

Çap-boy modelleri için örnek ağaç seçim ölçütlerinin geliştirilmesi

Development of sample tree selection criteria for diameter-height models

Niyazi ÖZÇANKAYA¹

Serdar CARUS²

¹ Ege Ormanlık Araştırma Enstitüsü
Müdürlüğü, İzmir

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi,
Orman Fakültesi, Isparta

Sorumlu yazar (Corresponding author)

Niyazi ÖZÇANKAYA

niyaziozçankaya@ogm.gov.tr

Geliş tarihi (Received)

16.08.2022

Kabul Tarihi (Accepted)

02.11.2022

Sorumlu editör (Corresponding editor)

Neşat ERKAN

nesaterkan@yahoo.com

Atıf (To cite this article): Özçankaya, N. & Carus, S. (2023). Çap boy modelleri için örnek ağaç seçim ölçütlerinin geliştirilmesi . Ormanlık Araştırma Dergisi , 10 (1) , 61-79 . DOI: 10.17568/ogmoad.1162142

Öz

Bu çalışmada plan ünitesi kapsamında kullanılacak çap-boy denklemlerinin düzenlenmesi için seçim yöntemi başarısı ve işlem süresi faktörleri gözeticilerle en uygun örnek ağaç seçim yöntemlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için aynıyaşlı ve saf kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) meşcerelerinden seçilen 47 örnek alanda 1408 örnek ağaç ölçülmüştür. Örnek ağaçların seçimine ilişkin 54 farklı yöntem kurgulanmıştır. Her bir seçim yöntemi regresyon analizleri, başarı ölçüt setleri ve bağıl puanlama metotları ile değerlendirilmiş ve puanlarına göre sıralanmıştır. Seçim yöntemlerinin örnek alanlarda uygulanma süreleri en kısa yol optimizasyonları ve regresyon analizi yöntemleriyle hesaplanmıştır. En başarılı sonucu veren ve aynı zamanda uygulamadaki işlem süreleri en az olan seçim yöntemlerini belirlemek için Pareto optimal yöntem kullanılmıştır. Sonuç olarak, seçim yöntemleri içerisinde en başarılı yöntemin 16 numaralı, uygulama süresi en kısa olan ise 1 numaralı yöntem olduğu tespit edilmiştir. Her iki faktör de dikkate alındığında ise 07, 14, 15, 16, 51, 08, 43 ve 49 numaralı seçim yöntemlerinin optimal çözüm kümesini oluşturduğu ortaya konulmuştur. İdeal noktaya en yakın çözümün Weise orta ağacı ve ona en yakın konumdaki iki adet ağaçla çalışan 14 numaralı yöntem olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Orman envanteri, Hacim tabloları, Çap-boy modelleri, İş ölçümleri, Pareto optimal yöntem

Abstract

In this study it is aimed to determine the optimal sample tree selection methods based on the success of the selection method and the processing time factors for the arrangement of the diameter-height equations within the scope of the plan unit. For this study, from the even-aged and pure red pine stands 1408 sampling trees were measured in the 47 sample areas. The selection of sample trees was designed by 54 different methods. The each selection method was evaluated with regression analysis, success criteria sets and relative scoring methods and ranked according to their scores. The processing times of the selection methods in the sample areas were calculated with the shortest path optimizations and regression analysis methods. The Pareto optimal method was used to determine the selection methods that gave the most successful results and at the same time have the shortest processing time. As a result, it was determined that method number 16 was the most successful method in scoring among the selection methods, while method number 1 was the shortest according to the processing time. When these two factors were both considered the 07, 14, 15, 16, 51, 08, 43 and 49 numbered selection methods constitute the optimal solution set. It has been determined that the nearest solution to the ideal point is the method number 14, which works with the Weise middle tree and the two trees closest to it.

Keywords: Forest inventory, Volume tables, Diameter-height models, Work measurements, Pareto optimal method



Creative Commons Atıf -
Türetilemez 4.0 Uluslararası
Lisansı ile lisanslanmıştır.

1. Giriş

Orman işletmeleri sermayesinin temel unsurlarından birisi de meşcerelerde dikili halde bulunan ağaçların toplamı olarak tanımlanan dikili ağaç servetidir (Kalıpsız, 1984; Kapucu, 2004; Yavuz, 1999). Planlama, yönetim, üretim ve pazarlama çalışmaları için önemli bir meşcere parametresi olan dikili ağaç serveti (Kalıpsız, 1984; Yavuz, 1999; Sakıcı ve ark., 2018), uygulamada plan üniteleri kapsamında hazırlanan hacim tabloları ile hesaplanmaktadır.

Hacim tabloları ağaç türleri için, ağacın kolay biçimde ölçüm değerlerinin elde edilebileceği kısımlarının (çap ve boy gibi) birer bağımsız değişken olarak kullanıldığı denklemler ile üretilmektedir (Kalıpsız, 1984). Denklemler içeriğindeki değişken sayısına (Loetsch ve ark., 1973; Kalıpsız, 1984) ve kullanıldıkları alan büyüklüğüne göre (Köhl ve ark., 2006; Sakıcı ve ark., 2018) sınıflandırılmaktadır.

Göğüs çapı, kolay ölçülebilen ve başta hacim olmak üzere ağacın diğer özellikleri ile yüksek düzeyde ilişkili bir değişkendir (Vanclay, 1994; Şenyurt, 2012). Bu özellikleri sebebiyle ormancılık uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Orman amenajman planları çalışmalarında da göğüs çapının bir fonksiyonu olarak hacim değerini tahmin eden tek girişli dikili kabuklu gövde hacim tabloları (DKGHT) kullanılmaktadır. Doğru ve güvenilir hacim tablolarının kullanımı sürdürülebilir bir orman yönetimi ve uygulanabilir planlama açısından önemlidir.

Geçmiş plan içeriklerinde seksiyon yöntemiyle (örnek ağaçların kesilip bölümlere ayrılarak hacimlerinin hesaplandığı yöntemler) düzenlenmiş, gerek görüldüğü şartlarda revize edilmiş hacim tablolarına rastlamak mümkündür. Ancak güncel uygulamada hacim tabloları plan yapıcı tarafından plan ünitesi veya üniteleri için çift girişli hacim tablolarının tek girişliye dönüştürülmesi ile elde edilmektedir (OGM, 2017). Bu işlem çalışma alanı için geliştirilen “kabuklu göğüs çapı ($d_{1,3}$)-ağaç boyu (h)” (çap-boy denklemleri) denklemlerinin çift girişli hacim denklemlerine entegre edilmesi ile gerçekleşir.

Çap-boy denklemleri genellikle çapın bir fonksiyonu olarak ağaç boyunu tahmin edebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Çap-boy denklemlerinin kullanım amaç ve yerleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Erkan ve ark., 2010; Özçelik ve Çapar, 2014; Carus ve Çatal, 2017):

- Büyüme ve hasılat tahminleri
- Simülasyonlar

- Orman amenajman planlarının düzenlenmesi
- Bonitet endeksi
- Meşcere yapısal analizi
- Zararların ortaya konması
- Büyüme dinamiklerinin belirlenmesi
- Biyokütle tahminleri
- Dikili satış işlemlerinde hacim tahminleri.

Literatürde farklı ağaç türleri ve meşcere yapıları için farklı formlarda modellerin geliştirildiği çok sayıda çalışma mevcuttur (Wykoff ve ark., 1982; Wang ve Hann, 1988; Huang ve ark., 1992; Colbert ve ark., 2002; Castedo Dorado ve ark., 2006; Lootens ve ark., 2007). Ülkemizde ise az sayılda rastlanan çap-boy denklemleri düzenlenmesine ilişkin çalışmalar (Özçelik ve Çapar, 2014) son yıllarda daha sık gözlenmektedir (Sönmez, 2009; Mısır, 2010; Çatal, 2012; Ercanlı ve ark., 2012; Aylak Özdemir, 2013; Carus ve Çatal, 2017; Ercanlı, 2020; Seki ve Sakıcı, 2022).

Çap-boy modellerinin aynı ağaç türü için bile türün tüm yayılış alanında geçerli olduğu söylenebilir. Bu nedenle ağaç boyundaki varyasyonu açıklamak için göğüs çapının yanında meşcere yaşı ve bonitet endeksi gibi parametrelerin de bağımsız değişken olarak modele dahil edildiği denklemler geliştirilmekte ve “genelleştirilmiş çap-boy modelleri” olarak adlandırılmaktadır (Larsen ve Hann, 1987; Soares ve Tome, 2002; Sharma ve Zhang, 2004). Meşcere parametrelerinin daha ayrıntılı çözümlendiği ve oldukça önemli bu modelleme çalışmaları birden fazla değişken ölçülmesi gerekliliği ve zorluğu göz önüne alındığında; pratik olması açısından sadece çapın bir fonksiyonu olarak boyu tahmin edecek “yöresel” çap-boy modellerinin geliştirilmesi de uygulama için ayrıca önem kazanmaktadır (Kalıpsız, 1984; Knowe, 1994; Carus ve Çatal, 2017). Plan üniteleri kapsamında düzenlenen çap-boy modelleri yöresel modeller içerisinde değerlendirilir.

Çap-boy denklemlerinin doğru sonuçlar vermesi özellikle ekonomik değeri yüksek ağaç türlerimiz için büyük önem taşımaktadır. Kızılcım (*Pinus brutia* Ten.) ekonomik ve ekolojik özellikleri ile ülkemiz için önemli asli ağaç türlerimiz başında gelmektedir. Kızılcım ormanları toplam 5.215.292 hektar yüzölçümü ile ülkemiz ormanlık alanlarının %22,74’ünü oluşturmaktadır (OGM, 2021). Ülkemizde Akdeniz ikliminin hâkim olduğu Akdeniz, Ege ve Marmara Bölgelerinde özellikle kıyıya bakan yamaçlarda geniş ve saf ormanlar kurmaktadır (Neyişçi, 1987).

Orman planlama çalışmaları “Ekosistem Tabanlı Fonksiyonel Orman Amenajman Planlarının Dü-

zenlenmesine Ait Usul ve Esaslar” isimli 299 no’lu tebliğ (OGM, 2017) doğrultusunda gerçekleştirilmektedir. Çap-boy denklemlerinin düzenlenmesine ilişkin örnek alan içerisinden alınacak örnek ağaçların sayısı ve ölçütleri, 299 sayılı tebliğin 5.4.1.3. alt başlığının f bendinde “Çap-boy eğrisi çizilebilir için örnek alan merkez kazığına en yakın ve olabildiğince değişik çaplarda en az 2 ağacın boyları ölçülür.” şeklinde tarif edilmektedir.

Çap-boy denklemlerinin geliştirilmesine ilişkin çalışmalar ağaç hacim tahminlerinin daha kısa sürede ve daha doğru yapılmasına yardımcı olacaktır (Jayaraman ve Zakrzewsk, 2001; Özçelik ve Çapar, 2014). Daha doğru ve hızlı tahminler modelleme çalışmaları yanında örnek ağaç seçim stratejilerinin geliştirilmesi ile de mümkündür. Tür çeşitliliğinin değerlendirilmesi, biyokütle tahmini ve yöreselleştirme (calibrate/localize) amaçlı çap-boy denklemleri üretmek için örnek ağaçların nasıl ve ne miktarlarda seçilmesi gerekliliği üzerine çalışmalar literatürde gözlenmektedir (Lappi, 1991; Arabatzis ve Burkhart, 1992; Gimaret-Carpentier ve ark., 1998; Sullivan ve ark., 2018; Dutca ve ark., 2020).

Ülkemizde orman envanter yöntemlerine ilişkin çalışmalar (Günel, 1973; Özer ve Uğurlu, 1976; Sakıç, 2009; Güneş, 2015) sınırlı sayıdadır. Hacim ve çap-boy modellerinin geliştirilmesi kapsamındaki çalışmalarda seçilen örnek ağaçlar için, değişik çap değerlerini temsil etmeleri, ağaçların çatal, tepesi kırık ve gövde formlarının bozuk olmaması gibi ölçütlere dikkat edildiği genel olarak belirtilmektedir. Ancak örnek ağaç seçim stratejileri özelinde bir çalışmaya rastlanamamıştır.

Bu çalışmada gerçeğe daha yakın hacim değerleri elde edebilmek için yapılan çalışmalara örnek ağaç seçim ölçütleri üzerinden katkıda bulunmak hedeflenmiştir. Modeller farklı meşcere yapıları için değil, yöresel olarak değerlendirilebilecek “plan ünitesi” kapsamında ve kızılçam ağaç türü için düzenlenmiştir.

Çalışmada “Plan ünitesi genelinde kullanılabilecek

en uygun çap-boy denklemini üretmek için örnek alanlardaki hangi ağaçlarda ölçüm yapılmalı?” sorusuna yanıt aranmıştır. Nihai amaç plan ünitesindeki ağaç türleri için gerçeğe daha yakın, daha küçük hata miktarları ile kestirim yapan tek girişli gövde hacim tabloları elde edebilmektir. Bu amaçla 299 sayılı tebliğdeki yöntem alternatif olarak, örnek ağaçların nasıl seçileceğine ilişkin farklı ölçütlerle kurgulanan 54 yöntem istatistik test ve analizlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Çalışma alanı olarak İzmir Orman Bölge Müdürlüğü, İzmir Orman İşletme Müdürlüğü, Gaziemir Orman İşletme Şefliği (OİŞ) seçilmiştir. Seçim yapılırken araştırma kapsamında değerlendirilecek değişkenlerin plan ünitesinde yeterli düzey ve dağılımda olması yanında ulaşım koşulları ve maliyeti dikkate alınmıştır.

Çalışmanın ana materyalini aynıyaşlı saf kızılçam meşcerelerinden seçilen 47 adet örnek alan içerisindeki ağaçlar oluşturmaktadır. Örnek alanlara ilişkin bazı tanımlayıcı istatistikler Tablo 1’de verilmiştir. Çalışma alanının coğrafi konumları ve örnek alanların plan ünitesi içerisindeki dağılımı ise Şekil 1’de görülmektedir.

Örnek alanların belirlenmesine yönelik yapılan ön çalışmada plan ünitesine ait orman amenajman planı ve meşcere haritasından (OGM, 2015) yardımcı materyal olarak yararlanılmıştır. Ekipman olarak Garmin eTrex GPS (Global Positioning System), Haglöf marka çapölçer ve Haglöf Vertex IV elektronik boyölçer kullanılmıştır. Ağaç konumları tripodla sabitlenen Suunto marka pusula ve Leica DISTO D3aBT model lazer mesafe ölçer ile belirlenmiştir.

Çalışma materyali içerisinde “Rastgele Sayılar Tabloları” (URL-1, 2018) da bulunmaktadır. Tüm istatistik analizler R istatistik yazılımı (URL-2, 2018) ile yapılmış, bazı grafikler için MS Office

Tablo 1. Örnek alanlara ilişkin bazı betimsel istatistikler
Table 1. Some descriptive statistics of sampling plots

Örnek alan ve veri seti değişkenleri özellikleri	Adet	En küçük	En büyük	Ortalama	Standart sapma	Varyasyon yüzdesi (%)
Örnek alan büyüklüğü (m ²)	47	200,0	1040,0	531,06	180,12	33,92
Aritmetik orta ağaç göğüs çapı (cm)	47	11,97	49,94	26,08	10,38	39,80
Göğüs yüzeyi orta ağacı göğüs çapı (cm)	47	12,47	50,78	26,90	10,53	39,13
Weise orta ağacı göğüs çapı (cm)	47	11,70	52,15	27,94	11,37	40,69
Örnek alanlardaki ağaç sayıları	1408	17	94	30,04	13,88	46,21
Ağaç boyu (m)	1408	2,70	27,80	12,24	4,71	38,48
Göğüs çapı (cm)	1408	8,00	69,20	23,30	11,63	49,91

Excel, ön çalışmalar, en kısa yol optimizasyonları ve harita çıktıları içinse ArcGIS 10.3. (URL-3, 2018) programı kullanılmıştır.



Şekil 1. Coğrafi konum ve örnek alanların plan ünitesindeki yerleri
Figure 1. Geographical location and locations of sampling plots in the plan unit

2.2. Yöntem

2.2.1. Örnek alanların seçimi ve ölçümler

Örnek alanlar, plan ünitesi sayısal meşcere haritası üzerinde yapılan analizlerle, gelişim çağları, yaş sınıfları, bonitet ve kapalılığa ilişkin farklı değerleri temsil edebilecek şekilde, başlangıçta 30 adet olmak üzere tabakalı rastgele örnekleme yöntemiyle dağıtılmıştır. Çalışma boyunca düzenli yapılan değişken değerlerinin dağılım kontrolleri ile varyasyonlarındaki eksik alanlar tamamlanacak biçimde yeni örnek alanlar belirlenerek ölçülmüş, 47. örnek alanda varyasyonları temsil açısından yeterli örnek alan sayısına ulaşılmış olduğuna karar verilmiştir.

Örnek alanlar daire şeklinde alınmıştır. Genel olarak 1 kapalı meşcerelerde 800 m², 2 kapalı meşcerelerde 600 m², 3 kapalı meşcerelerde 400 m² ve çok sık bazı genç meşcerelerde 200 m² izdüşümsel yüz ölçüme sahiptirler. Bununla birlikte her bir örnek alanda en az 17 adet ağaç sayısına ulaşılması

hedeflenmiştir (Çatal ve Güneş, 2016). Bu nedenle yüz ölçümlerinin 1040 m²'ye kadar genişletildiği örnek alanlar mevcuttur.

Örnek alan merkez koordinatları GPS cihazı yardımı ile arazide bulunmuş ve sabitlenmiştir. Ağaçlar merkez üzerine kurulan tripoda bağlı pusula ve lazer mesafe ölçer ile semt açısı değerleri yanında merkeze mesafeleri ölçülerek konumlandırılmıştır. Ağaçların numaralandırılması ve göğüs çapı ölçümleri kuzeyden başlayarak saat yönünde bir tam tur dönülerek gerçekleştirilmiştir. Göğüs çapları çift taraflı ölçümle mm, boylar ise 10 cm hassasiyetinde ölçülerek kaydedilmiştir.

2.2.2. Analiz süreci

Her seçim yöntemi (SY) için, örnek alanlar içerisinden yöntem ölçütleri ile seçilen örnek ağaçlar ile 54 farklı örnekleme grubu oluşturulmuştur. Her grup, seçim yöntemine özgü farklı çap ve boy değerlerinden oluşan veri seti biçimindedir.

Bağımlı değişkenin boy, bağımsız değişkenin çap değerleri ile oluşturulduğu veri setlerine (örnekleme gruplarına) regresyon analizi uygulanmış, istatistik modeller bir başarı ölçüt seti (SCI) ile değerlendirilmiştir. En başarılı seçilen modellere, bu kez seçim yöntemlerini değerlendirmek üzere seçim yöntemini temsil hakkı kazandırılmıştır.

Her bir seçim yöntemi modeli, örnek alanlardaki başlangıçtaki örnekleme gruplarına alınmamış ağaçlar ile test edilmiştir. Seçim yöntemi modellerinin tahmin ettiği boy değerleri ile ölçülen boy değerleri farklı bir başarı ölçüt seti (SC2) ile değerlendirilmiştir.

Her seçim yöntemi için uygulamada harcanacak zamanın belirlenmesi için iş ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Son aşamada ise seçim yöntemleri toplam başarı puanları ve uygulama süreleri açısından Pareto optimal yöntem ile değerlendirilmiştir.

2.2.3. Seçim yöntemlerinin kurgulanması

Çalışmada, farklı örnekleme yöntemleri ve kombinasyonları ile beraber, farklı örnek sayıları ile oluşturulan her bir yöntem "SY" olarak ifade edilmektedir. Meşcere içerisindeki ağaçlardan mümkün olduğunca farklı özellik ve kombinasyonlarda örnekleme yapılarak test edilebilmesi amacıyla toplam 54 adet SY kurgulanmıştır. Kurgulanan seçim yöntemlerini; (i) örnek alan merkezine mesafenin, (ii) rastlantısallığın, (iii) Weisse orta ağacının, (iv) göğüs çapı değerleri ile ilgili sınıflamaların ve (v) çap dağılımlarındaki konumları özellikleri (mod,

ortanca vd.) ile bazı ağaçların ana öge olduğu gruplar şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

Seçim yöntemleri için her örnek alandan seçilen ağaç sayısı 1 ile 15 adet arasında değişmektedir. Örnek ağaçların her bir örnek alan içerisinde hangi ölçütler ile kaç adet seçildiği Ek Tablo 1'de açıklanmaktadır.

2.2.4. Modelleme süreci

2.2.4.1. İstatistik modellerin belirlenmesi

Literatürdeki benzer çalışmalardan (Prodan, 1965; Ratkowsky, 1989; Lappi, 1991; Arabatzis ve Burkhart, 1992) derlenmiş modeller içerisinde, yapılan ön çalışma sonucu 5 adedi doğrusal (linear) formülü, 5 adedi ise doğrusal olmayan (non-linear) toplam 10 adet model değerlendirilmek üzere seçilmiştir (Denklemler 1-10).

$$h = \beta_0 + \beta_1 d_{1,3} + \varepsilon \quad (1)$$

$$h = \beta_0 + \beta_1 \ln d_{1,3} + \varepsilon \quad (2)$$

$$h = \beta_0 + \beta_1 d_{1,3} + \beta_2 \ln d_{1,3} + \varepsilon \quad (3)$$

$$h = \beta_0 + \beta_1 d_{1,3} + \beta_2 d_{1,3}^2 + \varepsilon \quad (4)$$

$$h = \beta_0 + \beta_1 d_{1,3} + \beta_2 d_{1,3}^2 + \beta_3 d_{1,3}^3 + \varepsilon \quad (5)$$

$$h = \alpha + d_{1,3}^\beta + \varepsilon \quad (6)$$

$$h = e^{\left(\alpha + \frac{\beta}{d_{1,3}}\right)} + \varepsilon \quad (7)$$

$$h = \alpha + \beta d_{1,3} + \gamma \ln d_{1,3} + \varepsilon \quad (8)$$

$$h = \alpha + d_{1,3}^\beta + \gamma \ln d_{1,3} + \varepsilon \quad (9)$$

$$h = 1,3 + \left(\frac{d_{1,3}^2}{\alpha + \beta d_{1,3} + \gamma d_{1,3}^2}\right) + \varepsilon \quad (10)$$

Burada, h : ağaç boyu (m), $d_{1,3}$: göğüs çapı (cm), $\beta_{0,1,2,\dots,n}$: doğrusal formülü modeller için parametre katsayıları, α, β, γ : doğrusal olmayan modellerdeki farklı parametre değerleri, \ln : e tabanlı doğal logaritma, e : Euler sabiti ($\approx 2,7183$) ve ε : hata miktarını ifade etmektedir.

2.2.4.2. En başarılı modellerin seçimi

Model seçimi aşamasında Akaike bilgi ölçütü (AIC), Bayes bilgi ölçütü (BIC), hata kareleri ortalamalarının karekökü ($RMSE$), düzeltilmiş belirtme katsayısı (\bar{R}^2), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama mutlak hata yüzdesi ($MAPE$) ve regres-

yon modelinin standart hatası (s) olmak üzere yedi adet başarı ölçütünden oluşan bir set (SCI) kullanılmıştır (Denklemler 11-17).

$$AIC = n \ln(2\pi) + 1 + \ln\left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - y'_t)^2\right) + 2(p + 1) \quad (11)$$

$$BIC = n \ln(2\pi) + 1 + \ln\left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - y'_t)^2\right) + \ln(n)(p + 1) \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - y'_t)^2} \quad (13)$$

$$\bar{R}^2 = 1 - \left\{1 - \left\{1 - \left(\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - y'_t)^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2}\right)\right\}^*\right\}^{\frac{n-1}{n-p-1}} \quad (14)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - y'_t| \quad (15)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - y'_t|}{y_t} \quad (16)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - y'_t)^2}{n - p}} \quad (17)$$

Burada, y_i : ölçülen değer, y'_i : tahmin değeri, n : örnek sayısı, t : ölçüm sırası, p : parametre sayısı (sabit hariç) ve \bar{y}_i : ölçülen değer aritmetik ortalamasını ifade etmektedir.

2.2.4.3. Tek ölçüt ve tümleşik değerlendirmeler

Modellerin ve SY'nin her bir başarı ölçütü için aldığı değer (tek ölçüt değerleri) 1 ile 100 puan aralığında dağıtılmıştır. En küçük puan en iyi değeri ifade edecek şekilde düzenlenmiş ve yapılan bağlı puanlama işlemi için Denklem 18 kullanılmıştır.

$$BPi_{TÖj} = 1 + \frac{99(D_{ij} - D_{jmin})}{(D_{jmax} - D_{jmin})} \quad (18)$$

Burada, $BPi_{TÖj}$: i . modelin j . tek ölçüt başarı puanını, i : 1, 2, 3, ... n adet model numarasını (n : test edilen model sayısı), D_{ij} : i . model için j . başarı ölçütü değerini ve j . başarı ölçütünün modeller için maksimum ve minimum değerini ifade etmektedir.

Bir ya da birkaç tek ölçütten iyi puan alan bir model diğer ölçütler tarafından düşük puanla değerlendirilebilir. Bu durumda; modeller için tek ölçüt

değerlerinin tümünün birlikte değerlendirileceği bir başarı sıralaması yapılması gerekmektedir. Bu tümleşik değerlendirme puanları ise Denklem 19 ile hesaplanmıştır.

$$BP_{TDi} = \sum_{j=1}^m BPi_{TÖj} \quad (19)$$

Burada, BP_{TDi} : i . yöntemin tümleşik başarı ölçütleri puanını, $BPi_{TÖj}$: i . yöntem için j . tek ölçüt başarı puanını, i : 1, 2, 3, ... n adet yöntem numarasını, j : 1, 2, 3, ... m adet başarı ölçütü numarasını ifade etmektedir.

2.2.5. Seçim yöntemlerinin değerlendirilmesi

Seçim yöntemlerinin değerlendirilmesi işlemlerinde örnek ağaç olarak seçilmemiş diğer ağaçlar test grubu olarak kullanılmıştır. Seçilen uygun modeller ile tahmin edilen ağaç boyları, ölçülen boylar ile karşılaştırılmıştır. Değerlendirme *SCI*'de yer alan *RMSE*, *MAE* ve *MAPE* (Denklem 13; 15 ve 16) ölçütlerine ek olarak toplam hata (*bias*), ortalama toplam hata yüzdesi (*percent bias*), açıklanan varyasyon katsayısı (*PVE*) ve standart hata (*SE*) ile kurgulanan başarı ölçüt seti (*SC2*) ile yapılmıştır (Denklem 20-23).

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - y'_t) \quad (20)$$

$$percent\ bias = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{(y_t - y'_t)}{|y_t|} \quad (21)$$

$$PVE = 1 - \left\{ 1 - \left\{ 1 - \left(\frac{\sum_{t=1}^N (y_t - y'_t)^2}{\sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2} \right) \right\} \right\} \quad (22)$$

$$SE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (y_t - y'_t)^2}{N}}}{\sqrt{N}} \quad (23)$$

Burada, y_t : ölçülen değer, y'_t : tahmin değeri, \bar{y} : ölçülen değer aritmetik ortalaması, t : ölçüm sırası ve N : karşılaştırılan değer çiftlerinin sayısını ifade etmektedir.

2.2.6. Tek girişli DKGHT elde edilmesi

Her seçim yöntemi için; elde edilen çap-boy modelleri ile Çatal (2009)'ın kızılçam çift girişli DKGHT (Denklem 24) kullanılarak, tek girişli DKGHT oluşturulmuştur.

$$v = d_{1,3}^2 (\beta_0 + \beta_1 h) \quad (24)$$

Burada, v : ağaç hacmini (m^3), $d_{1,3}$: göğüs çapını (cm) ve h : ağaç boyunu (m) ifade etmektedir. β_0 : 0,0000366463 ve β_1 : 0,0000279378 dir.

2.2.7. Seçim yöntemlerinin zaman ölçümleri

Test edilen seçim yöntemleri içinde başarılı olarak değerlendirilen kimi yöntemlerin arazide uygulanması, harcanacak yoğun emek ve zaman kaybı ile mümkün olmayabilir. Bununla beraber bazı yöntemler eşit başarı derecesinde olsa da farklı sürelerde uygulanabiliyor olabilirler. Bunu test edebilmek, en uygun yöntem veya yöntemler kümesini rasyonel biçimde belirlemek üzere yapılacak optimizasyon için her seçim yönteminde harcanan sürenin bilinmesi gereklidir. İş ölçümü, belli bir işin nitelikli bir işçi tarafından belirlenen bir performans (çalışma hızı) düzeyinde yapılabilmesi için gereken zamanın saptanmasına yarayan tekniklerin uygulanması şeklinde tanımlanmaktadır (MPM, 1974; Şirin, 1989).

İş etüdüne ilişkin çalışmalar çok sayıda parametre ile ilişkili, kapsamlı ve yoğun emek isteyen çalışmalardır. Bu araştırmadaki iş ölçümlerinin amacı 54 farklı seçim yöntemini işlemler için harcanacak zaman değerleri ile basit biçimde ölçekli olarak sıralayabilmektir. Ölçüm ve değerlendirme sonucu belirlenen zamanlar yalnızca bu çalışma kapsamında kullanılacağından "standart zaman" saptanması hedeflenmemiş, yaklaşık "temel zaman" olarak adlandırılabilir bir süre belirlenmesinin yeterli olacağı düşünülmüştür. İş ölçümü yöntemi olarak zaman etüdü seçilmiş ve doğrudan ölçme tekniği kullanılmıştır.

İş dilimlerinin çalışma zamanları video kayıt cihazı kullanılarak kaydedilmiştir. Daha sonra elde edilen bu video kayıtları büroda incelenerek her bir iş diliminin zaman etüdü gerçekleştirilmiştir.

Hacim tablosu elde edebilmek amacıyla ölçülen iş süreleri ise " IS_{HT} " biçiminde sembolize edilmiştir. Her bir SY için, Denklem 25'te açıklandığı gibi hesaplanmıştır.

$$IS_{HT} = IS_{HZ} + (IS_{BOY} * k_{eky}) \quad (25)$$

Burada, IS_{HT} : hacim tablosu oluşturma işlemleri için gereken toplam süre, IS_{HZ} : hazırlık süresi, IS_{BOY} : ağaç sayısına bağlı olarak toplam ağaç boyu ölçme süresini (ilk ağaç için uygun konum alma, boy ölçümü ve boy değerini kayıt etme), k_{eky} : en kısa yol (konumlanma) katsayısını ifade etmektedir.

Hesaplamalarda, taksasyon ekibinin bir taksatör ve iki işçiden oluştuğu kabul edilmiştir. Ekibin bir örnek alanda standart yaptığı işler (merkez kazığın çakılması, alanın çevrilmesi, örnek ağaçların numaralanması, göğüs çaplarının ölçülmesi vb.) ile ilgili herhangi bir ölçme yapılmamıştır. Yalnızca tek girişli hacim tablosunun hazırlanabilmesine yöne-

lik yapılması gereken işlemler için süre ölçümleri yapılmıştır. Örnek alandaki ağaçlara ait bazı orta ağaç değerlerini ve istatistikleri otomatik hesaplayabilen sayısal bir ortamda kayıt alındığı, boy ölçümünün Haglöf Vertex-IV boyölçer ile yapıldığı varsayılmıştır.

2.2.7.1. Hazırlık aşaması süresi

Hazırlık aşaması, ekibin örnek alan merkezinde toplanması, ölçü araçlarının hazır hale getirilmesi ve ölçülecek örnek ağaç numaralarının kısmen tespiti ile ilk örnek ağaç konumunun belirlenmesi işlemleri olarak kurgulanmıştır. Bu süre her SY için sabit kabul edilmiştir.

2.2.7.2. “Yol-zaman” ilişkisi modeli

Örnek alan içerisinde, seçim yöntemlerine bağlı olarak farklı sayı ve konumda seçilen örnek ağaçlara ulaşım için harcanacak bir zaman söz konusudur. Bu süreyi belirleyebilmek için mesafenin bir fonksiyonu olarak zaman bağımlı değişkenini tahmin edecek bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Süreyi etkileyebilecek eğim, taşlılık, diri örtü yoğunluğu gibi değişkenler yadsınmıştır. Bu analiz için kullanılan veriler, örnek alanlarda kaydedilen, konumları belli olan ağaçlara merkez noktadan gidiş-geliş eylemlerinin video analizlerinden elde edilmiştir. Bu çalışma için yeterli görülen doğrusal (Denklem 26) ve ikinci dereceden polinom formunda (Denklem 27) iki adet model test edilmiş, \bar{R}^2 , AIC ve $RMSE$ 'den oluşan başarı ölçüt seti ile değerlendirilmiştir.

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \varepsilon \quad (26)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \varepsilon \quad (27)$$

2.2.7.3. “Boy ölçümü yapılan ağaç sayısı-zaman” ilişkisi modeli

Seçim yöntemlerine bağlı olarak farklı sayılarda seçilecek örnek ağaçların boy ölçme işlemleri için harcanan bir zaman söz konusudur. Bu zamanı belirleyebilmek için öncelikle boyu ölçülen ağaç sayısının bir fonksiyonu olarak zaman bağımlı değişkenini tahmin edecek bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Bu amaçla farklı meşcerelerde yapılan boy ölçmeleri video kamera ile kaydedilmiş, veriler büro aşamasında video analizleri ile elde edilmiştir.

Bu çalışma için yeterli görülen iki adet model (26 ve 27) test edilmiş, \bar{R}^2 , AIC ve $RMSE$ başarı ölçüt seti ile değerlendirilmiştir.

Seçilen model tek bir ağaç içindir ve n . sıradaki örnek ağacın ne kadar sürede ölçüleceğini tahmin

eder. Ancak toplam örnek ağaç sayısı için birikimli toplam işlem süresi verecek bir denkleme ihtiyaç vardır. Bu yüzden birikimli zaman değerleri kullanılarak boy ölçüm işlemlerinde harcanan kümülatif zaman için Denklem 27 kullanılmıştır.

Uygun konum alma işlemi süresi birinci ağaç için her zaman diğerlerinden yüksek değere sahiptir. Bu yüzden ilk ağaç için aritmetik ortalama değer kullanılmış, seçilen modelin ürettiği 2.'den 10. ağaca kadar ölçüm süresi değerleri birbirlerine eklenecek kümülatif denklem oluşturulmuştur.

2.2.7.4. En kısa yolun hesaplanması ve k_{eky}

Kurgulanan her bir SY için örnek olarak seçilen ağaçlar sayı ve konum olarak farklılık göstermektedir. Uygulayıcı, ölçüm yapılacak bu örnek ağaçlara birçok farklı yol üzerinden ulaşılabilir. Ancak ulaşım için kullanılacak toplam süreyi belirleyecek toplam yolun standart biçimde tanımlanması, seçim yöntemlerini karşılaştırabilmek için zorunludur. Bunun için örnek alan merkezinden başlayarak tüm örnek ağaçlardan geçen, sonra tekrar merkeze dönen “en kısa yolun” kullanılması uygun görülmüştür.

En kısa yol hesapları, 54 seçim yöntemi ve 47 örnek alan için ArcGIS programının “*Network Analyst*” modülüyle yapılmıştır. Örnek alan merkez noktasından başlayıp son olarak yine merkez noktaya dönüşü içeren 2538 (54x47) farklı konumda, tüm örnek ağaçların dolaşılacağı en kısa yollar belirlenmiş, yürünmesi gereken toplam en kısa mesafeler hesaplanmıştır. Her SY için belirlenen 47 ayrı en kısa yolun aritmetik ortalaması hesaplanmış, toplam ulaşım sürelerinin hesaplanmasında kullanılacak değerler elde edilmiştir.

Ağaç boyu ölçme işlemi yapacak kişinin, hem göğüs çapı yüksekliğine takılan boyölçer cihazının aktarıcı (transponder) parçasını, hem de ağacın tepe noktasını görebileceği bir konum alması gerekmektedir. Örnek alanlardaki örnek ağaçların sayı ve konumları, seçim yöntemlerine göre farklılık gösterir. Bazı ağaçlar farklı sayılarda merkez noktaya ya da orta ağaca en yakın konumda iken bazıları rastgele dağılmış olarak tespit edilecektir. Boy ölçen kişi bu farklı durumlar için farklı sürelerde konum değiştirmek durumundadır. Birbirlerine yakın ağaçların seçildiği seçim yöntemlerinde daha az, rastgele dağılmış ağaçların seçildiği yöntemlerde de daha sık konum değiştirmesi gerekecektir. Dolayısıyla bu işlem için gerekli toplam süre farklılık gösterecektir.

Seçim yöntemlerine göre farklı sayı ve konumdaki örnek ağaçlar arasındaki en kısa yol, ağaç ko-

numlarının dağılımı ile ilişkilidir. Her bir SY için hesaplanmış ortalama en kısa yol uzunluklarının, boy ölçme süreleri ile çarpılacak bir katsayıya (k_{eky}) dönüştürülmesi kararlaştırılmıştır. Bu yöntemle, seçim yöntemlerinin sadece sayıya ilişkin hesaplanan toplam boy ölçümü sürelerine nazaran, ölçekli bir sıralama için daha rasyonel bir değer üretilmektedir. Denklem 28’de görüldüğü gibi formüle edilmiştir.

$$k_{i,eky} = \left(1 + \frac{x_{i,eky} - x_{eky(min)}}{x_{eky(max)} - x_{eky(min)}}\right) \quad (28)$$

Burada $k_{i,eky}$: i . seçim yöntemi için boy ölçüm süresi ölçeklendirme katsayısı, $x_{i,eky}$: i . seçim yöntemi için hesaplanan en kısa yol değeri ortalaması, $x_{eky(min)}$: girdi setindeki (seçim yöntemleri için hesaplanan 54 adet en kısa yol uzunluklarının aritmetik ortalamaları) en küçük değer ve $x_{eky(max)}$: girdi setindeki en büyük değeri ifade etmektedir.

2.2.8. Optimizasyon

Seçim yöntemleri için toplam başarılarının en yüksek olması, aynı zamanda uygulama için harcanacak iş süresi değerlerinin de en az olması istenmektedir. Genel olarak daha iyi bir sonuç buluncaya kadar, olası tüm çözümlerin amaç işlevine göre aranması ve karşılaştırılması işlemi “optimizasyon” olarak tanımlanır (Ergül, 2010).

Pareto optimal yöntemi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde birden fazla amacın eş zamanlı biçimde en iyilenmesi yöntemlerinden biridir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin asıl amacı, Pareto cephesini bulmak veya yaklaşmak, bu cephe üzerinde düzgün bir dağılım sağlayarak karar vericiye alternatif karar seçenekleri sunmaktır. Yakın zamanda yapılan çalışmalar, Pareto optimalin çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde en etkili yöntem olduğunu ve diğer yöntemlere üstünlüklerini göstermiştir (Kaya ve Fırlı, 2016).

Bu çalışmadaki optimizasyon işleminde iki amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Birincisi seçim yöntemlerinin başarı puanlarının en küçüklenmesidir. Seçim yöntemleri başarı ölçüt setleri ile puanlanarak kendi aralarında sıralanmıştır. Sıralamada seçim yönteminin başarısı başarı puanı artarken azalmaktadır. En küçük puana sahip yöntem uygun yöntemdir. İkinci amaç fonksiyonu uygulama süresinin en küçüklenmesidir. Yöntemler hesaplanan uygulanma süreleri ile aynı biçimde derecelendirilmiş, en kısa sürede uygulanan yöntem en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. İstenen her iki amaç fonksiyonunun da en küçüklenmesidir. Son olarak hesaplanan tüm değerler çok amaçlı

optimizasyon yöntemlerinden Pareto optimal ile değerlendirilmiştir.

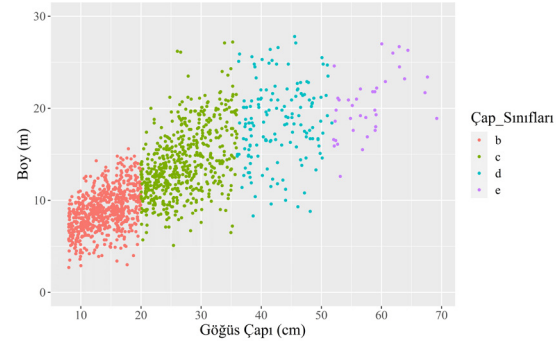
Optimizasyon öncesinde seçim yöntemlerinin toplam başarı puanları ile iş süreleri değerlerine normalizasyon işlemi (Denklem 29) uygulanmıştır. İstatistiksel normalleştirme veriler arasındaki farklılığın çok fazla olduğu durumlarda verileri tek bir düzen içerisinde ele almanın yanında farklı ölçeklendirme sisteminde bulunan verilerin birbirleri ile karşılaştırılabilecek bir forma taşınmasıdır (Öztemel, 2016).

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (29)$$

Burada x : girdi değeri, x' : girdi değerinin ölçeklendirilmiş hali, x_{min} : girdi setindeki en küçük değer ve x_{max} : girdi setindeki en büyük değeri ifade etmektedir.

3. Bulgular

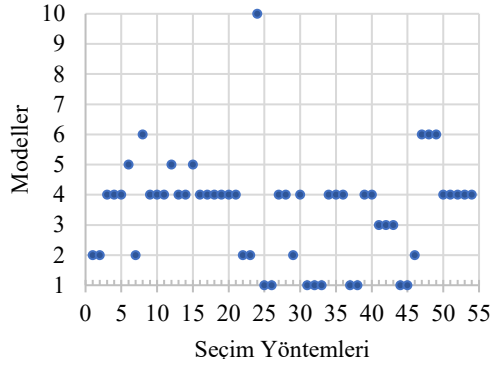
Örnek alanlar içerisindeki 1408 adet kızılçam ağacına ait çap ve boy değerlerinin çap sınıflarına göre dağılım grafiği Şekil 2’de verilmiştir. Grafikte göğüs çapı artarken, giderek azalan biçimde artan boy değerlerinin doğal kanuniyetlere uygun biçimde hareket ettikleri gözlenmektedir. Noktaların birbirlerine yakınlık dereceleri ile anlamlı bir korelasyondan bahsetmek mümkündür.



Şekil 2. Çap ve boy değerlerinin dağılımı
Figure 2. Distribution of diameter and height values

3.1. Çap-boy modellerinin değerlendirilmesi

Test edilen 10 adet çap-boy modelinin seçim yöntemlerine göre başarı durumları Şekil 3’te görülmektedir. 4 numaralı model toplam 27 seçim yöntemi için en başarılı olmuştur. Dokuz kez model 1, yedi kez model 2, dört kez model 6 seçilerek bunu takip etmiş, 3 ve 5 numaralı modeller üçer kez ve bir kez de model 10 en iyi seçilmiştir. Model 7, 8 ve 9 hiçbir seçim yöntemi örneğinde başarılı olmamıştır.



Şekil 3. Başarılı çap-boy modellerinin dağılımları
Figure 3. Distributions of successful diameter-height models

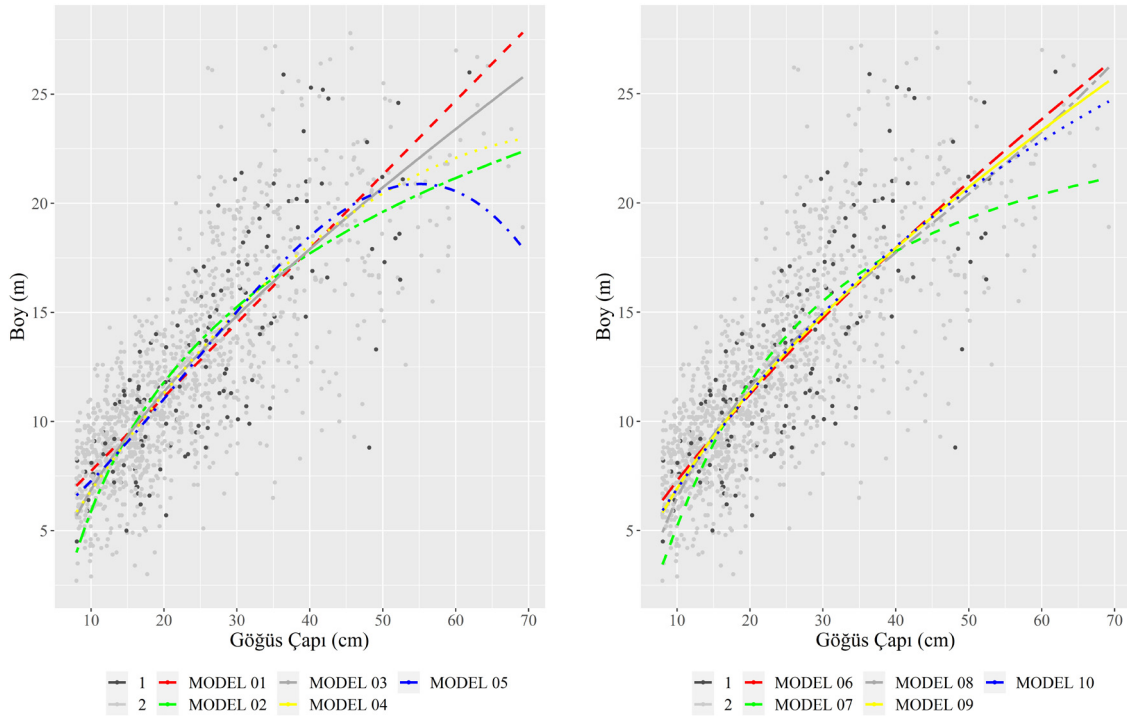
Tüm seçim yöntemleri ve 10 model için yapılan regresyon çözümlerinde toplam 540 adet denklem elde edilmiştir. Ek Tablo 2’de, modellerin *SCI* ile hesaplanan ölçüt değerleri ve puanları yer kısıtı nedeniyle yalnızca SY14 örneği için verilmiştir. Örnek olarak SY14’ün seçilmesinin nedeni yöntemin çözüm kümesi içerisinde ideal noktaya en yakın olarak tespit edilmesidir.

Tüm seçim yöntemleri için en başarılı seçilen 54 modele ait bazı *SCI* ölçüt değerlerinin istatistikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Başarılı modellere ilişkin bazı istatistikler
Table 2. Some statistics of successful models

	<i>RMSE</i>	\bar{R}^2	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>	<i>s</i>
En büyük	3,705	0,662	2,934	107,35	3,745
En küçük	2,648	0,466	2,086	17,944	2,702
Ortalama	3,126	0,584	2,432	28,456	3,155
<i>Sd</i>	0,213	0,037	0,173	25,100	0,214
Aralık	1,057	0,196	0,849	89,409	1,043
Basıklık	1,041	2,982	1,109	6,556	1,087
Çarpıklık	0,403	-1,29	0,666	2,877	0,624

Model grafikleri, örnek olarak SY14 için örneklem değerleri üzerinde görülecek biçimde Şekil 4’te model eğrilerinin net gözlenebilmesi amacıyla iki parça olarak verilmiştir. SY14 ile seçilen ağaçlar için Model 4 en iyi TBP olarak seçilmiştir. Siyah noktalar (1) SY14 ile seçilmiş, gri renkli noktalar (2) ise tüm ağaçlara ait değerlerin dağılımlarıdır. Model eğrileri (ya da doğrular) farklı renk ve çizgi tipleri ile gözlenmektedir.



Şekil 4. Test edilen modellerin SY14 örnekleme üzerinde gösterimleri
Figure 4. Demonstrations of the tested models on the SY14 sample

3.2. Seçim Yöntemleri için değerlendirmeler

Test grubu ağaçları üzerinde, farklı seçim yöntemlerinin tahmin ettiği boy değerleri ile gerçek boy

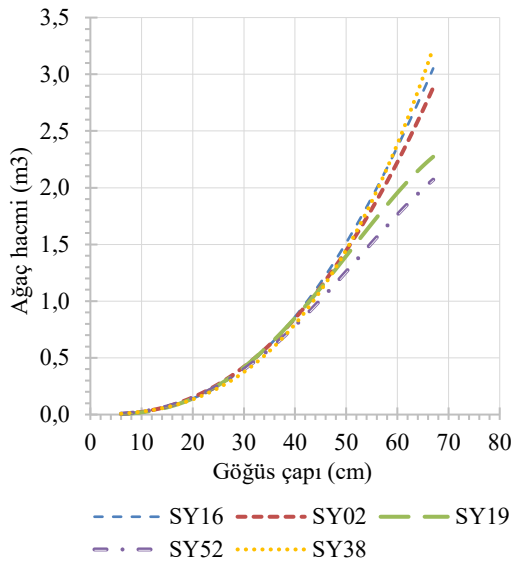
değerlerinin karşılaştırılması sonucu elde edilen *SC2* değerleri Ek Tablo 3’te görülmektedir. Tablo yer kısıtı nedeniyle en başarılı ilk 20 SY için düzenlenmiştir.

Seçim yöntemlerinin kendi aralarındaki değerlendirilmede en yüksek başarı puanına sahip ilk beş yöntem SY16, SY27, SY15, SY14 ve SY09 olarak sıralanmaktadır.

3.3. Elde edilen tek girişli hacim tablolarına ilişkin değerlendirmeler

Seçim yöntemleri ile elde edilen farklı çap-boy modellerinin hacim tabloları üzerindeki etkileri gözlenmek istenmiş, her bir yöntem ile Denklem 24 (Çatal, 2009) kullanılarak tek girişli hacim tabloları oluşturulmuştur.

Göğüs çapı 8-67 cm arasındaki tüm değerler için en yüksek (SY38), en düşük (SY52) ve ara miktarlarda hacim değeri üreten bazı yöntemler (SY16, SY02, SY19) için oluşturulan göğüs çapı ile ağaç hacim ilişkisi grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Diğer yöntemlerle oluşturulan eğriler grafikteki bu eğriler arasında dağılmaktadır. Son çap değeri 67 cm için en düşük hacim değerini 2,071 m³ ile SY52, en büyük hacim değerini ise 3,233 m³ ile SY38 üretmektedir. Aynı örnek alanlardan alınmalarına rağmen değişik ölçütlerle seçilen örnek ağaçlar ile elde edilen hacim değerlerinin nasıl farklı olabileceği Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Farklı SY'ler ile elde edilen kabuklu gövde hacim değerleri grafiği
Figure 5. Graph of bark tree volume values obtained with different SY's

Grafikte, denklemlerinin 40 cm'den itibaren artan göğüs çapları için giderek farklılaşan biçimlerde hacim değerleri ürettikleri görülmektedir. Plan ünitelerinde göğüs çapı büyük ağaçların oranları azaldıkça hata oranı yüksek hacim tablolarının fark edilmesinin de güçleşeceği ifade edilebilir.

3.4. İş ölçümlerinin değerlendirilmesi

3.4.1. Hazırlık aşaması süresi

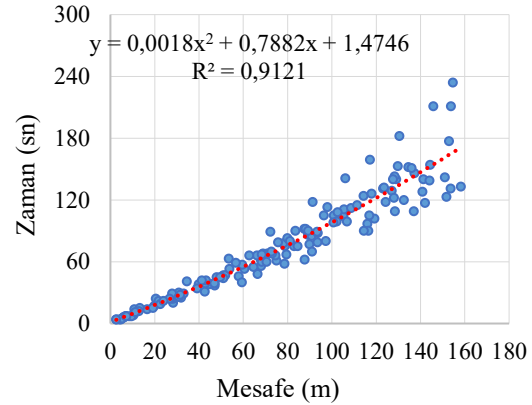
Hazırlık aşaması süresi ($\bar{I}S_{HZZ}$) ortalama değeri 11,53 sn olarak belirlenmiştir. Hazırlık sürelerine ilişkin bazı istatistikler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Hazırlık süreleri için bazı istatistikler
Table 3. Some statistics for preparation times

Ortalama	11,53	Ölçüm sayısı	47
Standart hata	0,418	En büyük	19
Standart sapma	2,87	En küçük	7

3.4.2. "Yol-zaman" ilişkisi modeli

Örnek alanların 15 adedinde, ilk ağaçtan başlayarak ortalama onuncu ağaca kadar sırayla merkez noktasına gidilip gelinmiş, ulaşım süreleri kaydedilmiştir. İşlemin video dosyalarının çözülmesi ile elde edilen verilerin dağılımı Şekil 6' da görülmektedir.



Şekil 6. Yürünen yol ile zaman değerleri dağılımları
Figure 6. Distribution of time values with the path taken

İkinci derece bir polinom olarak uygun seçilen model (Denklem 30), varyasyonun yaklaşık yüzde doksan birini mesafe bağımsız değişkeni ile açıklamaktadır. Modelin ANOVA sonuçları $\alpha=0,05$ için F istatistikleri açısından anlamlıdır [$F(2, 148)=767,4271, p<0,001^{***} (p=7,45E-79)$].

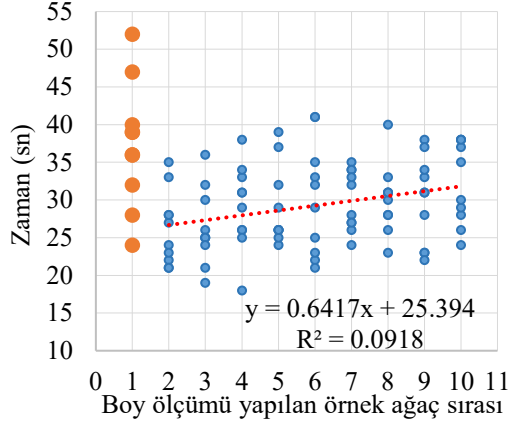
$$t = 1,4746 + 0,7882l + 0,0018l^2 \quad (30)$$

Burada t : zamanı (sn), l : yürünecek yolu (m) ifade etmektedir.

3.4.3. "Boy ölçümü yapılan ağaç sayısı-zaman" ilişkisi modeli

Dağılım grafiği Şekil 7'de görüldüğü üzere, farklı renkle (turuncu) gösterilen birinci sırada ölçülen örnek ağaçlar için harcanan süre genel olarak di-

ğerlerinden fazladır. Bunun nedeni, merkezden hareketle uygun konum alma işleminin başlangıçta daha uzun sürede gerçekleşmesidir. Bu yüzden ilk ağaçlar için işlem süresi aritmetik ortalama hesabı ile belirlenmiş ve sabit alınmış, 2. ve sonrası ağaçlar için regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

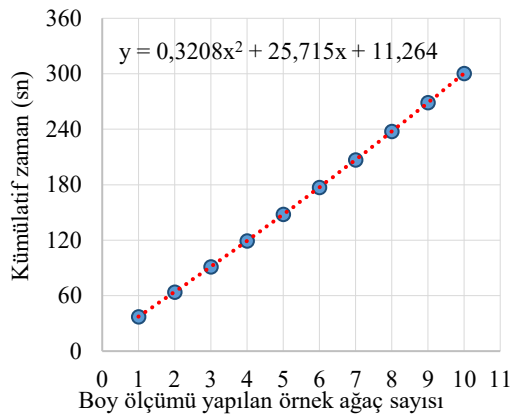


Şekil 7. Örnek ağaç sırası ile işlem sürelerine ait verilerin dağılımı

Figure 7. Distribution of data of processing times with sampling tree order

Seçilen doğrusal model, varyasyonun yaklaşık yüzde dokuzunu örnek ağaç sırası bağımsız değişkeni ile açıklamaktadır. Modele ait ANOVA sonuçları $\alpha=0,05$ için F istatistikleri açısından anlamlıdır [F(1, 89)=8,896644, $p<0,01^{**}$ ($p=0,003696$)]. Bu değerler, model kullanımı ile yapılan tahminin, ortalamaları kullanmaktan %95 güvenle daha iyi sonuç vereceği anlamını taşır.

Çalışmada ilk örnek ağaç için uygun konum alma süresi, ilgili değerlerin aritmetik ortalaması 37,3 sn olarak hesaplanmış ve kümülatif model (Şekil 8) bu değerler kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 8. Örnek ağaç sayıları için boy ölçümü-zaman grafiği
Figure 8. Height measurement-time graph for sampling tree numbers

Bu veriler ile hazırlanan ve " $\dot{I}S_{BOY}$ " olarak sembolize edilen kümülatif denklem (Denklem 31), k_{eky} katsayısı ile çarpılıp hazırlık süresinin ($\dot{I}S_{HT}$) eklenmesi sonucu; seçim yöntemleri için kullanılan ve her zaman tam sayı olmayan ortalama örnek ağaç sayılarının bir fonksiyonu olarak harcanacak sürenin ($\dot{I}S_{HT}$) hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$\dot{I}S_{BOY} = 11,264 + 25,715n + 0,3208n^2 \quad (31)$$

Burada n : boy ölçümü yapılan toplam ağaç sayısını ifade etmektedir.

3.4.4. En kısa yol, k_{eky} ve $\dot{I}S_{HT}$

Her SY için ayrı ayrı hesaplanan ve her biri 47 adet örnek alandan elde edilen ortalama en kısa yol (OEKY) uzunlukları (m), standart sapmaları (sd) ve iş süreleri ($\dot{I}S_{HT}$) Ek Tablo 4'te verilmiştir. Yöntemler, uygulanmalarındaki iş süreleri açısından değerlendirildiklerinde en iyi ilk beş yöntem SY01, SY13, SY07, SY52 ve SY51 şeklinde sıralanmaktadır.

Ek Tablo 4'te örnek ağaçların (i) merkez noktasına ve (ii) Weise orta ağacına yakınlık ölçütleri ile çalışan seçim yöntemlerinde yürünen en kısa yolların, (iii) rastlantısallığın genel bir ölçüt olarak kullanıldığı seçim yöntemlerindeki en kısa yollardan daha küçük değerlere sahip oldukları da okunabilmektedir.

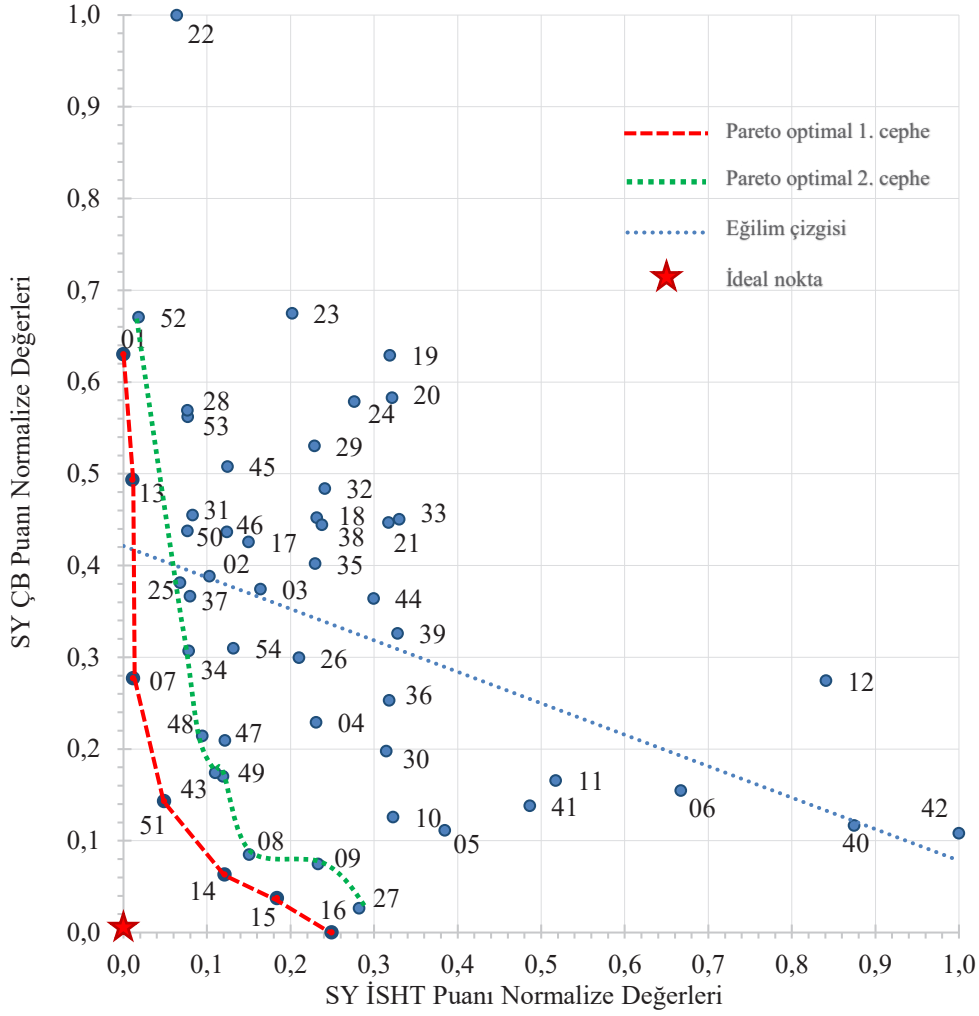
3.5. Optimizasyon değerlendirmeleri

Seçim yöntemleri için kullanılan $\dot{I}S_{HT}$ ile çap-boy (ÇB) denklemleri toplam başarı puanlarının normalize edilmiş değerlerinin dağılımları Şekil 9'da düzenlenmiştir. Pareto optimal küme 1. cephe grafikte kesikli kırmızı çizgi kullanılarak, 2. cephe ise noktalı yeşil renkteki çizgi ile belirtilmektedir.

Grafikte mavi noktalı doğrusal gösterimi tercih edilen "eğilim çizgisi", işlem süresi ile seçim yöntemlerinin başarılarının ilişkisini ifade eder. İşlem süresi çoğunlukla örneklem büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Genel olarak boy ölçümüne ilişkin işlem süresi artarken (örneklem büyürken) seçim yönteminin başarısı iyileşmektedir.

İşlem süresi artarken 1. cephe Pareto optimal çözüm kümesini oluşturan seçim yöntemleri de 01, 13, 07, 51, 14, 15 ve 16 şeklinde sıralanır. Pareto optimal 2. cephe ise 52, 25, 34, 48, 43, 49, 08, 09 ve 27 numaralı seçim yöntemlerinden oluşur.

Çap-boy denklemleri ve işlem süreleri ($\dot{I}S_{HT}$) optimizasyonu ile elde edilen Pareto optimal çözüm kümesinde en yüksek başarı puanına sahip olan SY16'dır. SY16, Weise orta ağacı ve ona en



Şekil 9. “ÇB-İS_{HT}” optimizasyonu ve Pareto optimal cepheler
Figure 9. “ÇB-İS_{HT}” optimization and Pareto optimal fronts

yakın mesafedeki dört adet ağaç ölçütüyle çalışmaktadır. Yöntemin pratikte kullanımının zaman alıcı olduğu söylenebilir. Bu yöntemi, kullanılan örnek ağaç sayısının azalış sırası ile SY15, SY14, SY51 ve SY07-SY13-SY01 takip etmektedir.

SY13, SY14 ve SY15 sırasıyla Weise orta ağacının kendisi, beraberinde en yakın mesafedeki iki ve üç adet ağaç ile çalışmaktadır. SY16’ya göre daha küçük örneklem ile çalıştıklarından daha pratiktirler. Örnek alan içerisinde Weise orta ağacı ve ona en yakın konumdaki ağaçların seçildiği yöntemler grubunun en başarılı olduğu gözlenmektedir.

Örnek alandaki ağaçların göğüs çaplarına göre ortancası bir veya iki adet ağaç seçimi ile SY51 de başarılı bir yöntemdir. Rastgele bir ağaç seçimi ile oluşturulan SY07 için ise kullanımı en pratik seçim yöntemi olduğu söylenebilir.

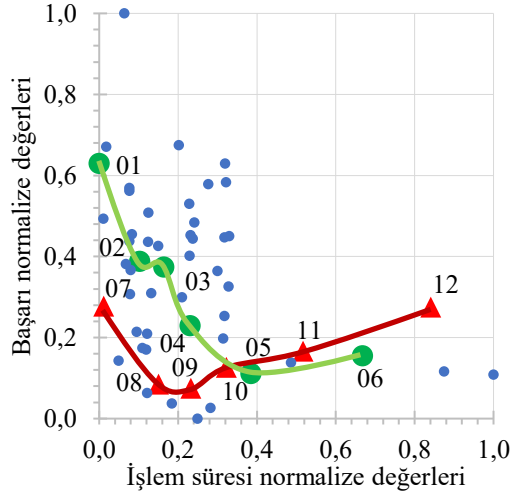
Pareto optimal 2. cephede yer alan SY08, SY43

ve SY49, orijine (0;0) yakın konumları ile başarılı olarak yorumlanabilecek yöntemlerdir. Seçim yöntemi grafik konumlarının orijin noktasına mesafelerinin (Öklid mesafesi) küçük olması ütöfik ve ideal optimale yakınlık anlamı taşımaktadır. SY43 örnek alandaki n adet çap sınıfı içerisinde rastgele seçilen birer adet (n x 1) ağaç ile çalışır. SY49’un seçim ölçütü ise yine çap sınıfları içerisinde seçilen, Weise orta ağacına en yakın konumdaki birer adet (n x 1) ağaçtır. Çap sınıflarından seçilen örnek ağaçlar ile çalışan yöntemlerin genel olarak başarılı oldukları gözlenmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Güncel uygulamada kullanılan yöntem ile en çok örtüşen seçim yöntemleri SY02, SY03 ve SY04’tür. Örnek alan merkezine en yakın konumda seçilen 3,4 ve 5 adet ağaç ile çalışırlar. Bu grup, seçim yöntemleri içerisinde belirgin bir başarı düzeyine

ulaşamamıştır. Rastgele 1, 3, 4 ve 5 ağaç ile çalışan yöntemler genel olarak merkeze en yakın ağaçlar ile çalışan yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar vermiştir (Şekil 10). Merkeze en yakın 7 ve 10 ağaç ile çalışan yöntemler (SY05 ve SY06) ise rastgele 7 ve 10 ağaçla çalışan yöntemlerden (SY11 ve SY12) daha başarılı olmuştur.



Şekil 10. Merkeze en yakın ile rastlantısal yöntemlerin karşılaştırılması
Figure 10. Comparison of the methods closest to the center and random methods

Teorik olarak sistematik dağıtılan örnek alanlarda, rastgele seçilen bir ağaç ile merkeze en yakın seçilen ağaç arasında rassal açıdan bir fark yoktur. Ancak çalışma sonucunda SY01 ile SY07 arasındaki başarı farkı büyüktür. Bu rassallığı engelleyen davranışın taksatörün alışkanlık ile merkez kazıgını örnek alan bilgilerini gövdesine yazabileceği kalın çaplı bir ağaca yakın yere sabitlemesi olduğunu düşünmek mümkündür. Yine de rastlantısal seçilen örnek ağaçlarla elde edilen başarının rastlantısal olmadığı da yöntemler birçok kez tekrarlanmadığı için net olarak söylenemez. Daha sağlıklı karşılaştırmalar açısından ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

Optimizasyon grafiğinde SY01 ve SY13 Pareto 1. cephede yer alsalar da baskın oldukları diğer yöntemlerin sayısı çok azdır. Bu nedenle her ne kadar pratik olsalar da başarılı oldukları söylenemez. Pareto 2. cephede yer alan SY8, SY43 ve SY49 ideal noktaya yakınlıkları ile başarılı olarak değerlendirilen yöntemlerdir.

Pareto optimal 1. cephe ve Pareto optimal 2. cephe içerisinde en uygun çap-boy denklemini elde eden seçim yöntemleri, bazı hata değerleri ve uygulanma süreleri ile Tablo 4'te düzenlenmiştir. Tablodaki hata değerleri test grubuyla yapılan karşılaştırmalar ile elde edilen rakamlardır.

Tablo 4. Çözüm kümesi ve seçim yöntemlerine ilişkin bazı hata değerleri
Table 4. Some error values for solution set and selection methods

SY	(BIAS) Toplam hata	(PBIAS) Toplam hata yüzdesi (%)	(MAE) Mutlak hata	(MAPE) Mutlak hata yüzdesi (%)	RMSE	(SE) Standart hata	Ölçüm işlemi süresi (dakika/örnek alan)	Öklid mesafesi
07	0,111	-4,6	2,308	21,2	2,972	0,081	0,94	0,277
14	0,115	-3,9	2,209	20,2	2,893	0,081	2,13	0,136
15	0,093	-4,8	2,173	19,8	2,879	0,082	2,81	0,188
16	0,056	-4,7	2,163	19,8	2,853	0,083	3,51	0,249
51	0,216	-3,0	2,262	20,5	2,937	0,080	1,35	0,151
*08	0,137	-5,3	2,201	20,2	2,902	0,081	2,44	0,173
*43	0,349	-3,7	2,227	20,0	2,942	0,081	2,11	0,208
*49	0,312	-4,4	2,216	20,1	2,943	0,082	2,00	0,206

SY sütununda * ile gösterilen seçim yöntemleri Pareto optimal 2. cephede yer almaktadır.

Çözüm kümesi içerisinde ideal noktaya en yakın yöntemler Öklid mesafesi değerlerine göre 14, 51, 08, 15, 49, 43, 16 ve 07 numaralı yöntemler biçiminde sıralanmaktadır.

Ortalama Öklid mesafeleri ($OÖM$) ile grup olarak değerlendirildiklerinde W_{oA} ve ona en yakın mesafedeki 2; 3 ve 4 ağaçla çalışan yöntemler (SY14, SY15 ve SY16) ilk sırada yer almaktadır ($OÖM=0,191$). İkinci başarılı grup çap sınıfları içerisinde; (i) rastgele seçilen birer ağaç (SY43) ve (ii) W_{oA} 'na en yakın mesafede seçilen birer adet ağaçla çalışan (SY49) yöntemlerdir ($OÖM=0,207$). Örnek

alan içerisinde rastlantısal çekilen bir (SY07) ve 3 (SY08) adet ağaçla çalışan yöntem grubu ise 3. sırada başarılıdır ($OÖM=0,225$).

Bu çalışma ülkemizde yapılan orman planlama faaliyetlerindeki envanter yöntemleri üzerine uygulanmıştır. Bu nedenle uluslararası literatürdeki çalışmalar ile yapılacak bir karşılaştırma; çalışmaların (i) farklı amaç ve (ii) amaç fonksiyonlarına sahip olmaları, (iii) tam örtüşmeyen örnekleme stratejileri, (iv) farklı başarı ölçütleri ve (v) çözümleme yöntemleriyle elde edilen sonuçlar için pek mümkün olmamaktadır. Kısmen yapılabilecek

karşılaştırmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Arabatzis ve Burkhart (1992), çap boy eğrisinin modellenmesinde yerine koymadan basit rastgele örnekleme yönteminin etkili biçimde kullanılabilir olduğunu, tabakalı rastgele örneklemenin ise maliyet ve zaman bakımından olumsuz özellikleri olsa da model tahmin performansını artırdığını belirtmektedir. Bu çalışmada da benzer sonuçlar sayısal zaman değerleri ile birlikte ayrıntılı biçimde ortaya koyulmuştur.
- Sullivan ve ark. (2018), boy ve toprak üstü biyokütle tahmini modelleri için örnek büyüklüğünü 50 ağaç olarak tavsiye etmektedir. Ayrıca denen 5 farklı örnek ağaç seçme yöntemi içerisinde tutarlı olarak öne çıkan bir yöntemin bulunmadığı belirtilmektedir. Bu çalışmada da 47 örnek ağaçla çalışan ve optimal çözüm kümesinde yer alacak düzeyde başarıya ulaşmış SY07 mevcuttur. Ancak 50 ağaçtan daha fazla örnekleme boyutları ile çalışan seçim yöntemleri genel olarak daha başarılıdır. Başarılı tek bir yöntem grubundan bu çalışmada da bahsetmek mümkün değildir. Pareto optimal çözüm kümesinde üç farklı örnekleme yöntem grubu yer almaktadır.
- Ducca ve ark. (2020), biyokütle tahmin modelleri için örnekleme büyüklük ve dağılımını önemli bulmuş, örneklemedeki çap değerlerinin üniform (tekdüze/düzensiz) dağılımda olmasının modelleme için optimal durum olduğu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da başarılı seçim yöntemleri için örnekleme çap değerlerinin üniform bir dağılımla gözlendiği yöntemler olduğu söylenebilir. Çalışmada örnek alanlar plan ünitesi bazında çap kademeleri gözetilerek seçildiğinden, alanlar için genel olarak üniform çap dağılımı beklenen bir durumdur. Ancak plan ünitesine “sistemik” dağıtılan örnek alanlardan elde edilen örneklemler üniform dağılımdan uzaklaşabilir. Plan yapıcı bu süreci kontrollü bir şekilde yürütülmelidir.

Bu çalışmanın karşılaştırıldığı çalışmalara göre daha kapsamlı olduğunu, içeriğindeki çok sayıda seçim yöntemini test etmesi, daha fazla başarı ölçütü ile yapılan değerlendirmeler, işlem sürelerinin ölçümü ve çok amaçlı optimizasyon çözümleri gibi özellikleriyle söylemek mümkündür.

Öneriler

Çalışma sonucunun ormancılık uygulamalarında ve benzer içerikli çalışmalar için araştırmacılara yardımcı olabileceği düşünülen önerileri şunlardır:

- Orman amenajman planı yapıcısı ile uygulayıcı-

şı, öncelikle plan yapımında kullanılacak ağaç hacim tablosunun yenilenip yenilenmeyeceğine (dolayısıyla çap-boy modeli istenip istenmediğine) ilişkin ortak kararı almalıdır. Devamında plan yapıcısı (i) iş programının yoğunluğunu, (ii) programı tamamlamak için sahip olduğu zaman ve iş gücünü, (iii) plan ünitesinde ayrılan işletme sınıflarını boyutları, dağılımları ve oranları ile değerlendirmelidir. Koşullar ortaya koyulduktan sonra hangi “hata miktarları” ile çalışabileceğini netleştirerek, Tablo 4’te sunulan çözümler içerisinden en uygun olduğuna karar vereceği örnek ağaç seçim yöntemini kullanabilecektir.

Böylece, odun üretiminin işletme amacı olduğu alanların daha büyük oranlarda yer aldığı plan ünitelerinde hata miktarları küçük seçim yöntemlerini, koruma amaçlı orman alanlarının yoğun olduğu ünitelerde de nispeten daha büyük hata oranlarını göze alarak pratik, kısa sürelerde uygulanabilecek seçim yöntemlerini tercih edilecektir.

- Plan ünitelerindeki meşcereler gelişim çağları ve bonitet sınıfları itibariyle genellikle üniform dağılım göstermez. Bununla birlikte farklı büyüklüklerde yüz ölçümlere sahip meşcere yapılarını da içeren plan ünitelerinde, sistematik biçimde dağıtılmış örnek alanlardan elde edilen veriler analiz sürecinde problem oluşturabilir. Bu yüzden gerçekleştirilecek regresyon analizi sürecinde yapılacak veri önleme, regresyon varsayımlarının testi, varsayımların sağlanmadığı durumlar için uygun çözüm yöntemleri denenmesi oldukça önemlidir (Aydın, 2014; Alpar, 2017; Özçankaya ve Batur, 2022). Plan yapıcı düzenlenen denklemin doğal kanuniyetlere uygunluğunu kontrol etmeli, gerektiğinde uzman yardımı almaktan çekinmemelidir.
- Çalışmada test edilen çap-boy modelleri içerisinde başarısını en fazla sayıda (%50) tekrarlayan 2. dereceden polinom (kuadratik) modeldir (Denklem 4). Basit formu, çözümlemede özel bir yazılıma ihtiyaç duyulmaması ve kullanım kolaylığı özellikleri ile plan yapıcının test edeceği modeller içinde yer alması uygun olacaktır.
- Hasılat çalışmalarında “Çapraz doğrulama” yönteminin kullanımı ile zor koşullarda elde edilen verinin daha verimli kullanılabileceği, modelin genelleşme performansının daha iyi ölçülebileceği, aşırı uyum ya da seçim yanlılığı problemlerinin tespiti ile (Cawley ve Talbot, 2010) model seçimi ve geçerliği sürecinde daha doğru değerlendirmeler yapılacağı düşünülmektedir.
- Çalışma sürecinde modellenen ve hesaplanan iş sürelerinin, daha kapsamlı bir çalışma ile yeni-

den düzenlenene dek gereken şartlarda kullanılmasında ciddi bir sakınca olmayacağı söylenebilir. Gerek duyulan araştırma ve uygulama çalışmalarında, örnek alanda yapılan işler için yürünecek mesafenin ne kadar zaman süreceği Denklem 30, ağaç sayısına bağlı olarak boy ölçümleri için ne kadar süre gerekeceği Denklem 31 ile tahmin edilebilir.

- Model seçiminde kullanılan başarı ölçütleri ve optimal kombinasyonlarının belirlenmesi, ölçütleri değerlendirme yöntemleri ve süreç algoritmalarının oluşturulması gibi teorik çalışmalara ihtiyaç olduğu gözlenmektedir.

Teşekkür

Bu makale, Orman Genel Müdürlüğü, Ege Ormanlık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü 15.3501/2017-2019-2020 numaralı projesi sürecinde elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile hazırlanmıştır. Çalışmada emeği geçen Dr. Mustafa BATUR, Dr. Alper VAHAPLAR, Prof. Dr. H. Oğuz ÇOBAN ve Prof. Dr. Yılmaz ÇATAL'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Alpar, R., 2017. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Yöntemler. Detay Yayıncılık, Ankara.

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.

Aydın, D., 2014. Uygulamalı Regresyon Analizi/Kavramlar ve R hesaplamaları. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.

Aylak Özdemir, G., 2013. Trakya Meşe Ormanlarında Artım ve Büyüme İlişkileri. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Carus, S., Çatal, Y., 2017. Ağlasun yöresi kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) ağaçlandırmaları için bazı çap-boy modellerinin kıyaslanması. *Türkiye Ormanlık Dergisi* 18(2): 94-101.

Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Barrio Anta, M., Sánchez Rodríguez, M., Gadow K.V., 2006. A generalized height-diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management* 229: 202-213.

Cawley, G.C., Talbot, N.L.C., 2010. On over-fitting in model selection and subsequent selection bias in performance evaluation. *Journal of Machine Learning Research* 11(70): 2079-2107.

Colbert, K.C., Larsen, D.R., Lootens, J.R., 2002. Height-diameter equations for thirteen Midwestern bottomland hardwood species. *Northern Journal of Applied Forestry* 19: 171-176.

Çatal, Y., 2009. Batı Akdeniz Bölgesi Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) Meşcerelerinde Artım ve Büyüme. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

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.

Çatal, Y., Güneş, S., 2016. Isparta yöresi kızılçam meşcerelerinde çap dağılımının örnek alan ağaç sayısına göre modellenmesi. *Türkiye Ormanlık Dergisi* 17(2): 166-173.

Dutca, I., Mather, R., Ioraş, F., 2020. Sampling trees to develop allometric biomass models: How does tree selection affect model prediction accuracy and precision? *Ecological Indicators* 117: 106553.

Ercanlı, İ., Kahriman, A., Yavuz, H., 2012. Trabzon Orman Bölge Müdürlüğü doğu ladini-sarıçam karışık meşcereleri için karışık etkili doğrusal olmayan regresyon denklemleri ile doğu ladini çap-boy modellerinin geliştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi* 13(2): 75-84.

Ercanlı, İ., 2020. Artificial intelligence with deep learning algorithms to model relationships between total tree height and diameter at breast height. *Forest Systems* 29(1): e013

Ergül, E.U., 2010. *Çok Amaçlı Genetik Algoritmalar: Temelleri ve Uygulamaları*. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

Erkan, N., Aydın, A.C., Birkan, M.B., 2010. Dikili satış uygulamalarında hacim belirlenmesinde çift girişli hacim tablosunun kullanımı. *Orman Mühendisliği Dergisi* 47: 20-25.

Gimaret-Carpentier, C., Pelissier, R., Pascal, J.P., Houllier, F., 1998. Sampling strategies for the assessment of tree species diversity. *Journal of Vegetation Science* 9(2): 161-172.

Günel, H.A., 1973. Ağaç Serveti Miktarının Tayininde Kullanılabilecek Metodlar Üzerine Araştırmalar. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İstanbul.

Güneş, S., 2015. Isparta Yöresi Kızılçam Meşcerelerinde Çap Dağılımının Örnek Alan Ağaç Sayısına Göre Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

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: 1297-1304.

Jayaraman, K., Zakrzewski, W.T., 2001. Practical approaches to calibrating height-diameter relationships for natural sugar maple stands. *Forest Ecology and Management* 148: 169-177.

Kalıpsız, A., 1984. Dendrometri. İstanbul Üniversitesi

Orman Fakültesi, Yayın No: 3149/354, İstanbul.

Kapucu, F., 2004. Orman Amenajmanı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi Yayın No:215/33, Trabzon.

Kaya, S., Fıglalı, N., 2016. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde Pareto optimal kullanımı. *Sosyal Bilgiler Araştırma Dergisi* 5(2): 12-18.

Knowe, S.A., 1994. Effect of competition control treatments on height-age and height-diameter relationships in young Douglas-fir plantations. *Forest Ecology and Management* 67: 101-111.

Köhl, M., Magnussen, S., Marchetti, M., 2006. Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory. Springer, Berlin.

Lappi, J., 1991. Calibration of height and volume equations with random parameters. *Forest Science* 37(3): 781-801.

Larsen, D.R., Hann, D.W., 1987. Height–Diameter Equations for Seventeen Tree Species in Southwest Oregon. Oregon State University Papers, Corvallis.

Loetsch, F., Zöhrer, F., Haller, K.E., 1973. Forest Inventory. Vol.2 BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, Germany.

Lootens, J.R., Larsen, D.R., Shifley, S.R., 2007. Height-diameter equations for 12 upland species in the Missouri Ozark Highlands. *Northern Journal of Applied Forestry* 24(2): 149-152.

Mısır, N., 2010. Generalized height-diameter models for *Populus tremula* L. stands. *African Journal of Biotechnology* 9: 4348- 4355.

MPM, 1974. İş Etüdü. Milli Produktivite Merkezi Yayınları, Ankara.

Neyişçi, T., 1987. Kızılcıdamın doğal yayılışı. Öktem, E. (Ed.), Kızılcıdam, Ormançılık Araştırma Enstitüsü Yayınları, Ankara, pp. 15-22.

OGM, 2015. İzmir Orman Bölge Müdürlüğü, İzmir Orman İşletme Müdürlüğü, Gaziemir Orman İşletme Şefliği, Ekosistem Tabanlı Fonksiyonel Amenajman Planı. Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.

OGM, 2017. Ekosistem Tabanlı Fonksiyonel Amenajman Planlarının Düzenlenmesine Ait Usul ve Esaslar, Tebliğ No:299. Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.

OGM, 2021. 2020 Türkiye Orman Varlığı. Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.

Özçankaya, N., Batur, M., 2022. İzmir Orman Bölge Müdürlüğü fıstıkçamı (*Pinus pinea* L.) meşcerelerinde kütük çapı–göğüs çapı ilişkisinin modellenmesi. *Ormançılık Araştırma Dergisi* 9(1): 44-60.

Özçelik, R., Çapar, C., 2014. Antalya yöresi doğal kızılçam meşcereleri için geliştirilmiş çap-boy modellerinin geliştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi*

Orman Fakültesi Dergisi 15: 44-52.

Özer, E., Uğurlu, S., 1976. Ormançılıkta Ağaç Servetinin İstenen Doğrulukta Elde Edilmesinde Uygun Örnek Alan Büyüklüğü ve Sıklığının Saptanması. Ormançılık Araştırma Enstitüsü Yayınları, Ankara.

Prodan, M., 1965. Holzmesselehre. J. D. Sauerlander's Verlag. Frankfurt AM Main, Germany.

Ratkowsky, D.A., 1989. Handbook of Nonlinear Regression Models. Marcel Dekker INC., New York.

Sakıcı, O.E., 2009. Ağaç Serveti Envanterinde Kullanılan Çeşitli Örnekleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Sakıcı, O.E., Sağlam, F., Seki, M., 2018. Kastamonu Orman Bölge Müdürlüğü karaçam meşcereleri için tek ve çift girişli ağaç hacim denklemleri. *Turkish Journal of Forestry* 19(1): 20-29.

Seki, M., Sakıcı, O.E., 2022. Ecoregion-based height-diameter models for Crimean pine. *Journal of Forest Research* 27(1): 36-44.

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.

Soares, P., Tomé, M., 2002. Height–diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management* 166: 99-109.

Sönmez, T., 2009. Generalized height-diameter models for *Picea orientalis* L. *Journal Environmental Biology* 30: 767-772.

Sullivan, M.J.P., Lewis, S.L., Phillips, O.L., 2018. Field methods for sampling tree height for tropical forest biomass estimation. *Methods in Ecology and Evolution* 9(5): 1179-1189.

Şenyurt, M., 2012. Batı Karadeniz yöresi sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde kütük çapı–göğüs çapı ilişkileri. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi* 13(1): 79-87.

Şirin, G., 1989. Doğu Karadeniz Yöresindeki Ağaçlandırmaya İşlerine İlişkin İş Analizleri ve Standart Zamanlar. Ankara, Ormançılık Araştırma Enstitüsü Yayınları.

URL-1, 2018. National Institute of Standards and Technology. *Appendix B. Random Number Tables*. <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/04/28/AppenB-HB133-05-Z.pdf/> (Ziyaret tarihi: 09.04.2018).

URL-2, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (Ziyaret tarihi: 10.11.2018).

URL-3, 2018. Esri, geographic information system (GIS) software, ArcGIS Version 10.3., <https://www.esri.com/>.

Vanclay, J.K., 1994. Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests. CAB International, Wallingford, UK.

Wang, C.H., Hann, D.W., 1988. Height-Diameter Equations Sixteen Tree Species in The Central Western Willamette Valle of Oregon. Oregon State Universty Papers, Corvallis.

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, Utah.

Yavuz, H., 1999. Taşköprü yöresinde karaçam için hacim fonksiyonları ve hacim tabloları. *Turkish Journal of Agriculture ad Forestry*, 23: 1181-1188.

Ek Tablo 1. Seçim yöntemleri için ölçütler
Annex 1. Criteria for selection methods

Seçim yöntemi numarası	Seçim yöntemine göre örnek alanda seçilecek ağaç ölçütü	Örnek alanda seçilen ağaç sayısı	Örneklem grubunu oluşturan ağaç sayısı
01; 02; 03; 04; 05; 06	M 'e en yakın	1; 3; 4; 5; 7; 10	47; 141; 188; 235; 329; 470
07; 08; 09; 10; 11; 12	Rs	1; 3; 4; 5; 7; 10	47; 141; 188; 235; 329; 470
13; 14; 15; 16	W_{OA} ve en yakın mesafedeki	1+0; 1+2; 1+3; 1+4	47; 141; 188; 235
17; 18; 19	W_{OA} ve azalan en yakın çaptaki	1+2; 1+3; 1+4	141; 188; 235
20; 21	W_{OA} , en yakın azalan ve artan çaplı	1+3+1; 1+2+2	235; 235
22; 23; 24	M 'e en yakın ve en ince çaplı	1+1; 2+2; 3+2	94; 188; 235
25; 26; 27	M 'e en yakın ve en kalın çaplı	1+1; 2+2; 3+2	94; 188; 235
28; 29; 30	Rs ve en ince çaplı	1+1; 2+2; 3+2	94; 188; 235
31; 32; 33	Rs ve en kalın çaplı	1+1; 2+2; 3+2	94; 188; 235
34; 35; 36	W_{OA} ; W_{OA} azalan ve en ince çaplı	1+0+1; 1+1+2; 1+2+2	94; 188; 235
37; 38; 39	W_{OA} ; W_{OA} azalan ve en kalın çaplı	1+0+1; 1+1+2; 1+2+2	94; 188; 235
40	$ÇB_2$ 'den Rs seçilen	$n \times 1$	482
41; 42	$ÇB_4$ 'ten Rs seçilen	$n \times 1$; $n \times 2$	311; 532
43; 44	$ÇS$ 'dan Rs seçilen	$n \times 1$; $n \times 2$	121; 223
45	$ÇS$ 'daki en kalın çaplı	$n \times 1$	121
46	$ÇS$ 'daki en ince çaplı	$n \times 1$	121
47	$ÇS$ 'daki Weisse orta çaplarından	$n \times 1$	121
48	$ÇS$ 'daki M 'e en yakın	$n \times 1$	121
49	$ÇS$ 'daki W_{OA} 'na en yakın	$n \times 1$	121
50	\bar{d} alt ve üst değeri	1+1	94
51	$ÇD$ 'nın "Ortanca" değerini temsil eden	m	76
52	$ÇD$ 'nin "Mod" değerini temsil eden	m	56
53	d_g 'nin alt ve üst çap değerinde	1+1	94
54	d_g ile \bar{d} arasındaki	m	131

Bu tabloda, M : örnek alan merkez noktası, Rs : rastgele, W_{OA} : Weisse orta ağacı, $ÇB_2$ ve $ÇB_4$: örnek alandaki 2 cm ve 4 cm'lik çap basamakları, $ÇS$: çap sınıflarını (a:<8, b:8-20, c:20-36, d:36-52, e:>52), $ÇD$: çap dağılımı, \bar{d} : aritmetik orta ağacı, d_g : göğüs yüzeyi orta ağacı, n : örnek alanlardaki çap basamağı ile çap sınıfı sayısı ve m : ölçüte bağlı olarak seçilen ağaç sayısı sembolü olarak kullanılmıştır.

Ek Tablo 2. En başarılı model seçimleri için SCI değerleri (SY14 örneği)
Annex 2. SCI values for most successful model selections (SY14 example)

Model	AIC	P	BIC	P	RMSE	P	\bar{R}^2	P	MAE	P	MAPE	P	s	P	TBP
1	729,8	29,3	738,7	27,2	3,15	46,6	0,610	36,4	2,502	14,0	0,208	1,1	3,174	36,9	191,4
2	732,4	55,7	741,3	54,4	3,18	66,4	0,602	59,8	2,567	57,2	0,219	2,4	3,203	60,3	356,2
3	729,3	24,5	741,1	53,1	3,12	27,9	0,614	23,5	2,501	13,8	0,209	1,2	3,157	23,9	167,9
4*	727,0	1,0	738,8	28,9	3,10	10,6	0,620	3,3	2,493	8,6	0,208	1,2	3,132	3,4	57,1
5	727,7	8,2	742,5	67,1	3,08	1,0	0,621	1,0	2,482	1,0	0,206	1,0	3,129	1,0	80,3
6	727,3	3,8	736,1	1,0	3,12	27,7	0,616	14,3	2,495	9,7	1,058	100	3,146	14,5	171,0
7	736,8	100	745,6	100	3,23	100	0,590	100	2,632	100	1,044	98,3	3,253	100	698,3
8	731,3	44,5	743,1	73,7	3,15	42,8	0,608	41,1	2,516	23,2	1,056	99,8	3,180	41,5	366,7
9	728,9	19,8	740,7	48,3	3,12	24,5	0,615	19,5	2,499	12,4	1,057	99,8	3,152	19,8	244,1
10	727,8	9,0	739,6	37,2	3,11	16,5	0,618	10,2	2,495	9,5	1,056	99,7	3,140	10,4	192,6

Bu tabloda P: tek ölçüt puanı, TBP: tümleşik başarı puanı kısaltması olarak kullanılmış olup * en başarılı seçilen modeldir.

Ek Tablo 3. Çap-boy ilişkilerinin açıklanmasında en başarılı ilk 20 seçim yönteminin SC2 değerleri
Annex 3. SC2 values of the top 20 most successful selection methods in explaining diameter-height relationships

BS	BIAS	P	PBIAS	P	MAE	P	MAPE	P	RMSE	P	PVE	P	SE	P	<i>n</i>	TBP	SY
1	0,056	5	-0,047	32	2,163	19	0,198	7	2,853	31	61,77	17	0,0833	30	1173	141,7	16
2	0,356	38	-0,034	24	2,149	14	0,197	6	2,826	24	61,06	28	0,0819	20	1173	153,5	27
3	0,093	9	-0,048	33	2,173	22	0,198	8	2,879	37	61,27	25	0,0824	24	1220	158,3	15
4	0,115	12	-0,039	27	2,209	34	0,202	16	2,893	41	61,29	24	0,0812	15	1267	169,8	14
5	0,264	28	-0,038	27	2,202	32	0,200	12	2,888	40	62,01	14	0,0824	23	1220	175,0	09
6	0,137	14	-0,053	36	2,201	31	0,202	17	2,902	43	61,53	21	0,0815	17	1267	179,5	08
7	0,217	23	-0,043	30	2,109	1	0,202	18	2,737	1	61,19	26	0,0923	92	876	189,9	42
8	-0,106	11	-0,070	48	2,177	23	0,209	33	2,833	25	62,85	1	0,0862	50	1079	191,4	05
9	-0,016	1	-0,066	45	2,123	6	0,208	31	2,758	6	61,34	24	0,0907	81	926	193,6	40
10	0,171	18	-0,047	33	2,197	30	0,202	17	2,893	41	61,42	22	0,0844	37	1173	197,8	10
11	0,140	15	-0,054	37	2,175	23	0,205	24	2,838	27	60,77	32	0,0856	46	1097	203,2	41
12	0,216	23	-0,030	21	2,262	52	0,205	24	2,937	52	61,21	26	0,0803	9	1332	205,4	51
13	-0,164	17	-0,075	51	2,127	7	0,209	33	2,788	14	62,54	6	0,0909	82	938	210,7	06
14	0,265	28	-0,038	26	2,187	27	0,201	15	2,877	37	61,16	26	0,0872	57	1079	215,5	11
15	0,349	37	-0,037	26	2,227	40	0,200	12	2,942	53	60,77	32	0,0815	17	1287	217,6	43
16	0,312	33	-0,044	30	2,216	36	0,201	14	2,943	54	60,65	34	0,0816	18	1287	219,4	49
17	-0,258	27	-0,085	58	2,217	37	0,208	33	2,863	33	62,08	13	0,0833	30	1173	229,9	30
18	0,433	46	-0,031	22	2,229	41	0,200	11	2,956	57	60,21	41	0,0815	17	1287	234,9	47
19	-0,183	19	-0,093	63	2,223	38	0,213	45	2,889	40	61,45	22	0,0804	10	1287	237,1	48
20	-0,166	17	-0,074	50	2,221	38	0,210	37	2,896	42	61,48	22	0,0844	38	1173	243,8	04

Bu tabloda BS: başarı sırası, P: tek ölçüt puanı, TBP: tümleşik başarı puanı, *n*: test grubundaki ağaç sayısı kısaltması olarak kullanılmıştır.

Ek Tablo 4. Seçim yöntemleri için OEKY, *key* ve $\dot{I}S_{HT}$ değerleri
Annex 4. OEKY, *key* and $\dot{I}S_{HT}$ values for selection methods

SY no.	OEKY ±sd	k_{key}	$\dot{I}S_{HT}$ (dak)	BS	SY no.	OEKY ±sd	k_{key}	$\dot{I}S_{HT}$ (dak)	BS	SY no.	OEKY ±sd	k_{key}	$\dot{I}S_{HT}$ (dak)	BS
01	04,14±01,8	1,00	0,81	1	19	47,31±13,6	1,65	4,27	43	37	30,16±10,6	1,39	1,68	12
02	13,41±04,4	1,14	1,93	15	20	48,02±14,3	1,66	4,29	44	38	44,21±11,2	1,61	3,39	34
03	17,78±05,9	1,21	2,59	25	21	46,83±13,1	1,65	4,25	41	39	50,00±12,8	1,69	4,37	46
04	21,71±07,0	1,27	3,31	31	22	19,33±07,5	1,23	1,50	6	40	67,63±19,3	1,96	10,28	53
05	29,76±09,0	1,39	4,98	48	23	31,40±10,1	1,41	3,00	27	41	57,49±18,0	1,81	6,08	49
06	41,56±12,5	1,57	8,04	51	24	34,92±09,9	1,47	3,80	37	42	70,20±18,8	2,00	11,64	54
07	17,59±07,5	1,20	0,94	3	25	22,12±06,4	1,27	1,55	7	43	33,35±14,4	1,44	2,11	17
08	35,80±11,9	1,48	2,44	23	26	34,40±10,2	1,46	3,09	28	44	47,10±15,9	1,65	4,06	39
09	42,54±11,2	1,58	3,34	33	27	36,65±10,6	1,49	3,87	38	45	36,30±13,8	1,49	2,16	21
10	48,45±11,8	1,67	4,31	45	28	28,13±10,5	1,36	1,65	9	46	35,82±13,5	1,48	2,15	20
11	57,27±12,9	1,80	6,42	50	29	40,99±11,8	1,56	3,29	29	47	34,44±14,2	1,46	2,13	19
12	66,36±14,7	1,94	9,92	52	30	46,05±11,1	1,63	4,22	40	48	20,03±11,4	1,24	1,84	14
13	16,74±07,7	1,19	0,93	2	31	32,01±11,7	1,42	1,71	13	49	28,18±11,7	1,36	2,00	16
14	22,00±08,5	1,27	2,13	18	32	45,47±14,2	1,63	3,42	35	50	28,09±09,5	1,36	1,65	10
15	24,99±08,7	1,32	2,81	26	33	50,53±14,7	1,70	4,39	47	51	23,21±11,4	1,29	1,35	5
16	27,09±08,6	1,35	3,51	36	34	29,06±11,4	1,38	1,66	11	52	14,61±14,7	1,16	1,01	4
17	35,49±13,4	1,47	2,44	24	35	41,33±13,7	1,56	3,30	30	53	27,97±10,1	1,36	1,64	8
18	42,06±14,3	1,57	3,32	32	36	47,02±14,8	1,65	4,26	42	54	33,07±11,1	1,44	2,24	22

Bu tabloda OEKY: Ortalama en kısa yol (metre), $\dot{I}S_{HT}$: İşlem süresi (dakika), BS: başarı sırası kısaltması olarak kullanılmıştır.