



Antalya yöresi doğal kızılçam meşcereleri için genelleştirilmiş çap-boy modellerinin geliştirilmesi

Ramazan Özçelik^{a*}, Caner Çapar^a

^a Süleyman Demirel Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Isparta

* İletişim yazarı/Corresponding author: ramazanozcelik@sdu.edu.tr, Geliş tarihi/Received: 26.12.2013, Kabul tarihi/Accepted: 17.02.2014

Özet: Kızılçam, ülkemizde orman ürünleri sanayisi için en önemli ticari ağaç türlerinden biridir. Bu çalışmada, Antalya Yöresi doğal kızılçam meşcereleri için göğüs çapı ve bazı meşcere özellikleri bağımsız değişken olarak kullanılarak çap (d)-boy (h) modelleri geliştirilmiştir. Çalışmada, toplam 16 adet genelleştirilmiş d - h modeli, Antalya Yöresi doğal kızılçam meşcerelerinden alınan 59 örnek alan verisi kullanılarak test edilmiştir. Bu amaçla örnek alan verileri iki gruba ayrılmış, bir kısmı (%85) model geliştirmek ve diğer bir kısmı da (%15) geliştirilen modellerin test edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin boy tahminlerindeki performansları, altı farklı ölçüt değerleri kullanılarak karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. En başarılı sonuçlar sırasıyla, Pienaar (1991-II), Sloboda vd. (1993-I) ve Sharma ve Parton (2007) tarafından geliştirilen modellerle elde edilmiştir. Bağımsız veri seti kullanılarak yapılan değerlendirmede de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kızılçam, Boy, Çap, Genelleştirilmiş modeller

Developing generalized height-diameter models for natural brutian pine stands in Antalya district

Abstract: Brutian pine is one of the important commercial species for forest products industry of Turkey. In this study, diameter (d)-height (h) models for natural Brutian pine stands in Antalya District were developed using the breast height diameter and some stand characteristics as regressors. In this study, a total of 16 models, the data used were obtained from 59 sample plots from natural Brutian pine stands in Antalya District, were tested. The available data for the species were split into two sets: the majority (%85) was used to estimate model parameters, and the remaining data (%15) were reserved to validate the models. The performance of the models was compared and evaluated with six model performance criteria. According to the model performance criteria, the best results were obtained with Pienaar (1991-II), Sloboda et al. (1993-I), and Sharma and Parton (2007) models, respectively. The similar results were obtained using independent dataset.

Keywords: Brutian pine, Height, Diameter, Generalized models

1. Giriş

Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) ekonomik ve ekolojik açıdan en önemli ağaç türlerinin başında gelmektedir. Son yapılan çalışmalara göre, 5,4 milyon hektar alan kaplamakta ve bu alan üzerindeki dikili ağaç serveti yaklaşık 270 milyon metreküptür (Anonim, 2006). Kızılçam ülkemizde orman ürünleri endüstrisinin en önemli hammadde kaynaklarından biridir.

Son yıllarda Türkiye, amenajman planlarının düzenlenmesinde, ekosistem tabanlı fonksiyonel planlama prensiplerine dayanan planlama yaklaşımlarını benimsemiş ve orman amenajman planlarına yansıtmaya başlamıştır. Ancak; bu tür planların yapılabilmesi için her ağaç türüne ilişkin büyüme ve hasılat modellerine ihtiyaç bulunmaktadır. Türkiye, ağaç türü çeşitliliği ve meşcere yapısı bakımından çok zengin bir ülke olmasına karşın, ağaç türlerinin farklı meşcere kuruluşlarındaki büyüme ve gelişme özelliklerine ilişkin temel altlıklardan yoksundur. Büyüme ve hasılat modellerinin en önemli unsurlarından birisi çap (d) - boy (h) modelleridir. Çap (d) - boy (h) denklemleri genel olarak ağacın göğüs çapı yardımı ile ağaç boyunun tahmin edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu tür

bilgiler, özellikle ağaç türü çeşitliliğinin zengin olduğu ve yetişme ortamı farklılıklarının yoğun olduğu ülkemizde daha da önem kazanmaktadır. Bu bilgiler, ekosistem tabanlı fonksiyonel planlama çalışmalarında, karar mekanizmaları için daha doğru hasılat tahminleri yapılabilmesi için gereklidir.

Orman kaynaklarının önemli özellikleri hakkında çok yönlü ve doğru bilgilerin bulunması odun kaynağının farklı yönetim ve yararlanma alternatiflerini değerlendirebilmek için hayati öneme sahiptir. Farklı ağaçlara ilişkin d - h modellerinin var olması büyüme ve hasılat tahminleri, bonitet endeksi, meşcerenin yapısal analizi, meşcerede çeşitli nedenlerle ortaya çıkmış zararların ortaya konması ve meşcere büyüme dinamiklerinin belirlenmesi için çok önemli ve yararlıdır. D - h denklemleri, orman amenajman planlarının düzenlenmesi yanında, ormanlık alanlardaki kayıp ağaçların boyu ve uygun biyokütle denklemleri yardımı ile ağaç biyokütlesinin tahmini amacıyla da kullanılabilir. Bu tür

Diğer yandan, ülkemizde özellikle son yıllarda odun kökenli orman ürünlerinin satışında dikili satış yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntem hem üretici olan orman

teşkilatı hem de alıcı olan orman ürünleri sanayii için ağaç hacimlerinin gerçeğe yakın biçimde tahminini gerekli kılmaktadır. Geliştirilecek olan $d-h$ denklemleri, ağaç hacim tahminlerinin hem daha kısa sürede hem de daha doğru yapılmasına yardımcı olacaktır (Jayaraman ve Zakrzewski, 2001).

Ağaç çapı, orman envanteri çalışmaları sırasında kolayca ölçülebilmesine rağmen, ağaç boyunun ölçümü nispeten daha zor ve masraflıdır. Bu nedenle, ağaç boyu genellikle göğüs çapı yardımı ile tahmin edilmektedir. Ancak, ülkemizde pek çok ağaç türü için $d-h$ ilişkilerini ortaya koyan denklemler geliştirilmemiştir. Değişik ülkelerde saf, aynı yaşlı, değişik yaşlı ve ağaçlandırma alanları için çok sayıda $d-h$ denklemi geliştirilmiştir. Ancak farklı ağaç türleri tarafından meydana getirilen orman kuruluşları ve meşcere yapıları her yerde homojen olmadığı için $d-h$ ilişkilerini açıklamak için çoğunlukla tek bir model yeterli olamamaktadır. Bu nedenle $d-h$ ilişkilerinde ortaya çıkan varyansı minimize edebilmek için her meşcere ve her ağaç türü için ayrı $d-h$ modellerinin geliştirilmesi gerektiği bildirilmektedir. Özellikle ülkemiz gibi, ağaç türü sayısının oldukça fazla ve ekolojik koşulların çok kısa mesafelerde büyük değişiklikler gösterdiği yerlerde bu zorunluluk kaçınılmaz bir hal almıştır.

Günümüze kadar değişik ülkelerde, farklı ağaç türleri için değişik formlarda $d-h$ modelleri geliştirilmiştir (Curtis, 1967; Wykoff vd., 1982; Larsen ve Hann, 1987; Wang ve Hann, 1988; Huang vd., 1992 ve 2000; Moore vd., 1996; Zhang, 1997; Lappi, 1997; Peng, 1999; Fang ve Bailey, 1998; Fededulegn vd., 1999; Soares ve Tome, 2002; Calama ve Montero, 2004; Gonda vd., 2004; Dieguez-Aranda vd., 2005; Castedo Dorado vd., 2006; Newton vd., 2007).

Arabatzis ve Burkhart (1992) ve Huang vd., (1992) $d-h$ modellerinin geliştirilmesinde "S" ya da "Konkav" şeklindeki eğrileri kullanmışlardır. Örneğin Huang (1999), Sharma ve Patron (2007) ve Saunders ve Wagner (2008) tarafından Chapman-Richards modeli; Colbert vd., (1992), Mehtatalo (2004) ve Lynch vd., (2005)'de Korf modeli gibi sigmoid tipi fonksiyonlar kullanılmıştır. Birçok bilim insanı tarafından ağaç $d-h$ ilişkilerinin modellenmesinde çoğunlukla uygun matematiksel özellikleri, parametrelerin biyolojik olarak açıklanabiliyor olması ve literatürdeki çalışmalarda tatmin edici sonuçları nedeniyle doğrusal olmayan Chapman-Richard büyüme fonksiyonu tercih edilmiştir (Pienaar ve Turnbull, 1973; Huang vd., 1992). Yine Lei ve Parresol (2001)'de; $d-h$ ilişkilerinin modellenmesinde, Bertalanffy-Richard ve Schnute fonksiyonlarının kullanılmasını tavsiye etmektedirler. Ancak Schnute modeline ilişkin denklem katsayılarının daha kolay bulunabilmesi nedeni ile Bertalanffy-Richards fonksiyonuna göre daha avantajlı olduğu da belirtilmektedir.

Ülkemizde de bu konuda yapılmış az sayıdaki çalışmada ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Sönmez (2008), Doğu Ladininde yaptığı çalışmada bireysel çap değerleri ve diğer meşcere parametrelerini kullanarak geliştirilmiş $d-h$ modelleri geliştirmiştir. Bu amaçla daha önceden geliştirilmiş 16 farklı $d-h$ modeli kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler, aynı yaşlı, saf doğu ladin meşcerelerindeki 440 ağaçtan elde edilmiştir. Toplanan verilerden 406 tanesi modelin geliştirilmesi için kullanılırken kalan veriler modelin doğrulanması için ayrılmıştır. Çalışma sonucunda denenen modeller içerisinde 8 tanesinin iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Mısır (2010) tarafından yapılan çalışmada ise; titrek kavak

için göğüs çapı ve diğer bazı meşcere parametreleri yardımı ile geliştirilmiş $d-h$ modelleri geliştirilmiştir. Bu amaçla 11 adet geliştirilmiş $d-h$ modeli test edilmiştir. Gerek model geliştirme verileri, gerekse test verileri ile yapılan değerlendirmelerde en başarılı sonuçlar, Schnute (1981) modeli ile elde edilmiştir. Diamantopoulou ve Özçelik (2012) tarafından yapılan çalışmada ise, Akdeniz bölgesindeki Kızılcım, Sedir ve Toros Göknaarı türleri için $d-h$ ilişkilerini ortaya koyan altı farklı doğrusal olmayan model denenmiştir. Gompertz ve Schnute modellerinin denenen diğer modellere göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

Yukarıda da belirtildiği gibi, Kızılcım ülkemizin önemli asli ağaç türlerinden birisidir. Özellikle Akdeniz Bölgesinde ve Antalya Orman Bölge Müdürlüğü içerisinde oldukça geniş bir yayılı alanına sahiptir. Bu alanlarda yapılacak ekosistem tabanlı fonksiyonel planlama çalışmalarının başarılı olabilmesi ve meşcere dinamiklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için $d-h$ ilişkileri gibi önemli bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada Antalya Yöresi doğal kızılçam meşcereleri için $d-h$ modellerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla değişik ülkelerde yaygın olarak kullanılan 16 adet geliştirilmiş $d-h$ modeli test edilmiş ve hangi modelin doğal kızılçam meşcereleri için daha uygun olduğu farklı ölçüt değerleri kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

Bu çalışma için gerekli veriler, Antalya Orman Bölge Müdürlüğü, Antalya Orman İşletme Müdürlüğü, Merkez İşletme Şefliği, Kumluca Orman İşletme Müdürlüğü Merkez İşletme Şefliği ve Korkuteli Orman İşletme Müdürlüğü Hacıbekar Orman İşletme Şefliği doğal kızılçam meşcerelerinden toplanmıştır. Çalışma kapsamında doğal kızılçam meşcerelerinin farklı gelişme çağı ve kapalılık sınıflarının temsil edilmesine dikkat edilmiştir. Bu amaçla, çalışma alanında mevcut tüm çap ve boy sınıflarını temsil edecek ve her örnek alan içerisine en az 30 adet ağaç girecek şekilde 400 m² ile 1600 m² arasında değişen büyüklükte örnek alanlar alınmıştır. Araziye aplikasyonunun kolay olması nedeniyle daire şeklinde örnek alanlar tercih edilmiştir. Örnek ağaçlar seçilirken çatal gövdelerin, tepesi kırık ağaçların ve gövde formu bozuk bireyler alınmamasına azami özen gösterilmiştir. Tüm çalışma alanında 59 adet örnek alanda, toplam 2087 ağaç üzerinde $d-h$ ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Örnek ağaçlarda göğüs çaplarının ölçümü, 0.01 cm hassasiyete sahip dijital çap ölçer yardımıyla, boy ölçümleri ise Vertex IV kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnek alan verilerinin yaklaşık %85'i (50 örnek alan) model geliştirmek için geri kalan yaklaşık %15'lik kısmı (9 örnek alan) ise geliştirilen modellerin test edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu verilere ilişkin tanımlayıcı istatistikler Çizelge 1 ve 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Genelleştirilmiş *d-h* modellerini geliştirmek ve test etmek amacıyla kullanılacak örnek ağaçlara ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişkenler	Model geliştirme verileri (n = 1725)				Model test verileri (n = 362)			
	Ortalama	Min.	Max.	S.D.	Ortalama	Min.	Max.	S.D.
D (cm)	29.5	4.0	62.0	9.8	23.6	5.0	55.0	9.8
H (m)	16.5	3.6	28.1	4.9	14.7	6.0	27.0	5.2

D: Göğüs çapı, H: toplam ağaç boyu

Çizelge 2. Genelleştirilmiş *d-h* modellerini geliştirmek ve test etmek amacıyla kullanılacak örnek alanlara ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişkenler	Model geliştirme verileri (n = 50)				Model test verileri (n = 9)			
	Ortalama	Min.	Max.	S.D.	Ortalama	Min.	Max.	S.D.
Yaş (yıl)	46.0	15.0	82.0	15.9	42.0	25.0	64.0	11.9
G (m ² ha ⁻¹)	32.7	12.4	58.4	11.0	35.6	14.4	48.9	12.3
N (a.sayısı)	474	211	975	253.5	1114	338	2976	1009
H ₀ (m)	16.6	7.3	23.0	3.9	14.7	7.6	21.6	4.7
D ₀ (m)	29.3	12.6	46.1	6.3	23.6	13.2	34.6	8.0
D _g (cm)	30.7	13.0	46.8	6.3	24.3	14.3	35.8	7.9

G: göğüs yüzeyi, N: hektardaki ağaç sayısı; H₀: dominant boy; D₀: dominant çap (hektarda en kalın 100 ağacın ortalama boyu ve çapına karşılık gelen örnek alan büyüklüğüne göre belirlenmiştir); D_g: kuadratik orta çap

2.2. Yöntem

D-h ilişkileri meşcereden meşçereye hatta aynı meşçere içerisinde zaman içerisinde değişkenlikler gösterebilmektedir (Curtis, 1967). Bu yüzden tek bir *d-h* eğrisi ile bir orman ya da meşçere içerisindeki *d-h* ilişkileri bakımından bütün olasılıkları tahmin etmek mümkün değildir (Castedo Dorado vd., 2006). Bu nedenle bir meşçere içerisindeki *d-h* ilişkileri bakımından ortaya çıkan varyansı minimuma indirebilmek için uygulanabilecek en uygun yöntem modele her meşçerenin kendine özel meşçere dinamiklerini katmak ya da model içerisinde meşçere özelliklerine yer vermektir (Larsen ve Hann, 1987; Soares ve Tome, 2002; Temesgen ve Gadow, 2004; Lopez-Sanchez vd., 2003; Sharma ve Zhang, 2004; Mısır, 2010). *D-h* ilişkileri özellikle meşçere yapısı, yetişme ortamı verimliliği ve konu ağacın meşçere içindeki konumu ile yakından ilişkili olduğu görülmüştür (Temesgen ve Gadow, 2004; Castedo Dorado vd., 2006; Sharma ve Patron, 2007; Trincado vd., 2007; Adame vd., 2008). Bu nedenle *d-h* modelleri geliştirilirken meşçere yapısı, yetişme ortamı verimliliğine ilişkin parametrelerinde ölçümünü içeren modellere genel olarak "genelleştirilmiş *d-h* modelleri" ismi verilmektedir. İlk genelleştirilmiş *d-h* modeli Wiedemann (1936) tarafından geliştirilmiştir. Günümüze kadar Avrupa (Nagel, 1991; Hui ve Gadow, 1993; Soares ve Tome, 2002; Lopez-Sanchez vd., 2003) ve Amerika'da (Krumland ve Wensel, 1988; Parresol, 1992; Larsen ve Hann, 1987; Zhang vd., 2002; Temesgen ve Gadow, 2004; Sharma ve Parton, 2007;) pek çok genelleştirilmiş *d-h* modeli denemiş olmasının rağmen ülkemizde bu türden çalışmaların sayısı yok denecek kadar azdır (Sönmez, 2009; Mısır, 2010). Bu çalışmada doğal kızılçam meşcerelerindeki *d-h* ilişkilerinin ortaya konması amacıyla, 16 farklı genelleştirilmiş modelinin test edilmesi amaçlanmıştır. Bu modeller aşağıda Çizelge 3'de verilmiştir.

2.3. Model değerlendirme ölçütleri

Bu çalışmada; geliştirilen *d-h* modellerinin tahmin performanslarını değerlendirmek amacıyla, altı farklı ölçüt kullanılmıştır. Bu performans kriterleri sırasıyla; ortalama mutlak hata (OMH), maksimum mutlak hata (MMH), hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE), korelasyon katsayısı (R), ortalama hata (E), Akaike Bilgi ölçütü (AIC)'dir. Bu ölçütler içerisinde RMSE yapılan tahminlerin

doğruluğunu, R tahmin edilen değerle ölçülen değer arasındaki nisbi korelasyonu, E yapılan tahminlerdeki tutarlılığı, AIC ise farklı modeller arasında en başarılısının seçimi için kullanılmıştır (Akaike, 1974). En iyi modelin belirlenmesinde, en küçük AAE, MAE, RMSE, E ve AIC değerlerine sahip olması yanında en yüksek R değerine sahip olması ölçütleri esas alınmıştır. Bu performans ölçütlerine ilişkin formüller aşağıda Çizelge 4'de verilmiştir.

Buna ilaveten geliştirilen modellerin performansları grafiksel olarak da değerlendirilmiştir. Bu amaçla iki farklı grafiksel gösterim kullanılmıştır. Birincisinde; ortalama hata değerlerinin tahmin edilen boy değerlerine göre dağılımı; ikincisinde ise; tahmin edilen boy değerleri ile ölçülen boy değerlerinin 1:1 dağılımı gösterilmiştir.

3. Bulgular ve tartışma

Çizelge 5'te çalışma kapsamında değerlendirilen 16 farklı genelleştirilmiş doğrusal olmayan *d-h* modeli için elde edilen parametre tahminleri verilmiştir. Test edilen bütün modeller için model parametreleri 0.001 önem düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Antalya Yöresi doğal kızılçam meşcereleri için model geliştirme verileri kullanılarak 16 farklı *d-h* modeli için elde edilen ölçüt değerleri Çizelge 6'da verilmiştir. Test edilen modeller için elde edilen ölçüt değerleri incelendiğinde; modellere ilişkin korelasyon katsayısı değerlerinin Cox (1994) hariç 0.85'ten daha yüksek olduğu, dolayısı ile tüm modellerde *d-h* ilişkilerinin ve bu ilişkinin meşçere özellikleri ile de yüksek bir korelasyon gösterdiği söylenebilir.

Çalışma kapsamında kullanılan model sayısı fazla olduğundan, hangi modelin *d-h* ilişkilerini açıklamada daha başarılı olduğunu ortaya koyabilmek için yukarıda belirtilen esaslar göz önüne alınarak tüm modeller için bir sıralama yapılmış ve sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Bu sıralama yönteminde, AAE, MAE, RMSE, E ve AIC değerleri bakımından en küçük, R için ise en büyük olana 1 den başlayarak sayısal değerler verilmiştir. Her bir model için elde edilen sıralama değerleri toplandığında, en küçük değere sahip olan model en iyi model olarak belirlenmiştir. Buna ilişkin sonuçlar Çizelge 7'de verilmiştir. Çizelge 7'deki sonuçlar incelendiğinde, Antalya yöresi doğal kızılçam meşcereleri için denenen 16 *d-h* modeli içinde en başarılı modelin Sharma ve Parton (2007) modeli olduğu, bu modeli sırasıyla Pienaar (1991-II) ve Richards (1959)

modellerinin izlediği görülmüştür. En başarısız sonuçların ise, Gaffrey (1988), Monnes (1982) ve Cox (1994) tarafından geliştirilen modeller ile elde edildiği görülmüştür.

Model geliştirme verileri kullanılarak doğal kızılçam meşcereleri için elde edilen sonuçlar grafik olarak da Şekil 1'de verilmiştir. Burada, sadece en iyi ve en kötü üç model için hataların tahmin edilen çap değerlerine göre dağılımı verilmiştir. Şekil 1'in incelenmesinden de görüleceği gibi, en başarılı modeller ile en başarısız modeller için elde edilen hata dağılımları grupların kendi içerisinde benzer dağılımı göstermektedir. Genel olarak hata miktarlarının başarılı modellerde, boy değerlerinin artmasına bağlı olarak bir artış

gösterdiği görülmemektedir. Genelleştirilmiş $d-h$ modelleri ile elde edilen hata dağılımlarına ilişkin varyasyonun nispeten sabit olduğu söylenebilir. Genel olarak, bir modelin başarılı olup olmadığına karar verilirken hata miktarının küçük olması yanı sıra elde edilen hatalarında belirli ve sabit bir varyansa sahip olması şartı da aranmaktadır. Bu bakımdan değerlendirme yapıldığında her ne kadar Sharma ve Parton (2007) modeli en başarılı model olarak belirlense de yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı Pienaar (1991-I) ve Richards (1959) modellerinin de $d-h$ ilişkilerini başarı ile modelleyebildiği söylenebilir.

Cizelge 3. $D-h$ modellerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılan doğrusal olmayan genelleştirilmiş regresyon modelleri

Cox (1994)	$h = e^{(b_0 + b_1 \ln d_g + b_2 \ln N + b_3 \sqrt{d})}$	(1)
Monnes (1982)	$h = 1.3 + \left[b_0 \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right) + \left(\frac{1}{H_0 - 1.3} \right)^{1/3} \right]^{-3}$	(2)
Cañadas et al. (1999-I)	$h = 1.3 + (H_0 - 1.3) \cdot \left(\frac{d}{D_0} \right)^{b_0}$	(3)
Cañadas et al. (1999-II)	$h = 1.3 + \frac{D_0}{H_0 - 1.3} + b_0 \cdot (D_0 - d)$	(4)
Gaffrey (1988)	$h = 1.3 + (H_0 - 1.3) \cdot e^{b_0 \cdot \left(1 - \frac{d_g}{d} \right) + b_1 \cdot \left(\frac{1}{d_g} - \frac{1}{d} \right)}$	(5)
Sloboda et al. (1993)	$h = 1.3 + (H_m - 1.3) \cdot e^{b_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_g} \right)} \cdot e^{b_1 \cdot \left(\frac{d}{d_g} - \frac{1}{d} \right)}$	(6)
Harrison et al (1986)	$h = H_0 \cdot \left(1 + b_0 \cdot e^{b_1 \cdot H_0} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{b_2 \cdot d}{H_0}} \right)$	(7)
Pienaar (1991-I)	$h = b_0 \cdot H_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{b_1 \cdot d}{d_g}} \right)^{b_2}$	(8)
Pienaar (1991-II)	$h = b_0 \cdot H_0 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{b_1 \cdot d}{D_0}\right) \right)^{b_2}$	(9)
Mirkovich (1958)	$h = 1.3 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 - b_2 \cdot d_g) \cdot e^{-b_3/d}$	(10)
Schröder and Alvarez (2001)	$h = 1.3 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 - b_2 \cdot d_g + b_3 \cdot G) \cdot e^{-b_4/\sqrt{d}}$	(11)
Tome (1989)	$h = H_0 \cdot e^{(b_0 + b_1 \cdot H_0 + b_2 \cdot \frac{N}{1000} + b_3 \cdot t) \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right)}$	(12)
Sloboda et al. (1991-I)	$h = 1.3 + (H_0 - 1.3) \cdot \exp\left(b_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{D_0} \right)\right) \cdot \exp\left(b_1 \cdot \left(\frac{d}{D_0} - \frac{1}{d} \right)\right)$	(13)
Sharma and Zhang (2004)	$h = 1.3 + b_0 \cdot G^{b_1} \cdot \left(1 - \exp(-b_2 \cdot d) \right)$	(14)
Sharma and Parton (2007)	$h = 1.3 + b_0 \cdot H_0^{b_1} \cdot \left(1 - \exp(-b_2 \cdot D_g^{-b_3} \cdot d) \right)^{b_4}$	(15)
Richards (1959)	$h = 1.3 + b_0 \cdot H_0^{b_1} \cdot \left(1 - \exp(-b_2 \cdot (D_0)^{b_3} \cdot d) \right)^{b_4}$	(16)

d: Göğüs çapı, h: toplam ağaç boyu, G: göğüs yüzeyi, N: hektardaki ağaç sayısı; H₀: dominant boy; D₀: dominant çap; D_m: meşcerenin ortalama çapı; H_m: Meşcerenin ortalama boyu; D_g: meşcerenin karelik orta çapı

Cizelge 4. Geliştirilen $d-h$ modelleri test etmek için kullanılan ölçütler

$OMH = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y_i - \hat{y}_i }{n}$	(17)
$MMH = \max(y_i - \hat{y}_i)$	(18)
$R = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(y_i - \bar{y}) \cdot (\hat{y}_i - \bar{y}_{est})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \bar{y})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (\hat{y}_i - \bar{y}_{est})^2}}$	(19)
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$	(20)
$E = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)}{n}$	(21)
$AIC = n \ln(RMSE) + 2p$	(22)

Burada y_i , \hat{y}_i and \bar{y} sırasıyla ölçülen, tahmin edilen ve bağımlı değişkenin ortalama değerini ifade etmektedir. \bar{y}_{est} tahmin edilen değerlerin ortalamasını, n model geliştirmek için kullanılan gözlemlerin toplam sayısını; p modeldeki parametre sayısını ve \ln ise doğal logaritmayı ifade etmektedir.

Çizelge 5. Geliştirilen genelleştirilmiş *d-h* modellerine ilişkin parametre tahminleri

Model	Parametre				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
Cox (1994)	0.2959	0.2615	0.0976	0.1878	
Monnes (1982)	2.6509				
Cañadas vd. (1999-I)	0.7003				
Cañadas vd. (1999-II)	-0.0174				
Gaffrey (1988)	0.5946	-2.5284			
Sloboda vd. (1993-I)	-0.4609	-0.0039			
Sloboda vd. (1993-II)	-0.7875	-0.1015			
Harrison vd. (1986)	-0.7914	-0.1202	1.4666		
Pienaar (1991-I)	1.0292	1.9259	1.3805		
Pienaar (1991-II)	1.4095	1.2383	0.9329		
Mirkovich (1958)	4.5114	1.4377	0.3408	12.6122	
Schröder ve Álvarez (2001)	4.2695	1.4466	0.3187	-0.0186	25.2274
Sharma ve Zhang (2004)	15.8205	0.1273	0.0344		
Sharma ve Parton (2007)	0.4431	1.2514	0.0189	0.4720	1.5407
Richards (1959)	0.5989	1.2473	1.0629	-1.0980	0.6522
Tome (1989)	-56.7861	0.6645	42.1952	0.0284	

Çizelge 6. Geliştirilen *d-h* modellerine ilişkin ölçüt değerleri

Model Adı	OMH	MMH	RMSE	E	R	AIC
Sharma ve Parton (2007)	1.7872	10.0473	2.3149	0.0042	0.8838	1457.89
Pienaar (1991-II)	1.5762	8.9942	2.1046	0.0266	0.9051	1289.65
Richards (1959)	1.8042	11.1160	2.3343	-0.0055	0.8817	1472.29
Sloboda vd. (1993-I)	1.7108	12.8182	2.3151	-0.0129	0.8836	1452.09
Pienaar (1991-I)	1.8357	9.9347	2.3581	-0.0752	0.8813	1485.78
Mirkovich (1958)	1.8429	10.5215	2.3921	0.0174	0.8754	1512.49
Schröder and Álvarez (2001)	1.8429	10.5216	2.3921	0.0174	0.8754	1512.49
Sloboda vd. (1993-II)	1.9249	11.8133	2.4619	-0.0900	0.8698	1558.09
Harrison vd. (1986)	2.0531	10.9448	2.5895	0.0205	0.8522	1647.27
Cañadas vd. (1999-II)	2.0021	12.7819	2.6978	-0.8835	0.8701	1713.92
Tome (1989)	2.0276	13.0033	2.7197	-0.8696	0.8745	1733.91
Sharma ve Zhang (2004)	2.8937	10.2359	3.5088	0.0139	0.7047	2171.37
Cañadas vd. (1999-I)	2.0141	13.1784	2.7069	-0.9194	0.8653	1719.78
Cox (1994)	2.9546	10.4568	3.5615	-0.0161	0.6941	2199.06
Monnes (1982)	2.1206	12.8191	2.8307	-0.9288	0.8592	1796.88
Gaffrey (1988)	3.6467	14.5000	4.3128	-3.5408	0.8776	2525.23

Çizelge 7. Geliştirilen modellerin ölçütler bakımından sıralaması

Model Adı	AAE	MAE	RMSE	E	R	AIC	Toplam*
Sharma ve Parton (2007)	3	3	2	1	2	3	14(1)
Pienaar (1991-I)	1	1	1	10	1	1	15(2)
Richards (1959)	4	10	4	2	4	4	28(3)
Sloboda vd. (1993-I)	2	16	3	3	3	2	29(4)
Pienaar (1991-II)	5	2	5	11	5	5	33(5)
Mirkovich (1958)	7	6	7	7	8	6	41(6)
Schröder and Álvarez (2001)	6	8	6	8	7	7	42(7)
Sloboda vd. (1993-II)	9	11	8	12	11	8	59(8)
Harrison vd. (1986)	16	9	9	9	18	9	70(9)
Cañadas vd. (1999-II)	10	15	10	15	10	10	70(9)
Tome (1989)	13	18	13	14	9	14	81(10)
Sharma ve Zhang (2004)	19	4	18	4	19	18	82(11)
Cañadas vd. (1999-I)	12	20	12	16	14	11	85(12)
Cox (1994)	20	5	19	5	20	19	88(13)
Monnes (1982)	18	17	17	19	16	17	104(14)
Gaffrey (1988)	21	21	20	21	6	20	109(15)

*Parantez içindeki değerler modellerin başarı sırasını göstermektedir.

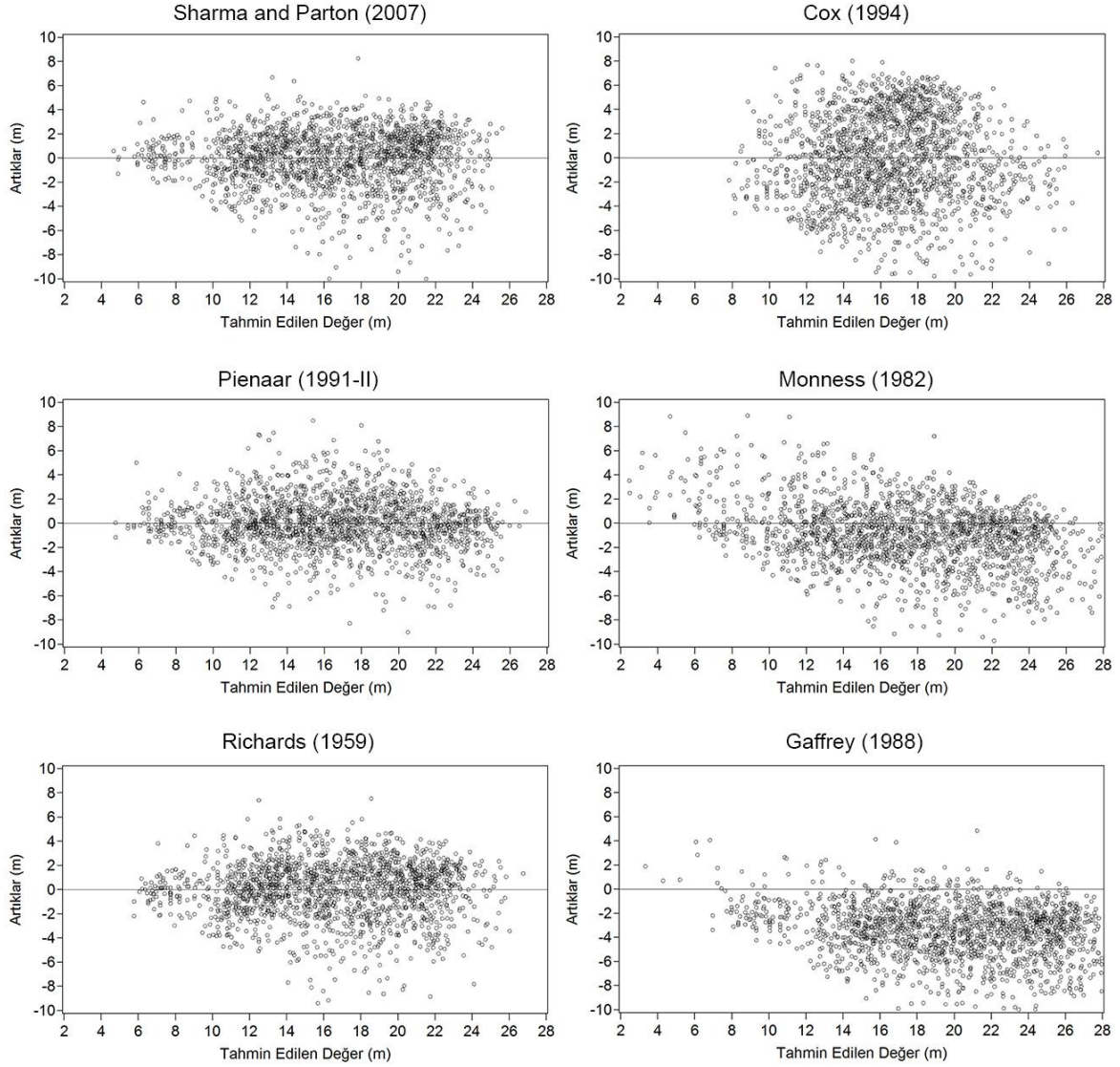
Doğal kızılçam meşcereleri için geliştirilen *d-h* modelleri bağımsız veri seti kullanılarak da test edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 8'de verilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde de görüleceği gibi test edilen doğrusal

olmayan *d-h* modelleri, model geliştirme verilerinden çok farklı sonuçlar üretmemiştir.

Çizelge 9'da ise beş farklı model için elde edilen ölçüt değerleri daha önce de belirtildiği gibi bir sıralamaya tabi

tutulmuş ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde de görüleceği gibi, Sloboda vd. (1993-I) modeli en başarılı model olarak elde edilmiştir. Bu modeli sırasıyla Pienaar (1991-II), Sharma ve Parton (2007),

Pienaar (1991-I) modelleri izlemiştir. Bu beş model içerisinde ise, en kötü sonuçlar Richards (1959) modeli ile elde edilmiştir.



Şekil 1. Geliştirilen $d-h$ modelleriyle elde edilen hata değerlerinin tahmin edilen boy değerlerine göre dağılımı

Çizelge 8. Bağımsız veri seti kullanılarak geliştirilen doğrusal olmayan genelleştirilmiş modellerin test edilmesi

Model Adı	AAE	MAE	RMSE	E	R	AIC
Pienaar (1991-II)	1.5264	8.9942	2.0407	0.0407	0.9144	1494.61
Sloboda vd. (1993-I)	1.6354	12.8182	2.2158	0.0155	0.8976	1664.44
Sharma ve Parton (2007)	1.7513	10.4726	2.2619	0.1374	0.8944	1713.44
Pienaar (1991-I)	1.7682	9.9347	2.2765	0.0202	0.8922	1722.87
Richards (1959)	1.7807	11.1160	2.2969	0.1133	0.8909	1745.47

Çizelge 9. Bağımsız veri seti kullanılarak elde edilen ölçüt sıralaması

Model Adı	AAE	MAE	RMSE	E	R	AIC	Toplam*
Sloboda vd. (1993-I)	1	4	1	2	1	1	10(1)
Pienaar (1991-II)	2	2	2	1	2	2	11(2)
Sharma ve Parton (2007)	4	5	4	5	3	5	26(5)
Pienaar (1991-I)	3	1	3	3	4	4	18(3)
Richards (1959)	5	3	5	4	5	3	25(4)

*Parantez içindeki değerler modellerin başarı sırasını göstermektedir.

Test edilen modeller için, bağımsız veri seti kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Bu grafiklerde sırasıyla en başarılı modeller olan Pienaar (1991-II), Sloboda vd. (1991-I) ve Sharma ve Parton (2007) modelleri için ölçülen ağaç boyuna karşılık modelden tahmin edilen ağaç boyunun örtüşme durumları verilmiştir. Şekil 2'den de görüleceği gibi, üç model içinde nispeten benzer sonuçlar elde edilmiştir. Burada da Şekil 1'dekine benzer bir durum söz konusudur. Tahmin edilen boy değerleri ile ölçülen boy değerlerinin örtüşme oranı boy değeri büyüdükçe azalmaktadır.

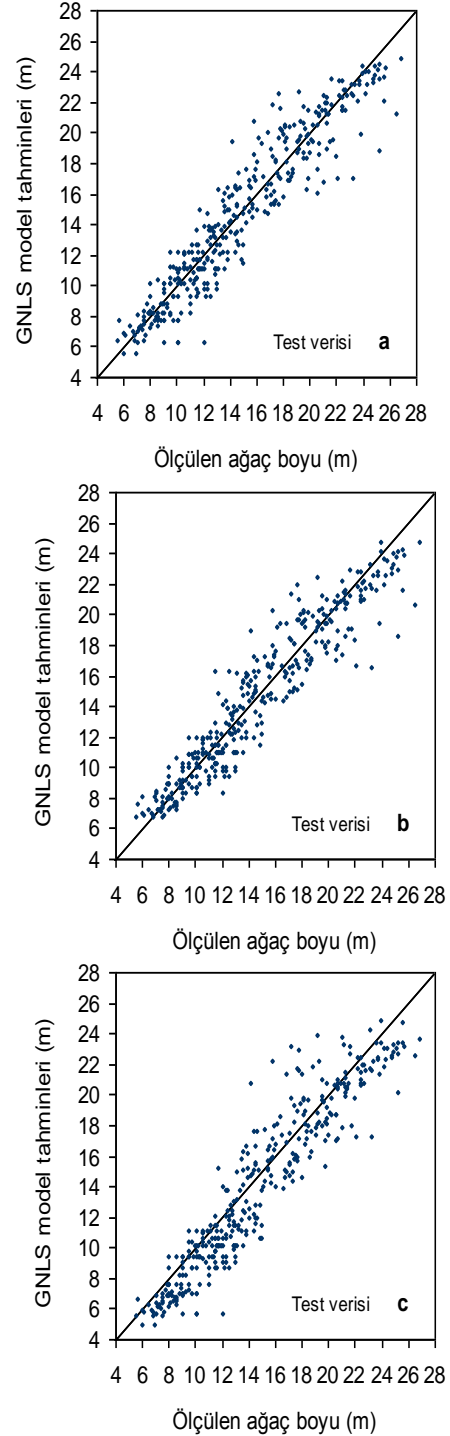
Son olarak önerilen en başarılı geliştirilmiş *d-h* modelleri tüm örnek alan verileri birlikte kullanılarak yeniden parametre tahminleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 10'da verilmiştir. Bu parametreler kullanılarak, Antalya Yöresi doğal kızılçam meşcereleri için güvenilir boy tahminleri yapılabilir.

4. Sonuçlar ve öneriler

D-h modelleri, ormancılık çalışmalarında büyüme ve hasılat modellerinin geliştirilmesinde en temel bileşenlerden birisidir. Bu modeller yardımı ile pek çok ağaç ve meşcere parametresi kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmada, Antalya Yöresi doğal kızılçam meşcereleri için *d-h* modellerinin geliştirilmesi amacıyla, 16 farklı geliştirilmiş *d-h* modeli test edilmiştir. Bu amaçla 59 adet örnek alan alınmış ve 2087 ağaç üzerinde detaylı *d-h* ölçümleri yapılmıştır. Altı farklı ölçüt değeri kullanılarak yapılan karşılaştırmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Test edilen modeller arasında en başarılı sonuçlar; Pienaar (1991-II), Sloboda vd. (1993-I) ve Sharma ve Parton (2007) tarafından geliştirilmiş modeller ile; en başarısız sonuçlar ise Cox (1994), Gaffrey (1988) ve Monnes (1982) tarafından geliştirilen modellerle elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatür bilgileri ile uyumlu olmakla birlikte, bu çalışmada başarısız olan bazı modeller diğer çalışmalarda başarılı modeller arasında yer almıştır. Bu sonuçlar ağaç türünün biyolojisi ve yöresel koşulların farklılıklarından kaynaklanabilmektedir. Geliştirilmiş modeller, model yapılarında dominant boy, dominant çap, meşcere kuadratik orta çapı ve meşcere göğüs yüzeyi gibi extra değişkenleri de bulundurması nedeniyle geleneksel regresyon modellerine göre meşcere içerisindeki ağaçlara ilişkin *d-h* ilişkilerini açıklamada daha başarılıdır. Yapılan ön çalışmalarda, geliştirilmiş *d-h* modellerinin geleneksel doğrusal olmayan *d-h* modellerine göre doğal kızılçam meşcerelerindeki *d-h* ilişkilerinin modellenmesinde daha başarılı olduğu görülmüştür (Çapar, 2013). Model performanslarının değerlendirilmesinde ölçüt değerler ile birlikte grafiksel gösterimlerde kullanılmıştır. Bazı durumlarda grafiksel gösterim daha yararlı sonuçlar verebilmektedir. Çünkü geliştirilen *d-h* modelinin değişik çap değerleri için boy tahminlerinin nasıl değiştiği daha net olarak görülebilmektedir. Modellere ilişkin hata dağılım grafikleri incelendiğinde; hata dağılımının değişik çap

değerleri için nispeten homojen olduğu ve bu dağılımın sabit bir varyansa sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 2. Ölçülen ağaç boylarına karşılık geliştirilmiş doğrusal olmayan modeller ile tahmin edile boy değerleri arasındaki ilişki. a- Pienaar (1991-I), b-Sloboda vd., (1993-I), c- Sharma ve Parton (2007).

Çizelge 10. Tüm veri seti kullanılarak geliştirilmiş *d-h* modellerine ilişkin olarak elde edilen parametre tahminleri

Model	Parametre				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
Sloboda vd. (1993-I)	-0.4535	-0.0023			
Pienaar (1991-II)	1.7387	0.3094	0.4934		
Sharma ve Parton (2007)	0.5111	1.2060	0.0173	0.5022	1.4867
Pienaar (1991-I)	1.0333	1.8592	1.2912		
Richards (1959)	0.7953	1.1924	0.7884	-1.1272	0.5692

Sonuç olarak, Antalya Yöresi doğal kızılçam meşcereleri için en uygun geliştirilmiş *d-h* modelleri belirlenmiştir. Bu modeller, meşcere yapısını, büyüme ve gelişme özelliklerini daha iyi yansıttıkları için geleneksel *d-h* modellerine tercih edilmelidir. Ancak herhangi bir ağaç türü için *d-h* ilişkilerinin belirlenmesinde öncelikli olarak, ağaç türünün biyolojisine ve veri yapısına uygun modeller tercih edilmelidir. Ayrıca *d-h* modelleri geliştirilirken mutlaka yetiştirme ortamı farklılıkları ve lokal çevresel faktörler dikkate alınmalı ve mümkünse farklı yetiştirme ortamları için ayrı *d-h* modelleri geliştirilmelidir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan veriler, SDÜ-Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiş olan BAP-3359-YL1-2013 nolu "Antalya Yöresi Kızılçam Meşcereleri İçin Doğrusal Olmayan Karışık Etkili Modeller Yardımı İle Çap-Boy Denklemlerinin Geliştirilmesi" proje çalışmasında elde edilmiştir.

Kaynaklar

Anonymous, 2006. Forest Resources. The General Directorate of Forests, Ankara, 159 pp.

Ademe, P., Del Rio, M., Canellas, I., 2008. A mixed nonlinear height-diameter model for hyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). For. Ecol. Manage. 256 (1-2): 88-98.

Akaike, H., 1974. A New Look at the Statistical Model Identification. IEEE Transactions on Automatic Control AC-19: 716-723.

Arabatzi, A.A., Burkhart, H.E., 1992. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in Loblolly pine plantations. For Sci., 38:192-198.

Calama, R., Montero, G., 2004. Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. Can. J. For. Res. 34:150-163.

Canadas, N., Garcia, C., Montero, G., 1999. Relacion altura-diametro para Pinus pine aL. En el Sistema Central. Congreso de Ordenacion y Gestion Sostenible de Montes, Santiago de Compestela, 4-9 octubre. Tomo I, pp. 139-153.

Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Barrio Anta, M., Sánchez Rodríguez, M., Gadov K.v., 2006. A generalized height-diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain. For. Ecol. Manage., 229:202-213.

Colbert, K.C., Larsen, D.R., Lootens, J.R., 2002. Height-diameter equations for thirteen Midwestern bottomland hardwood species. North. J. Appl. For. 19:171-176.

Cox, F., 1994. Parameterized models of height. Report of convention enterprises research.

Curtis, R.O., 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. For. Sci., 13:365-375.

Çapar, C., 2013. Antalya yöresi kızılçam meşcereleri için doğrusal olmayan karışık etkili modeller yardımı ile çap-boy denklemlerinin geliştirilmesi. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 68 s.

Diéguez-Aranda, U., Barrio Anta, M., Castedo Dorado, F., Álvarez González, J.G., 2005. Relación altura-diámetro generalizada para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en el noroeste de España. Forest Systems (Formerly: Inv Agrar: Sist Rec For) 14(2): 229-241.

Diamantopoulou, M.J., Özçelik, R., 2012. Evaluation of different modeling approaches for total tree-height estimation in Mediterranean region of Turkey. For Syst., 21:383-397.

Fang, Z., Bailey, R.L., 1998. Height-diameter models for tropical forest on Hainan Island in southern China. For. Ecol. Manage., 110:315-327.

Fekedulegn, D., Surtain, M.P.M., Colbert, J.J., 1999. Parameter estimation of nonlinear growth model in forestry. Silv. Fenn., 33:327-336.

Gaffrey, D., 1988. Forstamst-und bestandesindividuelles sortimentierungsprogramm als mittel zur plannung, aushaltung und simulation. Diplomarbeit Forscliche Fakultät, Univ. Göttingen.

Gonda, H.E., Maguire, D.A., Cortes, G.O., Tesch, S.D., 2004. Stand level height-diameter equations for young ponderosa pine plantations in Nuequen, Patagonia, Argentina: evaluating applications of equations developed in the Western United States. West. J. Appl. For. 19:202-210.

Huang, S., Price, D., Titus, S.J., 2000. Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests. For. Ecol. Manage., 12:125-141.

Huang, S., Titus, S.J., Wiens, D.P., 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. Can. J. For. Res., 22: 1297-1304

Huang S (1999). Ecoregion-based individual tree height-diameter models for lodgepole pine in Alberta. West J Appl For., 14: 186-193.

Hui, G., Gadov, K.v., 1993. Zur Entwicklung von Einheitshöhenkurven am Beispiel der Baumart *Cunninghamia lanceolata*. Allg. Forst. Lagdztg., 164: 218-220.

Jayaraman, K., Zakrzewski, W.T., 2001. Practical approaches to calibrating height-diameter relationships for natural sugar maple stands. For. Ecol. Manage., 148: 169-177.

Krumland, B.E., Wensel, L.C., 1988. A generalized height-diameter equation for coastal California species. West. J. Appl. For., 3: 113-115.

- Lappi, J., 1997. A longitudinal analysis of height-diameter curves. *For. Sci.*, 43: 555-570.
- Larsen, D.R., Hann, D.W., 1987. Height-diameter equations for seventeen tree species in southwest Oregon. Research paper 49. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, OR, 16 p.
- Lei, Y., Parresol, B.R., 2001. Remarks on height-diameter modeling. Res. Note. SRS-10. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern research Station, 5p.
- López Sánchez, C.A., Gorgoso Varela, J., Castedo Dorado, F., Rojo Alboreca, A., Rodríguez Soalleiro, R., Alvarez González, J.G., Sánchez Rodríguez F., 2003. A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). *Ann. For. Sci.*, 60:237-245.
- Lynch, T.B., Holley, A.G., Stevenson, D.J., 2005. A random-parameter height-diameter model for cherrybark oak. *South. J. Appl. For.* 29:22-26.
- Mehtatalo, L., 2004. A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland. *Can. J. For. Res.* 34:131-140.
- Misir, N., 2010. Generalized height-diameter models for *Populus tremula* L. stands. *African J. Biotech.*, 9: 4348-4355.
- Monnes, E.N., 1982. Diameter distributions and height curves in even-aged stands of *Pinus sylvestris* L. *Medd. No. Inst. Skogforsk*, 36:1-43
- Moore, J.A., Zhang, L., Stuch, D., 1996. Height-diameter equations for ten tree species in the Inland Northwest. *West. J. Appl. For.*, 11:132-137.
- Nagel, J., 1991. Einheitshöhenkurvenmodell für Roteiche. *Allg. Forst. Jagdztg*, 1:16-18.
- 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*, 247:149-166.
- Parresol, B.R., 1992. Baldcypress height-diameter equations and their prediction confidence interval. *Canadian Journal of Forest Research*, 22:1429-1434.
- Peng, C.H., 1999. Nonlinear height-diameter models for nine tree species in Ontario boreal forests. Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, OFRI-Rep. 155, 28 pp.
- Pienaar, L.V., Turnbull, K.J., 1973. The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-age stands. *For. Sci.* 19:2-22.
- Pienaar, L.V., 1991. PMRC yield prediction system for slash pine plantations in the Atlantic Coast Flatwoods, PRMC Technical Report, Athens.
- Richards, F.J., 1959. A flexible growth function for empirical use. *J. Exp. Bot.*, 10:290-300
- Saunders, M.R., Wagner, R.G., 2008. Long-term spatial and structural dynamics in Acadian mixed-wood stands management under various silvicultural systems. *Can. J. For. Res.*, 38: 498-517.
- Schnute, J., 1981. A versatile growth model with statistically stable parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38: 1128-1140.
- Schröder, J., Alvarez-Gonzalez, J.G., 2001. Developing a generalized diameter-height model for maritime pine in Northwestern Spain. *Forstwiss. Centralbl.*, 120:18-23.
- Sharma, M., Zhang, S.Y., 2004. Height-diameter models using stand characteristics for *Pinus banksiana* and *Picea mariana*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19:442-451.
- Sharma, M., Parton, J. 2007. Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. *For. Ecol. Manage.*, 249:187-198
- Sloboda, V.B., Gaffrey, D., Matsumura, N., 1993. Regionale und locale systeme von Höhenkurven für gleichaltrige Waldbestände. *Allg. Forst. Jagdztg* 164:225-228.
- Soares, P., Tomé, M., 2002. Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. *For. Ecol. Manage.* 166: 99-109.
- Sönmez, T., 2009. Generalized height-diameter models for *Picea orientalis* L. *J. Env. Biol.*, 30: 767-772.
- Temesgen, H., Gadow, K.v., 2004. Generalized height-diameter models—an application for major tree species in complex stands of interior British Columbia. *Eur. J. For. Res.*, 123:45-51.
- Tomé, M., 1989. Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. (1ª rotação) na região centro de Portugal. Ph.D. Thesis, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisbon, Portugal. 256 pp.
- Trincado, G., VanderSchaaf, C.L., Burkhart, H.E., 2007. Regional mixed-effects height-diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations. *Eur. J. For. Res.*, 126:253-262.
- Wang, C.H., Hann, D.W., 1988. Height-diameter equations sixteen tree species in the central western Willamette valley of Oregon. Forest Research Lab. Oregon State Univ. Res. Paper
- Wykoff, W.F., Crookston, N.L., Stage, A.R., 1982. User's guide to the Stand Prognosis Model. USDA Forest Service. General Technical Report INT-133, Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, UT, 113 p.
- Yang, R.C., Kozak A., Smith J.H., 1978. The potential of Weibull-type functions as a flexible growth curve. *Can. J. For. Res.* 8: 424-431.
- Zhang, L., 1997. Cross-validation of nonlinear growth functions for modeling tree height-diameter distributions. *Annals of Botany*, 79: 251-257.
- Zhang, L., Peng, C., Huang, S., Zhou, X., 2002. Development and evaluation of ecoregion-based jack pine height-diameter models for Ontario. *For. Chron.*, 78: 530-538.