

Sinop Yöresi Uludağ Göknarı (*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmülleriana* (Mattf.)) meşcereleri için gövde çapı modelinin karışık etkili modelleme tekniği ile geliştirilmesi

Ramazan Özçelik^{a,*}, Ümit Yaşar^b

Özet: Sinop-Ayancık Yöresi Uludağ göknarı [*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmülleriana* (Mattf.)] meşcereleri için doğrusal olmayan karışık etkili modelleme kullanılarak gövde profili modeli geliştirilmiştir. Bu amaçla ölçümü yapılan ağaçların %87'si model geliştirmek, geri kalan %13'lük kısmı ise geliştirilen modeli test etmek amacıyla kullanılmıştır. Ölçüt değerleri temel alındığında, en uygun model yapısının modelin bütün parametrelerinin tesadüfi değişken içermesi durumunda ortaya çıktığı görülmüştür. Model, homojen bir varyans yapısı göstermiş ve veriler arası otokorelasyonu azaltmıştır. Tesadüfi değişken eklenen model, ağaç gövdesi üzerinde değişik noktalardaki çap tahminlerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. Karışık etkili modeller, eğer ekstra çap ölçümleri mevcut ise, tesadüfi değişkenler yardımı ile yeni bir yer ya da birey için modelin kalibrasyonuna imkân sağlamaktadır. Bu amaçla ağaç gövdesi üzerindeki farklı yerlerdeki çap ölçümleri ve uygun Bayesian yaklaşımı kullanılarak kalibrasyon alternatifleri değerlendirilmiştir. Çap tahminleri için en uygun kalibrasyon seçeneğinin 8.3 m'de ölçülen çap değeri olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları, çap tahminleri amacıyla gövde çapı modelinin etkinliğini ve esnekliğini arttırmak amacıyla karışık etkili modelleme yaklaşımının kullanımını desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Gövde çapı, Karışık-etkili model, Uludağ göknarı, Model kalibrasyonu

Development of stem diameter model for Bornmullerian fir (*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmulleriana* (Mattf.)) stands in Ayancık District using mixed effects modeling approach

Abstract: A nonlinear mixed-effect modeling approach was used to model for Turkish fir [*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmülleriana* (Mattf.)] stands in Sinop-Ayancık District of Turkey. About 87% of the trees were randomly selected for model development and the remainder used for model validation. Based on goodness-of-fit criteria, the model including random-effects in all parameters was the best. The selected mixed-effects model showed homogeneous residual variance and autocorrelation was reduced with the inclusion of random-effects. Measures of bias and precision indicated that estimates of random-effects improved significantly the predictive capability of the taper equation when predicting upper stem diameters. Mixed models allow calibration of the model for new locations, by predicting random coefficients if additional stem form measurements are available. Diameter measurements from various stem locations were evaluated for tree-specific calibrations by predicting random-effects parameters using an approximate Bayesian estimator. It was found that an upper stem diameter at 8.3 m above ground was best suited for calibrating tree-specific predictions of diameter outside bark. The results of this study support previous findings indicating that the use of mixed-effects modeling approach increases flexibility and efficiency of taper equations for upper stem diameter prediction.

Keywords: Stem diameter, Mixed-effects model, Bornmullerian fir, Model calibration

1. Giriş

Ağaç ve meşcerelere ilişkin hacmin ve bu hacim miktarının farklı ticari sınıflara dağılımının doğru hesaplanması, orman amenajman planlarının düzenlenmesi ve orman ürünleri sanayisinin geleceğine ilişkin projeksiyonlarının yapılabilmesi için büyük önem taşımaktadır. Ağaç hacimlerinin doğru tahmini için var olan farklı yöntemler arasında en etkin ve çok yönlü yaklaşım tarzı gövde çapı modelleridir (Jiang vd., 2005). Gövde çapı

modellerinin ormancılık uygulamaları için diğer bir önemi de, büyüme ve hasılat modellerine entegre edilebilmesi, farklı yetiştirme ortamları ve farklı planlama alternatiflerinden elde edilecek ürün sınıflarının ve miktarlarının tahminine imkan sağlamasıdır (de-Miguel vd., 2012).

Gövde çapı modellerinin geliştirilmesi amacıyla genellikle doğrusal olmayan en küçük kareler (ONLS) yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, gövde çapı modellerinin geliştirilmesinde kullanılan veriler, aynı ağaç üzerinde düzenli ya da düzensiz aralıklarla ölçülen çap değerlerinden

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

^b Ayancık Orman İşletme Müdürlüğü, Sinop

@ * **Corresponding author** (İletişim yazarı): ramazanozcelik@sdu.edu.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 25.08.2015, **Accepted** (Kabul tarihi): 09.09.2015



Citation (Atıf): Özçelik, R., Yaşar, Ü., 2015. Sinop Yöresi Uludağ Göknarı (*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmülleriana* (Mattf.)) meşcereleri için gövde çapı modelinin karışık etkili modelleme tekniği ile geliştirilmesi, Turkish Journal of Forestry, 16(2): 86-95. DOI: [10.18182/tjf.94103](https://doi.org/10.18182/tjf.94103)

elde edilmektedir. Bunun sonucu olarak da, ardışık ölçüm değerleri birbiri ile ilişkili olmaktadır. Bu ilişki regresyondaki kovaryans matrisinin yansız tahmini için gerekli olan hataların bağımsız olma kuralını ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle, araştırma çalışmaları hem yeni model formlarının geliştirilmesine, hem de gövde formundaki ağaçlar arası değişkenliğin hesaplanmasına ilişkin yeni yaklaşımlara odaklanmıştır.

Bu amaçla son yıllarda gövde çapı modellerinin geliştirilmesinde doğrusal olmayan karışık etkili modelleme (NLME) yaklaşımı kullanılmaya başlamıştır (Gregoire ve Schabenberger, 1996; Fang ve Bailey, 2001). Bu yaklaşım ile çoklu hiyerarşik yapı gösteren veri seti içerisindeki bireylerin kendi içindeki ve bireyler arası ilişkisi hesaplanabilmekte ve model esnekliği sağlanabilmektedir. Yine bu modelleme yaklaşımıyla, sabit (fixed) ve tesadüfi (random) etkili parametreler eş zamanlı tahmin edilebilmektedir. Bu özellik, karışık etkili modellemeyi yeni bir birey için tahmin yapılması gerekli olduğunda ve bu bireyle ilgili bir ön bilginin bulunması durumunda diğer modellere göre daha etkili yapmaktadır. Bu durumda, ön bilgi, yeni birey için tesadüfi değişkenin tahmin edilmesi için kullanılmakta ve modelin kalibrasını mümkün kılmaktadır. Bu özellikler karışık etkili modellemeyi, diğer modelleme tekniklerine göre daha avantajlı duruma getirmektedir. Burkhart ve Tome (2012) tarafından da belirtildiği gibi, karışık etkili modelleme tekniğinin geleneksel regresyon denklemlerine üstünlüğü; modelin yapısında sabit ve tesadüfi etkili parametreleri birlikte bulundurma ve ilişkili verilerin varyans-kovaryans matrislerinin modellenmesine izin vermesidir. Bu nedenle karışık etkili modelleme yaklaşımı, ağaçlar arası ve ağaçlar içi varyasyonu daha iyi açıklayabilmekte ve modelin sabit etkili parametrelerinin yansız ve doğru tahminine imkân sağlamaktadır. Bunun yanında karışık etkili modelleme yaklaşımı şayet örneklenmemiş bir yer için tesadüfi parametreleri tahmini yapılacaksa, modelin tahmin yeteneğini iyileştirebilmektedir (Calama ve Montero, 2005; Jiang vd., 2007).

Bir ağacın gövde formunun ve dolayısı ile gövde üzerindeki herhangi bir noktadaki çap değerinin tahmin edilmesi amacıyla değişik ülkelerde, çok farklı matematiksel formlarda modeller geliştirilmiş olmasına rağmen (Kozak, 1988; Figueiredo-Filho vd., 1996; Fang vd., 2000; Sharma ve Oderwald, 2001; Sharma ve Burkhart, 2003; Lee vd., 2003; Jiang vd., 2005; Kozak, 2004; Trincado ve Burkhart, 2006; Jiang vd., 2007) ülkemizde, ağaç türleri ve meşcere yapılarına bağlı olarak elde edilebilecek odun çeşitlerinin tahmin edilmesinde kullanılan temel altlıklardan biri olan gövde çapı modelleri ile ilgili yeterli bilimsel çalışma bulunmamaktadır. Ülkemizde gövde çapı modellerinin geliştirilmesi amacıyla yöresel bazda farklı model yapıları kullanılarak bazı çalışmalar yapılmıştır (Yavuz, 1995; Yavuz ve Saraçoğlu, 1999; Sakıcı, 2002; Meydan-Aktürk, 2006; Sakıcı vd., 2008; Brooks vd., 2008; Özçelik ve Brooks 2012; Özçelik ve Bal 2013). Karışık etkili modelleme yaklaşımı ile gövde çapı modellerinin geliştirilmesi ile ilgili olarak ise, ülkemizdeki çalışmaların sayısı oldukça azdır (Özçelik vd. 2011; Şenyurt vd., 2014; Ercanlı, 2015).

Bu çalışmada, Sinop-Ayancık Yöresi doğal Uludağ göknarı meşcereleri için karışık etkili modelleme yaklaşımı kullanılarak gövde çapı modeli geliştirilmiştir. Bu amaçla

farklı tesadüfi etkili parametre kombinasyonları test edilmiş ve en başarılı tesadüfi değişken kombinasyonu kullanılarak yeni bir birey veya yetiştirme ortamı için modelin kalibrasyonu yapılarak geliştirilen model test edilmiştir.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan veriler, Ayancık Orman İşletme Müdürlüğü Kepez Orman İşletme Şefliği'ndeki doğal Uludağ göknarı meşcerelerinden toplanmıştır. Bu amaçla toplam 319 adet örnek ağaç ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu örnek ağaçlardan 278 adedi (%87) gövde çapı modelinin geliştirilmesi, geri kalan 41 adet (%13) ağaç ise geliştirilen modelin test edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Örnek ağaçların seçiminde, ağaçların meşcere kuruluşlarını ve dolayısıyla çap ve boy sınıflarını en iyi şekilde temsil etmesini sağlamak amacıyla, tüm çap ve boy sınıflarına mümkün olduğu kadar eşit dağılımının sağlanmasına çalışılmıştır. Bu nedenle, örnek ağaçlar hem galip hem de müşterek galip ağaçlar arasından seçilmiştir. Örnek ağaçların seçiminde gövdelerin çatalı ve eğri, tepelerin kırık olmamasına ve ağaçların yetiştirme ortamı şartlarını en iyi biçimde yansıtmasına dikkat edilmiştir. Örnek ağaçlar kesildikten sonra her ağaç üzerinde sırasıyla şerit metre yardımı ile ağaç boyları ölçülmüş ve daha sonra her ağaç üzerinde birer metre aralıkla çaplar ölçülmüştür. Çap ölçümleri için elektronik çap ölçer kullanılmıştır. Ölçümü yapılan örnek ağaçlara ilişkin nitelendirici istatistiksel bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Gövde çapı modelleri

Ormancılık çalışmalarında iki grup gövde çapı modelinin başarı ile kullanıldığı belirtilmektedir. Bunlardan ilki, değişken şekil çap modelleridir. Bu modellerde bir ağaç gövdesinin, dipten tepeye doğru nayloid, paraboloid ve konik parçalardan oluştuğu düşünülmektedir (Newnham, 1988; Kozak, 1988; Perez vd., 1990). Ancak bu model formunun bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar; gövde üzerindeki farklı şekillerin hacim hesaplamalarında birleştirilememesi ve en yüksekteki çap değeri için ticari boyun doğrudan hesaplanamayıp, bir iterasyon ile hesaplanmasının gerekli olmasıdır. İkinci grup ise; parçalı-gövde çapı (Segmented-polinomial) modelleridir. Bu modeller farklı ağaç bölümlerinin çap düşüşlerini farklı denklem formları kullanarak tanımlamaktadır (Martin, 1981; Parresol vd., 1987; Clark vd., 1991; Figueiredo-Filho vd., 1996; Fang vd., 2000; Jiang, 2004). Yapılan çalışmalar, gövde çapı tahminlerinde, değişken şekil gövde çapı modellerinin, parçalı gövde çapı modelleri kadar başarılı olduklarını göstermiştir (Sharma ve Parton, 2009; Yang vd., 2009b; Li vd., 2012; Gomez-Garcia vd., 2013). Bu nedenle çalışmada, Sharma ve Parton (2009) tarafından geliştirilen değişken şekil gövde çapı modeli kullanılmıştır. Bu model, Sharma ve Oderwald (2001) modelini temel alan ve Sharma ve Zhang (2004) tarafından geliştirilen gövde çapı modelinin değiştirilmiş bir şeklidir.

Çizelge 1. Uludağ göknarı için gövde çap modeli geliştirmek ve geliştirilen modelin test edilmesi amacıyla ölçülen parametrelerine ilişkin nitelendirici istatistikler.

Veri	Ortalama	Standart sapma	Minimum	Maximum
Model Geliştirme Verisi (n = 278 ağaç)				
Göğüs Çapı (cm)	37.70	11.08	10.20	73.00
Toplam Boy (m)	27.02	7.58	6.91	51.30
Disk Çapı (cm)	22.64	11.92	1.00	75.00
Disk Yüksekliği (m)	13.05	9.00	0.30	50.00
Disk Sayısı	12.35	7.96	1.00	40.00
Model Test Verisi (n = 41 ağaç)				
Göğüs Çapı (cm)	38.93	11.12	12.30	58.90
Toplam Boy (m)	27.49	7.73	9.52	41.80
Disk Çapı (cm)	23.29	11.69	1.00	60.10
Disk Yüksekliği (m)	13.39	9.12	0.30	40.00
Disk Sayısı	13.22	8.49	1.00	38.00

2.2.2. Karışık-etkili modelleme ile gövde çapı modelinin geliştirilmesi

Regresyon modelleri, genellikle toplum temelli ve birey temelli modeller olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Geleneksel regresyon modelleri en küçük kareler yöntemiyle toplum ortalamalarına ilişkin parametreleri tahmin etmekte iken, birey temelli modeller ise, bir toplum içindeki bireylere özel tahminler için kullanılmakta ve daha yüksek doğruluk ortaya koymaktadırlar. Doğrusal olmayan karışık etkili modelleme (NLME) yaklaşımı sabit ve tesadüfi etkili parametreleri yardımı ile bu iki özelliği birleştirebilmekte ve hem toplum temelli hem de birey temelli tahminler yapılabilmesine imkan sağlamaktadır. NLME modelleme yaklaşımı ile ilgili teori ve hesaplama metotlarına ilişkin detaylar Pinheiro ve Bates (2000) tarafından açıklanmıştır. Pinheiro ve Bates (2000) tarafından kullanılan metodoloji ise Lindstrom ve Bates (1990)'in çalışmalarını temel almaktadır. NLME yaklaşımı, ağaçlar içi ve ağaçlar arasındaki varyasyonu açıklayabilmek için iki aşamalı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada da, daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırma olanağı sağlamak ve tutarlığı sağlamak için Davidian ve Giltinan (1995) tarafından önerilen iki aşamalı yaklaşım kullanılarak gövde çapı modeli geliştirilmiştir.

I. aşama: Bireyler içi varyasyon

i. bireyin ölçümleri ile ilişkili tesadüfi ve sistematik varyasyonu temsil eden NLME modelin genel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$y_{ij} = f(\beta_i, x_{ij}) + \varepsilon_{ij} \quad (3.1)$$

$$i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n_i$$

Burada; y_{ij} i. örnek ağaçtaki j. gözlemin değerini, x_{ij} i. örnek ağaçtaki j. gözlem için tahmin vektörünü, $f(\cdot)$; parametre ve tahmin vektörlerinin doğrusal olmayan fonksiyonunu ve ε_{ij} normal dağılım gösteren hata terimini ifade etmektedir. Bir gövde çapı modeli kavramı içerisinde n ve n_i sırasıyla; toplam ağaç sayısını ve bir ağaç gövdesi boyunca ölçülen çap değerlerini ifade etmektedir. Bu formül, bir ağaç üzerinde gövde boyunca aşamalı düzensiz

tekrarlı ölçüm verilerinin bir durumunu ifade etmektedir. Özel bir birey veya i. küme için y_{ij} yanıtları $[y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}]^T$ vektörü ile birleştirilebilir ve genel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabılır.

$$y_i = f(\beta_i, x_i) + e_i \quad (3.2)$$

$$e_i | \beta_i \sim N(0, R_i(\beta_i, \xi)), \quad \xi = [\sigma, \theta', \rho']^T \quad (3.3)$$

Burada; $R_i(\beta_i, \xi)$ varyans-kovaryans yapısını; ξ ise bütün bireyler için $[\sigma, \theta', \rho']^T$ bilinmeyen parametreler vektörünü ifade etmektedir. Birey içi sistematik varyasyon hata terimlerinin tesadüfi dağılımı ile ilgili varsayım ve doğrusal olmayan fonksiyon yardımı ile yukarıdaki formül ile karakterize edilebilmektedir.

Hata terimlerinin varyans-kovaryans matrisi birey içi varyans ve birey içi korelasyonu hesaplamak için daha genel bir form aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$R_i(\beta_i, \xi) = \sigma^2 G_i^{1/2}(\beta_i, \theta) \Gamma_i(\rho) G_i^{1/2} \quad (3.4)$$

Burada; $G_i^{1/2}(\beta_i, \theta)$ birey içi varyansı karakterize eden $(n_i \times n_i)$ boyutlarındaki bir çapraz matrisi, $\Gamma_i(\rho)$ ise; i. bireyin ölçümleri içindeki korelasyon kalıbını tanımlayan $(n_i \times n_i)$ boyutundaki bir matrisi ifade etmektedir. σ^2 ise modelin artıklara ilişkin varyansıdır.

Şayet ağaç içi varyans homojen ve hatalar ilişkili değil ise, varyans-kovaryans matrisi aşağıdaki gibi basitleştirilebilmektedir.

$$R_i = \sigma^2 \Gamma_i(\rho) \quad (3.5)$$

II. aşama: Bireyler arası varyasyon

Bireyler arası varyasyon için parametre β_i 'in hesabı bireyden bireye değişmektedir. Parametre vektörü β_i , sistematik ve tesadüfi varyasyon düşünülerek aşağıdaki gibi genel bir formda ifade edilebilir.

$$\beta_i = A_i \beta + B_i b_i \quad (3.6)$$

$$b_i \sim N(0, D)$$

Burada; A_i ve B_i sabit ve rasgele etkili parametreler için tasarım parametreleridir. β ($r \times p$) büyüklüğünde sabit etkili parametre vektörü; b_i ise ($q \times 1$) büyüklüğünde i. ağaç için tesadüfi etkili parametre vektörüdür. D tesadüfi etkili parametreler için varyans-kovaryans matrisidir. p, q ise sırasıyla, modeldeki sabit ve tesadüfi etkili parametrelerin sayısını göstermektedir. Bu tasarım matrisleri sabit ve tesadüfi etkili parametreler için sıfır ve bir değerlerini içermektedir.

Bu çalışmada gövde çapı modeli olarak Sharma ve Parton (2009) tarafından geliştirilen model seçilmiştir. Bu amaçla NLME yaklaşımı ile gövde çapı modelinin geliştirilmesi için SAS yazılımında bulunan NLMIXED yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile sırasıyla tüm parametrelerin sabit etkili olduğu durum ve farklı tesadüfi parametre kombinasyonları test edilmiştir. Bu çalışmada; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ parametrelerinin bir, iki, üç ve dörtlülük tesadüfi etkili parametre kombinasyonları test edilmiştir. Bu

çerçevede toplam 16 farklı kombinasyon test edilmiştir. En uygun tesadüfi etkili parametre kombinasyonunun belirlenmesi için ölçüt değerleri olarak, Akaike'nin bilgi kriteri (AIC, Akaike, 1974) ve iki kez negatif logaritmik olabilirlik ($-2\ln(L)$) kriterleri kullanılmıştır. En uygun parametre kombinasyonuna karar verildikten sonra, geliştirilen modellerin bağımsız bir veri seti ile testi de gerçekleştirilmiştir. Yukarıda belirtilen açıklamalar ışığında, Sharma ve Parton (2009) gövde çapı modelinin karışık etkili model formu aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$y_{ij} = \beta_{0i} \left(\frac{H_i - h_{ij}}{H_i - h_D} \right) \left(\frac{h_{ij}}{h_D} \right)^{\beta_{1i} + \beta_{2i}x_{ij} + \beta_{3i}x_{ij}^2} + e_{ij} \quad (3.7)$$

Burada;

$$y_{ij} = d_{ij} / D_i ; x_{ij} = h_{ij} / H_i$$

h_{ij} = i. birey için j. ölçümün yerden yüksekliği (m),

H_i = i^{th} birey için toplam ağaç boyu (m),

h_D = Göğüs yüksekliği (1.3m)

$\beta_{0i}, \beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}$ = tahmin edilen parametreler,

e_{ij} = hata terimini ifade etmektedir.

III. aşama: Yeni bir gözlem için tahmin (Kalibrasyon)

Karışık etkili modellemede, değerlendirilmesi ve çözümlenmesi gereken önemli bir konu da; modelin "Kalibrasyon Yanıtlarının" ortaya konulmasıdır. Kalibre edilen modeller, daha doğru, tutarlı ve güvenilir tahminler elde edilmesi imkanlarını sağlamaktadır (Calama ve Montero, 2006; Trincado ve Burkhart, 2006; Yang vd., 2009a; Cao ve Wang, 2011). Bir gövde çapı modelinin temel amacı ölçülmemiş bir ağaç için gövde üzerindeki farklı çap değerlerinin tahminidir. Karışık etkili modelleme tekniğinin geleneksel regresyon modellerine olan üstünlüğü, karışık etkili modellemenin hem tüm popülasyona (ortalama yanıt) ilişkin hem de bireye özel (Kalibrasyon yanıtı) yanıtlara izin vermesidir. Bu özellikler karışık etkili modelleme yaklaşımını yeni bir ağaç için ön bilgilerin bulunması durumunda tahmin için daha etkili kılmaktadır. Trincado ve Burkhart (2006) tarafından belirtildiği gibi, kalibrasyon işlemi bir gövde çapı modelinin tahmin kapasitesini artırmakta ve tahmin için ekstra değişkenlere olan ihtiyacı azaltmaktadır.

Durum 1: Ortalama yanıt tahmini

Şayet bir ağaca ilişkin ön bilgilere sahip değil isek, o ağaç için tesadüfi etkili parametreleri tahmin edemeyiz. Tesadüfi etkiler ($E(b_k) = 0$) için beklenen tahminlerin kullanımı tek seçimdir. Sabit etkili parametre tahminlerini kullanarak bir ağaç gövdesi üzerindeki ortalama çap değerlerini tahmin edebiliriz.

Durum 2: Kalibrasyon yanıtı tahmini

Kalibrasyon yanıtı bir ağaç gövdesi üzerinde daha önceden ölçülmüş çap değerlerine ilişkin bilgileri gerektirir. Bu ilave bilgiler kullanılarak tesadüfi etkiler vektörü b_k tahmin edilebilir. Hesaplamalar aşağıda verilen b_k 'nin uygun Bayesian tahmincisi kullanılarak yapılabilir (Vonesh ve Chinchilli, 1997):

$$\hat{b}_k \approx \hat{D}\hat{Z}_k^T (\hat{Z}_k \hat{D}\hat{Z}_k^T + \hat{R}_k)^{-1} \hat{e}_k \quad (3.8)$$

Burada:

\hat{D} = tesadüfi etkiler için $q \times q$ boyutlarındaki varyans-kovaryans matrisi,

\hat{R}_k = birey içi değişkenlik için $k \times k$ boyutlarındaki varyans-kovaryans matrisi,

$$\hat{e}_k = y_k - f(A_k \beta, x_k) \quad (3.9)$$

$$\hat{Z}_k = \left. \frac{\partial f(A_k \beta, x_k)}{\partial \beta_k^T} \right|_{\beta_k = \hat{\beta}_k} \cdot B_k \quad (3.10)$$

Tesadüfi etkili parametrelerin tahminine ilişkin detaylar Fang ve Bailey (2001) ve Trincado ve Burkhart (2006) tarafından açıklanmıştır. Bu çalışmada; karışık etkili modellerin kalibrasyon yanıtlarının belirlenmesinde; Trincado ve Burkhart (2006), Yang vd., (2009a); Yang vd., (2009b) ve Sharma ve Parton (2009)'un çalışmalarında önerdiği farklı senaryolar değerlendirilmiştir.

2.2.4. Model performanslarının değerlendirmesinde kullanılan ölçütler

Tesadüfi değişken içeren ve içermeyen modellerin doğruluğunun ve tutarlılığının karşılaştırılmasında Arabatzis ve Burkhart (1992) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Bu amaçla en uygun tesadüfi değişken kombinasyonunun belirlenmesi amacıyla Akaike'nin bilgi kriteri (AIC, Akaike, 1974) ve iki kez logaritmik olabilirlik fonksiyonunu ($-2\ln(L)$) kriterleri kullanılmıştır. Akaike'nin bilgi kriteri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$AIC = n \log \left(\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / n \right) + 2p \quad (3.11)$$

Burada L = likelihood fonksiyonu ve k = parametre sayısını ifade etmektedir. AIC farklı modellerin güvenilirliğinin karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir ölçüt değeridir. AIC ve ($-2\ln(L)$) ölçütlerine göre, en küçük değerlere sahip model iyi model olarak düşünülmüştür.

En uygun tesadüfi değişken kombinasyonuna sahip model ile tüm parametreleri sabit etkili modelin gövde çapı tahminlerindeki başarı durumları farklı nisbi boy değerleri için karşılaştırılmıştır. Bu amaçla ağaç gövdesi on parçaya ayrılmış ve modellerin bu gövde parçalarındaki başarı durumları ortalama hata (E), hata kareler ortalaması (MSE) ve hata kareler ortalamasını karekökü (RMSE) ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Bu kriterlere ilişkin formüller aşağıda vermiştir.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (3.12)$$

$$MSE_i = \bar{e}_i^2 + v_i \quad (3.13)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (3.14)$$

Burada; y_i ölçülen değerleri, \hat{y}_i model ile tahmin edilen değerleri, \bar{y} ölçülen değerlerin ortalamasını, \bar{e}_i ortalama hatayı, n model geliştirmek için kullanılan toplam gözlem sayısını ve p ise tahmin edilen parametre sayısını göstermektedir.

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Karışık-etkili değişken şekil gövde çapı modeli

Çalışmada öncelikli olarak, sadece sabit etkili parametrelere sahip model (Fixed model) ile, farklı tesadüfi değişken kombinasyonlarına sahip karışık etkili model (Mixed effects model) karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, bu iki durum arasında önemli farklılıkların olduğu ortaya konmuştur. Buna ilişkin sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir. Bütün durumlarda, tesadüfi değişken eklenen modeller daha başarılıdır.

-2LL ve AIC ölçüt değerleri ve σ^2 değeri dikkate alındığında tüm parametreleri tesadüfi etkili model en başarılı olarak ortaya çıkan karışık etkili modelin parametre tahminleri ise Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 2. Sharma ve Parton (2009) modelinin farklı tesadüfi değişken kombinasyonları için istatistiksel sonuçları

Tesadüfi Değişkenler	Parametre sayısı	σ^2	-2LL	AIC
Hiçbiri ^a	5	0.01674	-2764	-2754
β_0	6	0.00329	-5878	-5866
β_1	6	0.01158	-3334	-3322
β_2	6	0.01132	-3374	-3362
β_3	6	0.01292	-3125	-3113
β_0, β_1	8	0.00190	-6800	-6784
β_0, β_2	8	0.00104	-7895	-7879
β_0, β_3	8	0.00117	-7670	-7654
β_1, β_2	8	0.01033	-3476	-3460
β_1, β_3	8	0.01061	-3428	-3412
β_2, β_3	8	0.00911	-3721	-3705
$\beta_0, \beta_1, \beta_2$	11	0.00074	-8397	-8375
$\beta_0, \beta_1, \beta_3$	11	0.00076	-8360	-8338
$\beta_0, \beta_2, \beta_3$	11	0.00070	-8495	-8473
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	11	0.00051	-8885	-8855
$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$	15	0.00046	-20315	-20285

σ^2 tahminlerin standart hatasını, -2LL iki kez logaritmik olabilirlik fonksiyonunu ve AIC Akaike'nin bilgi kriterini, ^aSabit etkili modeli ifade etmektedir.

Çizelge 3. Sharma ve Parton (2009)'un karışık etkili değişken şekil gövde çapı modeli için parametre tahminleri

	Tahmin	Standart Hata (σ^2)
<i>Sabit etkili parametreler</i>		
β_0	0.9939	0.00136
β_1	-0.04286	0.00190
β_2	0.03461	0.01284
β_3	0.3120	0.01686
<i>Varyans bileşenleri</i>		
σ^2	0.000524	0.000011
Var(b_0)	0.000365	0.000044
Var(b_1)	0.000815	0.000088
Var(b_2)	0.039030	0.003971
Var(b_3)	0.070220	0.006826
Cov(b_0, b_1)	0.000077	0.000044
Cov(b_0, b_2)	0.000811	0.000293
Cov(b_0, b_3)	-0.00059	0.000387
Cov(b_1, b_2)	-0.00396	0.000515
Cov(b_1, b_3)	0.005459	0.000669
Cov(b_2, b_3)	-0.04538	0.004898

^a standard hata

Ağaçlar arası varyasyon için, k . yeni bir ağaç için parametre vektörü β_k aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\beta_k = \mathbf{A}_k \beta + \mathbf{B}_k \mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} 0.99390 + b_{0k} \\ -0.04286 + b_{1k} \\ 0.03461 + b_{2k} \\ 0.31200 + b_{3k} \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}_k \sim N(0, \mathbf{D})$$

Burada, sırasıyla, β ; sabit etkili parametre vektörünü $[0.99390, -0.04286, 0.03461, 0.31200]^T$, \mathbf{b}_k tesadüfi etkili parametre vektörünü $[\mathbf{b}_{0k}, \mathbf{b}_{1k}, \mathbf{b}_{2k}, \mathbf{b}_{3k}]^T$, $\mathbf{A}_k = \mathbf{B}_k = \mathbf{I}_4$ ise (4x4) boyutundaki tanım matrisini $[\mathbf{1000}, \mathbf{0100}, \mathbf{0010}, \mathbf{0001}]^T$ veya sabit ve tesadüfi etkili dizayn matrisini ifade etmektedir. \mathbf{b}_k tesadüfi etkiler vektörü, $E[\mathbf{b}_k] = 0$ ve varyans-kovaryans matrisi \mathbf{D} ile çok değişkenli normal dağılmış olarak düşünülmektedir (Çizelge 4.2).

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0.000365 & 0.000077 & 0.000811 & -0.000590 \\ 0.000077 & 0.000815 & -0.003960 & 0.005459 \\ 0.000811 & -0.003960 & 0.039030 & -0.044538 \\ -0.000590 & -0.005459 & -0.045380 & 0.070220 \end{bmatrix}$$

Sharma ve Parton (2009) tarafından belirtildiği gibi, Formül (3.7) uygulanarak gövde üzerinde ekstra çap ölçümleri kullanılarak ($j=1, \dots, n_k$) yeni bir ağaç veya yer için tesadüfi etkili parametreler vektörü tahmin edilebilir.

3.2. Hata varyansı ve otokorelasyon için elde edilen sonuçlar

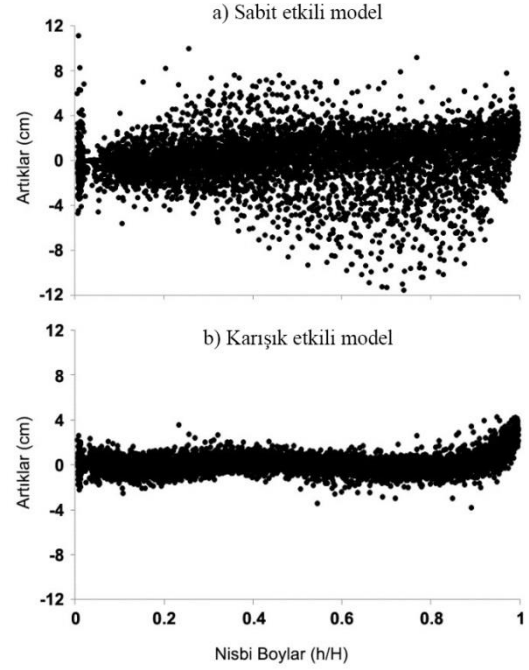
Sabit etkili ve karışık etkili modellere ilişkin hata analizleri, tesadüfi etkili parametrelere sahip karışık-etkili modelin, sabit etkili modele kıyasla daha homojen bir hata varyansı yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum Şekil 1'de de açık bir şekilde görülebilmektedir. Tüm nisbi boy değerleri için tesadüfi etkili parametrelere sahip model, tüm parametreleri sabit etkili model göre daha homojen bir hata varyansı yapısına sahiptir. Yine şekilden de açıkça görülebileceği gibi tüm parametreleri sabit etkili modelde, hata varyansı değerleri nisbi boy değerlerinin artmasına paralel olarak artış göstermektedir.

Modele tesadüfi etkili parametrelerin eklenmesinden sonra, hata ile ilişkili otokorelasyon problemi de hemen hemen ortadan kalkmıştır. İlk üç laglar için hata otokorelasyonu Şekil 2'de verilmiştir. Burada, sabit etkili modelde önemli ve pozitif bir korelasyon gözlenmektedir. Ancak, ilgili grafikten de görüleceği gibi, hata korelasyonu, modele, tesadüfi etkili parametrelerin eklenmesi ile hemen hemen ortadan kaldırılmıştır. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Tasissa ve Burkhart, 1998; Trincado ve Burkhart, 2006; Sharma ve Parton, 2009; Gomez-Garcia vd., 2013). Ağaç içi varyans-kovaryans matrisi 4 nolu denklem yardımı ile modellenmiştir. Bu formülde σ^2 (standart hata) değeri Çizelge 3'ten de görüleceği gibi 0.000524'dür.

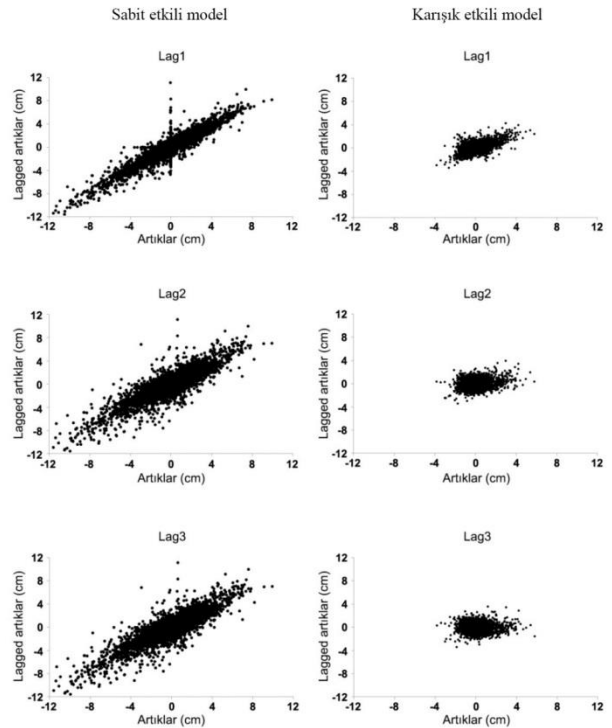
Sabit etkili parametreler ve tesadüfi etkili parametreler kullanılarak çap tahminlerine örnek olması amacıyla orta ve büyük çap sınıflarından iki ağaç için çap tahminlerine ilişkin grafiksel sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi, sadece sabit etkili parametrelere sahip model hem sabit hem de tesadüfi parametrelere sahip modele göre gövde şeklini tanımlamakta daha başarısız olmuştur. Karışık etkili model Uludağ göknarı ağaçlarının gövde şeklini tanımlamakta daha başarılıdır. Karışık etkili model, sabit etkili modele göre, özellikle ağaçların alt ve orta bölümlerini tanımlamada daha başarılıdır.

3.3. Gövde çapı tahminlerinin değerlendirilmesi

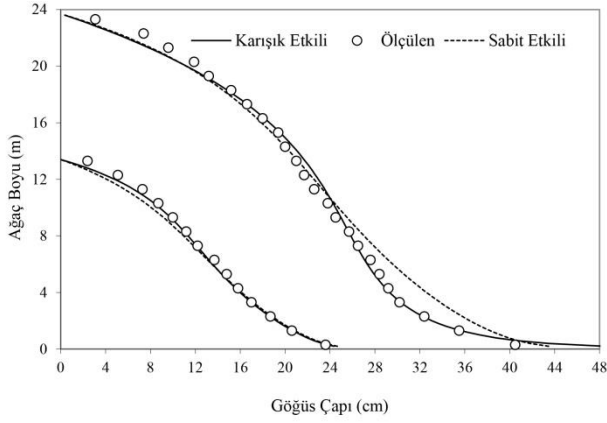
Karışık etkili modelleme tekniği kullanılarak geliştirilen gövde çapı modelinin gövde üzerindeki farklı nisbi boy gruplarındaki çap tahminlerindeki başarısı ortalama ve kalibre edilmiş yanıtlar için ortalama hata ve hataların standart sapması bakımından karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirmelere ilişkin sonuçlar Çizelge 4 ve Çizelge 5'te verilmiştir. Bu çizelgeden de görüleceği gibi, bütün nisbi boy grupları birlikte değerlendirildiğinde ortalama hata bakımından ve hata kareler ortalaması değerleri bakımından kalibre edilmiş yanıtlar, ortalama yanıtlardan daha başarılı olmuştur. Ortalama hata ve hata kareler ortalaması değerlerinin özellikle gövdenin alt kısımlarında kalibre edilmiş yanıtlar için daha küçük elde edilmesi daha önemlidir.



Şekil 1. Nisbi boylar itibariyle a) sabit etkili ve b) karışık etkili modeller için hata varyansı



Şekil 2. Sabit etkili ve karışık etkili modeller için Lag-hata Otokorelasyonu grafikleri



Şekil 3. Sabit etkili ve tesadüfi etkili parametrelere sahip modeller kullanılarak iki ağaç için gövde şekli eğrileri

Kalibre edilmiş yanıtlar bakımından bir değerlendirme yapılacak olursa; farklı kalibrasyon alternatifleri denenmiş bu amaçla gövde üzerinde farklı noktalarda ekstra bir çap

ölçümü yapılmıştır. Ancak tüm nisbi boy sınıflarının ortalaması bakımından değerlendirildiğinde; 8.3 m'de ölçülen ekstra çap değeriyle elde edilen kalibrasyon yanıtlarının doğruya daha yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür. Aynı nisbi boy değeri için hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE) değerleri Çizelge 5'de verilmiştir. Farklı nisbi boy grupları için en doğru sonuçların 8.3 m'de ölçülen ekstra tek çap değeri kullanılarak elde edilen kalibrasyon yanıtları ile elde edildiği görülmektedir. Ağaç gövdesinin %0-70'lik kısmındaki çap tahminleri için bu kalibrasyon yanıtlarının hem ortalama (Sabit etkili) hem de iki ekstra çap ölçümü ile elde edilen kalibrasyon yanıtlarından daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, Sinop yöresi Uludağ göknarı meşcerelerindeki ağaçlara ilişkin çap tahminleri yapılması durumunda, en başarılı tahminler için kalibre edilmiş gövde çapı modellerinin kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Ancak, uygulamada dikili haldeki ağaçların çap ölçümlerine ihtiyaç olduğu da unutulmamalıdır.

Çizelge 4. Farklı nisbi boy değerlerindeki gövde çapı tahminleri için ortalama ve kalibre edilmiş cevaplar için ortalama hata (E) ve hata kareler ortalaması (MSE) değerleri

Nisbi boylar (h/H)	n	Ortalama yanıtlar (cm)	Kalibre edilmiş yanıtlar (cm)				
			3.3 m	5.3 m	6.3 m	7.3 m	8.3 m
<i>Ortalama Hata (cm)</i>							
0.0 < h/H ≤ 0.1	113	0.4181	0.2644	0.3393	0.3339	0.3520	0.3612
0.1 < h/H ≤ 0.2	91	0.3099	-0.0300	0.1233	0.1352	0.2254	0.2698
0.2 < h/H ≤ 0.3	91	-0.0371	-0.3236	-0.1277	-0.1218	-0.0200	0.0372
0.3 < h/H ≤ 0.4	98	-0.1642	-0.4680	-0.2070	-0.1912	-0.1031	-0.0239
0.4 < h/H ≤ 0.5	91	-0.2878	-0.6540	-0.4429	-0.5051	-0.3887	-0.3006
0.5 < h/H ≤ 0.6	97	-0.0760	-0.3192	-0.0275	-0.0262	0.0714	0.1422
0.6 < h/H ≤ 0.7	94	-0.0985	-0.5614	-0.2631	-0.2604	-0.1132	0.0026
0.7 < h/H ≤ 0.8	89	-0.6054	-0.9237	-0.5625	-0.5688	-0.4801	-0.4248
0.8 < h/H ≤ 0.9	95	-0.9139	-1.1257	-0.8734	-0.8535	-0.7346	-0.6675
0.9 < h/H ≤ 1.0	88	-1.5277	-1.6880	-1.5743	-1.5729	-1.5426	-1.5193
<i>Toplam</i>	947	-0.2766	-0.5587	-0.3396	-0.3410	-0.2524	-0.1920
<i>RMSE (cm)</i>							
0.0 < h/H ≤ 0.1	113	1.6483	1.5433	1.4639	1.4397	1.4378	1.4398
0.1 < h/H ≤ 0.2	91	2.8363	0.4150	0.4178	0.7146	1.0322	1.2659
0.2 < h/H ≤ 0.3	91	3.0360	1.9520	1.1121	0.8950	0.5380	0.5596
0.3 < h/H ≤ 0.4	98	4.1347	4.0919	3.0453	2.6200	1.4857	1.0830
0.4 < h/H ≤ 0.5	91	5.0690	6.0415	5.7767	4.9399	3.0647	2.3928
0.5 < h/H ≤ 0.6	97	5.1179	6.2452	6.1275	5.9154	4.5078	3.8591
0.6 < h/H ≤ 0.7	94	5.4398	8.5283	7.8668	7.4692	5.8133	5.0275
0.7 < h/H ≤ 0.8	89	6.3995	9.5523	9.8383	9.7805	8.3235	7.4718
0.8 < h/H ≤ 0.9	95	5.9551	10.2266	9.4882	9.0532	7.3370	6.6061
0.9 < h/H ≤ 1.0	88	5.7943	7.5936	6.9330	6.7661	6.0526	5.6490
<i>Toplam</i>	947	4.2600	5.0450	4.6707	4.4466	3.5476	3.1675

Çizelge 5. Çap tahminleri için nisbi boylar itibarıyla ortalama ve kalibre edilmiş yanıtların RMSE değerleri.

Nisbi Boylar (h/H)	n	Ortalama Yanıtlar (cm)	Kalibre Edilmiş Yanıtlar (cm)				
			3.3 m	5.3 m	6.3 m	7.3 m	8.3 m
<i>RMSE (cm)</i>							
0.0 < h/H ≤ 0.1	113	1.2839	1.2423	1.2099	1.1999	1.1991	1.1919
0.1 < h/H ≤ 0.2	91	1.6841	0.6442	0.6464	0.8453	1.0160	1.1251
0.2 < h/H ≤ 0.3	91	1.7424	1.3972	1.0546	0.9460	0.7335	0.7481
0.3 < h/H ≤ 0.4	98	2.0334	2.0228	1.7451	1.6186	1.2189	1.0407
0.4 < h/H ≤ 0.5	91	2.2514	2.4579	2.4035	2.2226	1.7506	1.5292
0.5 < h/H ≤ 0.6	97	2.2623	2.4990	2.4754	2.4322	2.1232	1.9644
0.6 < h/H ≤ 0.7	94	2.3323	2.9203	2.8048	2.7330	2.4111	2.2422
0.7 < h/H ≤ 0.8	89	2.5297	3.0907	3.1366	3.1274	2.8850	2.7335
0.8 < h/H ≤ 0.9	95	2.4403	3.1979	3.0803	3.0089	2.7087	2.5702
0.9 < h/H ≤ 1.0	88	2.4071	2.7557	2.6331	2.6012	2.4602	2.3768
<i>Toplam</i>	947	2.0640	2.2461	2.1612	2.1087	1.8835	1.7797

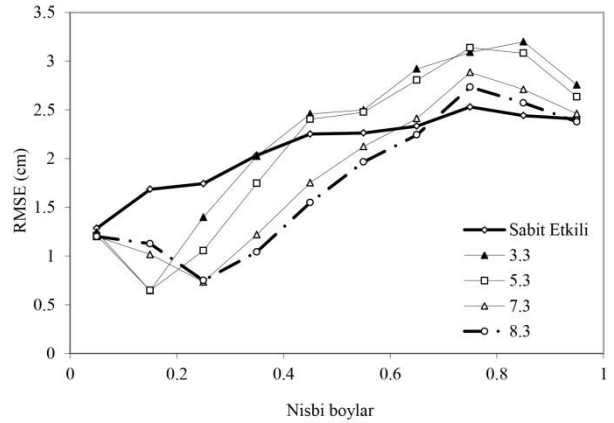
Aynı nisbi boy değeri için hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE) değerlerinin grafik analizi de Şekil 4'te verilmiştir. İlk şekilde göğüs çapı ve toplam ağaç boyuna ilave olarak tek çap ölçümü kullanılarak elde edilen kalibrasyon yanıtları ile ortalama yanıtların karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde sabit etkili modele göre en başarılı sonuçlar; 8.3 m'deki çap değerleri kullanılarak elde edilen kalibrasyon yanıtları ile elde edilmiştir. Bunu 7.3 m'deki çap değerleri kullanılarak elde edilen kalibrasyon yanıtları izlemiştir. Şekil 4'ten de görüleceği gibi bütün tek ekstra çap değeri kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon yanıtları ağaç gövdesinin ilk yarısında ortalama yanıtlara göre daha doğru sonuçlar vermiştir.

4. Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada, Sinop yöresi Uludağ göknarı meşcereleri için karışık etkili modelleme tekniği kullanılarak değişken şekil gövde çapı modeli geliştirilmiştir. Bu amaçla; Sharma ve Parton (2009) tarafından geliştirilen gövde çapı modeli kullanılmıştır. Bu model orijinali Sharma ve Oderwald (2001) tarafından sunulan boyutsal gövde çapı modelini temel alan ve Sharma ve Zhang (2004) tarafından geliştirilmiş değişken şekil gövde çapı modelinin değiştirilmiş bir şeklidir. Sharma ve Zhang (2004) tarafından geliştirilen model Güney Kanada'da balsam göknarı için yapılan bir çalışmada; Max ve Burkhart (1976), Kozak (1988) ve Zakrzewski (1999) tarafından geliştirilen modellere göre çap tahminlerinde çok daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Yapılan istatistiksel değerlendirmeler sonucunda; tesadüfi etkili parametrelere sahip gövde çapı modelinin, sadece sabit etkili parametrelere sahip modele göre daha iyi gövde çapı tahminlerine imkân sağladığı görülmektedir. Karışık etkili modelleme tekniğiyle gövde çapı modelinin geliştirilmesinde yapılması gereken önemli şeylerden birisi en uygun tesadüfi etkili parametre kombinasyonunun ortaya konmasıdır. Bu çalışmada, 15 farklı tesadüfi etkili parametre kombinasyonu denenmiş ve en uygun kombinasyon olarak bütün terimlerin tesadüfi etkili $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ olduğu durum bulunmuştur. Bu kombinasyon Sharma ve Parton (2009) tarafından yapılan çalışmada da en iyi kombinasyon olarak tanımlanmıştır.

Karışık etkili modelleme tekniğinin geleneksel regresyon modellerine karşı en önemli üstünlüğü veri yapısında bulunan otokorelasyon sorununun ortadan kaldırılmasına imkân sağlaması ve hata varyansı dağılımını homojen yapabilmesidir. Bu çalışmada da, karışık etkili modelleme tekniği kullanılarak otokorelasyon problemi hemen hemen ortadan kaldırılmış ve hata varyansı dağılımı tüm nisbi boy sınıfları için homojen bir yapıya dönüştürülmüştür. Benzer konuda başka araştırmacılar (Garber ve Maguire, 2003; Trincado ve Burkhart 2006; Yang vd., 2009b; Li ve Weiskittel, 2010; Özçelik vd., 2011) tarafından yapılan çalışmalarda otokorelasyon probleminin tamamen ya da kısmen ortadan kaldırılabilmesi için modele otokorelasyon hata yapısı bileşeninin eklenmesi önerilmekte ise de bu çalışmada Sharma ve Parton (2009) ve Lejeune vd., (2009) tarafından yapılan çalışmalardakine benzer olarak buna ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 4. Nisbi boy sınıfları itibarıyla tek ekstra çap kullanılarak yeni bir ağaç için ortalama ve kalibre edilmiş yanıtlar için RMSE değerleri

West vd., (1984) tarafından da belirtildiği gibi, otokorelasyonun hesaplanması modelin tahmin kapasitesini düzeltmemekte, fakat uygun istatistiksel yöntemler yardımı ile parametrelerin kovaryans matrisinin tahmininde yapılabilecek hataları önlemektedir. Diğer yandan Yang vd., (2009a) ve Gomez-Garcia vd., (2013) tarafından da belirtildiği gibi, otokorelasyon parametreleri aynı ağaç üzerinde farklı boyarlardaki birkaç çap değeri kullanılarak yapılan kalibrasyon işlemi uygulanmadıkça pratik amaçlarla ya da uygulamada kullanılmamaktadır.

Bu çalışmada bir ağaç gövde şeklinin kalibrasyonu için gövde üzerinde göğüs çapı ve ağaç boyu dışında ekstra çap değerleri kullanılarak tesadüfi etkili parametreler kullanılmıştır. Çalışmada farklı kalibrasyon alternatifleri denenmiş ve sonuçları sayısal ve grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla 5 farklı kalibrasyon alternatifi denemiştir. Calama ve Montero (2006) tarafından da belirtildiği gibi, günümüzde, gövde çapı veya gövde hacmi denklemlerinde, açıklayıcı bir eş değişken olarak ilave çap değerlerinin kullanımı ormancılık çalışmalarında genel bir uygulama halini almıştır. Denenen kalibrasyon alternatifleri farklı nisbi boy sınıfları için ortalama hata (E), hata kareler ortalaması (MSE) ve hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE) gibi kriterlere göre değerlendirilmiştir. Genel olarak bütün kalibrasyon alternatifleri her üç ölçüt değeri için de ortalama yanıtlardan daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar daha önce Trincado ve Burkhart (2006), Sharma ve Parton (2009), Lejeune vd., (2009) ve Yang vd., (2009a) tarafından yapılan çalışmalarla benzer ve tutarlıdır. Genel olarak değerlendirildiğinde ağaç çapı ve boyu yanında ekstra bir ya da iki çap değerinin kullanılması durumunda kalibrasyon alternatifleri arasında önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Ancak tek çap ölçümlerinde ekstra çapın ağaç gövdesi üzerinde daha yüksekten ölçülmesiyle kalibrasyon değerleri daha doğru şekilde elde edilmiştir.

Ancak burada belirtmek gerekir ki, kalibrasyon işlemi ile ağaç gövde şeklinin tahminindeki en önemli kısıt, dikili ağaçlar üzerinde ekstra çap ölçümlerinin gerekli olmasıdır. Bu çap değerleri de yerden ölçülemeyecek kadar yüksekte olmasıdır. Örneğin bu çalışmada kalibrasyon yanıtları için en doğru sonuçlar yerden 8.3 m'deki çap ölçümünün kullanılmasıdır. Ancak bu çap değerinin ölçümü kolay değildir. Kozak (1998) tarafından da belirtildiği gibi ölçüm

hataları bir modelin çap ve hacim tahminlerindeki başarısını etkileyen en önemli kriterlerdir. Ancak günümüzde, Cao ve Wang (2011) ve Rodriguez vd., (2014) tarafından da belirtildiği gibi, laser teknolojisi sayesinde dikili haldeki ağaçlarda gövdenin üst kısımlarındaki çaplarının ölçülmesi oldukça kolaylaşmıştır.

Bütün bu değerlendirmeler sonucunda; Sinop Yöresi Uludağ göknarı meşcerelerinde, gövde çapı tahminleri için doğrusal olmayan karışık etkili modelleme tekniği kullanılarak başarılı çap tahminleri yapılabileceği görülmüştür. Yeni bir ağaç ya da yer için modelin kalibrasyonu için ağaç çapı ve boyuna ilave olarak ekstra bir çap ya da iki çap ölçülmesinin çap tahminlerindeki doğruluğu çok fazla etkilemediği, ancak sadece sabit etkili parametrelere sahip modele göre tahmin başarısının daha yüksek olduğu görülmüştür. Kalibre edilmiş modeller özellikle gövdenin ilk %50'lik kısmında sabit etkili modellere göre çok daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Bu durum özellikle gövde hacminin büyük miktarının bu bölgede yoğunlaşmış olması nedeniyle önemlidir. Çap tahminlerindeki başarı doğrudan hacim tahminlerini etkilemektedir. Çünkü pratik ormancılık çalışmalarında ağaçların göğüs çaplarının doğru tahmin edilmesinden daha ziyade hacminin doğru tahmin edilmesi önemlidir. Ancak, burada yine belirtmek gerekir ki, herhangi bir yöredeki bir ağaç türü için uygun modelin seçilmesinde benzer tahmin başarısına sahip modeller arasından tercih yapılması gerektiğinde, yöntemin pratik olarak uygulanabilmesi ve orman yöneticilerinin tercihleri de önemlidir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan veriler, SDÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmekte olan BAP-3963-YL1-14 nolu "Sinop Yöresi Uludağ Göknarı [*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmülleriana* (Mattf.)] Meşcereleri İçin Gövde Çapı Modelinin Karışık Etkili Modelleme Tekniği Kullanılarak Geliştirilmesi" proje çalışmasında elde edilmiştir.

Kaynaklar

- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, 19(2):716-723.
- Arabatzi, A.A., Burkhart, H.E., 1992. An Evaluation of Sampling Methods and Model Forms for Estimating Height-Diameter Relationships in Loblolly-Pine Plantations. Forest Science, 38(1):192-198.
- Brooks, J.R., Jiang, L., Ozcelik, R., 2008. Compatible stem volume and taper equations for Brutian pine, Cedar of Lebanon, and Cilicica fir in Turkey. Forest Ecology and Management, 256(1-2):147-151.
- Burkhart, H.E., Tomé, M., 2012. Modeling forest trees and stands. Springer Science & Business Media.
- Calama, R., Montero, G., 2005. Multilevel linear mixed model for tree diameter increment in stone pine (*Pinus pinea*): a calibrating approach. Silva Fenn, 39(1): 37-54.
- Calama, R., Montero, G., 2006. Stand and tree-level variability on stem form and tree volume in *Pinus pinea* L.: a multilevel random components approach. Forest Systems, 15(1):24-41.

- Cao, Q.V., Wang, J., 2011. Calibrating fixed-and mixed-effects taper equations. Forest ecology and management, 262(4):671-673.
- Clark, A., Souter, R.A., Schlaegel, B.E., 1991. Stem Profile Equations for Southern Tree Species. Usda Forest Service Southeastern Forest Experiment Station Research Paper(Se-282):1-113.
- Davidian, M., Giltinan, D.M., 1995. Nonlinear models for repeated measurement data. (c. 62). CRC Press.
- De-Miguel, S., Mehtatalo, L., Shater, Z., Kraid, B., Pukkala, T., 2012. Evaluating marginal and conditional predictions of taper models in the absence of calibration data. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 42(7): 1383-1394.
- Ercanli, İ., 2015. Nonlinear Mixed Effect Models For Predicting Relationships Between Total Height And Diameter Of Oriental Beech Trees In Kestel, Turkey.
- Fang, Z.X., Bailey, R.L., 2001. Nonlinear mixed effects modeling for slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. Forest Science, 47(3): 287-300.
- Fang, Z.X., Borders, B.E., Bailey, R.L., 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. Forest Science, 46(1): 1-12.
- Figueiredo-Filho, A., Borders, B.E., Hitch, K.L., 1996. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in Southern Brazil. Forest Ecology and Management, 83(1): 39-46.
- Garber, S.M., Maguire, D.A., 2003. Modeling stem taper of three central Oregon species using nonlinear mixed effects models and autoregressive error structures. Forest Ecology and Management, 179(1-3): 507-522.
- Gomez-Garcia, E., Crecente-Campo, F., Dieguez-Aranda, U., 2013. Selection of mixed-effects parameters in a variable-exponent taper equation for birch trees in northwestern Spain. Annals of Forest Science, 70(7): 707-715.
- Gregoire, T.G., Schabenberger, O., 1996. A non-linear mixed-effects model to predict cumulative bole volume of standing trees. Journal of Applied Statistics, 23(2-3): 257-271.
- Jiang, L., 2004. Compatible taper and volume equations for yellow-poplar in West Virginia., West Virginia University, Morgantown, WV.
- Jiang, L., Brooks, J.R., Hobbs, G.R., 2007. Using crown ratio in yellow-poplar compatible taper and volume equations. Northern Journal of Applied Forestry, 24(4): 271-275.
- Jiang, L., Brooks, J.R., Wang, J., 2005. Compatible taper and volume equations for yellow-poplar in West Virginia. Forest ecology and management, 213(1): 399-409.
- Kozak, A., 1988. A Variable-Exponent Taper Equation. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 18(11): 1363-1368.
- Kozak, A., 1998. Effects of upper stem measurements on the predictive ability of a variable-exponent taper equation. Canadian journal of forest research, 28(7): 1078-1083.
- Kozak, A., 2004. My last words on taper equations. The Forestry Chronicle, 80(4): 507-515.

- Lee, W.-K., Seo, J.-H., Son, Y.-M., Lee, K.-H., von Gadow, K., 2003. Modeling stem profiles for *Pinus densiflora* in Korea. *Forest Ecology and Management*, 172(1): 69-77.
- Lejeune, G., Ung, C.-H., Fortin, M., Guo, X.J., Lambert, M.-C., Ruel, J.-C., 2009. A simple stem taper model with mixed effects for boreal black spruce. *European journal of forest research*, 128(5): 505-513.
- Li, R., Weiskittel, A., Dick, A.R., Kershaw, J.A., Seymour, R.S., 2012. Regional stem taper equations for eleven conifer species in the Acadian region of North America: development and assessment. *Northern Journal of Applied Forestry*, 29(1): 5-14.
- Li, R., Weiskittel, A.R., 2010. Estimating and predicting bark thickness for seven conifer species in the Acadian Region of North America using a mixed-effects modeling approach: comparison of model forms and subsampling strategies. *European Journal of Forest Research*, 130(2): 219-233.
- Lindstrom, M.J., Bates, D.M., 1990. Nonlinear mixed effects models for repeated measures data. *Biometrics*: 673-687.
- Martin, A.J., 1981. Taper and volume equations for selected Appalachian hardwood species. (c. 490). US Department of Agriculture, Forest Service.
- Max, T.A., Burkhart, H.E., 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. *Forest Science*, 22(3): 283-289.
- Meydan-Aktürk, G., 2006. Doğu Ladini (*Picea orientalis* (L.) Link) için Trigonometrik Gövde Çapı Denklemine Oluşturulması. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Newnham, R.M., 1988. A Variable form Taper Function. Information Report PI-X-83. Forestry, 33p. Canada.
- Ozcelik, R., Bal, C., 2013. Effects of adding crown variables in stem taper and volume predictions for black pine. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 37(2): 231-242.
- Ozcelik, R., Brooks, J.R., 2012. Compatible volume and taper models for economically important tree species of Turkey. *Annals of Forest Science*, 69(1): 105-118.
- Ozcelik, R., Brooks, J.R., Jiang, L.C., 2011. Modeling stem profile of Lebanon cedar, Brutian pine, and Cilicica fir in Southern Turkey using nonlinear mixed-effects models. *European Journal of Forest Research*, 130(4): 613-621.
- Parresol, B.R., Hotvedt, J.E., Cao, Q.V., 1987. A Volume and Taper Prediction System for Bald Cypress. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 17(3): 250-259.
- Perez, D.N., Burkhart, H.E., Stiff, C.T., 1990. A Variable-Form Taper Function for *Pinus-Oocarpa* Schiede in Central Honduras. *Forest Science*, 36(1): 186-191.
- Pinheiro, J.C., Bates, D.M., 2000. Mixed effects models in S and S-plus. Springer, Heidelberg, 528p. report. United Nations Economic Commission for Europe, Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (International Co-operative Programme Forests), 23p.
- Rodriguez, F., Lizarralde, I., Fernandez-Landa, A., Condes, S., 2014. Non-destructive measurement techniques for taper equation development: a study case in the Spanish Northern Iberian Range. *European Journal of Forest Research*, 133(2): 213-223.
- Sakıcı, O.E., 2002. Kastamonu Yöresi Uludağ Göknarı Meşcerelerinde Gövde Profili, Hacim, Hacim Oran Sistemlerinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Sakici, O.E., Misir, N., Yavuz, H., Misir, M., 2008. Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp *bornmulleriana* in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(6): 522-533.
- Şenyurt, M., Ercanlı, İ., Saraçoğlu, Ö., 2014. Batı Karadeniz Yöresi Sarıçam meşcereleri için uyumlu Gövde çapı ve Gövde hacim denklemlerinin karışık etkili modelleme ile Geliştirilmesi. II. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu, Antalya, s. 601-607.
- Sharma, M., Burkhart, H.E., 2003. Selecting a level of conditioning for the segmented polynomial taper equation. *Forest science*, 49(2): 324-330.
- Sharma, M., Oderwald, R.G., 2001. Dimensionally compatible volume and taper equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(5): 797-803.
- Sharma, M., Parton, J., 2009. Modeling stand density effects on taper for jack pine and black spruce plantations using dimensional analysis. *Forest Science*, 55(3): 268-282.
- Sharma, M., Zhang, S., 2004. Variable-exponent taper equations for jack pine, black spruce, and balsam fir in eastern Canada. *Forest ecology and management*, 198(1): 39-53.
- Tasissa, G., Burkhart, H.E., 1998. An application of mixed effects analysis to modeling thinning effects on stem profile of loblolly pine. *Forest ecology and management*, 103(1): 87-101.
- Trincado, G., Burkhart, H.E., 2006. A generalized approach for modeling and localizing stem profile curves. *Forest Science*, 52(6): 670-682.
- Vonesh, E., Chinchilli, V.M., 1997. Linear and nonlinear models for the analysis of repeated measurements. Dekker Inc., New York. 560 p.
- West, P.W., Patkowsky, 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.
- Yang, Y., Huang, S., Meng, S.X., 2009a. Development of a tree-specific stem profile model for white spruce: a nonlinear mixed model approach with a generalized covariance structure. *Forestry*, 82(5): 541-555.
- Yang, Y., Huang, S., Trincado, G., Meng, S.X., 2009b. Nonlinear mixed-effects modeling of variable-exponent taper equations for lodgepole pine in Alberta, Canada. *European Journal of Forest Research*, 128(4): 415-429.
- Yavuz, H., 1995. Taşköprü Orman İşletmesinde Sarıçam ve Karaçam İçin Uyumlu Gövde Çapı. Gövde Hacmi ve Hacim Oran Denklem Sistemlerinin Geliştirilmesi. Basılmamış Doçentlik Tezi. KTU Orman Mühendisliği Bölümü. Orman Amenajmanı Anabilim Dalı, Trabzon.
- Yavuz, H., Saraçoğlu, N., 1999. Compatible and non-compatible stem taper equations for Alder. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 23: 1275-1282.
- Zakrzewski, W., 1999. A mathematically tractable stem profile model for jack pine in Ontario. *Northern Journal of Applied Forestry*, 16(3): 138-143.