DİJİTAL YÜZEY MODELİNDEN TURUNÇGİL MEYVE AĞAÇLARININ TESPİTİ, ÇIKARIMI VE KÜMELENMESİ: BÜTÜNLEŞİK BİR SİSTEM

Ali Özgün OK¹, Aslı ÖZDARICI OK²

¹Doç. Dr., Nevşehir H.B.V. Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Bölümü, 50300, Nevşehir, ozgunok@nevsehir.edu.tr

²Doç. Dr., Ankara H.B.V. Üniversitesi, Tapu Kadastro Yüksekokulu, 06450, Ankara, asliok@gazi.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, turuncgıl meyve ağaçlarının tek bir Dijital Yüzey Modeli (DYM) girdi verisinden bireysel olarak tanınmasına yönelik tespit, çıkarım ve kümeleme aşamalarını içeren yeni bir bütünleşik yaklaşım sunulmuştur. Turuncgıllerin tespiti aşaması için bu meyve ağaçlarının dairesel şekil yapısı ile birlikte DYM'deki yerel maksimum bilgisini olasılıksal olarak birleştiren yeni bir yöntem kurgulanmıştır. Tespit edilen ağaç sınırlarının çıkarımı amacıyla her ağaç bölgesi için negatif büzülme eğilimli Chan-Vese aktif çevrit yöntemi uygulanmıştır. Bu aşama ile sınırları çıkarılan turuncgıl meyve ağaçları, bu çalışmada geliştirilen üçüncü ve son aşama olan kümeleme ile otomatik olarak gruplara ayrılmıştır. Kümelere ayırma işleminde ağaç özellikleri, dikim parametreleri ve çevresel komşuluk ilişkileri gözeticilerle birleştirici hiyerarşik kümeleme (ortalama bağlantı kümeleme metodu) yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, yakın çevresindeki kümelerden farklı karaktere ve yapısal ilişkiye sahip bireysel veya kümesel (ağaç) nesne yapılarını ortaya çıkarmaktadır. Önerilen yöntemin performansını test etmek için Türkiye'nin en verimli narenciye bahçelerinden birini içeren Mersin ilinin kuzey kısmından 3 bölge seçilmiştir. Önerilen bütünleşik yaklaşım için hesaplanan piksel-tabanlı genel F_1 skor değeri %92'dir. Bu sonuç literatürde var olan üç farklı yöntem sonucu ile de karşılaştırılarak önerilen yaklaşımın başarılı performansı açıkça ortaya konulmuştur. Değerlendirmeler, geliştirilen yaklaşımın DYM'den narenciye ağaçlarının kümelere ayrılması konusunda oldukça başarılı sonuçlar üretebildiğini göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: çıkarım, İHA dijital yüzey modeli, kümeleme, tespit, turuncgıllar

ABSTRACT

DETECTION, EXTRACTION AND CLUSTERING OF CITRUS FRUIT TREES FROM DIGITAL SURFACE MODEL: AN INTEGRATED APPROACH

In this study, we presented a new integrated approach including the detection, extraction and clustering steps for the recognition of individual citrus fruit trees from a single Digital Surface Model (DSM) input data. A new probabilistic method combining the circular shape of these fruit trees with the knowledge of local maximum in the DSM has been utilized for the detection stage of citrus fruits. The Chan-Vese active contour method with a negative contraction bias was applied for each tree region in order to extract the borders of the detected trees. The citrus fruit trees whose borders were extracted with this step were automatically divided into groups by the third and final clustering stage developed in this study. Agglomerative hierarchical clustering (average linkage clustering method) method was utilized considering the properties of trees, planting parameters and peripheral neighborhood relations during the clustering process. The method revealed individual or clustered (tree) object structures having distinctive character and structural relationship than nearby clusters. Three test sites were selected from the northern part of Mersin province to test the performance of the proposed approach, which contains one of the most productive citrus gardens of Turkey. The overall pixel-based F_1 score computed for the proposed integrated approach was 92%. This result was also compared with the results of three different methods in the literature and the successful performance of the proposed approach was clearly demonstrated. The assessments have shown that the developed approach can produce quite successful results from DSM for the clustering of citrus trees.

Keywords: extraction, UAV digital surface model, clustering, detection, citrus trees

1. GİRİŞ

Dünyada turuncgıllar meyve üretimi olarak çok önemli bir yere sahiptir. Bunun bir yansıması olarak Türkiye, 2017 TÜİK verilerine göre 43,500'den fazla sayıda turuncgıllar meyve ağacıyla 4,7 milyon tondan fazla üretim yapabilen Akdeniz civarındaki üretim potansiyeli en yüksek ülkelerden birisidir (TÜİK 2017). Bu bağlamda Türkiye, Akdeniz havzasındaki ülkeler ele alındığında turuncgıl ihracat gelirleri en yüksek ülkelerden birisidir. Fakat tüm bu coğrafi avantajlarına ve üretim potansiyeline rağmen, ülkemizin turuncgıl meyve üretimine ait önceliklerini tanımlayacak, gelecekte daha büyük hedeflere ulaşması hedeflenen turuncgıl üretimini ve planlamasını ülke çapında ele alan detaylı bir stratejik planı hâlâ oluşturulamamıştır. Bunun belki de birincil sebebi, narenciye üretimi yapılan

bölgelere ilişkin düzenli aralıklarla sürekli izlenebilir ve güncellenebilir bir sistemin henüz oluşturulamamış olmasıdır. Her ne kadar Narenciye Bilgi Sistemi (NARBİS) projesi kapsamında ülkemizin turunçgil üretimi konusunda lider bölgelerinden olan Adana için narenciye envanterinin belirlenmesini ve analiz edilmesini sağlayacak bir Coğrafi Bilgi Sistemi altyapısı önerilmiş olsa da (Çetinkaya 2010), bu sistem bildiğimiz kadarıyla henüz tam anlamıyla faal olarak hayata geçirilememiştir. Bunun yanı sıra, önerilen sistem içerisinde narenciye ağaçları ile ilgili öznel bilgileri (ürün çeşidi, ağaç yaşı, anaç türü vb.) veri tabanında parsel bazında alansal olarak tutulmakta ve bireysel ağaç yapıları özelinde bilgiler (çap, çevre, yükseklik, gövde konumu vb.) yer almamaktadır.

Çok yüksek çözünürlüklü görüntülerden otomatik yöntemlerle bireysel ağaçların çıkarımı konusu uzaktan algılama ve görüntü işleme çalışmalarının uğraştığı önemli konulardan birisidir. Bireysel ağaç tespiti konusunda önerilen otomatik yöntemler arasında büyük çoğunlukla bir dijital yüzey modeli (DYM), normalize dijital yüzey modeli (nDYM) veya taç yükseklik modeli (TYM) verilerini girdi olarak tercih eden yöntemler öne çıkmaktadır. Yapılan çalışmalardan bireysel ağaç tespitine yönelik çalışmaların temelini görüntü bölütleme yöntemlerinin (örn. Hyypä vd., 2001; Wolf ve Heipke, 2007) oluşturduğu görülmektedir. Bu yöntemin, başlangıç noktası üretimi (örn. Hirschmugl 2007), lokal maksimum bulma (örn. Popescu ve Wynne, 2004; Swetnam ve Falk, 2014; Dalponte vd., 2015), bölge büyütme (örn. Zhen vd., 2015) gibi popüler yöntemlerle birlikte kullanılarak desteklendiği de gözlenmektedir. Bunun yanı sıra bireysel ağaç tespiti çalışmalarında kullanılan diğer yöntemler arasında görüntü sınıflandırma (örn. Dalponte vd., 2014) ve morfolojik analizler (örn. Heinzel vd., 2011) gelmektedir.

İnsansız hava araçlarının (İHA) sivil amaçlar için kullanımı, çok yüksek kalitede yer örnekleme mesafesi (YÖA) sunması ve ilk yatırım maliyetinin karşılanabilir seviyelerde olması nedeniyle hızla artmaktadır. Çok üst seviyede detay içeren (YÖA < 4 cm) ve yüksek bindirme oranlarına (> %75) sahip renkli İHA görüntülerinden (RGB) minimum seviyede hata barındıran yüksek kalitede DYM üretmek artık standart bir hâle gelmiştir. Bu nedenle bu çalışmada, turunçgil meyve ağaçlarının tek bir DYM girdi verisinden bireysel olarak tanınmasına yönelik tespit, çıkarım ve kümeleme aşamalarını içeren yeni bir bütünleşik yaklaşım sunulmaktadır (Şekil 1). Turunçgillerin tespiti aşamasında, bu meyve ağaçlarının dairesel şekil yapısı ile beraber DYM'deki yerel maksimum (LM) bilgisini olasılıksal olarak birleştirerek kullanan yeni bir yöntemden yararlanılmıştır (Ok ve Özdarıcı Ok, 2018a). Tespit edilen ağaçların sınırlarının çıkarımı amacıyla ilgi ve etki bölgeleri üretilmiş ve her ağacın etki bölgesinde negatif büzülme eğilimli Chan-Vese aktif çevrit yöntemi uygulanmıştır (Ok ve Özdarıcı Ok, 2018b). Bu aşamada, ayrıca iki temel strateji yardımıyla farklı ağaçlara ve nesnelere ait olabilecek hatalı bölgelerde elde edilen bireysel ağaç sınırları incelenerek mümkün mertebe filtrelenmiştir. İlk iki aşama sonucunda sınır çıkarımı yapılan turunçgil meyve ağaçları, bu çalışmada geliştirilen üçüncü ve son aşama olan kümeleme işlemi ile ağaç özellikleri, dikim parametreleri ve çevresel komşuluk ilişkileri gözetilerek otomatik olarak gruplara ayrılmıştır. Kümeleme işlemi için birleştirici hiyerarşik kümeleme (ortalama bağlantı kümeleme metodu) yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede yakın çevresindeki kümelerden farklı karaktere ve yapısal ilişkiye sahip bireysel veya kümesel nesne yapıları ortaya çıkarılmış ve böylece turunçgiller dışında kalan diğer nesneler (başka ağaç türleri, insan yapımı vb.) küme bazında elimine edilerek bu nesnelerden kaynaklanan hatalar en alt düzeye indirilmiştir. Çalışma bölgesi olarak Akdeniz Bölgesi kıyısında Türkiye'nin en verimli narenciye bahçelerini içeren Mersin ilinin kuzey kısmından 3 test alanı seçilmiştir. Önerilen yaklaşımın başarısını net olarak ortaya koyabilmek amacıyla elde edilen sonuçlar literatürde güvenilirliği kanıtlanmış üç farklı yöntemin sonuçları ile de karşılaştırılmıştır.

Şekil 1. Turunçgil meyve ağaçlarının tek bir DYM'den elde edilmesi için geliştirilen bütünleşik sistem.

Bölüm 2'de geliştirilen bütünleşik sistemin detaylarına, Bölüm 3'te test alanlarına ve Bölüm 4'te ise kullanılan bazı kritik parametrelerin analizine yer verilmiştir. Bölüm 5'te geliştirilen sistemin sonuçları tartışılmıştır. Son bölümde (Bölüm 6) ise çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. YÖNTEM

Geliştirilen bütünleşik sistemin ilk aşamasını ağaçların dairesel şekil yapısı ile beraber DYM'deki LM bilgisini olasılıksal olarak birleştiren tespit aşaması oluşturmaktadır. İkinci aşamayı tespit edilen ağaçların sınırlarının çıkarımı oluşturmaktadır. Üçüncü ve son aşamada ise tespit edilen ve sınırları çıkarılan ağaçların ağaç özellikleri, dikim parametreleri ve çevresel komşuluk ilişkileri gözetilerek farklı kümelere ayrılması gerçekleştirilmiş ve bu sayede turunçgil ağaçlarının diğer nesnelerden ayrılması sağlanmıştır.

2.1 Ağaçlarının Tespiti

Ağaçlarının tespiti aşamasında kullanılan özgün yöntem yazarların yakın tarihte yaptığı bir çalışmada detaylarıyla açıklanmıştır (Ok ve Özdarıcı Ok, 2018a). Bu nedenle, çalışmanın bu kısmı burada kısaca özetlenmiştir. Tespit aşaması, çok-düzeyle genişletilmiş maksimum dönüşümü ile olasılıksal LM bölgelerinin hesaplanmasıyla başlamaktadır. Klasik genişletilmiş maksimum dönüşümü tek bir yükseklik eşik değeri (h) kullanırken, çok-düzeyle genişletilmiş maksimum dönüşümü ise bir dizi (n) yükseklik eşik değerini kullanarak (h_i , $i=1, 2, \dots, n$ olmak üzere) olasılıksal LM bölgelerinin hesaplanmasına imkân tanımaktadır:

$$p_{LM} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{regionalmax}_{h_i}[\text{rec}(J,I)]}{n} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$

Formülde yer alan $\text{rec}(J,I)$ terimi art arda gri tonlamalı jeodezik genişletme ifadesini tanımlamaktadır. Bu terimde yer alan I girdi verisi DYM'yi, J ise DYM'den belirli bir i değerindeki yükseklik eşik değeri olan h_i nin farkını ($\text{DYM}-h_i$) belirtmektedir. Formüldeki regionalmax ifadesi jeodezik genişletme işlemi uygulanmış DYM'deki bölgesel maksimum alanların bulunmasını ifade ederken γ terimi ise kullanıcı tanımlı bir duyarlılık parametresini belirtmektedir. p_{LM} de daha parlak pikseller LM'de daha yüksek olasılığa sahip alanları göstermekte ve bu bilgi, birleştirilmiş yönelim simetri görüntüsünün üretimi sırasında kullanılmaktadır:

$$O_r^A = \sum_{i=1}^m \left(\left[\frac{(O_r)^{\alpha_i}}{\max\{(O_r)^{\alpha_i}\}} \cdot p_{LM} \right] * G_{\sigma} \right) \quad (2)$$

Eş. 2'de yer alan O_r^A belirli bir yarıçap r için seçilen ışınsal simetri düzeyi parametre sayısına (m) bağlı olarak elde edilen birleştirilmiş yönelim görüntüsünü ifade etmektedir. Yine eşitlikte her bir ışınsal simetri düzeyi α_i ile tanımlanırken O_r ise $R = \{r_{\min}, r_{\min+1}, \dots, r_{\max}\}$ olmak üzere her bir r yarıçap için DYM'ye ait yönelim görüntüsüdür. G_{σ} terimi ise sabit bir σ değerine sahip iki boyutlu Gauss filtresini tanımlamaktadır. Hesaplanan birleştirilmiş yönelim görüntüsü (O_r^A) DYM'ye ait yönelim-tabanlı simetriyi R 'deki belirli bir yarıçap değeri r için yansıtmaktadır. Bu nedenle, R 'deki tüm r değerleri için yukarıdaki işlemler tekrar edilmiş ve tüm birleştirilmiş yönelim görüntüleri toplanarak ($O_s = \sum_R O_r^A$) DYM'ye ait LM ile ağırlıklandırılmış yönelim simetri görüntüsü (O_s) üretilmiştir. Ardından narenciye ağaçlarına ait ilgi bölgeleri oluşturmak amacıyla kontrolsüz çok-düzeyle eşik belirleme yöntemi uygulanmış ve elde edilen ilgi alanındaki her bir ağaç merkezi (gövdesi) çıkarılmıştır. Kaba hatalı merkez noktaları temizlemek için ise tüm merkez noktalar arasında ayrıntılı mesafe taraması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2. Test Alanı #1 için tespit edilen (ağaç) nesneler. (a) İHA görüntüsü, (b) yöntemin tek girdisi DYM (beyaz renk görece yüksek kot, siyah renk ise görece alçak kot) ve (c) tespit edilen (ağaç) nesnelerinin merkez konumları.

2.2 Ağaçlarının Sınırlarının Çıkarımı

Ağaçlarının sınırlarının çıkarımı aşamasında kullanılan özgün yöntem yazarların yakın tarihte yaptığı bir başka çalışmada (Ok ve Özdarıcı Ok, 2018b) detaylarıyla açıklandığından çalışmanın ilgili bölümü burada kısaca özetlenmiştir. Çalışmanın bu aşamaya ait kısmını Bölüm 2.1’de üretilen ağaç merkezlerinden etki bölgeleri elde etmek oluşturmaktadır. Bunun için ilk olarak merkez noktaların tamamına Watershed dönüşümü uygulanarak etki bölgelerinin sınırları bulunmuştur. Komşu sınır pikselleri tarafından çevrelenen tüm dallanma noktaları izlenerek nesneden nesneye mesafeyi tanımlamak için mesafe dönüşümü görüntüsü üretilmiştir. Devamında, elde edilen etki bölgelerinde narenciye ağaç sınırlarının bulunabilmesi için bölge-tabanlı aktif çevrit modeli uygulanmıştır:

$$\operatorname{argmin}_c \{ \lambda_1 \int_{\text{inside}(c)} |I(p) - \mu_1|^2 dp + \lambda_2 \int_{\text{outside}(c)} |I(p) - \mu_2|^2 dp + \rho \operatorname{Len}(C) + v \operatorname{Area}(C) \} \quad (3)$$

Formül 3’te yer alan C , kapalı bir çevritin sınırını tanımlamaktadır. μ_1 ve μ_2 ise sırasıyla çevritin içindeki ve dışındaki ortalama piksel değerlerini ifade etmektedir. Len ve Area operatörleri sırasıyla çevritin uzunluğunu ve çevritin içindeki alanı temsil etmektedir. λ_1 ve λ_2 parametreleri sırasıyla iç ve dış terimleri ağırlıklandırırken ρ terimi çevrite ait düzleştirme düzeyini tanımlamaktadır. v terimi, kullanılacak katsayı işaretine (pozitif veya negatif) bağlı olarak dışa doğru büyümek veya içe doğru büzülmek için çevrit eğilimini kontrol eden parametredir. I görüntüyü (DYM) ifade etmektedir.

Bu aşamada etki bölgesindeki evrimi başlatmak için gerekli ilk kontur sınırları için o etki bölgesini oluşturmak için kullanılmış olan ilgi alanının sınırları kullanılmıştır. Bu sayede her bir etki bölgesi için çevritin evriminin bağımsız olarak gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Aktif çevrit evriminin uygulaması, Whitaker (1998) tarafından önerilen seyrek-alan düzey-kümesi metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemi, olabilecek hatalı tespitleri önlemek amacıyla çalışma için geliştirilen ve sırasıyla (i) bulunan bir ağaç sınırı içine düşen yükseklik değerleri ile o ağaca ait ilgi alanına içine düşen yükseklik değerlerini bir güven düzeyi (örn. %95) dikkate alınacak şekilde yüzdelik dilimler hesaplatılarak karşılaştıran ve (ii) yarıçaplar açısından bir karşılaştırma yapmak için çıktı çevritlerinin daireselliğini araştıran iki farklı işlem aşaması takip etmektedir.

Şekil 3. Test Alanı #1 için sınırları çıkarılan (ağaç) nesneler (a) Yöntemin girdisi olan DYM ve nesnelerin merkez konumları (yeşil renk), (b) sınırları çıkarılan (ağaç) nesneler (beyaz renk) ve (c) sınırları çıkartılan (ağaç) nesnelere ait yeni merkez konumları (yeşil renk).

2.3 Ağaçlarının Kümelenmesi

Bu çalışmada geliştirilen üçüncü ve son aşama olan kümeleme işlemi ile ilk iki aşama sonucunda sınır çıkarımı yapılan nesneler (ağaçlar) için, ağaç özellikleri, dikim parametreleri ve çevresel komşuluk ilişkileri gözetilerek otomatik kümeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede turunçgiller dışında kalan diğer nesneler (başka ağaç türleri, insan yapımı vb.) küme bazında elimine edilerek farklı nesne türlerinden kaynaklanan hatalar en alt düzeye indirilmiştir.

Bu çalışmada (toplam K sayıda) çıkarımı yapılan her (ağaç) nesnenin bilgisi (Şekil 3b) ve yine her nesneye ait merkez (gövde) konum bilgisinden (Şekil 3c) kümeleme işleminde kullanılmak üzere toplamda 7-boyutlu özellik verileri ($\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2 \dots \mathbf{X}_7]$) özgün bir şekilde üretilmiştir. İlk özellik verisini ($\mathbf{X}_1 = \mathbf{r}_k^c = [r_1^c \ r_2^c \ \dots \ r_K^c]^T$; $k=1, 2, \dots, K$), elde edilen her nesnenin sınırına karşılık gelen dairenin yarıçap bilgisi oluşturmaktadır:

$$r_k^c = (\sqrt{4 \cdot n_k / \pi}) / 2 \quad (4)$$

Eş. 4'te r_k^C , bir C nesnesi içindeki alan ile aynı sayıda pikseli (n_k) çevreleyen dairenin yarıçapını belirtmektedir. Bu sayede kümeleme işlemi sırasında birbirinden görece farklı yarıçap değerlerine (küçük veya büyük) sahip nesnelerin farklı kümelerle ayrılması sağlanmıştır.

İkinci özellik verisini ($X_2 = d_{1k}^C = [d_{11}^C d_{12}^C \dots d_{1K}^C]^T; k = 1, 2, \dots, K$) ise elde edilen her (ağaç) nesnenin sınırına yine etrafındaki (ağaç) nesnelerin sınırları dikkate alınarak hesaplanan iki-boyutlu mesafelerin en yakını (d_{1k}^C) oluşturmaktadır:

$$d_{1k}^C = \min_M(d(m_i, b_k^j)) \quad (5)$$

Eş. 5'te bir C nesnesine ait j . sınır pikseli bb_{kk}^{jj} ile ifade edilirken $\mathbf{M}$ ise C nesnesi hariç olmak üzere veride bulunan tüm diğer nesneleri, $\mathbf{m}_i$ ise $\mathbf{M}$ 'de yer alan herhangi bir $\mathbf{m}$ nesnesinin i . sınır pikselini tanımlamaktadır. Yine Eş. 5'te verilen $d(\cdot)$ ise görüntü üzerinde iki-boyutlu yakınlık ölçütü hesabında kullanılan Öklid uzaklığını ifade etmektedir. Bu özellik sayesinde (ağaç) nesne kapallılığı yoğun (görece yakın mesafe) veya seyrek (görece uzak mesafe) yapıların tanımlanması sağlanarak farklı kümelerle ayrılması tasarlanmıştır.

Üçüncü özellik verisi ($X_3 = d_{2k}^C = [d_{21}^C d_{22}^C \dots d_{2K}^C]^T; k = 1, 2, \dots, K$) nesnelerin (gövde) konumları dikkate alarak kurgulanmıştır:

$$d_{2k}^C = \min_M(d(m_i, b_k^j)) \quad (6)$$

Eş. 6'da bir C nesnesine ait (gövde) pikseli konumu $\mathbf{c}_k$ ile ifade edilirken $\mathbf{M}$ ise C nesnesi hariç olmak üzere veride bulunan tüm diğer nesneleri, $\mathbf{m}_q$ ise $\mathbf{M}$ 'de yer alan herhangi bir $\mathbf{m}$ nesnesinin merkez (gövde) pikseli konumunu belirtmektedir. Yine verilen $d(\cdot)$ ise görüntü üzerinde iki-boyutlu yakınlık ölçütü hesabında kullanılan Öklid uzaklığını ifade etmektedir. Bu üçüncü özellik verisi, farklı dikim özelliklerine (görece sık veya ayrık dikim) sahip nesne yapılarını ortaya çıkarmaktadır.

Son dört özellik verisi ($\mathbf{X}_4, \mathbf{X}_5, \mathbf{X}_6$ ve $\mathbf{X}_7$) ise her (ağaç) nesnenin merkez (gövde) konumunun $\mathbf{c}_k = [x_k \ y_k]$ görüntüyü oluşturan düzlemin boyutlarına göre rölatif olacak şekilde pozisyonlarını tanımlamaktadır:

$$X_4 = x_k^C = [x_1^C x_2^C \dots x_K^C]^T \quad (7)$$

$$X_5 = y_k^C = [y_1^C y_2^C \dots y_K^C]^T \quad (8)$$

$$X_6 = x_{img} - x_k^C = [x_{img} - x_1^C \ x_{img} - x_2^C \dots x_{img} - x_K^C]^T \quad (9)$$

$$X_7 = y_{img} - y_k^C = [y_{img} - y_1^C \ y_{img} - y_2^C \dots y_{img} - y_K^C]^T \quad (10)$$

Eş. 9 ve 10'daki x_{img} ve y_{img} sırasıyla DYM verisindeki bir satır ve sütundaki toplam piksel sayısını ifade etmektedir. Bu sayede görüntü düzleminde birbirlerine göre görece yakın konumda bulunan (ağaç) nesnelerin aynı kümeye atanma imkânı olabilmektedir.

Kümeleme işlemi, verilerdeki farklı küme/grup yapılarını ortaya çıkarmak için uygulanan sayısal yöntemleri ifade etmektedir. Bu işlem sonucunda, kümeleme işlemi sırasında kullanılan veri özelliklerine göre her kümenin homojen bir yapıda olması sağlanırken kümelerin birbirleri arasında mümkün olduğunca heterojen yapıda olması beklenir. Kümeleme yöntemleri Hiyerarşik ve Hiyerarşik Olmayan kümeleme yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Hiyerarşik Kümeleme, çoğunlukla tek bir grup elemanı barındıran kümelerden başlayarak kümeleri ardı ardına birleştirerek oluşturma sürecidir ve bu yöntemlere genel olarak Birleştirici Hiyerarşik Kümeleme yöntemi adı verilir. Birleştirici hiyerarşik kümeleme yöntemleri, ilk adımda verideki tüm elemanların birbirleri arasındaki mesafelerin/uzaklıkların hesaplanması ile başlar. Bu sayede verideki her elemanın arasındaki benzerlik ya da farklılıklar ortaya çıkartılmış olur. Bu mesafelerin hesaplanmasında kullanılabilecek ölçütler girdi verisi özelinde farklılık gösterecek şekilde literatürde (örn. Öklid, Standartlaştırılmış Öklid, Manhattan, Mahalanobis, Cosine, Pearson korelasyon) tanımlanmıştır. Verideki tüm elemanların birbirleri arasındaki mesafelerin/uzaklıkların hesaplanması ile başlanan birleştirici hiyerarşik kümeleme yönteminde ikinci adımda her eleman kendine en kısa mesafede (veya en benzer) olan eleman ile birleştirilir. Bu adımdan sonra oluşturulan her küme birden fazla eleman içerebileceğinden sonraki adımlardaki birleşimlerin hesaplanmasında kullanılacak olan mesafelerin/uzaklıkların küme benzerliklerini ya da farklılıklarını içermesi gerekmektedir. Bu nedenle yine literatürde kümeler arası mesafelerin hesaplanması için tanımlanmış yöntemler (örn. Tek Bağlantı, Ortalama Bağlantı, Tam Bağlantı, Ağırlık Merkezi Bağlantı, Ward

Hiyerarşik vb.) bulunmaktadır. Küme birleştirme işlemi, tüm veriler tek bir kümede toplanana kadar yinelemeli bir şekilde devam eder ve birleştirilen kümelere ait özellik bilgileri ve birleştirme işlemi sırasında kullanılan mesafeler kaydedilir.

Şekil 4'te 7-boyutlu özellik verileri kullanılarak Birleştirici Hiyerarşik Kümeleme yöntemi sonucunda Test Alanı #1 için elde edilen kümeleme sonucu verilmiştir (Kullanılan parametreler ile ilgili bilgi Bölüm 4'te verilmiştir). Şekil 4c'den görüleceği üzere, kümeleme sonucu genel olarak başarılı olmasına rağmen bazı durumlarda karışmalar veya hatalı kümeye atanmış nesneler bulunabilmektedir (örn. dikim hattına uygun dikilmiş olsa bile yarıçap olarak veya sınır mesafesi uzaklığı bakımından çevresindeki nesnelerden çok farklı olan nesneler gibi). Bu hataları mümkün olduğunca azaltmak amacıyla bu çalışmada dikim özelliklerini de dikkate alan yeni bir *böl-birleştir-temizle* stratejisi önerilmiştir. Bu stratejinin ilk adımı olan küme bölme işleminde her küme ayrı ayrı ele alınarak herhangi bir elemanın veya elemanlarının bir eşik mesafesini (3m) aşıp aşmadığı kontrol edilmektedir. Eğer bir küme içerisinde bu mesafeyi aşan bir eleman veya elemanlar grubu var ise bunlar kümeden ayrılmakta ve bu elemanlardan yeni kümeler oluşturulmaktadır. Böylece her kümenin ağaç dikim mesafesi bakımından kendi içinde tutarlı olması garanti edilmektedir (Şekil 5b). Geliştirilen stratejinin ikinci adımı olan birleştirme işleminde ise en az sayıda elemana sahip kümeden başlanarak yinelemeli bir şekilde (küme elemanlarının dikim mesafeleri gözetilerek belirlenen 8m uzaklık kullanılarak) küme merkezlerinin yakın komşuluğundaki diğer küme merkezleri etiketleri incelenmektedir. Yakın komşuluk hesabında k-en yakın komşuluk (Friedman vd., 1977) yöntemi kullanılmış ve her küme için (kendi küme etiketine sahip olanlar hariç olmak üzere) en az 2 veya daha fazla komşusunun aynı küme etiketine sahip olma kriteri aranmıştır. Her yineleme sonucunda tüm küme bilgileri güncellenerek yinelemeler toplamda belirli sayıda elemana (en fazla 20) sahip tüm kümelerde herhangi bir değişiklik olmayana kadar devam ettirilmiştir. Bu ikinci adım tüm görüntüde bir düzleştirme etkisi sağlamakta ve hatalı kümelere atanmış olan elemanları mümkün olduğunca azaltmaktadır (Şekil 5c). Stratejinin son adımında ise önce tüm kümelere ait dışbükey örtüleri hesaplatılarak kümelerin sınırları oluşturulmakta ve bu sınırlar arasında bir kesişme olup olmadığı kontrol edilmektedir. Eğer küme dışbükey örtülerinde kesişme var ise sadece bu kesişmeye sebep olan elemanlar için tekrardan bir yinelemeli yakın komşuluk analizi uygulanmakta ve bu sayede tüm kümelerin dışbükey örtü ile belirlenen sınırlarının mümkün olduğunca ayrık olması garanti edilmektedir.

Şekil 4. Test Alanı #1 için elde edilen birleştirici hiyerarşik kümeleme yöntemi sonucu (a) İlk girdi olan (ağaç) nesneler (beyaz renk), (b) ikinci girdi olan nesnelerin merkez konumları (yeşil renk) ve (c) kümeleme sonucu (Standartlaştırılmış Öklid, Ortalama Bağlantı ve küme sayısı 10, her renk farklı bir kümeyi temsil etmektedir.).

Son olarak elde edilen kümelerin sahip olduğu eleman sayılarına bakılarak kümelerin turunçgiller meyve ağacına ait olup olmadığına (küme eleman sayısı > 5) karar verilmektedir (Şekil 5d).

Şekil 5. Test Alanı #1 için *böl-birleştir-temizle* stratejisi sonucu (a) Girdi kümeleme verisi (küme sayısı 10), (b) bölme adımı sonucu (Toplam küme sayısı 25), (c) birleştirme adımı sonucu (toplam küme sayısı 12) ve (d) DYM üzerine temizleme adımı sonucu (Toplam nihai küme sayısı 3: beyaz ve kırmızı renkler sırasıyla kabul ve reddedilen kümelerin sınırlarını belirtmektedir.) (a), (b) ve (c)'de her renk farklı bir kümeyi temsil etmektedir.

3. TEST ALANLARI

Çalışma bölgesi olarak Akdeniz Bölgesi kıyısında Türkiye'nin en verimli narenciye bahçelerini içeren Mersin ilinin kuzey kısmından 3 test alanı (Şekil 6) seçilmiştir. Test verisi çok yüksek mekânsal çözünürlüklü İHA görüntülerinden elde edilmiştir. Bu amaç için kullanılan İHA, 200W elektrik motoruna sahip 1,2 m kanat genişliği olan bir hava aracıdır. Çalışmada sırasıyla %80 ve %60 boyuna ve enine bindirme oranları sağlanmıştır. İHA görüntüleri, 8 bit radyometrik çözünürlükte ve çok yüksek yer örnekleme mesafesine ($\approx 3,5$ cm/piksel) sahip olan doğal renk kombinasyonunda (RGB) elde edilmiştir. Test alanlarına ait DYM'ler Pix4D yazılımında (Pix4D, 2016) yer alan yarı-global eşleme yöntemi ile elde edilen yoğun nokta bulutundan (m^3 başına ortalama 40-50 nokta) üretilmiştir. DYM'de yer alan ayrıntıyı azaltmak ve uygulanan işlem yükünü hafifletmek amacıyla yer örnekleme aralığı ≈ 7 cm/piksel olacak şekilde yeniden örneklendirilmiştir.

Şekil 6. Test alanları ve sonuçlar. Yukarıdan aşağı sırasıyla Test Alanı #1, #2 ve #3. Soldan sağa sırasıyla İHA RGB ortogörüntü, DYM, Kümelenmiş veri (Her renk farklı bir kümeyi temsil etmektedir), turuncgiller meyve ağaçları küme sınırları (Beyaz ve kırmızı renkler sırasıyla kabul ve reddedilen kümelerin sınırlarını belirtmektedir.).

Narenciye ağaçlarının sınırlarını içeren referans veri elle üretilmiştir. Bu çalışmada, önerilen yöntemin performansını test etmek amacıyla piksel-tabanlı *Kesinlik*, *Geri-getirme* ve F_1 skoru adıyla anılan üç kalite değerlendirme ölçütü kullanılmıştır:

$$Kesinlik = \frac{\|DP\|}{\|DP\| + \|YP\|} \quad Geri - Getirme = \frac{\|DP\|}{\|DP\| + \|YN\|} \quad F_1 = \frac{2 \cdot Kesinlik \cdot Geri - getirme}{Kesinlik + Geri - getirme} \quad (11)$$

Yukarıdaki formüllerde yer alan DP doğru-pozitif, YP yanlış-pozitif ve YN yanlış-negatif değerlerini ifade etmektedir. $\| \cdot \|$ operatörü bu kategorilere atanan piksel sayılarını göstermektedir. F_1 skoru ise *Kesinlik* ve *Geri-getirme* ölçütlerini eşit şekilde ağırlıklandırarak yöntemin genel performansını yansıtmaktadır.

4. PARAMETRE ANALİZİ VE SEÇİMİ

Önerilen yaklaşımın ilk iki aşaması için gerekli tüm parametreler için farklı değerler kullanılarak çok sayıda deney gerçekleştirilmiş ve her bir parametrenin sonuca etkisi *Kesinlik*, *Geri-getirme* ve F_1 skoru değerleriyle araştırılarak optimum parametre kombinasyonuna ulaşılmıştır (Ok ve Ok-Ozdarici, 2018a, Ok ve Ok-Ozdarici, 2018b).

Bu çalışmanın özgün olan üçüncü aşamasını içeren kümeleme işlemi için gerekli olan elemanlar arası uzaklık ölçme ve kümeler arası mesafe ölçme yöntemleri için kullanılan en uygun iki metot, bu konuda kullanılan popüler metotlar dikkate alınarak hesaplanan Kofenetik korelasyon skorları incelenerek belirlenmiştir. Kofenetik korelasyon, hiyerarşik bir kümeleme sonucunda elde edilen Kofenetik mesafeler ile kümeleri oluşturmak için kullanılan özellikler arasındaki doğrusal korelasyon katsayısıdır. Böylece, oluşturulan hiyerarşik yapının, onu oluşturmak için kullanılan gözlemler arasındaki farklılıkları ne kadar başarı ile temsil ettiğini ifade etmektedir. Çizelge 1’de test edilen toplam 6 farklı elemanlar arası uzaklık ölçme yöntemi ve 5 farklı kümeler arası mesafe ölçme yöntemi için en başarılı sonuçlar elemanlar arası uzaklık ölçme yönteminin Standartlaştırılmış Öklid ve kümeler arası mesafe ölçme yönteminin ise Ortalama Bağlantı olduğu durum için elde edilmiştir. Bu durum diğer test alanları için hesaplanan Kofenetik korelasyon skorları için de benzerdir.

Yöntemde başlangıç küme sayısı parametresi olarak 10 seçilmiştir. Küme sayıları *böl-birleştir-temizle* aşamasında zaten veriye göre adapte edilebilir şekilde tasarlandığından bu parametrenin çok az veya çok fazla seçilmediği durumlar için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada tüm test alanları için bu parametre 10 olarak sabitlenmiştir. Fakat bu çalışmada kullanılan test alanlarına göre görece büyük veya küçük alanlar seçilmesi durumunda bu parametrenin tekrardan değerlendirilmesi gerekebilmektedir.

Çizelge 1. Test Alanı #1 için hesaplanan Kofenetik korelasyon skorları
(En uygun yöntemler 1'e yakın sonuç üretenlerdir.).

Kümeler Arası Mesafe Ölçme Yöntemleri Elemanlar Arası Uzaklık Ölçme Yöntemleri	Tek Bağlantı	Ortalama Bağlantı	Tam Bağlantı	Ağırlık Merkezi Bağlantı	Ward Hiyerarşik
Öklid	0.24649	0.64614	0.66775	0.67675	0.68567
Standartlaştırılmış Öklid	0.69170	0.83475	0.68968	0.83460	0.56625
Manhattan	0.26300	0.65765	0.63648	0.66272	0.66883
Hamming	0.10655	0.74692	0.69069	0.20514	0.10193
Cosine	0.32568	0.63594	0.66399	0.57175	0.67310
Pearson korelasyon	0.26508	0.65539	0.68697	0.69106	0.68212

5. DEĞERLENDİRME

Geliştirilen yaklaşımın görsel sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Görsel sonuçların yanı sıra, yaklaşımın piksel-tabanlı performans sonuçları da Çizelge 2'de sunulmuştur. Önerilen yaklaşıma ait genel kesinlik, geri-getirme ve F_1 skoru performans değerlerinin tamamında %90 ve üzerinde bir piksel-tabanlı sonuç elde edilmiştir. Bu da yaklaşımın oldukça başarılı sonuçlar ürettiğini kanıtlamaktadır.

Şekil 7. Test alanları ve görsel sonuçlar. Yukarıdan aşağı sırasıyla Test Alanı #1, #2 ve #3. Yeşil, kırmızı ve mavi renkler sırasıyla doğru-pozitif, yanlış-pozitif ve yanlış-negatif pikselleri tanımlamaktadır.

Sunulan yöntemin sonuçları literatürde güvenilirliği kanıtlanmış üç farklı ağaç bulma yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Burada bu üç yöntemin başarılı olarak çalıştırılabilmesi için test alanlarına ait normalize DYM üretilmiş ve yöntemlere girdi verisi olarak kullanılmıştır. Karşılaştırmada ilk göze çarpan gerçek, sunulan yöntemin elde edilen genel *Kesinlik* ve F_1 skorları dikkate alındığında tüm yöntemlere göre açık ara iyi sonuçlar üretmiş olduğudur. Bu anlamda hesaplanan toplam F_1 skorları dikkate alındığında geliştirilen yöntem diğer yöntemlere göre %7,3 ile %23,6 oranlarında değişen daha iyi piksel-tabanlı sonuç elde etmiştir. Elde edilen geri-getirme oranları dikkate alındığında önerilen yöntem diğer yöntemlere nazaran daha az başarılı gibi gözükse de aslında neredeyse elde edilen bütün geri-getirme değerleri %90 ve üzeridir. Bu da oldukça tatmin edici şekilde turuncgiller meyve ağaçlarının bulunduğunu ispat etmektedir. Ağaç bulma konusunda kabul görmüş yöntemlerle karşılaştırma sonucunda yöntemin kesinlik ve geri-çağırma ölçütleri arasında oldukça iyi bir denge sağlayarak üstün bir performans sergilediği sonuçlardan görülmektedir.

Çizelge 2. Literatürde güvenilirliği kanıtlanmış üç farklı ağaç bulma yöntemi ile önerilen yöntemin piksel-tabanlı sonuçları. Her ölçüt için elde edilen en başarılı sonuç koyu renk ile ifade edilmiştir.

Veri seti	Piksel-tabanlı Performans (%)											
	Popescu ve Wynne (2004) + Kwak vd. (2007)			Swetnam ve Falk (2007)			Dalponte vd. (2015)			Önerilen Bütünleşik Yöntem		
	Kesinlik	Gerigetirme	F_1	Kesinlik	Gerigetirme	F_1	Kesinlik	Gerigetirme	F_1	Kesinlik	Gerigetirme	F_1
#1	70.9	92.2	80.2	70.6	78.1	74.2	68.2	85.0	75.7	98.5	90.6	94.4
#2	75.2	94.3	83.7	71.8	66.3	69.0	73.0	90.4	80.8	92.1	89.9	91.0
#3	57.1	97.0	71.9	72.5	63.3	67.6	57.3	97.1	72.1	88.8	93.8	91.2
Genel	67.0	94.6	78.4	71.6	68.9	70.2	65.5	91.0	76.2	92.7	91.4	92.0

6. SONUÇ

Çalışmada, turunçgil meyve ağaçlarının tek bir DYM girdi verisinden bireysel olarak tanınmasına yönelik tespit, çıkarım ve kümeleme aşamalarından oluşan yeni bir bütünleşik yaklaşım sunulmuştur. Turunçgillerin tespiti aşamasında, bu ağaçların dairesel şekil yapısı ile birlikte DYM'deki yerel maksimum bilgisi kullanılmış ve tespit edilen ağaçların sınırlarının çıkarımı amacıyla her ağacın etki bölgesinde negatif büzülme eğilimli Chan-Vese aktif çevrit yöntemi uygulanmıştır. İlk iki aşama sonucunda sınır çıkarımı yapılan turunçgil meyve ağaçları, bu çalışmada geliştirilen üçüncü ve son aşama olan kümeleme işlemi ile ağaç özellikleri, dikim parametreleri ve çevresel komşuluk ilişkileri gözetilerek otomatik olarak gruplara ayrılmıştır. Kümeleme işlemi için birleştirici hiyerarşik kümeleme (ortalama bağlantı kümeleme metodu) yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede yakın çevresindeki kümelerden farklı karaktere ve yapısal ilişkiye sahip bireysel veya kümesel nesne yapıları ortaya çıkarılmış ve bu yolla turunçgiller dışında kalan diğer nesneler (başka ağaç türleri, insan yapımı vb.) küme bazında elimine edilerek bu nesnelerden kaynaklanan hatalar en alt düzeye indirilmiştir. Çalışma bölgesi olarak Türkiye'nin en verimli narenciye bahçelerinin yer aldığı Akdeniz Bölgesi'nde yer alan Mersin ilinin kuzey kısmından 3 test alanı seçilmiştir. Önerilen yaklaşımın başarısını net olarak ortaya koyabilmek için elde edilen sonuçlar literatürde güvenilirliği kanıtlanmış üç farklı yöntemin sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Hesaplanan toplam F_1 skor değerleri dikkate alındığında öne sürülen yöntemin %92'in üzerinde bir sonuç elde ettiği gözlenmiştir. Değerlendirmeler, önerilen yaklaşımın DYM'den narenciye ağaçlarının hem bireysel hem de ağaç özellikleri, dikim parametreleri ve çevresel komşuluk ilişkileri gözetilerek otomatik olarak gruplara ayrılması konusunda oldukça başarılı sonuçlar üretebildiğini göstermiştir. Bu özellikleri ile çalışmanın bu konuda çalışan bilim insanlarına ve karar vericilere ışık tutacağı öngörülmektedir.

Gelecek çalışmalarda, elde edilen küme bilgilerinden yararlanılarak tespit edilememiş olan turunçgil ağaçlarının yeniden kazanımı üzerinde çalışılacaktır. Bu sayede geliştirilen bütünleşik sistemin geri-getirme oranların bir kademe daha ileriye götürülebileceği öngörülmektedir. Ayrıca yöntemin daha geniş alanları kapsayan görüntülerde denenmesi de planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir [Proje Numarası 114Y671]. Yazarlar olarak, proje çalışmalarındaki katkılarından dolayı Dr. Emre Başeski'ye ve arazi çalışmalarındaki katkılarından dolayı ATAY Mühendislik Genel Müdürü Hürkan ATAY'a ve SATLAB Geosolutions şirketine teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca, arazi ve referans veri üretimindeki çalışmalarından dolayı lisans öğrencileri Süleyman TOPRAK'a ve Esengül ZEYREK'e teşekkür ederiz.

Bunun yanı sıra yazarlar olarak Dr. Michele Dalponte ve Dr. Tyson L. Swetnam'a yaklaşımı ile ilgili kodları^{1,2} paylaştığı ve kodlarla ilgili yardımlarından ötürü teşekkürlerimizi sunarız. Popescu ve Wynne (2004) ve Kwak vd. (2007) yaklaşımına ait kaynak kodlar Matthew Parkan tarafından geliştirilmiş olup Digital Forestry Toolbox³ ta yer almaktadır.

¹ <https://cran.r-project.org/web/packages/itcSegment/index.html>

² <https://sites.google.com/a/email.arizona.edu/tyson-swetnam/code>

³ <http://mparkan.github.io/Digital-Forestry-Toolbox/>

KAYNAKLAR

- Çetinkaya, U. B.,** 2010. Adana Aşağı Seyhan Ovasında Narenciye Bilgi Sistemleri (NARBİS) Oluşturulması. *Yüksek Lisans tezi*. Çukurova Üniversitesi, Adana. 109 sayfa.
- Dalponte, M., Ørka, H.O., Ene, L.T., Gobakken, T., ve Næsset, E.,** 2014. Tree Crown Delineation and Tree Species Classification in Boreal Forests using Hyperspectral and ALS Data. *Remote Sensing of Environment*, 140(1): 306-317.
- Dalponte, M., Reyes, F., Kandare, K., ve Gianelle, D.,** 2015. Delineation of Individual Tree Crowns from ALS and Hyperspectral Data: A Comparison among Four Methods. *European Journal of Remote Sensing*, 48(8): 365382.
- Friedman, J. H., Bentely, J., ve Finkel, R. A.,** 1977. An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time, *ACM Transactions on Mathematical Software*, 3.3: 209-226.
- Heinzel, J.N., Weinacker, H., ve Koch, B.,** 2011. Prior-knowledge-based Single-tree Extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 32(17): 4999-5020.
- Hirschmugl, M., Ofner, M., Raggam, J., ve Schardt, M.,** 2007. Single Tree Detection in Very High Resolution Remote Sensing Data. *Remote Sensing of Environment*, 110(4): 533-544.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehtikoinen, M., ve Inkinen, M.,** 2001. A Segmentation-Based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height Models Produced by Laser Scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(5): 969-975.
- Kwak, D.-A., Lee, W.-K., Lee, J.-H., Biging, G. S., ve P. Gong,** 2007. Detection of Individual Trees and Estimation of Tree Height Using LiDAR Data. *Journal of Forest Research*, 12(6): 425-434.
- Ok, A.O., ve Ozdarici-Ok, A.** 2018a. Combining Orientation Symmetry and LM Cues for the Detection of Citrus Trees in Orchards from a Digital Surface Model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, (basımda).
- Ok, A.O., ve Ozdarici-Ok, A.** 2018b. 2-D Delineation of Individual Citrus Trees from UAV-based Dense Photogrammetric Surface Models. *International Journal of Digital Earth*, 11(6): 583-608.
- Pix4D,** 2016. <https://pix4d.com>. [Erişim tarihi: 02.08.2018]
- Popescu, S.C., ve Wynne, R.H.,** 2004. Seeing the Trees in the Forest: Using Lidar and Multispectral Data Fusion with Local Filtering and Variable Window Size for Estimating Tree Height. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(5): 589-604.
- Swetnam, T.L., ve Falk, D.A.,** 2014. Application of Metabolic Scaling Theory to Reduce Error in Local Maxima Tree Segmentation from Aerial LiDAR. *Forest Ecology and Management*, 323(6): 158-167.
- TÜİK.,** 2017. Bitkisel Üretim İstatistikleri. http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1001 [Erişim tarihi: 08.05.2017].
- Whitaker, R. T.,** 1998. A Level-Set Approach to 3d Reconstruction from Range Data. *International Journal of Computer Vision*, 29(3): 203-231.
- Wolf (né Straub), ve B.M., Heipke, C.,** 2007. Automatic Extraction and Delineation of Single Trees from Remote Sensing Data. *Machine Vision and Applications*, 18(5): 317-330.
- Zhen, Z., Quackenbush, L.J., Stehman, S.V., ve Zhang, L.,** 2015. Agent-based Region Growing for Individual Tree Crown Delineation from Airborne Laser Scanning (ALS) Data. *International Journal of Remote Sensing*, 36(7): 1965-1993.