

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRÜCÜSÜZ TAŞIT UYGULAMALARININ AĞ
YÖNETİM MODELLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR
KENTSEL HAREKETLİLİK ÖLÇÜTLERİ
ÇERÇEVESİNDE ULAŞIM SİSTEMLERİ İLE
BÜTÜNLEŞTİRİLMESİ**

Zeynel Baran YILDIRIM

Kasım, 2024

İZMİR

**SÜRÜCÜSÜZ TAŞIT UYGULAMALARININ AĞ
YÖNETİM MODELLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR
KENTSEL HAREKETLİLİK ÖLÇÜTLERİ
ÇERÇEVESİNDE ULAŞIM SİSTEMLERİ İLE
BÜTÜNLEŞTİRİLMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı

Zeynel Baran YILDIRIM

Kasım, 2024

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ZEYNEL BARAN YILDIRIM tarafından **DOÇ.DR. MUSTAFA ÖZUYSAL** yönetiminde hazırlanan “**SÜRÜCÜSÜZ TAŞIT UYGULAMALARININ AĞ YÖNETİM MODELLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK ÖLÇÜTLERİ ÇERÇEVESİNDE ULAŞIM SİSTEMLERİ İLE BÜTÜNLEŞTİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Mustafa ÖZUYSAL

Danışman

Prof. Dr. Serhan TANYEL

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. Hilmi Evren ERDİN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Halim CEYLAN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Soner HALDENBİLEN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her adımda bana yol gösteren, tezimin şekillenmesine ve gelişimine değerli katkılarıyla destek olan danışmanım sayın Doç. Dr. Mustafa ÖZUYSAL'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez izleme komite üyelerim sayın Prof. Dr. Serhan TANYEL ve sayın Prof. Dr. Özgür BAŞKAN'a tez araştırmama yaptıkları değerli katkılar için teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitim hayatım boyunca her zaman desteklerini yanımda hissettiğim Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı öğretim üyelerine teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 221M310 no'lu bilimsel ve teknolojik araştırma projeleri kapsamında desteklenmiştir. İlgili araştırma projesinde sağlanan TÜBİTAK burs destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, bana güvenen, desteklerini ve sevgilerini bana hissettiren ailem; annem Gülüzar YILDIRIM'a, babam Yener YILDIRIM'a ve kardeşlerim Ender Barkın YILDIRIM ve Melisa YILDIRIM'a sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın vazgeçilmezleri; sabır ve anlayışıyla her zaman yanımda olan, her zorluğun üstesinden gelmemde bana güç veren, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Ceren YILDIRIM'a ve varlığıyla bana her zaman neşe ve motivasyon kaynağı olan oğlum Eren Deniz YILDIRIM'a sonsuz sevgilerimi sunuyorum. Bu doktora tezini, varlıklarıyla bu süreci daha anlamlı kılan canım eşime ve sevgili oğluma ithaf ediyorum.

Zeynel Baran YILDIRIM

SÜRÜCÜSÜZ TAŞIT UYGULAMALARININ AĞ YÖNETİM MODELLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK ÖLÇÜTLERİ ÇERÇEVESİNDE ULAŞIM SİSTEMLERİ İLE BÜTÜNLEŞTİRİLMESİ

ÖZ

Sürdürülebilir ve akıllı şehir hedeflerinin merkezinde yer alan otonom araçlar, son yıllarda kaydettiği büyük ilerlemelerle Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) için vazgeçilmez bir teknolojiye dönüşmüştür. Otonom araçlar, çevresel verileri sensörler ve algoritmalar yardımıyla işleyerek, otomasyon seviyelerine göre değişen ölçülerde insan müdahalesi ile güvenli sürüş gerçekleştiren ileri teknoloji ürünleridir. Bu araçlar, şehirlerde sürdürülebilir ulaşım hedeflerini desteklemek için önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, bu teknolojinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, dikkatli bir planlama süreci ve uygun altyapı düzenlemeleriyle mümkün olabilir. Araştırmada, otonom araçların mevcut ulaşım sistemine kontrolsüz entegrasyonunun, istenilen sürdürülebilir hareketlilik hedeflerine ulaşmayı zorlaştırabileceği değerlendirilmiş ve bu riskleri en aza indirmek amacıyla bir Karar Destek Sistemi (KDS) geliştirilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır. Uzmanlarla yapılan görüşmeler ve kapsamlı literatür taramaları sonucunda, sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından kritik olan emisyon azaltımı, enerji verimliliği, trafik sıkışıklığı, seyahat süresi ve gürültü gibi önemli göstergeler belirlenmiştir. Bu göstergeler, kentsel ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için bir temel oluşturmuş ve kentsel hareketlilik ortamında hazırlanan simülasyonlarla bu göstergeler üzerinden detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, otonom araçların mevcut ulaşım sistemlerine entegre edilmesi, trafik akımının verimliliğini artırma ve çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, bu olumlu etkilerin sürdürülebilir bir şekilde gerçekleşmesi için uygun altyapı düzenlemelerinin yapılması ve kapsamlı politikaların devreye alınması büyük önem taşımaktadır.

Araştırma, geleneksel ve otonom araçların bir arada bulunduğu karma trafik koşullarında bazı zorlukların ortaya çıkabileceğini göstermektedir. İnsan sürücülerinin öngörülemez davranışları, otonom araçların güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını

zorlaştırmakta ve trafik performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu noktada, otonom araçların ulaşım ağı üzerinde otomasyon seviyelerine bağlı penetrasyon oranlarının dağılımı trafik üzerinde etkileri belirleyen kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, otonom araçların penetrasyon oranlarının artmasıyla birlikte insanların seyahat tercihleri değişmekte ve bu durum seyahat taleplerinin de artmasına neden olmaktadır. Kısıktırılmış seyahat talebi ve karma trafik koşullarındaki araçlar arası etkileşim dinamikleri göz önünde bulundurulduğunda, belirli bir penetrasyon oranı eşiği aşıldığında sürdürülebilirlik endekslerinde olumsuz sonuçlar doğabileceği ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, geliştirilmiş karar destek ve tahmin modelleri, otonom araç penetrasyon oranlarının kritik seviyelere ulaşmadan önce önleyici tedbirlerin alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Otonom araçların yaratacağı potansiyel faydaların sınırlanmaması adına önleyici tedbirlerin gerekliliği farklı senaryo durumlarının incelenmesi ile ortaya konulmuştur. Mevcut altyapının otonom araçlar için uygun hale getirilmesi, özellikle trafik ağ yönetimi ve kontrol sistemlerinin güncellenmesini gerektirmektedir. Akıllı trafik sinyalizasyon sistemleri, gerçek zamanlı trafik izleme ve ağ yönetim sistemleri gibi teknolojik entegrasyonların trafik akımını daha homojen hale getirerek tıkanıklıkların önlenmesini ve genel olarak daha verimli ve sürdürülebilir bir ulaşım sistemi oluşturacağı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, otonom araçların kentsel ulaşım sistemlerine entegrasyonu, sürdürülebilir mobiliteye önemli katkılar sağlayabilir. Bu araştırma, kritik sürdürülebilirlik göstergelerini belirleyerek, otonom araçların potansiyel etkilerini simülasyonlar yoluyla analiz etmiş ve politika yapıcılar için değerli içgörüler sunmuştur. Gelecekte, teknolojik ilerlemeler ve toplumsal değişimlerle birlikte otonom araçların bu katkıları daha da belirgin hale gelecektir. Bu süreçte, sürekli araştırma, paydaş iş birliği ve esnek politika yaklaşımları, şehirlerin daha verimli ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerine geçişini destekleyecektir.

Anahtar kelimeler: Otonom araçlar, sürdürülebilir kentsel hareketlilik, sürdürülebilir ulaşım, ulaşım sistemleri, ağ yönetim modelleri

INTEGRATION OF AUTONOMOUS VEHICLE APPLICATIONS WITH TRANSPORTATION SYSTEMS WITHIN THE FRAMEWORK OF NETWORK MANAGEMENT MODELS AND SUSTAINABLE URBAN MOBILITY MEASURES

ABSTRACT

Autonomous vehicles, which are at the core of sustainable and smart city objectives, have transformed into an indispensable technology for Intelligent Transportation Systems (ITS) due to significant advancements in recent years. These vehicles are advanced technological products that process environmental data with the help of sensors and algorithms, performing safe driving with varying degrees of human intervention depending on their levels of automation. They offer significant opportunities to support sustainable transportation goals in cities. However, the successful implementation of this technology can only be achieved through a careful planning process and appropriate infrastructure adjustments. The research evaluated that uncontrolled integration of autonomous vehicles into the existing transportation system could make it difficult to achieve desired sustainable mobility objectives, emphasizing the necessity of developing a Decision Support System (DSS) to minimize these risks. As a result of consultations with experts and comprehensive literature reviews, important indicators critical for sustainable urban mobility—such as emission reduction, energy efficiency, traffic congestion, travel time, and noise—were identified. These indicators formed a basis for evaluating the sustainability of urban transportation systems, and detailed analyses were conducted through simulations prepared in the urban mobility environment based on these indicators. According to the simulation results, integrating autonomous vehicles into existing transportation systems has the potential to increase the efficiency of traffic flow and reduce environmental impacts. However, to ensure these positive effects occur sustainably, it is of great importance to make appropriate infrastructure arrangements and implement comprehensive policies.

The research demonstrates that certain challenges may arise under mixed traffic conditions where traditional and autonomous vehicles coexist. The unpredictable behaviors of human drivers complicate the safe and effective operation of autonomous vehicles and can negatively impact traffic performance. At this point, the distribution of penetration rates of autonomous vehicles on the transportation network, depending on their levels of automation, emerges as a critical factor determining their effects on traffic. Moreover, as the penetration rates of autonomous vehicles increase, people's travel preferences change, leading to an increase in travel demand. Considering the induced travel demand and the interaction dynamics between vehicles in mixed traffic conditions, it has been demonstrated that once a certain penetration rate threshold is exceeded, negative impacts on sustainability indices may arise. In this context, developed decision support and prediction models emphasize that preventive measures should be taken before the penetration rates of autonomous vehicles reach critical levels. The necessity of preventive measures to avoid limiting the potential benefits that autonomous vehicles can create has been demonstrated through the examination of different scenario conditions. Making the existing infrastructure suitable for autonomous vehicles particularly requires updating traffic network management and control systems. It has been concluded that technological integrations such as intelligent traffic signaling systems, real-time traffic monitoring, and network management systems will prevent congestion by making traffic flow more homogeneous and will generally create a more efficient and sustainable transportation system.

In conclusion, the integration of autonomous vehicles into urban transportation systems can provide significant contributions to sustainable mobility. This research identified critical sustainability indicators, analyzed the potential impacts of autonomous vehicles through simulations, and provided valuable insights for policymakers. In the future, with technological advancements and societal changes, these contributions of autonomous vehicles will become even more evident. In this process, continuous research, stakeholder collaboration, and flexible policy approaches will support cities in transitioning to more efficient and sustainable transportation systems.

Keywords: Autonomous vehicles, sustainable urban mobility, sustainable transportation, transportation systems, network management models.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xviii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ

1.1 Konunun Önemi	1
1.2 Amaç ve Hedefler	7
1.3 Yöntem ve Kapsamı	9

BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Karma Trafik Koşullarının İncelendiği Çalışmalar	16
2.2 Kışkırtılmış Talebin İncelendiği Çalışmalar	19
2.3 Sürdürülebilir Ulaşım ve SKHP'nin İncelendiği Çalışmalar	22
2.4 Talep ve Ağ Yönetim Modellerinin İncelendiği Çalışmalar	24
2.5 KDS ve ÇKKV'nin İncelendiği Çalışmalar	29
2.6 Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi	31

BÖLÜM ÜÇ - MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Tez Organizasyonu	34
3.2 Sürdürülebilir Ulaşım ve Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik	36
3.2.1 SKHG'lerin Belirlenmesi	40
3.2.2 Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Gösterge Ağırlıklandırılması	44
3.2.3 Seçilen SKHG Ölçütlerinin Hesaplanması	48
3.2.3.1 Hava Kirlenen Emisyonlar	48
3.2.3.2 Sera Gazı Emisyonları	50

3.2.3.3	Enerji Verimliliği	51
3.2.3.4	Tıkanıklık ve Gecikme	52
3.2.3.5	Seyahat Süresi	53
3.2.3.6	Gürültünün Önlenmesi	53
3.3	Kentsel Hareketlilik Ortamının Oluşturulması	54
3.3.1	Araç Takip Modelleri.....	55
3.3.1.1	Krauss Araç Takip Modeli	56
3.3.1.2	IDM (Intelligent Driver Model) Araç Takip Modeli.....	57
3.3.1.3	EIDM (Extending Intelligent Driver Model) Araç Takip Modeli	59
3.3.2	Şerit Değiştirme Modelleri	61
3.3.2.1	SL2015 (Sub-Lane) Şerit Değiştirme Modeli	62
3.3.3	Ulaşım Ağlarının Oluşturulması	63
3.3.3.1	Sioux Falls Ulaşım Ağı	64
3.3.3.2	İzmir Kentsel Ulaşım Ağı.....	67
3.3.4	Otonom Araçların Modellenmesi	71
3.4	Kısıktırılmış Talep ve Kentsel Ulaşım Verileri	74
3.4.1	Kısıktırılmış Talep	74
3.4.2	Kentsel Ulaşım Verileri	77
3.4.2.1	Belirtilen Tercihler Anketi	79
3.5	Kalibrasyon ve Doğrulama	83
3.5.1	Kalibrasyon, Doğrulama Aşamalarında Gerçekleştirilen Duyarlılık Analizleri	87
3.5.1.1	Ölçeklenebilir Kalite Değeri (SQV).....	87
3.5.1.2	Theil's U İstatistiği.....	89
3.5.1.3	Göreceli Kök Ortalama Kare Hatası (RRMSE)	90
3.5.2	Kalibrasyon Aşamasının Sonuçları.....	91
3.5.3	Kalibrasyon ve Doğrulama Aşamasından Sonra Gerçekleştirilecek İşlemler	94
3.6	Trafik Atama ve Rota Seçimi	100
3.7	ÇKKV ve KDS	104
3.7.1	ÇKKV	104
3.7.1.1	CODAS	105
3.7.1.2	MARCOS	108
3.7.1.3	WASPAS.....	111
3.7.2	KDS.....	114
3.8	Ağ Yönetim Modelleri.....	117

3.8.1 Ayrılmış Şerit Uygulaması	117
3.8.2 Otonom Sürüş Kontrolü Uygulaması.....	119
BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	122
4.1 Kısıktırılmış Talep Senaryolarının Değerlendirilmesi.....	122
4.1.1 Sioux Falls Ağında Gerçekleştirilmiş Simülasyonlar	123
4.1.2 İzmir Kentsel Ulaşım Ağında Gerçekleştirilmiş Simülasyonlar.....	135
4.2 Kapasite Analizleri	145
4.3 Kalibrasyon ve Doğrulama İşlemleri Sonrasında Gerçekleştirilmiş Simülasyonlar	150
4.3.1 İzmir Kentsel Ulaşım Ağından Elde Edilen Sonuçlar	152
4.4 Önleyici Tedbirlerin Uygulandığı Simülasyonlar	161
4.4.1 Önleyici Tedbirlerden Elde Edilen Sonuçlar	162
BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	171
KAYNAKLAR.....	179
EKLER.....	202
EK-A: TAŞIT UYGULAMALARININ SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK ÖLÇÜTLERİ ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİNDE KULLANILABİLECEK GÖSTERGELERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK SORU FORMU	202
EK-B: SÜRÜCÜSÜZ TAŞIT UYGULAMALARININ SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK ÖLÇÜTLERİ ÇERÇEVESİNDE ARAŞTIRILMASI AHS (ANALİTİK HİYERARŞİK SÜREÇ) KRİTER AĞIRLIKLANDIRMA ANKETİ	223
EK-C: YENİLİKÇİ ULAŞIM TÜRLERİ SEÇİM ANKETİ - Uzak, Orta, Yakın Gelecekte Ulaşım Türleri - Belirtilen Tercihler Anketi (stated preference survey).....	236
EK-D.....	268

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Tezin genel akış şeması	13
Şekil 3. 1 Tez organizasyon şeması	34
Şekil 3.2 Sürdürülebilirlik temel unsurları (Litman, 2024).....	36
Şekil 3.3 Hava kirlenen emisyonlar göstergesinin uzmanlar tarafından değerlendirilmesi	41
Şekil 3.4 Yamuk üyelik fonksiyonu.....	46
Şekil 3.5 Uzman değerlendirmelerinin ikinci aşamasında yöneltlen örnek bir kıyaslama	47
Şekil 3. 6 Sioux Falls şehri test ağı ve gerçek ulaşım ağı	65
Şekil 3. 7 Nedit ve sumogui ortamından örnekler.....	67
Şekil 3. 8 İzmir ili ilçe bazlı nüfus dağılımı.....	68
Şekil 3. 9 İzmir kentsel ulaşım ağı	69
Şekil 3. 10 Filtreleme işlemleri sonrasında İzmir kent ulaşım ağı.....	70
Şekil 3. 11 Farklı özdevinim düzeyleri (Höb ve Lepke, 2011).....	72
Şekil 3. 12 Kışkırtılmış seyahat talebi bileşenleri.....	75
Şekil 3. 13 İzmir ili hanehalkı ulaşım anketlerinden elde edilen yolcu hareketlerinin araç türlerine göre dağılımı (İBB, 2017)	79
Şekil 3. 14 Kullanıcılara yöneltlen seçim sorularından örnekler	80
Şekil 3. 15 Kalibrasyon işlemi akış şeması.....	87
Şekil 3. 16 Belirtilen tercihler anketinin sonuçlarına göre türel dağılımlar ve referans durumunun karşılaştırılması	96

Şekil 3. 17 Kısıktırılmış talep bileşenlerinin katsayı seçiminde kullanılan eğriler	98
Şekil 3. 18 Karar destek mekanizması oluşturulması süreci.....	114
Şekil 3. 19 Ayrılmış şerit uygulamasının ağ dosyasında üzerinde tanımlanması	118
Şekil 3. 20 Ayrılmış şerit uygulaması	119
Şekil 3. 21 SUMO'nun ToC cihazı için durum geçiş diyagramı.....	120
Şekil 3. 22 TraCI arayüzü kullanılarak geliştirilmiş bir ağ yönetim uygulaması	121
Şekil 4. 1 SKHG değerlendirme aşamasında kullanılan Sioux Falls teorik ağında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından örnekler	126
Şekil 4. 2 Yanıt değişkeninin tahmin edilen ve gözlemlenen değerleri arasındaki ilişki	134
Şekil 4. 3 SKHG değerlendirme aşamasında kullanılan İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından örnekler	138
Şekil 4. 4 Yanıt değişkeninin tahmin edilen ve gözlemlenen değerleri arasındaki ilişki	144
Şekil 4. 5 L49 bağlantısına ait trafiğin temel diyagramları- %100 penetrasyon oranı	146
Şekil 4. 6 Kesintili akım koşullarında L52-L49 bağlantılarının kapasite değişimleri	147
Şekil 4. 7 L52'ye ait Hacim-Yoğunluk Grafiğinin %0 - %100 penetrasyon oranlarında karşılaştırılması	148
Şekil 4. 8 Kalibrasyon aşamasından sonra SKHG değerlendirmesinde kullanılan İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından örnekler.....	154
Şekil 4. 9 Yanıt değişkeninin tahmin edilen ve gözlemlenen değerleri arasındaki ilişki	161

Şekil 4. 10 Çeşitli ToC ve ayrılmış şerit uygulamalarında meydana gelen iyileşme yüzdeleri	164
Şekil 4. 11 Farklı ToC ve DL kombinasyonları için trafik davranışının kentsel ölçekte analizi	168
Şekil D.1 Sioux Falls test ağında kısıktırılmış talep simülasyonlarından elde edilen sonuçlar.....	277
Şekil D.2 İzmir kentsel ulaşım ağında kısıktırılmış talep simülasyonlarından elde edilen sonuçlar.....	283
Şekil D.3 Kalibrasyon işlemlerin sonra İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilmiş simülasyonlardan elde edilen sonuçlar	289

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Sürdürülebilir kentsel hareketlilik göstergeleri	38
Tablo 3.2 Otonom araç uygulamalarında kullanılmak üzere SKHG'lerin belirlenmesi ile ilgili tanımlayıcı istatistik değerleri	42
Tablo 3.3 AHP'de çiftler arası karşılaştırmalarda kullanılan göreceli önem ölçeği...	46
Tablo 3.4 B-AHP süreci kullanılarak belirlenen SKHG ağırlıkları	47
Tablo 3. 5 LeBlanc vd., (1975) yılı Sioux Falls ulaşım ağı B/V matrisi	66
Tablo 3. 6 Açık kaynak kodlu simülasyon ortamında literatürde yaygın olarak kullanılan otonom araç parametreleri	73
Tablo 3. 7 Otonom araç senaryolarında kısıktırılmış talep bileşenlerinin dağılımı	76
Tablo 3. 8 Uzak, orta ve yakın gelecek koşullarında tür seçimine etki eden öznelilik düzeyleri	82
Tablo 3. 9 UPİ2030 kapsamında toplanan gezici araç verileri	85
Tablo 3. 10 Kalibrasyon işlemlerinin başlangıç aşamasında SQV değerlendirmeleri	92
Tablo 3. 11 Kalibrasyon aşamasının sonucunda duyarlılık analizleri.....	93
Tablo 3. 12 Kalibrasyon işlemlerinin öncesinde ve sonrasında araç parametrelerinin değişimi.....	93
Tablo 3. 13 Kalibrasyon işlemlerinden sonra gerçekleştirilen doğrulama aşaması ...	94
Tablo 3. 14 Kısıktırılmış talep bileşenleri katsayılarının senaryolara göre dağılımı ..	99
Tablo 4. 1 Kısıktırılmış talep simülasyonlarında tanımlanan otonom araçların penetrasyon oranlarının seviyelere göre dağılımı	122
Tablo 4. 2 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 7200 simülasyon adımı SKD	128

Tablo 4. 3 Sioux Falls test ağında ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucunda elde edilen sıralamalar.....	130
Tablo 4. 4 Otonomluk seviyeleri ile toplam puan arasındaki ilişkinin ANOVA analizi sonuçları.....	133
Tablo 4. 5 İzmir kentsel ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 3600 simülasyon adımı SKD	140
Tablo 4. 6 İzmir kentsel ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucunda elde edilen sıralamalar	142
Tablo 4. 7 Otonomluk seviyeleri ile toplam puan arasındaki ilişkinin ANOVA analizi sonuçları.....	144
Tablo 4. 8 Seçilen yol kesimlerini kapasite ve kritik yoğunluk değerlerinin değişimi	149
Tablo 4.9 Kalibrasyon işlemleri sonrasında gerçekleştirilen simülasyonlarda otonom araç penetrasyon oranlarının seviyelerine göre dağılımı	151
Tablo 4. 10 Kalibrasyon ve doğrulama işlemlerinden sonra İzmir kentsel ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 3600 simülasyon adımı SKD	156
Tablo 4. 11 Kalibrasyon ve doğrulama işlemlerinden sonra İzmir kentsel ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucunda elde edilen sıralamalar.....	159
Tablo 4. 12 Otonomluk seviyeleri ile toplam puan arasındaki ilişkinin ANOVA analizi sonuçları	160
Tablo 4. 13 Çeşitli ToC ve ayrılmış şerit senaryoları altında operasyonel performans ölçütleri	163
Tablo 4. 14 Çeşitli ToC ve ayrılmış şerit senaryoları altında kentsel ölçekte elde edilen performans ölçümleri	166

Tablo D.1 Literatürde yaygın olarak kullanılan otonom araç parametreleri ve parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılan referanslar	268
Tablo D.2 Otonom araç parametreleri	269
Tablo D.3 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 5400 simülasyon adımı SKD	290
Tablo D.4 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 5400 simülasyon adımı SKD_ReRouter	291
Tablo D.5 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 7200 simülasyon adımı SKD	292
Tablo D.6 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 7200 simülasyon adımı SKD_ReRouter	293
Tablo D.7 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 9000 simülasyon adımı SKD	294
Tablo D.8 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 9000 simülasyon adımı SKD_ReRouter	295
Tablo D.9 İzmir kent ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 3600 simülasyon adımı SKD	296
Tablo D.10 İzmir kent ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 5400 simülasyon adımı SKD	297
Tablo D.11 İzmir kent ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 7200 simülasyon adımı SKD	298
Tablo D.12 İzmir kent ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 9000 simülasyon adımı SKD	299

KISALTMALAR

AUS	: Akıllı Ulaşım Sistemleri
NHTSA	: National Highway Traffic Safety Administration
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development
SKHP	: Sürdürülebilir Kent Hareketlilik Planları
KDS	: Karar Destek Sistemleri
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
CAV	: Bağlantılı Otonom Araçlar
VMT	: Araç Başına Kat Edilen Mesafe
P&R	: Park Et ve Devam Et
V2I	: Araçtan Altyapıya
I2V	: Altyapıdan Araçlara
EoT	: Uç Noktadaki Nesneler
ACC	: Adaptif Seyir Sistemi
CACC	: Kooperatif Adaptif Seyir Sistemi
HOV	: Yüksek Yolcu Kapasiteli Araç
UNFCCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
LOS	: Hizmet Seviyesi
SKHG	: Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Göstergeleri
B-AHP	: Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi
AHP	: Analitik Hiyerarşi Prosesi
SUMO	: Simulation of Urban Mobility
IDM	: Intelligent Driver Model
EIDM	: Extending Intelligent Driver Model
API	: Uygulama Programlama Arayüzü
TraCI	: Trafik Kontrol Arayüzü
SKD	: Stokastik Kullanıcı Dengesi
TAZ	: Trafik Analiz Zonları
OSM	: Open Street Map
B/V	: Başlangıç/Varış

İBB	: İzmir Büyükşehir Belediyesi
ORAD	: On-Road Automated Driving
MMPEVEM	: MMP'nin Elektrikli Araç Emisyon Modeli
MMP	: Mechatronics in Mobile Propulsion
SEN	: Senaryo
CO	: Karbonmonoksit
VOC	: Uçucu Organik Bileşenler
SO _x	: Kükürt oksit
NO _x	: Nitrojen oksit
O ₃	: Ozon
PM	: Parçacık Madde
CO ₂	: Karbondioksit
DKD	: Deterministik Kullanıcı Dengesi
SAV	: Paylaşımlı Otonom Araç
UPİ2030	: İzmir Ulaşım Ana Planı
CBB	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CODAS	: COmbinative Distance-based ASsessment
MARCOS	: Measurement Alternatives and Ranking According to Compromise Solution
WASPAS	: Weighted Aggregated Sum Product Assessment
NIS	: Negatif İdeal Çözüm
I	: İdeal Çözüm
AI	: Anti-ideal Çözüm
WSM	: Ağırlıklı Toplam Model
WPM	: Ağırlıklı Çarpım Model
SOV	: Tek Kişilik Taşıt
LEZ	: Düşük Emisyon Bölgeleri
HOT	: Yüksek Doluluk Ücretli Şeritler
ToC	: Transitions of Control
PCE	: Eşdeğer Otomobil Birimi
GLOSA	: Yeşil Işık Optimal Hız Danışmanı
V2X	: Araçtan Her Şeye
SQV	: Ölçeklenebilir Kalite Değeri

GEH	: Geoffrey E. Havers
RRMSE	: Göreceli Kök Ortalama Kare Hatası
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hatası
CBC	: Conjoint Based Choice
V2V	: Araçtan Araca
V2I	: Araçtan Altyapıya
STA	: Static
ACT	: Actuated
DB	: Delay Based
ART_GAW	: Artış Yöntemi Gawron
ART_LOH	: Artış Yöntemi Lohse
ART_LOG	: Artış Yöntemi Logit
SKD_LOG	: Stokastik Kullanıcı Dengesi Logit
ReR	: ReRouter cihazı
TBB	: Türkiye Belediyeler Birliği

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Ulaşım sistemleri, kentlerin yaşam kalitesini, ekonomik gelişimini ve çevresel sürdürülebilirliğini doğrudan etkileyen bir yapıya sahiptir. Mevcut sistemlerin karşılaştığı zorluklar hem altyapının hem de yönetim yaklaşımlarının yeniden ele alınmasını gerektirmektedir. Özellikle kentleşme ve artan nüfus hareketliliği, yeni çözüm yaklaşımlarının ve daha etkili stratejilerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda giriş bölümünde çalışmanın temel unsurları üç başlık altında incelenecektir. İlk olarak, konunun önemi tartışılarak ulaşım sistemlerinin karşı karşıya olduğu zorluklar ve bu zorlukların çözümündeki kritik noktalar ele alınacaktır. Daha sonra, temel amaç ve hedefler sistematik bir şekilde ele alınarak çalışmanın çerçevesi sunulacaktır. Son olarak, araştırmada kullanılan yöntemler ve çalışmanın kapsamı detaylandırılacaktır.

1.1 Konunun Önemi

Teknolojik gelişmelerin ivme kazanması, günlük yaşamımızı hemen her alanda etkilemektedir. Özellikle yapay zekâ, makine öğrenimi, sensör teknolojileri ve otonom sistemler gibi alanlardaki ilerlemeler sayesinde, ulaşım sektöründe köklü değişikliklere yol açabilecek sürücüsüz araçların gelişimine zemin hazırlanmıştır. Sürücüler otonom araçlarla birlikte; uyumlu hız kontrol, şerit koruma, otonom sürüş vb. çeşitli kavramlarla tanışmışlardır. Bu yeni teknolojik imkânlar; sürücü davranışının trafikteki olumsuz etkilerini azaltmak, altyapıyı daha verimli kullanmak, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmek gibi hedefleri gerçekleştirmek için fırsatlar sunmaktadır. Sensör teknolojilerindeki ilerlemeler, yapay zekâ algoritmalarının daha karmaşık hale gelmesi ve güçlü hesaplama yeteneklerinin artması, otonom araçların güvenliğini ve etkinliğini artırarak trafik kazalarını azaltma potansiyeline sahip olmalarıyla bir dönüm noktası yaratmaktadır (Arbib ve Seba, 2017; Litman, 2023). İnsan hatalarının, trafik kazalarının %90 oranından daha fazla sorumlu olduğu göz önünde bulundurulursa, bu gelişmelerin önemi daha da belirgin hale gelmektedir (Gao, Kaas, Mohr ve Wee, 2016; National Highway Traffic Safety Administration [NHTSA], 2008). Otonom araçlar, insan müdahalesine gerek duymadan çevresel verileri algılayıp işleyerek güvenli bir şekilde hareket etme yeteneğine sahiptirler. Bu özellikleri

sayesinde, potansiyel tehlikeli durumları insanlardan daha hızlı algılayıp daha hızlı tepki verebilecekleri düşünülmektedir (Anderson vd., 2014; Crosato vd., 2024; Trauth, Moller ve Betz, 2023; Van Brummelen, O'Brien, Gruyer ve Najjaran, 2018). Böylece, otonom araçların kentsel ve kırsal alanlarda ağırlıklı olarak kullanılmasıyla birlikte, yol ve kavşak kapasitelerinde bir artış beklenmekte ve bu da insan güdümlü araçlarla karşılaştırıldığında trafik sıkışıklığına duyarlılığın azalmasına yol açmaktadır (J. Anderson vd, 2016; Fagnant, Kockelman ve Bansal, 2015). Ek olarak, meydana gelen bu gelişmelerin etkisi sadece araçlarla sınırlı değil; aynı zamanda şehir planlaması, ulaşım politikaları ve güvenlik standartları gibi birçok alana da yayılmaktadır.

Bununla birlikte, farklı otonomluk seviyelerindeki araçlar uzun bir süre geleneksel araçlarla aynı yolu paylaşarak, literatürde karma trafik koşulları olarak adlandırılan durumu ortaya çıkarması beklenmektedir. Sürücüsüz taşıtların yol yapısı ve çevresel durumuyla toplamış olduğu veriler gerçek zamanlı olarak tepki vermesini sağlar. Ancak, insan sürücülerin öngörülemeyen davranışları, karma trafik koşullarında trafik performansı ve sürdürülebilirlik açısından olumsuz sonuçlar doğurma potansiyelini beraberinde getirmektedir. Otonom araçların penetrasyon oranı, yani otonom araçların toplam araç sayısına oranı, bu etkileşimi şekillendiren kritik bir faktördür. Penetrasyon oranı arttıkça otonom ve geleneksel araçlar arasındaki etkileşimin miktarı ve niteliği değişmektedir. Bu değişim, karma trafik koşullarında öngörülemeyen sonuçlara yol açma potansiyelini oluşturur (Al-Turki, Ratrou, Rahman ve Reza, 2021; Yu, Tak, Park ve Yeo, 2019).

Kentsel alanlarda yaşayan insanların karşılaştığı bir dizi ulaşım sorunu, sürdürülebilir kentsel yaşamı olumsuz etkilemektedir. Bunlar arasında trafik kazaları, tıkanıklıklar, gecikmeler, verimsiz toplu taşıma sistemleri, bireysel otomobil sahipliğinin artmasıyla birlikte sera gazı ve hava kirleten emisyonlarda artış, gürültü kirliliğinin artması, gelir dağılımındaki dengesizlik, erişilebilirlik, ödenebilirlik ve enerji verimliliğinin olumsuz etkilenmesi bulunmaktadır. Sürdürülebilir ulaşım planlamaları, ulaşım kararlarının insan hayatını çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlar olmak üzere birçok yönden etkilediğine odaklanarak planlama sürecinde çeşitli hedefler ve göstergeleri dikkate almaktadır. “Yaşanabilirlik” kavramının odak noktası; insanların yaşam kalitesi, güvenlik anlayışı, hizmetlere erişim, hareketlilik, yaşam

standartları gibi bir dizi unsuru incelemesidir. Bu kavram sürdürülebilirlik kavramının bir alt kümesi olarak ifade edilebilir. Bir örnek üzerinden açıklanacak olursa; her iki kavramda kirliliği azaltma hedefleri bulunmakta ancak sürdürülebilirlik genellikle iklim değişikliği emisyonlarına odaklanırken, yaşanabilirlik yerel hava ve gürültü kirliliğine odaklanmaktadır (Litman, 2024; Saeed, Ahmad, Mohey-ud-din, Butt ve Ashraf, 2022).

Kentsel hareketlilik, fiziksel altyapının kullanılarak bir noktadan başka bir noktaya yer değiştirme eylemi olarak tanımlanmaktadır. Kentsel hareketlilikte, araçlar ve bireyler genellikle yolculuklarını daha kısa sürede tamamlayarak zaman kazanmayı hedefler. Bu yolculuklar genellikle özel araçlar veya toplu taşıma araçlarıyla yapılır, ancak bazen yürüme gibi alternatif yöntemler veya daha nadir olarak bisiklet veya elektrikli scooter gibi yeni seçenekler tercih edilebilir (Maltese, Gatta ve Marcucci, 2021; Miskolczi, Földes, Munkácsy ve Jászberényi, 2021). Kentsel hareketlilik, şehirdeki yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyen bir unsurdur. Ulaşım planlamacıları, bir yandan artan araç kullanımını azaltmaya ve karayolu ağlarının doyumluk seviyelerini dengelemeye çabalarırken, aynı zamanda kentsel hareketliliğin gereksinimlerini karşılayacak yeni tasarımlar geliştirmeye çalışmaktadırlar. Bu doğrultuda, insanların ve diğer bileşenlerin hareketlilik ihtiyaçlarını karşılamak Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları (SKHP) adı altında yeni stratejik planlar oluşturulmaktadır (Cleuet ve Jehanno, 2023; Rupprecht Consult vd., 2020).

Uluslararası kalkınma kuruluşlarının bir koalisyonu olan “Herkes için Sürdürülebilir Hareketlilik” tarafından altı ayda bir çevrimiçi güncellenen küresel hareketlilik raporları, ulaşım türlerinin performansını Birleşmiş Milletler ’in sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yönelik ilerlemesini takip etmektedir. Temel olarak bu hedefler dört kategoriye ayrılmıştır. Evrensel erişim, verimlilik, güvenlik ve yeşil hareketlilik konusundaki ilerlemeleri ölçmek için toplamda 40 gösterge belirli aralıklarla takip edilip güncellenmektedir. 180’den fazla ülkenin değerlendirildiği sürdürülebilirlik indeksinde Türkiye 2022 yılı itibarıyla 37. Sırada yer almaktadır (Sum4All, 2022). Ülkenin bu alandaki konumu, sürdürülebilirlik çabalarının etkinliğini değerlendirmek ve iyileştirme alanlarını tanımlamak için kullanılabilecek kapsamlı bir perspektif sunmaktadır. Ülke sıralamamızın geliştirilmesi için

sürdürülebilir ulaşım ve bileşenlerine uygun planlama anlayışlarının geliştirilmesi ve mevcut ulaşım altyapısının daha verimli hale getirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, sadece ulaşımın sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve yenilenebilir enerjiye geçiş gibi faktörler de dikkate alınmalıdır. Bu şekilde, Türkiye'nin sürdürülebilirlik performansı gelecek raporlarda daha olumlu bir seviyeye taşınabilir ve ülkenin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasına katkı sağlanabilir.

Sürdürülebilir ulaşım planlaması, ulaşım sistemlerinin insanları birçok yönden etkilediğini kabul ederek, planlama sürecinde ekonomik, sosyal ve çevresel hedefleri göz önünde bulundurur ve bu hedefler arasında bir denge kurulmasına yardımcı olur. Geleneksel ulaştırma planlama yöntemleri ise genellikle motorlu taşıtların trafik koşullarına odaklanarak hizmet seviyesi (LOS), ortalama trafik hızı, kişi başına yıllık ortalama gecikme süresi ve araç başına düşen kaza oranları gibi göstergeleri dikkate alır. Bu yaklaşım, ulaştırma politikalarının hedeflerini belirli ölçüde kapsasa da yürüme, bisiklet ve toplu taşıma gibi aktif modlar ile zincir seyahatlerin değerlendirilmesini göz ardı eder. Sonuç olarak, motorlu taşımacılığı teşvik eden politika ve projeler öne çıkar, ancak sürdürülebilir ulaştırma hedeflerine ulaşmada yetersiz kalır. Günümüzde yürüme, bisiklet, toplu taşıma, otonom araçlar ve paylaşımlı ulaşım gibi alternatif taşıma modlarının kalitesini değerlendirebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olsa da bu yöntemler ek veri toplama gerektirir ve henüz geniş çapta uygulanmamaktadır (Litman, 2011; Price, Langford ve Higgs, 2023; Zhagyparova, Bader, Kouzayha, Elsayy ve Al-Naffouri, 2023).

Sürdürülebilir ulaşım ile ilgili çalışmalar yaklaşık kırk yıl önce başlatılmış olmasına rağmen (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 1996), günümüz kentlerinde sürdürülebilir hareketliliğin uygulanması ve yönetimiyle ilgili çeşitli zorluklar, ulaşım talebinin artmasından ve trafik sıkışıklığından kaynaklanan çeşitli kentsel ölçekli sorunlardan dolayı devam etmektedir. Karbon emisyonlarının artması, gürültü kirliliğinin yükselmesi, motorlu araçların sayısının artması, trafik sıkışıklığının artması ve trafik güvenliği endişelerinin artması gibi faktörler, sosyal, çevresel ve ekonomik açılardan birçok maliyetin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bu durum, toplumun dokusunu ve çevrenin dengesini olumsuz yönde etkilemiş, ekonomik

sürdürülebilirliği tehlikeye atmış ve gelecek nesillerin yaşam kalitesini tehdit etmiştir (Okraszewska vd., 2018; Velazquez vd., 2015). SKHP, bu sorunları genel olarak kendi çatısı altında kategorize ederken, çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik prensiplerini birleştirerek kentlerin gelecekteki ulaşım ihtiyaçlarına ve kentsel ulaşım sistemlerinin yönetimine bütünsel bir yaklaşım sunar (Polis, 2019; Rupprecht Consult vd., 2020). Bu planların temel amacı, sosyal eşitlik, sağlık, çevre kalitesi ve ekonomik uygulanabilirlik de dahil olmak üzere erişilebilirlik ve yaşam kalitesini yükseltmek, tüm ulaşım türlerinin bütünlük gelişimi ile sürdürülebilir hareketliliğe geçiş olarak açıklanmaktadır (Wefering vd., 2014).

Avrupa ülkelerinin önemli metropolleri geleneksel planlama anlayışını sürdürülebilirlik ve yaşanabilirlik kavramları çerçevesinde geliştirerek yenilikçi anlayışlar geliştirmişlerdir. SKHP bunun en önemlilerinden biridir, ancak ülkemizdeki birçok metropolün ulaşım planı hala klasik dört aşamalı modellerden oluşmakta iken birçok büyükşehir belediyesinin de hala ulaşım planı bulunmamaktadır. 2010 yılı itibarıyla Türkiye’de sürdürülebilir şehirlerin oluşturulması için önemli adımlar atılmaya başlanmıştır. Ulaştırma ve planlama bu anlamda en önemli adımlardan birisini oluşturmaktadır (İlbank, 2022; WEglobal, 2019; Worldwide ve Boğaziçi, 2011). Kentsel hareketliliğin karmaşıklığıyla başa çıkmanın bir yolu olarak daha sürdürülebilir ve bütünlükçü planlama süreçlerine duyulan ihtiyaç artmakta ve sürekli değişen bir kentsel hareketlilik ikliminde kentsel hareketlilik planlamasına yönelik yeni yaklaşımlar hızla ortaya çıkmaktadır. İnsanların yeni ulaşım türlerini (elektrikli skuter, paylaşımlı taşıtlar vb.) benimsemeye istekli olmaları nedeniyle, kentsel hareketlilik yapısı sürekli gelişmekte ve karar vericiler tarafından sunulan desteğin de buna uyum sağlaması gerekmektedir (Hipogrosso, 2022; Mouratidis, 2022). SKHP, şehirlerdeki ve çevrelerindeki insanların ve işletmelerin daha iyi bir yaşam kalitesi için mobilite ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmış stratejik planlar olarak tanımlanmaktadır. Mevcut planlama uygulamaları üzerine kurulan yaklaşım, entegrasyon, katılım ve değerlendirme ilkelerini somut ve belirleyici unsurlar olarak dikkate almaktadır (Polis, 2019; Wefering vd., 2014) Wefering vd., 2013).

Daha fazla erişilebilirlik, tür çeşitliliği, otomobil bağımlılığının azaltılması, enerji tasarrufu ve karbon emisyonlarının azaltılması, dolayısıyla şehirlerin

yaşanabilirliğinin artırılması hedefleri etrafında kentsel hareketliliği organize eden yeni bir anlayış gelişmiştir (Banister, 2008; Canitez, 2020; Litman ve Burwell, 2006; van Wee, 2011). Özellikle Avrupa şehirleri, SKHP paradigması temelinde kentsel hareketlilik sistemlerini yeniden düzenlemeye başlamıştır. Ülkemizde ilk olarak 2015'te Eskişehir'de bu yaklaşımla üretilen SKHP, halen İstanbul'da uygulanmakta olup, İzmir ve Konya gibi büyükşehirlerde de geliştirilerek uygulama aşamasına gelmiştir (SKUP Türkiye, 2023; Türkiye Belediyeler Birliği [TBB], 2019).

Günümüzün hızla büyüyen şehirlerinde, insanların ve araçların karmaşık etkileşiminin merkezinde kentsel hareketlilik yer almaktadır. Şehirlerde sıkça karşılaşılan trafik sıkışıklığı, hava kirliliği, ulaşım erişimindeki eşitsizlikler gibi sorunlar, kentsel hareketliliğin yönetilmesi gereken önemli konuları arasında yer almaktadır. Şehirlerdeki bu sorunlar sadece ulaşımı değil, aynı zamanda çevreyi, sağlığı ve ekonomiyi de etkilemektedir. Trafik sıkışıklığı nedeniyle zaman kaybı yaşanması, iş verimliliğini düşürebilirken, hava kirliliği solunum yolu hastalıklarının artmasına yol açabilir (P. Wang vd., 2023; Yang vd., 2022). Bu nedenle, kentsel hareketliliğin etkin bir şekilde yönetilmesi, şehirlerin sürdürülebilirliği ve insanların yaşam kalitesi için kritik ve araştırılmaya açık bir konu olarak literatürde yer almıştır.

Kent içi ulaşımın daha hızlı, güvenli ve mevcut yol ağlarının etkin bir şekilde kullanılmasında ağ yönetim modelleri önemli bir rol oynamaktadır. Teknolojik uygulamaların trafik ağı yönetim mekanizmalarına entegre edilerek araçların trafikte kalma süreleri en aza indirgenmeye çalışılmaktadır. Kentsel ulaşımın farklı gözlem noktalarına değişik amaçlarla yerleştirilen ölçüm, gözlem ve denetim sistemleri; trafik kontrol merkezlerine sayısal ve görsel bilgilerin aktarılması sağlayarak çeşitli yazılımlar vasıtasıyla analizler yapılabilmekte ve kentsel trafiği etkileyen problemler yönetilebilmektedir.

Kentsel hareketlilik yönetimi, gelişmiş ekonomilerde çeşitli politika ve planlama stratejileriyle desteklenmektedir. Toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi ve teşvik edilmesi, bisiklet yollarının ve yaya yollarının artırılması, araç trafiğini azaltıcı önlemlerin alınması gibi adımlar, kentsel hareketliliği iyileştirmek için atılabilecek adımlardan sadece birkaçıdır. Ayrıca, AUS'nin ve sürdürülebilir ulaşım politikalarının uygulanması da kentsel hareketliliği desteklemek için atılan önemli adımlardandır.

Geleneksel yaklaşımlara göre, kentsel hareketlilik sistemlerinin planlanması ve yönetimi genellikle fiziksel prototipler ve saha deneyleri üzerinden gerçekleştirilirdi. Örnek olarak, bir bisiklet paylaşım istasyonunun küçük bir versiyonu yapılarak o bölgedeki hareketlilik gözlemlenebilir. Ancak, bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte simülasyonlar ve açık kaynak kodlu yazılımlar bu süreci değişime uğratmıştır. Bu durum, verilerin daha hızlı analiz edilebilmesine, çeşitli senaryoların değerlendirilebilmesine ve daha az maliyetle çözümler geliştirilmesine imkân sağlamaktadır. Kentsel hareketlilik simülasyonları, kent ortamlarının farklı ulaşım senaryolarını sanal bir platformda yeniden yaratarak test etme ve analiz etme olanağı sunmaktadır. Aynı zamanda, gelecekteki kentsel dönüşümleri öngörmek için bir araç olarak da kullanılabilir.

1.2 Amaç ve Hedefler

Günümüz şehirlerinde AUS'nin etkin bir şekilde uygulanmasında, ulaşım planlaması ve trafik ağ yönetiminin rolü büyük önem taşımaktadır. Trafik ağ yönetimi, taşıt trafiğini düzenleyerek trafik akımlarının kabul edilebilir düzeylerde seyretmesini sağlayan modeller içerir. Trafik ağındaki iyileştirmeler sonucunda homojen bir trafik akımı sağlanması, tıkanıklıkların önlenmesi, kuyrukların ve şok dalgalarının azaltılması ya da geciktirilmesi gibi hedeflerle mevcut altyapının daha verimli kullanılmasını amaçlanır. Böylece, çevreye duyarlı ve toplumsal faydalara katkı sağlayabilecek bir trafik sistemi geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Ulaşım sistemlerinin geleceğinde, otonom araçların hareketliliği ciddi anlamda artıracığı, ancak bunun sürdürülebilir kentsel hareketliliği olumsuz etkileyebileceği öngörülmektedir. Bu iki eğilimin zıt yönlerde gelişmesi, otonom araçların birbirini engellemeden entegre bir biçimde gelişimini sağlayacak bir mekanizmanın incelenmesi gerekliliğini ortaya koymakta ve bu konu literatürde önemli bir araştırma boşluğu olarak belirlenmiştir. Literatürde, otonom araçların sürdürülebilir kentsel hareketlilik üzerindeki etkileri genellikle tek bir disiplinde ele alınmakta, bu durum ise daha geniş bir çerçevede yapılması gereken analizlerin eksik kalmasına yol açmaktadır. Örneğin, kent planlama perspektifinden bakıldığında, otonom araçların kentsel altyapıya entegrasyonu ve bu süreçte toplu taşıma ile aktif ulaşım modlarının korunması gibi konular ön plandadır. Öte yandan, inşaat mühendisliği açısından ise bu

araçların mevcut ulaşım altyapısı üzerindeki fiziksel etkileri, kapasite artışlarının gerektirdiği yapısal düzenlemeler ve teknolojik adaptasyon süreçleri önceliklidir. Bu tez çalışması, otonom araçların entegrasyonunun yalnızca bir disiplinden değerlendirilemeyeceği ve hem kent planlama hem de ulaşım mühendisliği alanlarının katkısını gerektiren kapsamlı bir yönetim mekanizmasının oluşturulması gerektiği tezini savunmaktadır. Tezde geliştirilmesi planlanan KDS, bu bağlamda disiplinler arası bir boşluğu doldurmayı hedeflemekte ve farklı disiplinlerin bir arada çalışmasıyla ulaşım sistemlerinin hem yüksek hareketlilik hem de sürdürülebilirlik hedeflerini karşılamasını sağlayacak çözümler sunmaktadır. Bu nedenle, tezin araştırma boşluğu, yalnızca otonom araçların sürdürülebilirlik ve hareketlilik üzerindeki etkilerini değil, aynı zamanda bu teknolojinin farklı disiplinlerin perspektifleriyle entegrasyon süreçlerini ele alan bir yaklaşım eksikliğini de ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, tez çalışmasının sunduğu çözüm önerileri hem kent planlamacılar hem de ulaşım planlamacıları için uygulanabilir stratejiler sunmayı hedeflemektedir.

Bu kapsamda tez çalışmasının temel amacı, ulaştırmanın yakın geleceğinde önemli yer tutacak yenilikçi türlerden otonom araçların, sürdürülebilir kentsel hareketlilik prensipleri çerçevesinde ulaşım sistemlerine entegre edilmesini kolaylaştıran bir KDS geliştirilmesidir. Bu çalışmanın gerekçesi, söz konusu teknolojinin plansız ve kontrolsüz bir şekilde entegrasyonunun, sürdürülebilirlik hedefleriyle çelişebileceği riskini en aza indirmek için uygun bir yönetim mekanizmasının geliştirilmesi ihtiyacıdır. Tez, bu bağlamda hem sürdürülebilirlik hem de yüksek hareketlilik gereksinimlerini bir arada karşılayacak stratejiler ve çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Tez çalışmasının temel hipotezi ise *“Otonom araçlar, sınırları belirlenmeden mevcut sisteme entegre edildiğinde, hareketliliğin sürdürülebilir gelişimini azaltır.”* şeklindedir. Bu bağlamda, aşağıda maddeler halinde belirtilmiş araştırma sorularının ortaya çıkmaktadır;

- Karma trafik koşullarında sürdürülebilir kentsel hareketlilik için önleyici tedbirler gerektiren kritik olarak nitelendirilebilecek otomasyon seviyelerinin belirlenmesi,
- Karayolu ağının hangi kesimlerinde otonom araç kullanımına izin verilirse sürdürülebilir hareketliliğin olumlu etkileeneceği,

- Mevcut ulaşım altyapısı üzerinde ağ yönetim uygulamalarının sürdürülebilir hareketliliği nasıl etkilediği,
- Ulaşım planlayıcılar ve karar vericiler otonom araç uygulamalarına nasıl yaklaşması gerektiği,

1.3 Yöntem ve Kapsamı

SKHP çerçevesinde, geleneksel altyapı odaklı planlamadan ziyade şehirlerimiz için yeni sürdürülebilir planlama yaklaşımlarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşımlar, talep yönetimi, ulaşım modlarının çeşitliliği, trafikte geçirilen zaman, sera gazı emisyonları, toplumun farklı kesimlerinin ulaşılabilirlik ve ekonomik ulaşılabilirlik açısından yolculuklardan ne kadar faydalandığı gibi kavramları dikkate almaktadır. Avrupa genelinde çok sayıda şehirde, kentsel yeniden yapılanma SKHP perspektifinden yürütülmekte ve bu da kentsel hareketliliğe ilişkin yeni paradigma oluşumlarını teşvik etmektedir (Diez, Lopez-Lambas, Gonzalo, Rojo ve Garcia-Martinez, 2018; Papaioannou, Politis ve Nikolaidou, 2016; Smeds ve Jones, 2021). Bu yaklaşım, özel araç kullanımının azaltılmasını, ulaşım türlerinin çeşitliliğinin teşvik edilmesini, karbon emisyonlarının düşürülmesini ve enerji tasarrufunun sağlanmasını amaçlamaktadır. Sonuç olarak, kentsel hareketliliği düzenleme açısından, şehirlerin yaşanabilirlik endekslerini artırmaya odaklı yeni bir anlayış gelişmektedir (Rupprecht Consult vd., 2020). Gelişen teknolojilerin ilerlemesiyle birlikte otonom araçlar, orta vadede yaygın kentsel entegrasyonun beklenmesiyle yenilikçi bir ulaşım aracı olarak çok sayıda çalışmaya konu olmuştur (Milakis, Snelder, Van Arem, Van Wee ve De Almeida Correia, 2017). Yenilikçi ulaşım türlerinin mevcut ulaşım sistemlerine uygun şekilde entegre edilmeden kullanılmasının sürdürülebilir hareketlilik hedeflerine zarar verici etkileri olacağı yapılan çalışmalarda belirtilmektedir (Garrow, Roy ve Newman, 2020). Örneğin otonom araçlar, ehliyeti olmayan veya araç kullanmak istemeyen kişilerin özel araçla seyahat etmelerine olanak tanıyacaktır. Kentsel hareketliliğin sürdürülebilir şekilde yönetmek için otonom araçlar gibi yenilikçi türlerin, mevcut kentsel altyapıya ve ulaşım davranışlarına uyum sağlamasının yanı sıra planlama ve KDS'nin geliştirilmesini gerektirir.

Göstergeler çeşitli analiz düzeylerini yansıtarak amaç ve hedeflere yönelik ilerlemeleri değerlendirmek için kullanılan ölçütlerdir. Örneğin, bir planlama sürecinde, taşıtlardan kaynaklanan emisyon miktarlarını ölçmek için belirli bir gösterge belirlenir. Ardından bu emisyon miktarlarını azaltma hedefi belirlenir ve karayolu trafiğindeki değişiklikleri veya tıkanıklığı azaltmaya yönelik çözüm önerileriyle bu göstergenin analiz düzeyine yansıtılması sağlanır. Victoria Ulaştırma Politikası Enstitüsü tarafından (2024) yılında yayınlanan kitaba göre, sürdürülebilir ulaşımın amaçları ve hedefleri temelde dört bölüme ayrılmış olup her biri için farklı performans göstergeleri belirlenmiştir. Nicelleştirmeye uygun bu göstergeler; eğilimleri belirleme, sorunları öngörme, hedefleri belirleme, çözümleri değerlendirme ve ilerlemeyi ölçme gibi çeşitli amaçlar doğrultusunda kullanılabilir. Raporda, sürdürülebilir ulaşım konusunda; 21 ekonomik, 11 sosyal ve 9 çevresel olmak üzere toplamda 41 gösterge tanımlanmıştır. Ulaşım sistemlerinin çeşitliliği, sistem entegrasyonu, ödenebilirlik, kaynak verimliliği, etkin fiyatlandırma ve önceliklendirme, erişilebilirlik, operasyonel verimlilik başlıkları altında detaylandırılan ulaşım plan hedefleri, sürdürülebilirlik hedeflerini destekleyici nitelikte tanımlanmıştır. Hem sürdürülebilirlik hem de yaşanabilirlik göz önünde bulundurulduğunda ortak ulaşım hedefleri; gelişmiş ulaşım sistemleri çeşitliliği, akıllı büyüme ve arazi kullanımı geliştirme, enerji tasarrufu, emisyon azalımı ve etkin ulaşım fiyatlandırması olarak belirlenmiştir. Sürdürülebilirlik ve yaşanabilirlik göstergeleri, bu etkilerin mümkün olduğunca net bir şekilde ölçülmesini gerektirdiğinden, geleneksel ulaşım planlama yaklaşımlarının ötesinde bir planlama olanağı sunmaktadır (Litman, 2024).

Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Göstergeleri (SKHG), kentsel alanların hareketlilik açısından güçlü ve zayıf yönlerini belirlemeye ve iyileştirilmesi gereken alanları tespit etmeye yardımcı olan önemli araçlardır. Bu göstergeler, Avrupa Birliği politikalarında belirlenen hedeflere uygun olarak geliştirilmekte ve SKHP'ler ile atılan adımların görünür hale getirilmesi ve ilerlemelerin kaydedilmesini sağlamaktadır. Avrupa komisyonu tarafından geliştirilen kapsamlı ve güvenilir bir çerçeve olan SKHG, kentsel hareketliliğin sürdürülebilirlik açısından izlenmesini ve değerlendirilmesini sağlar. Bu göstergeler, şehirlerin çevresel sorunlar, nüfus artışı, trafik sıkışıklığı gibi temel zorluklarını sürdürülebilirlik açısından yönetmeye karar

veren karar vericilere rehberlik etmek üzere tasarlanmıştır. SKHG çerçevesinin asıl amacı, kentsel ulaşım politikalarının çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarını dikkate alarak kentsel hareketliliğin etkilerini değerlendirmektir. Ayrıca, göstergeler farklı şehirlerin kentsel hareketlilik politikalarını değerlendirmede, gerekli önlemleri belirlemede ve kıyaslama noktaları oluşturmada etkili bir rol oynamaktadır (Finger ve Serafimova, 2020; Rupperecht Consult, Forschung & Beratung GmbH (Germany) ve European Comission, 2020).

2017-2020 yılları arasında gerçekleştirilen SKHG projesine 46 pilot şehir gönüllü olarak gösterge tablolarını kendi şehirleri için doldurup göndermişlerdir. Bu şehirlerden sağlanan veri tabanları sayesinde SKHG’de tanımlanan göstergelerin değerlendirilmesinde kullanılan sınır değerlerin temeli oluşturulmuştur (Rupperecht Consult, 2020; World Business Council for Sustainable Development, 2020).

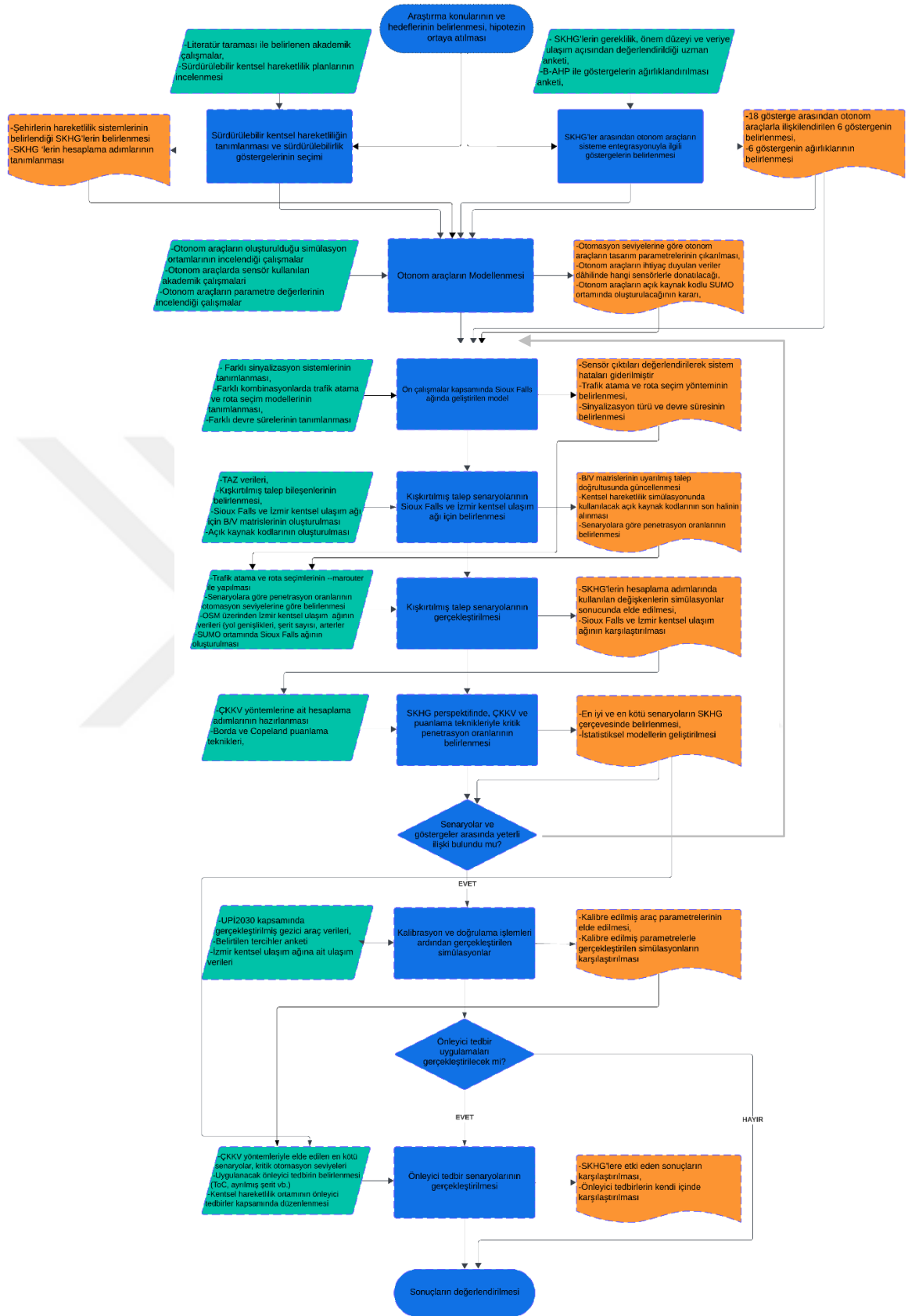
KDS, bir sistem üzerinde karar alma süreçlerini değerlendirme ve geliştirme amacıyla kullanılan yardımcı bilgi sistemlerini temsil eder. Bu sistemler, organizasyonel yönetim, operasyonel fonksiyonlar ve stratejik planlama seviyeleri boyunca faaliyet gösterir böylece bireylerin beklenmedik zorluklara daha etkili kararlar vermelerine yardımcı olur (Kitsios ve Kamariotou, 2017). Ulaşım sistemlerinde bu mekanizmaların kullanılması trafik yönetimi, ulaşım planlaması, rotalama ve optimizasyon gibi alanlarda önemli faydalar sağlayacaktır. Gerçek zamanlı trafik verilerinin analiz edilerek, trafik sıkışıklığının azaltılması, seyahat sürelerinin kısaltılması, yakıt tüketiminin azaltılması, trafik kazalarının önlenmesine ve diğer önemli hedeflerin takibine önemli katkılar sağlayabilir (Schwartzing, Alonso-Mora ve Rus, 2018; Sprenger ve Mönch, 2014). Dolayısıyla, bu mekanizmaların ulaşım sistemleri içinde kullanılması, kentsel merkezlerin daha akıllı ve sürdürülebilir bir ulaşım altyapısına doğru geçişini hızlandırmaya katkı sağlayacağı açıktır.

Karar verme süreci mühendislik başta olmak üzere işletme yönetimi, kamu politikaları ve diğer disiplinlerde temel bir araştırma alanıdır. Çeşitli değişkenlerin dinamik etkileşimi arasında, optimal seçimlerin peşinde genellikle karmaşık bir denge bulunur. Bu denge, sıklıkla belirsizliklerle ve çelişkili gereksinimlerle doludur. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, bu karmaşıklığı yönlendirmek için tasarlanmış kilit bir çerçeve olarak ortaya çıkarır ve karar verme senaryolarının çok

yönlü doğasını ele almak için yapılandırılmış metodolojiler sunar. Literatürün karmaşık sorunlarına akılcı ve etkili çözümler sunmak için ÇKKV, matematiksel modelleme, bilişsel psikoloji ve operasyonel araştırma alanlarının bir sentezi olarak ortaya çıkar. Bu yaklaşım, çatışan hedeflerin, belirsiz sonuçların ve çeşitli paydaşların gereksinimlerinin dengelenmesine yardımcı olur (Morelli, Casagrande ve Forte, 2022; Riandari, Albert ve Rogoff, 2023).

SKHP yaklaşımlarının ulaşım sistemlerinin geleceği üzerindeki etkisi göz önüne alındığında; yerel yönetimler, ulaşım otoriteleri, çevre ve sürdürülebilirlik kurumları, sivil toplum kuruluşları, kullanıcılar ve genel halk dahil olmak üzere çok sayıda karar verici yer almaktadır. SKHP'nin başarılı bir şekilde uygulanması, bu paydaşlar arasında iş birliğini ve ortak kararlar etrafında fikir birliğini gerektirir (Cleuet ve Jehanno, 2023; Rupprecht Consult vd., 2020). Kentsel zorlukların önceliklendirilmesi şehirden şehre farklılık gösterebileceğinden, KDS'nin geliştirilmesinin de bu değişime uyarlanabilir olması gerekmektedir. Örneğin, Avrupa'daki bir şehirde en kritik sürdürülebilirlik sorunu havayı kirleten emisyonlar olabilirken, başka bir şehirde gürültü kirliliği öncelikli sorun olabilir (Chiarini, D'Agostino, Marzano ve Regoli, 2020). Otonom araçlar gibi yeni ulaşım türlerinin mevcut ulaşım sistemleriyle birlikte yaygın şekilde benimsenmesi ve entegrasyonu, çok sayıda faktörü ve hedefi dikkate alan karmaşık bir ÇKKV süreci gerektirir. SKHP'ler çeşitli sosyal, çevresel ve ekonomik kriterleri ve göstergeleri kapsar. Sonuç olarak ÇKKV teknikleri geleceğin ulaşım sistemleri için daha kapsamlı ve dengeli karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Otonom araçların sürdürülebilir kentsel hareketlilik çerçevesinde ulaşım sistemlerine entegrasyonu, bu gelişmeler ışığında önemli fırsatlar sunmaktadır. Bununla birlikte, mevcut altyapının bu yeni ulaşım teknolojilerini güvenli ve verimli bir şekilde destekleyebilmesi için kapsamlı planlama, politika geliştirme ve uygun düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, tez çalışmasında otonom araçların karma trafik koşullarında performanslarını iyileştirecek stratejiler ve sürdürülebilir hareketlilik hedeflerine katkı sağlayacak yenilikçi çözümler ele alınmıştır. Şekil 1.1'de bu tezde izlenen adımları ve yöntemleri özetleyen akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Tezin genel akış şeması

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, otonom araçların kentsel ulaşım sistemleri üzerindeki etkileri detaylı literatür taraması ile incelenmiştir. Özellikle, karma trafik koşullarında geleneksel araçlarla birlikte kullanılan otonom araçların trafik performansı, kısıktırılmış talep yaklaşımı, sürdürülebilir hareketlilik, emisyon azaltımı ve diğer etkileri üzerindeki potansiyel katkıları değerlendirilmiştir. Çalışmalar, otonom araçların yaygınlaşmasının şehir planlaması ve ulaşım ağlarının yönetimi üzerindeki etkilerine odaklanarak, bu teknolojilerin başarılı entegrasyonu için karar destek sistemlerinin geliştirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümü sürdürülebilirlik, sürdürülebilir ulaşım ve sürdürülebilir kentsel hareketlilik konularının detaylı açıklamalarıyla başlamaktadır. Bu alanlardaki planlama süreçleri ve göstergeler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Özellikle, sürdürülebilir ulaşımın çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları incelenmiş ve bu unsurların dengelenmesinin gerekliliği vurgulanmıştır. Ayrıca, sürdürülebilir kentsel hareketliliğin değerlendirilmesinde kullanılan göstergelerin belirlenmesi, ağırlıklandırılması ve bu göstergelerin analiz edilmesi için Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (B-AHP) gibi yöntemlerin kullanımı detaylı olarak yorumlanmıştır. Ayrıca, kentsel hareketlilik ortamlarının oluşturulması üzerine detaylar paylaşılmıştır. Bu bölümde, karma trafik koşulları, araç takip modelleri, şerit değiştirme modelleri ve kentsel ulaşım ağlarının oluşturulması gibi temel konular ele alınmıştır. Bu bölümde, SKHG kapsamında belirlenen ölçütlerin hesaplanması, trafik atama ve rota seçimi gibi temel yaklaşımların metodolojileri üzerinde durulmuştur. Ayrıca, otonom araç uygulamalarının gelecekteki seyahat talebine etkileri ve bu talepleri değerlendirmek için kullanılan belirtilen tercihler anketi yöntemleri açıklanmıştır. Buna ek olarak, çeşitli alternatifleri sürdürülebilirlik kriterlerine göre sıralamak amacıyla ÇKKV tekniklerinin metodolojik yaklaşımları ve bu süreçte geliştirilen karar destek mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde son olarak, artan ulaşım talebinin sürdürülebilir ulaşım sistemlerine etkileri ve bu etkileri hafifletmek için kullanılan yönetim modelleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Özellikle talep ve ağ yönetim stratejileri ve kalibrasyon süreci üzerinde durulmuş, bu süreçte kullanılan yöntemler ile doğrulama aşamaları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümü, ulaşılan sonuçların kapsamlı bir değerlendirmesini ve bu sonuçlara dayalı tartışmaları içermektedir. Bu bölümde, özellikle simülasyon ortamında otonom araçların farklı penetrasyon seviyelerinin trafik performansı, sürdürülebilir hareketlilik ve çevresel etkiler üzerindeki potansiyel katkıları detaylı olarak incelenmiştir. Simülasyonlar hem Sioux Falls teorik ağı hem de İzmir kentsel ulaşım ağı üzerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar üzerinden bir dizi değerlendirme yapılmıştır.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde ise otonom araçların sürdürülebilir kentsel hareketlilik üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmekte ve bu teknolojinin entegrasyonu ile ilgili temel zorluklar ve fırsatlar üzerinde durmaktadır. Bölümde, otonom araçların trafik akımını iyileştirme, emisyonları azaltma ve enerji verimliliği sağlama potansiyeli ortaya konulurken, bu faydaların tam anlamıyla elde edilebilmesi için gerekli altyapı ve politikaların önemine dikkat çekilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında geliştirilen KDS, bu entegrasyon sürecini optimize etmek için kullanılacak önemli bir araç olarak değerlendirilmiştir.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR TARAMASI

Literatür çalışmaları; karma trafik koşullarının incelendiği çalışmalar, kısırtılmış talebin incelendiği çalışmalar, sürdürülebilir ulaşım ve SKHP'nin incelendiği çalışmalar, talep ve ağ yönetim modellerinin incelendiği çalışmalar, KDS ve ÇKKV'nin incelendiği çalışmalar ve literatür çalışmalarının değerlendirilmesi olmak üzere toplamda altı alt başlık altında incelenmiştir.

2.1 Karma Trafik Koşullarının İncelendiği Çalışmalar

Otonom araçların iletişim teknolojilerine bağımlılıkları nedeniyle tepki sürelerinin insan sürücülere kıyasla belirgin şekilde daha kısa olması beklenmektedir (Rydzewski ve Czarnul, 2021). Bu sayede, araçlar birbirlerini daha yakın aralıklarla ve güvenli bir şekilde takip edebilecek, bu da yol kapasitesini artırıp trafik kazalarını önemli ölçüde azaltacaktır (Dixit, Chand ve Nair, 2016). Ancak, tüm araçlar tamamen otonom hale gelene kadar, geleneksel ve otonom araçlar aynı trafik akımında birlikte var olacaktır (Gökaşar ve Arisoy, 2018). Otonom araçların trafikte tam hakimiyetinin 2050'de gerçekleşmesi öngörülse de (Milakis vd., 2015), bazı araştırmacılar bu sürenin 2070'e kadar uzayabileceğini belirtmektedir (Abraham, 2015). Bu nedenle, karma trafik koşullarında sürücü kontrollü ve otonom araçların uzun süre bir arada olması beklenmektedir.

İnsan sürücüler, agresif sürüş, yorgunluk, alkol etkisi, deneyimsizlik ve yaşlılık gibi çeşitli faktörler nedeniyle öngörülemeyen davranışlar sergileyebilir. Otonom araçların algoritmalara dayalı kararları ile insan sürücülerin davranışlarının bir arada bulunduğu karma trafik koşullarında, trafik performansı, güvenlik ve sürdürülebilirlik açısından olumsuz durumların ortaya çıkma potansiyeli yüksektir. Ayrıca, otonom araç teknolojisinin gelişim aşamasında olması ve farklı otomasyon düzeylerinin bulunması, bu etkileşimin karmaşıklığını artırmaktadır.

Otonom araçlardan sürücü hatalarının azaltılması, trafik akımının iyileştirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması gibi faydalar beklenmektedir. Ancak, bu araçların diğer araçlarla nasıl etkileşimde bulunacağı, mevcut trafik ve altyapıya entegrasyonunda büyük bir zorluk oluşturmaktadır. Otonom araçların toplam araç

sayısına oranı olan penetrasyon oranı, bu etkileşimi belirleyen kritik bir faktördür. Penetrasyon oranı arttıkça, otonom ve geleneksel araçlar arasındaki etkileşimin miktarı ve doğası değişir (Bilal ve Giglio, 2023; Kavas-Torris, Cantas, Cime, Aksun-Guvenc ve Guvenc, 2023), bu da karma trafik koşullarında beklenmedik sonuçlara yol açabilir. Örneğin, insan sürücülerin hataları, otonom araçlarla etkileşimde belirsizliklere neden olarak, bu araçların potansiyel faydalarını sınırlayabilir ve trafik akımını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, daha fazla otonom aracın bulunması, seyahat tercihlerini ve ulaşım sistemlerinin kapasitesini etkileyebilir.

Karma trafik koşullarında, belirli bir penetrasyon oranı eşliğinin aşılması durumunda, artan etkileşimler nedeniyle sürdürülebilirlik göstergelerinin olumsuz etkilenebileceği tahmin edilmektedir. Bu noktada, ulaşım yönetim sistemleri ve penetrasyon oranlarına dayalı kararlar önem kazanır. Penetrasyon oranı belirli bir eşığe ulaştığında, talep kısıtlamaları veya alternatif ulaşım çözümlerinin teşviki gibi önlemler, ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirliğini korumak için hayati hale gelir. Bu kararların ulaşım planlamasına ve altyapı düzenlemelerine entegre edilmesiyle, otonom araçların faydaları maksimize edilirken olumsuz etkileri en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

Literatürde incelenen otonom araç çalışmalarında ağırlıklı olarak karma trafik koşulları üzerinde beklenen etkiler farklı penetrasyon oranlarında incelenmiştir. Shladover, Su ve Lu (2012), Adaptif Seyir Sistemi (ACC) ve Kooperatif Adaptif Seyir Sistemi (CACC) özelliklerine sahip araçların penetrasyon değişkenliğinin otoyol kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. CACC'nin %40 penetrasyon oranı ve üzerindeki durumlarda kapasiteyi büyük ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu penetrasyon seviyesine ulaşıldığında, yüksek dinamik tepki yetenekleri nedeniyle daha kısa boşluklarda güvenle takip edilebileceğine dair bir ortamın oluştuğu ifade edilmiştir. Tüm araçların CACC ile donatıldığı durumda maksimum şerit kapasitesinin 4000 araç/saat seviyelerinde olduğu gösterilmiştir. Arnaout ve Arnaout (2014), düşük hacimli trafik senaryolarında farklı penetrasyon oranlarının etkisi olmadığını göstermiştir. Ancak, %40'ın üzerindeki yüksek hacimli senaryolarda, trafik performansında ciddi iyileşmeler kaydedilmiştir. Bununla birlikte, yakın gelecekte yüksek penetrasyon seviyelerine ulaşmanın mümkün olmayabileceği ve bu nedenle,

CACC'ye sahip araçların düşük penetrasyon seviyelerinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için Yüksek Yolcu Kapasiteli Araç (HOV) gibi özel şerit uygulamalarının incelenmesi gerektiği belirtilmiştir.

Tran ve Bae (2020), çeşitli otomasyon seviyelerine sahip otonom araçların karma trafikte sinyalizasyon olmayan bir kavşakta liderlik etme yeteneklerini değerlendiren pekiştirmeli öğrenme tabanlı bir model sunmuşlardır. Simülasyon ortamında tam otonom araç senaryolarını sürücülü araç senaryolarıyla karşılaştırdıklarında; ortalama hız değerlerinde 1,38 kat, gecikme sürelerinde ise 2,55 kat iyileşme olduğunu göstermişlerdir.

Conlon ve Lin (2019), hava kirliliği emisyonlarını tahmin etmek için %0 ile %100 arasında değişen otonom araç penetrasyon senaryolarını analiz etmişlerdir. İnsan sürücülü araçlar ile otonom araçlar arasındaki karmaşık etkileşim durumu incelenmiştir. Karma trafik koşullarındaki heterojenliğin CO₂ salımı üzerindeki etkisi, Newton tabanlı sera gazı emisyon modeli kullanılarak incelenmiştir. Çalışmalarında, tercih edilen emisyon modelinin elektrikli araçları içermemesi ve ulaşım ağı üzerinde seyahat taleplerinin sabit olacağı varsayımlarıyla, tam otomasyon durumunda CO₂ emisyonlarında %4'lük bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca, otonom araçların sağlayacağı faydaların tam olarak değerlendirilebilmesi için disiplinler arası çalışmaların önemini ve gerekliliğini vurgulamışlardır.

Talebpour ve Mahmassani (2016), otonom araçların ve Bağlantılı Otonom Araçlar (CAV)'ın verimliliği ve trafik akımının temel diyagramları üzerindeki etkilerini simülasyon ortamında incelemişlerdir. Otonom araçların isteğe bağlı olarak ve şerit sınırlamasıyla kullanıldığı iki durum araştırılmıştır. İki şeritli bir yol kesimi ve dört şeritli bir otoyol kesiminde; otonom araçların isteğe bağlı kullanım durumunda performansının arttığı, sınırlandırmanın olduğu kesimde ise genel performansının azaldığı sonucuna varmışlardır. Ek olarak, CAV'lerin %20-%30'un üzerindeki penetrasyon oranlarında kapasite değerlerinin belirgin şekilde olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, diğer akademik çalışmalar da CAV penetrasyon oranının artmasıyla yol kapasitesinin arttığını göstermiş ve %20-%30 penetrasyon oranının kritik bir eşik olduğunu ortaya koymuştur, bu oranın üzerindeki penetrasyon

oranlarında yol kapasitesinin kademeli olarak arttığı belirlenmiştir (Mena-Oreja, Gozalvez ve Sepulcre, 2018; Ye ve Yamamoto, 2018a).

2.2 Kısıktılmış Talebin İncelendiği Çalışmalar

Otonom araç uygulamalarının yaygınlaşacağı gelecek koşullarda, sürüşü önemli ölçüde daha ucuz ve kolay hale getiren dolayısıyla daha fazla sürüşü teşvik eden avantajların ortaya çıkma potansiyeli vardır. Şehir sakinlerinin daha sürdürülebilir ancak daha az çekici ulaşım modları (örneğin toplu taşıma ve aktif ulaşım modları) yerine özel araçları tercih edebilecekleri ve bunun dolaylı olarak sürdürülebilir hareketlilik üzerinde olumsuz etkiye yol açabileceği fikri literatürde farklı çalışmalarda incelenmiştir. Naumov, Keith ve Fine (2020), uygun politikalar olmadan otonom araçların kontrolsüz genişlemesinin, seyahat talebini artırarak ve potansiyel olarak toplu taşıma sistemlerine zarar vererek sürdürülebilir kentsel hareketliliğin ilerlemesini engelleyebileceği konusunu incelemiştir. Bu kapsamda tüm özel araçlara Araç Başına Kat Edilen Mesafe (VMT) açısından özel bir vergi politikası uygulanmasını ve elde edilen gelirin toplu taşıma bakım ve hizmetlerine tahsis edilmesini önermişlerdir. Lehtonen vd., (2021), üçüncü seviye otonom araçların toplu taşıma ve aktif seyahat gibi sürdürülebilir modlardan kişisel otonom araçlara geçişe yol açabileceğini ve potansiyel olarak sürdürülebilir hareketliliğin ilerlemesini engelleyebileceğini öne sürmüştür. Soteropoulos, Berger ve Mitteregger (2021), otonom araçların kontrolsüz büyümesinin, trafik hacmini artırarak ve özellikle yoğun kentsel alanlarda potansiyel olarak yaya ve bisikletli ihtiyaçlarını engelleyerek sürdürülebilir hareketliliği engelleyebileceğini iddia etmiştir. Ayrıca yaşlılar, çocuklar, engelliler, ehliyeti olmayanlar veya araç kullanmamayı tercih edenler gibi yeni kullanıcı gruplarının otonom araçlar tarafından teşvik edilmesi, sürdürülebilir mobilitede beklenmedik zorluklar yaratabilecektir. Bu durum, daha sürdürülebilir olduğu düşünülen ulaşım modlarına olan ilgiyi azaltabilir ve dolayısıyla bu modların uzun vadeli gelişimini olumsuz yönde etkileyebilir (Anderson vd., 2016; Fagnant ve Kockelman, 2015; Krueger, Rashidi ve Rose, 2016).

Yeni ulaşım projelerinin inşası veya mevcut altyapının iyileştirilmesi ve benzeri uygulamalar beklenen faydanın ötesinde sonuçlar doğurabilmektedir. Kısıktılmış talep kavramı bu sonuçlardan biridir ve ulaşım sistemlerindeki yeniliklerin,

iyileştirmelerin veya yatırımların aslında amaçlanandan daha büyük bir seyahat talebini tetikleyebileceğini ve dolayısıyla potansiyel olarak trafik sıkışıklığını artırabileceğini göstermektedir (Hymel, Small ve Dender, 2010). Literatürdeki araştırmalar, otonom araçların gelecekteki ulaşım sistemlerine getireceği avantajların yanı sıra, genel seyahat maliyetlerinde önemli bir düşüş öngörüsünü destekliyor ve ayrıca ek seyahat talebini artırma potansiyeline işaret ediyor (Gucwa, 2014; Hills, 1996). Otonom araçların gelecek koşullarında yaygınlaşmasıyla birlikte, kentsel alanlarda yeni banliyöleşme ve kentsel yayılma eğilimlerinin hızlanması mümkündür (Llorca, Moreno, Ammar ve Moeckel, 2022). Araştırmalar ayrıca otonom araçların geniş çapta benimsendiği bir gelecekte erişilebilirlik seviyelerinin artacağını ve bunun da ortaya çıkan fırsatlardan yararlanan bireyler veya işletmeler tarafından tetiklenen ek seyahat talebine yol açacağını göstermektedir (Hills, 1996; Meyer, Becker, Bösch ve Axhausen, 2017; Weis, 2012).

Otonom araçların seyahat talebi açısından ilk etkileri, yüksek güvenli (Seviye 4-5) olduğu ve sürücü gerektirmediği durumlarda araç sürmeye gerek duymama özellikleri yaşlı, çocuk, engelli, ehliyetsiz yetişkin gibi belirli kişilerin araç kullanma olanağına sahip olmasını sağlayacaktır (Harper, Mangones, Hendrickson ve Samaras, 2015; Lutin, Kornhauser ve MASCE, 2013). Bu durum, bu grupların daha önce kısıtlı veya hiç olmayan bir şekilde ulaşım imkanlarına erişimini artıracaktır ve toplumda daha geniş bir kentsel hareketlilik oluşmasını sağlama potansiyeli oluşturmaktadır. Meyer vd., (2017) İsviçre'de yaş gruplarına göre modal dağılımları incelemiştir ve yeni kullanıcı grupları olarak nitelendirilen bu yolculukların geleneksel araç moduna dönüştürüleceği varsayımıyla, otonom araç modlarını kullanan yeni kullanıcı gruplarının oranında %16'lık bir artış olacağını varsaymışlardır.

İkinci olarak, otonom araçlar yeni kullanıcı gruplarını çekmesinin yanı sıra çeşitli nedenlerle de boş yolculuklar yapacaktır. Bu boş yolculuklar arasında, bir aracın hane halkı üyeleri arasında tekrarlı kullanımına bağlı seyahatler (W. Zhang, Guhathakurta ve Khalil, 2018), aracın bir mobilite hizmet robotu olarak kullanıldığı boş yolculuklar (örneğin internetten satın alınan yiyecekleri almak için), park yeri arayan otonom taşıtlar ve boş dönüş yolculukları yer almaktadır. Araç paylaşım sistemlerinin giderek daha artacağını ve dolaylı olarak boş yolculukların ulaşım sistemleri üzerinde etkin bir

yol oynayacağı görüşünü savunan akademik çalışmalar da literatürde bulunmaktadır. Henao ve Marshall (2019), araç paylaşım hizmetlerinde araçların boş bir şekilde geri dönmesi veya hedeflerine ulaştıktan sonra boş bir şekilde başka bir yolcu aramak için dolaşması sonucu oluşan boş yolculukların %40'ı aşabileceğini raporlamıştır. Başka çalışmalarda, boş seyahatlerden kaynaklanan trafik sıkışıklığı üzerinde otonom araçların etkisinin önemli olduğunu dolayısıyla ulaşım ve arazi kullanımı etkilerinin birlikte modellenmesini içeren bütüncül bir yaklaşımların dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır (Martínez-Díaz, Soriguera ve Pérez, 2019; Milakis vd., 2017).

Son olarak, paylaşımlı otonom araçların (SAV) yaygınlaşmasıyla birlikte, mali yük ve özel araç sahibi olmanın getirdiği zorluklar olmadan, düşük fiyatlarla kapıdan kapıya seyahat etme imkânı ortaya çıkıyor (Johnson, 2015). Bu durum, ulaşımın daha erişilebilir ve ekonomik hale gelmesini sağlayarak, toplumun geniş kesimlerine hizmet etme potansiyelini beraberinde getirmektedir. Ayrıca, 4. ve 5. Seviye otonom araçlarda sürüş sırasında insan müdahalesine gerek olmadığı için, yolculuklar sırasında yolcuların farklı aktivitelere odaklanmasına olanak tanınmaktadır. Örneğin, insanlar sürüş sırasında işlerini halledebilir, kitap okuyabilir, çevrimiçi çalışabilir veya eğlenebilir, böylece seyahat sürecini daha verimli hale getirebilirler. Bu durum, Llorca vd., (2022) tarafından da vurgulandığı gibi, toplu taşıma kullanımını azalabilir ve seyahat alışkanlıklarında modal değişiklikleri meydana gelebilir. Malokin, Circella ve Mokhtarian (2019) ve Singleton (2019), seyahat ederken diğer aktiviteleri yapma olasılığının, ulaşım modu seçim kararlarını değiştirebileceğini ve araç kullanmaya göre daha düşük bir zamanın değeri ile sonuçlanabileceğini belirtmişlerdir. Malokin vd., (2019), toplu taşıma kullanıcıları için yapılan bir tercih araştırmasına dayanarak, otonom araç yolcuları için zamanın değerini %40 daha düşük olacağını bulmuşlardır. Benzer şekilde, Moore, Lavieri, Dias ve Bhat (2020), anket katılımcılarının iş ve ev konumlarını değiştirmeye istekli olup olmadıklarına bağlı olarak, zamanın değerinin %30 ila %68 arasında azalabileceğini tahmin etmişlerdir. Llorca vd., (2022), otonom araçların ağırlıklı olarak ulaşım ağında yer aldığı gelecek senaryolarında toplu taşımanın payının %25'ten %6'ya düşeceğini öngörmüşlerdir.

Bahsedilen üç etkinin dışında, kısırlanmış talep fikri aynı zamanda birkaç küçük faktörü de kapsamaktadır. Birincisi, otonom araçların gece yolculuğunu daha güvenli

ve keyifli hale getirmesiyle, kentsel ortamlarda gece aktivitelerinin artmasını teşvik edeceği gibi, kırsal veya şehirlerarası yolculuklarda da gece seyahatini popüler hale getireceği düşünülüyor (Cohen ve Hopkins, 2019; Gurumurthy ve Kockelman, 2020) İkinci olarak, paylaşımlı taksiler (örn. Uber, Cabify veya Bolt) ve paylaşımlı araçlar (örn. Car2Go veya ZipCar) geleneksel araçlara, toplu taşımaya ve taksilere karşı pazar paylarını güçlendirmeye devam ediyor (Enoch, 2015). Sonuç olarak, otonom araçların yaygın olarak benimsenmesiyle birlikte Waymo ve Wayve gibi ulaşım sistemlerinde SAV'lerin bireysel kullanımında da bir artış beklenmektedir (Fagnant vd., 2015; Harb, Stathopoulos, Shiftan ve Walker, 2021; Martinez ve Crist, 2015).

2.3 Sürdürülebilir Ulaşım ve SKHP'nin İncelendiği Çalışmalar

Otonom araçların sürdürülebilir ulaşım ve SKHP ile uyumlu bir biçimde ele alınması, araştırmacılar tarafından büyük ölçüde teşvik edilmektedir. Bandeira vd. (2021), CAV'lerin çevresel etkilerini inceleyerek bu araçların davranışlarının, geleneksel araçların farklı yollar ve penetrasyon oranları üzerindeki çevresel performansını nasıl değiştirdiğini analiz etmişlerdir. Bulgular, yol türüne ve penetrasyon oranlarına bağlı olarak CAV'lerin genel ağ üzerinde %18 ila %4 arasında CO₂ azalımı ve %13 ila %23 NO_x azalımı sağlayabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca, nüfus yoğunluğunun yüksek veya kirli bölgeler açısından riskli noktalarda CAV'lerin, belirli çevresel sorunları en aza indirmek için etkili bir yol olduğunu ifade etmişlerdir. Campisi, Severino, Al - rashid ve Pau (2021), otonom araçların şehirlerin gelecekteki sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarında oynayabileceği kilit rolü ayrıntılı bir şekilde tartışmışlardır. Otonom araçların şehir hava kalitesinin artırılması, yol kapasitelerinin genişletilmesi, trafik sıkışıklığının azaltılması ve yaşlı ve engellilere daha iyi erişim sağlanmasını içeren çeşitli SKHP hedeflerine katkıda bulunabileceğini ifade etmişlerdir. Staricco, Rappazzo, Scudellari ve Vitale Brovarone (2019), otonom araçların ulaşım sistemlerine entegrasyonuna yönelik kısa ve orta vadeli önlemleri değerlendirmiştir. Otonom araçların dolaşımı ve park etme ile ilgili farklı düzenleyici yaklaşımların İtalya'nın Torino kentinde sürdürülebilirlik ve yaşam kalitesi üzerindeki etkisini araştıran üç farklı vizyon sunmuşlardır. Buna göre, şehirdeki hareketliliğin sonuçlarına dayalı olarak farklı olası gelecek durumlarını değerlendirerek, mevcut SKHP politikalarıyla uyumlu olan Vizyon 1; geniş bir serbestlik ve otonom araçlara

tam güveni yansıtan Vizyon 2; otonom araçların dolaşımını şehir genelinde ciddi kısıtlamalarla düzenleyerek bireysel otonom araç kullanımını önemli ölçüde sınırlayan, paylaşımlı araç hizmetlerini teşvik eden ve yayaların ile bisikletlilerin hareket alanını artırarak şehir yaşam kalitesine katkı sağlamayı amaçlayan Vizyon 3 şeklinde üç farklı vizyon incelenmiştir. Bu analizlerle, şehirde hangi bölgelerde hangi düzenlemelerin yapılması gerektiği konusu araştırılmıştır. Başka bir çalışmada Alazzawi vd. (2018), Milano'daki paylaşımlı ve otonom taksi hizmetlerinin potansiyel etkilerini SKHP bağlamında detaylı bir şekilde ele almıştır. Çalışmada, bu hizmetlerin 9500 robot taksi aracılığıyla sunulmasıyla, trafik sıkışıklığının azaltılabileceğini ve emisyonların düşürülebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, insan tarafından işletilen paylaşımlı taksilerin akıllı fiyatlandırma stratejileriyle birlikte, düzenli trafik akımını destekleyebileceği ve bu tip hareketliliği teşvik edebileceği üzerinde durulmuştur.

Otonom araçların mikro ve makro trafik koşulları altında literatürdeki güncel çalışmalar incelendiğinde; dönel kavşakların güvenlik seviyeleri (Tibljša, Giuffrè, Surdonja ve Trubia, 2018), kirletici emisyon seviyelerinin belirlenmesi (Mattas vd., 2018; Rafael vd., 2020; Silva, Cordera, González-González ve Nogués, 2022; Stogios, Kasraian, Roorda ve Hatzopoulou, 2019), sera gazı etkileri (Makridis, Mattas, Mogno, Ciuffo ve Fontaras, 2020; A. Wang vd, 2018), kuyruk uzunluğu ve gecikme analizi (Rezaei ve Caulfield, 2021) ve farklı koşullar altında araç takip modellerinin analizi (Awal, Mushfiq ve Islam, 2022; Zeidler, Buck, Kautzsch, Vortisch ve Weyland, 2019) gibi çeşitli konularda araştırmalar gerçekleştirildiği görülmekte ve bu alandaki araştırmalar hız kesmeden devam etmektedir.

Acheampong, Cugurullo, Gueriau ve Dusparic (2021), çeşitli kentsel ulaşım seçeneklerine ilişkin kullanıcı tercihlerini ve ortaya çıkan politika zorluklarını analiz etmişlerdir. Araştırma kapsamında, otonom araçların tür seçimi ve potansiyel sürdürülebilirlik etkileri aracılığıyla seyahat davranışlarının nasıl şekillenebileceği incelenmiştir. Bu çalışma, otonom araçların seyahat maliyetlerini düşürme ve daha güvenli, daha konforlu ve sürdürülebilir bir ulaşım biçimi sunma potansiyelini öne çıkarmaktadır. Dlugosch, Brandt ve Neumann (2022), paylaşımlı ve otonom elektrikli araçların sürdürülebilir kentsel hareketlilik üzerindeki etkisini değerlendirmek için analitik ve simülasyon yöntemlerine odaklanmışlardır. Bulguları, bu yenilikçi ulaşım

türlerinin mevcut hizmet seviyesi gereksinimlerini karşılayarak sürdürülebilir ve sıfır emisyonlu kentsel hareketliliği mümkün kılabilceğini göstermiştir. Ancak, bu katkının devamını sağlamak için ulaşım politikaları ve düzenlemelerinin gerekli olduğunu belirtmekle birlikte, bu teknolojilerin ulaşım sistemleriyle entegrasyonunun önemini vurgulamışlardır.

Uzun vadeli perspektifte, otonom araçların elektrifikasyon trendiyle uyumlu olarak elektrikli olması beklenmektedir (Kapustin ve Grushevenko, 2020; L. Wang, Nian, Li ve Yuan, 2021). Elektrikli araçların, içten yanmalı motorlara göre daha az ya da hiç sera gazı emisyonu üretmedikleri belirtilmektedir (Karki, Phuyal, Tuladhar, Basnet ve Shrestha, 2020; Mo vd., 2022) ve daha yüksek tork üretebildikleri, bunun da daha iyi ivmelenme ve performans sağladığı ifade edilmektedir (Skippon, 2014; Xu, Zhu, Guo, Li ve Wang, 2009). Ayrıca, daha az hareketli parça içerdikleri için bakım maliyetlerinin genellikle daha düşük olduğu ve yakıt tüketimlerinin daha az olduğu belirtilmektedir (Barkenbus, 2020; Pielecha, Skobieć ve Kurtyka, 2020). Bu avantajlar, özellikle çevresel etkiler açısından önemli değişikliklere yol açabilir. Dolayısıyla, otonom araçların yaygınlaşmasıyla ortaya çıkabilecek potansiyel çevresel etkiler, pek çok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Le Hong ve Zimmerman (2021), 2030 ve 2040 yılları boyunca CAV'lerin yayılımından kaynaklanan emisyon değişikliklerini araştırmışlardır. En iyi koşulda, otonom araçların 2040 yılında otonom olmayan koşullara kıyasla sera gazı emisyonlarını %20 oranında azaltabileceğini öngörmüştür. Kısırtılmış seyahat talebi bileşenleriyle incelendiği en kötü durumda ise sera gazlarının salımında %6'lık bir düşüş gözlemlenmiştir. Benzer şekilde F. Liu, Zhao, Liu ve Hao (2019), iyimser senaryolar altında uzun vadede yüksek otonom araç penetrasyon oranlarının sera gazı emisyonlarında net bir azalmaya yol açacağını ifade etmişlerdir. Greenblatt ve Shaheen (2015), ABD'deki sürücüsüz taksilerin sera gazı azaltma faydaları üzerine yaptığı çalışmada 2030 yılına kadar araç-km başına emisyonlarda %87-%94 oranında bir azalmaya neden olacağını iddia etmişlerdir.

2.4 Talep ve Ağ Yönetim Modellerinin İncelendiği Çalışmalar

Trafik ağ yönetim modellerinde kentsel verimliliğin ve performansın değerlendirildiği ve trafik ağ sisteminin farklı yönlerinin incelendiği planlama modelleri bulunmaktadır. Bu modellemeler kentsel benzetim programlarında

yapılabildiği gibi çeşitli teorik hesaplamalar yoluyla da yapılabilmektedir. Etmen tabanlı benzetim modelleri, seyahat talebi ve trafik ağ operasyonları hesaplamalarında kullanılmaktadır. Arterde meydana gelebilecek kazalar gibi çeşitli ağ olayları üzerinde sistemin potansiyeli incelenilmektedir (Auld, Sokolov ve Stephens, 2017).

Ajan bazlı modelleme metodolojisi doğal ve sosyal dünyada karşılaştığımız birçok olayı derinlemesine anlamamıza ve çözümler üretmemize yardımcı olabilecek bir yaklaşımdır. Basit olarak bir ajan belirli özelliklere ve eylemlere sahip özerk bir hesaplamalı birey veya nesnedir. Ajan bazlı modelleme, bir olgunun ajanlar ve aralarındaki etkileşimleri açısından modellendiği bir yöntemdir. Ajanlar bir sistemin herhangi bir ögesini temsil edebilir. Örneğin bir bireysel taşıt ajanı 40 km/h “hız” değerinde ve belirli güzergâhta ilerleyen “yön” özelliklerine sahip olabilir. Temsil edilen ajanların özelliklerine ek olarak davranış kuralları da olabilir, diğer taşıtlarla çarpışmama kuralı veya belirli takip mesafesinde izleme davranışları uygulanabilir. Sistemin işleyişinde evrensel bir saat kabulü yapılmıştır ve bu saat işlediğinde tüm ajanlar kendi kurallarını sergilerler. Kuralların koşulları yerine getirilirse farklı davranışlar gösterebilirler (Wilensky ve William Rand, 2015). Ajan tabanlı modellemenin amacı hedef bir davranış oluşturacak ajanlar ve kurallar oluşturmaktır. Simülasyon modelleri çalıştırıldığında ajanlar birbiri ile etkileşim halini gerçekleştirip modelin genel davranışını ortaya kendiliğinden çıkarmaktadır. Kısaca, mikro düzeyde modellenen yaklaşımlardan makro düzeyde sonuçlar elde edilebilmektedir.

Ajan tabanlı modellerin denklem tabanlı diğer modellerden ayıran en önemli özelliklerinden biri heterojen olabilme yeteneğidir. Denklem tabanlı modeller tipik olarak homojen varsayımlar altında işlemlerini gerçekleştirirken ajan tabanlı modellerde etmenler heterojen rol oynayabilmektedir. Heterojen ajanlara sahip olmak, ajanlar arasındaki etkileşimin oldukça karmaşık olmasına izin verir. Bu ajanların birbirleriyle nasıl etkileşimde bulunduğunu açıklamak için yalnızca birkaç basit kural belirlenebilir. Ajan tabanlı modellerin bir diğer avantajı, bireysel davranışlardan hangi küresel modelin sonuçlandığını bilmeye gerek yoktur. Denklem tabanlı yaklaşımlarda sistemin davranışını bütün olarak iyi anlamamız ve ardından hipotezini toplam çıktıya göre test etmek gerekir. Bunun aksine ajan tabanlı yaklaşımlar basit kurallar yazılmasına olanak tanıyarak modeli çalıştırır ve toplu sonucu gözlemler. Ek olarak,

ajan tabanlı modeller tarafından üretilen sonuçlar daha ayrıntılıdır. Aynı anda hem bireysel hem de toplu düzeyde ayrıntı sağlanabilmektedir. Çoğu modelleme metodolojisi yukarıdan-aşağıya tündengelim yaklaşımlar kullanarak nedenselliği ortaya koymaya çalışırken ajan tabanlı modeller aşağıdan-yukarıya tümevarım yaklaşımlar yoluyla nedenselliğin model sonuçları üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olmasına izin verir (Railsback ve Volker Grimm, 2019; Wilensky ve William Rand, 2015).

De Souza, Verbas ve Auld (2019), POLARIS ajan tabanlı simülasyon aracı ile bir trafik ağındaki makroskobik ve mikroskobik özelliklerin bir arada değerlendirildiği bir model ortaya koymuştur. Aktiviteye dayalı seyahat modeline dayanarak ağ üzerinde tüm çeşitli rotalar, sinyalizasyon kavşakları, katılım kontrolleri, birbiriyle iletişime girebilen AUS bileşenleri gibi bağımsız ajanlar kullanılarak 7000 bağlantı ve 2500 düğüm sisteminde 350 bin yolculuk simüle edilip modellenmiştir. Analiz sonuçlarında modelin doğruluğu, ayrıntı düzeyi ve hesaplama verimlilikleri gösterilmiştir.

Auld vd., (2017), CAV'lerin potansiyel etkilerini incelemek için seyahat davranışını ve trafik akımını birlikte değerlendiren mezoskobik ölçekte simülasyonlar hazırlamışlardır. Chicago metropol bölgesindeki verilerle hazırlanan hareketlilik modelleri ile, ulaşım ağına belirli yüzdelerde CAV penetrasyonunun sistem ağ performansına etkileri incelenmiştir. Adaptif hızları sabitlenmiş araçların ulaşım ağı üzerinde katar oluşturmalarının yol segmentlerinde kapasitenin dinamik olarak ayarlanmasına izin verebileceği belirtilmiştir.

Auld vd., (2016), çoklu ajan tabanlı modelleme ortamı POLARIS kullanarak 27 milyon seyahat yapan ve 10 milyon kişiyi içeren metropoliten bir bölgenin ulaşım ağını AUS altyapısının faydasını analiz etmek için kullanmışlardır. Bölgedeki tarihsel verilerden kaza olaylarını içeren durumlar senaryo edilmiştir. Sisteme yerleştirilen 20 değişken mesaj işaretinin trafiğe etkisi, bağlantı kapasiteleri ve serbest akım hızları modellenmiştir.

HOV şeritleri, araç paylaşımı ve transit yolcular için daha hızlı ve daha güvenilir bir seyahat seçeneği sunmayı amaçlayan, genellikle iki veya daha fazla olmak üzere birden fazla yolcuya sahip araçlar için ayrılmış belirlenmiş otoyol şeritleridir. Bu

yaklaşım, trafik sıkışıklığını azaltma, seyahat süresi güvenilirliğini artırma ve araç paylaşımı ile toplu taşıma kullanımını teşvik ederek çevresel faydaları artırma potansiyeli sayesinde küresel olarak birçok kentsel alanda popülerlik kazanmıştır. Özellikle tek kişilik taşıtların (SOV) neden olduğu artan otoyol trafiği ve buna bağlı tıkanıklık sorunlarına yanıt olarak geliştirilmiştir. HOV stratejisi, yoldaki araç sayısını azaltmak, sıkışıklığı hafifletmek ve araç paylaşımı ile toplu taşıma yolcuları için daha güvenilir seyahat sağlamak üzere tasarlanmıştır (Jang, Chung, Ragland ve Chan, 2009; Kwon ve Varaiya, 2008). Aynı zamanda araç emisyonlarını azaltmayı ve toplu taşımayı teşvik ederek çevresel avantajlar elde etmeyi amaçlar. Genel olarak, bu stratejinin özellikle yoğun saatlerde yollardaki SOV sayısını azaltmada etkili olduğu kanıtlanmıştır. Nüfus artışının ulaşım hizmetlerine olan talebi artırdığı, trafik sıkışıklığını yoğunlaştırdığı ve seyahat sürelerini uzattığı kentsel ortamlarda, HOV şeritleri gelecekteki ulaşım zorluklarına yönelik önemli bir çözüm olarak umut vaat etmektedir. HOV şeritleri, yollardaki SOV varlığını azaltarak ve araç paylaşımı ve toplu taşıma kullanıcıları için daha hızlı ve daha güvenilir bir seyahat seçeneği sunarak bu sorunların azaltılmasına yardımcı olabilir. HOV stratejisinin başarısı, şerit tasarımı, sıkı uygulama, alternatif ulaşımın mevcudiyeti ve bölgenin sosyoekonomik özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. HOV şeritleri fiziksel olarak normal trafikten ayrılmalı, iyi işaretlenmeli ve HOV kullanıcıları için kolayca erişilebilir olmalıdır. Ek olarak, kurallara uyulmasını sağlamak ve bu şeritleri yalnızca uygun araçların kullanılmasını temin etmek için sıkı yaptırım önlemleri gereklidir.

Ayrılmış şeritler, otonom araçlar ve CAV'ler için, trafik yönetiminde önemli bir strateji olarak öne çıkmakta ve karma trafik akımlarında hem verimliliği artırma potansiyeli hem de yeni zorluklar getirme riski taşımaktadır. Bu strateji, otonom araçların karma trafikten ayrılmasına olanak tanıyarak trafik akımında şerit düzeyinde homojenlik sağlar. CAV'ler için ayrılmış şeritler sağlamak, düşük penetrasyon oranlarına sahip heterojen trafik akımlarında bile bu araçların potansiyellerini daha hızlı bir şekilde ortaya koymalarını mümkün kılar. Ye ve Yamamoto (2018b), CAV yaygınlığı ve CAV performansını, ayrılmış şeritlerin etkinliğini etkileyen önemli faktörler olarak belirlemiştir. Ayrıca, yüksek penetrasyon oranlarında, ayrılmış şeritlerin yüksek seyahat talebi koşullarında genel verimliliği olumlu etkilediğini göstermişlerdir. Araştırmalar, ayrılmış şeritlerin daha yüksek pazar penetrasyonuyla,

daha hızlı ve güvenilir bir seyahat alternatifi sunarak toplam seyahat süresini azalttığını öne sürmektedir. Pourgholamali, Miralinaghi, Ha, E. Seilabi ve Labi (2023), iki seviyeli bir optimizasyon problemi kapsamında otonom araçların sosyal, ekonomik ve çevresel faktörler açısından sürdürülebilir dağılımını incelemiştir. Önerdikleri çerçevede, sürdürülebilirlik endekslerini dikkate alarak otonom araçlar için ayrılmış şeritlerin yerlerini, sayılarını ve fiyatlandırma politikalarını formüle etmişlerdir. Literatür bulguları genel olarak, özel araçlar için ayrılmış şeritlerin sürdürülebilir planlamasının, kentsel ulaşım sistemlerini hem daha verimli hem de daha adil hale getirebileceğini öne sürmektedir.

Transitions of Control (ToC) olarak bilinen yaklaşım literatürde detaylı olarak incelenmiştir. Otonom araçların bir dizi nedenden dolayı devre dışı bırakılması gereken durumlar (sistem hataları, belirsiz veya eksik şerit işaretleri, karmaşık trafik durumları vb.) göz önüne alınarak otonom sürüşten manuel sürüşe geçiş durumunun kontrollü bir şekilde olması durumu TransAID projesi kapsamında incelenmiştir. Bu kontrollü geçişlerin, düzensiz araç davranışları ve potansiyel en düşük risk manevraları (MRM) nedeniyle trafik operasyonları üzerinde bir etki yapması beklenmektedir (Lücken vd., 2019). Bu durumun, karma trafik koşulları nedeniyle araç etkileşimlerinin yoğun olduğu bir ortamda daha da şiddetleneceği düşünülmektedir. Gelecekteki otonom araçlar, bağlantı olmaksızın diğer yol kullanıcılarının niyetlerini ve yaklaşan eylemlerini tahmin etme yeteneğine sahip olacak şekilde tasarlanmış olsa da (Bansal, Krizhevsky ve Ogale, 2018) , sürücüsüz teknoloji geliştiricileri, araç otomasyonunun sınır durumlarıyla başa çıkamadığı için insan sürücünün sorumluluklarından tamamen muaf tutulmasının uzun bir süre mümkün olmayacağını öngörmektedir. Bu nedenle, ToC'nin yol trafiği üzerindeki etkilerinin incelenmesi büyük öneme sahiptir.

Q. Liu, Liu, Cai ve Chen (2022), manuel sürüş yapan araçlar, tamamen otonom sürüş araçları ve koşullu otonom sürüş araçları içeren karma trafik ortamlarında, farklı kontrol devralma sürelerinin trafik akımı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. Çalışma, çeşitli devralma sürelerinin trafik akım dengesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, 7 saniyelik orta düzey bir devralma süresinin, sürücülerin çevredeki trafik koşullarını yeterince

gözlemlmelerine olanak tanıdığı, bu sayede devralma geçişlerinin olumsuz etkilerini azaltarak trafik güvenliğini artırdığı saptanmıştır. Araştırma ayrıca, koşullu otonom sürürlü araçlar ve tamamen otonom sürürlü araçların penetrasyon oranlarının veya sadece koşullu otonom sürürlü olanların penetrasyon oranının artırılmasının, trafik akım stabilitesini genişlettiğini göstermiştir. Her iki araç türünün de penetrasyon oranlarının artmasıyla stabilite iyileşmeleri daha da artmaktadır. Noulis (2020) ise, eğer sürücü belirli bir süre içinde kontrolü geri alamazsa, ToC cihazının güvenliği sağlamak için bir MRM başlattığını belirtmiştir. Bu çalışma, insan müdahalesi gereksinimini geciktirerek ve trafik akımını optimize ederek, karma otomasyon senaryolarında DRL algoritmalarının trafik yönetimini iyileştirme potansiyelini vurgulamaktadır.

2.5 KDS ve ÇKKV'nin İncelendiğı Çalışmalar

Otonom araçların dâhil olduğı koşullarda; ulaşım sistemlerinin performansı, sürdürülebilirlik, kentsel hareketlilik ve karar destek mekanizmaları gibi konuların incelenmesi hem karar vericiler hem de araştırmacılar için özel bir ilgi alanı haline gelmiştir. Otonom araçların ulaşım sistemlerine potansiyel etkileri, geliştirilen modeller aracılığıyla simülasyon ortamlarında test edilebilir. Hungness ve Bridgelall (2020), geliştirdikleri modellerin sonuçlarını değerlendirmek için parametre değişikliklerini ve simülasyon senaryolarını kullanmışlardır. Madison ve Gainesville şehir modellerinde yapılan simülasyonlarda, CAV'nin penetrasyon seviyelerindeki artışın VMT ve ortalama sıkışıklık hızında bir yükselmeye neden olduğunu açıkça ortaya koymuşlardır. Bu durumun, CAV'lerin daha yüksek kapasitelere ve daha akıcı trafik akımlarına katkıda bulunduğundan yoğun trafikte bile araçların daha hızlı hareket etmesini sağlaması ile ilgili olduğı belirtilmiştir.

Otonom araçlar, trafiğin olumsuz etkilerini azaltmak, altyapıyı daha verimli kullanmak, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmek gibi amaçlar doğrultusunda mevcut ulaşım sistemleri ile bütünleştirilmeden kullanılmaları halinde sürdürülebilir hareketlilik hedeflerine olumsuz etki edecektir (Garrow vd., 2020). Yakın gelecekte, otonom araçların ulaştırma sektörüne daha etkin bir şekilde entegre edilmesi beklenmektedir. Ancak, bu dönüşümün başarılı bir şekilde gerçekleşmesi, KDS'nin oynadığı rolle kritik bir şekilde bağlantılıdır. Otonom araçlarla ilgili verileri dikkatlice

analiz ederek ve trafik yönetimi, güvenlik protokolleri ve sürdürülebilirlik önlemleri gibi kritik faktörlerin dikkate alınması, KDS karar alma süreçlerini önemli ölçüde iyileştirme potansiyeline sahiptir.

Çeşitli araştırmalar, literatürde farklı KDS uygulamalarının otonom araçların güvenli karar alma süreçlerini iyileştirmede ve trafik yönetimi verimliliğini artırmada kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Buzachis vd. (2020), Araçtan Altyapıya (V2I) ve Altyapıdan Araçlara (I2V) iletişimine dayanan çoklu ajan otonom kavşak yönetimi sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, Uç Noktadaki Nesneler (EoT) ve blok zincir teknolojilerini kullanarak kavşaklardan geçen araçların etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanımıştır. Kavşaklardan geçen otonom araçların sayılarını değiştirerek çeşitli deneyler gerçekleştirip sistemin performansını doğrulamışlardır. Önerdikleri sistemin, otonom araç karar mekanizmalarının daha güvenli bir şekilde işlenmesine katkıda bulunacağını ifade etmişlerdir.

Makarova vd. (2020), ulaşım sistemlerinin optimize edilmesi için bilgi ve gelişmiş analiz yöntemlerine dayalı bir ortak bilgi platformu önererek genel verimliliği ve güvenilirliği artırmayı amaçlamışlardır. Bu platform, ulaşım sisteminin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak için gerekli bilgileri ve ileri analiz tekniklerini içermektedir. Bunlar arasında, veri toplama, depolama, veri madenciliği, karar verme ve bir kullanıcı arayüzü için geliştirilmiş modüller bulunmaktadır. Verilerin işlenmesi için çevrimiçi analitik işleme sistemi tabanlı araçlar kullanmışlardır. Büyük verilerin akıllı ve çok boyutlu analizlerine dayanarak, sorunların zamanında ve etkili bir şekilde çözümünün sağlanmasına katkıda bulunmuşlardır. Otonom sürüşte güvenli sollama konusunda, Yifei Wang ve Yin (2021), araç-yol koordinasyonunu içeren bir sollama yöntemi sunmuşlardır. Yol kenarı üniteleri, araçlardan hız ve konum bilgilerini alınarak ve otonom araçlarla iki yönlü iletişim kurarak sollamanın gerçekleştirilmesini sağlayan bir mekanizma önermişlerdir. Bu yaklaşım, akıllı araçlar tarafından gerçekleştirilen sollama manevralarının güvenliğini artırmayı hedeflemektedir.

Ilgın Gökaşar, Simic, Deveci ve Senapati (2023) çalışmalarında, karma trafik koşullarında otoyol olay yönetimini iyileştirmede otonom araçların potansiyelini ön plana çıkarmıştır. Bu çalışmada, karmaşık ÇKKV problemleri için özel olarak tasarlanmış T2NN-Entropy-COPRAS modelini tanıtmışlardır. Bu model, otoyol olay

yönetimi için değerlendirme kriterlerinin nesnel önemini vurgulamak için kullanılmıştır. Geliştirilen model, otonom araçların davranışlarına karar verirken alternatifleri sıralamak amacıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırma bulgularına göre, karma trafikteki bir olay sırasında ve sonrasında sorunları çözmek için en etkili alternatifin bir olay yönetimi algoritması kullanmak olduğu ortaya konmuştur.

Davidich vd. (2022), insan odaklı kentsel ulaşım sistemlerinde yolcu ve trafik akımlarının modellenmesi için bir KDS geliştirmişlerdir. Bu sistem, kentsel hizmet sağlayıcılarının çalışanlarının seyahat dağılım fonksiyonlarını modelleyerek, trafik akımlarını tahmin etmekte ve şehir içi yolculuk kararlarını sosyal, ekonomik ve demografik değişkenlere dayandırmaktadır. Çalışmada, çalışanların kişisel özelliklerinin ve seyahat davranışlarının ulaşım akımları üzerindeki etkisi özellikle vurgulanmıştır. Bu gibi KDS mekanizmaları, bireysel yolcu tercihlerinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine ve buna göre ulaşım politikalarının şekillendirilmesine olanak tanımaktadır.

2.6 Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Son yıllarda otonom araçlar ve AUS üzerine yapılan çalışmalar, sürdürülebilir kentsel hareketliliğe katkı sağlayabilecek birçok teknolojik çözüm ortaya koymuştur. Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı, otonom araçların mevcut ulaşım sistemlerine entegrasyonu sırasında karşılaşılabilecek potansiyel sorunlara yönelik sınırlı bir inceleme sunmaktadır. Özellikle, karma trafik koşullarında otonom araçların geleneksel sürücülü araçlarla olan etkileşimleri, çeşitli belirsizlikler ve sürdürülebilir hareketlilik hedeflerine yönelik potansiyel engeller yaratmaktadır. Literatürde otonom araç penetrasyon oranları ve bu oranların kentsel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerine dair çalışmalar bulunsa da bu çalışmalar çoğunlukla kısa vadeli simülasyon sonuçlarına odaklanmakta ve uzun vadeli etkiler yeterince analiz edilmemektedir. Ayrıca, SKHG bağlamında KDS kullanımı, sınırlı sayıda çalışmada ele alınmış olup, bu sistemlerin otonom araçlar için optimize edilmesi üzerinde yeterince durulmamıştır. Örneğin, karar destek mekanizmalarının karma trafik koşullarında otonom araçların performansını artırma, çevresel etkileri minimize etme ve toplumsal kabulü destekleme potansiyeli büyük ölçüde araştırma alanında boşluk olarak

kalmaktadır. Bu kapsamda, AUS içinde otonom araçların yönetimi ve entegrasyonu için uygulanabilir yönetim modellerinin geliştirilmesi konusunda eksiklikler göze çarpmaktadır.

Otonom araçların şehir planlama süreçlerine entegrasyonu üzerine yapılan araştırmalar genellikle teknolojik altyapıya odaklanmakta, ancak şehir sakinlerinin ve diğer paydaşların bu yeniliklere karşı tutumları ve olası toplumsal etkiler göz ardı edilmektedir. Bu bağlamda, otonom araçların toplumsal kabul edilebilirliği ve bu araçların yarattığı algının daha derinlemesine incelenmesi gerekmektedir. Aynı şekilde, sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu kentsel hareketlilik planlarının otonom araçların yaygınlaşmasına etkisi ve bu planların otonom araçlar için nasıl optimize edilebileceği konusu da yeterince araştırılmamış alanlar arasında yer almaktadır. Sonuç olarak, literatürdeki bu boşlukları doldurmak amacıyla, otonom araçların karma trafik koşullarında etkili bir şekilde çalışabilmesi için önleyici tedbirlerin geliştirilmesi, sürdürülebilir kentsel hareketliliğe katkı sağlayacak karar destek sistemlerinin oluşturulması ve bu teknolojilerin toplumsal kabulü üzerine çalışmalar yapılması gereklidir. Çalışma kapsamında geliştirilen tahmin modeli, otonom araç penetrasyon oranlarının kritik seviyelere ulaşmadan önce önleyici tedbirler almayı mümkün kılacak ve bu da sürdürülebilirlik açısından etkileşimlerin korunmasına yardımcı olacaktır. Bu özelliği açısından, literatürdeki diğer akademik çalışmalara kıyasla özgün değerini korumaktadır. Bu eksikliklerin giderilmesi, otonom araçların gelecekteki sürdürülebilir kentsel ulaşım sistemlerine entegrasyonunu daha verimli ve uyumlu hale getirecektir.

Literatür taramasında karma trafik koşullarının incelendiği bölümde, genellikle farklı penetrasyon oranlarının beklenen etkileri üzerinde yapılan araştırmalardan detaylı olarak bahsedilmiştir. Bu çalışmalar, genellikle belirli bir penetrasyon oranının altında, incelenen göstergelere bağlı olarak performans göstergelerinde belirgin bir iyileşme olmadığını öne sürmektedir. Penetrasyon oranları arttıkça ve aynı zamanda otonomluk seviyeleri değiştikçe, otonom araçlar ile geleneksel araçlar arasındaki etkileşimin miktarı ve niteliği değişmektedir. Kritik penetrasyon seviyesi, incelenen performans göstergesine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin, kapasite değerlerinin incelendiği bir kesimde kritik oran %20-30 üzerinde iyileşme

gösterebilirken, çevresel sürdürülebilirliğin incelendiği bir çalışmada kritik penetrasyon oranı %50 seviyelerinde çıkabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, penetrasyon oranlarındaki değişimlerin ve araçlar arasındaki etkileşimlerin SKHG açısından incelenmesi literatürde bir boşluk olarak tespit edilmiş ve katkı verilmesi gereken alanlardan biri olarak belirlenmiştir. İlerleyen bölümlerde açıklanacak olan modeller aracılığıyla otonom araçların penetrasyon oranları kritik seviyelere ulaşmadan önleyici tedbirlerin alınması ve böylece sürdürülebilir ulaşım açısından olumsuz etkileşimlerin azaltılması mümkün olacaktır.

Ulaşım ağ modellerinin değerlendirilmesinde dikkate alınacak yeni algoritmalar ve yaklaşımlar sayesinde tanımlanmış probleme daha iyi ve farklı çözüm önerileri getirilmesi planlanmaktadır. Geliştirilen ağ modellerinin işlevselliği kentsel bölgelerde seçilen ana arterlerde uygulanacaktır. Böylece geliştirilecek sistemin trafik kaynaklı çevresel etkilerin azaltılmasına ve kısıtlı kaynakların etkin kullanılmasına katkı sağlaması beklenmektedir. Uluslararası anlamda trafik ağ yönetim sistemlerinin geliştirilmesinde çok sayıda kapsamlı araştırmalar yapılmasına rağmen ülkemizde bu konuda sınırlı sayıda temel çalışmalar bulunmaktadır. Kentsel ulaşım sistemlerinde ağ yönetim modellerinin uyarlanabilir yeni yaklaşımlarla güçlendirilmesi çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

Yenilikçi türler, tüm dünyada kullanıcılar ve uygulamacılar tarafından heyecanla karşılanırken, bu türlerin sürdürülebilir planlama hedeflerine ters düşebileceği fikri bazı çalışmalarda oluşsa da bunun nasıl önlenebileceği ile ilgili araştırmalar yok denecek kadar azdır. Çalışma, bu konuyu otonom araçlar örneği üzerinden ele alarak planlamada karar destek modeli geliştirmesi bakımından incelemeler yapılacaktır. Geliştirilen ağ yönetim modellerinin trafik akımlarının optimizasyonunda kullanılması sonucunda daha verimli sonuçlar elde edilmesi planlanmaktadır. Böylece trafikte meydana gelen tıkanıkların ve kuyruklanmaların azaltılması, yolculuk sürelerinin kısılması ve ekonomik verimliliğin artması gibi toplumsal faydalarının olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte çevreye daha duyarlı, emniyetli, enerji ve zaman kayıplarından tasarruf sağlayan ve imkânlara kolay erişebilen bir toplum bilinci ortaya çıkacaktır.

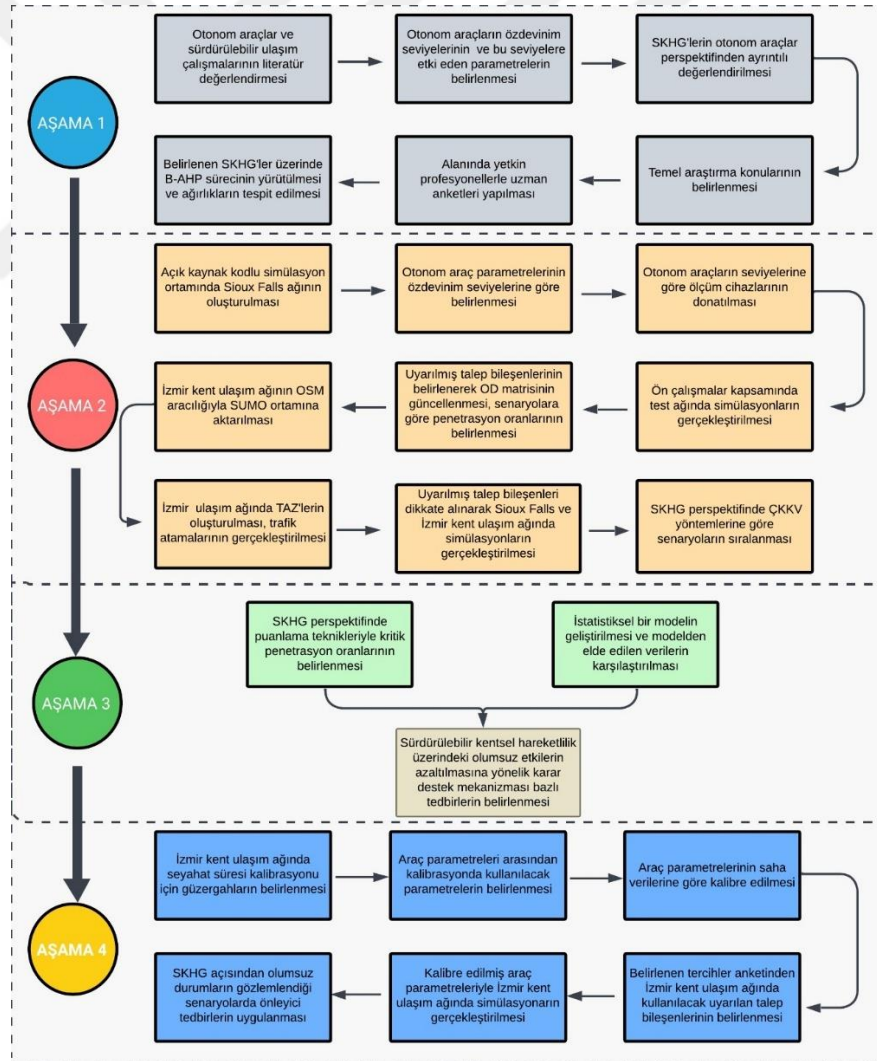
BÖLÜM ÜÇ

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal ve yöntem bölümü; tez organizasyonu, sürdürülebilir ulaşım ve sürdürülebilir kentsel hareketlilik, kentsel hareketlilik ortamının oluşturulması, kısıktırılmış talep ve kentsel ulaşım verileri, kalibrasyon ve doğrulama, trafik atama ve rota seçimi, ÇKKV ve KDS ve ağ yönetim modelleri başlıkları altında incelenmiştir.

3.1 Tez Organizasyonu

Otonom araç uygulamalarının ulaşım sistemine entegrasyonu konusunun incelendiği tez çalışması Şekil 3. 1’de verildiği üzere temelde dört aşamada organize edilmiştir.



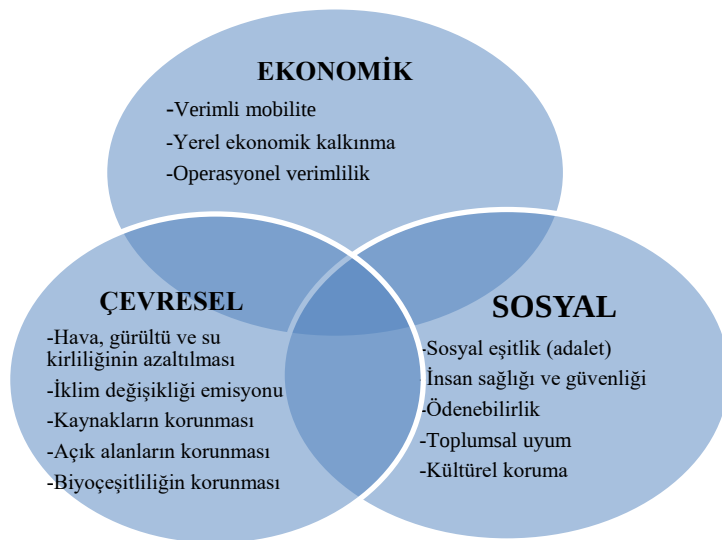
Şekil 3. 1 Tez organizasyon şeması

İlk aşamada, otonom araçların sürdürülebilirlik açısından incelenmesi, özdevinim seviyelerinin belirlenmesi konuları ile başlangıç yapılmıştır. Daha sonra Avrupa komisyonu tarafından belirlenen SKHG'lerin kullanılmasına karar verilmiştir ve bu kapsamda uzman anketleri gerçekleştirilerek göstergelerin seçimi ve önem ağırlıkları belirlenmiştir. İkinci aşamada, SUMO ortamında yapılan işlemlerle devam edilmiştir. Sioux Falls teorik ağı oluşturulduktan sonra otonom araç parametreleri literatürdeki benzer çalışmalara dayanarak tespit edilmiştir ve gerçek modellere yakın analiz yapılabilmesi için otonom araçların cihazlarla donatılması konularıyla ilgilenilmiştir. Ön çalışmalar kapsamında test ağına simülasyonlar gerçekleştirilerek sistemin performansı test edilmiştir. Daha sonra kısıktılmış talep bileşenleri belirlenerek test ağına kullanılan Başlangıç-Varış (B/V) matrisi güncellenmiştir. Aynı zaman aralığında, 'OpenStreetMap' (OSM) kullanılarak İzmir kent ulaşım ağı kentsel hareketlilik ortamına aktarılmıştır ve İzmir ulaşım ana planından trafik analiz bölgeleri/zonları (TAZ) verileri çekilerek kullanılacak hale getirilmiştir. İkinci aşamanın son adımında, kısıktılmış talep bileşenleri dikkate alınarak Sioux Falls ve İzmir kent ulaşım ağına simülasyonlar gerçekleştirilmiştir ve SKHG perspektifinde ÇKKV yöntemlerine göre senaryoların sıralamaları yapılmıştır. Üçüncü aşamada, SKHG perspektifinde puanlama teknikleriyle kritik penetrasyon oranları belirlenmiştir. Aynı zamanda istatistiksel bir model geliştirilerek modelden elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılmıştır. Böylece penetrasyon oranlarının değişimine bağlı olarak sürdürülebilir kentsel hareketlilik üzerinde meydana gelen olumsuz etkilerin tespit edilmesine olanak tanıyan karar destek mekanizması geliştirilmiştir. Bu aşamada eş zamanlı olarak, meydana gelen olumsuz durumların azaltılması için talep yönetim stratejileri ve ağ yönetim modelleri incelenmiştir. Tez çalışmalarının son aşamasında, İzmir ulaşım ana planı kapsamında gerçekleştirilmiş belirli güzergahlardaki seyahat süresi verileri alınıp bunların simülasyon ortamıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Otonom araç parametreleri bu kapsamda saha verileriyle kalibre edilmiştir. Aynı zamanda, belirtilen tercihler anketinden elde edilen değerlendirmeler ışığında İzmir kent ulaşım ağına gerçekleştirilecek simülasyon için kısıktılmış talep bileşenleri belirlenmiştir. Kalibre edilmiş otonom araç parametreleriyle ve İzmir ilinin gelecekteki otonom araç talebini yansıtan verilere dayalı olarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Son olarak, sürdürülebilir kentsel

hareketlilik açısından en kötü senaryolar üzerinde daha önceden belirlenmiş olan ağ yönetim modelleri ve talep yönetim stratejileri uygulanarak önleyici tedbirler simülasyon ortamında test edilmiştir.

3.2 Sürdürülebilir Ulaşım ve Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik

Sürdürülebilirlik, yaşanabilirlik, sürdürülebilir kalkınma ve sürdürülebilir ulaşım literatürde çeşitli tanımlara sahiptir. Bazı tanımlar yalnızca kirliliğin azaltılması olarak çevresel sürdürülebilirlik açısından dar bir çerçeveden açıklansa da ekonomik ve sosyal hedefleri de içerecek şekilde daha kapsamlı tanımlanmalıdır. Genel anlamda, bugünün dünyası ve gelecek nesillerin temel ihtiyaçları göz önünde bulundurularak sürdürülebilirliğin çevresel, ekonomik ve sosyal etmenlerinin bütünleşik bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Çevresel, ekonomik ve sosyal unsurlar başlı başına farklı konular olarak görünse de birbirleriyle yakından ilişkilidir. Örneğin, kentsel alanlardaki gürültü kirliliği çevresel bir sorun olarak görünse de bu sorun insanların sağlığını ve uyku kalitesini etkileyebildiğinden dolayı insanların yaşam kalitesini düşürecek ve sosyal etkileşimlerini olumsuz yönde etkileyecektir. Dolayısıyla, çevresel bir sorun gibi görünen gürültü kirliliği aslında ekonomik ve sosyal boyutlarıyla da yakından ilişkilidir (Berglund, Lindvall ve Schwela, 1999; World Health Organization [WHO], 2011). Sürdürülebilirliğin uzun vadeli etkilerini içeren ekonomik, çevresel ve sosyal anlamda temel unsurları Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 Sürdürülebilirlik temel unsurları (Litman, 2024)

Şekil 3.2'de yer alan ekonomik, çevresel ve sosyal unsurların kesişimi, sürdürülebilir ulaşımı temsil etmektedir. Bu kesişim, ulaşım sistemlerinin yalnızca ekonomik verimlilik sağlamasını değil, aynı zamanda çevresel etkileri en aza indirirken sosyal faydaları da maksimize etmesi gerektiği yaklaşımını yansıtmaktadır. Diğer bir ifadeyle, sürdürülebilir ulaşım, ekonomik açıdan erişilebilir, çevre dostu ve sosyal açıdan kapsayıcı bir sistemi ifade eder. Bu alan, üç unsurun dengeli bir şekilde bir araya gelerek uzun vadeli bir ulaşım sistemi hedefini gerçekleştirdiği ideal durumu temsil etmektedir. Şekil 3.2'de belirtilen temel unsurların birbirleriyle etkileşimlerini dikkate aldığımızda, en uygun çözüm önerilerinin geliştirilmesi ihtiyacının ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 3.2'de ki kesişim alanları, sürdürülebilirlik açısından unsurların birbiriyle uyumlu olduğu durumları ifade etmektedir. Örneğin, hava ve gürültü kirliliğini azaltmaya yönelik stratejiler, ekonomik unsurları olumsuz etkileyebilirken, trafikte talep yönetimi stratejileri ekonomik ve çevresel unsurları olumlu bir şekilde etkileyebilir. Ulaşım sistemlerine entegre edilmesi planlanan yenilikçi türler ve bu türlerin ortaya çıkarabileceği sorunların, sürdürülebilirlik açısından birbirleriyle etkileşimlerinin değerlendirilerek, ulaşım ağlarının optimizasyonu için karar destek mekanizmalarının geliştirilmesi önemli bir araştırma ve geliştirme alanı olduğu kabul edilebilir.

Ulaşım sistemlerinin yakın geleceğinde önemli yer tutması beklenen, yenilikçi ulaşım türlerinden biri olan otonom araçların, sürdürülebilir kentsel hareketlilik prensiplerine uygun olarak planlanmasına katkı sağlanması tez çalışmasının temel amaçlarından birisidir. Bu amaca ulaşmak için SKHP'nin temel ölçütleri izlenerek otonom araçların ulaşım sistemlerine ne şekilde uyarlandığında daha sürdürülebilir sonuçlar verdiğinin modellenmesi ve çeşitli senaryo sonuçlarına göre ulaşım planlamacılar için bir karar destek modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda aşağıda listelenen aşamaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir;

- Otonom araçların sürdürülebilirliğe etkisini en iyi şekilde ifade edebilen performans ölçütlerinin belirlenmesi ve amaca uygun olarak geliştirilmesi,
- Yolcuların otonom araçlara olan ilgi ve eğilimi ile sürdürülebilirlik ölçütlerine ilişkin algısının çevrimiçi tasarlanacak bir belirtilen tercihler anketi yardımıyla ortaya konulması,

- Yenilikçi türlerin mevcut ulaşım sistemi ile en sürdürülebilir şekilde bütünleştirilmesi için senaryolar geliştirilmesi, bunlara dayalı karar destek şemaları oluşturulması,

Şehirlerin hareketlilik sistemlerinin değerlendirilmesi ve yeni hareketlilik uygulamaları ve politikalarının takibinin kapsamlı ve pratik bir şekilde izlenmesi için Avrupa Komisyonu tarafından 2020 yılında bir yönerge yayınlanmıştır. Şehirlerin hareketlilik sistemlerinin standart bir değerlendirme prosedürü kapsamında değerlendirilmesi ve yeni hareketlilik uygulamalarının veya politikalarının verimliliklerini ölçmelerini destekleyen kapsamlı bir dizi güvenilir göstergeler yayınlamıştır (European Commission, 2022). Buna göre 13 temel gösterge, 5 temel olmayan olmak üzere toplam 18 gösterge tanımlanmıştır (Chatziioannou vd., 2023; Litman, 2024). Tablo 3.1’de SKHG’lerin iki farklı sütunda sınıflandırması görülmektedir.

Tablo 3.1 Sürdürülebilir kentsel hareketlilik göstergeleri

	Temel Göstergeler		Temel Olmayan Göstergeler
1	En yoksul kesim için toplu taşımanın ödenebilirliği	14	Kamusal alanların kalitesi
2	Hareket engelli gruplar için toplu taşımanın erişilebilirliği	15	Kentsel fonksiyonel çeşitlilik
3	Hava kirleten emisyonlar	16	Seyahat süresi
4	Gürültünün önlenmesi	17	Hareket alanı kullanımı
5	Yol ölümleri	18	Güvenlik
6	Toplu taşıma hizmetlerine erişim		
7	Sera gazı emisyonları		
8	Tıkanıklık ve gecikmeler		
9	Enerji verimliliği		
10	Aktif hareketlilik imkânı		
11	Çok modlu entegrasyon		
12	Toplu taşıma memnuniyeti		
13	Aktif modlar için trafik güvenliği		

Tez çalışmaları kapsamında, SKHG’nin uygulanma adımı Avrupa komisyonu tarafından düzenlenen çevrimiçi eğitimlerden faydalanılmıştır. Sürdürülebilirlik ölçütleri veri türü, verinin kaynağı, veriye erişilebilirlik, simülasyona entegre edilebilme yeteneği, simülasyon çıktısı olarak temin edilebilme durumu ve literatürde kullanılma sıklıkları bakımından değerlendirilmiştir. Otonom araç uygulamalarının günümüzde yaygın olarak kullanımının olmamasından dolayı bu yenilikçi türün entegrasyonu sürecinde sürdürülebilirliğe etkisi simülasyon ortamında incelenmiştir.

Bu sebeple, geliştirilecek senaryoların simülasyon ortamında analizleri gerçekleştirileceğinden, kullanılacak ölçütlerin simülasyona entegrasyonu ve/veya ölçüt verisinin simülasyon çıktısı olarak temini temel kriterler olmaktadır. Ayrıca ilgili veriye erişilebilirliğin zor olmaması ve literatürde sık kullanılması da önemli seçim kriterlerindendir.

Tablo 3.1’de bahsedilen SKHG’lerin büyük bir kısmı hesaplanacağı bölge için uzun dönemli ve detaylı ölçümleri gerektirmektedir. Örneğin “Gürültü Önleme” ölçütü kentin ana arterleri çevresinde belirli gürültü seviyelerine maruz kalan nüfus büyüklüğü ile bu nüfus içinde gürültüden olumsuz etkilenebileceklerin yüzdesini içermektedir. Dolayısıyla ölçütün ana verisi olan gürültü ölçümleri, ölçütün tam anlamıyla uygulanmasında yeterli olamayabilmektedir. Bu sebeple, doğrudan ana veriyi referans alan göstergelere ilişkin çalışmalar da incelenmiştir. Çetinkaya (2020) tarafından yapılan çalışma, çoğunlukla ana veriye dayalı göstergelerin ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik perspektifine göre irdelenmesi buna örnek olarak gösterilebilir.

Yukarıda bahsedilen seçim kriterleri, literatürdeki sürdürülebilirlik göstergelerinin değerlendirildiği çalışmalar ve Avrupa komisyonunun paylaştığı SKHG dokümanları göz önünde bulundurularak; otonom taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından değerlendirilmesinde 18 SKHG’nin tamamının kullanılmasına gerek olmadığı sonucuna varılmıştır. Örneğin, ‘Kentsel Fonksiyonel Çeşitlilik Göstergesi’ özellikle hastaneler, işletmeler, okullar vb. gibi tesislerin 1x1 km² alanlardaki sayısını incelemektedir. Bu ve benzeri göstergelerin, otonom araçların ulaşım sistemlerine entegrasyonu ile değerlerinde bir değişiklik olmayacağı öngörülmüş, bu nedenle incelenmelerinin gereksiz olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu aşamada, otonom araç uygulamalarının entegrasyonu ile ilgili ve önemli göstergelerin değerlendirilmesi ve ilişkili görülenlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, belirtilen göstergeler için gereksinimler, önem düzeyleri ve veri erişilebilirliği, alanında uzmanlaşmış uzmanlar tarafından gerçekleştirilen bir uzman görüşü araştırması yoluyla belirlenmiştir. Ulaştırma alanından uzmanlara yöneltilen anketlerden oluşan çalışma iki aşamadan oluşmaktadır: ilgili SKHG’lerin belirlenmesi ve B-AHP ile ağırlıklandırılması.

3.2.1 SKHG'lerin Belirlenmesi

Avrupa Komisyonu tarafından belirlenen 18 SKHG'den, otonom araç uygulamalarıyla ilişkilendirilen göstergelerin tespiti için uzman görüş formu oluşturulmuştur. Bu form, seçilen göstergelerin gereklilik ve önem düzeylerini, ayrıca veriye ulaşılabilirlik düzeylerini belirlemek amacıyla hazırlanmıştır. Uzman görüş formunun içeriği Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Araştırma ve Yayın Etik Kurulu tarafından incelenmiştir ve onaylanmıştır. Uzman görüş formu EK-A'da görüldüğü üzere son halini almıştır.

Örnekleme için iki temel yöntem bulunmaktadır: Rassal örnekleme ve rassal olmayan örnekleme. Rassal olmayan örnekleme teknikleri, kolaylı-hazır örnekleme, yargısal örnekleme ve kota örnekleme olarak daha da ayrılır (Khan, 2020; Mulisa, 2022). Yargısal örnekleme, evren içerisinde belirli kategorilere yerleştirilebilen ve çeşitlendirilebilen örneklerin olduğu durumlarda uygulanır (Matli, 2020). Bu çalışmada, SKHG çerçevesini belirlemeye odaklanan, ulaşım ve sürdürülebilirlik alanlarında uzmanlaşmış profesyonellerden oluşan bir grupta çalışılmıştır. Sınırlı sayıda uzmana danışma gerekliliği göz önüne alındığında, örneklem belirlenmesinde yargısal örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Örneklem grubu, ulaşım, sürdürülebilirlik, çevre ve ekonomi alanlarında çalışan akademisyenlerin yanı sıra ulaşım sektöründe danışmanlık yapan ve sürdürülebilirlik alanında hizmet veren yöneticileri içerecek şekilde seçilmiştir.

Uzman görüşlerinin ilk aşamasını oluşturan SKHG belirlenmesinde, tüm ölçütlerinin otonom araç uygulamaları araştırmalarında kullanılmak üzere gereklilikleri değerlendirilmeden önce göstergeler hakkında kısa açıklamalara yer verilmiştir. Daha sonra ilgili göstergenin gereklilik düzeyleri iki noktalı bir ölçekte değerlendirilmiştir (Gereklidir-Gereksizdir). Belirli bir gösterge gerekli görüldüğünde, önem düzeyi beş noktalı Likert ölçeğinde değerlendirilmiştir (1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli). Son olarak, bahsedilen gösterge gerekli olarak belirtilmiş ise bu göstergelere ilişkin verilere erişilebilirlik düzeyi, (Litman ve Burwell, 2006) tarafından geliştirilen üç puanlı bir ölçekte belirtilmiştir (1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde

bulunur). Şekil 3.3’de SKHG’lerin belirlenme aşamasında uzman görüş formunda yer alan bir seçim örneği yer almaktadır.

3. Hava Kirleten Emisyonlar

Açıklama: Hava kirleten emisyonların azaltılması sürdürülebilir kalkınmanın çevresel unsurlarının desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşenler (VOC), kükürt oksit (SOx) ve nitrojen oksit (NOx) gibi hava kirleticileri çevre ve insan sağlığı üzerinde anlık bir etkiye sahiptir. Bu gösterge, kentsel alandaki ulaşım modlarının (PM2.5 için egzoz ve egzoz dışı) ürettiği hava kirlenme emisyonlarının sağlık üzerindeki etkilerini emisyon zarar etkisi cinsinden ifade edilerek değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

☐ Gereklidir

☐ Gerekli değildir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1:Hiç önemli değil 2:Önemli değil 3:Ne önemli/Ne önemsiz 4:Önemli 5:Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1:Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3:Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

Şekil 3.3 Hava kirlenme emisyonlar göstergesinin uzmanlar tarafından değerlendirilmesi

Uzman görüşlerinin araştırıldığı ilk aşamada, 18 SKHG’nin değerlendirildiği anket formu Google Forms platformu üzerinden oluşturulmuştur. Anket formunun linki ilgili kişilere elektronik posta ile iletilmiştir. Çalışma kapsamında alanında uzman toplamda 34 kişi tarafından tüm göstergeler değerlendirilmiştir. SKHG’nin otonom araç uygulamaları kapsamında değerlendirilmesi konusunda gerekliliği, önem düzeyi ve göstergelere ait verilere erişilebilirliğin kolaylığı ile ilgili cevapların tanımlayıcı istatistikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Otonom araç uygulamalarında kullanılmak üzere SKHG’lerin belirlenmesi ile ilgili tanımlayıcı istatistik değerleri

Göstergeler	n	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
SKHG-1-En Yoksul Kesim için Toplu Taşımanın Ödenebilirliği					
Gereklilik	34	0	1	0,18	0,39
Önem Düzeyi	6	2	5	1,67	1,33
Veriye Ulaşım Kolaylığı	6	1	3	1,86	0,90
SKHG-2-Hareket Engelli Gruplar için Toplu Taşımanın Erişilebilirliği					
Gereklilik	34	0	1	0,21	0,41
Önem Düzeyi	7	2	5	3,71	1,11
Veriye Ulaşım Kolaylığı	7	1	3	1,71	0,76
SKHG-3-Hava Kirleten Emisyonlar					
Gereklilik	34	0	1	0,97	0,17
Önem Düzeyi	33	3	5	4,59	0,67
Veriye Ulaşım Kolaylığı	33	1	3	2,69	0,54
SKHG-4-Gürültünün Önlenmesi					
Gereklilik	34	0	1	0,85	0,36
Önem Düzeyi	29	2	5	4,00	0,94
Veriye Ulaşım Kolaylığı	29	1	3	2,21	0,74
SKHG-5-Ulaşım Kazalarından Kaynaklı Karayolu Ölümleri					
Gereklilik	34	1	0	0,32	0,47
Önem Düzeyi	11	2	5	3,5	1,27
Veriye Ulaşım Kolaylığı	11	1	3	2,00	0,94
SKHG-6-Toplu Taşıma Hizmetlerine Erişim					
Gereklilik	34	1	0	0,26	0,45
Önem Düzeyi	9	1	5	3,00	1,12
Veriye Ulaşım Kolaylığı	9	1	3	1,89	0,78
SKHG-7-Sera Gazı Emisyonları					
Gereklilik	34	0	1	0,88	0,33
Önem Düzeyi	30	3	5	4,50	0,63
Veriye Ulaşım Kolaylığı	30	1	3	2,70	0,53
SKHG-8- Tıkanıklık ve Gecikmeler					
Gereklilik	34	1	0	0,91	0,29
Önem Düzeyi	31	3	5	4,09	0,87
Veriye Ulaşım Kolaylığı	31	1	3	2,45	0,57
SKHG-9-Enerji Verimliliği					
Gereklilik	34	0	1	1,00	0,00
Önem Düzeyi	34	2	5	4,63	0,71
Veriye Ulaşım Kolaylığı	34	2	3	2,69	0,47
SKHG-10-Aktif Hareketlilik İmkânı					
Gereklilik	34	1	0	0,24	0,44
Önem Düzeyi	8	2	5	3,25	1,04
Veriye Ulaşım Kolaylığı	8	1	3	2,00	0,76
SKHG-11-Çok Modlu Entegrasyon					

Tablo 3.2 (Devamı)

Gereklilik	34	0	1	0,41	0,49
Önem Düzeyi	14	1	5	2,86	1,23
Veriye Ulaşım Kolaylığı	14	1	3	1,71	0,83
SKHG-12-Toplu Taşıma Memnuniyeti					
Gereklilik	34	0	1	0,21	0,41
Önem Düzeyi	7	3	5	4,00	0,82
Veriye Ulaşım Kolaylığı	7	2	3	2,29	0,49
SKHG-13-Aktif Modlar için Trafik Güvenliği					
Gereklilik	34	0	1	0,24	0,43
Önem Düzeyi	8	1	5	3,38	1,60
Veriye Ulaşım Kolaylığı	8	1	3	2,00	0,76
SKHG-14-Kamusal Alanların Kalitesi					
Gereklilik	34	0	1	0,06	0,24
Önem Düzeyi	2	3	5	4,00	1,41
Veriye Ulaşım Kolaylığı	2	3	3	3,00	0,00
SKHG-15-Kentsel Fonksiyonel Çeşitlilik					
Gereklilik	34	0	1	0,12	0,33
Önem Düzeyi	4	2	5	3,50	1,29
Veriye Ulaşım Kolaylığı	4	1	3	2,00	0,82
SKHG-16-Seyahat Süresi					
Gereklilik	34	0	1	0,94	0,24
Önem Düzeyi	32	3	5	4,58	0,67
Veriye Ulaşım Kolaylığı	32	2	3	2,42	0,50
SKHG-17-Hareket Alanı Kullanımı					
Gereklilik	34	0	1	0,24	0,43
Önem Düzeyi	8	3	5	4,50	0,76
Veriye Ulaşım Kolaylığı	8	2	3	2,38	0,52
SKHG-18-Güvenlik					
Gereklilik	34	1	0	0,15	0,36
Önem Düzeyi	5	3	5	4,20	0,84
Veriye Ulaşım Kolaylığı	5	1	3	2,20	0,84

Tablo 3.2’de verilen tanımlayıcı istatistik değerlerine bakıldığında; SKHG-9 göstergesinin gerekliliği tüm uzman katılımcılar tarafından onaylanmıştır. Gereklilik düzeyi %85 değerinin üzerinde olup, önem düzeyi ortalaması beş noktalı ölçek üzerinden 4,00 ve üzerinde olan göstergeler SKHG-3, SKHG-4, SKHG-7, SKHG-8, SKHG-9 ve SKHG-16 olarak belirlenmiştir. Bu göstergelere ait verilere ulaşılabilirlik kolaylık değerlendirmeleri üç noktalı ölçek üzerinden, en az 2,21 en çok 2,69 aralığındaki değerler çıkmıştır.

Uzman değerlendirmeleri sonucunda incelenen 18 SKHG arasından yukarıda belirtilmiş olan 6 göstergeye en yakın gösterge SKGH-11 göstergesidir. Ancak, bu

göstergenin incelenmesinin gerekliliği %41 oranında kalmış olup önem düzeyi 2,86, veriye ulaşım kolaylığı ise 1,71 değerinde kalmıştır. Bu durumda, otonom araç uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilebilmesi için birinci aşamada gerçekleştirilen uzman değerlendirmelerinden; gereklilik düzeyi %85 ve üzeri, önem düzeyi 4,00 ve üzeri, veriye ulaşım kolaylığı ise 2,00 üzeri değerlere sahip göstergelere araştırmanın sonraki aşamalarında kullanılmak üzere belirlenmiştir. Belirtilen koşulları sağlayan göstergeler Tablo 3.2 üzerinde mavi renkle işaretlenmiştir.

3.2.2 Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Gösterge Ağırlıklandırılması

B-AHP yöntemi, ÇKKV süreçlerinde literatürde sıklıkla kullanılan ve belirsizliklerin yüksek olduğu durumlarda etkili sonuçlar sağlayan bir yöntemdir. Bu araştırmada, sürdürülebilir kentsel hareketlilik göstergelerinin ağırlıklandırılması sürecinde uzman değerlendirmeleri doğrultusunda karar verilmesi gerekmekte olup, bu değerlendirmelerin nesnel ve hassas bir şekilde analiz edilmesi önem arz etmektedir. B-AHP, klasik Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemine göre uzmanların karar sürecindeki belirsizliğini ve subjektif değerlendirmelerini daha esnek bir biçimde modelleyebilmesiyle öne çıkmaktadır. Bu sebeple, araştırmada sürdürülebilir kentsel hareketlilik göstergelerinin önem derecelerini belirlemek için B-AHP tercih edilmiştir. Bu yöntemin seçilme gerekçesi, yöntemin uzman değerlendirmelerindeki belirsizlikleri yönetme kabiliyeti ve böylece daha doğru ağırlıklandırma sonuçlarına ulaşma amacına dayanır.

Uzman değerlendirmelerinin ikinci aşamasında, ilk aşamada gerekli görülen ve önem düzeyi yüksek altı gösterge B-AHP tekniğiyle kendi içerisinde ağırlıklandırılmıştır. Bu ağırlıklandırma süreci, ilgili alanda aktif olarak çalışan uzmanlara anketler aracılığıyla değerlendirme yapmaları şeklinde gerçekleştirilmiştir. AHP, karmaşık karar verme süreçlerini basitleştirmek için kullanılan birçok ölçütü ağırlıklandırma yöntemidir. B-AHP ise, bu ağırlıklandırma sürecinde belirsizliği ifade etmek ve daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için bulanık dilbilgisini uygular. B-AHP'nin temelinde bir analiz hiyerarşisi yapısı vardır (Foroozesh, Monavari, Salmanmahiny, Robati ve Rahimi, 2022; Kusakci, Yilmaz, Kusakci, Sowe ve Nantembelele, 2022). Bu yapı, karar verme problemi olan bir hedefin altında bulunan

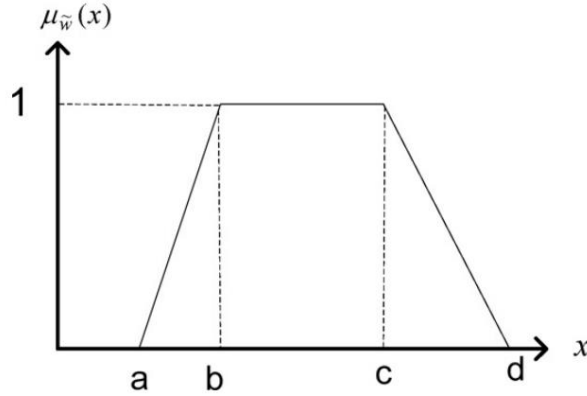
kriterleri ve alternatifleri hiyerarşik bir şekilde düzenler. İlk adım, karar verme problemi hedefini ve ona bağlı olan kriterleri belirlemektir. Ardından, kriterler arasındaki ilişkileri belirlemek için bir karşılaştırma matrisi oluşturulur. Bu matris, karşılaştırılan kriterlerin önem derecesini içerir. B-AHP'nin bulanık mantık kullanımı, kriterlerin ve alternatiflerin önem derecelerini ifade etmek için dil bilgisel terimleri kullanmasına dayanır. Örneğin, "yüksek", "orta" veya "düşük" gibi terimler kullanarak bir kriterin önem derecesi ifade edilebilir. Bu terimler, bulanık küme teorisine dayalı olarak sayısal değerlere dönüştürülür ve bulanık karşılaştırma matrisi oluşturulur. B-AHP sürecinde bulanık karşılaştırma matrisi kullanılarak kriterlerin ağırlıkları belirlenir. Bu matris, her kriter çifti için bulanık karşılaştırmaları içerir ve bu karşılaştırmaları temel alarak kriterlerin önem sıralaması elde edilir. Sonuç olarak, her kriter için bir ağırlık değeri elde edilir. B-AHP'nin sonucunda elde edilen ağırlıklar karar verme sürecinde kullanılarak farklı kriterlerin veya alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılır (Y. Liu, Eckert ve Earl, 2020; Nasution, Husni, Kuspriyanto ve Yusuf, 2022; Ying Wang, Xu ve Solangi, 2020).

Bulanık mantıkta bir küme içerisinde bir değeri temsil etmek için üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu üyelik fonksiyonu değer belirsizlik derecesini ifade etmek için kullanılmaktadır. Trapezoidal üyelik fonksiyonu, bir yamuk şeklinde ifade edilir ve dört parametreye dayanır: a, b, c ve d. Yamuk üyelik fonksiyonu Denklem 3.1'de olduğu şekliyle tanımlanır (Amindoust, Ahmed, Saghafinia ve Bahreininejad, 2012).

$$\mu_w(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } x < a \\ \frac{1}{b-a}(x-a) & \text{eğer } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{eğer } b \leq x \leq c \\ \frac{1}{c-d}(x-d) & \text{eğer } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{eğer } x > d \end{cases} \quad (3.1)$$

Bu parametreler, üyelik fonksiyonunda yamuğun alt ve üst kenarlarının kesiştiği noktaları belirler (Şekil 3.4). a ve d, yamuğun sol ve sağ kenarları, b ve c ise yamuğun zirve noktalarıdır. Bu parametreler, belirli bir değer için üyelik derecesini belirlemek için kullanılır. Değer, yamuğun içinde bulunduğu alanın büyüklüğüne bağlı olarak belirli

bir üyelik derecesine sahip olur. Yamuk üyelik fonksiyonu, bu şekliyle değeri belirsizliğe veya belirsizliğin derecesine göre tanımlar.



Şekil 3.4 Yamuk üyelik fonksiyonu

Çalışma kapsamında, uzmanlara Saaty ölçeği kullanılarak sorular yöneltilmiştir. Bulanık mantık dilindeki yanıtları değerlendirmek için Tablo 3.3'te verilen yamuk bulanık sayı tercih ölçeği kullanılmıştır (Zheng, Zhu, Tian, Chen ve Sun, 2012).

Tablo 3.3 AHP'de çiftler arası karşılaştırmalarda kullanılan göreceli önem ölçeği

Dilsel değişkenler	AHP önem sıralaması	Yamuk Bulanık Sayı	Karşılıklı Yamuk bulanık Sayı
Eşit derecede önemli	1	(1,1,1,1)	(1,1,1,1)
Ara değer	2	(1,3/2, 5/2,3)	(1/3, 2/5, 2/3, 1)
Orta derecede önemli	3	(2,5/2,7/2,4)	(1/4, 2/9, 2/5, 1/2)
Ara değer	4	(3,7/2,9/2,5)	(1/5, 2/9, 2/7, 1/3)
Belirgin olarak daha önemli	5	(4,9/2,11/2,6)	(1/6, 2/11, 2/9, 1/4)
Ara değer	6	(5,11/2,13/2,7)	(1/7, 2/13, 2/11, 1/5)
Çok daha belirgin olarak daha önemli	7	(6,13/2,15/2,8)	(1/8, 2/15, 2/13, 1/6)
Ara değer	8	(7,15/2,17/2,9)	(1/9, 2/17, 2/15, 1/7)
Son derece daha önemli	9	(8,17/2,9,9)	(1/9, 1/9, 2/17, 1/8)

Uzman değerlendirmelerinin ikinci kısmında, söz konusu değerlendirme kriterlerinin önem düzeyleri kendi içlerinde kıyaslanarak incelenmiştir. Kıyaslamalar yapılırken sırasıyla verilen iki kriterden hangisinin daha önemli /etkin olduğu seçilmiştir. Ayrıca, önemli olduğu belirtilen kriterin göreceli önem derecesi belirtilmiştir. İlk aşamada belirlenen 6 göstergenin birbirleri arasında sırasıyla ikili karşılaştırmalarının tamamı gerçekleştirilmiştir. Toplamda 15 ikili karşılaştırmayı

içeren anket sorusu uzmanlara yöneltilmiştir. Uzman değerlendirmelerinin ikinci aşamasında yöneltilen bir kıyaslama örneği Şekil 3.5’te görülmektedir. Bu aşamada uygulanan form EK-B’de detaylı olarak paylaşılmıştır.

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında **daha önemli** bir kriterdir?

☐ HAVA KİRLETEN EMİSYONLAR

☐ SERA GAZI EMİSYONLARI

ÖNEM DERECEİ

1: Eşit Önemde 3: Biraz daha önemli (Az üstünlük) 5: Oldukça önemli (Fazla üstünlük) 7: Çok önemli (Çok üstünlük) 9: Son derece önemli (Kesin üstünlük) 2,4,6 ve 8 Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

1 2 3 4 5 6 7 8 9

EŞİT ÜSTÜNLÜK ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ KESİN ÜSTÜNLÜK

Şekil 3.5 Uzman değerlendirmelerinin ikinci aşamasında yöneltilen örnek bir kıyaslama

Uzman görüşlerinin araştırıldığı ikinci aşamada, 6 SKHG’nin kendi içerisinde değerlendirildiği anket formu Google Forms platformu üzerinden oluşturulmuştur. Anket formunun linki ilgili kişilere elektronik posta ile iletilmiştir. Çalışma kapsamında alanında uzman toplamda 23 kişi tarafından tüm göstergeler karşılıklı olarak değerlendirilmiştir. İlk aşamada belirlenmiş olan altı SKHG’nin, ikinci aşamanın sonunda B-AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmış yüzdeleri Tablo 3.4’te görülmektedir.

Tablo 3.4 B-AHP süreci kullanılarak belirlenen SKHG ağırlıkları

İlk aşamada belirlenmiş SKHG ölçütleri	B-AHP Ağırlıkları
Hava Kirleten Emisyonlar	%21,45
Sera Gazı Emisyonları	%21,87
Enerji Verimliliği	%21,16
Tıkanıklık ve Gecikme	%17,65
Seyahat Süresi	%11,95
Gürültünün Önlenmesi	%5,92

Tablo 3.4'e göre, en yüksek ağırlığı alan göstergeler "Sera Gazı Emisyonları" (%21,87) ve "Hava Kirleten Emisyonlar" (%21,45) olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, otonom araç uygulamalarının çevresel sürdürülebilirliğe katkısının büyük önem taşıdığını ve bu iki göstergenin otonom araçların şehirlerdeki sürdürülebilirliğini değerlendirirken en kritik unsurlar arasında yer aldığını göstermektedir. "Enerji Verimliliği" göstergesi %21,16 ağırlıkla üçüncü sırada yer almakta olup, otonom araçların enerji tüketimlerini optimize edebilme potansiyelinin önemli bir etken olarak kabul edildiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, "Tıkanıklık ve Gecikme" göstergesi %17,65 ağırlık ile dördüncü sırada yer almakta, bu da otonom araçların trafik yoğunluğu ve gecikme sürelerine olan etkisinin değerlendirilmesinde önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

"Seyahat Süresi" (%11,95) ve "Gürültünün Önlenmesi" (%5,92) ağırlıkları, diğer göstergelere göre daha düşük olmakla birlikte, bu sonuçlar otonom araçların sürdürülebilir kentsel hareketliliğe katkılarının bu alanlarda tamamen önemsiz olduğu anlamına gelmemektedir. Daha düşük ağırlıklar, bu göstergelerin doğrudan otonom araç teknolojisinin odağına göre daha az belirleyici olduğunu, ancak yine de göz ardı edilemeyecek unsurlar olduğunu göstermektedir.

3.2.3 Seçilen SKHG Ölçütlerinin Hesaplanması

Avrupa komisyonu tarafından yayınlanan yönergeye göre, şehirlerin hareketlilik sistemlerinin takip edilebilmesi için belirlenen SKHG ölçütlerinden önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu göstergeler arasından, otonom araç uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilme aşamasında kullanılması uygun göstergeler alanında uzman kişiler tarafından belirlenmiştir. Seçilen göstergelere ait detaylı açıklamalar ve hesaplamalar alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

3.2.3.1 Hava Kirleten Emisyonlar

Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar, atmosfere zararlı emisyonlar salarak çevre kirliliğine neden olmaktadır. Sürücüsüz taşıtların yaygın kullanımının çevresel etkileri, özellikle hava kalitesi ve sera gazı salımları açısından önemlidir. Hava kirleticiler genel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır: yerel etkiye sahip olan geleneksel

kirleticiler ve küresel etkiye sahip sera gazları. Kentsel hava kalitesi ve insan sağlığı gibi sorunlar yerel etki sınıfına girmektedir (Faiz, 1993). Sera gazı küresel anlaşmalara tabiyken, hava kirleticiler yerel mevzuat ve politikalara tabidir. Hava kirleten emisyonların azaltılması sürdürülebilir kalkınmanın çevresel unsurlarının desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşenler (VOC), kükürt oksit (SO_x) ve nitrojen oksit (NO_x) gibi hava kirleticileri çevre ve insan sağlığı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu kirleticiler aynı zamanda yer seviyesindeki ozon (O₃) ve dolayısıyla parçacık madde (PM) gibi ikincil kirleticilerin oluşumuna katkıda bulunurlar (Harrison, 2012). Kentsel alandaki tüm yolcu ve yük taşıma modlarının (PM2.5 için egzoz ve egzoz dışı) hava kirletici emisyonları belirtilen formüller yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu gösterge Temiz Hava Programı ve Ulusal Emisyon Tavanları Direktifi tartışmaları bağlamında geliştirilen metodolojiye dayalı olarak PM2.5 eşdeğerleri kullanılarak sağlık üzerindeki etkileri emisyon zarar etkisi cinsinden ifade edilir (Denklem (3.2)) (European Commission, 2022; Union, 2008).

$$EHI = \frac{\sum s Eeq_s * \left(\sum ij A_{ij} * (NE_i + \sum ck S_{ck} * E_{ijkcs} * I_k) \right) * 1000}{cap} \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de belirtilen parametreler;

EHI: Emisyon zarar eşdeğer indeksi [kg PM2.5 eşdeğeri/kişi başına yılda]

Eeqs: Emisyon madde türü PM2.5 eşdeğer sağlık etki değeri [faktör]

E_{ijkcs}: Ulaşım modu i ve araç tipi j tarafından sürülen her bir kilometredeki kirleticilerin emisyonu, yakıt türü k, emisyon sınıfı c (g/km)

A_{ij}: Faaliyet hacmi (ulaşım modu i ve araç tipi j tarafından katedilen mesafe) [milyon vkm/yıl]

S_{ijk}: Aracın türüne ve ulaşım moduna göre yakıt türü k'nın payı [oran]

C_{ijkc}: Yakıt türü k, araç tipi j ve ulaşım modu i'ye göre emisyon sınıfı c'nin payı [oran]

NE_i: Sürülen mesafe başına kirletici i'nin egzoz dışı emisyonları [g/km]

Cap: Kentsel alanda yaşayanların sayısı

k: Enerji türü (benzil, dizel, biyoyakıt, elektrik, hidrojen vb.)

i: Araç tipi ulaşım modu (bireysel araç, otobüs, tren, motosiklet, kamyon vb.)

j: Araç sınıfı

s: Madde türü [tür], sınırlıdır NOx ve PM2.5

c: Emisyon sınıfı (euro normu)

3.2.3.2 Sera Gazı Emisyonları

Sera gazı emisyonlarının atmosfere salımını sağlayan sektörlerin başında ulaştırma sektörü yer almaktadır. Ulaştırma kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonlarının temel dört ana etkeni vardır. Nüfus, seyahat talebi, araç yakıt tüketimi ve yakıt karbon yoğunluğu. Bu bağımsız parametreler üzerinde yapılacak olan değişiklikler ile sera gazı emisyonlarının salımı azaltılabilmektedir. Araçların enerji kullanımı; ağırlığı veya mekanik kayıpları azaltılarak ya da aktarma organlarının verimliliği artırılarak azaltılabilir. Özellikle elektrikli araç teknolojilerinde geliştirilen bir dizi teknoloji enerji kullanımını azaltmak için seçenekler sunmaktadır (Kahn Ribeiro vd., 2007). Benzer şekilde, araç yakıtlarının karbon yoğunluklarının yüksek karbon içerikli petrol yakıtlarının daha düşük karbonlu yakıtlarla (elektrik, hidrojen veya biyo yakıt) değiştirilmesiyle gerçekleştirilir (California Hava Kaynakları Kurulu, 2007). SKHG'lerden 'Sera Gazı Emisyonları', kentsel alandaki yük ve yolcu taşımacılığı modlarından kaynaklı sera gazı emisyonlarının Denklem (3. 3) kullanılarak belirlenmesini sağlar. Göstergenin kullanımı için araç tipleri, araçların emisyon kategorileri ve yakıt türünün her bir kombinasyonu için araç kilometre sayısı bilgileriyle; CO₂ eşdeğerleri kullanılarak sera gazı emisyonları cinsinden ifade edilir.

$$G = \frac{\sum_{ij} A_{ij} * (\sum_{ck} S_{ijk} * C_{ijkc} * l_{jk} * (T_k + W_k) * (1 + F_{ijk}))}{cap} * 1000 \quad (3. 3)$$

Denklem (3. 3)'de belirtilen parametreler;

G: Sera gazı emisyonu [ton CO₂(eşdeğeri)/kişi başına yılda]

T_k : Ele alınan enerji türü birimi başına tanktan tekerleğe CO₂ emisyonu [kg/l veya kg/kWh]

W_k : Ele alınan enerji türü birimi başına kuyudan tanka CO₂ eşdeğer emisyonu

A_{ij} : Faaliyet hacmi (ulaşım modu i ve araç tipi j tarafından katedilen mesafe) [yılda milyon vkm]

S_{ijk} : j tipi araç ve i ulaşım modu başına k tipi yakıt payı

C_{ijk} : Yakıt türü k, araç türü j ve ulaşım modu i için emisyon sınıfı c'nin payı [oran]

I_{jk} : Araç türü j ve yakıt türü k için sürülen mesafe başına enerji yoğunluğu [l/km veya MJ/km veya kWh/km]

Cap = Kentsel alanda yaşayanların sayısı

F_{ijk} = CO2 olmayan sera gazı düzeltmesi (CO2 eşdeğeri) [faktör]

k = Enerji türü (benzin, dizel, biyoyakıt, elektrik, hidrojen vb.)

i = Ulaşım modu (bireysel araç, otobüs, tren, motosiklet, kamyon vb.)

j = Araç sınıfı

3.2.3.3 Enerji Verimliliği

Ulaştırma sektörü, bir ülkenin enerji arzı ve talebi arasındaki hassas dengeyi belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle kentsel alanlardaki nüfus artışı, ulaşım taleplerini artırmakta ve bu da daha fazla altyapı yatırımı ve enerji tüketimi gereksinimini beraberinde getirmektedir. Artan ulaşım talepleri hem şehir içi hem de şehirler arası ulaşım altyapısının geliştirilmesini ve genişletilmesini zorunlu kılarak enerji tüketimini artırır. Ulaştırma endüstrisinin enerji kullanımıyla ilgili sorunlar, yetkililerin dikkatini çekmiş ve bu bağlamda enerji verimliliği konusunda yeni düzenlemelerin geliştirilmesine yol açmıştır. Avrupa Birliği politikaları tarafından belirlenen sürdürülebilir ulaşım hedeflerinin önemli göstergelerinden biri olan 'Enerji verimliliği' Denklem (3. 4)'te belirtilen enerji tüketim oranı indeksi ile ifade edilmektedir. Sera gazı emisyonlarında olduğu gibi enerji verimliliğinde de ideal olarak, araç tipi, araç emisyon kategorisi (emisyon standardı) ve yakıt türünün her bir kombinasyonu için araç kilometre sayısı değerleri dikkate alınmaktadır.

$$E = \frac{(\sum_{ij} A_{ij} (\sum_k S_{jk} * I_{jk} * EC_k))}{TV_{pass} + (\frac{TV_{fre}}{8})} \quad (3. 4)$$

E : Enerji tüketim oranı [MJ/km]

TV_{pass} : Yolcu taşımacılığı taşıma hacmi (yolcu km) [milyon yolcu km]

TV_{fre} : Yük taşımacılığı taşıma hacmi [milyon ton km]

S_{jk} : Yakıt türü k'nın araç türü j başına payı [oran]

I_{jk} : Araç türü j ve yakıt türü k için sürülen mesafe başına enerji yoğunluğu [l/km veya MJ/km veya kWh/km]

A_{ij} = Faaliyet hacmi (Ulaşım modu i ve araç türü j tarafından sürülen mesafe) [yılda milyon km]

EC_k = Yakıt k için yakıt enerji içeriği [MJ/l veya MJ/kg]

k = Yakıt türü

i = Ulaşım modu (bireysel taşıt, otobüs, motosiklet, kamyon vb.)

j = Araç sınıfı

3.2.3.4 Tıkanıklık ve Gecikme

Trafiğin akımının yüksek araç yoğunluğu ile kesintiye uğraması ve bunun sonucunda fazla seyahat sürelerine yol açması tıkanıklık olarak tanımlanabilir. Kentsel alanlarda oluşan tıkanıklıklara birçok farklı etken sebep olabilir. Yoğunlukla yoğun saatlerde aşırı araç sayısı nedeniyle düzenli olarak tekrarlanan tıkanıklıklar meydana gelir. Yoğun nüfuslu bölgelerde tıkanıklıktan kaynaklı gecikmeler ve dolayısıyla maliyetler artmaktadır. 2014 yılında ABD’deki trafik sıkışıklığı insanlara fazladan 6,9 milyar saat fazladan seyahat süresine sebep olmuştur ve bunun eşdeğeri 3,1 milyar galon yakıt olarak yaklaşık 160 milyar dolar civarındandır (Schrunk, Lomax, Fellow, Bak ve Analyst, 2015; Sun, Dubey ve White, 2017). Bu gösterge, yoğun olmayan saatlerde toplu taşıma seyahat sürelerine kıyasla yoğun saatlerde karayolu trafiğinde ve toplu taşımada yaşanan gecikmeleri belirlemeye yardımcı olur. ‘Tıkanıklık ve Gecikme’ göstergesi Denklem (3. 5)’te görüldüğü üzere, karayollarındaki özel taşıt ve toplu taşıma için temsili koridorlar üzerindeki gecikmelerin ağırlıklı toplamaları alınmaktadır.

$$CD_{ij} = MS_{road} * \frac{(\sum_{i=1}^{10} \frac{CT_i * PHT_i}{FFT_i})}{\sum_{i=1}^{10} CT_i} + MS_{PT} * \frac{(\sum_{j=1}^{10} \frac{PT_j * PTPHT_j}{PTOT_j})}{\sum_{j=1}^{10} PT_j} \quad (3. 5)$$

CD_{ij} = Tıkanıklık ve gecikme indeksi (yoğun saatlerde gecikme yüzdesi) [% gecikme]

CT_i = i ana yol koridorunda yoğun saatlerde taşıt yolculuklarının sayısı.

PHT_i = i ana yol koridorunda yoğun saatlerde taşıt seyahat süresi [dakika]

FFT_i = i ana yol koridorunda yoğun olmayan taşıt seyahat süresi [dakika]

PT_j = j transit koridorundaki yoğun saatlerde toplu taşıma seferlerinin sayısı [#]

PTPHT_j = i ana yol koridorunda yoğun saatlerde toplu taşıma seyahat süresi [dakika]

PTOT_j = i ana yol koridorunda Optimum Toplu Taşıma seyahat süresi [dakika]

MS_{road} = Modal paylaşımlı yol [%]

MS_{pt} = Toplu taşıma modal payı [%]

3.2.3.5 Seyahat Süresi

Kentlerin yaşanabilirliği ve sürdürülebilirliği, ulaşım sistemlerinin etkinliği ve erişilebilirliği ile yakından ilişkilidir. Bu bağlamda, seyahat süresi göstergesi, kentsel planlama ve ulaşım politikalarının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Seyahat süresi, bireylerin günlük yaşamlarında işe gitme, eğitim almak, alışveriş yapmak gibi temel faaliyetlerini gerçekleştirmek için harcadıkları zamanı ifade eder. Bu süre bireylerin yaşam kalitesini, iş verimliliğini ve kentsel altyapının etkinliğini doğrudan etkiler. Seyahat süresi göstergesi, kentsel ulaşımın sürdürülebilirliğini değerlendirmede önemlidir. Daha uzun seyahat süreleri genellikle artan trafik, hava kirliliği ve enerji tüketimi gibi çevresel etkilere yol açabilir. Sürdürülebilir kentsel kalkınma politikaları, kent sakinlerinin toplu taşıma ve aktif ulaşım modlarının kullanılmasını desteklemektedir. Bu durum hem özel taşıt kullanımını hem de seyahat mesafesini ve sürelerini azaltır. Diğer bir değişle, sürdürülebilir kentsel hareketlilik, ulaşım türlerinin daha sürdürülebilir dağılımını sağlamak için kat edilen mesafeleri azaltmayı amaçlar. Ortalama seyahat süresi verisi Denklem (3. 6) yardımıyla hesaplanabilir (European Commission, 2022).

$$T_{com} = \sum_i \frac{T_{outi}}{n} + \sum_i \frac{T_{returni}}{n} \quad (3. 6)$$

T_{com}: Ortalama işe gidiş seyahat süresi [dakika/gün]

T_{outi}: Kişiye göre işe/okula gidip gelme süresi [dakika/gün]

T_{returni}: Kişiye göre eve gidip gelme süresi [dakika/gün]

n: anketteki kişi sayısı

3.2.3.6 Gürültünün Önlenmesi

Kentsel alanlarda gürültü, yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyen ve çeşitli kaynaklardan kaynaklanan yaygın bir sorundur. Ulaştırma faaliyetlerinin büyük bir

kısının gerçekleştirildiği karayolları, kentsel alanlarda oluşturulan ve toplum sağlığını etkileyen gürültülerin başlıca kaynaklarından biri sayılmaktadır. AB’de 210 milyondan fazla insan, insan sağlığı üzerinde çeşitli olumsuz etkileri olan zararlı trafik gürültülerine maruz kalmaktadır (Münzel vd., 2024). İnsan sağlığı üzerinde uyku aktiviteleri, performans ve konsantrasyon bozukluklarının yanı sıra çeşitli psikiyatrik bozukluklara da sebebiyet vermektedir. Ayrıca doğal ortamda bulunan birçok canlı türü bu gürültülere maruz kalmakta ve ekolojik ve biyolojik süreçlerinde etkilenmesine sebebiyet vermektedir. Gürültü doğrudan kayıplara neden olmamaktadır ancak gürültünün dolaylı etkileri zamana yayılan problemlere dönüşmektedir. 2007 yılında AB’de 55 dB üzerindeki trafik gürültüsünün sosyal maliyetlerinin kabaca tahmini yaklaşık olarak 38 milyar Euro civarındadır (Den Boer ve Schroten, 2007). Sürdürülebilir kentsel hareketlilik göstergelerinden “Gürültünün Önlenmesi” sürdürülebilirliğin sosyal, çevresel ve ekonomik boyutlarını etkilediğinden önemli bir göstergedir. Göstergenin değerlendirilmesinde kullanılan gürültü önleme indeksi Denklem (3. 7)’de verilen formülle hesaplanabilir.

$$NI = \frac{\sum i HFLden_i * (\sum m W_{im} * P_{im})}{\sum im W_{im} * P_{im}} \quad (3. 7)$$

NI: Gürültü engelleme indeksi [nüfusun yüzdesi]

i: Gürültü bantı için ortalama gürültü Lden [#]

P_{im}: Mod m (karayolu, demiryolu, uçak) için i gürültü bandına maruz kalan nüfus [#]

W_{im}: Mod m ve gürültü bantı i için Yüksek Rahatsızlık ağırlık faktörü [%] [%]

HFLDeni: İlgili gürültü bantı i'nin ortalama Ldeni'nde engelleme faktörü

Lden: Bir yılda tüm günlerin, akşamların ve gecelerin ortalama ses basıncı seviyesi

3.3 Kentsel Hareketlilik Ortamının Oluşturulması

Açık kaynak kodlu yazılımlar kullanıcılar tarafından kolayca erişilebilir, özelleştirilebilir ve geliştirilebilir nitelikte olmasından dolayı kentsel hareketlilik simülasyonlarının seçiminde önemli bir kriter olmaktadır. Simulation of Urban Mobility (SUMO), kentsel hareketlilik için açık kaynak kodlu bir simülasyon ortamı olup trafik akımının, araç davranışlarının ve ulaşım altyapısını modelleme olanağı tanımaktadır. Otonom araç uygulamalarının, klasik araçlara kıyasla otomotiv

endüstrisinde yeni bir uygulama olmasından dolayı yerleşim alanlarında henüz sınırlı sayıda bulunmaktadır. Bu teknolojinin yaygınlaşmasıyla birlikte, trafik akımı, güvenlik standartları, şehir planlaması ve insanların yaşam tarzları gibi birçok alanın değişebileceği öngörülmektedir. Dolayısıyla, sınırlı sayıda uygulamaları olan yeni bir teknolojinin ulaşım sistemleri üzerinde gelecekteki etkilerinin incelenmesi simülasyon ortamında mümkün olmaktadır. Bölüm 2’de incelenmiş olan literatür taramasında da görüldüğü üzere çalışmaların büyük bir çoğunluğu teorik kabuller üzerine yapılmış olup farklı kentsel hareketlilik ortamlarında değerlendirilmiştir. Bu bölümde, otonom araç uygulamalarını açık kaynak kodlu ortamda serbest bir şekilde oluşturma olanağı tanıyan SUMO’da kentsel hareketlilik ortamının oluşturulmasına dair detaylar alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

3.3.1 Araç Takip Modelleri

Trafik sıkışıklığı probleminin sebeplerini anlamak ve buna yönelik çözümler geliştirebilmek için araç-arac etkileşimlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, literatürde sıkça karşılaşılan bir yöntemdir. Trafik akımının modellenmesi aşamasında, her bir aracın dinamiklerinin komşu aracın konumlarının ve hızlarının bir fonksiyonu olarak tanımlanması gerekliliği en temel yaklaşımlardan biridir. Genel olarak araçların birbirini takip etmesi ve şerit değiştirme olmak üzere iki dinamik süreç bulunmaktadır. Araç takip modelleri, sürücülerin hızlarını, mesafelerini ve ivmelerini hesaba katarak araçların birbirlerini nasıl takip ettiğini modellemek için kullanılır. Bu modeller, sürücülerin önlerindeki araçların hareketlerine nasıl tepki verdiklerini anlamak için çeşitli matematiksel denklemleri ve algoritmaları içermektedir. Trafik akımındaki araçların birbirini takip etme süreci, bir aracın önündeki araçla güvenli bir mesafeyi korumaya çalışarak hızını belirlemeye çalışmasıyla gerçekleşir (A. Zhou, Liu, Tenenboim, Agrawal ve Peeta, 2023). Takip eden araç her zaman öndeki aracın yavaşlama ve hızlanma davranışına uyum sağlayarak hareketine devam eder. Güvenli hıza dayalı modeller olmasının yanı sıra kademeli yavaşlama ve kademeli hızlanma durumlarının da değerlendirildiği seçenekler de mevcuttur (Krajzewicz ve Behrisch, 2011).

Otonom araç uygulamalarının mevcut sistemle uyum sorunları ve eksik altyapı nedeniyle trafik akımı üzerindeki etkileri ancak simülasyon ortamlarında

değerlendirilebilmektedir. Kentsel hareketlilik simülasyonlarında bulunan araç takip modelleri yakın zamana kadar insan sürücülerin takip aralıkları, hızlanma ve yavaşlama davranışları, araç boşlukları gibi davranışlarını simüle edemezken, görüntü işleme tekniklerinin gelişmesi ve ardından gerçekçi araç yörüngelerinin incelenmesiyle bu eksiklikler giderilmeye başlanmıştır (He, 2022; Salles, Kaufmann ve Reuss, 2020). Dolayısıyla, insan sürücülerin davranışları daha gerçekçi bir şekilde simüle edilebilmektedir. Bu da otonom araçların trafik akımı üzerindeki etkilerini daha doğru bir şekilde analiz etmemize olanak tanımaktadır. Özellikle, otonom araçların takip mesafeleri, hızlanma ve yavaşlama profilleri gibi faktörlerin, saha koşullarında nasıl bir etki yaratacağını önceden tahmin etmemize yardımcı olmaktadır.

Trafik akımında meydana gelen değişiklikler sebebiyle sürücülerin araç takip davranışları büyük ölçüde değişmektedir. Bu nedenle belirli problemler için birçok araç takip modeli ortaya çıkmıştır. Araç takip modellerinin sürekli olarak geliştirilmesiyle, iyileştirilmiş araç takip modelleri gerçek trafik koşullarını giderek daha gerçeğe uygun hale getirmektedir (Fei, 2023). Geliştirilen araç takip modelleri zaman içinde daha fazla parametreyi inceleyerek daha karmaşık hale gelmiş ve çeşitli teknolojilerin entegrasyonu ile daha etkili hale gelmiştir. Tez çalışmaları kapsamında tercih edilen araç takip modelleri aşağıda alt başlıklar halinde incelenmiştir.

3.3.1.1 Krauss Araç Takip Modeli

Trafik akımında araçlar hızlarını önündeki araca göre belirlemenin yanı sıra öndeki aracın yavaşlama davranışına da uyum sağlamaktadır. Bu durum, arkadan gelen araçların her zaman önündeki araçla güvenli mesafeyi korumaya çalıştığını göstermektedir. Ek olarak, sürücülerin yol ve trafik koşullarına göre belirlenmiş hız limitlerinin aşılmadığı güvenli hız seviyelerine de dikkat edildiği yaklaşımlar bulunmaktadır. Krauß tarafından 1997 yılında geliştirilen araç takip modeli güvenli hız yaklaşımına dayanmaktadır. Krauß tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, araç takip modelinde kullanılan güvenli hız Denklem (3. 8) yardımıyla hesaplanmaktadır (Krauß, 1998; Krauss, Wagner ve Gawron, 1997) :

$$v_{güvenli} = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)t_r}{\frac{v_l(t)+v_f(t)}{2b} + t_r} \quad (3.8)$$

Burada, $V_l(t)$ önde giden aracın t zamanındaki hızını temsil ederken, $g(t)$ t zamanında önde giden araçla arasındaki mesafe cinsinden takip aralığını, t_r sürücünün tepki süresi (yaklaşık 1 sn) ve b aracın maksimum yavaşlama ivmesidir (m/sn^2). $V_{güvenli}$, yolda izin verilen maksimum hızdan daha büyük olabileceğinden veya aracın hızlanma yetenekleri nedeniyle daha büyük olabileceğinden, bu değerlerin minimumu Denklem (3.9)'da gösterilen "istenilen" veya "arzu edilen" hız olarak adlandırılan sonuç hızı olarak hesaplanır.

$$v_{istenen} = \min[v_{maks}, v + at, v_{güvenli}] \quad (3.9)$$

Burada t , simülasyonun adım süresini temsil eder. Mayer, Krajewicz, Erdmann, Behrisch ve Bieker (2009) simülasyon ortamına Krauss araç takip modelini uyarlamışlardır. SUMO'da tanımlanan araçların 'varsayılan' araç takip parametresi olarak Krauss kullanılmaktadır. Krauss araç takip modelinin ilerleyen yıllarda modifiye edilmiş farklı versiyonları geliştirilmiştir. Han, Chen, Yu ve Li (2012), Krauß'un çalışmasına dayanarak araçların yavaşlama sürecini göz önünde bulundurarak yeni bir model önermişlerdir ancak aracın durduğu durumlarda hızlanma ve yavaşlama ivmesi göz önünde bulundurulmamıştır. Song, Wu, Xu ve Lin (2015) araçların hareket durumunu ve frenleme sürecindeki yavaşlama ivmesini dikkate alan yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Ayrıca bu yaklaşım, araçlar durduğunda ve güvenli hızın sıfırdan küçük olduğunda ortaya çıkan sorunları da çözmektedir.

3.3.1.2 IDM (Intelligent Driver Model) Araç Takip Modeli

Otonom araçların, diğer araçlarla ve altyapıyla iletişim kurarak trafik akımı hakkında gerçek zamanlı bilgi toplayabilecek teknolojilere sahip olması beklenmektedir. Bağlantılı ve otonom araçların bu özelliklerinin karayolu kapasitesini penetrasyon oranlarına göre farklı düzeylerde iyileştirmesi beklenmektedir. Literatürde bulunan çeşitli sayıda araştırma bu iyileştirmeleri ACC ve CACC gibi özel olarak programlanmış cihazlar aracılığıyla incelemeye başlamışlardır (Van Arem, Van Driel ve Visser, 2006; Vanderwerf, Shladover, Miller ve Kourjanskaia, 2002).

Devamında yapılan çalışmalarda, otonom ve bağlantılı araçların trafik akımında başarılı bir şekilde temsil edilebilmesi için IDM araç takip modelinin uygunluğunu ifade eden çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Derbel, Mourllion ve Basset, 2012; M. Zhou, Qu ve Jin, 2017). İlerleyen zaman aralıklarında otonom araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte bu araçlar için daha küçük zaman aralıkları, tepki süreleri ve sigma değerleri (sürücü kusuru) kabul edilmeye başlanmıştır (Kavas-Torris, Lackey ve Guvenc, 2021; F. Wang, Lu, Dai ve Han, 2021).

Simülasyon ortamında otonom araçların modellenmesi için tercih edilen araç takip modeli Treiber, Hennecke ve Helbing (2000) tarafından geliştirilen IDM'dir. IDM araç takip modeli, takip eden aracın ivmesini; takip eden aracın hızı, takip eden ve lider araçlar arasındaki mesafe cinsinden takip aralığı ve takip eden ile lider araçlar arasındaki hız farkı olarak belirler. IDM model parametreleri sırasıyla; arzu edilen araç hızı, zaman cinsinden takip aralığı, maksimum ivme, arzu edilen yavaşlama ivmesi, ivme üssü, mesafe cinsinden takip aralığı ve araç uzunluğudur. IDM denklemleri ise; ivme denklemi, ivme ve frenleme eğilimi denklemi ve istenilen minimum mesafe ile gerçek mesafe oranı denklemlerini içermektedir. İvme denklemi Denklem(3. 10)'da verilmiştir.

$$\dot{v}_a = a^{(a)} \left[1 - \left(\frac{v_a}{v_0^{(a)}} \right)^\delta + \left(\frac{s^* (v_a, \Delta v_a)}{s_a} \right) \right] \quad (3. 10)$$

Bu denklemde, a , aracın ivmesi, v_a aracın hızı, Δv_a lider araçla olan hız farkı, v_0 aracın arzu ettiği hız, s^* aracın arzu ettiği minimum mesafe cinsinden boşluk, s_a aracın gerçek mesafe cinsinden boşluğu ve δ ise ivme üssüdür (Treiber vd., 2000). Alt ve üst indislerde olan a 'nın "a" aracı olduğu unutulmamalıdır.

İvme ve frenleme eğilimi denklemi, bir aracın arzu edilen negatif ivmesi olan b_{int} 'e dayalı ivme eğilimlerini, araç ivmesi, hızı ve mesafe cinsinde boşluğunu belirler. Denklem (3. 11)(3. 11'de belirtildiği şekliyle:

$$-b_{int}(s_a, v_a, \Delta v_a) := -a^{(a)}(s/s_a)^2 \quad (3. 11)$$

Takip eden araç, lider araca çok yaklaştığında, istenen minimum mesafe ile gerçek mesafe arasındaki farkı dikkate alan bir oran denklemi devreye girer. Bu oran, aracın yavaşlama eğilimini etkiler ve takipçinin negatif ivmesi (yani frenleme kuvveti), arzu edilen minimum takip mesafesi ile mevcut mesafe arasındaki farktan kaynaklanır. Denklem ayrıca lider ve takip eden araçların hızlarını, takip eden aracın lider araca yaklaşma hızını ve aralarındaki istenen takip süresini, yani T değerini, hesaba katar. Aşağıda verilen Denklem (3. 12) bu ilişkiyi tanımlar:

$$s * (v, \Delta v) = s_0^{(a)} + s_1^{(a)} \sqrt{\frac{v}{v_0^{(a)}}} + T^a v + \frac{v \Delta v}{2 \sqrt{a^{(a)} b^{(a)}}} \quad (3. 12)$$

3.3.1.3 EIDM (Extending Intelligent Driver Model) Araç Takip Modeli

Kentsel hareketlilik simülasyonlarında taşıtların simülasyon boyunca yapmış olduğu hareketlerin ve izlemiş olduğu yörüngelerin (trajectories) sonuçları farklı amaçlar doğrultusunda değerlendirilebilmektedir. Bu kapsamda trafik güvenliği çalışmaları başta olmak üzere, araç- araç, araç-yaya etkileşimleri, enerji tüketimi, gibi çok sayıda araştırma konusu çalışılmıştır. Grumert, Ma ve Tapani (2015) yapmış oldukları çalışmada, enerji tüketimi konusunu ileri taşıyarak emisyon değerlerini de dikkate almışlardır. Bu kapsamda yazarlar her ne kadar Krauss modelini kullanmış olsalar da gerçekçi olmayan ivmeler dolayısıyla emisyon üretiminin tutarlılığı eleştiri konusu olmuştur. Salles vd., (2020) ivmeye bağlı hesaplanan değişkenlerin, tutarlılık oranlarının daha yüksek ve doğru sonuçlar vermesi amacıyla gerçekçi ivmeler ve sarsıntıların da (jerk) incelenebildiği genişletilmiş bir IDM modelini EIDM olarak sunmuşlardır.

IDM şerit takip modeli başlangıçta tek şeritli bir model olarak geliştirilmiştir (Kesting, Treiber ve Helbing, 2010). EIDM araç takip modeli ise, Treiber ve Kesting (2017) tarafından önerilen yaklaşımla geliştirilmiş olup, IDM'nin bilinen birçok model uzantısına dayanmaktadır. Ek olarak, şerit değiştirme, dururken hızlanma vb. davranışların farklı sürüş durumlarında sarsıntıyı azaltmak için gerekli hesaplamalarını içermektedir. Genişletilmiş bu modelin amacı tek tek araçların ve sürücülerin mikroskobik ivme profillerini doğru şekilde çoğaltmaktır.

Bu model, şerit değiştirdikten sonra oluşan mesafe cinsinden boşluklar anlık olarak azaldığında yavaşlama ivmesini azaltarak çarpışmayı önler. EIDM modelinde sunulan yeni bir denklem, lider aracın ivmesini $a_n(t)$ 'yi hesaba katarak sabit ivme sezgiselliğini (CAH), $a_{CAH}(t)$ aşağıdaki Denklem (3.13)'de ki gibi hesaplar (Salles vd., 2020);

$$a_{CAH}(t) = \begin{cases} \frac{v_{n-1}^2 \tilde{a}_n}{v_n^2 + 2s(t)\tilde{a}_n} & v_n(v_{n-1} - v_n) \leq -2s(t)\tilde{a}_n \\ \tilde{a}_n - \frac{(v_{n-1} - v_n)^2 \theta}{2s(t)} & \text{yoksa} \end{cases}$$

$$\theta = \begin{cases} 0 & v_{n-1} - v_n < 0 \\ 1 & v_{n-1} - v_n \geq 0 \end{cases}$$

$$\tilde{a}_n = \min(a_n(t), a_{maks}) \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'de verilen θ , Heaviside adım fonksiyonudur. Heaviside adım fonksiyonu, ani değişiklikleri modelleyen ve belli bir noktada sıfırdan bire geçiş yapan bir fonksiyondur. CAH değişkeni IDM'nin bir uzantısı olarak kullanılmaktadır ve bağımsız bir parametre olarak işlev göstermemektedir. Denklem (3.14)'de, ivmelenme olarak ifade edilen a_{ACC} , 0 ile 1 arasındaki değerlere sahip olan yeni bir "soğukkanlılık" parametresi olarak c_{ACC} kullanılarak hesaplanır. Bu parametre, boşluklar azaldığında sürücünün nasıl "soğukkanlı" (sakin-cool) tepki verdiğini tanımlamaktadır (Salles vd., 2020):

$$a_{ACC} = \begin{cases} a_{IDM} \\ (1 - c_{ACC})a_{IDM} + c_{ACC} \left[a_{CAH} + b * \tanh\left(\frac{a_{IDM} - a_{CAH}}{b}\right) \right] \end{cases}, \quad \begin{matrix} a_{IDM} \geq a_{CAH} \\ \text{yoksa} \end{matrix} \quad (3.14)$$

EIDM araç takip modelinde bu güncellemelerin yapılmasıyla birlikte, geçici olarak daha düşük mesafe cinsinden aralıkların kabul edilmesi mümkün olmaktadır. IDM'ye kıyasla, EIDM daha küçük güvenli boşluklar kullanmakta, özellikle şerit değişiklikleri sırasında bu durum daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, şerit değişiklikleri ve duraklama sonrası hızlanma gibi farklı sürüş senaryolarında sarsıntıyı en aza indirmeyi amaçlayan düzenlemeleri de içermektedir. EIDM araç takip modeli 0,05 ila

0,5 saniye arasında değişen zaman aralıklarında optimal performans göstermektedir (SUMO, 2024a).

3.3.2 Şerit Değiştirme Modelleri

Kentsel ulaşımın çok şeritli yollara sahip ağlarında araçlar varış noktalarına ulaşmak için izledikleri rota gereği şerit değiştirme davranışları gerçekleştirirler. Şerit değiştirme davranışlarının, çevresinde bulunan araçları etkilediği ve trafik akımının makroskobik ve mikroskopik özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir (Piu, Herty ve Puppò, 2022; Sarvi ve Kuwahara, 2009). Özellikle yoğun trafik koşullarında trafik akımında araç takip etmek yerine şerit değiştirme davranışlarının daha sık görüldüğü gözlemlenmiştir (Kamala, Rajesh, Singh ve Sharmila, 2021; Piu vd., 2022). Şerit değiştirme modellerinin, ulaşım planlaması, trafik yönetimi ve politikalarının geliştirilmesi de dahil olmak üzere çeşitli çalışmalarında uygulamaları bulunmaktadır. Dolayısıyla, kentsel hareketlilik üzerinde sürücüler için doğru bir şerit değiştirme modelinin geliştirilmesi, model geliştirmenin önemli bir bileşenidir.

Kentsel hareketlilik simülasyonlarında, bir aracın bir simülasyon adımı içinde şerit değiştirme kararını aracın rotası ve aracın çevresindeki mevcut trafik koşulları belirler. Şerit değiştirmek isteyen aracın kendisi ve engel teşkil eden araçların hızlarındaki değişiklikler hesaplanır. Şerit değiştirme manevrası genel olarak, yalnızca hedef şeritte yeterli fiziksel alan olmasına ek olarak ne hedef şeritteki lider araca ne de hedef şeritteki takipçi araca çok yaklaşmadığında şerit değişimi gerçekleşmektedir. SUMO kentsel hareketlilik simülasyonunda her bir simülasyon adımı sırasında aşağıdaki adımlar uygulanır (Erdmann, 2015);

- Tercih edilmesi muhtemel sonraki şeritlerin (bestLane) hesaplanması yapılır.
- Mevcut şeritte kalma varsayımı altında güvenli hızların hesaplanması ve önceki simülasyon adımından şerit değiştirme ile ilgili hız taleplerinin entegrasyonu yapılır.
- Şerit değiştirme modeli sol, sağ ve şeritte kalma talebini hesaplar.
- Şerit değiştirme manevrası varsa yapılır. Yoksa, bir sonraki simülasyon adımı için hız talebinin hesaplanması yapılır. Hız değişikliklerinin talep edilip edilmeyeceği, şerit değiştirme talebinin acillik durumuna bağlıdır.

Her simülasyon adımı sırasında, simülasyonda bulunan bütün araçlar dört alt adımı gerçekleştirir ve herhangi bir araç şerit değiştirme koşulunu karşılıyorsa şerit değiştirme davranışı başlar. Bu süreçte, şerit değiştirme manevralarının başarıyla gerçekleşebilmesi için aracın bulunduğu yol, uzay koordinat sisteminde tanımlanmış olup, her bir aracın kendi pozisyonu bu sistemde izlenir ve değerlendirilir (SUMO, 2024b). Görüldüğü üzere, şerit değiştirme özelliği birçok farklı parametreye bağlı olarak her bir adımında işlem ve hesaplama yükü gerektiren bir olaydır. Yukarıda maddeler halinde verilen adımların her birini ilgilendiren şerit değiştirme model parametreleri ilerleyen başlıklarda detaylı olarak açıklanmıştır. Tez çalışmaları kapsamında simülasyon ortamında tercih edilen şerit değiştirme modeli SL2015 aşağıdaki başlıkta incelenmiştir.

3.3.2.1 SL2015 (Sub-Lane) Şerit Değiştirme Modeli

Simülasyon ortamında şerit değiştirme manevralarının gerçekte var olan davranışlarda benzerlik göstermesi amacıyla geliştirilen modellerden biri de SL2015 modelidir. Simülasyondaki araçların genişlikleri dikkate alınarak yolun tüm genişliği kullanılabilir ve SL2015 modelinde şerit değiştirme manevraları, yolun yanal olarak bölünmüş alt segmentleri (alt şeritler veya 'sub-lanes') üzerinde gerçekleşir. Bu modelde, araçların maksimum yanlamasına ve uzunlamasına hızları gibi kinematik kısıtlamaların tanımlanmasına izin verilmektedir. Mevcut ve istenilen hızlar arasındaki fark, sürüş ajanları arasındaki iş birliği ve mevcut şeritteki güvenlik boşluğu gibi çeşitli faktörlere dayalı olarak şerit değiştirme kararları alınmaktadır (Samiuddin, Boulet ve Wu, 2024). Bu modelde araçlar, belirli bir yanal hizalama elde etmek için niteliklere göre kademeli olarak yanal hareketler gerçekleştirerek şerit değiştirir. Tanımlanan bir şeridin ortasında veya kenarlarından birinde kalma tercihi *vType* özniteliği ile belirlenir. Diğer şerit değiştirme modellerinden farklı birçok parametreyi içinde barındıran bu modelde güvenli yanal boşluklar '*minGapLat*' fonksiyonu ile tanımlanır (SUMO, 2024c).

SL2015 şerit değiştirme modeli, yoğun trafikte tanımlanmış olan iki şeritte paralel olarak üç aracın gitmesine müsaade etmektedir. Yanal ivme ve hız, sollama sırasında iki şeridin bloke edilmesi, agresif sürücüler tarafından yanal taciz edilme durumları ve şerit değiştirme sırasında dinamik uzunlamasına boşluk durumları SL2015 modelinde

detaylı olarak incelenebilmektedir. Ayrıca, araçlar şerit değiştirme kararı alırken ve bu süreci gerçekleştirirken belirtilen koordinatlara tam uyum sağlayacak şekilde boylamasına ve yanal konumlandırılacaktır.

Trafik simülasyonlarında genel anlamda varsayılan olarak, bir araç bir simülasyon adımında tamamen orijinal şeritte konumlanırken bir sonraki simülasyon adımında tamamen hedef şeritte konumlanacak şekilde simüle edilmektedir. Simülasyon ortamlarında açık kaynak kodları kullanılarak geliştirilen modeller, çok fazla sayıda parametreye müdahale imkânı tanıyarak saha koşullarının daha iyi simüle edilebilmesine olanak tanımaktadır. Alekszejenkó ve Dobrowiecki (2019), otonom araçlarda ‘katar’ (platooning) konusunu incelerken katar halinde şerit değiştirme olanağını mümkün kılmak için SL2015 şerit değiştirme modelini geliştirerek SmartSL2015 haline dönüştürmüştür. Otonom araçlarda bulunan sensör teknolojisi düşünüldüğünde, tez çalışmaları kapsamında bu araçların müdahale edilebilir ve detaylı incelenebilmesi amacıyla SL2015 modeli şerit değiştirme modeli olarak tercih edilmiştir.

3.3.3 Ulaşım Ağlarının Oluşturulması

Kentsel alanlarda ulaşım ağlarının oluşturulması, tek boyutlu bir yaklaşımın ötesine geçerek çeşitli ulaşım ihtiyaçlarını karşılayabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Kentsel hareketlilik ortamları, araştırma sorularını yanıtlamak, trafik yönetimi stratejilerini ve etkilerini değerlendirmek veya test etmek için etkili araçlar sunar. Almanya Federal Cumhuriyeti Ulusal Havacılık ve Uzay Araştırma Merkezi ile DLR Ulaştırma Sistemleri Enstitüsü tarafından 2001 yılından beri geliştirilen açık kaynak kodlu bir yazılım aracı olan SUMO kentsel hareketlilik simülatörü karayolu taşıtları, toplu taşıma sistemleri ve yayalar dâhil olmak üzere intermodal trafik sistemlerinin modellenmesine olanak tanımaktadır (SUMO, 2024b).

Kentsel hareketlilik kavramı, şehirlerde gerçekleşen tüm ulaşım faaliyetlerini kapsayan bir yapıdır. Bu ortam, motorlu taşıtlar, bisikletler, yayalar ve toplu taşıma gibi farklı ulaşım modlarını içerir ve bu modların birbirleriyle olan etkileşimlerini, yolların, kaldırımların, kavşakların ve diğer altyapı unsurlarının nasıl kullanıldığını ele alır. Ek olarak, sadece fiziksel altyapıyı değil, aynı zamanda kullanıcıların

davranışlarını, trafik kurallarını, ulaşım politikalarını ve çevresel faktörleri de içine alan çok boyutlu bir sistemdir. Bu ortamın simülasyonlarla modellenmesi, sahada meydana gelen ulaşım dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasına ve farklı ulaşım senaryolarının etkilerinin incelenmesine olanak sağlar. Açık kaynak kodlu ortamlar, özellikle SUMO gibi araçlar, "black box" (kara kutu) olarak adlandırılan, arka planda nasıl işlemlerin gerçekleştiğini bilmediğimiz kapalı sistemlerden ayrılır. Açık kaynak olması sayesinde SUMO, kullanıcıya simülasyonun tüm işleyişine erişim sağlar; tüm algoritmalar, süreçler ve hesaplamalar görünür durumdadır. Böylece kullanıcı, kodları inceleyebilir, anlayabilir ve gerekirse simülasyonun varsayımlarını veya bileşenlerini kendi araştırma ihtiyaçlarına göre düzenleyebilir. SUMO'da ulaşım ağlarının tasarımı, rota hesaplama, görselleştirme, emisyon hesaplama gibi çok sayıda destekleyici araçlar geliştirilebilmektedir. Ek olarak, simülasyonların uzaktan kontrol edilmesini sağlayan TraCI (Traffic Control Interface) ara yüzüyle API (Application Programming Interface)'lar geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bir kentsel hareketlilik simülasyonunu başlatmak için temel olarak iki farklı bilgi olması gereklidir:

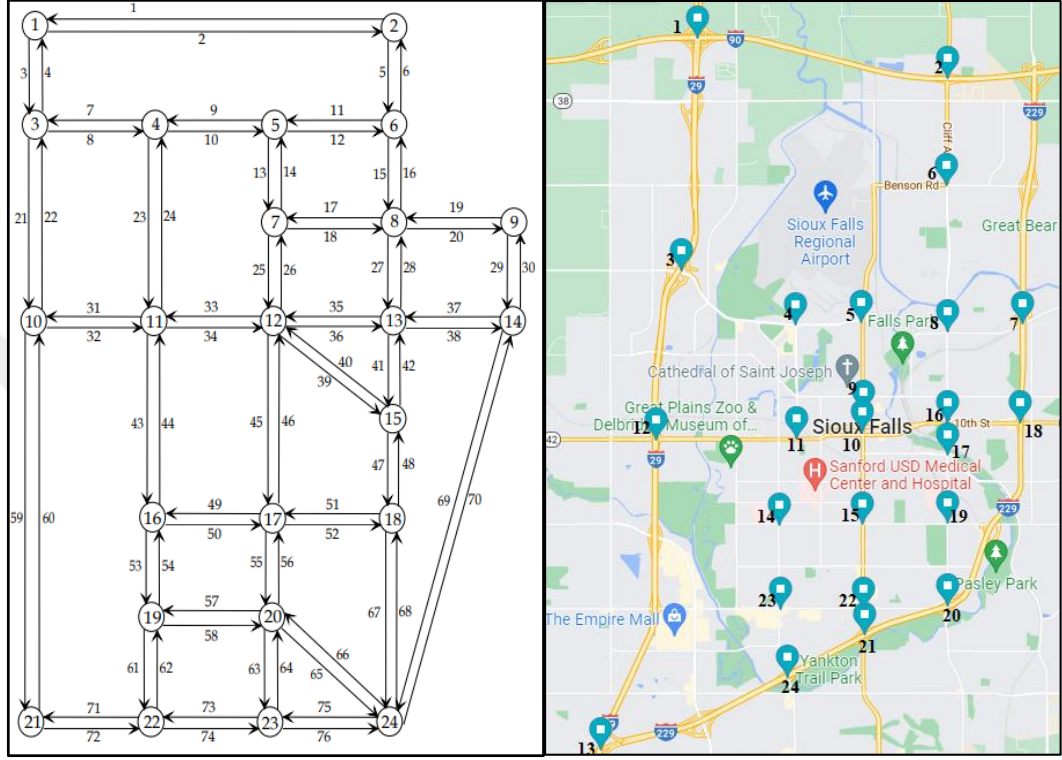
- Ağ topolojisi (*.net.xml)
- Trafik Talepleri (*.rou.xml)

Bir ağ topolojisi; karayolları, kavşaklar, demiryolları, yaya yolları, su yollarından oluşmaktadır. Trafik taleplerinde ise ağ boyunca belirli bir düzende hareket eden otomobillerin, ağır taşıtların, tramvayların veya insanların tanımlanması yapılmaktadır. Ağ ve talep dosyaları, kentsel hareketlilik ortamında bir simülasyonun çalıştırılması için tanımlanması gereken bir konfigürasyon dosyasında birleştirilmelidir.

3.3.3.1 Sioux Falls Ulaşım Ağı

Ulaşım ağı problemlerinin çözümü için geliştirilen yöntemlerin sınanması için çeşitli test ağları kullanılır. Literatürde sıklıkla kullanılan teorik bir ulaşım ağı olan Sioux Falls ağı, 24 düğüm ve 76 bağlantıdan oluşur. Şekil 3. 6'da bu teorik ağın Sioux Falls şehrindeki gerçek ulaşım ağıyla (2024) karşılaştırması görülmektedir. Ulaşım ağlarının tasarımında kullanılan birçok test ağının temel parametreleri, yolcu dağılım

matrisleri ve harita üzerindeki coğrafi koordinatları Github platformu üzerinden herkesin erişimine açık bir şekilde paylaşılmaktadır. Sioux Falls test ağı oluşturulurken, bu platform üzerinden sağlanan bilgilerden faydalanılmıştır (Stabler, 2024).



Şekil 3. 6 Sioux Falls şehri test ağı ve gerçek ulaşım ağı

LeBlanc, Morlok ve Pierskalla (1975) çalışmalarında, Sioux Falls şehri için günlük trafik hacimlerine göre B/V matrisini tanımlamıştır. B/V matrisinde matris değerlerinin bin araç biriminde olduğunu ifade etmiştir. Ancak Abdulaal ve Leblanc (1979)'da bir hata yaptıklarını ifade ederek birimi yüz araç olarak değiştirmişlerdir. Zirve saatlerde oluşacak trafiğin günlük trafik hacminin %10'u kabul edildiğinden, Tablo 3. 5'te verilen B/V matrisi test ağındaki talepler oluşturulurken, orijinal LeBlanc vd., (1975)'de verilen matristeki değerlerin %10'u olarak devam edilmiştir.

Tablo 3. 5 LeBlanc vd., (1975) yılı Sioux Falls ulaşım ağı B/V matrisi

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	100	100	500	200	300	500	800	500	1300	500	200	500	300	500	500	400	100	300	300	100	400	300	100
2	100	0	100	200	100	400	200	400	200	600	200	100	300	100	100	400	200	0	100	100	0	100	0	0
3	100	100	0	200	100	300	100	200	100	300	300	200	100	100	100	200	100	0	0	0	0	100	100	0
4	500	200	200	0	500	400	400	700	700	1200	1400	600	600	500	500	800	500	100	200	300	200	400	500	200
5	200	100	100	500	0	200	200	500	800	1600	500	200	200	100	200	500	200	0	100	100	100	200	100	0
6	300	400	300	400	200	0	400	800	400	800	400	200	200	100	200	900	500	100	200	300	100	200	100	100
7	500	200	100	400	200	400	0	1000	600	1900	500	700	400	200	500	1400	1000	200	400	500	200	500	200	100
8	800	400	200	700	500	800	1000	0	800	1600	800	600	600	400	600	2200	1400	300	700	900	400	500	300	200
9	500	200	100	700	800	400	600	800	0	2800	1400	600	600	600	900	1400	900	200	400	600	300	700	500	200
10	1300	600	300	1200	1000	800	1900	1600	2800	0	4000	2000	1900	2100	4000	4400	3900	700	1800	2500	1200	2600	1800	800
11	500	200	300	1500	500	400	500	800	1400	3900	0	1400	1000	1600	1400	1400	1000	100	400	600	400	1100	1300	600
12	200	100	200	600	200	200	700	600	600	2000	1400	0	1300	700	700	600	200	300	400	300	700	700	500	0
13	500	300	100	600	200	200	400	600	600	1900	1000	1300	0	600	700	600	500	100	300	600	600	1300	800	800
14	300	100	100	500	100	100	200	400	600	2100	1600	700	600	0	1300	700	700	100	300	500	400	1200	1100	400
15	500	100	100	500	200	200	500	600	1000	4000	1400	700	700	1300	0	1200	1500	200	800	1100	800	2600	1000	400
16	500	400	200	800	900	1400	2200	1400	4400	1400	700	600	700	1200	0	2800	500	1300	1600	600	1200	500	300	0
17	400	200	100	500	200	500	1000	1400	900	3900	1000	600	500	700	1500	2800	0	600	1700	1700	600	1700	600	300
18	100	0	0	100	0	100	200	300	200	700	200	200	100	100	200	500	600	0	300	400	100	300	100	0
19	300	100	0	200	100	200	400	700	400	1800	400	300	300	300	800	1300	1700	300	0	1200	400	1200	300	100
20	300	100	0	300	100	300	500	900	600	2500	600	500	600	500	1100	1600	1700	400	1200	0	1200	2400	700	400
21	100	0	0	200	100	100	200	400	300	1200	400	300	600	400	800	600	600	100	400	1200	0	1800	700	500
22	400	100	100	400	200	200	500	500	700	2600	1100	700	1300	1200	2600	1200	1700	300	1200	2400	1800	0	2100	1100
23	300	0	100	500	100	100	200	300	500	1800	1300	700	800	1100	1000	500	600	100	300	700	700	2100	0	700
24	100	0	0	200	0	100	100	200	200	800	600	500	700	400	400	300	300	0	100	400	500	1100	700	0

Sioux Falls test ağı oluşturulduktan sonra B/V matrisindeki toplam 552 B/V çiftinin xml dosyasında açık kaynak kodlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu aşamada Excel’de B/V çiftlerine ait talepler makro hücrelerle birleştirilmiştir ve SUMO ortamında kullanılacak düzeye getirilmiştir. Örnek olarak;

<routes> ...

flow id = "flow_1" begin = "0.00" fromJunction = "N1" toJunction = "N2" end = "3600.00" vehsPerHour = "100.00"/>

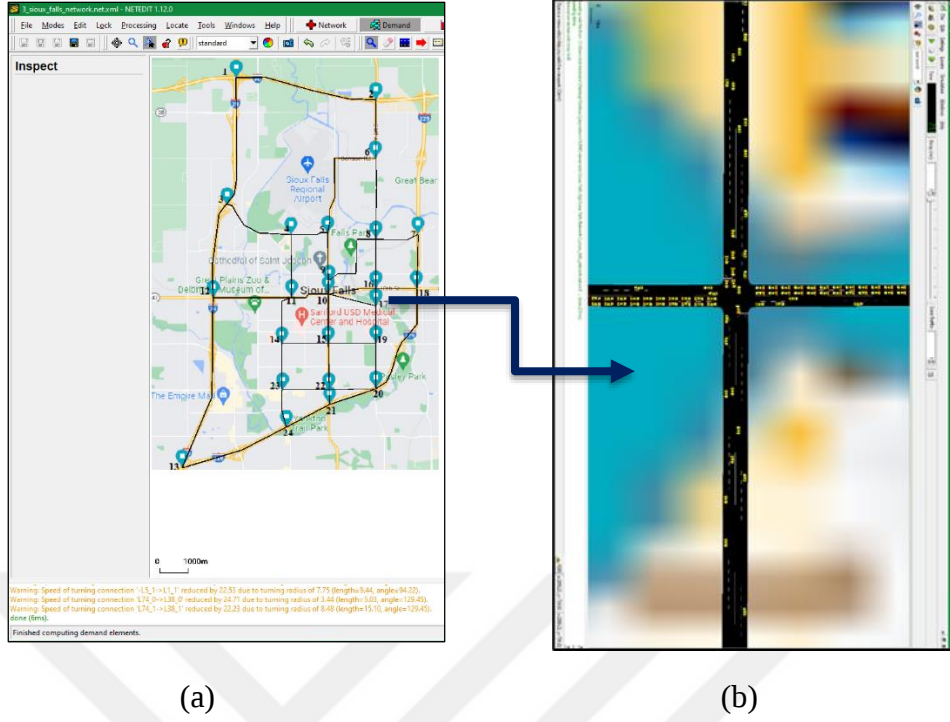
flow id = "flow_2" begin = "0.00" fromJunction = "N1" toJunction = "N3" end = "3600.00" vehsPerHour = "100.00"/>

...

flow id = "flow_552" begin = "0.00" fromJunction = "N24" toJunction = "N23" end = "3600.00" vehsPerHour = "700.00"/>

</routes>

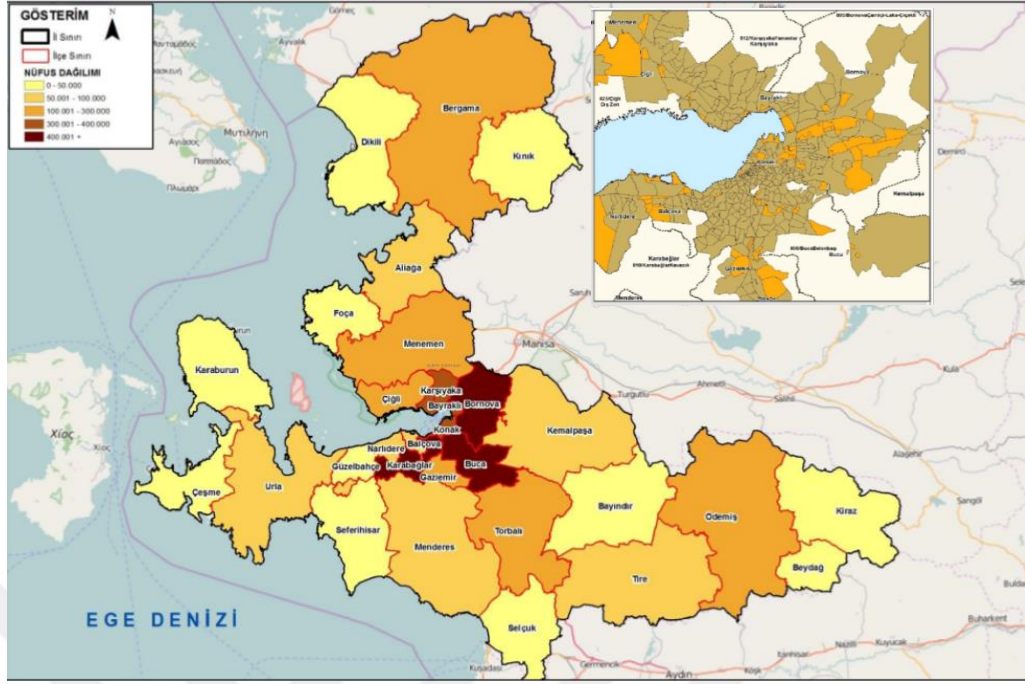
Sioux Falls ulaşım ağı SUMO ortamında oluşturulup talep matrisi xml formatında hazırlanmıştır ve sumogui ortamında simülasyonlar başarıyla çalıştırılmıştır. Şekil 3. 7(a) ve Şekil 3. 7(b)’de netedit ve sumogui ortamında oluşturulan Sioux Falls ulaşım ağından örnek görüntüler verilmektedir.



Şekil 3. 7 Netedit ve sumogui ortamından örnekler

3.3.3.2 İzmir Kentsel Ulaşım Ağı

İkinci aşama olarak İzmir kent ulaşım ağının oluşturulmasına karar verilmiştir. İzmir kenti 11.892 km² yüz ölçümüne sahip olup 11 merkez olmak üzere toplamda 30 ilçesi bulunmaktadır. Şehir merkezi, karayolu, demiryolu, havayolu ve denizyolu türleriyle ulaşılabilir nitelikteki kentler arasında yer almaktadır. İzmir şehrinin ilçelerinin nüfus dağılımları Şekil 3. 8'de görülmektedir. En yoğun nüfus merkez ilçelerde toplanırken genellikle merkezden uzaklaştıkça nüfus azalmaktadır.



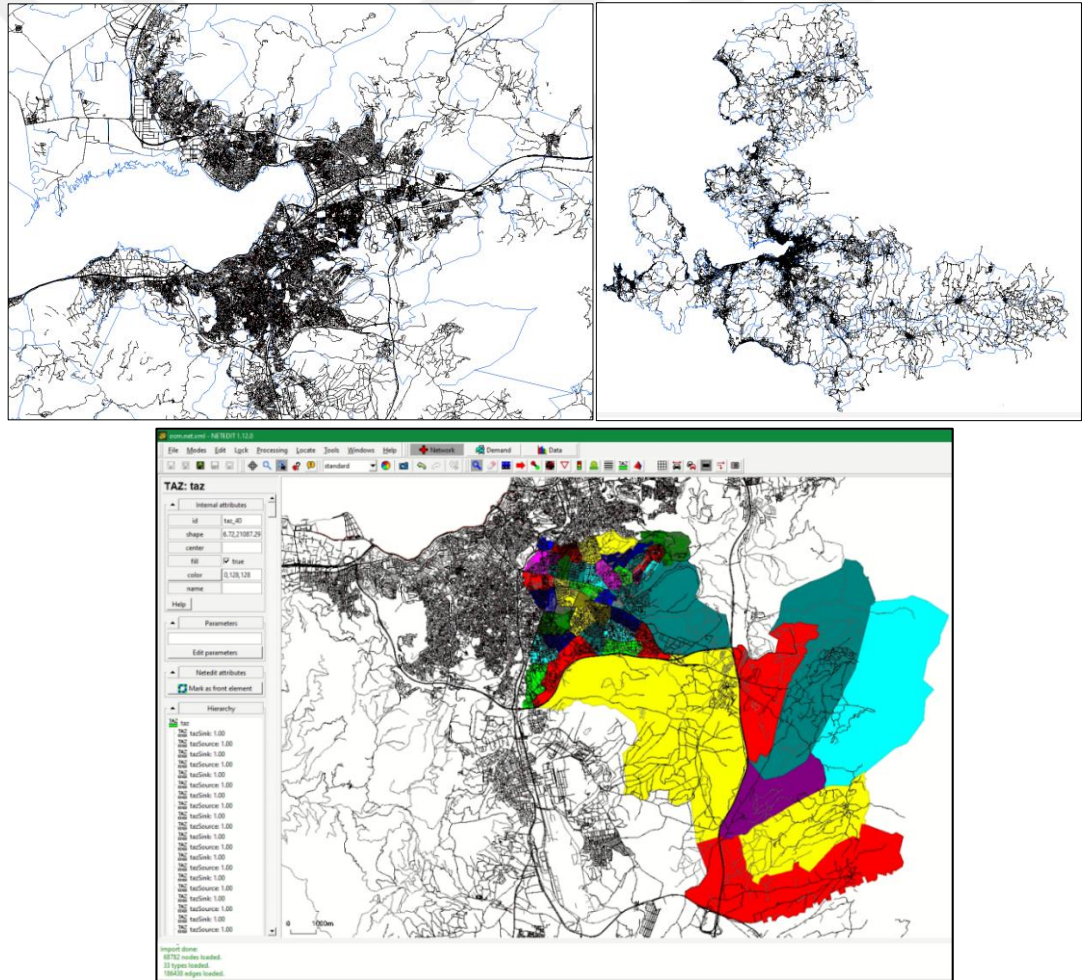
Şekil 3. 8 İzmir ili ilçe bazlı nüfus dağılımı

Bu çalışmada, yöntemin test edilmesi için İzmir kentsel ulaşım ağı tercih edilmiştir. İzmir, Türkiye'nin en büyük şehirlerinden biri olarak karmaşık bir ulaşım sistemine sahiptir ve yüksek nüfus yoğunluğuyla dikkat çekmektedir. Bu ağ, büyükşehirlerde karşılaşılan trafik sorunlarını temsil etmesi ve gerçek kentsel verilerin kullanılmasına olanak sağlaması bakımından çalışmanın genel geçerliliğini artıran önemli bir model sunmaktadır. Ayrıca, şehrin ana arterlerindeki trafik yoğunluğunun değişkenlik göstermesi, farklı trafik koşullarının incelenmesi için uygun bir zemin hazırlamıştır.

Ulaşım planlarında, çalışma alanı alt birimlere ayrılarak toplanan veriler bu birimler kapsamında incelenmektedir. Ülkemizde en küçük idari birim mahalleler olduğundan çalışma bölgesi TAZ esas alınarak incelenmiştir. Ek olarak, İzmir sınırları içerisindeki mahalleler, arazi kullanım özellikleri ve sosyoekonomik durum benzerlikleri göz önünde bulundurularak bazı zonların birleştirilmesi veya bölünmesi işlemleri yapılmıştır. Üniversiteler, organize sanayi bölgeleri, havalimanları, limanlar, alışveriş merkezleri vb. noktalar özel çekim merkezleri kabul edilmiştir.

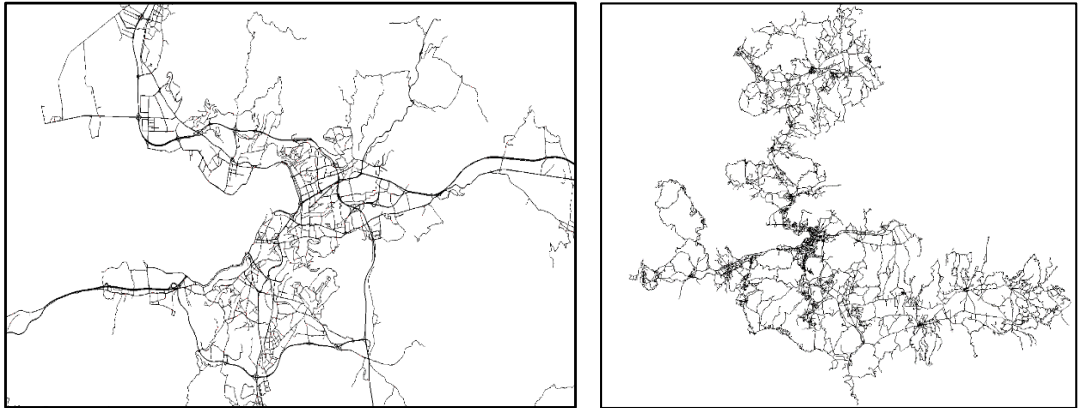
OSM, insanların kolayca erişebileceği bir harita servisi olarak kullanılmaktadır. Tüm dünyadaki mekânlar, yollar, ulaşım sistemleri vb. günlük hayatta kullanılan

hareket alanlarının ve noktalarının verisi bu altyapı altında bulunmaktadır. SUMO ortamında oluşturulan simülasyonlarda şerit genişliği, şerit sayısı, yaya geçitleri, otoyollar ve daha birçok gerçek hayattaki yol geometrik elemanlarına ait veriler OSM yardımıyla alınmıştır. Tez çalışmaları kapsamında İzmir ilinin bütün ilçelerini kapsayan mahallelerden oluşan TAZ'ler ve özel zonlar oluşturulmuştur. İzmir kentsel ulaşım ağı OSM aracılığıyla 68782 düğüm ve 186438 bağlantı verisi olacak şekilde SUMO ortamına aktarılmıştır. Nedit ortamında İzmir kent merkezinde toplamda 807 TAZ tanımlanmıştır ve talep matrisi kullanıma hazır hale getirilmiştir. Şekil 3. 9'da İzmir kent ulaşım ağına ait oluşturulan TAZ'ler ve örnek olarak Buca ilçesine ait olanlar görülmektedir.



Şekil 3. 9 İzmir kentsel ulaşım ağı

İzmir ulaşım ağına ait verilerin düzenlenmesi kapsamında ilk olarak 2015 İzmir ulaşım ana planı (UPİ2030) kapsamında kullanılan B/V matrisindeki seyahat talepleri Matlab ortamında işlenmiştir (İzmir Büyükşehir Belediyesi [İBB], 2019). Otonom araçların otonomluk seviyelerine bağlı olarak B/V noktalarına göre açık kaynak kodlarının oluşturulması bu kodların sumocfg ortamında kullanılabilecek duruma getirilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, OSM üzerinden elde edilen İzmir ulaşım ağına filtreleme işlemleri aracılığıyla sadeleşme yoluna gidilmiştir. Öncelikle linklerin önem derecelerine göre sınıflandırılması yapılmıştır. Daha sonra belirli önem derecesinin altındaki linklerin (ara sokaklar, site içi yollar vb.) ağdan kaldırılması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, bisiklet yolları, yaya aksları, demiryolları, ucu açık kalmış düğüm elemanları vb. birçok eleman filtreleme yöntemiyle ağdan çıkarılmıştır. Filtreleme işlemi, ağın daha sade bir hale getirilmesini sağlayarak simülasyonların yapılabilir konumlara gelmesini sağlamıştır. Özellikle, daha az karmaşık bir ağ yapısı sayesinde modellerin işlem süresi oldukça kısalmıştır. Bu olumlu yansımaların yanı sıra filtreleme işleminin getirdiği bazı olumsuz durumlar da oluşmaktadır. Ağın sadeleşmesi, özel trafik koşullarına sahip bazı bölgelerde sonuçların genelleştirilmesini zorlaştırabilir. Özellikle bazı alternatif kısa ve yoğun olmayan güzergahların kaldırılması özel durum senaryolarında modelin esnekliğini sınırlayabilir. Şekil 3. 10'da İzmir kent ulaşım ağına Şekil 3. 9'da tanımlanmış ilk halinin devamında gerçekleştirilen filtreleme işlemlerinden sonraki hali görülmektedir.



Şekil 3. 10 Filtreleme işlemleri sonrasında İzmir kent ulaşım ağı

Şekil 3. 9 ve Şekil 3. 10’de görüldüğü üzere, Nedit ortamında görüntülenen İzmir ulaşım ağı büyük ölçüde sadeleştirilmiş olup trafik atama sonrasında güzergâhlar elde edilebilmektedir. Sioux Falls ulaşım ağında gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen değerlendirmelerin, İzmir ulaşım ağında güncel ulaşım verileriyle de elde edilmesi hedeflenmiştir.

3.3.4 Otonom Araçların Modellenmesi

Otonom araçların küresel olarak yaygınlaşmasıyla birlikte, kentsel hareketliliği nasıl değiştireceği konusu ve bu değişimin tüm yönleri henüz tam olarak anlaşılmamış durumda olduğundan belirsizliğini korumaktadır. Otonom araçlardaki sürekli gelişmeler gelecekte insanların bu yeni ulaşım moduyla birlikte sürüş şeklinin önemli ölçüde etkileneceğine işaret etmektedir (Saha ve Motuba, 2023). Simülasyon ortamları, trafik akımlarının gerçek yol geometrisine uygun olarak yapılandırılması, modellenmesi ve analizi için geniş bir çerçeve sunmaktadır. Bu çerçevede, araç parametreleri farklı senaryolarda sürücü kontrolünü temsil edebilecek şekilde ayarlanabilen araç takip ve şerit değiştirme modellerini içermektedir.

Otonom araçların kentsel alanlar üzerindeki etkilerini uygun şekilde modellemek için, farklı otonomluk seviyelerine dayalı parametre değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Gemma, Cipriani, Crisalli ve Mannini, 2022; Kaltenhäuser, Hamzahi ve Bogenberger, 2023). Teknolojik ilerlemelere bağlı olarak, tam sürücü kontrolü ile işleyen araçlar Seviye 0 (otomasyon yok) olarak tanımlanırken, hiçbir sürücü etkisi olmadan işleyen araçlar Seviye 5 (tam otomasyon) olarak tanımlanır (Şekil 3. 11). Her seviye, aracın yeteneklerini ve sürücü müdahale gereksinimini belirtir (On-Road Automated Driving [ORAD] Committee, 2021). Otonom araçların özdevinim seviyelerine ayrılması sadece teknik bir ayrım sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bu teknolojinin benimsenmesinde, yasal düzenlemelerin oluşturulmasında ve güvenliğin sağlanmasında da önemli bir rol oynar (Favarò, Eurich ve Nader, 2018; Imai, 2019).



Şekil 3. 11 Farklı özdevinim düzeyleri (Höb ve Lepke, 2011)

Otonom araçlar ile insan kontrollü araçlar arasındaki farkı modellemek için tipik olarak kullanılan minimum zaman cinsinden takip aralığı olan ‘tau’ parametresi, sürücü kusurlarını temsil eden ‘sigma’ parametresi ve hız sınırına bağlılık ‘hız faktörü’ gibi bazı kalibrasyon parametreleri bulunmaktadır. Otonom araçların belirlenen ulaşım ağlarında doğru bir şekilde modellenebilmesi için taşıt türleri içinde doğru sürüş modellerinin tanımlanması ve mevcut modellere gerekli modifikasyonların yapılması gerekmektedir. Örneğin, Lackey (2019) yapmış olduğu çalışmada SUMO’da tanımlı IDM araç takip modeli ve LC2013 şerit değiştirme modellerini modifiye ederek otonom araçların parametrelerini belirlemiştir. Modifiye edilmiş modeller 2-3-4. özdevinim seviyelerindeki sürücüsüz taşıtlar ve sürücüsüz olmayan taşıtlar içinde insan sürücü saldırganlığının farklı seviyelerini yansıtarak geliştirmiştir.

Çalışmalar kapsamında, otonom araçlarla ilgili yapılmış çalışmalar literatürden incelenerek, ortak noktaların tanımlanması yapılmıştır ve bu kapsamda SUMO araç takip ve şerit değiştirme modelleri oluşturulmuştur. Otonom araç parametreleri, gelecekteki çeşitli koşullar ve otomasyon düzeyleri dikkate alınarak literatürdeki akademik çalışmalara dayalı olarak belirlenmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan otonom araç parametreleri Tablo 3. 6’da verilmiş olup, parametrelere ait detaylı açıklamalar ve parametre değerleri belirlenirken dikkate alınan referans çalışmalar EK-D’de yer alan Tablo D.1’de verilmiştir. Bu parametrelerle birlikte otonomluk seviyelerinin belirlenmesinde Tablo 3. 6’da verilen parametrelerle birlikte toplamda 65 farklı araç parametresi kullanılmıştır (EK-D, Tablo D.2). Tablo D.2’de kullanılan otonom araç parametrelerine ilişkin detaylı açıklamalar SUMO web sitesinde paylaşılmıştır (SUMO, 2024d).

Tablo 3. 6 Açık kaynak kodlu simülasyon ortamında literatürde yaygın olarak kullanılan otonom araç parametreleri

Parametreler	Seviye 0	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
<i>carFollowingModel</i>	Krauss	Krauss	IDM	EIDM	EIDM	EIDM
<i>laneChangeModel</i>	SL2015	SL2015	SL2015	SL2015	SL2015	SL2015
<i>minGap</i>	2,5	2	1,5	1,25	0,75	0,5
<i>accel</i>	2,6	2,6	3,05	3,5	3,6	3,8
<i>speedFactor</i>	normc(1,0,0,10,0,20,2,0)	normc(1,0,0,1,0,99,1,01)	normc(1,0,0,1,0,99,1,01)	normc(1,0,0,1,0,98,1,02)	normc(1,0,0,1,0,98,1,1)	normc(1,0,0,1,0,98,1,1)
<i>tau</i>	1	1,2	1,6	1,2	0,9	0,6
<i>sigma</i>	0,5	0,4	0,3	0,2	0,05	0,01
<i>lcStrategic</i>	1	1,1	1,2	1,6	3	5
<i>lcCooperative</i>	0,2	0,3	0,5	0,6	1	1
<i>lcSpeedGain</i>	0,9	1,1	1,2	1,6	5	10
<i>lcLookaheadLeft</i>	2	2	2	2,5	3	3,5
<i>lcOpposite</i>	2	1,5	1	0,6	0,3	0,1
<i>lcPushy</i>	0,25	0,25	0,2	0,1	0	0
<i>lcAssertive</i>	1	1	1	2	3	3
<i>emissionClass</i>	PC-G-EU4	PC-G-EU4	PC-G-EU4	MMPEVEM	MMPEVEM	MMPEVEM
<i>actionStepLength</i>	0,9	0,9	0,9	0,6	0,3	0,3
<i>stepping</i>	-	-	0,25	0,15	0,1	0,05

Özdevinim seviyelerinin değişimine göre parametre değerlerinin değişim nedeni, teknoloji ilerledikçe daha fazla otonom araç güvenliğini ve etkinliğini temsil etmesidir. IDM parametrelerinden sürücü kusuru olarak kabul edilen ‘sigma’ parametresinin özdevinim seviyesi arttıkça belirgin bir şekilde azalacağı kabulü yapılabilir (Kavas-Torris vd., 2021; Lackey, 2019; Lu, Tettamanti ve Varga, 2018). Gelişecek teknolojiyle birlikte kullanıcıların daha güvenli ortamda varış noktalarına daha hızlı ulaşma isteğinden dolayı hız sınırından sapmalar hesaplamalara katılmaktadır. ‘speedFactor’, üreticilerin araçlarına göre tasarladıkları olası hız sapmalarını dikkate almaktadır. Farklı özdevinim düzeylerine göre otonom araçların %95’inin hız dağılımlarının belirlenen karayolu hız sınırlarını belirli yüzdelerin altında ve üstünde kullanacak dağılıma göre sürülmesine izin vermektedir.

Farklı düzeylerdeki otonom araçların şerit değiştirme modeli olan SL2015 yaklaşım parametrelerinde, özdevinim seviyesi arttıkça otonom araçların yavaş taşıtların arkasından takip ettiği durumlarda hız kazanmak için şerit değiştirdiği durumları temsil eden ‘lcSpeedGain’ parametresinin değeri artmaktadır. Benzer şekilde, otonom araçların mevcut şeridinde bir yavaşlamaya ulaşmadan şerit değişikliğini daha fazla yapabileceği kabulüne dayanarak taşıtların solundan geçilerek şerit değişikliğine

yönelik stratejiler (lcStrategic) özdevinim seviyesiyle arttığı kabul edilmiştir. Otonom araçların diğer araçlarla koordineli bir şekilde iletişim içinde olacağı (lcCooperative) varsayılarak şerit değiştirme durumlarının geleneksel araçlara göre yüksek tutulduğu düşünülmüştür. LC2013 ve SL2015 modellerinde, 'IcSpeedGainRight' parametresi hız kazanmak için sağ şeride geçme davranışını temsil etmektedir. Ancak, varsayılan olarak bu değer sabit tutulmuştur, çünkü otonom araçların genellikle sol şeritten geçiş yapacağı kabul edilmektedir. Sonuç olarak, otonom araçların öndeki ve arkadaki araçlarla olan mesafeleri, araç takip modelleri parametreleriyle belirlenmiştir. Bu nedenle, şerit değiştirme parametrelerinden bazıları, özdevinim seviyesindeki değişikliklere rağmen sabit kalabilir.

Otonom araçları açık kaynak kodlu bir ortamda tanımlamanın en büyük avantajı, parametre sayılarının diğer simülasyon ortamlarına göre çok olması ve daha ayrıntılı olarak tanımlanabilmesidir. Diğer bir avantajı ise yaygın olarak kullanılan şerit değiştirme ve araç takip modellerinin yanı sıra yenilikçi yaklaşımların da test edilmesine olanak sağlamasıdır. Örneğin, Alt Şerit şerit değiştirme modeli- SL2015 (Erdmann, 2015), IDM (Treiber ve Kesting, 2017), EIDM yaklaşımları (Salles ve Kaufmann, 2020) ve MMP'nin elektrikli araç emisyon modeli (MMPEVEM) (Koch vd., 2021) bu simülasyon ortamında uygulanabilmektedir. Ayrıca, özdevinim seviyelerine göre tanımlanan otonom araçlara simülasyon ortamında özel olarak geliştirilmiş cihazlar eklenebilmektedir. Bu cihazlar, geliştirilmiş araç takibi ve şerit değiştirme modellerine ek olarak, tanımlanan araç türlerinin özdevinim seviyelerine göre "otonom" özellikler kazanmasını sağlar.

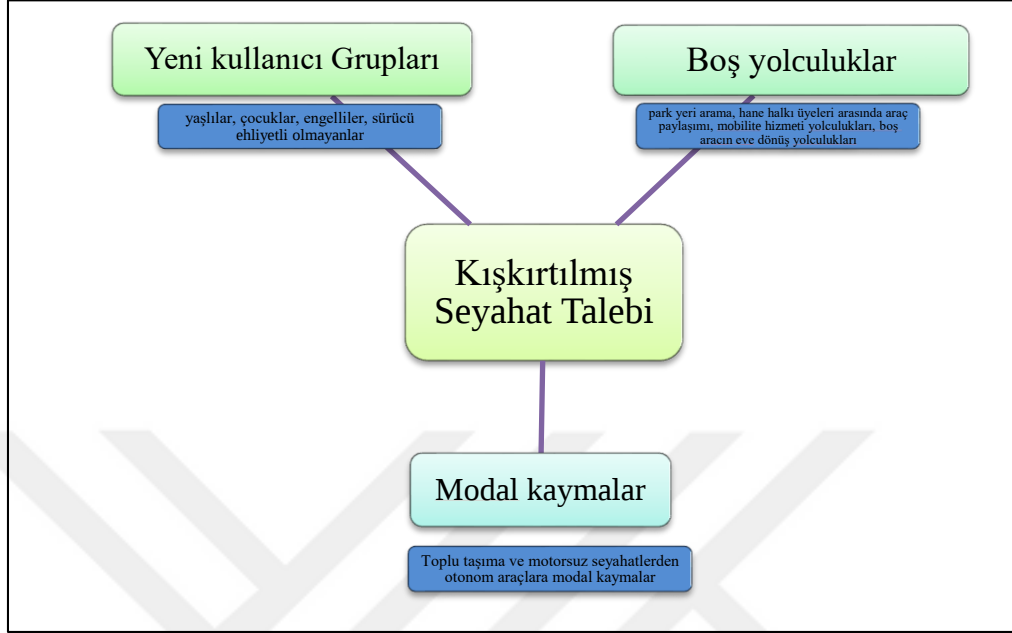
3.4 Kısırlanmış Talep ve Kentsel Ulaşım Verileri

Bu bölümde, kısırlanmış talep ve kentsel ulaşım verileri alt başlıklar halinde detaylı olarak incelenmiştir.

3.4.1 Kısırlanmış Talep

Otonom araçlar gibi yeni ulaşım türlerinin ortaya çıkması ve yaygınlaşmasıyla birlikte yeni kullanıcı gruplarının oluşması, boş yolculuklar ve seyahat taleplerinde mod değişimlerinin yaşanması kaçınılmazdır. Tez çalışmaları kapsamında, kısırlanmış

talep bileşenleri yeni kullanıcı grupları, boş seyahatler ve modal değişim başlıkları altında Şekil 3. 12’de olduğu gibi detaylandırılmıştır.



Şekil 3. 12 Kışkırtılmış seyahat talebi bileşenleri

Bu doğrultuda, B/V matrisinde yeni kullanıcı grupları etkisi altında ve toplu taşıma kullanıcıları ile motorsuz taşıt kullanıcıları tarafından gerçekleştirilen modal kaymaların seyahat talepleri Denklem (3. 15)’de verilen bağıntıya göre güncellenmiştir.

$$D'_{ij} = D_{ij} + \left[D_{ij} * \left(\frac{d_{yeni_kul} + d_s}{100} \right) \right] \quad \forall i, j \quad (3. 15)$$

Burada, D_{ij} belirli bir B-V noktası çifti (i,j) için güncellenmiş seyahat talebini temsil etmektedir. d_{yeni_kul} , yeni kullanıcı gruplarının seyahat talebindeki artış yüzdesini, d_s ise toplu taşıma ve motorsuz taşıt kullanıcılarının B/V noktaları aynı kalırken meydana getirdikleri türel değişimlerin yüzdesini temsil etmektedir.

Boş yolculukların B/V matrisi üzerine etkisi ise otonom araç fiyatlandırmalarının gelecekteki düzenlemelerine bağlı olduğundan otonom araç senaryolarında üç düzeyde boş yolculuk varsayımı yapılmıştır. Tez organizasyonuna göre, Aşama 2’de kışkırtılmış talep senaryolarında literatüre dayalı olarak bir kişi için günde 2,86 araç

yolculuğu varsayımı yaptığı kabul edilmiştir. Buna göre boş yolculukların oran esas alınarak kişi başı günlük 0,5, 1 ve 1,5 boş yolculuk yapacağı varsayımı yapılmıştır. Boş yolculukların yarattığı talep artışı Denklem (3.16)'ye göre B/V talep matrisinde uygulanarak değerler güncellenmiştir. D''_{ij} , Denklem (3. 15)'de güncellenmiş olan seyahat talep matrisinin boş yolculuklar etkisi altında tekrar güncellenmiş halidir.

$$D''_{ij} = D'_{ij} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{2.86}\right) \quad \beta \in \{0.5, 1.0, 1.5\} \quad \forall i, j \quad (3.16)$$

Literatürde incelenen akademik çalışmalardan elde edilen varsayımlar ışığında; tez organizasyonunda Aşama 2'de gerçekleştirilen Sioux Falls teorik ağında ve İzmir kent ulaşım ağındaki kısıktırılmış talep simülasyonlarında Tablo 3. 7'de verilen parametre değerleri yeni kullanıcılar, modal kaymalar ve boş yolculuklar için kullanılmıştır. Bu kapsamda, toplamda 14 farklı senaryo, 3 farklı kategoride kısıktırılmış talep etkisi altında düzenlemiştir. Bunun yanı sıra otomasyon düzeyi arttıkça Seviye 4 ve Seviye 5 otonom araçların yüzdesi artacağından talebin de artacağı varsayımından hareketle simülasyon senaryoları planlanmıştır.

Tablo 3. 7 Otonom araç senaryolarında kısıktırılmış talep bileşenlerinin dağılımı

Simülasyon No	Yeni Kullanıcılar (%)	Modal Kaymalar (%)	Boş yolculuklar
SEN1	0	0	0
SEN2	0	0	0
SEN3	0	0	0
SEN4	1	1	0,5
SEN5	2	2	0,5
SEN6	3	3	1
SEN7	4	4	1
SEN8	4	5	1
SEN9	5	6	1,5
SEN10	6	7	1,5
SEN11	7	8	1,5
SEN12	8	9	1,5
SEN13	9	10	1,5
SEN14	10	10	1,5

Özdevinim seviyesi 4 ve 5 düzeyinde olan otonom araçların, kısıktırılmış talep üzerinde önemli düzeyde etkisi olduğundan bahsedilmiştir. Bu yüzden, ulaşım ağındaki Seviye 4-5 otonom araçlardan kaynaklanan kısıktırılmış talep etkileri sistemdeki

toplam araç sayısının %20'lik oranından başlayarak (Tablo 3. 7'ye göre SEN4'ten itibaren) orijinal talep matrisine dahil edilmiştir ve yeni talepler oluşturmak için kullanılmıştır. Literatürde yapılmış çalışmalar dikkate alındığında, yeni kullanıcı gruplarından ve toplu taşımadan kaynaklanan kaymaların etkisi %20 ile sınırlı kalmıştır (Llorca vd., 2022; Meyer vd., 2017). Tez çalışmalarında Aşama 2'de uygulanan kısıktırılmış talep bileşenlerinde sistemin Seviye 5'te tam otonom olmasıyla, en yüksek düzeyde kısıktırılmış talep etkileri uygulanmıştır. Örneğin seyahat talebinin SEN 1 için 100 birim olduğu varsayılırsa, SEN 14'te kısıktırılmış talep bileşenlerinin etkisiyle yaklaşık 183 birim olarak uygulamaya geçecektir.

3.4.2 Kentsel Ulaşım Verileri

İzmir kentsel ulaşım ağının oluşturulması aşamasında, ulaşım planı kapsamında toplanan trafik verilerinin kullanılarak analizler yapılması çalışmanın etkinliği ve otonom araç uygulamalarının geçerliliği açısından önem arz etmektedir. OSM uygulaması kullanılarak İzmir ili kentsel yol ağına ait veriler kapsamlı olarak elde edilmiştir. Bu veriler arasında, linklerin uzunlukları, şerit sayıları ve genişlikleri, kavşakların ve sinyalizasyonların türleri, hız sınırlamaları, yol türleri (otoyol, devlet yolu vb.), linklerin önem dereceleri, araç türüne göre kullanılacak linkler, kavşak geometrilerine ait veriler (giriş genişlikleri, merkezi ada çapı, dıştan dışa dairesel çap vb.) ve daha birçok geometrik ve teknik detaylar simülasyon ortamına aktarılmıştır. Ek olarak, kavşak noktalarında linklerin birbirine bağlantıları şerit bazında önceliklere göre tanımlanmıştır.

Fiziksel ağın oluşturulmasından sonra, seyahat taleplerinin tanımlanması ve bu taleplerin hangi düzene göre ulaşım ağına dağılacığının belirlenmesi gerekmektedir. İlk olarak, ulaşım planlamalarında ülkemizde kullanılan en küçük idari birim olarak mahalleler bazında dikkate alınmış TAZ'lerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada, 2017 yılında yayınlanmış UPİ2030 kapsamında bu veriler detaylı olarak elde edilebilmiştir (İBB, 2017). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında tanımlanmış toplamda 807 TAZ sınırları bilgisi sisteme aktarılmıştır.

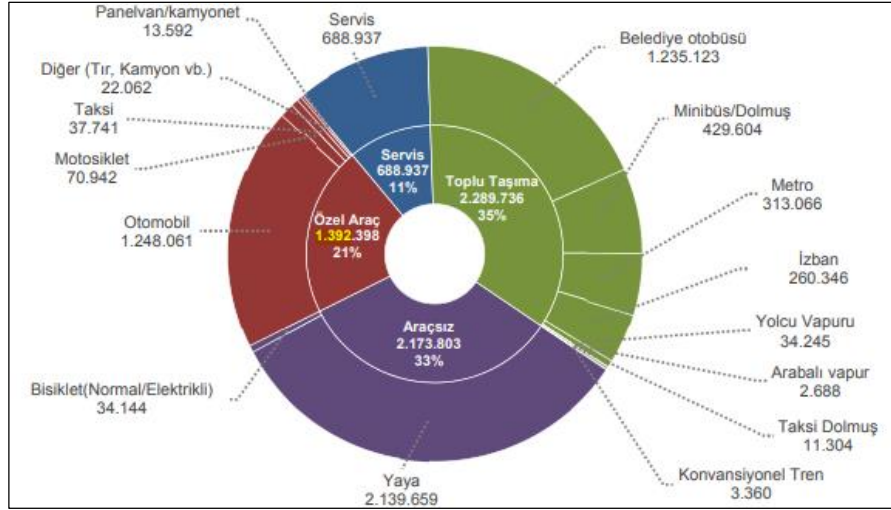
İkinci aşamada, DLR'nin edgeInDistricts.py Python komut dosyası kullanılarak ağ (.net) ve poligon (.pol.xml) dosyaları birleştirilip TAZ bölgeleri tanımlanmıştır. Kullanılan komut:

```
python edgeInDistricts.py -n osm.net.xml -t zones.poly.xml -i -s -v
```

Bu komutla district.taz.xml dosyası oluşturulmuş ve seyahat taleplerinde kullanılabilir hale gelmiştir. TAZ'lerin tanımlanmasından sonra, UPİ2030 kapsamında oluşturulan B/V matrisi Matlab'da işlenmiş ve SUMO'da kullanılmak üzere tazRelation dosyaları hazırlanmıştır. İzmir ulaşım ağı için TAZ'ler tanımlanıp B/V çiftlerine göre seyahat talepleri belirlenmiştir. Simülasyonlardan önce, trafik atama işlemleri SUMO'nun marouter fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Örnek komut:

```
marouter -n Network.xml -r route.xml --junction-taz --route-choice-method logit -  
-named-routes -o FileName.xml --assignment-method SUE --flow-output.departlane  
best
```

Tez organizasyonuna göre Aşama 2'de gerçekleştirilmiş simülasyonlarda kısıktırılmış seyahat talebinin bileşenleri ve literatüre dayalı kabul edilen değerler Tablo 3. 7'de verilmiştir. UPİ2030 kapsamında kentsel alanda gerçekleştirilen çok sayıda anket aracılığıyla talep modelleri geliştirilmiştir. Buna göre tez çalışmaları kapsamında İzmir kentsel ulaşım ağı için saha koşulları en iyi şekilde yansıtılmaya çalışılmıştır. Bu aşamada, otonom araçların entegrasyonu ve sürdürülebilir kentsel hareketliliğin inceleneceği araştırmalarda kısıktırılmış talep bileşenlerinin literatüre dayalı yaklaşım yerine, saha koşullarını yansıtması açısından belirtilen tercihler anketine dayalı olarak belirlenmesine karar verilmiştir. UPİ2030 kapsamında yapılan anketlerle belirlenen mevcut yolculuk tercihleri, kısıktırılmış talep bileşenlerinin yakın, orta ve uzak gelecekte daha iyi temsil edilebilmesi amacıyla kullanılmıştır. Şekil 3. 13'de İzmir hanehalkı ulaşım araştırmalarından elde edilen seyahatlerin araç türlerine göre dağılımları görülmektedir.



Şekil 3. 13 İzmir ili hanehalkı ulaşım anketlerinden elde edilen yolcu hareketlerinin araç türlerine göre dağılımı (İBB, 2017)

Şekil 3. 13'e göre, yaya yolculukları hariç toplamda 4.371.071 yolculuk doğrudan ulaşım ağını etkilemektedir. Bu yolculukların 1.392.398 tanesi özel araçlarla gerçekleştirilmiştir. Bu da ulaşım ağındaki araçların yaklaşık %31,9'nun özel araçlardan oluştuğunu göstermektedir. Lastik tekerlekli sistemler içinden servis araçları hariç tutulduğunda ise toplu taşımanın yüzdesi ulaşım ağını kullanan araçlar arasında %52,38 gibi yüksek bir oranda birinci olduğu görülmektedir. Belirtilen tercihler anketi sonrasında otonom araçların kullanıldığı yakın, orta ve uzak gelecek koşullarında kısıktırılmış talep bileşenleri hesaplanırken mevcut durum ile karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla Şekil 3. 13'de belirtilen araç türlerine göre dağılımlar kullanılmıştır.

3.4.2.1 Belirtilen Tercihler Anketi

Belirtilen tercihler yaklaşımına göre ankete katılan katılımcılara genellikle önceden belirlenmiş bir dizi varsayımsal yolculuk alternatifleri sunulmakta ve tercihlerini belirtmeleri istenmektedir. Örneğin, 10 dakika süren ve 20 TL geçiş ücreti gerektiren birinci seçeneği mi yoksa 15 dakika süren ancak geçiş ücreti olmayan ikinci seçeneği mi seçeceklerine yönelik soru sorulmaktadır. Bu anketlerin sonuçları genellikle tür seçimini modelleyen fayda fonksiyonlarını geliştirmek için kullanılmaktadır. Tez çalışmaları ve eş zamanlı gerçekleştirilen bilimsel araştırma projesi kapsamında, ulaşım sistemlerinin geleceğinde önemli yer tutacak olan yenilikçi türlerin kısa, orta

ve uzun vadede tür seçim davranışlarının belirlenmesi amacıyla belirtilen tercihler anketi uygulanmıştır. Yenilikçi ulaşım türlerinin gelecek koşullarında insan hayatına girme süreci düşünülerek temelde üç aşamada inceleme yapılması kararı alınmıştır. Bu kararda, yenilikçi türlerin sağlayabileceği maliyet, zaman ve konfor bileşenlerinin zaman içerisinde değişecek olması öngörüsü etkili olmuştur. Böylece, anket soruları ağırlıklı olarak belirtilen tercih durumlarından oluşmuş olup yakın, orta ve uzak gelecek koşullarında analiz yapma imkânı verecektir. Anket katılımcılarının 15 km’lik bir tek-yön yolculuğunda hangi ulaşım türünü tercih edeceğini yakın-orta-uzak gelecek koşullarının her biri için 8 adet seçim sorusu sorularak belirlenmeye çalışılmıştır. Örnek olarak iki seçim sorusu Şekil 3. 14’de görülmektedir.

Lütfen 15 km’lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (1 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom	Otonom uçan taksi	Otonom araç	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	26 dk	4 dk	14 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	10 dk	9 dk	2 dk	
Yolculuk maliyeti	14 ₺	210 ₺	25 ₺	
Güvenlik seviyesi	Çok	Az	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Kısmen var	Yok	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Lütfen 15 km’lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (6 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom	Otonom uçan taksi	Toplu taşıma	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	26 dk	6 dk	65 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	10 dk	15 dk	17 dk	
Yolculuk maliyeti	14 ₺	180 ₺	11 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Çok	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Kısmen var	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Şekil 3. 14 Kullanıcılara yöneltilen seçim sorularından örnekler

Anket formunda ilk olarak, araştırma ile ilgili genel bilgiler ve çalışmaya katılım onay metni katılımcılara sunulmaktadır. Birinci bölümde katılımcıların genel bilgilerinin belirlenmesi adına dört soru sorulmuştur. İkinci bölümde katılımcıların otonom sürüş farkındalığının belirlenmesi adına yedi soru hazırlanmıştır. Üçüncü bölümde kentsel hava hareketliliği farkındalığının belirlenmesi adına altı soru hazırlanmıştır. Dördüncü bölümde ulaşım tür seçim durumları açıklanarak yakın, orta ve uzak gelecek detayları verilmiştir. Ayrıca otonom araçlar ve kentsel hava hareketliliği araçları görsellerle açıklanmış ve video linkleri paylaşılarak isteyen katılımcıların daha detaylı fikir sahibi olmaları sağlanmıştır. Katılımcılara Bölüm 5’te

yöneltlen sorular temel olarak üç başlığa ayrılmış olup (yakın-orta-uzak gelecek) her başlıkta 8 soru yöneltlmıştır. Belirtilen tercihler anketinde 18 anket sorusu, 24 tür seçim sorusu olmak üzere katılımcılara toplamda 42 soru yöneltlmıştır. Belirtilen tercihler anketinin içeriği Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Araştırma ve Yayın Etik Kurulu tarafından incelenmiştir ve onaylanmıştır. Anket formunun detaylı içeriği EK-C’de paylaşılmıştır.

Yenilikçi tür seçimleri sorularında seçim üzerinde etkili kriterlerin belirlenmesi, katılımcıların hangi türler arasında seçim yapacağı konusu detaylı olarak ele alınmıştır. Özellikle, belirlenen seçim kriterlerinin katılımcılara farklı düzeyler için sorulması amaçlanmış olup dinamik bir sistem ile katılımcılara özel benzersiz sorular yöneltlmıştır. Seçim kriterlerinin seviyelere bağlı olması, fayda fonksiyonlarının elde edilmesi için anketin tutarlılığının test edilmesi ve hangi sayıda katılımcının anketi katılması gerekliliğinin belirlenmesi gereklidir. Belirtilen soruların bahsedilen sistemde kontrollerin ve testlerin yapıp katılımcılara yöneltlmesi için özel bir anket yazılımına ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmıştır. Bu kapsamda, tür seçim sorularında katılımcıya özgü dinamik varyasyonlar sağlayan Sawtooth Lighthouse isimli bir yazılıma ulaşılmıştır. Yazılım, seçim soruları için belirlenen özellik kümesi (farklı maliyet, süre vb. bileşenler) içinden farklı kombinasyonların oluşturulan kısıtlara göre ankete katılanlara sunulmasını sağlamaktadır. Aynı katılımcıya farklı kombinasyonlar sunularak bir katılımdan birçok seçim davranışı gözlemlenebilmesini sağlamaktadır.

Yenilikçi tür seçim sorularında ulaşım türleri; otomobil, otonom araç, toplu taşıma, paylaşımlı otonom ve otonom uçan taksi olarak belirlenmiştir. Araçta yolculuk süresi, araca yürüme/bekleme süresi, yolculuk maliyeti, güvenlik seviyesi sürüş esnasında yapılabilecek faaliyet olarak toplamda tür seçimini etkileyen 5 adet öznitelik belirlenmiştir. Bu özniteliklerin her biri için uzak, orta ve yakın gelecek koşullarında üç aşama belirlenmiştir. Örneğin, otonom aracın toplam yolculuk süresi yakın gelecek koşullarında 28-40-52 dakika olarak belirlenmişken, uzak gelecek koşullarında 14-22-30 dakika olarak belirlenmiştir. Bu öznitelik düzeyleri her anket katılımcısına rastgele şekilde sunulmaktadır. Belirtilen seçim anketleri kapsamında uzak, orta ve yakın gelecek koşullarında öznitelik düzeyleri Tablo 3. 8’deki gibi belirlenmiştir.

Tablo 3. 8 Uzak, orta ve yakın gelecek koşullarında tür seçimine etki eden öznelilik düzeyleri

	Yakın gelecek														
	2025-2035														
	Geleneksel araç			Otonom araç			Toplu Taşıma			Paylaşımlı Otonom			Kentsel Hava Hareketliliği		
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Araçta yolculuk süresi (dk)	18	30	42	28	40	52	35	50	65	30	45	60	5	7	9
Yolculuk maliyeti (TL)	30	50	65	45	70	95	5	8	11	20	30	40	210	240	270
Araca yürüme/bekleme süresi (dk)	0	2	4	0	2	4	15	17	19	10	15	20	20	23	26
Güvenlik seviyesi	-	1	-	0	1	-	-	1	-	0	1	-	0	1	2
Sürüş esnasında yapılabilecek faaliyetler	0	-	-	0	1	-	-	1	2	-	1	2	0	1	2
	Orta gelecek														
	2035-2050														
	Geleneksel araç			Otonom araç			Toplu Taşıma			Paylaşımlı Otonom			Kentsel Hava Hareketliliği		
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Araçta yolculuk süresi (dk)	18	30	42	20	32	44	35	50	65	24	36	48	5	7	9
Yolculuk maliyeti (TL)	30	50	65	30	50	65	5	8	11	15	20	25	180	210	240
Araca yürüme/bekleme süresi (dk)	0	2	4	0	2	4	15	17	19	5	10	15	20	22	24
Güvenlik seviyesi	-	1	-	0	1	2	-	1	-	0	1	2	0	1	2
Sürüş esnasında yapılabilecek faaliyetler	0	-	-	0	1	2	-	1	2	0	1	2	0	1	2
	Uzak gelecek														
	2050-2070														
	Geleneksel araç			Otonom araç			Toplu Taşıma			Paylaşımlı Otonom			Kentsel Hava Hareketliliği		
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Araçta yolculuk süresi (dk)	18	30	42	14	22	30	35	50	65	18	26	34	4	6	8
Yolculuk maliyeti (TL)	30	50	65	15	20	25	5	8	11	10	12	14	150	180	210
Araca yürüme/bekleme süresi (dk)	0	2	4	0	2	4	15	17	19	5	10	15	9	12	15
Güvenlik seviyesi	-	1	-	0	1	2	-	1	-	0	1	2	0	1	2
Sürüş esnasında yapılabilecek faaliyetler	0	-	-	-	1	2	-	1	2	0	1	2	0	1	2

Güvenlik seviyesi ve sürüş esnasında yapılabilecek faaliyetler 0-1-2 olarak kodlanmıştır. Güvenlik seviyesi için 0-Az, 1-Orta ve 2-Çok güvenli anlamına gelmektedir. Sürüş esnasında yapılabilecek faaliyetler için 0-Yok, 1-Kısmen var, 2-Var anlamına gelmektedir. Tablo 3. 8 incelendiğinde seviyelerin zamanın değişimine göre azaldığı, arttığı veya sabit kaldığı görülecektir. Örneğin toplu taşıma sistemlerinin seviyeleri aynı kalırken, kentsel hava hareketliliğinin gelecek zamanlarda daha yaygın bir şekilde kullanılması öngörüldüğünden yolculuk süresi, yolculuk maliyeti ve diğer değişkenleri olumlu yönde iyileştirilmiştir.

3.5 Kalibrasyon ve Doğrulama

Simülasyonun güvenilirliği, model parametrelerinin incelenen bölgedeki koşullara uyarlanmasıyla, yani modelin kalibrasyonu ile sağlanır. Trafik modelinin kalibrasyonu, belirlenen trafik değişkeni için yerel saha ölçümleri ile simülasyon değerleri arasındaki farkı kabul edilebilir bir seviyeye düşürmek amacıyla model parametrelerinin ayarlanması sürecidir. Simülasyon modelleri şerit değiştirme, araç takip modelleri ve bunlara ait alt modeller olacak şekilde çok sayıda parametre içermektedir. Bu parametre sayılarının artması kalibrasyon işlemlerini uzun bir süreç haline getirmektedir.

Özellik seçim algoritmaları, bir süreçte kullanılan parametre sayılarını azaltmak için kullanılan araçlardır. Bu algoritmalar simülasyon sonuçlarında elde edilen yanıt değerlerini en iyi şekilde ifade eden parametreler kümesi arasından bir altküme önermektedir. Bu sayede incelenen süreç daha basitleştirilerek tahmin performansları iyileştirilmeye çalışılır. Sonuç olarak, kalibrasyon sürecinde en etkili parametrelerin bulunması hedeflenmektedir. Tez çalışmasının bu aşamasında, literatürde SUMO kullanılarak gerçekleştirilmiş kalibrasyon çalışmaları incelenmiştir. Bunlar arasında özellik seçim algoritmalarının incelendiği çalışmalara ek olarak farklı yaklaşımlarla optimizasyon işlemi gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmaları da incelenmiştir. İncelenen bu çalışmalar arasından SUMO ortamında kalibrasyon işlemlerinde kullanılan en yaygın 10 taşıt parametresi belirlenmiştir. Kalibrasyon işleminde kullanılan parametreler sırasıyla şu şekildedir; *sigma*, *tau*, *accel*, *minGap*, *speedfactor*, *lcAssertive*, *lcStrategic*, *lcCooperative*, *lcSpeedGain*, *lcPushy* (Arkatkar,

Velmurugan, Puvvala, Ponnu ve Narula, 2016; Azam, Puan, Hassan ve Mashros, 2019; Berrazouane, Tong, Solmaz, Kiers ve Erhart, 2019a; Ciuffo vd., 2014; Doğan, 2022; Ge ve Menendez, 2014; Lemmer, 2017; Lopez vd., 2018b; Topal, 2022).

Kalibrasyon işlemleri aşamasında yalnızca günümüzde var olan Seviye 0 araçların parametreleri incelenmiştir. Kalibrasyon işlemleri mevcut sisteme ait ölçüm değerlerini içerdiği için ve günümüz ve geçmişte de otonom araçların ulaşım sistemlerinde olmadığı varsayıldığında yalnızca bu araç sınıfında kalibrasyon işlemlerinin yapılması kararı alınmıştır. Dördüncü ve beşinci seviye otonom araçların bazı dünya ülkelerinde aktif olarak kullanılmaya başlandığı bilinmektedir. Ancak, otonom araçların sisteme yeni katılması, kalibrasyon işlemlerinde kullanılacak verilerin elde edilememesi, İzmir ve Sioux Falls şehri dışında faaliyet göstermesi vb. birçok sebepten ötürü otonom araçların Seviye 0 dışındaki seviyelerinin kalibre edilmesi işlemi gerçekleştirilmemiştir.

Bu aşamada, İzmir kentsel ulaşım ağı için UPİ2030 kapsamında gerçekleştirilmiş çalışmalar arasından kalibrasyon işlemlerinde kullanılmak üzere gezici araç verilerinden yararlanılmıştır. İzmir kentsel ulaşım sisteminde 6 farklı güzergahta gidiş ve dönüş olmak üzere toplamda 12 güzergahın gezici araç verileri alınmıştır. Bu kapsamda incelenen güzergahlar ve toplanan verilerin detayları Tablo 3. 9'da görülmektedir.

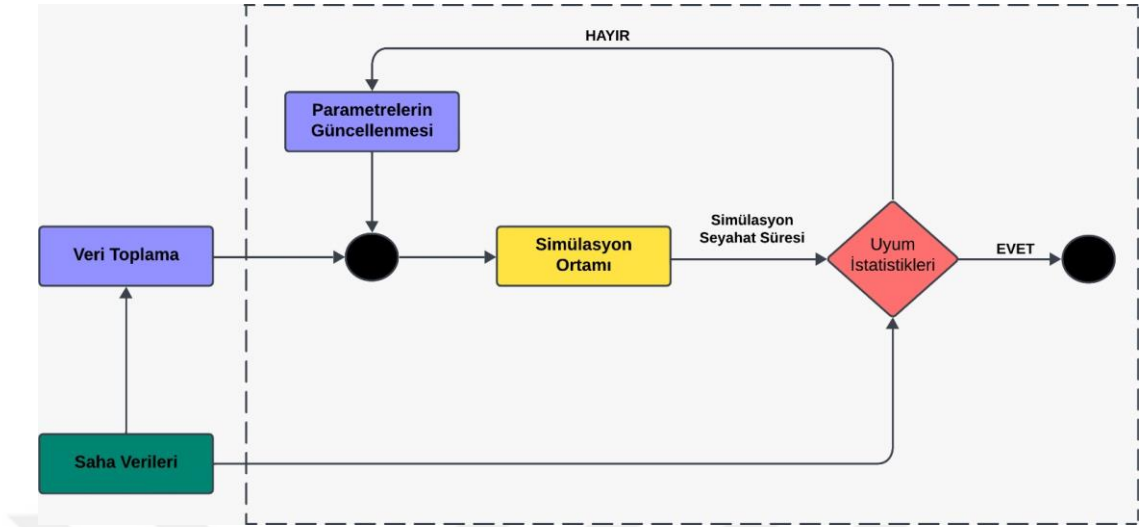
Tablo 3. 9 UPİ2030 kapsamında toplanan gezici araç verileri

		Ortalama Seyahat Süresi (dk)	Ortalama Gecikme Süresi (dk)	Ortalama Seyahat Hızı (km/sa)	Ortalama Seyir Süresi (dk)	Ortalama Seyir Hızı (km/sa)
1	Girne KöprülÜ Kavşakđı- Kent Koleji	36,00	14,82	33,67	21,18	57,2
	Kent Koleji- Girne KöprülÜ Kavşakđı	28,67	9,08	42,28	19,58	61,9
2	Fahrettin Altay Metro- Üçyol Metro	18,70	9,82	16,68	8,88	35,1
	Üçyol Metro- F. Altay Metro	16,80	8,50	18,57	8,30	37,6
3	Çiğli Kavşakđı- Havalimanı Kavşakđı	33,50	7,15	59,82	26,35	76,1
	Havalimanı Kavşakđı- Çiğli Kavşakđı	24,17	0,83	82,92	23,33	85,9
4	Menemen- Aliağa Cami / BP Petrol	17,62	2,00	65,05	15,63	73,3
	Aliağa Cami/BP Petrol- Menemen	16,63	1,88	68,90	14,75	77,7
5	Perge Prefabrik- Optimum AVM	10,17	0,12	62,56	10,05	63,3
	Optimum AVM- Perge Prefabrik	10,75	1,27	59,16	9,48	67,1
6	Eşref Paşa Kavşakđı- Buca Sancak Emlak	13,60	3,70	23,82	9,90	32,7
	Buca Sancak Emlak- Eşref Paşa Kavşakđı	15,00	4,75	21,60	10,25	31,6

Tablo 3. 9’da açıklanan gezici araç verileri arasından kalibrasyon işlemlerinde kullanılmak üzere ortalama seyahat süresi sonuç değişkeninin kullanılmasına karar verilmiştir. Günümüz ulaşım sistemlerinin simülasyonları farklı açık kaynak kodlu veya paket yazılım ortamlarında oluşturulurken bazı kabuller eşliğinde işlemler gerçekleştirilir. Örneğin, yol kenarı parklanma, ağır taşıt etkisi, sinyalizasyon sistemlerinin uyumsuzlukları vb. birçok durum yok sayılır. Kalibrasyon işlemleri tam olarak bu aşamada bu belirsizliklerin giderilerek gerçek durumu en iyi şekilde yansıtmayı amaçlamaktadır. Bu aşamanın devamında yapılan diğer bir durum uygun veri setini inceleyecek ve karşılaştıracak metodolojinin seçimidir.

Gerçek trafik ölçüm verileri ile simülasyondan elde edilen trafik modeli arasında yüksek düzeyde benzerlik sağlamak için, SUMO araç takip ve şerit değiştirme modellerinin parametreleştirilmesini sağlayan bir kalibrasyon süreci kullanılmıştır. Bu süreç, araçların simülasyon seyahat sürelerinin gerçek seyahat süreleri ile karşılaştırılarak kalibre edildiği 'San Pablo Dam' kalibrasyon yaklaşımına dayanmaktadır (Berrazouane, Tong, Solmaz, Kiers ve Erhart, 2019b; Raumfahrt, 2017; SUMO, 2024e). Bu yaklaşım, mevcut literatürde yalnızca araç takip modelini kalibre etmek için kullanılırken, bu çalışmada şerit değiştirme davranışını da içerecek şekilde uyarlanmıştır. Bu kalibrasyon aşaması, Şekil 3. 15’de gösterilen diyagram aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu süreç iki ana adıma ayrılabilir. İlk adım, trafik karakteristikleri ve UPI2030 tarafından sağlanan bilgilerin istatistiksel analizlerine dayalı olarak simülasyon ortamını (birincil kurulum) ve başlangıç koşullarını ayarlamayı amaçlar. Ardından ikinci adımda, SUMO kentsel hareketlilik simülasyonundaki sürücü modellerinin etkili parametrelerinin kalibrasyonu ve doğrulanmasına odaklanılır. Simülasyon modellerinin kalibrasyonu ve doğrulanması, birbirine çok yakın iki işlemidir. Kalibrasyon, model girdilerini ayarlayarak çıktıların gerçek ölçüm verileriyle uyumlu hale getirilmesine odaklanırken, doğrulama ise modelin gerçeği ne kadar iyi yansıttığını ve güvenilirliğini değerlendirmeye odaklanır (Toledo, Koutsopoulos ve Toledo, 2004).



Şekil 3. 15 Kalibrasyon işlemi akış şeması

Trafik mikrosimülasyon modellerini kalibre etmek için toplu veriler kullanıldığında, sonuçlar her zaman sınırlı davranışsal etkilere tabi olur. Bu nedenle, burada kullanılan SUMO alt modellerinin güçlü bir teorik temele dayandığını vurgulamak önemlidir. Bu modeller, sürücü davranışını mümkün olduğunca gerçekçi bir şekilde taklit etmek amacıyla geliştirilmiş olup, çeşitli nedenlere dayalı olarak bir dizi kural ve parametre ile kontrol edilir. Bu parametreler, gerçek ölçümlere göre tanımlanır veya belirli veri setlerine ve farklı koşul ve senaryolarda değişebilen varsayımlara uyarlanır. Dolayısıyla, incelenen gerçeği doğru bir şekilde yansıtmak için yeniden uyarlama gereklidir (Hollander ve Liu, 2008; Raumfahrt, 2017).

3.5.1 Kalibrasyon, Doğrulama Aşamalarında Gerçekleştirilen Duyarlılık Analizleri

Araç takip ve şerit değiştirme davranış modelleri için, model parametrelerinin kalibrasyon çıktısı (seyahat süresi) üzerindeki duyarlılığını değerlendiren analizler yapılmıştır. Sırasıyla şu duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir; SQV, Theils'U ve RRMSE.

3.5.1.1 Ölçeklenebilir Kalite Değeri (SQV)

Trafik modellerinin kalibrasyonu, modellerin saha koşullarını doğru bir şekilde yansıtabilmesi için kritik bir aşamadır. Kalibrasyon süreci, modelin tahmin ettiği trafik

hacimleri ile gözlemlenen gerçek trafik hacimlerinin karşılaştırılması ve modelin ayarlanmasını içerir. GEH (Geoffrey E. Havers) istatistiği, trafik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir ölçüt olup, model tahminlerinin gerçek veri ile ne kadar uyumlu olduğunu değerlendirmek için kullanılır. GEH istatistiği, modelleme hatalarını tespit etmek ve kalibrasyon sürecini iyileştirmek için hassas bir araç sunar. Bu yaklaşım 1970'lerde Birleşik Krallık'ta trafik planlama amaçları için tanıtılmış bir istatistiksel ölçüttür. GEH formülü Denklem (3. 17)'de ki şekildedir (Department for Transport, 2020; Kveiborg, Nielsen, Mabit, Burgess ve Korwer et al., 2007):

$$GEH = \sqrt{\frac{2(m - c)^2}{m + c}} \quad (3. 17)$$

Bu formül, gözlemlenen (c) ve modellenen (m) değerler arasındaki sapmaları ölçmek için kullanılır. GEH değeri, tahmin edilen ve gözlemlenen trafik hacimleri arasındaki yüzde farkını hesaplamak yerine, daha sofistike bir formül kullanarak bu farkı değerlendirir. Bir simülasyon modeli gerçek bir ulaşım sistemiyle çok iyi bir uyum sağladığında GEH 5'ten küçük olurken, iyi bir uyum GEH'in 5 ile 10 arasında olduğu durumdur. Bu yaklaşımda; GEH, pozitif ve negatif sapmaları aynı şekilde değerlendirir. Orta ve büyük değerler için sapmaları iyi bir şekilde temsil eder. GEH <5, modellenen ve gözlemlenen değerlerin iyi bir uyum içinde olduğunu gösterir. Ancak bununla beraber bu yaklaşımın bazı olumsuz yanları da bulunmaktadır. GEH, küçük değerler için duyarlılığını kaybeder ve bu durumda sapmaları aşırı abartabilir. Çok büyük değerler için GEH değeri çok küçülür ve bu da uyumsuzlukları hafife alabilir. Bu sınırlamalar, GEH'in her durumda uygun bir ölçüt olmasını engeller. Özellikle, küçük değerler veya çok büyük değerler söz konusu olduğunda GEH sonuçları güvenilir olmayabilir.

GEH istatistiği yaklaşımının yarattığı olumsuz koşulları aşmak amacıyla, farklı değer aralıkları için uygun bir ölçeklenebilir alternatif kalite ölçütü geliştirilmiştir. Bu ölçüt, küçük ve büyük değerler arasındaki sapmaları daha dengeli bir şekilde değerlendirebilir. Friedrich, Pestel, Schiller ve Simon (2019), GEH problemlerini, sayımın büyüklüğüne dayalı özel bir ölçekleme faktörü kullanarak çözen SQV istatistiğini önerdiler. Ayrıca, GEH istatistiği ile normal dağılım arasındaki ilişkiyi ve

dolayısıyla SQV istatistiği ile normal dağılım arasındaki ilişkiyi türetmişlerdir. SQV istatistiği, bir ölçekleme faktörü f ile ampirik bir formül kullanılarak Denklem (3.18)'de ki şekilde hesaplanır:

$$SQV = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(M-C)}{f.C}}} \quad (3.18)$$

Burada, SQV değerini birimi yoktur ve 0 ile 1 arasında bir değer aralığına sahiptir. f ölçekleme faktörü formülde tanımlanarak SQV istatistiğinin GEH istatistiği gibi sınırlı veri türleriyle değil de farklı veri setlerinde kullanılabilmesine olanak tanımışlardır. Örneğin, kalibrasyon işlemlerinde günlük trafik hacim verileri kullanılacaksa f değeri 10.000 seçilebilirken, kilometre cinsinden ortalama yolculuk mesafesi verileri kullanılacaksa f değeri 10 seçilebilmektedir. Friedrich vd., (2019), çalışmalarında hangi veri türü için hangi katsayıların alınabileceğinin detayları tablo halinde verilmiştir. Buna göre, tez çalışmaları kapsamında yapılan seyahat süresi kalibrasyonu için f ölçeklendirme parametresinin değeri 30 olarak belirlenmiştir. Yukarıda belirtilen formüle göre, 0,90'ın üzerindeki SQV değerleri simülasyon ve gerçek trafik sayımları arasında çok iyi bir uyum gösterirken, 0,85 ile 0,90 arasındaki değerler iyi bir uyumu ortaya koymaktadır. 0,85 ile 0,8 arasındaki değerler kabul edilebilir bir aralığı ifade etmektedir. Buna karşılık, 0,8'in altındaki değerler potansiyel bir modelin uyumsuz olduğunu gösterir (Avogadro, Birolini, Redondi ve Deforza, 2024; Schaniel, 2022).

3.5.1.2 Theil's U İstatistiği

Theil's U yaklaşımı, öngörülen ve gerçekleşen değerler arasındaki karşılaştırmayı nicel olarak ifade eden bir hata ölçütüdür. Theil (1966), tahmin doğruluğunu, öngörülen değerler ve gözlemlenen değerlerle iki oto-korelasyonlu zaman serisini karşılaştırarak ölçen Theil'in U istatistik ölçüsünü önerdi. Bu istatistik, özellikle ekonomi ve finans alanlarında yaygın olarak kullanılsa da trafik simülasyonlarının kalibrasyonunda da giderek daha fazla tercih edilmektedir. Theil's U değeri, tahmin hatalarının büyüklüğünü, yönünü ve dağılımını analiz ederek, modelin performansını değerlendirir ve iyileştirme alanlarını belirler. Theil's U-istatistiği, büyük hataların

önemini vurgulayan ve basit yaklaşımlarla karşılaştırarak görelî bir temel sağlayan bir doğruluk ölçüsüdür. Ayrıca sapmaları kare olarak büyük hatalara daha fazla ağırlık verir ve hataları abartarak büyük hataları elemeye yardımcı olabilir. Theil's U istatistiğinin formülü Denklem (3. 19)'da verilmiştir.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (w_j - y_j)^2}}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j^2 + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j^2}} \quad (3. 19)$$

Burada, m veri noktalarının sayısını ifade eder. w_j gerçek verileri temsil eder, y_j simülasyon sonucundan elde edilen verileri temsil eder. Bu yaklaşıma göre Theil's U değeri 0 ile 0,1 arasında ise iyi uyum, 0,1 ile 0,5 arasında ise kabul edilebilir bir uyum, 0,7 değerinden büyük ise uyumsuzluk olarak kabul edilir (Chalermwongphan ve Upala, 2019; Kolidakis, Botzoris, Profillidis ve Kokkalis, 2020).

3.5.1.3 Göreceli Kök Ortalama Kare Hatası (RRMSE)

RRMSE, literatürde sıklıkla kullanılan kök ortalama kare hatası (RMSE)'nin bir varyasyonudur ve tahmin modeli doğruluğunu hedef değişken aralığına göre ölçer. RRMSE, RMSE'yi hedef değişken aralığına göre normalleştirir ve veri setleri veya değişkenler arası karşılaştırmayı kolaylaştırmak için bir yüzde olarak sunar. Boyutsuz bir RMSE formu olan RRMSE, kalıntıları gerçek değerlerle karşılaştırarak farklı ölçüm tekniklerinin karşılaştırılmasına olanak tanır. Yüzde olarak RRMSE, RMSE'nin ölçülen ortalama değerlere bölünmesiyle elde edilir ve Denklem (3. 20)'de görüldüğü şekilde tanımlanır (Li, Tang, Wu ve Liu, 2013).

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100 \quad , \quad RRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^*)^2}} \quad (3. 20)$$

burada, y_i karşılık gelen simüle edilmiş değeri, n zaman adımlarının sayısını, $\bar{X}$ gözlemsel değerlerin ortalamasını ve y_i^* simülasyonların ortalama değerini ifade eder. RRMSE aralıkları modelin hassasiyetine göre şu şekilde yorumlanır; $RRMSE < 0,1$

mükemmel, $0,1 < RRMSE < 0,2$ ise iyi, $0,2 < RRMSE < 0,3$ orta ve $RRMSE > 0,3$ ise kötü olarak nitelendirilir (Ghorbani vd., 2017).

3.5.2 Kalibrasyon Aşamasının Sonuçları

Şekil 3. 15’de açıklanan kalibrasyon işlemi akış şemasına göre; İzmir kentsel ulaşım ağında günümüz durumunu temsil eden ilk senaryosunda SQV istatistiğinin duyarlılık analizi kapsamında değerlendirilerek seyahat süresi çıktı değişkeninin gerçek verileri en iyi şekilde temsil edeceği duruma kadar denemeler gerçekleştirilmiştir. Tablo 3. 10’e göre kalibrasyon işleminin başlangıç aşamasında SQV istatistiği değerlendirmelerine göre, toplamda 12 güzergâh üzerinden seyahat süresi değerleri çok iyi olanlar 2 güzergâh; iyi olanlar 2 güzergâh, kabul edilebilir olanlar 3 güzergâh ve kabul edilemeyenlerde 5 güzergâh olacak şekilde bir dağılıma sahiptir. Kalibrasyon aşamasının sonucunda ise SQV değerlendirmeleri Tablo 3. 11’de görülmektedir. Buna göre çok iyi olarak sınıflandırılan güzergâh sayısı 7’ye yükselirken, iyi olan güzergahların sayısı 3 ve kabul edilebilir güzergahların sayısı ise 2 olarak sonuçlanmıştır. Başlangıç durumunda belirlenen güzergahlardan, 5 kabul edilemeyen durumun hepsi kabul edilebilir durumuna getirilmiştir. Kalibrasyonun başlangıç durumunda belirlenmiş araç parametrelerinin son aşaması ile karşılaştırılarak meydana gelen değişimi Tablo 3. 12’de görülmektedir.

Tablo 3. 10 Kalibrasyon işlemlerinin başlangıç aşamasında SQV değerlendirmeleri

				SQV değerlendirme kriterleri			
				>0,9	0,9-0,85	0,85-0,8	<0,75
		Ortalama Seyahat Süresi (dk)	SQV	Çok İyi	İyi	Kabul edilebilir	Yetersiz
1	Girne KöprülÜ Kavşakđ- Kent Koleji	30,2	0,850	0	0	1	0
	Kent Koleji- Girne KöprülÜ Kavşakđ	24,6	0,878	0	1	0	0
2	Fahrettin Altay Metro- Üçyol Metro	20,4	0,933	1	0	0	0
	Üçyol Metro- F. Altay Metro	21,8	0,818	0	0	1	0
3	Çiğli Kavşakđ- Havalimanı Kavşakđ	38,4	0,866	0	1	0	0
	Havalimanı Kavşakđ- Çiğli Kavşakđ	32,6	0,761	0	0	0	1
4	Menemen- Aliağa Cami / BP Petrol	19,4	0,928	1	0	0	0
	Aliağa Cami/BP Petrol- Menemen	22,1	0,803	0	0	1	0
5	Perge Prefabrik- Optimum AVM	15,6	0,763	0	0	0	1
	Optimum AVM- Perge Prefabrik	15,3	0,798	0	0	0	1
6	Eşref Paşa Kavşakđ- Buca Sancak Emlak	19,1	0,786	0	0	0	1
	Buca Sancak Emlak- Eşref Paşa Kavşakđ	22,7	0,734	0	0	0	1
				16,67%	16,67%	25,00%	41,67%

Tablo 3. 11 Kalibrasyon aşamasının sonucunda duyarlılık analizleri

				SQV değerlendirme kriterleri			
				>0,9	0,9-0,85	0,85-0,8	<0,75
				Çok İyi	İyi	Kabul edilebilir	Yetersiz
		Ortalama Seyahat Süresi (dk)	SQV				
1	Girne Köprülü Kavşağı- Kent Koleji	33,8	0,937	1	0	0	0
	Kent Koleji- Girne Köprülü Kavşağı	27,5	0,962	1	0	0	0
2	Fahrettin Altay Metro- Üçyol Metro	19,5	0,967	1	0	0	0
	Üçyol Metro- F. Altay Metro	18	0,949	1	0	0	0
3	Çiğli Kavşağı- Havalimanı Kavşağı	35,3	0,946	1	0	0	0
	Havalimanı Kavşağı- Çiğli Kavşağı	26,8	0,911	1	0	0	0
4	Menemen- Aliaga Cami / BP Petrol	18,1	0,979	1	0	0	0
	Aliaga Cami/BP Petrol- Menemen	19,2	0,897	0	1	0	0
5	Perge Prefabrik- Optimum AVM	12,2	0,896	0	1	0	0
	Optimum AVM- Perge Prefabrik	14,1	0,843	0	0	1	0
6	Eşref Paşa Kavşağı- Buca Sancak Emlak	16,6	0,871	0	1	0	0
	Buca Sancak Emlak- Eşref Paşa Kavşağı	18,9	0,845	0	0	1	0
				58,33%	25,00%	16,67%	0,00%

Tablo 3. 12 Kalibrasyon işlemlerinin öncesinde ve sonrasında araç parametrelerinin değişimi

	sigma	tau	accel	minGap	speedfactor	lcAssertive	lcStrategic	lcCooperative	lcSpeedGain	lcPushy
Kalibrasyon Öncesi	0,5	1	2,6	2,5	normc(1.00,0.10,0.20,2.00)	1	1	0,2	0,9	0,25
Kalibrasyon Sonrası	0,65	1,1	2,7	2,35	1,2	1,25	0,9	0,15	0,8	0,22

Kalibrasyon işlemlerinden sonra UPI2030 kapsamında toplanan gezici araç verilerinden ortalama seyahat hızı verileri simülasyon ortamında elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Theil's U ve RRMSE yaklaşımları ile değerlendirilen doğrulama aşamasının detayları Tablo 3. 13'de görülmektedir.

Tablo 3. 13 Kalibrasyon işlemlerinden sonra gerçekleştirilen doğrulama aşaması

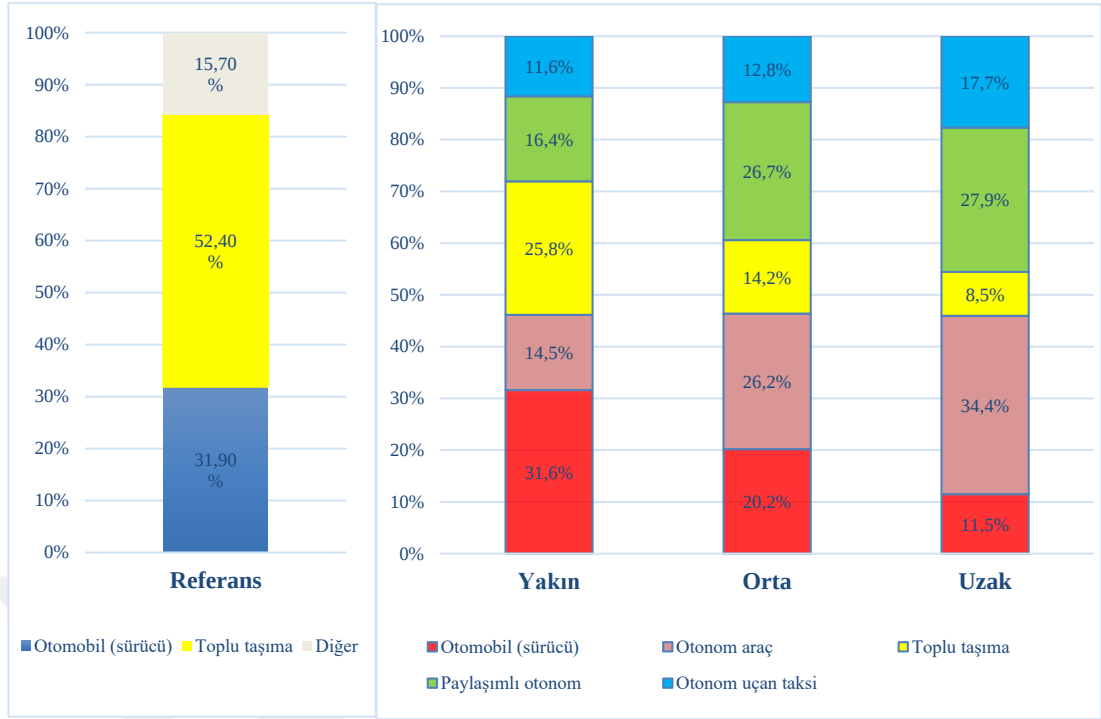
		Doğrulama		Ortalama Seyahat Hızı (km/s)	
		Theil's U	RRMSE	Simülasyon	Gözlem
1	Girne Köprülü Kavşağı- Kent Koleji	0,017	0,032	34,8	33,67
	Kent Koleji- Girne Köprülü Kavşağı	0,026	0,054	40,1	42,28
2	Fahrettin Altay Metro- Üçyol Metro	0,021	0,041	17,4	16,68
	Üçyol Metro- F. Altay Metro	0,035	0,067	19,9	18,57
3	Çiğli Kavşağı- Havalimanı Kavşağı	0,023	0,048	57,1	59,82
	Havalimanı Kavşağı- Çiğli Kavşağı	0,052	0,100	92,1	82,92
4	Menemen- Aliaga Cami / BP Petrol	0,010	0,020	66,4	65,05
	Aliaga Cami/BP Petrol- Menemen	0,072	0,154	59,7	68,90
5	Perge Prefabrik- Optimum AVM	0,090	0,198	52,2	62,56
	Optimum AVM- Perge Prefabrik	0,123	0,281	46,2	59,16
6	Eşref Paşa Kavşağı- Buca Sancak Emlak	0,093	0,170	28,7	23,82
	Buca Sancak Emlak- Eşref Paşa Kavşağı	0,117	0,209	27,3	21,60

Doğrulama aşamasında Theil's U istatistiğine göre, toplamda 12 güzergâh üzerinden istatistik değerinin 0 ile 0,1 arasında iyi uyum olanlar 10 güzergâh, 2 güzergahtan elde edilen verilerde kabul edilebilir düzeydedir. RRMSE yaklaşımına göre ise, 6 güzergahtan elde edilen veriler çok iyi uyumu, 4 güzergahtan elde edilen veriler iyi uyumu ve 2 güzergahtan elde edilen verilerin orta derecede uyum sağladığını göstermektedir.

3.5.3 Kalibrasyon ve Doğrulama Aşamasından Sonra Gerçekleştirilecek İşlemler

Belirtilen tercihler anketinin uygulanmasına dair detaylı bilgilere önceki başlıklarda yer verilmişti. İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilmiş seyahat süresi kalibrasyonu işlemlerinden sonra, sahayı daha iyi yansıtabilmesi amacıyla otonom araçların yakın, orta ve uzak olarak üç farklı gelecek durumunda kısıktırılmış talep bileşenleri etkisi altında simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Belirtilen tercihler anketinden elde edilen sonuçlar ve İzmir ili hanehalkı anketlerinden elde edilen

verilere dayalı olarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. UPİ2030 kapsamında İzmir ilinde gerçekleştirilen çok sayıda hanehalkı anketi aracılığıyla talep modelleri geliştirilmiştir. Buna göre tez çalışmaları kapsamında İzmir kentsel ulaşım ağı için saha koşullarının en iyi şekilde yansıtılması amacıyla otonom araçların entegrasyonu ve sürdürülebilir kentsel hareketliliğin inceleneceği araştırmalarda kısıktırılmış talep bileşenlerinin literatüre dayalı yaklaşım yerine, belirtilen tercihler anketine dayalı olarak belirlenmesine karar verilmiştir. UPİ2030 kapsamında yapılan anketlerle belirlenen mevcut yolculuk tercihleri, kısıktırılmış talep bileşenlerinin yakın, orta ve uzak gelecekte hesaplanabilmesi amacıyla kullanılmıştır. Karayolu ağında kısıktırılmış talep yaratacak asıl bileşenlerin toplu ulaşımından SAV ve otonom uçan taksi türlerine geçişlerde gözlemleneceği düşünülmektedir. UPİ2030 verilerine göre taşıtlı yolculuklarda toplu taşımanın payı (servis dahil) %68'dir. Yenilikçi tür seçim oranlarına göre ise bu oran toplamı %54 seviyesine inmektedir. Ancak özellikle konvansiyonel toplu taşıma tercih oranının %25,8'den %8,5'e inmesi, mevcut karayolu ağı üzerindeki yükü yüksek düzeyde artıracaktır. Toplu taşıma tercihinin azalmasından kaynaklanacak karayolu trafiği artış oranının tahmin edilebilmesi için toplu taşıma türlerinin kendi içindeki dağılımı önem kazanmaktadır. Örneğin raylı sistemden SAV türüne kayacak yolculuk tercih oranı ile belediye otobüsünden kayacak tercih oranının kısıktırılmış talep etkisi aynı olmayacaktır. Bu amaçla, çalışmada özel taşıt talep matrisinin referans alındığı 2015 İzmir Ulaşım Ana Planı tür seçim oranları referans alınabilir. Belirtilen tercihler anketi kapsamında, yakın orta ve uzak gelecek koşullarında yapılan tercihlere göre uygulanan modellemelerden elde edilen türel dağılım oranlarının referans durumla karşılaştırılması Şekil 3. 16'da verilmiştir.



Şekil 3. 16 Belirtilen tercihler anketinin sonuçlarına göre türel dağılımlar ve referans durumunun karşılaştırılması

Sawtooth yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen Conjoint Based Choice (CBC) anketi verilerine dayalı olarak; yakın, orta ve uzak gelecek için tür seçim oranları Şekil 3. 16'da ki gibi elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, konvansiyonel özel taşıt tercih oranı referans için %31,9 değerinden uzak gelecekte %11,5'e düşmektedir. Otonom ve SAV toplam tercih oranı yakın gelecekte %30,9 iken uzak gelecekte %62,3'e yükselmektedir. Toplu taşıma tercih oranı ise yakın gelecekte %25,8 değeri elde edilirken uzak gelecekte bu değerin %8,5'e kadar düştüğü görülmektedir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere konvansiyonel otomobil ve otonom araç tercih oranlarının toplamı üç gelecek senaryosu için %46 mertebesinde sabit kalmıştır. Bu durumda gelecekte bu iki tür arasındaki geçişin ilave bir trafik yoğunluğu yaratmayacağı söylenebilir. Çalışmada özel taşıt talep matrisinin referans alındığı 2015 İzmir ulaşım ana planı tür seçim oranları dikkate alındığında, taşıtlı yolculuklar arasında özel taşıtın payı %31,9'dur. CBC anketi sonucu yakın gelecekte özel taşıt tercih oranının %31,6 ile referans sonuçlarına yakın çıkması, CBC anketinin tutarlı olduğunu göstermektedir.

Kıskırtılmış talep bileşenlerinin detaylı hesaplamaları yakın gelecek koşulları için verilecek olursa; yenilikçi türlerin sisteme eklenmesi durumunda bu oranın sabit kalacağı kabul edilirse, otonom taşıtların sisteme dâhil olmasıyla toplam özel taşıt tercihinin %14 mertebesinde artacağı sonucuna varılmaktadır. Dolayısıyla yakın gelecek koşullarında araçlı yolculuklar için özel taşıt yolculuklarının toplu taşımaya olan kaymalar dikkate alınmaksızın artış oranı:

$$KToto = (0,461 - 0,319) / 0,319 = 0,445 = \%44,5 \text{ olacaktır.}$$

Uçan taksi ulaşım türüne karayolu ile aktarmaların SAV ile yapılacağı varsayılmıştır. Toplu taşıma tercih oranının SAV ve uçan taksiye kayması ile oluşacak kıskırtılmış talebin tahmin edilebilmesi için, 2016 hanehalkı ulaşım anketi verilerine dayalı yolculuk sayıları referans alınarak yolculuk sayıları üzerinden bir yaklaşım geliştirilmiştir. Yakın gelecek için hesaplamalar detaylı olarak gösterilecek olursa;

-Toplu taşımayı kullanmaktan vazgeçen yolcu sayısı: $TAYS * (0,524 - 0,258) = 1162705$

- Toplu Taşımayı Kullanmaktan vazgeçen yolcu sayısının zirve saat özel taşıt karşılığı: $TAYS * (0,524 - 0,258) * (\text{ÖTMZ} / \text{ÖT}) / 1,3 = 90696,66$

-Toplu Taşımayı Kullanmaktan vazgeçen yolcu sayısının zirve saat SAV karşılığı: $TAYS * (0,524 - 0,258) * (\text{ÖTMZ} / \text{ÖT}) / 2 = 33687,33$

-Tür Değişikliği kaynaklı kıskırtılmış talep oranı: $(TAYS * (0,524 - 0,258) * (\text{ÖTMZ} / \text{ÖT}) / 2) / \text{ÖTMZ} = 0,239$

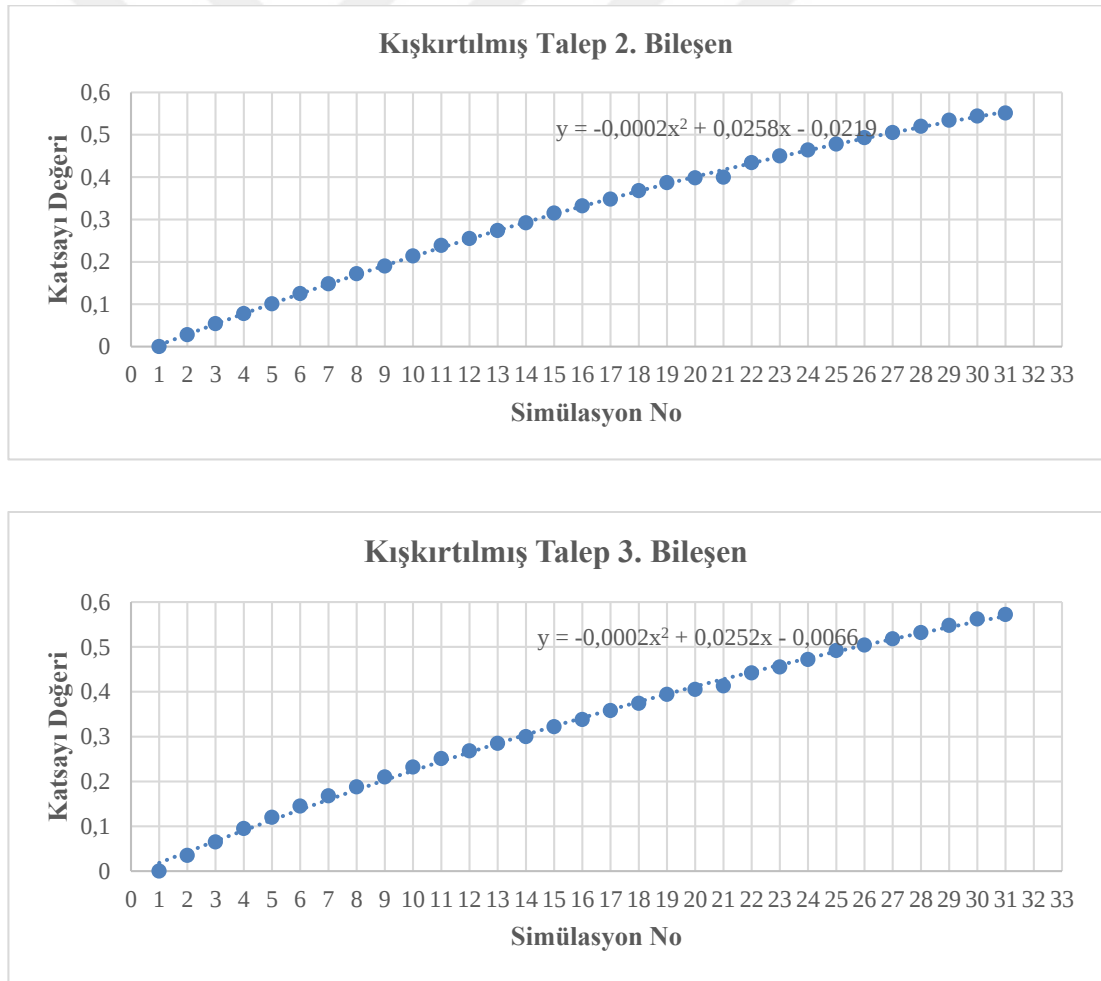
Bu hesaplamalarda belirtilen kısaltmalar ve değerleri;

TAYS	: Toplam araçlı yolculuk sayısı	4371071
ÖT	: Özel taşıt kullanan yolcu/gün	1392398
ÖTMZ	: Özel taşıt matrisi zirve saat toplamı	141198
POD	: SAV doluluk oranı	3,5
ÖTDO	: Özel Taşıt doluluk oranı	1,3

Kıskırtılmış talebin son bileşeninde ise, yakın gelecekte uçan taksi ve SAV toplam oranı: $\%17,7 + \%27,9 = \%45,6$ olarak, mevcut özel taşıt oranı: $\%31,9$ olarak ve POD dikkate alınırsa artış oranı $(0,116 + 0,164) / 2 / 0,319 = 0,251$ olarak hesaplanır. Dolayısıyla yakın gelecek için ÖTMZ kıskırtılmış talep bileşenleri altında

güncellenirken $\text{ÖTMZ} + \text{ÖTMZ} * 0,445 + \text{ÖTMZ} * 0,239 + \text{ÖTMZ} * 0,251 = 1,934 * \text{ÖTMZ}$ olarak belirlenmiştir.

Önceki bölümlerde detayları açıklandığı üzere, yakın orta ve uzak gelecek koşulları 10 farklı senaryo durumunda temsil edilmiştir. Yapılan hesaplamalarda bulunan değerler belirtilen gelecek durumunun en son senaryosunda uygulanacak şekilde kabul edilmiştir. Bu senaryoların dışındaki senaryolarda kullanılacak katsayıların seçimi ise Şekil 3. 17’de belirtilen 2. Dereceden eğri üzerindeki değerler kullanılarak belirlenmiştir. Katsayıların seçiminde doğrusal bir interpolasyon yerine eğrisel bir interpolasyon seçimi gerçekleştirilmiştir. Tablo 3. 14’de, İzmir kentsel ulaşım ağında kalibrasyon ve doğrulama işlemleri sonrasında gerçekleştirilecek simülasyonlarda kullanılacak kısırtılmış talep bileşenlerinin katsayıları detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3. 17 Kısırtılmış talep bileşenlerinin katsayı seçiminde kullanılan eğriler

Tablo 3. 14 Kısıktırılmış talep bileşenleri katsayılarının senaryolara göre dağılımı

	No	Kısıktırılmış Talep 1. bileşen	Kısıktırılmış Talep 2. bileşen	Kısıktırılmış Talep 3. bileşen	Katsayılar Toplamı
MEVCUT DURUM	1	-	-	-	1
	2	-	-	-	1
	3	-	-	-	1
YAKIN GELECEK	4	0,045	0,028	0,035	1,108
	5	0,089	0,054	0,065	1,208
	6	0,134	0,078	0,095	1,307
	7	0,178	0,101	0,120	1,399
	8	0,223	0,125	0,145	1,493
	9	0,268	0,148	0,168	1,584
	10	0,312	0,172	0,188	1,672
	11	0,357	0,190	0,210	1,757
	12	0,401	0,214	0,232	1,847
	13	0,446	0,239	0,251	1,935
ORTA GELECEK	14	0,446	0,255	0,268	1,969
	15	0,446	0,274	0,285	2,005
	16	0,446	0,292	0,300	2,038
	17	0,446	0,315	0,322	2,083
	18	0,446	0,332	0,338	2,116
	19	0,446	0,348	0,358	2,152
	20	0,446	0,368	0,374	2,188
	21	0,446	0,387	0,394	2,227
	22	0,446	0,398	0,405	2,249
	23	0,446	0,400	0,413	2,258
UZAK GELECEK	24	0,446	0,434	0,442	2,322
	25	0,446	0,450	0,455	2,351
	26	0,446	0,464	0,472	2,382
	27	0,446	0,478	0,492	2,416
	28	0,446	0,493	0,504	2,443
	29	0,446	0,505	0,518	2,469
	30	0,446	0,520	0,532	2,498
	31	0,446	0,534	0,548	2,528
	32	0,446	0,544	0,562	2,552
	33	0,446	0,551	0,572	2,569
TAMAMEN OTONOM	34	0,446	0,551	0,572	2,569

3.6 Trafik Atama ve Rota Seçimi

Trafik atama, bir karayolu ağındaki B/V noktaları arasında belirlenen seyahat taleplerinin ulaşım ağındaki linklere yüklenerek trafik akımlarının oluşturulduğu bir süreçtir. Trafik atama probleminin çözümü için ulaşım ağında tanımlı araçların rota seçim kararlarını hangi doğrultuda verdikleri büyük önem taşımaktadır. Bir yol ağında rota seçimlerini hesaplayabilmek için B/V matrisinin yanında ağıdaki seyahat süreleri hakkında da bilgiye ihtiyacımız vardır. Bu seyahat süreleri rota seçimlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Sheffi, 1985; Yuan, Li ve Bao, 2022). Bu nedenle kendi içinde tutarlı seyahat süreleri ortaya çıkaran bir dizi rota seçimi belirlememiz gerekmektedir. Rota seçim modelleri temelde iki sınıfa ayrılabilir. Birincisi, rota seçimleri ile trafik atamaları yapılarak maliyet fonksiyonlarına göre yani seyahat sürelerinin toplamını optimize etmeye çalışan “Sistem Optimumu” yaklaşımıdır. İkincil yaklaşım ise tüm sürücülerin rotalarını bireysel olarak seçmesi ve varsayım olarak her bireyin kendi seyahat süresini optimize etmeye çalışmasıdır. “Kullanıcı Dengesi” olarak adlandırılan yaklaşımda tüm rotaların maliyetleri eşittir ve kullanılmayan hiçbir rotanın maliyeti daha düşük değildir. Bu durum kullanıcıların rotalarını tek taraflı değiştirerek seyahat süresini iyileştiremeyeceği bir ağ dengesi olarak görülebilir (Chow, 2009; Gawron, 1998; Wardrop, 1952). Burada, Deterministik Kullanıcı Dengesi (DKD) olarak literatürde geçen yaklaşım ortaya çıkmaktadır. Ancak pratikte, sürücüler güzergahları hakkında tam bir bilgiye sahip değildir ve bu seçimi yaparken hata yapabilirler. Bu durumda, sürücülerin davranışlarındaki rastgelelik göz önüne alınmalıdır, bu da SKD durumuna yol açar.

SKD, trafik atama problemlerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, belirli bir rota veya yol ağı için önerilen yolları veya rotaları belirlerken, trafik yoğunluğunun rastgele değişimlerini dikkate alır. Bu, sistemin belirsizlik altında çalışmasına olanak tanır ve trafik yoğunluğunun zaman içinde değişebileceği durumlarda daha esnek bir çözüm sağlar. SKD yöntemi, trafik yoğunluğunun rastgele değişimlerini modellemek için birçok matematiksel modele dayanmaktadır. Bu modeller arasında, Wardrop I ve II eşitlikleri ve Beckmann'ın trafik atama modeli en yaygın olarak kullanılanlardır. Wardrop eşitlikleri, trafik yoğunluğunun rastgele değişimlerini modellemek için kullanılırken, Beckmann modeli ise trafik yoğunluğunun rastgele değişimlerini ve

sistemin kapasitesini dikkate alarak trafik atama problemlerinin çözümü için kullanılır (Beckmann, McGuire ve Winsten, 1956; Wardrop, 1952). SKD ve Wardrop Kullanıcı Dengesi arasındaki temel fark, SKD modelinde bir yol kullanıcısının diğerlerinin de düşündüğü ortak yolculuk süresini değil, kendine özgü bir yolculuk süresini dikkate almasıdır. SKD, kullanıcıların yolculuk süreleri konusundaki algılama çeşitliliğini hesaba katar ve bu algılama çeşitliliği, her bir kullanıcı için farklı yolculuk süreleri modellenir. Bu durum, belirli bir güzergâh üzerindeki algılanan yolculuk süresini, kullanıcılar arasında dağılmış olan bir rastgele değişken olarak dikkate alınır. SKD yaklaşımına göre, ulaşım ağında güzergâh kararının verilmesinde Denklem (3. 21)'de görüldüğü gibi sürücülerin ağ hakkındaki bilgi düzeyini temsil etmek için $\mathcal{E}_y^r$ hata terimi kullanılmaktadır.

$$S_y^r = s_y^r + \mathcal{E}_y^r, \quad r \in R_y, y \in Y \quad (3. 21)$$

Bu denklemde, B/V çiftindeki r rotası üzerinde algılanan ve gerçek maliyetler sırasıyla S_y^r ve s_y^r olarak gösterilmiştir. $\mathcal{E}_y^r$ ise r rotası üzerindeki seyahat maliyetlerinin algılanma hatasını temsil etmektedir. SKD'de güzergâh akımları $\mathcal{E}_y^r$ hata teriminin olasılık dağılımına bağlı olmaktadır. Bu aşamada logit ve probit tabanlı rota seçim modelleri olarak iki farklı varsayım ortaya çıkmaktadır.

Uygulama açısından bakıldığında, DKD atamasının sunduğu kolaylığa rağmen, SKD yaklaşımı sürücü davranışının daha doğru bir temsilini sağlar (H. Zhang ve Gao, 2007). Logit ve probit tabanlı modeller SKD atamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modellere ilişkin ayrıntılı bilgi, Dial (1971), Sheffi (1985), Ortuzar ve Willumsen (1994), Bell ve Iida (1997) tarafından yapılan çalışmaların da aralarında bulunduğu literatürde bulunabilir. SKD trafik atama yöntemi, literatürde bulunan diğer birçok trafik atama yöntemine göre daha esnek, uygulanabilir ve saha koşullarını yansıtan sonuçlar üretebilen bir yöntemdir; bunun başlıca nedeni, ulaşım ağı sorunlarını belirsizlikleri dikkate alarak ele alabilmesidir. Bu aşamada otonom araç uygulamalarını içeren ulaşım ağı problemlerinde birincil trafik atama yöntemi SKD olarak belirlenmiş olup, güzergahlar logit modeldeki Denklem (3. 22)-(3. 24)'e göre belirlenmiştir.

$$pr_{k,j}^i = \frac{\exp(-\theta C_k^i)}{\sum_1^k \exp(-\theta C_k^i)} \quad (3.22)$$

$$C_k^i = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^i c_a^i \quad (3.23)$$

$$\delta_{a,p}^i = \begin{cases} 1 & \text{eğer } a \text{ linki } k \text{ rotası üzerindeyse} \\ 0 & \text{yoksa} \end{cases} \quad (3.24)$$

Burada, $pr_{k,j}^i$ terimi, i iterasyonunda j aracı tarafından k rotasını seçme olasılığıdır. C_k^i terimi, i iterasyonunda k rotasının maliyeti (seyahat süresi)'dir. θ ise logit model ölçek parametresidir. Her araç grubu için, bireysel araçlarla ilişkilendirilmiş potansiyel rotalar $pr_{k,j}^i$ için logit modeli kullanılmıştır. Bu rotalar, belirli bir araç için erişilebilir k -en kısa rotaları içerir. Her alternatif rotaya atfedilen maliyet, o rotaya ilişkin seyahat süreleriyle belirlenir. Bu seyahat süreleri, önceki hesap adımında elde edilen ilgili linklerin seyahat sürelerinin toplamı olarak hesaplanır. Çeşitli alternatif rotaların bulunabilirliğini dikkate alarak, seyahat sürelerinde hafif farklılıklar olan her biri mutlak en kısa olanından farklı bir rota seçmek, potansiyel sıkışıklıklardan kaçınmak için makul bir seçenek olabilir. Bu nedenle, ölçeği temsil eden θ parametresi, bu rota alternatiflerine her birine olasılıklar atar. θ yüksek bir değere ayarlandığında, logit modeli sürekli olarak en kısa seyahat süresine sahip rotayı tercih ederken, düşük bir θ değeri logit modelinin tüm mevcut rotalara neredeyse eşit olasılıklar atmasına neden olur.

Trafik akımı doğası gereği zaman içerisinde değişkenlik göstermektedir. Simülasyon ortamında ağdaki farklı noktalardaki trafik koşulları hakkında ayrıntılı bilgiler sağlanarak bu bilgiler dinamik kullanıcı modelinde girdi olarak kullanılabilir. Model daha sonra bu bilgileri kullanarak farklı koşullar altında ağdaki trafik akımını nasıl öngöreceğini belirlemektedir (Flötteröd ve Erdmann, 2018; Sheng, Liu, Zhan, Wan ve Fan, 2023). Bu kapsamda, dinamik olarak otonom araçları yönlendirmeye ilk adım olarak SUMO ortamında tanımlanabilen özelliklerden biri olan 'Automatic Routing' seçeneği kullanılmıştır. Bu işlevsellik sayesinde araçlar, simülasyon sırasında trafik düzenlerindeki zamansal dalgalanmaları dikkate alarak

dinamik kararlar alınmasını sağlamıştır. Ulaşım ağının gerçek zamanlı durumunu ve burada meydana gelen değişiklikleri hesaba katmak için periyodik güzergâh denetimleri yapılmaktadır. Otonom araçların ulaşım sistemlerine entegre olacağı gelecek senaryolarında iletişim teknolojilerinin gelişeceği varsayımı göz önüne alındığında, otomatik yönlendirme özelliği gerçekçi ve dinamik bir ulaşım senaryosunu yansıtmaya açısından önemlidir.

Tez çalışmaları kapsamında “ReRouter (ReR)” cihazının aktif olduğu senaryolar, SKD senaryolarına ek olarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihazla donatılan araçlarda simülasyon esnasında dinamik olarak yönlendirme yapılması mümkün olmaktadır. ReR cihazının kullanılmasının aşağıda maddeler halinde verilmiş olan durumlarla karşı karşıya kalındığında kullanılması önerilmektedir (SUMO, 2024f);

- Dinamik kullanıcı dengesi hesaplamalarına yetecek kadar zamanın ve hesaplama gücünün olmadığı durumlarda,
- Simülasyon esnasında ağda değişiklikler meydana geldiğinde (tıkanıklık, linkin kapanması vs.)
- Simülasyon esnasında araçların rotalarını uyarlaması- adapte etmesi gerektiği zaman,

Bu durumlarda, ReR cihazı aktif ise araçların doğrudan rotalarında değişiklik için kullanılabilir. Bu yönlendirme yaklaşımı, bazı veya tüm araçlara belirli aralıklarla rotalarını yeniden hesaplama yeteneği vererek çalışır. Ulaşım ağındaki mevcut ve yakın zamandaki trafik durumunu dikkate alınmaktadır ve böylece trafik sıkışıklıklarına ve diğer ağ değişikliklerine uyum sağlanmaktadır. ReR cihazı tanımlanırken hangi araçların donatılacağı, ne sıklıkla yönlendirme kararının alınacağı ve seyahat sürelerinin mevcut ve yakın zamandaki bilgiden nasıl hesaplanacağına dair bilgiler detaylı olarak dikkate alınmıştır. Örneğin: *-device.rerouting.period value=“10”*: Araçların yönlendirmelerinin ne sıklıkla yapıldığını belirler.

3.7 ÇKKV ve KDS

Bu bölümde ÇKKV teknikleri ve karar destek mekanizmasında kullanılan puanlama modelleri alt başlıklar halinde detaylı olarak incelenmiştir.

3.7.1 ÇKKV

Otonom araçların ulaşım sistemlerine entegrasyonunun SKHP kriterlerine göre değerlendirilmesi, tek bir hedef yerine bir dizi farklı kriterin aynı anda göz önünde bulundurulmasını gerektirir. Günümüz şehirlerinin karşılaştığı çeşitli sorunlar dikkate alındığında, SKHP kriterlerinin sağlanması gereken sürdürülebilirlik etkilerinin farklılık gösterebileceği daha önceki bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır. Bu aşamada, yerel otoriteler, sürdürülebilirlik beklentilerine dayalı olarak SKHG'nin etki ağırlıklarını uzmanlar, halk ve karar vericilerin katkılarıyla belirleyebileceği göz önünde bulundurulmuştur. Bu şekilde, otonom araçların sistem içine entegrasyonu, planlanan karar alma süreçleri, ÇKKV yöntemlerinden elde edilen verilere dayanarak doğru ve etkili bir şekilde yönlendirilecektir. ÇKKV teknikleri, geniş bir yelpazede çeşitli yöntemleri içerir. Bu yöntemler arasında AHP, WASPAS, TOPSIS, ELECTRE, ve PROMETHEE gibi bilinen tekniklerin yanı sıra farklı yaklaşımlarla ele alınmış çok sayıda metodoloji bulunmaktadır. Her biri farklı bağlamlarda ve farklı problem tiplerinde kullanılabilir.

ÇKKV teknikleri, farklı kriterlere dayalı olarak alternatiflerin değerlendirilmesini ve sonuçların ağırlıklandırılarak en iyi alternatiflerin belirlenmesini sağlamaktadır. ÇKKV yöntemlerinin genel olarak uygulama aşaması aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir;

- **Kriterlerin Belirlenmesi:** İlk adım, karar verme sürecinde kullanılacak olan kriterlerin belirlenmesidir. Kriterler, alternatiflerin performansını değerlendirmek için kullanılan ölçütlerdir.
- **Kriterlerin ağırlıklandırılması:** Bu adımda, her bir kriterin önem derecesi belirlenir. Ağırlıklar, karar vericinin tercihlerine veya uzman görüşlerine dayanabilir. Örneğin, bir kriter diğerlerine göre daha önemli kabul edilebilir ve daha yüksek bir ağırlıkla değerlendirilebilir.

- Kriterlerin standartlaştırılması: Farklı kriterlerin ölçekleri ve birimleri farklı olabilir. Bu nedenle, karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için kriterler standartlaştırılır. Standartlaştırma, her kriter için 0 ile 1 arasında değerler elde edilmesini sağlar.
- Karar matrisinin oluşturulması: Bu adımda, alternatiflerin her bir kriter için performans değerleri dikkate alınarak bir karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi, alternatiflerin performansını temsil eder.
- Seçilen ÇKKV tekniğine göre hesaplamaların yapılması: Karar matrisi kullanılarak seçilen metodolojiye bağlı olarak hesaplamalar gerçekleştirilir.
- Sıralama ve Sonuçların Yorumlanması: Hesaplamaların ardından alternatifler sıralanır. En yüksek puana sahip alternatif en iyisi olarak kabul edilir.

Tez çalışmaları kapsamında, üçüncü bölümde açıklanan B-AHP yöntemi kullanılarak SKHG'lerin ağırlıkları belirlendikten sonra, ÇKKV yöntemlerinden CODAS (COmbinative DIstance-based ASsessment), MARCOS (Measurement Alternatives and Ranking According to Compromise Solution) ve WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) teknikleri, kısıktılmış seyahat talebi alternatif senaryoları arasında en iyi ve en kötü performans gösteren seçeneklerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Böylece, kısıktılmış seyahat taleplerine uygun üç farklı ÇKKV tekniğiyle birleştirilmiş bir yaklaşımla kritik penetrasyon oranlar belirlenecektir. Daha sonra, ilerleyen başlıklarda detaylı açıklanacak olan karar destek mekanizmasının daha etkili bir şekilde işlemesi amaçlanmıştır.

3.7.1.1 CODAS

CODAS yöntemi ÇKKV problemlerine çözüm getirmesi amacıyla Keshavarz, Zavadskas, Turskis ve Antucheviciene (2016) tarafından literatüre kazandırılmış yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, alternatifler arasındaki farklar değerlendirilirken, Öklidyen ve Manhattan mesafeleri kullanılarak alternatifler arasındaki benzerlikler ölçülür. Tercih seviyeleri, alternatiflerin negatif ideal çözümden (NIS) olan mesafelerine bağlı olarak belirlenir. Böylelikle, en uygun alternatifler Öklidyen ve Manhattan mesafelerinin birleşik formuna dayanarak alternatiflerin değerlendirme puanının hesaplanmasında kullanılır (Dahooei,

Zavadskas, Vanaki, Firoozfar ve Ghorabae, 2018). CODAS yöntemi diğer ÇKKV yöntemleriyle karşılaştırıldığında, alternatiflerin değerlendirilmesinde karar vericilere daha kapsamlı bir bakış açısı sunar ve Ökliden ve Manhattan mesafelerinin birleşik kullanımıyla daha kapsamlı sonuçlar sağlar (I. A. Badi, Abdulshahed ve Shetwan, 2018; Rahim, 2022). CODAS yönteminin etkinliğini değerlendirmek için WASPAS, COPRAS, TOPSIS, VIKOR ve EDAS gibi daha önce doğrulukları kanıtlanmış yöntemler karşılaştırılarak duyarlılık analizi yapılmıştır. Daha sonra sıralamalar arasındaki ilişkinin incelenmesi için korelasyon analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları CODAS yöntemiyle elde edilen başarılı sonuçları ortaya koymuştur (Keshavarz vd., 2016). CODAS yönteminin uygulama adımları aşağıdaki sıralanmıştır;

- m alternatif ve n kriterine göre Y karar matrisinin oluşturulması Denklem (3. 25) ile gösterilmiştir;

$$Y = [y_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n) \quad (3. 25)$$

burada y_{ij} , i. alternatif ve j. kriteri gösterir.

- Normalizasyon karar matrisinin hesaplanması Denklem (3. 26)'da gösterilmiştir;

$$m_{ij} = \begin{cases} \text{fayda yönlü kriter için;} & m_{ij} = \frac{y_{ij}}{\max y_{ij}} \\ \text{maliyet yönlü kriter için;} & m_{ij} = \frac{\min y_{ij}}{y_{ij}} \end{cases} \quad (3. 26)$$

burada, m_{ij} i. alternatif ve j. kriterin normalize edilmiş performansını ifade eder.

- Ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisinin Denklem (3. 27)'le hesaplanması;

$$r_{ij} = w_j * m_{ij}$$

burada, (w_j değeri $0 < w_j < 1$ kriter ağırlığıdır ve) $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 'dir. (3. 27)

- NIS Denklem (3.28) ve Denklem (3.29) yardımıyla tanımlanır;

$$NIS = [NIS_j]_{1 \times m} \quad (3.28)$$

$$NIS_j = \min r_{ij} \quad (3.29)$$

- Öklidyen ve Manhattan uzaklıklarının Denklem (3.30) ve Denklem (3.31) ile hesaplanması;

$$\ddot{O}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - NIS_j)^2} \quad (3.30)$$

$$M_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - NIS_j| \quad (3.31)$$

- Karşılaştırmalı değerlendirme matrisinin Denklem (3. 32) ve Denklem (3. 33) yardımıyla oluşturulması;

$$R_a = [h_{ik}]_{n \times n} \quad (3.32)$$

$$h_{ik} = [\ddot{O}_i - \ddot{O}_k] + (\varphi[\ddot{O}_i - \ddot{O}_k] * [M_i - M_k]) \quad (3.33)$$

burada, $k \in \{1,2,\dots,n\}$ ve φ ise iki alternatifin öklidyen mesafelerini tanımlamak için bir eşik fonksiyonunu ifade eder (Denklem (3. 34));

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 & |x| \geq \tau \\ 0 & |x| < \tau \end{cases} \quad (3.34)$$

Bu fonksiyonda τ parametresi analizi yapan kişiler tarafından oluşturulan bir başlangıç değeridir. Bu değer için 0,01 ve 0,05 değerleri arasında bir değer olacak şekilde seçim yapılır. İki alternatifin Öklidyen mesafeleri arasındaki mutlak fark τ 'dan küçükse, bu durumda iki alternatifin de Manhattan mesafeleri kıyaslanır.

- Her bir alternatif için değerlendirme puanlarının hesaplanması ve karşılaştırılması Denklem (3. 35) ile yapılır;

$$H_i = \sum_{k=1}^n h_{ik} \quad (3.35)$$

burada, alternatifler H_i değerlendirme puanı doğrultusunda sıralanır. En yüksek değere sahip olan alternatif en iyi alternatif veya en iyi çözüm olarak kabul edilir. CODAS yöntemi, farklı penetrasyon oranlarına sahip otonom araç senaryolarında kritik oranların belirlenmesinde kullanılan ilk tekniktir. Diğer ÇKKV tekniklerine göre nispeten yeni ve sağlam yapısı nedeniyle CODAS yöntemi, otonom araç senaryolarından elde edilen karmaşık veri setlerinin analizinde objektif bir değerlendirme sağlaması açısından tercih edilmiştir.

3.7.1.2 MARCOS

Literatüre son yıllarda kazandırılan ÇKKV tekniklerinden biri olan MARCOS yöntemi Stević, Pamučar, Puška ve Chatterjee (2020) tarafından geliştirilmiş olup, ideal değerler ve alternatifler arasındaki ilişkilerin tanımlanmasına dayanan bir metodoloji sunmaktadır. MARCOS tekniği, alternatifler ile referans değerler arasındaki ilişkiyi anlamak için kullanılır ve bu ilişkiler temel alınarak alternatiflerin fayda fonksiyonları belirlenir. Ardından, ideal ve karşıt-ideal çözümlere dayalı bir sıralama yapılır. Bu yöntemde, karar tercihleri fayda fonksiyonlarına göre belirlenir. En iyi alternatif, ideal noktaya en yakın olan ve aynı zamanda karşıt-ideal referans noktasına en uzak olan olarak belirlenir. İdeal ve karşıt-ideal çözümler, yarar ve maliyet temelli kriterlere göre değişir. Yarar kriterlerine göre, ideal çözüm en yüksek değere sahip olan alternatif olarak tanımlanırken, maliyet kriterleri için ideal çözüm en düşük değere sahip olan alternatif olarak kabul edilir. Bu nedenle, karşıt-ideal çözümde, yarar kriterleri için en düşük değere sahip olan alternatif ve maliyet kriterleri için en yüksek değere sahip olan alternatif aranır (Ecer, 2020; Stević ve Brković, 2020). MARCOS yönteminin uygulama adımları aşağıda belirtildiği gibidir;

- Karar verme problemi, alternatiflerin sayısı (m) ve bu alternatiflerin özellikleri (n) olacak şekilde bir X karar matrisi oluşturulur (Denklem (3.36)).

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.36)$$

- Oluşturulan matris, ideal (I) ve anti-ideal (AI) çözümleri içerecek şekilde Denklem (3.37)'de gösterildiği gibi genişletilir,

$$X = \begin{matrix} AI \\ A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \\ I \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{a1} & x_{q1} & \cdots & x_{an} \\ x_{a1} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{a1} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \\ x_{a1} & x_{i2} & \cdots & x_{in} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

burada, faydalı veya faydasız olabilen özelliklere dayalı olarak, AI ve I sırasıyla aşağıdaki eşitliklere (Denklem (3.38) ve Denklem (3.39)) göre hesaplanır;

$$AI = \min x_{ij}, \text{ eğer } j \in Y \text{ ve } \max x_{ij} \text{ eğer } j \in YD \quad (3.38)$$

$$I = \max x_{ij}, \text{ eğer } j \in Y \text{ ve } \min x_{ij}, \text{ eğer } j \in YD \quad (3.39)$$

burada, Y ifadesi yararlı özelliği temsil ederken, YD yararlı olmayan özelliği temsil eder. Kriter örneğin maliyet gibi yararlı olmayan bir özellikse, o zaman ideal çözüm I o özellikten gelen alternatifler arasındaki minimum değer olacak ve anti-ideal çözüm o özellikten gelen alternatifler arasındaki maksimum değer olacaktır.

- Genişletilmiş başlangıç matrisindeki (X) ideal ve anti-ideal değerlerin bulunmasından, bunların normalize edilmesi gerekmektedir. x_{ij} değerleri farklı birimlerde olabilir. Bu değerlerin karşılaştırılabilir hale gelmesi ve boyutsuz olması için ortak bir ölçekte ifade edilmelidir. MARCOS yönteminde, kriterlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesi için Denklem (3.40)'ta belirtildiği gibi doğrusal oran temelli bir normalleştirme yöntemi kullanılır.

$$R = [r_{ij}]_{m \times n} \quad (3.40)$$

burada, r_{ij} normalizasyon sonrası x_{ij} değeridir ve bu değer aşağıdaki eşitlikler (Denklem (3. 41) ve Denklem (3. 42)) uygulanarak elde edilir:

$$r_{ij} = \frac{x_{ai}}{x_{ij}}, \text{ eğer } j \in YD \quad (3. 41)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_i}, \text{ eğer } j \in Y \quad (3. 42)$$

burada, x_i ve x_{ai} elemanları, ideal (yararlı kriter için maksimum değer) ve anti-ideal (yararlı olmayan kriter için minimum değer) olarak tanımlanır.

- Alternatiflerin özellikleri B-AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmıştı. Ağırlıklı matris D hesaplanır. Normalleştirilmiş elemanlar R ve özelliklere atanan w_j ağırlıklarının çarpımı, Denklem (3. 43)'te gösterildiği gibi bir sonraki adımdır.

$$D = [d_{ij}]_{m \times n} \quad , \quad d_{ij} = r_{ij} * w_j \quad (3. 43)$$

- Aşağıdaki eşitlikler (Denklem (3. 44)) kullanılarak her alternatifin fayda derecelerine K_i değerleri hesaplanarak devam edilir,

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad , \quad K_i^+ = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad (3. 44)$$

burada, S_i , ağırlıklı matris D'nin elemanlarının toplamını temsil ederken (Denklem(3. 45)), S_{ai} ve S_{aai} sırasıyla ideal ve anti-ideal çözümlerin toplamını temsil eder.

$$S_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (3. 45)$$

- Her alternatifin $f(K_i)$ yani fayda fonksiyonunun hesaplanması için Denklem (3. 46)'da verilen eşitlik kullanır,

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (3.46)$$

burada, $f(K_i^-)$ anti-ideal çözümle ilgili olan fayda fonksiyonunu ifade ederken, $f(K_i^+)$ ise ideal çözümle ilgilidir ve bu değerler Denklem(3. 47)'de verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad , \quad f(K_i^+) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (3.47)$$

- Son aşamada, alternatiflerin sıralanmasında fayda fonksiyonunun değerlerine göre büyükten küçüğe sıralamalar gerçekleştirilir.

MARCOS yönteminin literatürde karmaşık ve çok amaçlı mühendislik problemlerinin karar verme süreçlerinde etkin bir şekilde uygulandığı görülmektedir. Duyarlılık analizlerinin tüm aşamaları MARCOS yönteminin geçerliliğini kanıtlamıştır. (I. Badi ve Pamucar, 2020; Duc Trung, 2022; Varghese ve Karande, 2022). Otonom araç senaryolarından ve SKHP hedeflerinden elde edilen çeşitli çıktılar göz önüne alındığında, tıpkı CODAS yönteminde olduğu gibi karar destek mekanizmalarını daha iyi bilgilendirmek amacıyla literatürde nispeten yeni bir yaklaşım olan MARCOS tekniğinin kullanılmasına karar verilmiştir.

3.7.1.3 WASPAS

WASPAS yöntemi, başlangıçta E. K. Zavadskas, Turskis, Antucheviciene ve Zakarevicius (2012) tarafından önerilen ağırlıklı toplam model (WSM) ve ağırlıklı çarpım modeli (WPM) yöntemlerinin bir kombinasyonu olarak ortaya çıkmıştır. WSM yöntemi genellikle bir alternatifin puanını kriter değerlerinin ağırlıklı toplamı olarak belirlerken, WPM yöntemi bir alternatifin puanını her kriterin ölçeğine eşit önem veren bir ölçü derecesinin belirli bir kriterin ağırlığı ile çarpımı olarak tanımlar (Turskis vd., 2015). WASPAS tekniği, ağırlıklı toplam fonksiyonlarını dinamik bir şekilde güncelleyerek en üst düzeyde tahmin doğruluğunu elde etmekte ve farklı türde çok kriterli problemlerin çözümünde etkili bir araç olarak kabul görmektedir (Deveci, Canitez ve Gökaşar, 2018). Farklı ÇKKV yöntemlerinden elde edilen sonuçların

tutarlılığına ilişkin akademik tartışmalar hala devam etmektedir. Dolayısıyla, iki farklı çok kriterli optimizasyon yaklaşımının birleştirilmesi tek bir yöntemle daha tutarlı sonuçlar sağlayabilir. Bu nedenle, ölçüm doğruluğuna dayalı akademik çalışmalarda WASPAS yöntemi en uygun ÇKKV tekniği olarak önerilmektedir. (Zavadskas, Šaparauskas ve Turskis, 2013). WASPAS yönteminin uygulama adımları aşağıda belirtildiği gibidir;

- Farklı alternatiflerin farklı kriterler altında gösterildiği X karar matrisi Denklem (3. 48)'de belirtildiği şekliyle oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n) \quad (3. 48)$$

- Aşağıda sıralanmış Denklem (3. 49) ve Denklem (3. 50) aracılığıyla karar matrisi elemanlarının doğrusal normalizasyon işlemi gerçekleştirilir;

Fayda kriterleri için,

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (3. 49)$$

Maliyet kriteri için,

$$x_{ij}^* = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (3. 50)$$

burada, i alternatifinin j kriteri altındaki performansı x_{ij} ile gösterilmektedir.

- WSM ve WPM yöntemlerine göre alternatiflerin toplam görelî önemleri hesaplanır. WSM'ye göre bu değer kriter değerlerinin ağırlıklı toplamı olup WPM'ye göre ise bir alternatifin kriter bazında değerinin o kriterin belirlenmiş olan ağırlığı (w_j) kadar kuvvetinin çarpımı olarak hesaplanır.

burada, WSM'ye göre i. alternatifin toplam görelî önemi şu şekildedir (Denklem (3. 51));

$$Q_1^{(1)} = \sum_{j=1}^n x_{ij}^* * w_j \quad (3. 51)$$

WPM'ye göre i. alternatifin toplam görelî önemi şu şekildedir (Denklem (3. 52));

$$Q_1^{(2)} = \prod_{j=1}^n (x_{ij}^*)^{w_j} \quad (3. 52)$$

- Önceki adımda WSM ve WPM yöntemlerine göre hesaplanmış alternatiflerin toplam görelî önemleri aşağıdaki Denklem (3. 53)'e göre genelleştirilmektedir.

$$Q_i = 0,5Q_1^{(1)} + 0,5Q_1^{(2)} = 0,5 \sum_{j=1}^n x_{ij}^* * w_j + 0,5 \prod_{j=1}^n (x_{ij}^*)^{w_j} \quad (3. 53)$$

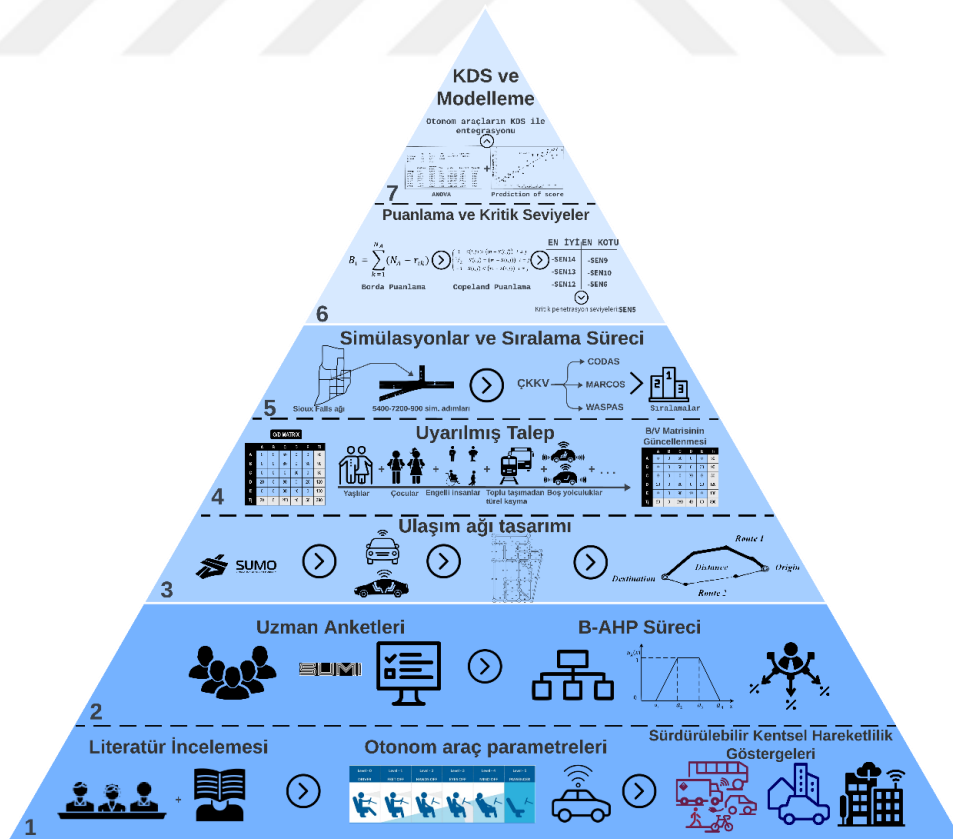
- Son adımda, karar verme süreci tamamlanır. Burada λ , 0 ile 1 arasında değeri alabilen bir parametredir. $\lambda = 0$ olarak belirlenirse WPM yöntemi; $\lambda = 1$ olarak belirlenirse WSM yöntemine dönüşmektedir. Toplam görelî önemini belirlemek için daha genel bir denklem aşağıdaki gibi geliştirilmiştir (Denklem (3. 54));

$$Q_i = \lambda Q_1^{(1)} + (1 - \lambda) Q_1^{(2)}, \quad (\lambda = 0, 0,1 \dots, 1) \quad (3. 54)$$

Otonom araçların ulaşım sistemlerine entegrasyonu ve sonrasında planlanan karar destek mekanizması işlevselliğinin geliştirilmesine ilişkin kararlar, birden fazla kriterin dikkate alındığı sorunları içermektedir. Önceki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanan otonom araç senaryolarının SKHG çerçevesi ve kısıktırılmış talep etkilerinin etkisi altında gerçekleştirilmesinin ardından, elde edilen çıktılar doğru ve tutarlı bir şekilde değerlendirilmesi için CODAS, MARCOS ve WASPAS teknikleri ayrı ayrı uygulanarak bir puanlama sistemi oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, ÇKKV tekniklerinin tutarlılığını ölçmek için alternatif sıralamaların karşılaştırılmasına olanak sağlar. Sıralamalarda farklılık olması durumunda, üç farklı tekniğin puanlarının ortalaması alınarak KDS üzerindeki etki en aza indirilecektir.

3.7.2 KDS

Ulaşım sistemlerinde otonom araçların yaygın kullanımının sürdürülebilir gelişim doğrultusunda ilerleyip ilerlemediğinin belirlenmesi tezin hipotezi olarak belirlenmişti. Sürdürülebilir gelişimden kasıt SKHP’de detaylı olarak bahsedilen çevresel, sosyal ve ekonomik göstergelerdir. Sürdürülebilirlik anlamında ilerlemelerin izlenebilmesi açısından somut göstergelerin belirlenmesi gerekliliği daha önceki başlıklarda detaylı olarak incelenmişti. Otonom araçlarla ilgili göstergelerin ilerlemesini izlemek için uzman anketleri yardımıyla SKHG’ler arasından karar verme mekanizmasında kullanılmak üzere anlamlı olanları seçilmiştir ve simülasyonlar gerçekleştirilerek gösterge değerleri sayısal olarak ifade edilmiştir. Bu aşamada, özellikle Seviye 4-5 düzeylerinde sürücüsüz taşıtların ulaşım ağlarına herhangi bir önlem alınmadan veya sınırları belirlenmeden eklenmesi durumunda sürdürülebilirlik açısından olumsuz durumlar olacağı öngörülerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmaları kapsamında karar destek mekanizması geliştirilmesi sürecinde gerçekleştirilen işlemlerin aşamaları Şekil 3. 18’de görüldüğü üzere özetlenmiştir.



Şekil 3. 18 Karar destek mekanizması oluşturulması süreci

Uzman anketlerinden B-AHP yöntemiyle sürdürülebilirlik göstergelerinin seçimi ve ağırlıklandırılması, sonrasında ÇKKV tekniklerinden MARCOS, CODAS ve WASPAS teknikleri aracılığıyla belirlenen senaryolar arasında en iyiden başlamak üzere sıralamalar yapılmıştır. Ancak, farklı ÇKKV yöntemleri kullanıldığında, her yöntem kendi benzersiz sıralamalarını oluşturabilir. Bu nedenle, farklı ÇKKV tekniklerinden elde edilen sonuçları birleştirmek, karar vericilerin daha bütünsel bir perspektif benimsemelerini ve kararlarını daha sağlam bir temele dayandırmalarını sağlamak için gereklidir. Bu entegrasyon süreci, farklı yöntemlerin güçlü ve zayıf yönlerini daha iyi anlamamıza yardımcı olabilir.

Literatürde, iki veya daha fazla sıralama formatını daha rasyonel bir forma dönüştürebilecek basit tekniklerden biri Borda sayım yöntemidir. Bu yöntem modern seçim sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılarda bulunarak elde edilen bireysel tercihlerin toplamına göre sıralama yapmayı amaç edinen bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Çakır ve Perçin, 2013). Grup karar verme problemleri için literatürde sıklıkla kullanılan bu yöntem her bir sıralama yönteminin kendine özgü bir tekniği olduğunu varsayarak bunları ek bağımsızlık varsayımı üzerine değerlendirir ve tek bir sıralama elde edilmesini sağlar (Cömert, 2018).

Bu yönteme göre, en çok tercih edilen seçenek toplam seçenek sayısından (NA) 'NA-1' puan alır, ikinci en çok tercih edilen seçenek 'NA-2' puan alır ve en az tercih edilen seçenek sıfır puan alır. Son olarak, alternatiflere tahsis edilen puanlar toplanarak Borda skoru hesaplanır ve bir sıralama elde edilir. Borda skoru Denklemi (3. 55)'de görülebilir. Burada, r_{ik} i seçeneğinin kaç kez k'inci konumda bulunduğunu temsil etmektedir (Akyüz ve Aka, 2017; Topcu vd., 2019).

$$B_i = \sum_{k=1}^{N_A} (N_A - r_{ik}) \quad (3. 55)$$

Otonom araçların ulaşım ağındaki kritik penetrasyon oranının belirlenmesinde, farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar Borda puanlama yöntemi ile birleştirildiği gibi literatürde yaygın olarak kullanılan bir diğer teknik olan Copeland yöntemi kullanılarak da birleştirilmiştir. Copeland yöntemiyle ortaya

konulan temel fikir, "azınlık çoğunluğa uyar" ilkesidir. Bir alternatifin diğer alternatiflere karşı kazanma veya kaybetme sayısını kaydetmek için ikili karşılaştırma matrisleri kullanılır. Copeland yöntemi, geniş bir kullanım alanına sahip olan basit bir parametrik olmayan sıralama yöntemidir. KDS sisteminin geliştirilmesinde uygulanan Copeland yöntemi için kullanılan parametreler ve uygulanacak işlem adımları aşağıda sıralanmıştır (Çakır, 2017; Özdağoğlu, Keleş, Altınata ve Ulutaş, 2021).

- İlk adım olarak, alternatifler arasında ikili karşılaştırmalar Denklem (3. 56)'ya göre yapılır ve bu karşılaştırmalarda büyük, küçük veya eşit olması durumuna göre puan değerleri alınır.

$$f_k(i, j) = \begin{cases} 1, & r_k(A_i) < r_k(A_j) \quad \text{ve } i \neq j \\ 0, & r_k(A_i) > r_k(A_j) \quad \text{ve } i \neq j \\ \text{boş } (-), & r_k(A_i) = r_k(A_j) \quad \text{ve } i = j \end{cases} \quad (3. 56)$$

- Bu adımda karar verici bazında puan değerleri $S(i, j)$ hesaplanmaktadır (Denklem (3. 57)). A_i alternatifinin A_j alternatifine göre elde ettiği toplam puan değeri $S(i, j)$ olarak ifade edilmiştir. Böylece i. alternatifin j. alternatifine göre almış olduğu puan değeri elde edilmiştir.

$$S(i, j) = \sum_{k=1}^m f_k(i, j) \quad \text{ve } i \neq j \quad (3. 57)$$

- $S(i, j)$ yardımıyla hesaplanan alternatifler arasındaki karşılaştırmada galip gelenler aşağıdaki eşitliklere (Denklem (3. 58)) göre belirlenmiştir. Eşitliğe göre galip taraf 1 puan alırken, yenilen taraf -1 puan almaktadır. Eşitlik durumunda ise ½ puan verilmektedir.

$$G(i, j) = \begin{cases} 1, & S(i, j) > (m - S(i, j)) \quad , \quad i \neq j \\ \frac{1}{2}, & S(i, j) = (m - S(i, j)) \quad , \quad i \neq j \\ -1, & S(i, j) < (m - S(i, j)) \quad , \quad i \neq j \end{cases} \quad (3. 58)$$

- Elde edilen 1 ve ½ puanlarına sahip $G(i, j)$ değerleri alternatifler bazında toplanarak galibiyet puanını (GP_i) (Denklem (3. 59)); -1 puan değerine sahip

olan $G(i, j)$ değerleri alternatifler bazında toplanarak yenilgi puanı (YP_i) (Denklem (3. 60)) elde edilir.

$$GP_i = \sum_{i=1}^n G(i, j), \quad G(i, j) > 0 \text{ olması durumunda} \quad (3. 59)$$

$$YP_i = \sum_{i=1}^n G(i, j), \quad G(i, j) < 0 \text{ olması durumunda} \quad (3. 60)$$

- GP_i ve YP_i değerlerinin Denklem (3. 61)'e göre toplanması sonucu Copeland Puanına (CP_i) ulaşılır. Copeland puanı en yüksek olandan başlanarak alternatifler sıralanır.

$$CP_i = GP_i + YP_i \quad (3. 61)$$

3.8 Ağ Yönetim Modelleri

Ulaşım ağlarında seyahat talebinin artması trafik sıkışıklığı, kirlilik, emisyonların artışı ve yüksek enerji kullanımı gibi zorluklara sebebiyet vermektedir. Sioux Falls test ağında ve İzmir kentsel ulaşım ağında tasarlanan bazı senaryolarda bu etkilerin görülebileceği tahmin edilmektedir. Bu aşamada, sürdürülebilir ulaşım yaklaşımlarından talep yönetim stratejileri ve ağ yönetim modelleri çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu teknikler, daha verimli ve sürdürülebilir ulaşım sistemleri elde etmek için seyahat talebini yönetmeyi amaçlayan bir dizi önlemi ifade eder.

Tez çalışmaları kapsamında, sürdürülebilirlik açısından sorun yaratan durumlara çözüm oluşturulması için farklı talep yönetim stratejileri incelenmiştir ve bunlar arasından etkili olacağı düşünülen birkaç farklı teknik simülasyon ortamında sınanmıştır. Bunlardan ilki ayrılmış şerit uygulaması, diğeri ise ToC olarak bilinen mekanizmadır.

3.8.1 Ayrılmış Şerit Uygulaması

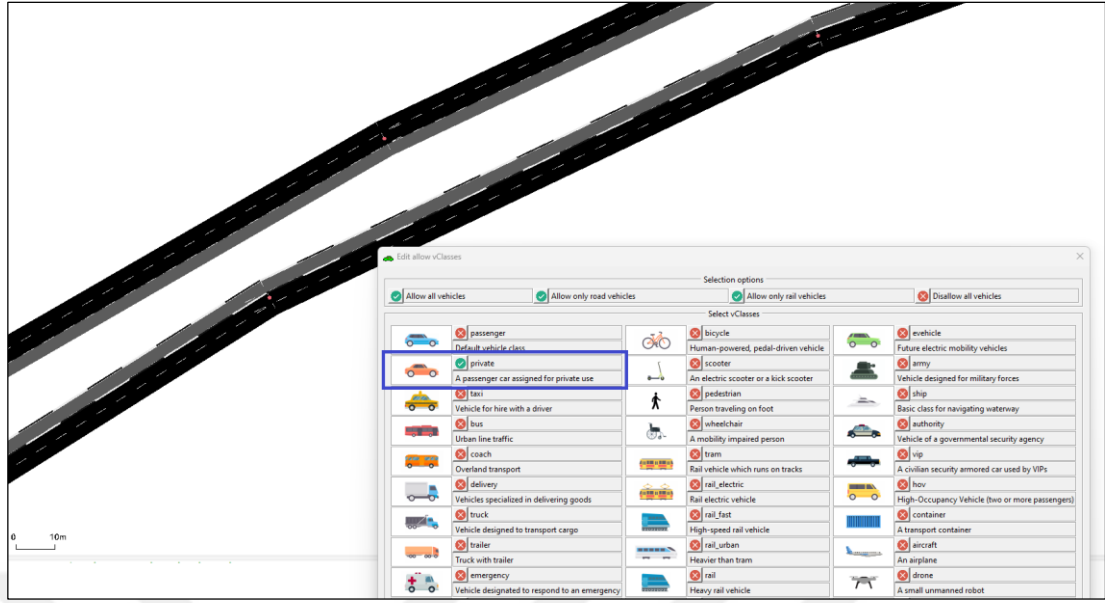
İzmir kentsel ulaşım ağında kalibrasyon ve doğrulama aşamasından sonra kritik senaryolarda uygulanması planlanan ilk önleyici tedbir ayrılmış şerit uygulamasıdır.

Trafik sıkışıklığı probleminin yaşandığı önemli metropoller incelendiğinde, ayrılmış şerit uygulamalarının belirli şartların sağlandığı yol kesimlerinde uygulandığı görülmektedir. Özellikle, ülkemizde otoyol standardında sınıflandırılan en az 3 şeridin olduğu yollar ayrılmış şerit uygulamaları için tercih edilmektedir. Ayrıca sabah ve akşam yoğun saatlerde yüksek oranda tıkanıklık yaşanan yollarda bu uygulamaların hayata geçirildiği görülmektedir. İzmir kentsel ulaşım ağı için bu kriterler göz önünde bulundurulduğunda, Balçova viyadüğünden başlayıp Kuzey Ege otoyoluna kadar devam eden ve ulaşım ağında ‘İzmir Çevre Yolu’ olarak tanımlanan yüksek standartlı yol kesiminde ayrılmış şerit uygulaması sol şerit için tanımlanmıştır. Ayrılmış şerit için oluşturulmuş **..network.xml* dosyasında ‘İzmir Çevre Yolu’ olarak filtrelenmiş kaynak kodlarının aşağıda belirtildiği üzere 3 şeritli kesimlerde *index= “2”*, 4 şeritli kesiminde ise *index= “3”* kısımlarında *allow= “vClass”* değişkeni Seviye 4 ve Seviye 5 olarak tanımlanan *allow= “private”* olarak değiştirilmiştir (Şekil 3. 19).

```
<edge id="1066628330" from="392013161" to="1066628330-AddedOffRampNode" name="İzmir Çevre Yolu" priority="14" type="highway.motorway">
  <lane id="1066628330_0" index="0" allow="private emergency authority army vip passenger hov taxi bus coach delivery truck trailer">
    <param key="origId" value="1066628330 741821899"/>
  </lane>
  <lane id="1066628330_1" index="1" allow="private emergency authority army vip passenger hov taxi bus coach delivery truck trailer">
    <param key="origId" value="1066628330 741821899"/>
  </lane>
  <lane id="1066628330_2" index="2" allow="private" speed="36.11" length="259.27" shape="88469.53,77771.38 88479.59,77732.31 88485.6">
    <param key="origId" value="1066628330 741821899"/>
  </lane>
  <param key="ref" value="O-30"/>
</edge>
```

Şekil 3. 19 Ayrılmış şerit uygulamasının ağ dosyasında üzerinde tanımlanması

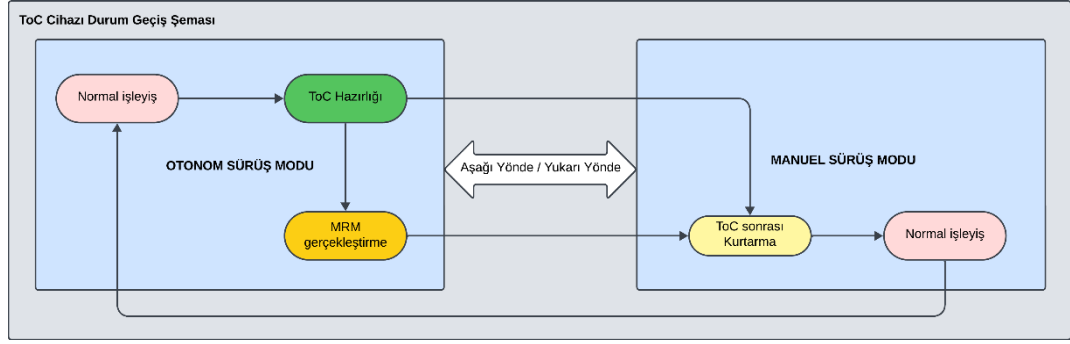
Simülasyon ortamında oluşturulmuş ayrılmış şerit örnekleri ve sol şeritler için izin verilen araç sınıfları Şekil 3. 20’de görülmektedir.



Şekil 3. 20 Ayırılmış şerit uygulaması

3.8.2 Otonom Sürüş Kontrolü Uygulaması

Araçların manuel ve otonom sürüş modları arasında geçiş yapabilmesi, modelleme sürecine bu değişiklikleri destekleyen bir mekanizma eklenmesini gerektirir. Örneğin, araç tiplerine tanımlanan takip etme veya şerit değiştirme modelleri için farklı parametre setlerini dinamik olarak seçebilme veya bir modeli başka bir modelle değiştirebilme yeteneği, böyle bir model için temel bir gereksinimdir. Kontrol geçişlerini temsil etmek amacıyla, devralma sürecini tanımlayan öğeleri içermesi de beklenir. SUMO'da kontrol geçişlerini tasvir etmek için tam model, bir araç cihazına (ToC cihazı) entegre edilmiştir. Bu cihaz, otomatik ve manuel sürüş modelleri arasındaki geçişleri yönetmenin yanı sıra, ToC hazırlığı sırasında ve manuel kontrolün devam ettiği aşamada sürüş performansında azalma sürecini de kontrol eder. Şekil 3. 21'de kontrol mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3. 21 SUMO'nun ToC cihazı için durum geçiş diyagramı

İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilen simülasyonlarda sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından olumsuz durumların tespit edildiği senaryolarda ToC cihazı kullanılarak karma trafik koşullarının daha homojen hale getirilmesi planlanmaktadır. Bu sayede, farklı türde araç parametrelerinden kaynaklı olumsuz etkileşimlerin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Özellikle tıkanıklık yaşanan linklerde dinamik olarak durumun kontrol edilmesi ve ToC cihazının devreye girerek kontrollü geçişin sağlanması durumları incelenmiştir. Şekil 3. 22’de TraCI arayüzü kullanılarak geliştirilmiş bir ağ yönetim uygulaması görülmektedir. ToC cihazının belirli koşullar altında aktif hale gelmesini sağlayan bu uygulamada; İzmir kentsel ulaşım ağının bütün bağlantı elemanları 5 dakikalık zaman aralıklarında kontrol edilmektedir. Buna göre; doluluk oranı %75’in üzerinde, ortalama hızı 25 km/s değerinin altında ve uzunluğu da 200 metreden fazla olan bağlantı elemanlarının listesi çıkarılmaktadır. Daha sonra bu bağlantı elemanları üzerinde bulunan Seviye 4 ve Seviye 5 türündeki araçlara ToC cihazının aktif hale gelmesi için talep gönderilmektedir. Böylece, ağ üzerinde sorun yaşanan bölgeler dinamik olarak takip edilerek karma trafik koşullarının yaratabileceği olumsuz durumlara müdahale edilir.

```

import traci
import sumolib

# SUMO'yu başlat
sumoBinary = sumolib.checkBinary('sumo-gui')
traci.start([sumoBinary, "-c", "SMR_izmir.sumocfg"])

# Sayaç değişkenlerini tanımla
total_steps = 0
check_interval = 300 # Kontrol süresi (5 dakika)
next_check_time = check_interval

# Simülasyon döngüsü
while traci.simulation.getMinExpectedNumber() > 0:
    traci.simulationStep()
    total_steps += 1 # Genel simülasyon adımı sayacı
    current_time = traci.simulation.getCurrentTime() / 1000 # Zamanı saniye cinsinden al
    print(f"Total Steps: {total_steps}, Current Time: {current_time:.2f} seconds")

    if current_time >= next_check_time:
        print(f"Checking network at {current_time:.2f} seconds")

        for edge_id in traci.edge.getIDList():
            occupancy = traci.edge.getLastStepOccupancy(edge_id)
            avg_speed = traci.edge.getLastStepMeanSpeed(edge_id)
            lane_count = traci.edge.getLaneNumber(edge_id) # Bağlantının şerit sayısını al

            if lane_count > 0:
                lane_id = f"{edge_id}_0" # İlk şeridin kimliğini oluştur
                length = traci.lane.getLength(lane_id) # İlk şeridin uzunluğunu al
                if occupancy >= 0.75 and avg_speed <= 6.94 and length > 200:
                    print(f"Edge {edge_id} occupancy: {occupancy:.2f}, avg speed: {avg_speed:.2f} m/s, length: {length} meters")

                    for vehicle_id in traci.edge.getLastStepVehicleIDs(edge_id):
                        vehicle_type = traci.vehicle.getTypeID(vehicle_id)
                        if vehicle_type in ["Seviye_4", "Seviye_5"]:
                            traci.vehicle.setParameter(vehicle_id, "device.toc.requestToC", "5.0")
                            current_toc_state = traci.vehicle.getParameter(vehicle_id, "device.toc.state")

                            print(f"Current Time: {current_time:.2f} seconds: Vehicle {vehicle_id} on edge {edge_id} ToC state after request: {current_toc_state}")

            next_check_time += check_interval

traci.close()

```

Şekil 3. 22 TraCI arayüzü kullanılarak geliştirilmiş bir ağ yönetim uygulaması

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Tez çalışmaları kapsamında yapılan simülasyonlar temel olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. İlk olarak, kısıktırılmış talep bileşenleri dikkate alınarak Sioux Falls ve İzmir kent ulaşım ağlarında gerçekleştirilen simülasyonlar incelenmiştir. İkinci olarak, kalibrasyon aşamasından sonra İzmir kent ulaşım ağında yapılan simülasyonlar ele alınmıştır. Bu bölümde ayrıca, kapasite analizleri ve önleyici tedbirlerin uygulandığı simülasyonlar da değerlendirilmiştir.

4.1 Kısıktırılmış Talep Senaryolarının Değerlendirilmesi

Simülasyon çalışmalarının ilk aşamasında, literatüre dayalı bir yaklaşımla kısıktırılmış talep bileşenleri dikkate alınarak Sioux Falls ve İzmir kent ulaşım ağlarında Tablo 4. 1’de verilen penetrasyon oranlarına göre simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. 1 Kısıktırılmış talep simülasyonlarında tanımlanan otonom araçların penetrasyon oranlarının seviyelere göre dağılımı

Simülasyon No	Penetrasyon Oranı (%)	Seviye 0 (%)	Seviye 1 (%)	Seviye 2 (%)	Seviye 3 (%)	Seviye 4 (%)	Seviye 5 (%)
SEN1	0	100	0	0	0	0	0
SEN2	20	80	10	5	5	0	0
SEN3	40	60	20	10	10	0	0
SEN4	60	40	15	10	15	15	5
SEN5	80	20	10	10	20	25	15
SEN6	100	0	10	10	20	35	25
SEN7	100	0	5	5	10	45	35
SEN8	100	0	5	5	10	35	45
SEN9	100	0	0	5	10	30	55
SEN10	100	0	0	5	5	25	65
SEN11	100	0	0	0	5	20	75
SEN12	100	0	0	0	0	15	85
SEN13	100	0	0	0	0	5	95
SEN14	100	0	0	0	0	0	100

Otonom araç senaryolarında (SEN) özdevinim düzeylerine göre kullanılan penetrasyon oranlarının dağılımı Tablo 4. 1’de görülmektedir. Geleneksel ve otonom araçların karma trafik koşullarında ulaşım ağlarında bir arada bulunması dikkate alınarak; araçların tamamının Seviye 0 olduğu bir senaryodan, tüm araçların Seviye 5

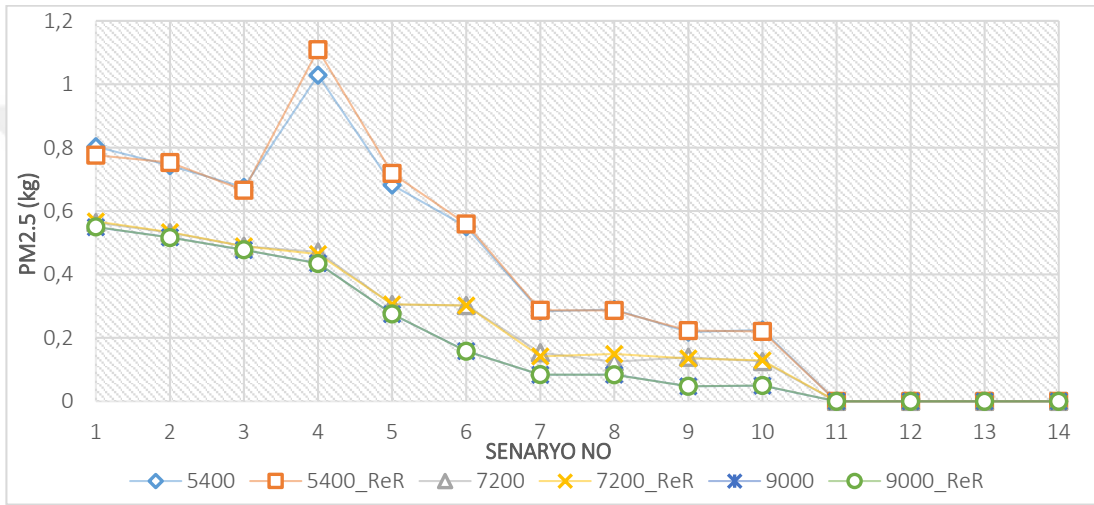
özerkliğe sahip olduğu toplamda 14 farklı durumun senaryoları planlanmıştır. Bu çalışma kapsamında elektrikli olmayan araçlar için seçilen emisyon sınıfı EK-D Tablo D.2’de de görüldüğü üzere HBEFA3/PC-G-EU4’tür, yani HBEFA3 kullanılarak modellenen benzinle çalışan Euro normunda 4 kişilik bir otomobildir (Kamishetty, Vadlamannati ve Paruchuri, 2020; Keller, Hausberger, Matzer, Wüthrich ve Notter, 2010). Tablo D.2’de görüldüğü gibi elektrikli araçlar Seviye 3-4-5 olarak sınıflandırılması kabul edilmiş olup, bu emisyon sınıfı olarak MMPEVEM modeli seçilmiştir. Ek olarak, simülasyon çalışmalarında ağır taşıtların ve yol kenarındaki parklanmaların etkileri göz ardı edilmiştir. Ancak, İzmir kent ulaşım ağında sonraki aşamada gerçekleştirilecek olan seyahat süresi kalibrasyonu yardımıyla bu bileşenlerin etkileri simülasyon ortamına yansıtılmaya çalışılmıştır.

4.1.1 Sioux Falls Ağında Gerçekleştirilmiş Simülasyonlar

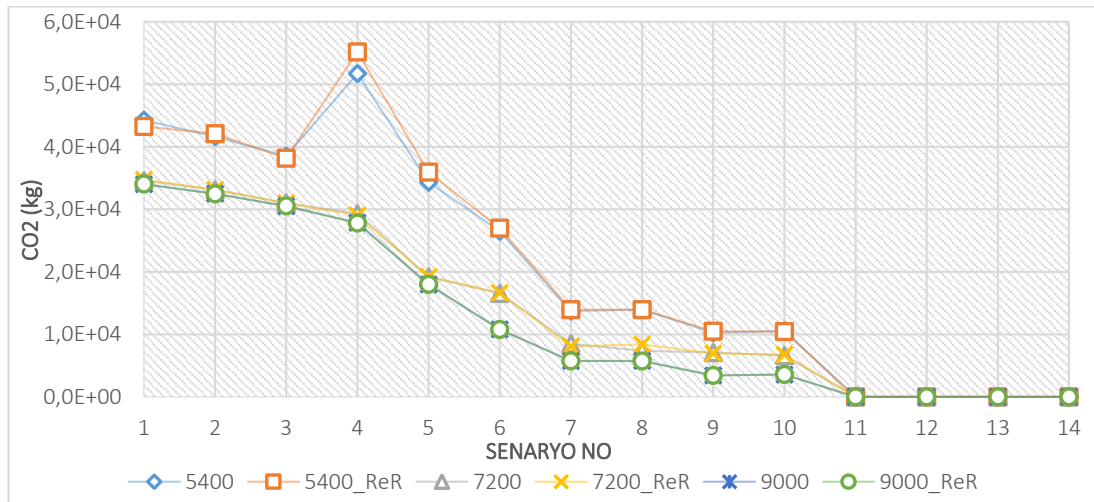
Karma trafik koşullarında sürdürülebilir hareketlilik açısından otonom araçların ulaşım ağlarında yarattığı değişiklikleri değerlendirmek için, kısırlanmış talep bileşenleri etkisi altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta, Sioux Falls ağının zirve saat B/V matrisinde yaklaşık 36.000 araç tanımlanmıştır. Kısırlanmış talep bileşenlerinin en yüksek seviyeleri B/V matrisine uygulanarak güncellendiğinde (SEN14), başlangıç koşullarını temsil eden SEN1 durumuna kıyasla seyahat talepleri 1,83 kat artmıştır. SEN14 durumunda, teorik Sioux Falls ağında toplam 66.244 araç bulunmaktadır.

İlk etapta seyahat talepleri 3600 simülasyon adımıyla sisteme atanmıştır. Ancak, kısırlanmış talep senaryolarında otonomluk seviyesi arttıkça artan seyahat talebi miktarının ulaşım ağını tıkadığı ve simülasyonların sonuç vermediği gözlenmiştir. Bu sebeplerden dolayı, seyahat taleplerinin ulaşım ağına yüklenme aralığı 5400 – 7200 – 9000 simülasyon adımı olarak belirlenmiştir. Bu durum aynı zamanda trafik sıkışıklığını çok, orta ve az olarak sınıflandırmış gibi düşünülebilir. Ayrıca, bu zaman aralıklarının her biri için trafik atama ve rota seçimi başlığı altında detaylandırılmış ReR cihazıyla donatılmış araçların simülasyonları da karşılaştırılmıştır. Toplamda 14 farklı penetrasyon oranında, 3 farklı simülasyon adımı ve iki farklı trafik atama yöntemiyle 14 x 3 x 2 olarak bu aşamada Sioux Falls ağında toplam 84 simülasyon gerçekleştirilmiştir. SKHG çerçevesini takip eden değerlendirme aşamasında

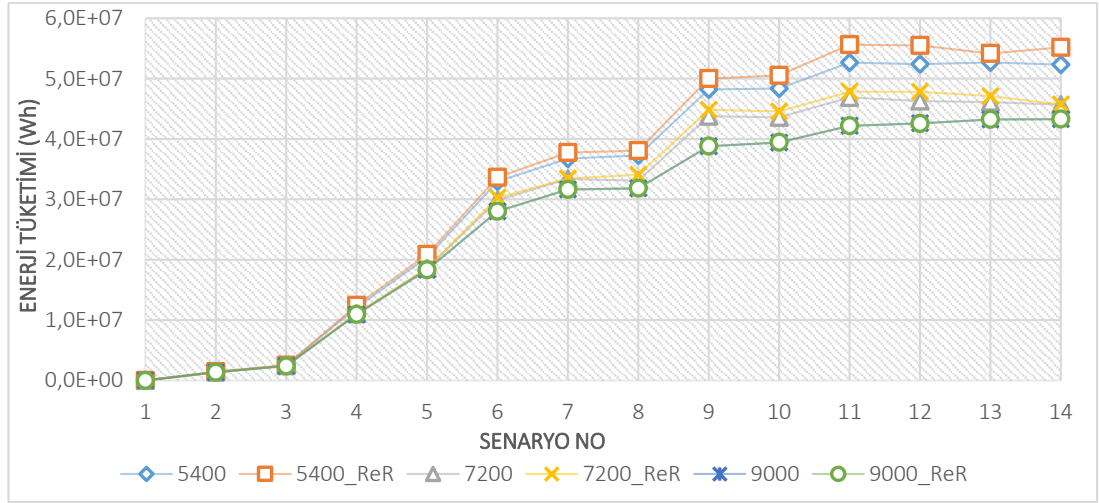
kullanılan simülasyon sonuçları EK-D Şekil D.1’de toplu olarak verilmektedir. SKHG çerçevesinin hesaplama adımlarında kullanılan sonuçlardan bazıları Şekil 4. 1’de grafiksel olarak gösterilmektedir. Hava kirletici emisyonlardan kaynaklanan PM_x sonuçları Şekil 4. 1(a)'da, sera gazı emisyonlarından kaynaklanan CO₂ Şekil 4. 1(b)'de, enerji verimliliği göstergesi için enerji tüketimi Şekil 4. 1(c)'de, seyahat süresi göstergesi için toplam seyahat süresi Şekil 4. 1(d)'de, trafik sıkışıklığı ve gecikme için bekleme süresi Şekil 4. 1(e)'de ve gürültünün önlenmesi göstergesi için ortalama gürültü değerleri Şekil 4. 1(f)'de gösterilmektedir.



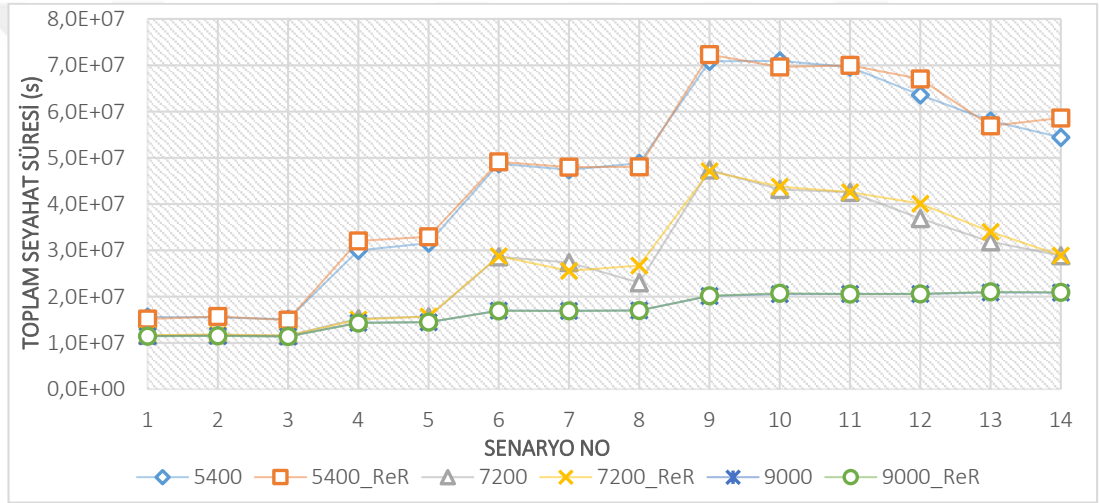
(a)



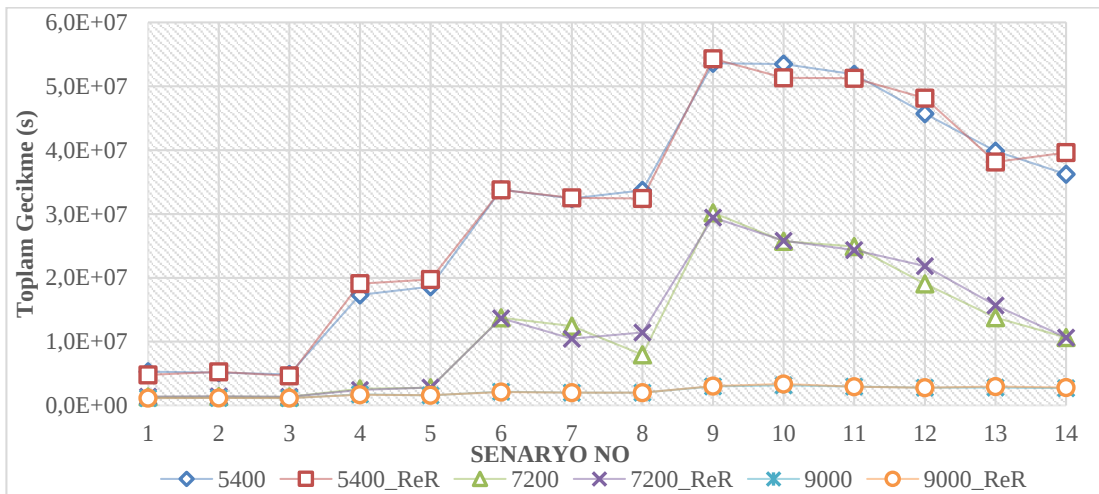
(b)



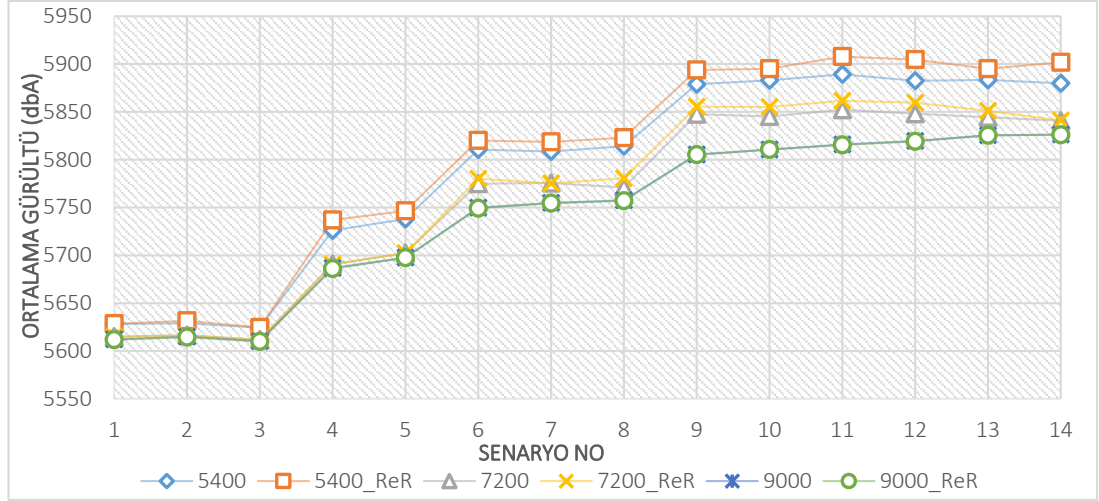
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4. 1 SKHG değerlendirme aşamasında kullanılan Sioux Falls teorik ağında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından örnekler

CO, NO_x, HC ve PM_{2.5} gibi hava kirliliğine neden olan emisyon grafiklerini incelediğimizde, dördüncü senaryoda trafik sıkışıklığının yüksek olarak tanımlandığı durumda, simülasyon adımı 5400'de zirve değerlerine ulaşıldığı, ardından emisyon değerlerinin azalarak sonunda sıfıra indiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, sera etkisi yaratan CO₂ için, yaklaşık %60'lık bir penetrasyon oranında 55.000 kg CO₂ salımı ile zirve konumundadır. Ayrıca, ReR cihazının tanımlandığı senaryolarda, tüm simülasyonlarda olmasa da SKD trafik atamasına göre değerlerin genellikle daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Emisyon değerlerinin kademeli olarak azalmasının ve sonunda sıfıra ulaşmasının nedeni, toplam araç sayısına göre Seviye 0-1-2 araçlarının sayısının azalması ve 10. senaryoya kadar PC_G_EU4 emisyon sınıfı araçların ulaşım ağında fosil yakıt tüketmesidir. İkinci senaryodan itibaren elektrikli araçlar sisteme dahil edildikçe, emisyon değerleri azalırken elektrik tüketimi artmaktadır. Şekil 4. 1(c)'de verilen ve Wh cinsinden enerji tüketimini incelediğimizde, talep artışıyla birlikte tüketimin arttığı, ancak 11. Senaryoda talep artışına rağmen, Seviye 4-5 araçların sayısının artması nedeniyle bir dengeye ulaşıldığı görülmektedir.

Araçların toplam gecikmesi (Şekil 4. 1 (e)) ve toplam seyahat süresi (Şekil 4. 1 (f)) grafiklerini incelediğimizde, 9-10. senaryolarda, kısıktırılmış talep artışıyla birlikte,

5400, 7200 ve 9000 simülasyon adımlarının tamamında zirve değerlerine ulaşıldığı gözlemlenebilir. Karma trafik koşullarının yoğun olarak yaşandığı durumlarda, 9-10. senaryo, orta ila düşük trafik sıklığı seviyelerinde baştaki 1-2. senaryoya veya sondaki 13-14. senaryoya göre 3 ila 9 kat daha yüksek değerler göstermektedir. Bu da karma trafik koşullarında önlem alınmazsa ulaşım ağının performansının olumsuz etkileneceğini destekleyen bir başka kanıttır.

Harmanoise gürültü hesaplama yöntemi, AB ülkeleri genelinde standartlaştırılmış bir teknik olup, otonom araçların simülasyon ortamında ürettiği gürültüyü değerlendirmek için kullanılmıştır (Nota, Barelds ve Van Maercke, 2005; Salomons vd., 2009; Watts, 2005). Şekil 4. 1(f)'de dBA birimiyle verilen gürültü grafiğini incelediğimizde, 9. senaryoda kısırlanmış talep artışına rağmen, gürültü değerlerinin dengeye ulaştığı gözlemlenmektedir.

Şekil 4. 1'deki grafiklerden elde edilen bir diğer sonuç, SKHG çerçevelerinin karma trafik koşulları altında ayrı ayrı değerlendirildiğinde, kritik penetrasyon oranlarının farklılık göstermesidir. Bu aşamada, farklı göstergelerden elde edilen değerlerin B-AHP yöntemiyle belirlenen ağırlıklarla entegrasyonu gerçekleştirilmelidir. Simülasyonlar tamamlandıktan sonra, ÇKKV yöntemlerinin 5. Bölüm 6. Başlıkta detaylandırılan tekniklerle en iyiden en kötüye doğru sıralamalar yapılmış ve tutarlılıklar karşılaştırılmıştır. 5400, 7200 ve 9000 simülasyon adımlarında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı tüm karar matrisleri EK-D'de Tablo D.3 – Tablo D.8 aralığında görülebilir. Bunlar arasında örnek olarak 7200 simülasyon adımıyla SKD yaklaşımıyla yapılan simülasyonun sonuçları Tablo 4. 2'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 2 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 7200 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,46%					21,87%	21,16%		11,95%			17,63%					5,93%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (bin)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBA)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	413,94	12,82	2,01	0,56	2,65	34,6	11,0	0	11,6	14,65	322,88	11,24	52,1	37,63	3,63	0,71	2,54	5614,96
SEN2	392,81	12,18	2,04	0,53	2,52	33,1	10,6	1,38	11,8	14,66	324,06	12,55	55,9	38,92	3,67	0,72	2,56	5616,59
SEN3	356,52	11,30	2,01	0,49	2,30	31,0	9,89	2,43	11,6	14,69	321,44	12,28	56,6	37,89	3,61	0,71	2,53	5611,88
SEN4	403,78	10,79	2,51	0,47	2,48	29,3	9,35	11,1	15,3	14,08	342,33	28,08	95,1	58,58	4,86	0,95	3,30	5691,02
SEN5	268,24	7,03	2,59	0,31	1,64	19,2	6,13	18,5	15,7	14,11	343,47	32,10	101	61,25	5,11	1,01	3,40	5702,29
SEN6	471,15	6,45	3,02	0,30	2,51	16,6	5,29	29,8	28,6	12,49	537,97	185,99	371	258,41	10,52	2,16	5,88	5775,00
SEN7	230,01	3,29	3,04	0,15	1,23	8,51	2,72	33,4	27,4	12,78	508,13	171,54	258	230,99	10,00	2,07	5,65	5775,62
SEN8	157,90	2,76	3,07	0,12	0,88	7,37	2,35	33,1	23,0	13,30	423,68	102,81	182	146,66	8,11	1,65	4,84	5770,90
SEN9	262,19	2,87	3,51	0,14	1,35	7,09	2,26	43,8	47,4	11,44	763,38	377,87	668	486,42	17,65	3,65	9,47	5847,57
SEN10	226,05	2,64	3,57	0,13	1,17	6,60	2,11	43,6	43,2	11,69	683,57	312,88	544	407,50	16,08	3,29	8,69	5845,23
SEN11	0	0	3,62	0	0	0	0	46,9	42,6	12,08	663,65	314,94	472	388,19	15,55	3,23	8,58	5852,23
SEN12	0	0	3,66	0	0	0	0	46,3	36,9	12,31	568,34	233,66	395	293,65	13,41	2,73	7,53	5847,99
SEN13	0	0	3,71	0	0	0	0	46,1	31,9	12,74	483,65	165,32	269	208,98	11,36	2,26	6,61	5844,35
SEN14	0	0	3,73	0	0	0	0	45,7	28,9	13,06	435,58	124,61	228	161,01	9,76	1,94	6,05	5840,67

Uzman anketleriyle belirlenen SKHG'lere göre, simülasyon sonuçları gruplara ayrılmıştır. Örneğin, hava kirliliği emisyonları göstergesini değerlendirmek için, simülasyon sonuçlarından elde edilen CO, NO_x, egzoz dışı PM_{2.5}, PM_{2.5} ve HC değerleri dikkate alınmıştır. B-AHP yöntemiyle %21,462 olarak belirlenen hava kirliliği emisyonları göstergesinin ağırlığı, belirtilen beş bileşen arasında ayrı ayrı bölünmüş ve her biri %4,29 ağırlığa sahip olmuştur. Benzer şekilde, diğer SKHG çerçeveleri değerlendirilmiş ve ÇKKV yöntemlerinde kullanılacak parametrelerin bireysel ağırlıklandırılması simülasyon sonuçlarından sağlanmıştır.

Gürültü göstergesi değerlendirilirken; link verilerinden elde edilen ortalama gürültü değerleri ve araçlara tanımlanan emisyon ölçer cihazdan okunan kümülatif gürültü emisyonu değerleri kullanılmıştır. Sisteme tanımlı tüm araçlar için, simülasyon adımı olarak belirlenen her 0,3 saniyelik zaman aralığında, aracın o an ürettiği gürültü değerlerinin dBA cinsinden ölçüm sonuçları toplanmıştır. Kümülatif değerlerin tercih edilmesinin nedeni simülasyon ilerledikçe sisteme yeni araçların eklenmesi ve varış noktasına ulaşan araçların sistemden çıkması nedeniyle toplam gürültü seviyesinin zaman içinde tutarlı ve doğru bir şekilde izlenmesini sağlamaktır. Örneğin, tanımlı bir araç bir senaryoda 5400 simülasyon adımıyla 500 saniye sistemde kalırken, başka bir senaryoda 7200 simülasyon adımıyla 350 saniye sistemde kalabilir. Böylece, sistemdeki araç sayısındaki değişimlerden bağımsız olarak sistemin genel gürültü profilini değerlendirebilir ve simülasyon boyunca oluşan toplam gürültü emisyonunu daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilir.

WASPAS, CODAS ve MARCOS yöntemleri kullanılarak senaryolar sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedeflerine göre en iyiden en kötüye doğru sıralanmıştır. ÇKKV yöntemleri arasında tutarlılık gözlemlenirken, ReR cihazıyla tanımlanan senaryolar ve 5400-7200-9000 simülasyon adımlarının çoğunda benzer sonuçlar elde edilmiştir. ÇKKV yöntemlerinden benzer sıralamalar elde edilmesine rağmen, bazı yöntemler benzersiz özellikleriyle farklı sıralamalar vermektedir. ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucu elde edilen sıralamalar Tablo 4. 3'de görülmektedir.

Tablo 4. 3 Sioux Falls test ağında ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucunda elde edilen sıralamalar

	WASPAS						MARCOS						CODAS					
	5400		7200		9000		5400		7200		9000		5400		7200		9000	
	SKD	ReR_SKD	SKD	ReR_SKD	SKD	ReR_SKD	SKD	ReR_SKD	SKD	ReR_SKD	SKD	ReR_SKD	SKD	ReR_SKD	SKD	ReR_SKD	SKD	ReR_SKD
	Sıralama		Sıralama		Sıralama		Sıralama		Sıralama		Sıralama		Sıralama		Sıralama		Sıralama	
SEN1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
SEN2	7	7	7	7	7	6	7	7	7	7	7	6	7	7	7	7	7	6
SEN3	6	6	6	6	6	7	6	6	6	6	6	7	6	6	6	6	6	7
SEN4	8	8	8	8	9	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	8	9	8
SEN5	9	9	9	9	8	9	9	9	9	9	8	9	9	9	9	9	8	9
SEN6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
SEN7	10	10	11	10	10	11	10	10	11	10	10	11	10	10	11	10	10	11
SEN8	11	11	10	11	11	10	11	11	10	11	11	10	11	11	10	11	11	10
SEN9	14	14	14	14	13	13	14	14	14	14	13	13	13	14	14	14	13	13
SEN10	13	13	13	13	14	14	13	13	13	13	14	14	14	13	13	13	14	14
SEN11	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	3
SEN12	3	3	3	3	2	1	3	3	3	3	2	1	3	3	3	3	2	1
SEN13	2	1	2	2	3	4	2	1	2	2	3	4	2	1	2	2	3	4
SEN14	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2

Birden fazla ÇKKV yönteminden elde edilen sıralamaların daha rasyonel bir forma entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Üç farklı ÇKKV yönteminden elde edilen sonuçlar Borda sayım yöntemi ve puanlama sistemine dayalı Copeland yöntemiyle hesaplanmıştır. Her iki yöntemden de elde edilen sıralamalar aynı olup, sırasıyla şu şekildedir: **SEN14, SEN13, SEN12, SEN11, SEN1, SEN3, SEN2, SEN4, SEN5, SEN7, SEN8, SEN6, SEN10, SEN9.**

Neredeyse bütün ÇKKV yöntemlerinde en iyi sıralamalar, kısıktırılmış taleplere rağmen Seviye 4 ve Seviye 5 otonom araçların ulaşım ağına ağırlıkla yer aldığı SEN14, SEN13 ve SEN12 senaryolarında elde edilmiştir. En kötü sıralamalar uygulanan tüm metodolojilerde tutarlı bir şekilde SEN9, SEN10 ve SEN6 simülasyonlarından elde edilmiştir. Bu senaryolar arasından SEN9'daki otonomluk seviyelerine göre otonom araç dağılımları şu şekilde belirlenmiştir: %5 Seviye 2, %10 Seviye 3, %30 Seviye 4 ve %55 Seviye 5. Kısıktırılmış talep koşulları dikkate alındığında, %80'in üzerinde bir talep artışına rağmen, SEN14 ve SEN13 en iyi sıralamaları sağlamaktadır. Bu, kentsel hareketlilikte, otonom araçların ulaşım ağlarında ağırlıklı olarak kullanıldığı senaryolarda sürdürülebilir gelişimin arttığını göstermektedir, özellikle de %95 veya daha fazla Seviye 4-5 tam otonom araçların olduğu koşullarda.

Bu sıralamalara göre, SEN4 ve SEN5'te belirtilen otonomluk seviyelerinin dağılımı açısından, karma trafik koşullarında ulaşım ağının en kötü senaryoları yaşamaması sürdürülebilirlik açısından kritik olarak değerlendirilebilir. Gelecekte, iletişim teknolojileri ile kontrol edilecek ulaşım ağlarında otonomluk seviyeleri, özellikle SEN5'te belirtilen şu yüzdelerin önleyici tedbirler almak için kritik olduğu varsayılabilir: %10 Seviye 1, %10 Seviye 2, %20 Seviye 3, %25 Seviye 4 ve %15 Seviye 5. EK-D ve Şekil 4. 1'te sunulan grafikler incelendiğinde benzer sonuçlar çıkarılabilir. Elde edilen sonuçlar, çalışmada belirtilen "*mevcut sisteme sınırlar koymadan otonom araçları uygulamak, hareketliliğin sürdürülebilir ilerlemesini azaltır*" hipotezini desteklemektedir. Bu durumda, ulaşım ağlarında ağ yönetim sistemleri ile sürekli bir kontrol mekanizması olması gerektiği varsayımıyla, otonomluk seviyelerinin kontrol altında tutulması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Örneğin, kontrollü bir ulaşım ağında otonomluk seviyelerinin dağılımı kritik eşiklere

yaklaştıkça, sistemi geliştirmek için önleyici tedbirler almak, sürdürülebilirlik performansını artıracaktır.

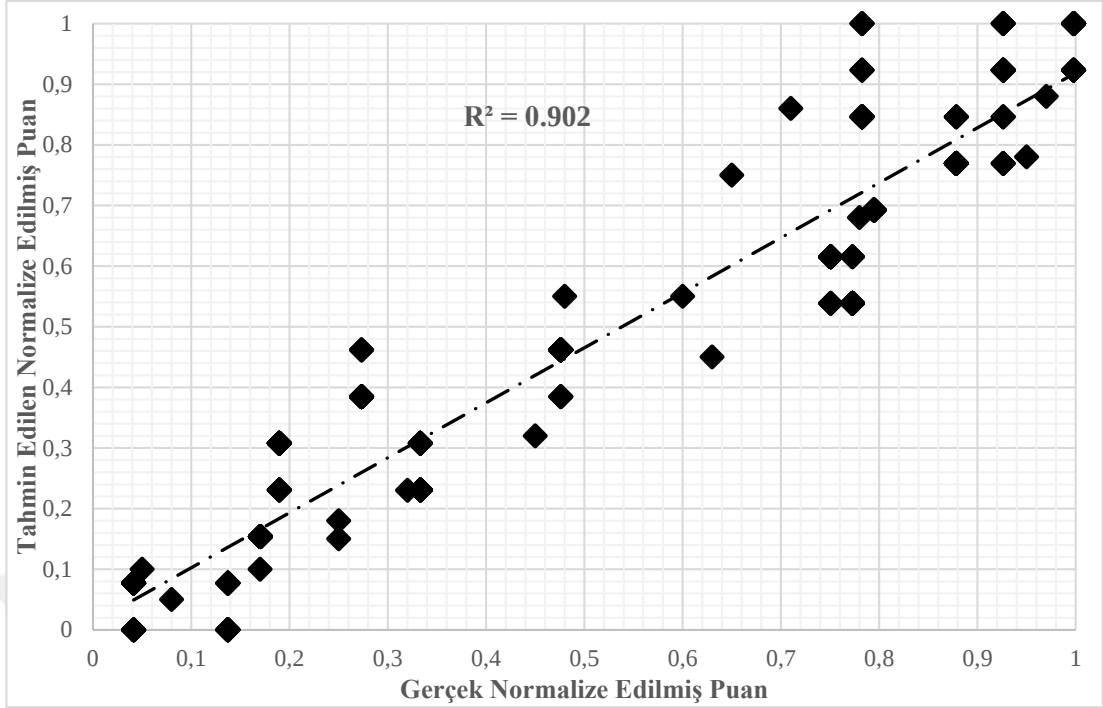
Karma trafik koşullarında otonom araçların yaygın olarak benimsenmesinden kaynaklanan beklenen zorluklar nedeniyle, KDS'lerin önemi giderek artacaktır. Bu sistemlerin geliştirilmesi ve optimize edilmesi, otonom araç teknolojisinin geleceğinde kritik bir unsur haline gelecektir. Bu nedenle, KDS'nin rolü ve önemi, otonom araçlarla ilgili planlama süreçlerinde göz ardı edilmemelidir. Özellikle çevrelerini sürekli izlemeleri, diğer araçlarla iletişim kurmaları ve güvenli bir şekilde seyahat etmeleri gereken Seviye 4-5 otonom araçlar için, bu kararlar hız, yön ve öncelik gibi temel unsurları ve karmaşık karar verme süreçlerini içerebilir. KDS ve otonom araçların birleşik bir sistemde ortak kararlar alması, ulaşım ağının performansını artıracaktır. Bu nedenle, otonom araçlarla ilgili planlama süreçlerinde KDS'lerin rolü ve önemi küçümsenmemelidir.

Bu çalışmanın kapsamı içinde, gelecekteki koşullarda otonom araçların otonomluk seviyelerinin kontrol edilebileceği varsayılmış ve otonomluk seviyeleri kritik eşiklere ulaşmadan önce önlemler alınmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Bu aşamada, ulaşım ağı sürdürülebilirlik açısından kritik bir aşamaya ulaşmadan önce otonomluk seviyelerine dayalı tahminlerde bulunmak, sistemin verimliliği açısından fayda sağlayacaktır. WASPAS, CODAS ve MARCOS yöntemleri aracılığıyla elde edilen sıralamalar ve ardından gelen puanlama sistemi kullanılarak, toplamda 84 simülasyon üzerinden bir veri bulutu oluşturulmuştur. Bu veriler kullanılarak, bağımsız değişkenler olarak otonomluk seviyeleri ve bağımlı değişken olarak toplam puan ile bir çoklu doğrusal regresyon modeli geliştirilmiştir. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini değerlendirmek için ANOVA analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 4. 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. 4 Otonomluk seviyeleri ile toplam puan arasındaki ilişkinin ANOVA analizi sonuçları

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Anlamlılık F</i>	
Regresyon	6	22,551	3,759	548,269	6,68E-139	
Fark	245	1,680	0,007			
Toplam	251	24,231				
	<i>Katsayılar</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t Stat</i>	<i>p-değeri</i>	<i>Düşük %95</i>	<i>Yüksek %95</i>
Kesişim	7,6668	1,5339	4,9981	1,10E-06	4,645	10,688
Seviye 0	-0,0687	0,0150	-4,5715	7,69E-06	-0,098	-0,039
Seviye 1	-0,0132	0,0150	-0,8807	3,79E-01	-0,043	0,016
Seviye 2	-0,2197	0,0158	-13,8803	1,04E-32	-0,251	-0,189
Seviye 3	-0,0332	0,0162	-2,0439	4,20E-02	-0,065	-0,001
Seviye 4	-0,0810	0,0154	-5,2697	3,00E-07	-0,111	-0,051
Seviye 5	-0,0667	0,0153	-4,3660	1,87E-05	-0,097	-0,037

Buna göre, Seviye 2 türü otonom araçların normalize edilmiş puan değerlerini tahmin etmede en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. İnsan tarafından kullanılan modellerden otonom sürüş modellerine geçişin örnekleri olarak görülebilecek olan Seviye 2 otonom araçlar, egzoz gazı emisyonları gibi hava kirliliği ve sera gazları gibi sürdürülebilirliğin ana bileşenleri üzerinde önemli bir etkiye sahip unsurlar üretmektedir. Ayrıca, otomasyon seviyesinin önemli bir göstergesi olan IDM takip parametresi bulunmaktadır. Daha basit bir ifadeyle, Seviye 2 otonom araçlar hem insan sürüşü hem de otonom sürüş özelliklerini sergileyen kritik bir geçiş aşaması oldukları için önemlidir. Şekil 4. 2, modelden elde edilen puanlar ile gözlemlenen puan değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4. 2 Yanıt değişkeninin tahmin edilen ve gözlemlenen değerleri arasındaki ilişki

Şekil 4. 2'ye göre, modelin veri setini ne derece uygun şekilde temsil ettiğini $R^2=0,90$ katsayısından anlayabiliriz. Tablo 4. 4'te görülen ANOVA analizinde, F değeri 548,27 ile oldukça yüksek, p değeri ise 6,68E-139 oldukça düşük değerlere sahiptir. Bu, modelinizin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir. Bu nedenle, bağımsız değişkenlerin (seviyeler) bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu söyleyebiliriz. ANOVA'da istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edildiği göz önüne alındığında, bağımlı değişken olarak tanımlanan puan değerinin otonom araç seviyelerini temsil eden yüzdeler açısından değişimi, Denklem (4. 1) ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
 y = & 7,6668 - 0,0687 * \%OA_{Seviye\ 0} - 0,0132 * \%OA_{Seviye\ 1} \\
 & - 0,2197 * \%OA_{Seviye\ 2} - 0,0332 * \%OA_{Seviye\ 3} \\
 & - 0,0810 * \%OA_{Seviye\ 4} - 0,0667 * \%OA_{Seviye\ 5}
 \end{aligned}
 \quad (4. 1)$$

Otonom araçların henüz sisteme entegre edilmediği SEN1 senaryosunda, normalize edilmiş puan değeri başlangıçta 0,69 olarak belirlenmiştir. Otonom araçların belirli yüzdelerle sisteme dahil edilmesiyle, normalize edilmiş puan değerleri kademeli

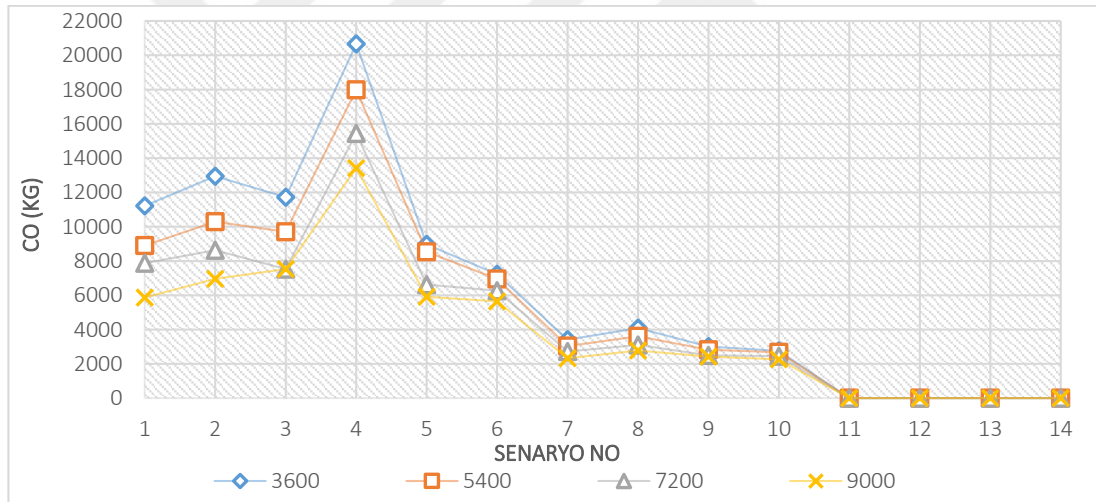
olarak azalarak SEN6 senaryosunda 0,15'e düşmüştür. Ancak, kritik olarak tanımlanan SEN5'te, normalize edilmiş puan değeri yaklaşık olarak 0,38 olup, sistemin sürdürülebilirlik açısından kötü sonuçlar vermeye başlamadan önceki son durumu temsil etmektedir. Bu nedenle, gelecekte KDS'lerin kullanıldığı senaryolarda, ulaşım ağlarının izlenmesi ve Denklem (4. 1)'de belirtilen normalize edilmiş puan değerlerini tahmin eden örnek model denklemleri kullanılarak kritik eşik değerlerine yaklaşıldığında olası aksaklıkların önceden tespit edilmesi mümkün olacaktır. Bu da sistemin sürdürülebilirliğini sağlamak adına büyük önem taşımaktadır.

4.1.2 İzmir Kentsel Ulaşım Ağında Gerçekleştirilmiş Simülasyonlar

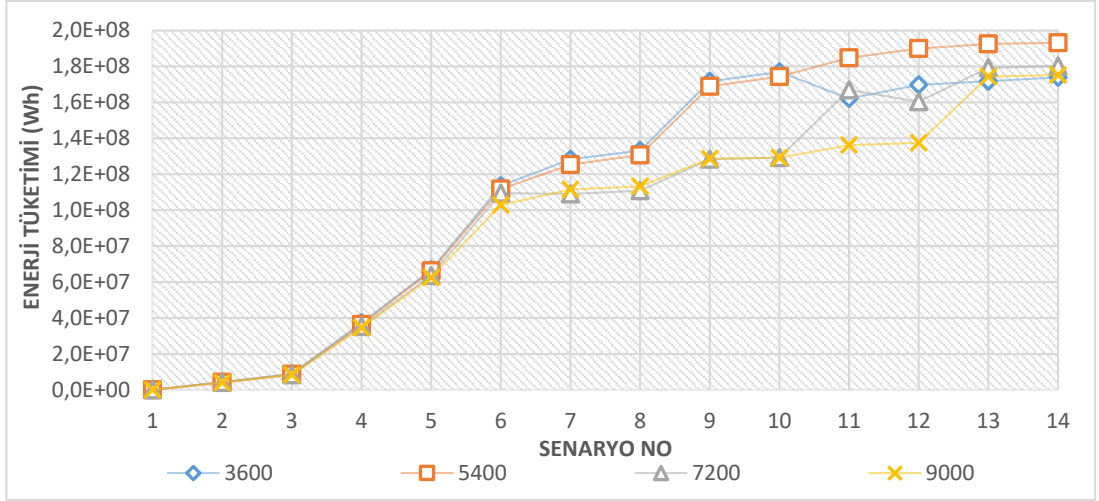
Bu bölümde, Sioux Falls teorik ağında olduğu gibi İzmir kent ulaşım ağında da literatüre dayalı kısıktırılmış talep simülasyonlarının sonuçları yer almaktadır. Benzer şekilde bu kapsamda da toplamda 14 farklı senaryo, üç farklı kategoride kısıktırılmış talep etkisi altında düzenlemiştir. Seviye 4 ve Seviye 5 düzeyinde otonom araçların toplam sisteme göre %20 oranından (SEN4) itibaren kısıktırılmış talep etkileri talep matrisine yansıtılarak yeni talepler oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra otomasyon düzeyi arttıkça Seviye 4 ve Seviye 5 otonom araçların yüzdesi artacağından talebin de artacağı varsayımından hareketle simülasyon senaryoları planlanmıştır. Sistemin tamamen Seviye 5 düzeyinde otonom olmasıyla kısıktırılmış talebin en üst seviyesi uygulanmıştır.

Sioux Falls ağında boş yolculukların etkisi talep matrisine yansıtılırken bir kişinin günde ortalama 2,86 araba yolculuğu yaptığı literatürdeki bir çalışma referans alınarak belirlenmişti (Meyer vd., 2017). İzmir ulaşım ağında ise UPI2030 verilerine dayanarak bu değer 2,18 araba yolculuğu olarak belirlenmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen simülasyonlarda modal kayma oranları ve yeni kullanıcıların oranları Sioux Falls ağında yapılan kabullerle aynı değerler alınmıştır. Ortalama günlük araç yolculuklarının 2,86 değerinden 2,18 değerine güncellenmesi kısıktırılmış talep katsayılarına etki ettiğinden Sioux Falls teorik ağında SEN1 ile SEN14 arasındaki kısıktırılmış seyahat talep katsayısı 1,83'ten 2,03 ye yükselmiştir. Böylece, başlangıç durumunda sistemde 141.198 araç varken SEN14 durumunda İzmir ağında toplam 286.023 araç bulunmaktadır.

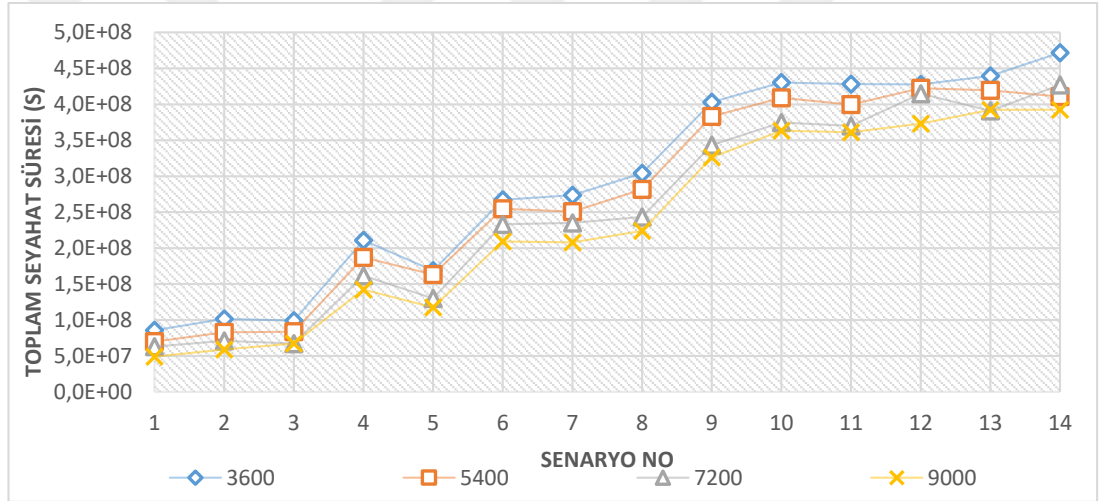
Sioux Falls test ağında simülasyonlar gerçekleştirilirken, otonomluk seviyesi arttıkça artan talep miktarlarının, ulaşım ağında tıkanıklıkları sebep olduğu ve simülasyonların sonlanmadığı durumlar gözlemlenmişti. Bu sebeple, taleplerin sisteme yüklenme aralığı 5400, 7200 ve 9000 simülasyon adımı olarak belirlenmişti. İzmir ulaşım ağında da seyahat talepleri çok fazla olmasına rağmen yol ağında fazla sayıda bağlantı bulunduğundan simülasyonların sonlanmaması gibi bir sorunla karşılaşılmamıştır. Bu durumda, İzmir kent ulaşım ağında gerçekleştirilen simülasyonlarda seyahat taleplerinin sisteme yüklenme aralığı 5400, 7200 ve 9000 simülasyon adımı ek olarak 3600 simülasyon adımı da eklenmiştir. 14 farklı penetrasyon oranı 4 farklı simülasyon adımıyla birlikte İzmir kent ulaşım ağında toplam 56 simülasyon gerçekleştirilmiştir. SKHG değerlendirme aşamasında kullanılan simülasyon sonuçları EK-D Şekil D.2’te toplu olarak verilmektedir. Elde edilen sonuçlardan bazıları aşağıda Şekil 4. 3’te grafiksel olarak gösterilmektedir.



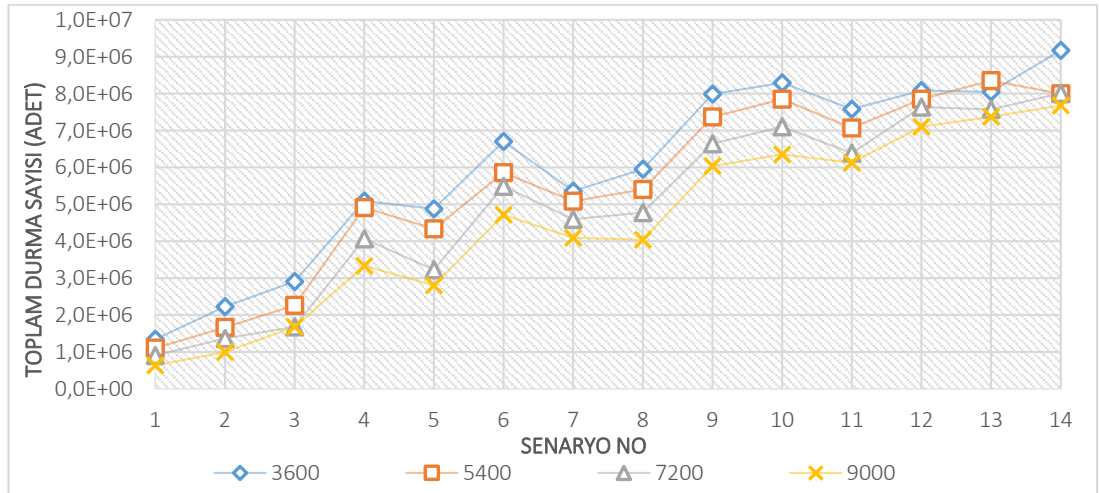
(a)



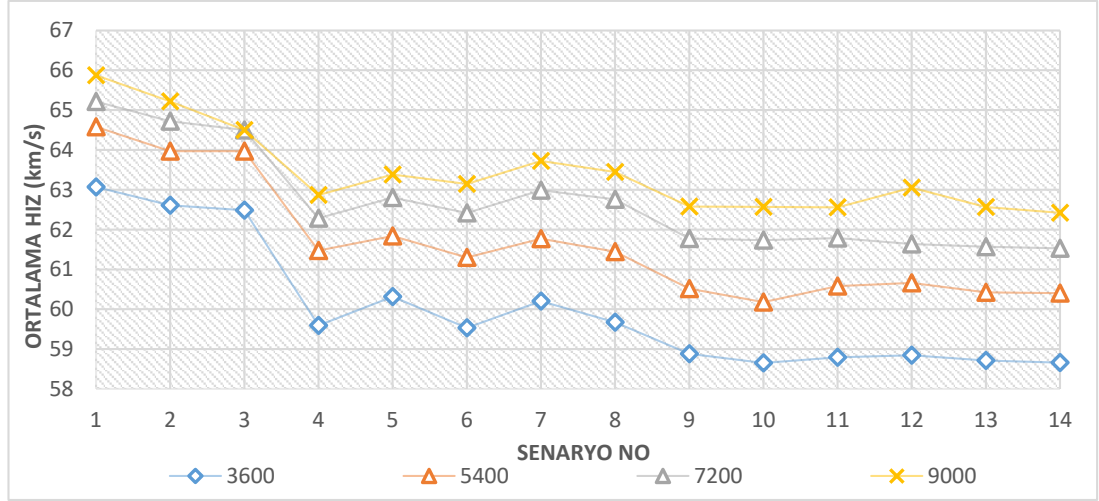
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4. 3 SKHG değerlendirme aşamasında kullanılan İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından örnekler

İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilmiş simülasyonlardan elde edilen grafikler incelendiğinde, hava kirliliğine neden olan emisyon ve sera gazı etkisi yaratan CO₂ salımlarının SEN4 simülasyonlarında zirve değerlerine ulaştığı görülmektedir. SEN10 simülasyonuna kadar fosil yakıt tüketen ve emisyon sınıfı PC_G_EU4 olan Seviye 0-1-2 araçlar olduğundan dolayı salım değerleri bu senaryoya kadar devam etmektedir. Ayrıca, SEN2 simülasyonundan itibaren elektrikli araçların sisteme katılmasıyla elektrik tüketiminin arttığı görülmektedir. Sioux Falls test ağından elde edilen sonuçlara benzer şekilde SEN9 ve SEN10 simülasyonlarından sonra kısıktırılmış seyahat taleplerine rağmen grafikte yatay eğilim görülmektedir. Enerji tüketimi grafiğinde ise bütün simülasyon adımları için olmasa da benzer bir durum ortaya çıkmıştır. Bu durum, elektrikli araç penetrasyonunun enerji tüketimini nasıl etkilediğini göstermektedir.

Benzer şekilde, toplam seyahat süresi, toplam durma sayısı ve diğer gecikme grafiklerinin tamamında SEN9 ve SEN10 simülasyonlarından sonra yatay eğilimde gitme trendi oluşmuştur. Ortalama hız grafiğine bakıldığında ise kısıktırılmış talep bileşenlerinin artmasıyla birlikte simülasyonlardaki ortalama hız değerleri azalmaktadır. Bu durum, artan trafik yoğunluğuyla birlikte seyahat hızlarının düştüğünü göstermektedir. Karma trafik koşulları altında grafiklerin ayrı ayrı değerlendirildiği koşullarda kritik penetrasyon oranlarının farklılık gösterdiği

görülmektedir. Daha önceki bölümlerde detaylı olarak anlatıldığı gibi, farklı göstergelerden elde edilen değerlerin B-AHP yöntemiyle belirlenen ağırlıklarla entegrasyonu gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Böylece senaryolar kendi içerisinde belirlenmiş ağırlıklara göre en iyiden en kötüye doğru sıralamaları gerçekleştirilebilecektir. Bu aşamada ÇKKV tekniklerinin uygulandığı tüm karar matrisleri EK-D’de Tablo D.9 – Tablo D.12 aralığında görülebilir. Bunlar arasından örnek olarak, 3600 simülasyon adımıyla kullanılan karar matrisi Tablo 4. 5’te görülmektedir.



Tablo 4. 5 İzmir kentsel ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 3600 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme						Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,462%					21,871%	21,158%		11,949%			17,632%						5,927%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (milyon)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBa)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (bin dBA)	
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96	
SEN1	11221,6	105,69	3,995	5,63	56,80	243	77,5	0	85,7	12,29	606,65	385,32	1,34	488,74	1,67	0,27	16,4	659,0	
SEN2	12944,7	117,49	4,083	6,28	65,24	269	85,7	4,31	102,0	11,93	719,62	467,13	2,23	600,06	1,96	0,31	19,4	665,0	
SEN3	11721,6	107,49	4,112	5,73	59,15	246	78,6	8,91	99,1	11,87	702,19	446,84	2,91	584,36	1,91	0,30	19,0	664,0	
SEN4	20665,2	174,80	5,759	9,40	103,34	394	126	37,3	211,0	11,45	1193,06	865,04	5,09	1053,8	3,41	0,66	39,8	733,0	
SEN5	8964,51	78,11	5,292	4,18	44,97	177	56,6	66,8	169,0	11,58	934,87	652,3	4,88	814,96	2,84	0,49	32,1	723,0	
SEN6	7230,94	60,76	6,456	3,27	36,13	137	43,7	114,0	267,0	11,18	1224,25	913,43	6,71	1101,62	4,00	0,80	50,5	753,0	
SEN7	3410,11	28,89	6,511	1,55	17,06	65,3	20,8	128,0	274,0	11,38	1230,10	934,34	5,36	1107,79	3,82	0,77	51,6	755,0	
SEN8	4084,81	34,01	6,648	1,83	20,39	76,6	24,4	133,0	304,0	11,32	1354,69	1045,63	5,95	1229,13	4,26	0,88	57,2	755,0	
SEN9	3012,88	24,70	7,867	1,33	15,02	55,4	17,7	172,0	403,0	11,20	1523,94	1205,7	7,99	1394,93	5,04	1,09	75,6	788,0	
SEN10	2755,93	22,68	7,99	1,22	13,74	50,9	16,2	177,0	430,0	11,15	1598,26	1274,69	8,29	1469,78	5,33	1,16	80,7	790,0	
SEN11	0	0	8,088	0	0	0	0	162,0	428,0	11,35	1562,53	1273,01	7,58	1434,73	5,40	1,23	57,6	792,0	
SEN12	0	0	8,185	0	0	0	0	170,0	428,0	11,37	1534,29	1255,1	8,08	1407,94	5,30	1,20	59,0	792,0	
SEN13	0	0	8,314	0	0	0	0	172,0	440,0	11,29	1549,86	1281,58	8,05	1423,31	5,74	1,33	65,5	797,0	
SEN14	0	0	8,397	0	0	0	0	174,0	472,0	11,32	1650,04	1376,82	9,17	1523,21	5,75	1,35	88,5	796,0	

CODAS, WASPAS ve MARCOS teknikleri kullanılarak İzmir kent ulaşım ağında gerçekleştirilmiş tüm simülasyonlar sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedefleri doğrultusunda en iyiden en kötüye doğru sıralanmıştır. Uygulanan tekniklerin içerdiği farklı yaklaşımlar ve hesap adımları sebebiyle her zaman aynı sıralama elde edilememektedir. Bu aşamada bu beklenen bir durumdur çünkü farklı sonuçlar hem sıralamaların tutarlılığı açısından hem de tekniklerin karşılaştırılması açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Her bir yöntem, alternatiflerin belirli özelliklerine odaklanarak farklı sıralamalar oluşturmaktadır. Bu farklılıklar, yöntemlerin güçlü ve zayıf yönlerinin anlaşılması ve karşılaştırılması açısından önemlidir. Örneğin, CODAS yöntemi daha çok mesafe temelli bir analiz sağlarken, WASPAS yöntemi daha kapsamlı ve dengeli bir yaklaşım sunar. MARCOS yöntemi ise ideal ve anti-ideal çözümler üzerinden bir karşılaştırma yaparak farklı bir perspektif kazandırır. Bu nedenle, Sioux Falls ve İzmir kent ulaşım ağına yönelik yapılan bu simülasyon çalışmaları, sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedeflerine ulaşmada farklı yöntemlerin bir sonraki aşamada birleştirilerek entegrasyonunun yapılması ve böylece ortaya çıkacak KDS yönteminin daha etkili ve uygun olduğunu belirlemeye yardımcı olacaktır. ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucu elde edilen sıralamalar Tablo 4. 6'da görülmektedir.

Tablo 4. 6'ya göre, elde edilen sıralamaların farklı ÇKKV teknikleri kullanılmasına rağmen yüksek oranda tutarlılık gösterdiği görülmektedir. Her teknik farklı simülasyon adımlarında sıralamaları küçük farklılıklarla benzer olarak verebilmiştir. Örnek olarak, en iyi sıralamalar SEN11- SEN14 aralığında elde edilmiştir ancak farklı simülasyon adımlarında sıralamalar birinde sonuç sırasıyla 2,1,3,4 olabilirken diğerinde sonuç 1,3,2,4 olabilmektedir. Tablo detaylı olarak incelendiğinde farklı senaryolarda farklı sıralamaların oluştuğu görülmektedir.

Tablo 4. 6 İzmir kentsel ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucunda elde edilen sıralamalar

	WASPAS				MARCOS				CODAS			
	3600	5400	7200	9000	3600	5400	7200	9000	3600	5400	7200	9000
	SKD	SKD	SKD	SKD	SKD	SKD	SKD	SKD	SKD	SKD	SKD	SKD
	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama
SEN1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
SEN2	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6
SEN3	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7
SEN4	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
SEN5	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
SEN6	11	11	12	11	11	11	12	11	11	11	12	11
SEN7	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
SEN8	12	12	11	12	12	12	11	12	12	12	11	12
SEN9	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
SEN10	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
SEN11	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
SEN12	1	3	3	2	1	3	3	2	1	3	3	2
SEN13	3	4	2	3	3	4	2	3	3	4	2	3
SEN14	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4

Önceki bölümlerde birden fazla ÇKKV yönteminden elde edilen sıralamaların daha rasyonel bir formda entegrasyonuna ait detaylı açıklamalar verilmişti. Üç farklı ÇKKV yönteminden elde edilen sonuçlar Borda sayım yöntemi ve puanlama sistemine dayalı Copeland yöntemiyle hesaplanmıştır. Her iki yöntemden de elde edilen sıralamalar aynı olup, sırasıyla şu şekildedir: **SEN11, SEN12, SEN13, SEN14, SEN1, $\frac{SEN2}{SEN3}$, SEN5, SEN4, SEN7, SEN6, SEN8, SEN9, SEN10.**

Uygulanmış olan bütün ÇKKV metodolojilerinde en iyi ilk dört sıralama SEN11, SEN12, SEN13 ve SEN14 olarak dört farklı simülasyonda elde edilmiştir. SEN2 ve SEN3 senaryolarında değerlendirme sonucunda eşit sıralamalar elde edilmiştir. En kötü sıralamalar ise uygulanan tüm tekniklerde tutarlı bir şekilde SEN10 ve SEN9 simülasyonlarından elde edilmiştir. Bu aşamada Sioux Falls test ağından elde edilen sonuçlarla tutarlılık olduğu görülmektedir.

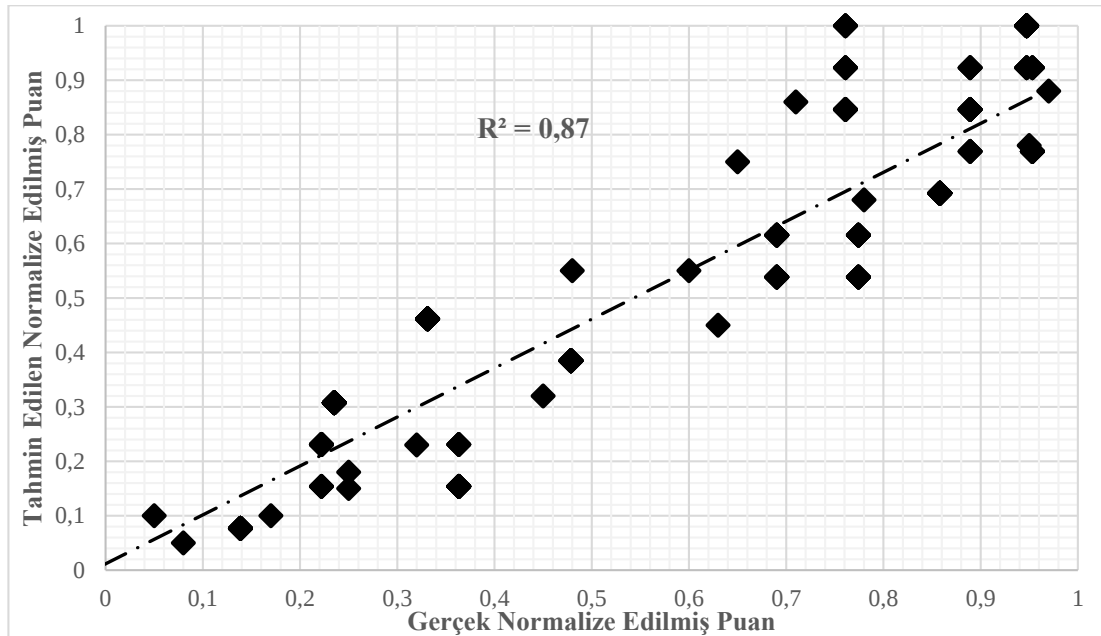
Bu sıralamalara göre, SEN4 ve SEN5'te belirtilen otonomluk seviyelerinin dağılımı açısından, karma trafik koşullarında ulaşım ağının en kötü senaryoları yaşamaması için sürdürülebilirlik açısından kritik senaryolar olarak değerlendirilebilir. Sioux Falls test ağında da benzer şekilde SEN5 senaryosunun önleyici tedbirler almak için kritik penetrasyon oranlarına sahip olduğu vurgulanmıştı. Elde edilen sonuçlar, çalışmanın başında belirtilen "*mevcut sisteme sınırlar koymadan otonom araçları uygulamak, hareketliliğin sürdürülebilir ilerlemesini azaltır*" hipotezini Sioux Falls test ağında olduğu gibi İzmir kentsel ulaşım ağında da desteklemektedir.

İzmir kentsel ulaşım ağında da benzer şekilde otonomluk seviyelerinin kontrol edilebilirliği ve bu seviyelerin ulaşım ağı sürdürülebilirliği açısından kritik eşiklere ulaşmadan önce alınması gereken önlemler üzerinde durulmuştur. WASPAS, CODAS ve MARCOS yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen 56 simülasyon sonucunda elde edilen verilerle, bağımsız değişkenler olarak otonomluk seviyeleri ve bağımlı değişken olarak toplam puan değerleri kullanılarak bir çoklu doğrusal regresyon modeli geliştirilmiştir. ANOVA analizi ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve sonuçlar detaylı bir şekilde Tablo 4. 7'de sunulmuştur.

Tablo 4. 7 Otonomluk seviyeleri ile toplam puan arasındaki ilişkinin ANOVA analizi sonuçları

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Anlamlılık F</i>	
Regresyon	6	14,696	2,449	270,433	2,32E-81	
Fark	161	1,458	0,009			
Toplam	167	16,154				
	<i>Katsayılar</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t Stat</i>	<i>p-değeri</i>	<i>Düşük %95</i>	<i>Yüksek %95</i>
Kesişim	8,7145	2,1594	4,0356	8,40E-05	4,450	12,979
Seviye 0	-0,0786	0,0212	-3,7126	2,82E-04	-0,120	-0,037
Seviye 1	-0,0199	0,0211	-0,9420	3,48E-01	-0,061	0,022
Seviye 2	-0,2638	0,0223	-11,8367	1,18E-23	-0,308	-0,220
Seviye 3	-0,0275	0,0229	-1,2052	2,30E-01	-0,073	0,018
Seviye 4	-0,0904	0,0216	-4,1772	4,82E-05	-0,133	-0,048
Seviye 5	-0,0776	0,0215	-3,6094	4,09E-04	-0,120	-0,035

Önceki başlıkta yapılan ANOVA analizine benzer şekilde Tablo 4. 7’de de otonomluk düzeyi Seviye 2 olan araçların normalize edilmiş puan değerlerini tahmin etmede en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. ANOVA analizinde katsayılar sütununda -0,26 katsayısı bu durumu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Seviye 2 otonom araçların hem insan sürürlü hem de otonom sürüş özellikleri sergileyen durumundan ötürü karma trafik koşullarında sürdürülebilirliği etkileyen önemli bir faktör olduğu öne çıkmaktadır. Şekil 4. 4, modelden elde edilen puanlar ile gözlemlenen puan değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4. 4 Yanıt değişkeninin tahmin edilen ve gözlemlenen değerleri arasındaki ilişki

Şekil 4. 4'e göre, modelin veri setine ne kadar iyi uyduğunu $R^2=0,87$ katsayısından anlayabiliriz. Tablo 4. 7'deki ANOVA analizine göre, F değeri 270,43 ile oldukça yüksek ve p değeri $8,40E-05$ ile oldukça düşüktür. Bu sonuçlar, oluşturulan modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve bağımsız değişkenlerin (otonomluk seviyeleri) bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. ANOVA'da elde edilen bu istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar, bağımlı değişken olarak tanımlanan puan değerinin otonom araç seviyeleri ile temsil edilen yüzdeler açısından değişimini İzmir kentsel ulaşım ağı için Denklem (4. 2) ile ifade edebileceğimizi göstermektedir.

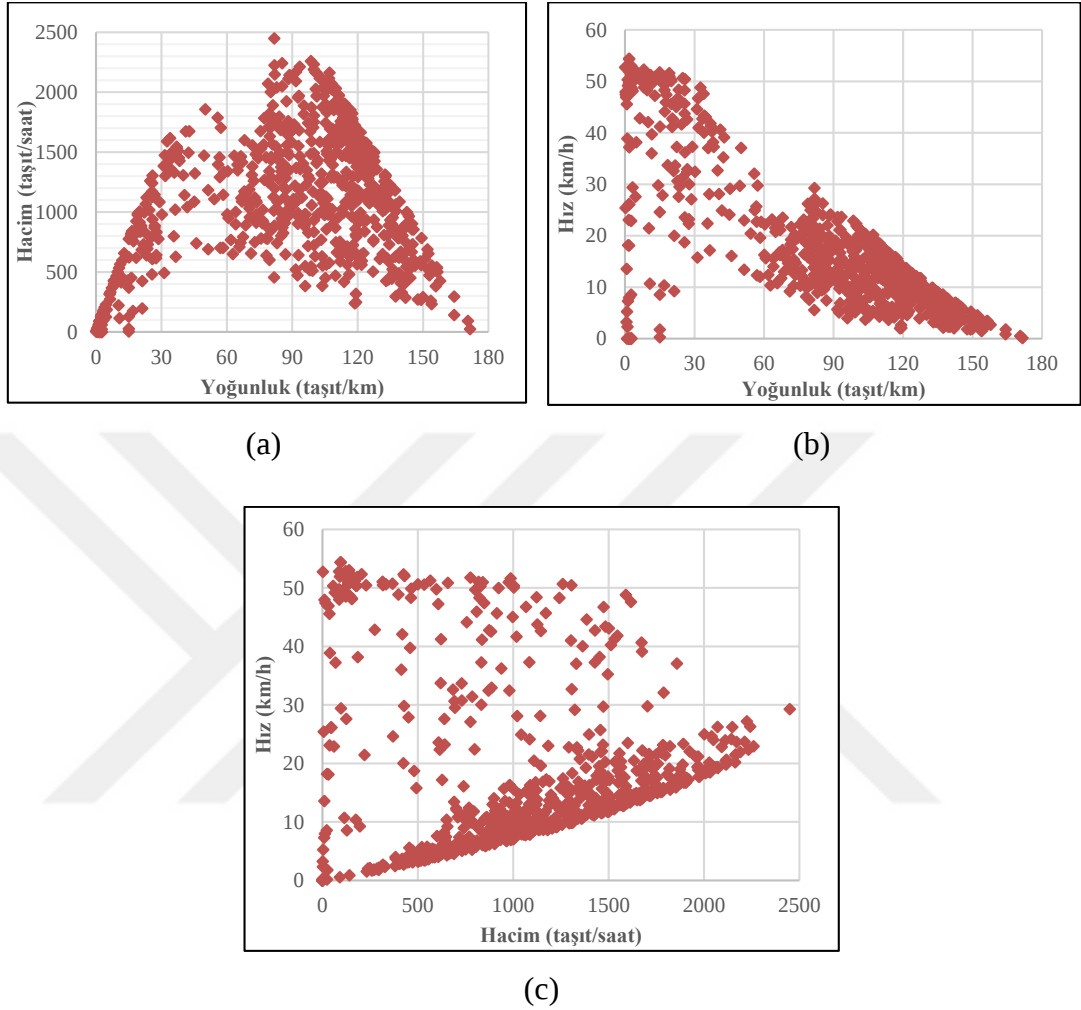
$$y = 8,7145 - 0,0786 * \%OA_{Seviye\ 0} - 0,0199 * \%OA_{Seviye\ 1} \\ - 0,2638 * \%OA_{Seviye\ 2} - 0,0275 * \%OA_{Seviye\ 3} \\ - 0,0904 * \%OA_{Seviye\ 4} - 0,0776 * \%OA_{Seviye\ 5} \quad (4. 2)$$

Puanlama modeli oluşturulurken, tamamen geleneksel araçlardan oluşan SEN1 simülasyonunda normalize edilmiş puan değeri yaklaşık 0,71 olarak belirlenmiştir. Farklı otonomluk seviyelerinin farklı penetrasyon oranlarında sisteme dahil edilmesiyle normalize edilmiş puan değerlerinin kademeli olarak düştüğü gözlenmiştir. SEN5 senaryosunda normalize edilmiş puan değeri 0,46 değerinde olup sistemin sürdürülebilirlik açısından kötü sonuçlar vermeye başlamadan önceki son durumu temsil etmektedir.

4.2 Kapasite Analizleri

Otonom ve bağlantılı araçlar, koordineli bir şekilde hızlarını ayarlayabildiklerinde daha kısa mesafelerde seyahat edebilirler ve bu durum verimsiz trafik sıkışıklığı dalgalarının önüne geçebilir. Bu etkinin otoyollar üzerinde daha belirgin olması beklenirken, şehir içi yol kesimlerinde sınırlı olabileceği beklenmektedir. Ulaşım ağından geçen araçların bağlantı bazında seyahat verileri işlenerek trafik akımının temel diyagramları elde edilmiştir. Sioux Falls test ağında kesintili akımı temsil edecek yol kesimleri L52 ve L49 bağları olarak belirlenmiştir. Penetrasyon oranlarındaki değişimlere bağlı olarak, belirlenen iki yol kesiminin temel diyagramları elde edilmiş ve bu diyagramlar üzerinden farklı penetrasyon oranlarının etkileri karşılaştırılmıştır. Örnek olarak, L49 yol kesimine ait temel diyagramlar üzerinden elde edilen grafikler,

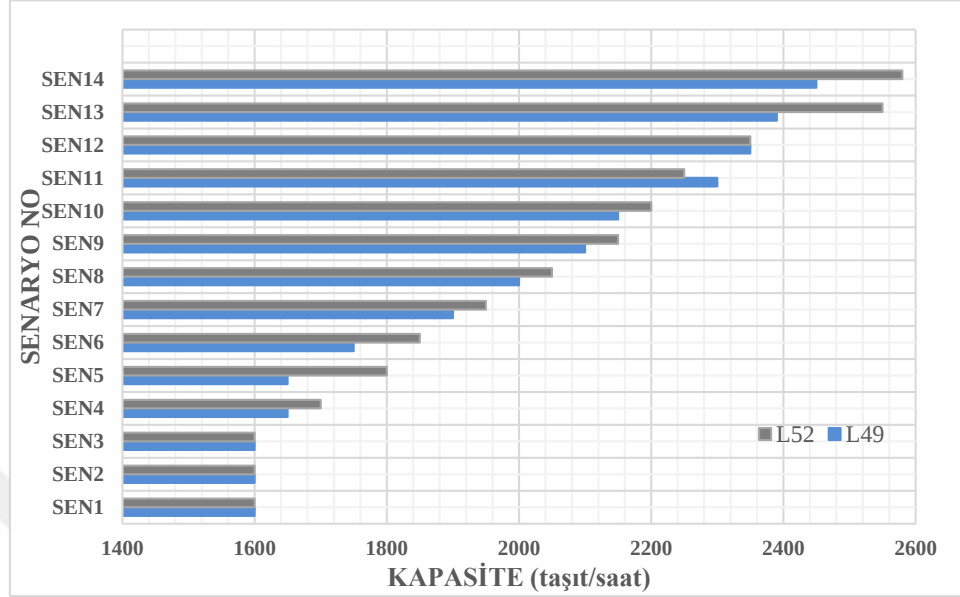
%100 penetrasyon oranlarına ait sonuçları içeren Şekil 4. 5’da detaylı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 4. 5 L49 bağlantısına ait trafiğin temel diyagramları- %100 penetrasyon oranı

Tamamen otonom araçlardan oluşan bir senaryoda, kesintili akım koşullarında elde edilen sonuçlar Şekil 4. 5’te gösterildiği gibi yolun kapasitesinin 2450 taşıt/saat değerlerine kadar çıktığını göstermektedir. Otonom araçların entegre sensör sistemleri aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurarak çevrelerini daha hassas bir şekilde algılayabilmeleri beklenmektedir. Bu sayede güvenli takip mesafeleri en aza indirilebilir ve şerit değişiklikleri daha etkin bir şekilde yönetilebilir. Bu gelişmeler, trafik akımındaki iyileştirmelerle birlikte altyapı sistemlerinin kapasitelerinin artmasına olanak tanır. Sioux Falls ulaşım ağında, kesintili akım koşullarının gözlemlendiği L49 ve L52 bağlarında, tamamı geleneksel araçlardan oluşan SEN1’den,

tamamı otonom araçlardan oluşan SEN14'e kadar gerçekleştirilen simülasyonlarda kapasite değerlerinin değişimi Şekil 4. 6'daki grafikte gösterilmiştir.

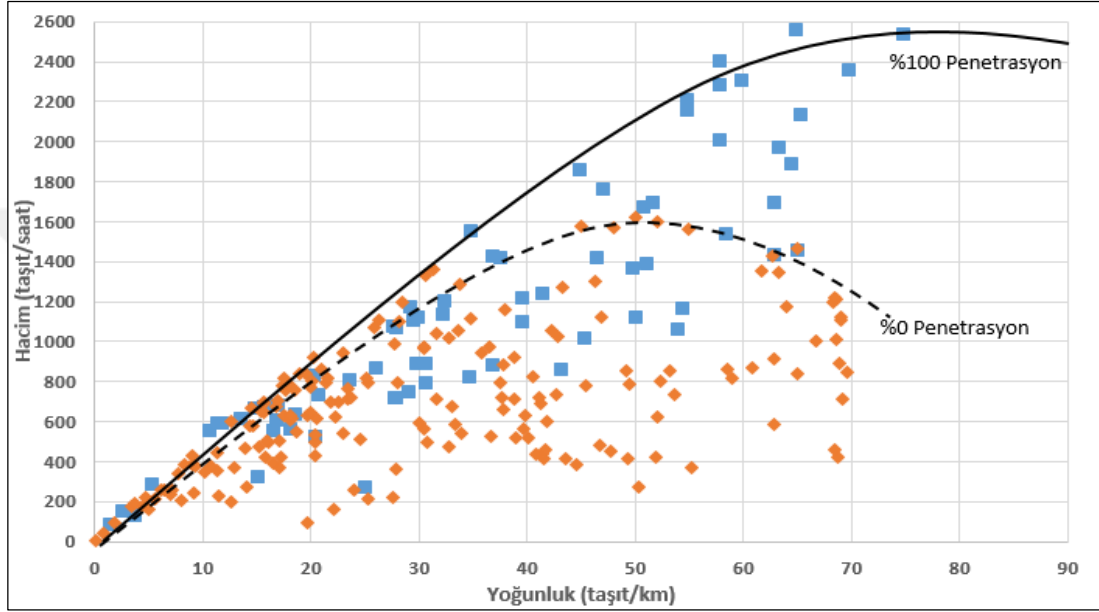


Şekil 4. 6 Kesintili akım koşullarında L52-L49 bağlantılarının kapasite değişimleri

Buna göre, %40 penetrasyon oranının üzerinde senaryolarda kapasite artışları gözlenmektedir. Ayrıca, otonomluk düzeyi Seviye 4-5 olan araçların, tüm araçlara oranla %60 ve üzeri olduğu durumlarda, kapasite değerlerinde önemli artışlar meydana gelmektedir. Bu durum özellikle literatürde belirtilen %20 ve %30'un üzerindeki penetrasyon oranlarında kapasite değerlerinin belirgin bir şekilde olumlu sonuçlar verdiğini ve yüksek penetrasyon oranlarında yol kapasitesini artırabileceğini destekler niteliktedir.

L49 yol kesiminde, %100 penetrasyon oranına sahip SEN14 senaryosunda, 5. seviye otonom taşıtların bulunduğu şerit başına 2450 taşıt/saat kapasite değeri gözlenirken, L52 yol kesiminde bu değer şerit başına 2580 araç olarak belirlenmiştir. SEN1 ile SEN6 arasındaki senaryolar incelendiğinde, Seviye 0-1-2-3 türündeki araçların farklı yüzdelerde artan penetrasyon oranları görülmektedir. Belirtilen otonomluk seviyeleri, SEN 6 senaryosunda %40 oranına ulaşsa ve sürücüsüz araç olarak nitelendirilen Seviye 4-5 araçlar toplamda %60'a ulaşsa bile, kapasite değerlerinde yalnızca %9-15 arasında bir artış gözlenmiştir. SEN6 senaryosunda, araçların tamamı farklı seviyelerde otonom araçlardan oluşsa da kapasite üzerinde

ciddi oranlarda artışlar gözlenmemiştir. Bu durum, ileri düzeyde sensörlerle donatılmış ve yüksek seviyelerde karar verme mekanizmalarını içeren Seviye 4-5 otonom araçların trafik performansı üzerindeki önemli etkisini ortaya koymaktadır. Seviye 4-5 olan araçların toplam araçlara kritik olarak nitelendirilebilecek %60 ve üzeri oranda olduğu senaryolarda, kapasite artışlarının %15'ten başlayarak %61'e kadar çıkabildiği görülmüştür.



Şekil 4. 7 L52'ye ait Hacim-Yoğunluk Grafiğinin %0 - %100 penetrasyon oranlarında karşılaştırılması

Şekil 4. 7 'de verilen L52 yol kesimine ait hacim-yoğunluk grafiği incelendiğinde, penetrasyon oranındaki artışın kapasite üzerindeki etkisi net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, grafik üzerinden kapasite değerindeki yoğunluk olarak bilinen kritik yoğunluk değerinin değişimi de görülmektedir. L52 yol kesimi için, %100 penetrasyon oranında 5. seviye otonom araçların olduğu SEN14 senaryosunda kritik yoğunluk değeri 50 taşıt/km değerinden 78 taşıt/km değerine yükselerek %56 oranında artış göstermiştir. Sioux Falls ulaşım ağında kesintili akım olarak seçilen L49 ve L52 yol kesimlerine ait Seviye 4-5 türündeki araçların artan penetrasyon oranlarına göre kapasitede kritik yoğunluk değerlerinin karşılaştırılması ve değişim oranları Tablo 4. 8'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4. 8 Seçilen yol kesimlerini kapasite ve kritik yoğunluk değerlerinin değişimi

Bağ	Seviye 4 + Seviye 5 Penetrasyon Oranı (%)	%0	%20	%40	%60	%80	%85	%90	%95	%100
L49	Kapasite değerinin %0 penetrasyona göre değişim oranı (%)	-	%3,13	%3,13	%9,38	%25	%31,25	%34,38	%43,75	%53,13
	Kritik Yoğunluk (taşıt/km)	54	60	60	62	68	70	72	75	75
	Kritik yoğunluk değerinin %0 penetrasyona göre değişim oranı	-	%11,11	%11,11	%14,81	%25,92	%29,63	%33,33	%38,89	%38,89
L52	Kapasite değerinin %0 penetrasyona göre değişim oranı (%)	-	%6,25	%12,50	%15,63	%21,88	%34,38	%37,50	%40,63	%61,25
	Kritik Yoğunluk (taşıt/km)	50	55	58	60	65	67	70	70	78
	Kritik yoğunluk değerinin %0 penetrasyona göre değişim oranı	-	%10	%16	%20	%30	%34	%40	%40	%56

Test ağının sonuçları, yüksek seviyelerde otonom araç penetrasyonunun artmasıyla kapasite değerlerinin lineer olarak arttığını göstermektedir. Beklenildiği gibi, otonom araçlar mevcut mobilite sistemlerinin trafik kapasitesini, verimliliğini, istikrarını ve güvenliğini artırmak için önemli potansiyele sahiptir. Kesintili akımın hâkim olduğu yol kesimleri incelendiğinde, %100 penetrasyon oranında 5. seviye otonom araçların olduğu simülasyonlarda kapasite değerlerinin şerit başına %53 ile %56 oranında artış gösterdiği sonucuna varılmıştır. Kritik yoğunluk değeri ise daha yüksek otonom araç penetrasyonu ile birlikte artmaktadır. Başlangıçta artış oranı yavaş bir şekilde yükselirken %60 oranında Seviye 4 ve Seviye 5 araçlarla birlikte kritik yoğunluk değeri yüksek düzeyde artmaktadır. Bu durum, yolda yeterince sürücüsüz araç olmadığından faydanın belirgin olmadığı anlamına gelmektedir; çünkü otonom araçlar geleneksel araçlara uyum sağlamak zorunda kalmaktadır. Sürücüsüz araçlar ulaşım ağında baskın bir şekilde görülmeye başladığında, hız-hacim ilişkisinde maksimum akım etrafında bir düzlük meydana gelmeye başlaması beklenmektedir. Bu durum literatürde klasik olarak bilinen bir maksimum elde edilmediği, yani geleneksel araçlarda olduğu gibi mevcut ve belirli bir noktada değil, maksimum verimliliğin daha uzun bir alanda gözlenebileceği anlamına gelmektedir. Trafik akımındaki bu iyileşme,

sürücüsüz taşıtların daha kısa takip mesafesi ve daha az tepki süresinden kaynaklanmaktadır. Yüzde yüz otonom araç benimseme ile ulaşım ağı daha istikrarlı hale gelmekte ve bir dereceye kadar tıkanıklıktan kaçınılabilmektedir.

4.3 Kalibrasyon ve Doğrulama İşlemleri Sonrasında Gerçekleştirilmiş Simülasyonlar

Simülasyon çalışmalarının son aşamasında, İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilmiş seyahat süresi kalibrasyonu işlemlerinden sonra, saha koşullarının daha iyi yansıtabilmek amacıyla farklı aşamalarda simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Otonom araçların yakın, orta ve uzak olarak üç farklı gelecek durumda kısıktırılmış talep bileşenleri hesaplanmıştır. Mevcut durumda 1 numaralı simülasyonda İzmir ağında toplam 141.198 araç bulunmaktadır. Kısıktırılmış talep bileşenlerinin en yüksek seviyeleri B/V matrisine uygulandığında (Tamamen Otonom-Sim. No-34), başlangıç durumunu temsil eden senaryoya kıyasla 2,56 kat artırılmıştır. Tablo 4.9’da belirtilen tamamen otonom durumunda İzmir ağında toplam 362.861 araç bulunmaktadır. Belirtilen tercihler anketinden elde edilen sonuçlar ve İzmir ili hanehalkı anketlerinden elde edilen bilgiler ışığında Tablo 4.9’da verilen penetrasyon oranlarına göre simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.9’a göre mevcut durum, üç farklı simülasyon koşulunda ağırlıklı olarak Seviye 0 araçların olduğu günümüz durumlarını ifade etmektedir. Yakın gelecek koşulları 2025-2035 yılları arasında temsil edecek şekilde toplamda 10 farklı penetrasyon durumunu inceleyecek şekilde planlanmıştır. Yakın gelecek simülasyonlarının sonucunda Seviye 4 ve Seviye 5 araçlarının toplamı %30 seviyelerine ulaşmaktadır. Orta gelecek koşulları 2035-2050 yılları arasında temsil edecek şekilde yine 10 farklı penetrasyon durumunu incelemektedir. Bu simülasyon grubunun da sonucunda penetrasyon oranları %65 oranında Seviye 4 ve Seviye 5 araçlarından oluşmaktadır. Uzak gelecek koşulları ise 2050-2070 yıllarını temsil edecek şekilde yine toplamda 10 farklı penetrasyon durumunu incelemiştir. Bu grubun da sonucu simülasyonunda Seviye 4 ve Seviye 5 araçları toplam araçların %85 olacak şekilde planlanmıştır. Son olarak ulaşım ağında tanımlanan bütün araçların Seviye 5 otonom olduğu durum da incelenmiş olup elde edilen sonuçlar SKHG açısından ÇKKV teknikleriyle yorumlanmıştır.

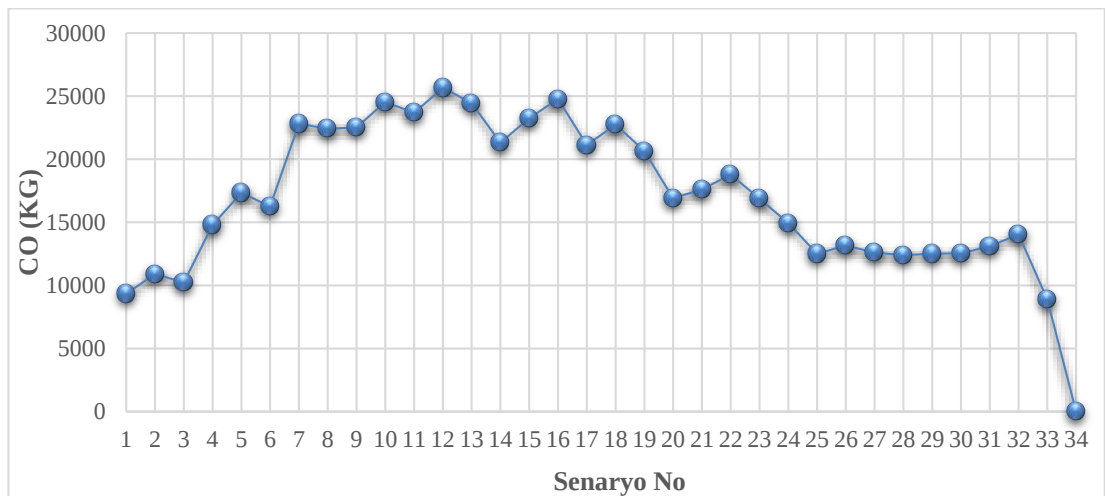
Tablo 4.9 Kalibrasyon işlemleri sonrasında gerçekleştirilen simülasyonlarda otonom araç penetrasyon oranlarının seviyelerine göre dağılımı

	Sim. No	Penetrasyon Oranı (%)	Seviye 0 (%)	Seviye 1 (%)	Seviye 2 (%)	Seviye 3 (%)	Seviye 4 (%)	Seviye 5 (%)
MEVCUT DURUM	1	0	100	0	0	0	0	0
	2	15	85	10	5	0	0	0
	3	25	75	10	10	5	0	0
YAKIN GELECEK	4	30	70	15	10	5	0	0
	5	35	65	15	15	5	0	0
	6	40	60	15	15	10	0	0
	7	45	55	15	15	10	5	0
	8	50	50	15	15	10	5	5
	9	60	40	15	15	15	10	5
	10	60	40	10	15	15	10	10
	11	65	35	10	15	20	10	10
	12	75	25	10	15	25	15	10
	13	80	20	10	15	25	15	15
ORTA GELECEK	14	80	20	10	10	30	15	15
	15	80	20	10	10	25	15	20
	16	80	20	10	10	20	15	25
	17	80	20	10	10	20	20	20
	18	85	15	10	10	20	20	25
	19	85	15	10	5	20	20	30
	20	90	10	10	5	25	20	30
	21	90	10	10	5	20	20	35
	22	90	10	10	5	15	20	40
	23	90	10	10	5	10	20	45
UZAK GELECEK	24	90	10	5	5	10	25	45
	25	95	5	5	5	15	25	45
	26	95	5	5	5	10	25	50
	27	95	5	5	5	5	30	50
	28	95	5	5	5	5	25	55
	29	95	5	5	5	5	20	60
	30	95	5	5	5	5	15	65
	31	95	5	5	5	5	10	70
	32	95	5	5	5	5	5	75
	33	95	5	5	0	5	5	80
TAMAMEN OTONOM	34	100	0	0	0	0	0	100

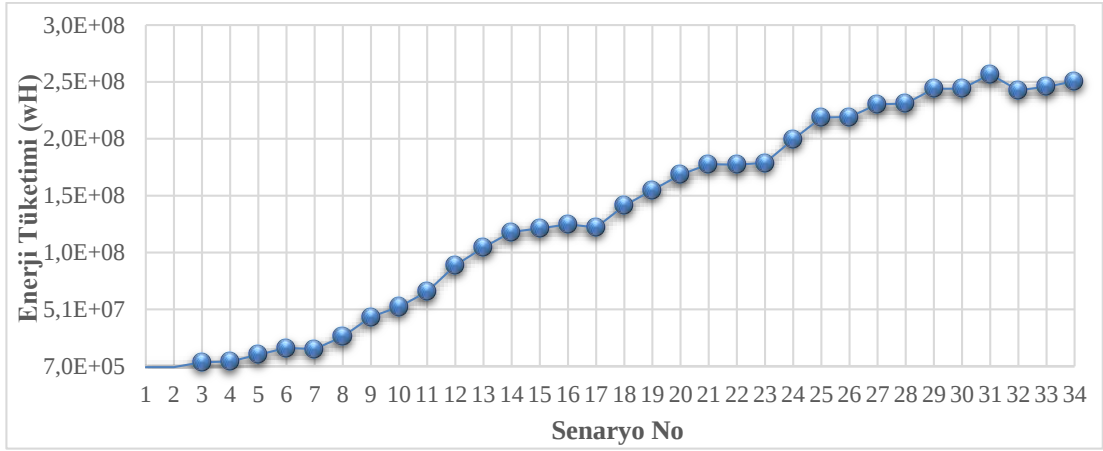
4.3.1 İzmir Kentsel Ulaşım Ağından Elde Edilen Sonuçlar

Kalibrasyon işlemi akış şemasına göre şerit değiştirme ve araç takip simülasyon parametrelerinin gezici araçlardan toplanan seyahat süresi değerlerine göre kalibre edilmiştir. SQV istatistiğine dayalı duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiş ve kalibrasyon aşamasından sonra Theil's U ve RRMSE yöntemleriyle yine gezici araçlardan toplanan verilerden ortalama hız verilerine göre doğrulama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

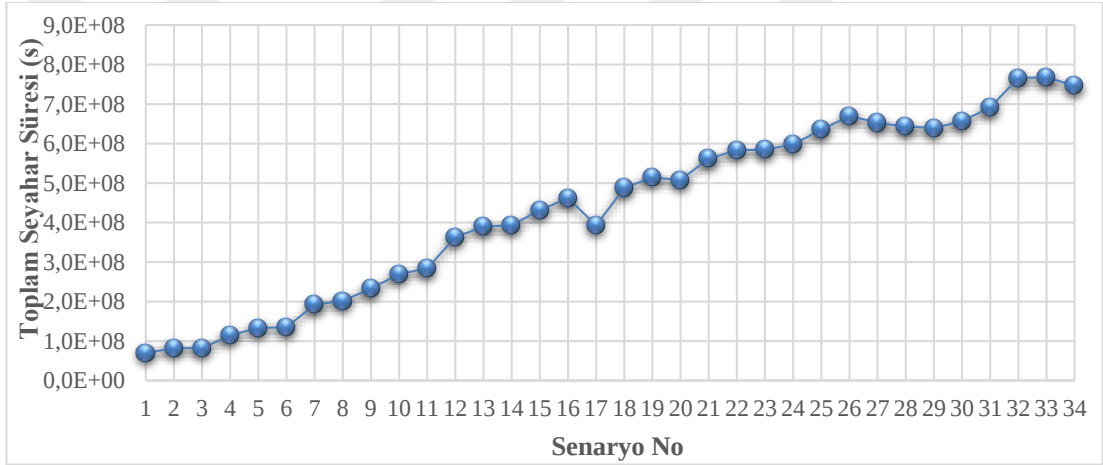
Saha koşullarının daha iyi yansıtılabilmesi amacıyla, otonom araçların yakın, orta ve uzak olarak üç farklı gelecek durumunda kısıktırılmış talep bileşenleri etkisi altında simülasyonları kalibrasyon işlemlerinden sonra İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilmiştir. Belirtilen tercihler anketinden elde edilen sonuçlar ve İzmir ili hanehalkı anketlerinden elde edilen verilere dayalı olarak Tablo 4.9'da verilen penetrasyon oranlarına göre simülasyonlar yapılmıştır. Burada, kısıktırılmış talep bileşenlerinin literatüre dayalı yaklaşım yerine, belirtilen tercihler anketine dayalı olarak belirlenmesine karar verilmişti ve UPI2030 kapsamında yapılan anketlerle belirlenen mevcut yolculuk tercihleri, kısıktırılmış talep bileşenlerinin yakın, orta ve uzak gelecekte hesaplanabilmesi amacıyla kullanılmıştı. Diğer simülasyon sonuçlarında olduğu gibi, kalibrasyon ve doğrulama işlemlerinden sonra gerçekleştirilmiş simülasyonlar SKHG değerlendirme aşamasında kullanılan sonuçları EK-D Şekil D.3'te toplu olarak verilmektedir. Elde edilen sonuçlardan bazıları aşağıda Şekil 4. 8'de grafiksel olarak gösterilmektedir.



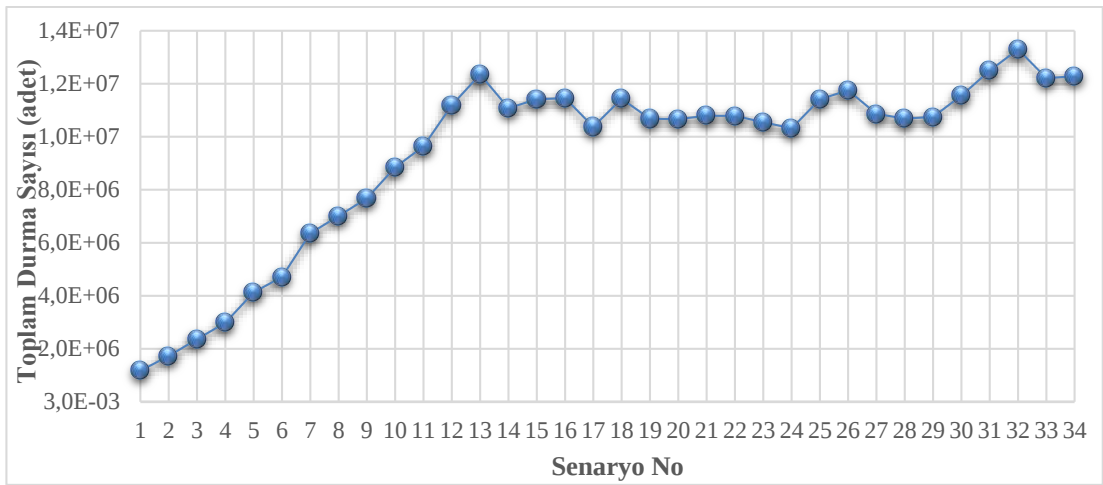
(a)



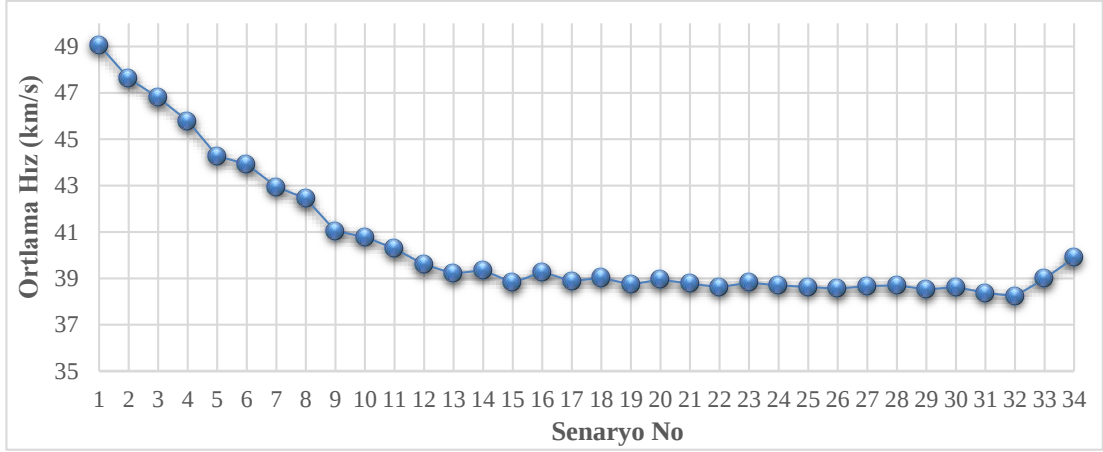
(b)



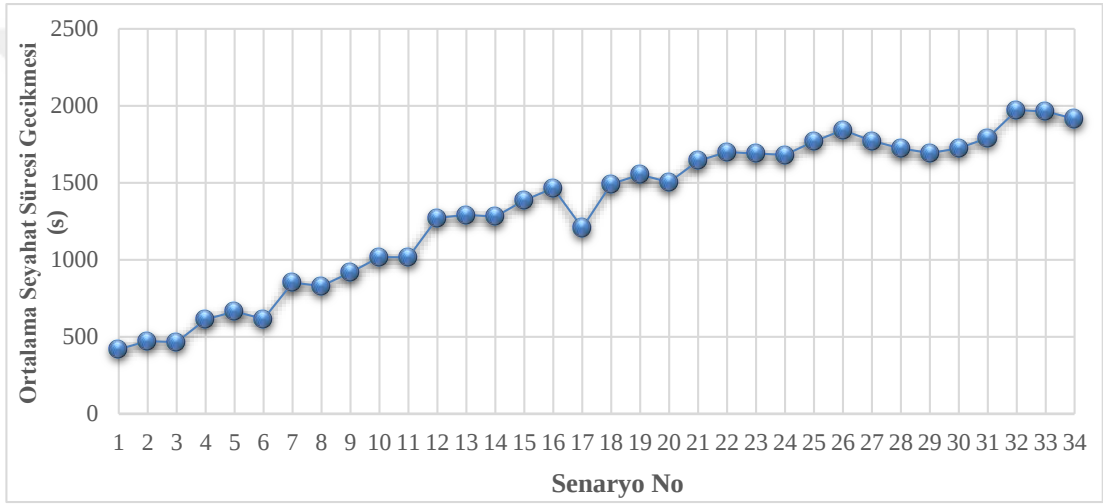
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4. 8 Kalibrasyon aşamasından sonra SKHG değerlendirmesinde kullanılan İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından örnekler

Kalibrasyon aşamasından sonra İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilmiş simülasyonlardan elde edilen grafikler incelendiğinde, hava kirliliğine ve sera gazı etkisi yaratan CO₂ salımlarının SEN10-SEN13 aralığındaki simülasyonlarda zirve değerlerine ulaştığı söylenebilir. Belirtilen tercihler anketinden gelen türel dağılımlar dikkate alındığından, fosil yakıt tüketen ve emisyon sınıfı PC_G_EU4 olan Seviye 0-1-2 araçlar simülasyonlarda yakın, orta ve uzak gelecek koşullarının neredeyse tamamında bulunmaktadır. Yalnızca bu üç gelecek durumundan farklı olarak karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla SEN34 senaryosu tamamen Seviye 5 otonom araç olarak tasarlanmıştır. Bu simülasyondan elde edilen değerlerde fosil yakıt kullanımının oluşturduğu emisyon değerleri bulunmamaktadır. SEN3 senaryosundan

itibaren Seviye 3 otonom araçlarla birlikte elektrikli araçların sisteme girmesiyle elektrik tüketiminin arttığı görülmektedir. Önceki başlıklarda grafikleri verilen Sioux Falls ve İzmir kentsel ulaşım ağlarına bakıldığında SEN9 ve SEN10 simülasyonlarından sonra kısıktırılmış talep etkisine yatay bir eğilim genel olarak gözlenmiştir. Şekil 4. 8 ve Ek-D Şekil D.3'te ki grafiklerde de benzer bir durum genel olarak SEN24 ve SEN25 senaryolarından sonra görülmüştür. Bu senaryolardaki penetrasyon oranlarına bakıldığında önceki kısımlarda bahsedilen SEN9 ve SEN10 senaryoları ile benzer ilişkilerin olduğu görülmektedir. Özellikle Seviye 4-5 otonom araçların penetrasyon oranları toplamı %70-75 aralığında olduğu zaman ve diğer otonomluk seviyelerinin %5 ve %10'luk dağılımların denk geldiği aralıklarda kritik bir dönüm noktasının gözlemlendiği açıkça görülmektedir. Ortalama hız grafiğine bakıldığında, kısıktırılmış talep bileşenlerinin artmasıyla birlikte ortalama hız değerleri SEN13 senaryosuna kadar azalmakta ve sonra yatay bir seyir izlemektedir. Artan trafik yoğunluğu ve doluluk oranlarıyla birlikte ortalama hız değerlerinde bir düşüşün gözlenmesi diğer simülasyon sonuçlarıyla da ortaya çıktığı gibi beklenen bir durumdur. Karma trafik koşulları altında grafiklerin ayrı ayrı değerlendirildiği koşullarda kritik penetrasyon oranlarının farklılık gösterdiği görülmektedir. Hava kirliliği ve sera gazı emisyonları grafiğinde kritik senaryolar bahsedildiği gibi, ortalama hız, doluluk oranı, yoğunluk ve diğer grafiklerinde eğilimin değiştiği senaryolar farklılık gösterebilmektedir. Daha önceki bölümlerde detaylı olarak anlatıldığı gibi, farklı göstergelerden elde edilen değerlerin B-AHP yöntemiyle belirlenen ağırlıklarla entegrasyonu gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Böylece senaryolar kendi içerisinde belirlenmiş ağırlıklara göre en iyiden en kötüye doğru sıralamaları gerçekleştirilebilecektir. Kalibrasyon ve doğrulama işlemleri sonrasında simülasyon ortamında 3600 simülasyon adımında toplam 34 farklı penetrasyon oranında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi Tablo 4. 10'da görülmektedir.

Tablo 4. 10 Kalibrasyon ve doğrulama işlemlerinden sonra İzmir kentsel ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 3600 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme						Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,462%					21,871%	21,158%		11,949%			17,632%						5,927%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (milyon)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBA)	Link Gürültü Emisyon Toplam (bin dBA)	
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96	
SEN1	9334,1	93,44	3,9	5,04	47,62	215	68,6	0,00	70,0	49,07	524,68	307,83	1,17	419,78	1,31	0,20	13,6	755	
SEN2	10902,9	106,86	4,3	5,75	55,47	246	78,4	0,00	82,4	47,63	581,84	340,46	1,73	472,12	1,54	0,24	16,0	766	
SEN3	10230,0	100,55	4,3	5,40	52,06	232	73,9	4,30	81,6	46,80	574,88	330,23	2,36	465,80	1,59	0,24	15,9	767	
SEN4	14799,2	136,71	4,8	7,36	74,75	312	99,5	4,89	115	45,79	730,75	465,34	2,98	613,18	1,97	0,33	21,9	785	
SEN5	17334,4	157,62	5,2	8,47	87,39	359	114	10,9	133	44,28	780,10	498,81	4,13	663,97	2,18	0,39	25,5	802	
SEN6	16256,1	150,70	5,6	8,08	82,14	344	110	16,9	135	43,92	731,04	448,94	4,71	616,68	2,30	0,41	26,0	819	
SEN7	22804,9	198,88	6,0	10,71	114,43	450	143	15,9	192	42,95	972,57	658,53	6,36	851,74	2,82	0,53	36,5	833	
SEN8	22414,0	196,18	6,4	10,55	112,51	444	142	26,9	201	42,44	950,80	627,29	7,01	830,39	2,93	0,55	38,3	849	
SEN9	22524,0	194,85	6,9	10,48	112,91	440	140	44,1	233	41,04	1041,77	713,66	7,68	917,49	3,30	0,66	44,1	871	
SEN10	24527,3	208,80	7,1	11,25	122,73	470	150	53,0	270	40,79	1142,37	803,50	8,85	1017,99	3,54	0,72	50,8	881	
SEN11	23678,2	202,16	7,6	10,88	118,52	455	145	66,2	284	40,28	1142,27	800,21	9,64	1016,84	3,78	0,79	53,6	896	
SEN12	25659,5	212,73	7,9	11,47	128,03	477	152	89,4	363	39,60	1406,70	1051,86	11,2	1272,77	4,51	0,99	68,1	898	
SEN13	24447,4	202,50	8,3	10,92	121,97	454	145	105	390	39,20	1425,57	1066,24	12,4	1291,71	4,58	1,02	73,0	908	
SEN14	21305,9	176,96	8,5	9,54	106,33	397	126	119	393	39,35	1414,44	1065,81	11,1	1281,18	4,62	1,03	73,8	911	
SEN15	23244,1	191,74	8,7	10,35	115,92	429	137	122	432	38,81	1523,99	1165,36	11,4	1386,86	4,89	1,10	80,7	917	
SEN16	24776,3	203,16	8,8	10,97	123,48	454	145	125	462	39,28	1604,26	1239,46	11,5	1465,30	5,06	1,14	86,2	915	
SEN17	21126,4	177,08	9,1	9,54	105,54	398	127	123	393	38,88	1337,72	986,22	10,4	1208,18	4,75	1,06	74,1	923	
SEN18	22746,4	186,41	9,2	10,07	113,36	417	133	142	488	39,02	1632,37	1266,92	11,4	1492,70	5,43	1,25	91,1	928	
SEN19	20649,1	168,70	9,4	9,12	102,88	377	120	156	515	38,74	1693,38	1328,07	10,7	1553,01	5,70	1,31	96,1	931	
SEN20	16900,8	138,53	9,6	7,48	84,23	310	98,8	169	508	38,95	1643,23	1293,95	10,7	1504,07	5,65	1,32	95,0	938	

Tablo 4.10 (Devamı)

SEN21	17607,9	143,65	9,8	7,76	87,71	321	102	178	562	38,77	1788,70	1429,12	10,8	1643,87	6,23	1,48	105	937
SEN22	18787,8	152,51	9,8	8,25	93,54	340	109	178	583	38,63	1844,50	1477,12	10,8	1699,92	6,27	1,52	109	939
SEN23	16865,6	137,29	9,9	7,42	84,00	307	97,8	180	585	38,81	1833,75	1467,19	10,6	1689,84	6,41	1,52	109	942
SEN24	14943,4	122,06	10,1	6,60	74,45	273	87,0	200	598	38,70	1828,08	1471,34	10,3	1682,30	6,81	1,67	120	948
SEN25	12502,2	101,47	10,4	5,49	62,24	227	72,3	219	635	38,63	1917,90	1554,69	11,4	1768,86	7,10	1,76	126	952
SEN26	13169,7	106,57	10,5	5,76	65,55	238	75,8	220	670	38,56	1992,63	1616,67	11,8	1842,79	7,23	1,80	137	955
SEN27	12598,4	102,34	10,6	5,53	62,73	229	72,9	231	653	38,66	1921,09	1548,65	10,9	1772,02	7,42	1,84	149	958
SEN28	12406,4	101,03	10,7	5,46	61,79	226	72,0	232	643	38,70	1872,65	1506,34	10,7	1723,47	7,42	1,83	159	962
SEN29	12507,0	101,89	10,8	5,51	62,29	228	72,6	245	640	38,52	1842,85	1479,17	10,8	1693,40	7,42	1,84	146	963
SEN30	12538,1	102,17	11,0	5,52	62,45	228	72,8	245	657	38,63	1872,99	1507,74	11,6	1724,53	7,38	1,82	147	966
SEN31	13100,8	106,51	11,3	5,75	65,24	238	75,9	257	692	38,38	1939,34	1559,31	12,5	1792,63	7,18	1,76	152	968
SEN32	14036,5	113,50	11,5	6,14	69,86	253	80,8	243	766	38,23	2125,43	1744,57	13,3	1972,48	6,08	1,49	160	945
SEN33	8894,2	72,25	11,5	3,91	44,29	161	51,4	246	767	38,99	2113,92	1770,02	12,2	1964,21	5,89	1,44	166	943
SEN34	0,0	0,00	11,5	0,00	0,00	0,00	0,00	251	747	39,89	2058,34	1759,81	12,3	1916,13	5,92	1,51	176	935

ÇKKV teknikleri kullanılarak İzmir kentsel ulaşım ağında kalibrasyon ve doğrulama işlemleri sonrasında gerçekleştirilen simülasyonlar sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedefleri doğrultusunda en iyiden en kötüye doğru sıralanmıştır. ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucu elde edilen sıralamalar Tablo 4. 11'de gösterilmektedir. Tablo 4. 11'e göre, farklı ÇKKV teknikleri kullanılmış olmasına rağmen elde edilen sıralamaların yüksek oranda tutarlılık gösterdiği görülmektedir.

Üç farklı ÇKKV yönteminden elde edilen sonuçların aynı sıralamaları ortaya çıkarmasından dolayı Copeland ve Borda puanlama yöntemlerine göre entegrasyon işlemine gerek kalmamıştır. Tablo 4. 11'e göre sıralamalar arasından son çeyreklik dikkate alındığında SEN26-SEN33 aralığındaki 8 senaryo en kötü sonuç verenler olarak belirlenmiştir. En iyi sıralamalarda ise birinci sırada tamamen Seviye 5 otonom araçların olduğu SEN34 ve ikinci sırada da tamamen Seviye 0 geleneksel araçların olduğu SEN1 senaryoları belirlenmiştir. SEN26-SEN33 arasındaki senaryoların otonom araç penetrasyon oranları dağılımlarına bakıldığında; sekiz senaryonun altısında Seviye 0-1-2-3 araç dağılımlarının %5 olduğu görülmektedir. %75-80 gibi yüksek bir oran aralığındaki Seviye 4-5 araçların olması bile olumsuz durumların ortaya çıkmasına engel olmamıştır. Kalibrasyon öncesi yapılan simülasyonlarda da SEN9 ve SEN10 senaryoları için benzer durumlar gözlemlendiği ilgili başlıklarda detaylı olarak açıklanmıştır. Dolayısıyla, kalibrasyon ve doğrulama işlemleri öncesinde yapılan simülasyonlarla elde edilen sonuçların tutarlılık gösterdiği söylenebilir.

Bu sıralamalara göre, 14. sıradaki SEN13 ve özellikle 15. sırada yer alan SEN17'nin belirtilen otonomluk seviyelerinin dağılımı açısından, karma trafik koşullarında ulaşım ağının en kötü senaryoları yaşamaması için sürdürülebilirlik açısından kritik senaryolar olarak değerlendirilebilir. Sioux Falls test ağı ve İzmir kentsel ulaşım ağında da penetrasyon oranları açısından benzer şekilde SEN5 senaryosunun önleyici tedbirler almak için kritik penetrasyon oranlarına sahip olduğu vurgulanmıştı. SEN17 senaryosuna göre penetrasyon oranlarının dağılımı şu şekildedir; **%20 Seviye 0, %10 Seviye 1, %10 Seviye 2, %20 Seviye 3, %20 Seviye 4 ve %20 Seviye 5.**

Tablo 4. 11 Kalibrasyon ve doğrulama işlemlerinden sonra İzmir kentsel ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulanması sonucunda elde edilen sıralamalar.

	3600-SKD		
	WASPAS	CODAS	MARCOS
SEN1	2	2	2
SEN2	3	3	3
SEN3	4	4	4
SEN4	5	5	5
SEN5	6	6	6
SEN6	7	7	7
SEN7	8	8	8
SEN8	9	9	9
SEN9	10	10	10
SEN10	11	11	11
SEN11	12	12	12
SEN12	13	13	13
SEN13	14	14	14
SEN14	16	16	16
SEN15	17	17	17
SEN16	18	18	18
SEN17	15	15	15
SEN18	19	19	19
SEN19	21	21	21
SEN20	20	20	20
SEN21	22	22	22
SEN22	23	23	23
SEN23	24	24	24
SEN24	25	25	25
SEN25	26	26	26
SEN26	31	31	31
SEN27	29	29	29
SEN28	28	28	28
SEN29	27	27	27
SEN30	30	30	30
SEN31	32	32	32
SEN32	34	33	34
SEN33	33	34	33
SEN34	1	1	1

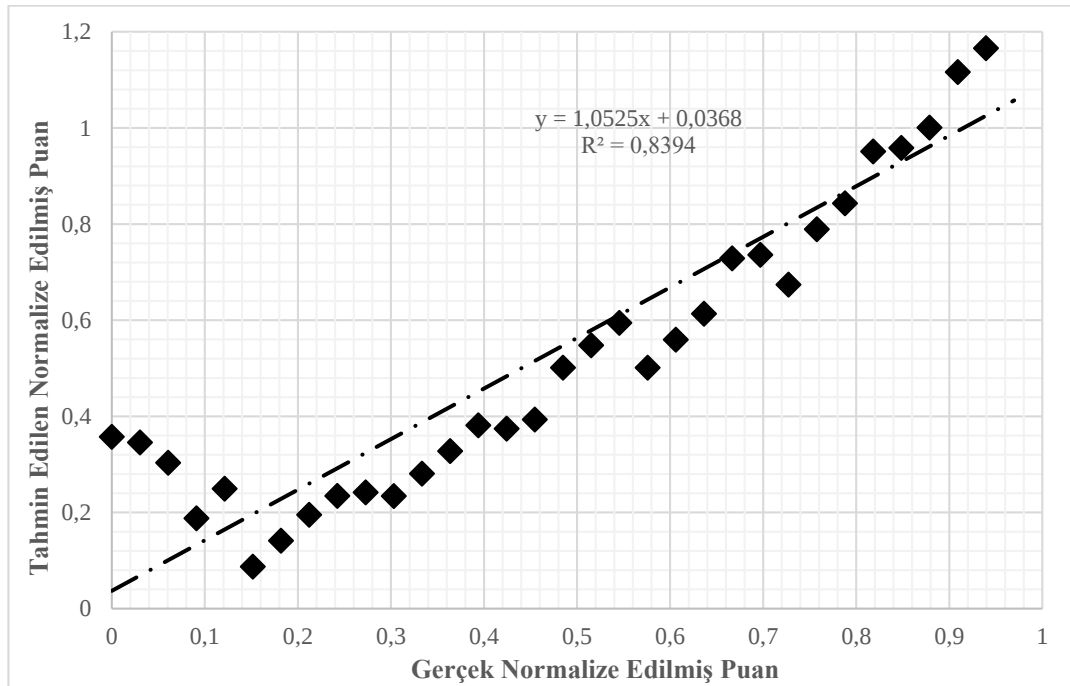
Önceki başlıklarda Sioux Falls test ağı ve İzmir kentsel ulaşım ağında otonomluk seviyelerinin kontrol edilebilirliği ve bu seviyelerin ulaşım ağı sürdürülebilirliği açısından kritik eşiklere ulaşmadan önce alınması gereken önlemler üzerinde durulmuştu. ÇKKV yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerle, bağımsız değişkenler olarak otonomluk seviyeleri ve bağımlı değişken olarak toplam puan değerleri kullanılarak bir çoklu doğrusal regresyon modeli kalibrasyon ve doğrulama işlemleri sonrası içinde geliştirilmiştir. ANOVA

analizi ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve sonuçlar detaylı bir şekilde Tablo 4. 12’de sunulmuştur.

Tablo 4. 12 Otonomluk seviyeleri ile toplam puan arasındaki ilişkinin ANOVA analizi sonuçları

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Anlamlılık F</i>	
Regresyon	6	2,228031	0,371339	122,90334	7,61E-07	
Fark	27	0,777019	0,028778			
Toplam	33	3,005051				
	<i>Katsayılar</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t Stat</i>	<i>p-değeri</i>	<i>Düşük %95</i>	<i>Yüksek %95</i>
Kesişim	8,3559	10,0848	0,8286	6,30E-05	3,390	11,478
Seviye 0	-0,0692	0,0960	-0,7202	1,53E-04	-0,089	-0,037
Seviye 1	-0,0923	0,1062	-0,8695	2,32E-01	-0,124	-0,042
Seviye 2	-0,0776	0,1085	-0,7152	1,28E-23	-0,0955	-0,014
Seviye 3	-0,0706	0,1007	-0,7009	2,42E-01	-0,0912	0,015
Seviye 4	-0,0908	0,1001	-0,9066	4,52E-05	-0,112	-0,038
Seviye 5	-0,0800	0,1007	-0,7940	3,92E-04	-0,118	-0,075

ANOVA analizi sonucunda istatistiksel olarak anlamlı model katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen bu katsayılar ve bağımsız değişkenlerin sayısal değerleri tekrar model denkleminde yazılarak tahmin edilen puan değerleri elde edilmiştir. Şekil 4. 9’da modelden elde edilen puanlar ile gözlemlenen puan değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 4. 9 Yanıt değişkeninin tahmin edilen ve gözlemlenen değerleri arasındaki ilişki

Şekil 4. 9'a göre, modelin veri setine ne kadar iyi uyduğunu $R^2=0,84$ katsayısından anlayabiliriz. Tablo 4. 12'de ki ANOVA analizine göre, F değeri 122,90 ile oldukça yüksek ve p değeri $6,30E-05$ ile oldukça düşüktür. Bu sonuçlar, oluşturulan modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir.

4.4 Önleyici Tedbirlerin Uygulandığı Simülasyonlar

Sioux Falls ve İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilmiş olan 14 farklı senaryo durumunun arasından en kötü iki sıralama her iki ulaşım ağı içinde SEN9 ve SEN10 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, sürdürülebilirlik endeksleri açısından önlem alınması gerekli olan kritik senaryolarda SEN4 ve SEN5 olarak belirlenmiştir. Tez çalışmaları kapsamında, önleyici tedbir uygulamalarının yukarıda açıklanan SEN4, SEN5, SEN9 ve SEN10 senaryoları için yapılmasına karar verilmiştir. Bu aşamanın gerçekleştirilmesinde alınan diğer kararlar aşağıda sıralanmıştır;

- Önleyici tedbirler arasından yalnızca ayrılmış şerit ve ToC cihazı uygulamaları gerçekleştirilecektir.
- Belirlenmiş olan dört senaryoda; ayrılmış şerit var, ayrılmış şerit yok, ayrılmış şeritte ToC var ve ayrılmamış şeritte ToC var şeklinde 4 farklı durum incelenecektir.
- Önleyici tedbir senaryoları, kalibrasyon ve doğrulama işlemlerinden sonra belirlenmiş olan kalibre edilmiş araç parametreleriyle gerçekleştirilecektir. Dolayısıyla, senaryolar yalnızca İzmir kentsel ulaşım ağında yapılacaktır.
- İzmir kentsel ulaşım ağında önceden belirlenmiş olan kesintili ve kesintisiz akımın gözlemlendiği yol kesimlerinde önleyici tedbirlerin etkileri incelenecektir.

Böylece, ToC uygulamalarının belirli trafik koşulları altında ayrıntılı bir şekilde incelenmesinde, özellikle ayrılmış şeritlerin varlığına odaklanılarak hem yerel hem de kentsel ölçekte etkilerinin değerlendirilmesi gerçekleştirilecektir. Ek olarak, çalışma farklı otonom araç penetrasyon oranlarının ToC ve ayrılmış şerit stratejilerinin uygulanabilirliği üzerindeki etkilerini de araştırmaktadır.

4.4.1 Önleyici Tedbirlerden Elde Edilen Sonuçlar

İzmir kentsel ulaşım ağı üzerinde farklı ToC ve ayrılmış şerit uygulama kombinasyonları, yoğun saat trafik koşulları altında sistematik bir şekilde uygulanmıştır. Yapılan analizler, etkilerin kapsamlı bir şekilde anlaşılabilmesi için iki farklı ve kritik bakış açısına odaklanmıştır. İlk bakış açısı, ayrılmış şerit uygulamasının mevcut şehir içi ulaşım ağına stratejik olarak entegre edildiği İzmir çevreyolu üzerindeki 199 belirli bağlantı elemanından elde edilen verilerin ayrıntılı bir incelemesini içermektedir. Veriler, ilgili trafik bilgilerinin kesin ve doğru bir şekilde toplanmasını sağlayan bir Python API'si kullanılarak elde edilmiştir. Bu 199 bağlantı elemanı, seçilmiş performans kriterleri kullanılarak yerel ölçekte değerlendirilmiştir. Bu kriterler arasında, trafik akımının verimliliği ve genel ulaşım performansının önemli göstergeleri olan yoğunluk, doluluk oranları, gecikme, seyahat süresi ve bekleme süresi gibi temel ölçütler yer almaktadır.

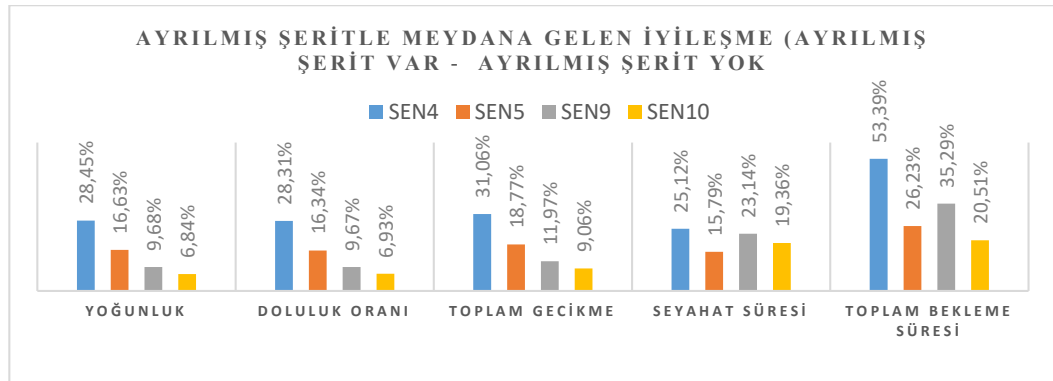
İkinci bakış açısı, çeşitli önleyici tedbirlerin kombinasyonlarını içeren simülasyonların şehir ölçeğindeki etkilerine odaklanarak analizin kapsamı genişletilmiştir. Bu simülasyonlarla ToC ve ayrılmış şerit uygulamalarının İzmir'in tüm ulaşım ağı üzerindeki kapsamlı etkilerinin değerlendirmesi amaçlanmıştır. Değerlendirmeler, özellikle sürdürülebilirlik indekslerini doğrudan etkileyen sonuçlara odaklanmıştır. Bu indeksler arasında çevresel sürdürülebilirlik ile yakından bağlantılı olan sera gazı emisyonları, halk sağlığını etkileyen hava kirleticisi emisyonlar, ulaşım sistemlerinin ekonomik sürdürülebilirliğini yansıtan enerji verimliliği, ağın operasyonel verimliliğini gösteren gecikme süreleri ve yoğun saatlerde şehir içi trafik hacimlerini yönetmede ulaşım ağının etkinliğini ölçen genel trafik performansı gibi kritik faktörler yer almaktadır.

ToC ve ayrılmış uygulamalarının yerel ve şehir geneline yayılmış etkileri incelenerek, trafik yönetimini iyileştirme, tıkanıklığı azaltma ve şehir içi ulaşım sistemlerinin sürdürülebilir gelişimine katkıda bulunma potansiyelleri kapsamlı bir şekilde değerlendirildi. İlk olarak yerel değerlendirmeden elde edilen sonuçlar Tablo 4. 13'te sunulmuştur.

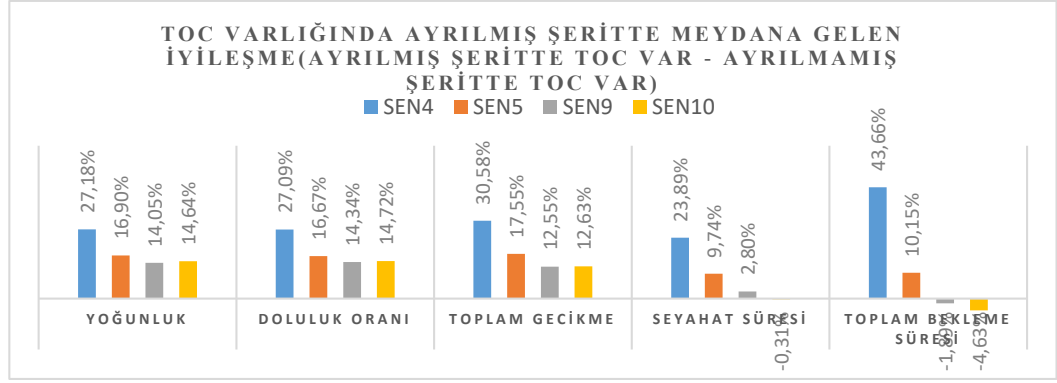
Tablo 4. 13 Çeşitli ToC ve ayrılmış şerit senaryoları altında operasyonel performans ölçütleri

Önleyici Tedbirler	Senaryolar	Yoğunluk (taş/km)	Doluluk Oranı(%)	Gecikme (s)	Seyahat Süresi (s)	Bekleme Süresi (s)
Ayrılmış şerit var	SEN4	127,66	18,84	4623133,23	192,81	1236881,95
	SEN5	154,80	22,87	5703699,70	220,91	2073022,91
	SEN9	182,08	26,80	6622707,29	172,26	1658810,16
	SEN10	190,64	28,04	6953276,47	183,38	1894565,73
Ayrılmış şerit yok	SEN4	178,42	26,28	6706347,14	257,49	2653921,25
	SEN5	185,67	27,34	7021932,12	262,34	2810034,43
	SEN9	201,60	29,67	7523229,01	224,11	2563476,29
	SEN10	204,64	30,12	7645945,49	227,42	2383434,48
Ayrılmış şeritte ToC var	SEN4	130,00	19,17	4661762,81	196,63	1513067,61
	SEN5	150,73	22,25	5653401,55	237,08	2480386,41
	SEN9	155,98	22,88	6007775,30	250,79	2411659,24
	SEN10	155,85	22,91	6026211,92	263,66	2411102,91
Ayrılmamış Şeritte ToC var	SEN4	178,53	26,30	6714944,32	258,35	2685626,78
	SEN5	181,39	26,70	6856816,62	262,65	2760517,18
	SEN9	181,48	26,71	6870306,96	258,01	2366962,45
	SEN10	182,58	26,86	6897010,72	262,85	2304300,51

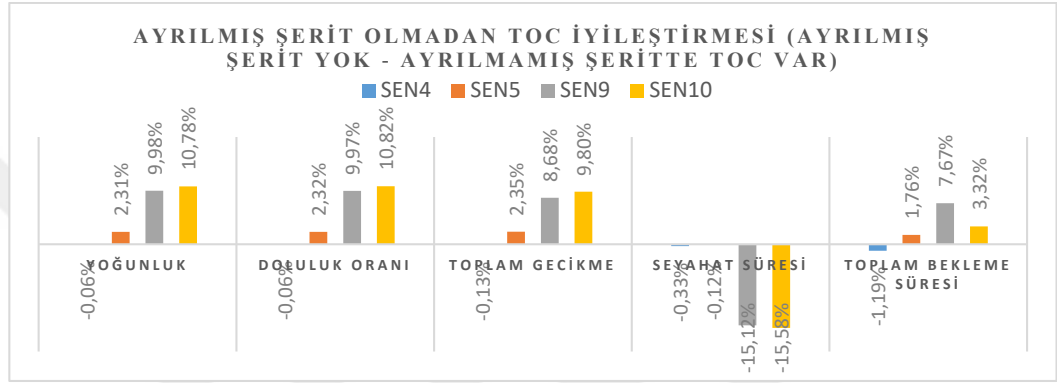
Tablo 4. 13, dört farklı koşul altında önleyici tedbirlerin uygulama sonuçlarını göstermektedir. İlk satır, ulaşım ağı içinde yalnızca ayrılmış şerit uygulamasının gerçekleştirildiği senaryonun sonuçları sunulmuştur. İkinci satır, ToC veya ayrılmış şerit gibi herhangi bir önleyici tedbirin uygulanmadığı referans senaryosunu temsil etmektedir. Üçüncü satır, ayrılmış şerit ve ToC'nin eşzamanlı olarak uygulandığı senaryoların sonuçlarını listelerken, son satır ise yalnızca ToC'nin ayrılmış şerit olmadan uygulandığı senaryoların sonuçlarını göstermektedir. Bu önleyici tedbirlerin sağladığı iyileştirmelerin detayları Şekil 4. 10'da verilmiştir.



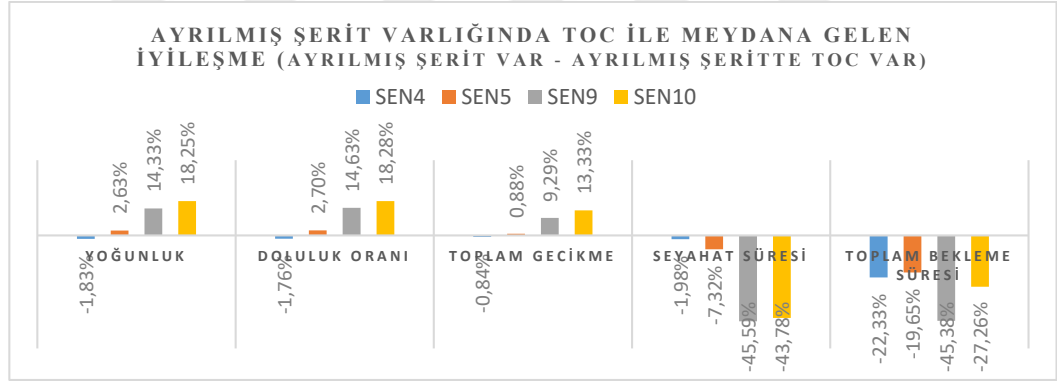
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4. 10 Çeşitli ToC ve ayrılmış şerit uygulamalarında meydana gelen iyileşme yüzdeleri

Şekil 4. 10(a), ayrılmış şerit uygulanmasıyla elde edilen iyileştirme yüzdelerini göstermektedir. Veriler, ayrılmış şeritleri içeren tüm senaryolarda, ayrılmış şerit içermeyen senaryolara kıyasla tüm karşılaştırma metriklerinde sürekli olarak daha yüksek iyileştirme oranları olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle SEN4 ve SEN5 senaryolarında, seyahat süresinde en az %15,79, bekleme süresinde ise %53,39'a kadar iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, ayrılmış şeritlerin araçların daha homojen bir dağılımına teşvik ettiğini, böylece tıkanıklıkları azalttığını ve genel trafik akımının

verimliliğini artırdığını göstermektedir. Bu bulgu, otonom araç penetrasyon oranlarının arttığı durumlarda, karma trafik koşullarını etkin bir şekilde yönetmenin, optimum trafik performansını sürdürmek için kritik hale geldiği bir zamanda özellikle önemlidir.

Şekil 4. 10(b)'de gösterildiği gibi, ayrılmış şerit uygulamasının varlığında ToC önlemi eklendiğinde, daha önce penetrasyon oranlarına göre en düşük sürdürülebilirlik sonuçlarını sergileyen SEN9 ve SEN10 senaryoları, yoğunluk, doluluk oranı ve gecikme değerlerinde Şekil 4. 10(a)'daki iyileşmelere kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir. ToC uygulaması, SEN9 ve SEN10 senaryolarında Seviye 4-5 otonom araçların insan kontrolüne geçmesine yol açmış ve karma trafik koşullarını iyileştirmiştir. Ancak, bu durum sol şeridin kısıtlı kullanımı nedeniyle seyahat süresi ve bekleme süresi üzerinde olumsuz bir etki yaratmıştır.

Şekil 4. 10(c), ayrılmış şerit uygulaması olmaksızın ToC uygulamasıyla elde edilen iyileştirmeleri göstermektedir. SEN4 ve SEN5 senaryolarında iyileştirmeler, %2,35'e kadar pozitiften negatife doğru değişiklik göstermektedir. Bu sınırlı iyileşmenin, İzmir çevre yolunu kullanan araçlar arasında ToC cihazını etkinleştirmek için gerekli olan tıkanıklık koşullarının oluşmamasından kaynaklandığı ve sonuçların referans duruma benzer olduğu düşünülmektedir. Buna karşılık, SEN9 ve SEN10 senaryolarında ToC cihazı etkinleştirilmiş ve yoğunluk, doluluk oranı ve gecikme metriklerinde yaklaşık %10'luk bir iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca, bu senaryolarda, araçların hareketsiz kaldığı süreyi temsil eden bekleme süresi, ToC uygulaması sayesinde %3,3 ile %7,7 arasında iyileşmiştir. Tablo 4. 1'te belirtildiği gibi, SEN9 ve SEN10 senaryolarında Seviye 4-5 araçların penetrasyon oranları sırasıyla %85 ve %90'dır. Bu senaryolarda seyahat sürelerinde iyileşme olmamasının, ToC cihazının otonom araçların daha yüksek hızlar ve daha kısa takip mesafeleri gibi avantajlarını ortadan kaldırmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

Şekil 4. 10(d), 'Ayrılmış şerit var' senaryoları ile 'Ayrılmış şeritte ToC var' senaryolarını karşılaştırırken gözlemlenen iyileştirmeleri sunmaktadır. SEN4 ve SEN5 senaryolarında, tıkanıklık olmaması ve dolayısıyla ToC cihazının etkinleştirilmemesi nedeniyle, yoğunluk, doluluk ve zaman kaybı metriklerinde, Şekil 4. 10(c)'de gözlemlenenlere benzer şekilde, anlamlı bir iyileşme gözlenmemiştir. Ancak, SEN9

ve SEN10 senaryolarında, ayrılmış şerit ve ToC önlemlerinin bir arada uygulanması, yoğunluk, doluluk oranı ve gecikme değerlerinde %9-18 arasında iyileşmelere yol açmış, ancak seyahat süresi ve bekleme süresi sonuçları olumsuz etkilenmiştir. Bu durum, sol şeridin kullanımına getirilen kısıtlamalar nedeniyle otonom araçların performans avantajlarının tam olarak kullanılamamasına bağlanabilir.

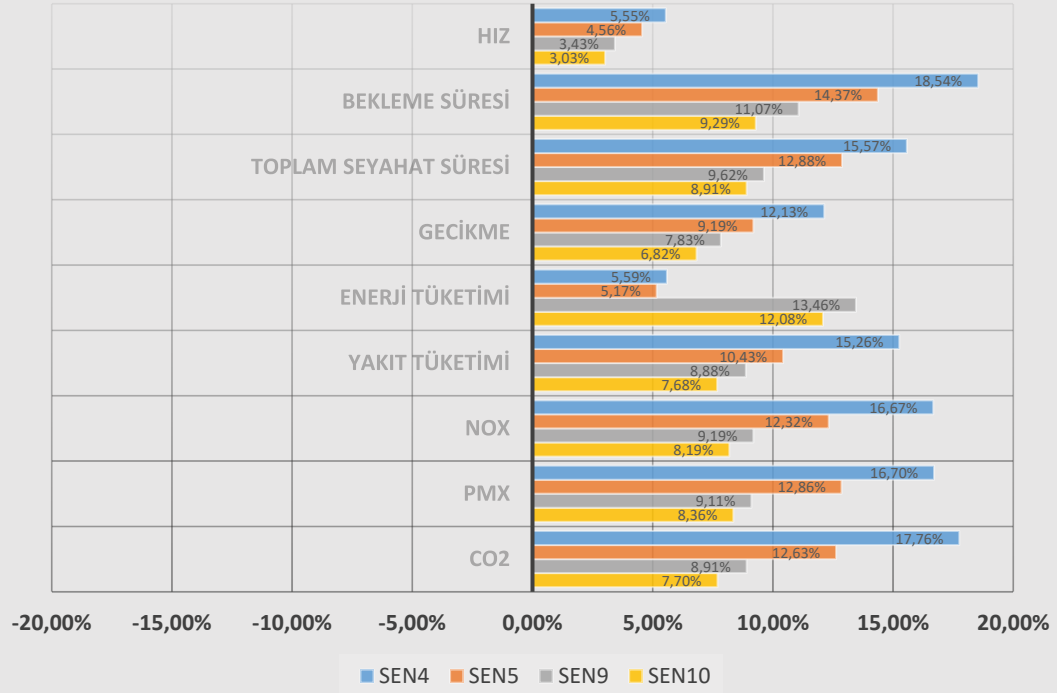
Birinci perspektifte elde edilen bulguların ardından, ikinci perspektif kapsamında önleyici tedbir kombinasyonlarının kentsel ölçekteki etkileri incelenmiştir. Bu değerlendirmelerde, özellikle farklı ToC ve DL uygulamalarının İzmir'in tüm ulaşım ağı üzerindeki geniş kapsamlı etkileri analiz edilmiştir. Kentsel ölçekteki değerlendirmelerin sonuçları Tablo 4. 14'te sunulmaktadır.

Tablo 4. 14 Çeşitli ToC ve ayrılmış şerit senaryoları altında kentsel ölçekte elde edilen performans ölçümleri

Önleyici Tedbirler	Senaryolar	CO ₂ (kg)	PM _x (kg)	NO _x (kg)	Yakıt tüketimi (l)	Enerji Tüketimi (Wh)	Gecikme (s)	Toplam Seyahat Süresi (s)	Bekleme Süresi (s)	Hız (km/h)
Ayrılmış şerit var	SEN4	2,58E+06	59,31	1125,15	7,98E+08	4,94E+08	1,56E+09	1,6E+09	5,56E+08	31,8
	SEN5	2,12E+06	49,94	940,38	6,66E+08	9,35E+08	1,92E+09	1,96E+09	7,87E+08	32,0
	SEN9	4,41E+05	10,38	195,69	1,39E+08	2,40E+09	3,5E+09	3,38E+09	1,39E+09	30,8
	SEN10	4,74E+05	11,14	208,96	1,48E+08	2,41E+09	3,55E+09	3,45E+09	1,43E+09	30,7
Ayrılmış şerit yok	SEN4	3,13E+06	71,20	1350,28	9,41E+08	5,23E+08	1,77E+09	1,89E+09	6,83E+08	33,6
	SEN5	2,43E+06	57,31	1072,51	7,43E+08	9,86E+08	2,12E+09	2,25E+09	9,2E+08	33,5
	SEN9	4,84E+05	11,42	215,49	1,52E+08	2,77E+09	3,8E+09	3,74E+09	1,56E+09	31,9
	SEN10	5,14E+05	12,15	227,60	1,60E+08	2,74E+09	3,81E+09	3,79E+09	1,58E+09	31,6
Ayrılmış şeritte ToC var	SEN4	2,56E+06	59,30	1125,71	8,18E+08	5,03E+08	1,52E+09	1,68E+09	5,69E+08	32,5
	SEN5	2,13E+06	49,96	941,13	6,78E+08	9,43E+08	1,86E+09	2,05E+09	8,14E+08	33,0
	SEN9	4,35E+05	10,23	192,47	1,39E+08	2,34E+09	3,25E+09	3,6E+09	1,37E+09	32,2
	SEN10	4,62E+05	10,90	205,06	1,47E+08	2,36E+09	3,33E+09	3,7E+09	1,38E+09	32,1
Ayrılmamış şeritte ToC var	SEN4	3,12E+06	71,31	1350,13	9,60E+08	5,32E+08	1,71E+09	1,96E+09	6,96E+08	34,4
	SEN5	2,43E+06	57,14	1070,82	7,69E+08	1,00E+09	2,1E+09	2,38E+09	9,79E+08	34,6
	SEN9	4,83E+05	11,36	214,89	1,52E+08	2,71E+09	3,6E+09	3,58E+09	1,39E+09	32,2
	SEN10	5,04E+05	11,99	225,37	1,60E+08	2,68E+09	3,6E+09	3,63E+09	1,41E+09	32,0

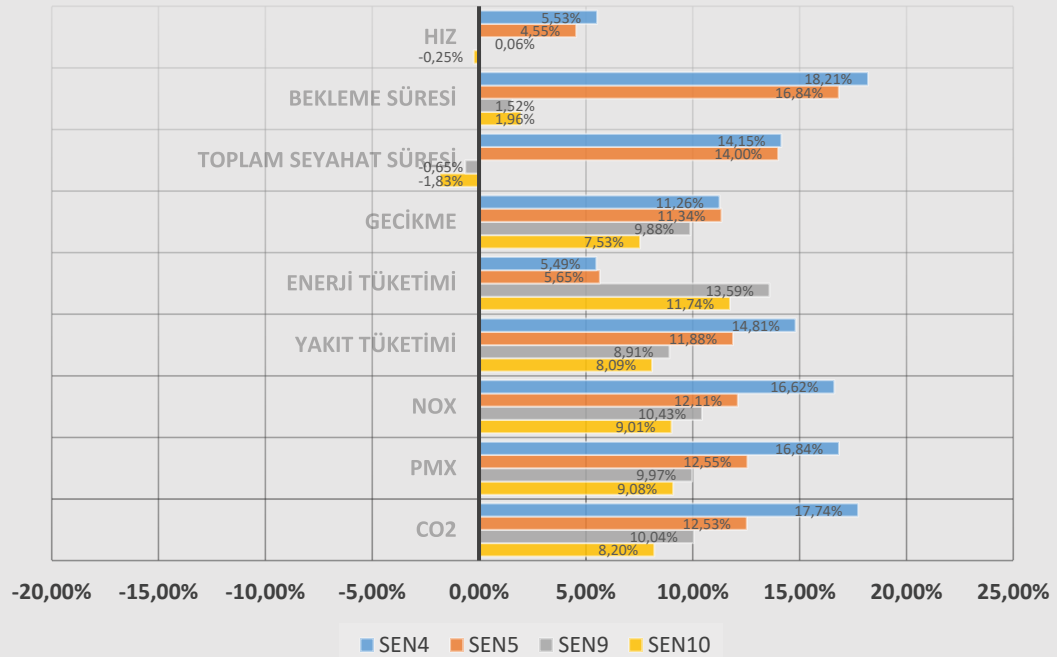
Tablo 4. 14 benzer şekilde ToC ve DL uygulamalarının farklı kombinasyonlarına göre sonuçları içermektedir. Farklı olarak, kentsel ölçekte sürdürülebilirlik endekslerini doğrudan etkileyen sonuçlar sütunlar kısmında verilmiştir. Çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik endekslerini etkileyen 9 farklı değerlendirme kriterinin meydana getirdiği iyileştirme sonuçları Şekil 4. 11'de detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

**AYRILMIŞ ŞERİTLE MEYDANA GELEN İYİLEŞME
(AYRILMIŞ ŞERİT VAR - AYRILMIŞ ŞERİT YOK)**

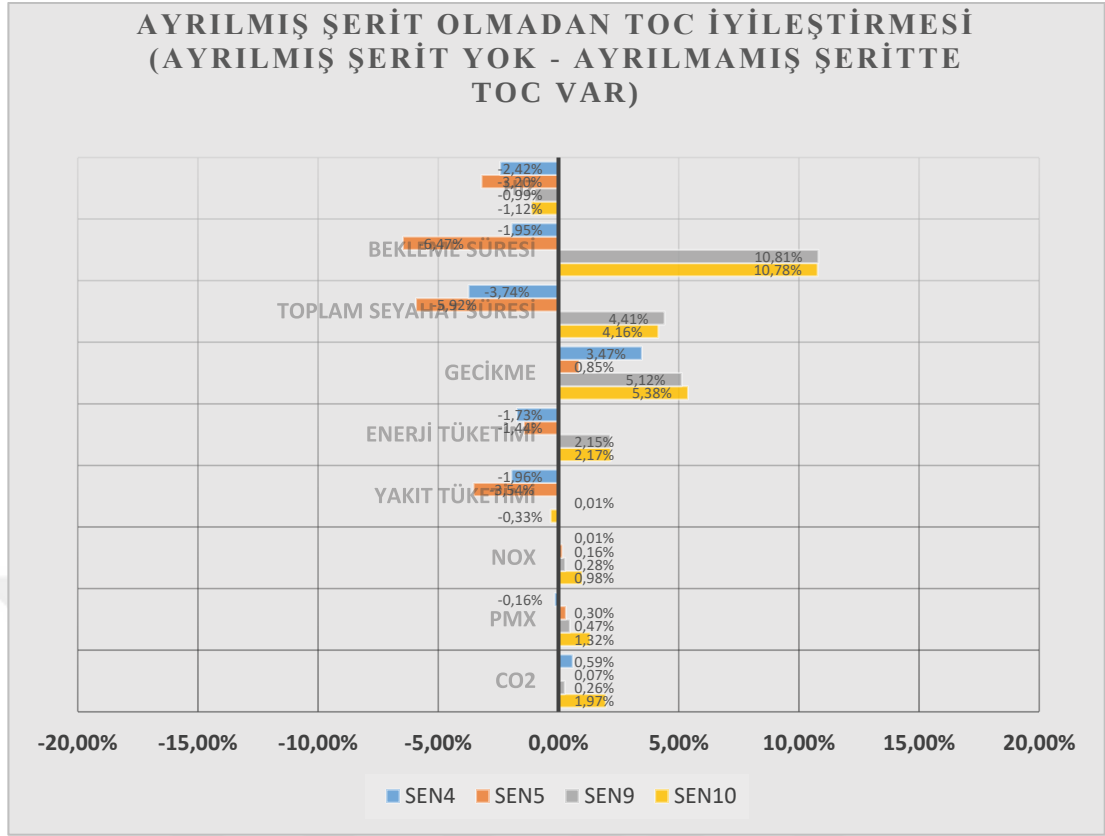


(a)

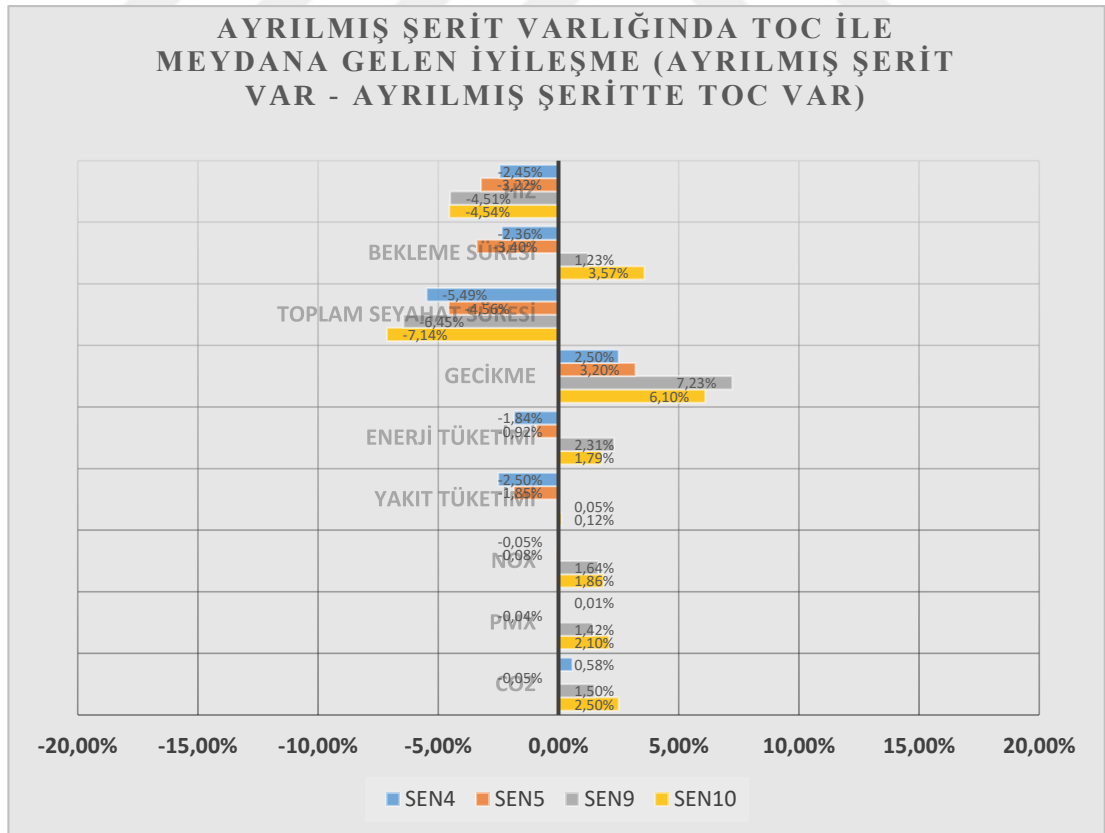
**TOC VARLIĞINDA AYRILMIŞ ŞERİTTE MEYDANA
GELEN İYİLEŞME (AYRILMIŞ ŞERİTTE TOC VAR -
AYRILMAMIŞ ŞERİTTE TOC VAR)**



(b)



(c)



(d)

Şekil 4. 11 Farklı ToC ve DL kombinasyonları için trafik davranışının kentsel ölçekte analizi

Şekil 4. 11 (a)'ya göre ayrılmış şerit uygulaması referans durumla kıyaslandığında tüm karşılaştırma ölçütlerinde kentsel anlamda önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Pik saatlerde İzmir çevre yolundan geçen yoğun trafik nedeniyle, ayrılmış şeridin lokal ölçekteki güçlü etkisi kentsel alana yayıldığında bir miktar azalsa da, trafik akımını iyileştirme ve sıkışıklığı azaltma konusundaki etkisi kentsel seviyede de devam etmektedir. İyileştirmeler sürekli olarak olumludur ve özellikle SEN4 ve SEN5 senaryolarında diğer senaryolara göre daha belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Trafikteki yoğunluğun daha düşük olmasına rağmen ayrılmış şeridin sağladığı iyileştirmeler dikkat çekicidir. Bu senaryolarda, hız ve enerji tüketimi dışında kalan tüm değişkenlerde %9-18 aralığında değişken iyileşmeler elde edilmiştir. SEN9 ve SEN10 senaryolarında yüksek otonomluk seviyelerinde otonom araçların varlığı ayrılmış şerit kullanımıyla birlikte enerji tüketimi sonuçlarında %12-13 seviyelerinde iyileşme sağlamıştır. Ek olarak diğer tüm senaryolarda, sera gazı etkisi yaratan CO₂ ve hava kirlenen emisyonlarda (NO_x, PM_x) ise %7,70 ile %17,76 arasında iyileşmeler kaydedilmiştir. Bu sonuçlar ayrılmış şeridin sadece trafik performansını artırmakla kalmayıp, çevresel sürdürülebilirliğe de önemli katkılar sunduğunu göstermektedir.

Şekil 4. 11(b), ToC'nin varlığında ayrılmış şerit uygulamasının sağladığı iyileştirmeleri göstermektedir. SEN4 ve SEN5 senaryoları için Şekil 4. 11(a)'da yapılan yorumlarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. ToC cihazının aktif hale gelmesi tıkanıklık durumuna bağlı olduğundan, bu senaryolarda gerek trafik hacminin düşük olması gerekse karma trafik koşullarının sorun yaratacak seviyede olmaması nedeniyle yalnızca ayrılmış şerit uygulamasının sağladığı iyileştirmelere benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ancak, SEN9 ve SEN10 senaryolarında ToC cihazının devreye girmesi dolayısıyla hız, bekleme süresi, toplam seyahat süresi gibi bazı sonuçlarda iyileşme değerlerinin azaldığı hatta negatif değerler aldığı görülmektedir. Bu durumun, benzer şekilde sol şeridin kısıtlı kullanımı nedeniyle olabileceği yorumu yapılabilir.

Şekil 4. 11(c), ayrılmış şerit uygulaması olmadan yalnızca ToC uygulamasının uygulanmasıyla elde edilen iyileştirmeleri göstermektedir. Bütün senaryolar arasından en belirgin iyileşme SEN9 ve SEN10'dan %10 civarlarındaki bekleme süresi değişkeninden elde edilmiştir. Onun dışında diğer tüm senaryolarda iyileştirmeler,

pozitiften negatife doğru değişmekte olup maksimum %5,38 den minimumda %6,47 aralığında değişmektedir. Bu grafikten genel anlamda ToC uygulamasının kentsel ölçekte sınırlı sayıda pozitif etkisinin olduğu yorumu yapılabilir. Ayrılmış şerit uygulamasının daha etkili iyileşmeler yarattığı Şekil 4. 11'de ki diğer grafikler üzerinden de anlaşılmaktadır.

Şekil 4. 11 (d)'de ayrılmış şerit uygulamasının olduğu durumda ToC uygulamasının eklenmesiyle meydana gelen iyileştirmeler görölmektedir. Şekil 4. 11(c)'ye benzer hatta daha olumsuz sonuçların alındığı söylenebilir. SEN9 ve SEN10 senaryolarında ToC cihazı etkinleştirilmesi ve ayrılmış şeridin varlığından dolayı Şekil 4. 11(c) de elde edilen pozitif toplam seyahat süresi sonucu-%6-7 seviyelerine kadar gerilemiştir. Bunun sebebi yüksek penetrasyon oranlarında Seviye 4-5 araçların varlığı olarak değerlendirilebilir. Daha yüksek hızlar ve daha kısa takip mesafeleri gibi otonom araçların avantajları ToC cihazının aktif olmasıyla ortadan kalkmıştır. Ayrılmış şerit uygulamasının olduğu veya olmadığı her iki durumda da ToC uygulamasının kentsel ölçekte yeterli iyileştirmeler sağlayamadığı, yalnızca lokal etkiler yarattığı genel olarak söylenebilir.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Otonom araç teknolojisinin hızla gelişmesi ve bu araçların ulaşım sistemlerine entegrasyonu, şehirlerin sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedeflerini gerçekleştirmede önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, bu teknolojinin etkin ve sorunsuz bir şekilde benimsenmesi, çeşitli zorlukları ve karmaşık planlama süreçlerini beraberinde getirmektedir. Tez çalışmasının temel hipotezi olan "*otonom araçlar, sınırları belirlenmeden mevcut sisteme entegre edildiğinde, hareketliliğin sürdürülebilir gelişimini azaltır.*" ifadesi doğrultusunda yapılan araştırma, otonom araçların sürdürülebilir kentsel hareketlilik üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu etkilerin en aza indirgenmesi için bir KDS geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Araştırma, kapsamlı bir literatür taraması ve uzmanlarla yapılan görüşmeler yoluyla kentsel mobilite için kritik sürdürülebilirlik göstergelerini belirlemiştir. Bu göstergeler, emisyon azaltımları, enerji verimliliği, trafik sıkışıklığı azaltma, seyahat süresi ve gürültü önleme gibi çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları kapsar. Bu göstergeler, farklı ulaşım sistemlerinin ve politikalarının sürdürülebilirliğini değerlendirmek için bir temel oluşturmuştur. Simülasyonlar ve modelleme yoluyla çalışma, otonom araç uygulamalarının kentsel ulaşım ağları üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Bulgular, otonom araçların mevcut ulaşım sistemleriyle entegre edildiğinde trafik akımının verimliliğini artırma, emisyonları azaltma ve genel sürdürülebilirliği iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, bu faydalar destekleyici altyapı ve politikaların uygulanmasına bağlıdır.

Araştırma sonuçları, otonom araçların mevcut ulaşım sistemine entegre edilmesi sürecinde dikkat edilmesi gereken kritik noktaları ve potansiyel sorunları ortaya koymaktadır. Öncelikle, karma trafik koşullarında, yani otonom ve geleneksel araçların birlikte kullanıldığı senaryolarda, trafik akımında belirli bir öngörülemezlik ve düzensizlik söz konusu olmaktadır. Bu durum, insan sürücülerin tepkileri ve davranışlarının öngörülemezliği ile birleştiğinde, trafik performansı ve sürdürülebilirlik açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Örneğin, otonom araçların hızlı tepki verme ve çevresel verileri algılama yetenekleri, insan sürücülerin ani ve beklenmedik hareketleri karşısında etkisiz kalmaktadır.

Bu bağlamda, otonom araçların belirli bir penetrasyon oranına ulaşmadan önce mevcut sistemle entegrasyonunun kademeli olarak yapılması, trafik güvenliğini ve akımını korumak için önemlidir. Araştırmada belirlenen kritik otomasyon seviyeleri, otonom araçların hangi koşullarda ve ne şekilde kullanılmasının sürdürülebilir hareketlilik açısından daha olumlu sonuçlar doğuracağını ortaya koymaktadır. Özellikle, belirli yolların ve karayolu ağlarının otonom araçlara öncelikli olarak tahsis edilmesi, bu araçların etkin ve güvenli bir şekilde kullanılması için gerekli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Araştırma, mevcut ulaşım altyapısının otonom araçlar için nasıl optimize edilebileceğini ve bu optimizasyonun sürdürülebilir kentsel hareketliliğe nasıl katkı sağlayacağını da ele almıştır. Mevcut altyapının otonom araçlar için uygun hale getirilmesi, özellikle trafik ağ yönetimi ve kontrol sistemlerinin güncellenmesini gerektirmektedir. Bu güncellemeler, akıllı trafik sinyalizasyon sistemleri, gerçek zamanlı trafik izleme ve yönetim sistemleri gibi teknolojilerin entegrasyonunu içermektedir. Bu tür teknolojik iyileştirmeler, trafik akımının daha homojen hale gelmesini, tıkanıklıkların önlenmesini ve genel olarak daha verimli bir trafik yönetimini mümkün kılmaktadır.

Bununla birlikte, ulaşım planlayıcılarının ve karar vericilerin otonom araçların kullanımına yönelik tutum ve stratejileri de büyük önem taşımaktadır. Otonom araçların potansiyel faydalarından tam anlamıyla yararlanabilmek için, bu araçların şehirlerin genel ulaşım planlarıyla uyumlu bir şekilde entegre edilmesi gerekmektedir. Bu entegrasyon süreci, sadece teknolojik ve altyapısal düzenlemelerle sınırlı kalmamalı, aynı zamanda sosyal ve çevresel boyutları da içermelidir.

Tez çalışmasının önemli bulgularından biri, SKHP çerçevesinde otonom araçların entegrasyonunun nasıl yönetilmesi gerektiğidir. Araştırma sonuçları, otonom araçların SKHP'ler ile uyumlu bir şekilde entegrasyonunun, bu araçların potansiyel faydalarını en üst düzeye çıkarabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, geliştirilen KDS, otonom araçların mevcut ulaşım sistemlerine entegrasyonunu kolaylaştırmak için çeşitli kriterler ve göstergeler sunmaktadır. KDS, ÇKKV teknikleri kullanarak, otonom araçların kentsel hareketlilik üzerindeki etkilerini değerlendirmekte ve karar vericilere dengeli ve kapsamlı bir rehber sunmaktadır. Bu sistem, sosyal, çevresel ve ekonomik

kriterleri göz önünde bulundurarak, otonom araçların hangi koşullar altında, hangi bölgelerde ve hangi yollar üzerinde kullanılmasının sürdürülebilir hareketliliğe en fazla katkısı sağlayacağını belirlemektedir. Ayrıca, KDS, trafik performansı ve güvenliğinin artırılması, emisyonların azaltılması ve enerji verimliliğinin sağlanması gibi hedeflere ulaşılmasına da yardımcı olmaktadır.

Otonom araçların entegrasyonu, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Araştırma, otonom araçların insan hatasından kaynaklanan trafik kazalarını azaltma potansiyeline sahip olduğunu ve bu sayede trafik güvenliğinin artırılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca, otonom araçların daha verimli enerji kullanımı ve düşük emisyon seviyeleri ile çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabileceği belirtilmektedir. Sosyal sürdürülebilirlik açısından, otonom araçlar, engelli bireyler, yaşlılar ve araç kullanma yeteneği olmayan diğer bireyler için erişilebilirliği artırabilir. Bu durum, toplumsal eşitlik ve kapsayıcılığı teşvik edebilir.

Otonom araçların trafik akımına etkisi hem teorik hem de simülasyon çalışmalarıyla desteklenmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında, otonom araçların penetrasyon oranının artmasıyla yol ve kavşak kapasitelerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu bulgu, literatürde yer alan çalışmalarda ifade edilen benzer sonuçlarla örtüşmektedir. J. M. Anderson vd. (2016) ve Fagnant ve Kockelman (2015) çalışmaları, otonom araçların trafik sıklığına duyarlılığı azaltarak kapasiteyi artırma potansiyelini vurgulamaktadır. Bu paralellik, tezin kapasite analizlerinde elde edilen bulguların literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir. Farklı penetrasyon oranlarının yolun kapasitesi üzerine etkisinin incelendiği bölümde, %40 oranının üzerindeki senaryolarda kapasite artışlarının gözle görülür seviyelerin üzerinde olduğu belirtilmişti. Elde edilen bu bulgunun Arnaout ve Arnaout (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirtilen, %40'ın üzerindeki yüksek hacimli senaryolarda elde edilen sonuçlarla paralel olarak büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Benzer şekilde, Mena-Oreja vd., (2018), Ye ve Yamamoto (2018b)'da çalışmalarında %20-30 üzerindeki penetrasyon oranlarının kritik bir eşik olması ve bu oran üzerinde yol kapasitelerinin kademeli olarak artış gösterdiğini belirtmeleri bu tez çalışmalarından elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir.

Tezde incelenen kapasite artışı, özellikle belirli penetrasyon oranlarında, trafik akışının homojenleşmesini ve şerit kapasitesinin önemli ölçüde artmasını sağlamaktadır. Bu durum, otonom araçların şehir içi ulaşım ağlarındaki etkinliğini artırarak sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedeflerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ek olarak, kapasite analizleri kısmında yorumlanan ve %40 değerinin üzerindeki kapasite artışları Tientrakool, Ho ve Maxemchuk (2011) ve Park, Byun, Kim, Ahn ve Shin (2021) tarafından yapılan çalışmalardaki bulgularla da örtüşmektedir.

Otonom araçların karma trafik koşullarında incelendiği senaryolar, günümüzden geleceğe doğru ilerlemeleri temsil edecek şekilde planlanmıştır. Hem Sioux Falls hem de İzmir kentsel ulaşım ağında penetrasyon oranlarının artmasıyla sürdürülebilirlik göstergelerinin iyileşme göstermesi paralel ilerlememiştir. Bu sonuçlar, Garrow vd.,(2020) tarafından ifade edilen; ulaşım sistemleri ile bütünleştirilmeden otonom araçların kullanımının sürdürülebilir kentsel hareketliliği olumsuz etkileyici sonucunu desteklemektedir. Uygun politikalar olmadan otonom araçların kontrolsüz genişlemesini konu alarak sürdürülebilir kentsel hareketliliğin olumsuz etkileyeceğini ifade eden Naumov vd., (2020), Lehtonen vd. (2021) ve (Soteropoulos vd., 2021) çalışmaları ile de karşılaştırıldığında tezin çıktıları ile benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu çalışmalarda da toplu taşıma sisteminin zayıflaması, seyahat taleplerinin kontrolsüz şekilde artması ve aktif ulaşım modlarının tercih edilmemesi gibi faktörlerin, sürdürülebilir ulaşımı olumsuz etkileyen temel nedenler arasında yer aldığı belirtilmiştir. Bu bağlamda, otonom araçların baskın hale geleceği bir geleceğe geçişten önce, ilk ilerlemelerin kontrolsüz bir şekilde uygulanmasının mevcut sisteme zarar vereceği yönündeki öngörüler, tezde sunulan çıkarımlarla paralellik göstermektedir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen belirtilen tercih anketinin sonuçlarına göre, toplu taşıma tercih oranının %25,8'den %8,5'e kadar düşeceği sonucu öngörülmüştür. Mevcut karayolu ağı üzerindeki yükü artırması beklenen türler arası kaymaya ait bu tahmin oranlarının literatürde yapılan diğer çalışmalarla yakın sonuçlar verdiği söylenebilir. Llorca vd., (2022) otonom araçların baskın olduğu gelecek senaryolarında toplu taşıma payının %25 seviyelerinden %6'lı seviyelere kadar

düşebileceğini öngörmüşlerdir. Bahsedilen çalışmanın gerek toplu taşımada meydana gelen kaymalar gerekse paylaşımlı otonom araçlar hakkında yapılan bulguların ve yorumların tezde elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde örtüştüğü söylenebilir.

Bu tez, otonom araçların sürdürülebilir kentsel hareketlilik üzerindeki etkilerini ve bu araçların mevcut ulaşım sistemlerine entegrasyonunu incelemiştir. Yapılan analizler ve öneriler doğrultusunda, otonom araçların kentsel ulaşımında önemli bir dönüşüm yaratma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Ancak, bu dönüşüm sürecinde dikkatli planlama, iş birliği ve sürekli izleme gerekmektedir. Otonom araçların entegrasyonu, sadece teknolojik bir yenilik olarak değil, aynı zamanda sosyal, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından geniş kapsamlı bir değişim olarak ele alınmalıdır. Bu bağlamda, tez çalışmasının sonuçları ve önerileri, otonom araçların kentsel hareketlilikteki rolünü ve bu teknolojinin sürdürülebilirlik hedeflerine nasıl katkı sağlayabileceğini anlamak için önemli bir rehber sunmaktadır.

Çalışmada ele alınan konunun uygulama alanlarını daha somut bir çerçeveye oturtmak adına, hangi kentsel ölçek, arter ve bölgelerde bu modelin uygulanabilir olduğu netleştirilmelidir. Bu bağlamda, otonom araçların etkilerinin analiz edileceği kentsel ölçeklerin büyüklüğü (örneğin, küçük kasabalar, orta ölçekli şehirler veya metropoller), kentsel arterlerin türü (ana yollar, çevre yolları, ya da mahalle yolları) ve kentsel bölgelerin özellikleri (konut alanları, ticari bölgeler, sanayi bölgeleri gibi) detaylandırılmalıdır. Tez kapsamında, Sioux Falls ve İzmir kentsel ulaşım ağları kentsel anlamda birçok farklı özellikleri olmasına rağmen (nüfus, seyahat talebi, kentsel yayılım vb.) model sonuçlarında ortaya çıkan katsayılar otonom araçların ulaşım sistemlerine entegrasyonu bakımından benzer sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Özellikle İzmir özelinde yapılan simülasyonlar, genel bir çerçeve sunmakla birlikte, belirli kentsel bölgeler ve arterler için ayrı ayrı değerlendirmeler sunarak daha güçlü sonuçlar ortaya koyabilir. Bu nedenle, önleyici tedbirler, önerilen yaklaşımlar ve karar destek mekanizmalarının uygulanacağı spesifik kentsel bağlamlar belirlenmeli, bu bağlamda altyapı gereklilikleri ve politika ihtiyaçları detaylı olarak sunulmalıdır.

Çalışma kapsamında İzmir kentsel ulaşım ağı üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar, otonom araçların sürdürülebilir kentsel hareketlilik üzerindeki etkilerine dair önemli bulgular sunmuştur. Ancak, bu sonuçların uluslararası, ulusal ve

diğer kentler düzeyinde genellenebilirliğini artırmak için bazı değerlendirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. İzmir özelinde elde edilen sonuçlar, yüksek penetrasyon oranlarında trafik akışının iyileştiğini, emisyonların azaldığını ve enerji verimliliğinin arttığını göstermektedir. Bu bulgular, benzer demografik, ekonomik ve altyapı özelliklerine sahip ulusal ve uluslararası kentler için de genellenebilir niteliktedir. Örneğin, İzmir gibi orta büyüklükteki kentlerde, yoğun ana arterlere sahip kentsel ağlarda ve karma trafik koşullarında otonom araçların etkileri benzer şekilde değerlendirilebilir. Ancak bu sonuçların başka kentlere uygulanabilirliği, kentin ulaşım altyapısı, toplu taşıma ağının genişliği ve bireysel araç kullanım oranlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Uluslararası düzeyde, özellikle Avrupa'daki metropoller ve ABD gibi bireysel araç kullanımının yoğun olduğu kentler, bu sonuçlardan faydalanabilir. Bununla birlikte, gelişmekte olan ülkelerdeki kentler veya daha küçük ölçekli yerleşim alanlarında, altyapı eksiklikleri ve trafik dinamiklerindeki farklılıklar nedeniyle uyarılama yapılması gerekebilir. Bu nedenle, her bir kentin kendi özel koşullarını dikkate alarak, İzmir sonuçlarının genellenebilirliğini test edecek ek çalışmalar önerilmektedir.

Bu çalışmada, otonom araçların kentsel ulaşım sistemlerine entegrasyonu kapsamında öne çıkan trafik performansı, çevresel etkiler ve sürdürülebilir hareketlilik hedefleri gibi unsurlara odaklanılmıştır. Bununla birlikte, çağdaş ulaşım yaklaşımları ve sürdürülebilirlik prensipleri açısından bazı eksik noktaların bu tezde sınırlı bir şekilde ele alındığı kabul edilmelidir. Güncel ulaşım yaklaşımları, bireysel araç kullanımının azaltılmasını, toplu taşıma sistemlerinin teşvik edilmesini ve mikro-mobilite gibi yenilikçi çözümlerin benimsenmesini içermektedir. Bu bağlamda, tezde otonom araçların toplu taşımayla entegrasyonu gibi konular yalnızca dolaylı olarak ele alınmış, talep yönetim stratejileri, mikro-mobilite ve akıllı şehir planlamaları gibi çağdaş yaklaşımlar ise doğrudan incelenmemiştir. Ancak, otonom araçların mevcut kentsel altyapıya etkileri ve karma trafik koşullarındaki performansları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu durum, sürdürülebilir hareketlilik hedeflerine yönelik bazı eksik noktaların değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Sürdürülebilirlik açısından, tez kapsamında emisyon azaltımı, enerji verimliliği ve trafik performansı gibi göstergeler üzerinde durulmuş, ancak toplumsal etkiler, sosyal

eşitlik ve farklı ulaşım türlerinin bütünleşik bir şekilde değerlendirilmesi gibi konular daha sınırlı bir şekilde incelenmiştir. Ancak, bu konuların daha detaylı bir şekilde ele alınması, otonom araçların kentsel ulaşım sistemlerine entegrasyonunun daha kapsamlı bir anlayışla değerlendirilmesine olanak sağlayabilir.

Gelecek çalışmalarda, çağdaş ulaşım yaklaşımlarının geniş bir perspektifle ele alınması önerilmektedir. Özellikle, otonom araçların toplu taşıma sistemleriyle entegrasyonu, mikro-mobilité çözümleri (elektrikli scooterlar, bisikletler gibi) ve akıllı şehir planlamaları gibi yenilikçi konular üzerinde detaylı analizler yapılması faydalı olacaktır. Ayrıca, bireysel araç kullanımını azaltmaya yönelik politika önerileri geliştirmek ve bu politikaların ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarını kapsamlı bir şekilde incelemek, otonom araçların sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedeflerine katkısını daha iyi anlamaya yardımcı olabilir. Sürdürülebilirlik açısından, toplumsal etkilerin, sosyal eşitlik ve adalet prensipleri çerçevesinde daha ayrıntılı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Örneğin, otonom araçların düşük gelirli gruplara erişilebilirliği, bu teknolojilerin toplumsal adalet üzerindeki etkileri ve farklı demografik gruplar arasındaki fırsat eşitliği bağlamında ele alınması önemlidir. Ayrıca, enerji tüketimi ve emisyon azaltımına odaklanan çalışmaların, yenilenebilir enerji kaynaklarının ulaşım sektörüne entegrasyonu ile birlikte incelenmesi, daha geniş bir sürdürülebilirlik perspektifi sağlayabilir.

Araştırmanın sonuçları, farklı şehirler ve kentsel bağlamlar için genelleştirilebilir nitelikte olup, otonom araçların entegrasyonunun küresel düzeyde farklı şehirlerde nasıl uygulanabileceğine dair önemli ipuçları sunmaktadır. Bu bağlamda, şehirlerin yerel koşulları ve ihtiyaçları dikkate alınarak, otonom araçların sürdürülebilir kentsel mobilitéye katkı sağlaması için uyarlanabilir stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir. Gelecekte, teknolojik ilerlemeler ve toplumsal değişimlerle birlikte, otonom araçların sürdürülebilir kentsel mobilitéye katkıları daha da belirgin hale gelecektir. Bu süreçte, sürekli araştırma, yenilikçi çözümler ve uyarlanabilir politikalar, şehirlerin daha verimli, adil ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerine ulaşmalarını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, otonom araç uygulamalarının kentsel ulaşım sistemlerine entegrasyonu, sürdürülebilir kentsel mobilitéyi artırma konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Bu araştırma, kritik sürdürülebilirlik göstergelerini vurgulamış,

simölasyonlar yoluyla otonom araçların etkisini değerlendirmiş ve politika yapıcılar ve uygulayıcılar için değerli içęörüler sağlamıştır. Belirlenen zorlukların ele alınması ve otonom araçların potansiyel faydalarının kullanılmasıyla, şehirler daha verimli, adil ve sürdürülebilir kentsel mobilite sistemlerine doğru ilerleyebilir. Bu vizyonun gerçekleştirilmesinde ve kentsel mobilitenin geleceğinin yenilikçi ve sürdürülebilir olmasını sağlamada sürekli araştırma, paydaş iş birliği ve uyarlanabilir politika çerçeveleri hayati önem taşıyacaktır.



KAYNAKLAR

- Abdulaal, M. ve Leblanc, L. J. (1979). Methods for Combining Modal Split and Equilibrium Assignment Models. *Transportation Science*, 13(4), 292-314. doi:10.1287/TRSC.13.4.292
- Abraham, Z. (2015). *Identifying the Optimal Highway Driving Conditions for the Integration of Manned and Autonomous Vehicles*. Massachusetts Institute of Technology.
- Acheampong, R. A., Cugurullo, F., Gueriau, M. ve Dusparic, I. (2021). Can autonomous vehicles enable sustainable mobility in future cities? Insights and policy challenges from user preferences over different urban transport options. *Cities*, 112. doi:10.1016/j.cities.2021.103134
- Akyüz, G. ve Aka, S. (2017). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleriyle Tedarikçi Performansı Değerlendirmede Toplamsal Bir Yaklaşım. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 15(2), 28-46.
- Alazzawi, S., Hummel, M., Kordt, P., Sickenberger, T., Wieseotte, C. ve Wohak, O. (2018). Simulating the Impact of Shared, Autonomous Vehicles on Urban Mobility- A Case Study of Milan. *EPiC Series in Engineering*, 2, 94-110.
- Alekszejenkó, L. ve Dobrowiecki, T. (2019). SUMO Based Platform for Cooperative Intelligent Automotive Agents. *SUMO User Conference 2019* içinde (C. 62). EPiC Series in Computing.
- Al-Turki, M., Ratrou, N. T., Rahman, S. M. ve Reza, I. (2021, 1 Ekim). Impacts of autonomous vehicles on traffic flow characteristics under mixed traffic environment: Future perspectives. *Sustainability*. MDPI. doi:10.3390/su131911052
- Amindoust, A., Ahmed, S., Saghaforia, A. ve Bahreininejad, A. (2012). Sustainable supplier selection: A ranking model based on fuzzy inference system. *Applied Soft Computing Journal*, 12(6), 1668-1677. doi:10.1016/j.asoc.2012.01.023
- Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K., Sorensen, P., Samaras, C. ve Oluwatola, O. (2016). *Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers*.
- Anderson, James M, Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C. ve Oluwatola, O. A. (2014). *Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers*. [https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=y0WrAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Anderson,+J.+M.,+Nidhi,+K.,+Stanley,+K.+D.,+Sorensen,+P.,+Samaras,+C.,+%26+Oluwatola,+O.+A.+\(2014\).+Autonomous+vehicle+technology:+A+guide+for+policymakers.+Rand+Corporation.&ots=9Eeg1GzVJ&sig=glJhDILi7ZmsrSNEi7ZcizQWKM](https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=y0WrAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Anderson,+J.+M.,+Nidhi,+K.,+Stanley,+K.+D.,+Sorensen,+P.,+Samaras,+C.,+%26+Oluwatola,+O.+A.+(2014).+Autonomous+vehicle+technology:+A+guide+for+policymakers.+Rand+Corporation.&ots=9Eeg1GzVJ&sig=glJhDILi7ZmsrSNEi7ZcizQWKM) adresinden erişildi.
- Arbib, J. ve Seba, T. (2017). *Rethinking Transportation 2020-2030 -The Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal-Combustion Vehicle and Oil Industries*. www.rethinkx.com. adresinden erişildi.

- Arisoy, A. A. (2017). *Real Time Traffic Management Using Connected Vehicles: A Case Study on D100 Highway*. (Yayımlanmamış master's thesis). Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, İstanbul.
- Arkatkar, S., Velmurugan, S., Puvvala, R., Ponnu, B. ve Narula, S. (2016). Methodology for simulating heterogeneous traffic on expressways in developing countries: A case study in India. *Transportation Letters*, 8(2), 61-76. doi:10.1179/1942787515Y.0000000008
- Arnaout, G. M. ve Arnaout, J. P. (2014). Exploring the effects of cooperative adaptive cruise control on highway traffic flow using microscopic traffic simulation. *Transportation Planning and Technology*, 37(2), 186-199. doi:10.1080/03081060.2013.870791
- Auld, J., Hope, M., Ley, H., Sokolov, V., Xu, B. ve Zhang, K. (2016). POLARIS: Agent-based modeling framework development and implementation for integrated travel demand and network and operations simulations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, 101-116. doi:10.1016/j.trc.2015.07.017
- Auld, J., Sokolov, V. ve Stephens, T. S. (2017). Analysis of the effects of connected-automated vehicle technologies on travel demand. *Transportation Research Record*, 2625, 1-8. doi:10.3141/2625-01
- Avogadro, N., Birolini, S., Redondi, R. ve Deforza, P. (2024). Assessing airport ground access interventions: An integrated approach combining mode choice modeling and microscopic traffic simulation. *Transport Policy*, 148, 154-167. doi:10.1016/j.tranpol.2024.01.013
- Awal, T., Mushfiq, M. M. ve Islam, A. B. M. A. Al. (2022). Fault Tolerance Analysis of Car-Following Models for Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 20036-20045. doi:10.1109/TITS.2022.3201051
- Azam, M., Puan, O. C., Hassan, S. A. ve Mashros, N. (2019). Calibration of microsimulation model for tight urban diamond interchange under heterogeneous traffic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* içinde (C. 527). Institute of Physics Publishing. doi:10.1088/1757-899X/527/1/012077
- Badi, I. A., Abdulshahed, A. M. ve Shetwan, A. G. (2018). A case study of supplier selection for asteelmaking company in libya by using the combinative distance-based assessment (codas) model. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1(1), 1-12. doi:10.31181/dmame180101b
- Badi, I. ve Pamucar, D. (2020). Supplier selection for steelmaking company by using combined grey-marcos methods. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 3(2), 37-47. doi:10.31181/dmame2003037b
- Bandeira, J. M., Macedo, E., Fernandes, P., Rodrigues, M., Andrade, M. ve Coelho, M. C. (2021). Potential pollutant emission effects of connected and automated vehicles in a mixed traffic flow context for different road types. *IEEE Open Journal*

- of *Intelligent Transportation Systems*, 2, 364-383. doi:10.1109/OJITS.2021.3112904
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73-80. doi:10.1016/j.tranpol.2007.10.005
- Bansal, M., Krizhevsky, A. ve Ogale, A. (2018). Learning to Drive by Imitating the Best and Synthesizing the Worst. <http://arxiv.org/abs/1812.03079> adresinden erişildi.
- Barkenbus, J. N. (2020). Prospects for electric vehicles. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14), 1-13. doi:10.3390/su12145813
- Beckmann, M. J., McGuire, C. B. ve Winsten, C. B. (1956). *Studies in Economics of Transportation*.
- Bell, M. G. H. ve Iida, Y. (1997). *Transportation Network Analysis* (John Wiley & Son Ltd.).
- Berglund, B., Lindvall, T. ve Schwela, D. H. (1999). *Guidelines for Community Noise*. Geneva.
- Berrazouane, M., Tong, K., Solmaz, S., Kiers, M. ve Erhart, J. (2019a). Analysis and initial observations on varying penetration rates of automated vehicles in mixed traffic flow utilizing SUMO. *2019 8th IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2019 - Proceedings*. doi:10.1109/ICCVE45908.2019.8965065
- Berrazouane, M., Tong, K., Solmaz, S., Kiers, M. ve Erhart, J. (2019b). Analysis and initial observations on varying penetration rates of automated vehicles in mixed traffic flow utilizing SUMO. *2019 8th IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2019 - Proceedings*. doi:10.1109/ICCVE45908.2019.8965065
- Bilal, M. T. ve Giglio, D. (2023). Evaluation of macroscopic fundamental diagram characteristics for a quantified penetration rate of autonomous vehicles. *European Transport Research Review*, 15(1). doi:10.1186/s12544-023-00579-0
- Buzachis, A., Celesti, A., Galletta, A., Fazio, M., Fortino, G. ve Villari, M. (2020). A multi-agent autonomous intersection management (MA-AIM) system for smart cities leveraging edge-of-things and Blockchain. *Information Sciences*, 522, 148-163. doi:10.1016/j.ins.2020.02.059
- California Hava Kaynakları Kurulu. (2007). *California GREET Model*. Sacramento.
- Campisi, T., Severino, A., Al-rashid, M. A. ve Pau, G. (2021, 1 Temmuz). The development of the smart cities in the connected and autonomous vehicles (Cavs) era: From mobility patterns to scaling in cities. *Infrastructures*. MDPI AG. doi:10.3390/infrastructures6070100
- Canitez, F. (2020). Transferring sustainable urban mobility policies: An institutional perspective. *Transport Policy*, 90, 1-12. doi:10.1016/j.tranpol.2020.02.005

- Chalermwongphan, K. ve Upala, P. (2019). The Analysis of Dynamic O/D Adjustment for Bicycle Traffic Demand Estimation with AIMSUN Simulation Model: A Case Study of Nakhon Sawan Municipality in Thailand. *The Open Transportation Journal*, 12(1), 352-365. doi:10.2174/1874447801812010352
- Chatziioannou, I., Nikitas, A., Tzouras, P. G., Bakogiannis, E., Alvarez-Icaza, L., Chias-Becerril, L., ... Rexfelt, O. (2023). Ranking sustainable urban mobility indicators and their matching transport policies to support liveable city Futures: A MICMAC approach. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 18. doi:10.1016/j.trip.2023.100788
- Chiarini, B., D'Agostino, A., Marzano, E. ve Regoli, A. (2020). The perception of air pollution and noise in urban environments: A subjective indicator across European countries. *Journal of Environmental Management*, 263. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110272
- Chow, A. H. F. (2009). Properties of system optimal traffic assignment with departure time choice and its solution method. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(3), 325-344. doi:10.1016/j.trb.2008.07.006
- Ciuffo, B., Punzo, V. ve Montanino, M. (2014). Global sensitivity analysis techniques to simplify the calibration of traffic simulation models. Methodology and application to the IDM car-following model. *IET Intelligent Transport Systems*, 8(5), 479-489. doi:10.1049/iet-its.2013.0064
- Cleuet, M. ve Jehanno, A. (2023). *Developing Sustainable Urban Mobility Plans-Guidelines for MobiliseYourCity geographies*. https://www.mobiliseyourcity.net/sites/default/files/2023-03/SUMP%20Guidelines_final%20%281%29.pdf adresinden erişildi.
- Cohen, S. A. ve Hopkins, D. (2019). Autonomous vehicles and the future of urban tourism. *Annals of Tourism Research*, 74, 33-42. doi:10.1016/J.ANNALS.2018.10.009
- Conlon, J. ve Lin, J. (2019). Greenhouse Gas Emission Impact of Autonomous Vehicle Introduction in an Urban Network. *Transportation Research Record*, 2673(5), 142-152. doi:10.1177/0361198119839970
- Cömert, H. G. (2018). *Akdeniz Ülkelerinin Turizm Performansının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta.
- Crosato, L., Tian, K., Shum, H. P. H., Ho, E. S. L., Wang, Y. ve Wei, C. (2024, 1 Mart). Social Interaction-Aware Dynamical Models and Decision-Making for Autonomous Vehicles. *Advanced Intelligent Systems*. John Wiley and Sons Inc. doi:10.1002/aisy.202300575
- Çakır, S. ve Perçin, S. (2013). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleriyle Lojistik Firmalarında Performans Ölçümü. *Ege Akademik Bakış*, 13(4), 449-459.

- Çakir, E. (2017). Kriter Ağırlıklarının SWARA – Copeland Yöntemi ile Belirlenmesi: Bir Üretim İşletmesinde Uygulama. *Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 42-56.
- Çetinkaya, V. (2020). *Çoklu Taşımacılık Koridorlarının Sürdürülebilir Ulaştırma Açısından İncelenmesi*.
- Dahooei, J. H., Zavadskas, E. K., Vanaki, A. S., Firoozfar, H. R. ve Ghorabae, M. K. (2018). An Evaluation Model of Business Intelligence for Enterprise Systems with New Extension of CODAD (CODAS-IVIF), 21(3), 171-187.
- Davidich, N., Galkin, A., Davidich, Y., Schlosser, T., Capayova, S., Nowakowska-Grunt, J., ... Thompson, R. (2022). Intelligent Decision Support System for Modeling Transport and Passenger Flows in Human-Centric Urban Transport Systems. *Energies*, 15(7). doi:10.3390/en15072495
- De Souza, F., Verbas, O. ve Auld, J. (2019). Mesoscopic traffic flow model for agent-based simulation. *Procedia Computer Science* içinde (C. 151, ss. 858-863). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.procs.2019.04.118
- Den Boer, L. C. ve Schroten, A. (2007). *Traffic noise reduction in Europe: Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise*. CE Delft. https://inquinamentoacustico.it/_download/traffic_noise_reduction-CE-Delft.pdf adresinden erişildi.
- Department for Transport. (2020). *TAG UNIT M3.1 Highway Assignment Modelling*. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427124/webtag-tag-unit-m3-1-highway-assignment-modelling.pdf. Accessed November 3, 2015 adresinden erişildi.
- Derbel, O., Mourllion, B. ve Basset, M. (2012). Extended safety descriptor measurements for relative safety assessment in mixed road traffic. *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* içinde . Alaska, USA: IEEE.
- Deveci, M., Canitez, F. ve Gökaşar, I. (2018). WASPAS and TOPSIS based interval type-2 fuzzy MCDM method for a selection of a car sharing station. *Sustainable Cities and Society*, 41, 777-791. doi:10.1016/J.SCS.2018.05.034
- Dial, R. B. (1971). A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research*, 5(2), 83-111. doi:10.1016/0041-1647(71)90012-8
- Diez, J. M., Lopez-Lambas, M. E., Gonzalo, H., Rojo, M. ve Garcia-Martinez, A. (2018). Methodology for assessing the cost effectiveness of Sustainable Urban Mobility Plans (SUMP). The case of the city of Burgos. *Journal of Transport Geography*, 68, 22-30. doi:10.1016/j.jtrangeo.2018.02.006
- Dixit, V. V., Chand, S. ve Nair, D. J. (2016). Autonomous vehicles: Disengagements, accidents and reaction times. *PLoS ONE*, 11(12). doi:10.1371/journal.pone.0168054

- Dlugosch, O., Brandt, T. ve Neumann, D. (2022). Combining analytics and simulation methods to assess the impact of shared, autonomous electric vehicles on sustainable urban mobility. *Information and Management*, 59(5). doi:10.1016/j.im.2020.103285
- Doğan, E. (2022). Trafik Mikro-Simülasyon Model Kalibrasyonu için Özellik Seçim Algoritmalarının Karşılaştırılması. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 14(2), 752-761. doi:10.29137/umagd.1096157
- Duc Trung, D. (2022). Multi-criteria decision making under the MARCOS method and the weighting methods: Applied to milling, grinding and turning processes. *Manufacturing Review*, 9. doi:10.1051/mfreview/2022003
- Ecer, F. (2020). *Çok Kriterli Karar Verme*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Enoch, M. P. (2015). How a rapid modal convergence into a universal automated taxi service could be the future for local passenger transport. *Technology Analysis and Strategic Management*, 27(8), 910-924. doi:10.1080/09537325.2015.1024646
- Erdmann, J. (2015). SUMO's Lane-Changing Model (ss. 105-123). Berlin, Germany: Springer International Publishing.
- European Commission. (2022, 13 Ağustos). Sustainable Urban Mobility Indicators (SUMI). 13 Ağustos 2022 tarihinde https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban_mobility/sumi_en adresinden erişildi.
- Fagnant, D. J. ve Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 167-181. doi:10.1016/j.tra.2015.04.003
- Fagnant, D. J., Kockelman, K. M. ve Bansal, P. (2015). Operations of shared autonomous vehicle fleet for Austin, Texas, market. *Transportation Research Record*, 2536, 98-106. doi:10.3141/2536-12
- Faiz, A. (1993). Automotive emissions in developing countries-relative implications for global warming, acidification and urban air quality. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 27(3), 167-186. doi:10.1016/0965-8564(93)90057-R
- Favarò, F., Eurich, S. ve Nader, N. (2018). Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations. *Accident Analysis and Prevention*, 110, 136-148. doi:10.1016/j.aap.2017.11.001
- Fei, G. (2023). Literature review of research progress on car following model. *Journal of Physics: Conference Series* içinde (C. 2649). Institute of Physics. doi:10.1088/1742-6596/2649/1/012008
- Finger, M. ve Serafimova, T. (2020). *Towards a Common European Framework for Sustainable Urban Mobility Indicators*.
- Flötteröd, Y. P. ve Erdmann, J. (2018). Dynamic Reroute Modeling for Emergency Evacuation: Case Study of the Brunswick City. *ICTSMSO* içinde .

- Foroozesh, F., Monavari, S. M., Salmanmahiny, A., Robati, M. ve Rahimi, R. (2022). Assessment of sustainable urban development based on a hybrid decision-making approach: Group fuzzy BWM, AHP, and TOPSIS–GIS. *Sustainable Cities and Society*, 76. doi:10.1016/j.scs.2021.103402
- Friedrich, M., Pestel, E., Schiller, C. ve Simon, R. (2019). Scalable GEH: A Quality Measure for Comparing Observed and Modeled Single Values in a Travel Demand Model Validation. *Transportation Research Record*, 2673(4), 722-732. doi:10.1177/0361198119838849
- Gao, V. P., Kaas, H.-W., Mohr, D. ve Wee, D. (2016). *Automotive revolution-perspective towards 2030-How the convergence of disruptive technology-driven trends could transform the auto industry*, McKinsey and Company. <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/disruptive%20trends%20that%20will%20transform%20the%20auto%20industry/auto%202030%20report%20jan%202016.pdf> adresinden erişildi.
- Garrow, L. A., Roy, S. ve Newman, J. P. (2020). *Competition Among Traditional Modes, a Fully Autonomous Auto, and a Piloted Air Taxi for Commuting Trips in the U.S. Georgia*.
- Gawron, C. (1998). *Simulation-Based Traffic Assignment Computing User Equilibria in Large Street Networks*. (Yayımlanmamış doctoral dissertation). Universität zu Köln, Germany.
- Ge, Q. ve Menendez, M. (2014). An Efficient Sensitivity Analysis Approach for Computationally Expensive Microscopic Traffic Simulation Models. *International Journal of Transportation*, 2(2), 49-64. doi:10.14257/ijt.2014.2.2.04
- Gemma, A. , Cipriani, E., Crisalli, U. ve Mannini, L. (2022). Automated Vehicles' Effects on Urban Traffic Flow Parameters. In *Conference on Sustainable Urban Mobility* içinde (ss. 593-605). Springer Nature Switzerland.
- Ghorbani, M. A., Shamshirband, S., Zare Haghi, D., Azani, A., Bonakdari, H. ve Ebtehaj, I. (2017). Application of firefly algorithm-based support vector machines for prediction of field capacity and permanent wilting point. *Soil and Tillage Research*, 172, 32-38. doi:10.1016/j.still.2017.04.009
- Gökaşar, İlgin, Simic, V., Deveci, M. ve Senapati, T. (2023). Alternative prioritization of freeway incident management using autonomous vehicles in mixed traffic using a type-2 neutrosophic number based decision support system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123. doi:10.1016/j.engappai.2023.106183
- Gökaşar, İlgin ve Arisoy, A. A. (2018). Evaluation of the Effects of Autonomous Public Transportation Vehicles on Traffic Conditions. *13th International Congress on Advances in Civil Engineering* içinde (ss. 12-14). <https://www.researchgate.net/publication/330712408> adresinden erişildi.

- Greenblatt, J. B. ve Shaheen, S. (2015, 1 Eylül). Automated Vehicles, On-Demand Mobility, and Environmental Impacts. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. Springer Nature. doi:10.1007/s40518-015-0038-5
- Grumert, E., Ma, X. ve Tapani, A. (2015). Analysis of a cooperative variable speed limit system using microscopic traffic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, 173-186. doi:10.1016/j.trc.2014.11.004
- Gucwa, M. (2014). *Mobility and energy impacts of automated cars*. (Yayımlanmamış phd thesis). Stanford University, Stanford, CA.
- Gurumurthy, K. M. ve Kockelman, K. M. (2020). Modeling Americans' autonomous vehicle preferences: A focus on dynamic ride-sharing, privacy & long-distance mode choices. *Technological Forecasting and Social Change*, 150. doi:10.1016/j.techfore.2019.119792
- Han, G., Chen, X., Yu, Y. ve Li, Y. (2012). A Study of Microscopic Traffic Simulation□ Based on the SUMO Platform. *Computer Engineering & Science*, 34(7).
- Harb, M., Stathopoulos, A., Shiftan, Y. ve Walker, J. L. (2021). What do we (Not) know about our future with automated vehicles? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 123. doi:10.1016/j.trc.2020.102948
- Harper, C., Mangones, S., Hendrickson, C. T. ve Samaras, C. (2015). Bounding the potential increases in vehicles miles traveled for the non-driving and elderly populations and people with travel-restrictive medical conditions in an automated vehicle environment. *In Transp. Res. Board 94th Annu. Meet.* içinde .
- Harrison, R. M. (2012). *Handbook of Air Pollution Analysis*. Springer Science & Business Media.
- He, Y. (2022). *Calibration of Car Following Model with Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization methods*.
- Henao, A. ve Marshall, W. E. (2019). The impact of ride-hailing on vehicle miles traveled. *Transportation*, 46(6), 2173-2194. doi:10.1007/s11116-018-9923-2
- Hills, P. (1996). What is induced traffic? . *Transportation*, 23(1).
- Hipogrosso, S. (2022). *Towards sustainable mobility New solutions and approaches for Sustainable Urban Mobility Plans*.
- Hollander, Y. ve Liu, R. (2008). The principles of calibrating traffic microsimulation models. *Transportation*, 35(3), 347-362. doi:10.1007/s11116-007-9156-2
- Höb, Ing. A. ve Lepke, H. (2011). *The future of driving - Highly Automated Driving for Intelligent Transport (HAVEit)*.
- Hungness, D. ve Bridgelall, R. (2020). Model Contrast of Autonomous Vehicle Impacts on Traffic. *Journal of Advanced Transportation*, 2020. doi:10.1155/2020/8935692

- Hymel, K. M., Small, K. A. ve Dender, K. Van. (2010). Induced demand and rebound effects in road transport. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(10), 1220-1241. doi:10.1016/j.trb.2010.02.007
- İBB. (2017). *UPİ 2030 İzmir Ulaşım Ana Planı*. <https://melesyarisma.izmir.bel.tr/CKYuklenen/2-6.pdf> adresinden erişildi.
- İlbank. (2022). Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Çerçevesinde Mevcut Durumun Değerlendirilmesi. 26 Şubat 2024 tarihinde <https://www.ilbank.gov.tr/userfiles/files/S%C3%BCrd%C3%BCr%C3%BClebilir%20Kalk%C4%B1nma%20Ama%C3%A7lar%C4%B1%20%C3%87er%C3%A7evesinde%20Mevcut%20Durumun%20De%C4%9Ferlendirilmesi%20Raporu.pdf> adresinden erişildi.
- Imai, T. (2019, 1 Aralık). Legal regulation of autonomous driving technology: Current conditions and issues in Japan. *IATSS Research*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.iatssr.2019.11.009
- Jang, K., Chung, K., Ragland, D. R. ve Chan, C. Y. (2009). Safety performance of high-occupancy-vehicle facilities. *Transportation Research Record*, (2099), 132-140. doi:10.3141/2099-15
- Jayasinghe, T., Sivakumar, T. ve Kumarge, A. S. (2021). Calibration of SUMO Microscopic Simulator for Sri Lankan Traffic Conditions. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 13. <https://www.researchgate.net/publication/357162895> adresinden erişildi.
- Johnson, B. (2015). *Disruptive mobility*. Barclays.
- Kahn Ribeiro, S., Kobayashi, S., Beuthe, M., Gasca, J., Greene, D. L., Muromachi, Y., ... Zhou, P. J. (2007). Transport and its infrastructure. In: Metz, B., O.R.D., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.) *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kaltenhäuser, B., Hamzehi, S. ve Bogenberger, K. (2023). The Impact of Autonomous Vehicles and Their Driving Parameters on Urban Road Traffic. *Proceedings of the 12th International Scientific Conference on Mobility and Transport: Mobility Innovations for Growing Megacities* içinde (ss. 3-19). Springer Nature Singapore.
- Kamala, K. R., Rajesh, V., Singh, S. ve Sharmila, P. (2021). Simulation Modeling of Impact of Multi-class Heavy Vehicles on Traffic Flow Characteristics of Multi-lane Highways Under Mixed Traffic Conditions Using VISSIM Software. *International Conference on Civil Engineering Trends and Challenges for Sustainability* içinde (ss. 351-370). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Kamishetty, S., Vadlamannati, S. ve Paruchuri, P. (2020). Towards a better management of urban traffic pollution using a Pareto max flow approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 79. doi:10.1016/j.trd.2019.11.023

- Kapustin, N. O. ve Grushevenko, D. A. (2020). Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid. *Energy Policy*, 137. doi:10.1016/j.enpol.2019.111103
- Karki, A., Phuyal, S., Tuladhar, D., Basnet, S. ve Shrestha, B. P. (2020, 1 Eylül). Status of pure electric vehicle power train technology and future prospects. *Applied System Innovation*. MDPI AG. doi:10.3390/asi3030035
- Kavas-Torris, O., Cantas, M. R., Cime, K. M., Aksun-Guvenc, B. ve Guvenc, L. (2023). *The Effects of Varying Penetration Rates of L4-L5 Autonomous Vehicles on Fuel Efficiency and Mobility of Traffic Networks*. doi:https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.01177
- Kavas-Torris, O., Lackey, N. ve Guvenc, L. (2021). Simulating the Effect of Autonomous Vehicles on Roadway Mobility in a Microscopic Traffic Simulator. *International Journal of Automotive Technology*, 22(3), 713-733. doi:10.1007/S12239-021-0066-7/METRICS
- Keller, M., Hausberger, S., Matzer, C., Wüthrich, P. ve Notter, B. (2010). *Handbook of emission factors for road transport (HBEFA)*. Zurich, Switzerland.
- Keshavarz, G. M., Zavadskas, K. E., Turskis, Z. ve Antucheviciene, J. (2016). A New Combinative Distance-Based Assessment (CODAS) Method for Multi-Criteria Decision-Making. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 50(3), 25-44.
- Kesting, A., Treiber, M. ve Helbing, D. (2010). Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1928), 4585-4605. doi:10.1098/rsta.2010.0084
- Khan, N. (2020). *CRITICAL REVIEW OF SAMPLING TECHNIQUES IN THE RESEARCH PROCESS IN THE WORLD*. <https://ssrn.com/abstract=3572336> adresinden erişildi.
- Kitsios, F. ve Kamariotou, M. (2017). Decision Support Systems and Strategic Information Systems Planning for Strategy Implementation. *Springer Proceedings in Business and Economics*, 327-332. doi:10.1007/978-3-319-56288-9_43/FIGURES/1
- Koch, L., Buse, D. S., Wegener, M., Schoenberg, S., Badalian, K., Dressler, F. ve Andert, J. (2021). Accurate physics-based modeling of electric vehicle energy consumption in the SUMO traffic microsimulator. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC* içinde (C. 2021-September, ss. 1650-1657). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/ITSC48978.2021.9564463
- Kolidakis, S., Botzoris, G., Profillidis, V. ve Kokkalis, A. (2020). Real-time intraday traffic volume forecasting - A hybrid application using singular spectrum analysis and artificial neural networks. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 48(3), 226-235. doi:10.3311/PPTR.14122

- Krajzewicz, D. ve Behrisch, M. (2011). SUMO-Simulation of Urban MObility-User Documentation.
- Krauß, S. (1998). *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*.
- Krauss, S., Wagner, P. ve Gawron, C. (1997). *Metastable states in a microscopic model of traffic flow*.
- Krueger, R., Rashidi, T. H. ve Rose, J. M. (2016). Preferences for shared autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69, 343-355. doi:10.1016/j.trc.2016.06.015
- Kusakci, S., Yilmaz, M. K., Kusakci, A. O., Sowe, S. ve Nantembelele, F. A. (2022). Towards sustainable cities: A sustainability assessment study for metropolitan cities in Turkey via a hybridized IT2F-AHP and COPRAS approach. *Sustainable Cities and Society*, 78. doi:10.1016/j.scs.2021.103655
- Kveiborg, O., Nielsen, O. A., Mabit, S., Burgess, A. ve Korwer et al. (2007). *MOTOS Handbook containing guidelines for constructing national and regional transport models.: Handbook of transport modelling (in Europe): learning from best practice*.
- Kwon, J. ve Varaiya, P. (2008). Effectiveness of California's High Occupancy Vehicle (HOV) system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(1), 98-115. doi:10.1016/j.trc.2007.06.008
- Lackey, N. A. (2019). *Simulating Autonomous Vehicles in a Microscopic Traffic Simulator to Investigate the Effects of Autonomous Vehicles on Roadway Mobility*. The Ohio State University.
- Le Hong, Z. ve Zimmerman, N. (2021). Air quality and greenhouse gas implications of autonomous vehicles in Vancouver, Canada. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90. doi:10.1016/j.trd.2020.102676
- LeBlanc, L. J., Morlok, E. K. ve Pierskalla, W. P. (1975). An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. *Transportation Research*, 9(5), 309-318. doi:10.1016/0041-1647(75)90030-1
- Lehtonen, E., Malin, F., Innamaa, S., Nordhoff, S., Louw, T., Bjorvatn, A. ve Merat, N. (2021). Are multimodal travellers going to abandon sustainable travel for L3 automated vehicles? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10. doi:10.1016/j.trip.2021.100380
- Lemmer, Ing. K. (2017). SUMO: Towards Simulation for Autonomous Mobility. *Conference: SUMO 2017* içinde . Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Institut für Verkehrssystemtechnik.
- Li, M. F., Tang, X. P., Wu, W. ve Liu, H. Bin. (2013). General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China.

- Energy Conversion and Management*, 70, 139-148. doi:10.1016/j.enconman.2013.03.004
- Litman, T. (2011). *Measuring transportation: Traffic, mobility and accessibility*. <https://www.researchgate.net/publication/37183597> adresinden erişildi.
- Litman, T. (2023). *Autonomous vehicle implementation predictions-Implications for Transport Planning*. <https://www.bilbloggen.dk/wp-content/uploads/2023/04/Autonomous-Vehicle-Implementation-Predictions.pdf> adresinden erişildi.
- Litman, T. (2024). *Well Measured - Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning*. *Transportation Research Record*. USA: National Research Council. doi:10.3141/2017-02
- Litman, T. ve Burwell, D. (2006). Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(4), 331-347. doi:10.1504/IJGENVI.2006.010889
- Liu, F., Zhao, F., Liu, Z. ve Hao, H. (2019). Can autonomous vehicle reduce greenhouse gas emissions? A country-level evaluation. *Energy Policy*, 132, 462-473. doi:10.1016/j.enpol.2019.06.013
- Liu, Q., Liu, J., Cai, Y. ve Chen, L. (2022). Exploring the Impact of the Takeover Time for Conditionally Automated Driving Vehicles on Traffic Flow in Highway Merging Area. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(12), 24753-24764. doi:10.1109/TITS.2022.3202834
- Liu, Y., Eckert, C. M. ve Earl, C. (2020, 15 Aralık). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.eswa.2020.113738
- Llorca, C., Moreno, A., Ammar, G. ve Moeckel, R. (2022). Impact of autonomous vehicles on household relocation: An agent-based simulation. *Cities*, 126. doi:10.1016/j.cities.2022.103692
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flotterod, Y. P., Hilbrich, R., ... Wiebner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018-November*, 2575-2582. doi:10.1109/ITSC.2018.8569938
- Lu, Q., Tettamanti, T. ve Varga, I. (2018). Impacts of autonomous vehicles on the urban fundamental diagram. *5th International Conference on Road and Rail Infrastructure içinde* . Zadar, Croatia.
- Lutin, J. M., Kornhauser, A. L. ve MASCE, E. L. L. (2013). The revolutionary development of self-driving vehicles and implications for the transportation engineering profession. *Institute of Transportation Engineers. ITE Journal*, 83(7). https://search.proquest.com/openview/a805bcd7922a5dfbbef1f53561606eaf/1?pq-origsite=gscholar&cbl=42116&casa_token=PMNqS_Iei7UAAAAA:JZuQVliVyg

I5MNAvTA74xJvp8iy872zMDvNuqtZ1LCVH9oZSS7IP6NJZzPYAULpEF2Br-Vm2Pgw adresinden erişildi.

- Lücken, L., Mintsis, E., Porfyri, K. N., Alms, R., Flötteröd, Y. P. ve Koutras, D. (2019). From Automated to Manual - Modeling Control Transitions with SUMO. *EPiC Series in Computing*, 62, 124-144. doi:10.29007/SFGK
- Makarova, I., Buyvol, P., Gabsalikhova, L., Pashkevich, A., Tsybunov, E. ve Boyko, A. (2020). Improving the Reliability of Autonomous Vehicles in a Branded Service System Using Big Data. *2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics, REM 2020* içinde . Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/REM49740.2020.9313084
- Makridis, M., Mattas, K., Mogno, C., Ciuffo, B. ve Fontaras, G. (2020). The impact of automation and connectivity on traffic flow and CO2 emissions. A detailed microsimulation study. *Atmospheric Environment*, 226. doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117399
- Malokin, A., Circella, G. ve Mokhtarian, P. L. (2019). How do activities conducted while commuting influence mode choice? Using revealed preference models to inform public transportation advantage and autonomous vehicle scenarios. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 124, 82-114. doi:10.1016/j.tra.2018.12.015
- Maltese, I., Gatta, V. ve Marcucci, E. (2021). Active Travel in Sustainable Urban Mobility Plans. An Italian overview. *Research in Transportation Business and Management*, 40. doi:10.1016/j.rtbm.2021.100621
- Martinez, L. ve Crist, P. (2015). Urban Mobility System Upgrade How shared self-driving cars could change city traffic. *International transport forum* içinde . Paris. www.internationaltransportforum.org adresinden erişildi.
- Martínez-Díaz, M., Soriguera, F. ve Pérez, I. (2019, 1 Nisan). Autonomous driving: A bird's eye view. *IET Intelligent Transport Systems*. Institution of Engineering and Technology. doi:10.1049/iet-its.2018.5061
- Matli, W. (2020). The changing work landscape as a result of the Covid-19 pandemic: insights from remote workers life situations in South Africa. *International Journal of Sociology and Social Policy*, 40(9-10), 1237-1256. doi:10.1108/IJSSP-08-2020-0386
- Mattas, K., Makridis, M., Hallac, P., Raposo, M. A., Thiel, C., Toledo, T. ve Ciuffo, B. (2018). Simulating deployment of connectivity and automation on the Antwerp ring road. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(9), 1036-1044. doi:10.1049/iet-its.2018.5287
- Mayer, T., Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. ve Bieker, L. (2009). SUMO User Documentation," [Online]. https://sumo.dlr.de/doxygen/de/d42/_m_s_c_f_model__krauss_p_s_8cpp.html adresinden erişildi.

- Mena-Oreja, J., Gozalvez, J. ve Sepulcre, M. (2018). Effect of the Configuration of Platooning Maneuvers on the Traffic Flow under Mixed Traffic Scenarios. *IEEE Vehicular Networking Conference, VNC* içinde (C. 2018-December). IEEE Computer Society. doi:10.1109/VNC.2018.8628381
- Meyer, J., Becker, H., Bösch, P. M. ve Axhausen, K. W. (2017). Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? *Research in Transportation Economics*, 62, 80-91. doi:10.1016/j.retrec.2017.03.005
- Milakis, D., Snelder, M., Van Arem, B., Van Wee, B. ve De Almeida Correia, G. H. (2017). Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: Scenarios for 2030 and 2050. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 17(1), 63-85. doi:10.18757/ejtir.2017.17.1.3180
- Milakis, D., Snelder, M., Van Arem, B., Van Wee, B., Homem, G. ve Correia, A. (2015). *Development of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050*.
- Milakis, D., Snelder, M., Van Arem, B., Van Wee, B., Homem, G. ve Correia, A. (2017). Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050. *EJTIR Issue*, 17(1), 63-85.
- Miskolczi, M., Földes, D., Munkácsy, A. ve Jászberényi, M. (2021, 1 Eylül). Urban mobility scenarios until the 2030s. *Sustainable Cities and Society*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.scs.2021.103029
- Mo, T., Li, Y., Lau, K. T., Poon, C. K., Wu, Y. ve Luo, Y. (2022, 1 Eylül). Trends and Emerging Technologies for the Development of Electric Vehicles. *Energies*. MDPI. doi:10.3390/en15176271
- Moore, M. A., Lavieri, P. S., Dias, F. F. ve Bhat, C. R. (2020). On investigating the potential effects of private autonomous vehicle use on home/work relocations and commute times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 110, 166-185. doi:10.1016/J.TRC.2019.11.013
- Morelli, M., Casagrande, M. ve Forte, G. (2022). Decision Making: a Theoretical Review. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, 56(3), 609-629. doi:10.1007/s12124-021-09669-x
- Mouratidis, K. (2022). Bike-sharing, car-sharing, e-scooters, and Uber: Who are the shared mobility users and where do they live? *Sustainable Cities and Society*, 86. doi:10.1016/j.scs.2022.104161
- Mulisa, F. (2022). Sampling techniques involving human subjects: Applications, pitfalls, and suggestions for further studies. *International Journal of Academic Research in Education*, 8(1), 74-83. doi:10.17985/ijare.1225214
- Münzel, T., Molitor, M., Kuntic, M., Hahad, O., Rösli, M., Engelmann, N., ... Sørensen, M. (2024). Transportation Noise Pollution and Cardiovascular Health. *Circulation Research*, 134(9), 1113-1135. doi:10.1161/CIRCRESAHA.123.323584

- Nasution, S. M., Husni, E., Kuspriyanto, K. ve Yusuf, R. (2022). Personalized Route Recommendation Using F-AHP-Express. *Sustainability (Switzerland)*, 14(17). doi:10.3390/su141710831
- National Highway Traffic Safety Administration. (2008). *National Motor Vehicle Crash Causation Survey: Report to Congress. National Highway Traffic Safety Administration Technical Report DOT HS, 811, 059.*
- Naumov, S., Keith, D. R. ve Fine, C. H. (2020). Unintended Consequences of Automated Vehicles and Pooling for Urban Transportation Systems. *Production and Operations Management*, 29(5), 1354-1371. doi:10.1111/poms.13166
- Nota, R., Barelds, R. ve Van Maercke, D. (2005). *Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning.*
- Noulis, A. (2020). *Reinforcement Learning in Traffic Control for Connected Automated Vehicles.* Universite Di Trento, Berlin .
- Okraszewska, R., Romanowska, A., Wołek, M., Oskarbski, J., Birr, K. ve Jamroz, K. (2018). Integration of a multilevel transport system model into sustainable Urban mobility planning. *Sustainability*, 10(2). doi:10.3390/su10020479
- On-Road Automated Driving (ORAD) Committee, (2021). (2021). Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. . *SAE International*.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (1996). *OECD Proceedings TOWARDS SUSTAINABLE TRANSPORTATION The Vancouver Conference CONFERENCE HIGHLIGHTS AND OVERVIEW OF ISSUES.*
- Ortuzar, J. D. ve Willumsen, L. G. (1994). *Modelling Transport (2nd Edition)* (John Wiley and Sons.). Chichester.
- Özdağoğlu, A., Keleş, M. K., Altınata, A. ve Ulutaş, A. (2021). Combining different MCDM methods with the Copeland method: An investigation on motorcycle selection. *Journal of process management and new technologies*, 9(3-4), 13-27. doi:10.5937/jpmnt9-34120
- Papaioannou, P., Politis, I. ve Nikolaidou, A. (2016). Steps towards Sustaining a SUMP Network in Greece. *Transportation Research Procedia* içinde (C. 14, ss. 945-954). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.074
- Park, J. E., Byun, W., Kim, Y., Ahn, H. ve Shin, D. K. (2021). The Impact of Automated Vehicles on Traffic Flow and Road Capacity on Urban Road Networks. *Journal of Advanced Transportation*, 2021. doi:10.1155/2021/8404951
- Pettersson, N. (2020). *Modelling and Simulation of Heterogeneous Traffic - An investigation of autonomous vehicles impact on heterogeneous traffic in terms of traffic flow and safety.* (Yayımlanmamış master's thesis). Department of Mechanics and Maritime Sciences, Gothenburg, Sweden.

- Pielecha, J., Skobieć, K. ve Kurtyka, K. (2020). Exhaust emissions and energy consumption analysis of conventional, hybrid, and electric vehicles in real driving cycles. *Energies*, 13(23). doi:10.3390/en13236423
- Piu, M., Herty, M. ve Puppo, G. (2022). Derivation and stability analysis of macroscopic multi-lane models for vehicular traffic flow. *Journal on Applied Mathematics*, 83(5). doi:10.1137/22M154328
- Polis, I. C. (2019). *UVAR and SUMPs Regulating vehicle access to cities as part of integrated mobility policies*. https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/document/download/e785523a-b62f-4f36-8c33-4ba0528236ef_en?filename=uvar_and_sumps.pdf&prefLang=fr adresinden erişildi.
- Pourgholamali, M., Miralinaghi, M., Ha, P. (Young J., E. Seilabi, S. ve Labi, S. (2023). Sustainable deployment of autonomous vehicles dedicated lanes in urban traffic networks. *Sustainable Cities and Society*, 99. doi:10.1016/j.scs.2023.104969
- Price, A., Langford, M. ve Higgs, G. (2023). Quantifying disparities in access to recreational opportunities by alternative modes of transport. *Case Studies on Transport Policy*, 11. doi:10.1016/j.cstp.2023.100949
- Rafael, S., Correia, L. P., Lopes, D., Bandeira, J., Coelho, M. C., Andrade, M., ... Miranda, A. I. (2020). Autonomous vehicles opportunities for cities air quality. *Science of the Total Environment*, 712. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136546
- Rahim, M. (2022). Extension of CODAS Method Under Cubic Pythagorean fuzzy set for Multi-Criteria Decision Making Problems. doi:10.21203/rs.3.rs-2200476/v1
- Railsback, S. F. ve Volker Grimm. (2019). *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*.
- Raumfahrt, D. D. Z. für L. (2017). Calibration/san pablo dam.
- Rezaei, A. ve Caulfield, B. (2021). Simulating a transition to autonomous mobility. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 106. doi:10.1016/j.simpat.2020.102175
- Riandari, F., Albert, M. Z. ve Rogoff, S. S. (2023). MCDM methods to address sustainability challenges, such as climate change, resource management, and social justice. *Idea: Future Research*, 1(1). www.idea.ristek.or.id adresinden erişildi.
- Rupprecht Consult. (2020). SUMI Project. 25 Mart 2024 tarihinde <https://www.rupprecht-consult.eu/project/sumi#documents> adresinden erişildi.
- Rupprecht Consult, Forschung & Beratung GmbH (Germany) and ve European Commission. (2020). *Harmonisation Guideline Final (web) version*.
- Rupprecht Consult, Forschung & Beratung GmbH (Germany) ve European Commission. (2020). *Technical support related to sustainable urban mobility indicators (SUMI) - Harmonisation Guideline*.

- Rydzewski, A. ve Czarnul, P. (2021). Human awareness versus autonomous vehicles view: Comparison of reaction times during emergencies. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings* içinde (C. 2021-July, ss. 732-739). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/IV48863.2021.9575602
- Saeed, U., Ahmad, S. R., Mohey-ud-din, G., Butt, H. J. ve Ashraf, U. (2022). An Integrated Approach for Developing an Urban Livability Composite Index—A Cities’ Ranking Road Map to Achieve Urban Sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 14(14). doi:10.3390/su14148755
- Saha, N. ve Motuba, D. (2023). Estimating the Impacts of AV and CAV and Technologies Transportation Systems for Medium, Long, and Buildout Transportation Planning Horizons. *Future Transportation*, 3(2), 457-478. doi:10.3390/futuretransp3020027
- Salles, D., Kaufmann, S. ve Reuss, H.-C. (2020). Extending the Intelligent Driver Model in SUMO and Verifying the Drive Off Trajectories with Aerial Measurements. *SUMO Conference Proceedings*, 1, 1-25. doi:10.52825/scp.v1i.95
- Salomons, E., Polinder, H., Lohman, W. J. A., Zhou, H., Borst, H. ve Miedema, H. M. E. (2009). Engineering modeling of traffic noise in shielded areas in cities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(5), 2340-2349. <https://pubs.aip.org/asa/jasa/article/126/5/2340/901036> adresinden erişildi.
- Samiuddin, J., Boulet, B. ve Wu, D. (2024). An Online Spatial-Temporal Graph Trajectory Planner for Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1-11. doi:10.1109/TIV.2024.3389640
- Sarvi, M. ve Kuwahara, M. (2009). Improving the efficiency of freight traffic at congested freeway merging sections. *Transportation Letters*, 1(4), 309-322. doi:10.3328/TL.2009.01.04.309-322
- Schaniel, J. (2022). *Towards a Digital Twin of Seychelles’ Road Transport System*.
- Schrank, D., Lomax, T., Fellow, R., Bak, J. ve Analyst, R. (2015). *URBAN MOBILITY SCORECARD*. <https://mobility.tamu.edu/umr/> adresinden erişildi.
- Schwarting, W., Alonso-Mora, J. ve Rus, D. (2018). Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles. *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.* 2018, 1, 187-210. doi:10.1146/annurev-control-060117
- Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks* (C. 6). Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Sheng, Q., Liu, Y., Zhan, Y., Wan, Q. ve Fan, L. (2023). Urban transportation network allocation considering heterogeneous users in the context of carbon trading (s. 128). *SPIE-Intl Soc Optical Eng.* doi:10.1117/12.2668745
- Shladover, S. E., Su, D. ve Lu, X. Y. (2012). Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow. *Transportation Research Record*, 2324, 63-70. doi:10.3141/2324-08

- Silva, Ó., Cordera, R., González-González, E. ve Nogués, S. (2022, 15 Temmuz). Environmental impacts of autonomous vehicles: A review of the scientific literature. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.154615
- Singleton, P. A. (2019). Discussing the “positive utilities” of autonomous vehicles: will travellers really use their time productively? *Transport Reviews*, 39(1), 50-65. doi:10.1080/01441647.2018.1470584
- Skippon, S. M. (2014). How consumer drivers construe vehicle performance: Implications for electric vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 23, 15-31. doi:10.1016/j.trf.2013.12.008
- SKUP Türkiye. (2023). *Sustainable Urban Mobility Plan-Preparing and Analysis (Phase 1)*. <https://www.skupturkiye.org.tr/en/webinars/#egitim3> adresinden erişildi.
- Smeds, E. ve Jones, P. (2021). Developing transition pathways for mobility in European cities—challenges and new approaches. *Barcelona Centre for International Affairs (CIDOB)* içinde . CIDOB.
- Song, J., Wu, Y., Xu, Z. ve Lin, X. (2015). Research on car-following model based on SUMO. *Proceedings of 2014 IEEE 7th International Conference on Advanced Infocomm Technology, IEEE/ICAIT 2014*, 47-55. doi:10.1109/ICAIT.2014.7019528
- Soteropoulos, A., Berger, M. ve Mitteregger, M. (2021). Compatibility of automated vehicles in street spaces: Considerations for a sustainable implementation. *Sustainability (Switzerland)*, 13(5), 1-32. doi:10.3390/su13052732
- Sprenger, R. ve Mönch, L. (2014). A decision support system for cooperative transportation planning: Design, implementation, and performance assessment. *Expert Systems with Applications*, 41(11), 5125-5138. doi:10.1016/J.ESWA.2014.02.032
- Stabler, B. (2024). Transportation Networks / Sioux Falls. *Github*. 22 Temmuz 2024 tarihinde <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks/tree/master/SiouxFalls> adresinden erişildi.
- Staricco, L., Rappazzo, V., Scudellari, J. ve Vitale Brovarone, E. (2019). Toward policies to manage the impacts of autonomous vehicles on the city: A visioning exercise. *Sustainability*, 11(19). doi:10.3390/su11195222
- Stević, Ž. ve Brković, N. (2020). A Novel Integrated FUCOM-MARCOS Model for Evaluation of Human Resources in a Transport Company. *Logistics*, 4(1). doi:10.3390/logistics4010004
- Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A. ve Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMpromise solution (MARCOS).

Computers & Industrial Engineering, 140, 106231.
doi:10.1016/J.CIE.2019.106231

Stogios, C., Kasraian, D., Roorda, M. J. ve Hatzopoulou, M. (2019). Simulating impacts of automated driving behavior and traffic conditions on vehicle emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76, 176-192. doi:10.1016/j.trd.2019.09.020

Sum4All. (2022). Sustainable Mobility For All. 21 Şubat 2024 tarihinde <https://www.sum4all.org/gra-tool/country-performance/snapshot> adresinden erişildi.

SUMO. (2024a). Extended Intelligent Driver Model. 23 Nisan 2024 tarihinde <https://sumo.dlr.de/docs/Car-Following-Models/EIDM.html> adresinden erişildi.

SUMO. (2024b). SUMO User Documentation. 23 Nisan 2024 tarihinde <https://sumo.dlr.de/docs/index.html> adresinden erişildi.

SUMO. (2024c). SublaneModel. 23 Nisan 2024 tarihinde <https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/SublaneModel.html> adresinden erişildi.

SUMO. (2024d). Simulation of Urban Mobility - Definition of Vehicles, Vehicle Types.

SUMO. (2024e). SUMO San Pablo Dam. 24 Temmuz 2024 tarihinde https://sumo.dlr.de/docs/Tutorials/Calibration/San_Pablo_Dam.html adresinden erişildi.

SUMO. (2024f). Automatic Routing. 2 Mayıs 2024 tarihinde https://sumo.dlr.de/docs/Demand/Automatic_Routing.html adresinden erişildi.

Sun, F., Dubey, A. ve White, J. (2017). *DxNAT — Deep neural networks for explaining non-recurring traffic congestion*.

Talebpour, A. ve Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 143-163. doi:10.1016/j.trc.2016.07.007

Theil, Henri. (1966). Applied economic forecasting, 474. https://books.google.com/books/about/Applied_Economic_Forecasting.html?hl=tr&id=HjtjAAAAIAAJ adresinden erişildi.

Tibljša, A. D., Giuffrè, T., Surdonja, S. ve Trubia, S. (2018). Introduction of Autonomous Vehicles: Roundabouts design and safety performance evaluation. *Sustainability*, 10(4). doi:10.3390/su10041060

Tientrakool, P., Ho, Y.-C. ve Maxemchuk, N. F. (2011). Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance. *IEEE Vehicular Technology Conference* içinde . IEEE.

- Toledo, T., Koutsopoulos, H. N. ve Toledo, T. (2004). Statistical Validation of Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research*, 1876, 142-150.
- Topal, E. (2022). *Sezgisel algoritma tabanlı trafik ışıkları optimizasyonu ve benzetimi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik.
- Topcu, I., Ülengin, F., Kabak, Ö., Isik, M., Unver, B. ve Onsel Ekici, S. (2019). The evaluation of electricity generation resources: The case of Turkey. *Energy*, 167, 417-427. doi:10.1016/j.energy.2018.10.126
- Tran, D. Q. ve Bae, S. H. (2020). Proximal policy optimization through a deep reinforcement learning framework formultiple autonomous vehicles at a non-signalized intersection. *Applied Sciences*, 10(16). doi:10.3390/app10165722
- Trauth, R., Moller, K. ve Betz, J. (2023). Toward Safer Autonomous Vehicles: Occlusion-Aware Trajectory Planning to Minimize Risky Behavior. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 4, 929-942. doi:10.1109/OJITS.2023.3336464
- Treiber, M., Hennecke, A. ve Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62(2). <http://www.m.treiber.de/>. adresinden erişildi.
- Treiber, M. ve Kesting, A. (2017). The Intelligent Driver Model with Stochasticity - New Insights into Traffic Flow Oscillations. *Transportation Research Procedia* içinde (C. 23, ss. 174-187). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.trpro.2017.05.011
- Turskis, Z., Zavadskas, E. K., Antucheviciene, J., Kosareva, N., Turskis, Z., Zavadskas, K., ... Kosareva, N. (2015). A Hybrid Model Based on Fuzzy AHP and Fuzzy WASPAS for Construction Site Selection. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS COMMUNICATIONS & CONTROL* , 10(6), 873-888.
- Türkiye Belediyeler Birliği. (2019). Sürdürülebilir Kent İçi Hareketlilik Planları. 14 Ağustos 2021 tarihinde <https://www.tbb.gov.tr/basin-ve-yayin/haberler/20191121-surdurulebilir-kent-ici-hareketlilik-planlari> adresinden erişildi.
- Union, P. U.-O. J. of the E. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *news.cleartheair.org.hkP UNION Official Journal of the European Union, 2008•news.cleartheair.org.hk*. <http://news.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2013/02/LexUriServ.pdf> adresinden erişildi.
- Van Arem, B., Van Driel, C. J. G. ve Visser, R. (2006). The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4), 429-436. doi:10.1109/TITS.2006.884615
- Van Brummelen, J., O'Brien, M., Gruyer, D. ve Najjaran, H. (2018). Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89, 384-406. doi:10.1016/j.trc.2018.02.012

- van Wee. (2011). *Urban Transport and Sustainability Sustainable Urban Environments*.
- Vanderwerf, J., Shladover, S. E., Miller, M. A. ve Kourjanskaia, N. (2002). Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity. *Transportation Research Record*, 1800(1).
- Varghese, B. ve Karande, P. (2022). AHP-MARCOS, a hybrid model for selecting gears and cutting fluids. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1397-1405. doi:10.1016/J.MATPR.2021.11.142
- Velazquez, L., Munguia, N. E., Will, M., Zavala, A. G., Verdugo, S. P., Delakowitz, B. ve Giannetti, B. (2015). Sustainable transportation strategies for decoupling road vehicle transport and carbon dioxide emissions. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 26(3), 373-388. doi:10.1108/MEQ-07-2014-0120
- Wang, A., Stogios, C., Gai, Y., Vaughan, J., Ozonder, G., Lee, S. J., ... Hatzopoulou, M. (2018). Automated, electric, or both? Investigating the effects of transportation and technology scenarios on metropolitan greenhouse gas emissions. *Sustainable Cities and Society*, 40, 524-533. doi:10.1016/j.scs.2018.05.004
- Wang, F., Lu, Y., Dai, H. ve Han, H. (2021). Evaluation of Freeway Traffic Management and Control Measures Based on SUMO. *Journal of Physics: Conference Series*, 1910(1), 012044. doi:10.1088/1742-6596/1910/1/012044
- Wang, L., Nian, V., Li, H. ve Yuan, J. (2021). Impacts of electric vehicle deployment on the electricity sector in a highly urbanised environment. *Journal of Cleaner Production*, 295. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126386
- Wang, P., Zhang, R., Sun, S., Gao, M., Zheng, B., Zhang, D., ... Zhang, H. (2023). Aggravated air pollution and health burden due to traffic congestion in urban China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(5), 2983-2996. doi:10.5194/acp-23-2983-2023
- Wang, Yifei ve Yin, K. (2021). Study of overtaking method of intelligent vehicle under vehicle road coordination. *Journal of Physics: Conference Series* içinde (C. 1983). IOP Publishing Ltd. doi:10.1088/1742-6596/1983/1/012095
- Wang, Ying, Xu, L. ve Solangi, Y. A. (2020). Strategic renewable energy resources selection for Pakistan: Based on SWOT-Fuzzy AHP approach. *Sustainable Cities and Society*, 52. doi:10.1016/j.scs.2019.101861
- Wardrop, J. (1952). Some theoretical aspect of road traffic research. *Proceedings Institute Civil Engineers Part II*, 325-378.
- Watts, G. (2005). *Harmonoise prediction model for road traffic noise*.
- Wefering, F., Rupprecht, S., Bührmann, S., Böhler-Baedeker, S., Rupprecht Consult ve Forschung und Beratung GmbH. (2014). *Guidelines. Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan*.

- http://capacitybuildingunhabitat.org/wp-content/uploads/workshops/2019-sustainable-transportation-in-asian-cities-for-a-greener-globe-and-better-life/Pre-course%20readings/A-1%20sump_guidelines_en.pdf adresinden erişildi.
- WEglobal. (2019). İklim Değişikliği, Sürdürülebilir Kentler ve Kentsel Planlama Etkileşimi. 26 Şubat 2024 tarihinde <https://www.iklimin.org/moduller/kentmodulu-surdurulebilirkentler.pdf> adresinden erişildi.
- Weis, C. (2012). *Activity oriented modelling of short-and long-term dynamics of travel behaviour*. (Yayımlanmamış doctoral dissertation). ETH Zurich.
- WHO. (2011). *Burden of disease from environmental noise Quantification of healthy life years lost in Europe*. Regional Office for Europe.
- Wilensky, U. ve William Rand. (2015). *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*.
- World Business Council for Sustainable Development. (2020). *World Business Council for Sustainable Development Sustainable Mobility Project 2.0 (SMP2.0) Indicators Work Stream - 2nd Edition*.
- Worldwide, M. ve Boğaziçi, Ü. (2011). *Türkiye'nin Şehirleri Sürdürülebilirlik Araştırması*.
- Xu, W., Zhu, J., Guo, Y., Li, Y. ve Wang, L. (2009). Performance Analysis of Electric Machine Drives for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices Chengdu* içinde . IEEE.
- Yang, Z., Stoleski, S., Kobizek, V., Ran, P., Zhou, Y., Copyright, fpubh, ... Ran, P. (2022). Traac-related air pollution is a risk factor in the development of chronic obstructive pulmonary disease. *Frontiers in Public Health*.
- Ye, L. ve Yamamoto, T. (2018a). Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 490, 269-277. doi:10.1016/j.physa.2017.08.015
- Ye, L. ve Yamamoto, T. (2018b). Impact of dedicated lanes for connected and autonomous vehicle on traffic flow throughput. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 512, 588-597. doi:10.1016/j.physa.2018.08.083
- Yu, H., Tak, S., Park, M. ve Yeo, H. (2019). Impact of Autonomous-Vehicle-Only Lanes in Mixed Traffic Conditions. *Transportation Research Record*. doi:10.1177/0361198119847475
- Yuan, H., Li, G. ve Bao, Z. (2022). Route Travel Time Estimation on A Road Network Revisited: Heterogeneity, Proximity, Periodicity and Dynamicity. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 16(3), 393-405. doi:10.14778/3570690.3570691
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J. ve Zakarevicius, A. (2012). Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *System Engineering, Computer Technology*, 122(6).

- Zavadskas, Edmundas Kazimieras, Antuchevičienė, J., Šaparauskas, J. ve Turskis, Z. (2013). MCDM Methods WASPAS and MULTIMOORA: Verification of Robustness of Methods When Assessing Alternative Solutions. *Journal of economic computation and economic cybernetics studies and research*, 47(2).
- Zeidler, V., Buck, S. H., Kautzsch, L., Vortisch, P. ve Weyland, C. M. (2019). Simulation of Autonomous Vehicles Based on Wiedemann's Car Following Model in PTV Vissim. *Proceedings of the 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB)* içinde (ss. 13-17). Washington DC, USA. <https://www.researchgate.net/publication/331020495> adresinden erişildi.
- Zhagyparova, K., Bader, A., Kouzayha, N., Elsayy, H. ve Al-Naffouri, T. (2023). Transportation Mode Recognition based on Cellular Network Data. *2023 IEEE International Conference on Smart Mobility, SM 2023* içinde (ss. 132-137). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/SM57895.2023.10112273
- Zhang, H. ve Gao, Z. (2007). Two-way road network design problem with variable lanes. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 16(1), 50-61. doi:10.1007/S11518-007-5034-X/METRICS
- Zhang, W., Guhathakurta, S. ve Khalil, E. B. (2018). The impact of private autonomous vehicles on vehicle ownership and unoccupied VMT generation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 90, 156-165. doi:10.1016/J.TRC.2018.03.005
- Zheng, G., Zhu, N., Tian, Z., Chen, Y. ve Sun, B. (2012). Application of a trapezoidal fuzzy AHP method for work safety evaluation and early warning rating of hot and humid environments. *Safety Science*, 50(2), 228-239. doi:10.1016/j.ssci.2011.08.042
- Zhou, A., Liu, Y., Tenenboim, E., Agrawal, S. ve Peeta, S. (2023). Car-Following Behavior of Human-Driven Vehicles in Mixed-Flow Traffic: A Driving Simulator Study. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(4), 2661-2673. doi:10.1109/TIV.2023.3257962
- Zhou, M., Qu, X. ve Jin, S. (2017). On the Impact of Cooperative Autonomous Vehicles in Improving Freeway Merging: A Modified Intelligent Driver Model-Based Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(6), 1422-1428. doi:10.1109/TITS.2016.2606492

EKLER

EK-A: TAŞIT UYGULAMALARININ SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK ÖLÇÜTLERİ ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİNDE KULLANILABİLECEK GÖSTERGELERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK SORU FORMU

Değerli katılımcı,

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Programı çerçevesinde **Doç. Dr. Mustafa ÖZUYSAL** danışmanlığında yürütülen ‘**Sürücüsüz Taşıt Uygulamalarının Ağ Yönetim Modelleri ve Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Ölçütleri Çerçevesinde Ulaşım Sistemleri ile Bütünleştirilmesi**’ adlı doktora tezinde ve ‘*Yenilikçi Ulaşım Türlerinin Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Perspektifinde Ulaşım Sistemi ile Bütünleştirilmesi için Karar Destek Modeli Geliştirilmesi: Kentsel Hava Hareketliliği ve Sürücüsüz Taşıtlar Örneği*’ başlıklı TUBİTAK 1001- Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi'nde kullanılmak üzere bir anket çalışması yapmaktayız. Bu çalışma ile, sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından değerlendirilmesinde kullanılabilecek göstergelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda sürdürülebilir kentsel hareketlilik planlarının belirlenmesinde etkili olan göstergelere soru formunda yer verilmiş olup, sizden sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından incelenmesinde bu göstergelerin gerekli olup olmadığı, önem düzeyleri ve bu göstergeler ile ilgili verilere ulaşım düzeyini belirtmeniz istenmektedir. Formda yer alan sorulara vereceğiniz cevaplar tamamen bilimsel amaçlı olarak kullanılacak, hiçbir şekilde yanıltıcı ismi belirtilerek yayınlanmayacaktır.

İlgi ve yardımlarınız için şimdiden teşekkür ederiz.

Zeynel Baran YILDIRIM

(DEU Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi)

Açıklama: Şehirlerin hareketlilik sistemlerinin değerlendirilmesi ve yeni hareketlilik uygulamaları ve politikalarının takibinin kapsamlı ve pratik bir şekilde izlenmesi için Avrupa Komisyonu tarafından 2020 yılında bir yönerge yayınlanmıştır. Şehirlerin sürdürülebilir kentsel hareketlilik sistemlerinin standart bir değerlendirme prosedürü kapsamında değerlendirilmesi ve yeni hareketlilik uygulamalarının veya politikalarının verimliliklerini ölçmelerini destekleyen kapsamlı bir dizi güvenilir göstergeler yayınlamıştır. (Eurapien Comission web site, 2022).

Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, Avrupa Komisyonu tarafından belirlenen 18 gösterge arasından sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından değerlendirilmesinde göstergelerin gereklilikleri, önem düzeyi ve veriye ulaşım durumları belirlenecektir. İkinci aşamada, ilk aşamada gerekli görülen ve önem düzeyi yüksek göstergeler Analitik Hiyerarşik Süreç (AHP) tekniğiyle kendi içerisinde ağırlıklandırılacaktır. Bu anket yalnızca ilk aşamada bahsedilen bölümü içermektedir.

Lütfen aşağıda yer alan Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Göstergelerinin açıklama kısımlarını okuyarak, ilgili göstergelerin sürücüsüz taşıt uygulamalarının değerlendirilmesi için gerekli olup olmadığını işaretleyerek belirtiniz. Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız alt kısımda yer alan önem düzeyi ve veriye ulaşmanın kolaylık derecesini lütfen puanlayınız.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL ARAŞTIRMA ve YAYIN ETİĞİ
KURULLARI (DEÜ-BAYEK) Fen ve Mühendislik Araştırma ve Yayın Etik
Kurul Başkanlığı BİLGİLENDİRİLMİŞ ONAM FORMU**

Sizi Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı tarafından yürütülen “**Sürücüsüz Taşıt Uygulamalarının Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Ölçütleri Çerçevesinde Değerlendirilmesinde Kullanılabilecek Göstergelerin Belirlenmesi**” başlıklı araştırmaya davet ediyoruz. Bu araştırmaya katılıp katılmama kararını vermeden önce, araştırmanın neden ve nasıl yapılacağını bilmeniz gerekmektedir. Bu nedenle bu formun okunup anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Eğer anlayamadığınız ve sizin için açık olmayan şeyler varsa ya da daha fazla bilgi isterseniz bize danışabilirsiniz.

Bu çalışmaya katılmak tamamen gönüllülük esasına dayanmaktadır. Çalışmaya katılmama veya katıldıktan sonra herhangi bir anda çalışmadan çıkma hakkına sahipsiniz. Çalışmayı yanıtlamanız araştırmaya katılım için onam verdiğiniz biçiminde yorumlanacaktır. Size verilen formlardaki soruları yanıtlarken kimsenin baskısı veya telkini altında olmayın. Bu formlardan elde edilecek kişisel bilgiler tamamen gizli tutulacak ve yalnızca araştırma amacı ile kullanılacaktır.

Çalışmaya Katılım Onayı:

Yukarıda yer alan ve araştırmadan önce katılımcıya/gönüllüye verilmesi gereken bilgileri okudum ve katılmam istenen çalışmanın kapsamını ve amacını, gönüllü olarak üzerime düşen sorumlulukları tamamen anladım. Bu çalışmayı istediğim zaman ve herhangi bir neden belirtmek zorunda kalmadan bırakabileceğimi ve bıraktığım takdirde herhangi bir olumsuzluk ile karşılaşmayacağımı anladım.

Bu formu doldurup sonundaki gönder butonuna tıkladığımda, “Sürücüsüz Taşıt Uygulamalarının Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Ölçütleri Çerçevesinde Değerlendirilmesinde Kullanılabilecek Göstergelerin Belirlenmesi” adlı proje çalışması kapsamında şahsıma yöneltilen soruları cevaplamayı, bu koşullarda söz konusu araştırmaya kendi isteğimle, hiçbir baskı ve zorlama olmaksızın katılmayı kabul etmiş oluyorum.

1. En Yoksul Kesim için Toplu Taşımanın Ödenebilirliği

Açıklama: Bu gösterge, erişilebilirlik ve ödenabilirlik perspektifinden sürdürülebilir ulaşımın eşitlik ilkesi dayanarak hanelerin gelir seviyelerine göre en yoksul dörtte birinin payının da göz önünde bulundurulması gerekliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Toplu taşıma sistemlerine erişiminin arttırılarak yoksul hanelerin mali yükünün hafifletilmesini amaçlayan bu düşünce ile sürdürülebilir ulaşımın temel unsurlarından sosyal ve ekonomik hedeflerine katkı sağlanacaktır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

ÖNEM DÜZEYİ ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

VERİYE ULAŞIM ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3

2. Hareket Engelli Gruplar için Toplu Taşımanın Erişilebilirliği

Açıklama: Toplu taşıma sistemlerinin tüm vatandaşlar için hizmet kalitesinin ve verimliliğinin artırılması sürdürülebilir şehirlerin oluşturulmasında önemli bir etkidir. Bu gösterge, hareket engelli grupların (hamile kadınlar, tekerlekli sandalye ve mobilite cihazları kullanıcıları, yaşlılar, bebek arabası kullanan ebeveynler ve bakıcılar, geçici yaralanmaları olan kişiler, görme ve işitme engelli kişiler, fiziksel kısıtlamaları olan kişiler gibi) bağımsız ve kolayca toplu taşıma sistemlerine erişebilmeleri ve kullanabilmelerinin yanı sıra altyapıda toplu taşıma altyapısında iyileştirmeler ve bilgi sistemlerinde düzenlemeler yapılması gerekliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

3. Hava Kirleten Emisyonlar

Açıklama: Hava kirleten emisyonların azaltılması sürdürülebilir kalkınmanın çevresel unsurlarının desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşenler (VOC), kükürt oksit (SOx) ve nitrojen oksit (NOx) gibi hava kirleticileri çevre ve insan sağlığı üzerinde anlık bir etkiye sahiptir. Bu gösterge, kentsel alandaki ulaşım modlarının (PM2.5 için egzoz ve egzoz dışı) ürettiği hava kirletici emisyonların sağlık üzerindeki etkilerini emisyon zarar etkisi cinsinden ifade edilerek değerlendirmesinde kullanılmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

ÖNEM DÜZEYİ ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

VERİYE ULAŞIM ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3

4. Gürültünün Önlenmesi

Açıklama: Ulaştırma faaliyetlerinin büyük bir kısmının gerçekleştirildiği karayolları, kentsel alanlarda oluşturulan ve toplum sağlığını etkileyen gürültülerin başlıca kaynaklarından biri sayılmaktadır. İnsanlar çeşitli olumsuz etkileri olan zararlı trafik gürültülerine maruz kalmaktadır. İnsan sağlığı üzerinde uyku aktiviteleri, performans ve konsantrasyon bozukluklarının yanı sıra çeşitli psikiyatrik bozukluklara da sebebiyet vermektedir. Ayrıca doğal ortamda bulunan birçok canlı türü bu gürültülere maruz kalmakta ve ekolojik ve biyolojik süreçlerinde etkilenmesine sebebiyet vermektedir. Gürültü doğrudan kayıplara neden olmamaktadır ancak gürültünün dolaylı etkileri zamana yayılan problemlere dönüşmektedir. Bu gösterge, kentsel alanlarda trafikteki araçlardan kaynaklı gürültülerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi: 1:** Hiç önemli değil **2:** Önemli değil **3:** Ne önemli/Ne önemsiz **4:** Önemli **5:** Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım: 1:** Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. **2:** Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. **3:** Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

5. Ulaşım Kazalarından Kaynaklı Karayolu Ölümleri

Açıklama: Tüm dünyada her yıl yüzbinlerce insan trafik kazalarında hayatını kaybetmektedir. Düşük ve orta gelirli ülkelerde hızlı kentleşme ve bireysel otomobil sahipliklerinin artması trafik kazalarında meydana gelen ölümleri ciddi bir sorun haline getirmiştir. Bu gösterge, kentsel alanlardaki tüm ulaşım kazalarından kaynaklı karayolu ölümlerinin yıllık bazda değerlendirildiği bir orandır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

6. Toplu Taşıma Hizmetlerine Erişim

Açıklama: Kentsel alanlarda insanların toplu taşıma gibi sürdürülebilir ulaşım modlarına teşvik edilmesi, birçok kentte politikaların düzenlenmesinde öncü hedefler arasında yer almaktadır. Erişilebilirliğin ölçülmesi, kentsel nüfus için gelecek senaryoların değerlendirilmesinde bir kıyaslama olanağı sağlar. Bu gösterge, toplu taşıma araçlarına uygun erişimi olan nüfus yüzdesinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

7. Sera Gazı Emisyonları

Açıklama: Hava kirleticiler genel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır: yerel etkiye sahip olan geleneksel kirleticiler ve küresel etkiye sahip sera gazları. Sera gazı emisyonlarının atmosfere salımını sağlayan sektörlerin başında ulaştırma sektörü yer almaktadır. Ulaştırma kaynaklı CO₂ emisyonlarının temel dört ana etkeni vardır. Nüfus, seyahat talebi, araç yakıt tüketimi ve yakıt karbon yoğunluğu. Araçların enerji kullanımı; ağırlığı veya mekanik kayıpları azaltılarak ya da aktarma organlarının verimliliği artırılarak azaltılabilir. Özellikle elektrikli araç teknolojilerinde geliştirilen bir dizi teknoloji enerji kullanımını azaltmak için seçenekler sunmaktadır. Bu gösterge, kentsel alandaki ulaşım modlarından kaynaklı sera gazı emisyonlarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

8. Tıkanıklık ve Gecikmeler

Açıklama: Trafik akımının yüksek araç yoğunluğu ile kesintiye uğraması ve bunun sonucunda fazla seyahat sürelerine yol açması tıkanıklık olarak tanımlanabilir. Yoğunlukla yoğun saatlerde aşırı araç sayısı nedeniyle düzenli olarak tekrarlanan tıkanıklıklar meydana gelir. Yoğun nüfuslu bölgelerde tıkanıklıktan kaynaklı gecikmeler ve dolayısıyla maliyetler artmaktadır. Bu gösterge, yoğun olmayan saatlerde toplu taşıma seyahat sürelerine kıyasla yoğun saatlerde karayolu trafiğinde ve toplu taşımada yaşanan gecikmeleri belirlemeye yardımcı olur. Karayollarındaki özel taşıt ve toplu taşıma için temsili koridorlar üzerindeki gecikmelerin ağırlıklı toplamaları alınmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

9. Enerji Verimliliği

Açıklama: Ulaştırma sektörü ülkelerin enerji arzı ve talebi arasındaki dengenin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kentsel alanlardaki nüfusun giderek artması ulaşım taleplerini arttıracak ve bu durum daha fazla altyapı yatırımı ihtiyacı ve enerji tüketimine sebep olacaktır. Ulaştırma endüstrisinin enerji kullanım sorunu otoritelerin dikkatini çekmekle birlikte enerji verimliliği konusunda yeni düzenlemeler getirilmeye başlanmıştır. Enerji verimliliğinde ideal olarak, araç tipi, araç emisyon kategorisi (emisyon standardı) ve yakıt türünün her bir kombinasyonu için araç kilometre sayısı değerleri dikkate alınmaktadır. Bu gösterge, kentsel alanlardaki ulaşım taleplerinden kaynaklı enerji verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

10. Aktif Hareketlilik İmkânı

Açıklama: Bu gösterge, yaya hareketleri ve bisiklet kullanıcıları gibi motorize olmayan ulaşım türlerinin aktif hareketliliği için altyapı imkânlarını belirler. Şehir içi yol ağının toplam uzunluğuna ilişkin kaldırımlı yolların, sokakların, bisiklet şeritlerinin, 30 km/saat bölgelerinin ve yaya bölgelerinin uzunluğu dikkate alınarak aktif hareketlilik için uyarlanmış yol uzunluklarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

11. Çok Modlu Entegrasyon

Açıklama: Çok modlu entegrasyon iki temel özelliği ile bilinmektedir. Toplu taşıma modlarının birbirleri ile entegrasyonu ve toplu taşıma modlarının araba paylaşımı, bisiklet paylaşımı, taksiler, servisler gibi besleyici modlarla ilk ve son mil bağlantısını sağlamaya yardımcı olarak ayrılabilir. Aktarma, bir yolcunun minimum/makul miktarlarda yürüme veya bekleme ile bir seyahat modundan diğerine geçebilme imkânıdır. Bir aktarmada ne kadar fazla ulaşım modu mevcutsa, çok modlu entegrasyon seviyesi o kadar yüksek olur. Bu göstergenin değerlendirilmesinde göz önüne alınan öncelikli parametre; yolcunun kentsel alanda önceden tanımlanmış ulaşım modları arasında geçiş yapabileceği değişim noktalarıdır. Gösterge, ulaşım ağının bağlantı düzeyini değil, çok modlu kavşakların ve merkezlerin kullanılabilirliğini yakalamak için tasarlanmıştır. örneğin metrodan otobüse veya otobüsten tramvaya çok modlu aktarmalar dâhil edilirken, aynı ulaşım modunun farklı hatları (otobüs-otobüs, tramvay-tramvay) dâhil edilmemektedir.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

12. Toplu Taşıma Memnuniyeti

Açıklama: Bu gösterge, toplu taşıma ile kentsel alanda hareket etmenin algılanan ve ortalama bildirilen memnuniyetinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu kapsamda, toplu taşıma sistemlerinin ödenebilirliği, güvenliği, erişilebilirliği, sıklığı, güvenilirliği ile ilgili memnuniyet anketleri hazırlanmalıdır.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

ÖNEM DÜZEYİ ☐ **1** ☐ **2** ☐ **3** ☐ **4** ☐ **5**

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

VERİYE ULAŞIM ☐ **1** ☐ **2** ☐ **3**

13. Aktif Modlar için Trafik Güvenliği

Açıklama: Ulaşımın aktif modları, insanların fiziksel aktivitesine dayalı olarak hareketliliklerini motorsuz taşıtlar aracılığıyla gerçekleştirmesidir. En yaygın aktif hareketlilik modları olarak yürüme, bisiklet ve elektrikli skuter örneği verilebilir. Bu gösterge, aktif mod kullanıcılarının trafiğe maruz kalmalarına bağlı olarak kentsel alanlardaki trafik kazalarında ölüm oranları ifade etmektedir.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

14. Kamusal Alanların Kalitesi

Açıklama: Bu gösterge, Avrupa Komisyonu'nun kentsel denetiminden elde edilen sonuçları analiz etmek için tasarlanmıştır. Kamusal alanların algılanan memnuniyeti bu gösterge ile belirlenir. Yeşil ve yeşil olmayan kamusal alanların (meydanlar, park, bahçeler, pazarlar, yaya alanları vb.) rapor edilen ortalama memnuniyetleri değerlendirilir.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

15. Kentsel Fonksiyonel Çeşitlilik

Açıklama: Fonksiyonel çeşitlilik, çalışma alanlarındaki mekânsal fonksiyonların bir karışımını ve karşılıklı olarak birbiriyle ilişkili faaliyetlerin yakınlığını ifade eder. Bu göstergiyi hesaplamak için çalışma alanı 1 km x 1 km'lik parçalara bölünür. 1 km x 1 km'lik parçalarda çalışma dışında, günlük aktivitelerle ilgili 9 uzamsal fonksiyondan ortalama mevcudiyet değerleri belirlenir. 9 fonksiyonun varlığı her bir parçada belirtilir ve kentsel alanda yaşayan nüfusla ağırlıklandırılır. Belirtilen 9 kentsel fonksiyon: İşletme (sanayi, ofisler, lojistik vb.), hastane ve tıbbi hizmetler, genel hizmetler (posta, yönetim vb.), okullar, esnaf (mağazalar, süpermarketler vb.), spor ve rekreasyon, konut, yaşlılar için ikamet, parklar ve yeşillikler.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

16. Seyahat Süresi

Açıklama: Her türlü modu kullanarak işe veya bir eğitim kurumuna gidiş geliş süresi bu gösterge tarafından temsil edilir. Sürdürülebilir kentsel kalkınma politikaları, kent sakinlerinin toplu taşıma ve aktif ulaşım modlarının kullanılmasını desteklemektedir. Bu durum hem özel taşıt kullanımını hem de seyahat mesafesini ve sürelerini azaltır. Diğer bir deyişle, sürdürülebilir kentsel hareketlilik, ulaşım türlerinin daha sürdürülebilir dağılımını sağlamak için kat edilen mesafeleri azaltmayı amaçlar.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

ÖNEM DÜZEYİ ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

VERİYE ULAŞIM ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3

17. Hareket Alanı Kullanımı

Açıklama: Günümüz ulaşım planlamalarında şehirlerin araba merkezliliği ana bir motif olmasına rağmen kentsel hareketlilik alanının dağılımı sürdürülebilir ulaşım kapsamında adaletli bir şekilde dağılması önem arz etmektedir. Bu aşamada hareketlilik alanının farklı ulaşım modları arasındaki dağılımının ölçülmesi ve ayrılan alanın payının modsal paylaşımıyla karşılaştırılması gerekmektedir. Bu gösterge, doğrudan ve dolaylı kullanımlar dahil olmak üzere şehrin tüm ulaşım modları tarafından alınan arazi kullanım oranını temsil eder. Kişi başına düşen doğrudan ve dolaylı mobilite alanı kullanımı değerlendirilir.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

18. Güvenlik

Açıklama: Bu gösterge, kentsel ulaşımда algılanan suç riski ve yolcu güvenliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Farklı ulaşım modlarının kullanıcıları ve kullanıcı olmayan kişilerine anketler düzenlenir. Sorular, ulaşımда suçla ilgili güvenlik unsurlarını içeren bilgilerin elde edilmesidir. Örneğin; akşamları toplu taşımada, yürüyüş sırasında, geceleri sokaklarda yürümek, bisiklet sürmek, araba hırsızlığı, taşıt trafiğinde suç riski gibi unsurlar.

Sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik kapsamında değerlendirilmesi açısından bu gösterge..

- ☐ Gereklidir
☐ Gereksizdir

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, ÖNEM DÜZEYİNİ derecelendiriniz.

***Önem Düzeyi:** 1: Hiç önemli değil 2: Önemli değil 3: Ne önemli/Ne önemsiz 4: Önemli 5: Son derece önemli

	1	2	3	4	5
ÖNEM DÜZEYİ	☐	☐	☐	☐	☐

Göstergenin gerekli olduğunu düşünüyorsanız, VERİYE ULAŞIM durumunu derecelendiriniz.

***Veriye Ulaşım:** 1: Kısıtlıdır, özel veri toplama teknikleri gerektirir. 2: Sıklıkla ulaşılabilir, fakat standartlaşmış şekilde değildir. 3: Her zaman standartlaşmış şekilde bulunur.

	1	2	3
VERİYE ULAŞIM	☐	☐	☐

EK-B: SÜRÜCÜSÜZ TAŞIT UYGULAMALARININ SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL HAREKETLİLİK ÖLÇÜTLERİ ÇERÇEVESİNDE ARAŞTIRILMASI AHS (ANALİTİK HİYERARŞİK SÜREÇ) KRİTER AĞIRLIKLANDIRMA ANKETİ

Değerli katılımcı,

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Programı çerçevesinde **Doç. Dr. Mustafa ÖZUYSAL** danışmanlığında yürütülen ‘Sürücüsüz Taşıt Uygulamalarının Ağ Yönetim Modelleri ve Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Ölçütleri Çerçevesinde Ulaşım Sistemleri ile Bütünleştirilmesi’ adlı doktora tezinde ve ‘Yenilikçi Ulaşım Türlerinin Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Perspektifinde Ulaşım Sistemi ile Bütünleştirilmesi için Karar Destek Modeli Geliştirilmesi: Kentsel Hava Hareketliliği ve Sürücüsüz Taşıtlar Örneği’ başlıklı TUBİTAK 1001- Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi’nde kullanılmak üzere bir anket çalışması yapmaktayız.

Bu çalışma kapsamında, sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından değerlendirilmesinde kullanılabilecek göstergelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, Avrupa Komisyonu tarafından Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Göstergeleri (SUMI) kapsamında belirlenen 18 gösterge arasından, sürücüsüz taşıt uygulamalarının sürdürülebilir kentsel hareketlilik açısından değerlendirilmesinde göstergelerin gereklilikleri, önem düzeyi ve veriye ulaşım durumları belirlenmiştir. İkinci aşamada, ilk aşamada gerekli görülen ve önem düzeyi yüksek göstergeler Analitik Hiyerarşik Süreç (AHS) tekniğiyle kendi içerisinde ağırlıklandırılacaktır. Bu anket yalnızca ikinci aşamada bahsedilen bölümü içermektedir.

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), çok seçenekli karar problemlerinde karar vericilere ihtiyaçlarına ve problemi anlamalarına yardımcı olan bir metodolojidir. AHS kullanılarak, çok kriterli problem daha önce her biri bağımsız olarak analiz edilebilen daha kolay ve anlaşılır hiyerarşilerine ayrıştırılır. Daha sonra, karar vericiler değişkenleri birbirleriyle karşılaştırarak sistematik olarak değerlendirirler.

Bu anket kapsamında, '*Sürücüsüz Taşıt Uygulamalarının Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Ölçütleri Çerçevesinde Değerlendirilmesi*' için önemli düzeyinin yüksek ve gerekli olduğu belirlenen çevresel, ekonomik ve sosyal kriterlerin aşağıda yer alan açıklama kısmında kısaca bahsedilmektedir. Karar destek mekanizmasının oluşturulması ve yürütülmesi açısından ilk aşamada belirlenen bu göstergelerin kendi içerisinde önem derecesinin tespit edilmesi gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar tutarlılık analizinden geçirilecektir. Kabul edilebilir tutarlılık düzeyi dışında kalan değerlendirmeler uzmanlar ile tekrar görüşülerek yeniden değerlendirilmesi talep edilecektir. Formda yer alan sorulara vereceğiniz cevaplar tamamen bilimsel amaçlı olarak kullanılacak, hiçbir şekilde yanıtlayıcı ismi belirtilerek yayınlanmayacaktır.

İlgi ve yardımlarınız için şimdiden teşekkür ederiz.

Zeynel Baran YILDIRIM

(DEU Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi)

Birinci Aşamada Belirlenen Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Göstergelerine Dair Açıklamalar:

Hava Kirleten Emisyonlar: Hava kirleten emisyonların azaltılması sürdürülebilir kalkınmanın çevresel unsurlarının desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşenler (VOC), kükürt oksit (SOx) ve nitrojen oksit (NOx) gibi hava kirleticileri çevre ve insan sağlığı üzerinde anlık bir etkiye sahiptir. Bu gösterge, kentsel alandaki ulaşım modlarının (PM2.5 için egzoz ve egzoz dışı) ürettiği hava kirletici emisyonların sağlık üzerindeki etkilerini emisyon zarar etkisi cinsinden ifade edilerek değerlendirmesinde kullanılmaktadır.

Gürültünün Önlenmesi: Ulaştırma faaliyetlerinin büyük bir kısmının gerçekleştirildiği karayolları, kentsel alanlarda oluşturulan ve toplum sağlığını etkileyen gürültülerin başlıca kaynaklarından biri sayılmaktadır. İnsanlar çeşitli olumsuz etkileri olan zararlı trafik gürültülerine maruz kalmaktadır. İnsan sağlığı üzerinde uyku aktiviteleri, performans ve konsantrasyon bozukluklarının yanı sıra çeşitli psikiyatrik bozukluklara da sebebiyet vermektedir. Ayrıca doğal ortamda

bulunan birçok canlı türü bu gürültülere maruz kalmakta ve ekolojik ve biyolojik süreçlerinde etkilenmesine sebebiyet vermektedir. Gürültü doğrudan kayıplara neden olmamaktadır ancak gürültünün dolaylı etkileri zamana yayılan problemlere dönüşmektedir. Bu gösterge, kentsel alanlarda trafikteki araçlardan kaynaklı gürültülerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Sera Gazı Emisyonları: Hava kirleticiler genel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır: yerel etkiye sahip olan geleneksel kirleticiler ve küresel etkiye sahip sera gazları. Sera gazı emisyonlarının atmosfere salımını sağlayan sektörlerin başında ulaştırma sektörü yer almaktadır. Ulaştırma kaynaklı CO2 emisyonlarının temel dört ana etkeni vardır. Nüfus, seyahat talebi, araç yakıt tüketimi ve yakıt karbon yoğunluğu. Araçların enerji kullanımı; ağırlığı veya mekanik kayıpları azaltılarak ya da aktarma organlarının verimliliği artırılarak azaltılabilir. Özellikle elektrikli araç teknolojilerinde geliştirilen bir dizi teknoloji enerji kullanımını azaltmak için seçenekler sunmaktadır. Bu gösterge, kentsel alandaki ulaşım modlarından kaynaklı sera gazı emisyonlarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Enerji Verimliliği: Ulaştırma sektörü ülkelerin enerji arzı ve talebi arasındaki dengenin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kentsel alanlardaki nüfusun giderek artması ulaşım taleplerini arttıracak ve bu durum daha fazla altyapı yatırımı ihtiyacı ve enerji tüketimine sebep olacaktır. Ulaştırma endüstrisinin enerji kullanım sorunu otoritelerin dikkatini çekmekle birlikte enerji verimliliği konusunda yeni düzenlemeler getirilmeye başlanmıştır. Enerji verimliliğinde ideal olarak, araç tipi, araç emisyon kategorisi (emisyon standardı) ve yakıt türünün her bir kombinasyonu için araç kilometre sayısı değerleri dikkate alınmaktadır. Bu gösterge, kentsel alanlardaki ulaşım taleplerinden kaynaklı enerji verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Seyahat Süresi: Her türlü modu kullanarak işe veya bir eğitim kurumuna gidiş geliş süresi bu gösterge tarafından temsil edilir. Sürdürülebilir kentsel kalkınma politikaları, kent sakinlerinin toplu taşıma ve aktif ulaşım modlarının kullanılmasını desteklemektedir. Bu durum, hem özel taşıt kullanımını hem de seyahat mesafesini ve sürelerini azaltır. Diğer bir deyişle, sürdürülebilir kentsel hareketlilik, ulaşım

türlerinin daha sürdürülebilir dağılımını sağlamak için kat edilen mesafeleri azaltmayı amaçlar.

Tıkanıklık ve Gecikme: Trafik akımının yüksek araç yoğunluğu ile kesintiye uğraması ve bunun sonucunda fazla seyahat sürelerine yol açması tıkanıklık olarak tanımlanabilir. Çoğunlukla yoğun saatlerde aşırı araç sayısı nedeniyle düzenli olarak tekrarlanan tıkanıklıklar meydana gelir. Yoğun nüfuslu bölgelerde tıkanıklıktan kaynaklı gecikmeler ve dolayısıyla maliyetler artmaktadır. Bu gösterge, yoğun olmayan saatlerde toplu taşıma seyahat sürelerine kıyasla yoğun saatlerde karayolu trafiğinde ve toplu taşımada yaşanan gecikmeleri belirlemeye yardımcı olur. Karayollarındaki özel taşıt ve toplu taşıma için temsili koridorlar üzerindeki gecikmelerin ağırlıklı toplamaları alınmaktadır.

KRİTERLERİN KENDİ ARASINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, söz konusu değerlendirme kriterlerinin önem düzeyleri kendi içlerinde kıyaslanarak saptanacaktır. Kıyaslamalar yapılırken sırasıyla;

- Verilen iki kriterden hangisinin daha önemli/etkin olduğu seçilecektir.
- Önemli olduğu belirtilen kriterin göreceli önem derecesi belirtilecektir.

SAATY DERECE ÖNEM ÖLÇEĞİ

Önem Değerleri	Değer Tanımları
1	Eşit Önemde
3	Biraz Daha Önemli (Az Üstünlük)
5	Oldukça Önemli (Fazla Üstünlük)
7	Çok Önemli (Çok Üstünlük)
9	Son Derece Önemli (Kesin Üstünlük)
2, 4, 6 ve 8	Ara Değerler (Uzlaşma Değerleri)

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL ARAŞTIRMA ve YAYIN ETİĞİ
KURULLARI (DEÜ-BAYEK) Fen ve Mühendislik Araştırma ve Yayın Etik
Kurul Başkanlığı BİLGİLENDİRİLMİŞ ONAM FORMU**

Sizi Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı tarafından yürütülen “Sürücüsüz Taşıt Uygulamalarının Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Ölçütleri Çerçevesinde Araştırılması AHS (Analitik Hiyerarşik Süreç) Kriter Ağırlıklandırma” başlıklı araştırmaya davet ediyoruz. Bu araştırmaya katılıp katılmama kararını vermeden önce, araştırmanın neden ve nasıl yapılacağını bilmeniz gerekmektedir. Bu nedenle bu formun okunup anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Eğer anlayamadığınız ve sizin için açık olmayan şeyler varsa ya da daha fazla bilgi isterseniz bize danışabilirsiniz.

Bu çalışmaya katılmak tamamen gönüllülük esasına dayanmaktadır. Çalışmaya katılmama veya katıldıktan sonra herhangi bir anda çalışmadan çıkma hakkına sahipsiniz. Çalışmayı yanıtlamanız araştırmaya katılım için onam verdiğiniz biçiminde yorumlanacaktır. Size verilen formlardaki soruları yanıtlarken kimsenin baskısı veya telkini altında olmayın. Bu formlardan elde edilecek kişisel bilgiler tamamen gizli tutulacak ve yalnızca araştırma amacı ile kullanılacaktır.

Çalışmaya Katılım Onayı:

Yukarıda yer alan ve araştırmadan önce katılımcıya/gönüllüye verilmesi gereken bilgileri okudum ve katılmam istenen çalışmanın kapsamını ve amacını, gönüllü olarak üzerime düşen sorumlulukları tamamen anladım. Bu çalışmayı istediğim zaman ve herhangi bir neden belirtmek zorunda kalmadan bırakabileceğimi ve bıraktığım takdirde herhangi bir olumsuzluk ile karşılaşmayacağımı anladım.

Bu formu doldurup sonundaki gönder butonuna tıkladığımda, “Sürücüsüz Taşıt Uygulamalarının Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Ölçütleri Çerçevesinde Araştırılması AHS (Analitik Hiyerarşik Süreç) Kriter Ağırlıklandırma” adlı proje çalışması kapsamında şahsıma yöneltilen soruları cevaplamayı, bu koşullarda söz konusu araştırmaya kendi isteğimle, hiçbir baskı ve zorlama olmaksızın katılmayı kabul etmiş oluyorum.

ÖRNEK-1

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

{X} Hava Kirlenen Emisyonlar

{ } Gürültünün Önlenmesi

ÖNEM DERECECİ

{ }1 { }2 { }3 { }4 { }5 { }6 {X}7 { }8 { }9

ANLAMI: Sürdürülebilir kentsel hareketlilik planlarının değerlendirilmesinde "Hava Kirlenen Emisyonlar" göstergesi "Gürültünün Önlenmesi" ne göre çok önemlidir.

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

☐

HAVA KİRLİTEN EMİSYONLAR

☐

GÜRÜLTÜNÜN ÖNLENMESİ

ÖNEM DERECECİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ HAVA KİRLETEN EMİSYONLAR
- ☐ ENERJİ VERİMLİLİĞİ

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ HAVA KİRLETEN EMİSYONLAR
- ☐ SEYAHAT SÜRESİ

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ HAVA KİRLETEN EMİSYONLAR
- ☐ TIKANIKLIK VE GECİKME

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ GÜRÜLTÜNÜN ÖNLENMESİ
- ☐ SERA GAZI EMİSYONLARI

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ GÜRÜLTÜNÜN ÖNLENMESİ
- ☐ ENERJİ VERİMLİLİĞİ

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ GÜRÜLTÜNÜN ÖNLENMESİ
- ☐ SEYAHAT SÜRESİ

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ GÜRÜLTÜNÜN ÖNLENMESİ
- ☐ TIKANIKLIK VE GECİKME

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ SERA GAZI EMİSYONLARI
- ☐ ENERJİ VERİMLİLİĞİ

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ SERA GAZI EMİSYONLARI
- ☐ SEYAHAT SÜRESİ

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ SERA GAZI EMİSYONLARI
- ☐ TIKANIKLIK VE GECİKME

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ ENERJİ VERİMLİLİĞİ
- ☐ SEYAHAT SÜRESİ

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

- ☐ ENERJİ VERİMLİLİĞİ
- ☐ TIKANIKLIK VE GECİKME

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

Aşağıdakilerden hangisi Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlamasında daha önemli bir kriterdir?

☐

SEYAHAT SÜRESİ

☐

TIKANIKLIK VE GECİKME

ÖNEM DERECEŚİ

1: Eşit Önemde **3:** Biraz daha önemli (Az üstünlük) **5:** Oldukça önemli (Fazla üstünlük) **7:** Çok önemli (Çok üstünlük) **9:** Son derece önemli (Kesin üstünlük) **2,4,6 ve 8** Ara değerler (Uzlaşma değerleri)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
EŞİT ÜSTÜNLÜK	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	KESİN ÜSTÜNLÜK

EK-C: YENİLİKÇİ ULAŞIM TÜRLERİ SEÇİM ANKETİ - Uzak, Orta, Yakın
Gelecekte Ulaşım Türleri - Belirtilen Tercihler Anketi (stated preference
survey)

Değerli katılımcı,

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Programı çerçevesinde **Doç. Dr. Mustafa ÖZUYSAL** danışmanlığında yürütülen ‘**Sürücüsüz Taşıt Uygulamalarının Ağ Yönetim Modelleri ve Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Ölçütleri Çerçevesinde Ulaşım Sistemleri ile Bütünleştirilmesi**’ adlı doktora tezinde ve ‘*Yenilikçi Ulaşım Türlerinin Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Perspektifinde Ulaşım Sistemi ile Bütünleştirilmesi için Karar Destek Modeli Geliştirilmesi: Kentsel Hava Hareketliliği ve Sürücüsüz Taşıtlar Örneği*’ başlıklı TUBİTAK 1001- Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi'nde kullanılmak üzere kullanılmak üzere sizi Belirtilen Tercihler Anketi yapmaya davet ediyoruz. Bu araştırmaya katılıp katılmama kararını vermeden önce, araştırmanın neden ve nasıl yapılacağını bilmeniz gerekmektedir. Bu nedenle bu formun okunup anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Eğer anlayamadığınız ve sizin için açık olmayan şeyler varsa, ya da daha fazla bilgi isterseniz bize sorunuz. Formda yer alan sorulara vereceğiniz cevaplar tamamen bilimsel amaçlı olarak kullanılacak, hiçbir şekilde yanıtlayıcı ismi belirtilerek yayınlanmayacaktır.

İlgi ve yardımlarınız için şimdiden teşekkür ederiz.

Zeynel Baran YILDIRIM

(DEU Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi)

Bu çalışmaya katılmak tamamen gönüllülük esasına dayanmaktadır. Çalışmaya katılmama veya katıldıktan sonra herhangi bir anda çalışmadan çıkma hakkında sahipsiniz. Çalışmayı yanıtlamanız, araştırmaya katılım için onam verdiğiniz biçiminde yorumlanacaktır. Size verilen formlardaki soruları yanıtlarken kimsenin baskısı veya telkini altında olmayın. Bu formlardan elde edilecek kişisel bilgiler tamamen gizli tutulacak ve yalnızca araştırma amacı ile kullanılacaktır.

a. Araştırmanın Amacı: Projenin amacı, ulaştırma sistemlerinin geleceğinde iki zıt eğilim olan sürdürülebilir kentsel hareketlilik ve hareketliliği yükselten yenilikçi türlerin birbirini engellemeden, bütünleşik gelişimini sağlayacak

b. Araştırmanın İçeriği: Araştırma, yenilikçi ulaşım türlerini (sürücüsüz araçlar, kentsel hava hareketliliği vb.) hangi koşullarda tercih edebileceğinize ilişkin süre, maliyet, konfor vb. faktörlerin değişimlerine karşı tutumlarınızı içeren sorular içermektedir.

c. Araştırmanın Öngörülen Süresi (Araştırma takviminde öngörülen süredir): 12 ay

d. Araştırmaya Katılması Beklenen Katılımcı/Gönüllü Sayısı: 1500

e. Araştırmanın Yapılacağı Yer(ler): Çevrimiçi

Bu sayfada yer alan ve araştırmadan önce katılımcıya/gönüllüye verilmesi gereken bilgileri okudum ve katılmam istenen çalışmanın kapsamını ve amacını, gönüllü olarak üzerime düşen sorumlulukları tamamen anladım. Bu çalışmayı istediğim zaman ve herhangi bir neden belirtmek zorunda kalmadan bırakabileceğimi ve bıraktığım takdirde herhangi bir olumsuzluk ile karşılaşmayacağımı anladım. “Yenilikçi Ulaşım Türleri Seçim Anketi - Uzak, Orta, Yakın Gelecekte Ulaşım Türleri - Belirtilen Tercihler Anketi (stated preference survey) ” adlı araştırmaya kendi isteğimle, hiçbir baskı ve zorlama olmaksızın katılmayı kabul etmiş oluyorum.

☐

Kabul ediyorum.

Bölüm 1 - Sosyo-demografik özellikler
Cinsiyet ☐ Erkek ☐ Kadın ☐ Belirtmek istemiyorum
Yaş aralığınız nedir? ☐ <18 ☐ 18-25 ☐ 26-35 ☐ 36-45 ☐ 46-55 ☐ 56-65 ☐ >65 ☐ Yanıtlamak istemiyorum
Aylık geliriniz ☐ <3000 ☐ 3000-5000 ☐ 5000-10000 ☐ 10000-15000 ☐ 15000-25000 ☐ 25000-40000 ☐ >40000
En son kazanılan öğrenim derecesi ☐ Lise diploması öncesi ☐ Lise ☐ Lisans ☐ Yüksek lisans ☐ Doktora

Bölüm 2 – Otonom Sürüş Farkındalığı

Teknolojiye yönelik aşağıdaki her bir ifadeye ne kadar katılıyorsunuz?

	Kesinlikle katılmıyorum	Katılmıyorum	Kararsızım	Katılıyorum	Kesinlikle katılıyorum
Yeni teknolojilerin bana sunabileceği olanaklar konusunda heyecanlıyım.	☐	☐	☐	☐	☐
Pahalı olsalar bile sıklıkla yeni teknolojik ürünler kullanıyorum.	☐	☐	☐	☐	☐
Yeni teknolojilere neredeyse hiç ilgi duymuyorum.	☐	☐	☐	☐	☐
Yeni teknolojiler çözdüklerinden daha fazla sorun yaratıyorlar.	☐	☐	☐	☐	☐

Daha önce otonom araçlar hakkında bir şey duydunuz mu?

- ☐ Evet
☐ Hayır

Otonom sürüş hakkında aşağıdaki fikirlere ne düzeyde katılırsınız?

	Kesinlikle katılmıyorum	Katılmıyorum	Kararsızım	Katılıyorum	Kesinlikle katılıyorum
Otonom araçların yaygınlaşması faydalı bir gelişmedir.	☐	☐	☐	☐	☐
Otonom araçlar, 10 ila 15 yıl içinde günlük hayatın bir parçası olacak.	☐	☐	☐	☐	☐
Otonom sürüş beni korkutuyor.	☐	☐	☐	☐	☐
Otonom taşıtların yaygınlaşmasını istiyorum.	☐	☐	☐	☐	☐
Güvenilir bir şekilde çalışacağına inanmıyorum.	☐	☐	☐	☐	☐

Size göre tam otonom araçlar (sürücü olarak herhangi bir müdahale gerektirmeyen) ne zaman yollarda olacak?

- ☐ Önümüzdeki birkaç yıl içinde
☐ 5 yıl sonra
☐ 10 yıl sonra
☐ 15 yıl sonra
☐ 20 yıl sonra
☐ Daha ileri

Otonom sürüşün aşağıdaki hangi yol ve koşullarda kullanabileceğinizi düşünüyorsunuz?

	Kesinlikle katılmıyorum	Katılmıyorum	Kararsızım	Katılıyorum	Kesinlikle katılıyorum
Uzun otoyol yolculuklarında	☐	☐	☐	☐	☐
Karayolunda sıkışık trafikte	☐	☐	☐	☐	☐
Şehir trafiğinde	☐	☐	☐	☐	☐
Kırsal yollarda	☐	☐	☐	☐	☐
Özellikle hafif trafikte	☐	☐	☐	☐	☐
Özellikle yoğun trafikte	☐	☐	☐	☐	☐
Günlük yolculuklarda	☐	☐	☐	☐	☐

Yolculuk süresini araç kullanmak dışında bir faaliyet yaparak geçirmekten hoşlanır mısınız?

- ☐ Evet
☐ Hayır

Otonom sürüş özelliği olan bir araçta seyahat ettiğinizi varsayarsanız, sürüş sırasında ne yapmayı tercih ederdiniz?

- ☐ Radyo dinlemek
☐ Telefon görüşmesi yapmak
☐ Bir şeyler okumak
☐ Bir şeyler yazmak veya e-posta atmak
☐ Diğer yolcular ile konuşmak
☐ Araç içi ekrandan bir şeyler izlemek
☐ Uyumak
☐ Hiçbir şey yapmamak
☐ Diğer

Bölüm 3 – Kentsel hava hareketliliği

Daha önce kent içi mesafede hizmet veren otonom uçan araçlar (hava taksi) hakkında bir şey duydunuz mu?

Hava taksiler hakkında kısa bilgiye, aşağıda yer alan video linkine tıklayarak erişebilirsiniz.

Uyarı: Videoyu ayrı bir sekmede açmak için; farenizin kaydırma tekerleği ile tıklayınız veya linki kopyalayıp ayrı bir sekmede açınız.

Link: <https://www.youtube.com/watch?v=m75HjVs0gsM>

Şehrinizde kentsel hava hareketliliği çözümleri uygulanmaya başlasaydı genel algınız nasıl olurdu?

Oldukça olumsuz	Olumsuz	Kararsız	Olumlu	Oldukça olumlu
☐	☐	☐	☐	☐

Otonom uçan araçlar (hava taksi) ile yolculuk etmeye yönelik tutumunuza ilişkin aşağıdaki her bir ifadeye ne kadar katılıyorsunuz?

	Kesinlikle katılmıyorum	Katılmıyorum	Kararsızım	Katılıyorum	Kesinlikle katılıyorum
Kullanmak eğlenceli olurdu.	☐	☐	☐	☐	☐
Kullanmayı korkutucu bulurum.	☐	☐	☐	☐	☐
Bu tür araçların ulaşım sisteminde önemli bir role sahip olabileceğini düşünüyorum.	☐	☐	☐	☐	☐

Bir yılda ortalama kaç kez uçakla seyahat ediyorsunuz?

Her ay veya daha sık	Yılda 6-10 kez	Yılda 3-5 kez	Yılda 1-2 kez	Neredeyse hiç
☐	☐	☐	☐	☐

Uçakla seyahat ederken, havaalanına ve havaalanından gideceğiniz noktaya genellikle nasıl ulaşım sağlarsınız? Lütfen uygun olanların tümünü seçin.

- ☐ Özel araç ile arkadaşım/yakınım bırakır.
- ☐ Özel araçla kendim giderim.
- ☐ Taksi ile giderim.
- ☐ Toplu taşıma (metro,otobüs vb) ile giderim.
- ☐ Diğer

Kentsel hava hareketliliği için aşağıdaki yolcu taşımacılığı kullanım durumlarından hangisini en yararlı olarak değerlendirirsiniz?

- ☐ Bir şehirde veya bölgede hava yoluyla gezi
- ☐ Şehir merkezinden havaalanına gidip gelmek için
- ☐ Bir banliyö bölgesinden şehir merkezine gidip gelmek için
- ☐ Şehrin merkezinde bir noktadan diğerine seyahat etmek için
- ☐ Bölgedeki bir şehirden başka bir şehre bölgesel hava hareketliliği (örn. İzmir-Manisa)

Bölüm 4 – Ulaşım Tür Seçimi

Katılmış olduğunuz belirtilen tercihler anketi temelde 3 farklı bölümden oluşmaktadır. **Uzak Gelecek (2050-2070), Orta Gelecek (2035-2050) ve Yakın Gelecek (2025-2035)** olarak 3 farklı anket grubunu sırası ile ulaşım türü tercihlerinize göre seçerek ilerleyeceksiniz.

Lütfen aşağıdaki iki yenilikçi ulaşım türünün tanıtımını göz önünde bulundurun. Sonraki bölümlerde gelecek sorular bu iki yeni türü içerecektir.

Doğru ya da yanlış cevap yoktur. Fikirlerinizi merak ediyoruz.

Yenilikçi ulaşım türleri: **Otonom (sürücüsüz) araç** ve **Otonom Uçan Araçlar (Hava taksi)**

Otonom Araç örneği-----Otonom Uçan Taksi örneği



Yeni nesil ulaşım türlerinin daha iyi anlaşılması açısından, aşağıda yer alan Youtube linklerinden örnek videoları izleyebilirsiniz.

Uyarı: Videoyu ayrı bir sekmede açmak için; farenizin kaydırma tekerleği ile tıklayınız veya linki kopyalayıp ayrı bir sekmede açınız.

Otonom Araç Örnek 1: <https://www.youtube.com/watch?v=6v036bBD31o&t=164s>

Otonom Araç Örnek 2: <https://www.youtube.com/watch?v=EoOvVkEMo>

Otonom Uçan Araç Örnek 1: https://www.youtube.com/watch?v=brl_8TRB5t0

Otonom Uçan Araç Örnek 2: https://www.youtube.com/watch?v=b9i_2aX0R88

Teknolojinin etkin olduğu ulaşım türlerine (otonom araç ve otonom uçan taksi gibi) yönelik tutumunuzla ilgili aşağıdaki ifadelerin her birine ne kadar katılıyorsunuz veya katılmıyorsunuz?

	Kesinlikle katılmıyorum	Katılmıyorum	Kararsızım	Katılıyorum	Kesinlikle katılıyorum
Otonom taşıma türlerini kullanmayı eğlenceli bulurum.	☐	☐	☐	☐	☐
Otonom araç kullanmaktan korkuyorum.	☐	☐	☐	☐	☐
Otonom ulaşım türleri sistemimizde önemli bir rol oynamalıdır	☐	☐	☐	☐	☐
Otonom uçan taksiye binmekten korkuyorum	☐	☐	☐	☐	☐

Anketin devamında, **15 km'lik bir yolculuk(tek yön)** için beş farklı ulaşım türü arasından seçim yapabilirsiniz. Bu senaryolar varsayımsaldır.

Her senaryo için tercih ettiğiniz ulaşım şeklini seçmenizi rica ederiz.

Fikirlerinizi merak ediyoruz..

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (1 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom araç	Otonom uçan taksi	Paylaşımlı otonom	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
				
Araçta yolculuk süresi	22 dk	4 dk	26 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	2 dk	12 dk	5 dk	
Yolculuk maliyeti	25 ₺	150 ₺	10 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Çok	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Kısmen var	Yok	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (2 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom	Toplu taşıma	Otomobil (sürücü)	HiçBİRİ: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	18 dk	50 dk	42 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	10 dk	19 dk	2 dk	
Yolculuk maliyeti	12 ₺	5 ₺	50 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Orta	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Kısmen var	Yok	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)**'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (3 / 8)

Ulaşım Türü	Toplu taşıma 	Paylaşımlı otonom 	Otonom uçan taksi 	HiçBİRİ: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	35 dk	26 dk	6 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	19 dk	15 dk	9 dk	
Yolculuk maliyeti	11 ₺	10 ₺	180 ₺	
Güvenlik seviyesi	Orta	Çok	Az	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Kısmen var	Yok	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç**, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)**'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı**; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler**, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (4 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom uçan taksi	Otonom araç	Toplu taşıma	HiçBİRİ: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	8 dk	30 dk	65 dk	
Araca yürüme/bekleme süresi	15 dk	4 dk	17 dk	
Yolculuk maliyeti	210 ₺	20 ₺	8 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Çok	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Kısmen var	Var	
	Seç	✓	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç**, kullanıcılar arasında paylaşılabilir, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)**'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı**; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler**, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (5 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom 	Otomobil (sürücü) 	Otonom araç 	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	34 dk	18 dk	14 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	10 dk	0 dk	2 dk	
Yolculuk maliyeti	14 ₺	50 ₺	15 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Orta	Çok	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Kısmen var	Yok	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)**'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (6 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom araç 	Paylaşımlı otonom 	Otomobil (sürücü) 	HiçBiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	14 dk	26 dk	30 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	0 dk	5 dk	4 dk	
Yolculuk maliyeti	20 ₺	12 ₺	65 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Çok	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Kısmen var	Yok	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (7 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom	Toplu taşıma	Otonom uçan taksi	HiçBİRİ: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	34 dk	50 dk	8 dk	
Araca yürüme/bekleme süresi	15 dk	17 dk	9 dk	
Yolculuk maliyeti	10 ₺	8 ₺	150 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Orta	Çok	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Kısmen var	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)'in** toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Uzak Gelecekte (2050-2070) Ulaşım Tür Seçimi (8 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom uçan taksi 	Otomobil (sürücü) 	Toplu taşıma 	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	6 dk	42 dk	35 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	12 dk	2 dk	19 dk	
Yolculuk maliyeti	180 ₺	30 ₺	11 ₺	
Güvenlik seviyesi	Çok	Orta	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Yok	Kısmen var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Yenilikçi ulaşım türlerinin *Uzak gelecek (2050-2070)* varsayımlarında, tür seçimini tamamladınız.

Lütfen bundan sonraki ulaşım tür seçimlerinizi Orta gelecek (2035-2050) varsayımlarına dayanarak gerçekleştiriniz.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Orta Gelecekte (2035-2050) Ulaşım Tür Seçimi (1 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom uçan taksi	Otonom araç	Otomobil (sürücü)	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	7 dk	20 dk	18 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	26 dk	4 dk	2 dk	
Yolculuk maliyeti	240 ₺	65 ₺	30 ₺	
Güvenlik seviyesi	Çok	Az	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Kısmen var	Var	Yok	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Orta Gelecekte (2035-2050) Ulaşım Tür Seçimi (2 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom araç	Paylaşımlı otonom	Toplu taşıma	HİÇBİRİ: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	44 dk	24 dk	50 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	0 dk	15 dk	19 dk	
Yolculuk maliyeti	50 ₺	25 ₺	11 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Çok	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Var	Kısmen var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Orta Gelecekte (2035-2050) Ulaşım Tür Seçimi (3 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom uçan taksi 	Toplu taşıma 	Otonom araç 	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	5 dk	65 dk	32 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	26 dk	17 dk	2 dk	
Yolculuk maliyeti	240 ₺	11 ₺	50 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Orta	Çok	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Var	Kısmen var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)'in** toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Orta Gelecekte (2035-2050) Ulaşım Tür Seçimi (4 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom	Otomobil (sürücü)	Otonom uçan taksi	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	24 dk	18 dk	9 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	10 dk	0 dk	23 dk	
Yolculuk maliyeti	25 ₺	65 ₺	210 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Orta	Çok	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Kısmen var	Yok	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Orta Gelecekte (2035-2050) Ulaşım Tür Seçimi (5 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom	Otomobil (sürücü)	Otonom uçan taksi	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
				
Araçta yolculuk süresi	48 dk	42 dk	7 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	5 dk	4 dk	20 dk	
Yolculuk maliyeti	15 ₺	30 ₺	180 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Orta	Çok	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Yok	Kısmen var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)**'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Orta Gelecekte (2035-2050) Ulaşım Tür Seçimi (6 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom	Toplu taşıma	Otonom araç	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	36 dk	50 dk	20 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	5 dk	15 dk	4 dk	
Yolculuk maliyeti	20 ₺	5 ₺	65 ₺	
Güvenlik seviyesi	Çok	Orta	Az	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Var	Kısmen var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Orta Gelecekte (2035-2050) Ulaşım Tür Seçimi (7 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom araç 	Toplu taşıma 	Otonom uçan taksi 	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	44 dk	35 dk	9 dk	
Araca yürüme/bekleme süresi	0 dk	17 dk	26 dk	
Yolculuk maliyeti	50 ₺	8 ₺	240 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Orta	Çok	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Kısmen var	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)**'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Orta Gelecekte (2035-2050) Ulaşım Tür Seçimi (8 / 8)

Ulaşım Türü	Otomobil (sürücü)	Paylaşımlı otonom	Otonom uçan taksi	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	30 dk	36 dk	7 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	2 dk	15 dk	20 dk	
Yolculuk maliyeti	30 ₺	20 ₺	210 ₺	
Güvenlik seviyesi	Orta	Çok	Az	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Kısmen var	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Yenilikçi ulaşım türlerinin *Orta gelecek (2035-2050)* varsayımlarında tür seçimini tamamladınız.

Lütfen bundan sonraki ulaşım tür seçimlerinizi *Yakın gelecek (2025-2035)* varsayımlarına dayanarak gerçekleştiriniz.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Yakın Gelecekte (2025-2035) Ulaşım Tür Seçimi (1 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom araç 	Paylaşımlı otonom 	Toplu taşıma 	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	52 dk	45 dk	35 dk	
Araca yürüme/bekleme süresi	4 dk	20 dk	17 dk	
Yolculuk maliyeti	45 ₺	40 ₺	8 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Az	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Var	Kısmen var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Yakın Gelecekte (2025-2035) Ulaşım Tür Seçimi (2 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom uçan taksi 	Otonom araç 	Otomobil (sürücü) 	HiçBiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	5 dk	28 dk	30 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	23 dk	2 dk	4 dk	
Yolculuk maliyeti	270 ₺	70 ₺	50 ₺	
Güvenlik seviyesi	Çok	Az	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Kısmen var	Yok	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Yakın Gelecekte (2025-2035) Ulaşım Tür Seçimi (3 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom uçan taksi	Toplu taşıma	Otonom araç	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	7 dk	65 dk	40 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	26 dk	15 dk	0 dk	
Yolculuk maliyeti	210 ₺	5 ₺	95 ₺	
Güvenlik seviyesi	Çok	Orta	Az	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Var	Kısmen var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılabilir, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)**'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Yakın Gelecekte (2025-2035) Ulaşım Tür Seçimi (4 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom 	Toplu taşıma 	Otomobil (sürücü) 	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	60 dk	50 dk	42 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	10 dk	17 dk	0 dk	
Yolculuk maliyeti	30 ₺	11 ₺	65 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Orta	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Kısmen var	Yok	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)**'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Yakın Gelecekte (2025-2035) Ulaşım Tür Seçimi (5 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom	Otonom uçan taksi	Otomobil (sürücü)	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	45 dk	5 dk	18 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	15 dk	26 dk	2 dk	
Yolculuk maliyeti	40 ₺	240 ₺	30 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Çok	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Kısmen var	Var	Yok	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Yakın Gelecekte (2025-2035) Ulaşım Tür Seçimi (6 / 8)

Ulaşım Türü	Toplu taşıma 	Otonom uçan taksi 	Otonom araç 	Hiçbiri: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	50 dk	9 dk	40 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	19 dk	20 dk	4 dk	
Yolculuk maliyeti	8 ₺	270 ₺	70 ₺	
Güvenlik seviyesi	Orta	Çok	Az	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Kısmen var	Yok	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)'in** toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Yakın Gelecekte (2025-2035) Ulaşım Tür Seçimi (7 / 8)

Ulaşım Türü	Otonom uçan taksi	Toplu taşıma	Paylaşımlı otonom	HiçBİRİ: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	7 dk	35 dk	30 dk	
Araca yürüme/bekleme süresi	23 dk	17 dk	10 dk	
Yolculuk maliyeti	210 ₺	5 ₺	20 ₺	
Güvenlik seviyesi	Çok	Orta	Az	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Yok	Kısmen var	Var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

1. Paylaşımlı otonom araç, kullanıcılar arasında paylaşarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.

2. Otomobil (sürücü)'in toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.

3. Çok güvenli anlamı; araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.

4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler, araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

Bölüm 5 – Ulaşım Tür Seçimi

Lütfen 15 km'lik bir yolculuk (tek yön) yaptığınızı dikkate alın.

Aşağıda yer alan ulaşım türleri tek seçeneğiniz olsaydı, hangisini seçerdiniz?

Yakın Gelecekte (2025-2035) Ulaşım Tür Seçimi (8 / 8)

Ulaşım Türü	Paylaşımlı otonom 	Otonom uçan taksi 	Otonom araç 	HİÇBİRİ: Bunlardan hiçbirini seçmezdim.
Araçta yolculuk süresi	60 dk	5 dk	28 dk	
Araça yürüme/bekleme süresi	15 dk	20 dk	4 dk	
Yolculuk maliyeti	20 ₺	270 ₺	95 ₺	
Güvenlik seviyesi	Az	Çok	Orta	
Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler	Var	Yok	Kısmen var	
	Seç	Seç	Seç	Seç

Dipnotlar:

- 1. Paylaşımlı otonom araç,** kullanıcılar arasında paylaşılarak kullanılabilen, duruma göre; belirli bir rota ve süre için rezervasyon yapılarak veya kiralanarak, otomasyon ve paylaşım ekonomisi ilkesiyle çalışan ve otonom araç teknolojisiyle birlikte gelecekte yaygın bir şekilde tercih edilmesi beklenen ulaşım türü.
- 2. Otomobil (sürücü)'in** toplam yolculuk maliyeti, km başına amortisman, yakıt, sigorta, vergi, bakım içermektedir. Ayrıca seyahatlerde park yeri mevcut olacak ve park ücreti seyahat maliyetine entegre edilecektir.
- 3. Çok güvenli anlamı;** araç kullanırken meydana gelen kaza oranının en az yarısı anlamına gelir. **Az güvenli** anlamı; araç kullanırken kaza oranının iki katına çıkması anlamına gelir.
- 4. Sürüş sırasında yapılabilecek faaliyetler,** araç hareket halindeyken çoklu iş yapabilme yeteneğidir. Örneğin kitap okuma, çalışma, uyuma vb.

EK-D

Tablo D.1 Literatürde yaygın olarak kullanılan otonom araç parametreleri ve parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılan referanslar

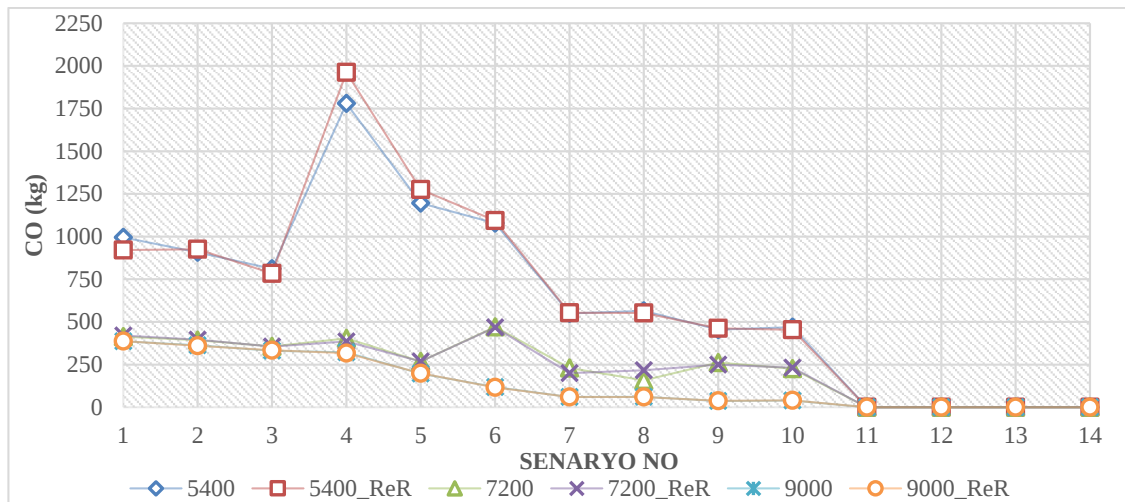
Parametreler	Açıklama	Referanslar
<i>carFollowingModel</i>	araç takibi için kullanılan model	(Krauß, 1998; Salles vd., 2020; Treiber ve Kesting, 2017)
<i>laneChangeModel</i>	şerit değiştirmek için kullanılan model	(Erdmann, 2015)
<i>minGap</i>	araçların dururken minimum boşluk (m)	(Arısoy, 2017; Kavas-Torris vd., 2021; Lu vd., 2018; Pettersson, 2020)
<i>accel</i>	araçların hızlanma yeteneği (m/s^2)	(Lu vd., 2018; Pettersson, 2020)
<i>speedFactor</i>	şerit hız limitleri çarpanı ve araçlar için istenen maksimum hız	(Lackey, 2019)
<i>tau</i>	sürücünün istediği minimum zaman cinsinden takip aralığı	(Berrazouane, Tong, Solmaz, Kiers ve Erhart, 2019b; Kavas-Torris vd., 2021; Lackey, 2019; Lu vd., 2018; Pettersson, 2020)
<i>sigma</i>	sürücü kusuru (0 mükemmel sürüşü belirtir)	(Arısoy, 2017; Berrazouane vd., 2019b; Jayasinghe, Sivakumar ve Kumarge, 2021; Kavas-Torris vd., 2021; Lu vd., 2018; Pettersson, 2020)
<i>lcStrategic</i>	stratejik şerit değiştirmeyi gerçekleştirme isteği	Jayasinghe vd., 2021; Kavas-Torris vd., 2021; Lackey, 2019; F. Wang vd., 2021)
<i>lcCooperative</i>	işbirlikçi şerit değiştirme eğilimi	(Jayasinghe vd., 2021; Kavas-Torris vd., 2021; Lackey, 2019; F. Wang vd., 2021)
<i>lcSpeedGain</i>	hız kazanımları için şerit değiştirme isteği	(Berrazouane vd., 2019b; Jayasinghe vd., 2021; Kavas-Torris vd., 2021; Lackey, 2019)
<i>lcLookaheadLeft</i>	sol yönlü değişiklikler için stratejik öngörü mesafe faktörünü yapılandırma	(Kavas-Torris vd., 2021; Lackey, 2019)
<i>lcOpposite</i>	karşı şeritten geçerek sollama yapma isteği	(Kavas-Torris vd., 2021; Lackey, 2019)
<i>lcPushy</i>	diğer sürücülere yan yoldan müdahale etme eğilimi	(Jayasinghe vd., 2021)
<i>lcAssertive</i>	hedef şeritte daha düşük ön ve arka mesafeleri kabul etme isteği.	(Berrazouane vd., 2019b; Kavas-Torris vd., 2021; Lackey, 2019)
<i>emissionClass</i>	emiyon sınıfı	(Keller vd., 2010; Koch vd., 2021)
<i>actionStepLength</i>	araçların karar mantığını gerçekleştirdiği aralık uzunluğu	(F. Wang vd., 2021)
<i>stepping</i>	takip hızını hesaplarken içsel adım uzunluğu (s cinsinden)	(Lackey, 2019)

Tablo D.2 Otonom araç parametreleri

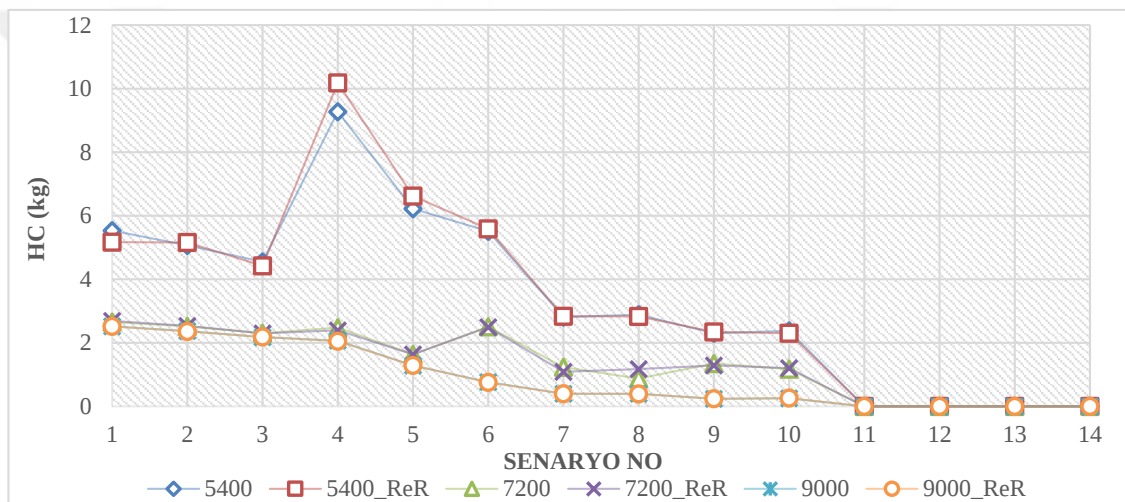
No	Model Parametreleri	Seviye 0	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
	Taşıt Türü Parametreleri	Krauss Araç Takip Modeli		Intelligent Driver Model (IDM) Araç Takip Modeli	Extended Intelligent Driver Model (EIDM) Araç Takip Modeli		
1	<i>minGap</i>	2,5	2	1,5	1,25	0,75	0,5
2	<i>length</i>	5	5	5	5	5	5
3	<i>maxSpeed (m/s)</i>	55,55	55,55	44,44	44,44	44,44	44,44
4	<i>desiredMaxSpeed</i>	2778	2778,00	2778	2778	2778,00	2778,00
5	<i>speedFactor</i>	normc(1.00,0.1 0.0.20,2.00)	normc(1,0.1, 0.99,1.01)	normc(1,0.1,0. 99,1.01)	normc(1,0.1, 0.98,1.02)	normc(1,0.1, 0.98,1.1)	normc(1,0.1,0. 98,1.1)
6	<i>emissionClass</i>	PC_G_EU4	PC_G_EU4	PC_G_EU4	MMPEVEM/ default	MMPEVEM/ default	MMPEVEM/ default
7	<i>width</i>	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
8	<i>laneChangeModel</i>	SL2015	SL2015	SL2015	SL2015	SL2015	SL2015
9	<i>latAlignment</i>	merkez	merkez	merkez	merkez	merkez	merkez
10	<i>minGapLat</i>	0,6	0,8	0,8	0,6	0,5	0,4
11	<i>maxSpeedLat</i>	1	1	1	1	1,2	1,2
12	<i>actionStepLength</i>	0,9	0,9	0,9	0,6	0,3	0,3
Kavşak Modeli Parametreleri							
13	<i>jmCrossingGap</i>	10	10	10	10	10	10
14	<i>jmIgnoreKeepClearTime</i>	-1	-1	-1	-1	-1	-1
15	<i>jmDriveAfterRedTime</i>	0	0	-1	-1	-1	-1
16	<i>jmDriveAfterYellowTime</i>	0	0	-1	-1	-1	-1
17	<i>jmDriveRedSpeed</i>	55,55	55,55	44,44	44,44	44,44	44,44
18	<i>jmIgnoreFoeProb</i>	0,3	0,2	0,25	0,1	0,05	0
19	<i>jmIgnoreFoeSpeed</i>	8	8	5	5	0	0
20	<i>jmSigmaMinor</i>	0,5	0,4	0,3	0,2	0,05	0,01
21	<i>jmTimegapMinor</i>	1	1	1	1	1	1
22	<i>impatience</i>	0,3	0,3	0,2	0,15	0,1	0,05
Şerit Değişirme Model Parametreleri							
23	<i>lcStrategic</i>	1	1,1	1,2	1,6	3	5
24	<i>lcCooperative</i>	0,2	0,3	0,5	0,6	1	1
25	<i>lcSpeedGain</i>	0,9	1,1	1,2	1,6	5	10
26	<i>lcKeepRight</i>	1	1	2	1,8	1,2	1,2
27	<i>lcSublane</i>	3	2,5	2	1	0,75	0,5
28	<i>lcOpposite</i>	2	1,5	1	0,6	0,3	0,1
29	<i>lcPushy</i>	0,25	0,25	0,2	0,1	0	0
30	<i>lcPushyGap</i>	0,6	0,8	0,8	0,6	0,5	0,4
31	<i>lcAssertive</i>	1	1	1	2	3	3
32	<i>lcImpatience</i>	0	0	0	0,5	1	1

Tablo D.2 (Devamı)

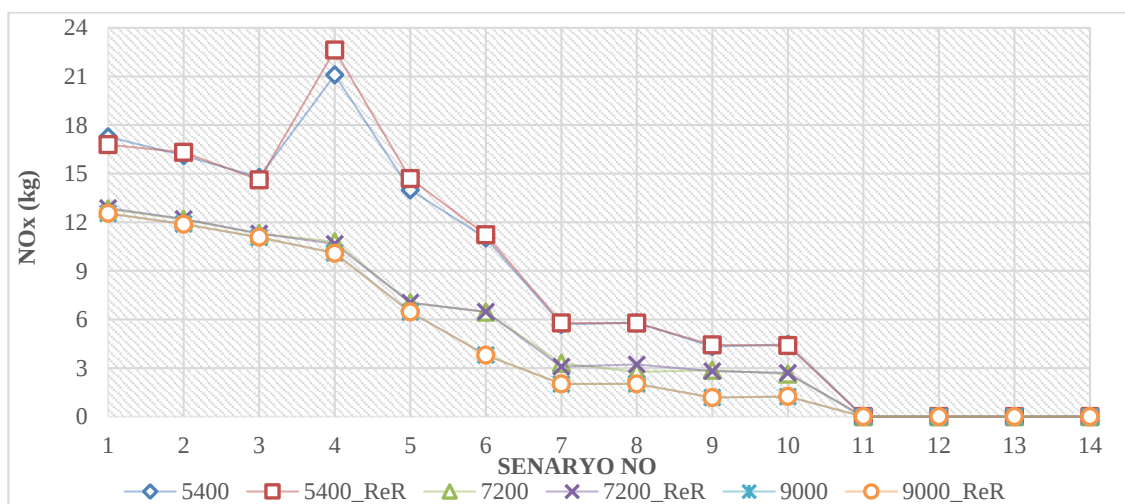
33	<i>lcTimeToImpatience</i>	sonsuz	sonsuz	sonsuz	sonsuz	sonsuz	sonsuz
34	<i>lcAccelLat</i>	1	1	1,5	2	2,25	2,5
35	<i>lcLookaheadLeft</i>	2	2	2	2,5	3	3,5
36	<i>lcSpeedGainRight</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
37	<i>lcMaxSpeedLatStanding</i>	1	1	1	1	1,2	1,2
38	<i>lcMaxSpeedLatFactor</i>	1	1	1	1	1,2	1,2
39	<i>lcTurnAlignmentDistance</i>	0	0	0	0	0	0
40	<i>lcOvertakeRight</i>	0	0	0	0	0	0
41	<i>lcKeepRightAcceptanceTime</i>	-1	-1	-1	-1	-1	-1
42	<i>lcOvertakeDeltaSpeedFactor</i>	0	0	0,2	0,4	0,6	0,8
Araç Takip Model Parametreleri							
43	<i>accel</i>	2,6	2,6	3,05	3,5	3,6	3,8
44	<i>decel</i>	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
45	<i>apparentDecel</i>	4,5	4,5	-	-	-	-
46	<i>emergencyDecel</i>	9	9	8	8	8	8
47	<i>tau</i>	1	1,2	1,6	1,2	0,9	0,6
48	<i>sigma</i>	0,5	0,4	0,3	0,2	0,05	0,01
49	<i>collisionMinGapFactor</i>	-	-	1	0,9	0,8	0,7
50	<i>delta</i>	-	-	4	3	2	2
51	<i>stepping</i>	-	-	0,25	0,15	0,1	0,05
52	<i>tpreview</i>	-	-	-	4	5	7
53	<i>treaction</i>	-	-	-	0,5	0,25	0,1
54	<i>tPersDrive</i>	-	-	-	3	1,5	1
55	<i>tPersEstimate</i>	-	-	-	10	5	1
56	<i>ccoolness</i>	-	-	-	0,99	0,5	0,1
57	<i>sigmaleader</i>	-	-	-	0,1	0,02	0,001
58	<i>sigmagap</i>	-	-	-	0,1	0,05	0,01
59	<i>sigmaerror</i>	-	-	-	0,15	0,1	0,02
60	<i>jerkmax</i>	-	-	-	3	2	1
61	<i>epsilonacc</i>	-	-	-	1	1,25	1,5
62	<i>taccmax</i>	-	-	-	2	1,5	1,2
63	<i>Mflarness</i>	-	-	-	2	3,5	5
64	<i>Mbegin</i>	-	-	-	0,7	0,5	0,2
65	<i>vehdynamics</i>	-	-	-	1	1	1



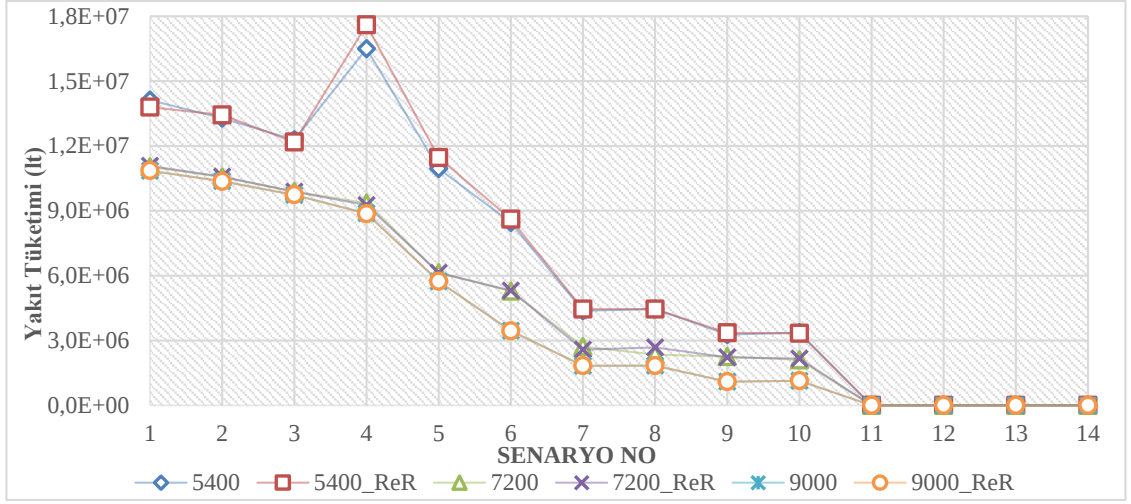
(a)



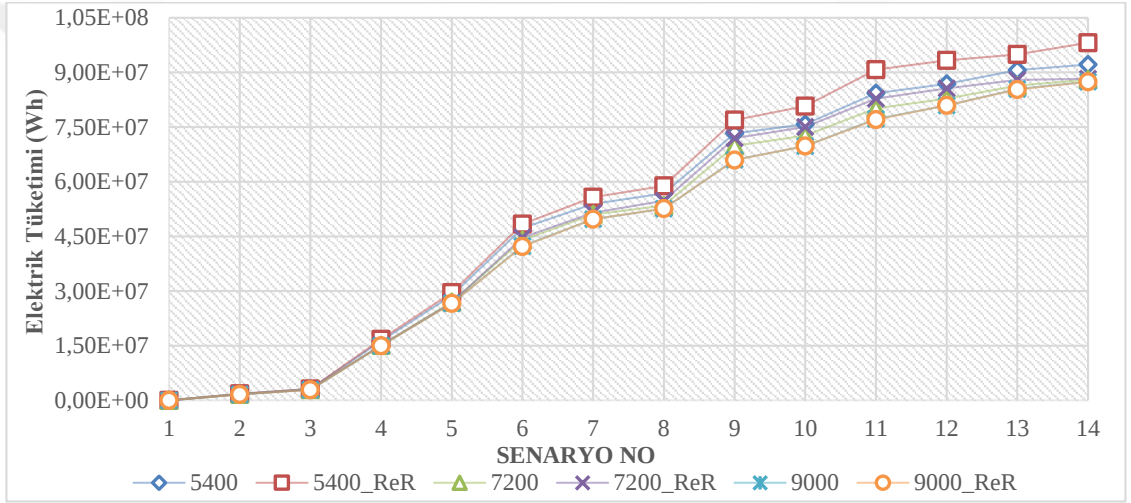
(b)



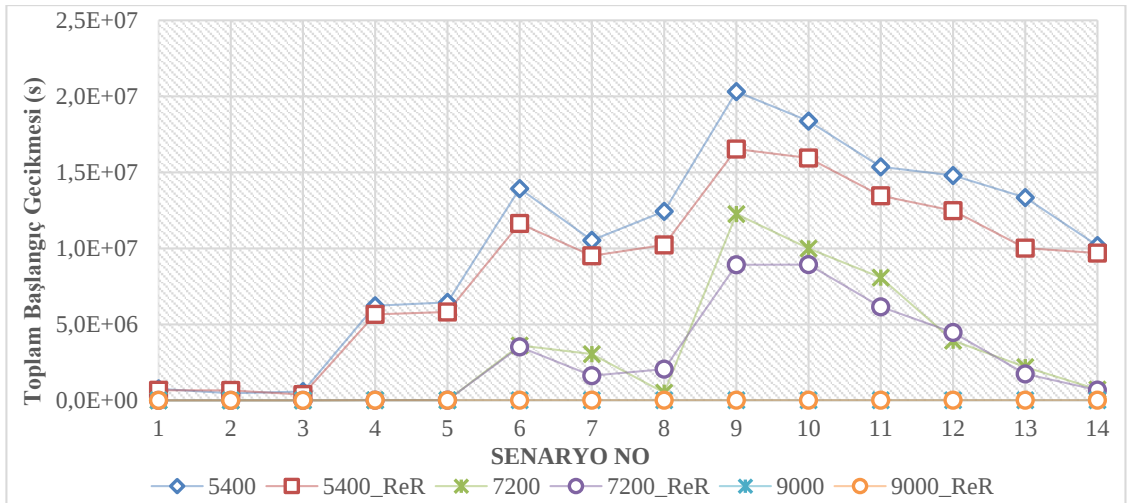
(c)



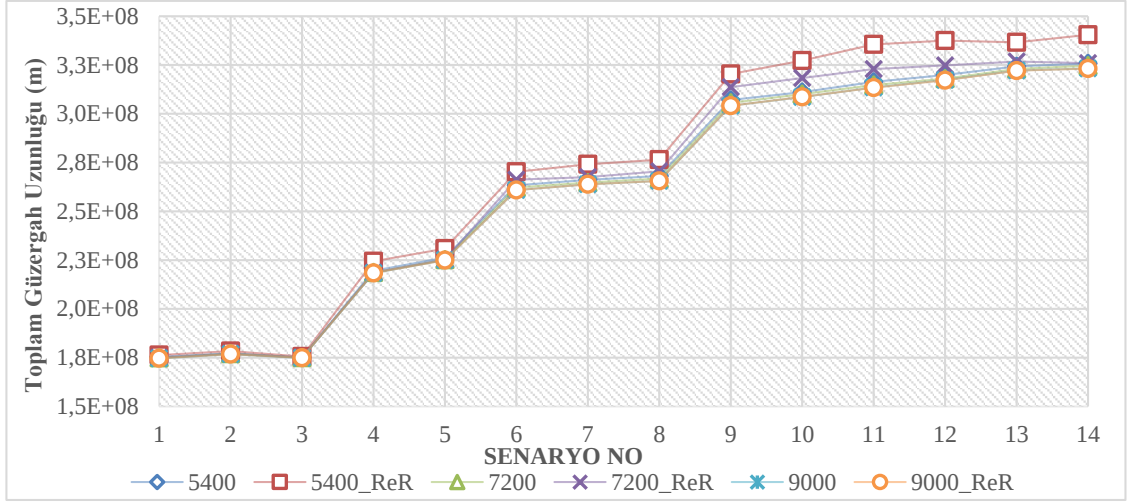
(ç)



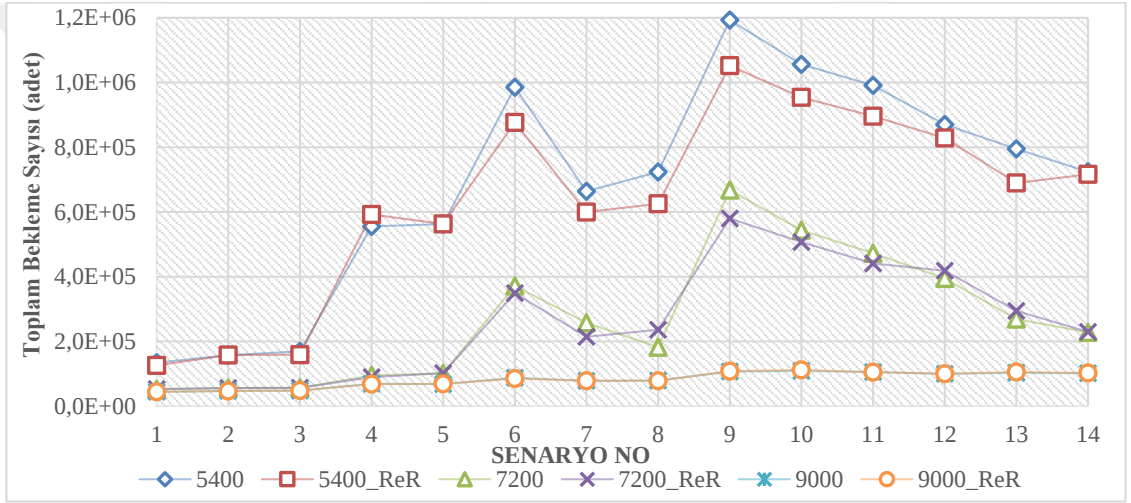
(d)



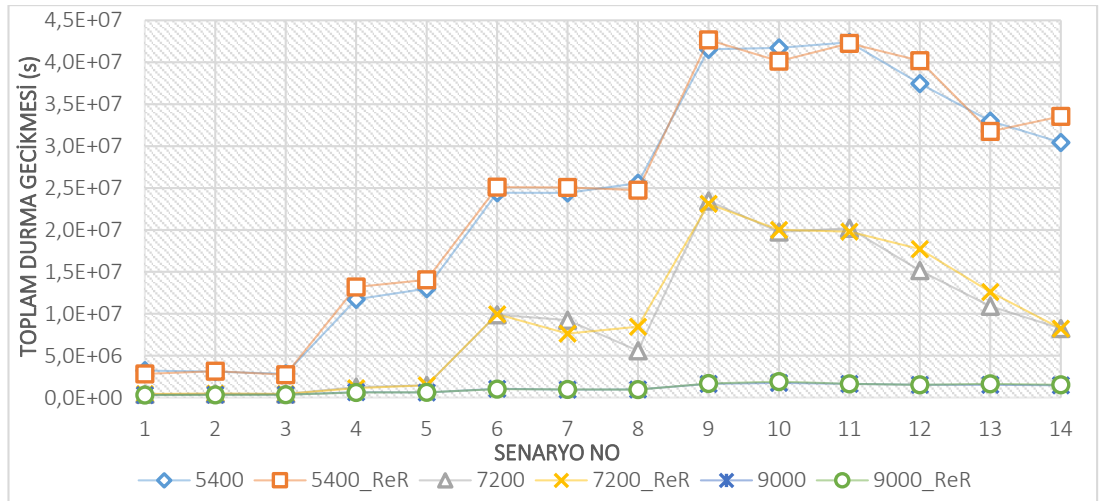
(e)



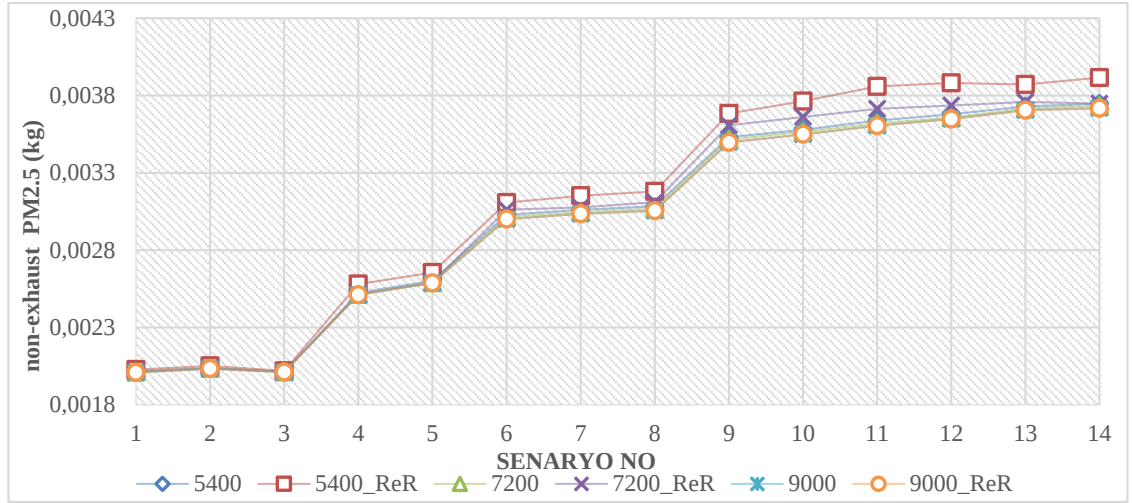
(f)



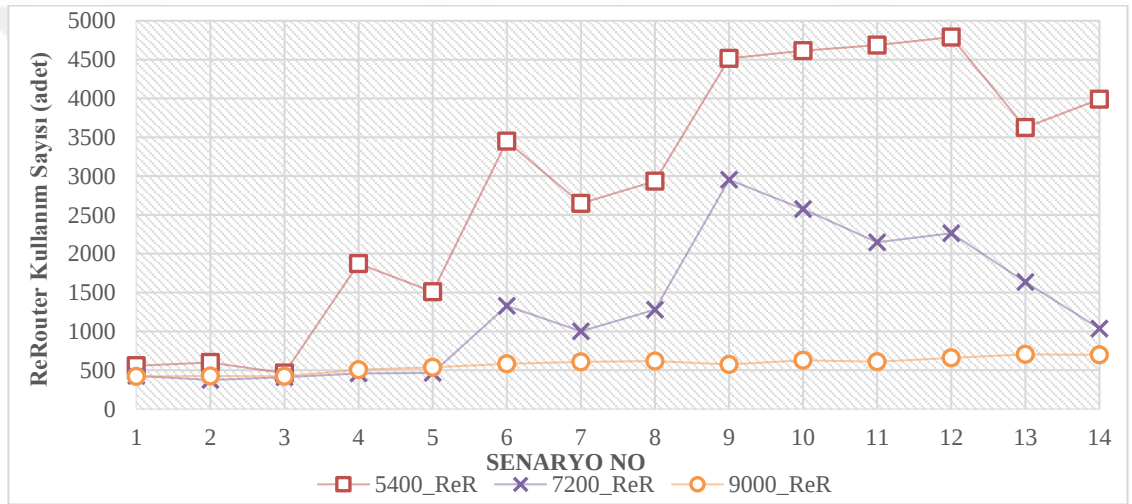
(g)



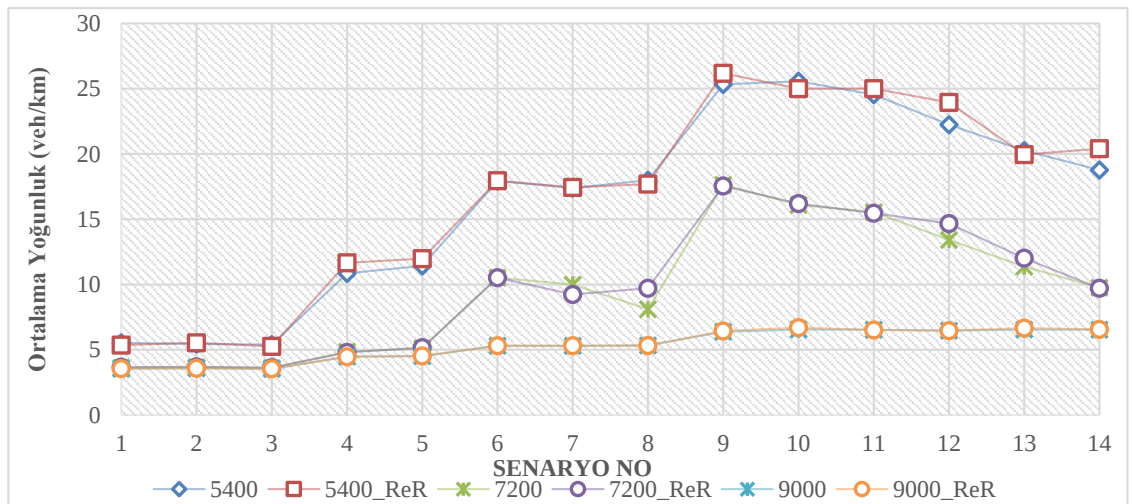
(ğ)



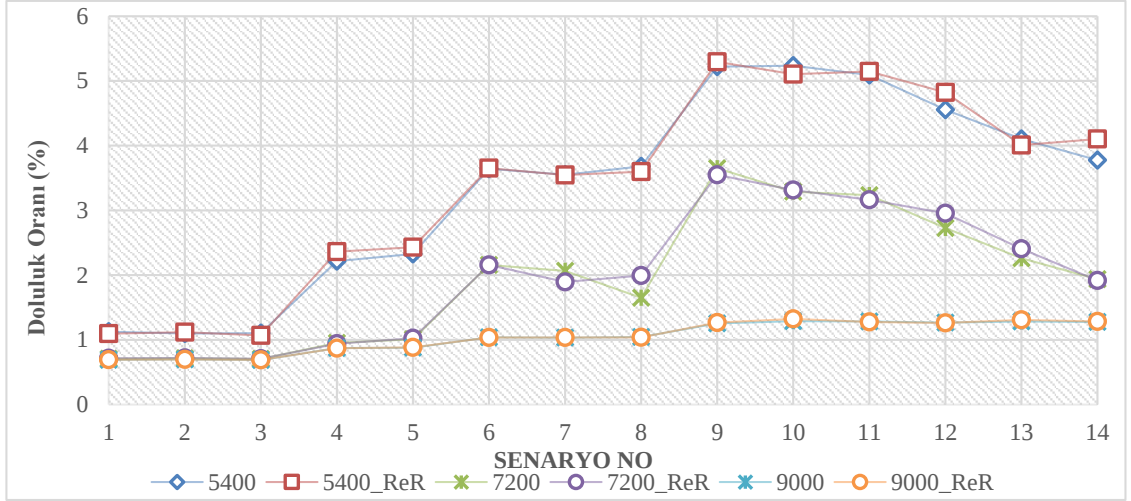
(h)



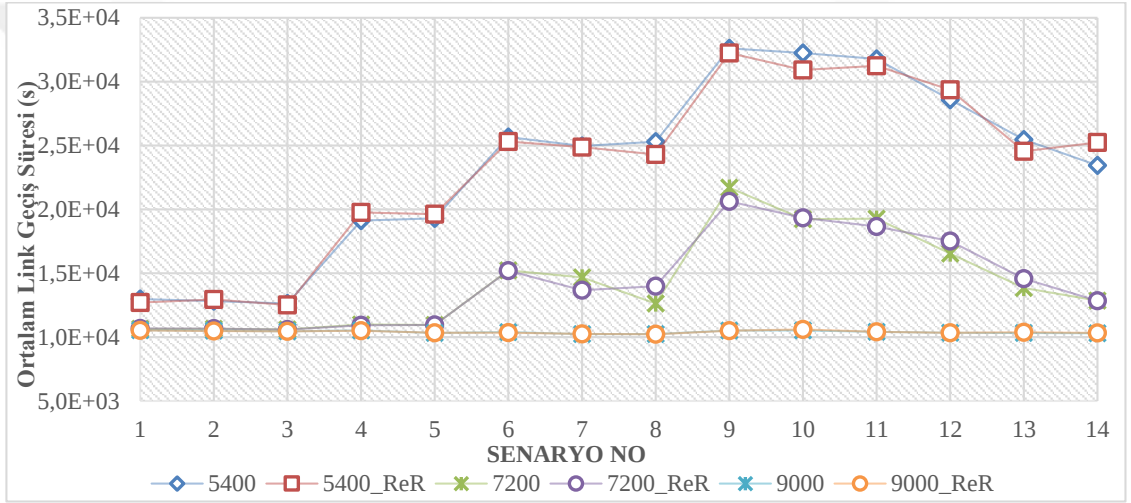
(i)



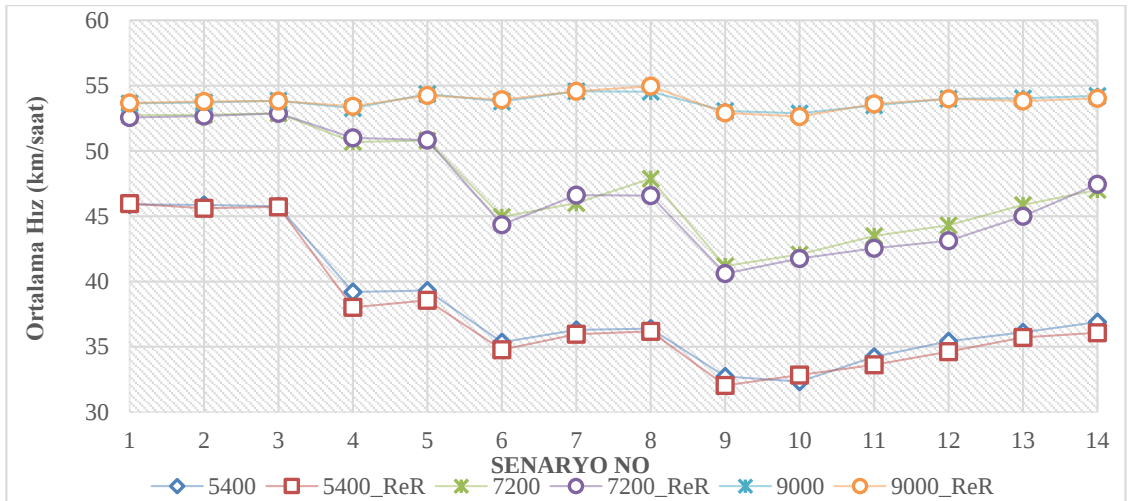
(i)



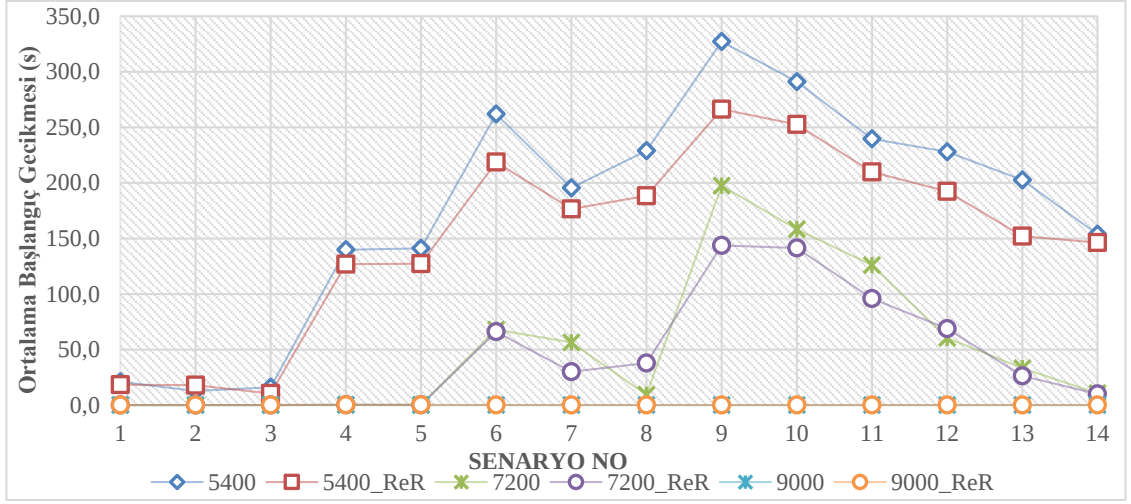
(j)



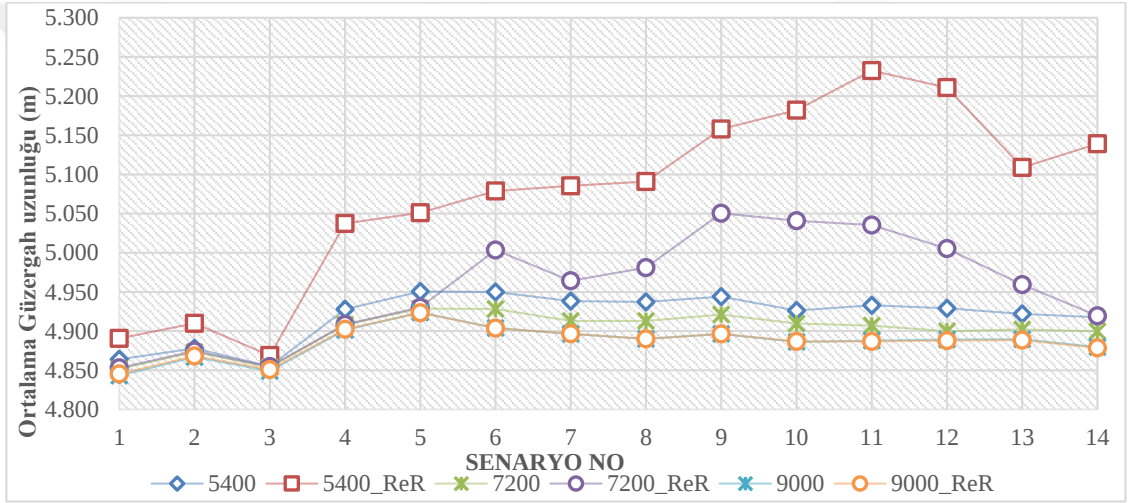
(k)



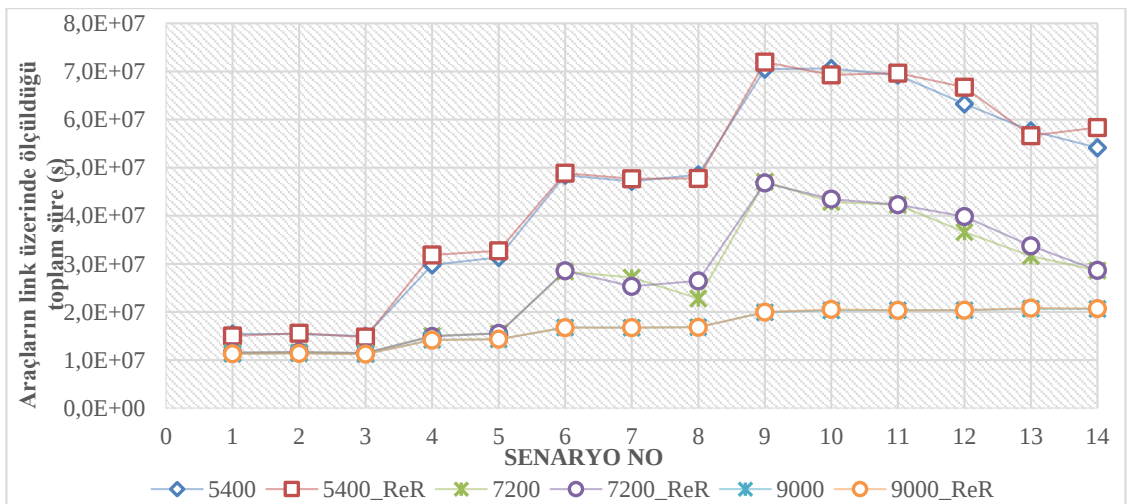
(l)



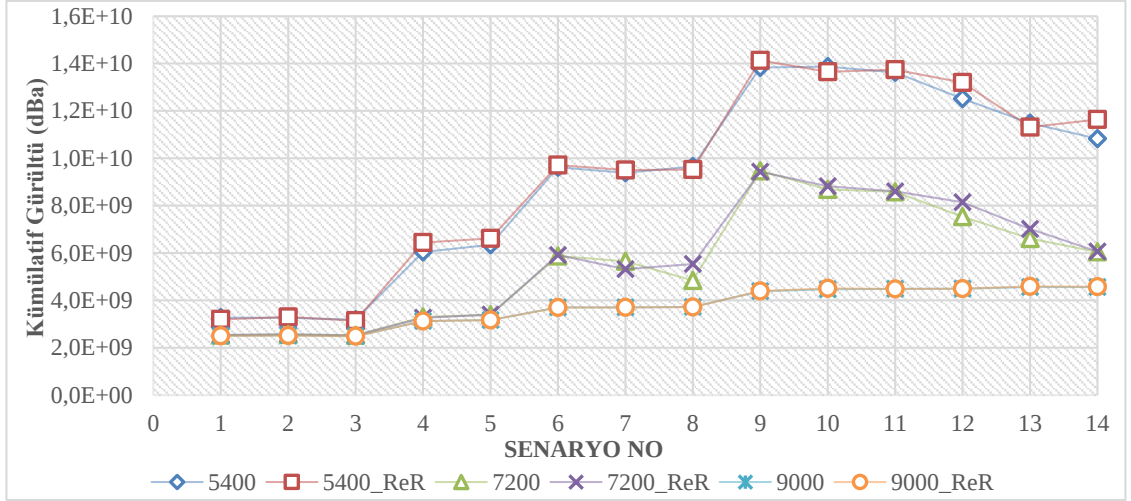
(m)



(n)

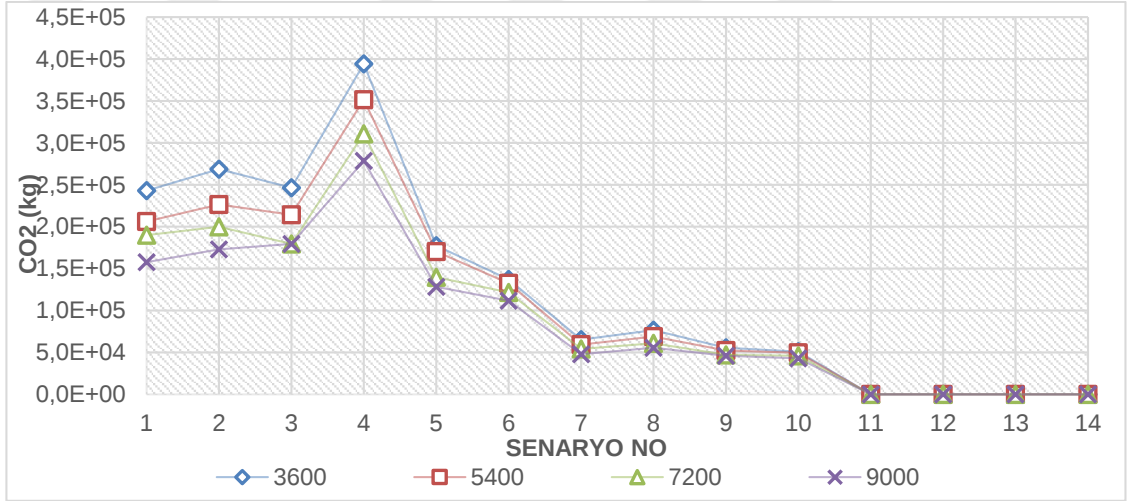


(o)

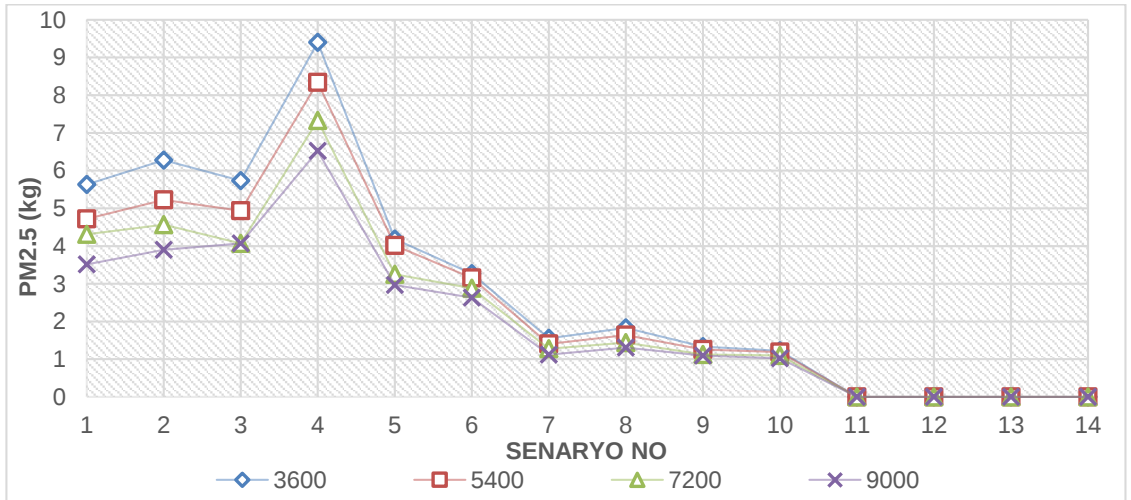


(p)

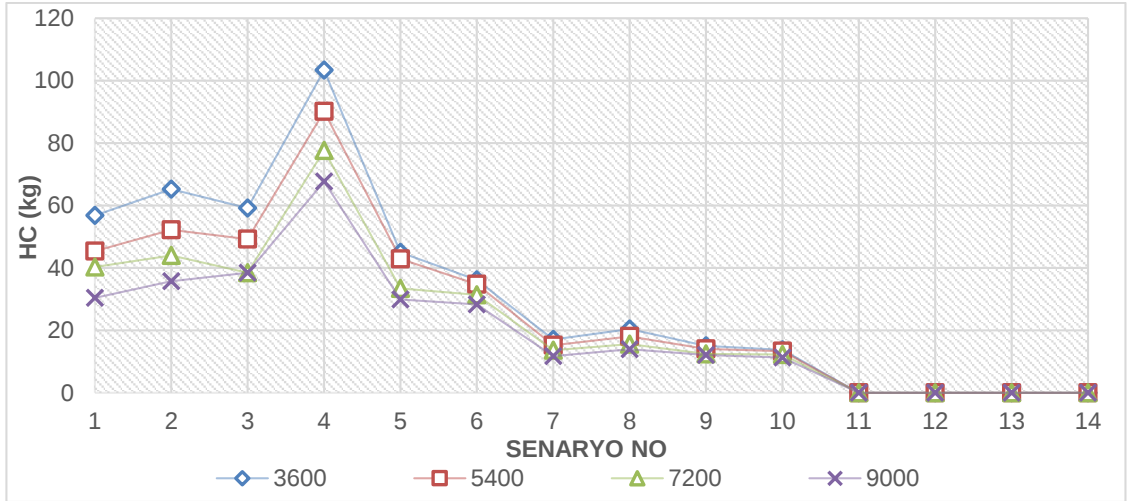
Şekil D.1 Sioux Falls test ağında kıskırtılmış talep simülasyonlarından elde edilen sonuçlar



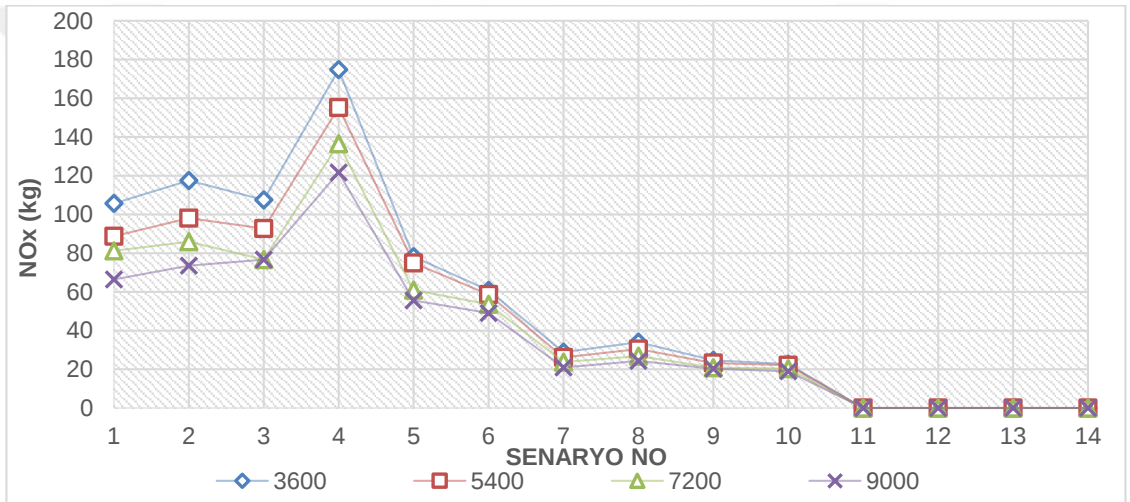
(a)



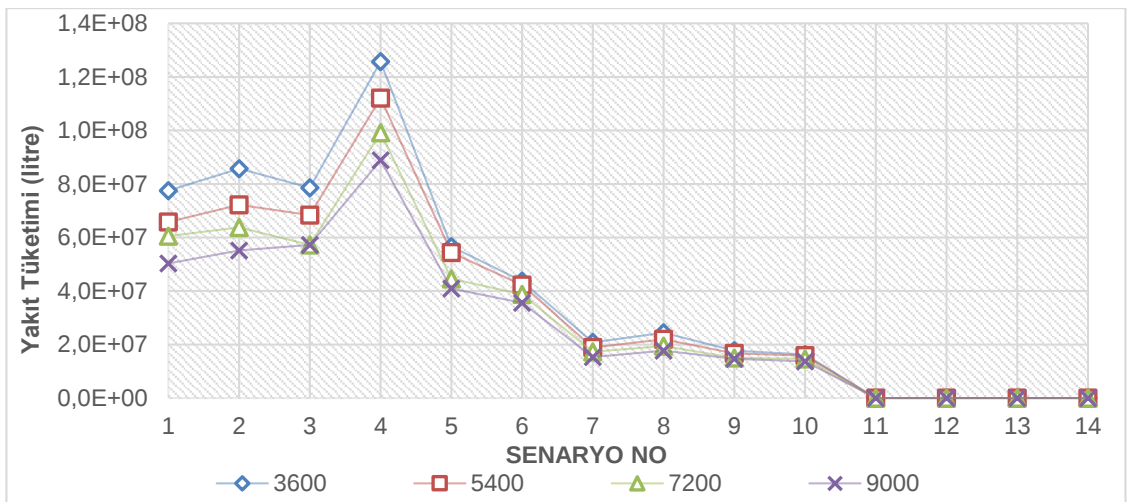
(b)



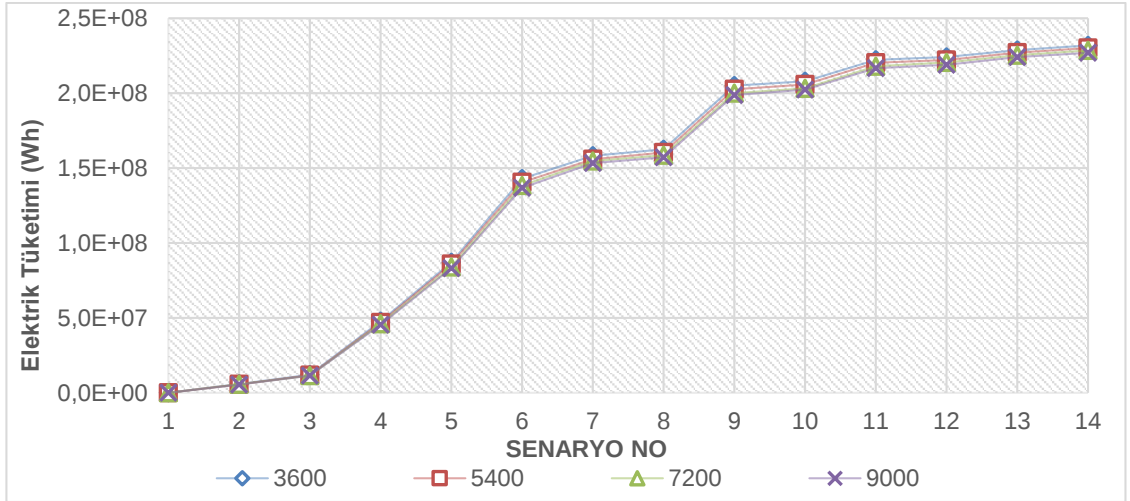
(c)



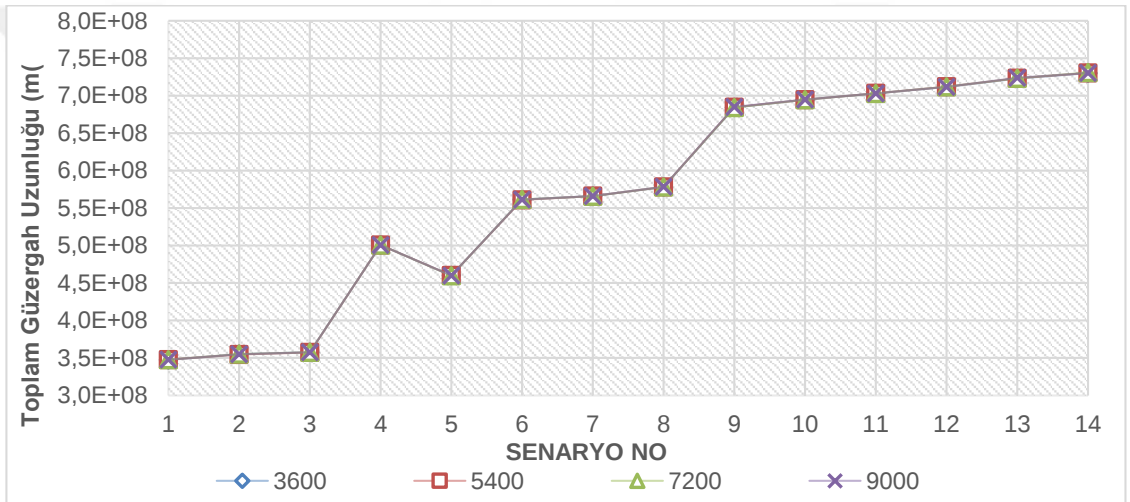
(ç)



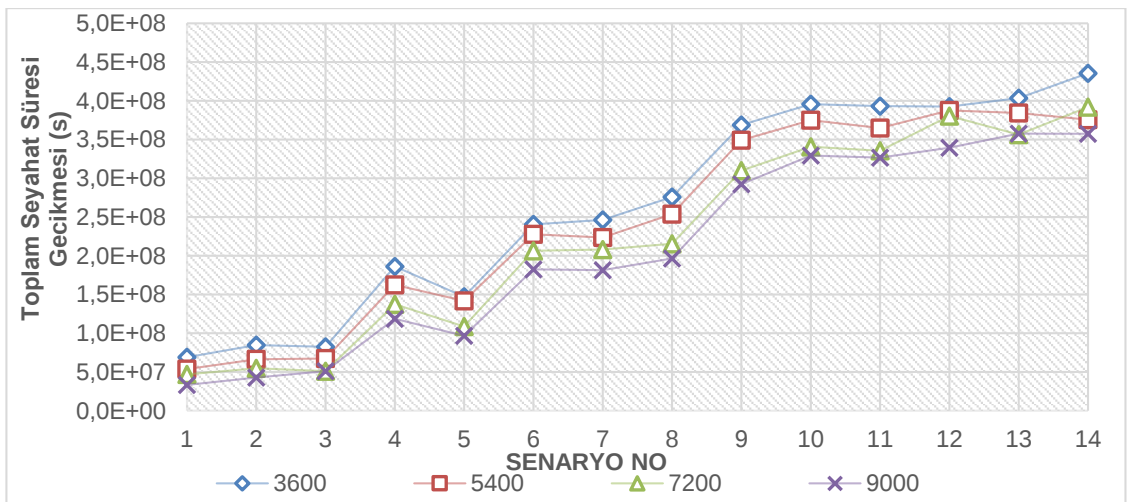
(d)



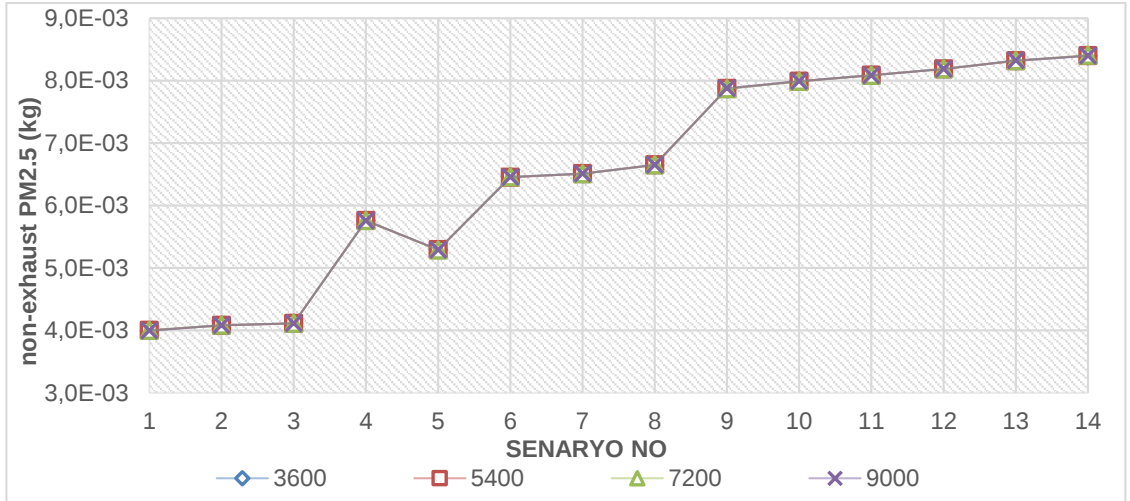
(e)



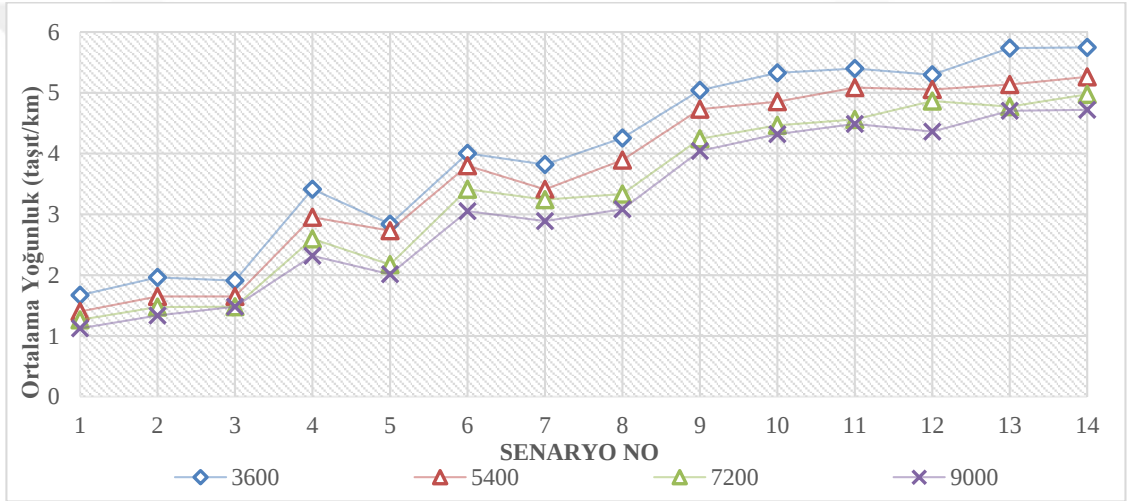
(f)



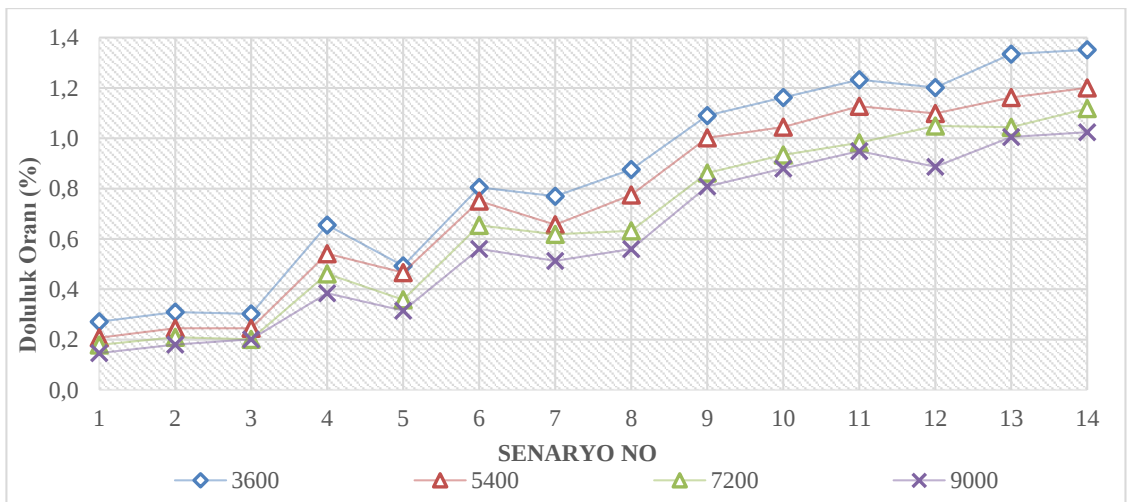
(g)



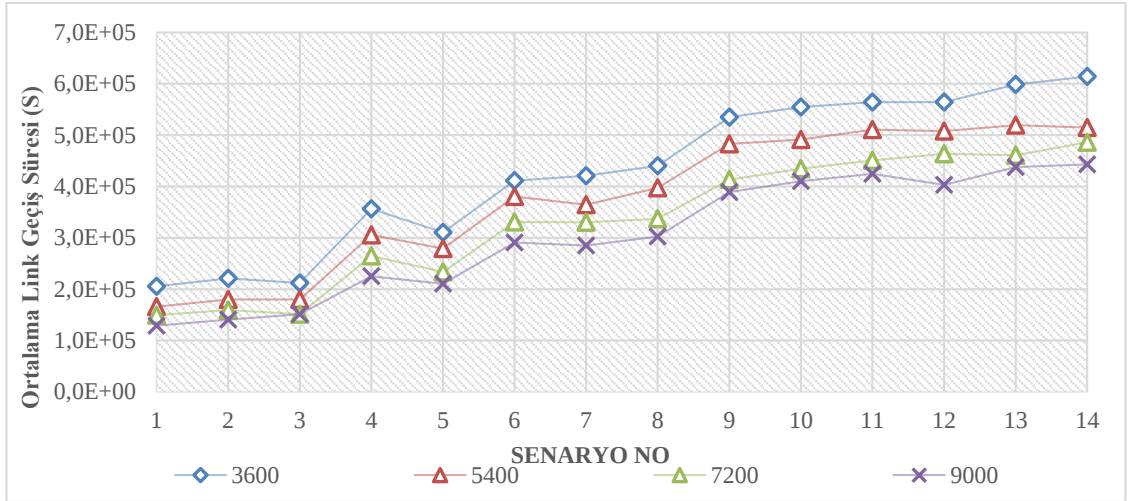
(ğ)



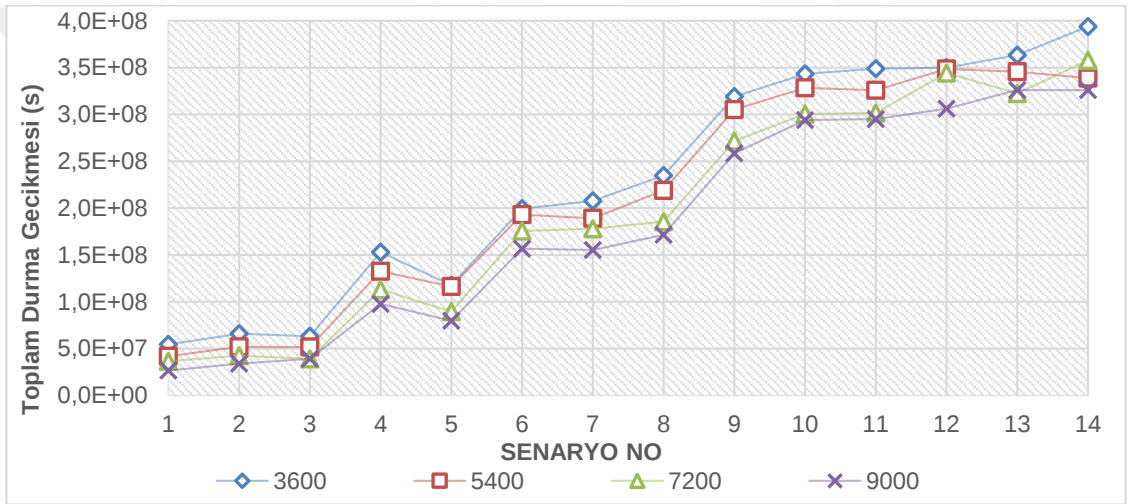
(h)



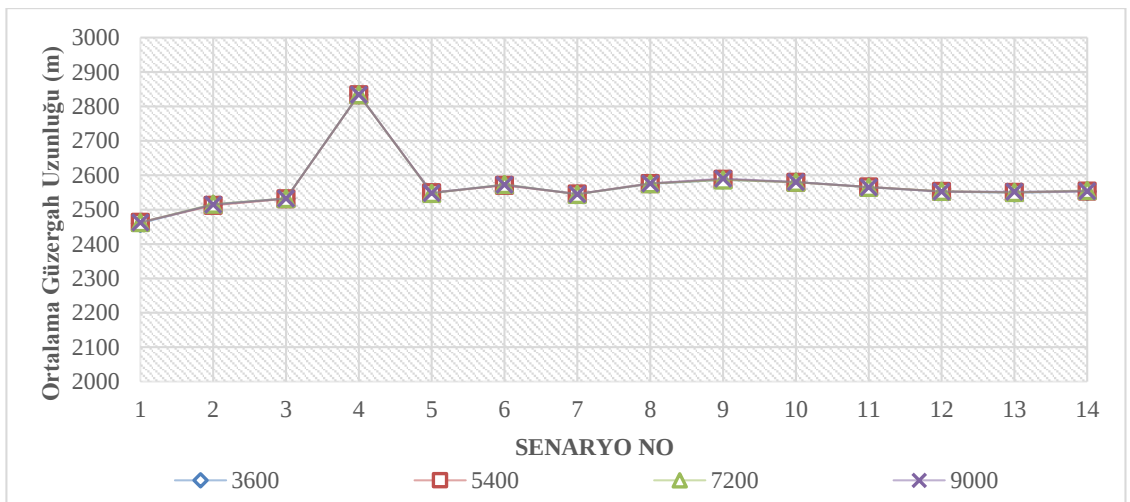
(i)



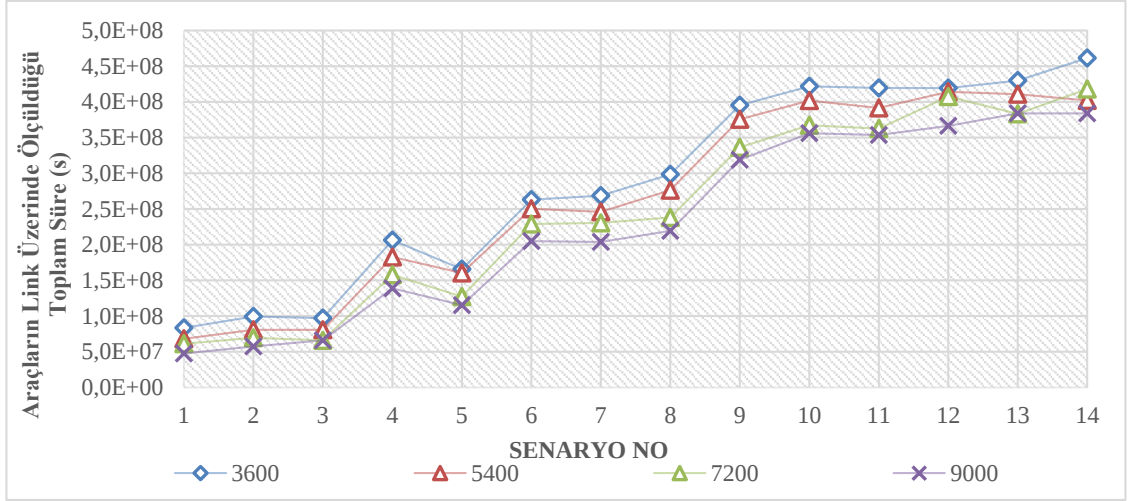
(i)



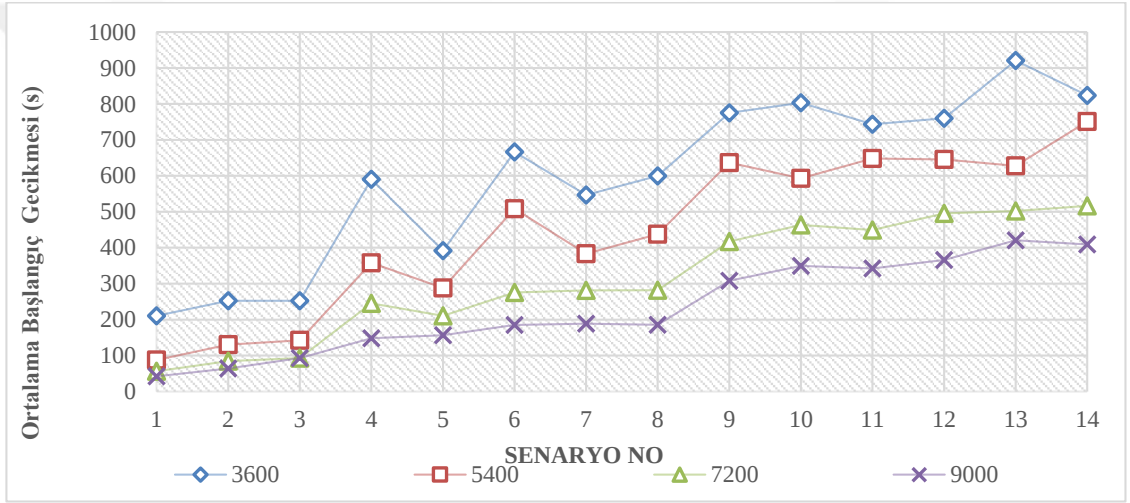
(j)



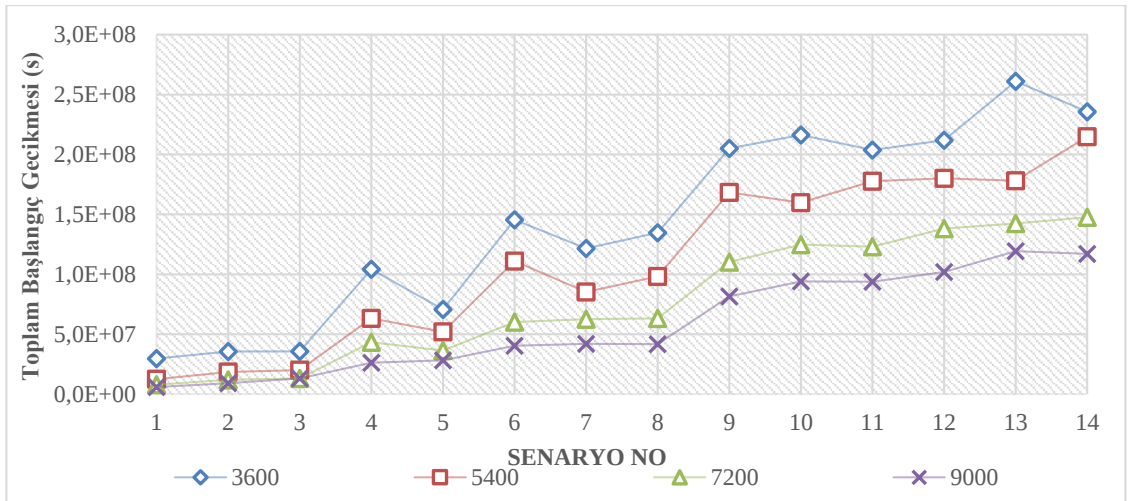
(k)



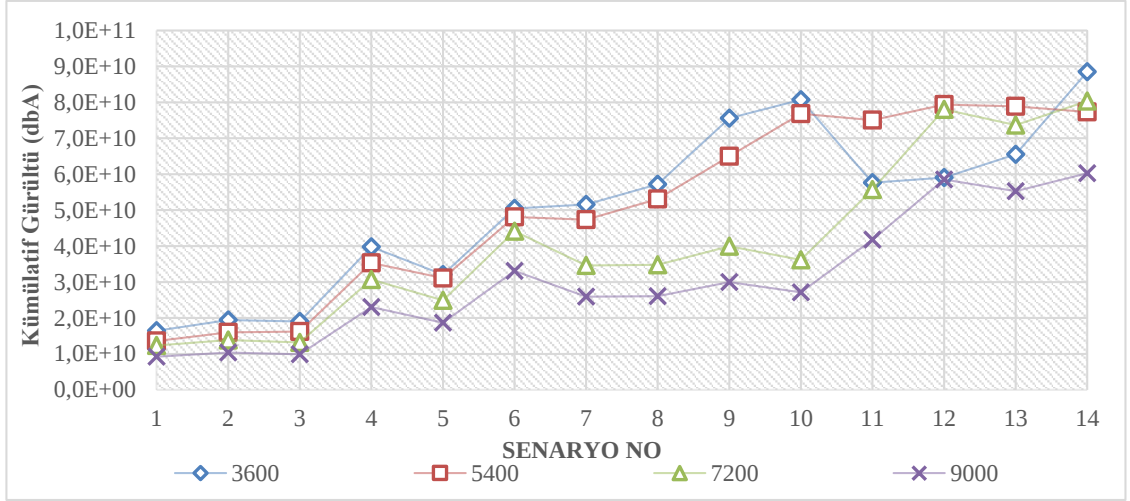
(l)



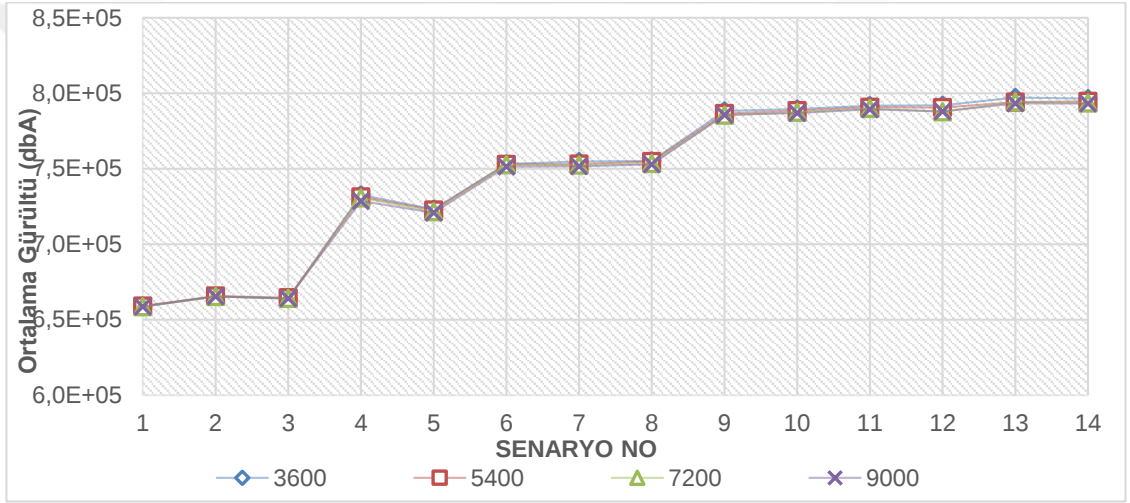
(m)



(n)

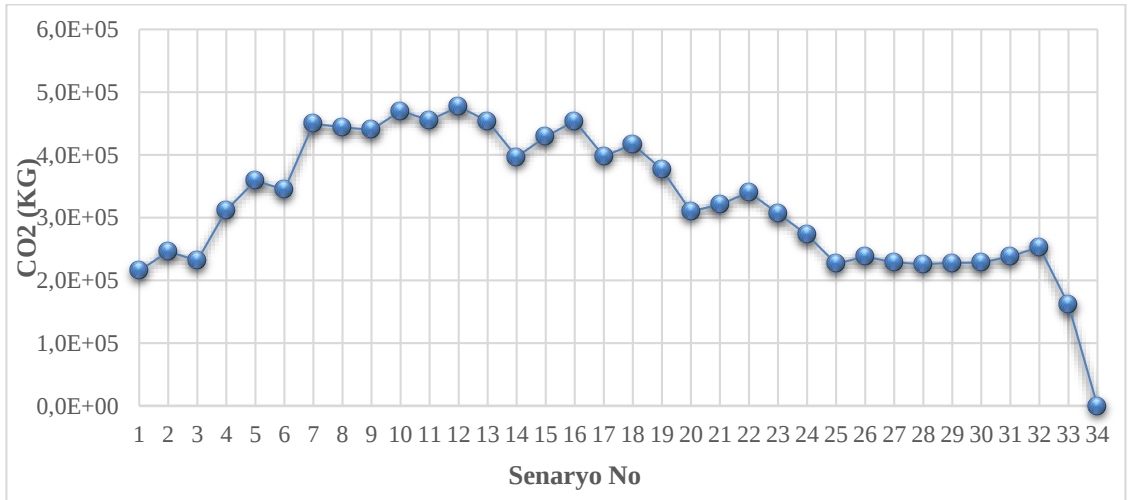


(o)

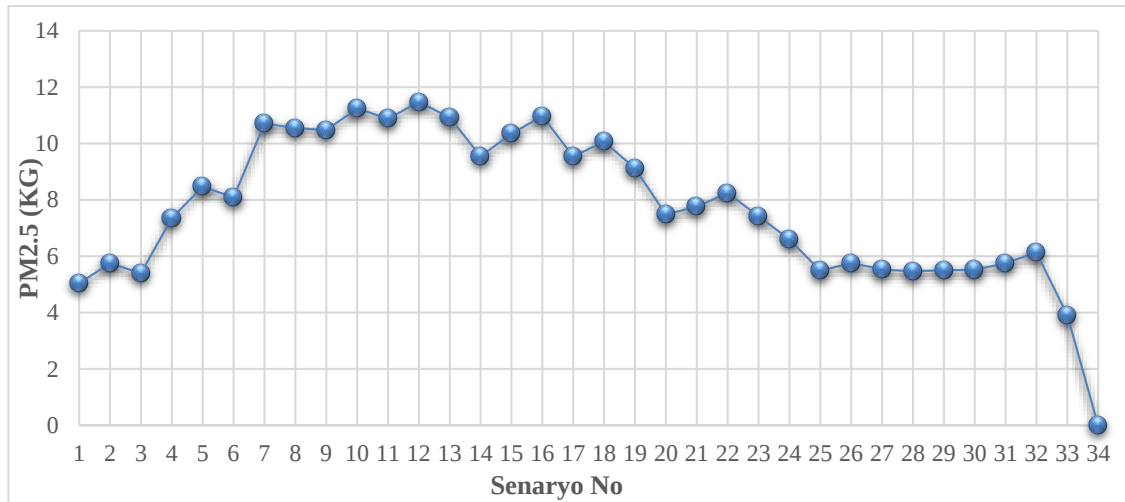


(ö)

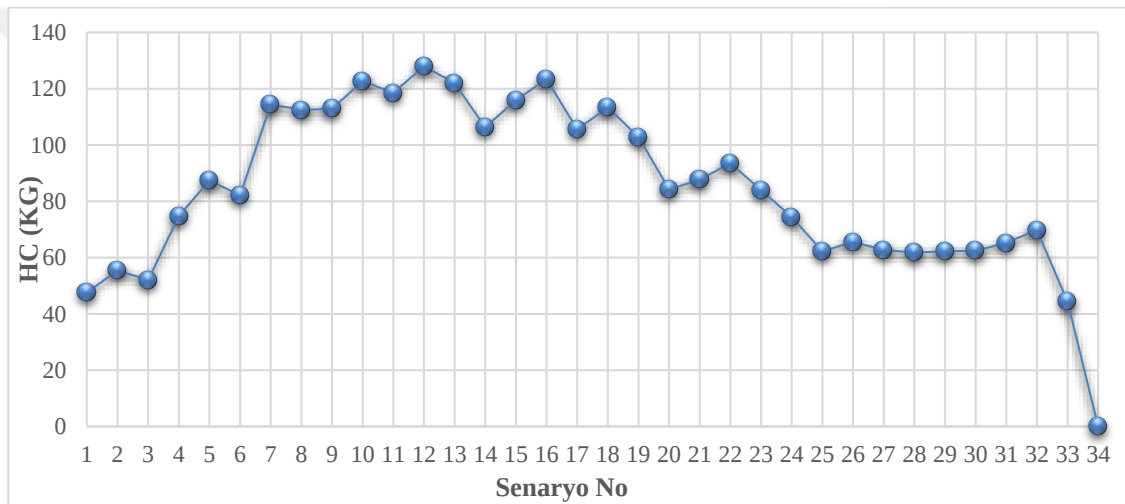
Şekil D.2 İzmir kentsel ulaşım ağında kıskırtılmış talep simülasyonlarından elde edilen sonuçlar



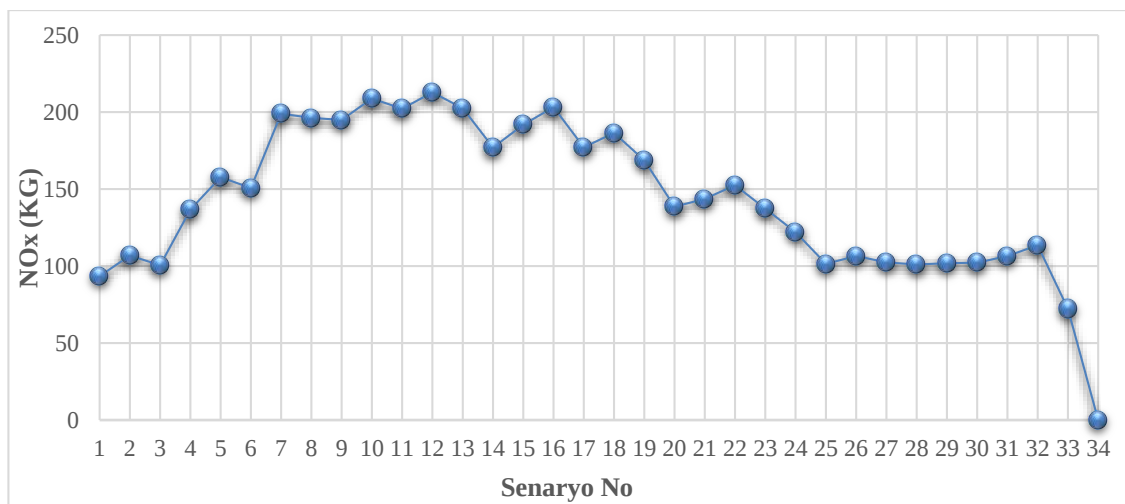
(a)



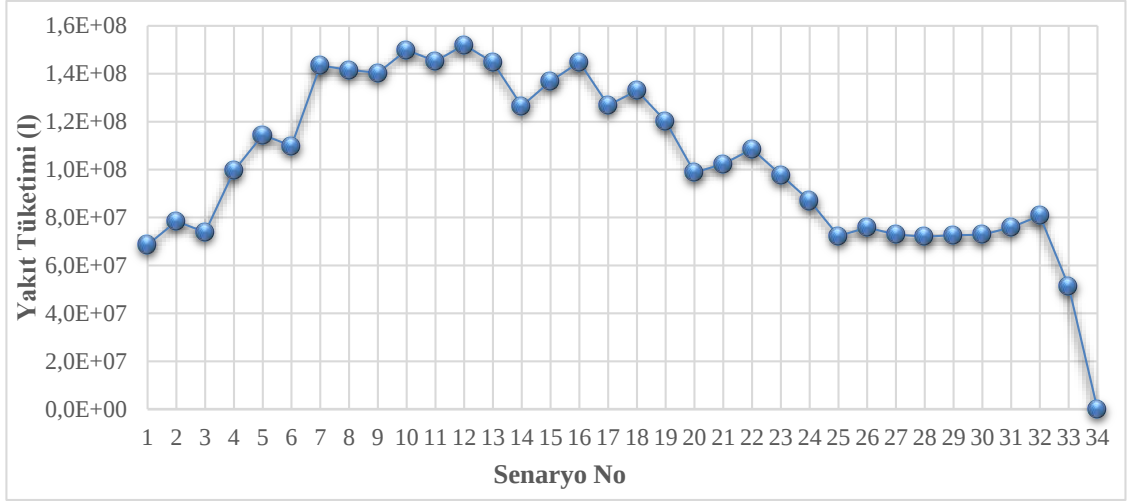
(b)



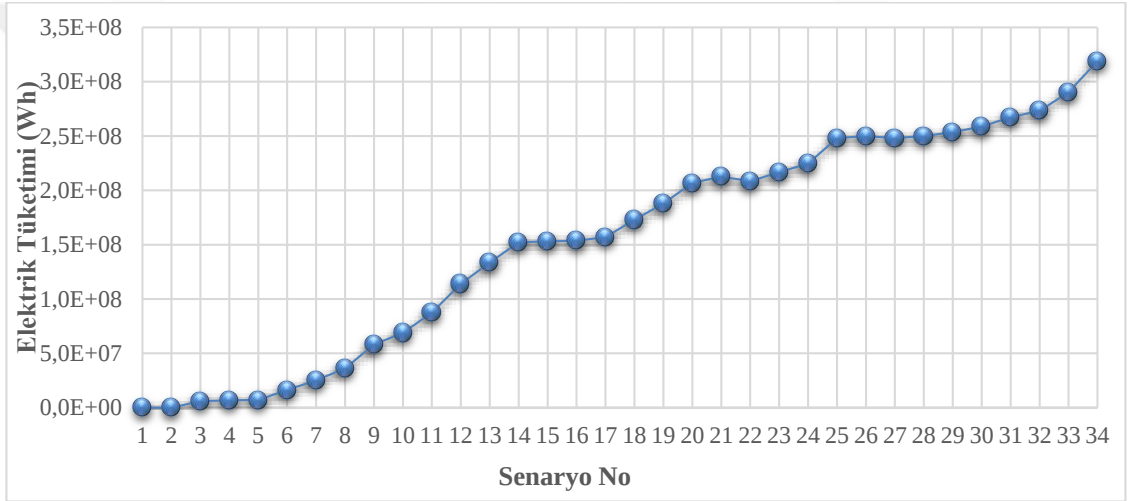
(c)



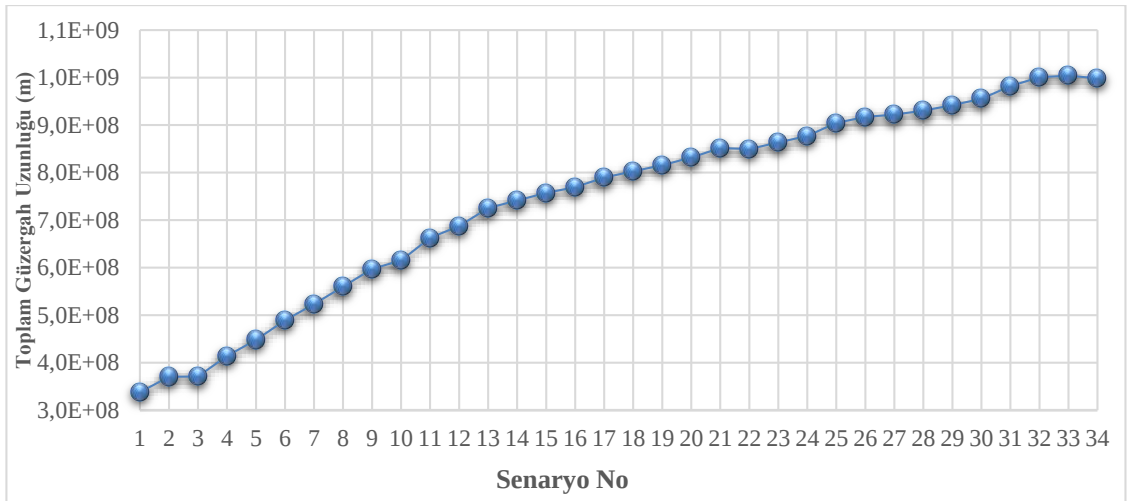
(d)



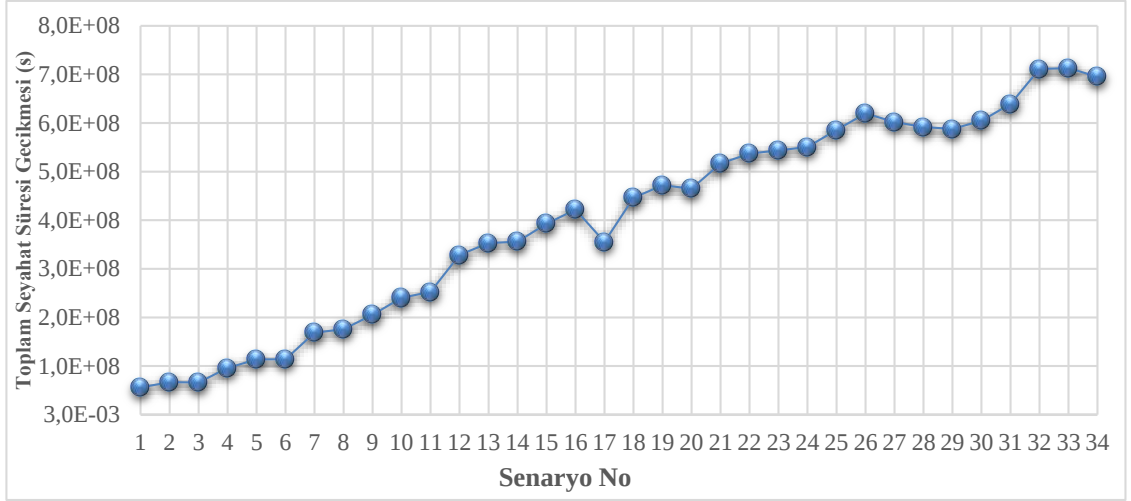
(e)



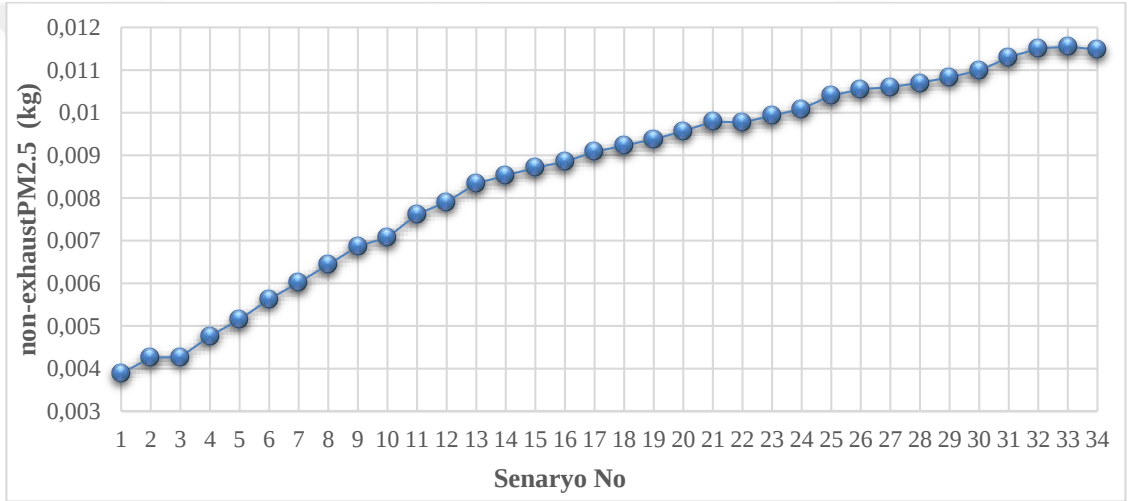
(f)



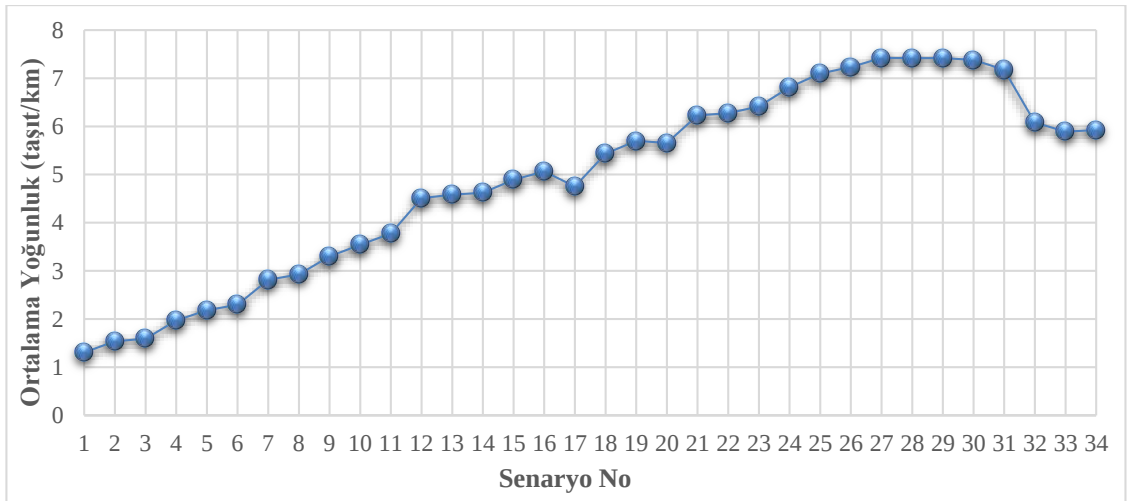
(g)



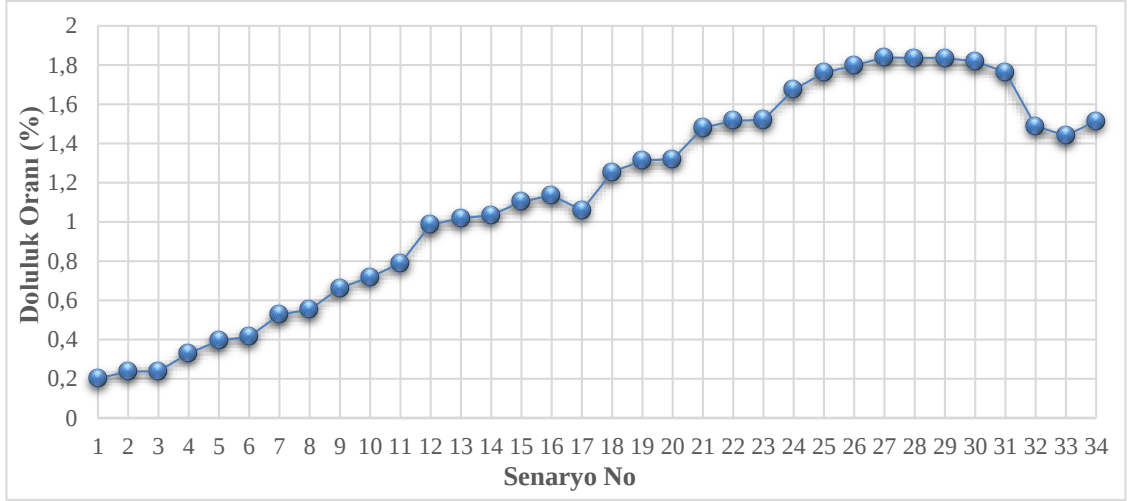
(h)



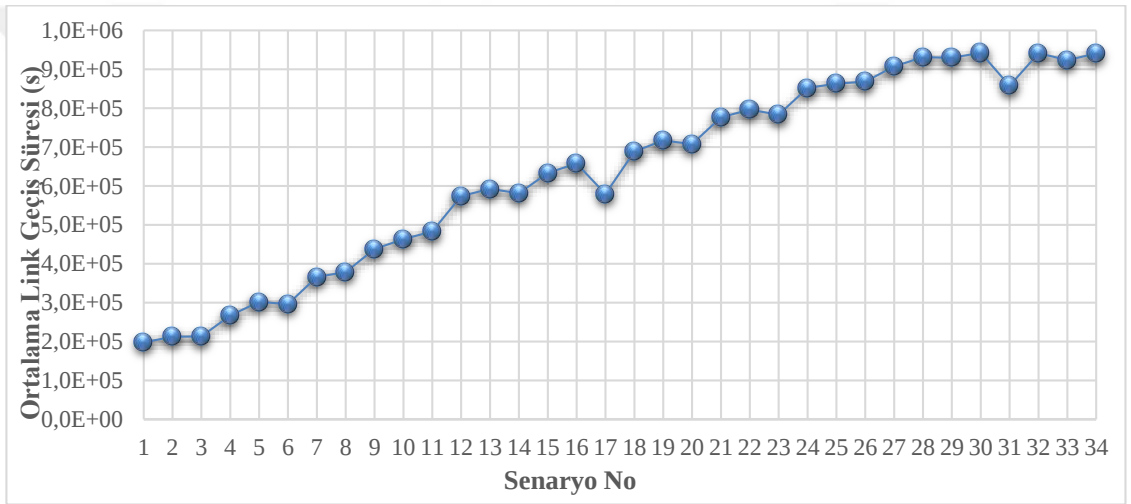
(i)



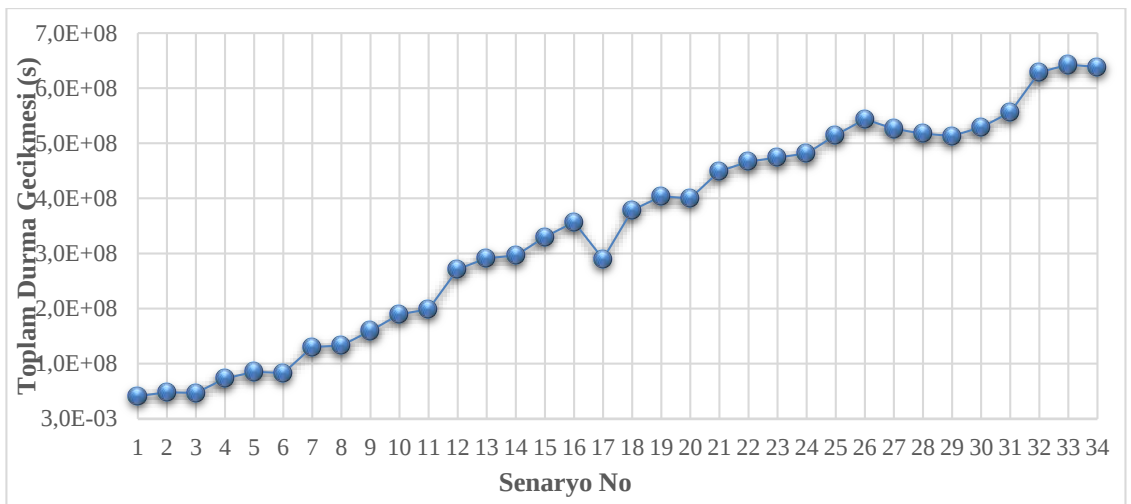
(i)



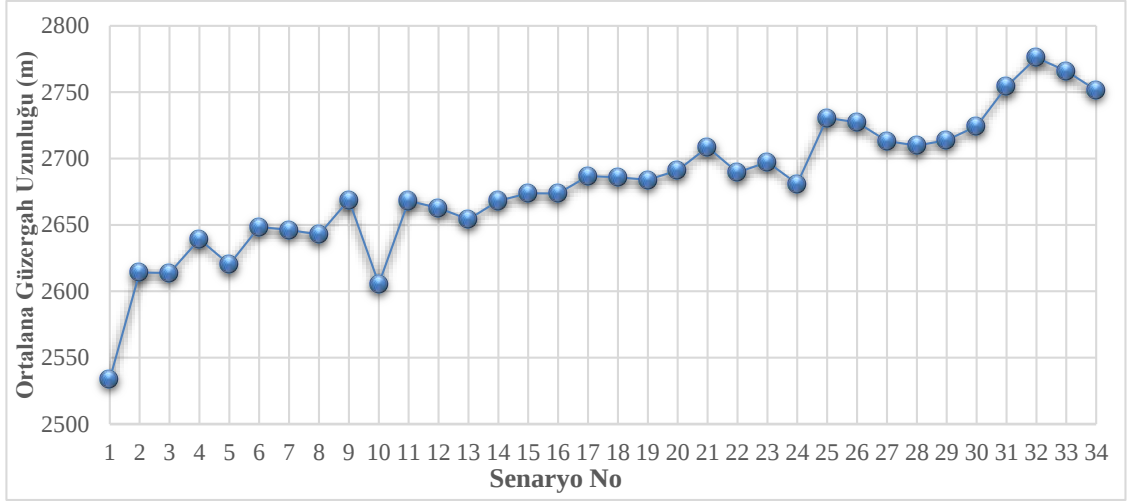
(j)



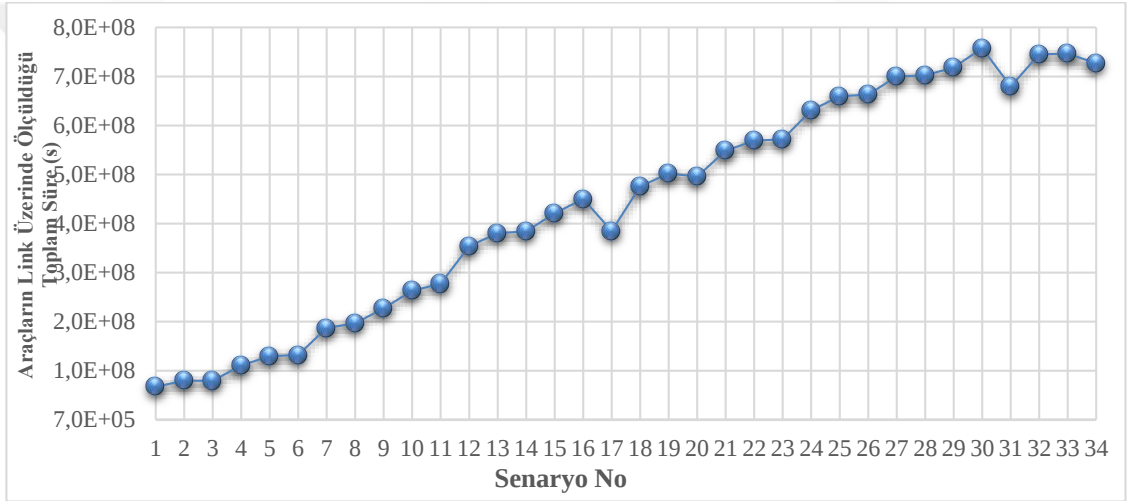
(k)



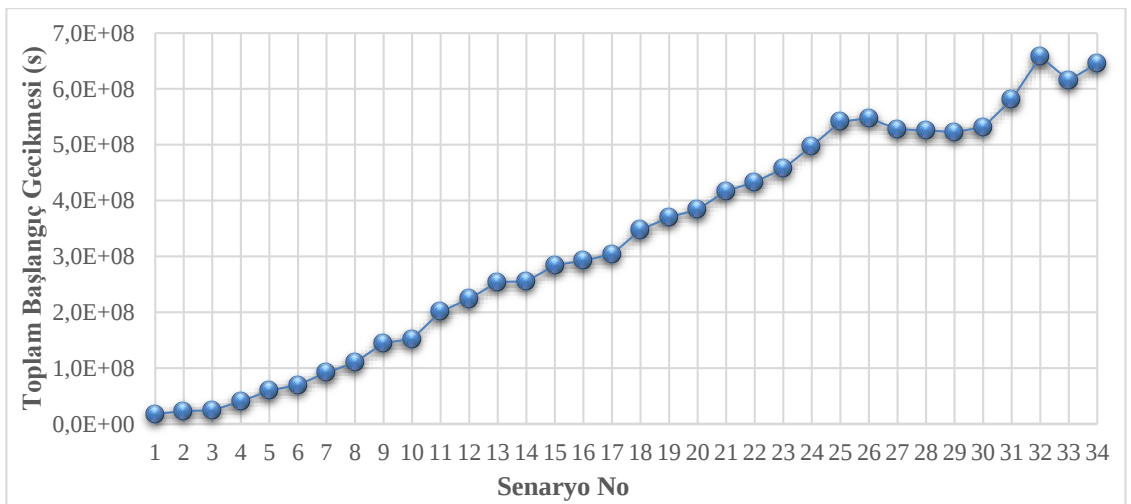
(l)



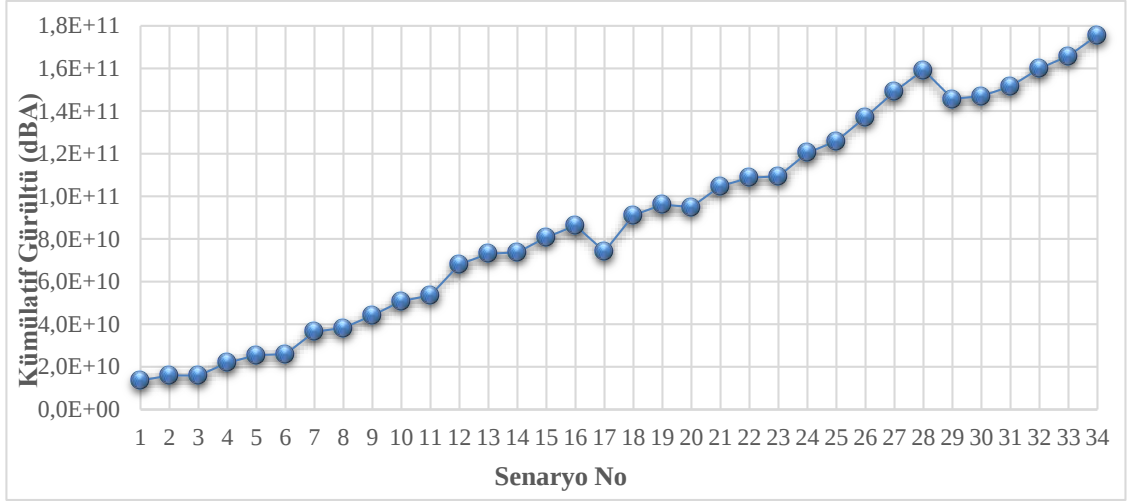
(m)



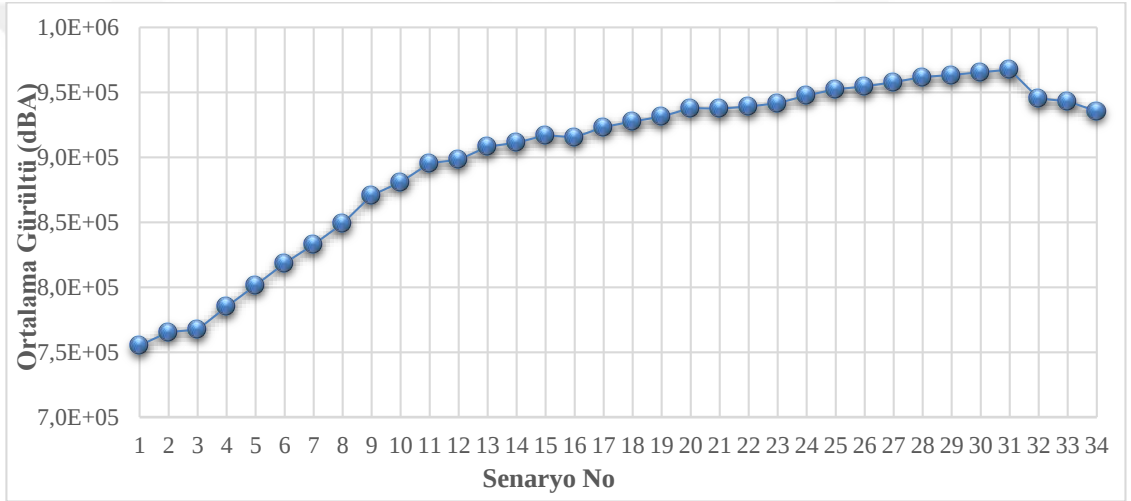
(n)



(o)



(ö)



(p)

Şekil D.3 Kalibrasyon işlemlerin sonra İzmir kentsel ulaşım ağında gerçekleştirilmiş simülasyonlardan elde edilen sonuçlar

Tablo D.3 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 5400 simülasyon adımında SKD

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,46%					21,87%	21,16%		11,95%			17,63%					5,93%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (bin)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBA)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	995,09	17,27	2,02	0,8	5,53	44,30	14,10	0	15,60	12,75	432,62	89,36	134,0	146,79	5,54	1,13	3,28	5628,26
SEN2	907,94	16,11	2,04	0,74	5,07	41,60	13,30	1,44	15,50	12,74	427,11	84,8	157,0	141,66	5,44	1,1	3,26	5629,03
SEN3	811,16	14,77	2,01	0,67	4,55	38,50	12,30	2,53	15,10	12,71	419,07	78,77	169,0	135,29	5,39	1,1	3,18	5624,33
SEN4	1780,08	21,1	2,52	1,03	9,28	51,70	16,50	12,1	30,00	10,89	673,34	262,99	555,0	388,94	10,86	2,22	6,05	5726,14
SEN5	1195,87	13,99	2,60	0,68	6,22	34,30	11,00	20,4	31,50	10,92	690,26	284,37	562,0	407,35	11,43	2,33	6,35	5737,94
SEN6	1078,97	11,03	3,03	0,55	5,51	26,50	8,45	33	48,70	9,82	915,35	459,29	985,0	635,25	17,93	3,64	9,62	5810,62
SEN7	549,53	5,69	3,06	0,28	2,81	13,70	4,38	36,7	47,40	10,08	879,88	453,34	664,0	601,92	17,38	3,55	9,38	5808,59
SEN8	564,39	5,81	3,08	0,29	2,89	14,00	4,46	37,3	48,80	10,11	898,88	471,29	724,0	620,64	18	3,68	9,65	5814,15
SEN9	454,85	4,33	3,53	0,22	2,3	10,30	3,27	48,2	70,90	9,09	1140,89	669,01	1190,0	863,43	25,34	5,22	13,80	5878,89
SEN10	469,61	4,46	3,58	0,23	2,38	10,60	3,37	48,4	71,00	8,98	1123,79	660,73	1060,0	846,93	25,57	5,23	13,90	5882,93
SEN11	0	0	3,64	0	0	0,00	0,00	52,6	69,60	9,51	1085,39	661,1	991,0	809,22	24,55	5,09	13,60	5889,15
SEN12	0	0	3,68	0	0	0,00	0,00	52,4	63,60	9,84	979,99	577,39	870,0	704,59	22,24	4,55	12,50	5882,52
SEN13	0	0	3,73	0	0	0,00	0,00	52,7	58,00	10,03	879,88	500,9	795,0	604,89	20,26	4,1	11,50	5883,38
SEN14	0	0	3,75	0	0	0,00	0,00	52,3	54,40	10,25	821,69	459,42	724,0	546,93	18,77	3,78	10,80	5879,9

Tablo D.4 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 5400 simülasyon adımında SKD_ReRouter

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,46%					21,87%	21,16%		11,95%			17,63%					5,93%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (bin)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBa)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	920,79	16,79	2,03	0,78	5,17	43,30	13,80	0	15,20	12,77	420,49	78,42	126,0	133,13	5,36	1,1	3,20	5628,59
SEN2	925,54	16,31	2,05	0,75	5,16	42,10	13,40	1,46	15,70	12,67	432,33	86,6	158,0	145,13	5,54	1,12	3,30	5631,49
SEN3	784,66	14,61	2,02	0,67	4,42	38,20	12,20	2,53	14,90	12,7	413,33	75,39	159,0	128,71	5,26	1,07	3,14	5624,5
SEN4	1961,41	22,63	2,58	1,11	10,18	55,20	17,60	12,4	32,10	10,56	719,6	296,19	592,0	428,44	11,66	2,36	6,44	5736,99
SEN5	1275,73	14,69	2,65	0,72	6,62	35,90	11,50	20,9	32,90	10,71	720,54	307,53	563,0	431,86	11,98	2,43	6,61	5746,43
SEN6	1093,54	11,23	3,11	0,56	5,59	27,00	8,61	33,6	49,10	9,66	923,14	472,07	877,0	635,2	17,96	3,65	9,71	5820,16
SEN7	553,79	5,78	3,15	0,29	2,84	14,00	4,45	37,8	48,00	9,99	890,2	465,35	599,0	603,8	17,44	3,55	9,51	5818,53
SEN8	552,91	5,78	3,18	0,29	2,83	14,00	4,45	38,1	48,00	10,05	884,64	455,71	625,0	597,35	17,7	3,6	9,52	5823,01
SEN9	462,16	4,43	3,68	0,22	2,34	10,50	3,35	50	72,30	8,9	1164,13	687,17	1050,0	874,8	26,18	5,29	14,10	5893,69
SEN10	454,18	4,39	3,76	0,22	2,3	10,40	3,33	50,5	69,60	9,12	1102,52	635,58	954,0	812,9	25	5,1	13,60	5895,08
SEN11	0	0	3,86	0	0	0,00	0,00	55,6	70,00	9,34	1091,17	658,95	896,0	799,31	25	5,15	13,70	5907,84
SEN12	0	0	3,88	0	0	0,00	0,00	55,5	67,00	9,62	1033,2	619,59	829,0	742,49	23,94	4,82	13,20	5904,57
SEN13	0	0	3,87	0	0	0,00	0,00	54,2	56,90	9,92	863,89	481,91	689,0	578,98	19,95	4,01	11,30	5895,03
SEN14	0	0	3,92	0	0	0,00	0,00	55,2	58,60	10,02	884,88	506,56	717,0	598,16	20,41	4,1	11,60	5901,77

Tablo D.5 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 7200 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,46%					21,87%	21,16%		11,95%			17,63%					5,93%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (bin)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBa)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	413,94	12,82	2,01	0,56	2,65	34,60	11,00	0	11,60	14,65	322,88	11,24	52,1	37,63	3,63	0,71	2,54	5614,96
SEN2	392,81	12,18	2,04	0,53	2,52	33,10	10,60	1,38	11,80	14,66	324,06	12,55	55,9	38,92	3,67	0,72	2,56	5616,59
SEN3	356,52	11,3	2,01	0,49	2,3	31,00	9,89	2,43	11,60	14,69	321,44	12,28	56,6	37,89	3,61	0,71	2,53	5611,88
SEN4	403,78	10,79	2,51	0,47	2,48	29,30	9,35	11,1	15,30	14,08	342,33	28,08	95,1	58,58	4,86	0,95	3,30	5691,02
SEN5	268,24	7,03	2,59	0,31	1,64	19,20	6,13	18,5	15,70	14,11	343,47	32,1	101,0	61,25	5,11	1,01	3,40	5702,29
SEN6	471,15	6,45	3,02	0,3	2,51	16,60	5,29	29,8	28,60	12,49	537,97	185,99	371,0	258,41	10,52	2,16	5,88	5775
SEN7	230,01	3,29	3,04	0,15	1,23	8,51	2,72	33,4	27,40	12,78	508,13	171,54	258,0	230,99	10	2,07	5,65	5775,62
SEN8	157,9	2,76	3,07	0,12	0,88	7,37	2,35	33,1	23,00	13,3	423,68	102,81	182,0	146,66	8,11	1,65	4,84	5770,9
SEN9	262,19	2,87	3,51	0,14	1,35	7,09	2,26	43,8	47,40	11,44	763,38	377,87	668,0	486,42	17,65	3,65	9,47	5847,57
SEN10	226,05	2,64	3,57	0,13	1,17	6,60	2,11	43,6	43,20	11,69	683,57	312,88	544,0	407,5	16,08	3,29	8,69	5845,23
SEN11	0	0	3,62	0	0	0,00	0,00	46,9	42,60	12,08	663,65	314,94	472,0	388,19	15,55	3,23	8,58	5852,23
SEN12	0	0	3,66	0	0	0,00	0,00	46,3	36,90	12,31	568,34	233,66	395,0	293,65	13,41	2,73	7,53	5847,99
SEN13	0	0	3,71	0	0	0,00	0,00	46,1	31,90	12,74	483,65	165,32	269,0	208,98	11,36	2,26	6,61	5844,35
SEN14	0	0	3,73	0	0	0,00	0,00	45,7	28,90	13,06	435,58	124,61	228,0	161,01	9,76	1,94	6,05	5840,67

Tablo D.6 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 7200 simülasyon adımı SKD_ReRouter

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,46%					21,87%	21,16%		11,95%			17,63%					5,93%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (bin)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBA)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	420,7	12,88	2,01	0,57	2,69	34,70	11,10	0	11,70	14,6	323,84	12,07	52,8	38,73	3,67	0,72	2,54	5614,8
SEN2	395,85	12,2	2,04	0,53	2,53	33,20	10,60	1,37	11,80	14,63	324,59	12,96	56,1	39,58	3,69	0,72	2,57	5616,31
SEN3	355,84	11,3	2,01	0,49	2,3	31,00	9,89	2,44	11,60	14,69	321,14	12,07	56,7	37,7	3,63	0,71	2,52	5611,55
SEN4	386,13	10,66	2,51	0,46	2,39	29,00	9,26	11	15,10	14,17	338,27	25,16	89,8	54,59	4,79	0,94	3,27	5690,36
SEN5	268,5	7,04	2,59	0,31	1,64	19,20	6,13	18,6	15,70	14,12	343,98	32,16	102,0	61,7	5,16	1,02	3,40	5702,36
SEN6	467,93	6,47	3,06	0,3	2,49	16,60	5,31	30,3	28,80	12,32	540,73	186,91	349,0	256,85	10,52	2,16	5,91	5780,05
SEN7	200,4	3,09	3,08	0,14	1,09	8,09	2,58	33,5	25,60	12,95	474,24	141,56	214,0	194,21	9,23	1,89	5,32	5775,29
SEN8	217,07	3,23	3,11	0,15	1,17	8,40	2,68	34,1	26,70	12,94	491,64	155,65	236,0	210,75	9,71	1,99	5,54	5780,65
SEN9	250,02	2,81	3,61	0,13	1,29	6,97	2,22	44,8	47,10	11,28	758,82	372,36	580,0	474,18	17,55	3,55	9,43	5855,4
SEN10	231,71	2,7	3,66	0,13	1,2	6,77	2,16	44,6	43,80	11,6	693,26	317	507,0	408,81	16,2	3,31	8,82	5855,09
SEN11	0	0	3,71	0	0	0,00	0,00	47,8	42,60	11,82	663,96	308,62	441,0	379,96	15,47	3,16	8,61	5861,66
SEN12	0	0	3,74	0	0	0,00	0,00	47,8	40,10	11,98	617,95	273,1	419,0	336,71	14,66	2,96	8,15	5859,54
SEN13	0	0	3,76	0	0	0,00	0,00	47,1	34,00	12,5	516,23	191,33	295,0	238,12	12,02	2,41	7,02	5851
SEN14	0	0	3,75	0	0	0,00	0,00	45,7	28,90	13,18	436,38	124,11	230,0	160,5	9,71	1,92	6,07	5841,08

Tablo D.7 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 9000 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,46%					21,87%	21,16%		11,95%			17,63%					5,93%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (bin)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBa)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	386,84	12,54	2,01	0,55	2,52	34,00	10,80	0	11,40	14,9	317,52	8,36	44,1	32,21	3,55	0,69	2,50	5612,09
SEN2	363,58	11,9	2,03	0,52	2,37	32,50	10,40	1,35	11,50	14,92	317,84	9,19	47,0	32,81	3,58	0,7	2,52	5614,97
SEN3	331,69	11,06	2,01	0,48	2,17	30,50	9,72	2,4	11,40	14,96	315,49	9,22	48,0	32,02	3,53	0,69	2,49	5610,29
SEN4	322,02	10,11	2,51	0,44	2,07	27,80	8,88	10,9	14,40	14,8	322,44	14,63	69,4	38,91	4,48	0,87	3,13	5686,75
SEN5	197,6	6,45	2,59	0,27	1,28	18,00	5,73	18,3	14,50	15,1	316,92	13,44	68,1	34,91	4,5	0,88	3,17	5697,62
SEN6	118,27	3,8	3,00	0,16	0,76	10,80	3,45	28	17,00	14,94	319,14	19,71	87,5	40,71	5,31	1,04	3,71	5749,76
SEN7	60,49	2,02	3,03	0,08	0,39	5,75	1,83	31,6	16,90	15,16	314,16	17,81	78,1	37,36	5,29	1,04	3,70	5754,88
SEN8	61,29	2,02	3,05	0,08	0,4	5,77	1,84	31,8	17,00	15,15	313,61	17,79	79,5	37,21	5,33	1,04	3,73	5757,56
SEN9	37,19	1,18	3,50	0,05	0,24	3,44	1,10	38,8	20,20	14,74	324,57	26,47	107,0	48,33	6,38	1,25	4,39	5805,4
SEN10	39,66	1,24	3,55	0,05	0,25	3,57	1,14	39,4	20,50	14,69	325,31	27,76	109,0	49,97	6,55	1,29	4,47	5810,55
SEN11	0	0	3,60	0	0	0,00	0,00	42,2	20,60	14,86	320,99	25,57	106,0	46,27	6,53	1,28	4,49	5815,92
SEN12	0	0	3,65	0	0	0,00	0,00	42,6	20,60	15	317,27	23,28	100,0	42,95	6,47	1,27	4,50	5819,66
SEN13	0	0	3,70	0	0	0,00	0,00	43,2	20,90	15,01	317,03	23,24	103,0	42,69	6,56	1,28	4,56	5825,43
SEN14	0	0	3,72	0	0	0,00	0,00	43,3	20,90	15,06	315,14	22,07	102,0	41,1	6,53	1,28	4,56	5826,32

Tablo D.8 Sioux Falls ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 9000 simülasyon adımı SKD_ReRouter

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,46%					21,87%	21,16%		11,95%			17,63%					5,93%	
	CO (kg)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (bin)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBA)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	387,27	12,55	2,01	0,55	2,52	34,00	10,90	0	11,40	14,91	317,37	8,32	44,0	32,19	3,56	0,69	2,50	5611,79
SEN2	360,6	11,87	2,03	0,52	2,36	32,50	10,40	1,35	11,50	14,94	317,15	8,67	46,5	32,28	3,58	0,7	2,52	5614,42
SEN3	333,77	11,08	2,01	0,48	2,18	30,50	9,74	2,4	11,40	14,95	315,63	9,45	48,2	32,33	3,55	0,69	2,49	5609,91
SEN4	317,52	10,08	2,51	0,43	2,05	27,80	8,87	10,9	14,30	14,84	321,17	13,64	68,2	37,74	4,46	0,87	3,12	5686,12
SEN5	198,87	6,47	2,59	0,28	1,29	18,00	5,74	18,3	14,50	15,07	317,41	13,88	69,0	35,47	4,53	0,88	3,17	5697,47
SEN6	116,78	3,8	3,00	0,16	0,76	10,80	3,44	28	16,90	14,98	318,08	18,81	85,3	39,74	5,31	1,04	3,70	5749,13
SEN7	60,68	2,02	3,03	0,08	0,4	5,75	1,84	31,6	16,90	15,16	314	17,85	78,1	37,4	5,31	1,04	3,70	5754,44
SEN8	60,43	2,02	3,05	0,08	0,39	5,75	1,84	31,8	17,00	15,27	313,1	17,56	78,5	36,82	5,33	1,04	3,72	5757,08
SEN9	37,48	1,18	3,50	0,05	0,24	3,44	1,10	38,8	20,20	14,7	325,12	26,9	108,0	48,96	6,44	1,27	4,39	5805,19
SEN10	41,03	1,25	3,55	0,05	0,26	3,59	1,14	39,4	20,70	14,62	328,45	30,11	112,0	53,16	6,7	1,32	4,51	5810,59
SEN11	0	0	3,60	0	0	0,00	0,00	42,2	20,60	14,89	320,63	25,41	105,0	45,97	6,51	1,28	4,48	5815,37
SEN12	0	0	3,65	0	0	0,00	0,00	42,5	20,60	15	317,37	23,27	100,0	43,11	6,46	1,26	4,50	5819,1
SEN13	0	0	3,70	0	0	0,00	0,00	43,2	21,00	14,95	319,11	24,89	106,0	44,83	6,66	1,31	4,59	5825,41
SEN14	0	0	3,72	0	0	0,00	0,00	43,3	21,00	15,01	316,28	23,04	103,0	42,31	6,57	1,28	4,58	5825,97

Tablo D.9 İzmir kent ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 3600 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirleten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme						Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,462%					21,871%	21,158%		11,949%			17,632%						5,927%	
	CO (ton)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (milyon)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBa)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (bin dBA)	
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96	
SEN1	11,22	105,69	4,00	5,63	56,8	243,00	77,50	0	85,70	12,29	606,65	385,32	1,34	488,74	1,67	0,27	16,40	659	
SEN2	12,94	117,49	4,08	6,28	65,24	269,00	85,70	4,31	102,00	11,93	719,62	467,13	2,23	600,06	1,96	0,31	19,40	665	
SEN3	11,72	107,49	4,11	5,73	59,15	246,00	78,60	8,91	99,10	11,87	702,19	446,84	2,91	584,36	1,91	0,3	19,00	664	
SEN4	20,67	174,8	5,76	9,4	103,34	394,00	126,00	37,3	211,00	11,45	1193,06	865,04	5,09	1053,8	3,41	0,66	39,80	733	
SEN5	8,96	78,11	5,29	4,18	44,97	177,00	56,60	66,8	169,00	11,58	934,87	652,3	4,88	814,96	2,84	0,49	32,10	723	
SEN6	7,23	60,76	6,46	3,27	36,13	137,00	43,70	114	267,00	11,18	1224,25	913,43	6,71	1101,62	4	0,8	50,50	753	
SEN7	3,41	28,89	6,51	1,55	17,06	65,30	20,80	128	274,00	11,38	1230,1	934,34	5,36	1107,79	3,82	0,77	51,60	755	
SEN8	4,08	34,01	6,65	1,83	20,39	76,60	24,40	133	304,00	11,32	1354,69	1045,63	5,95	1229,13	4,26	0,88	57,20	755	
SEN9	3,01	24,7	7,87	1,33	15,02	55,40	17,70	172	403,00	11,2	1523,94	1205,7	7,99	1394,93	5,04	1,09	75,60	788	
SEN10	2,76	22,68	7,99	1,22	13,74	50,90	16,20	177	430,00	11,15	1598,26	1274,69	8,29	1469,78	5,33	1,16	80,70	790	
SEN11	0,00	0	8,09	0	0	0,00	0,00	162	428,00	11,35	1562,53	1273,01	7,58	1434,73	5,4	1,23	57,60	792	
SEN12	0,00	0	8,19	0	0	0,00	0,00	170	428,00	11,37	1534,29	1255,1	8,08	1407,94	5,3	1,2	59,00	792	
SEN13	0,00	0	8,31	0	0	0,00	0,00	172	440,00	11,29	1549,86	1281,58	8,05	1423,31	5,74	1,33	65,50	797	
SEN14	0,00	0	8,40	0	0	0,00	0,00	174	472,00	11,32	1650,04	1376,82	9,17	1523,21	5,75	1,35	88,50	796	

Tablo D.10 İzmir kent ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 5400 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirlüten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme						Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,462%					21,871%	21,158%		11,949%			17,632%						5,927%	
	CO (ton)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (milyon)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBa)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (bin dBA)	
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96	
SEN1	8,90	88,74	4,00	4,72	45,38	206,00	65,80	0	70,00	47,27	495,89	296,5	1,11	380,52	1,4	0,21	13,60	659	
SEN2	10,29	98,07	4,08	5,23	52,18	226,00	72,20	4,2	82,90	45,47	587,21	367,47	1,66	469,7	1,65	0,24	16,00	666	
SEN3	9,71	92,71	4,11	4,94	49,23	214,00	68,30	8,64	83,70	45,18	592,82	366,67	2,26	476,86	1,65	0,24	16,20	665	
SEN4	17,99	155,16	5,76	8,34	90,16	352,00	112,00	36,4	187,00	43,88	1058,37	750,67	4,91	919,4	2,95	0,54	35,30	731	
SEN5	8,54	74,9	5,29	4,02	42,88	170,00	54,30	66,2	163,00	43,56	904,88	643,89	4,33	785,58	2,73	0,47	31,10	723	
SEN6	6,95	58,62	6,45	3,15	34,74	132,00	42,20	112	255,00	42,48	1167,21	884,69	5,86	1043,9	3,8	0,75	48,10	753	
SEN7	3,04	26,15	6,51	1,4	15,24	59,40	18,90	125	251,00	42,91	1127,84	850,02	5,09	1005,97	3,41	0,66	47,40	753	
SEN8	3,61	30,48	6,65	1,64	18,04	68,90	22,00	131	282,00	43,24	1255,08	974,66	5,40	1130,43	3,89	0,77	53,10	755	
SEN9	2,82	23,27	7,87	1,25	14,08	52,30	16,70	169	383,00	42,41	1448,57	1153,79	7,37	1320,47	4,73	1	65,00	787	
SEN10	2,68	22,08	7,99	1,19	13,35	49,60	15,80	174	409,00	42,23	1518,87	1219,38	7,85	1392,7	4,85	1,04	76,80	788	
SEN11	0,00	0	8,09	0	0	0,00	0,00	185	400,00	42,84	1458,03	1188,56	7,07	1331,99	5,09	1,13	75,10	791	
SEN12	0,00	0	8,19	0	0	0,00	0,00	190	422,00	43,06	1514,72	1249,95	7,85	1390,46	5,05	1,1	79,40	790	
SEN13	0,00	0	8,32	0	0	0,00	0,00	192	419,00	42,91	1478,94	1218,73	8,35	1355,14	5,14	1,16	78,90	794	
SEN14	0,00	0	8,40	0	0	0,00	0,00	193	411,00	42,88	1436,18	1184,52	8,00	1313,51	5,26	1,2	77,30	795	

Tablo D.11 İzmir kent ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 7200 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirlüten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,462%					21,871%	21,158%		11,949%			17,632%					5,927%	
	CO (ton)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (milyon)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBa)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (bin dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	7,88	81,19	4,00	4,31	40,32	190,00	60,60	0	63,00	48,35	446,09	259,03	0,91	332,34	1,26	0,18	12,30	659
SEN2	8,63	85,9	4,08	4,57	44	200,00	63,80	4,14	71,20	47,3	504,21	301,52	1,36	388,54	1,48	0,21	13,90	665
SEN3	7,53	76,68	4,11	4,07	38,47	179,00	57,20	8,42	67,30	47,12	476,82	276,15	1,68	362,46	1,48	0,2	13,20	664
SEN4	15,45	136,5	5,76	7,33	77,62	311,00	99,20	35,3	162,00	46,26	915,46	640,5	4,07	778,59	2,6	0,46	30,70	731
SEN5	6,62	60,84	5,29	3,25	33,44	140,00	44,60	63,6	130,00	46,01	720,08	495,4	3,23	602,08	2,17	0,36	24,90	722
SEN6	6,27	53,62	6,46	2,88	31,39	122,00	38,80	109	233,00	44,68	1068,72	804,76	5,49	946,16	3,41	0,65	44,10	753
SEN7	2,72	23,8	6,51	1,28	13,67	54,20	17,30	109	235,00	44,89	1057,7	800,8	4,60	936,43	3,24	0,62	34,60	752
SEN8	3,11	26,79	6,65	1,44	15,57	60,90	19,40	111	243,00	45,14	1083,9	826,65	4,78	960,07	3,33	0,63	34,80	753
SEN9	2,50	20,86	7,87	1,12	12,47	47,10	15,00	128	343,00	44,53	1298,33	1027,16	6,64	1171,81	4,24	0,86	40,00	786
SEN10	2,45	20,39	7,99	1,1	12,23	46,00	14,70	129	375,00	44,42	1391,41	1115,7	7,10	1265,36	4,47	0,93	36,20	787
SEN11	0,00	0	8,08	0	0	0,00	0,00	167	370,00	44,96	1350,35	1100,44	6,39	1224,6	4,56	0,98	55,70	790
SEN12	0,00	0	8,19	0	0	0,00	0,00	160	415,00	44,82	1487,59	1234,8	7,64	1364,38	4,86	1,05	78,00	788
SEN13	0,00	0	8,32	0	0	0,00	0,00	179	391,00	44,57	1378,7	1136,78	7,57	1257,07	4,77	1,04	73,70	794
SEN14	0,00	0	8,41	0	0	0,00	0,00	180	427,00	44,75	1493,17	1251,07	8,01	1370,32	4,98	1,12	80,40	794

Tablo D.12 İzmir kent ulaşım ağında ÇKKV tekniklerinin uygulandığı karar matrisi – 9000 simülasyon adımı SKD

SKHG	Hava Kirlüten Emisyonlar					Sera Gazı Emisyonları	Enerji Verimliliği		Seyahat Süresi			Tıkanıklık ve Gecikme					Gürültünün Önlenmesi	
B-AHP ağırlıkları	21,462%					21,871%	21,158%		11,949%			17,632%					5,927%	
	CO (ton)	NO _x (kg)	Non-Exhaust PM2,5 (g)	PM2,5 (kg)	HC (kg)	CO ₂ (ton)	Yakıt Tüketimi (milyon lt)	Enerji Tüketimi (MWh)	Toplam Seyahat Süresi (milyon saniye)	Hız (m/s)	Ortalama Seyahat Süresi (s)	Ortalama Durma Gecikmesi (s)	Ortalama Durma Sayısı (milyon)	Seyahat Süresi Gecikmesi (s)	Yoğunluk (araç/km)	Doluluk Oranı (%)	Ağ Genelinde Gürültü Emisyon Toplamı (milyar dBa)	Link Gürültü Emisyon Toplamı (bin dBA)
Ağırlıklar	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%4,29	%21,87	%10,58	%10,58	%7,97	%1,99	%1,99	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%3,53	%2,96	%2,96
SEN1	5,87	66,4	4,00	3,51	30,43	158,00	50,30	0	49,00	50,15	346,94	188,69	0,63	235,39	1,12	0,15	9,25	659
SEN2	6,96	73,5	4,08	3,9	35,73	173,00	55,20	4,05	59,10	48,92	418,46	240,72	1,00	303,82	1,34	0,18	10,40	665
SEN3	7,53	76,68	4,11	4,07	38,47	179,00	57,20	8,42	67,30	47,12	476,82	276,15	1,68	362,46	1,48	0,2	9,91	664
SEN4	13,43	121,66	5,76	6,52	67,66	279,00	88,90	34,6	142,00	47,59	805,97	553,08	3,33	671,41	2,32	0,38	23,00	729
SEN5	5,91	55,58	5,29	2,97	29,92	128,00	40,90	62,6	118,00	46,94	652,03	441,51	2,80	536,22	2,02	0,32	18,70	721
SEN6	5,65	49,02	6,46	2,63	28,32	112,00	35,60	103	209,00	46,3	958,88	717,56	4,72	836,61	3,05	0,56	33,10	751
SEN7	2,33	20,92	6,51	1,12	11,74	47,90	15,30	112	208,00	46,48	934,95	698,24	4,09	816,26	2,89	0,51	25,90	752
SEN8	2,78	24,37	6,65	1,31	13,95	55,60	17,70	113	224,00	46,8	997,67	764,24	4,04	875,37	3,09	0,56	26,10	753
SEN9	2,42	20,32	7,88	1,09	12,11	45,90	14,60	129	326,00	45,97	1233,48	977,33	6,04	1105,71	4,04	0,81	30,00	786
SEN10	2,26	18,99	7,99	1,02	11,31	42,90	13,70	129	363,00	46,04	1349,66	1092,16	6,35	1223,28	4,32	0,88	27,10	787
SEN11	0,00	0	8,08	0	0	0,00	0,00	136	361,00	46,12	1317,49	1076,44	6,13	1192,3	4,49	0,95	41,80	789
SEN12	0,00	0	8,19	0	0	0,00	0,00	137	373,00	46,37	1338,62	1097,77	7,10	1217,34	4,36	0,89	58,50	788
SEN13	0,00	0	8,32	0	0	0,00	0,00	174	392,00	46,12	1383,64	1149,09	7,37	1261,01	4,71	1,01	55,30	793
SEN14	0,00	0	8,40	0	0	0,00	0,00	175	393,00	46,15	1372,47	1139,66	7,68	1250,21	4,72	1,02	60,30	793