

AÇIK KAYNAKLI BİR TRAFİK SİMÜLASYON ORTAMININ GELİŞTİRİLMESİ

Abdullah KARAAĞAÇ¹

¹ Öğr. Gör. Dr., Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Harita ve Kadastro Pr., 70000, Merkez, Karaman, akaraagac@kmu.edu.tr

ÖZET

Ulaşım operasyonları özellikle büyük şehirlerde çok önemli bir yere sahiptir. Bu operasyonlar sürecinde geliştirilmekte olan çözümlerin doğrudan trafiğe uygulanması büyük riskler barındırmaktadır. Risklerin aşılması pratikte mümkün olmasa da aşıldığı varsayımı ile dahi, çözümlerin sahada denenerek sorunlara çözüm bulma girişimi çok maliyetli olacaktır. Bu problem simülasyon ortamları sayesinde aşılmaya çalışılmaktadır.

Dünya piyasasında halihazırda trafik simülasyonlarının yapılabildiği VISSIM, Aimsun, SUMO, MATSim gibi ticari ve akademik yazılımlar bulunmaktadır. Bu yazılımların hemen hemen hepsi karşılaşılan temel problem ya çok pahalı oluşu ya da kullanıcılara geliştirme seçeneğinin sunulmamasıdır. Bu çalışmada mikroskobikten makroskobik trafik simülasyonlarında kullanılacak bir trafik simülasyon ortam yazılımından bahsedilecektir. Yazılım MATLAB dili ile halen geliştirilmekte olup kullanıcıların ihtiyaçlarına göre kolayca şekillendirilebilmektedir. Yazılımın daha da geliştirilebilmesi için açık kaynaklı hale getirilmesi planlanmaktadır. Halihazırda yazılım trafik operasyonlarının testi ve otonom araçların eğitimi için kullanılmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Akıllı Şehirler, Akıllı ulaşım sistemleri, Ulaşım operasyonları, Trafik simülasyonu, MATLAB

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF AN OPEN SOURCE TRAFFIC SIMULATION ENVIRONMENT

Transportation operations have a very important place especially in metropolitans. The direct application of the solutions developed during these operations to the traffic carries great risks. Although it is not possible to overcome the risks in practice, even with the assumption that they are overcome, the attempt to find solutions to the problems by trying the solutions in the field will be very costly. This problem is tried to be overcome by means of simulation environments.

In the world market, there are commercial and academic software such as VISSIM, Aimsun, SUMO, MATSim, where traffic simulations can be made. The main problem encountered in almost all of these software is that it is either too expensive or that users are not offered the development option. In this study, a traffic simulation environment software that allows to use in microscopic to macroscopic traffic simulations will be mentioned. The software is still being developed with the MATLAB language and allows users to shape according to their needs. It is planned to make the software open source for further development. Currently, the software is used for testing traffic operations and training autonomous vehicles.

Keywords: Smart cities, Intelligent transportation systems, Transportation operations, Traffic simulations, MATLAB

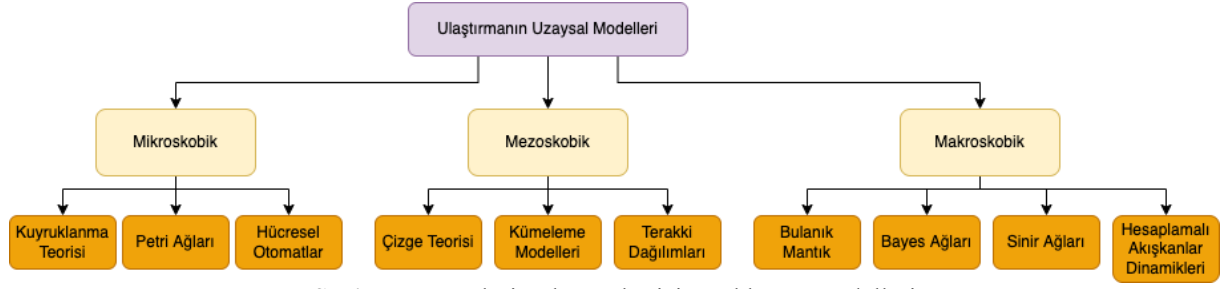
1. GİRİŞ

Büyük şehirlere doğru göç her geçen gün artmaktadır (TÜİK, 2022). Bu büyüme ulaşım talebi her geçen gün üstel olarak arttırmaktadır. Artan bu ulaşım talebini karşılamak için yeni yolların açılması veya var olan yolların genişletilmesinin ters üretken bir etkiye sahip oluşu Braess'in paradoksu ile açıklanmıştır (Frank 1981). Günümüzde ulaşım operasyonları problemlerinin en etkili çözümünün doğru planlama ve yönetim yapmak olduğu görülmektedir.

Ulaşım operasyonları, toplu taşıma operasyonları, sinyalizasyon, navigasyon, lojistik, tedarik zinciri vb. pek çok konuyu kapsamaktadır. Tüm bu operasyonlarla ilgili geliştirilmekte çözümlerin sonuçlarını görmek için doğrudan sahaya uygulanması çok riskli ve maliyetlidir. Bu riski ve maliyeti minimize etmek adına simülasyon ortamları geliştirilmektedir. Fakat simülasyon ortamlarının başarısı ancak doğru geometrik ve matematiksel modellemeye bağlıdır. Modelleme sırasında yapılacak hatalar geliştirilecek çözümün büyük zararlara yol açmasına sebebiyet verebilir.

Trafiğe ait statik ve dinamik yapıların birebir modellenmesi imkansızdır. Bu sebeple, modeller ihtiyaca göre şekillendirilip, genel olarak mikroskobik, mezoskobik ve makroskobik modeller olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu modeller uzaysal ve zamansal olarak farklı statik ve dinamik verilere ihtiyaç duymaktadır.

Burada statik verilerden kasıt; topoğrafya, yol geometrileri, sinyalizasyon cihazlarının konumları gibi bilgilerdir. Uzaysal dinamik verilerden kasıt ise, mikroskobik modellerde araca ait uzunluk, genişlik, gaz ve fren tepkisi, dönme yarıçapı gibi veriler iken; mezoskobik modellerde trafiğe ait akış, yoğunluk, ortalama hız; makroskobik modellerde ise ana arter ve otoban bilgileri ve bunlara bağlı alt dinamiklerdir. Mikroskobik, mezoskobik ve makroskobik modellemelerde kullanılan matematik modeller Şekil 1'de belirtilmiştir.



Şekil 1. Uzaysal Simülasyonlar için Yaklaşım Modelleri

Zamansal olarak bu ulaşım modelleri ele alındığında, adaptif sürüş sistemleri gibi araç bazındaki mikro saniyeden birkaç dakikaya kadar olan çalışmalarda mikroskobik modellemekten, trafik sinyalizasyonu gibi birkaç kavşağı veya şehrin bir kısmını ile ilgili dakika ve saat bazlı yapılan çalışmalarda mezozkobik modellemekten, şehirler ve ülkeler arası günlük ve yıllık bazda uzun vadeli planlamalar söz konusu olduğunda makroskobik modellemelerden bahsedildiği görülmektedir (Karaağaç 2020). Zamansal modellerin genel yapısı Çizelge 1’de gösterilmektedir. Simülasyon yapılacak her bilgisayarın donanım ve yazılım yeterlilikleri farklı olduğundan zamansal modellerin büyük kısmı ayırık matematik yöntemleri geliştirilip simüle edildikten sonra kalibrasyona ihtiyaç duyarlar.

Çizelge 1. Zamansal Simülasyon Yaklaşımları

Zaman Aralığı	İlgi Alanı	Model	Problem Örneği
<0,1 sn	Araç Dinamikleri	Alt-Mikroskobik	Motor ve Fren Kontrolü
1 sn 10 sn 1 dk 10 dk	Trafik Akış Dinamikleri	Araç Takip Modelleri, Mezozkobik	Tepki Zamanı/Zaman Boşluğu İvmelenme ve Yavaşlama Trafik Lamba Döngü Süreleri Dur-Kalk Dalgası
1 sa 1 gün 1 yıl 5 yıl 50 yıl	Ulaşım Planlanma	Makroskobik Modeller, Trafik Gereksinimine göre Güzergâh Ataması, Piramit Dönem İstatistikleri	Pik Saatler Günlük Gereksinim Örüntüsü Altyapı inşa/değişim Sosyo-ekonomik Yapı Demografik Değişim

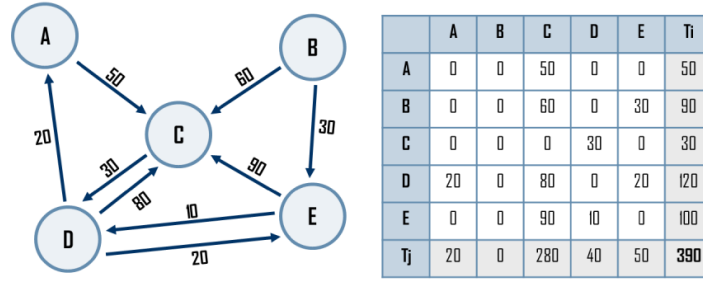
Bu çalışmada mikroskobik temeller üzerine kurulu mezozkobik ve makroskobik ölçümlerin de yapılmasına izin veren bir simülasyon ortamının geliştirilme sürecinden bahsedilecektir. Geliştirilme süreci halen devam etmekte ve yapılan çalışmalara yenileri eklenmektedir. Bu süreç MATLAB dili ile geliştirilmektedir.

Çalışmanın metodoloji bölümünde simülasyon için gerekli olan en kısa yol algoritmaları, trafiğin modellenmesi ve sinyalizasyon ile ilgili bilgiler verilecektir. Uygulama bölümünde geliştirilmiş bu ortam ile yapılmış iki uygulama tanıtılacaktır. Sonuçlar ve tartışma bölümünde akıllı hareketliliğin harita mühendisliği alanı ile ilgisi irdelenecek, bu konuda yapılabilecek gelecek çalışmalar ile ilgili fikirler verilecektir.

2. METODOLOJİ

2.1.En Kısa Yol Algoritmaları

En kısa yol algoritmalarının temelinde çizge teorisi yatmaktadır. Çizge teorisi basitçe iki veya daha çok nesne arasındaki ikili ilişkileri modellemek için kullanılan matematiksel yapılar olan grafikleri inceleyen matematiğin bir dalıdır. Temelde bir çizge, düğümlerden ve kenarlardan oluşur. Düğümler nesneleri, kenarlar ise nesneler arası ağırlıklandırılabilir ilişkiyi ifade eder. Şekil 2’de gösterildiği gibi, çizgeler bir sistemi daha kolay modellemek için kullanıldığından genellikle yön ifade etmeyen grafiklerden oluşur.



Şekil 2. Çizge ve Başlangıç-Varış Matrisi

Çizge teorisi, bir şehir trafik ağını modellemek için kullanıldığında düğümler kavşak noktaları, kenarlar ise bu kavşaklar arası mesafeyi (linkleri) temsil edebilir. Trafik dinamiklerine göre bu kenarlar ağırlıklandırılarak seyahat sürelerine bağlı en kısa yol tahmini yapılabilmektedir. En kısa yol algoritmaları ise bir çizgedeki düğümler arası toplam kenar uzunluğunun yani maliyetin toplamı en aza indirilecek şekilde yol bulma problemlerinin çözümü için geliştirilmiş algoritmalarlardır. En kısa yol algoritmaları ile elde edilmek istenen başlangıç-varış matrisi adı verilen düğümler arası en kısa maliyeti temsil eden matristir. Birçok problem için üretilmiş çeşitli en kısa yol bulma algoritmaları geliştirilmiştir. Bunlardan en bilinenleri ise şu şekilde sıralanabilir:

- Dijkstra Algoritması
- A* Arana Algoritması
- Bellman-Ford Algoritması
- Floyd-Warshall Algoritması
- Johnson Algoritması
- Viterbi Algoritması

2.2. SİMÜLASYON MODELLERİNE GÖRE TRAFİK DİNAMİKLERİ

Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere trafik simülasyonlarını uzaysal olarak, mikroskobik, mezoskobik ve makroskobik olarak 3 farklı şekilde modellenmektedir. Bu çalışmada bahsedilecek olan simülasyon ortamında mikroskobik verilerden makroskobik verilerin elde edilecek uygulama yapılması mümkündür. Bu sebeple bu iki model ayrıntılı olarak incelenecek makroskobik modeller ise temel düzeyde anlatılacaktır.

2.2.1. Mikroskobik Modeller

Mikroskobik modeller doğrudan araç takibi yapan modellerdir. Burada bir aracın dinamikleri doğrudan ele alınabilir. Mikroskobik modellerde genellikle şu dinamiklerden yararlanılır:

Takip Mesafesi (Spacing): Akan trafikte iki araç arasındaki ön tampondan-ön tampona olan ortalama mesafedir. Cinsi metre (m)'dir

Takip süresi (Headway): Birbirini izleyen araçlar arasında, her araç için aynı noktadan ölçülen (ön tampondan-ön tampona gibi) bir şerit veya yol üzerindeki bir noktaya aracın ulaştığı andaki geçen süredir. Cinsi saniye (sn)'dir.

Hız (Speed): Bir aracın 1 saniyede ilerlediği mesafedir. Cinsi m/sn'dir.

Fakat bunu yanında araçların birbirleri ile ilişkileri ele alındığında bazı gözlemler tecrübe edilmiştir.

- Çoğu zaman çarpışma yaşanmaz.
- Maksimum hız, hızlanma ve yavaşlama otomobillerin ve sürücülerin fiziksel sınırlamaları ile sınırlıdır.
- Sürücüler çoğu zaman sabırsız davranır ve 'birinci dereceden yaklaşımda' sadece önündeki araca tepki verir.
- Sürücülerin harekete geçmesi için zaman gereklidir.

Ancak deneyimlere rağmen birçok farklı modelleme yaklaşımı da bulunmaktadır. Genellikle bu yaklaşımlarda tek şeritli bir yolda, $i + 1$. aracın i . aracın önündeki araç olduğu şeklinde numaralandırılmış N adet aracın olduğu varsayılmaktadır. Bu modellerden en yaygınları gecikmeli diferansiyel denklemler ile hücresel otomatlar ve bağlantılı haritalar modelleridir.

Sürücülerin tepkime sürelerinin reaksiyon süreleri olan Δt ile ertelenmesini, gecikmeli diferansiyel denklem olarak sürüş davranışının modellenmesi ilk olarak Gawron tarafından önerilmiştir (Gawron, 1998). Fakat bu modelin gelişmiş yeni formu Gazis, Herman ve Rothery tarafından Denklem 1'deki gibi önerilmiştir. (Gazis vd., 1961).

$$\frac{dv_i}{dt} = \alpha v_i^m(t) \frac{v_{i+1} - v_i}{(x_{i+1} - x_i)^l} \Big|_{t-\Delta t} \quad (1)$$

Burada v_i hızı, x_i mesafeyi, t zamanı belirtmektedir. α , l , m değerleri ise modelin ölçekleme parametreleridir. Modellerin avantajı, model denklemlerinin hız-yoğunluk ilişkisini belirlemek için doğrudan sisteme entegre edilebilir olmasıdır. Gecikmeli diferansiyel denklem modellerinin en büyük dezavantajı düşük hesaplama performansdır.

Yüksek hesaplama performanslı olarak önerilen yöntem ise hücresel otomatlar ve bağlantılı haritalar modelleridir. Bu modeller arasında en göze çarpan ve bir çok defa incelenen Nagel-Schreckenberg modelidir (Nagel ve Schreckenberg, 1992) Fakat bu model günümüzde Krauß tarafından güncellenen hali ile karşımıza çıkmaktadır. S. Krauß, "Towards a Unified View of Microscopic Traffic Flow Theories," vol. 2 (Proceedings of the 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium, Yunanistan: Elsevier Science, 1997); S. Krauß, "Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics" (Doktora, Almanya, University of Cologne, 1998).

Krauß tarafından yeniden modellenen Nagel-Schreckenberg modelinde, linkler Δx uzunluktaki hücrelere ayrılır. Yoğun sıkışmalarda (kilometrede yaklaşık 130 araba) araç yoğunluğunun ölçülmesi, $\Delta x = 7.5 \text{ m}$ 'nin makul bir değer olduğunu göstermektedir. Sonrasında, "doğal" birimler olan Δx ve Δt değerleri sisteme dahil edilmez. Burada aynı zamanda $\Delta x/\Delta t$ nin değeri olan hız da kullanılmamaktadır. Kullanılan değişkenler ise şu şekildedir:

$$\textbf{Hız Güncellemesi (Speed Update): } v_i(t + \Delta t) := \min\{v_{max}, v_i(t) + a, v_{eh}\} \quad (2)$$

$$\textbf{Umarsız Sürüş (Dawdling): } v_i(t + \Delta t) := \max\{v_i(t + \Delta t) - a\varepsilon\xi, 0\} \quad (3)$$

$$\textbf{Yer Değiştirme (Translation): } x_i(t + \Delta t) := x_i(t) + \Delta t v_i(t + 1) \quad (4)$$

Burada $\xi \in [0, 1]$ aralığındaki üniform dağılımlı rastgele değişken ve ε hızlanmadaki 'gürültünün' genliğini kontrol eden bir parametredir. Nagel-Schreckenberg modelinde olduğu gibi Δt zaman adımı genellikle 1. adım olarak alınır.

2.2.2. Mezokobik Modeller

Mezokobik modeller, makroskobik modellerin toplam seviye yaklaşımı ile mikroskobik modellerin bireysel etkileşimleri arasındaki boşluğu doldurmaktadır. (Karaağaç, 2020) Mezokobik seviyede kullanılan dinamikler şu şekilde özetlenebilir:

Akış (Flow): Belirlenen bir nokta üzerinden bir saatte geçen araç sayısıdır. Akış en sade haliyle Denklem 5 ile ifade edilmektedir:

$$q = \frac{N}{t(sa)} \quad (5)$$

Yoğunluk (Density): Bir linkteki veya bölgedeki araçların link uzunluğuna veya bölge alanına oranı olarak ifade edilmektedir. Yoğunluk basitçe Denklem 6 ifade edilmektedir:

$$k = \frac{N}{x(m)} \quad (6)$$

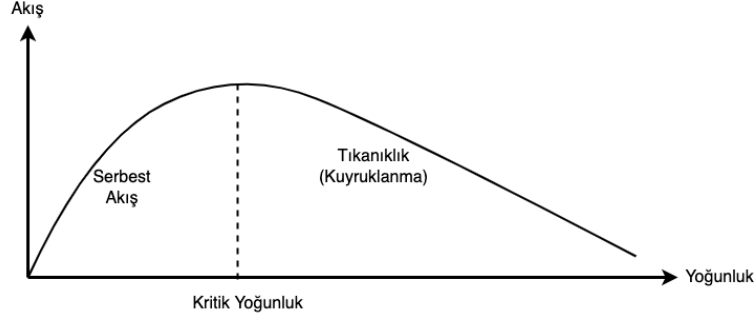
Ortalama seyahat hızı (Average Travel Speed): Bir linkteki veya bölgedeki araç sayısının bölgeyi geçmek için harcadığı toplam süreye olan oranıdır. Denklem 7 ile ifade edilmektedir:

$$S = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (7)$$

Burada $S(\text{km/sa})$ ortalama seyahat hızını, $L(\text{km})$ linkin uzunluğunu, $t(\text{sa})$ i . aracın linki veya bölgeyi geçmek için geçen süreyi ve n toplam gözlem sayısını ifade etmektedir.

Mezokobik modellerde genellikle trafiğe ilişkin varlıklar yüksek bir ayrıntı düzeyinde mikroskobik olarak tanımlanıp, trafik varlıklarının davranışları ve etkileşimleri daha düşük bir ayrıntı düzeyinde açıklanmaktadır. Bu sebeple trafiğin kontrolüne dayalı ölçümler yapılabilmektedir. Bu ölçümler dikkate alındığında Şekil 3'te

gösterildiği gibi karşımıza bir linke ait trafiğin temel diyagramı çıkmaktadır. Grafikten de görüleceği üzere araç sayısı arttıkça yoğunluk ve akış artmaktadır. Fakat kritik yoğunluk değerine ulaşıldığında araçlarda kuyruklanma oluşmakta ve yoğunluk artarken akış azalmaktadır. Burada sürücülerin sürüş kabiliyetleri öne çıkmaktadır. Sürücülerin kabiliyetlerinin yüksek olduğu bir ortamda kritik yoğunluk değeri yoğunluğun ve akışın daha üst olduğu bir değere ötelenecektir. Bu yapı modellenirken mikroskobik olarak umarsız sürüş değerinden türetilmektedir.



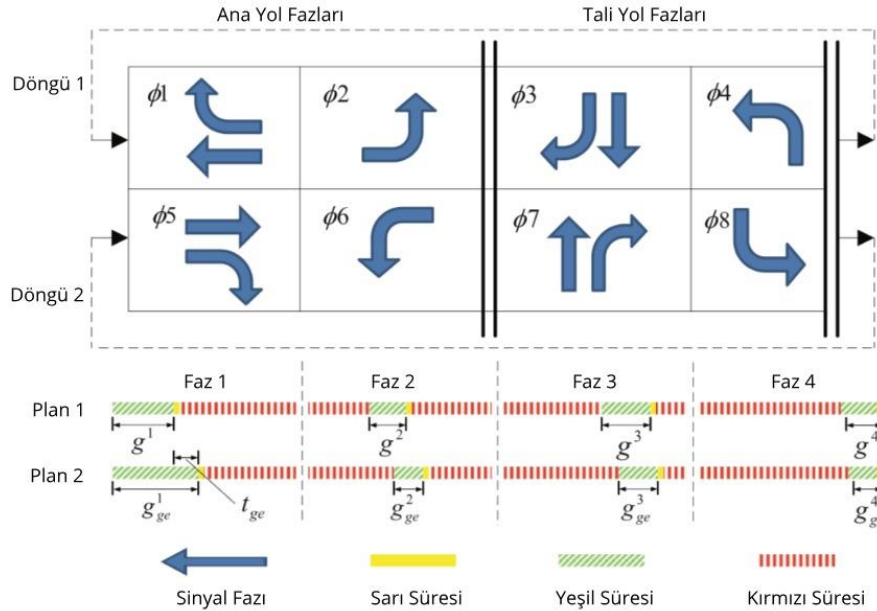
Şekil 3. Trafiğin Temel Diyagramı

2.2.3. Makroskobik Modeller

Trafiğin bölgesel veya uzak mesafeler ile modellenmesi prensibine dayanır. Genellikle tedarik zinciri modellerinde, karayolu yapım planlamasında veya bölgesel istatistikler söz konusu olduğunda kullanılmaktadır. Burada mezoskobik parametrelerin uzun vadeli olarak istatistik modellerinden yararlanılmaktadır.

2.2.4. Trafik Sinyalizasyonu ve Sinyal Fazı

Trafik sinyal kontrolünde, bütün yönlerdeki trafik akışı arasındaki tıkanıklığı önlemek için, tüm trafik akışının sinyal döngüsünde aynı anda aktif olması mümkün değildir. Genel olarak bir sinyal döngüsünde aynı renkli sinyal lambaları ile trafik akışı aynı sinyal fazına sahiptir.



Şekil 4. Sinyal Faz Planları ve Döngüleri (Li ve Jin, 2017)

Şekil 4'te sinyal faz planları ve döngüleri görülmektedir. Sinyalize bir kavşakta gün içerisinde yoğunluğa göre birden fazla sinyal faz planı ve döngüsü uygulanabilmektedir. Şekil 4'de görülen $\emptyset$ fazı, g yeşil faz süresini, t ise iki döngüde yeşil fazların farkını ifade etmektedir.

3. UYGULAMALAR

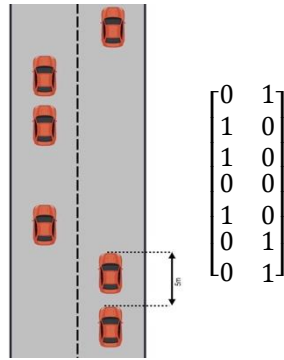
Bu bölümde MATLAB ortamında geliştirilmiş olan simülasyon ortamında yapılan birbirine bağlı iki uygulamadan bahsedilecektir. Bu uygulamalardan ilki Nagel-Schreckenberg modeline bağlı olarak bir kavşakta veya bir trafik ağında oluşan yoğunluk, akış, ortalama hız ve kuyruklanma bilgileri gösterilecektir. İkinci uygulamada ise bu bilgilerden yararlanılarak bir trafik ağında navigasyon güzergahını hesaplayan ve animasyonunu yapan uygulamadır.

3.1. Uygulama 1: Hücresel Otomat ve Bağlantılı Haritalar ile Trafik Bilgilerinin Ölçülmesi

Uygulama bir mikroskobik simülasyon örneğidir. Uygulamada her link birer matris olarak ele alınır. Bu matrisler oluşturulurken her aracın bir şerit ve 5m bir alan kapladığı kabul edilmektedir. Dolayısı ile her linke ait matris boyutu yani kapasitesi Denklem 8'de belirtilmiştir.

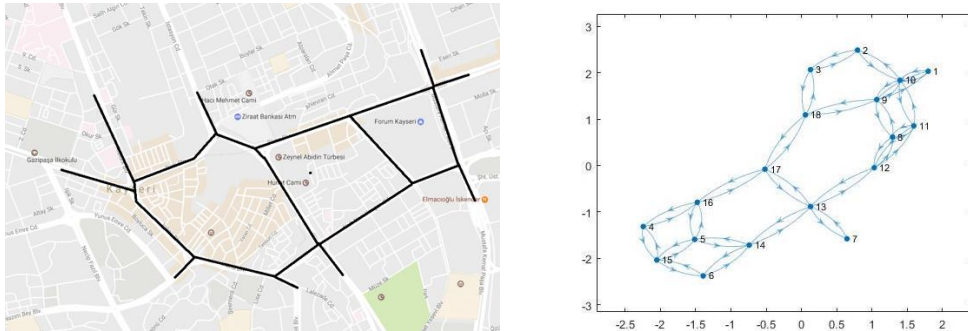
$$C_i = \frac{X_i}{5} \times Ln \quad (8)$$

Burada X_i linkin uzunluğunu, Ln ise şerit sayısını göstermektedir. Burada her link için sıfırlar matrisi oluşturulur. Sonrasında linke giren her araç matrisin ilgili bölümünde 1 haline gelmektedir. Şekil 5'te verilen örnekte bir linkin temsili görseli ve onun matris olarak temsili gösterilmektedir.



Şekil 5. Temsili Bir Link ve Onun İfade Matrisi

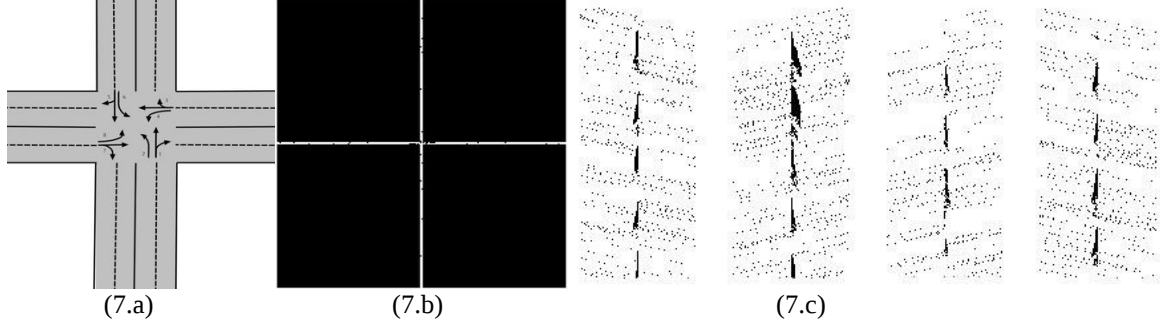
Linklerin tamamı matris haline getirildikten sonra aralarındaki çizge topolojisi oluşturulur. Şekil 6'da örnek olarak gösterilen bir trafik ağı ve onun çizge temsili gösterilmektedir.



Şekil 6. Örnek Bir Trafik Ağı ve Trafik Ağının Çizge Modeli

Bir sonraki adımda simülasyon ihtiyacına göre üretilecek araçlar oluşturulur. Bu araçlar ağı girişlerinden başlayarak ağda rastgele dolaşım veya bir rotaya göre hareket ettirilebilir. Ayrıca araçlar yolun izin verdiği üst limite göre rastgele hızlanıp yavaşlarlar. Hızlanmaya meyilli olan araçlar önlerindeki araç yavaşsa sollama girişiminde bulunurlar. Araçlar herhangi bir çıkışa ulaştıklarında ağı terk ederler. Böylelikle araçlardan ve

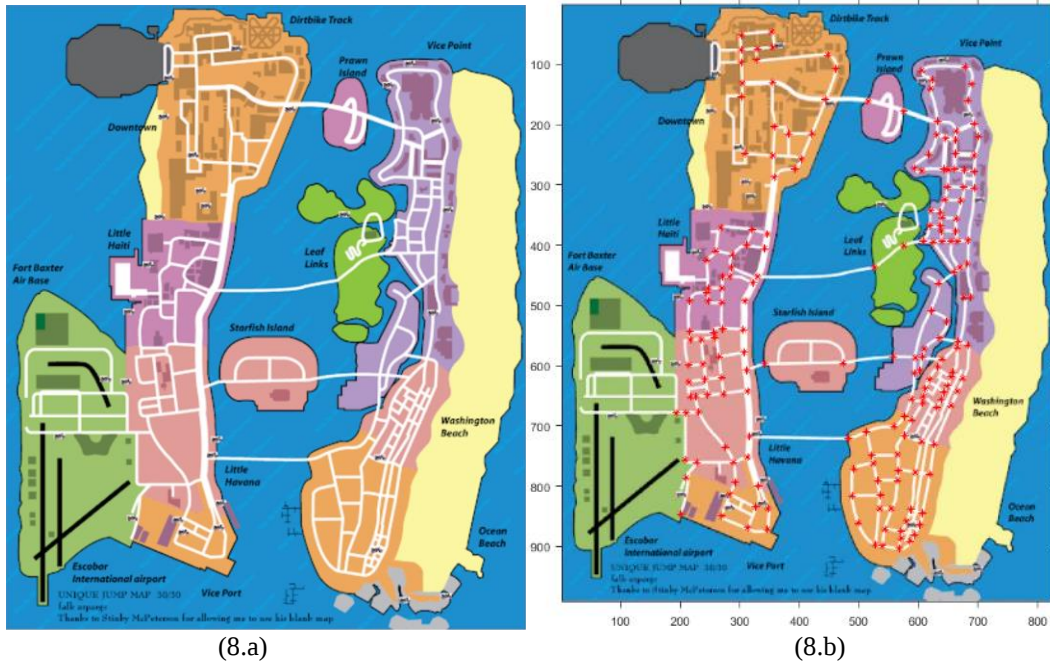
linklerden ölçümlerin alınması mümkün olur. Bu uygulamada aynı zamanda sinyal süreleri ve fazları da kontrol edilebilmektedir. Bunun için iki adet matris kullanılmaktadır. Matrislerden biri sinyallerin hangi link veya linkleri aktif veya pasif hale getireceğini ve ilgili simülasyon adımıyla aktif veya pasif olma durumunu göstermektedir. İkinci matriste ise simülasyon süreci boyunca hangi sinyallerin hangi durumda hangi fazda olacağını gösteren matristir. Bu özellik sayesinde sinyal zamanlama optimizasyonu yapılabilmektedir. Şekil 7’de bir temsili bir kavşak, buna ait simülasyondan bir görüntü ve bu sinyalizasyon kavşağına ait kuyruklanma grafiği gösterilmektedir.

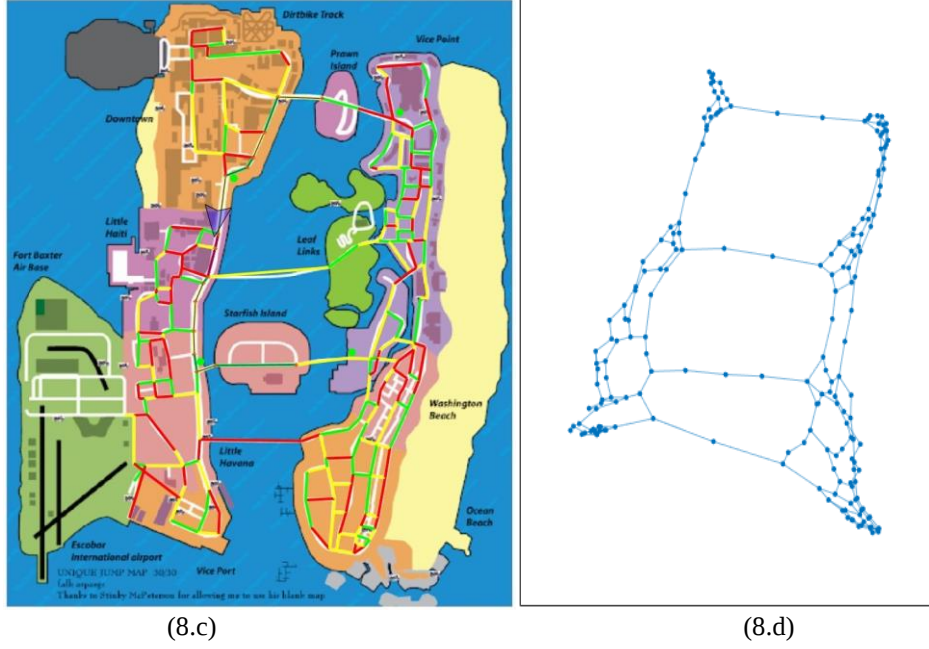


Şekil 7. Temsili Bir Kavşak (7.a), Kavşağına ait Simülasyon Görüntüsü (7.b), Kuyruklanma grafiği (7.c)

3.2. Uygulama 2: Örnek Bir Navigasyon Uygulaması

Bu uygulama bir mezoskopik simülasyon örneğidir. Uygulamada koordinatlı bir harita altlığı üzerinde mikroskopik ölçekte gelen veriler analiz edilerek linklere ait ortalama hız verisi elde edilmektedir. Bu bilgilerden yararlanılarak her linkin başından sonuna kadar olan seyahat süresi hesaplanmaktadır. Bu seyahat süreleri bir en kısa yol algoritmasına ağırlık olarak verilerek optimum güzergâh tespit edilebilmektedir. Sonrasında aracın linkler arası geçişi, sinyalizasyon kavşaklarda duruşu ve güzergâh boyunca ilerleyişi animasyon halinde sunulmaktadır. Standart olarak en kısa yol algoritması olarak Ağırlıklandırılmış Dijkstra Algoritması sunulmaktadır. Fakat uygulama deterministik ve stokastik algoritmaların denemesine imkân tanımaktadır. Şekil 8’de verilen örnekte bir video oyununa ait harita doğrudan uygulama için modellenmiş ve navigasyon uygulamasında kullanılmıştır.





Şekil 8. Ham Harita Altlığı (8.a), Koordinatlandırılmış Harita Altlığı (8.b), Trafik Bilgisi, Sinyalizasyon Eklendi Navigasyon Görüntüsü (8.c), Haritaya Ait Oluşturulmuş Çizge (8.d)

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada akıllı hareketliliğin temelinde yatan matematik, harita koordinatları ve harita bilgisi harmanlanarak bir simülasyon ortamı geliştirilmiştir. Bu çalışma halen geliştirilmekte olup ihtiyaç olunan uygulamaya göre şekillendirilmeye devam etmektedir. Özellikle yapay zekâ destekli ulaşım uygulamaları, adaptif trafik sinyal optimizasyonları ve otonom sürüş gibi konularda yeni uygulamalar geliştirilmeye devam etmektedir. Bu proje uzun vadede tamamen açık kaynaklı hale getirilmeye çalışılmaktadır.

Harita mühendisliği alanı her geçen gün kapsamını genişleterek gelişmektedir. Özellikle akıllı şehirler kavramının yaygınlaşması ile beraber, coğrafi bilgi sistemleri altyapısı benimsemiş olan harita mühendisleri pek çok alanda yenilikçi uygulamalara kapılar aralamaktadır. Akıllı şehirlerin altı alt alanından biri olan akıllı hareketlilik ise bu mesleğe yeni fırsatlar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Gawron, C.**, 1998. Simulation-Based Traffic Assignment. Doktora Tezi, Universität zu Köln, Almanya. ss: 112
- Frank, M.**, 1981, The Braess Paradox. *Mathematical Modelling*, 20(1): 283-302.
- Gazis, D.C., R Herman, and R.W. Rothery.** 1961. Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow. *Operations Research* (9): 545–67.
- Karaağaç, A.**, 2020, Sezgisel Arama Algoritmaları ile Trafik Sinyal Optimizasyonu, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 130 sayfa.
- Krauß, S.**, 1998. Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics. Doktora Tezi, University of Cologne.
- Krauß, S.**, 1997 “Towards a Unified View of Microscopic Traffic Flow Theories,” Vol. 2. Yunanistan: Elsevier Science (2)
- Nagel, K., and M. Schreckenberg,** 1992. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. *Journal de Physique I France* (2)2: 2221–29.
- Li, R., Jin, P.J.**, 2017. Transit Signal Priority Optimization for Urban Traffic Network Considering Arterial Coordinated Signal Control, *Advances in Mechanical Engineering*, (9)8: 1-12
- Türkiye İstatistik Kurumu**, 2022, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2021, Rapor Numarası: 45500. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=45500#:~:text=T%C3%BCrkiye'de%202020%20y%C4%B1%C4%B1nda%20%93,6%2C8'e%20d%C3%BC%C5%9Ft%C3%BC.&text=%C4%B0stanbul'un%20n%C3%BCfusu%2C%20bir%20%C3%B6nceki,840%20bin%20900%20ki%C5%9Fi%20oldu.> [Erişim tarihi: 05.09.2022]