

Agent-based Modeling for User Movements using Fuzzy Logic

Berfin Yıldız¹, Gülen Çağdaş²

ORCID NO: 0000-0002-5238-8241¹, 0000-0001-8853-4207²

¹ Istanbul Technical University, Graduate School, Department of Informatics, Architectural Design Computing, Istanbul, Turkey

Yaşar University, Architecture Faculty, Architecture Department, İzmir, Turkey

² Istanbul Technical University, Graduate School, Department of Informatics, Architectural Design Computing, Istanbul, Turkey

The distance between designer and user gradually increases due to the growing complexity of design processes. It makes difficult to take the user experience into consideration in design. Computational models in which users are represented as autonomous decision-making entities, help to simulate user movement. In this regard, the development of these models supports decision-making in the early stages of urban design. This study aims to analyze how the user get involved in urban space, and to examine the relationship between urban space components and the users' movement to develop a model for simulating user movement. Collecting the data using fixed point observation and environmental analysis; Data inference with fuzzy logic; Development of the agent-based model; Implementation of the model; Evaluation and Validation are the steps followed by this article. Data inference with fuzzy logic represents the process of calculation *attractiveness value* which is the relationship between the user and urban space components. Afterwards, the value is determined as *attract force* on the simulation model. İzmir Konak Square has been chosen as the case study area. Two different simulation models, morning and evening, are defined and implemented to simulate the movement in different timelines. Then, the simulation outputs and observation data are compared with the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and Secant Cosine Calculation methods to be able to examine the model efficiency.

Received: 20.08.2020

Accepted: 05.03.2021

Corresponding Author:

berfin.yildiz@yasar.edu.tr

Yıldız, B. & Çağdaş, G. (2021). Agent-based Modeling for User Movements using Fuzzy. JCoDe: Journal of Computational Design, 2(1), 243-264.

Keywords: Agent-based modeling, Fuzzy Logic, User movement, Simulation

Bulanık Mantık ile Kullanıcı Hareketlerinde Etmen Tabanlı Modelleme

Berfin Yıldız¹, Gülen Çağdaş²

ORCID NO: 0000-0002-5238-8241¹, 0000-0001-8853-4207²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim, İstanbul, Türkiye

Yaşar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim, İstanbul, Türkiye

Tasarım süreçlerinin artan karmaşıklığı, tasarımcı ile kullanıcı arasındaki mesafeyi arttırmakta ve bu da tasarımda kullanıcı deneyimini göz önünde bulundurmaya zorlaştırmaktadır. Kullanıcıların otonom karar verme varlıkları olarak temsil edildiği hesaplamalı modeller kullanıcı davranışlarının benzetim modelleri ile temsil edilmesinde yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, modellerin geliştirilmesi kentsel tasarımın erken aşamasında karar vermeyi desteklemektedir. Bu çalışmanın amacı, kullanıcının kentsel mekâna nasıl dahil olduğunu araştırmak ve kullanıcı hareketinin benzetimi için bir model geliştirebilmek ve kentsel alan bileşenleri ile kullanıcıların hareketi arasındaki ilişkiyi analiz etmektir. Bu makale beş aşamalı ardışık bir süreci takip etmektedir: Gözlem çalışmaları ve çevresel analiz ile veri toplama; Verilerin bulanık mantık kullanarak yorumlanması; Etmen tabanlı model geliştirme; Model uygulama; Değerlendirme ve doğrulama. Gözlem verilerinin yorumlanması, kentsel mekân bileşenlerinin etki değerlerini bulanık mantıkla hesaplama süreçleridir. Bu değer, daha sonra etmen tabanlı benzetim modelinde etki kuvveti olarak tanımlanır. Benzetim modeli sonuçları, gözlem çıktıları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Örnek vaka incelemesi olarak, bir kentsel meydan seçilmiştir (Konak Meydanı, İzmir, Türkiye). Sabah ve akşam zaman dilimleri için iki model tanımlanmış ve meydana kullanıcı hareketinin benzetimi için test edilmiştir. Daha sonra model sonuçları ve gözlem verileri Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) ve Sekant Kosinüs Hesaplama yöntemleri ile karşılaştırılarak modelin verimliliği incelenmiştir.

Teslim Tarihi: 20.08.2020

Kabul Tarihi: 05.03.2021

Sorumlu Yazar:

berfin.yildiz@yasar.edu.tr

Yıldız, B. & Çağdaş, G. (2021). Bulanık Mantık ile Kullanıcı Hareketlerinde Etmen Tabanlı Modelleme. JCoDe: Journal of Computational Design, 2(1), 243-264.

Anahtar Kelimeler: Etmen Tabanlı Modelleme, Bulanık Mantık, Kullanıcı Hareketleri, Benzetim

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kentsel tasarımdan, mimarlık, iç mekân tasarımı ve hatta ürün tasarımına kadar ölçek ne olursa olsun tasarımın öznesi insandır. Kamusal mekanların tasarlanmasındaki temel odak insan iken, kullanımındaki temel durum ise harekettir. Bu bağlamda kullanıcı hareketlerinin analiz edilmesi, tasarım problemlerinin doğru tanımlanması açısından önem taşımaktadır. Kentlinin kamusal alan kullanımı tasarımı doğrudan etkileyecek önemli bir girdi iken aslında çoğunlukla tasarımı şekillendiren bir kısıttır. Bu araştırmanın amacı kullanıcının mekâna nasıl dahil olduğunu araştırmak, mekânın kullanıcı hareketini nasıl değiştirdiğini anlamak ve kullanıcı hareketinin benzetim modelini geliştirmektir.

Model, bulanık mantık ve etmen tabanlı modelleme yöntemlerinin birleştirilmesinden oluşmaktadır. İlk olarak kullanıcı tercihlerini tahmin etmede bulanık mantık yöntemi kullanılmaktadır. Kentsel mekân bileşenlerinin kullanıcılar ve kararları üzerindeki etkilerinin hasta tanımlanmış, oldukça karmaşık, öznel ve zamana bağlı olması nedenleriyle, belirsizlik kavramı, bu çalışma için önem taşımaktadır. Bu nedenle, kentsel mekân bileşenlerinin etki değerlerini hesaplamak için esnek hesaplama yöntemlerinden biri olan bulanık mantık uygulanmaktadır. Etki değeri, belirli koşullar altında kullanıcı ve kentsel mekân bileşenleri arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir.

Bir insan yapacağı hareketin kararını, bir takım bilişsel süreçlerden geçtikten sonra verir. Bu süreçler hedef belirleme, algılama, hedefi ve süreci değerlendirme, karar verme olarak nitelendirilebilir. İnsan kararını verdikten sonra harekete geçer ve hareket süreci içerisinde kişisel ve çevresel faktörlere göre değerlendirme döngüsünü sürdürerek hareketini devam ettirir (Hollmann, 2015). Kullanıcı hareketleri doğrudan, değişken ve rastgele olarak sınıflandırılabilir. Başlangıçta, her kullanıcının çevreyi ziyaret etmede ana motivasyonunu temsil eden birincil hedefi vardır. Kullanıcılar birincil hedeflerine göre hareket ederse, bu doğrudan hareket olacaktır. Bir bileşenin uyarıcı olarak etkisi, hareketin doğrudan değişmesine neden olur. Rastgele hareket, hedefsiz yürümek olarak tanımlanabilir (Chen, 2009). Ayrıca, kalabalık tahliyesinin benzetiminde yaygın olarak kullanılan Sosyal Kuvvet Modeli (SKM) (Helbing & Molnar, 1995), diğer kullanıcıların ve bileşenlerin kullanıcı hareketi üzerindeki etkilerini dikkate almakta ve

bunları sosyal kuvvetler olarak tanımlamaktadır. SKM'ye göre algılanan nesnelere, kişisel hedeflere bağlı olarak hareket etmede davranışsal değişikliklere neden olur. SKM, kullanıcı hareketini farklı kuvvetlerin sonucu olarak ortaya çıkan bir tepki olarak tanımlamaktadır. Hızlanma veya yavaşlama olarak görülebilecek reaksiyon, alternatif davranış kümelerinden seçilir. Sosyal kuvvetler doğrudan çevre tarafından uygulanmaz, ancak bireylerin belirli eylemleri (hareketleri) gerçekleştirme iç motivasyonlarının bir ölçüsü olarak ortaya çıkar. Bu bağlamda Lewin'in Alan Teorisi (Lewin, 1951), pozitif veya negatif değerlerin etkisi altında bir hedefe doğru veya bir hedeften uzaklaşmada psikolojik hareketi etkileyen alan kuvvetlerini tanımlamaktadır. Alan, kişinin güdülerini, inançlarını, düşüncelerini ve algılanan nesne ve olaylardan oluşan fiziksel ortamını içeren kişi ve yaşam alanından oluşur. Alan kuvvetleri, pozitif kuvvetler olan itici kuvvetler ve engel olan sınırlayıcı kuvvetler olarak tanımlanır.

Bu çalışmada etmenlerin bir arada tutulmasını sağlamak için uygulanan bir dizi kuvveti barındıran Reynolds'un kuvvet tabanlı yönlendirme algoritmaları (Reynolds, 1999) kullanılmıştır. Model kuvvet tabanlı bir yaklaşım izlemesine rağmen, diğer kuvvet tabanlı modellerden önemli farklılıkları içermektedir. SKM gibi kuvvet tabanlı modeller, kullanıcıların dışsal davranışlarını, sanki hareketleri dış güçlere maruz kalmış gibi vurgular. Aynı kuvvetlerin tanımlandığı bireyler tamamen aynı hareketi gösterirler. Diğer yandan, karar verme yaklaşımlarını uygulayan, kullanıcıların içsel davranışlarına da odaklanan etmen tabanlı modelleme (ETM), bireysel davranışı bir dereceye kadar benzersiz olarak ele almayı sağlar. Yapay zekâ yaklaşımı olarak kullanıcı hareketlerini sanal ortama aktaran ETM, farklı bireyler üzerindeki kuvvet etkilerinin keşfedilmesine olanak sağlamaktadır. Etmenler bağımsız oldukları ve dışarıdan kontrol edilmedikleri için bir anlamda özerktirler. Ayrıca, ortamdaki değişikliklere yanıt verirler ve diğer etmenlerle etkileşime girerler. Tıpkı kullanıcıya benzer şekilde, bir etmenin kontrol sistemi de önce sistemi algılar; sonra hareketi algı ve bilgisine göre planlayarak harekete geçer.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Araştırmacılar, kullanıcı hareketlerinin benzetimi için çeşitli modeller geliştirmiş ve farklı modelleme ölçekleri uygulamıştır. Bunlar; makroskopik, mezoskopik ve mikroskopik modellemelerdir.

Makroskopik modellerde, bireysel kullanıcı davranışı yerine kullanıcıların grup davranışları bir bütün olarak ele alınmaktadır. Örneğin Akışkanlar dinamiği (AD) (Helbing, 1998) modelleri, yoğunluk ve hız değişimini tanımlamak için sıvılar veya gazlarla bir analogi kullanır. Bu nedenle, modeller fiziksel yasalara dayanmaktadır; ancak insan davranışının karmaşıklığını yalnızca denge, momentum ve enerji kavramlarıyla tanımlamak zordur. AD modelleri, büyük bir kalabalığın soyut davranışıyla ilgilidir. Bu durum, kalabalık içindeki bireysel hareketlerin gözlemlenmesini engellemektedir (Kormanová, 2013). Makroskopik ve mikroskobik modelleme yaklaşımlarını birleştiren mezoskopik modelleme, daha az veri talebi ile dinamiklerin basitleştirilmesinden oluşur. Kullanıcılar bireysel olarak temsil edilir, ancak bireysel davranış, modelin ortalama miktarları tarafından belirlenir (Johansson, 2013). Makroskopik modellerin aksine mikroskobik modeller, kullanıcıların bireysel durumlarını, onlar ve çevre arasındaki etkileşimleri temsil eder. Mikroskobik modellemede, önceki bölümde kısaca bahsedilen SKM (Helbing & Molnar, 1995), hücresel özdevinim (HÖ) (Pelechano & Malkawi, 2008) ve ETM (Batty, 2001) gibi çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. HÖ yaklaşımında, kullanıcılar bir ızgaradaki hücreleri işgal etmekte ve tanımlanan basit kurallara göre hareket etmektedir. Hücrelerin durumu, çevreleyen hücrelerin durumuna bağlı olarak değişir. HÖ, minimum aktivite seçeneği olan ayrıştırılmış modeller için yararlıdır (Narimatsu, Shiraishi, & Morishita, 2004). Etmen tabanlı sistem, hedeflerine ulaşmak için belirli bir ortamda esnek ve otonom bir şekilde hareket eden birleşik bir etmenler ağıdır. Etmenlerin otonomluk, sosyal yetenek, cevap verme ve hafızaya sahip olma özellikleri bulunmaktadır. Otonomluk, herhangi bir doğrudan etkiye uğramadan karar verme olarak tanımlanabilir. Sosyal yetenek, bir topluluğa ait olma ve diğer temsilcilerle iletişim kurma becerisidir. Her etmen bir "sanal kullanıcı" olarak benzersiz bilgi ve hedef ile ayrı ayrı modellenebilmektedir (Padgham & Winikoff, 2005). Bu özellikler, karmaşık ve doğrusal olmayan etkileşimlere izin verirken kolektif davranışların yaratılmasını sağlamaktadır. Helbing ve diğ. (2001), kullanıcı hareketlerinin benzetim modellerini kentsel ölçek ve bina ölçeği olmak üzere iki gruba ayırmıştır. Bina ölçeğindeki mikro simülasyonlar tahliye (Waldau, et al., 2007); (Tavares & Galea, 2009); (Zheng, Zhong, & Liu, 2009) (Helbing et al., 2002), kalabalık (Lu et al., 2008); (Heliövaara et al., 2012) ve yol bulma (Raubal, 2001); (Andresen et al., 2016); (Becker-Asano et al., 2014) çalışmalarından oluşmaktadır.

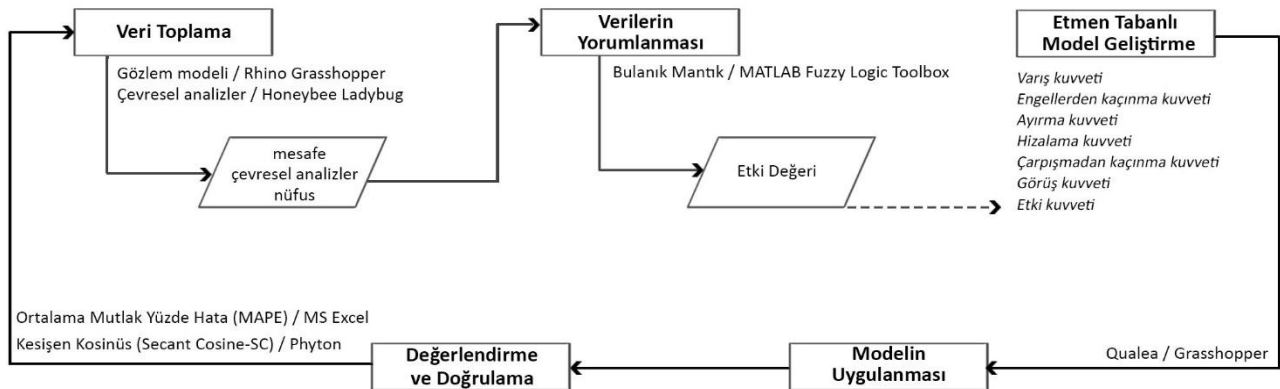
Kentsel ölçekteki çalışmalar, farklı yazılım türleri ve bu yazılımlarla uygulanan modellerle birlikte incelenmiştir. Öncelikle Logo programlama dili ile oluşturulmuş programlanabilir bir modelleme ortamı olan SimPed'de (Jiang, 1999) etmenler hız, hareket ve liderlik özellikleriyle tanımlanmaktadır. Çevreyi modele tanımlamak için mekân sözdizimi yöntemi kullanılmakta ve kentsel alan bir aks haritası olarak ifade edilmektedir. Model rastgele yürüme ve bilinçli yürüme olmak üzere iki seçenek sunmaktadır. Rastgele yürüme modeli, bir etmenin yürüyebileceği sekiz yön olduğu varsayımıyla başlar ve sokakların kesişme noktasına ulaştığında, döneceği caddeyi rastgele belirler. Bilinçli yürüme için hedef noktalar tanımlanır ve etmenler çevredeki sokak konfigürasyonuna göre bu noktalara ulaşmaya çalışırlar. Modelin büyük ölçüde sokak konfigürasyonuna bağlı olduğu yorumlanabilir. Puusepp ve diğ. (2016), Tallinn için oluşturdukları bir etmen tabanlı benzetim modelinde Logo dili ile geliştirilen NetLogo'yu (Tisue & Wilensky, 2004) kullanmışlardır. Model, bazı mekânsal özelliklerin kullanıcıyı en kısa yoldan saptırdığı hipotezine dayanmaktadır. Gün ışığı analizi, Bentley Microstation analiz araçları kullanılarak çalışmaya dahil edilmiştir. Ancak modelde sadece nicel analiz yöntemleri kullanılmış ve kullanıcının bireysel tercihlerinden kaynaklanan nitel analizler dikkate alınmamıştır. Java ile geliştirilen STREETS (Schelhorn et al., 1999) modelinde, etmenler belirli bir rota planı ile oluşturulur. Her etmenin iki ayrı kategoriye bağlı karakteristik özellikleri bulunmaktadır. Bunlardan ilki, gelir ve cinsiyet gibi sosyoekonomik özellikleridir. Diğer kategori, davranış özellikleri, etmenin hızı, görsel açı ve odak noktasıdır. Yüksek derecede odaklanmış etmenler rotayı takip etme eğilimindeyken, daha az olanlar rotadan sapma eğilimindedir. Model vektör verilerini, hücresel verileri ve desen verilerini içermektedir. Vektör verileri, 0, 1, 2 değerleriyle temsil edilen alan kullanım durumlarını ifade etmektedir. Hücresel veriler, kentsel alanın yürünebilirliğini içermektedir. Desen verileri ise kentsel mekânın sokak örüntülerini temsil etmektedir. Vektör verileri, desen verileriyle hareket seçeneklerini sınırlamaktadır. Ayrıca hücresel veriler kişiden kişiye değişebilmektedir, ancak araştırmada herhangi bir nitel ölçüm vurgulanmamaktadır. Rose ve diğ. (2014), Delft'teki mekânsal tercihlerle dayalı olarak kullanıcı hareketlerinin etmen tabanlı modelini GAML dilini kullanan GAMA ile uygulamıştır. Modelde yerli, yerli turist ve yabancı turist olmak üzere üç tip kullanıcı tanımlanmıştır. Etmenlerin tercihleri, tanımlandıkları tipe bağlı olarak, ilgi alanına giden yoldaki konumların uygunluğuna bağlıdır.

Tüm bu yaklaşımlara rağmen, nicel ve nitel analiz yöntemlerini birleştiren tek bir model hâlâ bulunmamaktadır. Ek olarak, çalışmalar belirli bir kentsel sokak kurgusu içinde yürütülmüştür. Bu nedenle, sonuçların çoğu sokak konfigürasyonunun etkisi altında oluşmaktadır. Bu makale kapsamında geliştirilen modelde ise, alan çalışması olarak bir meydan seçilmiştir ve meydanın kullanıcıları farklı yönlerde hareket etmektedir. Bu yaklaşım, modelin özgün yönünü oluşturmaktadır.

3. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Önerilen model beş aşamadan oluşmaktadır: (1) veri toplama, (2) verilerin bulanık mantık ile yorumlanması, (3) etmen tabanlı model geliştirme, (4) modelin uygulanması, (5) değerlendirme ve doğrulama (Şekil 1). Öncelikle kullanıcı hareketlerini etkileyen bileşenler sabit nokta gözlem yöntemi ile analiz edilmektedir. Makale kapsamında, hareketin özellikleri kullanıcının sosyoekonomik durumu, yaşı, cinsiyeti veya eğitim durumu gibi değişkenlerden bağımsız olarak incelenmektedir. Gözlem çalışmalarının yanı sıra kullanıcı hareketine olan etkilerini anlamak için çevresel analizler yapılmaktadır. Model iklim verilerini eş zamanlı olarak çıkardığı için istenilen zamanda benzetim model sonuçlarını almak mümkündür. Daha sonra gözlem ve çevresel analizlerin çıktıları yorumlanmakta ve bulanık mantıkta bir kural seti olarak tanımlanmaktadır. Bulanık çıkarım sisteminin bir sonucu olarak *etki değerleri* elde edilmektedir. Diğer bir önemli aşama, etmenlerin kullanıcıları temsil ettiği etmen tabanlı bir benzetim modeli oluşturmaktır. Model, etki değeri verilerini, etki kuvveti olarak tanımlamak için girdi olarak kullanmaktadır. Modelin uygulamaları, kullanıcı tiplerine ve modelde tanımlanan değişkenlere göre değerlendirilmektedir. Son olarak, Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) ve Sekant Kosinüs Hesaplaması (Peacock at al., 1999) yöntemleri ile doğrulama prosedürleri yer almaktadır.

Şekil 1: Modelin akış şeması
(Flow diagram of the model).



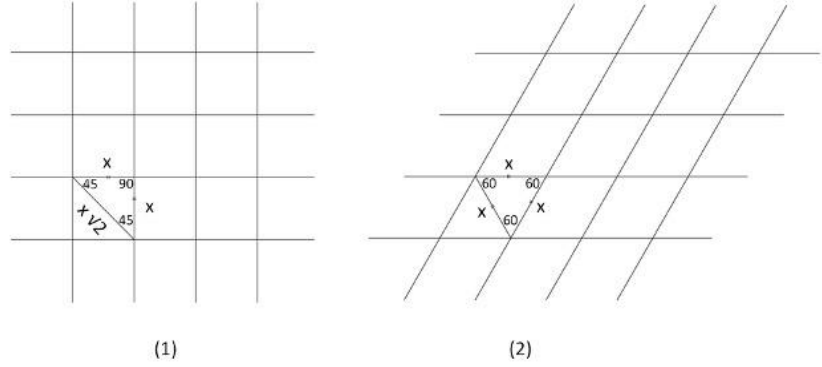
3.1 Veri Toplama (Data Collecting)

Veri toplama aşaması, kentsel mekânın fiziksel, çevresel ve insan bileşenleri dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Bradshaw'a (1993) göre fiziksel faktörler arasında zemin kat kullanımı, hareket kaynakları, yaya yollarının kalitesi, aydınlatma ve işaretler yer almaktadır. Zemin kat kullanımı alışveriş, çalışma, yeme-içme, eğlence vb. aktiviteleri içermektedir. Kamusal alanın insanları durmaya teşvik edecek işlevlere ihtiyacı vardır. Bu işlevler mevcut değilse, alan bir "geçiş alanı" olarak kalacaktır. Hareket kaynakları, ulaşımda transfer merkezlerinin yarattığı hareketi tanımlamaktadır. Çevresel faktörler ise topografya ve sıcaklık, yağmur, manzara vb. hava koşullarını içermektedir. Çalışmalar, sıcaklık değişiminin mevsime bağlı olarak kullanıcı akışını etkilediğini göstermektedir. Bu noktada Gehl'in (2011) aktivite sınıflandırmasına bakmak faydalı olacaktır. Çevresel koşullara bağlı olarak yoğunlukla zorunlu faaliyetler (işe / okula gitmek) ile isteğe bağlı faaliyetler vardır. İsteğe bağlı faaliyetlerin yoğunluğu üzerinde sıcaklık değişimi veya yağmur gibi çevresel faktörlerin etkisi bulunmaktadır. Kentsel mekânın mekânsal özellikleri sabitken, güneş ve rüzgâr gibi çevresel değişkenler dinamik etkenler olarak tanımlanabilir. Güneş yazın olumsuz etkilerken, kışın olumlu bir uyarıcı olarak kabul edilebilmektedir. Benzer şekilde yazın rüzgârın olumlu ferahlatıcı bir etkisi bulunmaktayken, kışın olumsuz bir etkisi vardır. İnsan faktöründe, kullanıcı hareketi çevredeki diğer insanların varlığından etkilenmektedir. Kullanıcı yoğunluğuna ve istenen hareket hızına bağlı olarak, insanlar diğer kullanıcılarla belirli bir mesafeyi koruma eğilimindedir. Schefflen ve diğ. (1976), bölgesel etki olarak yorumlanabilecek "özel alan" kavramını ortaya koymaktadır. Buna göre, bir kullanıcı başka bir kullanıcıya yaklaştıkça daha rahatsız hisseder. Bu, SKM'de diğer kullanıcıların itici etkileri olarak tanımlanmaktadır. Ancak, diğer kullanıcılar (arkadaşlar, sokak performansları vb.) çekici etkiler de sunabilir. Kullanıcı yoğunluğunun ve konumunun değişkenliği, kullanıcının dinamik bir bileşen olarak kabul edilmesine neden olmaktadır.

3.1.1 Gözlem modeli (Observation model)

Gözlem modelinde, kamusal alan planında, her kullanıcının iki adımının ortalama uzunluğu olan 130 cm'lik diagridlerden oluşan bir ızgara oluşturulmuştur. Bu ızgaranın her köşesine bir koordinat noktası atanmakta ve tüm bu noktalar numaralandırılmaktadır. Önerilen ızgara sisteminin 90 dereceden ziyade 120 derecelik bir diagrid şeklinde seçimi önemlidir. Dik açılı bir ızgaradaki hipotenüs mesafesi nedeniyle, her bir

koordinat noktasının mesafesi aynı değildir (Şekil 2.1). Buna karşın diagride her koordinat noktası arasındaki mesafe eşittir (Şekil 2.2). Bir kullanıcının koordinat noktaları arasında iki adım atabileceği varsayımı ile her 2 saniyede bir koordinat değişikliği kaydedilmektedir. Bu koordinat noktalarını birleştirerek kullanıcının rotası elde edilmektedir.



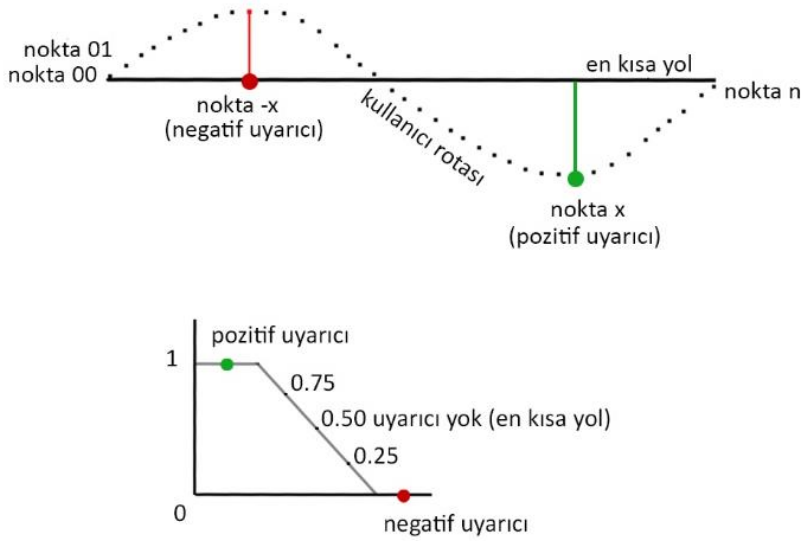
Şekil 2: Gözlem modeli diagrid seçimi (Choosing diagrid of observation model).

Başlangıç noktaları ile bitiş noktaları arasında en kısa yol belirlemeleri yapılır. En kısa yol kullanıcının rotasından farklıysa, buna neden olan bir uyarıcı olduğu varsayılır. En kısa yoldan en uzak noktada pozitif (nokta x / yeşil) uyarıcı veya en kısa yolda negatif (nokta-x / kırmızı) uyarıcı olduğu yorumu yapılmaktadır. Olumlu uyarıcılar kullanıcıyı kendilerine doğru yönlendirerek rotayı değiştirirken, olumsuz uyarıcılar ise onları iterek rotayı değiştirir (Şekil 3). Örneğin, rota üzerindeki bir köpek veya çöp konteyneri kullanıcının uzaklaşmasına neden olabilir. Puusepp ve diğ. (2016), kullanıcıları en kısa yoldan uzaklaştıran uyarıcıları, olumlu özelliklerine göre çeken ve olumsuz özelliklerine göre iten "mıknatıslar" olarak tanımlamışlardır. Uyarıcının türünü ayırt etmek için yaklaşılan uyarıcının bir başka kullanıcı olup olmadığı incelenmektedir. Uzaklık, sapma durumuna bağlı olarak (-) negatif olarak veya yakınsama durumuna bağlı olarak (+) pozitif olarak bulanık çıkarım sistemine işlenmektedir (Şekil 4).

3.1.2 Çevresel analizler (Environmental analysis)

Gerekli çevresel analiz türü, iklim bölgelerine, mevsime ve günün saatine bağlı olarak değişmektedir. Grasshopper çevresel analiz eklentileri Honeybee ve Ladybug benzetim modelleri ile çevresel faktörler analiz edilmektedir. Model, Energy Plus hava durumu dosyasından (.epw) elde edilen kentsel alan ve iklim verilerinin bina kitle modelinin tanımlanmasıyla çalışmaktadır. Bu dosya, sıcaklık, nem, atmosferik istasyon basıncı, güneş radyasyonu, entalpi, aydınlatma ve

rüzgâr verilerini içeren 365 günlük bir yılın hava durumu verilerini içerir (Crawley et al., 2000).



Şekil 4: x veya -x noktasında uyarıcı tahmini (Stimulant prediction on x or -x point).

3.2 Verilerin Yorumlanması (Data Interpretation)

Etki değerlerini elde etmek ve benzetim modelinde tanımlayabilmek için yorum ve çıkarım yapmak gerekmektedir. Kullanıcı hareketleri gibi karmaşık, değişken ve belirsiz verilerin yorumlanmasında karar verme yöntemi olarak bulanık mantık yöntemi kullanılmaktadır. Belirsizlikle ilgili varsayımlarda bulunan teoriler, "olasılık" teorisine dayanmaktadır. Bulanık mantık, olasılıktan ziyade "olanağa" dayanır ve her şeyin bir olanak derecesine sahip olduğunu söyler. Olasılık, tekrarlama sıklığını ifade ederken, olanak kavramı bir olgunun gerçekleşme düzeyiyle ilgilidir. Bulanık mantığın anlaşılabilmesi için öncelikle küme teorisinin incelenmesi gerekir. Küme teorisinde, eleman bir kümenin parçasıdır ya da değildir. Zadeh bulanık kümeyi üyelik dereceleri ile tanımlanan nesnelere sınıfı olarak tanımlamaktadır (Zadeh, 1999). Bu set, 0 ile 1 arasında değişen $\mu_f(x)$ üyelik fonksiyonlarından oluşmaktadır. Yani bu üyelik fonksiyonlarının bir sonucu olarak her üyenin kümeye ait olma derecesi vardır.

Bulanık çıkarım sistemi, giriş değişkenlerini tanımlanan kurallara göre 0 ile 1 arasında değişen çıktı vektörlerine dönüştüren bir sistemdir. Bu çıkarım sistemi dört adımdan oluşmaktadır. Bunlar bulanıklaştırma, kural tabanlı çıkarım, toplama ve bulanıklaştırma olarak sıralanabilir. Bulanık mantıkta en sık kullanılan çıkarım yöntemleri Mamdani (1975)

ve Sugeno (1985) 'dur. Mamdani bulanık kümeler kullanırken Sugeno, giriş değişkenlerinin doğrusal işlevlerini kullanmaktadır. Bulanık çıkarım sisteminin ilk adımı olan bulanıklaştırma sürecinde, giriş değişkenlerine üyelik fonksiyonları atanmaktadır. Kural tabanı, “ve / veya / değil” işlemlerini ve “eğer-o zaman” kural setlerini içermektedir. Çıktı değerlerinin alt kümeleri, çıkarım sistemindeki kural tabanındaki her kurala göre hesaplanmaktadır. Toplama aşamasında, bu alt kümeler tek bir küme halinde birleştirilmekte ve bulanıklaştırma aşamasında bu dil değişkenlerini sayısal değerlere dönüştürülmektedir.

Bu yöntemin uygulanması için, MatLab yazılımındaki “Fuzzy Logic Toolbox” kullanılmaktadır. Girdiler ve çıktı fonksiyonu arasında “eğer-ise” kuralları tanımlayarak etki değerlerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Sistemin çıktısı, 0 ile 1 arasında değişen kentsel mekân bileşenlerinin etki değerleridir.

3.3 Etmen Tabanlı Model (Agent-Based Model)

Model, kullanıcıları birer etmen olarak kabul etmektedir. Modelde, kullanıcılar olarak etmenler, belirtildiği gibi etki değerlerine göre tanımlanan etki kuvveti altında hareket etmektedir. Etmen tabanlı sistemler benzetim modelinin temelini oluşturmakta ve nesnelere, ortamı ve iletişim bilgisini içermektedir (Drogoul & Ferber, 1995). Nesnelere, engel olarak tanımlanır ve çevrenin fiziksel bileşenlerini oluşturur. Çevre, etmenlerin hareket ettiği topolojik mekandır. Son olarak, iletişim, kullanıcılar ve kentsel alan arasındaki ilişkiyi tanımlar ve farklı kuvvetlerle tanımlanır. Bu kuvvetler, yönlendirme kuvvetleri olarak adlandırılmakta ve kombinasyonel kullanımı, modellerin özelleştirilmesine olanak tanımaktadır. Etmenlerin davranışları bu kuvvetlerle tanımlanmakta ve şekillenmektedir. Davranış terimi, insanların veya hayvanların karmaşık eylemleri olarak tanımlanmaktadır. Otonom etmenlerin doğaçlama hareketleri de davranış olarak belirlenir. Bu benzetim modelinde varma, engellerden kaçınma, ayırma, hizalama, çarpışmadan kaçınma, görüş kuvvetleri Reynolds'un yönelim kuvvetlerine göre tanımlanmıştır (Reynolds, 1999).

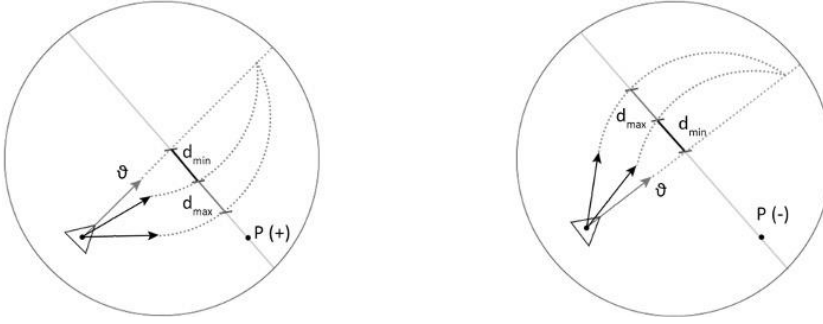
Bu kuvvetlerin yanında modelde tanımlanan etki kuvveti, tanımlanmış üst (d_{max}) ve alt (d_{min}) sınırlarda mesafeye bağlı olarak çekme veya itme kuvvetidir (**Şekil 5**). Kuvvet, ağırlık değeri (w) ile çarpılır. Bulanık

çıkartım sisteminin çıktıları olan etki değeri (a), formülde gösterildiği gibi ağırlık değeri olarak tanımlanmaktadır (Equation 1):

eğer $0 \leq a < 0,5$ ise, $-1 \leq w < 0$, (negatif etki - d_{max})

eğer $a = 0.5$ (nötr) ise, $w = 0$ (etki yok),

eğer $0,5 < a \leq 1$ ise, $0 < w \leq 1$ (pozitif etki - d_{max}) (1)



Şekil 5: Etmenlere uygulanan etki kuvveti (Force applied on the agents).

Etmenlerin hareket etmeye başladığı yayıcılar, başlangıç noktalarında tanımlanmaktadır. Her yayıcı için ilk hız ve etmen sayısı belirlenir. Etmen, hareket sürecinde uygulanan kuvvetlerin etkisiyle hızını güncelleyerek harekete devam eder.

3.4 Modelin Uygulanması (Application of the Model)

Benzetim modeli Grasshopper'da etmen tabanlı bir modelleme eklentisi olan Quelea ile oluşturulmaktadır. Araç, kullanıcının basit kuralların birleşimi yoluyla karmaşık durumlar oluşturmasını sağlar. Sistem girdileri, tanımlanmış bir hıza ve görüş alanına sahip etmenler, etmen yayıcılar ve ortamdır. Çıktılar ise etmen ağlarıdır. Önceki bölümde anlatıldığı gibi, etmenler belirli bir ortamda, kendisine tanımlanan hedeflere ulaşmak için kuvvetlerle hareket ederler.

Modelin uygulanması için, gözlem çalışmalarında kentsel mekânda en çok kullanılan rotalar dikkate alınarak etmen yayıcı noktalar belirlenmektedir. Etmenler sadece ortam sınırları içinde hedeflerine hareket ederler. Sistemin çıktıları olan ağlar, etmenlerin hareket sırasında bıraktıkları izlerdir. Etmenlerin hareket sırasında geçtiği koordinat noktalarından elde edilen veriler zamana göre güncellenmekte ve kaydedilmektedir. Bu noktalar arasında çizilen çizgi, etmen ağının temsiliyi oluşturmaktadır. Bu izler dinamiktir ve etmenin hareketi boyunca şekillenmeye devam eder.

3.5 Değerlendirme ve Doğrulama (Evaluation and Verification)

Model sonuçları, kentsel mekânda gözlemlenen kullanıcı türleri, kentsel mekânın yoğunluğu ve kullanım amaçlarına göre değerlendirilmektedir. Doğrulama aşaması için yaygın olarak kullanılan istatistiksel ölçüt Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) hesaplanır. MAPE, gerçek değerle karşılaştırıldığında tahmin değerlerinde ne kadar hata olduğunu göstermektedir (Khair et al., 2017). Bu araştırmada gözlem verisi gerçek değer olarak işlenmekte, simülasyon verisi de tahmin edilen değer olarak tanımlanmaktadır (Equation 2).

$$100/n \sum |x_o - x_s|/x_o \quad (2)$$

MAPE'i hesaplamanın ilk adımı, gözlem ve çıktı eğrileri sürecinde çizilen eğriler arasındaki farkı hesaplamaktır. Bunun için her bir eğri bölünmekte ve en yakın noktalar arasındaki mesafeler toplanmaktadır. Bu noktalar arasındaki mesafe, gözlem verileri ile çıktı verileri $x_o - x_s$ arasındaki farkı göstermektedir. Mesafe arttıkça benzerliğin azaldığı şeklinde yorum yapılabilir.

MAPE, doğrulama yöntemi ile benzetim modeli sonucu elde edilen kullanıcı hareketlerinin, gözlem sonuçları ile mesafe farkı üzerinden bir doğrulama işlemi yapmaktadır. Kullanıcı hareketleri hızı ve yönü olan vektörel kuvvetler olduğundan mesafe doğrulaması yanında vektörel eğri farklılığını hesaplama yöntemi olan Kesişen Kosinüs (Secant Cosine - SC) yöntemi kullanılmıştır. SC, iki boyutlu zamanla değişen eğrilerin şekil farklılıklarının bir metriğini temsil etmektedir. Ayrık vektörler \vec{x}, \vec{y} iki farklı eğrinin vektörlerini temsil eder.

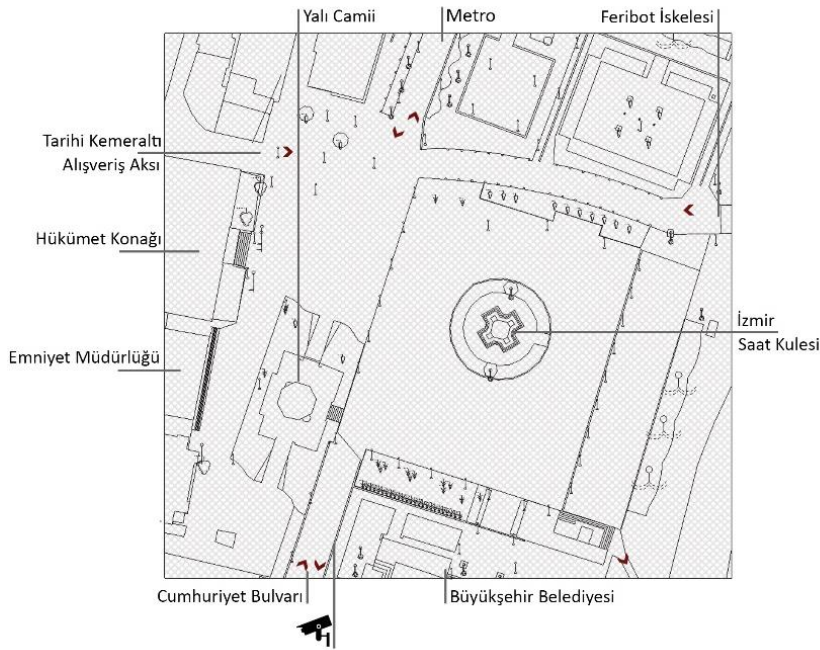
Burada: t, Bölüm 3.1.1'de belirtildiği gibi zaman aralığıdır. Gözlem modeli için, kullanıcının koordinat noktası değişikliği 2 saniyede bir kaydedilmektedir; bu çalışma için t = 2'dir. s, hesaplamada ne kadar gürültünün dikkate alınacağını belirleyen aralıktaki veri noktalarının sayısıdır. n, veri kümesindeki veri noktalarının sayısını temsil eder. SC 1'e eşit olduğunda, eğrilerin şekilleri aynıdır (Ronchi et al., 2013) (Equation 3).

$$SC = \frac{\langle \vec{x}, \vec{y} \rangle}{\|\vec{x}\| \|\vec{y}\|} = \frac{\sum_{i=s+1}^n \frac{(x_i - x_{i-s})(y_i - y_{i-s})}{s^2(t_i - t_{i-1})}}{\sqrt{\sum_{i=s+1}^n \frac{(x_i - x_{i-s})^2}{s^2(t_i - t_{i-1})} \sum_{i=s+1}^n \frac{(y_i - y_{i-s})^2}{s^2(t_i - t_{i-1})}}} \quad (3)$$

4. VAKA ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

Bu araştırmada vaka çalışması için kullanıcı hareketlerinin benzetiminde bir kamusal alan olarak, kentsel bir meydan seçilmiştir. Bir meydanın seçimi, yönlendirici bir yol dokusunun olmaması nedeniyle önemlidir. Literatürde konuyla ilgili olan örnekler, sokak veya cadde gibi tanımlı bir aks üzerindeki kullanıcı hareketleri ile ilgilidir.

Seçilen İzmir Konak Meydanı'nın merkezinde tarihi bir saat kulesi; kuzeyinde büyükşehir belediye binası; doğusunda tarihi Kemeraltı alışveriş aksı; güneyinde şehir için önemli bir ulaşım kavşağı (feribot limanı, metro istasyonu, otobüs transfer merkezi) yer almaktadır (**Şekil 6**). Tüm bu idari, sosyal, ticari ve ulaşım avantajlarıyla meydan, kullanıcı hareketlerini incelemek açısından oldukça çeşitlilik arz etmektedir.

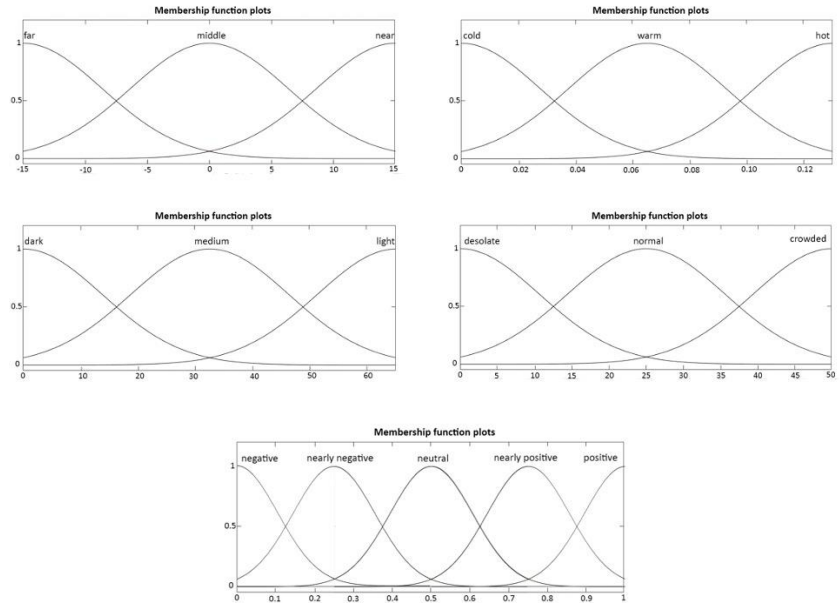


Şekil 6: İzmir Konak Meydanı kamusal mekan bileşenleri (İzmir Konak Square public space elements).

İlk olarak kent gözetleme kameraları ile kullanıcı hareketleri kaydedilmiş ve bu veriler gözlem modeline işlenmiştir. Hareket verileri Aralık 2016'da hafta içi 5 farklı gün saat 08.30 ve akşam 19.00'da olmak üzere iki farklı zamanda kaydedilmiştir. Günün farklı saatlerinde iki gözlem yapılmasının sebebi, meydanın kullanım şekillerindeki değişimi gözlemlemektir. Ayrıca, kullanıcı hareketini etkileyen çevresel faktörler sabah ile akşam arasında farklılık göstermektedir. Gündüz saatlerinde

insanlar sıcaklığa göre hareket etme eğilimindedir; akşamları insanlar görsel erişilebilirlik ve algılanan güvenlik için dış aydınlatmaya bağlı olarak hareket etmektedir (Rahm & Johansson, 2018). Bu nedenle çevre analizleri sabah için güneş radyasyonu, akşam için yapay aydınlatma analizi olarak belirlenmiştir.

Mesafe değeri, en kısa yoldan sapma miktarını ifade etmekte; güneş radyasyonu veya yapay aydınlatma değeri, kullanıcı hareket sürecinin sabah veya akşam gerçekleşmesine bağlı bulunmakta ve nüfus değeri, gözlem anında meydana bulunan insan sayısını temsil etmektedir (Tablo 1). Belirtildiği gibi, bu değerler, bileşenlerin etki değerlerini hesaplayabilmek için bulanık mantık ile yorumlanır (Şekil 7).



Şekil 7: Girdi ve çıktı parametrelerinin üyelik fonksiyonları (Fitness functions of the input and output parameters).

Bulanık çıkarım sisteminde tanımlanan kurallara göre:

- Kış mevsimi sabah benzetim modeli için mesafe arttıkça, güneş radyasyonu azaldıkça ve nüfus azaldıkça etki değeri artar;
- Kış mevsimi akşam benzetim modeli için mesafe arttıkça, aydınlatma azaldıkça ve nüfus azaldıkça etki değeri artmaktadır.

Daha sonra bu etki değerlerine yönelik etmen tabanlı benzetim modeli oluşturulmuştur. Her iki benzetim modeli de sabah ve akşam yapılan gözlemlerden elde edilen, meydana en sık kullanılan kullanıcı rota ve

sayısı verilerine dayanmaktadır. Tanımlanan başlangıç ve hedef noktaları ile etmen sayısı **Tablo 2** 'de açıklanmıştır.

Tablo 1: Bulanık Çıkarım Sistemi Parametreleri (Fuzzy prediction system parameters).

<i>Kural tabanı</i>					
Girdi	Bulanıklaştırma	<u>Bulanık Çıkarım</u>	Toplama	Durulaştırma	Çıktı
<i>Sayısal</i>	<i>Dilsel</i>	<u><i>Veri tabanı</i></u>	<i>Dilsel</i>	<i>Sayısal</i>	<i>Sayısal</i>
Girdi 1: mesafe	Uzak-orta-yakın	-15, +15 m			
Girdi 2: güneş rad. aydınlanma	Soğuk-ılık-sıcak	0, 0.13 kwh/m ²	Σ	Dönüşüm	Etki değeri
Girdi 3: nüfus	Karanlık-orta- aydınlık	0, 65.20 lux			
	Issız-normal-kalabalık	0,50 kullanıcı			

SABAH BENZETİM MODELİ				AKSAM BENZETİM MODELİ		
	Başlangıç	Hedef	Etmen sayısı	Başlangıç	Hedef	Etmen sayısı
Rota 1	Transit merkezi	Cumhuriyet Bulvarı	15	Büyükşehir Belediye	Transit merkezi	3
Rota 2	Transit merkezi	Büyükşehir Belediye	10	Büyükşehir Belediye	Metro	3
Rota 3	Feribot iskelesi	Hükümet Konağı	15	Yalı Camii	Kemeraltı	3
Rota 4	Feribot iskelesi	Cumhuriyet Bulvarı	40	Cumhuriyet Bulvarı	Transit merkezi	5
Rota 5	Büyükşehir Belediye	Kemeraltı	15	Cumhuriyet Bulvarı	Feribot iskelesi	10

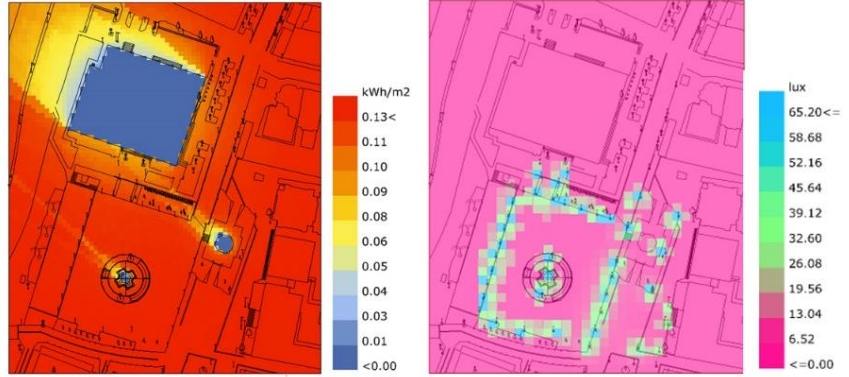
Tablo 2: Etmen rotaları ile başlangıç ve hedef noktaları (Agent routes and, starting and target points).

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Gözlem çalışmasına göre; uyarıcıların %58,3'ü kullanıcılardan oluşmakta ve %85,7'si olumsuz uyarıcı olarak kabul edilmektedir. Sabah, kullanıcı uyarıcı olarak %100 negatif pozisyondayken bu oran akşam saatlerinde %71,4'e düşmektedir. Gözlemden elde edilen kullanıcının ortalama hızı sabah 1,46 m/s iken aynı günün akşamında ortalama hız 1,16 m/s'dir. Hafta içi sabahları işe/okula yetişme gibi zorunlu faaliyetler nedeniyle kullanıcıların ortalama hızının daha yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Modelde meydanın ısınma değerlerini ölçmek için bina kütlelerinin gölge analizi yapılmıştır ve her bir koordinat noktasının ısı değerleri tanımlanan grid üzerinde hesaplanmaktadır. Bu hesaplanan değerlere,

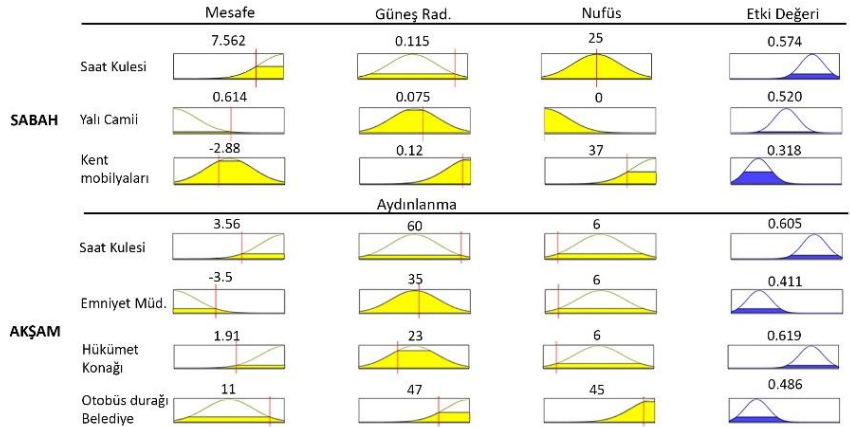
grid üzerinde bir renk kodu atanır. Grid üzerindeki her noktanın aydınlatma değerleri 0 ile 65.20 lux arasında hesaplanmıştır (**Şekil 8**).

Şekil 8: Güneş radyasyonuna maruz kalma ve yapay aydınlatma analiz verileri (Data of exposing of a radiation, and artificial light).

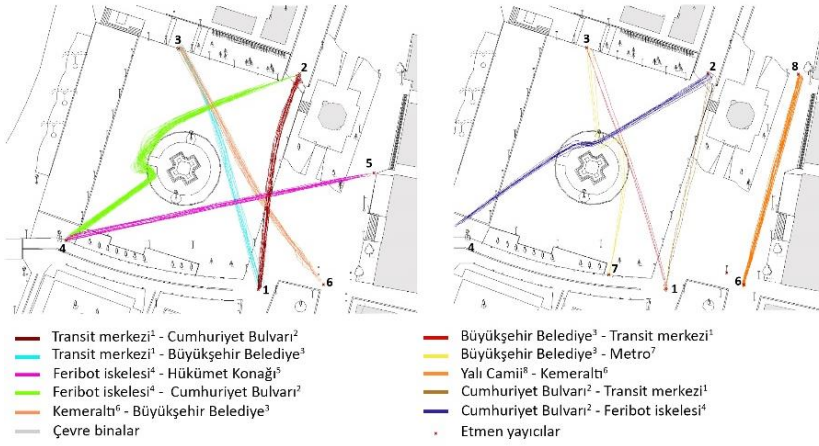


Gözlem ve çevresel analiz verilerine göre fiziksel uyarılara ilişkin girdiler ve hesaplanan etki değerleri **Şekil 9**'da görülebilir. Sabah ve akşam benzetim modellerinin sonuçları **Şekil 10**'da sunulmuştur. Her iki benzetim modeli de kullandıkları rotaya bağlı olarak beş farklı rotadan oluşmaktadır.

Şekil 9: Bulanık çıkarım sonuçları (Fuzzy implication results).



Genelde kullanıcı hareketleri sabah benzetim modeli için doğrudan hareket olarak tanımlanabilir. Hareketlerin çoğu en kısa yolu takip etmekte ve kullanıcıların çoğu zorunlu faaliyetler için hareket eden kentlileri temsil etmektedir. Akşam saatlerinde kentli işten eve dönmektedir ve hafta içi olduğu için meydan ıssız bir konumdadır. Kullanıcıların yavaş hareket ettiğini ve akşam saatlerinde ortamı gözlemlene fırsatı bulduğunu söylemek mümkündür. Kullanıcılar kışın sabah saatlerinde daha güneşli yerlerde, akşamları da daha aydınlık bölgelerde yürümeyi tercih etmektedir.



Şekil 4: Sabah ve akşam benzetim sonuçları (Simulation results in morning and evening).

Tablo 3 ve **Tablo 4** model performansının özetini sunmaktadır. Akşam benzetim modeli sabah benzetiminden daha yüksek hata oranına sahiptir. Bunun nedeni, akşamları daha değişken hareketlerin gerçekleşmesidir. Rota tipi 2, sabah benzetiminde en büyük hata oranına ve en düşük SC değerine sahiptir. Bu durum etmenlerin saat kulesi etrafındaki seviye farkını algılayamamasından ve simülasyonda oradan geçmesinden kaynaklanmaktadır.

SABAH BENZETİM MODELİ		AKSAM BENZETİM MODELİ	
MAPE (%)		MAPE (%)	
Rota 1	10,69	Rota 1	14,65
Rota 2	20,27	Rota 2	21,97
Rota 3	11,95	Rota 3	12,26
Rota 4	12,51	Rota 4	23,57
Rota 5	18,72	Rota 5	10,18
14,82		16,52	

Tablo 3: MAPE ile model performans sonuçları (Model performance results with MAPE).

Sonuç olarak, bu model ile kentsel mekân bileşenlerinin etki değerleri bu model ile hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, bu değerleri girdi olarak kullanan benzetim modelleri kullanıcı yollarını belirleyebilmektedir. Bu yollar, mimarların ve kentsel tasarımcıların erken tasarım aşamalarında kullanıcı hareketini değerlendirmelerine yardımcı olabilmektedir. Önerilen model, kentsel tasarımı kullanıcı hareketi perspektifi açısından değerlendirmek için pratik bir çözüm sunmaktadır. Hareket akışlarını yönetmek için meydanlardaki yolların daha iyi organize edilmesini sağlamak ve ayrıca alışveriş aktiviteleri, turist rotası vb. gibi belirli amaçlar için kullanıcı hareketini dolaylı olarak yönlendirmek amacıyla uygulanabilir. Ayrıca model, sabah ve akşam saatlerinde uyarıcı bileşenlerle ilgili kullanıcıların çabalarını en aza

indirmek için kentsel açık alanlarda gölgeleme elemanlarının ve aydınlatma sistemlerinin konumunu tanımlamanın bir yolunu sunabilir. Gelecek çalışmalarda örneklem alanını genişletmek ve kentsel mekânın yaz mevsiminde ve hafta sonu kullanımını test etmek için daha fazla gözlem çalışması yapılması planlanmaktadır. Model, kentsel meydanlar, parklar ve plazalar başta olmak üzere tüm kentsel açık alanlar için uygulanma imkânı taşımaktadır. Kentsel alan bileşenlerinin etki değerlerinin doğrulanması için, bir anket çalışması ile bu bulanık mantık çıktıları karşılaştırılabilir.

Tablo 4: SC ile model performans sonuçları (Model performance results with SC).

SABAH BENZETİM MODELİ				AKSAM BENZETİM MODELİ			
	s=1	s=10	s=20		s=1	s=10	s=20
Rota 1	0,87112	0,95784	0,98488	Rota 1	0,81004	0,90684	0,97497
Rota 2	0,77936	0,86152	0,92206	Rota 2	0,77398	0,85597	0,91791
Rota 3	0,86863	0,93364	0,97537	Rota 3	0,86717	0,93325	0,96985
Rota 4	0,85181	0,91056	0,96432	Rota 4	0,75831	0,83985	0,91568
Rota 5	0,78608	0,86655	0,93717	Rota 5	0,87707	0,94749	0,97900
	0,8314	0,90602	0,95676		0,81731	0,89668	0,95148

Referanslar (References)

- Andresen, E., Haensel, D., Chraibi, M., & Seyfried, A. (2016). Wayfinding and cognitive maps for pedestrian models. *Traffic and Granular Flow '15*, 249-256. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33482-0_32
- Batty, M. (2001). *Agent-based pedestrian modeling*. SAGE Publications. <https://doi.org/10.1068/b2803ed>
- Becker-Asano, C., Ruzzoli, F., Hölscher, C., & Nebel, B. (2014). A Multi-Agent System based on Unity 4 for virtual perception and wayfinding. *Transportation Research Procedia*, 2, 452-455. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.059>
- Bradshaw, C. (1993). Creating—and using—a rating system for neighborhood walkability: towards an agenda for “local heroes.” *14th Intl Pedestrian Conf.*
- Chen, C.-H. (2009). A Prototype Using Multi-Agent Based Simulation in Spatial Analysis and Planning. *The 14th Annual Conference of the Association of Computer Aided Architectural Design*. CAADRIA.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Pedersen, C. O., & Winkelmann, F. C. (2000). Energy plus: energy simulation program. *ASHRAE Journal*, 42(4), 49-56.
- Drogoul, A., & Ferber, J. (1995). Multi-agent simulation as a tool for analysing emergent processes in societies. *Proceedings of Simulating Societies Symposium*.

- Gilbert, N., & Doran, J. (1994). *Simulating societies: the computer simulation of social phenomena*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781351165129-6>
- Gehl, J. (2011). *Life between buildings: using public space*. Island Press.
- Helbing, D. (1998). A fluid dynamic model for the movement of pedestrians. *ArXiv Preprint Cond-Mat/9805213*.
- Helbing, D., Farkas, I. J., Molnar, P., & Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 21(2), 21–58.
- Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282.
<https://doi.org/10.1103/physreve.51.4282>
- Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I. J., & Bolay, K. (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(3), 361–383. <https://doi.org/10.1068/b2697>
- Heliövaara, S., Korhonen, T., Hostikka, S., & Ehtamo, H. (2012). Counterflow model for agent-based simulation of crowd dynamics. *Building and Environment*, 48, 89–100.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.020>
- Hollmann C. (2015). A cognitive human behaviour model for pedestrian behaviour simulation [Doctoral dissertation].
https://gala.gre.ac.uk/id/eprint/13831/1/Claudia_Hollmann_2015.pdf
- Jiang, B. (1999). SimPed: simulating pedestrian flows in a virtual urban environment. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 3(1), 21–30.
- Johansson, F. (2013). *Microscopic modeling and simulation of pedestrian traffic*. Linköping University Electronic Press.
<https://doi.org/10.3384/lic.diva-101085>
- Khair, U., Fahmi, H., Al Hakim, S., & Rahim, R. (2017). Forecasting error calculation with mean absolute deviation and mean absolute percentage error. *Journal of Physics: Conference Series*, 930(1), 12002. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/930/1/012002>
- Kormanová, A. (2013). A review on macroscopic pedestrian flow modelling. *Acta Informatica Pragensia*, 2(2), 39–50.
<https://doi.org/10.18267/j.aip.22>
- Lewin, K. (1951). *Field theory in social science: selected theoretical papers*. (D. Cartwright, Ed.). Harper. <https://doi.org/10.1086/638467>
- Luo, L., Zhou, S., Cai, W., Low, M. Y. H., Tian, F., Wang, Y., ... Chen, D. (2008). Agent-based human behavior modeling for crowd simulation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 19(3-4), 271–281.
<https://doi.org/10.1002/cav.238>

- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-1450-4.50032-8>
- Narimatsu, K., Shiraishi, T., & Morishita, S. (2004). Acquisition of local neighbor rules in the simulation of pedestrian flow by cellular automata. *International Conference on Cellular Automata*, 211–219. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30479-1_22
- Padgham, L., & Winikoff, M. (2005). *Developing intelligent agent systems: A practical guide* (Vol. 13). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470861223>
- Peacock, R. D., Reneke, P. A., Davis, W. D., & Jones, W. W. (1999). Quantifying fire model evaluation using functional analysis. *Fire Safety Journal*, 33(3), 167–184. [https://doi.org/10.1016/s0379-7112\(99\)00029-6](https://doi.org/10.1016/s0379-7112(99)00029-6)
- Pelechano, N., & Malkawi, A. (2008). Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in Construction*, 17(4), 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.06.005>
- Puusepp, R., Cerrone, D., & Melioranski, M. (2016). *Synthetic Modelling of Pedestrian Movement-Tallinn case study report* [Paper presentation]. 34th eCAADe Conference, Finland.
- Rahm, J., & Johansson, M. (2018). Assessing the pedestrian response to urban outdoor lighting: A full-scale laboratory study. *PLoS One*, 13(10), e0204638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204638>
- Raubal, M. (2001). Human wayfinding in unfamiliar buildings: a simulation with a cognizing agent. *Cognitive Processing*, 2(3), 363–388.
- Reynolds, C. W. (1999). Steering behaviors for autonomous characters. *Game Developers Conference, 1999*, 763–782. Citeseer.
- Ronchi, E., Kuligowski, E. D., Reneke, P. A., Peacock, R. D., & Nilsson, D. (2013). *The process of verification and validation of building fire evacuation models*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/nist.tn.1822>
- Rose, J., Ligtenberg, A., & Spek, S. van der. (2014). Simulating pedestrians through the inner-city: an agent-based approach. *Social Simulation Conference*.
- Schefflen, A. E., & Ashcraft, N. (1976). *Human territories: How we behave in space-time*. https://doi.org/10.1111/j.1545-5300.1976.447_5_5.x
- Schelhorn, T., O’Sullivan, D., Haklay, M., & Thurstain-Goodwin, M. (1999). *STREETS: An agent-based pedestrian model*.
- Sugeno, M. (1985). An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences*, 36(1–2), 59–83. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(85\)90026-x](https://doi.org/10.1016/0020-0255(85)90026-x)

- Tavares, R. M., & Galea, E. R. (2009). Evacuation modelling analysis within the operational research context: A combined approach for improving enclosure designs. *Building and Environment*, *44*(5), 1005–1016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.019>
- Tisue, S., & Wilensky, U. (2004). Netlogo: A simple environment for modeling complexity. *International Conference on Complex Systems*, *21*, 16–21. Boston, MA.
- Waldau, N., Gattermann, P., Knoflacher, H., & Schreckenberg, M. (2007). *Pedestrian and evacuation dynamics 2005* (Vol. 319). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-47064-9>
- Zadeh, L. A. (1999). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, *100*(1), 9–34. [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(99\)80004-9](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(99)80004-9)
- Zheng, X., Zhong, T., & Liu, M. (2009). Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, *44*(3), 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.002>