilik, verimlilik ve karbon depolama gibi önemli konular hakkında bilgiler vermektedir. Dq, meşcere yapılarının analizinde genel merkezi eğilimini göstermekte iken, G, meşcere sıklığı hakkında bilgi vermektedir. H_{100} ise meşcere verim gücünün bir göstergesi olup ağaçların çap ve boy gelişiminde oldukça etkili bir faktördür (Crecente-Campo vd., 2010; Özçelik vd., 2014). Bu çalışmada geliştirilen Genelleştirilmiş H-D modelleri (M3 ve M4) yukarıda açıklanan bilgileri destekler nitelikte sonuçlar üretmiştir. M3 ve M4 modelleri hatadaki varyansı minimize ederek, boydaki açıklanan varyansı önemli düzeyde iyileştirmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Sinop yöresi doğal Sarıçam meşcerelerinin etkili bir şekilde planlanması amacıyla ihtiyaç duyulan Boylanma Eğrisi Denklemleri (M3 ve M4) geliştirilmiştir. Geliştirilen H-D modelleri, boydaki varyansın büyük bir oranını (>%90) açıklamış ve homojen bir hata dağılımı göstermiştir. Söz konusu bulgular M3 ve M4'ün ağaç boyu tahmininde; dolayısıyla ağaç hacim tahmininde, yetiştirme ortamı verim gücünün ve karbon depolama potansiyelinin belirlenmesinde güvenle kullanılabileceğine işaret etmektedir. Bu bağlamda, güvenilir ağaç boyu tahminlerinin elde edilebilmesi amacıyla model performansı değerlendirilirken, hata ölçütleri ve hata davranışının analizi yanında model formunun veriye uygunluğu da dikkate alınabilir. Sonuç olarak, geliştirilen H-D modelleri Sinop yöresi doğal sarıçam meşcerelerinin planlanması aşamasında karar verme süreçlerine önemli katkılar sağlayabilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje No: OF211221D08. Desteklerinden dolayı Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimine teşekkür ederiz.

Yazar Katkıları

Hasan AKSOY: Verileri elde etmiş, çalışmayı tasarlamış, istatistiksel analizleri yapmış ve makaleyi yazmıştır. Alkan GÜNLÜ: Verileri elde etmiş, çalışmayı tasarlamış, istatistiksel analizleri yapmış ve makaleyi yazmıştır. Ferhat BOLAT: Çalışmayı tasarlamış, istatistiksel analizleri yapmış ve makaleyi yazmıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- 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.
- Aksoy, H., & Günlü, A. (2025). UAV and satellite-based prediction of aboveground biomass in scots pine stands: a comparative analysis of regression and neural network approaches. *Earth Science Informatics*, 18(1), 66. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01657-0>

- Aksoy, H. (2024). Estimation stand volume, basal area and quadratic mean diameter using Landsat 8 OLI and Sentinel-2 satellite image with different machine learning techniques. *Transactions in GIS*, 28(8), 2687-2704. <https://doi.org/10.1111/tgis.13265>
- Aksoy, H. (2022). *Sinop Orman Bölge Müdürlüğü safsarıçam meşcerelerinde farklı uzaktan algılama verileri kullanılarak bazı meşcere parametrelerinin modellenmesi* (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı).
- Archontoulis, S. V., & Miguez, F. E. (2015). Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agronomy Journal*, 107, 786–798.
- Atar, D., & Bolat, F. (2025). Height-Diameter allometry of Calabrian pine within Anamur, Southern Türkiye. *Forest and Wood Science*, 1, 1–9.
- Bolat, F. (2023). Gompertz büyüme modelinden türetilen farklı model formlarının bazı eğrisellik ve yanlılık ölçütleri ile değerlendirilmesi. Presented at the IV. International Applied Statistics Congress, Tokat Gaziosmanpaşa University, Sarajevo / Bosnia and Herzegovina, pp. 407–411. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10835021>
- Bolat, F. (2024). Antalya-Yeşilvadi yöresinde yayılış yapan kızılçam meşcereleri için yeni bir ağaç hacim modelinin geliştirilmesi. *Anatolian Journal of Forest Research*, 10, 108–113. <https://doi.org/10.53516/ajfr.1566540>
- 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, 199–220.
- Bolat, F., Ercanlı, İ., & Günlü, A. (2023). Yield of forests in Ankara Regional Directory of Forestry in Turkey: comparison of regression and artificial neural network models based on statistical and biological behaviors. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 16, 30–37. <https://doi.org/10.3832/ifer4116-015>
- Carus, S., & Akguş, Y. (2018). Tarsus yöresi fıstıkçamı (*Pinus pinea* L.) meşcereleri için çap-boy modellerinin geliştirilmesi. *Turkish Journal of Forestry*, 19, 1–8.
- 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, 92–96.
- Crecente-Campo, F., Tomé, M., Soares, P., & Diéguez-Aranda, U. (2010). A generalized nonlinear mixed-effects height–diameter model for *Eucalyptus globulus* L. in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 259, 943–952. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.036>
- FAO. (2020). Global forest resources assessment 2020. Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Fischer, C., & Schönfelder, E. (2017). A modified growth function with interpretable parameters applied to the age–height relationship of individual trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 47, 166–173.
- Gompertz, B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 513–583.
- Huang, S., Titus, S. J., & Wiens, D. P. (1992). Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 22, 1297–1307.
- Huang, S., S. J. Titus, Lakusta, T. W., & Held, R. J. (1994). Ecologically based individual tree height-diameter models for major Alberta tree species. Rep. No. 2, Alberta Environmental Protection, Land and Forest Service, Forest Management Division, Edmonton, AB, Canada. 27 p.
- Huang, S., Price, D., & Titus, S. J. (2000). Development of ecoregion-based height–diameter models for white spruce in boreal forests. *Forest ecology and management*, 129(1-3), 125-141.
- Lei, X., Peng, C., Wang, H., & Zhou, X. (2009). Individual height–diameter models for young black spruce (*Picea mariana*) and jack pine (*Pinus banksiana*) plantations in New Brunswick. *Forestry Chronicle*, 85, 43–56. <https://doi.org/10.5558/tfc85043-1>
- Mehtätalo, L., de-Miguel, S., & Gregoire, T. G. (2015). Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7), 826-837.

- McRoberts, R. E., & Westfall, J. A. (2014). Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. *Forest Science*, 60, 34–42. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-141>
- Mirkovich J. L. (1958). Normale visinske krive za chrast kitnak I bukvu v NR Srbiji. Zagreb. *Glasnik Sumarskog Fakulteta*, 13, 43–56.
- Nesha, M. K., Herold, M., De Sy, V., Duchelle, A. E., Martius, C., Branthomme, A., ... & Pekkarinen, A. (2021). An assessment of data sources, data quality and changes in national forest monitoring capacities in the Global Forest Resources Assessment 2005–2020. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd81b>.
- OGM, (2022). Sinop Bölge Orman Müdürlüğü, Orman Planlama Birimleri, Orman Yönetim Planları. Türkiye Cumhuriyeti, Orman Genel Müdürlüğü, Orman İdaresi ve Planlama Dairesi, Ankara.
- Özçelik, R., & Çapar, C. (2014). Antalya yöresi doğal kızılçam meşcereleri için genelleştirilmiş çap-boy modellerinin geliştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 15, 44–52.
- Özçelik, R., Yavuz, H., Karatepe, Y., Gürlevik, N., & Kırış, R. (2014). Development of ecoregion-based height-diameter models for 3 economically important tree species of southern Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38, 399–412.
- R Core Team, 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Richards, F. J. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10, 290–301. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
- Sağlam, F., & Sakıcı, O. (2024). Ecoregional height–diameter models for Scots pine in Türkiye. *Journal of Forestry Research*, 35, 103. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01757-z>
- Sağlam, F., & Sakıcı, O. E. (2025). Height-diameter relationships for *Pinus brutia* Ten. in the Adana-Karaisali Region of Türkiye. *Dendrobiology*, 93, 121–131. <https://doi.org/10.12657/denbio.093.009>
- Seki M., & Sakıcı, O.E. (2022). Ecoregion-based height-diameter models for Crimean pine. *Journal of Forest Research*, 27(1), 36–44, <https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1972511>
- Sharma, M., & Parton, J. (2007). Height–diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. *Forest Ecology and Management*, 249, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.006>
- Şahin, A. (2025). Nonlinear mixed-effect models for height-diameter relationships of Oriental beech trees in Artvin region, Eastern Black Sea Region of Türkiye. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/02827581.2025.2533378>
- Şenyurt, M. (2011). Batı Karadeniz yöresi sarıçam meşcerelerinde artım ve büyüme. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 215 s., İstanbul.
- Tjörve, K. M. C., & Tjörve, E. (2017). The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family. *Plos One*, 12, e0178691. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178691>
- Vancly JK (1994). Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford, UK, pp. 329.
- Zobel, J. M. (2024). Measurement error effects on estimates from linear and nonlinear regression whole-stand yield models. *Natural Resource Modeling*, 37, e12384. <https://doi.org/10.1111/nrm.12384>
- Yuancai, L., & Parresol, B. R. (2001). Remarks on Height-Diameter Modeling. Res. Note SE-10. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 8 p.