

Sisorta Orman İşletme Şefliği sınırları içerisinde yer alan sarıçam ağaçlarının hacimlerinin tahmininde Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri Tekniğinin kullanımı

İlker Ercanlı^{a,*} , Burak Özdemir^b 

Öz: Bu çalışma, Giresun Orman Bölge Müdürlüğü, Koyulhisar Orman İşletme Müdürlüğü, Sisorta Orman İşletme Şefliği sınırları içerisinde yer alan sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde tek ağaç gövde hacimlerinin elde edilmesinde, tek ve çift girişli ağaç hacim tahmin modellerinin geliştirilmesi ile Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS) yöntemine dayana tahmin modellerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, farklı göğüs çapları ve boylarda olmak üzere ağaçların gövde hacmindeki değişimi temsil etmek üzere alınmış 238 örnek ağaçtan elde edilen veriler kullanılmış ve bu veriler, tek ve çift girişli ağaç hacim denklemleri ile MARS modellerinin geliştirilmesi (n=190) ve geliştirilen bu modellerin çalışma alanındaki meşcerelere uygunluğunun test edilmesi (n=48) amacıyla rastgele örnekleme yöntemiyle iki alt gruba ayrılmıştır. Jerome Friedman tarafından 1991 yılında geliştirilen parametrik olmayan bir veri madenciliği yöntemi olan MARS tekniği, herhangi bir istatistiksel varsayıma ihtiyaç duymadan karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri başarılı bir şekilde modelleyebilmektedir. Tek girişli tahminlerde, çoklu regresyon denklemi ile $THY=0.07260$, $OMHY=10.7788$ ve $R^2=0.9696$ olarak sonuçlar elde edilirken; tek girişli MARS modeli $THY=9.74 \times 10^{-7}$, $OMHY=10.6510$ ve $R^2=0.9736$ olarak hesaplanmıştır. Çift girişli tahminlerde ise, çoklu regresyon denklemi ile $THY=0.31654$, $OMHY=6.7784$ ve $R^2=0.9865$ olarak elde edilmiş iken, çift girişli MARS modeli ile $THY=0.00099$, $OMHY=5.8994$ ve $R^2=0.9885$ olarak elde edilmiştir. Ayrıca, modellerin geliştirme sürecinde kullanılmayan bağımsız örnek ağaçlar kullanılarak yapılan denetlemede, Sisorta yöresi sarıçam meşcereleri için mevcut amenajman hacim tablosunun ve geliştirilen tek girişli denklemin istatistiksel olarak %95 güvenle uygun olmadığı; çoklu regresyon analizi ile elde edilen çift girişli hacim denkleminin ve hem tek hem de çift girişli MARS modellerinin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu bulgularla, MARS tekniğinin parçalı doğrusal segmentler ve düğüm noktaları aracılığıyla değişkenler arası karmaşık ilişkileri esnek bir şekilde modelleme yeteneği, ormancılık uygulamalarında önemli bir potansiyel sunduğu sonucuna varılabilir. Bu yenilikçi yaklaşımın Türkiye'nin farklı ormanlık alanlarında yaygınlaştırılması, orman amenajmanı ve envanter çalışmalarının başarısına önemli katkılar sağlayabilecektir.

Anahtar kelimeler: Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri, Hacim, Sarıçam, Tahmin

Application of Multivariate Adaptive Regression Splines for individual tree estimation of scots pine trees in Sisorta Forest Management Planning Unit

Abstract: This study aimed to develop single-entry and double-entry tree volume prediction models, as well as prediction models based on Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) methodology, for estimating individual tree stem volumes in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands located within the boundaries of Sisorta Forest Sub-district Directorate, Koyulhisar Forest Enterprise Directorate, Giresun Regional Directorate of Forestry. For this purpose, data obtained from 238 sample trees representing variation in stem volume across different diameter at breast height (DBH) and height classes were utilized, and these data were randomly divided into two subsets for model development (n=190) and validation of the developed models' applicability to stands in the study area (n=48). The MARS technique, a non-parametric data mining method developed by Jerome Friedman in 1991, can successfully model complex nonlinear relationships without requiring any statistical assumptions. For single-entry predictions, the multiple regression equation yielded results of bias=0.07260%, RMSE=10.7788%, and $R^2=0.9696$, while the single-entry MARS model calculated bias as $9.74 \times 10^{-7}\%$, RMSE as 10.6510%, and $R^2=0.9736$. For double-entry predictions, the multiple regression equation produced bias=0.31654%, RMSE=6.7784%, and $R^2=0.9865$, whereas the double-entry MARS model yielded bias=0.00099%, RMSE=5.8994%, and $R^2=0.9885$. Furthermore, validation using independent sample trees not employed in the model development process revealed that the existing forest management volume table and the developed single-entry equation were statistically unsuitable at the 95% confidence level for Scots pine stands in the Sisorta region, while the double-entry volume equation obtained through multiple regression analysis and both single-entry and double-entry MARS models were determined to be appropriate. In conclusion, these findings suggest that the MARS technique's ability to flexibly model complex relationships between variables through piecewise linear segments and knot points presents significant potential for forestry applications. The widespread adoption of this innovative approach across different forested areas of Türkiye could make substantial contributions to the success of forest management and inventory studies.

Keywords: Multivariate Adaptive Regression Splines, Volume, Scots pine, Prediction

✉ ^a Çankırı Karatekin Üniversitesi, Orman Fakültesi, 18200, Çankırı
^b Çayıralan Orman İşletme Müdürlüğü, Kayseri Orman Bölge Müdürlüğü, Yozgat
@ * **Corresponding author** (İletişim yazarı): ilkerercanlı@karatekin.edu.tr
✓ **Received** (Geliş tarihi): 24.10.2025, **Accepted** (Kabul tarihi): 16.12.2025



Citation (Atf): Ercanlı, İ., Özdemir, B., 2025. Sisorta Orman İşletme Şefliği sınırları içerisinde yer alan sarıçam ağaçlarının hacimlerinin tahmininde Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri Tekniğinin kullanımı. Turkish Journal of Forestry, 26(4): 460-474.
DOI: [10.18182/tjf.1808766](https://doi.org/10.18182/tjf.1808766)

1. Giriş

Orman ekosistemlerinin mevcut ağaç servetinin nicel ve nitel açıdan belirlenmesi, ormancılık planlama süreçlerinin temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Bu kapsamda mevcut ağaç servetine ilişkin veri kaynağını da orman envanteri oluşturmaktadır. Orman envanteri, orman ekosistemlerinin yapısal özellikleri ve kaynak potansiyeli hakkında detaylı bilgi sağlayarak, sürdürülebilir orman yönetimi ve uygulamalı planlama süreçlerinde önemli bir işlev üstlenmektedir (Yavuz ve Saraçoğlu, 1999; Kapucu, 2004). Orman envanterinde, ağaç serveti, genellikle birimi m³ olarak ölçülen ağaç hacmi olarak ortaya konulmakta; ekonomik olarak oldukça değer taşıyan yapacak nitelikteki ağaç hacminin satışı ile de orman işletmelerinin gelir-gider dengesi sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu bakımdan, orman işletmeciliği açısından oldukça büyük bir önem taşıyan ağaç hacminin doğru ve etkin bir şekilde ortaya konulması, orman işletmeciliğinin sürdürülebilirliğinin temel gereksinimlerinden birisi olmaktadır (Kalıpsız, 1999; Asan vd., 2001).

Ağaç hacminin belirlenmesinde en temel yöntemlerden birisi de ormancılık uygulamalarında kolay ölçülebilen bir tek ağaç özelliği olan göğüs çapı ile birlikte ağaç hacminde önemli bir faktör olan ağaç boyunun fonksiyonu olan regresyon modellerinin, temel istatistik tekniklerden olan regresyon analizi ile geliştirilmesidir (Kalıpsız, 1999; Fırat, 1973). Ağaç hacmini göğüs çapı ile birlikte ağaç boyuna göre tahmin eden regresyon modelleri, daha uygulanabilir olmalı ve hacim tahmininde daha başarılı tahmin yapmaları ile başta orman envanterinde olmak üzere çeşitli ormancılık uygulamalarında, ağaç hacminin tahmininde en yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmuşlardır (Kalıpsız, 1999; Kapucu, 2004). Ağaç hacim tabloları ise, ağaçların göğüs çapı ve boy gibi dendrometrik özellikler ile gövde hacmi arasındaki istatistiksel ilişkilerden türetilen tablolar olup, regresyon analizi gibi istatistiksel yöntemlerin uygulanmasıyla geliştirilen regresyon denklemlerinin tablolaştırılmış uygulamalarıdır (Fırat, 1973; Loetsch vd., 1973). Regresyon modellemesi kapsamında oluşturulan ağaç hacim denklemleri ve bu denklemlerin tablolaştırılmış formu olan hacim tabloları, ağaçların göğüs yüksekliği çapı ve boy özelliklerine bağlı olarak gövde hacmini uygulamalı bir yaklaşımla ve belirli bir doğruluk düzeyinde tahmin etmeyi mümkün kılmakta, böylece orman envanterlerinin daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik standartlarında gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bilgisayar teknolojilerinin ormancılık disiplininde henüz yaygınlaşmadığı 1940'lı yıllarda, bir şablon üzerinde manuel olarak ağaç hacimleri ile göğüs çapı ve boy uzunluğu arasındaki ilişkilerin dengelenmesi amaçlanmış ve grafik temelli çizimlerden hareket eden "Grafik Yöntem" adı verilen bir metodoloji benimsenmiştir (Yavuz, 1995; Şentürk, 1997). Bu dönemde, teknolojik imkanların kısıtlılığı nedeniyle görsel ve manuel yaklaşımlar ile subjektif bir değerlendirmeye dayanan grafik yöntem, o dönemin şartları ile yaygın bir uygulama alanı bulmuştur. Bununla birlikte, bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelerle paralel olarak, yoğun hesaplama gerektiren kompleks regresyon denklemlerinin kullanımı mümkün hale gelmiş ve bu gelişme sonucunda ağaç hacmi tahminlerinde daha yüksek hassasiyet ve doğruluk düzeyine sahip sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır.

Ağaç hacim denklemleri, regresyon analizi yönteminin tatbikiyle türetilen regresyon modelleri niteliğinde olup, söz konusu regresyon analizinin uygulanmasında istatistiksel bilim dalının öngördüğü; regresyon denklemlerinin ürettiği tahmin değerleri ile gözlemsel veriler arasındaki fark olarak tanımlanan artıkların (errors, residuals) normal dağılım sergilemesi, bu artıklara ait varyansların tahmini değerlerin değişkenliğine karşı homojen bir yapı göstermesi (homoskedastisite koşulu), zamansal (temporal data) ve mekansal (longitudinal data) bağımlılıktan kaynaklanan otokorelasyon neticesinde artıklar arasında ilişki bulunmaması (mevcut olması durumunda otokorelasyon probleminin ortaya çıkması) ve bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişkinin var olmaması (var olması halinde çoklu bağlantı sorunsalının gündeme gelmesi) gibi çeşitli varsayımların yerine getirilmesi halinde güvenilir, doğru ve etkin tahminler sağlayabilmektedir (Searle vd., 1992; İyit vd., 2006). Leites ve Robinson (2004) tarafından belirtildiği üzere, ağaç hacim denklemlerinin temelini oluşturan ve kesilmiş ağaçların gövdesi boyunca farklı yüksekliklerden elde edilen çap ölçümlerinin birleştirilmesiyle oluşturulan veri setlerinde, bir önceki çap değerinin bir sonraki çap değeri ile ilişkili olduğu "otokorelasyon" veya "serikorelasyon" olarak adlandırılan bir sorun gözlemlenmektedir. Bu durum, aynı ağaç üzerinden alınan gövde çapı ölçümlerinin ve dolayısıyla bu ölçümlere dayalı tahmin hatalarının istatistiksel olarak birbirine bağımlı olmasıyla ve böylece parametrelere ilişkin elde edilen standart hataların artması ile belirginleşmektedir. Searle vd. (1992) ile İyit vd. (2006) gibi araştırmacılar, bu tür ilişkili veri yapılarını "hiyerarşik" veya "kümelenmiş" veri yapıları olarak tanımlamaktadır. Ağaç hacim denklemlerinin oluşturulması amacıyla seçilen örnek ağaçlar, bireysel düzeyde homojen, ancak birbirleri arasında heterojen özelliklere sahip hiyerarşik ve kümelenmiş bir veri yapısı oluşturması, otokorelasyon sorununun ortaya çıkmasına yol açmakta ve regresyon analiziyle geliştirilen modellerin parametre tahminlerine ilişkin güven aralıklarının sistematik hatalarla hesaplanmasına neden olmaktadır. Bu gibi veri yapılarının, tahminlerdeki etkisinin dikkate alınmaması ise, önemli hata kaynaklarına neden olabilmektedir. Birbiri ile ilişkili bu hiyerarşik yapıda kümelenmiş verileri esas alan modellemelerde, ağaç gövdesi boyunca tekrarlı ölçümlerden kaynaklanan bağımlılık yapılarının istatistiksel analizlerde dikkate alınabilmesi için, varyans-kovaryans ilişkilerinin esnek biçimde modellenmesine olanak tanıyan Doğrusal Olmayan Karışık Etkili Modeller (Mixed-Effects Models) giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır (Keselman vd., 1998; Littell vd., 2005). Bununla birlikte, aynı birey üzerinde zamansal ya da mekansal olarak sıralı biçimde alınan ölçümlerde ortaya çıkan otokorelasyon etkisini azaltmak amacıyla Otoresif Modelleme yaklaşımları da önemli bir alternatif olarak önerilmektedir (Gregoire vd., 1995; Davidian ve Giltinan, 1995; Li ve Weiskittel, 2010; Li vd., 2012).

Son yıllarda ise, çeşitli tek ağaç ve meşcere özelliklerinin modellenmesinde, istatistiksel varsayımlara bağlı kalmadan karmaşık ilişkileri modelleyebilen parametrik olmayan (nonparametrik) veri madenciliği yöntemlerinin kullanımı gündeme gelmektedir. Bu yaklaşımlar arasında, Stanford Üniversitesi'nden Jerome Friedman'ın 1991'de geliştirdiği Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri "Multivariate Adaptive Regression Splines, MARS"

algoritması, öne çıkan yöntemlerden birisidir (Friedman, 1991). Bu konudaki birçok bilimsel çalışmada, bu yöntemin kısaltması olarak da “MARS” terimi tercih edilmektedir. MARS, doğrusal olmayan ilişkileri ve değişkenler arası etkileşimleri parametrik olmayan bir biçimde modellemek için tasarlanmış güçlü bir regresyon tekniğidir (Friedman, 1991). MARS, en küçük kareler yöntemine benzer şekilde bir tahmin modeli üretirken, standart regresyon tekniklerinin aksine herhangi bir istatistiksel varsayıma ihtiyaç duymaz. Bu özelliği, tekniği istatistiksel varsayımların sağlamadığı durumlarda güçlü bir alternatif haline getirir. Ayrıca, değişkenlerin sürekli veya kesikli olması, algoritmanın uygulanabilirliği için kritik bir koşul değildir (Özbalcı, 2008; Ünal, 2009). Algoritmanın en önemli özelliklerinden birisi de doğrusal olmayan ilişkileri başarılı bir şekilde modelleme yeteneğidir. MARS, bu karmaşık ilişkileri, değişkenlerin belirli aralıkları için katsayıları değişen parçalı fonksiyonlar (spline functions) kullanarak basit ve etkili bir şekilde açıklayabilmektedir (Örekeci vd., 2010; Oğuz, 2014). Bu bakımdan, MARS'ın en karakteristik özelliği, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri, değişkenlerin belirli değer aralıklarına göre farklı katsayılarla tanımlanan parçalı doğrusal fonksiyonlar aracılığıyla başarıyla modelleyebilmesidir. Bu yönüyle MARS, karmaşık etkileşimleri anlamada ve açıklamada güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Örekeci vd., 2010; Oğuz, 2014).

MARS model yapısının, bağımsız değişkenlerin farklı değerleri için farklı katsayılarla sahip olduğu parçalı bir fonksiyon yapısına sahip olması, bu model yapısının esnek ve doğrusal olmayan bir modelleme trendi sunmasına imkân tanır (Sevgenler, 2019; Çanga ve Boğa, 2020). Bu modelleme yapısı ile değişkenlerin doğrusal olmayan değişimlerini dikkate alarak verilerdeki doğrusal olmayan ilişkiler daha etkin ve başarıyla temsil edilir. Bu modelleme kabiliyeti ile MARS algoritması özellikle ziraat alanında çok sayıda farklı çalışmalar gerçekleştirilmiş iken, ormancılık alanındaki modelleme çalışmaları ile diğer karar verme süreçlerindeki uygulamaları oldukça sınırlı kalmıştır. Ülkemizde, ziraat alanında yapılan çalışmalarda, Karadaş vd. (2017a), Çelik vd. (2017), Çelik ve Boydak (2020), Çanga ve Boga (2019), Yerlikaya (2008), Tatlıdil ve Demirağ (2014), Şevgin (2020), Oktar ve Yüksel (2016), Kartal vd. (2018), Kan (2011), Akyol (2011), Tunay (2001), Örekici vd. (2005), Tunay (2011), Kuter vd. (2012), Doğan ve Toprak, (2012), Örekici vd. (2010), Öztürk ve Sevinç (2013), Kuter (2014), Orhan vd. (2018), Eyduran (2016), Karadaş vd. (2017a), Karadaş vd. (2017b), Akkuş (2017), Eyduran ve Türkoğlu (2017), Celik vd. (2018), Eyduran vd. (2017a), Eyduran vd. (2017b), Eyduran vd. (2017c), Eyduran vd. (2017d), Eyduran vd. (2018), Aytekin vd. (2018), Ertürk (2018), Ertürk vd. (2018), Nacar vd. (2018), Celik ve Yılmaz (2018), Aksoy vd. (2018a), Aksoy vd. (2018b), Tosun (2021), Nacar vd. (2021), Nacar vd. (2022), Zaborski vd. (2018), Eyduran vd. (2019a), Eyduran vd. (2019b), çalışmalarında, MARS yöntemini kullanarak çeşitli uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Ormancılık alanında ise, González-Rodríguez ve Diéguez-Aranda (2020) ve Guerra-Hernández vd. (2021), yetiştirme ortamı verim gücü olan bonitet endeksinin çeşitli ekolojik değişkenlerle tahmininde ve Ou vd. (2019), ağaçların çap artımlarını çeşitli tek ağaç ve meşcere özellikleri ve iklim özellikleri ile tahmininde, oldukça sınırlı sayıda MARS yönteminin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Özellikle ziraat alanında oldukça yaygın ve başarılı kullanımlarına ilişkin

çalışmalar söz konusu iken, ormancılık alanında oldukça az sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu bakımdan, orman işletmelerinin sermaye yapısının önemli bir bileşenini oluşturan dikili ağaç servetinin tahmininde, geleneksel regresyon yöntemlerinin yanı sıra, veri madenciliği yaklaşımlarından MARS algoritması gibi güncel ve gelişmiş tekniklerin uygulanabilirliğinin ve performansının bilimsel olarak değerlendirilmesi bir gereklilik arz etmektedir. Böylece, Giresun Orman Bölge Müdürlüğü, Koyulhisar İşletme Müdürlüğü, Sisorta Orman İşletme Şefliği sınırları içerisinde yayılış gösteren Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcereleri için tek ve çift girişli ağaç hacim tahminlerinin MARS yöntemi ile elde edilme potansiyellerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, geleneksel regresyon yöntemlerinin yanı sıra, Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS) gibi veri madenciliği tekniklerinin ormancılık uygulamalarındaki kullanım potansiyeli ve performans düzeyi araştırılacaktır.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan veriler, Giresun Orman Bölge Müdürlüğü'ne bağlı Koyulhisar İşletme Müdürlüğü, Sisorta Orman İşletme Şefliği sınırları dahilinde yer alan sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinden elde edilmiştir (Özdemir, 2024). Çalışma kapsamında farklı göğüs çapları ile boylarda olmak üzere toplam 238 örnek ağaç üzerinde ölçümler yapılmıştır. Örnek ağaçların seçiminde, çalışma alanındaki hacim gelişimine ilişkin varyansı yeterli düzeyde temsil edebilmesi amacıyla farklı göğüs yüksekliği çapı ve boy sınıflarından bireylerin dahil edilmesine özen gösterilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen örnek ağaçlar, standart örnekleme prosedürüne uygun olarak 0.3 m yüksekliğinden kesilmiş ve dip kütük seviyesinde kabuklu gövde çapı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Gövde boyunca kabuklu çap ölçümleri şerit metre kullanılarak sistematik aralıklarla alınmıştır. Bu bakımdan, ilk ölçüm göğüs yüksekliği (1.30 m) seviyesinde yapılmış, ardından 2 m aralıklarla devam edilerek sırasıyla 3.30, 5.30, 7.30, 9.30, 11.30 m yüksekliklerinde kabuklu çap değerleri kaydedilmiştir. Örnek ağaçlara ait tanımlayıcı istatistikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Örnek ağaçlara ilişkin tanımlayıcı istatistiksel bilgiler

Table 1. Descriptive statistical information for the sample trees

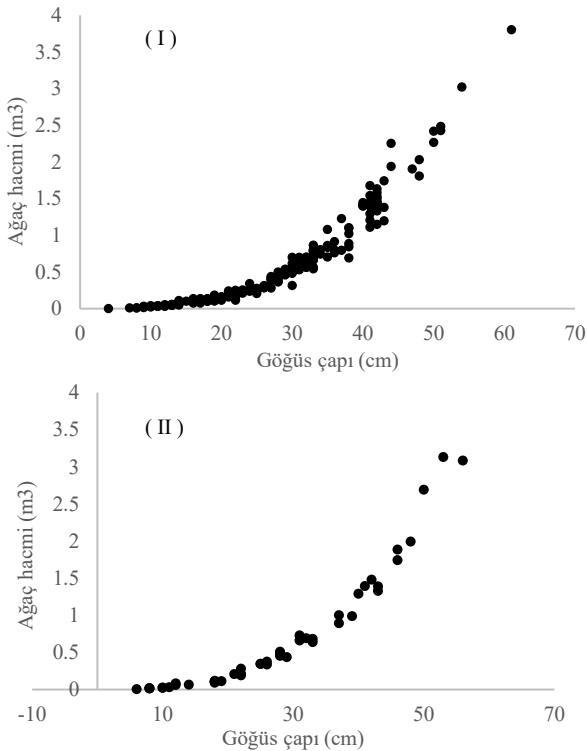
		Göğüs çapı (cm)	Boy (m)	Hacim (m ³)
Model (n=190)	Minimum	4.00	5.20	0.0028
	Maksimum	61.00	29.69	3.8014
	Ortalama	27.87	15.16	0.6213
	Standart sapma	11.16	4.89	0.6490
Test (n=48)	Minimum	6.00	6.09	0.0052
	Maksimum	56.00	24.84	3.1286
	Ortalama	27.48	16.38	0.6941
	Standart sapma	13.33	7.98	0.8048

Bu çalışmadaki örnek ağaçlar, tek ve çift girişli ağaç hacim denklemleri ile MARS modellerinin geliştirilmesi ve geliştirilen bu modellerin çalışma alanındaki meşcerelere uygunluğunun test edilmesi amacıyla rastgele örnekleme yöntemiyle iki alt gruba ayrılmıştır. Birinci veri grubu (model veri seti), toplam verinin %80'ini (n=190) oluştururken; ikinci veri grubu (test veri seti) ise toplam verinin %20'sini (n=48) temsil etmektedir. Şekil 1'de, model geliştirme ve model test aşamalarında kullanılan verilere ait göğüs yüksekliği çapı-hacim ilişkisi gösterilmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Ağaç hacim denklemleri

Bu çalışmada, tek girişli (göğüs yüksekliği çapına dayanan) ve çift girişli (göğüs yüksekliği çapına ve ağaç boyuna dayanan) hacim denklemlerinin geliştirilmesinde ve MARS modellerinin eğitiminde, tek ağaçların hacimlerinin belirli bir doğruluk ile hesaplanması büyük bir önem taşımaktadır. Örnek ağaçlara ait hacim değerlerinin hesaplanmasında, her bir ağaç gövdesi üç temel bölüme ayrılmış olup, bunlar: (i) dip kütük, (ii) 2 m uzunluğundaki gövde seksiyonları ve (iii) uç parçadır. Her bir bölümün hacmi ayrı ayrı hesaplandıktan sonra, toplam gövde hacmi bu hacimlerin toplamı alınarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Ağaç hacim denklemlerinin ve MARS modellerinin geliştirilmesinde (I.) ve uygunluğunun test edilmesinde (II.) kullanılan veri sınıflarına ilişkin göğüs çapı-hacim ilişkisi
Figure 1. DBH-volume relationships of the data sets used in the modeling (I) and validation (II) of tree volume equations and MARS models

Dip kütüğün hacmi, silindir formülü kullanılarak hesaplanmış olup, bu hesaplamada dip kütük taban çapı ($d_{0.3}$) ve yüksekliği (0.3 m) değerleri kullanılmıştır. Gövde seksiyonları 2 m uzunluğunda eşit parçalara bölünmüş ve her bir seksiyonun hacmi Huber formülü ile hesaplanmıştır. Huber formülünde, seksiyonun orta noktasındaki çap ve seksiyon uzunluğu (2 m) parametreleri kullanılmaktadır. Uç parçanın hacmi ise koni formülü ile hesaplanmış olup bu hesaplamada uç parça taban çapı (d_{uc}) ve yüksekliği (h_{uc}) değerleri dikkate alınmıştır. Ağaçların hacim hesaplarında, Denklem (1), (2) ve (3) kullanılmıştır. Aşağıda, ağaç hacimlerinin hesaplanmasında kullanılan formüller yer almaktadır:

$$\text{Dip kısım için; } V_{dip} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{0.3}^2 \cdot 0.3 \quad (1)$$

$$\text{Uç kısmı için; } V_{uc} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{uc}^2 \cdot h_{uc} \quad (2)$$

$$\text{Seksiyon hacimleri için Huber formülü; } V_{seksiyon} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{1.3}^2 + \dots + d_n^2) \cdot 2 \quad (3)$$

Ağaç hacim denklemlerinin geliştirilmesi sürecinde kullanılan tek girişli modeller yalnızca göğüs yüksekliği çapına bağlı iken, çift girişli modeller hem göğüs yüksekliği çapı hem de ağaç boyu değişkenlerini içermektedir. Ağaç hacim denklemlerinin geliştirilme sürecinde çoğul regresyon analizi yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen denklem yapılarında, dendrometrik formüllerle hesaplanan gövde hacmi bağımlı değişken olarak tanımlanmış; göğüs yüksekliği çapı ve ağaç boyu gibi orman envanterinde daha kolay ölçülebilen değişkenler ise bağımsız değişkenler olarak modele dahil edilmiştir. Regresyon modellerinin geliştirilmesi amacıyla, Şentürk (1997) ve Yavuz (1999) çalışmalarından elde edilen farklı tek ve çift girişli hacim denklemleri geliştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, tek girişli hacim tahminleri için 6 farklı model yapısı [Denklem (4)-(9)] ve çift girişli hacim tahminleri için 15 farklı model yapısı [Denklem (10)-(25)] kullanılmıştır. Modellere ait parametre değerleri, parametrelerin istatistiksel anlamlılık düzeyleri ve belirtme katsayısı ve standart hata gibi diğer başarı ölçütleri, SPSS 15.0 paket programı (SPSS Institute Inc., 2010) kullanılarak elde edilmiştir. Tek girişli ağaç hacim fonksiyonları; $V = f(d)$

$$V = b_0 + b_1 \cdot d^2 \quad (4)$$

$$V = b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2 \quad (5)$$

$$V = b_0 + b_1 \cdot d^2 + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) \quad (6)$$

$$\log V = b_0 + b_1 \cdot \log d \quad (7)$$

$$\log V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) \quad (8)$$

$$\log V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot (\log d)^4 \quad (9)$$

Çift girişli ağaç hacim fonksiyonları; $V = f(d, h)$

$$V = b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (10)$$

$$V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (11)$$

$$V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot d^2 + b_4 \cdot h + b_5 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (12)$$

$$V = b_1 \cdot d^2 + b_2 \cdot h \quad (13)$$

$$V = b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot d^2 + b_4 \cdot h^2 + b_5 \cdot (d \cdot h^2) + b_6 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (14)$$

$$V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot d^2 + b_4 \cdot h + b_5 \cdot (d \cdot h) + b_6 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (15)$$

$$V = b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot d^2 + b_4 \cdot (d \cdot h) + b_5 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (16)$$

$$V = b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot \log h + b_4 \cdot (\log h)^2 \quad (17)$$

$$V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot d^2 + b_4 \cdot h^2 + b_5 \cdot (d \cdot h^2) + b_6 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (18)$$

$$V = b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot d^2 + b_4 \cdot h + b_5 \cdot (d \cdot h) + b_6 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (19)$$

$$V = b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot d + b_4 \cdot d^2 + b_5 \cdot (d \cdot h) + b_6 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (20)$$

$$V = b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot d^2 + b_4 \cdot h^2 + b_5 \cdot (d \cdot h^2) + b_6 \cdot (d^2 \cdot h^2) \quad (21)$$

$$V = b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot (d \cdot h) + b_4 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (22)$$

$$\log V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot \log h \quad (23)$$

$$\log V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot \log h + b_4 \cdot (\log d)^4 \quad (24)$$

$$\log V = b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) + b_3 \cdot (\log d)^4 + b_4 \cdot \log h + b_5 \cdot (\log h)^4 \quad (25)$$

Burada;

V : gövde hacmini (m³)

d : göğüs çapını (cm)

h : ağaç boyunu (m)

df : düzeltme faktörü

$\log$: 10 tabanında logaritmayı

$b_0, b_1, \dots, b_k$: denklem katsayılarını göstermektedir.

2.2.2. Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri tekniği, MARS

Bu çalışmada, ağaç hacimlerine ilişkin tahminlerin elde edilmesinde, geleneksel çoğul regresyon analizinin yanı sıra, alternatif bir modelleme yaklaşımı olarak Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (Multivariate Adaptive Regression Splines - MARS) yöntemi de uygulanmıştır. Friedman (1991) tarafından geliştirilen MARS tekniği, parametrik olmayan bir regresyon yaklaşımıdır ve klasik regresyon modellerinin gerektirdiği gerek bağımlı gerekse bağımsız değişkenlere ilişkin çeşitli istatistiksel varsayımların sağlanmasına gerek duymamaktadır (Özbalcı, 2008). MARS yönteminin diğer bir önemli özelliği de herhangi bir fonksiyonel denklem yapısının kullanılmasına gerek olmadan, bağımsız değişkenler arasındaki karşılıklı etkileşimleri dikkate alarak doğrusal olmayan ilişkileri başarıyla modelleyebilme kapasitesidir. Bu bakımdan, MARS tekniği özellikle doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkilerin tahmininde güçlü bir alternatif sunmaktadır (Örekici vd., 2005; Oğuz, 2014). MARS tekniğinin modelleme stratejisi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin temel fonksiyonlar (basis functions) aracılığıyla parçalı doğrusal segmentlere/parçalara (piecewise linear splines) ayrılmasına dayanmaktadır. Bu segmentasyon stratejisi, değişkenler arası karmaşık ilişkilerin daha yüksek doğruluk ve etkinlikle modellenmesine olanak tanımaktadır (Kuter vd., 2012; Eydur, 2016; Eydur vd., 2017a)

MARS model yapısını oluşturan parçalı doğrusal segmentler (splines), temel fonksiyonların düğüm noktaları (knots) aracılığıyla birbirine bağlanmaktadır. Düğüm noktaları, ilişkinin eğiminin değiştiği ve bir doğru parçasından diğerine geçişin gerçekleştiği kritik değerleri ifade etmektedir (Friedman, 1991; Özbalcı, 2008; Oğuz, 2014). Düğüm noktalarının belirlenmesi ve bu noktalar

arasındaki doğru parçalarının tanımlanması, MARS yöntemine doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri esnek ve etkin bir şekilde modelleme kapasitesi kazandırmaktadır (Örekici vd., 2005; Oğuz, 2014). Bu özellik sayesinde, verinin yerel yapısına uyum sağlayan adaptif bir modelleme yaklaşımı elde edilmektedir.

MARS modellemesinin temel yapısı, değişkenlerin belirli değer aralıklarında oluşturulan temel fonksiyonların (basis functions) düğüm noktalarında (knots) bağlanmasıyla meydana gelmektedir (Friedman, 1991; Özbalcı, 2008; Oğuz, 2014). Bu modelleme yaklaşımının matematiksel formülasyonu, Denklem (26)'da sunulan temel fonksiyon ile aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$Y = \beta_0 + \sum_{k=1}^k a_k \cdot (\beta_k \cdot X_t) + \varepsilon_i \quad (26)$$

Bu eşitlikte, β_0 : sabit katsayı, k : düğüm sayısı, a_k : k . temel fonksiyona ilişkin katsayı, $\beta_k \cdot X_t$: t . Bağımsız değişken için k . temel fonksiyonu ve ε_i ise; model hatasını göstermektedir. Genel eşitlik içindeki en önemli fonksiyon bileşenleri de (Örekici vd., 2005, Çanga ve Boğa, 2020);

$$\beta_k \cdot X_t = \text{maksimum}(0, x - k) = \begin{cases} x - k, & x > k, \\ 0, & x \leq k \end{cases} \quad (27)$$

ya da

$$\beta_k \cdot X_t = \text{maksimum}(0, k - x) = \begin{cases} k - x, & x < k, \\ 0, & x \geq k \end{cases} \quad (28)$$

gibi Denklem (27) ve Denklem (28) ile ifade edilebilir.

MARS algoritmasının uygulama süreci iki ayrı aşamadan meydana gelmektedir (Ünal, 2009; Oğuz, 2014; Özbalcı, 2008). Birinci aşamada uygulanan ileri yönlü algoritma (forward stepwise algorithm), modelin azami karmaşıklık seviyesine erişmesi amacıyla potansiyel tüm temel fonksiyonların (basis functions) sisteme dahil edilmesini içermektedir. Bu aşamada kullanılan temel fonksiyonlar, münferit değişkenlere ait transformasyonları veya değişkenler arası çoklu etkileşimleri betimleyen matematiksel yapılarıdır. Süreç boyunca, değişkenlerin tümü ve muhtemel kombinasyonları adım adım analiz edilerek bağımsız değişkenler arasındaki karşılıklı etkileşimler ile doğrusal olmayan transformasyonlar model yapısına entegre edilmektedir. Temel fonksiyon çiftleri, düğüm noktasında gradyanın değişim gösterdiği ve birinci türevin sıfır değerini aldığı ayna yansıma fonksiyonları (mirrored basis functions) şeklinde tanımlanmaktadır. Yöntemin ikinci aşamasını oluşturan geri yönlü algoritma (backward elimination algorithm) veya budama prosedürü (pruning process), istatistiksel açıdan anlamlılık gösteren değişkenlerin ve bunlar arasındaki etkileşimlerin tespiti yoluyla hata kareler toplamını minimize etmeye odaklanmakta ve neticesinde en sadeleştirilmiş optimal modelin elde edilmesini sağlamaktadır (Ünal, 2009). Genelleştirilmiş çapraz geçerlilik (GCV) tekniği ile modelin karmaşıklığını ve genelleme yeteneğini dengeleyen en uygun temel fonksiyon kümesi belirlenmektedir. İki aşamada gerçekleştirilen bu süreç, modelin genelleme yeteneğini de korurken, karmaşık ve esnek bir model yapısı üretebilmektedir. Model geliştirme sürecinde önem taşıyan GCV değeri, aşağıdaki Denklem (29) ile hesaplanmıştır (Ünal, 2009; Eydur vd., 2019a; Eydur vd., 2017b; Çanga ve Boğa, 2020).

$$GCV = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\left(1 - \frac{M+d \cdot \frac{(M-1)}{2}}{N}\right)^2} \quad (29)$$

Bu formülde, N : toplam veri sayısını, y_i : gözlem değerini (ağaçların bölümlene yöntemi ile hesaplanan hacmini), $\hat{y}_i$: MARS modeli ile tahmin edilen ağaçların hacim değerini, M : temel fonksiyon sayısı, d : 2 ile 3 arasında değer alabilen (Akkuş, 2017) maliyet-karmaşıklık ölçüştü değeridir.

Ağaç gövde hacimlerinin tahminine yönelik MARS tekniğinin uygulanması ve MARS modellerinin elde edilmesi, R istatistiksel yazılım ortamında (R Core Team, 2024) "earth" kütüphanesi (Milborrow, 2011) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde, aşırı öğrenme (overfitting) riskini minimize etmek amacıyla düzenleme parametresi (regularization parameter) değeri -1 seviyesinde tutulmuştur (penalty = -1). Algoritmanın uygulanmasında, model güvenilirliğini artırmak için k-katlı çapraz doğrulama tekniği (k-fold cross-validation) tercih edilmiş ve veri seti 10 eşit alt kümeye bölünerek değerlendirme yapılmıştır (nfold = 10). Bu yaklaşım, literatürde standart bir uygulama olarak kabul görmektedir. Model sadeleştirme (pruning) aşamasında, ileri adım prosedüründe türetilen geniş temel fonksiyon havuzunun optimizasyonu için Denklem (29)'da formüle edilen GCV kriteri (pmethod = "cv") uygulanmıştır. Model kompleksitesinin belirlenmesinde, alt sınır (nprune = 50) ve üst sınır (nk = 100) değerleri literatürdeki konvansiyonel uygulamalara paralel olarak ayarlanmıştır. Bu gibi makine öğrenmesi yaklaşımlarında model tutarlılığının (consistency) ve genelleme kapasitesinin güçlendirilmesi, iteratif eğitim stratejilerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Bu amaçla, her bir model senaryosu için R dilindeki döngü yapısı kullanılarak minimum 1000 tekrarlı eğitim prosedürü yürütülmüş ve en yüksek tahmin performansına sahip model yapısı belirlenmiştir.

2.2.3. Ağaç hacim tahminlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada, geliştirilen tek ve çift girişli ağaç hacim denklemleri ile MARS tekniği kullanılarak geliştirilmiş hacim tahmin modellerinin performanslarının karşılaştırılması amacıyla on farklı istatistiksel tahmin başarı ölçütü kullanılmıştır. Bu ölçütler şunlardır: (1) Ortalama Mutlak Hata (OMH/MAE - Mean Absolute Error), (2) Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (HKOK/RMSE - Root Mean Square Error), (3) Yüzde Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (HKOK%/RMSE%), (4) Ortalama Hata (Bias), (5) Yüzde Ortalama Hata (Bias%), (6) Belirtme Katsayısı (R^2 - Coefficient of Determination), (7) Toplam Hata Yüzdesi (THY/TRE - Total Relative Error), (8) Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi (OMHY/MAPE - Mean Absolute Percentage Error), (9) Akaike Bilgi Kriteri (AIC - Akaike Information Criterion) ve (10) Bayesian Bilgi Kriteri (BIC - Bayesian Information Criterion). Model performansının değerlendirilmesinde, OMH, RMSE, RMSE%, Bias, Bias%, THY, OMHY, AIC ve BIC değerlerinin mümkün olduğunca küçük olması; Belirtme Katsayısı (R^2) değerinin ise 1'e yaklaşması durumunda modelin yüksek tahmin başarısına sahip olduğu kabul edilmiştir. Kullanılan bu başarı ölçüt değerlerinin formülleri, Denklem (30)-(39)'da verilmiştir.

$$OMH = \sum_{i=1}^n |V_i - \hat{V}_i| / n \quad (30)$$

$$HKOK = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2 / (n - k)} \quad (31)$$

$$HKOK\% = \left(\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2 / (n - k)} \right] / \bar{V}_i \right) \cdot 100 \quad (32)$$

$$Bias = \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i) / n \quad (33)$$

$$Bias\% = \left(\left[\sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i) / n \right] / \bar{V}_i \right) \cdot 100 \quad (34)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \quad (35)$$

$$THY = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \hat{V}_i - \sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \right] \cdot 100 \quad (36)$$

$$OMHY = \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - \hat{V}_i|}{\sum_{i=1}^n V_i} \cdot 100 \quad (37)$$

$$AIC = n \cdot \ln(HKOK) + 2 \cdot k \quad (38)$$

$$BIC = n \cdot \ln(HKOK) + n \cdot \ln(k) \quad (39)$$

Burada, n : veri sayısını, k : parametre sayısını, $\hat{V}_i$: hacim denklemi ile tahmin edilen hacim değeri, V_i : ölçülen hacim değeri, $\bar{V}$: ölçülen ortalama ağaç hacim değerlerini göstermektedir.

Geliştirilen ağaç hacim denklemlerinin ve modellerinin tahmin performanslarının karşılaştırılmasında, tüm istatistiksel tahmin başarı ölçütlerini kapsayan bütünsel bir değerlendirme yaklaşımı kullanılmıştır. Bu amaçla, Poudel ve Cao (2013) tarafından önerilen rölatif sıralama yöntemi (relative ranking method) uygulanmıştır. Geleneksel karşılaştırma yaklaşımlarında, belirli bir kritere göre en iyi performansı gösteren model 1, takip edenler ise sırasıyla 2, 3, ... şeklinde sıralanmaktadır. Ancak, rölatif sıralama yöntemi, modeller arasındaki başarı ölçütlerine ilişkin farkların büyüklüğünü ve birbirine olan yakınlığını ve uzaklığını da dikkate alarak daha hassas ve kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır (Özçelik ve Çevlik, 2017; Sakıcı vd., 2018; Sakıcı ve Özdemir, 2018). Bu yöntemde kullanılan göreceli sıra değeri, Poudel ve Cao (2013) tarafından önerilen Denklem (2.40) ile hesaplanmaktadır:

$$R_i = 1 + \frac{(m-1) \cdot (S_i - S_{min.})}{(S_{max.} - S_{min.})} \quad (40)$$

Bu formülde, R_i : i . Denklemin rölatif sırasını, S_i : i . Denkleme ilişkin başarı ölçüt değerini, $S_{min.}$: en düşük başarı ölçüt değerini, $S_{max.}$: en yüksek başarı ölçüt değerini ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında, rölatif sıralama prosedürü aracılığıyla en başarılı olduğu belirlenen hacim tahmin modelinin, Sisorta Orman İşletme Şefliği'ndeki sarıçam meşcereleri için uygunluğu da test edilmiştir (model validasyonu). Hacim tahminlerinin çalışma alanına uygunluk analizi, model geliştirme aşamasına dahil edilmeyen 48 bağımsız örnek ağaçtan toplanan veri seti üzerinde yürütülmüştür. Bu bakımdan, en başarılı olarak seçilen tek ve çift girişli ağaç hacim denklemleri ve MARS algoritmaları kullanılarak söz konusu 48 ağacın hacimleri tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değerlerin uygunluğunun test edilmesinde, "Eşlendirilmiş İki Örnek Testi" (Paired t-Test) istatistiksel analiz yöntemi uygulanmış ve model tahminleri ile bölümlene yöntemi yoluyla hesaplanan hacim değerleri karşılaştırılmıştır (Kalıpsız, 1988; Batu, 1995). Model tahminleri ile bölümlene yönteminden elde edilen hacim değerleri arasında istatistiksel anlamlılık düzeyinde bir farklılık gözlenmemesi koşulunda ($p > 0.05$), söz konusu denklem veya modelin çalışma alanı için uygun olduğu

sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, bu iki değer grubu arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark mevcutsa ($p < 0.05$), ilgili denklem veya modelin çalışma alanına uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Ağaç hacim denklemlerine ilişkin bulgular

Tek ve çift girişli ağaç hacim denklemlerinin tahmin başarılarını karşılaştırma ölçütleri Çizelge 2'de gösterilmiş, bu kriterlere ait rölatif sıralamalar ise Çizelge 3'te sunulmuştur. Başarı ölçütlerine ilişkin Çizelge 3'teki rölatif sıralamalar dikkate alındığında, en küçük rölatif sıra toplamına (20,48986) sahip tek girişli ağaç hacim denklemi Denklem (5)'tir. Bununla birlikte, Denklem (5)'in hacim tahminlerinde başarılı sonuçlar sağlamasına rağmen, özellikle düşük çap sınıflarında (<10 cm), çap değerinin yükselmesiyle ağaç hacminin düştüğü bir seyir izlemesi ve dolayısıyla büyüme kanuniyetine ters düşen sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Bu durum göz önüne alınarak, 20,88016 rölatif sıra toplamı ile bir sonraki en iyi performansa sahip Denklem (8) analiz kapsamına dahil edilmiştir. Tüm parametrelerinin anlamlı olduğu ve çap artışıyla tutarlı bir şekilde pozitif hacim tahminleri sağladığı görülen Denklem (8), tek girişli hacim denklemleri arasında en başarılı model olarak seçilmiştir. Seçilen bu en başarılı tek girişli ağaç hacim denklemi, Denklem (41)'de verilmiştir.

$$\log V = -4.918911 + 3.085619 \cdot \log(d) - 2.192152 \cdot \left(\frac{1}{d}\right) \quad (41)$$

En başarılı tek girişli hacim denkleminin ilişkin uygunluk ölçütleri, OMH=0.06697, HKOK=0.11282, HKOK%= %18.17266, AIC=-176.050, BIC=-122.854, Bias=0.00045, Bias%= %0.07266, THY= %0.07260, OMHY= %10.7788 ve $R^2=0.9696$ olarak hesaplanmıştır.

Çift girişli ağaç hacim modellerinde, Çizelge 3'te belirtilen en küçük rölatif sıra toplamına (40,03101) sahip 18 numaralı denklemin bazı parametreleri, $p < 0.05$ anlamlılık düzeyinde anlamsız çıkmıştır. Sıralamadaki bir sonraki hacim denklemleri de incelenmiş, ancak onların parametrelerinin de aynı önem düzeyinde anlamsız olduğu görülmüştür. Bu nedenle, başarı sırasında üst sıralarda yer alan, tüm parametreleri anlamlı olan ve göğüs çapı ile boyun artışıyla tutarlı hacim artışı gösteren, yani büyüme prensiplerine uygun bir model elde etmek amacıyla, 23 numaralı denklemin anlamsız parametresi $\left(\frac{1}{d}\right)$ denklemden çıkarılarak, yeniden model ilişkin parametreler tahmin edilmiştir. Böylece en başarılı çift girişli hacim denklemi formüle edilmiştir. En başarılı çift girişli ağaç hacim denklemi aşağıda Denklem (42)'de verilmiştir.

$$\log V = -4.665475 + 2.463347 \cdot \log d + 0.620180 \cdot \log h \quad (42)$$

En başarılı çift girişli denklem olarak seçilen denkleme ilişkin başarı ölçütleri ise OMH= 0.04211, HKOK= 0.07521, HKOK%= % 12.14410, AIC= -209.508, BIC= -156.313, Bias= 0.00197, Bias%= % 0.31754, THY= % 0.31654, OMHY= % 6.7784 ve $R^2= 0.9865$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Hacim denklemlerine ilişkin hesaplanan başarı ölçütleri

Table 2. Performance criteria calculated for the volume equations

Denklem no	OMH	HKOK	HKOK%	Bias	Bias%	R^2	THY	OMHY	AIC	BIC
4	0.11216	0.14794	23.81231	1.47×10^{-16}	2.36×10^{-14}	0.9478	1.50×10^{-07}	18.0528	-153.684	-100.488
5	0.06918	0.10788	17.36446	1.57×10^{-17}	2.52×10^{-15}	0.9722	1.50×10^{-07}	11.1351	-179.740	-126.545
6	0.09035	0.12702	20.44550	3.51×10^{-17}	5.65×10^{-15}	0.9615	1.50×10^{-07}	14.5428	-166.263	-113.067
7	0.06971	0.11479	18.86680	0.01286	2.11404	0.9686	2.07023	11.2205	-174.621	-121.426
8	0.06697	0.11282	18.17266	0.00045	0.07266	0.9696	0.07260	10.7788	-176.050	-122.854
9	0.07281	0.13341	21.24651	0.00658	1.04801	0.9575	1.05919	11.7203	-162.216	-109.020
10	0.05469	0.10297	16.56523	0.00034	0.05478	0.9747	0.05481	8.8031	-183.583	-130.388
11	0.05546	0.10214	16.44039	1.11×10^{-16}	1.79×10^{-14}	0.9751	1.50×10^{-07}	8.9267	-184.253	-131.057
12	0.04558	0.07689	12.37577	7.6×10^{-16}	1.14×10^{-13}	0.9859	1.50×10^{-07}	7.3371	-207.687	-154.492
13	0.13086	0.17267	26.69456	0.02557	3.95265	0.9288	4.115315	21.0635	-140.928	-87.732
14	0.04137	0.07131	11.47721	1.5×10^{-06}	0.00024	0.9879	0.00024	6.6582	-213.907	-160.711
15	0.04468	0.07650	12.31322	3.39×10^{-16}	5.46×10^{-14}	0.9860	1.50×10^{-07}	7.1911	-208.106	-154.910
16	0.04602	0.07910	12.73689	0.00025	0.04059	0.9851	0.04058	7.4073	-205.348	-152.152
17	0.15214	0.23922	38.51029	9.57×10^{-05}	0.01541	0.8634	0.01540	24.4879	-114.029	-60.834
18	0.04137	0.07131	11.47722	5.30×10^{-17}	8.53×10^{-15}	0.9879	1.50×10^{-07}	6.6596	-213.907	-160.711
19	0.04519	0.07745	12.46947	0.00013	0.02105	0.9857	0.02104	7.2731	-207.082	-153.887
20	0.04401	0.07500	12.07078	5.15×10^{-05}	0.00828	0.9866	0.00828	7.0842	-209.740	-156.544
21	0.05264	0.08541	13.75622	0.00036	0.05859	0.9826	0.05856	8.4729	-199.010	-145.814
22	0.05048	0.08854	14.23640	0.00062	0.09932	0.9813	0.09942	8.1249	-196.048	-142.852
23	0.04126	0.07503	12.07113	0.00034	0.05452	0.9866	0.05455	6.6411	-209.701	-156.505
23*	0.04211	0.07521	12.14410	0.00197	0.31754	0.9865	0.31654	6.7784	-209.508	-156.313
24	0.04253	0.07936	12.70385	0.00345	0.55232	0.9850	0.55536	6.8458	-205.075	-151.879
25	0.04235	0.08075	12.91832	0.00378	0.60452	0.9844	0.60824	6.8167	-203.640	-150.445

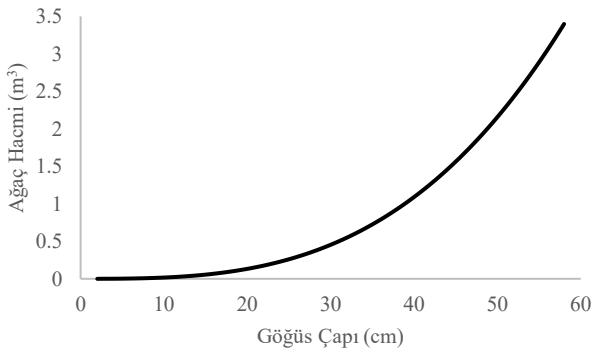
* 23 numaralı denklemin anlamsız parametresini çıkarılması ile yeniden elde edilmiş sonuçlar

Çizelge 3. Hacim denklemlerinin başarı ölçütlerine ilişkin rölatif sıra değerleri

Table 3. Relative ranking values based on the performance metrics of the volume equations

No	OMH	HKOK	HKOK%	Bias	Bias%	R ²	THY	OMHY	AIC	BIC	Σ
4	6.000	6.000	6.000	1.000	1.000	6.000	1.000	6.000	1.000	1.000	35.00000
5	1.245	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.245	6.000	6.000	20.48986
6	3.587	3.389	3.389	1.000	1.000	3.194	1.000	3.587	3.414	3.414	26.97427
7	1.304	1.862	2.165	6.000	6.000	1.750	6.000	1.304	5.018	5.018	36.41953
8	1.000	1.616	1.627	1.175	1.172	1.531	1.175	1.000	5.292	5.292	20.88016
9	1.647	4.186	4.010	3.558	3.479	4.005	3.558	1.647	2.637	2.637	31.36526
10	2.817	3.829	2.982	1.200	1.208	2.588	1.200	2.817	11.446	11.446	41.53184
11	2.921	3.755	2.933	1.000	1.000	2.539	1.000	2.921	11.546	11.546	41.16116
12	1.585	1.499	1.350	1.000	1.000	1.238	1.000	1.585	15.066	15.066	40.38845
13	13.122	10.05	6.927	16.00	16.00	8.115	16.00	13.12	5.040	5.040	109.4204
14	1.014	1.000	1.000	1.001	1.001	1.000	1.001	1.014	16.000	16.000	40.03131
15	1.462	1.464	1.326	1.000	1.000	1.221	1.000	1.462	15.129	15.129	40.19237
16	1.644	1.696	1.491	1.148	1.154	1.337	1.148	1.644	14.714	14.714	40.69094
17	16.00	16.00	11.53	1.056	1.058	16.00	1.056	16.00	1.000	1.000	80.70031
18	1.016	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.016	16.000	16.000	40.03101
19	1.531	1.549	1.386	1.077	1.080	1.263	1.077	1.531	14.975	14.975	40.44454
20	1.372	1.330	1.231	1.030	1.031	1.155	1.030	1.372	15.374	15.374	40.30153
21	2.540	2.260	1.888	1.213	1.222	1.636	1.213	2.540	13.763	13.763	42.03779
22	2.247	2.539	2.075	1.362	1.377	1.792	1.362	2.247	13.318	13.318	41.63774
23	1.000	1.333	1.231	1.199	1.207	1.157	1.199	1.000	15.368	15.368	40.06258
24	1.172	1.720	1.478	3.024	3.096	1.349	3.024	1.172	14.674	14.674	45.38212
25	1.148	1.844	1.561	3.217	3.294	1.413	3.217	1.148	14.458	14.458	45.75796

Bu çalışmada en başarılı olarak belirlenen tek girişli denklem ile tahmin edilen ağaç hacimlerinin göğüs yüksekliği çapına göre değişimi Şekil 2'de, çift girişli denklem ile elde edilen hacim tahminlerinin göğüs yüksekliği çapı ve ağaç boyuna göre değişimi ise Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 2 ve 3'teki değişimler değerlendirildiğinde, ağaç hacimlerinin hem göğüs yüksekliği çapına hem de göğüs yüksekliği çapı ile ağaç boyuna bağlı olarak sürekli artan eğrisel bir trend gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum, geliştirilen hacim denklemlerinin ortaya koyduğu ilişkilerin, ağaç hacim gelişimine ilişkin beklenen biyolojik büyüme yasaları ile uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. En başarılı tek girişli denklem tahmin edilen hacim değerlerinin göğüs çapına göre değişimi

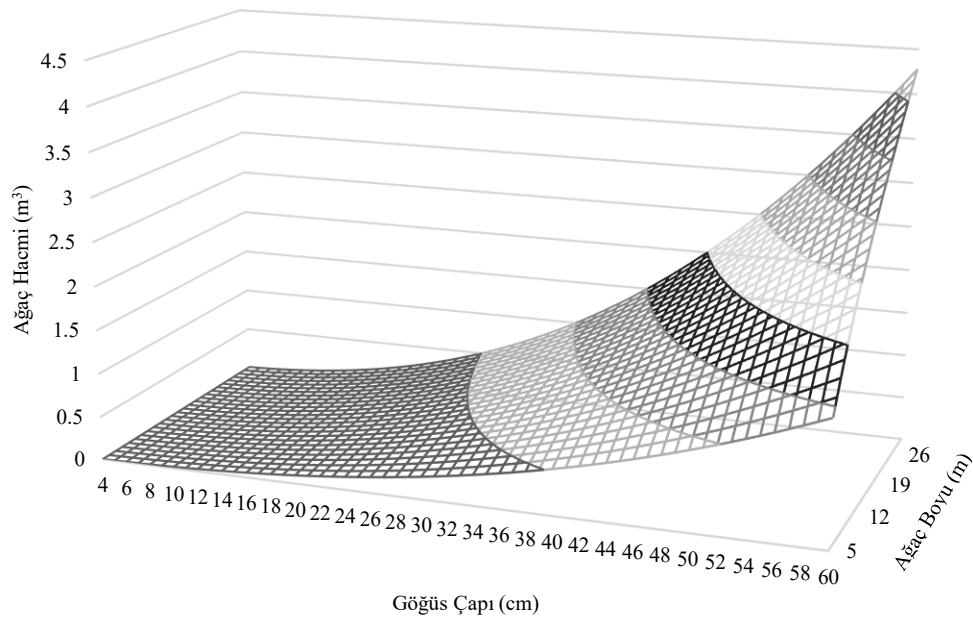
Figure 2. Relationship between diameter at breast height (dbh) and the volume values predicted by the best predictive single entry tree volume equation

3.2. MARS modellerine ilişkin sonuçlar

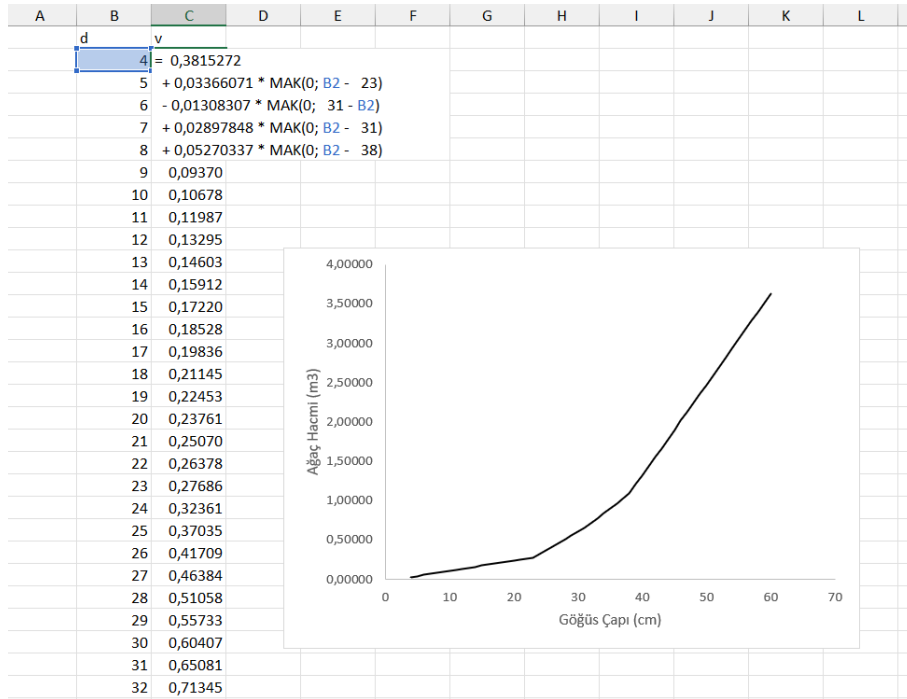
Bu çalışmada, Friedman (1991) tarafından geliştirilen MARS tekniği ile elde edilen MARS modelleri, klasik tek ve çift girişli ağaç hacim denklemlerine alternatif bir yaklaşım olarak ağaç hacim tahminlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Ağaç hacim tahminlerini sadece göğüs çapına göre veren tek girişli MARS modeline ait parametre değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Tek girişli MARS modeli aşağıdaki Denklem (43)'te verilmiştir;

$$V = 0.381527 + 0.033661 \cdot \text{Maksimum}(0, d_{1,30} - 23.0) - 0.013083 \cdot \text{Maksimum}(0, 31.0 - d_{1,30}) + 0.028978 \cdot \text{Maksimum}(0, d_{1,30} - 31.0) + 0.052703 \cdot \text{Maksimum}(0, d_{1,30} - 38.0) \quad (43)$$

Bu modelde, $d_{1,30}$; ağaçların göğüs çapını göstermektedir. Maksimum fonksiyonu da ağaçların göğüs çaplarına göre 0 ya da göğüs çapı ile ilgili değerin farkına ilişkin bir değeri alabilen bir fonksiyonu göstermektedir. Tek girişli MARS modelleri ile hacim tahminlerinin elde edilmesine ilişkin Excel uygulaması ise, Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. En başarılı çift girişli denklem ile tahmin edilen hacim değerlerinin göğüs çapı ve ağaç boyuna göre değişimi
Figure 3. Relationships between the volume values predicted by the best predictive double-entry equation and dbh and total tree height.



Şekil 4. Tek girişli MARS modelinin Excel programında uygulamasından bir görüntü
Figure 4. An graphical illustration of the single-entry MARS model application in Excel.

Ağaç hacminde önemli bir değişken olan ağaç boyunu, ek olarak göğüs çapı ile birlikte içerebilen çift girişli MARS modeli de Çizelge 5'te verilmiştir. Bu MARS modeli aşağıdaki Denklem (44)'te verilmiştir;

$$V = 0.2583757 + 0.020889 \cdot \text{Maksimum}(0, d_{1,30} - 19) - 0.008236 \cdot \text{Maksimum}(0, 32 - d_{1,30}) + 0.049773 \cdot \text{Maksimum}(0, d_{1,30} - 32.0) + 0.04276 \cdot \text{Maksimum}(0, d_{1,30} - 42) + 0.04276 \cdot \text{Maksimum}(0, h - 12.0815) \quad (44)$$

Bu denklemde, $d_{1,30}$; ağaçların göğüs çapını ve h değeri, ağacın boy değerini ifade etmektedir. Şekil 5'te çift girişli MARS modelinin Excel programında uygulaması gösterilmiştir.

Bu çalışmada, tek ve çift girişli MARS (Çok Değişkenli Adaptif Regresyon Spline) modellerinin performans ölçütleri, çoklu regresyon analizi ile belirlenen en başarılı tek (Denklem 8) ve çift girişli (Denklem 23) ağaç hacim denklemlerinin ilgili ölçütleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir (Çizelge 6). Tek girişli MARS modelinin başarı ölçütleri şu değerleri almıştır: OMH= 0.06617, HKOK= 0.10524, HKOK%= % 16.93902, AIC= -181.787, BIC= -128.592, Bias= 5.12×10^{-9} , Bias%= % 8.25×10^{-7} , THY= % 9.74×10^{-7} , OMHY= % 10.6510 ve $R^2= 0.9736$. Çift girişli MARS modeline ilişkin performans ölçütleri ise şöyledir: OMH= 0.03665, HKOK= 0.06932, HKOK%= % 11.15764, AIC= -216.238, BIC= -163.043, Bias= 4.28×10^{-6} , Bias%= % 0.00069, THY= % 0.00099, OMHY= % 5.8994 ve $R^2= 0.9885$.

Şekil 6'da, tek girişli hacim tahminlerinde kullanılan MARS (Çok Değişkenli Adaptif Regresyon Spline) modelinin öngördüğü ağaç hacmi gelişiminin göğüs çapına bağlı değişimi grafik olarak verilmiştir. Şekil 7 ise, çift girişli hacim tahminlerinde MARS modeli ile tahmin edilen ağaç hacminin göğüs çapı ve ağaç boyuna göre değişimini

göstermektedir. MARS modellerinin kritik bileşenleri olan düğüm noktaları (knots), tek girişli modelde sırasıyla 23 cm, 31 cm ve 38 cm çap değerlerinde elde edilmiştir. Çift girişli MARS modelinde ise, ağaç boyu için 12,0815 m'de ve çap için 19 cm, 32 cm ve 42 cm'de düğüm noktaları tespit edilmiştir. Söz konusu bu düğüm noktaları, Şekil 6 ve Şekil 7'deki grafikler üzerinde belirtilmiştir.

Çizelge 4. Tek girişli MARS modeline ilişkin parametre değerleri ile çeşitli istatistikler

Table 4. Estimated parameters and goodness-of-fit statistics for the single-entry MARS model

Temel fonksiyonlar	Katsayılar	Standart hata	t değeri	Önem düzeyi
Sabit katsayı (b_0)	0.301527	0.033422	9.022	$p < 0.001$
$\text{mak}(0, d_{130} - 23)$	0.033661	0.005269	6.389	$p < 0.001$
$\text{mak}(0, 31 - d_{130})$	-0.013083	0.002324	-5.628	$p < 0.001$
$\text{mak}(0, d_{130} - 31)$	0.028978	0.008560	3.385	$p < 0.001$
$\text{mak}(0, d_{130} - 38)$	0.052703	0.007018	7.510	$p < 0.001$

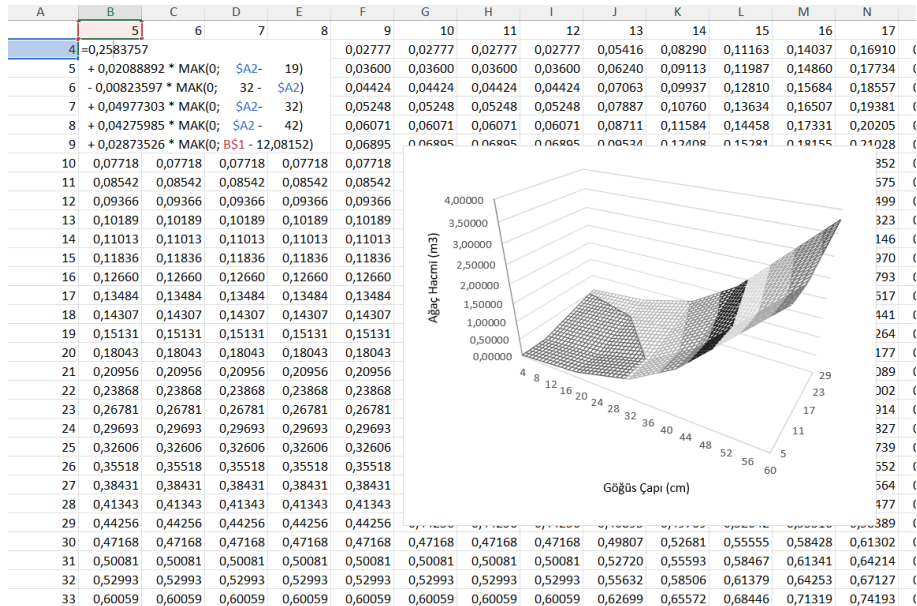
Mak: maksimum değer

Çizelge 5. Çift girişli MARS modeline ilişkin parametre değerleri ile çeşitli istatistikler

Table 5. Estimated parameters and goodness-of-fit statistics for the double-entry MARS model

Temel fonksiyonlar	Katsayılar	Standart hata	t değeri	Önem düzeyi
Sabit katsayı (b_0)	0.198376	0.043218	4.590	$p < 0.001$
$\text{mak}(0, d_{130} - 19)$	0.020889	0.003802	5.494	$p < 0.001$
$\text{mak}(0, 32 - d_{130})$	-0.008236	0.002543	-3.239	$p < 0.01$
$\text{mak}(0, d_{130} - 32)$	0.049773	0.004999	9.956	$p < 0.001$
$\text{mak}(0, d_{130} - 42)$	0.042760	0.004629	9.237	$p < 0.001$
$\text{mak}(0, \text{boy} - 12.0815)$	0.028735	0.002516	11.420	$p < 0.001$

Mak: maksimum değer

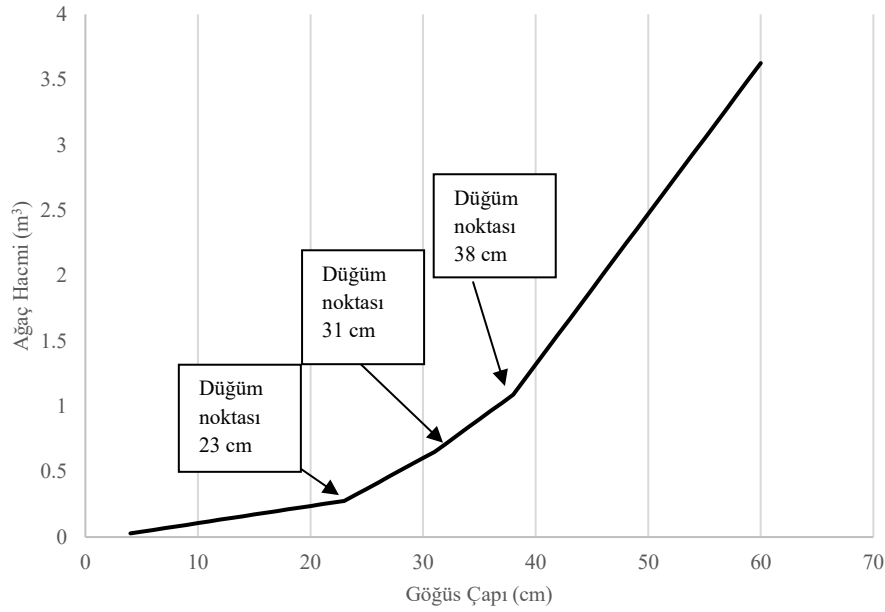


Şekil 5. Çift girişli MARS modelinin Excel programında uygulamasından bir görüntü
Figure 5. An graphical illustration of the double-entry MARS model application in Excel.

Çizelge 6. MARS modellerine ilişkin hesaplanan başarı ölçütleri

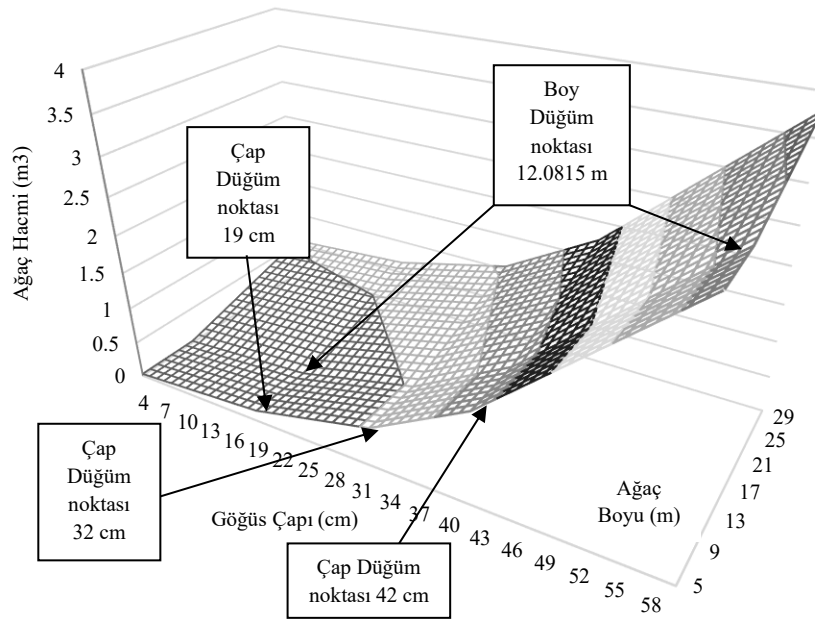
Table 6. Performance criteria calculated for MARS models.

	OMH	HKOK	HKOK%	Bias	Bias%	R ²	THY	OMHY	AIC	BIC
Tek girişli MARS	0.06617	0.10524	16.93902	5.12x10 ⁻⁹	8.25x10 ⁻⁷	0.9736	9.74x10 ⁻⁷	10.6510	-181.787	-128.592
Tek Girişli Regresyon	0.06697	0.11282	18.17266	0.00045	0.07266	0.9696	0.07260	10.7788	-176.050	-122.854
Çift girişli MARS	0.03665	0.06932	11.15764	4.28x10 ⁻⁶	0.00069	0.9885	0.00099	5.8994	-216.238	-163.043
Çift Girişli Regresyon	0.04211	0.07521	12.14410	0.00197	0.31754	0.9865	0.31654	6.7784	-209.508	-156.313



Şekil 6. Tek girişli MARS modeli ile elde edilen hacim tahminlerinin göğüs çapına göre değişimi

Figure 6. Relationship between dbh and the volume values predicted by the MARS model



Şekil 7. Çift girişli MARS modeli ile elde edilen hacim tahminlerinin göğüs çapı ile birlikte ağaç boyuna göre değişimi

Figure 7. Relationships between the volume values predicted by the MARS and dbh and total tree height

Ağaç hacim denklemleri ve modellerinin denetimine (validasyon) ilişkin sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalı testlerde, orman amenajman planındaki mevcut tek girişli hacim tablosunun t istatistiği, 2.1573 ve önem düzeyi $p=0.036$ ($p<0.05$) bulunmuştur. Çalışmamızda geliştirilen tek girişli hacim denklemi için t istatistiği, 6.7966 ve $p=0.001$ ($p<0.05$); çift girişli hacim denklemi için t istatistiği, 0.6028 ve $p=0.550$ ($p>0.05$); tek girişli MARS modeli için t istatistiği, 0.5751 ve $p=0.568$ ($p>0.05$); ve çift girişli MARS modeli için t istatistiği, -1.0146 ve $p=0.315$ ($p>0.05$) olarak tespit edilmiştir. Geliştirme sürecinde kullanılmayan bağımsız örnek ağaçlar kullanılarak yapılan bu denetleme, Sisorta yöresi sarıçam meşcereleri için mevcut amenajman hacim tablosunun ve geliştirilen tek girişli denklemin istatistiksel olarak %95 güvenle uygun olmadığını; öte yandan çoklu regresyon analizi ile elde edilen çift girişli hacim denkleminin ve hem tek hem de çift girişli MARS modellerinin uygun olduğunu göstermiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, Giresun Orman Bölge Müdürlüğü, Koyulhisar Orman İşletme Müdürlüğü'ne bağlı Sisorta Orman İşletme Şefliği sınırları içerisinde yayılış gösteren sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinden toplanan veriler kullanılarak, tek ve çift girişli ağaç hacim tahmin denklemleri ve modelleri geliştirilmiştir. Model geliştirme sürecinde, geleneksel bir yaklaşım olan çoklu regresyon analizi yönteminin yanı sıra, parametrik varsayımlardan bağımsız olarak çalışabilen ve karmaşık doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesinde yüksek tahmin başarısı gösteren bir makine öğrenmesi tekniği olan Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (Multivariate Adaptive Regression Splines - MARS) yöntemi de uygulanmıştır. Geliştirilen modellerin tahmin başarıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Ormancılık literatürde sıklıkla kullanılan geleneksel bir yöntem olarak, çoğul regresyon analizi kullanılarak regresyon modelleri geliştirilmiştir. Literatürden (Şentürk 1997, Yavuz 1999) sağlanan altı tek girişli (Denklemler 4-9) ve yirmi beş çift girişli (Denklemler 10-35) hacim denkleminin parametreleri tahmin edilerek modeller geliştirilmiştir. Tek girişli denklemlerden, Denklem (5) göreli sıralamaya göre en iyi performansı sergilemesine rağmen, hacim artışına ilişkin doğal büyüme eğilimiyle çelişen sonuçlar vermiştir. Bu nedenle 20.88016 göreli sıra toplamına sahip ve sıralamada onu takip eden Denklem (8),

tek girişli hacim tahminleri için en başarılı model olarak belirlenmiştir. Çift girişli denklemlerde ise, modelin ve parametrelerin istatistiksel yeterliliğine ek olarak, hacim gelişiminde beklenen büyüme kanuniyetleriyle uyum kriteri esas alınmıştır. Bu değerlendirme sonucunda, en başarılı olarak saptanan Denklem (23) modelinden anlamsız bir parametrenin (1/d) çıkarılması yoluyla nihai ve en başarılı çift girişli hacim denklemi elde edilmiştir.

Ormancılık literatüründe ağaç hacim tahmininde yaygın olarak kullanılan klasik yöntem olan çoklu regresyon analizinin yanı sıra, parametrik olmayan bir yaklaşım olan MARS tekniği de bu araştırmada alternatif bir tahmin yöntemi olarak uygulanmıştır. MARS modellerinin geliştirilmesinde R programlama dilinde yazılmış "earth" kütüphanesi kullanılmış ve çeşitli uyum iyiliği istatistikleri hesaplanmıştır. MARS modellerinin karşılaştırılmasında ve en yüksek performansa sahip modelin belirlenmesinde, çoklu regresyon denklemlerinin değerlendirilmesinde uygulanan yaklaşım benimsenmiştir. Rölatif sıralama yöntemiyle optimal olduğu belirlenen MARS modelinin seçiminde, tüm parametrelerin istatistiksel olarak anlamlı olması ($p < 0.05$) ve modelin hacim gelişimine ilişkin beklenen biyolojik büyüme yasalarıyla uyumlu tahminler üretmesi kriterleri dikkate alınmıştır.

Çoğul regresyon denklemleri ve MARS modellerinin performans karşılaştırması, MARS modellerinin daha başarılı ağaç hacmi tahmini verebildiklerini ortaya koymuştur. Tek girişli modellerde, çoklu regresyon denklemi ile $THY=0.07260$, $OMHY=10.7788$ ve $R^2=0.9696$ olarak sonuçlar elde edilirken; tek girişli MARS modeli THY 'yi 9.74×10^{-7} , $OMHY$ 'yi 10.6510 ve $R^2=0.9736$ olarak hesaplamıştır. Çift girişli tahminlerde ise, çoklu regresyon denklemi ile $THY=0.31654$, $OMHY=6.7784$ ve $R^2=0.9865$ olarak elde edilmiş iken, çift girişli MARS modeli ile $THY=0.00099$, $OMHY=5.8994$ ve $R^2=0.9885$ olarak elde edilmiştir. Bu başarı ölçütleri ile diğer istatistiksel kriterler dikkate alındığında, MARS modellerinin, hem tek girişli hem de çift girişli hacim tahminlerinde çoklu regresyon denklemlerine göre daha yüksek bir tahmin başarısına ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, MARS modelleri hem tek girişli (Şekil 4) hem de çift girişli (Şekil 5) hacim tahminlerinde beklenen büyüme kanuniyetleriyle uyumlu, giderek artan pozitif eğrisel bir gelişim trendi sergilemiştir. Bu bulgu, MARS modellerinin yalnızca istatistiksel olarak başarılı olmakla kalmayıp, aynı zamanda biyolojik prensiplere uygun tahminler de sağlayabildiğini desteklemektedir.

Çizelge 7. Ağaç hacim denklemlerinin ve modellerinin denetimine ilişkin sonuçlar

Table 7. Results of the validation of tree volume equations and models.

Karşılaştırma	Farklar ort.	Farklar standart sapması	Farklar standart hatası	%95'lik alt güven sınırı	%95'lik üst güven sınırı	t hesap	Serbestlik derecesi	Önem düzeyi(p)
Vbölümleme-Vamenajman	-0.0464	0.1491	0.0215	-0.0897	-0.0031	-2.1573	47	0.036
Vbölümleme-Vtek girişli	0.1754	0.1788	0.0258	0.1235	0.2274	6.7966	47	0.001
Vbölümleme-Vçift girişli	0.0073	0.0840	0.0121	-0.0171	0.0317	0.6028	47	0.550
Vbölümleme-Vtek girişli MARS	0.0087	0.1049	0.0151	-0.0217	0.0392	0.5751	47	0.568
Vbölümleme-Vçift girişli MARS	-0.0286	0.1953	0.0282	-0.0853	0.0281	-1.0146	47	0.315

Ormancılıkta, çeşitli tek ağaç ve meşcere niteliklerinin tahmininde MARS modellemesi kullanımının yaygınlık düzeyi sınırlıdır. Örneğin, literatürde Ou vd. (2019), ağaç çap artımını tahmin etmek için Random Forest, Boosted Regression Tree ve Cubist gibi makine öğrenmesi tekniklerinin yanı sıra MARS modellerini de kullanmıştır. Ayrıca, Guerra-Hernández vd. (2012) ile González-Rodríguez ve Diéguez-Aranda (2020), bonitet endeksinin iklim, toprak ve fizyografik değişkenlerle olan ilişkilerini modellemek amacıyla MARS'tan faydalanmıştır. Guerra-Hernández vd. (2021) ise bonitet endeksinin iklim ve toprak özelliklerine dayalı olarak tahmin eden bir MARS modeli sunmuştur. Ülkemizdeki durum incelendiğinde, biyoloji, ekonomi, çevre ve ziraat gibi alanlarda MARS modellerinin kullanımı yaygınlaşmışken, ormancılık sektöründeki ilgili çalışmalar ise başlangıç düzeyindedir.

Bu çalışma kapsamında, MARS (Çok Değişkenli Adaptif Regresyon Spline) modelinin hem başarı ölçütleri hem de denetim (validasyon) verileri üzerinden elde edilen sonuçları dikkate alınarak modelin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Buna göre, MARS modeli ile ulaşılan başarı ölçütlerinin, çoklu regresyon analizi ile geliştirilen tek ve çift girişli ağaç hacim denklemlerinin sonuçlarına oldukça yakın, hatta belirli bir düzeyde daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca, tek girişli çoklu regresyon denklemi bağımsız verilerle yapılan validasyon testinde başarısız olurken, hem tek hem de çift girişli MARS modelleri bu denetimden geçmiş ve çalışma alanındaki Sarıçam meşcerelerine uygun bulunmuştur. Bu veriler ışığında, klasik çoklu regresyon denklemlerine kıyasla daha başarılı tahmin potansiyeli sunan MARS modelinin, bu denklemlere güçlü bir alternatif tahmin tekniği olarak ele alınabileceği sonucuna varılmıştır. MARS yönteminin, model geliştirme sırasında istatistiksel varsayımlara bağımlı olmaması ve değişken tiplerinden (sürekli veya kesikli) bağımsız olarak uygulanabilme yeteneği gibi önemli avantajları mevcuttur (Özbalcı, 2008; Ünal, 2009). Ayrıca Örekeci vd. (2005) ile Oğuz'un (2014) belirttiği gibi, MARS algoritmasının bir diğer ayırt edici özelliği de, doğrusal olmayan ilişkileri olan değişkenler arasındaki ilişkileri, parçalı spline fonksiyonları kullanarak basit ve etkin bir biçimde modelleyebilmesidir. Bu özellik, MARS modellerine, doğrusal olmayan yapıları başarılı bir şekilde modelleme esnekliği sağlamaktadır. Bu avantajlar göz önüne alındığında, MARS modelinin ormancılıkta tek ağaç ve meşcere özelliklerinin tahminindeki başarı potansiyelinin daha geniş kapsamlı araştırılması ve değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

MARS gibi yenilikçi metodolojilerin ağaç hacmi tahminlerinde uygulanması, tek ağaç ve meşcere seviyesindeki hacim öngörülerinin hassasiyetini ve güvenilirliğini artırma potansiyeli taşımaktadır. Bu gelişme, orman amenajmanı başta olmak üzere, ormancılık faaliyetlerinin daha etkin ve isabetli yürütülmesini sağlayabilecektir. Özellikle, ülkemizin kritik orman ekosistemleri için yöresel hacim denklemlerinin, MARS gibi güncel ve ileri tekniklerle geliştirilmesi, bu bölgelerdeki ormancılık uygulamalarının genel başarısına önemli katkılar getirecektir.

Açıklama

Bu çalışma, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü "Ağaç Hacim Tahminlerinin Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri Tekniği ile Elde Edilmesi" adlı yüksek lisans tezinin bir özeti olarak hazırlanmıştır.

Kaynaklar.

- Akkuş, O., 2017. Hayvancılık alanında çok değişkenli uyarlanabilir regresyonun kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Iğdır.
- Aksoy, A., Ertürk, Y.E., Eyduvan E. Tariq M.M., 2018a. Comparing predictive performances of MARS and CHAID algorithms for defining factors affecting final fattening live weight in cultural beef cattle enterprises. *Pakistan Journal of Zoology*, 50(6): 2279-2286.
- Aksoy, A., Ertürk E., Eyduvan E., Tariq M.M., 2018b. Utility of mars algorithm for describing non-genetic factors affecting pasture revenue of Morkaraman breed and Romanov × Morkaraman fl crossbred sheep under semi intensive conditions. *Pakistan Journal of Zoology*, 51(1): 235-240.
- Akyol, M., 2011. Yaşam çözümlemesine yeni bir yaklaşım: MARS. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Asan, Ü., Başkent, E.Z., Özçelik, R., 2001. Gelişmiş ülkelerdeki ulusal orman envanter sistemleri ve Türkiye için öneriler. 1. Ulusal Ormancılık Kongresi, 19-20 Mart, Ankara, s. 30-51.
- Aytekin, İ., Eyduvan, E., Karadas, K., Akşahan, R., Keskin, İ., 2018. Prediction of fattening final live weight from some body measurements and fattening period in young bulls of crossbred and exotic breeds using MARS data mining algorithm. *Pakistan Journal of Zoology*, 50(1): 189-195.
- Batu, F., 1995. Uygulamalı İstatistik Yöntemler, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, KTÜ Matbaası, Genel Yayın No: 179, Fakülte Yayın No: 22, 312 s. Trabzon
- Çanga, D., Boga, M., 2019. Use of MARS in Livestock and an application. III. International Scientific and Vocational Studies Congress, 27-29 June, Nevşehir, s. 31-37.
- Çanga, D., Boğa, M., 2020. Determination of the effect of some properties on egg yield with regression analysis method bagging MARS and R application. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(8): 1705-1712.
- Çanga, D., Yavuz, E., Efe, E., 2019. Use of MARS data mining algorithm for egg weight estimation presented at the international congress on domestic animal breeding Genetics and Husbandry-19 (ICABGEH-19).
- Çelik, S., Boydak, E., 2020. Description of the relationships between different plant characteristics in soybean using multivariate adaptive regression splines (mars) algorithms. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 30(2): 431-441.
- Çelik, S., Eyduvan, E., Karadas, K., Tariq, M.M., 2017. Comparison of predictive performance of data mining algorithms in predicting body weight in Mengali rams of Pakistan. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 46(11): 863-872.
- Çelik, S., Eyduvan, E., Tatliyer, A., Karadas, K., Kara, M.K., Waheed, A., 2018. Comparing predictive performances of some nonlinear functions and multivariate adaptive regression splines (MARS) for describing the growth of Daera Din Panah (DDP) goat in Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, 50(3): 1187-1190.
- Davidian, M., Giltinan, D.M., 1995. Nonlinear Models for Repeated Measurement Data. Chapman and Hall, New York.
- Doğan, B.B., Toprak, S., 2012. Diyarbakır Ticaret Borsası'nın faaliyetleri ve borsanın üye profilleri ile ilgili veri eksiklerinin mars analizi ile düzeltilmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 13(2):151-174.
- Ertürk, Y.E., 2018. Description of factors influencing final fattening weight in domestic beef cattle breeds through MARS Algorithm. *Pakistan Journal of Zoology*, 50(5): 1731-1737.

- Ertürk, Y.E., Aksoy, A., Tariq, M.M., 2018. Effect of selected variables identified by MARS on fattening final live weight of crossbred beef cattle in eastern Turkey. *Pakistan Journal of Zoology*, 50(4): 1403-1412.
- Eyduran, E., 2016. The possibility of using data mining algorithms in prediction of live body weights of small ruminants. *Journal of Biomedical Science*, 1: 1-4.
- Eyduran, E., Türkoğlu, M., 2017. Procedure of MARS algorithm for describing the relationship between body weight and morphological traits of some migratory birds in Iğdır province of Turkey. II. International Iğdır Symposium, Iğdır, pp. 133.
- Eyduran, E., Tirink, C., Karahan, A.E., Türkoğlu, M., Tariq, M. M., 2017a. Comparison of predictive performances of MARS and CART algorithms through R software. *International Conference on Computational and Statistical Methods in Applied Sciences*, 9-11 November, Samsun, pp. 176.
- Eyduran, E., Akkuş, O., Kara, K.M., Tirink, C. and Tariq, M. M., 2017b. Use of adaptive regression splines (MARS) in predicting body weight from body measurements in Mengali rams. *International Conference On Agriculture, Forest, Sciences and Technologies*, 15-17 May, Nevşehir, 1-5.
- Eyduran, E., Zaborski, D., Waheed, A., Celik, S., Karadas, K., Grzesiak, W., 2017c. Comparison of the predictive capabilities of several data mining algorithms and multiple linear regression in the prediction of body weight by means of body measurements in the Indigenous Beetal Goat of Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, 49(1): 273-282.
- Eyduran, E., Tirink, C., Karahan, A.E., Türkoğlu, M., 2017d. Prediction of an upper bound of generalized cross validation in multivariate adaptive regression splines in agricultural studies. *International Conference on Computational and Statistical Methods in Applied Sciences*, 9-11 November, Samsun, pp. 176.
- Eyduran, E., Sevgenler, H., Akin, M., Eyduran, B.M., 2018. Usage multivariate adaptive regression splines for predicting continuous responses. animal and plant sciences. *International Agricultural Science Congress*. 9-12 May, Van, pp. 78.
- Eyduran, E., Akin, M. and Eyduran, S.P., 2019a. Application of multivariate adaptive regression splines in agricultural sciences through R Software. *Nobel Bilimsel Eserler Sertifika*, Ankara.
- Eyduran, E., Çanga, D., Sevgenler, H., Çelik, A.E., 2019b. Use of bootstrap aggregating bagging MARS to improve predictive accuracy for regression type problems. 11. Uluslararası İstatistik Kongresi, 4-8 Ekim, Muğla, s. 66.
- Firat, F., 1973. Dendrometri. IV. Baskı, İ.Ü. Orman Fakültesi, İ. Ü Yayın No, 1800, O. Yayın No, 193, Kutulmuş Matbaası, İstanbul.
- Friedman, J.H., 1991. Multivariate adaptive regression splines. *Annals of Statistics*, 19(1): 1-67.
- González-Rodríguez, M.A., Diéguez-Aranda, U., 2020. Exploring the use of learning techniques for relating the site index of radiata pine stands with climate, soil and physiography. *Forest Ecology and Management*, 458, p. 117803.
- Gregoire, T.G., Schabenberger, O., Barrett, J.P., 1995. Linear modeling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent plot measurement., *Canadian Journal of Forest Research*, 25(1): 137-156.
- Guerra-Hernández, J., Arellano-Pérez, S., González-Ferreiro, E., Pascual, A., Altelaarrea, V.S., Ruiz-González, A.D., Álvarez-González, J.G., 2021. Developing a site index model for P. pinaster stands in NW Spain by combining bi-temporal ALS data and environmental data. *Forest Ecology and Management*, 481, p. 118690.
- İyit, N., Genç, A., Arslan, F., 2006. Analysis of repeated measures for continuous response data using General Linear Model and Mixed Models, *Proceedings of the international conference on modeling and simulation*, Konya, pp. 937-942.
- Kalıpsız, A., 1988. İstatistik Yöntemler. İstanbul Üniversitesi Yayını, İstanbul Üniversitesi Yayın No: 3522, Orman Fakültesi No: 394, İstanbul.
- Kalıpsız, A., 1999. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İ.Ü. Yayın No: 3194, Orman Fakültesi Yayın No: 354, İstanbul
- Kan, B. 2011. Yanıt yüzeyi modellerine MARS yaklaşımı. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
- Kapucu, F., 2004, Orman amenajmanı. KTÜ Orman Fakültesi Yayın No: 215 / 33, Trabzon
- Karadaş, K., Tariq, M., Tariq, M.M., Eyduran, E., 2017a. Measuring predictive performance of data mining and artificial neural network algorithms for predicting lactation milk yield in indigenous Akkaraman sheep. *Pakistan Journal of Zoology*, 49(1): 1-7.
- Karadaş, K., Ertürk, E.Y., Eyduran, E., Gürsoy, K.A., Tariq, M.M., 2017b. Predictive Performances of Chaid and Mars Data Mining Algorithms in the establishment of Relationship between Live Body Weight and Several Morphological Measurements of Indigenous Mengali Sheep and Its Economic Importance. *International Conference On Agriculture, Forest, Sciences and Technologies*, 15-17 May, Nevşehir, pp. 117.
- Kartal, M., Depren, S.K., Depren, Ö., 2018. Türkiye’de döviz kurlarını etkileyen makroekonomik göstergelerin belirlenmesi: MARS yöntemi ile bir inceleme. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(1): 209-229.
- Keselman, H.J., Algina, J., Kowalchuk, R.K., Wolfinger, R.D., 1998. A Comparison of Two Approaches for Selecting Covariance Structures in the Analysis of Repeated Measures. *Communications in Statistics-Computation and Simulation*, 27 (3): 591-604.
- Kuter, S., Akyürek, Z., Weber, G.W., Özmen, A., 2012. Testing of MARS on MODIS Images for Local Atmospheric Correction, 25th European Conference on Operational Research (EURO XXV 2012), July 8-11, Vilnius, Lithuania.
- Kuter, S., 2014. Atmospheric correction and image classification on MODIS images by nonparametric regression splines. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Leites, L.P., Robinson, A.P., 2004. Improving taper equations of loblolly pine with crown dimensions in a mixed-effects modeling framework. *Forest Science*, 50: 204-212.
- Li, R., Weiskittel, A., 2010. Development and evaluation of regional taper and volume equations for the primary conifer species in the Acadian Region. *Annals of Forest Science*, 67: 302.
- 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: 5-14.
- Littell, R.C., Miliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D., 2005. SAS system for Mixed Models, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Loetsch, F., Zöhrer, F., Haller, K.E., 1973. Forest Inventory, Volume II, BLV Verlagsgesellschaft München Bern Wien, München,
- Milborrow, S., 2011. Derived from MDA: MARS by T. Hastie and Tibshirani, earth: Multivariate adaptive regression splines, R package, R note series.
- Nacar, S., Kankal, M., Hınıs M.A., 2018. Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (ÇDURE) ile günlük akarsu akımlarının tahmini-Haldizen Deresi örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1): 38-47.
- Nacar, S., Kankal, M., Okkan, U., 2021. *EralInterim* Re-analiz verileri kullanılarak istatistiksel ölçek indirgeme yöntemi ile Doğu Karadeniz Havzası aylık ortalama sıcaklık değerlerinin tahmin edilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(1): 136-148.
- Nacar, S., Baki, O.T., Bayram, A., 2022. Akarsularda çözünmüş oksijen konsantrasyonunun regresyon tabanlı yöntemlerle modellenmesi: Harşit Çayı örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(1): 309-324.
- Oğuz, A., 2014. Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon zincirlerinin irdelenmesi ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan.
- Oktar, S., Yüksel, S., 2016. Bankaların türev ürün kullanımını etkileyen faktörler: MARS yöntemi ile bir inceleme. *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, 53 (620): 31.

- Orhan H., Teke, Ç.E., Karcı, Z., 2018. Laktasyon eğrileri modellenmesinde çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (Mars) yönteminin uygulanması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 21(3): 363-373.
- Ou, Q., Lei, X., Shen, C., 2019. Individual tree diameter growth models of larch–spruce–fir mixed forests based on machine learning algorithms. Forests, 10(2): 187.
- Örekici, G., Çamdeviren, H., Yazıcı, C., 2005. Regresyon Modellerine Alternatif Yaklaşım: MARS, VIII. Ulusal Biyoistatistik Kongresi Bildiri Kitabı, Bursa, 105-123.
- Örekici Temel, G., Ankaralı, H., Yazıcı, A., 2010. Regresyon analizine alternatif bir yaklaşım: MARS. Türkiye Klinikleri Biyoistatistik Dergisi, 2: 58-66.
- Özçelik, R., Çevlik, M., 2017. Batı Akdeniz yöresi doğal sedir meşcereleri için hacim denklemleri. Turkish Journal of Forestry, 18(1): 37-48.
- Özdemir, B., 2024. Ağaç hacim tahminlerinin çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri tekniği ile elde edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çankırı.
- Özkalç, Y., 2008. Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Kesitleri: MARS, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Öztürk, S., Sevinç, V., 2013. Yeni doğan bebeklerin düşük doğum ağırlığının mars yöntemine dayalı ikili lojistik regresyonla modellenmesi. İstatistik Araştırma Dergisi, 10(2): 56-72.
- Poudel, K.P., Cao, Q.V., 2013. Evaluation of methods to predict Weibull parameters for characterizing diameter distributions. Forest Science, 59(2): 243-252.
- R Core Team, 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Sakici, O.E., Özdemir, G., 2018. Stem taper estimations with artificial neural networks for mixed Oriental beech and Kazdağı fir stands in Karabük region, Turkey. Cerne, 24(4): 439-451.
- Sakıcı, O.E., Sağlam, F., Seki, M., 2018. Kastamonu Orman Bölge Müdürlüğü karaçam meşcereleri için tek ve çift girişli ağaç hacim denklemleri. Turkish Journal of Forestry, 19(1): 20-29.
- Searle, S.R., Casella, G., McCulloch, C.E., 1992. Variance Components. John Wiley and Sons Inc., USA.
- Sevgenler, H., 2019. Keçilere Ait Kimi Özelliklerin Canlı Ağırlık Üzerindeki Etkilerini Belirlemek Amacıyla Kullanılan Veri Madenciliği Algoritmalarının (CART, CHAID ve Mars) Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Iğdır.
- SPSS Institute Inc., 2010. SPSS Base 15.0, User's Guide, 750 s.
- Şentürk, N., 1997. Dişbudak (*Fraxinus angustifolia* Wahl. subsp. (Bieb. Ex Willd.) Franco&Rocha Afonso) gövde hacim ve ağaç hacim tablolarının düzenlenmesi. Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 108 sayfa, Trabzon.
- Şevgin, H., 2020. ABİDE 2016 Fen başarısının yordanmasında MARS ve brt veri madenciliği yöntemlerinin karşılaştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ünal, B., 2009. Çok değişkenli uyarlamalı regresyon uzanımları, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tatlıdil, H., Demirağ, İ., 2014. Türkiye'de yoksulluğun sosyo-ekonomik ve demografik değişkenlerle ilişkilerinin lojistik regresyon ve MARS yöntemleri kullanılarak incelenmesi. TISK Academy/TISK Akademi, 9 (17): 59-62.
- Tosun, F., 2021. Veri madenciliği ile çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (Mars Modellemesi) yöntemi uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Tunay, K.B., 2001. Türkiye'de paranın gelir dolaşım hızlarının MARS yöntemiyle tahmini. ODTÜ Gelişme Dergisi, 28 (3-4): 431-454.
- Tunay, B.K., 2011. Türkiye'de durgunlukların MARS yöntemi ile tahmini ve kestirimi. Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 3(1):71-91.
- Yavuz, H., 1995. Uyumlu ve uyumsuz gövde çapı modelleri. KTÜ Orman Fakültesi Bahar Yarıyılı Seminerleri, Fakülte Yayın No:49, 101-106.
- Yavuz, H., Saraçoğlu, N., 1999. Kızılağaç için uyumlu ve uyumsuz gövde çapı modelleri. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 23 (5): 1275-1282.
- Yerlikaya, F., 2008. A New Contribution to Nonlinear Robust Regression and Classification with MARS and Its Applications to Data Mining for Quality Control in Manufacturing, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Zaborski, D., Grzesiak, W., Szweczek, M., Eydurán, E., Tariq, M. M. and Ali, M., (2018). The use of MARS method for predicting daily body weight gains in Harnai sheep. IX International Scientific Agriculture Symposium, Jahorina Bosnia Herzegovina,