



# Kentsel Tasarımda Hesaplamalı Tasarım Yaklaşımların Kullanılması: Hücresel Otomata Tabanlı Model Çerçevesi

## Computational Design Approaches in Urban Design: Cellular Automata-Based Model Framework

Emirhan Coşkun<sup>1</sup>

### Öz

Teknolojik gelişmeler Bilgisayar Destekli Tasarımdan Hesaplamalı Tasarıma doğru bir yönelimin hız kazanmasına olanak sağlamıştır. Bu yönelimde Hesaplamalı Tasarımın sahip olduğu üretken yapının, geleneksel tasarım düşüncesini oluşturan mekanizmaları anlama ihtiyacını ortaya çıkarmada önemli bir yeri vardır. Geleneksel tasarım düşüncesinin sahip olduğu örtük yapı, tasarım sürecinin nasıl gerçekleştiği, tasarım sürecinde hangi mekanizmaların yer aldığı, tasarım bilgisinin ve temsilin nasıl oluştuğu anlamamıza ve formüle etmemize izin vermediğinden üretken ve değerlendirci bir bilgidен söz etmek mümkün olmamaktadır. Hesaplamalı tasarım yaklaşımı geleneksel tasarım düşüncesindeki örtük bilginin keşfedilmesini sağlayarak üretken ve değerlendirci bir bilgi oluşturur. Bu çalışmanın amacı Hesaplamalı tasarım yaklaşımının keşfetmemizi sağladığı üretken ve değerlendirci bilginin kentsel tasarımda kullanımına yönelik bir öğrenme çerçevesini oluşturma düşüncesinden ortaya çıkmıştır. Çalışma kapsamında Hesaplamalı tasarım düşüncesinin yansıması olan ve oldukça sık kullanılan üretken sistemlerden Hücresel Otomatların (Cellular Automata) kentsel tasarım bağlamında nasıl ele alınabileceği tartışılacaktır. Hücresel Otomata çalışmalarında hesaplama düşüncesi ve yaklaşım yöntemleri tartışıldıktan sonra kentsel tasarım bağlamında bu üretken yöntemin katkıları incelenecektir. Hücresel Otomata yaklaşımları, parçalardan bütünü görme, parçalar arasındaki ilişkileri ve örüntüleri fark etme ve bunları üretken süreç sırasında ve sonrasında yeniden keşfetme yeteneğini geliştiren keşifsel süreçler olduğundan, özellikle kentsel gelişim senaryolarının bir parçası olmak açısından önemli bir role sahip olmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Kentsel Tasarım, Hesaplamalı Tasarım, Hücresel Otomata, Üretken Sistemler, Coğrafi Bilgi Sistemleri

### ABSTRACT

Technological developments have enabled the acceleration of a shift from Computer Aided Design to Computational Design. The productive structure of Computational Design plays an important role in revealing the mechanisms that make up traditional design thinking. The traditional design thinking approach lacks an explicit structure for understanding and formulating the design process, the mechanisms involved, and the formation of design knowledge and representation. As a result, it is difficult to develop productive and evaluative knowledge. In contrast, the computational design approach facilitates the discovery of tacit knowledge, leading to the creation of productive and evaluative knowledge. The aim of this study is to create a learning framework for using the productive and evaluative knowledge discovered through the computational design approach in urban design. The study will discuss how to handle Cellular Automata, one of the most frequently used generative systems that reflects computational design thinking, in the context of urban design. This section will analyze the contributions of the generative method in the context of urban design, after discussing the computational thinking and approach methods used in Cellular Automata studies. Cellular Automata approaches are useful in urban development scenarios as they allow for the recognition of relationships and patterns between parts, and rediscovery of them during and after the generative process.

**Keywords:** Urban Design, Computational Design, Cellular Automata, Generative Systems, Geographic Information Systems

<sup>1</sup> Corresponding Author: (Dr. Öğr. Üyesi) Haliç Üniversitesi, [emirhancoskun@halic.edu.tr](mailto:emirhancoskun@halic.edu.tr), ORCID: 0000-0003-3699-1486



## GİRİŞ:

Son 50 yıllık sürece baktığımızda küresel ekosistemde teknolojinin hızlı bir şekilde ilerlemesi dijital devrimlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. 1970'lerde kişisel bilgisayarların geliştirilmeye başlanması ile ortaya çıkan Birinci Dijital Devrim; teknolojik ilerlemeler, internetin yaygın kullanımı, daha fazla ürün ve hizmetin çevrimiçi olarak sunulmaya başlanması ve kitlesel dijitalleşmenin başlamasıyla beraber yerini İkinci Dijital Devrime bırakmıştır. Günümüzde her alanda internet özellikli cihazların daha yaygın hale gelmesi (nesnelerin interneti), yapay zekâ teknolojilerinin çok hızlı bir gelişme göstermesi, açık inovasyonun günlük yaşantının bir parçası olması İkinci Dijital Devrimin önemli bir eşliğidir (Yigitcanlar vd., 2021).

Dijital devrimin bir yansıması ve günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelen teknolojinin hızlı ilerleyişi, Hesaplamalı Tasarım kavramını hem tasarım pratiğinde hem de eğitimde giderek daha önemli hale getirmektedir. Ayrıca, hesaplama dayalı düşünme biçimleri ve üretim yöntemleri, tasarım disiplini için yeni gündemleri şekillendirmektedir. Geleneksel tasarım yöntemlerinden ayrılan hesaplamalı tasarım, tasarım sürecinde yeni tekniklere ve alternatif bakış açılarına olanak tanıyan bir perspektif sunmaktadır. Bu bağlamda, tasarım sürecinde hesaplamalı tasarım düşüncesinin evrimi, dijital araçlar yerine hesaplamalı tasarım yöntemlerinin vurgulanmasına dayanmaktadır (Çalışır Adem & Çağdaş, 2020). Bu çalışmanın odak noktası üretken tasarım yaklaşımlarından Hücreli Otomatların kentsel gelişim senaryolarının bir parçası olması bağlamında hesaplamalı tasarım düşüncesinin gelişimine nasıl katkı sağlayabileceğini araştırmaktır.

Hesaplamalı tasarım düşüncesi sistem teorisi, sibernetik, morfogenez ve biyoloji gibi çeşitli disiplinlerden etkilenerek tasarımcılara, tasarımın amacını yalnızca son ürün üzerinden değil, aynı zamanda üretim süreci üzerinden de değerlendirme fırsatı sunan bir yaklaşımdır (Çalışır Adem & Çağdaş, 2020; Menges & Ahlquist, 2011). Hesaplamalı tasarım yöntemleri, bilgisayar destekli veya desteksiz, biçim, mekân ve yapının oluşum sürecini tanımlamak için algoritmalar kullanan sistemlerdir. Bu süreçler, tasarım verilerini, kullanıcı ihtiyaçları, topografi, iklim ve program gibi faktörleri analiz etmeyi ve yorumlamayı içerir. Tasarım aşamaları daha sonra düzenlenir ve oluşum kuralları belirlenir. Ortaya çıkan ürünler, çeşitli performans kriterlerine göre değerlendirilir ve en uygun çözüm uygulanır. Hesaplamalı tasarım, tasarım süreci mekanizmalarının tanımlanmasını, üretici ve değerlendirici tasarım bilgisinin formüle edilmesini ve tanımlanmasını sağlar (Singh & Gu, 2012). Aynı zamanda yeni bir bilgi alanının ve kavramsal bir kelime dağarcığının ortaya çıkmasına yol açar. Dolayısıyla, hesaplamalı tasarım düşüncesi tasarım ortamlarında, bilgi ve teoride, model ve metodolojilerde bir değişim meydana getirir (Çalışır Adem & Çağdaş, 2020). Hesaplamalı tasarım düşüncesinde tasarım problemlerini çözmek için algoritmik yöntemlerin ve kuralları net belirlenmiş aşamaların olması esastır. Algoritmik yöntemlerin kullanılmasının amacı problemi hesaplanabilir parçalara bölebilmek ve en doğru çözüm kümesine ulaşabilmektir (Terzidis, 2003). Tasarım süreçlerinde algoritmik yöntemlerin kullanılması sınıflandırıldığında üç kategori ön plana çıkar. Bu üç kategori formasyon modelleri, performans modelleri ve üretken modellerdir (Oxman, 2008). Tasarım probleminin yapısı gereği muğlak olması farklı kategorilerin oluşmasında etken olmuştur. Formasyon modellerinde parametrik tasarım yaklaşımlarını ön plana çıkarken; performans modellerinde önemli olan formları analiz etmek, sentezlemek ve üretmek için simülasyonlar önermektedir. Üretken modeller ise tasarım problemini çözmek ve tasarım ürününü üretmek için kurallar ve prosedürlerin yer aldığı metodolojileri içeriğinde barındırır.

## 1. Üretken Tasarım Yaklaşımları ve Hücresel Otomatlar

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında yaygın olarak beş temel üretken tasarım algoritmasının olduğu görülmektedir. Bu algoritmalar Biçim Gramerleri (Shape Grammars), L-Sistemleri (L-Systems), Genetik Algoritmalar (Genetic Algorithms), Hücresel Otomatlar (Cellular Automata), Etmen Tabanlı Sistemlerdir (Agent-Based Systems). Biçim gramerleri bir dil veya tasarım kümesi oluşturmak için kullanılan bir dizi kuraldır. Kurallar üretilen tasarımların biçimlerinin tanım kümesidir. Kural tabanlı bir sistem olup tanımlayıcı ve üretken bir yapıya sahiptir. Biçim gramerleri tasarım dilleri oluşturmak ya da mevcut tasarımları daha iyi anlayarak ve çözümleyerek benzer tasarımların üretilmesi için biçim kuralları oluşturulmasını sağlayan bir analiz aracıdır (Knight, 1999). Hücresel otomatlar komşuluk ilişkilerine göre davranan dinamik ve ayrık sistemlerdir. Hücresel otomata modellerinde uzay ızgara olarak tanımlanırken, uzaydaki her bir parça hücre olarak tanımlanır. Hücresel otomata modelleri dört bileşene sahiptir. Izgara (lattice), hücre durumları (cell states), hücreler arası komşuluk ilişkileri (neighbourhood) ve hücreler arası geçiş kuralları (transition rules) (Batty & Xie, 1994). Hücresel Otomatlar, komşu hücrelerin durumu tarafından belirlenen bir dizi kurala dayalı olarak zaman içinde gelişen hücre koleksiyonları olarak da tanımlanabilir (Wolfram, 2002). Sistemin karmaşıklığı kullanılan ızgara tipine bağlı olarak değişir. Hücresel otomatlar hücrelerin ve komşu hücrelerin durumları tarafından tanımlanır ve bağlama duyarlı bir sistemdir. Ortaya çıkan ürün hücre durumlarının işlevselliğine bağlı olduğu için biçimin formu izlediği bir durum söz konusudur. Bu sebepten ötürü daha çok kentsel tasarım, bina kütle hesaplamaları, zonlama gibi komşuluk ilişkilerinin önemli olduğu durumlar için kullanılır (Gu vd., 2010). Genetik algoritmalar doğal evrimsel süreçleri esas alarak bir uygunluk fonksiyonu tarafından optimize edilen durumları belirlemek için kullanılır. Evrimsel operatörler kullanılarak çözüm kümesi içindeki her bir çıktının durumu kontrol edilir ve optimize edilip edilmeyeceğinin kararı verilir (Gero & Kazakov, 1998). L-Sistemleri (Lindenmayer Sistemleri) ilk olarak biyolog Lindenmayer tarafından geliştirilen matematiksel algoritmalar. L-Sistemlerde dizginin yeniden yazılması yoluyla özyinelemeli olarak uygulanabilen bir dizi üretim kuralı ön plana çıkar. Dizgi kavramı, mimarideki biçimin sembolik bir ifadesidir. L-Sistemleri tipik olarak tekrarlayan desenler, fraktaller ve bitki dokuları gibi doğal organik formlar üretmek için kullanılır. Mimari ve kentsel sistemler için kullanıldığında genel olarak yol ağları ve bina formları oluşturmak için kullanılmaktadır (Çalışır Adem & Çağdaş, 2020; Ning Wu & Silva, 2010). Etmen tabanlı sistemler, tasarım alanındaki uzmanlığına bağlı olarak içinde bulunduğu ortama göre kendi başına eylem üretebilen sistemlerdir. Etmen tabanlı sistemler sahip olduğu sensörleri vasıtasıyla bulunduğu ortamı algılayarak ve bu ortamda belirli davranışlarda bulunan sistemler olarak değerlendirilebilirler. Etmen Tabanlı Sistemler, sosyal veya kolektif davranışların modellenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Etmenlerin eylemleri özerk ve bağımsızdır, ancak rekabet etmek veya iş birliği yapmak ve toplu olarak belirli hedeflere ulaşmak için birbirleriyle etkileşime girebilir ve iletişim kurabilirler (Çalışır Adem & Çağdaş, 2020; Russell vd., 2022; Wooldridge, 2012).

Farklı üretken algoritmalar karşımıza çıksa bile bu yaklaşımların ortak özelliği, tasarım problemi yaklaşımlarında yeni bir bakış açısı kazandırarak, hem tasarım sürecini hem de sonuçlarını geliştirme olanağı sunmasıdır. Üretken bir sistem karmaşıklık yaratma, çevreyle ilişki kurma, dinamik çevresel değişikliklere uyum sağlama, öngörülemez ve yenilikçi ilişkiler ya da sonuçlar ortaya koyma kapasitesine sahip olduğu takdirde üretken bir sistem olarak değerlendirilebilir (McCormick vd., 2003). Üretken sistemlerin bu özellikleri keşfetmeye açık bir tasarım alanı imkânı sunar (Tablo-1).

Parametreler/Üretken Siste	Hücreyel Otomata	Biçim Gramerleri	L-Sistemleri	Genetik Algoritmalar
<b>Bileşenler</b>	*Izgara ve Hücreler *Kurallar Setleri *Hücre Durumları	* Şekiller (BG) veya semboller (LS), operatörler ve kurallar kümesi *Başlangıç şekli		*Genotipler *Fenotipler *Popülasyon *Operasyonlar *Uygunluk fonksiyonu
<b>Kurallar</b>	*Geçiş Kuralları *Durumları Değiştirmek İçin Gerekli Kurallar	* Genellikle koşullar eşleştğinde kurallardan biri devreye girer.	* Genellikle tanımlandığı kadar çok kural aynı anda uygulanır.	*Genellikle, bir popülasyon alt kümesi üzerinde her seferinde bir işlem uygulanır
<b>Avantajlar</b>	*Bağlama duyarlı *Kısıtlı *Tümevarım	*Geometrik	*Sembolik	*Çoklu çözüm ve alternatifler * Optimizasyon
<b>Sınırlar</b>	*Hücre geometrisi ve tanımı ile kısıtlı	* Kullanışlılık ve ortaya çıkma keşfi arasında kalma		*Optimuma yakın çözümler ama nadiren optimal
<b>Doğruluk/Tutarlılık</b>	*Problemin temsiline ve çözümün yorumlanmasına bağlı	* Genellikle kullanıcı tarafından üretim sonrası analiz gerektirir		*Genotip seçimine ve uygunluk fonksiyonuna bağlıdır
<b>Faz/Süreç</b>	* Izgara tabanlı tasarım ve planlama.	* Tasarım araştırması: mekân düzeni (BG), desenler ve kompozisyonlar.		* Tasarım keşfi, optimizasyon.
<b>Yaklaşım</b>	*Komşu etkilerin, büyüme kalıplarının, sosyal olayların vb. incelenmesi. *Form işlevi takip eder	* Keşif odaklı *İşlev biçimi takip eder *Yinelemeli ve yeniden yapılanmaya dayalı yaklaşımlar		*Tasarım optimizasyonu *Morfolojik tasarımlar.
<b>Tasarım Problemi</b>	*Kentsel planlama, imar, ada tasarımı ve kütlelendirme *Genellikle 2D ama de 3D uygulanabilir	*Desenler *Mimari formlar ve stiller *Genellikle 2D ama 3D de uygulanabilir	* Doğal ve organik formlar, yol ağları, araziler, dokular *Genellikle 2D	*Bileşen bazlı tasarımlar *Optimizasyon
<b>Özellikler</b>	*Ortaya çıkma ve normatif *Bağlama duyarlı *Genellikle öngörülebilir çözümler.	* Geometrik *Ortaya çıkma ve kişisel *Çözümler genellikle doğrulama gerektirir.		*Optimize edilmiş
<b>Kullanıcı Müdahalesi</b>	*Hücre boyutu, geçiş kuralları ve başlangıç durumları tanımlandıktan sonra düşük düzeyde kullanıcı müdahalesi.	*Sonuçları doğrulamak için yüksek düzeyde kullanıcı müdahalesi *Tekrarlanan süreç		*Uygunluk fonksiyonları, genotipler ve sonlandırma koşulları tanımlandıktan sonra düşük düzeyde kullanıcı müdahalesi

Tablo 1. Üretken Sistemlerin Karşılaştırılması (Gu vd., 2010)

Üretken sistemleri gerçek yaşam senaryoları dahilinde ele almak özellikle de kentsel tasarım söz konusu olduğunda daha kapsamlı bir yaklaşım stratejisi geliştirmek önemli bir noktadır. Kenti sürekli evrim geçiren bir organizma olarak düşünmek problemi doğru tanımlayabilmek açısından önemlidir. Mimari ve kentsel tasarımcılar geçici kentin gelişen inceliklerini kavrama konusunda kritik bir zorlukla ve sürekli bir mücadele ile karşı karşıyadır.

Kentsel mekânı oluşturan çok sayıda dinamik parametreyi ve ara bağlantıları etkin bir şekilde ele almak ve bunlara yanıt verebilecek bir gelişim senaryosu oluşturabilmek ve nihai tasarımın bu gelişim senaryosuna uyum sağlayabilmesi çok önemlidir. Hesaplamalı tasarım araçlarının hem tasarım sürecine hem de eğitim çerçevesine entegrasyonu, mimarların ve kentsel tasarımcıların tasarım problemlerine yaklaşım biçimlerini değiştirebilme ve gerekli yetenekleri geliştirebilme imkânı sağlayabilir. Bu entegrasyon, öğrencilerin tasarım projelerinin kalitesini artırma, şeffaf bir öğrenme sürecini teşvik etme ve kentsel tasarım alanının kavranmasını geliştirme potansiyeline sahiptir (Jensen & Foged, 2014). Yine benzer şekilde geleneksel master planın, biçimsel düzen ve uyarlanabilirlik konusundaki doğal eksiklikleri nedeniyle kentsel büyümeyi yönetmede ve bir kentsel alandaki dinamik mekanizmalara uyum sağlamada yetersiz kaldığı söylemek yanlış olmayacaktır (Popov, 2011). Bu bağlamda hesaplamalı tasarım yaklaşımlarının özellikle de üretken tasarım sistemlerinin büyük miktarda bilgiyi ve parametrik ilişkileri yönetme konusunda oldukça yetenekli olması araştırmaların ve tasarım sürecinin odağında olmalarını sağlamaktadır. Çalışma kapsamında ele alınan üretken tasarım sistemlerden Hücresel Otomatlar (CA) matematikçi John von Neumann ve Stanislaw Ulam tarafından tasarlanmış ve matematikçi Stephen Wolfram tarafından geliştirilmiştir. Hücresel Otomatlar çeşitli girdi kuralları ve aksiyom koşulları aracılığıyla farklı zaman tabanlı çözümler üretmek için güçlü bir teknik olan hesaplama paralellüğünü kapsamlı bir şekilde kullanan bir hesaplama sistemidir. John Conway, "Game of Life" (Yaşam Oyunu) çalışması kapsamında, Hücresel Otomatların dinamik olarak gelişen bir sistem olarak keşfedilmesini önemli ölçüde ilerletmiş ve bir sistem içindeki etkileşimli ve birbirine bağlı aktörlerin karmaşık dinamiklerini göstermiştir. Hücresel Otomatlar genel sistem yapılandırması ve güçlü işleme yetenekleri sayesinde yangın gelişim simülasyonu, biyolojik modelleme, hastalık salgını analizi, kentsel yayılma gibi çok çeşitli bilimsel araştırmalara zaman içerisinde uygulanmıştır (Batty, 1997; Huang vd., 2004). Hücresel Otomatlar ayrıca çeşitli büyük ölçekli şehir gelişimleri yaratan Dinamik Kentsel Evrimsel Modelleme projeleri ile örneklenen karmaşık kentsel gelişimi simüle etmek için farklı yaklaşımların kullanılmasında etkili olmuştur (Jensen & Foged, 2014).

Hücresel Otomatların kentsel gelişim senaryolarında ele alınabilmesi için kentsel tasarım bağlamında nasıl kullanılabileceklerini doğru tanımlamak gerekmektedir. Kentsel tasarım, şehirlerin, kasabaların ve banliyölerin fiziksel yapılarını tasarlama ve yapılandırma sürecini içerdiğinden, kentsel çevreyi hem performatif hem de sürdürülebilir kılmak amacıyla sokak sistemlerinin, bina kümelerinin, kamusal alanların ve peyzajların organizasyonunu ve tasarımını da sürecin bir parçası olarak ele almak gerekmektedir. Tasarım sürecinde uzman bilgisi çok önemlidir ancak bu zorunluluk yüksek performanslı tasarım çözümlerine ulaşmada verimsiz olabilir. Özellikle kentsel tasarım söz konusu olduğunda sosyal, kurumsal ve ekonomik bağlamlarda etkin olan farklı aktörlerin ve paydaş grupları arasındaki çatışma uzman bilgisinin önüne geçerek süreci etkileyebilir. Bu bağlamda üretken tasarım yöntemlerinin kentsel tasarım ve kentsel gelişim senaryolarının geliştirilmesi sürecinde kullanılması çağdaş bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle tasarımın erken aşamalarında tasarım alternatiflerini keşfetmek ve verimliliği artırmak için üretken sistemlerin hesaplama kapasitesinden yararlanılmaktadır (Jiang vd., 2023). Karmaşık çözüm alanlarını sistematik olarak keşfetmek ve çatışan hedefleri ve çeşitli kısıtlamaları uzlaştırabilecek tasarım alternatiflerini otomatik olarak oluşturmak için evrimsel optimizasyon ve derin üretken modeller de dahil olmak üzere bilgisayar destekli üretken teknikler kullanılması önemli bir nokta haline gelmektedir. Kentsel gelişim senaryoları ve kentsel

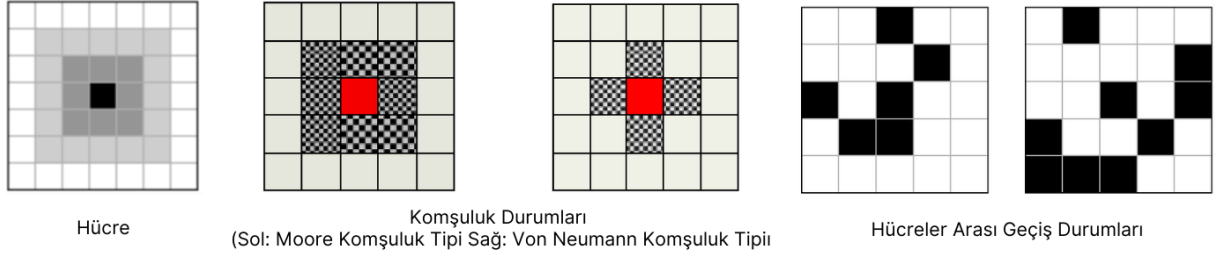
büyüme modellerinin oluşturulması bağlamında üretken tasarım sistemlerinin kapsamlı veriye ihtiyacı olmaktadır. Son yıllarda Coğrafi Bilgi Sistemlerinin (CBS) gelişim göstermesi gelecekteki gerçekçi kentsel büyüme modellerini belirlemek için çeşitli simülasyonların ve tahmin modellerinin kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Bu modeller, kentsel büyümeyi izleyen nicel ve mekânsal-zamansal teknikleri içermektedir. Bu tekniklerle elde edilen sonuçlar, sürdürülebilir kalkınmayı ve gelecek nesillerin ihtiyaçlarını göz önünde bulunduran geleceğe yönelik politikalar oluşturmak için kullanılmaktadır (Aburas vd., 2016). Bu çalışma kentsel tasarım çalışmalarında hesaplamalı tasarım yaklaşımlarının yansıması olarak gelişen üretken sistemlerden hüresel otomatların coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama yöntemleri ile bütünleşmiş biçimde kullanılarak gelecek simülasyonu ve tahmini yapılabilmesi kapsamında bir çerçeve çizmeyi amaçlamaktadır. Metodolojik yaklaşımdaki potansiyeller ve eksiklikler belirlenerek sürecin nasıl olması gerektiği tartışılacaktır.

## 2. Yöntem

Kentlerin sürekli değişim gösteren bir yapısının olması değişen şartlara uyum sağlayabilecek kentsel politikaların ve tasarım yaklaşımlarının benimsenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özellikle kaynak talepleri, yönetim karmaşıklığı, sosyo-ekonomik eşitsizlik ve çevresel tehditler gibi önemli zorluklar tasarım sürecinde karşılaşılan durumlardır. İnovatif yaklaşımlar, bu sorunları ele almanın ve akıllı, sürdürülebilir ve kapsayıcı bir büyüme sağlamanın önemli bir aracı olarak görülmektedir (Yigitcanlar vd., 2021). Kentsel gelişim senaryolarını ve kentsel büyümeye yönelik yaklaşımları geliştirebilmek için mekânsal ve zamansal ilişkileri doğru bir şekilde anlamak önemlidir. Bu açıdan kentsel yayılmanın tarihsel süreç içinde nasıl gerçekleştiği ve tarihsel bilgiler önemli bir veri kaynağı olmaktadır (Sudhira vd., 2004). Kentlerin tarihsel süreçte nasıl bir gelişim gösterdiğinin doğru çözümlenmesi ve gelecekteki kullanımları etkileyen kentsel büyümenin ardındaki itici güçlerin de doğru bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Bu bağlamda uzaktan algılama (UA) ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) sadece mekânsal ve zamansal değişimler dışında kentsel gelişime etki eden tüm etkili unsurların anlaşılmasını kolaylaştıran bir özellik sunmaktadır (Pijanowski vd., 2014; Singh & Gu, 2012). Üretken tasarım sistemlerin özellikle de Hüresel Otomatların sahip olduğu açık yapı, kentsel büyüme modellerini oluşturmada diğer sistemlerle entegre edilebilmesini sağlamaktadır. CA modellerinin kentsel büyüme modellerini ve gelecekteki kentsel kullanım değişikliklerini teşvik etmek için yaygın olarak uygulanması; CA sistemlerinin, esnekliği, sezgiselliği ve süreçlerin mekânsal ve zamansal boyutlarını entegre etme yeteneğinin yanı sıra karmaşık dinamikleri modelleme yeteneğinden kaynaklanmaktadır (Aburas vd., 2016; Batty, 1997; Batty & Xie, 1994; Clarke vd., 1997; Santé vd., 2010a).

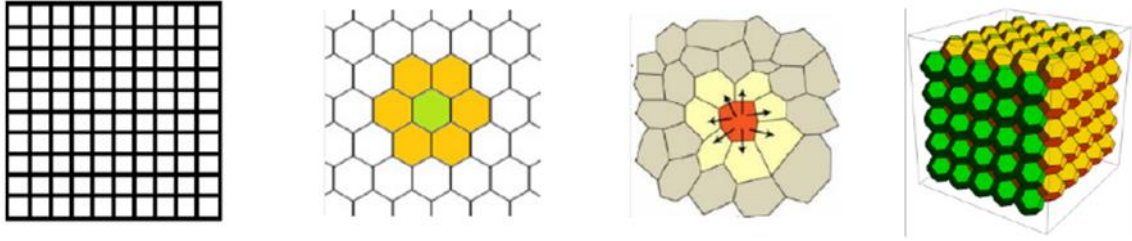
Hücre alanı, hücre, komşuluk ilişkileri, zaman durumları ve geçiş kuralları bir hüresel otomata modelinin temel bileşenlerini oluşturur (Şekil 1). Kentsel modellerde her bir bileşenin coğrafi etkileri ve yansımaları vardır. Kentsel modellerde hücre alanı, hücrelerin bir araya getirdiği iki boyutlu coğrafi alanı temsil ederken, hücrelerin durumları farklı arazi kullanımalarını gösterir. Geçiş kuralları, farklı arazi kullanımalarına sahip durumlar arasındaki geçişleri sağlar. Geçiş kuralları aynı zamanda hüresel otomata modelinin çekirdeğini oluşturur. Hücrelerin otonom yapıları, zaman ilerledikçe hücrelerin geçiş kurallarına göre durum değiştirmesini sağlar (Hashemi & Meybodi, 2009; Ning Wu & Silva, 2010; Yeh vd., 2021).





**Şekil 1.** Hücresel Otomata Bileşenleri

Temel bir hücresel otomata modeli, kare hücrelerden oluşan düzenli bir ızgara sistemi hesaplamaya olanak tanır ve uzaktan algılanan verilerle uyum içinde çalışır. Hücrelerin komşuluğu homojen olduğunda, ızgara sistemi yerine altıgen hücre sistemi kullanılabilir. 3D hücre sistemleri kentsel sistemlerdeki dikey gelişmeleri simüle edebilir. Voronoi sistemlerinde olduğu gibi düzensiz alanlara sahip hücre tipleri farklı mekânsal değerlere sahip senaryolar için kullanılabilir (Shi & Pang, 2000; Yeh vd., 2021) (Şekil 2).



**Şekil 2.** Hücresel Otomata Grid Çeşitleri (Soldan sağa ızgara grid, altıgen grid, voronoi grid, 3d grid)

Hücresel Otomata (CA), kentsel sistemlerin mekân ve zaman içindeki karmaşıklığını simüle etme ve tahmin etme yeteneğinden dolayı etkili bir kentsel modelleme sistemi haline gelmiştir (Aburas vd., 2016; Musa vd., 2017; Santé vd., 2010a). Karmaşık mekânsal alanlara uyarlanabilirliği, basit ve etkili kuralların kullanılmasıyla sağlanır ve bu da onu kentsel gelişim sürecinde değerli bir araç haline getirir. Bunun dışında Hücresel Otomata (CA) genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- (1) CA aralıklı dinamik bir sistemdir ve bu yapısı nedeniyle karmaşık ve dinamik mekânsal modelleri temsil eder veya performansının test edilmesinde sürekli etkilidir (Sietchiping, 2004).
- (2) Hücresel otomatların mekânsal bütünlüğü herhangi bir coğrafi alanda veya kendi kendine organizasyonda avantaj sağlar ve bu sayede yüksek kaliteli çıktılar elde etmek mümkündür (Silva & Clarke, 2005).
- (3) Hücresel Otomata (CA), komşu hücrelerle esnek ilişkileri ve hücre boyutunu ayarlama yeteneği nedeniyle uyarlanabilir. Ayrıca yeteneklerini genişletmek için farklı modellerle entegre edilebilir (Batty, 1997).
- (4) Hücresel otomatların basitliği, mekânsal karmaşıklığın sezgisel ve etkili bir şekilde sunulmasına olanak tanır. Kentsel bağlamlara uygulandığında karmaşıklığı yönetilebilir bir düzeye indirir (O'Sullivan & Torrens, 2001).
- (5) Hücresel otomatın (CA) kafes yapısı, coğrafi verilerin net bir görsel temsilini sağlar. Bu özellik, onu çeşitli sanal uygulamalara son derece uyarlanabilir hale getirir. Kentsel bağlamda, hücresel otomatların yapısı zaman içinde kentsel sistem büyümesinin izlenmesini kolaylaştırır (Santé vd., 2010a).

Birçok uygulama hücresel otomatin uyum sağlayabilme ve esnekliğinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Hücresel otomatayı kentsel bağlamda kullanmak veya farklı kentsel dinamiklere sahip bölgelerde hücresel otomatinin gelişen yapısını göstermek için, hücresel otomata dört ana şekilde genişletilmiştir.

- (1) Herhangi bir kentsel dinamiğin farklı ölçeklerdeki durumunun bireysel ya da hücresel katmanda analiz edilmesi gerekmektedir. Bu da farklı ölçeklerdeki mekânsal alanların hücre olarak ele alınarak değerlendirilmesiyle mümkündür. Böylece hücresel otomata hücreleri farklı ölçeklerde farklı durumlarla karşılaşacak ve kentsel dinamiklerin durumu hakkında yeterli veri elde edilmiş olacaktır.
- (2) Hücresel otomata modellerinde yapılacak değişiklikler veya modellerin gireceği uyarılma süreci, modeli oluşturan hücrelerin boyutlarında ve yapılarında meydana gelen değişiklikleri içerir. Ayrıca komşuluk ilişkilerini genişletebilen hücresel önemli bir yere sahiptir.
- (3) Hücresel otomata modellerinin özellikle optimizasyon ve kalibrasyon sürecinde verimliliğinin artırılmasına yönelik yapılacak çalışmalar önemli bir yere sahiptir.
- (4) Hücresel otomata modellerindeki tüm gelişmelere rağmen hücresel otomatların sınırlılığı, komşuluk fonksiyonlarının miktarı ve eylemsizlik özellikleri göz ardı edilmemelidir.

Hücresel otomata modelleri, uzaktan algılanan verileri basit kurallarla işleyerek coğrafi bilgi sistemlerine entegre olabilir ve karmaşık kentsel dinamikleri simüle edebilir. Basitlik, esneklik ve kontrol edilebilirlik ile birleşen bu özellikler, hücresel otomatı kentsel gelişim süreçlerinde mekânsal ve zamansal boyutları birleştiren etkili bir araç haline getirmektedir (Musa vd., 2017; Santé vd., 2010a; Yeh vd., 2021). Kentsel çalışmalar alanında hücresel otomatlar, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile kolayca entegre olabilmeleri nedeniyle diğer modellere göre daha büyük bir potansiyel sergilemektedir (Ning Wu & Silva, 2010). Bu entegrasyon, yerel verilerin kentsel dinamiklere ilişkin karmaşık hesaplamalarda kullanılmasına olanak tanıyarak, geleneksel matematiksel modellere göre daha etkili sonuçlar elde edilmesini sağlar (Musa vd., 2017). Çalışma hücresel otomatların kullanım yaklaşımı ve kentsel tasarım senaryoları bağlamında nasıl bir çerçeveye sahip olması gerektiğine odaklanmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın odak noktası kentsel tasarım alanında çalışan uzmanların ve farklı aktörlerin faydalanabileceği bir araç çerçevesi oluşturmaktır.

### 2.1. Kentsel Hücresel Otomata Modelinin Tasarlanması

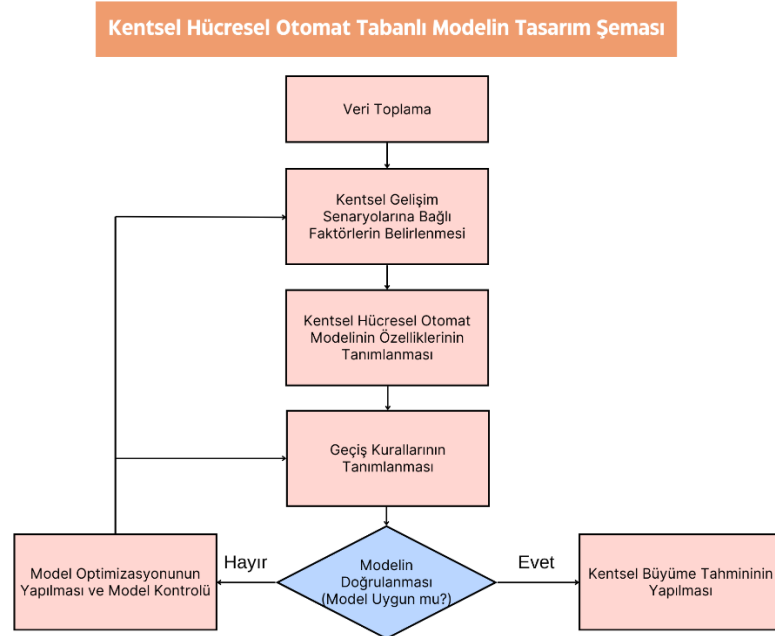
Hücresel Otomata çalışmalarındaki kavramsal ilerlemeler ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak artan hesaplama gücü, 1990'lı yıllar itibarıyla kentsel çalışmalar kapsamında Hücresel Otomatların kullanımını mümkün kılmıştır. Ortaya çıkan ilk modeller ve gelişen sistemlere bağlı olarak; kentsel hücresel otomata sistemleri arazi kullanımı değişikliklerini simüle etme ve tahmin etme kapasitesine sahip olmuştur. Kentsel hücresel otomata sistemleri geçmiş yıllardaki kentsel büyümenin, farklı arazi kullanım türleri arasındaki yerel ve bölgesel etkileşimler yoluyla gelecekteki modelleri etkilediği varsayımına dayanarak hesaplama yapmaktadır. Bununla beraber kentsel hücresel otomata modellerinin coğrafi bilgi sistemleri sorunsuz bir şekilde entegre olmaktadır. Coğrafi bilgi sistemlerine entegre olabilmesi yüksek mekânsal çözünürlük ve hesaplama verimliliği sağlayarak, arazi kullanımları arasındaki yerel etkileşimlere dayalı olarak gelecekteki kentleşme eğilimlerini simüle etmeyi etkin kılmıştır (Al-sharif & Pradhan, 2014; Santé vd., 2010a; Wagner, 1997).

Kentsel hücresel otomata modelleri, geleneksel modellere göre büyük bir gelişmeyi temsil eden güçlü mekânsal dinamik modelleme teknikleridir. Bu bağlamda kentsel hücresel otomata modelleri beş temel alana sahiptirler. Mekânsallık, makro ve mikro yaklaşımlar arasında bağlantı kurma, coğrafi



bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknikleri arasında entegrasyon, kentsel dinamikler, basitlik ve görselleştirme beş temel alanı temsil etmektedir (Aburas vd., 2016; Batty & Xie, 1994). Bu çalışma hücresel otomata modellerinin hesaplamalı tasarım perspektifinden kentsel tasarıma nasıl entegre edilebileceğini ve bir öğrenme çerçevesi olabileceğinin yaklaşımını sunmaya çalışmaktadır. Çalışmada ulaşılmak istenen sosyal, ekonomik, dinamik ve mekânsal-zamansal boyutları dikkate alan gerçekçi bir kentsel modelin oluşturulması ve oluşturulan modelden nasıl bir öğrenme çıktısı alınabileceğinin sorgulanmasıdır. Kentsel tasarım problemlerini hesaplamalı tasarım çerçevesinden ele almaya çalışmak, gelecekteki planlama stratejilerinin belirlenmesinde, kentsel tasarımda etkin olan aktörlerin kendilerini doğru konumlandırmasında, kalkınma stratejilerinin belirlenmesinde ve karşılaşılan sorunları çözmede etkin ve üretken bir yaklaşımın oluşmasına katkı sağlayabilir. Bu bağlamda üretken bir kentsel hücresel otomata modelinin geliştirilmesi birden fazla aşamaya bağlıdır (Şekil 3).

- Veri toplama aşaması kentsel büyüme senaryolarına bağlı olarak farklı veri türlerini gerektiren bir süreç olarak karşımıza çıkar. Veri toplama aşamasında seçilen kentsel büyüme senaryosunun dışında, veri kullanılabilirliği, farklı modellerle entegrasyon vb. durumlar da düşünülmelidir.
- Kentsel büyüme modelleri ve gelecekteki arazi kullanım değişiklikleri üzerinde etkili olan faktörlerin belirlenmesi süreci.
- Hücresel otomatların simülasyon özelliklerinin belirlenmesi. Bu aşama hücre durumlarının belirlenmesini, hücreler arası komşuluk özelliklerinin tanımlanmasını ve hücreler arası geçiş kurallarının belirlenmesini kapsar.
- Oluşturulan üretken sistemin doğrulanması ve kalibrasyonu. Gerçek bir arazi kullanım modeli olup olmadığının farklı değerlendirme ölçütleriyle kontrol edilmesi. Bu aşamada değerlendirme ölçütü olarak genelde Kappa endeksinden faydalanılmaktadır (Aburas vd., 2016).



**Şekil 3.** Kentsel Hücresel Otomata Modelinin Tasarım Şeması

Hücresel Otomata modellerinin açık bir yapıya sahip olması, mekânsal ve zamansal değişkenleri simüle edebilmesi, karmaşık problemleri hesaplayabilme gücü ve uygulanması kolay bir sistem olması

üretken bir sistem açısından önemlidir. Bununla beraber kentsel büyümenin öngörülemez yapısı ve hangi itici güçlerin dahil edileceği konusundaki sınırlamalar modellerin etkin bir şekilde çalışmasını etkileyebilir. Bu sebepten ötürü kentsel bir hüresel otomata sistemi geliştirilirken aynı zamanda Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve Lojistik Regresyon (LR) gibi nicel ve mekânsal-zamansal yöntemlerin de entegrasyonu önemlidir (X. Liu vd., 2017; Y. Liu & Feng, 2012; Mohammadi vd., 2013).

## 2.2. Veri Toplama Süreci

Kentsel tasarım çalışmalarında kullanılacak hüresel otomata modelleri için veri toplama aşaması üretken sistemin doğru kurgulanabilmesi açısından önemlidir (Tablo 2). Veri toplama aşamasında gelecekteki arazi kullanım değişikliklerinin doğru bir simülasyonunu oluşturmak için iki ana gereklilik yerine getirilmelidir. Bunlardan birincisi mekânsal dinamikler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ve ölçülmesi; ikinci ise simülasyon işlemi içinde kentsel büyüme için gerçek faktörlerin tanımlanması ve dahil edilmesidir (Aburas vd., 2016). Uydu görüntüleri, zamansal ve mekânsal değişimleri ve görselleştirilmedeki kesinlik ve doğruluğu sağlama yetenekleri nedeniyle kullanılan temel veri kaynakları olarak karşımıza çıkar (Musa vd., 2017; Santé vd., 2010b; Yeh vd., 2021). Uydu görüntüleri dışında yükseklik modelleri (Digital Elevation Model) simülasyon için çevresel ve fiziksel faktörleri içerdiğinden kentsel büyüme modellerinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan veri kaynaklarından biridir. Uydu görüntüleri ve yükseklik modelleri dışında arazi kullanım simülasyonlarının doğruluğunu artırmak için ekonomik ve sosyal veriler de hüresel otomata modellerine entegre edilebilmektedir (Poelmans & Van Rompaey, 2009).

Kentsel Hüresel Otomata Tabanlı Modellerde Kullanılan Veri Tipleri
Uydu Görüntüleri
Topografik Haritalar
Yükseklik Modelleri (Digital Elevation Model)
Arazi Kullanım ve Arazi Örtüsü (Land Use/Land Cover)
Hava Fotoğrafları
Kentsel Master Plan
Yol Ağları
Kamusal Alanlar
Tarım ve Bitki Örtüsü Haritaları/Yeşil Alanlar
Sosyo-ekonomik Veriler (Nüfus, Nüfus Yoğunluğu vb.)
Zemin Etüdü Verileri
Sulak Alanları Gösteren Haritalar

**Tablo 2.** Kentsel Hüresel Otomata Modellerinde Kullanılabilecek Veri Tipleri

Uzaktan algılama (RS) ve coğrafi bilgi sistemi (GIS) tekniklerinin kullanılmasındaki önem çözünürlük ve veri kalitesiyle ilgilidir. Uydu görüntüleri arazi kullanımı (land use) ve arazi örtüsü (land cover) haritaları oluşturmak için kullanıldığından çok önemlidir. Topografik haritalar, sınırlar ve yollar gibi temel katmanları oluşturmanın yanı sıra coğrafi referanslama amacıyla ve uydu görüntülerini geliştirmek için kullanılır. Uydu görüntüleri ile elde edilen saha verileri arazi kullanımalarını örneklemede iki amaç için kullanılır. Birinci amaç görüntü düzeltmektir. Diğer amaç ise görüntülerin

sınıflandırılmasıdır. Bunlara ek olarak, nüfus verileri gibi sosyo-ekonomik veriler, zaman içinde arazi kullanımı değişikliği ile bunun sosyal nedenleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılır (Aburas vd., 2016; Alkan vd., 2013). Kentsel gelişim modellerinin gerçek dünya simülasyonu kapsamında doğru tahminler yapabilmesi için geniş ve sınıflandırılmış bir veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Sınıflandırılmış veri seti, geçiş kurallarının ve komşuluk ilişkilerinin tanımlanması açısından önemlidir. Bu kapsamda uzaktan algılama verileri kentsel gelişim modellerinde en çok kullanılan verilerdir. Dünya yüzeyindeki arazi kullanımlarının filtrelenmesi, değişimlerin izlenmesi ve ölçülmesi uzaktan algılama verileri ile mümkün olmaktadır. Kentsel gelişim modellerinin doğru tahminler yapabilmesi ve model kalibrasyonunun sağlanabilmesi için farklı zaman dilimlerindeki arazi kullanımlarına ilişkin verilere de ihtiyaç duyulmaktadır.

Coğrafi verilerin karmaşıklığını temsil etmede hücresel otomata modellerin sahip olduğu basit ve düzenli yapı sınırlayıcı olabilir. Kentsel büyüme senaryoları söz konusu olduğunda standart hücresel otomata yaklaşımı yerine düzensiz hücre yapılarına sahip modellerin geliştirilmesi gereklidir. Hücre yapıları ve durumları oluşturulurken, coğrafi süreçlerin özellikleri geçiş kuralları ve komşuluk ilişkileri içerisine dahil edilmelidir. Bu bağlamda coğrafi bilgi sistemleriyle entegre olmuş bir hücresel otomata modeli kısıtlamalarla karakterize edilen bir kent modelinin geliştirilmesine imkân tanır. Kısıtlamalarla karakterize etmek kentsel planlama senaryolarını daha etkili bir şekilde formüle edebilmek için önemlidir. Kentlerin gelişiminde yerel, bölgesel ve küresel faktörlerin etkili olduğu gerçeği, model performansının iyileştirilmesinde kısıtlamaların kritik bir öneme sahip olduğunu vurgular. Kısıtlamaların ve coğrafi verilerin olmadığı bir senaryoda, kent modeli genel örüntüler ortaya koyacaktır. Bu nedenle, kent modellerinde senaryoların belirlenmesi ve doğru kısıtların kullanılması, kentsel gelişim modelinin doğru bir şekilde simüle edilebilmesi için önemlidir (SipahiOğlu & Çağdaş, 2022). Kısıtlamalar, hücresel otomata modellerinin üretimini etkilemekten ziyade doğru tahminler yapabilmek adına gereklidir. Aynı zamanda, kısıtlar çevresel ve sürdürülebilir politikaların kentsel büyümeye olan etkilerini gözlemleyebilmek adına sistemli veri sağlar. Bu bağlamda, seçilen kentsel alanın tarihsel dönüşümlerinden sistemli bir şekilde veri alınması, kısıtların uygun bir şekilde uyarlanabilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu kısıtlar, çeşitli çalışma alanlarında, örneğin çevresel uygunluk, kentsel formlar, gelişme yoğunluğu, ekonomik kalkınma ve sürdürülebilir kalkınma gibi konularda sıkça karşımıza çıkmaktadır (Yeh vd., 2021).

Kentsel büyüme modellerinde tarihsel veriler gelecek tahminlerinin çözüm kümesini oluşturmak için önemli bir veri seti oluşturur. Geçmiş zamana ait verilerden gelecek tahminleri oluştururken tutarlı sonuçlar üretmek için geçiş kurallarının tanımlanması ve kalibre edilmesi önemli bir aşamadır. Hücresel otomata modellerindeki hücreler arası geçiş kuralları geçmiş zaman verileri ve gelecek tahminleri için aynı veri setini kullanacağından, doğru veri setlerinin oluşturulması önemlidir (Batty, 1997; Clarke vd., 1997). Hücresel otomata tabanlı kentsel büyüme modellerinin çoğunda alan kare ızgaralara indirgenir. Geçiş kurallarının mekânsal modele iteratif olarak uygulanmasını sağlamak için bu indirgeme gereklidir. Bu nedenle, modelde kullanılan ızgara boyutları ile uzaktan algılama verilerinin tutarlı olması çok önemlidir. Hücresel otomatların kullanıldığı kentsel büyüme için farklı modeller süreç içerisinde geliştirilmiştir (Tablo 3).

Kentsel Büyüme Modelleri	Modellerin Yaklaşım Biçimleri
SLEUTH	Kentsel büyüme ve arazi kullanımı çalışmalarında yaygın olarak kullanılır. Arazi kullanımının tarihsel süreçteki değişimi ön plandadır.
Dinamik Kentsel Evrim Modeli (DUEM)	Kentsel büyümeyi simüle etmek için konut, sanayi, ticari ve hizmet alanları ile, cadde ve yol ağları verilerini kullanır.
Çok Kriterli Değerlendirme Modeli (MCE)	Seçilen alanların sahip olduğu çeşitli özelliklere dayalı olarak belirli bir amaca uygun arazi kullanımını araştırmak için kullanılır.
Çok Etmenli Sistem (MAS)	Etmenler, kendi davranışları olan nesnelere veya insanları temsil eder. Simülasyonun her bir iterasyonu, yerel kurallara uyan etmenlerin paralel olarak güncellenmesine dayanır. Bir çevre içinde konumlandırılan etmenler, yerel komşularını algılamak ve çevrelerini etkilemek için sensörlere sahiptir.
Voronoi-Tabanlı Hücresel Otomata Modeli	Voronoi tabanlı model, mekânsal nesnelere arasındaki komşuluk ilişkilerini dinamik olarak ele almak için hazır bir çözüm sunar.
Markov-Chain Hücresel Otomata Modeli	Model simülasyonu doğrulamak için gerçek arazi kullanım verilerini kullanır.
Analitik Hiyerarşi Tabanlı Hücresel Otomata Modeli	Kullanılan faktörlerin ağırlıklarının hesaplanmasında, AHP görüş formunu yanıtlayan alan uzmanlarının görüşleri esastır.
Lojistik Regrasyon Tabanlı Hücresel Otomata Modeli	Kentsel büyümenin sürecini simüle etmek için lojistik bir büyüme fonksiyonu kullanan bir olasılık yüzeyi oluşturur.

**Tablo 3.** Hücresel Otomata Tabanlı Modeller ve Yaklaşım Biçimleri

SLEUTH modeli dört temel veri seti kullanmaktadır: arazi kullanımı, eğim, ulaşım ve kısıtlı veya korunan alanlar (Clarke vd., 1997). Çok kriterli bir değerlendirme modeli olan MCE ise morfodinamik katmanları, arazi kullanımını, eğimi, arazi taşıma kapasitesini, kentsel alanlara yakınlığı ve ekolojik açıdan hassas alanları veri seti olarak kullanmaktadır (Bosque-Sendra, 2004). Çok etmenli sistem (MAS) arazi kullanımı, nüfus yoğunluğu ve ulaşım gibi çeşitli veri setlerini dikkate almaktadır (Crooks vd., 2014). Analitik Hiyerarşi Süreci modellerinde kullanılan faktörlerin ağırlıklarının hesaplanmasında, AHP görüş formunu yanıtlayan alan uzmanlarının görüşleri esas alınmaktadır (Mohammadi vd., 2013). LR modeli, kentsel büyümenin sürekli sürecini simüle etmek için lojistik bir büyüme fonksiyonu kullanan bir olasılık yüzeyi oluşturmak için sürekli verileri kullanmaktadır. Entegrasyon modeli, mekânsal ve zamansal süreci simüle etmek için güçlü bir araçtır (Y. Liu & Feng, 2012). Bir model oluşturmak için, standart bir kural ve veri seti kullanılmayacağından, veri setleri belirli bir senaryoya göre hazırlanmalıdır.

### 2.3. Kentsel Faktörlerin Belirlenmesi

Kentsel büyümeyi etkileyen faktörlerin seçimi üzerine çalışmalar uzun yıllardır devam etmektedir. Kentsel büyümeye ilişkin ilk kavramlar, kentsel büyümede iki önemli faktör üzerine odaklanmaktadır. Bu faktörlerden ilki şehir merkezine olan mesafe ve diğeri de ulaşım maliyetidir (Alonso, 1960; Wahyudi & Liu, 2016). Kentsel çalışmaların farklı disiplinlerden araştırmacıların odak noktası olması ile kentsel büyümeyi etkileyen faktörlerin seçimi ve kentsel sistemler kavramı sürekli bir gelişim

göstermiştir. Bu gelişimin bir yansıması olarak, kentsel sistemi açıklamak ve yeni bir kentsel alanın yeri, dağılımı ve büyüklüğü hakkında fikir vermek için bu faktörleri bir modele uygulayarak olası kentsel büyümeyi tahmin etmede kullanılacak kentsel faktörler çalışmaların odak noktası haline gelmiştir (Al-sharif & Pradhan, 2014; Jiang vd., 2023; Wahyudi & Liu, 2016).

Hücresel otomatların kentsel büyüme modellerinde kullanılmaları son yıllarda oldukça artmıştır. Hücresel otomata modellerinin kentsel faktörler ile olan açık ve esnek ilişkisi bu modelleri popüler bir araç haline getirmiştir. Hücresel otomata modellerinin kentsel çalışmalardaki popülaritesi, karmaşık kentsel morfolojiyi basit kurallarla temsil etme yeteneğine ve kullanıcılarına güçlü bir mesaj veren sezgisel görünümüne bağlanabilir (Barredo vd., 2004; Batty, 1997). Hücresel otomata modelleri dört ana unsura sahiptir: Modeli oluşturan hücreler, hücrelerin durumu, hücreler arası geçiş kuralları ve hücreler arası komşuluk ilişkileri. Kentsel çalışmalarda bu unsurlarda geçiş kuralları diğerlerine göre daha çok ön plana çıkmaktadır. Geçiş kuralları bir hücrenin değişen durumunu belirleyen bir unsurdur. Kentsel çalışmalarda geçiş kuralları, bir hücrenin arazi örtüsü özelliğini, örneğin kentsel olmayan durumdan kentsel duruma nasıl değiştirdiğini belirlemede önemli bir rol oynar. Geçiş kuralları, itici faktörlerin kentsel büyümeye nasıl katkıda bulunduğunu göstermektedir (Silva & Clarke, 2005).

Geçiş kuralları için girdinin nasıl belirleneceği kapsamında net bir kural ve ortak bir anlayış olmadığı için çok çeşitli kentsel faktörler araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Araştırmacıların bu faktörleri belirleme sürecinde farklı yaklaşımları olmuştur. Faktörlerin belirlenmesinde analiz ölçeği (şehir ölçeği, bölgesel ölçek veya küresel ölçek), modelin uygulanacağı bölgenin jeomorfolojisi (eğim, yükseklik, su kütlesi vb.) ve veri kullanılabilirliği ve erişilebilirliği etkili olmuştur (Wu & Webster, 2000; Zhang vd., 2011). Aynı bölge için farklı büyüme senaryolarına göre farklı faktörlerin kullanıldığı modeller ortaya çıkabilir (Zhang vd., 2011). İtici faktörlerin belirlenmesinde farklı yaklaşımlar ile karşılaşılsa da literatürde karşılaştığımız faktörler gruplandırıldığında beş ana grup faktörden bahsetmek mümkündür (Barredo vd., 2004).

- Çevresel faktörler
- Yerel ölçekli mahalle faktörleri
- Kentlerin mekânsal özellikleri ile ilgili faktörler
- Kentsel politika ile ilgili faktörler
- Sosyoekonomik faktörler

Çevresel faktörler hücresel otomata modelleri için kısıtlı veya hariç tutulacak katmanları içeren faktörleri temsil etmektedir. Çevresel faktörlerde kısıtlayıcı ya da hariç tutulacak katmanlar olarak yeşil alanlar, milli parklar, tarım alanları gibi bitki örtüsüne sahip alanlar, su kütlesi, orman alanları vb. örnek gösterilebilir. Yerel ölçekli mahalle faktörleri arazi kullanım türleri ile ilişkilidir. Genellikle mevcut yerleşim bölgelerinin yakınında büyüyen yeni yerleşim bölgeleri gibi diğer arazi kullanımlarından etkilenen faktörlerdir. Kentlerin mekânsal özellikleri kent merkezlerine uzaklık ve erişilebilirlik gibi faktörleri içerir. Kentsel politikanın etkilediği faktörler arazi kullanım durumları, imar durumları ile ilgilidir. Sosyoekonomik faktörler nüfus verisi, nüfus artışı, sosyal büyüme, merkezi iş alanları gibi faktörleri içerir (Barredo vd., 2004). Kategorilere ayrılan faktörlerden yola çıkarak hücresel otomata modellerinin gelecekteki arazi kullanımı değişikliklerini simüle etmek için niceliksel faktörlerden ziyade dinamik faktörlere odaklandığı görülmektedir. Bu bağlamda hücresel otomata modellerinin nicel veri türleriyle de etkileşim kurabilmesi için diğer modeller ve araçlarla entegrasyonu önemlidir. Erişilebilirlik faktörleri karayollarına, otoyollara, demiryollarına ve önemli

ulaşım ağlarına olan uzaklıklar ile ilgilidir. Bu faktörler, dinamik kalkınma ağı gibi nedenler ile bunların insan ve kentsel genişleme gibi sonuçları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bunlara ek olarak topografik özellikler; yükseklik, eğim gibi faktörlerin de göz önüne alınması önemlidir. Bu faktörler doğanın, yapılı çevrenin dinamik gelişimi ve hareketi ile olan etkileşimi anlamak için gereklidir. Faktörlerin belirlenmesi sürecinde yerel ölçek de önemli bir parametre olmaktadır. Yerel ölçeğin kendine özgün özellikleri alanlara özgün faktörlerin ortaya çıkarılması bağlamında çok kritiktir. İtici faktörlerin oluşturulması aşamasında uzman kişilerle kapsamlı bir saha çalışması yapılması, gerçekçi ve durumu yansıtan faktörlerin seçilerek kentsel büyüme modellerinin doğru sonuçları üretmesi açısından kritik bir değere sahiptir (Tablo 4).

<b>Kentsel Faktörlerin Belirlenmesi</b>
Yollara/Ulaşım Ağlarına (Havaalanı-Raylı Sistemler) Olan Uzaklık – Yollarla Olan Kesişim
Kent Merkezine Olan Uzaklık
Kentteki Önemli Merkezler/Odak Noktaları
Eğim
Yükseklik
Tepe Noktaları
Çevresel, Hidrolojik ve Tarımsal Faktörler
Kentsel Uygunluk (Gelişime Açık Alanlar)
Nüfus Yoğunluğu
Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü
Sulak Alanlar
Yapılı Çevreyi Oluşturan Etmenler (Endüstriyel Alanlar, Ticari Alanlar, Kamusal Alanlar, Eğitim ve Sağlık Alanları vb.)
Kentsel Sınırlar (Zonlama)
Yeşil Alanlar (Milli Parklar, Ormanlar, Rekreasyon Alanları vb.)

**Tablo 4.** Kentsel Büyüme Modellerinde Kullanılabilecek Faktörler

#### 2.4. Model Çerçevesi ve Model Uygunluğu

Hüresel otomatların kentsel büyüme ve yayılma senaryolarında kullanılabilmesi için gerekli veri setleri uzaktan algılama verileri ile tematik katmanlar şeklinde oluşturulmalıdır. Bu bağlamda arazi kullanım ve arazi örtüsü katmanları modelin doğruluğunu değerlendirebilmek için farklı tarihsel zaman aralıklarını içermelidir. Seçilen kentsel alanda kentsel büyüme bağlamında ciddi değişikliklerin olduğu dönem aralıklarının seçilmesi modelin uygunluğunu ölçmek için önemli bir parametredir. Tarihsel zaman dilimleri seçilirken dikkat edilmesi gereken noktalardan biri de zaman aralıklarının eşit olarak verilmesidir. Kentsel değişimlerin rahat ölçülebilmesi için zaman aralıkları 10-20 yıl gibi aralıklarla, kısa bir dönemi kapsamayacak şekilde belirlenmelidir. Model çerçevesinde kentsel faktörler bağlamında ele alınan nüfus yoğunluğu haritaları da veri setinin önemli bir parçasıdır. Aynı zamanda yol ağlarına olan mesafeler, seçilen alandaki odak noktaları, seçilen alanın eğim ve yükseklik analizi, kentsel büyümenin gerçekleşeceği alanların tespiti veri setinin önemli katmanlarıdır. Veri setleri hazırlanırken raster katmanlar halinde hazırlanması önemlidir. Kentsel model çerçevesi oluşturulurken uzaktan algılama ile elde edilen bölge arazi kullanım verileri sınıflandırılmalıdır. Sınıflandırma geçiş kurallarının tanımlanabilmesi için gerekli bir aşamadır. Coğrafi bilgi sistemleri kullanarak uydu görüntülerinin indirilmesi, görüntülerin işlenmesi ve raster hesaplamaların yapılması mümkün olmaktadır. Sınıflandırma yapılırken kentsel faktörleri gruplandırabilmek adına genellikle dört ana kategori belirlenebilir. Yapılı çevre (yerleşim alanları, ticari alanlar, kamu yapıları vb.), bitki örtüsü ve yeşil alanlar (parklar, ormanlar ve rekreasyon alanları vb.), sulak alanlar (göller,

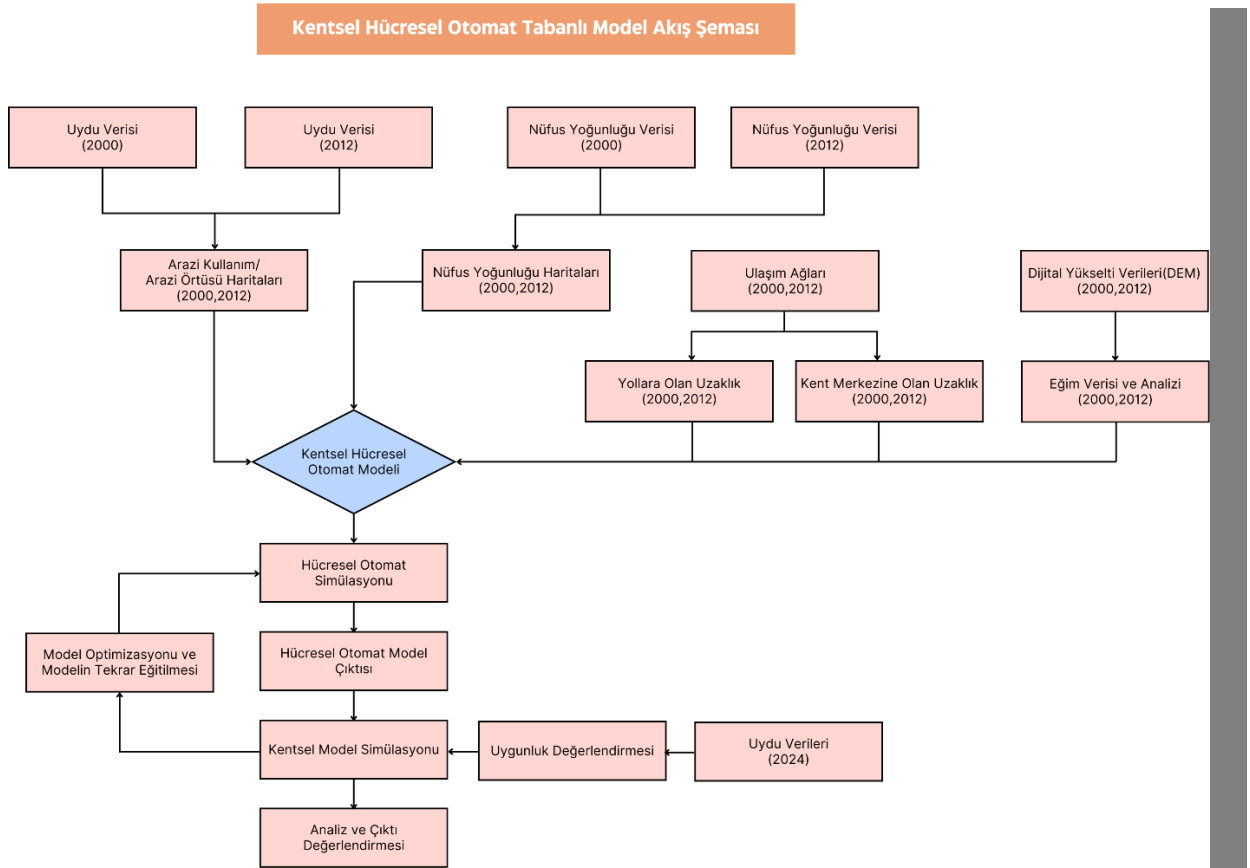


dereler, su kaynakları vb.) ve bu üç kategorinin dışında kalan diğer faktörler (Tablo 5). Kategori sayısı seçilen alanda uygulanmak istenen senaryoya göre değişiklik gösterebilir.

Kategoriler	Tanımlar
Yapılı Çevre	Doğal çevreden bağımsız yapılmış alanlar (yerleşim alanları, ticari alanlar, kamu alanları vb.)
Bitki Örtüsü	Kentsel alan ve çevresindeki tüm yeşil alanlar
Sulak Alanlar	Yüzey suyu kütleleri, göller, rezervuarlar, göletler, nehirler dahil tüm su kütleleri
Diğer	Yerleşim, bitki örtüsü ve su hariç tüm özellikler

**Tablo 5.** Arazi Kullanım Verilerinin Sınıflandırılması

Arazi kullanım verileri uzaktan algılama verileri kullanılarak elde edildiği için verilerin doğruluğu kontrol edilmelidir. Bu aşamada maksimum olabilirlik algoritması (maximum likelihood algorithm) sınıflandırmanın doğru sonuçlar verip vermediğini kontrol edecek mekanizmayı sağlar. Maksimum olabilirlik algoritmasının doğru sonuçlar üretebilmesi için yeterli eğitim verisine ihtiyaç vardır. Maksimum olabilirlik algoritması uydu görüntülerden elde edilen verilerin spektral uzaklıklarını hesapladığı için belirlenen her kategori için ayrı bir eğitim verisine ihtiyaç vardır. Spektral mesafeleri yakın olan kategorilerde doğruluk oranının artması için daha fazla eğitim verisi gereksinimi duyulmaktadır. Bu süreç farklı tarihsel zamanlardaki arazi kullanımları için ayrı ayrı yapılmalıdır. Sınıflandırma, üretilen sonuç ile gerçek veri arasındaki benzerlik oranını belirlediği için modelde önemlidir. Kentsel büyüme senaryoları bağlamında hücresel otomatların kullanımına yönelik model çerçevesi geçiş kurallarının tanımlanması, model kalibrasyonu ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Hücresel otomata tabanlı modelin 2000-2012-2024-2036 yılları için varsayılan projeksiyonuna göre oluşturulmuş akış şeması model çerçevesinin hangi aşamaları içerdiğinde barındırdığını göstermektedir (Şekil 4).



**Şekil 4.** Hücresel Otomata Tabanlı Kentsel Büyüme Model Akış Şeması

Kentsel büyüme birçok etmene bağlı bir sistemdir. Etmenlerin odağında ise kent plancıları, tasarımcılar, karar vericiler, akademik uzmanlar vb. aktörler yer almaktadır. Birden fazla aktörün yer aldığı bir sistemde hücresele otomata tabanlı bir modelin kullanımı aktörlerin kolektif bir süreç geçirmesi ile doğrudan ilişkili olmaktadır. Hücresele otomata tabanlı bir model hücreler arası ilişkiler üzerinden analiz edildiği için hücreler arası durumları temsil eden geçiş kurallarının doğru oluşturulması önemli bir aşamadır. Bu bağlamda farklı aktörlerin Şekil 5'te gösterilen model kısmında ortak bir karar verici rolü oynaması önemlidir. Hücresele otomata tabanlı bir kentsel büyüme modelinde bu ortaklığı sağlayabilecek yaklaşımlardan birisi Analitik Hiyerarşi Sürecidir (AHP). Mohammadi vd. İran İsfahan'da gerçekleştirdikleri çalışmada CBS, AHP ve Hücresele Otomata modelini birlikte kullanmayı denemişlerdir. Çalışmada ilk olarak otoyollara olan mesafe, yollar, yerleşim alanları, kentsel altyapılar ve eğitim amaçlı arazi kullanımı gibi kentsel büyümeyi etkileyen faktörler belirlenmiştir. Daha sonra, her bir faktörün ağırlıkları AHP ve ikili karşılaştırmalar kullanılarak hesaplanmıştır. Burada her bir faktörün belirlenmesinde ve ağırlıklarının karşılaştırılmasında karar verici uzman kişiler etkin bir rol oynamıştır ve ortak değerlendirmeler sonucu faktörler belirlenmiştir. Daha sonra çalışma, elde edilen ağırlıklara dayalı olarak her bir faktörün analitik haritalarını üst üste bindirerek ve CBS kullanarak birincil arazi uygunluğunu haritalandırmaktadır. Çalışma, Hücresele Otomata, AHP ve CBS kombinasyonunun, plancıların planlarını uygulamadan önce değerlendirmeleri ve üretilen farklı senaryoların incelenmesine dayalı olarak gelecekteki durumları daha iyi anlamaları için uygun bir araç sağladığı sonucuna varmaktadır (Mohammadi vd., 2013).

Kentsel büyüme ve yayılma senaryolarında kullanılacak modelin gelecek simülasyonu ve tahmini yapabilmesi için güncel durumun analizini doğru yapması gerekir. Bu bağlamda kentsel çalışmalarda modelin çerçevesini farklı zaman aralıklarına uyarlamak önemlidir. Şekil 5'teki şemada baz alınan örnek üzerinden model akış şeması incelendiğinde öncelikli olarak 2000 ve 2012 yıllarındaki uydu verileri (arazi kullanım/arazi örtüsü haritalarının oluşturulması), nüfus yoğunluğu, ulaşım ağları, dijital yükselti verileri kullanılarak kentsel hücresele otomata modeli oluşturulmaktadır. Model oluşturulduktan sonra hücreler arası geçiş kuralları kentsel büyüme senaryosuna bağlı olarak tanımlanarak modelin simülasyonu üretilerek model çıktısı oluşturulur. Kentsel model simülasyonunun çıktıları güncel durum olan 2024 yılının uydu verilerinden alınan arazi kullanım ve arazi örtüsü haritaları ile karşılaştırılarak modelin uygunluğu test edilir. Eğer model Kappa indeksi verilerine göre 0,85 ve üzerinde bir benzerlik oranı gösteriyorsa modelin uygun olduğu kabul edilerek gelecek simülasyonu ve tahmini üretme çalışmaları sürecin bir parçası haline gelir. Eğer model yeterli uygunluğu gösteremezse geçmiş yıllardaki veriler kullanılarak modelin tekrar oluşturulması ve simülasyonun baştan kurulması gerekir.

Kentsel büyüme senaryosuna göre belirlenen geçiş kurallarının tanımlanması modelin başlangıç aşamasını oluşturur. Geçiş kuralları kısıtlayan bir fonksiyon görevi görerek arazi kullanımı, nüfus verisi gibi verilerin modelde işlenmesini sağlar. Geçiş kurallarında öne çıkan hücreler arası komşuluk ilişkileridir. Kurallar komşuluk ilişkilerini belirleyerek kentsel alandaki etkilerini simüle eder. Geçiş kuralları kentsel büyümenin senaryosuna göre değişiklik gösterebilir. Hücresele otomata tabanlı sistemlerde bir hücrenin gelecekteki durumunu etkileyen üç önemli faktör vardır.

- Hücrelerin başlangıç durumu
- Komşu hücrelerin başlangıç durumu
- Kentsel büyüme senaryosuna göre belirlenen geçiş kuralları

Arazi kullanımı değişikliklerine göre kuralların belirlenmesi, modelinin güvenilirliğini ölçmek için gereklidir. Bu bağlamda, arazi kullanımı, korunacak alan bilgisi, nüfus yoğunluğu ve yol kullanımı geçiş kurallarına örnek olarak verilebilir. Geçiş kurallarına göre sınıfların dönüşümlerine ait genel bir örnek

aşağıdaki tabloda sunulmuştur (Tablo 6). Senaryolara göre geçiş kuralları ve dönüşümler farklılık gösterecektir.

* EĞER arazi sınıfı YAPILI ÇEVRE ise (konut, ticari, yol vb.) O ZAMAN değişiklik olmaz.				
* EĞER arazi sınıfı YAPILI ÇEVRE değilse (bitki örtüsü veya diğerleri) O ZAMAN YAPILI ÇEVRE olabilir. <i>eğer &gt;&gt; Nüfus yoğunluğu tanımlanan eşişe eşit veya daha büyükse</i> <i>VE komşu YAPILI ÇEVRE hücre sayısının tanımlanan eşişe eşit veya daha büyük ise</i>				
* EĞER arazi sınıfı SULAK ALANLAR ise, O ZAMAN değişiklik yok.				
<b>Kategori</b>	<b>Yapılı Çevre</b>	<b>Bitki Örtüsü</b>	<b>Sulak Alan</b>	<b>Diğer</b>
<b>Yapılı Çevre</b>	Dönüşebilir	Değişiklik Yok	Değişiklik Yok	Değişiklik Yok
<b>Bitki Örtüsü</b>	Dönüşebilir	Dönüşebilir	Değişiklik Yok	Dönüşebilir
<b>Sulak Alan</b>	Değişiklik Yok	Değişiklik Yok	Dönüşebilir	Değişiklik Yok
<b>Diğer</b>	Dönüşebilir	Dönüşebilir	Değişiklik Yok	Dönüşebilir

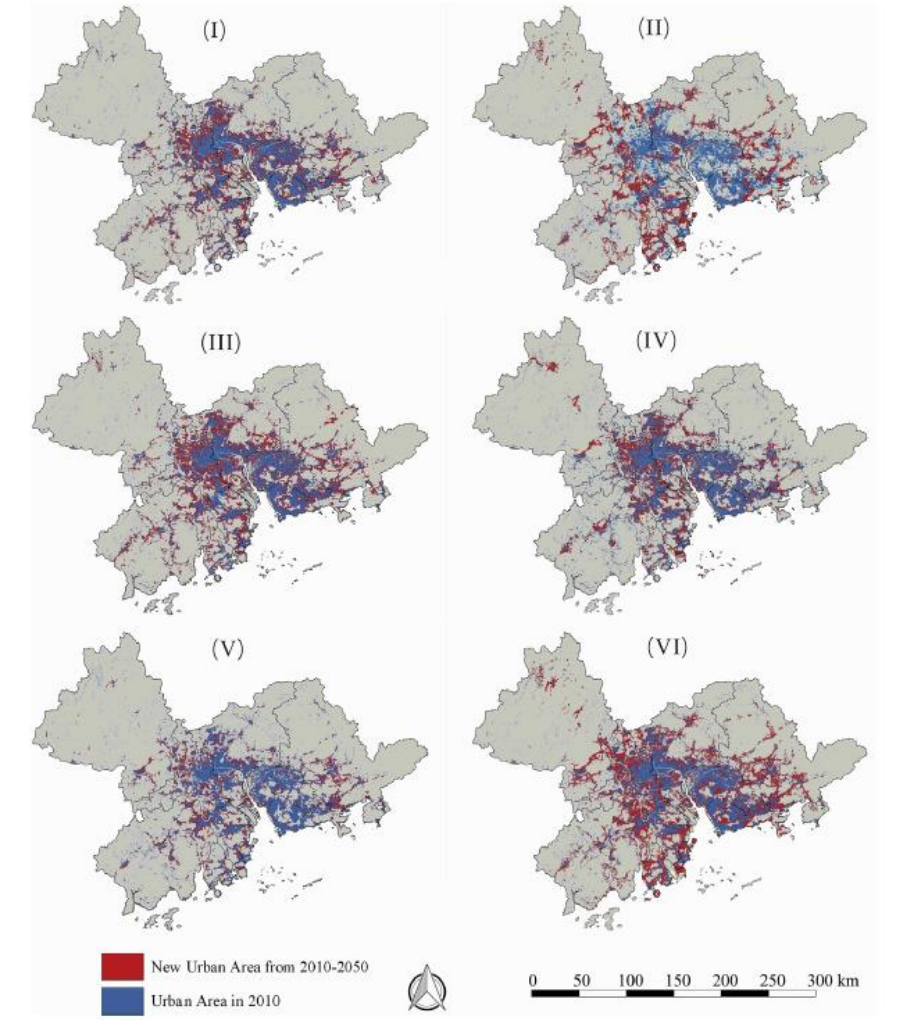
**Tablo 6.** Geçiş Kuralları ve Dönüşüm Matrisi Örneği

Kentlerin sahip olduğu organik yapı ve doğasında olan belirsizlik olgusu gerçek dünya modellerinin mükemmel bir temsilini yapmayı zorlaştırır. Bu sebepten geliştirilen modellerin çalışmasını ve çözüm kümelerini doğrulama çok önemlidir (Al-sharif & Pradhan, 2014). Kentsel büyüme senaryolarına geliştirilen modellerin de doğrulanması, bu modellerin bir yaklaşım çerçevesi oluşturulabilmesi açısından kritik bir yere sahiptir.

Liang vd. yaptıkları çalışmada Çin'deki bir bölgede kentsel büyümeyi simüle etmek için hücresel otomata (CA) modelini çok senaryolu bir yaklaşımla ele alarak kentsel büyüme sınırlarını belirlemek CBS ve AHP ile birleştirmişlerdir. Çalışma, otoyollara, yollara, yerleşim alanlarına, kentsel altyapılara ve eğitim arazisi kullanımına olan mesafe gibi kentsel büyümeyi etkileyen faktörleri tanımlamaktadır. Her bir faktörün ağırlıkları AHP kullanılarak hesaplanmış ve birincil arazi uygunluk haritası CBS kullanılarak oluşturulmuştur. Belirlenen senaryolara göre dönüşen hücrelerin sayısı hesaplanır ve kafes, hücre durumu, komşuluk ve geçiş kuralları dahil olmak üzere CA modeli bileşenleri tanımlanmıştır. Model daha sonra üç senaryoya dayalı olarak farklı yıllardaki kentsel büyümeyi simüle etmek için uygulanmıştır: iş ve ekonomi, kompakt şehir ve yeşil şehir. Çalışma, bütünleşmiş CA-GIS-AHP modelinin, planlamacıların planlarını uygulamadan önce değerlendirmeleri ve üretilen farklı senaryoların incelenmesine dayalı olarak gelecekteki durumların daha iyi tanınması için değerli bir araç sağladığı sonucuna varmaktadır (Şekil 5) (Liang vd., 2018).

Berberoğlu, Akın ve Clarke da yaptıkları çalışmada Adana, Türkiye'deki kentsel büyümeyi tahmin etmek için hücresel otomata modellerinin kullanımını tartışmışlardır. Çalışma üç farklı kentsel hücresel otomata modelleme yaklaşımını karşılaştırmaktadır: Markov Zinciri, SLEUTH ve Dinamica EGO. Markov Zinciri modeli, her bir arazi kullanımı/örtü sınıfı için kentsel uzaklık, yol ve su sınıfları, eğim ve arazi kullanımı gibi faktörlere dayalı Çok Kriterli Değerlendirme (MCE) kullanılarak elde edilen arazi kullanım uygunluk haritalarını gerektirir. SLEUTH modeli büyüme kurallarını her seferinde bir hücreye uygular ve yinelemeler tamamlandıkça tüm ızgarayı günceller. Dinamica EGO modellemesi en yüksek geçiş olasılığına sahip hücreleri ayırır ve dahili bir seçim prosedürü kullanarak hesaplanan hücre miktarını rastgele seçer. Genel olarak, çalışmanın bulguları, şehir planlamacılarının kentsel büyümeyi tahmin etmek ve yönetmek için çok yönlü bir yaklaşım kullanmaları gerektiğini, birden fazla

modelleme yaklaşımını, mekânsal değişkenleri, doğrulama ve kalibrasyon tekniklerini ve kentsel gelişmeyi yönlendiren faktörleri anlamalarını önermektedir. Bu şekilde, şehir planlamacıları sürdürülebilir ve öngörülebilir kentsel büyümeyi teşvik eden daha bilinçli kararlar alabilirler (Berberoğlu vd., 2016).



**Şekil 5.** Farklı Kentsel Büyüme Senaryolarına Göre 2010-2050 arası Çin Pearl Nehri Deltası ve Çevresinin Büyüme Simülasyonu (Liang vd., 2018)

Hüresel otomata modellerinin model geliştirme sürecinde oluşturulan geçiş kurallarına göre doğrulanması simülasyon sonuçlarının en iyi çözüm kümesini üretebilmesi açısından gereklidir (Wu & Webster, 2000). Doğrulamadaki amaç modelin uygulandığı kentsel alandaki büyümeyi en iyi tahmin edecek parametre setini oluşturmak içindir. Bu bağlamda hüresel otomata modellerinin doğrulanmasında genel doğruluk oranı ve Kappa endeksi en çok kullanılan katsayılar ve yaklaşımlar olarak karşımıza çıkar. Bu bağlamda belirli bir kentsel alandaki kentsel büyüme senaryosu dahilinde yapılan simülasyon ve çözüm kümesinin Kappa indeks değerinin 0,85 veya daha yüksek olması modelin kabul edilebilir olmasını sağlar (Aburas vd., 2016; Al-shalabi vd., 2013; Wu & Webster, 2000). Doğrulamanın yapılabilmesi için gerçek arazi kullanımı ile modelin ürettiği simülasyonun karşılaştırılması gerekmektedir. Karşılaştırma farklı tarihsel zaman dilimleri dahil edilerek yapılmalıdır. Aynı zamanda karşılaştırmanın yapılacağı tarihsel zaman dilimlerinin seçimi de bu aşamada önem kazanmaktadır. Kentsel büyüme ve gelişimde önemli değişikliklerin olduğu zaman aralıklarının seçilmesi modellerin güvenilirliğini doğrulamak açısından önemli bir parametredir.

**SONUÇ:**

Hücresele otomata modellerinin sahip olduğu basit ve düzenli yapı, kentsel tasarım söz konusu olduğunda coğrafi verilerin karmaşıklığını temsil etme kapsamında sınırlayıcı olabilir. Bu bağlamda hücresele otomata modellerinin kentsel büyüme senaryolarında kullanılabilmesi için diğer modellerle birleştirilmesi bu sınırlılıkların üstesinden gelebilmek için önemli bir yaklaşımdır. Hücresele otomata modellerinin nicel veri türleriyle de etkileşim kurabilmesini sağlayan analitik hiyerarşi süreci ve lojistik regresyon gibi modeller kentsel büyümenin mekânsal ve zamansal süreçlerini simüle etme, kentsel büyümenin itici güçlerini ve kentsel örüntülerin oluşumunu açıklama, kentsel büyüme modellerini simüle etme sürecinde etkin olan ağırlık faktörlerini hesaplayabilme, uzman bilgisini ve deneyimlerini kullanarak ağırlık faktörlerini sürecin bir parçası haline getirme, sosyal, ekonomik ve çevresel faktörleri dahil olduğu farklı kentsel büyüme senaryoları üretme yeteneğine sahip olma gibi avantajlar sunduğundan gerçekçi simülasyonlar elde etmek ve doğru bir tasarım çerçevesi oluşturmak için oldukça önemlidir. Bu çalışma kentsel sistemlerin sahip olduğu karmaşık örüntüleri ve farklı büyüme senaryolarının simüle ve tahmin edilmesi bağlamında üretken sistemlerden hücresele otomatların ele alınabileceği bir çerçeve çizmeye odaklanmaktadır. Üretken sistemler genel bağlamda belirli bir tasarım problemine odaklanarak etkin bir çözüm kümesi oluştururken, kentsel sistemler gibi karmaşık örüntüler problem alanı haline geldiğinde tek bir yaklaşıma dayanmak yerine farklı modellerin birlikte ele alınması gerekmektedir. Uzaktan algılama (UA) verilerinin coğrafi bilgi sistemleriyle (CBS) beraber kullanılması mekânsal dinamiklerin doğasını anlamak, sosyal, çevresel ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak değişen durumları analiz edebilmek ve simüle edebilmek için esnek bir tasarım ortamının oluşmasına katkı sağlar. Üretken bir sistem dahilinde bu veri havuzunun farklı senaryolar dahilinde denenmesi ve geliştirilmesi bütünlük bir yaklaşım oluşturmak için çok önemlidir. Her bir çalışma üretken sistemin gelişmesine katkı sağlayarak yeni mekânsal geçiş kurallarının ortaya çıkmasını sağlamakta ve daha gerçekçi sonuçların üretken sistem tarafından oluşturulmasını sağlamaktadır.

Kentlerin geçirdiği hızlı dönüşüm kontrol edilemez bir büyüme neden olmakta, buna bağlı olarak da düzensiz kentsel yapılar ortaya çıkmaktadır. Kontrolsüz büyümenin getirdiği birçok olumsuzluk vardır. Bunlar arasında tarım arazilerinin yok olması, kayıt dışı yerleşimlerin ortaya çıkması, düzensiz kentsel yapılar vb. gösterilebilir. Bu sebepten ötürü kentsel gelişimin nasıl olduğunu anlayabilme ve farklı planlama senaryolarının kentsel büyüme süreci üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi kaçınılmaz bir olgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma kentsel büyüme sürecinin bir parçası olabilecek hücresele otomata tabanlı bir büyüme modelinin çerçevesini çizmeyi amaçlamıştır. Hücresele otomata modelleri sahip oldukları basit, düzenli yapı ve hesaplama güçleri sayesinde ihtiyaçların karşılanması bağlamında etkili bir araç olmakla beraber, belirli sınırlamaları da yapısında barındırır. Bu bağlamda makale kapsamında farklı modellerin hücresele otomata modelleri ile bütünlüklenmesinin gerekliliğinden bahsedilmiştir. Hücresele otomata modelinin farklı modellerle birleşimi ile oluşturulacak çerçevenin kentsel planlama çalışmalarındaki uzmanların planlarını uygulamadan önce değerlendirmek ve farklı senaryoları inceleyerek gelecekteki durumları daha iyi anlamak için etkili bir araç sağlayacağı ön görülmektedir. Her bir faktörün kentsel büyüme süreci üzerindeki etkisini gözlemlemek ve değişkenlerin eklenmesine ve ağırlıklarının ayarlanmasına imkân veren bir alan çalışması yapmak önemli bir adım olmaktadır. Bu bağlamda gelecek çalışmalarda farklı tarihsel zaman aralıklarını içine alacak şekilde bir alan çalışması yapılması planlanmaktadır. Yapılacak alan çalışmasının tutarlı bir sonuç verip vermediğinin anlaşılması için seçilen kentsel alan için günümüzdeki durumun geçmişteki verinin model ortamında değerlendirilerek tutarlı olup olmadığı test edilecektir ve daha sonra gelecek projeksiyonu üzerinde çalışma yapılacaktır.



### **Etik Standart ile Uyumluluk**

**Çıkar Çatışması:** [TR] Yazar / yazarlar, kendileri ve / veya diğer üçüncü kişi ve kurumlarla çıkar çatışmasının olmadığını veya varsa bu çıkar çatışmasının nasıl oluştuğuna ve çözüleceğine ilişkin beyanlar ile yazar katkısı beyan formları makale süreç dosyalarına ıslak imzalı olarak eklenmiştir.

**Etik Kurul İzni:** Bu makalede etik kurul iznine gerek yoktur, buna ilişkin ıslak imzalı etik kurul kararı gerekmediğine ilişkin onam formu sistem üzerindeki makale süreci dosyalarına eklenmiştir

**Finansal Destek:** Bu çalışma için finansal destek alınmamıştır.

### **KAYNAKÇA:**

- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 380-389. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.007>
- Alkan, M., Oruc, M., Yildirim, Y., Seker, D. Z., & Jacobsen, K. (2013). Monitoring Spatial and Temporal Land Use/Cover Changes; a Case Study in Western Black Sea Region of Turkey. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(3), 587-596. <https://doi.org/10.1007/s12524-012-0227-2>
- Alonso, W. (1960). A THEORY OF THE URBAN LAND MARKET. *Papers in Regional Science*, 6(1), 149-157. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1960.tb01710.x>
- Al-shalabi, M., Billa, L., Pradhan, B., Mansor, S., & Al-Sharif, A. A. A. (2013). Modelling urban growth evolution and land-use changes using GIS based cellular automata and SLEUTH models: The case of Sana'a metropolitan city, Yemen. *Environmental Earth Sciences*, 70(1), 425-437. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2137-6>
- Al-sharif, A. A. A., & Pradhan, B. (2014). Monitoring and predicting land use change in Tripoli Metropolitan City using an integrated Markov chain and cellular automata models in GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(10), 4291-4301. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1119-7>
- Barredo, J. I., Demicheli, L., Lavallo, C., Kasanko, M., & 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. <https://doi.org/10.1068/b29103>
- Batty, M. (1997). Cellular Automata and Urban Form: A Primer. *Journal of the American Planning Association*, 63(2), 266-274. <https://doi.org/10.1080/01944369708975918>
- Batty, M., & Xie, Y. (1994). Research Article. Modelling inside GIS: Part 1. Model structures, exploratory spatial data analysis and aggregation. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8(3), 291-307. <https://doi.org/10.1080/02693799408902001>
- Bosque-Sendra, J. (2004). COMPARISON OF MULTI-CRITERIA EVALUATION METHODS INTEGRATED IN GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS TO ALLOCATE URBAN AREAS. <https://www.semanticscholar.org/paper/COMPARISON-OF-MULTI-CRITERIA-EVALUATION-METHODS-IN-Bosque-Sendra/d024625bc7c8aa1ad0ae6a4f25a19da979711b51>
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247-261. <https://doi.org/10.1068/b240247>



- Crooks, A. T., Patel, A., & Wise, S. (2014). Multi-Agent Systems for Urban Planning. İçinde Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories. IGI Global. DOI: 10.4018/978-1-4666-4349-9
- Çalışır Adem, P., & Çağdaş, G. (2020). Computational Design Thinking through Cellular Automata: Reflections from Design Studios. Journal of Design Studio, 71-83. <https://doi.org/10.46474/jds.816833>
- Gero, J. S., & Kazakov, V. A. (1998). Evolving design genes in space layout planning problems. Artificial Intelligence in Engineering, 12(3), 163-176. [https://doi.org/10.1016/S0954-1810\(97\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0954-1810(97)00022-8)
- Gu, N., Singh, V., & Merrick, K. (2010). A framework to integrate generative design techniques for enhancing design automation. 127-136.
- Hashemi, A. B., & Meybodi, M. R. (2009). A multi-role cellular PSO for dynamic environments. 2009 14th International CSI Computer Conference, 412-417. <https://doi.org/10.1109/CSICC.2009.5349615>
- Huang, C.-Y., Sun, C.-T., Hsieh, J.-L., & Lin, H. (2004). Simulating SARS: Small-World Epidemiological Modeling and Public Health Policy Assessments. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 7(4), 100-131.
- Jensen, M. B., & Foged, I. W. (2014). Cellular Automata as a learning process in Architecture and Urban design. 297-302. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2014.1.297>
- Jiang, F., Ma, J., Webster, C. J., Chiaradia, A. J. F., Zhou, Y., Zhao, Z., & Zhang, X. (2023). Generative urban design: A systematic review on problem formulation, design generation, and decision-making. Progress in Planning, 100795. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2023.100795>
- Knight, T. W. (1999). Shape grammars: Six types. Environment and Planning B: Planning and Design, 26(1), 15-31. <https://doi.org/10.1068/b260015>
- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., Li, S., Wang, S., & Pei, F. (2017). A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 168, 94-116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>
- Liu, Y., & Feng, Y. (2012). A Logistic Based Cellular Automata Model for Continuous Urban Growth Simulation: A Case Study of the Gold Coast City, Australia. İçinde A. J. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, & M. Batty (Ed.), Agent-Based Models of Geographical Systems (ss. 643-662). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8927-4\\_32](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8927-4_32)
- McCormick, N., Lavalley, C., Kasanko, M., Demicheli, L., & Barredo, J. (2003). Mapping and modelling the impact of land use planning and management practices on urban and peri-urban landscapes in Europe: The MOLAND project. 22nd Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No.03CH37449), 243-244. <https://doi.org/10.1109/DFUA.2003.1219996>
- Menges, A., & Ahlquist, S. (Ed.). (2011). Computational design thinking. John Wiley & Sons.
- Mohammadi, M., Sahebgharani, A., & Malekipour, E. (2013). Urban growth simulation through cellular automata (CA), analytic hierarchy process (AHP) and GIS; case study of 8th and 12th municipal districts of Isfahan. Geographia Technica, 8(2), 57-70.

- Musa, S. I., Hashim, M., & Reba, M. N. M. (2017). A review of geospatial-based urban growth models and modelling initiatives. *Geocarto International*, 32(8), 813-833. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1213891>
- Ning Wu, & Silva, E. A. (2010). Artificial Intelligence Solutions for Urban Land Dynamics: A Review. *Journal of Planning Literature*, 24(3), 246-265. <https://doi.org/10.1177/0885412210361571>
- O'Sullivan, D., & Torrens, P. M. (2001). Cellular Models of Urban Systems. İçinde S. Bandini & T. Worsch (Ed.), *Theory and Practical Issues on Cellular Automata* (ss. 108-116). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0709-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0709-5_13)
- Oxman, R. (2008). Digital architecture as a challenge for design pedagogy: Theory, knowledge, models and medium. *Design Studies*, 29(2), 99-120. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2007.12.003>
- Pijanowski, B. C., Tayyebi, A., Doucette, J., Pekin, B. K., Braun, D., & Plourde, J. (2014). A big data urban growth simulation at a national scale: Configuring the GIS and neural network based Land Transformation Model to run in a High Performance Computing (HPC) environment. *Environmental Modelling & Software*, 51, 250-268. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.015>
- Poelmans, L., & Van Rompaey, A. (2009). Detecting and modelling spatial patterns of urban sprawl in highly fragmented areas: A case study in the Flanders–Brussels region. *Landscape and Urban Planning*, 93(1), 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.05.018>
- Popov, N. (2011). Generative sub-division morphogenesis with Cellular Automata and Agent-Based Modelling. 166-174. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2011.166>
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., & Crecente, R. (2010a). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), 108-122. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.03.001>
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., & Crecente, R. (2010b). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), 108-122. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.03.001>
- Shi, W., & Pang, M. Y. C. (2000). Development of Voronoi-based cellular automata -an integrated dynamic model for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(5), 455-474. <https://doi.org/10.1080/13658810050057597>
- Sietchiping, R. (2004). A Geographic Information Systems and cellular automata-based model of informal settlement growth [Doctoral, University of Melbourne]. <http://hdl.handle.net/11343/38860>
- Silva, E. A., & Clarke, K. C. (2005). Complexity, emergence and cellular urban models: Lessons learned from applying SLEUTH to two Portuguese metropolitan areas. *European Planning Studies*, 13(1), 93-115. <https://doi.org/10.1080/0965431042000312424>
- Singh, V., & Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design Studies*, 33(2), 185-207. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.06.001>

- Sipahioğlu, N., & Çağdaş, G. (2022). Scenario-Based Cellular Automata and Artificial Neural Networks in Urban Growth Modeling. *GAZI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE*. <https://doi.org/10.35378/gujs.998073>
- Sudhira, H. S., Ramachandra, T. V., & Jagadish, K. S. (2004). Urban sprawl: Metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(1), 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2003.08.002>
- Terzidis, K. (2003). *Expressive form: A conceptual approach to computational design*. Spon Press.
- Wagner, D. F. (1997). Cellular automata and geographic information systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 219-234. <https://doi.org/10.1068/b240219>
- Wahyudi, A., & Liu, Y. (2016). Cellular Automata for Urban Growth Modelling: A Review on Factors defining Transition Rules. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 4(2), 60-75. [https://doi.org/10.14246/irspsd.4.2\\_60](https://doi.org/10.14246/irspsd.4.2_60)
- Wolfram, S. (2002). *A new kind of science*. Wolfram Media.
- Wu, F., & Webster, C. J. (2000). Simulating artificial cities in a GIS environment: Urban growth under alternative regulation regimes. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(7), 625-648. <https://doi.org/10.1080/136588100424945>
- Yeh, A. G. O., Li, X., & Xia, C. (2021). Cellular Automata Modeling for Urban and Regional Planning. İçinde W. Shi, M. F. Goodchild, M. Batty, M.-P. Kwan, & A. Zhang (Ed.), *Urban Informatics* (ss. 865-883). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6\\_45](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_45)
- Yigitcanlar, T., Corchado, J. M., Mehmood, R., Li, R. Y. M., Mossberger, K., & Desouza, K. (2021). Responsible Urban Innovation with Local Government Artificial Intelligence (AI): A Conceptual Framework and Research Agenda. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1), 71. <https://doi.org/10.3390/joitmc7010071>
- Zhang, Q., Ban, Y., Liu, J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.12.002>

## EXTENDED SUMMARY

### Research Problem:

The study aims to create a learning framework for the use of generative and evaluative knowledge in urban design through the computational design approach. The study will discuss how to handle Cellular Automata, one of the most frequently used generative systems, in the context of urban design.

### Research Questions:

What is the role of computational design approaches in the context of urban design? What are the stages involved in building generative system models in urban growth and sprawl scenarios? What is the framework of a cellular automaton-based urban growth model?

### Literature Review:

A review of the literature shows that there are five basic generative design algorithms: Shape Grammars, L-Systems, Genetic Algorithms, Cellular Automata, and Agent-Based Systems. Among these, Cellular Automata are dynamic and discrete systems that operate based on neighbourhood relations. In Cellular Automata models, space is defined as a grid, and each part of space is defined as a cell. These models consist of four components: Lattice, cell states, neighbourhood and transition rules (Batty & Xie, 1994). Cellular Automata are collections of cells that evolve over time based on a set of rules determined by the state of neighbouring cells (Wolfram, 2002). The complexity of the system varies depending on the type of grid used. The states of cells and neighbouring cells define Cellular Automata as a context-sensitive system. As the resulting product is dependent on the functionality of the cell states, there is a situation where form follows form. Therefore, it is primarily used in urban design, building mass calculations, and zoning, where neighbourhood relationships are crucial (Gu et al., 2010).

Cellular Automata (CA), one of the generative design systems considered in this study, was designed by mathematicians John von Neumann and Stanislaw Ulam and developed by mathematician Stephen Wolfram. Cellular Automata is a computational system that makes extensive use of computational parallelism, a powerful technique for generating different time-based solutions through various input rules and axiom conditions. John Conway, in his "Game of Life", significantly advanced the exploration of Cellular Automata as a dynamically evolving system and demonstrated the complex dynamics of interacting and interdependent actors within a system. Due to their general system configuration and robust processing capabilities, Cellular Automata have been applied over time to a wide range of scientific investigations, such as fire growth simulation, biological modelling, disease outbreak analysis, urban sprawl, etc. (Batty, 1997; Huang et al., 2004). Cellular Automata have also been instrumental in the use of different approaches to simulate complex urban development, exemplified by Dynamic Urban Evolutionary Modelling projects that have created various large-scale urban developments (Jensen & Foged, 2014).

### Methodology:

Since the 1990s, conceptual advances in Cellular Automata studies and increasing computational power due to technological developments have made it possible to use Cellular Automata in urban studies. Urban cellular automata systems have the capacity to simulate and predict land use changes, depending on the first models and developing systems. Urban cellular automata systems calculate based on the assumption that past urban growth influences future patterns through local and regional interactions between different land use types. However, urban cellular automata models are seamlessly integrated with geographic information systems. The integration of geographic information systems allows for high spatial resolution and computational efficiency, making it possible to simulate future urbanisation trends based on local interactions between land uses (Al-sharif & Pradhan, 2014; Santé et al., 2010a; Wagner, 1997).

Urban cellular automata models are powerful spatial dynamic modelling techniques that represent a major improvement over traditional models. In this context, urban cellular automata models have five main areas.

Spatiality, linking macro and micro approaches, integration between geographic information systems and remote sensing techniques, urban dynamics, simplicity and visualisation represent the five main areas (Aburas et al., 2016; Batty & Xie, 1994). This study attempts to present an approach of how cellular automaton models can be integrated into urban design from a computational design perspective and can be a learning framework. The aim of the study is to create a realistic urban model that takes into account social, economic, dynamic and spatio-temporal dimensions and to question what kind of learning output can be obtained from the model. Trying to address urban design problems from a computational design framework can contribute to the formation of an effective and productive approach in determining future planning strategies, positioning the actors active in urban design correctly, determining development strategies and solving the problems encountered. In this context, the development of a productive urban cellular automaton model depends on multiple stages.

- The data collection phase is a process that requires different types of data depending on urban growth scenarios. Apart from the selected urban growth scenario, data availability, integration with different models, etc. should also be considered during the data collection phase.
- The process of determining the factors affecting urban growth patterns and future land use changes.
- Determining the simulation characteristics of cellular automata. This stage includes determination of cell states, definition of neighbourhood properties between cells and determination of transition rules between cells.
- Verification and calibration of the generated generative system. Checking whether it is a real land use model with different evaluation criteria. At this stage, Kappa index is generally used as an evaluation criterion (Aburas et al., 2016).

#### Results and Conclusions:

The simple and regular structure of cellular automaton models can be limiting in representing the complexity of geographical data when it comes to urban design. In this context, combining cellular automata models with other models to be used in urban growth scenarios is an important approach to overcome these limitations. Models such as analytical hierarchy process and logistic regression, which enable cellular automata models to interact with quantitative data types, can simulate the spatial and temporal processes of urban growth, explain the drivers of urban growth and the formation of urban patterns, calculate the weighting factors that are effective in the process of simulating urban growth patterns, It is very important for obtaining realistic simulations and creating an accurate design framework as it offers advantages such as the ability to make weighting factors a part of the process by using expert knowledge and experience, having the ability to generate different urban growth scenarios including social, economic and environmental factors. This study focuses on the complex patterns that urban systems have and on drawing a framework in which cellular automata can be considered from generative systems in the context of simulating and predicting different growth scenarios. While generative systems generally focus on a specific design problem and create an efficient solution set, when complex patterns such as urban systems become the problem domain, different models need to be considered together instead of relying on a single approach. The use of remote sensing (RS) data together with geographic information systems (GIS) contributes to the creation of a flexible design environment for understanding the nature of spatial dynamics, analysing and simulating changing situations due to social, environmental and economic developments. Within a generative system, the testing and development of this repository of data in different scenarios is crucial to create an integrated approach. Each study contributes to the development of the generative system, enabling new spatial transition rules to emerge and more realistic results to be generated by the generative system.