



Kentsel büyümenin vektör hücresel otomat yaklaşımı ile yüksek çözünürlüklü modellenmesi

Modelling urban growth in high resolution employing vector cellular automata approach

Ahmet Emir Yakup^{1*} , İsmail Ercüment Ayazlı² 

^{1,2} Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 58070, Sivas, Türkiye

¹ Hitit Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 19500, Çorum, Türkiye

Öz

Bu çalışma, coğrafi veri madenciliği (CVM) ile bütünleşik çalışan, vektör hücresel otomat (V-HO) tabanlı kentsel büyüme simülasyon modeli (KBSM) geliştirmeyi amaçlamaktadır. Coğrafi nesnelerin gerçek geometrilerini daha doğru şekilde temsil eden V-HO modelinin KBSM çalışmalarında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak raster tabanlı HO algoritmasına kıyasla, vektör veri yapısının karmaşıklığı ve düzensizliği, V-HO modellerinin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle esnek komşuluk ve hücresel işlerliğin sağlanmasındaki kısıtlılıkları aşmak amacıyla büyüme vektörleri (BV) yöntemi önerilmiştir. Modelde, arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini etkileyen mekânsal ve zamansal dinamikler Rastgele Orman (RO) algoritması ile analiz edilmiştir. Çalışma alanı olarak İstanbul'un Sancaktepe ilçesi seçilmiş, parsel seviyesinde arazi örtüsü/kullanımı değişimleri simüle edilerek %86 doğruluk oranı elde edilmiştir. Bulgularımız, vektör veri yapısının esnekliğinden yararlanılarak daha verimli, dinamik, doğru ve yüksek çözünürlükte simülasyonlar oluşturulabileceğini göstermektedir. 2040 yılına ait simülasyon sonuçları, mevcut kentleşme eğilimlerinin devam etmesi durumunda tarım alanlarında %25, orman alanlarında %3 ve açık arazilerde %21 oranında kayıplar yaşanabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Vektör Hücresel Otomat, Simülasyon, Arazi Örtüsü/Kullanımı Değişimi, Coğrafi Bilgi Sistemleri

1 Giriş

Hızlı ve kontrolsüz kentsel büyüme, doğal kaynakların tükenmesine, ekosistemlerin bozulmasına, yetersiz kentsel altyapıya ve yaşam kalitesinin düşmesine neden olmuştur. Bu bağlamda, arazi örtüsü/kullanım değişikliklerinin izlenmesi, kentsel büyümenin fiziksel, çevresel ve sosyo-ekonomik etkilerini azaltmaya yönelik stratejilerin araştırılması ve geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Kentsel büyümeyi simüle etmek için kullanılan HO modelleri, hem mekânsal hem de hesaplama kabiliyeti açısından oldukça verimli oldukları için, kentsel sistemlerin kendi kendini organize etme, kendine benzerlik, mekânsal-zamansal dinamikler ve doğrusal olmayan davranışlar gibi

Abstract

This paper aims to create a vector cellular automata (V-CA)-based urban growth simulation model (UGSM) integrated with geographic data mining (GDM). V-CA-based models, which more accurately represent the actual geometries of geographic objects, are becoming prevalent in UGSM studies. However, compared to the raster-CA algorithm, the complexity and irregularity of the vector data structure make implementing V-CA models difficult. Therefore, the growth vectors (GV) method suggests overcoming the limitations of flexible neighborhood and cellular operability. The model examines the spatio-temporal dynamics driving land cover/land use changes with the Random Forest (RF) algorithm. Istanbul's Sancaktepe district was selected as the study area, achieving an 86% accuracy rate in simulating land cover/use changes at the parcel level. Our findings demonstrate that vector data structure's flexibility allows more efficient, dynamic, accurate, and high-resolution UGSMs. Simulation results for 2040 indicate that if current urbanization trends continue, agricultural areas could lose 25%, forest areas 3%, and open lands 21%.

Keywords: Vector Cellular Automata, Simulation, Land Cover/Use Change, Geographical Information Systems

karmaşık özelliklerini etkili bir şekilde analiz edebilmektedir [1-3].

Düzenli yapıya sahip raster tabanlı HO modelleri, kentsel alanlardaki düzensiz, parçalı ve tutarsız geometrik nesnelerin oluşturduğu karmaşık arazi örtüsü/kullanım değişimlerini doğru bir şekilde yakalamakta zorlanabilir [4]. V-HO'da hücreler kentsel gelişim, planlama ve arazi politikasının temel birimleridir ve kentsel büyüme bu hücelere bağlı olarak arazi örtüsü/kullanımındaki değişimleri ifade eder [4]. Her hücre benzersiz olduğundan, dönüşüm kuralları belirlenirken komşuluk faktörleri ve etkileri daha esnek bir şekilde tanımlanabilir [5].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emiryakup@hitit.edu.tr (A. E. Yakup)

Geliş / Received: 27.01.2025 Kabul / Accepted: 17.03.2025 Yayınlanma / Published: 15.04.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1627880

Uygun hücre boyutunun seçilmesi raster HO için bir diğer önemli konudur, çünkü daha büyük hücre boyutu mekansal doğruluğu ve veri hacmini azaltmaktadır [6]. Vektör verilerin kullanılması coğrafi nesnelerin daha gerçekçi bir şekilde temsil edilmesini sağlar [7]. V-HO algoritmasında, arazi örtüsü/kullanımı gibi her bir nesne, komşuluk ilişkilerinden etkilenen çokgenlerle geometrik olarak temsil edilir. Nesnelerin zaman içindeki durum değişiklikleri bir dönüşüm fonksiyonu tarafından belirlenir [8]. Mekansal nesnelerin geometrisi ve öznitelikleri V-HO modelindeki hücrelere eklenebilir. Bu sayede modelin dönüşüm kuralları, arazi örtüsü/kullanımı değişiminin mekansal-zamansal dinamiklerini göz önünde bulundurarak türetilir. V-HO modelinde komşuluk, her bir coğrafi nesne üzerindeki etki bölgesi olarak tanımlanır ve komşular, etki bölgesi içinde yer alan coğrafi nesnelerdir [9].

Minimum alan birimi olarak düzenli hücrelerin kullanılması nesnelerin basitleşmesine ve model çıktılarının hücre boyutuna duyarlı hale getirebilir. Ülkemizde planlama uygulamalarında birim olarak mevcut kadastro parselleri baz alınmaktadır. Bu durum sadece bir ölçek sorunu değildir, modelde referans alınan birimin daha gerçekçi temsil edilmesidir. V-HO algoritmasının parsel bazında işlem yapabilme kabiliyeti sayesinde yüksek çözünürlüklü modeller kurulabilmektedir [10]. Son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar raster HO yerine V-HO'un kullanılması kentsel büyüme simülasyon doğruluğunun önemli ölçüde arttığını göstermiştir [11–13].

İlk V-HO temelli KBSM çalışmaları voronoi çokgenleri [14] ve delunay üçgenlemesi [15] ile geliştirilmiştir. Fakat çokgenler otomatik oluşturulmakta ve gerçek coğrafi nesneler ile uyuşmamaktaydı. Parsel bazında V-HO algoritmasının ilk uygulaması, Kanada'nın Quebec bölgesinde VecGCA modeliyle gerçekleştirilmiş ve literatürde öncü bir örnek olarak gösterilmiştir [8]. Çin'deki bir dizi çalışma, V-HO'nun KBSM'inde pratik ve uygulanabilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur [12,16–18]. Madrid'de ise çizge teorisi, V-HO algoritmasına entegre edilerek hesaplama süresinin optimize edilmesi ve algoritmanın işlerliği incelenmiştir [7]. Günümüzde model kalibrasyon aşamasına yönelik V-HO ile CVM algoritmalarının birlikte kullanımı ön plana çıkmıştır [12,13,19].

Veri madenciliği, büyük veri kümelerinden anlamlı bilgi ve desenler elde etmek için istatistiksel analiz, yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanıldığı bir süreçtir. CVM ise, mekansal-zamansal verilerdeki gizli desenleri ve ilişkileri keşfetmek amacıyla bu teknikleri coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile birleştirir [20–22]. V-HO algoritmasında dönüşüm kurallarının madenciliği kritik öneme sahiptir; ancak düzensiz yapı, bu kuralların belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Dönüşüm kuralları, arazi örtüsü/kullanımları ile mekansal-zamansal dinamikler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri ifade etmektedir [13]. Raster HO'da kullanılan CVM yöntemleri, V-HO modellerinde de dönüşümleri belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, RO yöntemi hem raster HO hem de V-HO modellerinde dönüşüm kurallarının belirlenmesinde sıklıkla uygulanmıştır [4,12]. Bu çalışma

kapsamında geliştirilen modelin kalibrasyon aşamasında hızlı ve yüksek doğrulukla çalışma özelliklerinden dolayı RO algoritması tercih edilmiştir.

Çalışmanın temel amacı, kentsel büyümenin neden olduğu arazi örtüsü/kullanımı değişimlerinin, vektör veri yapısı ile çalışan V-HO temelli KBSM ile belirlenmesidir. Bu doğrultuda parsel bazlı çalışabilen yeni bir V-HO temelli KBSM geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen modelin amacı, vektör veri yapısını kullanarak düzensiz, esnek ve dinamik hücresel işlerliği sağlamak ve bunu büyüme vektörü (BV) adı verilen yeni bir hesaplama katmanı aracılığıyla gerçekleştirmektir. Bu yaklaşımla, arazi ve hesaplama yüzeylerinin ayrıştırılması sayesinde hesaplama süresinin azaltılması ve aralarındaki dönüşümlerin mümkün kılınması hedeflenmiştir. Ayrıca, BV'ler ve CVM algoritması aracılığıyla yeni dinamik komşuluk ve dönüşüm kuralları yapılandırılmıştır.

Çalışma alanı olarak 2008 yılında üç beldenin birleştirilmesi ile oluşan ve yaşanan hızlı nüfus artışı neticesinde kentleşme faaliyetlerinin yoğun olduğu İstanbul'un Sancaktepe ilçesi seçilmiştir. Modelin girdi verileri arazi örtüsü, erişebilirlik, uygunluk ve planlama başlıklarında toplanmaktadır. Arazi örtüsü/kullanımı verisi parsel bazlı olarak 2001, 2014 ve 2024 dönemleri için Tapu ve Kadaströ Müdürlüğünden alınan kadaströ haritalarından ve bu dönemlere ait tescile konu olmayan alanlar uydu görüntüleri ile giderilmiştir. Erişebilirlik verileri 2001, 2013 ve 2024 dönemleri için Open Street Map (OSM) açık kaynak web servisinden ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB)'den temin edilmiştir. Topografik uygunluk için ihtiyaç duyulan sayısal yükseklik modeli (SYM) Harita Genel Müdürlüğünden (HGM) alınan raster yapıda SYM-12 ürününden karşılanmıştır. Planlama verileri bölgenin 1000 ölçekli onaylı uygulama imar planı ile oluşturulmuştur. Model tamamen günümüzde CBS için yaygın kullanılan açık kaynak nesne yönelimli programlama dili olan Python ortamında geliştirilmiştir. V-HO modelinin kalibrasyon aşamasında, bölgedeki geçmiş kentleşme eğilimleri ve mekansal-zamansal dinamiklerinin etkileri RO algoritması ile belirlenmektedir.

Çalışma, vektör veri yapısıyla çalışabilen bir V-HO temelli KBSM geliştirmeyi, BV yaklaşımının hücresel işlerlik sağlamadaki hesaplamalı ve operasyonel uygulanabilirliğini doğrulamayı, bütünsel RO-VHO algoritması ile bir kalibrasyon prosedürü oluşturmayı, modeli Sancaktepe İlçesi üzerinde test ederek 2040 yılı için bir KBSM geliştirmeyi ve bölgedeki arazi örtüsü/kullanım değişimlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda 2001'den 2014'e kadar üretilen BV'ler RO-VHO algoritması ile eğitilmiş ve F1 skor metriği ile değerlendirilmiştir. Doğrulama aşamasında 2014'den 2024 yılına kadar KBSM'ler oluşturulmuş ve alıcı işletim karakteristiği (ROC) eğrisi üretilmiş ve eğrinin altında kalan alan (AUC) değeri hesaplanmıştır. Simülasyon aşamasında 2040 yılına kadar bölgedeki mevcut kentleşme eğilimlerinin devam edeceği senaryosu ile KBSM üretilerek arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini belirlenmiştir.

Makale dört bölümde düzenlenmiştir: giriş bölümünde çalışmanın kavramsal çerçevesi, amacı, literatür ve özgün

değeri sunulmaktadır. İkinci bölümde çalışmanın metaryal ve yöntemleri açıklanmıştır. Bu bölümde, geliştirilen V-HO temelli modelin iş akışı, modelin kalibrasyon süreci ve doğrulama aşamaları ile çalışma alanı ve veri işleme adımları ele alınmaktadır. Üçüncü bölümde modelin çalışma alanında uygulanması ile elde edilen bulgular özetlenmektedir. Makale sonuçlar ve tartışma bölümü ile tamamlanmıştır.

2 Materyal ve Metot

2.1 V-HO temelli KBSM

V-HO temelli KBSM, kentsel büyümenin neden olduğu arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini simüle etmektedir. Model nesne yönelimli programlama dili olan Python ile geliştirilmiştir. Python ortamında açık kaynak mekansal analiz (OGR, Geopandas, Rasterio, Scikit-learn) ve yerleşik kütüphanelerin (Build-In) kullanımı sayesinde yazılım kısıtlamalarından kaçınmak ve esnekliğin sağlanması amaçlanmıştır. Model başlangıcı için ihtiyaç duyulan değişkenler oluşturulan senaryo dosyasında yapılan belirtmeler ile tanımlanabilmektedir.

V-HO temelli KBSM; kalibrasyon ve simülasyon olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Model başlangıçta datum, projeksiyon, senaryo dosyasındaki değişkenler ve girdi verilerinin uygunluğu denetlenmektedir. Böylece model, çalışmaya başlamak için ihtiyaç duyduğu veri ve değişkenleri kontrol etmektedir. Geçmiş büyüme karakteristiğinin belirlenmesi için kalibrasyon aşamasına geçilmektedir. Son olarak simülasyon kısmında KBSM oluşturulmaktadır. Model, arazi parçalarını vektör veri yapısına sahip çokgenler olarak temsil etmektedir. Her bir çokgen, hücre olarak temsil edilmekte ve düğüm-kenar yapısına indirgenmektedir. Bu yapı modelin temel büyüme döngüsündeki hesaplama katmanını oluşturmakta ve bir sonraki döngüde kentleşecek hücreleri belirlemektedir.

Model KEUB yapısına dayanan dört faktörü içeren bir eşitliği kullanır [23].

$$PE_i^t = \left(\sum_{j=1}^n K_{i,j} \right) E_i U_i B_i \quad (1)$$

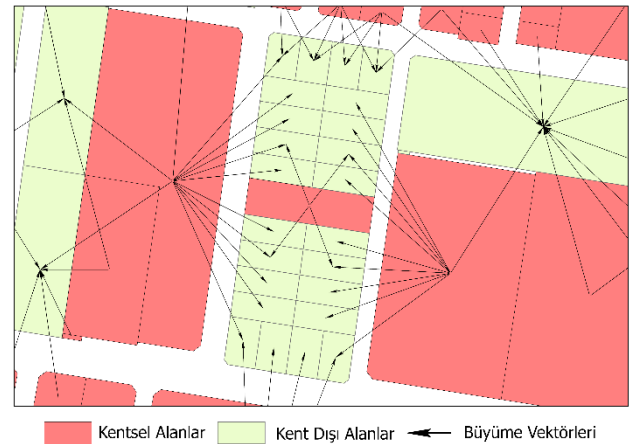
Denklem (1)'de K komşuluk, E erişebilirlik, U uygunluk ve planlama B harfleri ile belirtilmiştir. Dört etken faktörden her biri parsel düzeyinde bir tekil değer almaktadır.

Komşuluk, mekanın etkileşimini tanımlamaktadır. Sadece hangi parsellerin komşular olduğunu tanımlamaz, aynı zamanda komşu arazi örtüsü sınıfının etkisini ölçer. Etken parametrelerden bir diğeri erişebilirliktir. Farklı bir ifade ile yol ağına olan yakınlıktır. Kentsel alanlar yüksek kapasiteli bir ulaşım ağına ihtiyaç duymaktadır. Uygunluk, bir parselin bir arazi kullanımına sahip olabilmesi için doğal veya yapısal kapasitesidir. Bu parametrede sıklıkla, yükseklik, eğim, bakı veya jeolojik yapı gibi çeşitli değişkenler dahil edilir. Komşuluk, erişebilirlik ve uygunluk, parsellerin coğrafi ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Planlama parametresi ise yasal özellikleriyle ilişkilidir. Planlama durumu, parsellerin taşınmaz hukuku, üst ve alt ölçekli planlar kapsamında yasal durumlarını belirtmektedir.

Parselin plan ve yasal düzenlemelerden gelen hak ve kısıtlılıklarının modele dahil edilmesini sağlamaktadır.

Wolfram [24], HO'nun beş temel bileşenini tanımlamıştır: kafes alanı (grid network), komşuluk, dönüşüm kuralları, zaman ve durum. Modelde, HO teorisini vektör veri yapısıyla uyumlu ve birlikte çalışabilir hale getirmek için kafes alanı ve komşuluk bileşenlerinde düzenlemeler yapılmıştır. Kafes alanını oluşturan düzenli birimler hücre olarak temsil edilir. Bu yapı, raster veri yapısıyla doğrudan uyumlu olmasına rağmen, kentsel yapı düzenli eşit hücrelerden değil, bir dizi düzensiz geometriden oluşmaktadır [5,25]. Bu nedenle V-HO KBSM, minimum alan birimi (hücre) olarak parsel geometrilerini baz almaktadır. Her bir hücre farklı arazi örtüsü/kullanımı tipini, komşuluk ilişkisini ve dönüşüm kuralını taşımaktadır.

Komşuluk bileşeni, hücre durumlarının bir sonraki nesilde dönüşümlerini belirlemektedir. Von Neuman (4 hücre) ve Moore (8 hücre) komşulukları, komşuluk ilişkilerini tanımlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak yalnızca düzenli yapıda bitişik hücrelerin benzer ağırlıkta olan etkisi değerlendirilmektedir. Bir hücrenin durumunu mesafe ve mevcut durumunun fonksiyonu olarak değiştiren bir komşuluk ilişkisi, kentsel büyüme süreçlerini simüle ederken daha gerçekçi olmaktadır [26,27]. Moore veya Von Neumann gibi düzenli komşuluk ilişkilerinin bu modelde uygulanması mümkün değildir. V-HO modelinde her bir hücre belli bir etki alanına sahiptir ve etki alanına denk gelen coğrafi nesneler komşu hücre olarak tanımlanır. Oluşturduğumuz komşuluk belirleme fonksiyonu, hücrelerin (çokgen) kenarlarına tampon (buffer) analizi uygulamakta ve oluşan tampon alan ile kesişim (intersection) analizi gerçekleştirmektedir. Modelde BV ismini verdiğimiz hesaplama katmanı oluşturularak komşuluk yapılanması sağlamıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Büyüme Vektörleri

Parsellere ait çokgenler ve öznitelikleri nokta-düğüm yapısına soyutlanarak BV'ler elde edilir. Her bir düğüm kendisine ilişkin öznitelik bilgilerini (arazi örtüsü, uygunluk, planlama, komşuluk ve çokgene dair tanımlayıcı bilgiler) depolamaktadır. Komşu düğümler arasında oluşan kenarlar, iki düğüm arasındaki mekansal etkileşimi tanımlamaktadır. Bir BV iki düğüm bir kenardan oluşmaktadır. BV'leri

oluşturan düğümlerin arazi örtüsü tipine bağlı olarak yönleri vardır. Eğer bir BV'nin başlangıç düğümü kent (U) tipinde ve kırsal (N) nitelikte bir düğüme bağlanıyorsa yönü UN olarak etiketlenir. Kentsel ve kırsal olarak ikili bir kombinasyona göre modelde; NU, UN, NN, UU dört farklı etiket kullanılır.

BV kenar uzunluk verilerinin, kentleşmeye etken olası azami tekil mesafe değerini tespit etmek amacıyla gamma dağılımı kullanılmıştır. Gamma dağılımı iki parametre ile tanımlanır bunlar; şekil (α) ve ölçeği (β) [28]. Mesafe verilerinin gamma dağılımına uygunluğunu değerlendirmek amacıyla Kolmorov-Smirnov (KS) testi uygulanmıştır. Gözlemlenen (ölçülen-hesaplanan) uzunlukların kümülatif dağılımı ($\hat{F}_n(x)$) ile teorik kümülatif dağılım ($F_{gamma}(x; \alpha, \beta)$) arasındaki en büyük mutlak farkı ölçer; bu fark, KS istatistiği olarak adlandırılır. Burada D_n , KS test istatistiğidir ve Denklem (2)'deki gibi ifade edilir [29]:

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} |\hat{F}_n(x_i) - F_{gamma}(x_i; \alpha, \beta)| \quad (2)$$

Eğer test sonucunda elde edilen KS istatistiğinin anlamlılık düzeyi 0,05 değerinden büyük ise, veri setinin gamma dağılımına uygun olduğu kabul edilir [30]. En olası azami mesafe değeri (d_{max}), dağılımın Denklem (3)'te belirlenen noktasına denk gelen mesafe değeri olarak belirlenir.

$$d_{max} = loc + \alpha \times \beta \quad (3)$$

Düzensiz yapı nedeniyle her bir hücrenin komşuları, hücre büyüklüğü ve arazi örtüsü sınıfına göre birbirinden farklı sayıda ve etkide olmaktadır. Komşu hücrelerin etkisini hesaplamak için, arazi örtüsü sınıfına, d_{max} değerine ve komşu hücre arasındaki mesafeye göre bir çekme veya itme değeri (E_{ij}) sağlayan üçüncü dereceden polinomal (küresel-gaussian) fonksiyon kullanılmıştır. Bu fonksiyon tüm kenarlara uygulanır.

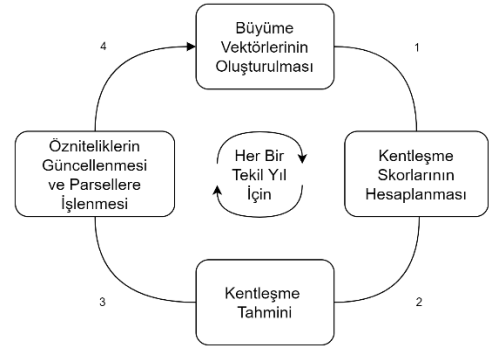
Denklem (4)'te P_i^t seçilen hücrenin t zamanında kentleşme potansiyelini, PE_i^t etken parametrelere dayalı olarak hücrenin dönüşüm olasılığı, K_i^t seçilen i hücresinin komşuluk etkileşimlerine dayalı dönüşüm olasılığıdır. Rassal değişken (RD) hesaba katılmayan sonsuz sayıdaki etken faktörü (stokastik faktör) temsil eden parametredir.

$$P_i^t = PE_i^t \times K_i^t \times RD \quad (4)$$

Denklem (5)'te kenarı oluşturan düğümlerin (P_i , P_j) ve kenarın (E_{ij}) skorları çarpılarak sonuç kentleşme skoru (P_{ij}) elde edilmektedir.

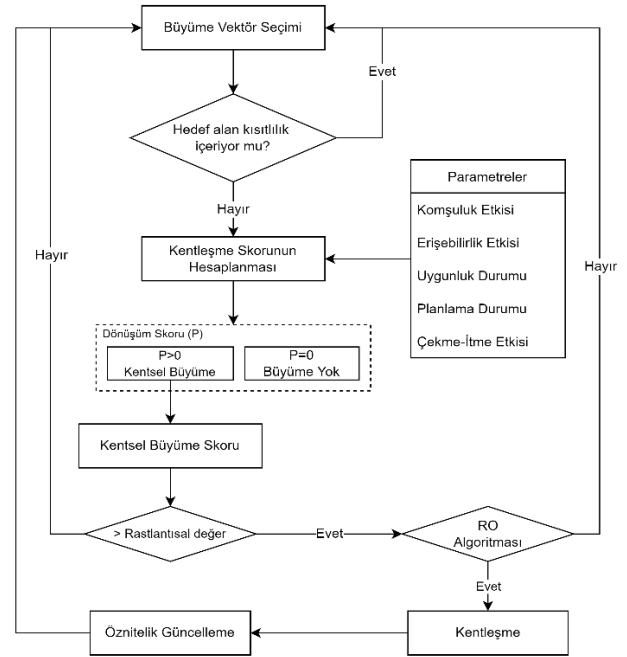
$$P_{ij} = P_i \times P_j \times E_{ij} \quad (5)$$

Tüm aşamalarda modelin en temel işlem birimi olan büyüme döngüsü çalışmaktadır. Bir büyüme döngüsü bir tekil yıla denktir. Her bir iterasyonda dört aşama vardır ve bu aşamalar sırasıyla birbirini izlemektedir (Şekil 2). Hem kalibrasyon hem de simülasyon aşamalarında çalışan fonksiyondur.



Şekil 2. Büyüme Döngüsü

Büyüme döngüsündeki kentleşme tahmini aşaması Şekil 3 ile sunulmuştur. Karar aşaması bir sonraki yılda kentleşecek parsel geometrilerinin belirlendiği aşamadır. Hesaplanan dönüşüm skorları değerlendirilir ve kalibrasyon aşamasında elde edilen Rastgele Orman modeli ile tahminler gerçekleştirilir.



Şekil 3. Karar Prosedürü

2.2 Rastgele Orman algoritması ile model kalibrasyonu

RO denetimli öğrenme algoritmaları arasında yer alan güçlü bir topluluk yöntemidir [31]. RO, karar ağaçlarının (decision trees) bir koleksiyonudur ve ağaçların her biri bağımsız olarak eğitilir. Sonuç olarak, her bir ağaç sınıflandırma problemi için tahminlerde bulunur ve nihai sonuç, ağaçların oy çoğunluğuna göre belirlenir. Karmaşık veri setleriyle çalışabilme ve parametreler arasındaki ilişkileri keşfetme yeteneği sayesinde kentsel büyüme ve arazi örtüsü/kullanımı değişikliklerini modellemek için sıklıkla tercih edilmektedir [32–36].

Bir veri seti $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ olmak üzere, burada x_i girdi öz nitelik vektörü ve y_i çıktı etiketidir. Ormanın B sayıda karar ağacından oluştuğunu varsayılırsa, her ağaç veri

giderilmiştir. Dönemler kadastro paftası üretim tarihleri ve imar uygulamalarının yoğunluğu değerlendirilerek belirlenmiştir.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Veriler

Veri	Kaynak Veri Türü	Dönem	Kaynak	Veri Yapısı
Arazi Örtüsü/Kullanımı	Kadastral Veriler, Uydu Görüntüleri	2001 2014 2024	TKGM	Vektör
Ulaşım	İBB, Açık Kaynak Veriler	2001 2013 2024	TKGM, OSM, İBB	Vektör
İdari Sınır	İdari Sınır	-	İBB	Vektör
Eğim	SYM-12	-	HGM	Raster
Planlama	Uygulama İmar Planı	-	Belediye	Vektör

Erişebilirlik parametresine ait veriler; 2001 dönemi kadastral paftalardan sayısallaştırma ile, 2013 dönemi İBB'den yol orta çizgisi şeklinde ve 2024 dönemi açık kaynak mekansal veri servisi olan OSM'den elde edilmiştir. OSM verileri, 2001 ve 2013 dönemine ait veriler ve referans altlık haritalarla (basemap) karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Modelde, yol ağına olan en kısa mesafe tampon analizi ile hesaplanmakta ve üç kademeli erişebilirlik değerleri üretilmektedir: 500 metre mesafe yakınındaki alanlar tam uygun, 500-1000 metre arasında olanlar yarı-uygun, ve 1000 metreden uzak olanlar düşük uygunluk olarak değerlendirilmektedir [40,41].

Modelde sadece eğim değişkeni uygunluk parametresi olarak kullanılmakta ve 12 metre mekansal çözünürlüklü SYM verisinden üretilen yüzdesel eğim verisi kullanılmıştır. SYM verisinin raster yapısı nedeniyle vektör yapıdaki parsel verisi arasında iki katmanı ilişkilendirecek bir mekansal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile her bir parselde denk düşen eğim değerlerinin ortalaması alınarak tekil bir eğim değeri hesaplanmıştır. Bölgede yapılan analiz sonucunda %46'a kadar bir eğimde kentleşme faaliyetlerinin olduğu belirlenmiştir. Böylece modelde çalışma alanının kritik eğim değeri %46 olarak belirlenmiş ve bu değer altındaki parseller için uygunluk derecesi, eğim değeri sıfıra yaklaştıkça artan bir doğrusal derecelendirme ile hesaplanmıştır.

Planlama parametresi için ilçenin 1/1000 ölçeğindeki uygulama imar planından genel ve kamusal hizmet alanları belirlenmiştir. Model bu parametrede, 0-1 değerleri arasında doğrusal bir önceliklendirme uygulamaktadır. Değer 0'a yaklaştıkça kentleşme olasılığı düşmekte 1 değerine yaklaştıkça kentleşmeyi teşvik etmektedir. Bu doğrultuda konut veya belediye/kamusal hizmet yapıları olarak fonksiyonlandırılmış alanlarda değer 1; park, yeşil alan, bölge parkı ve mezarlık olarak ayrılan alanlarda ise bu değer 0 olarak belirlenmiştir. Çalışma alanında tarihsel dönemler arasında orman alanlarının dönüşüm yüzdesi %13 olarak belirlenmiştir [39]. Bu değerini tümleyen alınarak orman alanları %87 oranında (0.13) kısıtlanarak planlama verisine dahil edilmiştir. Böylece orman alanlarında mevcut eğilimin gelecekteki büyüme oranıyla sürdürülebilir kılınması hedeflenmiştir.

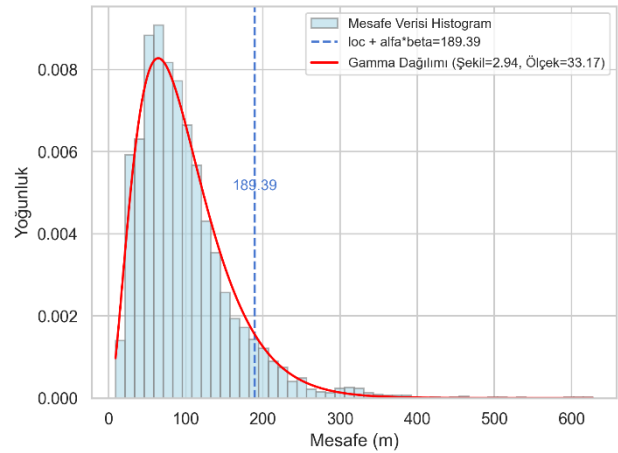
3 Bulgular

Makalenin bu bölümünde, çalışmada geliştirilen V-HO temelli KBSM'nin Sancaktepe İlçesinde test edilmesi, performansı ve uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi ele alınmıştır. İstanbul Sancaktepe İlçesindeki arazi örtüsü/kullanımı değişimleri, vektör veri yapısına sahip yüksek çözünürlüklü kadastral veriler kullanılarak mevcut kentleşme eğilimlerinin sürececeği senaryosu altında araştırılmış ve elde edilen bulgular sunulmuştur. Hızlı nüfus artışı çalışma alanı içinde bulunan doğal alanlar üzerinde kentleşme baskısı oluşturmuştur. İlçede 2001-2024 yılları arasında gerçekleşen kentsel büyüme neticesinde; tarım, orman ve açık arazileri sırasıyla %22.1 (337,11 ha), %4.13 (93,75 ha), %35.2 (75,95 ha) oranlarında azalmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. 2001-2024 arasında arazi örtüsü değişimleri

Arazi Örtüsü	2001 (ha)	2014 (ha)	2024 (ha)	Değişim	
				2001-2014	
				(+)	(-)
Kent	1541,95	1925,88	1932,33	%25,3	
Tarım	1526,66	1190,07	1189,55		%22.1
Orman	2270,17	2196,81	2176,42		%4.13
Açık A.	215,74	161,33	139,79		%35.2

Geçmiş dönemlerdeki kentleşme eğilimlerinin belirlenmesi amacıyla 2001-2014 ve 2014-2024 aralıklarında BV'ler oluşturulmuştur. Geçmişte kentleşme yaratan BV öklid uzunluk değerlerinin (gözlemlenen) sürekli dağılımı ile referans gamma dağılımı arasındaki uyum incelenmiştir (Şekil 5). Dağılımın uygunluğu istatistiksel denetimi için KS testi uygulanmış ve elde edilen KS test istatistiği (0,012535) ile anlamlılık düzeyi (0,05) karşılaştırılmıştır. Elde edilen dağılım vasıtasıyla BV kenar uzunluğu azami etki değeri (d_{max}) çalışma alanına özgü olarak 189 metre olarak belirlenmiştir.



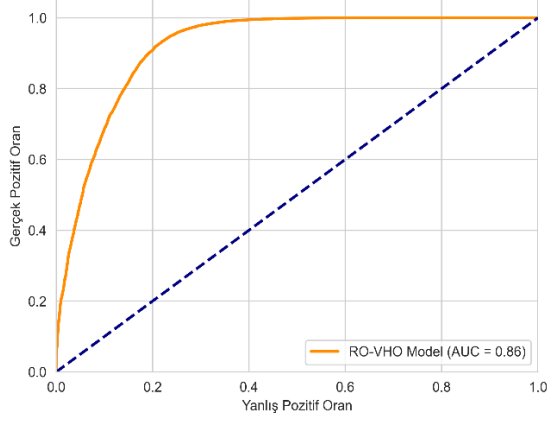
Şekil 5. Mesafe ve Gamma Dağılımlarının Karşılaştırmalı Grafiği

V-HO temelli KBSM'nin kalibrasyon aşamasında 2001-2014 yılları arası döneme ait BV'ler RO Algoritması ile

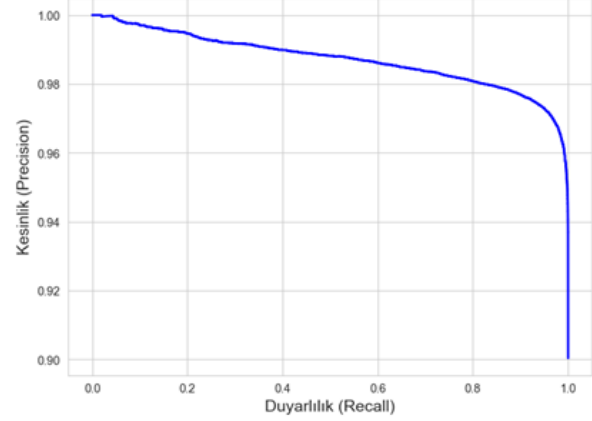
eğitilmiştir. Sancaktepe için üretilen RO-VHO sınıflandırma modeli test seti ile karşılaştırılmış ve performans metrikleri elde edilmiştir. Buna göre RO-VHO algoritması kullanılarak %83 F1 skor değeri ile eğitim aşaması tamamlanmıştır.

Elde edilen RO modeli ile V-HO temelli KBSM'nin doğrulaması (validation) için 2014 tarihli dönemden 2024 yılı için KBSM oluşturulmuştur. 2024 yılında simüle edilen

harita ile mevcut (bilinen) harita arasında ROC eğrisi analizi yapılarak AUC istatistiği hesaplanmıştır. Analiz sonucuna göre AUC değeri 0.86 olarak belirlenmiştir, bu değer RO-VHO modelinin kentleşme/kentleşmeme ayırt etme performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir (Şekil 6). Kesinlik-Duyarlılık eğrisi de çizdirilmiştir, grafiğe göre kesinlik ve duyarlılık arasında denge gözlemlenmiştir.

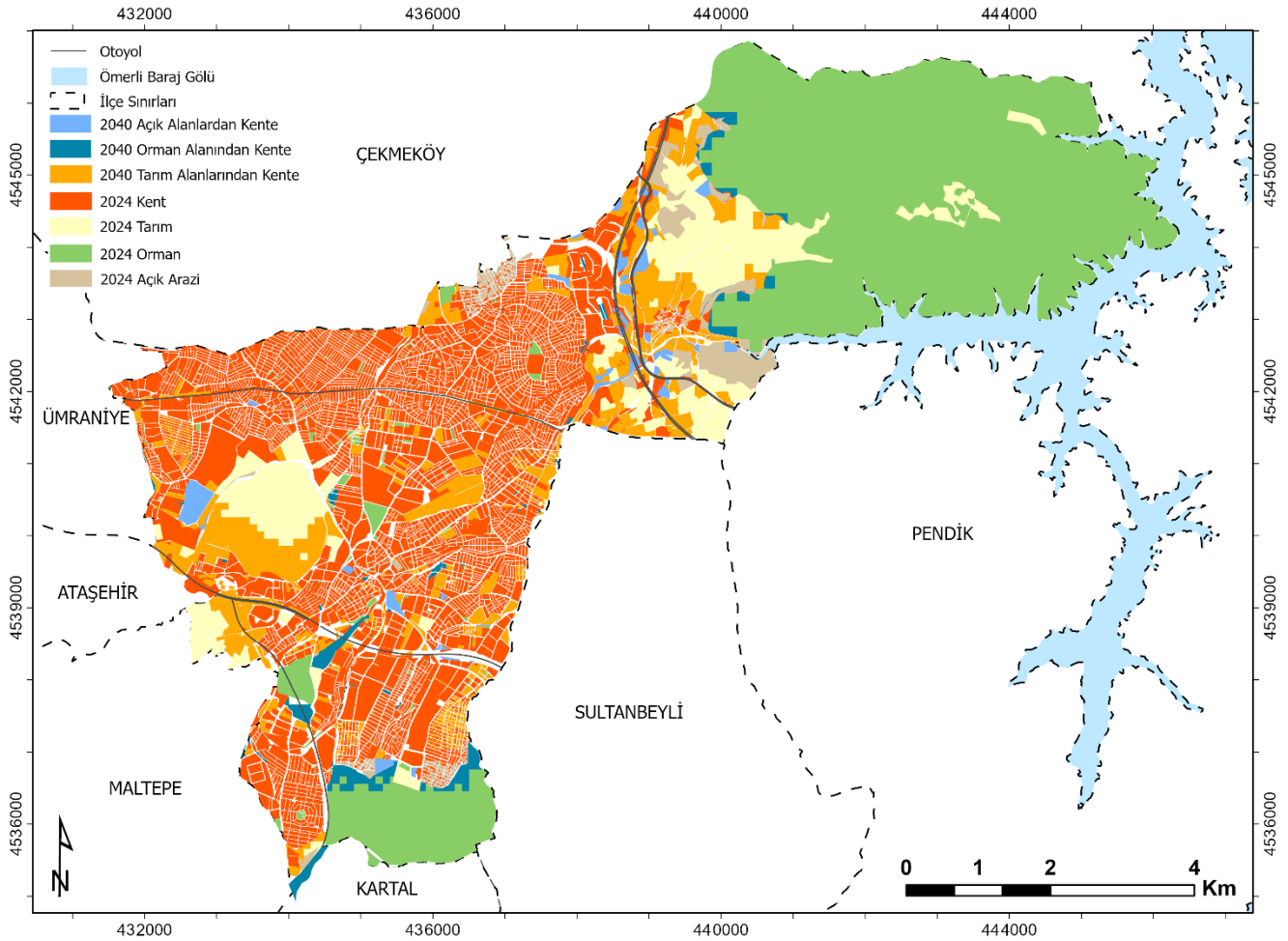


(a)



(b)

Şekil 6. ROC (solda) ve Kesinlik-Duyarlılık (sağda) Eğrileri



Şekil 7. 2040 yılı simüle edilen potansiyel arazi örtüsü değişimleri

Bağımsız değişkenlerin model üzerindeki etkileri RO-VHO model ile belirlenebilmektedir. Çalışmada kullanılan dört bağımsız değişkenin sıralaması ve etki oranları **Tablo 3** ile sunulmuştur. Sonuçlara göre bölgenin topografyası ile ilişkili olan uygunluk en yüksek etkiye sahipken, planlama ise modelde en düşük etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Bağımsız Değişkenlerin Etkileri

Etki Sırası	Bağımsız Değişken	Etki Oranı (%)
1	Uygunluk	41,5
2	Komşuluk	35,95
3	Erişebilirlik	22,43
4	Planlama	0,12

Kalibrasyon aşamasında elde edilen RO modeli, hesaplanan bağımsız değişken etki oranları ve BV etki mesafe değerleri ile simülasyon aşamasında 2040 yılı için KBSM oluşturulmuştur (**Şekil 7**). Simülasyon modeli sonuçlarına göre çalışma alanında 2024-2040 yılları arasında %21 oranında kentsel büyüme meydana gelebileceği ve tarım alanları %25 (306 ha), orman alanları %3 (63 ha) ve açık arazilerin %21 (35 ha) oranında kentleşme baskısı altında olabileceği kestirilmiştir.

4 Sonuçlar ve tartışma

Mevcut kentsel eğilimlerin devam edeceği varsayımı altında, kentsel büyümenin neden olduğu arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini simüle etmek ve V-HO algoritmasındaki uygulama zorluklarını ele almak amacıyla, coğrafi nesneleri temsilen parsel düzeyinde çalışabilecek bir V-HO tabanlı KBSM önerilmiştir. Bu model, yalnızca arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini simüle etmekle kalmayıp, aynı zamanda karmaşık mekansal ve zamansal dinamikleri keşfetmek ve bu dinamiklerin etkilerini belirlemek için CVM (RO) algoritmasını kullanmaktadır.

Literatürde, V-HO tabanlı KBSM çalışmalarında parsel verileri üzerinde esnek komşuluk ve dönüşüm yapılandırması sağlayan BV veya benzer bir yöntemle gerçekleştirilmiş bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bağlamda önerilen model, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

V-HO algoritmasının dezavantajlarından biri olan uzun hesaplama sürelerini çözmek için, vektörel çokgenler nokta-düğüm yapısına indirgenmiştir. Böylece hesaplama süreci basitleştirilmiş ve modelin performansı artırılmıştır. Büyüme döngüsünde her bir parsel, tüm öznitelikleriyle bir düğüm olarak tanımlanmakta, komşuluklar ise kenarlar aracılığıyla anlık ve net bir şekilde belirlenmektedir. Bu sayede, model daha verimli ve kullanıcı dostu hale gelmiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları, V-HO tabanlı kentsel büyüme modellemesinde hücrelerin vektör veri yapısı ile kullanılmasının uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Bu

çalışmada, vektör veri yapısında hücresel işlerlik sağlanmış ve büyüme vektörleri yardımıyla dinamik komşuluklar oluşturma kapasitesi test edilmiştir.

Kadastral parsellerin modelde gerçek planlama birimlerini yansıtan hücreler olarak temsil edilmesi ve nokta-düğüm yapısına indirgenmesi, temsil ve hücresel işlerlik sorunlarını büyük ölçüde çözmüştür. Arazi geliştirme sürecinde kullanılan parseller, planlamacıların kullandığı en küçük birimlerdir. Bu bağlamda, V-HO modelinin oluşturulmasındaki bir diğer amaç, kentsel planlama süreçlerini daha gerçekçi yansıtan modeller elde etmek ve planlayıcılara farklı büyüme alternatifleri sunarak karar verme sürecine destek olmaaktır.

Çalışma, modelin hesaplama ve operasyonel işlerliğinin yanı sıra, gerçek ve simüle edilen kentsel büyüme arasındaki farkları ortaya koyan kalibrasyon ve doğrulama aşamalarını da kapsamaktadır. Bu aşamada, öncelikle BV'lere ait baz uzunluklarının kentleşmeye olan etkileri analiz edilmiştir. Buna göre, kentleşmeye etken azami mesafe değeri ampirik bir yaklaşımla değil, çalışma alanına özgü olarak belirlenmiştir. Kalibrasyon aşaması, arazi örtüsü/kullanımı değişim dinamiklerinin belirlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu aşamada son yıllarda V-HO ve CVM algoritmaları birlikte kullanımı sıklıkla tercih edilmektedir [4,12]. Bu çalışmada 2001-2014 yılları arasında eğitilen RO modeli %83 F1 Skor değeri ile yüksek doğruluk sağlamıştır. Doğrulama aşamasında 2024 yılında bilinen ile simüle edilen haritalar karşılaştırılarak ROC eğrisi analizi gerçekleştirilmiş ve AUC değeri %86 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar modelin, arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini etkileyen zaman-mekan dinamiklerini yüksek doğruluk ve duyarlılıkla tespit edebildiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca kullanılan dört parametrelili eşitlikten; planlama parametresi (%0,12) Sancaktepe İlçesinde en az etkiye sahip olarak belirlenmiştir. Bu durum bölgede planlı büyümenin aksine organik bir büyüme şeklinin olduğunu ifade etmektedir.

Çalışmada Sancaktepe İlçesi için 2040 yılına ait KBSM oluşturulmuştur. 2024-2040 yılları arasında gerçekleştirilen zamansal değişim analizi sonuçlarına göre, tarım arazilerinin %25'inin, orman arazilerinin %3'ünün ve açık arazilerin %21'inin kaybı öngörülmüş, kentsel alanların %21 oranında artması beklenmektedir. Bu oranlar, bölgedeki kentleşme hızının mevcut hızla benzer şekilde devam edeceğine işaret etmektedir. Askeri alan, Kuzudere orman alanı ve Paşaköy mevkiindeki tarımsal ve orman alanları, potansiyel kentsel büyüme alanları olarak belirlenmiştir. Yakup ve Ayazlı [39] tarafından gerçekleştirilen bölgeye ait raster HO simülasyon modeliyle de benzer sonuçlar elde edilmiştir. V-HO modelinin sonuçlarına göre orman arazileri üzerinde şu an için belirgin bir kentleşme baskısı bulunmamakla birlikte, gerekli önlemler alınmadığı takdirde ilerleyen dönemlerde bu baskının artacağı öngörülmektedir.

Araştırma, sürdürülebilir kalkınma politikalarının bir sonucu olarak kadastronun temel altlık görevi üstlenmesine vurgu yapmaktadır. V-HO temelli KBSM çalışmalarında kadastral veriler birincil veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ancak, kadastral verilerin zamansal boyutu dünya genelinde düzenli bir şekilde

kaydedilmediğinden, bu verilerin yapısı karmaşıktır [42]. Bir diğer zorluk ise, bu verilerin ediniminin kolay olmamasıdır. Bununla birlikte, Kadastro 2034 vizyonunda belirtildiği gibi, kadastral verilerin paylaşılabılır standart bir formatta üretilmesi ve kanun yapımcıların bu doğrultuda yasal altyapıyı hazırlaması gerekmektedir [43,44].

Sunulan V-HO temelli KBSM'nin çeşitli sınırlılıkları mevcuttur. Öncelikle HO temelli modellerdeki zaman temsildir. HO modellerinde her zaman adımı veya yinelemesi aynı zaman aralıklarında ve genellikle bir yıla eşdeğer olmaktadır. Sunulan modelde de büyüme döngüsünün bir kez çalışması bir yıla eşdeğerdir. Ancak arazi örtüsü/kullanımı değişimleri aynı zaman diliminde gerçekleşmeyebilir, değişim bir süreci içerir [45]. İlerideki çalışmalarda her hücreye bir kentsel büyüme yüzdesi eklenebilir. İkinci olarak modelde büyüme hızına denge getiren bir algoritmanın eksikliğidir, buna literatürde kendi kendini düzenleme (self-modification) adı verilmektedir [46]. Modelde tarihsel yıllık büyüme oranları tespit edilerek büyüme hızına denge sağlanabilir. Üçüncüsü hücre geometrisindeki zamana bağlı değişimlerdir. Zamanla araziler imar uygulamaları vb. nedenlerle birleştirilip ayrılabilirler [17]. Model, geometrik bölünme süreçlerine ait bir algoritma ile bütünleştirilmemiştir.

Önerilen model ile İstanbul Sancaktepe İlçesi'nde tarım, orman ve açık arazilerin kentleşme baskısı altında kalmaya devam edebileceği tespit edilmiştir. Model, kent plancıları ve araştırmacılar için etkili bir öngörü aracı olarak kullanılabilir. Planlama birimi olan parsel seviyesinde üretilen KBSM'ler sayesinde daha doğru ve hassas tahminler yapılabilir. Gelecekteki çalışmalarda, kalibrasyon ve zaman bileşeninde yapılacak iyileştirmelerin yanı sıra, arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini etkileyen sosyo-ekonomik parametrelerin de modele dahil edilmesi ile V-HO temelli KBSM'lerin performansı daha da artırılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, ilk yazarın Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Ana Bilim Dalında hazırlanan doktora tezinin bir kısmını içermektedir. Araştırma TÜBİTAK 124Y025 ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından M-2024-862 No'lu projeler kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] I.E. Ayazlı, Monitoring of urban growth with improved model accuracy by statistical methods, Sustainability 11 (2019) 5579. <https://doi.org/10.3390/su11205579>.
- [2] M. Batty, Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals, The MIT press, 2007. <https://doi.org/10.5555/1543541>.
- [3] R. White, G. Engelen, Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns, Environment

- and Planning A: Economy and Space 25 (1993) 1175–1199. <https://doi.org/10.1068/a251175>.
- [4] Y. Yao, L. Li, Z. Liang, T. Cheng, Z. Sun, P. Luo, Q. Guan, Y. Zhai, S. Kou, Y. Cai, L. Li, X. Ye, UrbanVCA: a vector-based cellular automata framework to simulate the urban land-use change at the land-parcel level, (2021). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.08538>.
- [5] N. Moreno, F. Wang, D.J. Marceau, Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model, Computers, Environment and Urban Systems 33 (2009) 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.008>.
- [6] A.G.-O. Yeh, X. Li, Errors and uncertainties in urban cellular automata, Computers, Environment and Urban Systems 30 (2006) 10–28. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.007>.
- [7] P. Barreira-González, M. Gómez-Delgado, F. Aguilera-Benavente, From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory, Computers, Environment and Urban Systems 54 (2015) 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.004>.
- [8] N. Moreno, A. Ménard, D.J. Marceau, VecGCA: A Vector-Based Geographic Cellular Automata Model Allowing Geometric Transformations of Objects, Environ Plann B Plann Des 35 (2008) 647–665. <https://doi.org/10.1068/b33093>.
- [9] Y. Lu, M. Cao, L. Zhang, A vector-based Cellular Automata model for simulating urban land use change, Chin. Geogr. Sci. 25 (2015) 74–84. <https://doi.org/10.1007/s11769-014-0719-9>.
- [10] S. Abolhasani, M. Taleai, M. Karimi, A. Rezaee Node, Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model, International Journal of Geographical Information Science 30 (2016) 2276–2301. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1184271>.
- [11] Y. Lu, S. Laffan, C. Pettit, M. Cao, Land use change simulation and analysis using a vector cellular automata (CA) model: A case study of Ipswich City, Queensland, Australia, Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science 47 (2020) 1605–1621. <https://doi.org/10.1177/2399808319830971>.
- [12] Y. Yao, K. Zhou, C. Liu, Z. Sun, D. Chen, L. Li, T. Cheng, Q. Guan, Temporal-VCA: Simulating urban land use change using coupled temporal data and vector cellular automata, Cities 149 (2024) 104975. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104975>.
- [13] H. Zhuang, X. Liu, Y. Yan, D. Zhang, J. He, J. He, X. Zhang, H. Zhang, M. Li, Integrating a deep forest algorithm with vector-based cellular automata for urban land change simulation, Transactions in GIS 26 (2022) 2056–2080. <https://doi.org/10.1111/tgis.12935>.
- [14] W. Shi, M.Y.C. Pang, Development of Voronoi-based cellular automata -an integrated dynamic model for Geographical Information Systems, International Journal of Geographical Information Science 14 (2000)

- 455–474.
<https://doi.org/10.1080/13658810050057597>.
- [15] F. Semboloni, The Growth of an Urban Cluster into a Dynamic Self-Modifying Spatial Pattern, *Environ Plann B Plann Des* 27 (2000) 549–564. <https://doi.org/10.1068/b2673>.
- [16] Q. Guan, J. Li, Y. Zhai, X. Liang, Y. Yao, HashGAT-VCA: A vector cellular automata model with hash function and graph attention network for urban land-use change simulation, *Landscape and Urban Planning* 250 (2024) 105145. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105145>.
- [17] Y. Long, Z. Shen, V-BUDEM: A Vector-Based Beijing Urban Development Model for Simulating Urban Growth, in: Y. Long, Z. Shen (Eds.), *Geospatial Analysis to Support Urban Planning in Beijing*, Springer International Publishing, Cham, 2015: pp. 91–112. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19342-7_5.
- [18] J. Yang, X. Zhu, W. Chen, Y. Sun, J. Zhu, Modeling land-use change using partitioned vector cellular automata while considering urban spatial structure, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* (2023) 239980832311528. <https://doi.org/10.1177/23998083231152887>.
- [19] Y. Chen, X. Liu, X. Li, Calibrating a Land Parcel Cellular Automaton (LP-CA) for urban growth simulation based on ensemble learning, *International Journal of Geographical Information Science* 31 (2017) 2480–2504. <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1367004>.
- [20] İ.E. Ayazlı, Investigating the interactions between spatiotemporal land use/land cover dynamics and private land ownership, *Land Use Policy* 141 (2024) 107165. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107165>.
- [21] D. Ozturk, N. Uzel-Gunini, Investigation of the effects of hybrid modeling approaches, factor standardization, and categorical mapping on the performance of landslide susceptibility mapping in Van, Turkey, *Natural Hazards* 114 (2022) 2571–2604. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05480-y>.
- [22] A. Tayyebi, B.C. Pijanowski, M. Linderman, C. Gratton, Comparing three global parametric and local non-parametric models to simulate land use change in diverse areas of the world, *Environmental Modelling & Software* 59 (2014) 202–221. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.022>.
- [23] R. White, G. Engelen, Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling, *Environ. Plann. B* 24 (1997) 235–246. <https://doi.org/10.1068/b240235>.
- [24] S. Wolfram, Cellular automata as models of complexity, *Nature* 311 (1984) 419–424. <https://doi.org/10.1038/311419a0>.
- [25] N.N. Pinto, A.P. Antunes, A Cellular Automata Model Based on Irregular Cells: Application to Small Urban Areas, *Environ Plann B Plann Des* 37 (2010) 1095–1114. <https://doi.org/10.1068/b36033>.
- [26] J.I. Barredo, L. Demicheli, C. Lavalle, M. Kasanko, N. McCormick, Modelling Future Urban Scenarios in Developing Countries: An Application Case Study in Lagos, Nigeria, *Environ Plann B Plann Des* 31 (2004) 65–84. <https://doi.org/10.1068/b29103>.
- [27] M. Batty, Y. Xie, Z. Sun, Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata, *Computers, Environment and Urban Systems* 23 (1999) 205–233. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(99\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(99)00015-0).
- [28] K. Krishnamoorthy, *Handbook of statistical distributions with applications*, Chapman and Hall/CRC, 2006. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420011371/handbook-statistical-distributions-applications-krishnamoorthy>, Accessed August 31, 2024.
- [29] F.J. Massey, The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit, *Journal of the American Statistical Association* 46 (1951) 68–78. <https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769>.
- [30] J.D. Gibbons, S. Chakraborti, *Nonparametric statistical inference: revised and expanded*, CRC press, 2014. <https://doi.org/10.4324/9780203911563>, Accessed August 31, 2024.
- [31] L. Breiman, Random Forests, *Machine Learning* 45 (2001) 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- [32] S. Amini, M. Saber, H. Rabiei-Dastjerdi, S. Homayouni, Urban land use and land cover change analysis using random forest classification of landsat time series, *Remote Sensing* 14 (2022) 2654. <https://doi.org/10.3390/rs14112654>.
- [33] L.A. Guzman, R. Camacho, A.R. Herrera, C. Beltrán, Modeling population density guided by land use-cover change model: a case study of Bogotá, *Popul Environ* 43 (2022) 553–575. <https://doi.org/10.1007/s11111-022-00400-5>.
- [34] C. Kamusoko, J. Gamba, Simulating urban growth using a random forest-cellular automata (RF-CA) model, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4 (2015) 447–470. <https://doi.org/10.3390/ijgi4020447>.
- [35] J. Lv, Y. Wang, X. Liang, Y. Yao, T. Ma, Q. Guan, Simulating urban expansion by incorporating an integrated gravitational field model into a demand-driven random forest-cellular automata model, *Cities* 109 (2021) 103044. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103044>.
- [36] A. Rienow, A. Mustafa, L. Krelaus, C. Lindner, Modeling urban regions: Comparing random forest and support vector machines for cellular automata, *Transactions in GIS* 25 (2021) 1625–1645. <https://doi.org/10.1111/tgis.12756>.
- [37] İ.E. Ayazlı, F. Gul, A.E. Yakup, D. Kotay, Extracting an Urban Growth Model's Land Cover Layer from Spatio-Temporal Cadastral Database and Simulation Application, *Polish Journal of Environmental Studies* 28 (2019). <https://doi.org/10.15244/pjoes/89506>.

- [38] TÜİK, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları (2025). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2022-49685>, Accessed January 26, 2025.
- [39] A.E. Yakup, İ.E. Ayazlı, Investigating changes in land cover in high-density settlement areas by protected scenario, *International Journal of Engineering and Geosciences* 7 (2022) 1–8. <https://doi.org/10.26833/ijeg.850247>.
- [40] A.S. Kubat, H.S. Kaya, F. Sarı, G. Güler, Ö. Özer, The Effects of Proposed Bridges on Urban Macroform of Istanbul, in: 6th International Space Syntax Symposium. Istanbul: Istanbul Technical University, 2007. https://www.academia.edu/download/90993985/papers_5Clongpapers_5C003_20_20Kubat_20Kaya_20G_C3_BCler_20Sari_20Ozer.pdf, Accessed August 17, 2024.
- [41] Y. Ye, C. Jia, S. Winter, Measuring Perceived Walkability at the City Scale Using Open Data, *Land* 13 (2024) 261. <https://doi.org/10.3390/land13020261>.
- [42] Kaufman, J, Steudler, D, Kadaastro 2014: Gelecekteki Kadastral Sistem İçin Bir Vizyon, International Federation of Surveyors, Brighton, 1998.
- [43] I. Horňanský, E. Ondřejčka, M. Fojtl, From Cadastre 2014 to Cadastre 2034, in: Permanent Committee on Cadastre in the EU, Plenary Meeting & Conference, Greece, 2014: pp. 45–51.
- [44] M. Lemmens, Towards cadastre 2034 (Part II), *GIM International: The Worldwide Magazine for Geomatics* 24 (2010) 37–45.
- [45] X. Liu, C. Andersson, Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling, *Computers, Environment and Urban Systems* 28 (2004) 107–124.
- [46] K.C. Clarke, S. Hoppen, L. Gaydos, Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth, in: Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Citeseer, 1996: pp. 21–25. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=5d755c433ff52d36e08a235689c69c7db127bd59>, Accessed March 22, 2024.

