

# VEKTÖR HÜCRESEL OTOMAT YAKLAŞIMI İLE KENTSEL BÜYÜMENİN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ SİMÜLASYONU

Ahmet Emir YAKUP<sup>1\*</sup>, İsmail Ercüment AYAZLI<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Öğr. Gör., Hitit Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 19500, Çorum, emiryakup@hitit.edu.tr  
<sup>2</sup>Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, eayazli@cumhuriyet.edu.tr

## ÖZET

Hücresel Otomat tabanlı modeller, hesaplama yetenekleri ve raster veri yapısıyla uyumlulukları nedeniyle kentsel büyüme araştırmalarında sıkça tercih edilmektedir. Ancak, son çalışmalar bu modellerin hücre büyüklüklerine ve komşuluk yapılarına duyarlı olduğunu, ayrıca hücrelerin mekânsal varlıklarla uyumsuzluğu ve tüm hücrelere aynı komşuluk kuralının uygulanmasının dezavantaj oluşturduğunu göstermektedir. Bu kısıtlamaları aşmak amacıyla, bu çalışmada, raster yerine vektör veri yapısını kullanan bir Vektör Hücresel Otomat (V-HO) temelli kentsel büyüme simülasyon modeli (KBSM) önerilmektedir. Önerilen model ile vektör temelli hücresel işlemlerin gerçekleştirilmesi ve İstanbul metropolitanı için 2040 yılına ait KBSM oluşturulması amaçlanmıştır. Bu simülasyon modeli, V-HO ile Rastgele Orman algoritmasının birleştirilmesiyle geliştirilmiş ve böylece yüksek doğruluk ve detaylı analiz imkânı sağlanmıştır. Çalışma alanına ait veriler CORINE, Open Street Map ve USGS açık kaynak servislerinden elde edilmiştir. V-HO temelli KBSM, 1990 ve 2018 dönemleri arasında eğitilmiş ve 2040 yılı için kentsel büyümeyi simüle ederek yüksek bir doğruluk sağlamış ve AUC istatistiği %86'ya ulaşmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre orman alanlarının 10.848 ha, tarım arazilerinin 4.696 ha miktarlarında kentleşme tehdidi altında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca İstanbul'da 2040 yılında %11 oranında artışla kentsel büyüme yaşanabileceği kestirilmiştir. Elde edilen bulgular, vektör veri yapısının esnekliğinden yararlanılarak yüksek çözünürlüklü, daha doğru ve ayrıntılı simülasyonlar oluşturulabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Kentsel Büyüme, Vektör Hücresel Otomat, Arazi Örtüsü/Kullanım Değişimi

## ABSTRACT

### HIGH-RESOLUTION SIMULATION OF URBAN GROWTH USING A VECTOR CELLULAR AUTOMATA APPROACH

Cellular Automata-based models are frequently preferred in urban growth research because of computational capabilities and compatibility with raster data structure. However, recent studies have shown that these models are susceptible to cell sizes and neighborhood patterns, as well as the incompatibility of cells with spatial entities and the disadvantages of applying the same neighborhood rule to all cells. To overcome these limitations, in this paper, a Vector Cellular Automata (V-CA) based urban growth simulation model (UGSM), using vector data structure instead of raster is developed. The aim of the suggested model is to realize vector-based cellular operability and to create an urban growth simulation model (UGSM) for the Istanbul metropolitan area for the year 2040. The simulation model is developed by combining V-CA with the Random Forest algorithm, thus providing high accuracy and detailed analysis. Data for the study area were obtained from CORINE, Open Street Map and USGS open source services. The V-CA based UGSM trained between 1990 and 2018 and simulated urban growth for the year 2040 with high accuracy and AUC statistic reaching 86%. According to the simulation results, 10,848 ha of forest areas and 4,696 ha of agricultural lands are under the threat of urbanization. Urban growth in Istanbul is also predicted to increase by 11% in 2040. The findings show that high resolution, more accurate and detailed simulations can be created by utilizing the flexibility of vector data structure.

**Keywords:** Urban Growth, Vector Cellular Automata, Land Cover/Use Change

## 1. GİRİŞ

Kentsel büyüme modellerinin yaygınlaşmasının başlıca nedenlerinden biri, küresel çapta kent nüfusunun hızla artması ve bu artışın meydana getirdiği toplumsal ve çevresel sorunlara çözüm üretebilmektir (Li & Gong, 2016). Birleşmiş Milletler (BM) tarafından yayınlanan rapora göre; günümüzde 8 milyara yaklaşan dünya nüfusu yıllık %1,2 oranında artarak 2030'da 8,5 milyar, 2050'de ise 9,7 milyar olarak tahmin edilmiş ve kentsel alanlardaki nüfus artışının, dünya nüfusunun gelecekteki büyüme oranının neredeyse tamamını oluşturacağı öngörülmüştür (UN, 2019). Kontrolsüz kentsel büyüme, sınırlı (kıt) çevresel kaynakların etkin kullanılmasında ve sürdürülebilir kalkınma politikalarının uygulanmasında zorluklar oluşturmaktadır (UN, 2015). Kentsel büyümenin etkileri sadece doğal kaynakların zarar görmesiyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda kent sınırlarında oluşan konut alanları, kırsal yerleşmeler ve gecekondular arasında da sosyal ayrışmaya neden olmaktadır. Sürdürülebilir kent yönetimi bakış açısına göre kentsel büyümenin kontrol altına alınması gerekmektedir. Bu sebeple kentlerin en uygun şekilde yönetimi için kent dokusundaki değişimin yönü ve hızı tespit edilerek ve izlenerek uygulanabilir plan kararları alınmalıdır.

Kentsel büyüme, uzamsal-zamansal (spatio-temporal) dinamiklere sahip çok yönlü bir süreçtir ve arazi örtüsündeki değişimleri başlatan en önemli olgudur (Seto vd., 2011). Günümüzde büyümenin izlenmesi ve dönüşümlerin

belirlenebilmesi için kullanılan yöntemlerden en önemlisi modelleme yaklaşımıdır (Aien vd., 2017; Jantz vd., 2010; van Vliet vd., 2013; White, 1998). Modeller kentleşme dinamiklerinin tekrarlanması (Benenson & Torrens, 2004), kentleşmeyi başlatan faktörlerin keşfedilmesi (Jokar Arsanjani vd., 2013; Leao vd., 2004), kentsel büyüme dokusunun analizi (Aguilera vd., 2011; Shafizadeh Moghadam & Helbich, 2013), kentleşmenin mekânsal dokuyu nasıl etkilediği (Mitsova vd., 2011) ve üretilen çeşitli senaryolar ile gelecekteki sonuçların izlenmesi için kullanılabilir. (Santé vd., 2010; Verburg vd., 2004; Zhang vd., 2011).

Kentsel büyümeyi simüle etmek için üretilen hücresele otomat (HO) temelli modeller genellikle mekansal varlıkları düzenli parçalara indirgeyen raster veri modeli temsili kullanmaktadır. Fakat gerçekte arazi parçaları düzensiz yapıdadır ve raster veri modeliyle gerçekçi şekilde temsil edilememektedir. Arazi parçalarının vektör veri yapısında temsil edilmesi daha doğru ve hassas modellerin üretilmesini sağlayabilmektedir.

VHO modelinde hücreler, coğrafi varlıkların geometri ve özneliklerine göre sunulabilir. VHO modelinin geçiş kuralları, çalışma alanının kentleşme dinamikleri dikkate alınarak geliştirilebilir (Lu vd., 2015). Hücreler, kentsel gelişim, kent planlama ve arazi politikasındaki temel işlevsel birimdir. Kentsel büyüme, hücreye bağlı olarak arazi örtüsü türünün değişmesidir (Yao vd., 2021). Böylece her hücre diğerlerinden farklı olduğundan geçiş kurallarının oluşturulmasında komşuluk faktörleri ve etkileri daha esnek bir şekilde tanımlanabilecektir. VHO kapsamında son yıllarda gerçekleştirilen çeşitli araştırmalarda raster HO yerine VHO'nun kullanılmasıyla kentsel büyüme simülasyonu doğruluğunun önemli ölçüde arttığını göstermiştir (Lu vd., 2015; Yao vd., 2021; Zhuang vd., 2022).

Bu çalışmada, V-HO temelli simülasyon modelini geliştirilmesi amaçlanmıştır. Model İstanbul metropolitan alanında test edilmiştir. Çalışmada kullanılan veriler açık kaynaklardan elde edilmiştir. Model girdi verisi olarak 1990, 2000, 2006, 2012 ve 2018 yıllarına ait arazi örtüsü verisi, erişilebilirlik verisi 1990 ve 2018 tarihli olarak ve tek periyot sayısal yükseklik modeli verisi kullanılmıştır. Verilerin mekansal olarak analizi ve modele girdi olarak hazırlanması süreçleri Python ve Coğrafi Bilgi Sistemi ortamında gerçekleştirilmiştir. Modelin kalibrasyon aşaması geçmiş kentleşme karakteristiğini yakalaması için kritik öneme sahiptir. Bu aşamada Rastgele Orman (RO) algoritması ile geçmiş tarihli kentleşme eğilimleri araştırılmıştır. RO algoritmasının eğitim aşaması %82 (F1 skoru) doğrulukla tamamlanmıştır. Model 1990-2018 yılları arasında tahmin gerçekleştirilmiş olup, 2018 tarihli bilinen ile tahmin edilen durumlar arasında ROC eğrisi analizi gerçekleştirilmiş olup %85 oranında doğruluk elde edilmiştir. Elde edilen istatistikler, geliştirilen modelin iyi bir performansla KBSM oluşturduğunu göstermektedir. Kalibrasyon aşamasından sonrasında gerçekleştirilen 2040 yılı için KBSM ile potansiyel kentleşme alanları ve arazi örtüsü değişimleri belirlenmiştir. Simülasyon sonucuna göre 2018 ile 2040 yılları arasında kentsel alanlar 15.545 hektar boyutunda artmıştır. Bu miktarın 10.847 hektarı tarım arazilerinden 4.696 hektarlık alanı ise orman niteliğindeki alanlardan dönüşmüştür.

## 2. VERİ VE YÖNTEM

1990, 2000, 2006, 2012 ve 2018 yılları için Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) tarafından belirlenen standartlar doğrultusunda üretilmiş vektör yapıda CORINE arazi örtüsü/kullanımı verisi kullanılmıştır. 1990 yılına ait CORINE arazi örtüsü verisinin modelde başlangıç yılını temsil etmektedir. Erişilebilirlik verileri Open Street Map (OSM) web servisinden elde edilmiştir. Erişim verisinde birincil derecede öneme sahip il yolları, devlet yolları ve uluslararası yolların orta çizgisi göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 1. Araştırmada kullanılan veriler.

Veri	Dönem	Kaynak
Arazi Örtüsü	1990	CORINE Veritabanı
	2000	
	2006	
	2012	
	2018	
Erişilebilirlik	1990	Open Street Map ve Uydu Görüntüleri
	2018	
Bölgeleme	-	CORINE Veritabanı
Uygunluk	-	SRTM

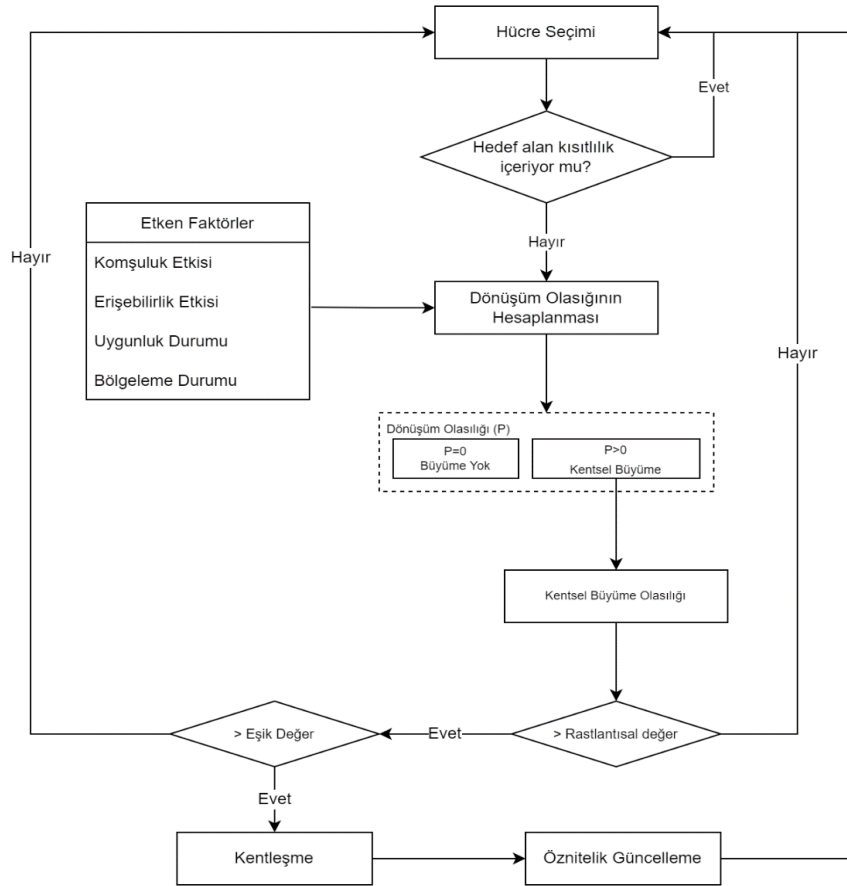
Geliştirilen V-CA temelli kentsel büyüme simülasyon modeli (UGSM), kentsel büyümenin tetiklediği arazi örtüsü değişikliklerini simüle etmektedir. Bu model, üç aşamalı bir süreçten oluşmaktadır. İlk aşama olan ön işleme, girdi verilerinin işlenmesi, raster ve vektör veri yapısına sahip verilerin uyumlaştırılması, mekansal hesaplamalarla

öznitelik çıkarımı ve çalışma alanına ait yerel parametrelerin belirlenmesi adımlarını içermektedir. İkinci aşama olan kalibrasyon, yerel alanın geçmiş büyüme eğilimlerinin gelecekte simüle edilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Bu aşamada, modelin kalibrasyonu için RO algoritması kullanılmaktadır. Kalibrasyon sonucunda elde edilen model ile çekirdek yıl 1990'dan final yıl 2018'e kadar hücresele otomata döngüsü içinde büyüme süreçleri gerçekleştirilir. Kontrol yılı olan 2018'de doğruluk değerlendirme ölçütleri hesaplanarak eğitilen modelin doğrulanması gerçekleştirilir. Tahmin aşamasında, hedeflenen yıl ile son kontrol yılı arasındaki yıl farkı kadar, eğitilmiş ve doğrulanmış model kullanılarak V-HO döngüsü çalıştırılır. Bu sayede çalışma alanına ait KBSM'ler üretilir. Üretilen KBSM'ler ile son kontrol yılına ait arazi örtüsü arasında değişim analizi yapılır ve yıl bazında haritalar ile değişim raporları çıktı olarak elde edilir.

Çoğu HO temelli modelde olduğu gibi geliştirilmesi amaçlanan model, kentsel alanın gelecekteki olası durumunu simüle etmek için dönüşüm kural ve faktörlerini uyguladığı bir başlangıç durumundan başlar. Modelde göz önüne alınan faktörler HO temelli kentsel büyüme modellerinde geleneksel olarak kullanılan eşitlik 1'de sunulan KEUB model şemasına dayanmaktadır (White, 1998).

$$P(x_i, t + 1) = f \left( D(x_i, t), \sum_{x_j \in K(x_i)} a_j D(x_j, t), U(x_i), E(x_i), B(x_i) \right) \quad (1)$$

Eşitlikte  $x_i$  hücresinin;  $t$  zamanındaki durumu  $D(x_i, t)$ , komşu hücre durumlarının ağırlıklı toplamı  $\sum_{x_j \in K(x_i)} a_j D(x_j, t)$  uygunluk faktörü  $U(x_i)$ , bölgeleme faktörü  $B(x_i)$ , erişebilirlik faktörü  $E(x_i)$  ile belirtilmiştir. Durum fonksiyonu ( $f$ ) faktörlerin etkileşimi ile hücre durumlarının  $t+1$  zamandaki dönüşüm potansiyelini hesaplar (Şekil 1).



Şekil 1. V-HO Temelli KBSM İşlem Akışı

ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrileri, model seçimi ve simüle edilen değişim ile gerçek değişimin karşılaştırılması yoluyla kentsel büyüme modelinin doğruluğunu değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Pontius & Millones, 2011). Bu yöntemde, model doğruluğunu görselleştirmek için Doğru Pozitif (TP) ve Doğru Negatif (TN) değerler ile Yanlış Pozitif (FP) ve Yanlış Negatif (FN) değerler üzerinden Doğru Pozitif Oranı (TPR) ve Yanlış Pozitif Oranı (FPR) hesaplanır. Modelin sınıflandırma başarısını ölçen AUC (Area Under the Curve) değeri hesaplanmaktadır. AUC değeri, sınıflandırma modelinin doğru pozitif ve yanlış pozitif oranlarını dikkate alarak modelin doğruluğunu ölçer.

## 2.1 Vektör Hüresel Otomat

Literatürde HO kavramının çeşitli tanımları yapılmıştır (Leao vd., 2004; Ménard & Marceau, 2005; Torrens & O'Sullivan, 2001; Wolfram, 1984). Genel olarak HO kavramı, girdilere, durumlara ve kurallara bağlı olarak özelliklerin zaman içinde değişen sistemlerin modellenmesinde kullanılan bir mekanizma olarak düşünülebilir (Benenson & Torrens, 2004). Wolfram (1984), HO'nun beş temel bileşenini tanımlamıştır, bunlar; grid ağı(hücrelerden oluşur), zaman, durum, komşuluk ve dönüşüm kurallarıdır. Ancak Wolfram tarafından tanımlanan temel HO bileşenlerinde çeşitli kısıtlılıklar vardır. Kısıtlılıklar kentsel büyüme gibi karmaşık bir sistemin modellenmesi için uygun olmamaktadır (Coculelis, 1985). Bu sebeple, HO temelli KBSM geliştirmek için bileşenlerde bazı değişikliklerin yapılması gerekli hale gelmiştir. Geleneksel HO teorisinden esnetilmiş V-HO teorisine bileşenler açısından incelemek gerekmektedir;

- Klasik HO temelli modeller, mekanı raster yapısındaki hücreler şeklinde düzenli birimler olarak temsil eder. Bu yapı küçük ölçekli süreçleri modellemek için uygun olabilir ancak kentsel yapı düzenli eşit hücrelerden değil, bir dizi düzensiz şekilli yapılardan oluştuğu için, kentsel büyüme sürecinin simülasyon kapasitesini sınırlamaktadır. Mekan temsiline arazi düzensizliğini göz önüne alan ve modeli daha gerçekçi kılan temel HO'nun düzenli hücreler tanımının dışında başka bir temsilin kullanılması literatürde uygun görülmektedir (Moreno vd., 2009; Pinto & Antunes, 2010; Stevens vd., 2007).
- Durum bileşenine yönelik geliştirmenin amacı, her bir durum kümesindeki her bir elemanın rolünü farklılaştırmaktır. Bazı hücreler dinamik arazi kullanımlarına sahipse, model süresince değişiklik gösterebilir; ancak hücre durumu statikse ve mevcut durumun değişmesini engelleyen bir kullanıma sahipse, model boyunca sabit kalacaktır (Barredo vd., 2004; White, 1998). Bu yaklaşım, her ne kadar HO teorisinin genişletilmesini içermese de, onun geliştirilmesine yönelik bir adımdır.
- HO teorisinde, Von Neuman (4 Hücre) veya Moore (8 hücre) komşuluklarında her bir bitişik hücrenin benzer ağırlıkta olduğu kabul edilir. Ancak bir hücre, yalnızca komşu hücrelerin durumları ile değil, aynı zamanda daha az etkiye sahip olsa da belirli bir mesafede bulunan hücre durumlarından da etkilenir (Torrens & O'Sullivan, 2001; White vd., 1997). Bir hücrenin durumunu mesafe ve mevcut durumunun fonksiyonu olarak değiştiren bir komşuluk ilişkisi, kentsel büyüme süreçlerini simüle ederken daha gerçekçi olacaktır (Barredo vd., 2004; Batty vd., 1999).
- HO teorisinde, dönüşüm kuralları sadece komşuluk ve hücre durumuna dayandırmasına rağmen bunlardan farklı olarak kentsel büyüme süreçlerinde birçok farklı türde faktörün dahil olması ihtiyacı açıktır. Erişebilirlik, uygunluk, fiziksel arazi karakteristiği ve sosyo ekonomik durum gibi faktörlerin dahil edilmesi ile oluşturulacak simülasyonlarda çok daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir (Barredo vd., 2004; Engelen vd., 1995; White, 1998). Dönüşüm kurallarına yer alan her bir faktör simüle edilen sürecin arkasındaki itici gücün bir parçası olmaktadır.
- HO'nun temel tanımına bağlı olarak, zaman düzenli aralıklarla modellenir (böylece eşzamanlılık sağlanır), bir başka ifade ile, modelin her zaman adımı veya yinelenmesi aynı zaman aralıklarında ve genellikle bir yıla eşdeğer olmaktadır. Arazi kullanımı değişikliklerinin tümü doğası gereği aynı zaman diliminde gerçekleşmez (Liu & Andersson, 2004). Değişim bir süreci içermektedir. Bu nedenle temel HO'nun bu açıdan esnetilmesi, farklı zaman atlama uzunluklarının kullanımını ve her bir arazi kullanımı tipine göre eşzamanlı bir güncellemeye geçilmesi ile gerçekleştirilir.

Yukarıda sunulan HO teorisinde gerçekleştirilen geliştirmeler arasında, yüksek çözünürlüklü şekilde kentsel dinamikleri simüle ederken faydalı olabilecek mekan temsilleriyle ilgili olanıdır. Arazileri temsil eden poligonlar, bu çalışmada oluşturulması amaçlanan model içinde minimum alan birimi olarak kabul edilmiştir ve böylece otomat teorisinin hücre bileşeni yapısı oluşturulmuştur. Her bir birim farklı arazi örtüsü sınıfını, belirli bir komşuluk ilişkisini ve etkisini, dönüşüm kurallarını içermektedir. Bununla birlikte parametrik HO temelli modellerin bazı yönlerini, özellikle komşuluk ilişkileri bu modelde yeniden tanımlamak gerekmektedir. Çünkü Moore veya Von Neumann gibi düzenli komşuluk ilişkilerinin bu modelde uygulanması mümkün değildir. Kenar-düğüm ağı ile hesaplama yüzeyi oluşturularak modelin komşuluk yapılanmasını sağlamıştır. Aynı zamanda modelin makul bir hesaplama süresi içinde çalışmasını sağlayacak bir hesaplama çözümü belirlemek gerekmektedir. Bu çalışmada çözüm yöntemi olarak geleneksel makine öğrenmesi algoritması Rastgele Orman kullanılmıştır.

## 2.2 Rastgele Orman Algoritması

Rastgele Orman (RO), denetimli öğrenme algoritmaları arasında yer alan güçlü bir topluluk yöntemidir. RO, karar ağaçlarının bir koleksiyonudur ve ağaçların her biri bağımsız olarak eğitilir (Breiman, 2001). Sonuç olarak, her bir ağaç belirli bir sınıflandırma problemi için tahminlerde bulunur ve nihai sonuç, bu ağaçların oy çoğunluğuna göre

belirlenir. RO algoritması kentsel büyüme modellemesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Amini vd., 2022; Guzman vd., 2022; Kamusoko & Gamba, 2015; Rienow vd., 2021). Karmaşık veri setleriyle çalışabilme ve parametreler arasındaki ilişkileri keşfetme yeteneği sayesinde kentsel büyüme ve arazi örtüsü değişikliklerini modellemek için tercih edilmektedir (Guzman vd., 2022).

Bir veri seti  $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$  olmak üzere, burada  $x_i$  girdi öznitelik vektörü ve  $y_i$  çıktı etiketidir. Ormanın B sayıda karar ağacından oluştuğunu varsayarsak, her ağaç veri setinin rastgele bir (bootstrap) örneğini ( $D_b \subseteq D$ ) kullanır. Her düğümde, rastgele olarak seçilen m özellik ( $M_b \subseteq M$ ) arasından en iyi bölme yapan karar ağacı oluşturulur. Her bir ağaç b, bir girdi vektörü x için bir tahmin  $h_b(x)$  üretir. Karar ağacı sınıflandırma yapıyorsa çıktısı bir sınıf etiketidir. Her bir ağacın tahmin ettiği sınıf etiketi bir oy olarak düşünülür ve en fazla oyu alan sınıf nihai tahmin olarak seçilir.

$$\hat{y} = \text{mod}(\{h_1(x), h_2(x), \dots, h_b(x)\}) \quad (2)$$

Model aynı zamanda tahmin edilen etiketlerin olasılık değerlerini de hesaplayabilmektedir. Aşağıdaki sınıf olasılıklarının hesaplanması denkleminde c, olası sınıflardan herhangi birisini temsil eder. Farklı bir ifade ile modelin tahmin etmeye çalıştığı kategorik çıktı değerlerinden biridir.

$$\hat{p}(y = c | x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B I(h_b(x) = c) \quad (3)$$

Eşitlik 3, x öznitelik vektörü verildiğinde çıktı y'nin c sınıfına ait olma olasılığını tahmin eder. Burada I gösterge (indicator) fonksiyonudur ve  $h_b(x)$  tahminin c sınıfına eşit olup olmadığını kontrol eder. Eğer eşitse, 1 değerini alır; aksi halde 0 değerini alır. Her bir x öznitelik vektörü üzerinden tüm tekil kategorik sınıf çıktıları için olasılıklar ayrı ayrı hesaplanır ve olasılık değerlerinin toplamı 1'e eşit olmalıdır.

### 3. BULGULAR

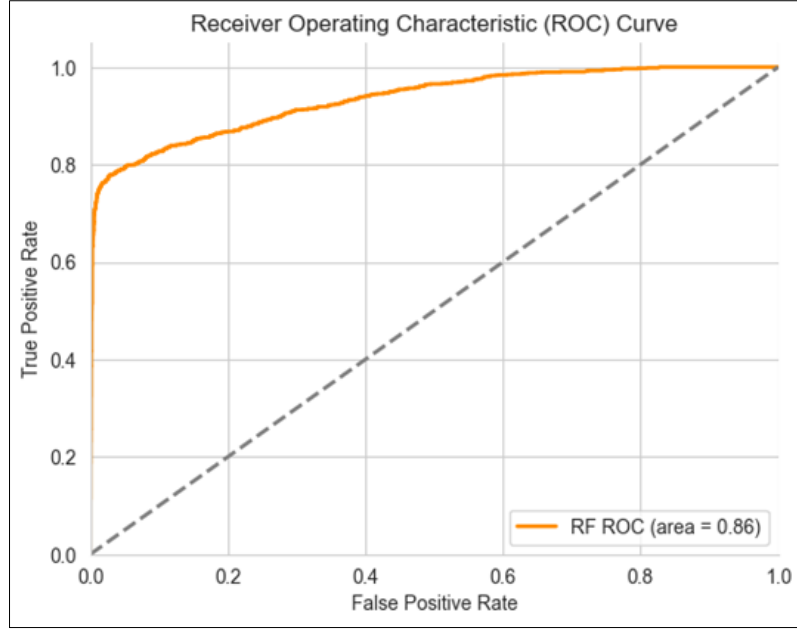
Geliştirilen modelde İstanbul'un kentsel büyüme dinamikleri üzerinde yapılan analizler, dört ana faktörün şehir gelişimi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır (Çizelge 2). İlk olarak, bölgeleme faktörünün %28 oranında etki ettiği belirlenmiştir. Bölgeleme, bir şehrin arazi kullanım politikalarını belirler ve yeni gelişim alanlarının nerede ortaya çıkacağını etkiler. Bu durum, kentsel alanların planlı bir şekilde genişlemesini sağlarken, altyapı ve hizmetlerin verimli dağıtımını da destekler. Modelde uygunluk, %18 oranında etkili bulunmuş olup, bir bölgenin topoğrafyası, doğal afet riski gibi fiziksel koşullara bağlı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. Parametre Etki Oranları

Parametre	Oran (%)
Bölgeleme	28.64
Uygunluk	18.71
Erişebilirlik	16.61
Komşuluk	36.04

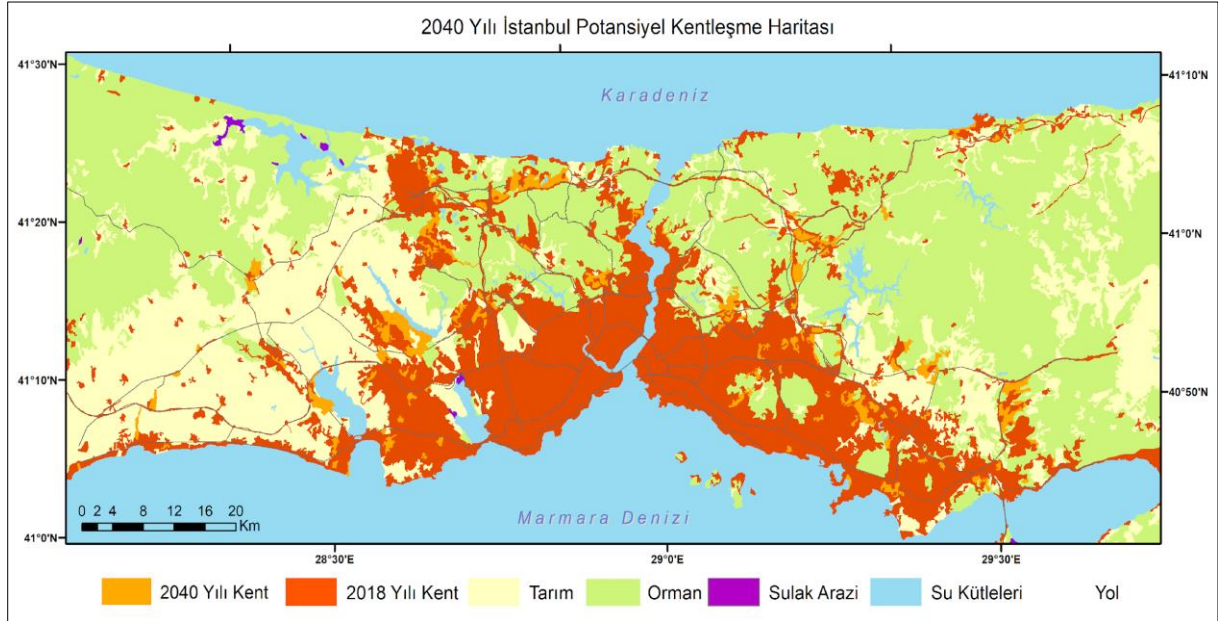
Erişebilirlik ise %16 oranında etki ile ulaşım altyapısının büyüme üzerinde ne kadar kritik olduğunu göstermektedir. İstanbul'un kentsel gelişiminde, ana arterlere ve toplu taşıma hatlarına yakınlık, yeni yerleşim alanlarının cazibesini artırmakta ve şehrin genişleme yönünü belirlemektedir. Son olarak, komşuluk faktörü %36 ile en güçlü etkiyi göstermektedir. Bu faktör, bir bölgedeki mevcut yapılaşma yoğunluğunun, komşu alanların gelişimine olan etkisini açıklamaktadır. Kentsel büyüme genellikle mevcut yerleşim alanlarının etrafında yoğunlaşır, bu da komşuluk etkisinin önemini ortaya koyar.

İstanbul'un 1990 ile 2018 yılları arasındaki döneme ait veriler üzerinden kalibrasyon yapılmıştır. 2018 yılı için modelin performansı, gerçek kentsel büyüme verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, ROC eğrisi analizi ile yapılmış olup, RO modeli ile elde edilen AUC değeri %86 olarak bulunmuştur (Şekil 2). %86'lık AUC değeri, modelin yüksek bir doğruluğa sahip olduğunu, kentsel büyüme dinamiklerini önemli ölçüde yakalayabildiğini ve simülasyonun gerçek verilerle büyük ölçüde uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, geliştirilen simülasyon modelinin kentsel planlama ve büyüme analizlerinde güçlü bir araç olabileceğini göstermektedir.



Şekil 2. V-HO KBSM'nin ROC Eğrisi

Oluşturulan KBSM ile 2040 yılına ait olası kentsel büyüme alanları tespit edilmiştir. Şekil 3'de turuncu alanlar 2018 ile 2040 yılına kadar olası kentleşme bölgelerini göstermektedir. 2018-2040 yılları arasında gerçekleştirilen değişim analizi sonuçlarına göre %11 oranında kentsel alanlarda artış belirlenmiştir. Kentsel alanlar 15545 hektar boyutunda artmıştır, bu miktarın 10847 hektarı tarım arazilerinden 4696 hektarlık alanı ise orman niteliğindeki alanlardan dönüşmüştür



Şekil 3. 2040 Yılı V-HO temelli KBSM

#### 4.SONUÇLAR

HO, karmaşık ve dinamik sistemlerin modellenmesinde sıklıkla tercih edilen önemli bir araçtır. Basit ve esnek yapısı, kent gibi sonsuz sayıda uzamsal ve mekansal dinamiklere sahip sistemlerin simüle edilmesini sağlamaktadır. Ancak standart HO bileşenlerinin uygulama kabiliyetlerini kısıtlayan sınırlılıkları vardır. Coğrafi varlıkların temsil kapasitesini arttırmak için bu bileşenlerde geliştirmeler yapılmalıdır. Bu çalışmada HO teorisi bileşenlerinde düzenleme yapılmıştır ve arazi parçalarının daha hassas temsil edebilecek vektör yapısına uyumu sağlanmıştır. Böylece VCA temelli yeni bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Çalışma, HO tabanlı kentsel büyüme

modellemesinde hücreleri vektörel bir temsil ile kullanılmasının uygulanabilirliği göstermiştir. Vektör veri yapısında hücresel işlerlik sağlamıştır.

Modeli test etmek için hızlı nüfus artışı ve düzensiz kentleşmeye sahne olan İstanbul metropoliteni çalışma alanı olarak tercih edilmiştir. Doğru bir KBSM oluşturabilmek için çalışma alanının tarihsel kentleşme karakteristiklerinin doğru şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Çalışma alanı genelinde kentleşmeye uygun bir öngörü ile simülasyon senaryosu oluşturulmuştur. Oluşturulan V-HO temelli KBSM sonuçlarına göre 2018 ile 2040 yılları arasında kentsel alanlar 15545 hektar boyutunda artmıştır. Bu miktarın 10847 hektarı tarım arazilerinden 4696 hektarlık alanı ise orman niteliğindeki alanlardan dönüşmüştür. Modelin doğrulaması metriklerle ölçülmüş ve %86 doğruluk elde edilmiştir. Elde edilen bulgular V-HO temelli kentsel büyüme simülasyon modellerinin gelecekteki arazi örtüsü değişikliklerini parsel ölçeğinde ve yüksek doğrulukla kestirilebileceğini göstermektedir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 124Y025 ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi BAP birimi tarafından M-2024-862 Nolu projeler kapsamında desteklenmektedir.

## KAYNAKLAR

**Aguilera, F., Valenzuela, L. M., ve Botequilha-Leitão, A.** 2011. Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99(3), 226-238.

**Aien, A., Rajabifard, A., Kalantari, M., ve Williamson, I.** 2017. Review and Assessment of Current Cadastral Data Models for 3D Cadastral Applications. İçinde A. AbdulRahman (Ed.), *Advances in 3d Geoinformation* (ss. 423-442). Springer International Publishing Ag.

**Amini, S., Saber, M., Rabiei-Dastjerdi, H., ve Homayouni, S.** 2022. Urban land use and land cover change analysis using random forest classification of landsat time series. *Remote Sensing*, 14(11), 2654.

**Barredo, J. I., Demicheli, L., Lavalle, C., Kasanko, M., ve McCormick, N.** 2004. Modelling Future Urban Scenarios in Developing Countries: An Application Case Study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 65-84.

**Batty, M., Xie, Y., ve Sun, Z.** 1999. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(3), 205-233.

**Benenson, I., ve Torrens, P.** 2004. *Geosimulation: Automata-based Modeling of Urban Phenomena*. John Wiley & Sons.

**Breiman, L.** 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.

**Couclelis, H.** 1985. Cellular Worlds: A Framework for Modeling Micro—Macro Dynamics. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 17(5), 585-596.

**Engelen, G., White, R., Uljee, I., ve Drazan, P.** 1995. Using cellular automata for integrated modelling of socio-environmental systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 34(2), 203-214.

**Guzman, L. A., Camacho, R., Herrera, A. R., ve Beltrán, C.** 2022. Modeling population density guided by land use-cover change model: A case study of Bogotá. *Population and Environment*, 43(4), 553-575.

**Jantz, C. A., Goetz, S. J., Donato, D., ve Claggett, P.** 2010. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(1), 1-16.

**Kamusoko, C., ve Gamba, J.** 2015. Simulating urban growth using a random forest-cellular automata (RF-CA) model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(2), 447-470.

**Leao, S., Bishop, Ian, ve Evans, D.** 2004. Simulating Urban Growth in a Developing Nation's Region Using a Cellular Automata-Based Model | Journal of Urban Planning and Development | Vol 130, No 3. *Journal of Urban Planning and Development*, 130(3), 145-158.

**Li, X., ve Gong, P.** 2016. Urban growth models: Progress and perspective. *Science Bulletin*, 61(21), 1637-1650.

- Liu, X., ve Andersson, C.** 2004. Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(1-2), 107-124.
- Lu, Y., Cao, M., ve Zhang, L.** 2015. A vector-based Cellular Automata model for simulating urban land use change. *Chinese Geographical Science*, 25(1), 74-84.
- Ménard, A., ve Marceau, D. J.** 2005. Exploration of Spatial Scale Sensitivity in Geographic Cellular Automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(5), 693-714.
- Mitsova, D., Shuster, W., & Wang, X.** 2011. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 141-153.
- Moreno, N., Wang, F., ve Marceau, D. J.** 2009. Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1), 44-54.
- Pinto, N. N., ve Antunes, A. P.** 2010. A Cellular Automata Model Based on Irregular Cells: Application to Small Urban Areas. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(6), 1095-1114.
- Pontius, R. G., ve Millones, M.** 2011. Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407-4429.
- Rienow, A., Mustafa, A., Krelaus, L., ve Lindner, C.** 2021. Modeling urban regions: Comparing random forest and support vector machines for cellular automata. *Transactions in GIS*, 25(3), 1625-1645.
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., ve Crecente, R.** 2010. Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), 108-122.
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., ve Reilly, M. K.** 2011. A meta-analysis of global urban land expansion. *PloS one*, 6(8), e23777.
- Shafizadeh Moghadam, H., ve Helbich, M.** 2013. Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, 40, 140-149.
- Stevens, D., Dragicevic, S., ve Rothley, K.** 2007. iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 761-773.
- Torrens, P. M., ve O'Sullivan, D.** 2001. Cellular Automata and Urban Simulation: Where Do We Go from Here? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 163-168.
- UN.** 2015. Take Action for the Sustainable Development Goals. *United Nations Sustainable Development*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- UN.** 2019. *World population prospects*. United Nations Department of International. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/MostUsed/>
- van Vliet, J., Naus, N., van Lammeren, R. J. A., Bregt, A. K., Hurkens, J., ve van Delden, H.** 2013. Measuring the neighbourhood effect to calibrate land use models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 55-64.
- Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst, M. J., ve Veldkamp, A.** 2004. Land use change modelling: Current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4), 309-324.
- White, R.** 1998. Cities and cellular automata. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2, 111-125.
- White, R., Engelen, G., ve Uljee, I.** 1997. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3), 323-343.
- Wolfram, S.** 1984. Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311(5985), Article 5985.
- Yao, Y., Li, L., Liang, Z., Cheng, T., Sun, Z., Luo, P., Guan, Q., Zhai, Y., Kou, S., Cai, Y., Li, L., ve Ye, X.** 2021. *UrbanVCA: A vector-based cellular automata framework to simulate the urban land-use change at the land-parcel level*.

**Zhang, Q., Ban, Y., Liu, J., ve Hu, Y.** 2011. Simulation and analysis of urban growth scenarios for the Greater Shanghai Area, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(2), 126-139.

**Zhuang, H., Liu, X., Yan, Y., Zhang, D., He, J., He, J., Zhang, X., Zhang, H., ve Li, M.** 2022. Integrating a deep forest algorithm with vector-based cellular automata for urban land change simulation. *Transactions in GIS*, 26(4), 2056-2080.