

KENTSEL YAYILMA SİMÜLASYON MODELLERİ VE HÜCRESEL OTOMAT

İsmail Ercüment Ayazlı¹, Fatmagül Batuk¹, Hülya Demir¹

¹YTÜ, Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Müh.Bölümü, Esenler, İstanbul, eayazli@yildiz.edu.tr, batuk@yildiz.edu.tr, hudemir@yildiz.edu.tr

ÖZET

Kentsel yayılma, kentin merkezden çeperlere doğru fiziksel olarak genişlemesidir. Bu tarzdaki fiziksel genişleme, çevresel ve sosyo-ekonomik bazı değişimlere neden olmaktadır. 19. yüzyılın başlarından 20. yüzyılın sonlarına kentsel yayılmanın modellenmesi birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Ancak birçok model, kentlerin karmaşık yapısını modellemede yetersiz kalmıştır. Günümüzde kentler; hücresel otomata (HO), çok ajanlı sistemler, yapay sinir ağları gibi karmaşık sistem modelleme teknikleri ile modellenmektedir. HO bu yöntemlerin en çok uygulananlarından biridir. Bu bildiride kentsel yayılmayı modelleyebilmek için geliştirilen HO tabanlı yazılımlar incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Coğrafi Bilgi Sistemi, Görüntü İşleme, Şehircilik, Zamansal Analiz, Simülasyon

ABSTRACT

URBAN SPRAWL SIMULATION MODELS AND CELLULAR AUTOMATA

Urban sprawl is physical expansion of cities from the urban centre to the fringes. This causes some environmental and socio-economic changes. From beginning of the early 19th century to the late of 20th century a lot of models were developed in order to model urban sprawl. However, they are not able to model the complex urban structures in an adequate way. Nowadays, urban models are created by using complex system modelling techniques such as; cellular automata (CA), multi agent systems, artificial neural networks. The method of CA is the most popular of them. In order to simulate urban sprawl, CA based software were examined in this paper.

Keywords: Geographic Information Systems, Digital Image Processing, Urban Sprawl, Spatio-temporal Analysis, Simulation

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunda yaşanan hızlı artış, beraberinde kentleşme sorunlarını da artırmaktadır. Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) verilerine göre, 2020 yılında Avrupa'daki nüfusunun %80'inin kentlerde yaşaması beklenmektedir (AÇA, 2006). Kentsel ve çevre kaynaklarını daha iyi kullanabilmek ve yaşanabilir kentleri kurmak için karar vericiler, 15-20 yıl sonra kent sınırları içerisinde arazi kullanımının nasıl olacağı ve kentin yayılımının hangi yönde olacağını kestirmek istemektedirler.

Özellikle nüfus artışı ve köyden kente göç ile kent formunda meydana gelen değişimler; kentsel yayılma, kentsel büyüme, kentsel değişim ve kentsel gelişim terimleri ile açıklanmaya çalışılmaktadır. Bu terimler, çoğu zaman birbirlerine yakın anlamlarda kullanılmalarına rağmen temelde birbirlerinden farklıdır. Kentsel gelişme; kent mekânının fiziksel büyümesinin yanında içinde bulundurduğu toplumun ekonomik, kültürel ve sosyal olarak daha iyiye gittiğine işaret eden bir kavramdır. Kentin fiziki mekânının nicel olarak büyümesi kentsel büyüme, nitelik olarak farklılaşması ise kentsel değişim kavramları ile tanımlanmaktadır (Başlık, 2008). Kent mekânının fiziksel genişlemesi ile birlikte çevresel ve sosyo-ekonomik faktörlerin de etkisiyle değişimi, kentsel yayılma terimi içinde açıklanabilir.

Yayılma terimi ilk olarak ABD'li kent plancı Earle Draper tarafından 1937'de kullanılmıştır (Nechyba ve Walsh, 2004). AÇA, kentin plansız ve kontrolsüz olarak genişlemesi olarak tanımladığı kentsel yayılmayı; büyük kent alanlarının düşük yoğunluklu fiziksel dokularının serbest piyasa ekonomisi koşulları altında ağırlıklı olarak tarımsal alanlara doğru genişlemesi şeklinde tarif etmektedir (AÇA, 2006).

Bir başka deyişle, kent sınırlarının kent merkezinden çeperlere doğru genişlemesi sonucunda arazi kullanımı ve fonksiyonlarının iç içe girmesi kentsel yayılma olarak adlandırılmaktadır (AÇA, 2006; Cheng, 2003). AB Çevre Ajansı tarafından AB üye ve aday ülkelerin kentleşme sorunlarının incelendiği raporda kentsel yayılma etkenleri yedi başlıkta toplanmaktadır (AÇA, 2006):

- Makro-ekonomik etkenler
- Mikro-ekonomik etkenler
- Demografik etkenler
- Barınma tercihleri

- Kent içi problemler
- Ulaşım
- Planlama politikaları

Kentsel yayılma, fiziksel, çevresel ve sosyo-ekonomik nedenlere bağımlı olduğu için dinamik, doğrusal olmayan ve kompleks bir yapıya sahiptir ve karmaşık sistem teknikleri ile modellenenilmektedir (Clarke, vd., 1997; Cheng, 2003; Portugali, 2006).

Kompleks sistem öğeleri arasında doğrusal olmayan etkileşimler vardır ve bu etkileşimler sıklıkla sistem öğelerinin yeni özelliklerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Karmaşık sistemlerin temel özellikleri kendi kendini organize eden bir yapıya sahip olmasıdır. Karmaşık sistem öğeleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler ve geri besleme döngüsü; hem farklı hem de aynı ölçeklerde tahmin edilemeyen dinamik bir yapıyı doğurur. Kendi kendini örgütleyen bir sistemin kendini örgütleyen bir içyapısı vardır ve bu yapı dışarıdan etkilenmez tamamıyla kendi iç dinamikleriyle hareket eder. Çevreyle etkileşime gereksinim duyar ve elemanları arasında doğrusal olmayan ilişkiler vardır (Cheng 2003; Başlık, 2008).

Kent ile ilgili karar verecekler için bir kentin yayılımı, ileriki yıllarda kent sınırlarının nerelere ulaşacağı, arazi kullanımında meydana gelen ve gelecek değişimlerin belirlenmesi ve önceden kestirebilmesi büyük önem arz etmektedir. HO arazi kullanımında meydana gelen değişimlerin etkisiyle kentsel yayılma simülasyon modellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle HO tabanlı çalışan birçok yazılım geliştirilmiştir. Bunlardan başlıcaları; METRONAMICA, DUEM ve SLEUTH'dür.

2. KENTSEL YAYILMA MODELLERİ VE KARMAŞIKLIK

Kentsel yayılmayı belirleyebilmek için pek çok kuram geliştirilmiştir. 19. yüzyılın başlarında von Thunen kendi adını taşıyan modelde kentsel arazi kullanımının mekânsal olarak nasıl dağıldığını araştırmıştır. Thunen, kent merkezinin çevresindeki tarımsal alanların dağılımını etkileyen faktörleri belirlediği çalışmada, tarımsal faaliyetlerin şehirden dışarıya doğru açılan eşmerkezli halkalar halinde olacağı sonucuna varmıştır. Bu çalışma tespitlerinden arazi bedeli, kentsel aktiviteler, yoğunluk ve seyahat, merkezden uzaklaştıkça azalmaktadır ve merkezle olan mesafeyle aralarında ters orantılı bir ilişki vardır (Başlık, 2008).

Burgess tarafından 1926 yılında önerilen Eş Merkezli Bölgeleme Teorisi'nde ise kent mekânı beş bölgeden oluşmaktadır. Merkezden dışa doğru iç içe geçmiş dairelerden oluşan bu modele göre; kent merkezinde yer alan birinci bölge, merkezi iş alanlarıdır. Bitişğinde sanayi alanları ile yoksul insanların yaşadığı varoşların iç içe bulunduğu çok kullanımlı geçiş bölgeleri olarak adlandırılan ikinci bölge yer almaktadır. İşçilerin yaşadığı yerler üçüncü bölgede, orta gelir sınıfının yaşadığı yerler ise dördüncü bölgede yer almaktadır. Dairenin en dışında ise üst gelir sınıfının yaşadığı beşinci bölge bulunmaktadır (Candau, 2002).

1933 yılında coğrafyacı Christaller tarafından tasarlanan Merkezi Alan Teorisi modelinde, yerleşim yerleri üçgen ve altıgen gibi geometrik şekillerle tanımlanmaktadır. Merkez, kendisinden eşit uzaklıkta bulunan küçük ilçelerin sayısına göre belirlenmektedir.

1939 yılında Hoyt, Burgess'in Eş Merkezli Bölgeleme Teorisi'ni geliştirmeye çalışmış ve kentsel arazi kullanımı için Sektör Teorisi'ni önermiştir. Bu modelde, farklı sosyo-ekonomik gruplar için ikamet eğilimleri araştırılmıştır. Modele göre yüksek kalitedeki yerleşim tercihleri kent merkezinden dışa doğru genişlemektedir (Candau, 2002).

Ayrıca, "Tek Merkezli Kent Modeli", "Tiebout Yerel Kamusal Finans Modeli" (Nechyba ve Walsh, 2004), "Çoklu Çekirdek Teorisi" (Candau, 2002), "Zipf Kuralı" ve "Bid-Rent Teorisi" (Candau, 2002) kentsel yayılmayı modelleyebilmek için kullanılan modellerden bazılarıdır. Ancak tüm bu sistemler kentlerin karmaşık yapısı nedeniyle, yayılmayı modellemekte yetersiz kalmaktadır.

Kompleks teorisi kavramı, kendi kendini örgütlenme, belirme, hiyerarşi ve derece gibi karmaşık coğrafi olayların sistem olarak düşünülmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Cheng, 2003). Kompleks sistem öğeleri arasında doğrusal olmayan etkileşimler vardır ve bu etkileşimler sıklıkla sistem öğelerinin yeni özelliklerinin ortaya çıkmasına neden olur. Karmaşık sistemler, temel özelliklerini kendi kendini örgütleyen karakterlerden alır. Karmaşık sistem öğeleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler ve geri besleme döngüsü, hem farklı hem de aynı ölçeklerde tahmin edilemeyen dinamik bir yapıyı doğurur. Sistem kendi kendini örgütleyen bir içyapıya sahiptir. Bu yapı dışarıdan etkilenmez tamamıyla kendi iç dinamikleriyle hareket eder. Çevreyle etkileşime ihtiyaç duyar ve elemanları arasında doğrusal olmayan ilişkiler vardır (Cheng, 2003; Başlık, 2008).

Karmaşıklığın yorumlanması ve kavramların düzenlenmesi için hiyerarşi teorisi kullanılmaktadır. Hiyerarşi teorisi; derece, organizasyon, gözlem ve açıklama konularını düzeyler karşısındaki etkileşimler ve hiyerarşik yapılar tarafından nitelendirilen kompleks bir sistem içinde inceler (Cheng, 2003).

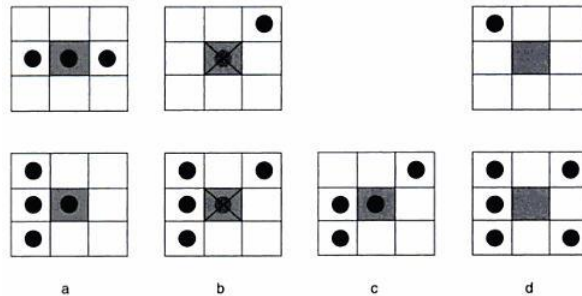
Son yıllarda bilgisayar teknolojisinde yaşanan gelişmeler, kentsel karmaşıklığın modellenmesinde çözümü çok zor olan simülasyon hesaplamalarının bilgisayar ortamında yapılabilmesini sağlamıştır. Simülasyon, bilgisayar modelini çalıştırarak sistemin davranışı hakkında geçerli bilgilerin toplanmasını sağlar. Modellenen sistemin performans ölçülerini kestirmek için kullanılan bir yöntemdir. Simülasyon çıktısının kestirimi, rastgele örnekleme temeline dayandığı için herhangi bir istatistiksel deneyde olduğu gibi simülasyon deneylerinde de istatistiksel yorum testlerinin kullanılması gerekir. Simülasyon modelleri arasında en yaygın kullanılanı, deneyin sonucunu tahmin etmek için rastgele örneklemeden yararlanan Monte Carlo Simülasyon modelidir (Taha, 2006). Birleşik Devletler Jeolojik Araştırma (USGS; United States Geologic Survey) tarafından gerçekleştirilen SLEUTH projesinde Monte Carlo Simülasyon modeli kullanılmıştır (Jantz ve Goetz, 2005; Herold vd., 2003). Günümüzde kentsel karmaşıklığı modellemek için kullanılan en yaygın yöntemler şunlardır: Yapay Sinir Ağları (YSA), Çok Ajanlı Sistemler (MAS) ve HO.

2.1 Hücresel Otomat

Otomat kavramı, 1930'lu yıllarda bilgisayarların temel çalışma ilkelerini ortaya koyan Alan M. Turing adına atfedilen, Evrensel Turing Makinesi ile ortaya çıkmıştır. Daha sonrasında John von Neumann ve Stanislaw Ulam HO'yı keşfetmiştir. 1970 yılında John Horton Conway "Hayat Oyunu (Game of Life)" adını verdiği ve en çok bilinen HO'yı geliştirmiştir (Başlık, 2008).

Hayat oyununun evreni, sonsuz ve iki boyutlu gridin oluşturduğu ölü veya diri hücrelerdir. Her hücre yatay, dikey veya çapraz olmak üzere bitişik olan sekiz komşusuyla doğrudan etkileşim içindedir. Model içindeki bir hücre, komşu olduğu bu sekiz hücreden bilgi alarak durumunu belirlemektedir. Herhangi bir hücre için, her zaman adımında aşağıdaki değişikliklerden biri gerçekleşmektedir (Benenson ve Torrens, 2004):

- Bir canlı hücrenin, iki ya da üç canlı komşusu varsa değişmeden bir sonraki nesle kalır (Şekil 1a).
- Bir canlı hücrenin, üçten daha fazla canlı komşusu varsa "kalabalıklaşma nedeniyle" ölür (Şekil 1b ve 2d).
- Bir canlı hücrenin, ikiden daha az canlı komşusu varsa "yalnızlık nedeniyle" ölür (Şekil 1b ve 2d).
- Bir ölü hücrenin tam olarak üç canlı komşusu varsa canlanır (Şekil 1c).

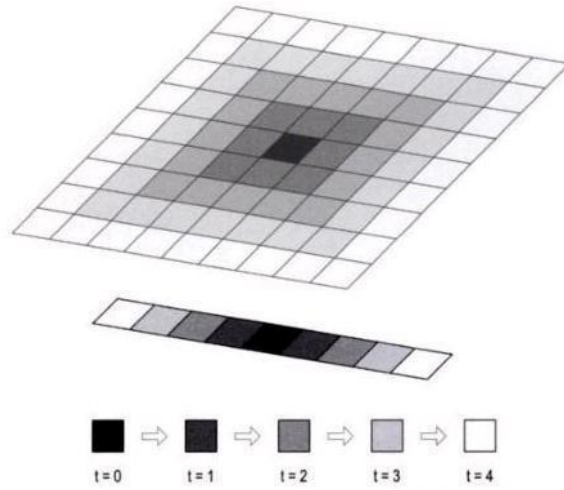


Şekil 1: Hayat Oyunu (Benenson ve Torrens, 2004)

Başlangıçtaki dağılıma sistemin "tohumu" denilmektedir. Birinci nesil, üstteki kuralların eş zamanlı olarak "tohum"daki her hücreye uygulanmasıyla elde edilmekte yani canlanmalar ve ölümler tek bir anda oluşmaktadır. Bir başka deyişle her nesil yalnızca bir önceki nesildeki dağılımın bir sonucudur. Bu kurallar daha fazla nesil yaratmak için aynı şekilde art arda uygulanmaktadır (URL 1).

HO, bir durumun hücrelere bölünmesi ve her bir hücrenin kendisine komşu olan hücrelerin durumuna göre gelecekteki durumunun kestirilmesine olanak sağlayan bir işletim sistemidir. Kentsel modellerde HO, Şekil 2'deki gibi iki boyutlu olarak tasarlanmaktadır. Şekildeki her bir hücrenin durumu, orman alanı, tarım arazisi, yerleşim, vb. arazi kullanımı fonksiyonlarını göstermektedir.

Hücrelerin arasında bilgi, takas edilebilir veya komşulara doğru yayılabilir ve bu anlamda HO, bilginin mekâna yayılmasını destekleyebilir. Tek boyutlu 3-hücre veya iki boyutlu 3x3-hücre Moore komşuluğu durumunda, örneğin renk bilgisi mekân içinde yayılabilir ve d mesafesindeki hücrelere veya $d \times d$ -karesinin çevresindeki d zamanı süresince ilk hücreye ulaşabilir (Benenson ve Torrens, 2004).

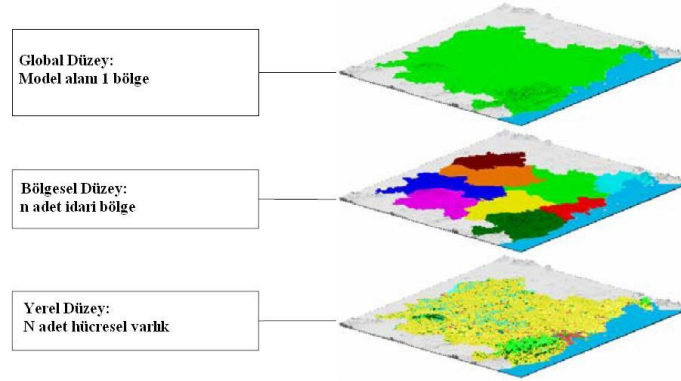


Şekil 2: HO içinde bilgi değişimi (Benenson ve Torrens, 2004)

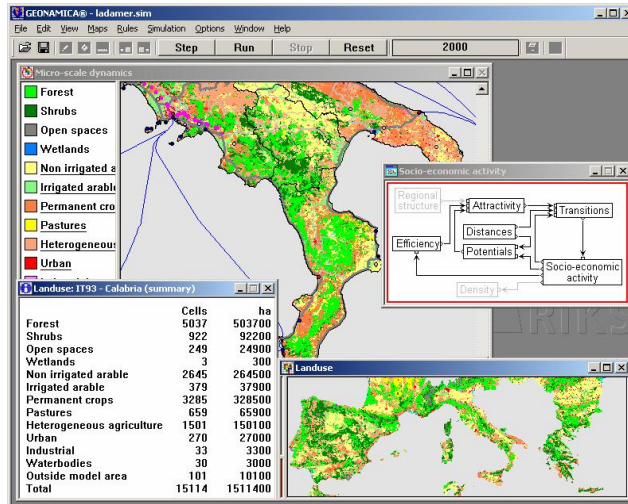
3. HO TABANLI SİMÜLASYON YAZILIMLARI

3.1 Metronamica

RIKS (Research Institute Knowledge Systems) tarafından geliştirilen Metronamica yazılımı aynı şirket tarafından üretilen Geonamica yazılımı içinde yer almaktadır. MOLAND projesi kapsamında birçok Avrupa kentinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Engelen vd., 2002; Fricke ve Wolff, 2002). Metronamica yazılımı, üç coğrafi düzeyde çalışmaktadır (Şekil 3). Global düzey olarak il sınırı, bölgesel düzey olarak ilçe idari sınırları ve lokal düzey olarak da arazi kullanımı verileri düşünülebilir. Şekil 4’de yazılımın arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 3: Metronamica veri yapısı (RIKS, 2005)



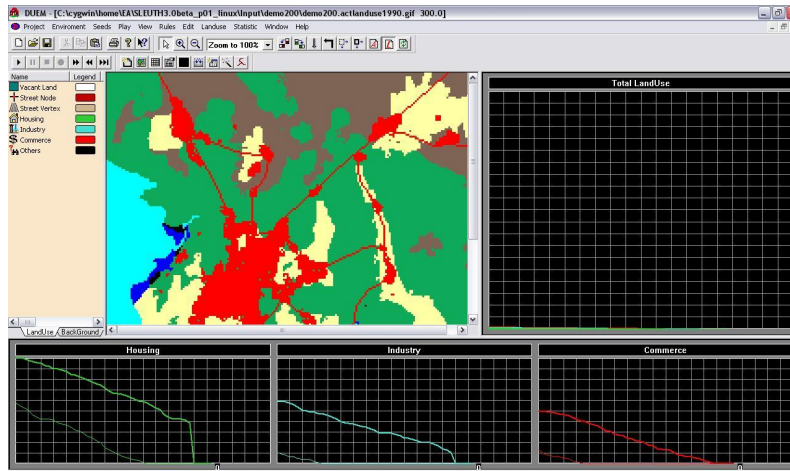
Şekil 4: Metronamica arayüzü (RIKS, 2005)

3.2 DUEM

Xie tarafından 1994-1996 yıllarında geliştirilmiş DUEM (Dynamic Urban Evolutionary Modeling) sonradan birçok çalışmada kullanılmıştır (Başlık, 2008). DUEM modeline göre; herhangi bir t anında tüm kentsel aktiviteler, başlangıç (initiating), olgunlaşma (mature) ve çökme (declining) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. t anında çökme durumunda olan hücreler bir sonraki $t+1$ zamanında yok olmaktadır, başlangıç durumunda olan hücreler büyümeyi oluşturan bütün aktivitelerin bir yorumudur, olgunlaşma durumunda olan hücreler ise yeni büyüme durumu yaratmamaktadır (Batty, 2007; Başlık, 2008).

Duem HO modelinde model parametreleri mesafe, yön, yoğunluk ve dönüşüm olmak üzere dört tanedir. Her bir arazi kullanım kategorisi için ayrı ayrı tanımlanan parametreler, bir kentsel sistem içinde yer alan tüm öğelerin başlangıç, olgunlaşma ve çöküş dönemleri için hesaplanmaktadır. Gelişme, komşu hücrelerin içerisindeki aktiviteden olan *mesafeye* göre konumlanmaktadır, bir başka deyişle mevcut gelişmeye olan uzaklık yeni bir gelişmenin oluşmasını önleyici bir rol oynar. *Yön* parametresi, kentsel sistemin gelişme yönünün tanımlandığı parametredir. Komşu hücreler içinde aynı veya farklı arazi kullanımlarının gelişmeyi engelleyici kısıtlamaları vardır. Bu durum *yoğunluk* parametresi ile belirlenmektedir. Yoğunluk; doğrusal, sıçramalı, güçlü ve gamma olabilir. Son olarak, bir arazi kullanımından bir başka arazi kullanımının üretilmesi *dönüşüm* parametresi ile sağlanmaktadır (Batty, 2007; Başlık, 2008).

Şekil 5’de DUEM yazılımının arayüzü gösterilmiştir. Sol tarafta yazılımın çalışması için gerekli olan arazi kullanım sınıfları bulunmaktadır. Tanımlı olan sınıflar değiştirilememekte ve yeni sınıflar eklenememektedir. Model parametrelerinin hesaplanması için istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır.



Şekil 5: DUEM arayüzü

3.3 SLEUTH

USGS ve California Üniversitesi Santa Barbara, Coğrafya Bölümü’nün beraber gerçekleştirdiği, kentsel dinamiklerin simülasyon modellerinin yaratılmasının amaçlandığı Gigalopolis projesi kapsamında HO tabanlı çalışan SLEUTH yazılımı kullanılmıştır. SLEUTH, modelde kullanılan girdi verilerinin; Slope (eğim), Land Cover (arazi örtüsü), Exclusion (kentleşme olmayacak alanlar), Urbanization (kentleşme), Transportation (ulaşım) ve görselleştirme amaçlı Hillshade (gölgeli rölyef) baş harflerinden oluşmaktadır (URL 2).

İlk uygulamalara San Francisco, Chicago, Washington-Baltimore, Sioux Fall ve California gibi ABD kentlerinde başlanmış, daha sonra, Avrupa, Güney Afrika, Çin ve Türkiye’de çalışmalara devam edilmiştir (Silva ve Clarke 2002; Şevik, 2006; Watkiss, 2008; Xibao vd., 2006; Xi vd. 2009; Wu vd. 2009).

“Clarke Urban Growth Model” (UGM) den türetilmiş bir çalışma olan SLEUTH, kentsel büyümeyi göstermek için HO, haritalar ve Land Cover Deltatron (LCD) modeli kullanır. Unix tabanlı çalışan program Windows işletim sisteminde kullanılmak istenirse, Cygwin isimli bir aracı yazılım kullanmak gerekmektedir. Program “*grow*” komutu ile çalıştırılmakta, gerekli parametreler senaryo dosyasında yapılan değişiklikler ile tanımlanmaktadır (Şekil 6). LCD Model, UGM tarafından çalıştırılan ve çağrılan bir kod içinde yer alır. LCD, urban code (kent kodu) ile eşleştirilmiştir; ancak UGM onlardan bağımsız da çalışabilir. Birleştirilen modellerin hepsi SLEUTH olarak adlandırılmaktadır (URL 2).

```

> -SLEUTH3.0beta_p01_linux/Output/demo200_test
driver.c          memory_obj.o      transition_obj.o
driver.c          output.c         ugm_defines.h
driver.c          output.h       ugm_macros.h
gdiff_obj.c      output.o       ugm_typedefs.h
gdiff_obj.h      pgrid_obj.c    utilities.c
globals.h        pgrid_obj.h    utilities.h
grid_obj.c       proc_obj.c     ugid_obj.c
grid_obj.h       proc_obj.h     ugid_obj.h
grid_obj.o       proc_obj.o     ugid_obj.o
grow             random.c
% cd Scenarios/
> -SLEUTH3.0beta_p01_linux/Scenarios
> -SLEUTH3.0beta_p01_linux/grow.exe test scenario.demo200_test
=====
                                SLEUTH
                        (URBAN GROWTH MODEL)
                                Beta Version 3.0
                        Release Date: Decenber4, 2000
=====
Notice: This is a beta version. It has been formally released
by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) and should
not be construed to represent Agency policy. This model is being
circulated for comments on its technical merit and potential for
policy implications.

The U.S. Environmental Protection Agency through its Office
of Research and Development Interagency Agreement SDW4938148-01-2
with the United States Geological Survey partially funded and
laborated in the model described here. Implementation and
redesign of the model code was conducted under contract BG6V790055
to Lockheed Martin Technical Services. The model has not been
submitted to Agency review. Mention of trade names or
commercial products does not constitute an endorsement or
recommendation for use.

Contributors:
```

Şekil 6: Cygwin ile çalıştırılmış SLEUTH arayüzü

SLEUTH, simülasyon modelini oluştururken dört büyüme kuralı ve bu kurallarla ilişkili beş büyüme katsayısını (Tablo 1) kullanmaktadır.

Tablo 1: SLEUTH büyüme kuralları ve büyüme katsayıları

Büyüme Kuralları	Büyüme Katsayıları
Doğal	Saçılım, Eğim
Yeni Yayılma Merkezleri	Ortaya Çıkma, Eğim
Çeper	Yayılım, Eğim
Yol Etkisi	Ortaya Çıkma, Eğim, Yol Etkisi, Saçılım

4. SONUÇLAR

20. yy.ın sonlarına doğru bilgisayar teknolojileri ile birlikte CBS ve uzaktan algılama biliminde yaşanan gelişmeler, kentlerin doğrusal olmayan ve karmaşık yapısının anlaşılabilmesi için gerekli olan verilerin üretimini ve analizini daha kolay ve ekonomik hale getirmiştir. Özellikle bilgi-işlemin hızlanması hesap gücünün artması, kentsel mekânın simülasyonlarının yapılabilmesini ve gelecek için kestirimlerde bulunulmasını olanaklı kılmış ve basitleştirmiştir. Klasik modellerde kentlerdeki ekonomik faaliyetler, modellenmeye çalışılırken günümüzde kent çevresiyle bir bütün olarak ele alınmakta, ekonomik göstergelerin yanında, fiziksel, topografik, çevresel ve sosyo-ekonomik parametreler de oluşturulan sistemlerde girdi verileri arasında yer almaktadır.

Günümüzde kentsel yayılmayı modelleme çalışmaları sıklıkla mekânsal simülasyon yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Mekânsal simülasyon kavramı otomat düşüncesi üzerine kuruludur. Bir otomat türü olan HO, arazi kullanımında meydana gelen değişimlerin etkisiyle kentsel yayılma simülasyon modellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kentsel yayılma çalışmalarında kullanılan HO tabanlı az sayıda yazılım vardır. Bunlardan başlıcaları; Metronamica yazılımı, SLEUTH ve DUEM yazılımıdır. Metronamica ticari bir yazılım olması nedeniyle maliyeti yüksektir, buna karşılık SLEUTH ve DUEM yazılımları, akademik yazılımlar olmaları nedeniyle ücretsizdir. DUEM yazılımında arazi kullanım sınıfları programla birlikte zorunlu olarak gelmekte ve değiştirilememektedir. Bu nedenle yazılım esnek bir yapıya sahip değildir.

Açık kaynak kodlu ve ücretsiz bir yazılım olan SLEUTH'ün yazılımının kullanımı diğer iki yazılıma göre daha kolaydır. Model parametreleri Monte Carlo simülasyon yöntemine göre hesaplanmaktadır.

KAYNAKLAR

AÇA, 2006. *Urban sprawl in Europe, The ignored challenge*, EEA Report No 10/2006, Avrupa Birliği Çevre Ajansı,

Kopenhag.

Başlık, S., 2008. *Dinamik Kentsel Büyüme Modeli: Lojistik Regresyon ve Cellular Automata (İstanbul ve Lizbon Örnekleri)*, Doktora Tezi, MSGSÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Batty, M., 2007. *City and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*, The MIT Press Cambridge.

Benenson, I. ve Torrens, P. M., 2004. *Geosimulation Automata-based modeling of urban phenomena*, John Wiley and Sons.

Candau J. T., 2002. *Temporal Calibration Sensitivity of the SLEUTH Urban Growth Model*, Master of Arts Thesis, California Üniversitesi, Santa Barbara.

Cheng, J., 2003. *Modelling Spatial & Temporal Urban Growth*, Doktora Tezi, Utrecht Üniversitesi, Coğrafya Bilimleri Fakültesi, Utrecht.

Clarke K. C., Hoppen S. ve 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, sayı: 24, sayfa: 247-261.

Engelen, G., White, R. ve Uljee, I., 2002. *The Murbandy And Moland Models For Dublin*, European Commission Joint Research Centre, Ispra, Italy.

Fricke R., Wolff, E., 2002. *The Murbandy Project: Development Of Lans Use and Network Databases For The Brussels Area*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, sayı: 4, sayfa: 33-50

Herold M., Couclelis H. Ve Clarke K. C., 2003. *The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change*, Computers, Environment and Urban Systems, sayı:29, sayfa: 369-399.

Jantz C. A. ve Goetz S. J., 2005. *Analysis of scale dependencies in an urban land-use-change model*, International Journal of Geographical Information Science, Taylor & Francis, sayı: 19(2), sayfa: 217 – 241.

Nechyba T. J. ve Walsh R. P., 2004. *Urban Sprawl*, The Journal of Economic Perspectives, sayı: 18 (4), sayfa: 177-200.

Portugali, J., 2006. *Complex Artificial Environments: Simulation, Cognition and VR in the Study and Planning of Cities*, Springer.

RIKS, 2005. *Metronamica A dynamic spatial land use model*, *Metronamica Broşür*, Research Institute for Knowledge Systems (RIKS bv), Maastricht, The Netherlands.

Silva, E.A. ve Clarke K.C., 2002. *Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal*, Computers, Environment and Urban Systems, sayı: 26, sayfa: 525-552.

Şevik O., 2006. *Application Of SLEUTH Model In Antalya*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Teknolojileri, Ankara.

Taha, H., 2006. *Yöneylem Araştırması*, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

URL 1, Vikipedi, http://tr.wikipedia.org/wiki/Conway%27in_Hayat_Oyunu, 13.10.2010

URL 2, Gigalopolis Projesi İnternet Sitesi, http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/project_gig.htm, 17.10.2010

Watkiss B. M., 2008. *The SLEUTH Urban Growth Model As Forecasting and Decision Making Tool*, Master of Natural Sciences at the University Stellenbosch, Güney Afrika.

Wu X., Hu Y., He H. S., Bu R., Onsted J. ve Xi F., 2009. *Performance Evaluation of the SLEUTH Model in the Shenyang Metropolitan Area of Northeastern China*, Environ. Model Assess., sayı: 14, sayfa: 221-230.

Xi F., He H. S., Hu Y., Wu X., Bu R., Chang Y., Liu M. ve Yu J., 2009. *Simulate Urban Growth Based on RS, GIS, and SLEUTH Model in Shenyang-Fushun Metropolitan Area Northeastern China*, 2009 Urban Remote Sensing Joint Event, IEEE.

Xibao X., Feng Z. ve Jianming Z., 2006. *Modelling the Impacts of Different Policy Scenarios on Urban Growth in Lanzhou with Remote Sensing and Cellular Automata*, IEEE.