

Eğirdir yöresi doğal karaçam meşcereleri için çap-boy modeli: Kantil regresyon yaklaşımı

Onur Alkan^{a,*} , Ramazan Özçelik^a 

Özet: Karaçam (*Pinus nigra* JF Arnold.) ekonomik ve ekolojik açıdan en önemli ağaç türlerimiz arasında yer almaktadır. Bu nedenle doğal karaçam meşcerelerinin bir taraftan korunması, diğer taraftan da sürdürülebilir yönetimi amacıyla, geleceğe dönük planlama ve stratejilerin oluşturulması için bu meşcerelerin büyüme ve gelişme özelliklerine ilişkin güvenilir bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Büyüme ve hasılat modellerinin en önemli bileşenlerinden birisi de çap-boy ilişkileridir. Çap ve boy değişkenleri, orman envanteri çalışmalarının da en önemli ölçüm araçlarıdır. Dikili ağaçlarda ağaç boyu ölçümünün göğüs çapı ölçümü kadar kolay olmaması nedeniyle, ağaç boyları orman envanteri çalışmalarında genellikle göğüs çapının bir fonksiyonu olarak tahmin edilmektedir. Bu sebeple, ağaç boyunun doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi, ormancılık faaliyetleri açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Eğirdir yöresi doğal karaçam meşcereleri için Kantil Regresyon (QR) yaklaşımı kullanılarak çap-boy modelleri geliştirilmiştir. Bu amaçla ölçümü yapılan veriler tesadüfi olarak eşit sayıda örnek alan içerecek şekilde iki gruba ayrılmıştır. Diğer modellere göre daha başarılı sonuçlar üretmesi nedeniyle çap-boy modellerinin geliştirilmesinde Chapman-Richards fonksiyonu temel alınmıştır. Çalışma kapsamında üç farklı kantil setini (3, 5 ve 9 katil) temel alan QR modelleri geliştirilmiştir. QR yaklaşımının geleneksel tahmin yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü, her örnek alan için ekstra örnek ağaç boyları ile modelin kalibrasyonuna imkân sağlamasıdır. Bu amaçla, QR yöntemi kullanılarak modelin kalibrasyonu amacıyla her örnek alanda tesadüfi olarak seçilen 1-10 arasında değişen sayıda örnek ağaç kullanılarak farklı kalibrasyon alternatifleri test edilmiştir. Çap-boy ilişkilerinin modellenmesi amacıyla 5QR ve 9QR'ye göre daha başarılı sonuçlar üreten ve üç kantil setini temel alan QR'nin yeterli olduğu görülmüştür. Diğer yandan farklı sayıda örnek ağaç verisi kullanılarak yapılan kalibrasyon işleminin boy tahminlerinde önemli iyileşmeler sağladığı, her örnek alanda, beş ağaç kullanılarak yapılacak kalibrasyonun hem modellerin tahmin başarısı hem de örnekleme maliyetleri açısından uygun ve yeterli olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Karaçam, Boy tahmini, Kantil regresyon, Kalibrasyon

Height-diameter model for natural black pine stands in Eğirdir region: Quantile regression approach

Abstract: Black pine (*Pinus nigra* JF Arnold.) is one of the most economically and ecologically important tree species in Turkey. In this context, reliable and accurate information about the current status, growth and yield characteristics of these forests is needed for the sustainable management of black pine forests. One of the most important components of growth and yield models is the height-diameter relationships. Diameter and height variables are also the most important measurement tools in forest inventory studies. Since the height of a standing tree cannot be measured as easily as the breast height diameter, tree height is often estimated as a function of diameter in forest inventory studies. For this reason, accurate and reliable estimation of tree height has a great importance for forestry activity. In this study, a height-diameter model was developed for natural black pine stands in Eğirdir region using Quantile Regression (QR) techniques. The measured data were randomly divided into two equal groups. Chapman-Richards height-diameter model was chosen as the base model for both methods since this model has been provided successful results in previous studies. QR models are developed based on three quantile (3, 5 and 9 quantiles) sets in this study. The most important advantage of QR approach over other estimation methods is that QR allows the calibration of the model with extra sample tree heights. For this purpose, different calibration alternatives were tested using a number of trees ranging from 1 to 10 in each sample plot. As a result of the study, it was seen that the 3QR approach performed better than both 5QR and 9QR approaches in terms of describing the height-diameter relationships. In addition, it has been determined that the calibration with five sample trees in each sample plot is appropriate in terms of both the estimation precision of the models and the sampling costs.

Keywords: Black pine, Height prediction, Quantile regression, Calibration

1. Giriş

Ekosistem tabanlı fonksiyonel planlama yaklaşımı ile orman kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için en temel koşullardan biri, ağaç türlerine ilişkin dinamik büyüme ve hasılat modellerine ihtiyaç duyulmasıdır. Büyüme ve hasılat modellerinin en önemli bileşenlerinden birisi de çap-boy

ilişkileridir (Huang vd., 2000). Çap ve boy değişkenleri, orman envanteri çalışmalarının da en önemli ölçüm araçları konumundadır. Temesgen vd. (2008), amenajman planlarının düzenlenmesi sırasında meşcerelere ilişkin pek çok özelliğin ortaya konmasında bu iki değişkenin kullanıldığını ifade etmiştir. Göğüs çapı (d), orman envanteri çalışmalarında kolaylıkla ve düşük maliyetle ölçülebilen bir değişken

✉ ^a Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, 32260, Isparta

@ ^{*} **Corresponding author** (İletişim yazarı): onuralkan@isparta.edu.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 15.08.2022, **Accepted** (Kabul tarihi): 09.09.2022



Citation (Atf): Alkan, O., Özçelik, R., 2022. Eğirdir yöresi doğal karaçam meşcereleri için çap-boy modeli: Kantil regresyon yaklaşımı. Turkish Journal of Forestry, 23(3): 187-195. DOI: [10.18182/tjf.1162582](https://doi.org/10.18182/tjf.1162582)

olmasına karşın, ağaç boyuna (h) ilişkin verilerin toplanması oldukça güç ve masraflıdır. Bu nedenle ağaç boyu, orman envanteri çalışmalarında çoğunlukla çapın bir fonksiyonu olarak tahmin edilmektedir (Temesgen vd., 2008; Bronisz ve Mehtätalo, 2020).

Çap ve boy değişkenleri, tek ağaç ve buna bağlı olarak meşcere hacim tahminleri (Crecente-Campo vd., 2009), meşcerelerin yapısal analizi (Gadow vd., 2001), bonitet endeksi ve karbon bütçesi modelleri (Gómez-Garcia vd., 2015), hâsılat ve büyüme modellerinin geliştirilmesi (Calama ve Montero, 2004; Huang vd., 2009), dikey meşcere kuruluşunun tanımlanması ve meşcere gelişiminin zamana bağlı tahmini (Dubrasich vd., 1997) gibi ormancılığın pek çok alanında kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda biyokütle tahmini ve karbon bütçesi ile ilgili çalışmaların artması, çap-boy modellerinin daha da önem kazanmasına yol açmıştır (Yuancai ve Parresol, 2001). Birçok büyüme ve hasılat modeli, temel değişkenler olarak çap ve boy değişkenlerine ihtiyaç duymaktadır (Temesgen vd., 2008; Huang vd., 2009; Özçelik vd., 2018; Bronisz ve Mehtätalo, 2020). Sonuç olarak, ağaç türlerine ve bunların farklı yetiştirme ortamlarına ait çap-boy ilişkilerinin doğru şekilde ortaya konması, orman envanteri ve buna bağlı olarak orman amenajmanı çalışmalarında karar verme süreçleri için büyük önem taşımaktadır (Avery ve Burkhart, 2002).

Bugüne kadar birçok ülkede ve pek çok ağaç türü için çap-boy ($d-h$) modelleri geliştirilmiştir (Curtis, 1967; Parresol, 1992; Zhang, 1997; Fang ve Bailey, 1998; Fekedulegn vd., 1999; Yuancai ve Parresol, 2001; Soares ve Tomé, 2002; López-Sánchez vd., 2003; Diéguez-Aranda vd., 2005; Mehtätalo, 2005; Adame vd., 2008; Mısır, 2010; Diamantopoulou ve Özçelik, 2012; Lhotka, 2012; Çatal ve Carus, 2018; Özçelik vd., 2019; Ercanlı, 2020; Bronisz ve Mehtätalo, 2020; Ciceu vd., 2020; Seki ve Sakıcı, 2022). Özellikle ülkemizde farklı ağaç türleri için geliştirilen modellerin önemli bir kısmı belirli bir yöre içindir. Ancak Seki ve Sakıcı (2022) tarafından da belirtildiği gibi yöresel şartlar ağaç türlerinin çap-boy ilişkileri üzerinde önemli etkiye sahiptir ve imkânlar el verdiği ölçüde her yöre ve ağaç tür için ayrı çap-boy modeli geliştirilmelidir. Son 10 yıldır $d-h$ modellerinin geliştirilmesi ve başarılı ağaç boyu tahminleri yapılabilmesi amacıyla, geleneksel regresyon tekniklerine alternatif olarak doğrusal olmayan karışık-etkili modelleme (NLME) ve Kantil Regresyon (QR) tekniği de yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Orman envanteri çalışmalarında, $d-h$ modellerinin geliştirilmesi amacıyla ölçülen örnek ağaç verileri, aynı örnek alan ya da örnekleme biriminden elde edildikleri için genellikle hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Bunun doğal bir sonucu olarak da veriler arasında mekânsal ve zamansal bir korelasyon ortaya çıkmaktadır. Bu durum, geleneksel en küçük kareler yönteminin (ONLS) temel varsayımı olan hataların bağımsız olması gerektiği varsayımını ihlal etmektedir (West vd., 1984; Lhotka, 2008). Birçok araştırmacı, bu problemin üstesinden gelebilmek amacıyla NLME ve QR gibi farklı modelleme teknikleri kullanmıştır (Calama ve Montero, 2004; Trincado vd., 2007; Adame vd., 2008; Crecente-Campo vd., 2009; Huang vd., 2009; Lhotka, 2012; Özçelik vd., 2013; Gómez-Garcia vd., 2014; Zang vd., 2016; Özçelik vd., 2018; Bronisz ve Mehtätalo, 2020; Zhang vd., 2020). Xie vd. (2022) tarafından NLME ve QR yaklaşımları kullanarak çap-boy modellerinin geliştirildiği çalışmada, NLME yaklaşımının, QR metoduna göre daha başarılı sonuçlar ürettiğini belirtilmiştir. Ancak, NLME yaklaşımında, modele eklenen tesadüfi parametre

sayısının artması, modeldeki hesaplamaları zorlaştırmakta ve sıklıkla modelin çözümlenmesini başarısız kılabilmektedir. Bu sebeple, çok sayıda tesadüfi etkiye sahip parametrelerin kullanıldığı durumlarda, QR yaklaşımının daha uygulanabilir bir yöntem olduğu ifade edilmiştir (Xie vd., 2022).

Kantil regresyon, Koenker ve Bassett (1978) tarafından, bağımlı değişkenin dağılımındaki herhangi bir kantil ile bağımsız değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişkinin tahmini amacıyla geliştirilmiştir. Kantil Regresyon (QR), geleneksel regresyon yöntemlerinin uygulanması sırasında ortaya çıkan problemlerin üstesinden gelmek amacıyla ve özellikle hiyerarşik yapı gösteren verilerin analizinde kullanılabilen bir yöntemdir. Bu teknik, mühendislik, finans, ekonomi, tıp vb. alanlarda yoğun bir şekilde kullanılmasına rağmen, ormancılık çalışmalarında son 20 yıldır kullanılmaktadır. Yöntem ormancılıkta, orman envanterindeki hata değerlendirmelerinde (Mäkinen vd., 2008), doğal dal budanmasının sınırlarının belirlenmesinde (Zhang vd., 2005; Ducey ve Knapp, 2010), böcek yayılımı (Evans ve Gregoire, 2007) ve hastalık (Evans ve Finkral, 2010) oranlarının belirlenmesinde, çap yüzdelilerinin belirlenmesinde (Mehtätalo vd., 2008), çap gelişiminin tahmininde (Bohara ve Cao, 2014), gövde çapı modellerinin geliştirilmesinde (Cao ve Wang, 2015; Özçelik vd., 2019; He vd., 2021) ve çap-boy modellerinin geliştirilmesinde (Zang vd., 2016; Özçelik vd., 2018; Zhang vd., 2020; Xie vd., 2022) kullanılmıştır. Bohara ve Cao (2014) tarafından çap büyümesinin tahmini amacıyla yapılan çalışmada üç farklı kantil seti (3QR, 5QR ve 9QR) kullanılmış ve farklı sayıda kantili temel alan QR metotları arasında önemli farklılıklar olmamakla birlikte en başarılı tahminlerin sırasıyla 5QR, 3QR ve 9QR ile elde edildiği ifade edilmiştir. Özçelik vd. (2018) kızılçam ve sedir ağaçları için çap-boy modeli geliştirdikleri çalışmada iki farklı kantil setini (3 ve 5) kullanmış ve iki kantil seti arasında büyük farklılıklar olmamakla birlikte beş kantili temel alan kantil regresyon yönteminin daha başarılı sonuçlar ürettiğini ifade etmiştir. Xie vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada ise, üç farklı kantil seti (3, 5 ve 9) kullanılmış ve en başarılı tahminler dokuz kantil seti ile elde edilmiştir. Wang vd. (2022) tarafından yapılan diğer bir çalışmada tepe başlangıç yüksekliğinin tahmin edilmesi amacıyla kantil regresyonun da içinde bulunduğu farklı modelleme teknikleri test edilmiştir. Üç, beş ve dokuz kantili temel alan kantil regresyon tekniği kullanılmış en başarılı tahminler üç kantili temel alan yaklaşımla elde edilmiştir.

Diğer yandan QR yönteminin geleneksel yöntemlere göre en önemli üstünlüğü, yeni bir meşcereden birkaç ağacın boyunu içerecek şekilde bir alt örneğin bulunması durumunda, modelin kalibrasyonuna imkân sağlamasıdır. Bununla birlikte, QR yaklaşımı ile $d-h$ modellerinin geliştirilmesi sırasında modelin kalibrasyonu amacıyla alınması gereken örnek büyüklüğü konusunda da tam bir fikir birliği bulunmamaktadır. Örneğin, Özçelik vd. (2018) tarafından sedir ve kızılçam ağaç türleri için NLME ve QR yöntemleri kullanılarak $d-h$ modelleri geliştirilmiş, modellerin kalibrasyonu amacıyla her örnek alandan tesadüfi seçilen 1 ile 10 arasında değişen sayıda ağaç kullanılmış ve kalibrasyon için kullanılan örnek ağaç sayısının artmasına bağlı olarak modellerin tahmin performansının arttığı gözlenmiştir. Ancak envanter maliyetleri de düşünülüğünde, kalibrasyon için en uygun örnek ağaç sayısının dört olduğuna karar verilmiştir. Xie vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada ise $d-h$ modelinin kalibrasyonu

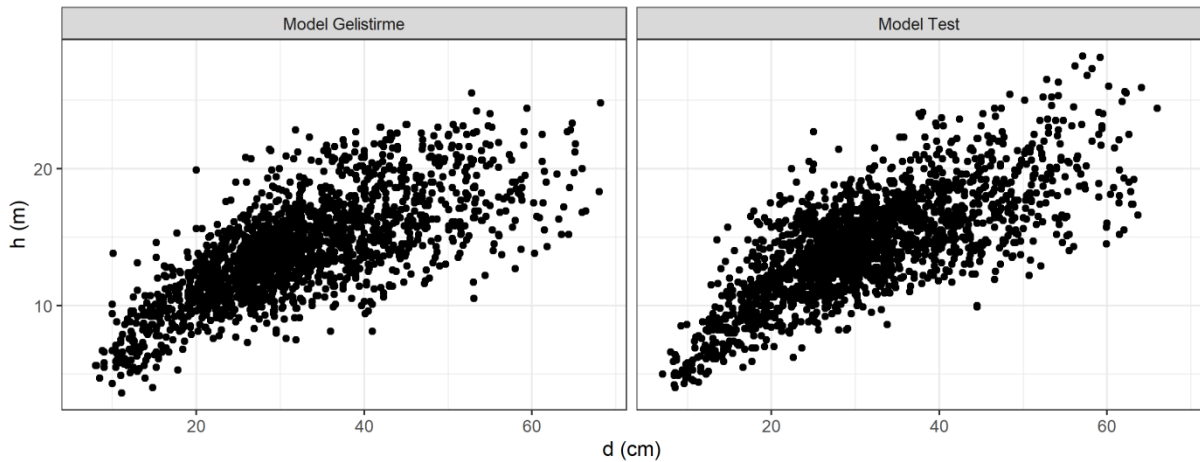
sonucu, modelin tahmin performansının arttığını ancak en başarılı sonuçların model kalibrasyonu için altı ağaç kullanılması ile elde edildiğini ifade etmiştir.

Sonuç olarak, hasılat ve büyüme modellerinin önemli bir bileşeni olan ve ormancılık çalışmalarında pek çok alanda kullanılabilen $d-h$ ilişkilerinin gerçeğe yakın bir şekilde ortaya konması amacıyla modern ve güvenilir metotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Kantil Regresyon tekniğinin özellikle ormancılık biyometrisi alanında kullanımı dünyada ve ülkemizde oldukça yenidir. Ülkemizde büyüme ve hasılat modellerinin geliştirilmesi amacıyla QR tekniğinin kullanıldığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır (Özçelik vd., 2018; Özçelik vd., 2019). Bu nedenle, bir taraftan farklı ağaç türleri ve yetiştirme ortamları için $d-h$ modelleri geliştirilirken, diğer yandan da göğüs çapı ve buna ilave eş değişkenler yardımı ile boy tahminlerindeki başarıyı arttırmak amacıyla farklı modelleme tekniklerinin araştırılması da gerekmektedir. Bu çalışmada, Eğirdir Yöresi doğal karaçam meşcereleri için $d-h$ modellerinin geliştirilmesi amacıyla doğrusal olmayan geleneksel regresyon (ONLS) ve Kantil Regresyon (QR) teknikleri kullanılmıştır. Çalışmanın temel amaçları $d-h$ modelinin geliştirilmesinde, *i*) modelleme tekniğinin (ONLS ve QR Teknikleri) ve *ii*) kalibrasyon için kullanılacak örnek ağaç sayısının model performansı üzerine etkisinin ortaya konmasıdır.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

Bu çalışma için gerekli örnek ağaç verileri, 2021-2022 yılları arasında Isparta Orman Bölge Müdürlüğü Eğirdir Orman İşletme Müdürlüğü'nün değişik şefliklerindeki doğal ve saf karaçam meşcerelerinden elde edilmiştir. Çalışmada 120 adet örnek alandan toplam 3844 adet ağaçtan elde edilen $d-h$ verileri kullanılmıştır. Saf ve doğal karaçam meşcerelerinin ve yetiştirme ortamı koşullarının en iyi şekilde temsil edilebilmesi amacıyla, örnek alanların mümkün olduğunca farklı bonitet sınıflarına, bakı, yükselti ve gelişme çağlarına dağıtılmasına özen gösterilmiştir. Örnek ağaçların seçiminde ise ağaçların gövde formlarının bozuk olmamasına, tepesi kırık ya da çatallı bireyler olmamasına ve meşcere kuruluşlarını ve var olan farklı çap ve boy sınıflarının en iyi şekilde temsil etmesini sağlamak amacıyla, tüm çap ve boy sınıflarına mümkün olduğu kadar eşit dağılımının sağlanmasına dikkat edilmiştir. Örnek alanların araziye tesisi sırasında her örnek alan içerisine yaklaşık 30 ağaç girecek şekilde örnek alan büyüklüklerinin alınmasına çalışılmıştır. Bu açıdan bir değerlendirme yapıldığında, örnek alan büyüklüklerinin 250 m²-1700 m² arasında değiştiği görülmüştür. Örnek alanlar araziye aplike edildikten sonra, örnek alan içerisindeki her ağaca bir sıra numarası verilmiş ve sırayla bu ağaçların çapları elektronik çap ölçer yardımı ile 0.1 cm hassasiyetle; boyları ise lazer boy ölçer yardımı ile 0.10 m hassasiyetle ölçülmüştür (Şekil 1). Ölçümü yapılan 120 örnek alan, 60 adedi model geliştirmek, 60 adedi ise geliştirilen modellerin test edilmesi amacıyla tesadüfi olarak iki gruba ayrılmıştır. Şekil 1'de bu iki gruptaki örnek ağaç verilerine ilişkin çap-boy ilişkileri grafik olarak verilmiştir. Her iki grupta ölçümü yapılan örnek ağaçların çap ve boy değerlerine ilişkin nitelendirici istatistikî bilgiler ise Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Model geliştirme ve model test verileri için çap-boy dağılımı

Çizelge 1. Veri setleri için temel nitelendirici istatistikler

| Değişkenler ^{a/} | Model Geliştirme Verisi | | | | Grup II | | | |
|--|-------------------------|-------|--------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|
| | Ortalama | Min. | Maks. | S.D. | Ortalama | Min. | Maks. | S.D. |
| | 60 örnek alan 1914 ağaç | | | | 60 örnek alanda 1930 ağaç | | | |
| d (cm) | 32.0 | 8.0 | 68.2 | 11.04 | 31.5 | 7.0 | 66.0 | 11.06 |
| h (m) | 14.1 | 3.6 | 25.5 | 3.57 | 14.5 | 4.0 | 28.2 | 3.84 |
| Alan (m ²) | 850.9 | 250.0 | 1700.0 | 353.0 | 766.5 | 250.0 | 1500 | 350.2 |
| G (m ² ha ⁻¹) | 108.6 | 57.7 | 318.8 | 40.9 | 126.5 | 49.4 | 349.4 | 61.3 |
| N (ağaç ha ⁻¹) | 470 | 160.0 | 1280.0 | 222.9 | 550 | 160 | 1365 | 288.9 |

^{a/} dbh, göğüs çapı; h , toplam ağaç boyu; N , hektardaki ağaç sayısı; BA, hektardaki göğüs yüzeyi; S.D., Standart hata

2.2 Yöntem

Doğal ve saf karaçam meşcereleri için d - h modellerinin geliştirilmesi amacıyla öncelikli olarak literatürde (Zhang, 1997; Huang vd., 1992; Bronisz ve Mehtatalo, 2020) yaygın olarak kullanılan bazı temel doğrusal olmayan çap-boy modelleri seçilmiştir. Bu modeller için tüm veri seti ve doğrusal olmayan en küçük kareler (ONLS) yöntemi ile modellerin tahmin performanslarını değerlendirmek amacıyla tahmin edilen boy ve ölçülen ağaç boyu değerleri kullanılarak dört farklı ölçüt değeri (MD, MAD, RMSE ve FI) hesaplanmıştır. Poudel ve Cao (2013) tarafından önerilen nisbi sıralama yöntemi ile yapılan değerlendirmeler sonucunda en başarılı temel model formunun Chapman-Richards olduğu anlaşılmıştır. Bu modele ait temel denklem formu aşağıda verilmiştir (Denklem 1).

$$h = 1.3 + \beta_1(1 - \exp(-\beta_2 d))^{\beta_3} \quad (1)$$

Burada β_1 , β_2 ve β_3 , model parametrelerini; d , ağacın göğüs çapını; h , ağaç boyunu; \exp ise doğal logaritma tabanını ifade etmektedir.

2.2.1. Kantil Regresyon (QR)

Yaygın olarak kullanılan En Küçük Kareler (ONLS) yönteminin uygulanabilmesi için hataların bağımsız olması, verilerin normal dağılıma sahip olması ve bağımsız değişkenler arasında çoklu bağıntı probleminin olmaması gibi bazı temel varsayımların sağlanması gerekmektedir. Bu varsayımların sağlanmadığı ve veri yapısında ekstrem değerlerin bulunduğu durumlarda, ONLS yönteminin etkinliği oldukça azalmakta ve parametre tahminlerinin varyansında tutarsızlıklar ortaya çıkabilmektedir (West, 1984; Yang vd., 2009; Huang vd., 2017). Ancak günümüzde, birçok veri seti normal dağılım göstermemekte ve zaman zaman diğer gözlemlerden önemli derecede farklılık gösteren aykırı değerler de barındırabilmektedir. Bu gibi durumlara ve özellikle hiyerarşik yapı gösteren verilerin analizinde son yıllarda alternatif teknikler olarak NLME ve QR Metodu kullanılmaya başlamıştır (Koenker, 2004; Geraci ve Bottai, 2007; Zang vd., 2016; Özçelik vd., 2018). QR, özellikle koşullu kantillerin değişkenlik gösterdiği durumlarda daha kullanışlı olmakta ve kantillere bağlı olarak regresyon katsayıları belirlenmektedir (Chen ve Wei, 2005).

Bu çalışma kapsamında, Kantil Regresyon ile d - h modellerinin geliştirilmesinde aşağıda açıklanan yöntem uygulanmıştır. QR yöntemi ve bu yöntem kullanılarak d - h modellerinin geliştirilmesine ilişkin ayrıntılı bilgiler Bohora ve Cao (2014), Zang vd. (2016), Özçelik vd. (2018) ve Özçelik vd. (2019)'da bulunabilir.

Çalışma kapsamında karaçam meşcerelerine ilişkin d - h modelinin geliştirilmesi amacıyla Chapman-Richards fonksiyonu kullanıldığından, bu fonksiyon için τ . boy kantilini tahmin etmek için model aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\hat{y}_\tau(d_{ij}) = 1.3 + \beta_1[1 - \exp(-\beta_2 d_{ij})]^{\beta_3} \quad (2)$$

Burada, $\hat{y}_\tau(d_{ij})$, d_{ij} çap değerine sahip ağaç boyunun τ .kantilin tahmin edilen değeridir.

En küçük kareler yönteminin aksine, kantil regresyonda parametre tahminleri minimizasyon ile elde edilmektedir (Zang vd., 2016; Özçelik vd., 2018).

$$S = \sum_{h_{ij} \geq \hat{y}_\tau(d_{ij})} \tau [h_{ij} - \hat{y}_\tau(d_{ij})] + \sum_{h_{ij} < \hat{y}_\tau(d_{ij})} (1 - \tau) [\hat{y}_\tau(d_{ij}) - h_{ij}] \quad (3)$$

Bu çalışma kapsamında, denklem (2) için SAS yazılımındaki NLP sekmesi kullanılarak üç kantil (0.1, 0.5 ve 0.9), beş kantil (0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9) ve dokuz kantil (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 ve 0.9) sayılarını temel alacak şekilde regresyon setleri geliştirilmiştir.

Her örnek alanda sadece bir ağaç ($m=1$) ölçüldüğü zaman amaç, o ağacın boyuna en yakın iki kantil regresyon eğrisini tanımlamaktır. Şayet h_{ij} ; $\hat{y}_k(d_{ij}) \leq h_{ij} \leq \hat{y}_{k+1}(d_{ij})$ şeklinde k ve $k+1$. kantiller arasında kalıyor ise, bu noktadan geçen bir boy büyüme eğrisi aşağıdaki gibi enterpolasyon ile oluşturulabilmektedir (Denklem 4).

$$\hat{h}_{ij} = \alpha \hat{y}_k(d_{ij}) + (1 - \alpha) \hat{y}_{k+1}(d_{ij}) \quad (4)$$

Burada $\alpha = \frac{\hat{y}_{k+1}(d_{ij}) - h_{ij}}{\hat{y}_{k+1}(d_{ij}) - \hat{y}_k(d_{ij})}$ enterpolasyon oranını ifade etmektedir.

Şayet ağaç boyu en yüksek kantil regresyon eğrisi olan q . kantilden daha yukarıda ise, denklem (4), \hat{y}_k olarak \hat{y}_{q-1} ve \hat{y}_{k+1} olarak \hat{y}_q tanımlanmış şekliyle halen uygundur. Benzer şekilde şayet ağaç boyu en düşük kantil regresyon eğrisinin (1^{st}) altındaysa denklem (4)'teki \hat{y}_k ve \hat{y}_{k+1} , sırasıyla \hat{y}_1 ve \hat{y}_2 olarak tanımlanır.

Diğer yandan her örnek alanda iki ya da daha fazla örnek ağaç alınması durumunda, örnek alandaki bütün ağaçların tahmin edilen boyları ile ölçülen boyları arasındaki ortalama fark her bir kantil regresyon için hesaplanmaktadır. İki ardışık kantil regresyon (k . ve $k+1$.) sadece bir ağacın boyu örneklendiyse sırasıyla h_{ij} boyunun altında ve üstündedir. $m \geq 2$ için, k . ve $k+1$. kantil regresyonlar için ortalama farkın işareti değişecektir. Eğer ortalama fark bütün kantil regresyonlar için pozitif ise, ağaç boylarının büyük bir çoğunluğu en düşük kantil regresyon eğrisinin altında kalacaktır ve denklem (4)'teki \hat{y}_k ve \hat{y}_{k+1} sırasıyla \hat{y}_1 ve \hat{y}_2 olarak tanımlanacaktır. Bunun aksine şayet bütün kantil regresyon eğrileri için ortalama fark negatif olur ise, o zaman denklem (4)'teki \hat{y}_k ve \hat{y}_{k+1} sırasıyla \hat{y}_q ve \hat{y}_{q-1} olarak tanımlanacaktır.

Her iki durumda da enterpolasyon oranı, α , $\sum_{j=1}^m (h_{ij} - \hat{h}_{ij})^2$ minimize edilerek elde edilecektir. Burada \hat{h}_{ij} denklem (4)'ten tahmin edilen ağaç boyudur.

2.2.2. Değerlendirme ölçütleri

Çalışmada test edilen modellerin model performanslarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılan dört farklı ölçüt değeri ve bunlara ilişkin formüller aşağıda verilmiştir.

$$\text{Ortalama hata: } MD = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} (h_{ij} - \hat{h}_{ij})}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad (5)$$

$$\text{Ortalama mutlak hata: } MAD = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} |h_{ij} - \hat{h}_{ij}|}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad (6)$$

$$\text{Uyum İndeksi: } FI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} (h_{ij} - \hat{h}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} (h_{ij} - \bar{h}_i)^2} \quad (7)$$

$$\text{Ortalama Hata Kare Kökü: } RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} (h_{ij} - \hat{h}_{ij})^2}{n-p}} \quad (8)$$

Burada, n , örnek alan sayısını; n_i , i örnek alanda ölçülen ağaç sayısını; h_{ij} ve \hat{h}_{ij} , sırasıyla ölçülen ve tahmin edilen boy değerlerini; \bar{h}_i , h_{ij} 'nin ortalama değerini; p , parametre sayısını ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çizelge 2'de denklem (1) için en küçük kareler yöntemi (ONLS) ve denklem (2) için kantil regresyon (QR) modelleri için parametre tahminleri verilmiştir. Çizelge 3'te model geliştirme verileri kullanılarak ONLS ve sırasıyla 3QR, 5QR ve 9QR için elde edilen ölçüt değeri (MD, MAD, FI, RMSE) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3'teki sonuçlardan da görüleceği gibi, üç farklı kantil setini temel alan kantil regresyon metodlarının sonuçları arasında önemli farklılıklar olmamasına karşın, QR ile elde edilen sonuçların ONLS ile elde edilen sonuçlara göre daha başarılı olduğu görülmektedir. 3QR, 5QR ve 9QR arasında ise en başarılı boy tahminlerinin, üç kantil setini temel alan kantil regresyon tekniği ile elde edildiği, bunu sırasıyla 9QR ve 5QR yöntemlerinin izlediği görülmüştür.

Çizelge 2. Sabit etkili regresyon modeli ile dokuz kantili (τ) temel alan kantil regresyon modeli için parametre tahminleri

| Model Tipi ^a | β_1 | β_2 | β_3 |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| ONLS | 19.9420 | 0.0363 | 1.0896 |
| QR (τ) | | | |
| $\tau = 0.1$ | 13.5508 | 0.0606 | 1.7518 |
| $\tau = 0.2$ | 15.0404 | 0.0544 | 1.4916 |
| $\tau = 0.3$ | 16.3976 | 0.0510 | 1.4138 |
| $\tau = 0.4$ | 17.5881 | 0.0467 | 1.2862 |
| $\tau = 0.5$ | 18.9639 | 0.0423 | 1.1969 |
| $\tau = 0.6$ | 20.1437 | 0.0394 | 1.1342 |
| $\tau = 0.7$ | 24.0277 | 0.0276 | 0.9611 |
| $\tau = 0.8$ | 27.3522 | 0.0218 | 0.8686 |
| $\tau = 0.9$ | 29.0119 | 0.0234 | 0.9043 |

^aONLS, Sabit etkili model; QR, Kantil regresyon; β_1 , β_2 ve β_3 , Model Parametreleri

Çizelge 3. ONLS ve üç kantil (QR3), beş kantil (QR5) ve dokuz kantil (QR9) regresyon modelleri ve model geliştirme verisi için değerlendirme istatistikleri ($n=60$ örnek alan, 1914 ağaç).

| Modeller | MD | MAD | RMSE | FI |
|----------|---------|--------|--------|--------|
| ONLS | -0.0008 | 1.8685 | 2.4233 | 0.5403 |
| 3QR | 0.0495 | 1.2203 | 1.5771 | 0.8050 |
| 5QR | 0.0772 | 1.2396 | 1.6050 | 0.7980 |
| 9QR | 0.0663 | 1.2331 | 1.5948 | 0.8006 |

MD, Ortalama hata; MAD, Ortalama mutlak hata; FI, Uyum İndeksi; RMSE, Ortalama Hata Kare Kökü

Geleneksel regresyon yöntemi (ONLS) ve farklı kantilleri temel alan kantil regresyon metodu ile model test verisi için elde edilen sonuçlar ise Çizelge 4'te verilmiştir. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi, kantillerin farklı sayılarını temel alan kantil regresyon metodu geleneksel regresyon yöntemine göre daha başarılı tahmin sonuçları üretmiştir. 3QR, 5QR ve 9QR yöntemleri kendi arasında değerlendirildiğinde ise model geliştirme verileri için elde edilen sonuçlara benzer bir durum ile karşılaşmıştır. 3QR, sırasıyla 5QR ve 9QR'den daha başarılı olmuştur. Bohora ve Cao (2014) tarafından çap gelişiminin tahmin edilmesi amacıyla yapılan bir çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş ve en başarılı tahminler 3QR ile en başarısız tahminler ise 9QR ile elde edilmiştir. Bohora ve Cao (2014) tarafından da ifade edildiği gibi kantil regresyon için fazladan eğrilerin (0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8 kantillerinden) kullanılması aşırı uyum sorunu nedeniyle daha doğru boy tahminlerine yardımcı olmadığı gibi 3QR gibi nispeten daha basit kantil regresyon yaklaşımlarına göre model performanslarında küçük sayılabilecek düşüslere de sebep olmuştur. Benzer sonuçlar Wang vd. (2022) tarafından yapılan ve tepe tacının başlama yüksekliğinin tahmini çalışmalarında da rapor edilmiştir. Bu çalışmadan farklı olarak Özçelik vd. (2018)'de 5QR, 3QR'den daha başarılı olurken; Xie vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada ise boy tahminlerindeki başarı açısından 9QR, 5QR ve 3QR şeklinde bir sıralama ortaya çıkmıştır. Özçelik vd. (2018) ve Xie vd. (2022)'nin aksine bu çalışmada kantil sayısının artması model performansını olumlu etkilememiş aksine küçük sayılabilecek düşüslere neden olmuştur. Pek çok çalışmada olduğu (Bohora ve Cao, 2014; Cao ve Wang, 2015; Özçelik vd., 2018; Xie vd., 2022; Wang vd., 2022) gibi farklı kantil sayılarını temel alan kantil regresyon metodlarından elde edilen eğriler çoğu zaman birbirine çok benzer hatta birbirinden ayrılmaz durumdadır. Bu nedenle bu çalışma sonucunda da ortaya konduğu gibi sadece üç kantili temel alan kantil regresyon metodu karaçam ağaçlarının boy tahmini için yeterli görünmektedir.

Daha önce vurgulandığı gibi, QR'nin geleneksel regresyon yöntemlerine en önemli avantajlarından birisi de kalibrasyona imkân vermesidir. Farklı kantil sayısına sahip kantil regresyon metodları için her örnek alandaki farklı ağaç sayılarını temel alan kalibrasyon sonuçları Çizelge 4'te, bunlara ilişkin grafiksel gösterim ise Şekil 2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kalibrasyon için kullanılan ağaç sayısı arttıkça modellerin tahmin performansları da buna paralel olarak iyileşmiştir. Ancak bu iyileşme oranı özellikle 1-5 ağaç için oldukça yüksek sayılabilecek iken, 6-10 ağaç için bu oran nispeten azalmış ve çok fazla değişmemiştir. Çalışma kapsamında kullanılan 4 ölçüt değerden ortalama hata (MD) dışındaki tüm değerlendirme ölçütleri için (MAD, RMSE ve FI) farklı kalibrasyon alternatifleri için 3 kantili (3QR) temel alan kantil regresyon yaklaşımı diğer kantil regresyon (5QR ve 9QR) metodlarına göre daha başarılı sonuçlar üretmiştir.

Çizelge 4. Kalibrasyon işleminden sonra kalibre edilmiş üç kantil (QR3), beş kantil (QR5) ve dokuz kantil (QR9) regresyon modelleri için değerlendirme istatistikleri (n=60 örnek alan, 1930 ağaç).

| Kalibrasyon için kullanılan ağaç sayısı ^{a/} | Karaçam | | | |
|---|---------|------------------|---------------|---------|
| | ONLS | Kantil regresyon | | |
| | | 3QR | 5QR | 9QR |
| Ortalama Hata (MD) | | | | |
| 0 | 0.5523 | | | |
| 1 | | 0.0076 | -0.0205 | -0.0094 |
| 2 | | 0.1153 | 0.1009 | 0.1015 |
| 3 | | 0.2186 | 0.2684 | 0.2329 |
| 4 | | 0.1685 | 0.2095 | 0.1985 |
| 5 | | 0.0678 | 0.1058 | 0.0921 |
| 6 | | 0.0685 | 0.1012 | 0.0900 |
| 7 | | 0.0683 | 0.0997 | 0.0891 |
| 8 | | 0.0907 | 0.1218 | 0.1132 |
| 9 | | 0.0682 | 0.1102 | 0.0896 |
| 10 | | 0.0640 | 0.0987 | 0.0851 |
| Ortalama Mutlak Hata (MAD) | | | | |
| 0 | 1.9858 | | | |
| 1 | | 1.6323 | 1.6947 | 1.6728 |
| 2 | | 1.4531 | 1.4957 | 1.4782 |
| 3 | | 1.3661 | 1.4092 | 1.3886 |
| 4 | | 1.3041 | 1.3411 | 1.3289 |
| 5 | | 1.2567 | 1.2950 | 1.2802 |
| 6 | | 1.2375 | 1.2772 | 1.2635 |
| 7 | | 1.2270 | 1.2610 | 1.2474 |
| 8 | | 1.2103 | 1.2505 | 1.2362 |
| 9 | | 1.2099 | 1.2487 | 1.2349 |
| 10 | | 1.2019 | 1.2401 | 1.2264 |
| Uyum İndeksi (FI) | | | | |
| 0 | 0.5552 | | | |
| 1 | | 0.6980 | 0.6734 | 0.6819 |
| 2 | | 0.7614 | 0.7450 | 0.7517 |
| 3 | | 0.7945 | 0.7809 | 0.7875 |
| 4 | | 0.8093 | 0.7986 | 0.8029 |
| 5 | | 0.8231 | 0.8122 | 0.8169 |
| 6 | | 0.8284 | 0.8174 | 0.8214 |
| 7 | | 0.8319 | 0.8210 | 0.8248 |
| 8 | | 0.8341 | 0.8233 | 0.8273 |
| 9 | | 0.8342 | 0.8234 | 0.8274 |
| 10 | | 0.8361 | 0.8257 | 0.8300 |
| RMSE | | | | |
| 0 | 2.5621 | | | |
| 1 | | 2.1112 | 2.1952 | 2.1668 |
| 2 | | 1.8767 | 1.9401 | 1.9141 |
| 3 | | 1.7414 | 1.7982 | 1.7709 |
| 4 | | 1.6755 | 1.7238 | 1.7053 |
| 5 | | 1.6159 | 1.6649 | 1.6437 |
| 6 | | 1.5916 | 1.6417 | 1.6235 |
| 7 | | 1.5752 | 1.6255 | 1.6081 |
| 8 | | 1.5642 | 1.6146 | 1.5963 |
| 9 | | 1.5554 | 1.6045 | 1.5961 |
| 10 | | 1.5549 | 1.6039 | 1.5840 |

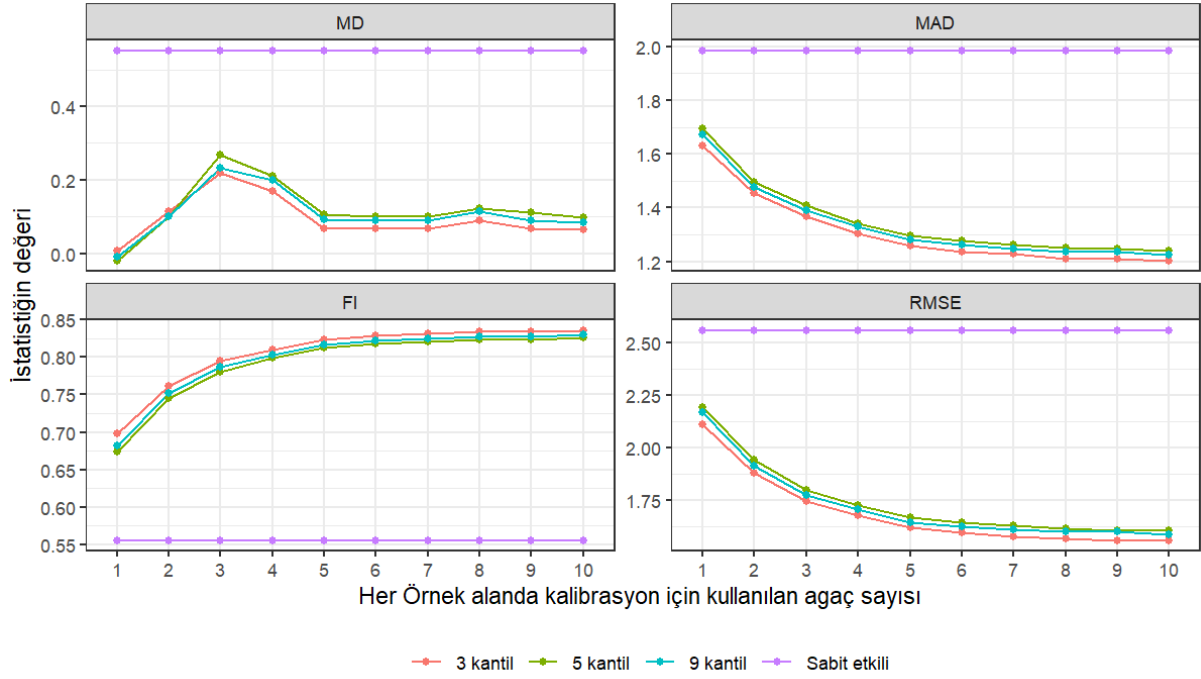
^{a/} Farklı kalibrasyon alternatifleri için koyu ve altı çizili ifade en başarılı yöntemi göstermektedir.

Şekil 2'nin incelenmesinde de görüleceği gibi model performanslarındaki artış kalibrasyon için kullanılan ağaç sayısındaki artışla çok uyumlu değildir. Çünkü özellikle kalibrasyon için 5'ten fazla ağaç kullanıldığında ölçüt değerlerine göre modellerin tahmin performanslarında her üç kantil regresyon yaklaşımı için de büyük bir artış ve değişim meydana gelmemektedir.

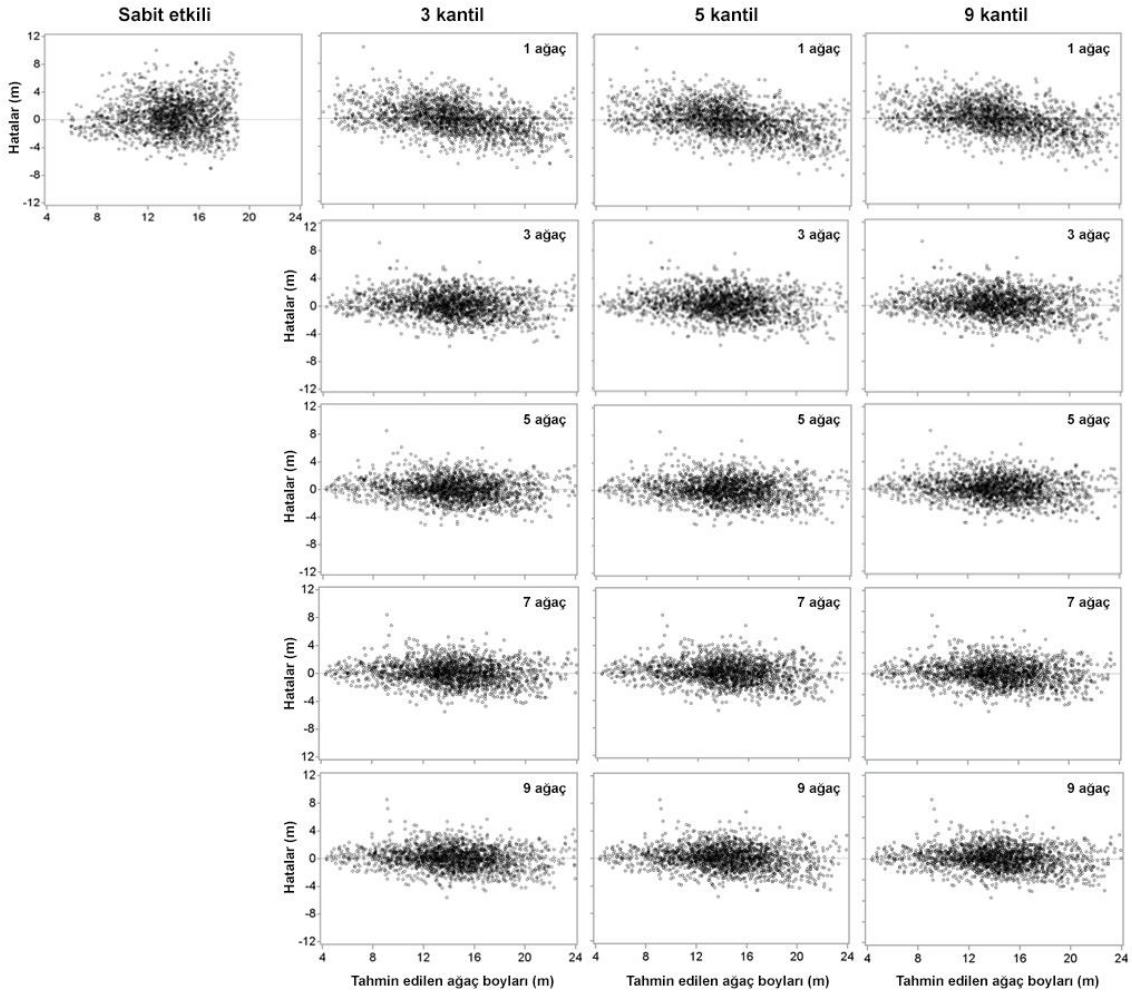
Özçelik vd. (2018) tarafından doğal kızılçam ve sedir meşcereleri için yapılan çalışmada 3QR ve 5QR için kalibrasyon amacıyla kullanılması gereken ağaç sayısının dört olduğu, bundan daha fazla sayıda ağaç kullanılması ile modellerin tahmin performanslarının bir miktar arttığı ancak bu artışın fayda/maliyet oranı düşünüldüğünde önemli olmadığı değerlendirilmiştir. Yine Xie vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada örnekleme maliyeti ve tahmin doğruluğu arasındaki dengeyi sağlama bakımından 3QR, 5QR ve 9QR yöntemlerinin kalibrasyonu amacıyla altı ağacın yeterli olduğu ifade edilmiştir. Şekil 3'te ise geleneksel regresyon (ONLS) ve farklı kantil sayılarını temel alan kantil regresyon metodları için tahmin edilen ağaç boyuna karşılık gelen hataların dağılımı verilmiştir. ONLS için hataların dağılımı ağaç boyundaki artışa bağlı olarak artmakta ve homojen bir dağılım göstermemektedir. Farklı kantil sayılarını temel alan kantil regresyon metodu içinde bir ağaç kullanılarak yapılan kalibrasyon işlemi için de nispeten hata dağılımı varyasyonu düşmüş olmakla birlikte benzer bir durum söz konusu iken iki ve daha fazla ağaç sayısı kullanımı ile hata miktarı azalmış ve hata dağılımı daha homojen bir hal almıştır.

Kantil regresyon yaklaşımında, her bir kantil setinin farklı parametrelere sahip olması, bu yaklaşım ile elde edilen çap-boy eğrilerinin de şekil bakımından farklı formlarda oluşabilmesine neden olmaktadır. Bu durum, kantil regresyon modellerinin daha esnek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Cao ve Wang, 2015). Ancak bu yaklaşım, farklı parametre setlerinden elde edilen eğrilerin, genellikle kantil regresyonlar tarafından belirlenen temel şekilleri takip ettiğini varsaydığından, bu eğrilerin bazılarının birbirini kesebileceği gerçeğine imkân ve ihtimal vermemektedir (Bohora ve Cao, 2014).

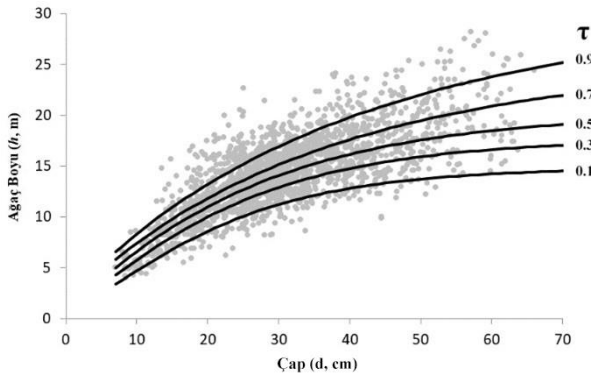
Şekil 4'te ise model test verileri için farklı kantil sayılarını esas alan kantil regresyon metodundan elde edilen eğriler verilmiştir.



Şekil 2. Her örnek alanda örneklenen ağaç sayısına göre ölçüt değerlerinin değişimi (MD, Ortalama hata; MAD, Ortalama mutlak hata; FI, Uyum İndeksi; RMSE, Ortalama Hata Kare Kökü)



Şekil 3. Çalışma kapsamında test edilen modellere ilişkin hata dağılımları



Şekil 4. Karaçam için model test verilerinden gözlemlenen çap-boy ölçümleri ile 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, ve 0.9 kantilleri için Kantil regresyon eğrilerini

4. Sonuç ve öneriler

Ağaç türleri için çap-boy ilişkilerinin ortaya konması ormancılıktaki en temel ve önemli çalışmalardan birisidir. Bu çalışmada, Eğirdir yöresi doğal karaçam meşcereleri için çap-boy ilişkilerinin modellenmesi amacıyla Chapman-Richards fonksiyonu kullanılarak geleneksel regresyon yöntemine (ONLS) alternatif yeni bir yaklaşım olan kantil regresyon metodu test edilmiştir. Farklı kantilleri temel alan kantil regresyon eğrileri değişik biçimlere sahiptir ve bu durum büyüme eğrileri için esneklik sağlayabilmektedir. QR metodunun ONLS'ye göre en önemli avantajı yeni bir örnekleme birimi için birkaç ağacın boyunu içeren ön bilgilerin var olması durumunda, kalibre edilebilmesidir. Bu nedenle daha doğru boy tahminleri yapılabilmesi amacıyla QR için her örnek alanda farklı sayıdaki ağaç için (1-10 ağaç) kalibrasyon alternatifleri de test edilmiştir. Çalışmada farklı sayıda kantili temel alan (3QR, 5QR ve 9QR) kantil regresyon metodu ile $d-h$ modelleri geliştirilmiş ve dört farklı ölçüt değeri ile en başarılı kantil seti kararlaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, 3QR ile yapılan boy tahminlerinin sırasıyla 9QR ve 5QR ile elde edilen tahminlere göre daha başarılı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, Eğirdir Yöresi doğal karaçam meşcerelerinin $d-h$ ilişkilerinin modellenmesi amacıyla üç kantili temel alan QR yeterlidir. Bununla birlikte, farklı kantil setleri için elde edilen sonuçların ONLS'ye göre çok daha başarılı olduğu da ortaya konmuştur. Farklı sayıda örnek ağaç verisi kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon işleminin model performansları üzerine etkisi incelendiğinde ise artan örnek ağaç sayısı ile model performansının iyileştiği görülmüştür. Ancak modelin tahmin başarısı ve örnekleme maliyeti ilişkisi dikkate alındığında, model performansının artırılması amacıyla yapılacak kalibrasyon işlemi için beş örnek ağacın yeterli olduğu, bunun üzerinde kullanılacak ağaç sayısının tahmin performansı üzerindeki etkisinin minimal düzeyde olacağı ortaya konmuştur.

Açıklama

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 120R080 numaralı "Eğirdir Yöresi Doğal Karaçam Meşcereleri için Çap-Boy Modellerinin Karışık-Etkili Modelleme ve Kantil Regresyon Teknikleri Kullanılarak Geliştirilmesi" başlıklı projedeki verilerin bir kısmı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- Adame, P., del Río, M., Canellas, I., 2008. A mixed nonlinear height-diameter model for pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). Forest ecology and management, 256 (1-2): 88-98.
- Avery, T.E., Burkhart, H.E., 2002. Forest Measurements. McGraw-Hill Book Company, New York, NY.
- Bohora, S.B., Cao, Q.V., 2014. Prediction of tree diameter growth using quantile regression and mixed-effects models. Forest Ecology and Management, 319: 62-66.
- Bronisz, K., Mehtätalo, L., 2020. Seemingly Unrelated Mixed-Effects Biomass Models for Young Silver Birch Stands on Post-Agricultural Lands. Forests, 11 (4): 381.
- Calama, R., Montero, G., 2004. Interregional nonlinear height diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. Canadian Journal of Forest Research, 34: 150-163.
- Cao, Q. V., Wang, J., 2015. Evaluation of methods for calibrating a tree taper equation. Forest Science, 61: 213-219.
- Chen, C., Wei, Y., 2005. Computational issues on quantile regression. Special Issue on Quantile Regression and Related Methods, 67: 399-417.
- Ciceu, A., Garcia-Duro, J., Seceleanu, I., Badea, O., 2020. A generalized nonlinear mixed-effects height-diameter model for Norway spruce in mixed-uneven aged stands. Forest Ecology and Management, 477: 118507.
- Crecente-Campo, F., Alboreca, A. R., Diéguez-Aranda, U., 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* L. in the major mountain ranges of Spain. Annals of Forest Science, 66: 1-12.
- Curtis, R.O., 1967. Height-diameter and height-age equations for second-growth Douglas-fir. Forest Science, 13: 365-375.
- Çatal, Y., Carus, S., 2018. A height-diameter model for brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) plantations in southwestern Turkey. Applied Ecology and Environmental Research, 16: 1445-1459.
- Diamantopoulou, M.J., Özçelik, R., 2012. Evaluation of different modeling approaches for total tree-height estimation in Mediterranean Region of Turkey. Forest Systems, 21(3): 383-397.
- Diéguez-Aranda, U., Barrio, A.M., Castedo, D.F., Álvarez, J., 2005. Relación altura-diámetro generalizada para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en el noroeste de España. Forest Systems, 14 (2): 229-241.
- Dubrasich, M.E., Hann, D.W., Tappeiner II, J.C., 1997. Methods for evaluating crown area profiles of forest stands. Canadian Journal of Forest Research, 27 (3): 385-392.
- Ducey, M.J., Knapp, R.A. 2010., A stand density index for complex mixed species forests in the northeastern United States. Forest Ecology and Management, 260: 1613-1622.
- Ercanlı, İ., 2020. Innovative deep learning artificial intelligence applications for predicting relationships between individual tree height and diameter at breast height. Forest Ecosystems, 7:12.
- Evans, A.M., Finkral, A.J. 2010. A new look at spread rates of exotic diseases in North American forests. Forest Science, 56: 453-459.
- Evans, A.M., Gregoire, T.G., 2007. A geographically variable model of hemlock woolly adelgid spread. Biological Invasions, 9: 369-382.
- Fang, Z., Bailey, R.L., 1998. Height-diameter models for tropical forest on Hainan Island in southern China. Forest Ecology and Management, 110: 315-327.
- Fekedulegn, D., Siurtain, M.P.M., Colbert, J.J., 1999. Parameter estimation of nonlinear growth models in forestry. Silva Fennica, 33: 327-336.

- Gadow, K.V., Real, P., Alvarez Gonzalez, J. G., 2001. Modelización del Crecimiento y la Evolución de los Bosques. Vienna, Austria: IUFRO World Series, Vol. 12 242p. (in Spanish).
- Geraci, M., Bottai, M., 2007. Quantile regression for longitudinal data using the asymmetric Laplace distribution. *Biostatistics*, 8 (1): 140-154.
- Gómez-García, E., Diéguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F., Crecente-Campo, F., 2014. A comparison of model forms for the development of height-diameter relationships in even-aged stands. *Forest Science*, 60: 560-568.
- Gómez-García, E., Fonseca, T.F., Crecente-Campo, F., Almeida, L. R., Dieguez-Aranda, U., Huang, S., Marques, C.P., 2015. Height-diameter models for maritime pine in Portugal: a comparison of basic, generalized and mixed-effects models. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 9: 72.
- He, P., Hussain, A., Shahzad, M.K., Jiang, L., Li, F., 2021. Evaluation of four regression techniques for stem taper modeling of Dahurian larch (*Larix gmelinii*) in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 494: 119336.
- Huang, S., Price, D., Morgan, D., Peck, K., 2000. Kozak's variable-exponent taper equation regionalized for white spruce in Alberta. *Western Journal of Applied Forest*, 15: 75-85.
- 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(9): 1297-1304.
- Huang, S., Wiens, D.P., Yang, Y., Meng, S.X., Vanderschaaf, C.L., 2009. Assessing the impacts of species composition, top height and density on individual tree height prediction of quaking aspen in boreal mixed woods. *Forest Ecology and Management*, 258: 1235-1247.
- Huang, Q., Zhang, H., Chen, J., He, M., 2017. Quantile regression models and their applications: A review. *Journal of Biometrics & Biostatistics*, 8: 3.
- Koenker, R., Bassett Jr, G., 1978. Regression quantiles. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 33-50.
- Koenker, R., 2004. Quantile regression for longitudinal data. *Journal of Multivariate Analysis*, 91 (1): 74-89.
- Lhotka, J.M., 2012. Height-diameter relationships in Sweetgum (*Liquidambar styraciflua*)-dominated stands. *Southern Journal of Applied Forestry*, 36 (2): 98-106.
- Lhotka, J. M., Loewenstein, E.F., 2008. An examination of species-specific growing space utilization. *Canadian Journal of Forest Research*, 38 (3): 470-479.
- López-Sánchez, C.A., Varela, J.G., Dorado, F.C., Alboreca, A.R., Soalleiro, R.R., González, J.G.Á., Rodríguez, F.S., 2003. A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). *Annals of forest science*, 60 (3): 237-245.
- Mäkinen, A., Kangas, A., Kalliovirta, J., Rasinmäki, J., Välimäki, E., 2008. Comparison of tree-wise and stand-wise forest simulators by means of quantile regression. *Forest Ecology and Management*, 255(7): 2709-2717.
- Mehtätalo, L., Gregoire, T.G., Burkhart, H.E., 2008. Comparing strategies for modeling tree diameter percentiles from re-measured plots. *Environmetrics*, 19: 529-548.
- Mehtätalo, L., 2005. Height-diameter models for Scots pine and birch in Finland. *Silva Fennica*, 39 (1): 55-66.
- Mısır, N., 2010. Generalized height-diameter models for *Populus tremula* L. *Stands. African Journal of Biotechnology*, 9(28): 4348-4355.
- Özçelik, R., Cao, Q.V., Trincado, G., Göçer, N., 2018. Predicting tree height from tree diameter and dominant height using mixed-effects and quantile regression models for two species in Turkey. *Forest Ecology and Management*, 419-420: 240-248.
- Özçelik, R., Diamantopoulou, M.J., Crecente-Campo, F., Eler, U., 2013. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models. *Forest Ecology and Management*, 306, 52-60.
- Özçelik, R., Diamantopoulou, M., Trincado, G., 2019. Evaluation of potential modeling approaches for Scots pine stem diameter prediction in north-eastern Turkey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162: 773-782.
- Parresol, B.R., 1992. Baldcypress height-diameter Equations and their prediction confidence intervals. *Canadian Journal of Forest Research*, 22: 1429-1434.
- Poudel, K.P., Cao, Q.V., 2013. Evaluation of methods to predict Weibull parameters for characterizing diameter distributions. *Forest Science*, 59 (2): 243-252.
- Seki, M., Sakıcı, O.E., 2022. Ecoregion-based height-diameter models for Cremanian pine. *Journal of Forest Research*, 27: 36-44.
- Soares, P., Tome, M., 2002. Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management*, 166: 99-109.
- Temesgen, H., Monleon, V., Hann, D., 2008. Analysis and comparison of nonlinear tree height prediction strategies for Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 553-565.
- Trincado, G., VanderSchaaf, C.L., Burkhart, H.E., 2007. Regional mixed-effects height-diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations. *European Journal of Forest Research*, 126: 253-262.
- Wang, J., Jiang, L., Gaire, D., He, P., Yan, Y., Xin, S., 2022. Predicting and calibrating height to crown base: a case for Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) in Northeastern China. *Canadian Journal of Forest Research*, e-First.
- West, P.W., Ratkowsky, D.A., Davis, A.W., 1984. Problems of hypothesis testing of regressions with multiple measurements from individual sampling units. *Forest Ecology and Management*, 7: 207-224.
- Xie, L., Widagdo, F.R.A., Miao, Z., Dong, L., Li, F., 2022. Evaluation of the mixed-effects model and quantile regression approaches for predicting tree height in larch (*Larix olgensis*) plantations in northeastern China. *Canadian Journal of Forest Research*, 52(3): 309-319.
- Yang, Y., Huang, S., Trincado, G., Meng, S.X., 2009. Nonlinear Mixed Effects Modelling of Variable Exponent Taper Equations for Lodgepole pine in Alberta, Canada. *European Journal of Forest Research*, 128: 415-429.
- Yuancai, L., Parresol, B.R. 2001. Remarks on height-diameter modeling. *Res. Note. SRS-10*. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 6p.
- Zang, H., Lei, X., Zeng, W., 2016. Height-diameter equations for larch plantations in northern and northeastern China: a comparison of the mixed-effects, quantile regression and generalized additive models. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 89 (4): 434-445.
- Zhang, L., Bi, H., Gove, J.H., Heath, L.S., 2005. A comparison of alternative methods for estimating the self-thinning boundary line. *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 1507-1514.
- Zhang, B., Sajjad, S., Chen, K., Zhou, L., Zhang, Y., Yong, K.K., Sun, Y., 2020. Predicting tree height-diameter relationship from relative competition levels using quantile regression models for Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) in Fujian province, China. *Forests*, 11(2): 183.
- Zhang, L., 1997. Cross-validation of non-linear growth functions for modeling tree height-diameter relationship. *Annals of Botany*, 79: 251-257.