T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ÇOK YÖNLÜ OPTİMİZASYONU

Yunus ARDIÇOĞLU

DOKTORA TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Tufan DEMİREL

Kasım, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ÇOK YÖNLÜ OPTİMİZASYONU

Yunus ARDIÇOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 28.11.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Doktora Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Tufan DEMİREL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Tufan DEMİREL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Selin SONER KARA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Semih ÖNÜT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Muhammet DEVECİ, Üye
Milli Savunma Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Sabahattin Kerem AYTULUN, Üye
İstanbul Arel Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Tufan DEMİREL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarinin Çok Yönlü Optimizasyonu" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yunus ARDIÇOĞLU

İmza

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Sayın Doç.Dr. Tufan DEMİREL'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her döneminde benden desteklerini esirgemeyen değerli aileme ve çok kıymetli eşime teşekkürlerimi sunarım.

Yunus ARDIÇOĞLU

İÇİNDEKİLER

KISATMA LİSTESİ….……... vii
ŞEKİL LİSTESİ…..…….……... viii
TABLO LİSTESİ…..…….……... x
HARİTA LİSTESİ…...…….……... xii
ÖZET……..…….……... xiii
ABSTRACT…….…… v
1.GİRİŞ……..……1
1.1 Literatür Özeti 3
1.2 Tezin Amacı ve Önemi 12
1.3 Orijinal Katkı 13
1.4 Tezin İçeriği 14
2. MALZEME VE METOT…….……...15
2.1 Veri Toplama ve Taleplerin Belirlenmesi.....15
2.2 Matematiksel Model 21
2.2.1 Oluşturulan Model 21
2.3 Genetik Algoritma.....29
3. UYGULAMALAR……...……36
3.1 İstanbul-İzmir Otoyolu- Aks Uygulaması.....36
3.1.1 Deterministik Çözüm ile Edinilen Sonuçlar 41
3.1.2 Genetik Algoritma ile Edinilen Sonuçlar…….……..……..46
3.2 İstanbul Avrupa Yakası- Şehir içi Alan Uygulaması.....54
3.2.1 Güncel Taleplere Göre Sonuçlar.....57
3.2.2 Gelecek Talep Tahminlerine Göre Sonuçlar 58
3.3 Büyük Ölçekli Bölge Uygulaması 65
3.3.1 Güncel Taleplere Göre Sonuçlar.....65
3.3.2 Gelecek Talep Tahminlerine Göre Sonuçlar 65
3.4 Duyarlılık Analizi 66
3.4.1 Deterministik Sonuçların Duyarlılık Analizi.....66
3.4.2 Genetik Algoritma Kullanılan Çözümlerin Duyarlılık Analizi 68

3.5 Matematiksel Modelin Değerlendirilmesi 72
3.5.1 İstanbul İzmir Otoyolu.....73
3.5.2 İstanbul Avrupa Yakası 78
3.5.3 Büyük Ölçekli Bölge Uygulaması 81
4.SONUÇ……..……..86
KAYNAKÇA……89
EK-A……102
TEZDEN ÜRETİLEN ÇALIŞMALAR……...113

KISALTMA LİSTESİ

COPRAS	Karmaşık Oransal Değerlendirme (Complex Proportional Assessment)
EA	Elektrikli Araç
EPDK	Enerji Piyasası Denetleme Kurulu
GA	Genetik Algoritma
GT	Güncel Talep
MAKS	Maksimizasyon
MIN	Minimizasyon
MINLP	Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (Mixed Integer Non Linear Problem)
NSGA-II	Hakim Olmayan Sıralama Genetik Algoritması (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)
PSO	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Türkiye Trafik Hacim Haritası…….....16
Şekil 2.2 İstanbul-İzmir Garanti Geçiş Karşılama Oranları……...17
Şekil 2.3 Genetik Algoritma Akış Şeması…….32
Şekil 2.4 Genetik Algoritma (Başlangıç popülasyonu ve lokasyonları)……33
Şekil 2.5 Genetik Algoritma (Final lokasyonları)…….….33
Şekil 3.1 Alternatif Konumlar Haritası (Güncel)……...65
Şekil 3.2 Lokasyon Bazında Toplam Talep (Güncel)……...…….65
Şekil 3.3 Açılan İstasyonlar Haritası (Güncel)……..……65
Şekil 3.4 Alternatif Konumlar Haritası (2030-düşük)……...65
Şekil 3.5 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2030-düşük)……...…….65
Şekil 3.6 Açılan İstasyonlar Haritası (2030-düşük)……..……65
Şekil 3.7 Alternatif Konumlar Haritası (2030-orta)……...65
Şekil 3.8 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2030-orta)……...…….65
Şekil 3.9 Açılan İstasyonlar Haritası (2030-orta)……...……...……65
Şekil 3.10 Alternatif Konumlar Haritası (2030-yüksek)…….……...65
Şekil 3.11 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2030- yüksek)……...…….65
Şekil 3.12 Açılan İstasyonlar Haritası (2030- yüksek)……..……...……65
Şekil 3.13 Alternatif Konumlar Haritası (2035-düşük)……..……...65
Şekil 3.14 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2035-düşük)…….....…….65
Şekil 3.15 Açılan İstasyonlar Haritası (2035-düşük)…..……..……65
Şekil 3.16 Alternatif Konumlar Haritası (2035-orta)……..……...65
Şekil 3.17 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2035-orta)…….....…….65
Şekil 3.18 Açılan İstasyonlar Haritası (2035-orta)…..……...……...……65
Şekil 3.19 Alternatif Konumlar Haritası (2035-yüksek)…….……...65
Şekil 3.20 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2035- yüksek)……...…….65
Şekil 3.21 Açılan İstasyonlar Haritası (2035- yüksek)……..……...……65
Şekil 3.22 İstasyon Kurulumu ve Kapasite Maliyeti Değişikliklerinin Etkileri…70
Şekil 3.23 Karşılanmayan Talep Cezası Değişikliklerinin Etkileri……..70
Şekil 3.24 Maksimum İstasyon Kapasitesi Değişikliklerinin Etkileri…….71
Şekil 3.25 Mesafe Servis Maliyet Değişikliklerinin Etkileri……..72
Şekil 3.26 İstanbul-İzmir Otoyolu için EA ve Kapasite Artış Oranları……...74
Şekil 3.27 İstanbul-İzmir Otoyolu GA için EA ve Kapasite Artış Oranları…….76

Şekil 3.28 İstanbul Avrupa Yakası için EA ve Kapasite Artış Oranları……..81
Şekil 3.29 Büyük Ölçekli Bölge için EA ve Kapasite Artış Oranları……..84
Şekil 3.30 Nesiller Göre Minimum Maliyet (GA Sonuçları)……..85

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Literatür Taraması Özeti 5
Tablo 2.1 Güncel ve EPDK Elektrikli Araç Tahminleri…….19
Tablo 3.1 Güncel ve 2030 Yılı Talep Tahminleri……...39
Tablo 3.2 Güncel ve 2035 Yılı Talep Tahminleri……...…40
Tablo 3.3 Güncel ve 2030 Yılı İstasyon Lokasyonları Ve Kapasiteleri……..…43
Tablo 3.4 Güncel ve 2030 Yılı İstasyon Lokasyonları Ve Kapasiteleri (GA)…….48
Tablo 3.5 Güncel ve 2035 Yılı İstasyon Lokasyonları Ve Kapasiteleri (GA)…….51
Tablo 3.6 İst.Avr. Güncel ve 2030 Yılı İçin Belirlenen Talepler……55
Tablo 3.7 İst.Avr. Güncel ve 2035 Yılı İçin Belirlenen Talepler……56
Tablo 3.8 İst.Avr. Güncel İstasyon Lokasyonları Ve Kapasiteleri…….57
Tablo 3.9 İst.Avr. Güncel ve 2030 Yılı İstasyon Lokasyonları ve Kapasiteleri….59
Tablo 3.10 İst.Avr. Güncel ve 2035 Yılı İstasyon Lokasyonları ve Kapasiteleri…62
Tablo 3.11 Deterministik Yaklaşım İçin Duyarlılık Analizi……...67
Tablo 3.12 Genetik Algoritma ile Çözüm İçin Duyarlılık Analizi……..69
Tablo 3.13 Deterministik Yaklaşım İçin Boş Kalma Yüzdeleri (2030)……..73
Tablo 3.14 Deterministik Yaklaşım İçin İstasyon Doluluk Yüzdeleri (2030)……73
Tablo 3.15 Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri (2030)……..73
Tablo 3.16 Deterministik Yaklaşım İçin Kapasite Artış Yüzdeleri (2030)…….74
Tablo 3.17 Deterministik Yaklaşım İçin Verimlilik Yüzdeleri (2030)……...74
Tablo 3.18 Genetik Algoritma Çözümü İçin Boş Kalma Yüzdeleri (2030)……75
Tablo 3.19 Genetik Algoritma Çözümü İçin İstasyon Doluluk Yüzdeleri (2030)..75
Tablo 3.20 Genetik Algoritma Çözümü İçin Kapasite Artış Yüzdeleri (2030)…...75
Tablo 3.21 Genetik Algoritma Çözümü İçin Verimlilik Yüzdeleri (2030)…….75
Tablo 3.22 Genetik Algoritma Çözümü İçin Kapasite Artış Yüzdeleri (2035)…...77
Tablo 3.23 Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri (2035)……..77
Tablo 3.24 Genetik Algoritma Çözümü İçin Verimlilik Yüzdeleri (2035)…….78
Tablo 3.25 Genetik Algoritma Çözümü İçin Boş Kalma Yüzdeleri (2035)……78
Tablo 3.26 Genetik Algoritma Çözümü İçin İstasyon Doluluk Yüzdeleri (2035)..78
Tablo 3.27 İstanbul Avrupa Yakası 2030 Yılı Boş Kalma Yüzdeleri…….79
Tablo 3.28 İstanbul Avrupa Yakası 2030 Yılı İstasyon Doluluk Yüzdeleri……79

Tablo 3.29 İstanbul Avrupa Yakası 2035 Yılı Boş Kalma Yüzdeleri…….79
Tablo 3.30 İstanbul Avrupa Yakası 2035 Yılı İstasyon Doluluk Yüzdeleri……79
Tablo 3.31 2030 Yılı Elektrikli Araç Artış Yüzdeleri…….80
Tablo 3.32 İstanbul Avrupa Yakası 2030 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri……80
Tablo 3.33 İstanbul Avrupa Yakası 2030 Yılı Verimlilik Yüzdeleri……..80
Tablo 3.34 2035 Yılı Elektrikli Araç Artış Yüzdeleri…….80
Tablo 3.35 İstanbul Avrupa Yakası 2035 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri……80
Tablo 3.36 İstanbul Avrupa Yakası 2035 Yılı Verimlilik Yüzdeleri……..80
Tablo 3.37 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı Boş Kalma Yüzdeleri…….82
Tablo 3.38 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı İstasyon Doluluk Yüzdeleri……82
Tablo 3.39 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı Boş Kalma Yüzdeleri…….82
Tablo 3.40 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı İstasyon Doluluk Yüzdeleri……82
Tablo 3.41 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri……83
Tablo 3.42 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri……83
Tablo 3.43 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı Verimlilik Yüzdeleri……..83
Tablo 3.44 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri……83
Tablo 3.45 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri……83
Tablo 3.46 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı Verimlilik Yüzdeleri……..83

HARİTA LİSTESİ

Harita 3.1 İstanbul-İzmir Otoyolu…….37
Harita 3.2 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyon Alternatifleri……..38
Harita 3.3 İstanbul-İzmir Otoyolu Bölünmüş Hali……..……..41
Harita 3.4 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (Güncel Talep)….. …..42
Harita 3.5 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (2030-Düşük)…....…44
Harita 3.6 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (2030-Orta)… …….....45
Harita 3.7 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (2030-Yüksek)…..…...45
Harita 3.8 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (GA-GT)……...47
Harita 3.9 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (GA-2030Düşük)…...49
Harita 3.10 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (GA-2030Orta). …..49
Harita 3.11 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (GA-2030Yüksek)...50
Harita 3.12 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (GA-2035Düşük).....52
Harita 3.13 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (GA-2035Orta)..…..52
Harita 3.14 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İst. Lok. ve Kap. (GA-2035Yüksek)...53
Harita 3.15 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonları Alternatifleri……..54
Harita 3.16 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İst. Lok. ve Kap. (GT)……. ……..58
Harita 3.17 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İst. Lok. ve Kap. (2030-Düşük)……..60
Harita 3.18 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İst. Lok. ve Kap. (2030-Orta)..……..60
Harita 3.19 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İst. Lok. ve Kap. (2030-Yüksek).…..61
Harita 3.20 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İst. Lok. ve Kap. (2035-Düşük)……..63
Harita 3.21 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İst. Lok. ve Kap. (2035-Orta)..……..63
Harita 3.22 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İst. Lok. ve Kap. (2035-Yüksek).…..64

ÖZET

Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Çok Yönlü Optimizasyonu

Yunus ARDIÇOĞLU

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Tufan DEMİREL

Elektrikli araçlar (EA) çevresel sürdürülebilirliğin geliştirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Elektrikli araçlar, sera gazı emisyonlarını azaltarak, hava kalitesini iyileştirerek, gürültü kirliliğini azaltarak ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu teşvik ederek, en acil çevresel sorunların bazılarının çözülmesine yardımcı olmaktadır. Bunların sürekli benimsenmesi ve destekleyici altyapının genişletilmesi, küresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak ve gezegen için daha temiz, daha sağlıklı bir gelecek yaratmak adına gereklidir.

Elektrikli araç şarj istasyonları, elektrikli araçların yaygın olarak benimsenmesinde ve ana ulaşım sistemlerine entegrasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. İklim değişikliğinin ve sera gazlarının etkileri dünya çapında artarken, elektrikli araçlara geçiş hem ekolojik hem de sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. EA şarj istasyonları, EA sahiplerinin şarj ihtiyaçlarını desteklemek ve elektrikli araçlara geçişi kolaylaştırmak için gerekli altyapıyı sağlayarak bu geçişin omurgasını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada elektrikli araç şarj istasyonlarının çok yönlü optimizasyonu ele alınmaktadır. Bu amaçla hem mevcut talep hem de gelecek talep tahminleri dikkate alınarak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Temel amaç, talebi karşılarken minimum istasyon sayısı, minimum kapasite, minimum bekleme süresi ve minimum istasyon boşta kalma süresine ulaşmaktır.

Oluşturulan matematiksel modelin uygulama alanı olarak İstanbul-İzmir otoyolu, İstanbul Avrupa yakası ve büyük ölçekli oluşturulan rastgele bir bölge uygulama alanları olarak seçilmiştir. Problemin büyüdüğü durumlarda meta-sezgisel algoritmaların kullanımına ihtiyaç duyulmuş ve bu bağlamda oluşturulan matematiksel model Genetik algoritma ile çözülerek sonuçların kıyaslamaları ve matematiksel model için gerekli olan duyarlılık analizleri yapılmıştır.

Çalışmanın bulguları, olası çalışmalarda seçilecek otoyolların, aksların, bölgelerin ve kentsel alanların EA şarj istasyonu altyapı planlamasına değerli bir perspektif sağlayacaktır. Bu çalışmada ele alınan çok yönlü optimizasyon modeli, karar vericilere ve sektör uzmanlarına, EA şarj altyapısının sürdürülebilir ve verimli bir şekilde geliştirilmesine yönelik bilinçli kararlar alma konusunda destek sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç, Şarj istasyonu, Karışık tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel model, Çok yönlü optimizasyon, Genetik Algoritma.

ABSTRACT

Multidirectional Optimization Of Electric Vehicle Charging Stations

Yunus ARDIÇOĞLU

Department of Industrial Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc.Prof. Dr. Tufan DEMİREL

Electric vehicles (EV) play a significant role in improving environmental sustainability. Electric vehicles are helping to solve some of the most pressing environmental problems by reducing greenhouse gas emissions, improving air quality, reducing noise pollution and promoting renewable energy integration. Their continued adoption and expansion of supporting infrastructure is essential to achieve global sustainability goals and create a cleaner, healthier future for the planet.

Electric vehicle charging stations play an important role in the widespread adoption of electric vehicles and their integration into major transportation systems. With the growing impact of climate change and greenhouse gases worldwide, the shift to electric vehicles is crucial for both ecological benefits and sustainability. EV charging stations serve as the foundation of this shift by offering the essential infrastructure needed to meet the charging demands of EV owners and enable the transition to electric vehicles.

In this study, multi-dimensional optimization of electric vehicle charging stations is discussed. For this purpose, a mathematical model has been developed taking

into account both current demand and future demand forecasts. The main goal is to achieve the minimum number of stations, minimum capacity, minimum waiting time and minimum station idle time while meeting demand.

Istanbul-Izmir highway, Istanbul European side and large scale randomly generated region were selected as application areas of the created mathematical model. In cases where the problem grew larger, the use of meta-heuristic algorithms was needed, and the mathematical model created in this context was solved with the Genetic algorithm, and the comparisons of the results and the sensitivity analysis required for the mathematical model were made.

The study's findings will offer valuable insights for planning EV charging station infrastructure on highways, major routes, regions, and urban areas in future studies. The multi-dimensional optimization model presented in this study will assist decision-makers and industry experts in making well-informed choices for the sustainable and efficient development of EV charging infrastructure.

Keywords: Electric vehicle, Charging station, Mixed integer non-linear mathematical model, Multidirectional optimization, Genetic Algorithm.

1
GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EA), temel ekolojik zorlukları ele alarak çevresel sürdürülebilirliğin ilerletilmesinde önemli bir rol oynamaktadır[1]. Bu yeni konsept, geleneksel yöntemlere kıyasla sera gazlarının, gürültünün ve görüntü kirliliğinin azaltılmasına doğrudan katkı sağlıyor[2][3]. Emisyonlardaki bu azalma[4], özellikle elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması ile birlikte, küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle[5] mücadeleye yardımcı oluyor[6]. Ayrıca elektrikli araçlar, solunum ve kalp-damar sağlığı sorunlarına neden olduğu bilinen azot oksitler ve partikül madde gibi zararlı kirleticileri ortadan kaldırarak kentsel alanlardaki hava kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunuyor[7]. Dünya Sağlık Örgütü'ne göre 3 milyon ölüm ve 85 milyon sakatlığın sorumlusu kentsel hava kirliliğidir[8]. Elektrikli araçların daha sessiz çalışması aynı zamanda gürültü kirliliğini de azaltarak yoğun nüfuslu şehirlerde daha az gürültülü bir yaşam ortamı sağlıyor[9]. Dahası, elektrikli araçlar fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak bu yakıtların çıkarılması, rafine edilmesi ve taşınmasından kaynaklanan çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olurken yenilenebilir enerjiye geçişi de destekliyor[10]. Hükümetler elektrikli araç altyapısına ve sürdürülebilir mobilite çözümlerine giderek daha fazla yatırım yaptıkça[11], elektrikli araçların benimsenmesi, kirliliğin ve trafik sıkışıklığının azaldığı çevre dostu kentsel alanların geliştirilmesini teşvik ediyor[12]. Bu bağlamda şarj altyapılarında elektrik enerjisinin sağlanması, bu yeni ve geleneksel olmayan ulaşım alternatifinin sürdürülebilirliğinde kritik rol oynuyor[13].

Son yıllarda özellikle geleneksel araç yakıtlarının çevresel etkileri ve artan maliyetleriyle birlikte elektrikli araçlara olan eğilim artmış[14] ve küresel düzeyde elektrikli araçlara geçiş hızlanmıştır[15]. Elektrikli araçların artan popülaritesiyle[16] birlikte EA'ların şarj edilirindeki eksikliklerle alakalı çok sayıda çalışma yapıldı[17]. Ancak altyapı yetersizlikleri EA kullanıcıları veya

elektrikli araçlara geçmeyi düşünen kullanıcılar için endişe yaratarak EA geçişini yavaşlatıyor[18][19]. Ayrıca EA şarj istasyonlarının kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve bu altyapının sadece belirli bölgelerde sağlanması talebin karşılanmasında yeterli olmuyor [20]. Çünkü altyapının uygun olmaması durumunda elektrikli araç sahiplerinin araçlarını verimli bir şekilde kullanmaları mümkün olmayacaktır[21]. EA şarj istasyonlarının etkili optimizasyonu hem EA sahipleri hem de şarj istasyonu sahipleri için büyük önem taşıyor[22]. Gelişigüzel kurulan EA şarj istasyonları hem istasyon sahipleri için gereksiz maliyetlere neden olacak hem de müşteri taleplerini yeterince karşılayamayacaktır[23]. Son yıllarda elektrikli araç sayısındaki artış ve geleceğe yönelik elektrikli araç kullanım tahminleri, elektrikli araç şarj istasyonlarının çok yönlü optimizasyonunu gerektirmektedir[24].

Bu nedenle elektrikli araçların mevcut ve artan şarj istasyonu ihtiyaçlarının uygun şekilde karşılanabilmesi için elektrikli araç şarj istasyonlarının çok yönlü optimizasyonu büyük önem taşımaktadır[25]. Bu çalışmada EA şarj istasyonlarının konumu ve kapasitesinin yanı sıra araç sahiplerinin bekleme süreleri, istasyonların boşta kalma süreleri, hizmet maliyetleri ve karşılanmayan talepleri optimize etmek için bir matematiksel model oluşturulmuştur. Yapılan çalışma ve oluşturulan matematiksel model sadece güncel talepler için değil, aynı zamanda EPDK'ya ait olan 2030 ve 2035 yıllarına ait 3 farklı talep tahmin seviyesi dikkate alınarak ilerletilmiştir. Matematiksel modelin çalışma alanı olarak otoyol uygulaması için İstanbul-İzmir otoyolu, şehir içi uygulaması için İstanbul Avrupa yakası ve problem fazla büyüdüğünde modelin performansını görmek için oluşturulan büyük ölçekli rastgele oluşturulmuş bölge seçilmiştir. Oluşturulan problemin fazla büyüdüğü ve çözümünün sağlanamadığı noktada meta-sezgisel algoritmaların kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Bu noktada, Genetik algoritma seçilmiş ve problemin büyüdüğü yerlerde çözüm için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar kıyaslamaya tabi tutulmuş ve duyarlılık analizleri yapılarak matematiksel modelin değerlendirilmesi daha kolay bir hale getirilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Özellikle son yıllarda elektrikli araçların popülaritesinin artışıyla birlikte bu konuda yapılan akademik çalışmalarda da hızlı bir artış görülmektedir[26]. Elektrikli araç şarj istasyonlarının farklı açılardan optimizasyonu adına gerçekleştirilen çalışmalar dikkatle incelendiğinde çoğunluk olarak lokasyon ve kapasitelerin esas alındığı görülmüştür. 2018 yılında, Milano şehri için elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlarının mesafeye göre belirlenmesinde genetik algoritma kullanılmıştır[27]. Benzer şekilde 2019 yılında, Valensiya şehrinin popüler lokasyonları ve mevcut elektrikli araç şarj istasyonları dikkate alınarak elektrikli araç şarj istasyonlarının yerlerinin belirlenmesinde genetik algoritma kullanılmıştır[28]. Yine 2023 yılında oluşturulan modelde 2023 yılında Kopenhag kentindeki elektrikli araç talebini tahmin etmek ve elektrikli araç şarj istasyonlarının sayıları ve konumları optimize edilmek istenmiştir[29]. 2025 yılında İstanbul-Ankara otoyolu için kapasite limit aralığı kapsamında çok amaçlı bir model oluşturulmuş ve özellikle şehirlerarası güzergahlardaki bekleme süresi artışlarına odaklanmıştır[30]. Yine 2025 yılında önerilen sıralı tahmin optimizasyon yöntemi, elektrikli araç talebinin zaman serisine dayalı bir tahminini yaparak gerçek zamanlı sistem kapasitesi değerlendirmesi sağlar. Yöntem, sağlam bir tahmin altyapısına sahip olsa da, çok amaçlı istasyon konum sorunlarını doğrudan ele almaz[31]. 2021 yılında Milano şehrinin elektrikli şarj istasyonlarının yerlerini belirlemek için oluşturulan matematiksel model Evrimsel algoritma ile çözülmüştür. Daha sonra elde edilen sonuçlar Parçacık sürüsü optimizasyonu, Genetik algoritma, Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon ve Sosyal Ağ Optimizasyonu algoritmaları ile karşılaştırıldı[32].

Toplu taşımada yapılan çalışmalar dikkate alındığında, 2019 yılında Pekin'de toplu ulaşımda kullanılan elektrikli araçların şarj istasyonlarının yerlerinin belirlenmesine yönelik bir model oluşturularak çözüm sağlanmıştır[33]. Toplu taşımayla ilgili bir başka çalışma ise 2021 yılında yapılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı İstanbul'daki bir elektrikli otobüs aksı için EA şarj istasyonlarının yerlerini belirlemektir[34].

Farklı olarak 2023 yılında elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılmasının birden fazla konuttan gelen şarj taleplerini karşılayacak şekilde nasıl ayarlandığını araştırmıştır. Analizler, şarj istasyonlarının elektrikli araç sahiplerinin şarj ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde uygun şekilde konumlandırıldığını

göstermiştir[35]. Farklı olarak, 2018 yılında yapılan bir çalışmada hibrit meta-sezgisel algoritma kullanmıştır. Bu çalışmada, elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırma problemine çözüm bulmak için Parçacık sürüsü optimizasyonu ve Tabu Arama algoritmaları ile oluşturulan hibrit meta-sezgisel yöntem kullanılmaktadır. Analizler, önerilen hibrit meta-sezgisel yöntemin elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılmasında etkili olduğunu göstermektedir[36]. Benzer şekilde 2020 yılında meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları (Harries Hawk Optimizasyonu, Öğretme-Öğrenim Tabanlı Optimizasyon) kullanılarak elektrikli araç şarj istasyonlarının en iyi konumlarının belirlenmesine yönelik bir model sunulmuştur. Analizler, önerilen yöntemin etkili olduğunu ve çok amaçlı optimizasyon sürecinde avantajlar sağladığını göstermektedir[37]. Ayrıca 2011 yılında oyun teorisini kullanılarak elektrikli araç şarj istasyonlarının en uygun lokasyonlarının belirlenmesi için bir model sunulmuştur. Analizler, önerilen oyun teorisine dayalı modelin elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılmasında etkili olduğunu göstermektedir[38]. 2025 yılında EA şarj istasyonlarının optimum konumlandırılması için çok amaçlı parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) yöntemini uygulanmıştır. Çalışmanın amacı, standart bir IEEE-69 düğüm dağıtım sisteminde güç kayıplarını en aza indirmek ve voltaj profilini iyileştirmektir. Ancak, önerdikleri model, MINLP modelimizin temel bileşenleri arasında yer alan gelecekteki talep senaryolarını veya dinamik talep birikimini içermemektedir[39]. Subash ve Narmadhai 2025 senesinde, COPRAS tabanlı çok kriterli bir değerlendirme yöntemi kullanarak teknik, çevresel ve ekonomik kriterleri entegre ederek kentsel elektrikli araç şarj istasyonları için en uygun konumları belirlemiştir[40]. Ancak, bu çalışma değerlendirmesini nicel ağırlıklandırmaya dayandırmış ve zaman serisi talep projeksiyonlarını veya boşta kalma süresi veya kalan talep gibi dinamik performans metriklerini içermemektedir. 2025 yılında Wuhan'da uygulanan iki aşamalı bir optimizasyon modeli, ücretlendirme verimliliğini dengelemeyi amaçlamıştır. Gerçek dünya kullanım verilerine dayanan bu model, erişilebilirlik ve eşit dağıtım gibi sosyal hedeflere odaklanmaktadır. Ancak, model boşta kalma süreleri veya kapasite gelişimi gibi teknik bileşenleri içermediğinden, çok amaçlı MINLP yaklaşımımızla doğrudan karşılaştırılabilir değildir[41]. Ek olarak, bazı çalışmalarda, elektrikli araç şarj altyapısında meydana gelebilecek arızalar veya bakım gereksinimleri gibi belirsizlikleri göz önünde bulunduran modeller geliştirilmiştir. Örneğin, 2022 yılında, elektrikli otobüs ağları

için sağlam bir yerleşim modeli oluşturulmuş ve olası sistem arızalarında hizmet sürekliliğini sağlayan senaryolar değerlendirilmiştir[42]. Bu tür yaklaşımlar, yüksek operasyonel belirsizliklere sahip yoğun kentsel ağlarda sistem güvenilirliğini artırmak için önemlidir.

Örnekler arttırılabilir ama özetle, gerçekleştirilen literatür taramasında konu ile ilgili çoğunlukla son yıllarda olmak üzere hükümetler, vatandaşlar ve geliştirilen politikalara bakıldığında[43] elektrikli araçların dünya genelinde populer hale geldiği ve bunun sonucu olarak literatürde de bir takım çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar genellikle elektrikli araç şarj istasyonlarının lokasyon ve kapasitelerini optimize etmek için kurulan matematiksel modelin, uygulama alanı olarak seçilen farklı dünya şehirlerindeki çözümünü içermektedir. Bunlara ek olarak bazı çalışmalarda, oluşturulan matematiksel modelin farklı meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak sonuca ulaşıldığı ve elde edilen çıktıların yer yer birbirleri ile kıyaslandığı görülmüştür. İlgili sorunun optimizasyonu için bulanık mantık kullanılan çalışmalara da rastlanmıştır. Literatür tarama özeti Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1 Literatür Taraması Özeti

Yazar(lar)	Yıl	Uygulama Alanı	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Yöntem(ler)	Duyarlılık Analizi
Shuangshuang Chen,Yue Shi, Xingyu Chen, Feng Qi[44]	2015	Xi şehir içi alan	Kurulum ve servis maliyeti min.	Genetik Algoritma	Yok
Milad Akbari, Morris Brenna, Michela Longo[27]	2018	Milan şehir içi alan	Araç servis mesafesi min.	Genetik Algoritma	Yok
Jean Hassler, Zlatina Dimitrova, Marc Petit, Philippe Dessante[45]	2021	Rastgele oluşturulmuş 2 farklı aks	Araç mesafe maks.	Diferansiyel Gelişim Algoritması	Yok

Tablo 1.1 Literatür Taraması Özeti (Devamı)

Yazar(lar)	Yıl	Uygulama Alanı	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Yöntem(ler)	Duyarlılık Analizi
Jaume Jordan, Javier Palanca, Elena del Val, Vicente Julian, Vicente Botti[28]	2019	Valencia şehir içi alan	Kurulum ve servis maliyeti min.	Çoklu Ajan Sistemi, Genetik Algoritma	Yok
Michalis Mavrovouniotis, Georgios Ellinas, Marios Polycarpou[46]	2019	Oluşturulan bir otopark	Toplam gecikme min.	Karınca Kolonisi Optimizasyonu	Yok
Liu Zi-fa, Zhang Wei, JI Xing, Li Ke[47]	2012	Pekin şehir içi alan	Kurulum ve servis maliyeti min.	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu	Var
Jorge Garc´ıa-´Alvarez Miguel A. Gonz´alez Camino R.Vela[48]	2018	Oluşturulan bir şarj istasyonu	Toplam gecikme min.	Memetic Algoritma ve Açgözlü Rastgele Uyarlanabilir Arama Prosedürü	Yok
Sanchari Deba, Xiao-Zhi Gaob, Kari Tammic, Karuna Kalitad, Pinakeswar Mahanta[49]	2021	IEEE 33	Kurulum ve servis maliyeti min.	Tavuk Sürüsü Optimizasyonu ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyonu	Var
Sara Mehar, Sidi Mohammed Senouci[50]	2013	Köln şehir içi alan	Kurulum ve servis maliyeti min.	Genetik Algoritma	Var

Tablo 1.1 Literatür Taraması Özeti (Devamı)

Yazar(lar)	Yıl	Uygulama Alanı	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Yöntem(ler)	Duyarlılık Analizi
Guangyou Zhou, Zhiwei Zhua, Sumei Luo[51]	2022	İrlanda bölge	Kurulum, servis ve çevresel maliyetleri min.	Genetik Algoritma	Var
Daqıng Gong, Mıncong Tang, Borut Buchmeıster And Hankun Zhang[33]	2019	Pekin şehir içi alan	Araç servis mesafesi min.	Ajan Tabanlı Modelleme	Yok
Tao Yi, Xiao-bin Cheng, Hao Zheng, Jin-peng Liu[52]	2019	Pekin şehir içi alan	Şarj kolaylığı, şarj maliyeti ve şarj süresi min.	Yapay Bağışıklık Sistemi	Yok
Jian Ma,IDand Liyan Zhang[53]	2018	Çin şehir içi alan	Bekleme süresi ve servis maliyeti min.	Bass Model, Kuyruk Teorisi	Yok
Dong Jı, Mıngsong Lv, Jıayu Yang, And Wang Yı[54]	2020	Pekin şehir içi alan	Karşılanan talep ve kar maks.	Açgözlü Rastgele Uyarlanabilir Arama Prosedürü	Yok
Dimitrios Efthymiou, Katerina Chrysostomou, Maria Morfoulaki, Georgia Aifantopoulou[55]	2017	Thessaloniki şehir içi alan	Karşılanan talep maks.	Genetik Algoritma	Var
Hao Zhang, Lei Tang, Chen Yang, Shulin Lan[56]	2019	Şehir içi alan	Kurulum ve servis maliyeti min.	Geliştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritması	Yok

Tablo 1.1 Literatür Taraması Özeti (Devamı)

Yazar(lar)	Yıl	Uygulama Alanı	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Yöntem(ler)	Duyarlılık Analizi
Mariana T. Sebastiani, Ricardo Lüders, Keiko Verônica O.Fonseca[57]	2014	Curitiba şehir içi aks	Bekleme süresi min.	Simülasyon Modeli	Yok
Alessandro Niccolai, Leonardo Bettini, Riccardo Zich[32]	2021	Milan şehir içi alan	Toplam maliyet min.	Evrimsel Algoritma, Açgözlü Algoritma	Var
Christian Anker Vandeta, Jeppe Rich[29]	2023	Kopenhag şehir içi alan	Fayda maks.	Ajan Bazlı Simülasyon	Var
Hubert Maximilian Sistig, Dirk Uwe Sauer[58]	2023	Otobüs rotası	Mülkiyet maliyeti min.	Adaptasyonlu Büyük Komşu Arama Algoritması	Yok
Hyeon Woo,Yongju Sona,Jintae Chob, Sung-Yul Kimc, Sungyun Choi[59]	2023	Jeju Adası bölge	Maksimum talebin minimizasyonu	Hibrit (Genetik Algoritma ve Oyun Teorisi)	Yok
Jing-min Wang,Yan Liu,Yi-fei Yang,WeiCai, Dong-xuan Wang[60]	2019	Rastgele oluşturulmuş şehir ağı	Yol akışı maks.	Yakıt İkmali Akışı Doğrusal Programlama Modeli ve Robust Optimization yaklaşımı	Yok

Tablo 1.1 Literatür Taraması Özeti (Devamı)

Yazar(lar)	Yıl	Uygulama Alanı	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Yöntem(ler)	Duyarlılık Analizi
Sašo Karakatič[61]	2021	MDVRPTW	Seyahat, şarj ve bekleme süresi min.	İki Katmanlı Genetik Algoritma	Yok
Nida An Khofiyah, Ananda Vania Arisa Putri, Wahyudi Sutopo[62]	2021	Surakarta şehir içi alan	Kurulum ve servis maliyeti min.	Oluşturulan modelin deterministik çözümü sağlanmıştır.	Yok
Ragavendran Gopalakrishnan, Arpita Biswas, Alefiya Lightwala, Skanda Vasudevan[20]	2016	Kuzey Doğu İngiltere şehir içi alan	Bekleme süresi min.	Kanonik Korelasyon Analizi	Yok
Zhihui Tian, Wenbin Hou, Xiaoning Gu, Feng Gu and Baozhen Yao[63]	2018	Dalian şehir içi alan	Bekleme süresi min.	Karıştırılmış Karmaşık Evrim Algoritması	Yok
Khaoula Chraibi, Abdelahad Chraibi, Iham Chaker[36]	2018	Rastgele oluşturulmuş veri	Kurulum maliyeti min.	Hibrit (Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Tabu Arama Algoritması)	Var

Tablo 1.1 Literatür Taraması Özeti (Devamı)

Yazar(lar)	Yıl	Uygulama Alanı	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Yöntem(ler)	Duyarlılık Analizi
Yue Zhang, Qi Zhang, Arash Farnoosh, Siyuan Chena, Yan Li[64]	2019	Pekin şehir içi alan	Kurulum ve elektrik maliyeti min.	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu	Yok
Dandan Hua,Jinsong Zhang, Qing Zhang[65]	2019	Cixi şehir içi alan	Boş geçen süre min.	Hibrit (İkili Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Genetik Algoritma)	Yok
Stephan Hutterer, Franz Auinger, Michael Affenzeller[4]	2012	IEEE 14	Kurulum ve elektrik maliyeti min.	Simülasyon Tabanlı Optimizasyon	Yok
Miguel Campaña,Esteb anInga[13]	2023	San Luis Obispo şehir içi alan	Talep karşılama maks. ve Bekleme süresi min.	Kapasiteli Çoklu Ürün Akış Optimizasyonu	Yok
Hector Utreras, Rolando Armas[66]	2023	Cuenca şehir içi alan	Bekleme süresi min. ve İstasyon sayısı maks.	Çok Amaçlı Evrimsel Algoritmalar, Genetik Algoritma	Yok
Serap Ercan Comert, H arun Resit Yazgan[67]	2023	Türkiye'deki bir zincir market dağıtım rotası	Servis maliyeti, toplam mesafe ve istasyon sayısı min.	Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Yapay Arı Koloni Algoritması	Yok

Tablo 1.1 Literatür Taraması Özeti (Devamı)

Yazar(lar)	Yıl	Uygulama Alanı	Amaç Fonksiyonu	Kullanılan Yöntem(ler)	Duyarlılık Analizi
Hong Zhang ve Feifan Shi[68]	2023	Hohhot şehir içi alan	Kapsama ve Fayda maks.	NSGA-II	Yok
Ayyappan Subramaniam, Lal Raja Singh Ravi Singh[69]	2023	Atlanta kampüs içi alan	Kurulum ve servis maliyeti min.	Hibrit (Kartal Optimizasyonu ve Atom Arama Optimizasyonu)	Yok
K. Kathiravan, P.N. Rajn arayanan[70]	2023	IEEE 33	İletim kaybı min.	Aritmetik Optimizasyon Algoritması	Var
Saúl Zapotecas-Martínez, Rolando Arm as, Abel García-Nájera[71]	2023	Cuenca şehir içi alan	Seyahat süresi ve istasyon sayısı min.	NSGA-II	Yok
Mohammad Hossein Abbasi, Ziba Arjmandzadeh, Jiangfe ng Zhang; Venkat N. Krovi,Bin Xu, Dillip Kumar Mishra[72]	2024	Boulder şehir içi alan	Kurulum ve servis maliyeti min	Hibrit (Oyun Teorisi ve Lyapunov Optimizasyonu)	Yok
Ramón Piedra-de-la-Cuadra, Francisco A. Ortega[73]	2024	Anon şehir içi alan	İstasyon sayısı min. ve Talep karşılama maks.	Bilevel Optimizasyon	Yok
H. Pourvaziri, H. Sarhadi, N. Azad, H. Afshari, M. Taghavi[74]	2024	Halifax şehir içi alan	Kurulum maliyeti ve Bekleme süresi min.	Derin Öğrenme Algoritması ve NSGA-II	Var
Tugce Uslu, Onur Kaya[75]	2020	Türkiye otobüs güzergahla rı	Kurulum ve servis maliyeti min.	MILP model oluşturulup çözülümüş	Var

1.2 Tezin Amacı ve Önemi

Özellikle son yıllarda elektrikli araçlar içten yanmalı motorlara sahip geleneksel araçlara göre yüksek verimlilik, düşük maliyet ve çevreci yaklaşımlarıyla gittikçe yaygınlaşmaktadır. Gelişen elektrikli araç sektörüyle birlikte elektrikli araç şarj istasyonlarına olan ihtiyaç da artmaktadır. Bu bağlamda elektrikli araçlar için oluşan elektrikli araç şarj istasyonları ihtiyacına binaen bu çalışmanın gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Elektrikli araçların kullanımı için elektrikli araç şarj istasyonlarının yeterli sayıda, doğru lokasyonlarda ve yeterli kapasitelerde olmaları gerekmektedir. Bu durumda elektrikli araçların şarj istasyonlarının belirtilen hususlar dikkate alınarak bir optimizasyon çalışmasına tabi tutulmasının gerekliliği oluşmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada elektrikli araçların şarj istasyonlarının çok yönlü optimizasyonu ele alınacaktır.

Bu çalışmada, ülkemizde belirlenecek olan bölge veya akslardaki elektrikli araç şarj istasyonlarının güncel ve artan talebini karşılayacak şekilde, istasyonların kapasitesi, lokasyonu, sayısı, istasyon içerisindeki bekleme süresi gibi farklı yönlerin, oluşturulacak olan matematiksel model ile optimize edilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın başarılı bir şekilde gerçekleştirilebildiği takdirde çalışmada uygulanan yöntem ile ülke genelinde ihtiyaç duyulan ve duyulacak olan elektrikli araç şarj istasyonlarının daha önce bahsedilen farklı yönlerden optimizasyonu sağlanmış olacaktır. Bu sayede, hızla gelişmekte olan elektrikli araç sektörünün önemli bölümlerinden biri olan elektrikli araç şarj istasyonlarının yeterli sayıda, uygun kapasitede, minimum maliyetle verimli olarak sürdürülebilecek ve istenirse gerçek hayatta uygulanabilecek bir çalışma tamamlanmış olacaktır.

1.3 Orijinal Katkı

Bu çalışmada EA şarj istasyonlarının lokasyonu ve kapasitesinin yanı sıra araç sahiplerinin bekleme süreleri, istasyonların boşta kalma süreleri, hizmet maliyetleri ve karşılanmayan talepleri minimize etmek için bir matematiksel model oluşturulmuş ve ihtiyaç duyulan noktalarda Genetik algoritma ile modelin çözümü sağlanmıştır.

Bu çalışmanın literatürdeki çalışmalardan farkı, optimizasyonu amaçlayan hedef sayısı ve MINLP (karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama) problemi olarak formüle edilen özgün matematiksel modeldir. Böylece sonuçlar daha pratik ve etkili hale gelir. Doğrusal olmayan ilişkiler ve tamsayı değişkenlerin birleşimi sayesinde sistemin davranışı daha gerçekçi modellenmektedir. Çünkü bu çalışmadaki gibi gerçek dünya problemleri çoğunlukla doğrusal olmayan ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Ayrıca EA şarj istasyonu sahipleri veya kurucuları için kanıtlanmış verimlilik sağlanması ve EA kullanıcıları için yüksek talep yanıt oranı sağlanması da bu çalışmanın diğer önemli katkılarından bazılarıdır. Gerçekleştirilen çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan bir diğer farkı olarak, sadece mevcut talebi değil, gelecekte artan olası talepleri de karşılamak amacıyla yapıldığı söylenebilir. Bu amaç ile 2030 ve 2035 EA sayılarının 3 farklı seviyedeki tahminlerine göre EA şarj istasyonlarının optimizasyonu oluşturulan matematiksel modelin çözümü ile sağlanmıştır.

Bu çalışma sayesinde EA şarj istasyonlarının optimizasyonuna ihtiyaç duyulan bölgeler, otoyollar, akslar ve kentsel alanlarda gerekli veri setlerinin sağlanması durumunda bu ihtiyacı karşılayabilecek bir matematiksel modelin ortaya konularak kullanım için hazır hale getirilmiştir.

1.4 Tezin İçeriği

Bu çalışma, “Giriş”, “Malzeme ve Metot”, “Uygulamalar” ve “Sonuç ve Öneriler” kısımları ile toplam dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümünde, literatür özeti, tezin amacı ve önemi, orijinal katkı ve tezin içeriği alt başlıkları altında tezin Giriş bölümü tamamlanmıştır. Daha sonra Malzeme ve Metot bölümünde ilk olarak çalışmada kullanılan verilerin nasıl ve nerelerden elde edildiği ve devamında nasıl işlenerek kullanıma hazır hale getirildiği anlatılmıştır. Devamında oluşturulan matematiksel model detaylıca anlatılmıştır. Son olarak oluşturulan matematiksel modelin çözümü için kullanılan Genetik algoritma hakkında temel bilgiler verilmiş ve çalışmada nasıl kullanıldığından bahsedilmiştir. Üçüncü bölüm olan Uygulamalar kısmında, ikinci bölümde detaylı bir şekilde anlatılmış olan matematiksel modelin farklı uygulama alanları üzerindeki deterministik ve Genetik algoritma çözümlerinden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Ek olarak üçüncü bölümde sonuçlar değerlendirilmiş, duyarlılık analizleri yapılmış ve sonuçlar gerekli kıyaslamalara tabi tutulmuştur. Son bölüm olan Sonuç ve Öneriler bölümünde, çalışmada yapılanlar ve sonuçlar değerlendirilmiş ve olası gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2
MALZEME VE METOT

Bu çalışma için öncelikle matematiksel modelin oluşturulması gerekmektedir. Oluşturulan matematiksel modelin maliyeti, araçların istasyonda geçirdikleri süreyi, toplam istasyon sayısını, istasyon kapasitesini minimize ederken güncel ve artan talebi karşılaması gerekmektedir.

Matematiksel modelin oluşturulmasının ardından seçilen çalışma alanları için modelin çözümü gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı olarak şehir içi alanlar, akslar, şehirlerarası otoyollar ya da belirlenen bölgeler seçilebilirdi. Oluşturulan matematiksel modelin hem şehir için alandaki performansını hem de tek bir akstaki performansını hem de problemin büyüdüğü durumlarda modelin performansını görebilmek adına üç farklı uygulama alanı seçilmiştir. Bunlardan biri İstanbul-İzmir otoyolu, diğeri İstanbul Avrupa yakası ve son olarak büyük ölçekli oluşturulan rastgele bir bölge uygulama alanları olarak belirlendi.

Güncel ve gelecekteki taleplerin belirlenebilmesi adına ülkedeki toplam elektrikli araç sayıları TÜİK ve Karayolları Genel Müdürlüğünden sağlanan veriler ile sağlandı. İleriye dönük talep tahmini için EPDK'nın 2030 ve 2035 yılları için yaptığı tahminler kullanıldı.

Oluşturulan problemin büyüklüğü deterministik bir çözümün bulunmasını mümkün kılmadığı için çalışmanın devamında modelin çözümü için meta-sezgisel algoritmaların kullanımı ihtiyacı doğmuş ve bunun üzerine Genetik algoritma, oluşturulan matematiksel modelin çözümünde kullanılmıştır.

Çalışmada, matematiksel modelleme ve optimizasyon yazılımı olan GAMS ve PyCharm programları kullanılmıştır. Özellikle Genetik algoritmanın kullanımında PyCharm tercih edilmiştir.

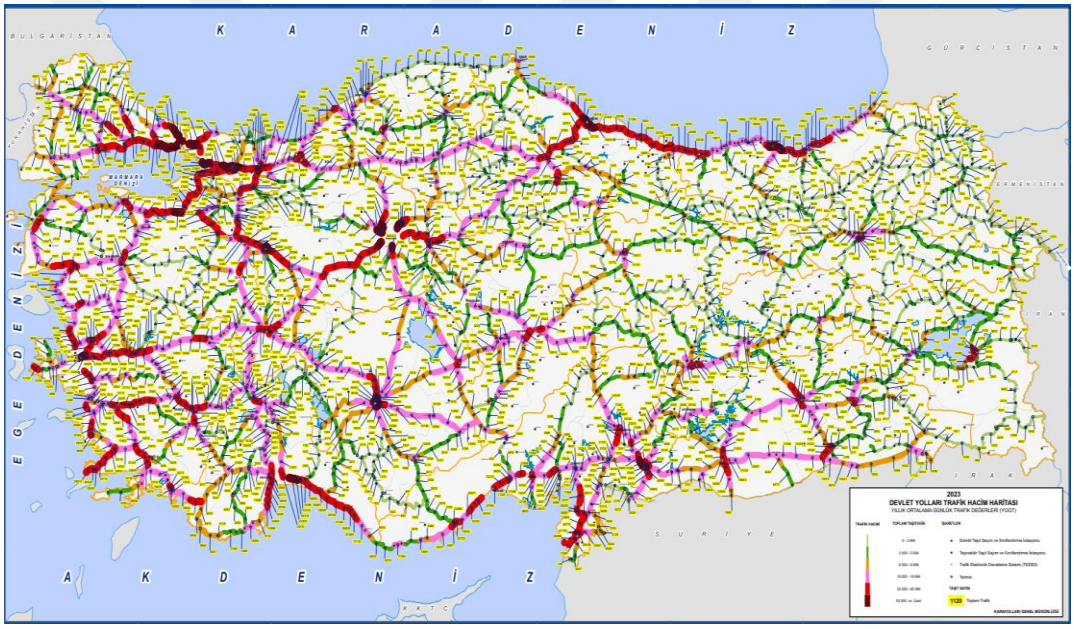
2.1 Veri Toplama ve Taleplerin Belirlenmesi

Elektrikli araç altyapısının doğru geliştirilmesi ve planlanması için mevcut talebin doğru belirlenmesi ve geleceğe yönelik talep tahmini önemlidir. Bu sayede trafiğin yoğun olduğu aksların, otoyolların, şehir içi alanların ve bağlantı yollarının altyapı

ihtiyaçları optimum şekilde belirlenebilmektedir. Bu sayede şarj istasyonlarının kapasiteleri ve verimlilikleri mevcut ve gelecekteki talepleri karşılayacak şekilde planlanabilir. Aynı zamanda müşteri bekleme süreleri ve boş istasyonlar en aza indirilebilir. Ayrıca şarj istasyonu sahiplerinin yeni istasyon açmalarında, bu yönde yatırım yapmalarında, daha doğru fizibilite çalışmaları ve kar hesaplamaları yapmalarında mevcut ve gelecekteki talepleri belirlemek önemli rol oynuyor.

Bu çalışmada verilerin Karayolları Genel Müdürlüğü, TÜİK ve Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı üzerinden sağlanabileceği belirlenmiştir.

Karayolları Genel Müdürlüğünden ülke üzerindeki tüm aksların yıl bazında ortalama günlük araç geçişleri sayı olarak bulunmaktadır. Şekil 2.1'de görülebileceği üzere;



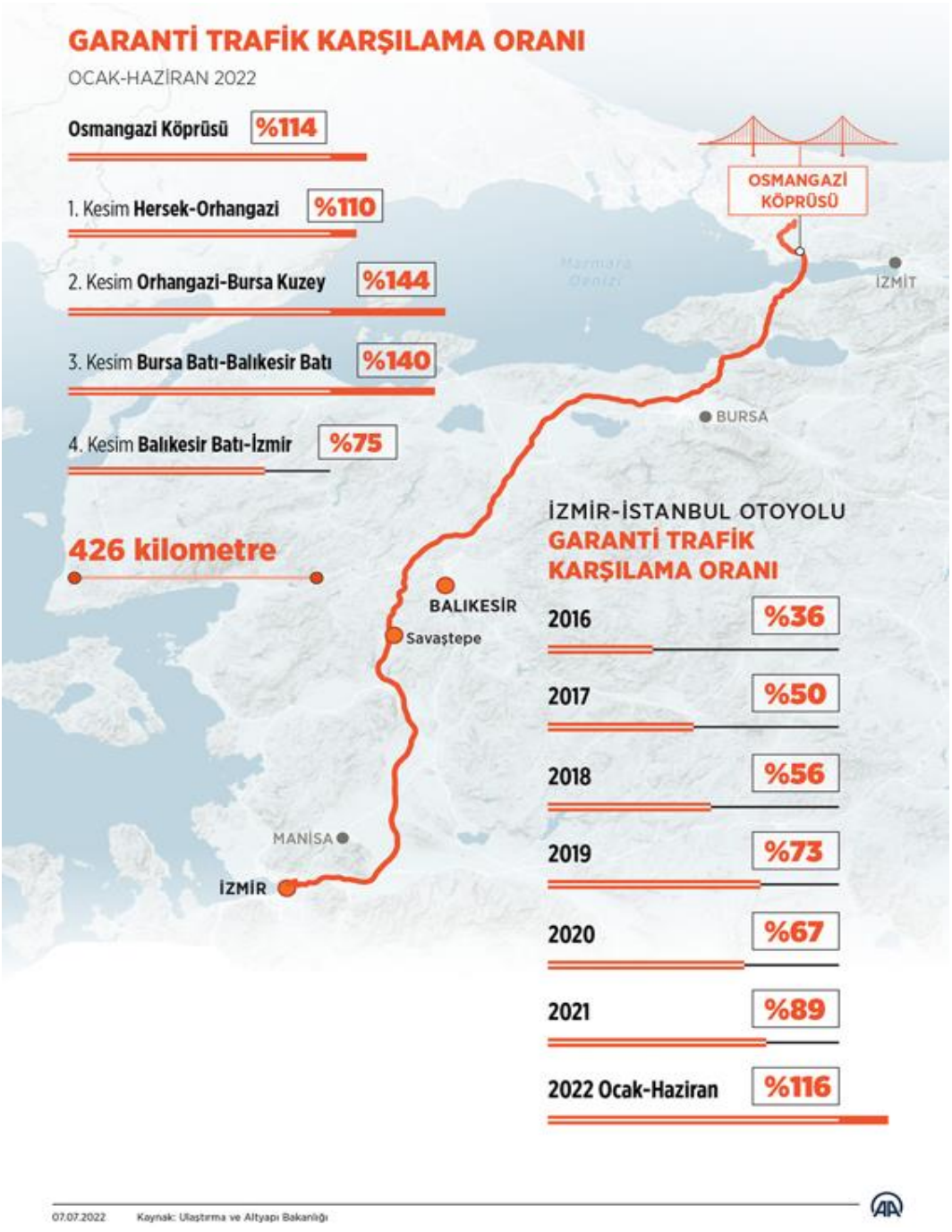
Şekil 2.1 Türkiye Trafik Hacim Haritası[76]

Bunun haricinde TÜİK'de trafikteki toplam araç sayısı ve trafikteki toplam elektrikli ve hibrit araç sayıları bulunmaktadır. Bu şekilde araç sayıları oranlanarak elektrikli araçların trafikteki toplam araç sayısının kaçta kaçına tekabül ettiği bulunabilmektedir.

Böylelikle, TÜİK verilerinden elde edilen oranı Karayolları Genel Müdürlüğünden alınan haritada istenilen aks üzerinde uygulayarak, belirlenen akstan geçen ortalama elektrikli araç sayısı bulunabilmektedir.

Talepleri belirlemek amacıyla Karayolları Genel Müdürlüğü'nden alınan 2023 yılı trafik yoğunluğu ve günlük geçiş araçları haritası ile İstanbul-İzmir otoyolunun ve İstanbul Avrupa yakasının kullanım sayıları hazırlanmıştır.

Bunun yanında İstanbul-İzmir otoyolu için Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığının 2022 yılında açıkladığı garanti geçiş sayıları Şekil 2.2'de gösterilmektedir;



Şekil 2.2 İstanbul-İzmir Garanti Geçiş Karşılama Oranları

Garanti geçiş sayısı ortalama olarak 45.000 olarak kabul edildiğinde 2022 yılının ilk 6 aylık geçiş sayıları belirlenebilmektedir. Ancak, 2023 yılı için direk bir veri bulunmamaktadır. Bu sebeple, 2022 yılının ikinci yarısı ve 2023 yılındaki garanti trafik karşılama oranının bulunabilmesi için Multiplicative Holt's Exponential Smoothing modeli (Üstel Düzeltme) kullanılmıştır. Bu modelin adımları aşağıda gösterilmiştir.

1. **Seviye Güncellemesi:**

$$L_t = \text{a}.\ \frac{y_t}{T_{t-1}} + (1-a).\ L_{t-1} \tag{2.1}$$

2. **Trend Güncellemesi:**

$$T_t = \beta.\ \frac{L_t}{L_{t-1}} + (1-\beta).\ T_{t-1} \tag{2.2}$$

3. **Tahmin Denklemi:**

$$y_{t+h} = L_t\ .\ (T_t)^h \tag{2.3}$$

2022'nin ilk yarısı için gözlemlenen seviye değeri: 116%

2022'nin ikinci yarısı için tahmin edilen seviye değeri:

$$y_{2022H2} = 116.(1{,}21)^1 = 116.(1{,}21) \approx 140{,}36\% \tag{2.4}$$

Buna göre 2022 tam yıl ortalaması 2022 Tam Yıl Oranı = (116+140) / 2 = 128% çıkmıştır. (2.5)

2023 yılı için : $y_{2023} = L_{2022}.(T_{2022})^1 = 128.(1{,}286)^1 \approx 164{,}6\%$ (2.6)

Veriler:

- **2016:** 36%
- **2017:** 50%
- **2018:** 56%
- **2019:** 73%
- **2020:** 67%
- **2021:** 89%

- **2022:** 128% (tam yıl ortalaması; H1=116, H2 (tahmin) =140 alınarak ortalama)
- **2023:** 164,6% (tahmin)

Elde edilen sonuç ile garanti geçiş sayısı olan 45.000 çarpıldığında günlük ortalama 74.000 araç geçisi belirlenmiştir.

Her bir talep noktasının taleplerinin belirlenmesi için trafik hacim haritasından alınan veriler normalize edilmiş ve bu normalleştirilmiş değerler İstanbul-İzmir otoyolunun kullanım sayılarıyla çarpılmıştır. TÜİK'den alınan veriler doğrultusunda (80.043/15.221.134)*100'den yaklaşık %0,5 olarak bulunmuştur.

Ek olarak, ileriye yönelik talebin belirlenebilmesi adına EPDK (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu)'nın 2030 ve 2035 yıllarındaki düşük, orta ve yüksek düzeydeki elektrikli araç sayılarının tahminleri de kullanılmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, elektrik, doğal gaz, petrol ve diğer enerji emtiaları dahil olmak üzere enerji piyasasının çeşitli yönlerini denetlemek ve düzenlemekle görevlidir. EPDK, EA'larin elektrik talebi, şebeke istikrarı ve enerji tüketim modelleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için tahmin modelleri ve metodolojileri kullanmaktadır.

Her bir noktanın talebi belirlendikten sonra EPDK'nın 2030 ve 2035 yıllarındaki 3 farklı senaryo tahminlerine göre bu hesaplamalar tekrarlandı.

EPDK'nın 2030 ve 2035 yıllarına ilişkin EA sayıları için tahminleri üç farklı tahmin düzeyiyle Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Güncel ve EPDK Elektrikli Araç Tahminleri[77]

	Elektrikli Otomobil Sayısı		
2023	**80.043**		
	Düşük Senaryo	**Orta Senaryo**	**Yüksek Senaryo**
2030	**776.362**	**1.321.392**	**1.679.600**
2035	**1.779.488**	**3.307.577**	**4.214.273**

Bu çalışmada 2030 ve 2035 yılı için düşük, orta ve yüksek düzeylerdeki tahminler kullanılmış, gelecekteki elektrikli araç şarj istasyonu ihtiyacı karşılanmaya çalışılmış ve günümüz talepleriyle karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Her bir talep

noktası, yıl ve tahmin düzeyi için İstanbul-İzmir otoyolunda belirlenen ve kullanılan talepler Uygulamalar bölümünde talep tablolarında gösterilmektedir.

İstanbul Avrupa yakasında yapılan uygulama için ise Karayolları Genel Müdürlüğü Hacim Haritaları, TÜİK ve EPDK verileri kullanılmıştır. Şekil-1'deki Karayolları Genel Müdürlüğü Hacim Haritasından İstanbul Avrupa Yakasına ait talep noktaları belirlenmiştir. Bu alternatif lokasyonların talepleri belirlenirken yine TÜİK'den alınan veriler doğrultusunda bulunan elektrikli araç oranı (80.043/15.221.134)*100'den yaklaşık %0,5 olarak kullanılmıştır. Buna ek olarak, yine TÜİK'den edinilen veriler ile bir otomobilin yıl içerisindeki toplam ortalama katettiği mesafe olan 13.000-14.000km verisine ulaşılmıştır. Aylık ortalama için bu sayı 12'ye bölünmüştür. Sonrasında elde edilen 1080-1100km değeri ortalama EA menzili 400km olarak kabul edilerek bu sayıya bölündüğünde, EA'ların ayda 3 defa yani 10 günde bir şarj dolum istasyonlarına girmeleri gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu hesaplamaların sonucunda elde edilen 2023 taleplerini İstanbul-İzmir otoyolunda olduğu gibi EPDK'nın 2030 ve 2035 yıllarındaki 3 farklı senaryo tahminlerine göre bu hesaplamalar tekrarlandı. İlgili talep tabloları Uygulama bölümünde verilmiştir.

Son olarak, oluşturulan matematiksel modelin alternatif sayısı arttırıldığında nasıl sonuçlar verdiğinin görülebilmesi için 250 alternatiflik yapay lokasyonlar ve her lokasyonun rastgele talepleri belirlenmiştir. Önceki uygulamalarda olduğu gibi 2030 ve 2035 senesi için olan talepler belirlenirken yine EPDK'nın verileri kullanılmıştır. Belirlenen bu taleplerin bulunduğu grafikler yine Uygulama bölümünde bulunmaktatır.

2.2 Matematiksel Model

Matematiksel modeller, gerçek dünya sistemleri ve olayları içindeki davranışı, yapıyı veya ilişkileri tanımlamak için matematiksel dil ve kavramları kullanan soyut temsillerdir. Karmaşık sistemleri anlamak, tahmin etmek ve optimize etmek için bir çerçeve sağlayan, temel araçlardandır[78].

Giriş bölümünde hem EA kullanıcıları hem de EA şarj istasyonu sahipleri için EA şarj istasyonlarının optimize edilmesinin öneminden bahsedilmişti. Bu noktada EA şarj istasyonlarının kapasiteleri ve konumları belirlenirken optimize edilmesi gereken bazı faktörler vardır. Bu önemli faktörlerden biri müşterilerin bekleme süreleridir. Çünkü müşterilerin bekleme sürelerinin uzun olması, açılan EA şarj istasyonlarının EA kullanıcılarının ihtiyaçlarını karşılamada yetersiz olduğunu gösterir. Bir diğer önemli faktör ise istasyonların boşta kalma süreleridir. Tam tersine, istasyonların boşta kalma süreleri çok fazla ise EA şarj istasyonu sahiplerinin ya çok fazla şarj istasyonu açarak ya da kapasitesi fazla şarj istasyonu açarak gereksiz masrafa girdiklerini gösterir. Elbette bu faktörler optimize edilmeye çalışılırken karşılanmayan talepler yani EA şarj istasyonuna gelen EA kullanıcılarının şarj talebinin karşılanamaması da dikkate alınmalıdır. Bu da bu çalışmada kaçınılan önemli noktalardan biridir.

Oluşturulan matematiksel model, konum, kapasite, müşteri bekleme süresi, istasyonun boşta kalma süresi, karşılanmayan talepler ve servis maliyetleri gibi faktörler dikkate alınarak elektrikli araç şarj istasyonu dağıtımının optimizasyonunu içermektedir. Oluşturulan matematiksel model aşağıda gösterilmiştir:

2.2.1 Oluşturulan Model

Sets

İ .. istasyon alternatifleri

J ..talep noktaları

T.. saat sayısı

Parametreler

M ..maksimum başlangıç kapasitesi

C.. istasyon kurma maliyeti

L.. uzaktan talep karşılama ceza katsayısı

G.. karşılanamayan talep ceza katsayısı

H ..idle kalma ceza katsayısı

P ..kapasitenin istasyon kurulumunda etki katsayısı

D ..talep

St ..servis süreleri

E ..istasyon ve talep noktaları arasındaki mesafe

Binary Değişkenler

X(i) ..i lokasyonuna istasyon açılıp açılmadığı

Değişkenler

Z.. amaç fonksiyonu

Y(i,j,t).. t anında j lokasyonundaki talebin hangi i lokasyonunda ne kadarının karşılandığı

F(j,t).. t anında j lokasyonundaki talebin ne kadarının karşılamadığı

Td(t) ..t anındaki toplam talep

Tf(t).. t anındaki toplam karşılanamayan talep miktarı

Ty(t).. t anındaki toplam karşılanabilen talep miktarı

Dd(j,t).. t anındaki j lokasyonundaki talep miktarı

Kt(i,t) ..t anında i lokasyonundaki istasyonun kapasite miktarı

Sc(i,t).. t anında i lokasyonundaki istasyonun toplam servis süresi

Ext(i,t) ..t anında i lokasyonundaki devam eden ve artan talepler

Yit(i,t) ..t anında i lokasyonundaki istasyondan karşılanan talep miktarı

İdlet(i,t).. t anında i lokasyonundaki istasyonun boş kaldığı süre

Sct(t) ..t anındaki toplam servis süresi

K(i) ..başlangıç kapasiteleri

Kurulum ..istasyon kurulum maliyeti

Servis.. servis maliyeti

Karsilanamayan. karşılanamayan talep maliyeti

Boszaman.. boş zaman maliyeti

Sonuc.. toplam maliyet

Amaç Fonksiyonu

Min z =

$$(c * \sum_{i} (\mathrm{x(i)} * \mathrm{k(i)} * \mathrm{p})) + (\mathrm{l} * (\sum_{i,j,t} y(i,j,t) * e(i,j))) + (g * (\sum_{j,t} f(j,t))) + (h * (\sum_{i,t} idlet(i,t)))$$

Kurulum maliyeti + Servis maliyeti + Karşılanamayan talep maliyeti + Boş zaman maliyeti

(2.7)

Amaç, kurulum maliyeti, hizmet maliyeti, karşılanmayan talep maliyeti ve boşta kalma süresi maliyetini içeren toplam maliyeti en aza indirmektir.

Oluşturulan matematiksel modelde amaç fonksiyonu birden fazla hedefi optimize etmeyi amaçlamaktadır ve bu hedeflerin her biri belirli bir ağırlık değeri ile çarpılmaktadır. Bu ağırlık değerleri, genel optimizasyon sürecinde her hedefin göreceli önemini yansıtır. Amaç fonksiyonunda karar vericinin tercihine bağlı olan ağırlık değerleri belirlenirken birbirleriyle dengeli olmasına dikkat edilmiştir. Dengeli ağırlıklar, hiçbir hedefin diğerlerine aşırı derecede baskın olmamasını sağlar. Çünkü ağırlık değerleri dengeli olmazsa sonuçlar gerçekçi ve doğru olmayacaktır. Örneğin 'g' değeri 'h' değerinden çok daha yüksekse sonuçlar istasyonların boşta kalma sürelerinin arttığını gösterecektir. Bunların detaylarına duyarlılık analizi bölümünde değinilecektir.

Kısıtlar

Kısıtlar, talep kapsamının maksimuma çıkarılmasını, istasyon kapasitelerine uyulmasını, zaman aralıklarının sağlanmasını, müşterilerin o istasyondaki bir sonraki zaman dilimine transferlerinin beklenmesini ve tüm değişkenlerin negatif olmamasını sağlar.

Modelimiz; talep, hizmet süreleri, dağıtım maliyetleri ve boşta kalma süresi, bekleme süresi ve karşılanmayan taleple ilişkili cezalar gibi faktörleri temsil eden çeşitli parametrelere, değişkenlere ve denklemlere sahiptir. Amaç fonksiyonu, kurulum maliyetlerini, dağıtım maliyetlerini, boşta kalma süresi cezalarını ve karşılanmayan talebi içeren toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlar.

Matematiksel model, şarj istasyonlarının maksimum başlangıç kapasitesi, kurulum maliyetleri, boşta kalma süresi cezaları, karşılanmayan talep ve dağıtım maliyetleri gibi faktörleri dikkate alır. Ayrıca normal dağılım gibi olasılık dağılımlarını kullanarak belirli bir aralıkta kalarak rastgele talep oluşturmayı da içerir. Temel kısıtlamalar aşağıda tanımlanmıştır.

1.Kısıt: Karşılanan ve karşılanamayan taleplerin toplamı, toplam talebe eşittir.

$$\sum_{i,j,t} \boldsymbol{y(i,j,t)} + \boldsymbol{f(j,t)} = \boldsymbol{dd(j,t)} \quad \forall \text{ j, n, t}$$

(2.8)

2.Kısıt: Açık olmayan istasyondan servis alınamasın

$$\boldsymbol{x(i)} * \boldsymbol{M} \geq \sum_{j} \boldsymbol{y(i,j,t)} \quad \forall \text{ i, t}$$

(2.9)

3.Kısıt: t=1 anında, i lokasyonundaki istasyondan kapasiteden fazla talep karşılanamasın

$$\boldsymbol{k(i)} \geq \sum_{j} \boldsymbol{y(i,j,'\,1')} \qquad \forall \text{ i, t=1}$$

(2.10)

4.Kısıt: y değişkeni "0"dan büyük olmak zorunda

$$\boldsymbol{y(i,j,t)} \geq \boldsymbol{0} \qquad \forall \text{ i, j, t}$$

(2.11)

5.Kısıt: Başlangıç kapasiteleri "0"dan büyük olmak zorunda

$$\boldsymbol{k(i)} \geq \mathbf{0} \qquad \forall \text{ i}$$

(2.12)

6.Kısıt: f değişkeni "0"dan büyük olmak zorunda

$$\boldsymbol{f(j,t)} \geq \mathbf{0} \qquad \forall \text{ j, t}$$

(2.13)

7.Kısıt: t anında taleplerin toplamı

$$\boldsymbol{td(t)} = \sum_{\boldsymbol{j}} \boldsymbol{dd(j,t)} \qquad \forall \text{ t}$$

(2.14)

8.Kısıt: t anında karşılanamayan taleplerin toplamı

$$\boldsymbol{tf(t)} = \sum_{\boldsymbol{j}} \boldsymbol{f(j,t)} \qquad \forall \text{ t}$$

(2.15)

9.Kısıt: t anında karşılanan taleplerin toplamı

$$\boldsymbol{ty(t)} = \sum_{\boldsymbol{i,j}} \boldsymbol{y(i,j,t)} \qquad \forall \text{ t}$$

(2.16)

10.Kısıt: taleplerin normal dağılıma göre rastgele şekilde değişken olarak tanımlanması

$$\boldsymbol{dd(j,t)} = \boldsymbol{d(j,}\mathbf{norm}\boldsymbol{,t)} \qquad \forall \text{ j, t}$$

(2.17)

11.Kısıt: t>1 iken talepleri normal dağılıma göre rastgele değişen ve önceki t'den karşılanmayan talebe göre tanımlama

$$\boldsymbol{dd(j,t)} = \boldsymbol{d(j,}\mathbf{norm}\boldsymbol{,t)} + \boldsymbol{f(j,t-1)} \qquad \forall \text{ j, t>1}$$

(2.18)

12.Kısıt: t anında i lokasyonundaki istasyonun toplam servis süresinin hesaplanması

$$\boldsymbol{sc(i,t)} = \sum_{\boldsymbol{j}} \boldsymbol{st(i,t)} * \boldsymbol{y(i,j,t)} \qquad \forall \text{ i, t}$$

(2.19)

13.Kısıt: t anında i lokasyonundaki istasyon kapasitelerinin "0"dan büyük olması

$$\boldsymbol{kt(i,t) \geq 0} \qquad \forall \text{ i, t}$$

(2.20)

14.Kısıt: karşılanan talebin istasyon kapasitesinden büyük olmaması kısıtı

$$\boldsymbol{kt(i,t) \geq \sum_j y(i,j,t)} \qquad \forall \text{ i, t}$$

(2.21)

15.Kısıt: t=1 anında istasyon kapasitelerinin hesaplanması

$$\boldsymbol{kt(i,'1') = k(i)} \qquad \forall \text{ i, t=1}$$

(2.22)

16.Kısıt: t'nin 1'den büyük olduğu durumlarda istasyon kapasitesinin hesaplanması

$$\boldsymbol{kt(i,t) = kt(i,t-1) - ext(i,t-1)} \qquad \forall \text{ i, t} \geq 1$$

(2.23)

17.Kısıt: servis süresinin 1'den büyük olduğu durumlar için artık sürelerin hesaplanması

$$\boldsymbol{ext(i,t) = (st(i,t) - 1) * \sum_j y(i,j,t)} \qquad \forall \text{ i, t}$$

(2.24)

18.Kısıt: servis süresinin 1'e eşit veya küçük olduğu durumlar için artık sürelerin hesaplanması

$$\boldsymbol{ext(i,t) = 0} \qquad \forall \text{ i, t}$$

(2.25)

19.Kısıt: servis süreleri "0"dan küçük olamaz

$$\boldsymbol{st(i,t) \geq 0} \qquad \forall \text{ i, t}$$

(2.26)

20.Kısıt: talep miktarları "0"dan küçük olamaz

$$\boldsymbol{d(j,t) \geq 0} \qquad \forall \text{ j, t}$$

(2.27)

21.Kısıt: t anında i istasyonunda karşılanan toplam talep miktarı

$$\boldsymbol{yit(i,t) = \sum_j y(i,j,t)} \quad \forall \text{ i, t}$$

(2.28)

22.Kısıt: t>1 iken boş zamanlarının hesaplanması

$$\boldsymbol{idlet(i,t) = x(i) * (kt(i,t) - sc(i,t) - ext(i,t-1))} \quad \forall \text{ i, t}$$

(2.29)

23.Kısıt: t=1 iken boş zamanlarının hesaplanması

$$\boldsymbol{idlet(i,'1') = x(i) * (k(i) - sc(i,'1'))} \quad \forall \text{ i, t}$$

(2.30)

24.Kısıt: boş zamanlar "0"dan küçük olamaz

$$\boldsymbol{idlet(i,t) \geq 0} \quad \forall \text{ i, t}$$

(2.31)

25.Kısıt: açılmayan istasyonların kapasitesi hesaplanamasın

$$\boldsymbol{x(i) * 100000 \geq k(i)} \quad \forall \text{ i}$$

(2.32)

26.Kısıt: maksimum kapasite sınırı

$$\boldsymbol{k(i) \leq m} \quad \forall \text{ i}$$

(2.33)

27.Kısıt: t anındaki toplam servis süresilerinin hesaplanması

$$\boldsymbol{sct(t) = \sum_i sc(i,t)} \quad \forall \text{ t}$$

(2.34)

28.Kısıt: artık değerler "0"dan küçük olamaz

$$\boldsymbol{ext(i,t) \geq 0} \quad \forall \text{ i, t}$$

(2.35)

29.Kısıt: rastgele oluşturulan talep miktarı "0"dan küçük olamaz

$$\boldsymbol{dd(j,t) \geq 0} \quad \forall \text{ j, t}$$

(2.36)

30.Kısıt: amaç fonsiyonundaki kurulum maliyetleri

$$\boldsymbol{kurulum} = (\boldsymbol{c} * (\sum_{\boldsymbol{i}} \boldsymbol{x(i)} * \boldsymbol{k(i)} * \boldsymbol{p})$$

(2.37)

31.Kısıt: amaç fonsiyonundaki servis maliyetleri

$$\boldsymbol{servis} = \mathbf{l} * (\sum_{\boldsymbol{i,j,t}} \boldsymbol{y(i,j,t)} * \boldsymbol{e(i,j)})$$

(2.38)

32.Kısıt: amaç fonsiyonundaki karşılanamayan talep maliyetleri

$$\boldsymbol{karsilanamayan} = \boldsymbol{g} * (\sum_{\boldsymbol{j,t}} \boldsymbol{f(j,t)})$$

(2.39)

33.Kısıt: amaç fonsiyonundaki istasyonların boş kalma maliyetleri

$$\boldsymbol{boszaman} = \boldsymbol{h} * (\sum_{\boldsymbol{i,t}} \boldsymbol{idlet(i,t)})$$

(2.40)

34.Kısıt: amaç fonsiyonundaki tüm maliyetlerin toplamı

$$\boldsymbol{sonuc} = \boldsymbol{kurulum} + \boldsymbol{servis} + \boldsymbol{karsilanamayan} + \boldsymbol{boszaman}$$

(2.41)

Gerçek dünya sorunları genellikle doğrusal olmayan ve karmaşık bir yapıya sahiptir. MINLP modelleri bu doğrusal olmayan ilişkileri ve kısıtlamaları doğrudan modelleyerek çözümün doğruluğunu ve kesinliğini artırır. Matematiksel modelimiz bir MINLP problemi olarak formüle edilmiştir. Bu sayede elde edilen sonuçlar pratikte daha uygulanabilir ve etkilidir. Doğrusal olmayan ilişkilerin tamsayı değişkenlerle entegre edilmesiyle sistemin davranışı daha gerçekçi modellenir. Doğrusal olmayan ilişkilerin ve tamsayı değişkenlerin birleşimi çözüm alanını genişletir ve potansiyel olarak daha iyi çözümlerin bulunmasına olanak tanır. Bu özellikle karmaşık ve çok boyutlu problemlerde önemli bir avantajdır.

Bu model, çeşitli maliyet faktörlerini ve operasyonel hususları dikkate alarak EA şarj istasyonlarının çok yönlü optimizasyonunu optimize etmek için kapsamlı bir çerçeve sağlar. Model, kısıtlar ve amaç fonksiyonundaki denklemlerle karşılanmayan talep, EA bekleme süreleri ve şarj istasyonunun boşta kalma süreleri arasındaki dengeyi sağlar. Ayrıca model, karar verici için değiştirilebilen parametre değerleri ile bu çelişen hedefleri önceliklendirmektedir.

Ayrıca akslar, şehir içi alanlar, otoyollar ve her türlü bölge için matematiksel model oluşturulmuştur. Doğru veri sağlanması durumunda talep noktaları ile istasyon alternatifleri arasındaki mesafeler, talepler ve servis süreleri kullanıcı tarafından çalışılan uygulama alanına göre düzenlenebilmekte ve böylece oluşturulan matematiksel model istenilen bölgede çalıştırılabilmektedir. Bu, matematiksel modelin çok yönlü kullanıma sahip olmasını ve EA şarj talebindeki hem mevsimsel hem de günlük dalgalanmalardan ve gelecek yıllar veya onyıllarda elektrikli araç sayısındaki artıştan bağımsız olarak istenen şehir veya ülkeye göre kolayca değiştirilmeye uygun olmasını sağlar.

2.3 Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA), meta-sezgisel algoritmalar arasında muhtemelen en fazla kullanılan evrimsel algoritmadır. Popüler optimizasyon problemlerinin bir çoğu genetik algoritma kullanılarak çözülebilmektedir[79]. Bununla birlikte, genetik algoritma popülasyon tabanlıdır[80] ve modern evrimsel algoritmaların çoğu direk olarak genetik algoritmayı temel alır ya da güçlü benzerliklere sahiptir[81]. Genetik algoritma büyük ölçekli uygulamalara çok uygun olan bir stokastik algoritma sınıfıdır[82]. Ölçekli, kısıtlı ve kısıtsız, tek ve çok amaçlı, optimizasyon sorunlarınlarının çözümünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır[83].

Genetik algoritma John Holland ve arkadaşları tarafından 1960 ve 1970'lerde geliştirilen [84], Charles Darwin'in doğal seçilim teorisini baz alan bir biyolojik evrim modelidir[85]. Genetik algoritmanın adaptasyonu yüksek ve yapay sistemlerinin çalışmasında seçim, çaprazlama, mutasyon ve rekombinasyon ilkeleri kullanılmaktadır[86]. Genetik algoritmanın problem çözme stratejisinde bu operatörler temel bileşenlerdir. [55]. Günümüze kadar, genetik algoritmanın birçok çeşidi geliştirilmiş ve uygulanmıştır[87]. İlk akla gelen problem türlerinin

dışında[88], grafik renklendirmeden kalıp tanımaya, farklı yapıdaki sistemlerden sürekli sistemlere[89] ve çok amaçlı mühendislik optimizasyonlarından finansal piyasalara[44][90] kadar geniş bir çalışma sahasında Genetik algoritmanın kullanımı örneklendirebilir[91].

Genetik bir algoritmada, popülasyondaki her bireyin genellikle bir kromozom olarak temsil edildiği bir potansiyel çözüm popülasyonu oluşturulur[85]. Algoritma, bu popülasyonu rastgele veya bazı buluşsal yöntemlere dayalı olarak başlatılır[80]. Daha sonra her birey, eldeki problemi ne kadar iyi çözdüğünü ölçen bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak değerlendirilir. Bu uygunluk puanı, bireyin üreme için seçilme olasılığını belirler[84].

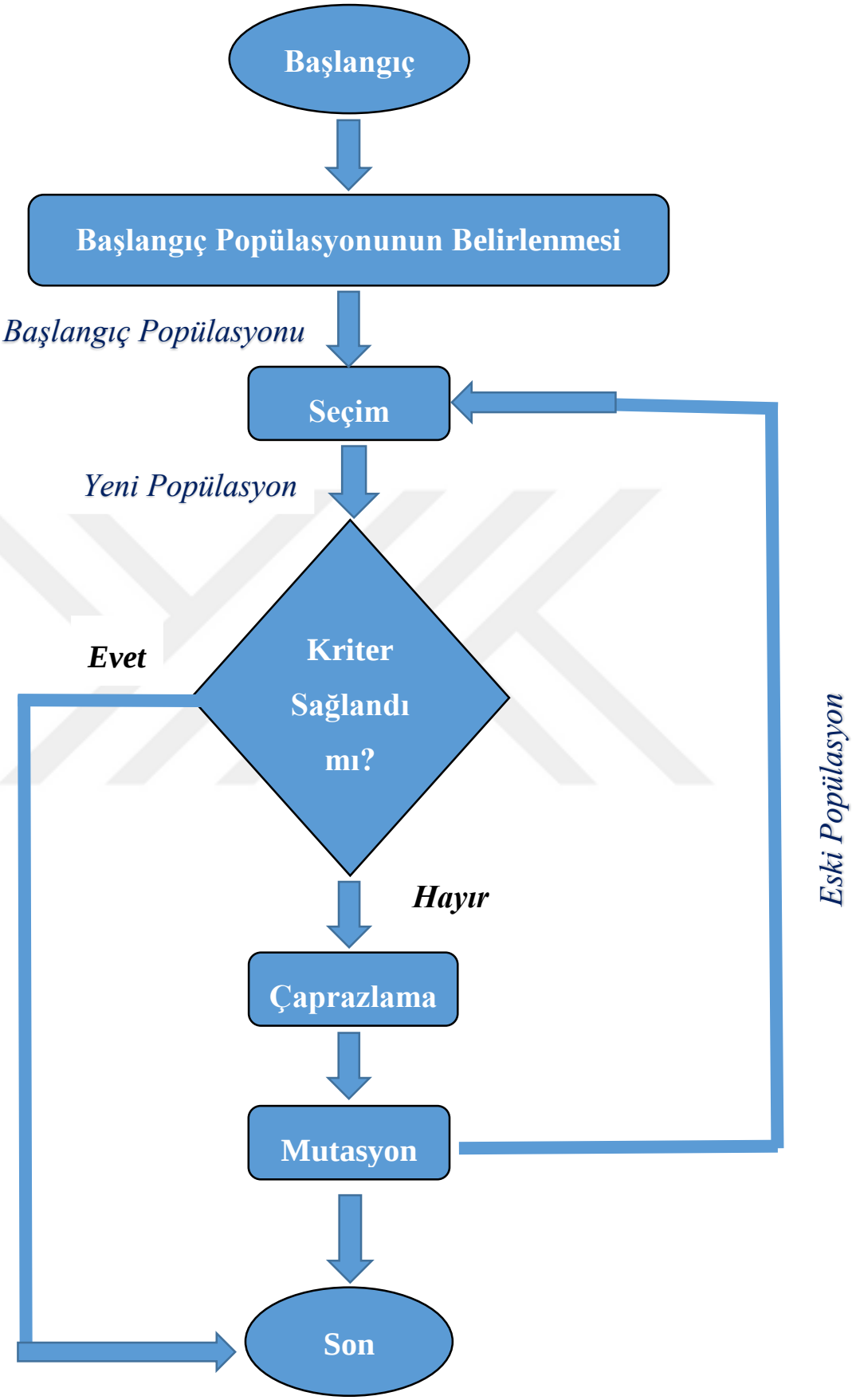
Seçim, mevcut popülasyondan gelecek neslin ebeveyni olarak hizmet edecek bireylerin seçilmesi sürecidir. Daha yüksek uygunluk puanına sahip bireylerin seçilme şansı daha yüksektir, bu da en etkili çözümlerin gelecek nesiller üzerinde daha fazla etkiye sahip olmasını sağlar[55]. Yaygın seçim yöntemleri arasında rulet çarkı seçimi, turnuva seçimi ve sıra seçimi yer alır.

Ebeveynler seçildikten sonra yavru üretmek için çaprazlama (veya rekombinasyon) uygulanır. Bu, çözüm uzayında yeni bölgelerin keşfedilmesini teşvik ederek yeni kromozomlar oluşturmak için iki ebeveynin genetik bilgisini birleştirmeyi içerir[92]. Ebeveyn kromozomları boyunca geçiş noktaları seçilir ve yavruların kromozomunu oluşturmak için genler değiştirilir. Bu süreç değişkenliği ortaya çıkarır ve farklı parametre kombinasyonlarını keşfederek algoritmanın yerel optimumlardan kaçınmasına yardımcı olur[93].

Mutasyon daha sonra yavruların kromozomlarına uygulanır ve bireysel genlerde rastgele değişiklikler meydana gelir. Bu adım, popülasyon içindeki genetik çeşitliliği korur ve optimal olmayan çözümlerde erken yakınsamayı önler[94]. Yeni çözümlerin araştırılması ile avantajlı özelliklerin korunmasını dengelemek için mutasyon oranları genellikle düşük tutulur.

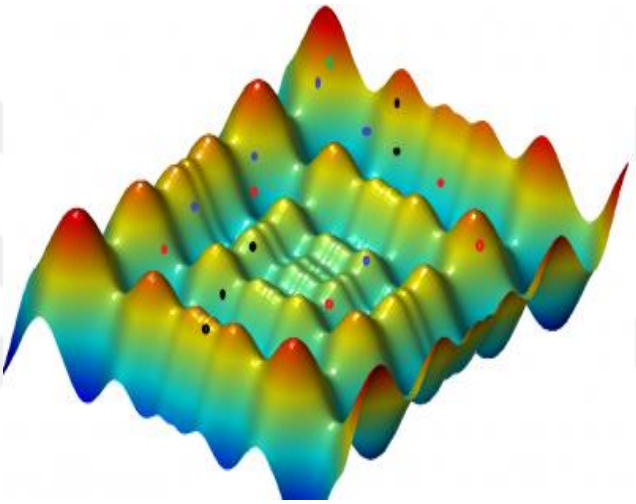
Çaprazlama ve mutasyondan sonra yeni nesil bireyler eski popülasyonun bir kısmının veya tamamının yerini alır. Değiştirme stratejileri farklılık gösterir; bazı algoritmalar tüm popülasyonun yerini alırken, diğerleri mevcut neslin en iyi bireylerini elde tutmak için elitizmi kullanır. Bu, en yüksek kalitedeki çözümlerin korunmasını ve sonraki nesillere yayılmasını sağlar[95].

Algoritma, bir sonlandırma koşulu karşılanıncaya kadar bu döngüyü tekrarlar. Bu durum tatmin edici bir uygunluk düzeyine ulaşmak, maksimum sayıda nesli tamamlamak veya birkaç yinelemede önemli bir gelişme gözlemlememek olabilir. Süreç boyunca bulunan en iyi çözüm daha sonra algoritmanın çıktısı olarak döndürülür[84]. Genetik algoritmanın genel akış şeması Şekil 2.3'de verilmiştir[96].

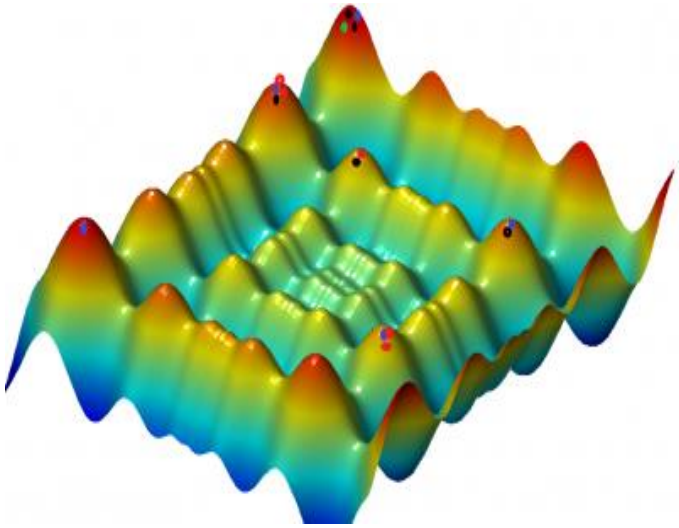


Şekil 2.3 Genetik Algoritma Akış Şeması

Genetik algoritmanın performansı popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı ve çaprazlama oranı gibi parametre seçimlerine duyarlıdır ve en iyi sonuçlar için dikkatli ayarlama gerektirir. Genetik algoritmayı etkili bir şekilde kullanmak için, problemin hedeflerini doğru bir şekilde yansıtan, iyi tasarlanmış bir uygunluk fonksiyonunun tanımlanması önemlidir. Uygun algoritma parametrelerinin seçilmesi ve popülasyon içindeki genetik çeşitliliğin korunması da çok önemlidir[85]. Genetik algoritmanın başlangıç ve bitiş popülasyonun başlangıç ve final lokasyonları Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de gösterilmiştir[97].



Şekil 2.4 Genetik Algoritma (başlangıç popülasyonu ve lokasyonları)



Şekil 2.5 Genetik Algoritma(final lokasyonları)

Sonuç olarak, genetik algoritma karmaşık optimizasyon ve arama problemlerini çözmek için güçlü araçlardandır. Doğal seçilim ve genetiğin evrimsel süreçlerini taklit ederek, geleneksel yöntemlerle elde edilmesi zor olabilecek yüksek kaliteli çözümler bulmak için geniş ve karmaşık çözüm alanlarını keşfedebilirler. Bu sadece klasik tarzdaki Genetik algoritma kullanımı[98] ile değil aynı zamanda Genetik algoritmanın farklılaştırılarak[99] ya da diğer algoritmalarla hibritlenerek olan kullanımı ile de yapılmaktadır[100].

Bu çalışmada, elektrikli araç şarj istasyonlarının çok yönlü optimizasyonu için oluşturulan matematiksel modelin problemin fazla büyüdüğü durumlarda deterministik çözümünün sağlanamaması üzerine meta-sezgisel algoritmaların kullanımı ihtiyacı doğmuştur. Bu noktada, hem büyük ölçekli problemlerde hem de lokasyon planlama problemlerinde minimum sorunla çalışabilmesinden dolayı Genetik algoritma oluşturulan matematiksel modelin çözümünde kullanılmak için seçilmiştir[65]. Genetik algoritma, oluşturulan matematiksel modelin çözümü için kullanılırken Genetik algoritma operatörleri ve popülasyonlar şu şekilde belirlenmiştir.

Genetik algoritma modelimizde, popülasyondaki bireyler iki bileşen içerecek şekilde temsil edildi; x, bir istasyonun açık olup olmadığını gösteren ikili (binary) bir liste ve k, açık olan her istasyona sıfırdan farklı bir şekilde atanan kapasiteyi temsil eden bir liste. İlk popülasyon, generate_x() ve generate_k(x) kullanılarak rastgele oluşturulur. Burada her istasyona açık olma durumu için 0 veya 1 ataması yapılır ve açıksa, 1 ile maksimum kapasite M arasında rastgele bir kapasite atanır. İlk popülasyon uygunluk fonksiyonu kullanılarak değerlendirildikten sonra, evrim süreci başlar.

Her nesilde, bireyler turnuva seçimi kullanılarak seçilir. Burada bireylerin bir alt kümesi yarışır ve aralarından en iyileri seçilir. Bu, keşif ve sömürünün dengelenmesine yardımcı olur. Seçilen bireyler daha sonra eşleştirilir, x ve k değerlerinin her genin yeni yavru üretmesi için %50 şansla değiştirildiği çaprazlama geçirebilirler.

Çaprazlamanın ardından, belirtilen bir mutasyon olasılığı ile bireyler, istasyonların açık/kapalı durumunu rastgele değiştiren ve kapasitelerini buna göre ayarlayan mutasyona uğrayabilir. Çaprazlama ve mutasyondan sonra, değiştirilmiş bireylerin uygunluk değerleri yeniden değerlendirilir ve yeni yavrular eski popülasyonun yerini alır.

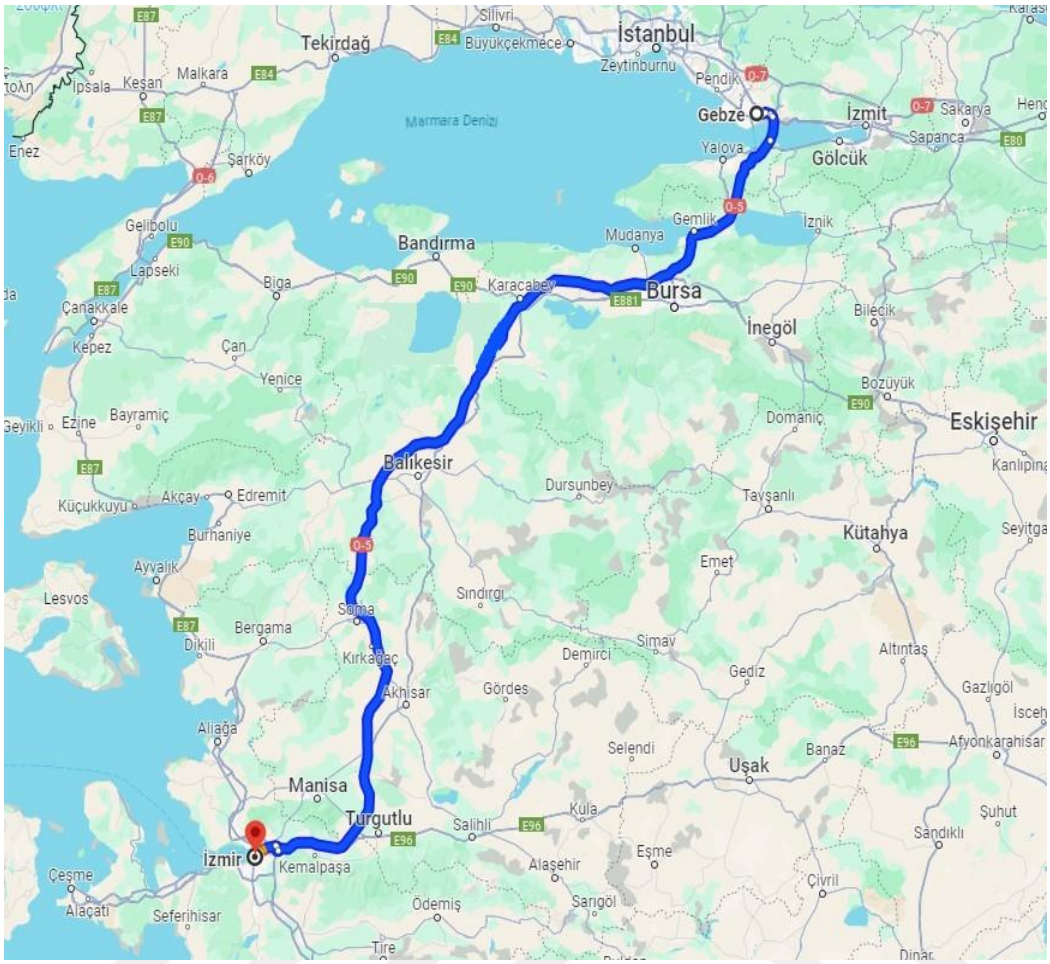
Bu döngü belirlenen iterasyon sayısı boyunca devam eder. Bu çalışmada bu sayı problem büyüklüğü belirli bir seviyeye gelene kadar 70-80 arası iterasyonlarda optimal sonuca ulaşabildiği ve daha yüksek problem büyüklüklerinde ise çözüm optimale oldukça yaklaştığı için iterasyon sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Sürecin sonunda, en iyi bireyler, en verimli istasyon yapılandırmasını ve kapasite tahsisini temsil eden minimum uygunluk değerine yani minimum toplam maliyete göre seçilir.

3
UYGULAMALAR

Oluşturulan matematiksel modelin hem tek bir aksta hem şehir için alanlarda hem de büyük ölçekli durumlarda performansını görebilmek adına üç farklı uygulama yapılmıştır. Bunlardan ilki İstanbul-İzmir otoyolu, diğeri İstanbul Avrupa yakası ve sonunucusu 250 talep noktası ve 250 istasyon alternatifli rastgele oluşturmuş bir alan olarak belirlenmiştir. 2023 yılına ait verilerle oluşturulan taleplerin yapılan uygulamalarda kullanımının yanı sıra EPDK'nın 2030 ve 2035 seneleri için gerçekleştirdikleri 3 farklı seviyedeki elektrikli araç sayıları tahminleri kullanılarak oluşturulan talep verileri de kullanılmıştır. Bu sayede oluşturulan matematiksel modelin sadece güncel talep için değil artan talep için de kapsayıcı olup olmadığı gözlemlenmiş oldu. Matematiksel modelin çözümü sağlanırken 2. bölümde de bahsedildiği üzere problemin fazla büyümesi sebebiyle deterministik çözümler sağlanamamaya başlanmış ve bunun üzerine meta-sezgisel algoritmalardan Genetik algoritmanın kullanımı uygun görülmüştür. Üç uygulama için de oluşturulan modelin Genetik algoritma ile çözümü sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar gerekli kıyaslara tabi tutulmuş ve duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.1 İstanbul-İzmir Otoyolu- Aks Uygulaması

Uygulama çalışmalarının ilki, 384 kilometresi otoyol, 42 kilometresi bağlantı yolları olmak üzere toplam 426 kilometre uzunluğundaki İstanbul-İzmir Otoyolu ile ilgilidir. Tamamlanan bölümleri kademeli olarak hizmete açılan otoyolun tamamı 4 Ağustos 2019'da açılmıştır. İstanbul-İzmir otoyolunun harita üzerindeki gösterimi Harita 3.1'de verilmiştir.

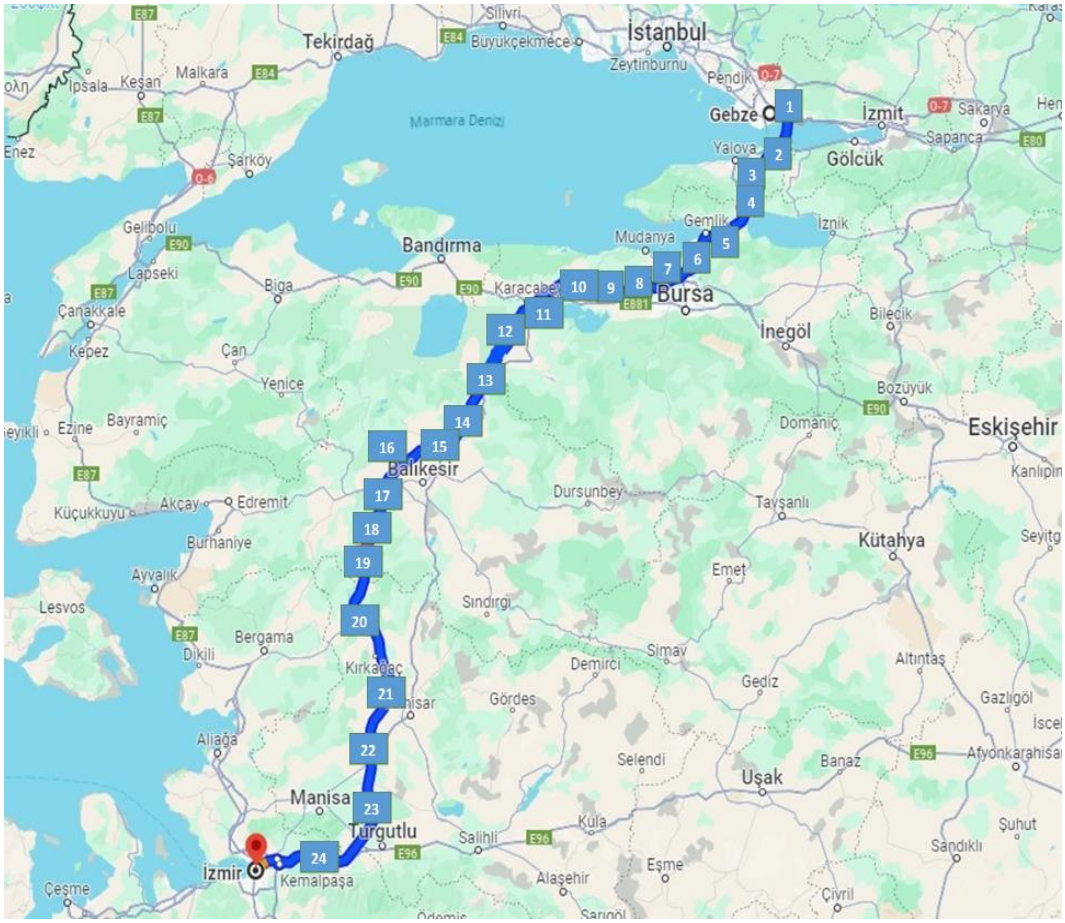


Harita 3.1 İstanbul-İzmir Otoyolu

Otoyolun güzergahı 100 kilometre kısaltmasıyla, İstanbul-İzmir arasında 8,5 saat süren seyahat süresi 3,5 saate düştü. Bu, yerleşim alanlarından ve mevcut devlet yolundan geçerek oluşan şehir içi trafikteki aşırı sıkışıklığı hafifletti. Ayrıca, İstanbul-Bursa arasında 3 saat süren seyahat süresi 1 saate düştü.

Şu anda bu otoyolda halihazırda bazı EA şarj istasyonları bulunmaktadır. Ancak bu EA şarj istasyonları, hem mevcut talebi ve hem de EPDK'nın 2030 ve 2035 yılları EA verilerinden tahmin edilen gelecekteki talepleri karşılamaya yeterli değildir. Bu nedenle bu çalışmada çok az sayıda olan mevcut EA şarj istasyonları dikkate alınmamıştır. Ayrıca, İstanbul-İzmir otoyolu boyunca EA şarj istasyonlarının yerleşimi ve güç kapasitesinin optimize edilmesine yönelik teknik, coğrafi ve mevzuatla ilgili zorluklar şarj ağının operasyonel verimliliğini etkilememektedir. Çünkü otoyolun çevresi dinlenme tesisleri, benzin istasyonları, elektrikli araç şarj istasyonları ve benzeri yol kenarı mağazaların yerleşimi için oldukça uygundur.

Aşağıdaki harita EA şarj istasyonlarının alternatif lokasyonlarını göstermektedir. Bu noktalar, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2023 yılı için günlük trafik yoğunluğu ve geçen araç haritasından elde edilen talep noktalarına göre belirlenmiştir.



Harita 3.2 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyon Alternatifleri

Harita 3.2'de gösterilen alternatif noktalarının taleplerinin Veri Toplama ve Taleplerin Belirlenmesi bölümünde anlatıldığı şekilde güncel veriler ile 2030 ve 2035 yıllarının farklı tahmin seviyelerine göre belirlenmiş talep tabloları Tablo 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Güncel ve 2030 Yılı Talep Tahminleri

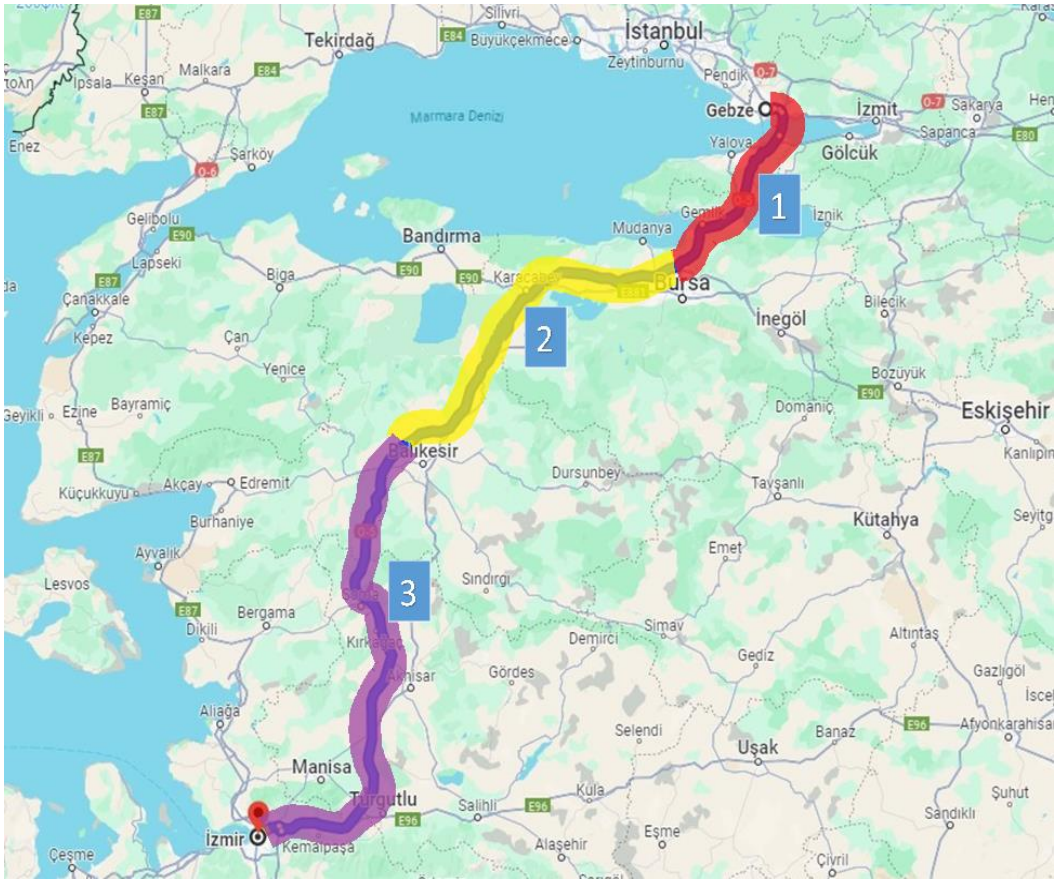
	2023 Verileirne Göre	EPDK'nın 2030 Tahminlerine Göre		
Talep Noktaları	**Güncel Talep**	**Düşük**	**Orta**	**Yüksek**
1	3,037366	29,50042	50,19248	63,78469
2	2,699881	26,2226	44,61554	56,69751
3	2,0511	19,92131	33,89442	43,07309
4	1,417438	13,76686	23,42316	29,76619
5	1,82242	17,70025	30,11549	38,27082
6	2,595936	25,21303	42,89784	54,51465
7	2,83096	27,4957	46,78162	59,45017
8	2,294899	22,28921	37,92321	48,19288
9	0,834862	8,108601	13,7961	17,53211
10	0,715596	6,950229	11,82523	15,02752
11	0,644037	6,255206	10,64271	13,52477
12	0,453211	4,401812	7,489312	9,517431
13	0,333945	3,24344	5,51844	7,012844
14	0,811009	7,876927	13,40193	17,03119
15	0,405505	3,938463	6,700963	8,515596
16	1,001835	9,730321	16,55532	21,03853
17	0,737805	7,16593	12,19223	15,4939
18	0,771341	7,491654	12,74642	16,19817
19	0,771341	7,491654	12,74642	16,19817
20	1,106707	10,74889	18,28834	23,24085
21	1,039634	10,09745	17,17995	21,83232
22	0,637195	6,188758	10,52965	13,3811
23	1,006098	9,771723	16,62576	21,12805
24	0,804878	7,817378	13,30061	16,90244

Tablo 3.2 Güncel ve 2035 Yılı Talep Tahminleri

	2023 Verileirne Göre	EPDK'nın 2035 Tahminlerine Göre		
Talep Noktaları	**Güncel Talep**	**Düşük**	**Orta**	**Yüksek**
1	3,037366	67,6175	125,6368	160,0417
2	2,699881	60,1044	111,6772	142,2593
3	2,0511	45,6613	84,8411	108,0744
4	1,417438	31,5548	58,6305	74,6861
5	1,82242	40,5705	75,3821	96,0250
6	2,595936	57,7904	107,3776	136,7823
7	2,83096	63,0225	117,0991	149,1660
8	2,294899	51,0888	94,9256	120,9204
9	0,834862	18,5856	34,5330	43,9897
10	0,715596	15,9305	29,5997	37,7055
11	0,644037	14,3375	26,6398	33,9349
12	0,453211	10,0893	18,7465	23,8801
13	0,333945	7,4342	13,8132	17,5959
14	0,811009	18,0546	33,5464	42,7329
15	0,405505	9,0273	16,7732	21,3664
16	1,001835	22,3027	41,4396	52,7876
17	0,737805	16,4249	30,5184	38,8756
18	0,771341	17,1715	31,9056	40,6427
19	0,771341	17,1715	31,9056	40,6427
20	1,106707	24,6374	45,7775	58,3135
21	1,039634	23,1442	43,0032	54,7793
22	0,637195	14,1852	26,3568	33,5744
23	1,006098	22,3976	41,6160	53,0122
24	0,804878	17,9181	33,2928	42,4098

Bu talepler kullanılarak öncelikle, GAMS optimizasyon yazılımı, 12. Nesil Intel(R) Core(TM) i7-12700F, 2.10 GHz, 32,0 GB Ram'e sahip bir kişisel bilgisayarda oluşturulan matematiksel model çözüm için kullanılmaya çalışıldı. Problem hacmi fazla büyük olduğu için ve GAMS yazılımı bu bilgisayarla sorunu çözemediğinden,

aks 3 parçaya bölündü. Birinci parça Gebze-Bursa, ikinci parça Bursa-Balıkesir ve son parça Harita 3.3'de gösterilen Balıkesir-İzmir'dir.



Harita 3.3 İstanbul-İzmir Otoyolu Bölünmüş Hali

Her parça talep yoğunluğuna ve aks uzunluğuna göre belirlenir. İlk parça mesafe açısından en kısa olmasına rağmen talep açısından en yoğun parçadır. Diğer iki parçanın talepleri benzerdir.

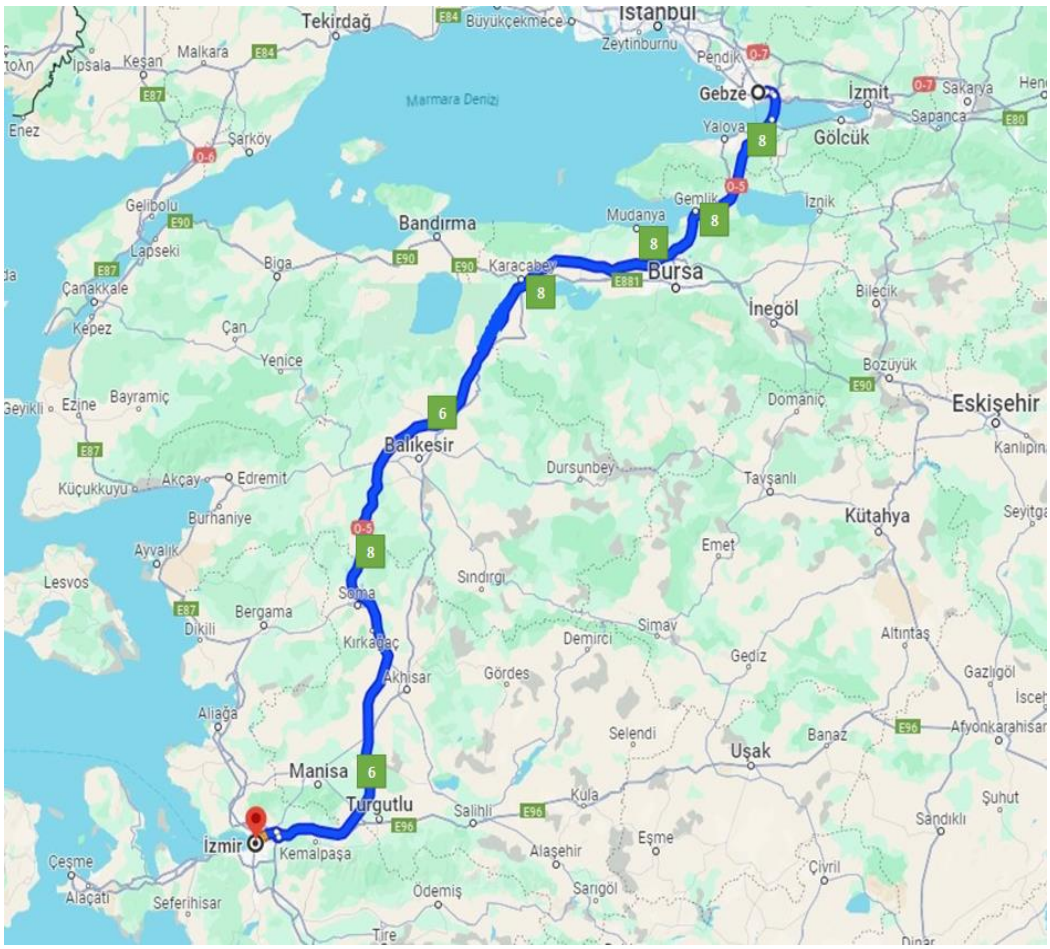
3.1.1 Deterministik Çözüm ile Edinilen Sonuçlar

Oluşturulan matematiksel model, belirlenmiş olan talepler ve EA şarj istasyonu alternatifleri baz alınarak farklı talep tahmin seviyeleri için GAMS yazılımı üzerinde çalıştırılmıştır. Sonuçlar güncel taleplere göre ve gelecek talep tahminlerine göre olmak üzere iki ayrı başlık altında incelenmiştir.

3.1.1.1 Güncel Taleplere Göre Sonuçlar

Yukarıda gösterilen talep tablosuna göre, mevcut talepler sırasıyla 8, 8, 8, 8, 6, 8 ve 6 kapasiteli 7 şarj istasyonu ile karşılanabilir. Matematiksel model çözülürken

mümkün olduğunca gerçekçi parametreler kullanılmaya çalışılmıştır. Sonuçların konumları ve kapasiteleri Harita 3.4'de verilmiştir.



Harita 3.4 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (Güncel Talep)

Bu harita, İstanbul-İzmir otoyolunda mevcut elektrikli araç şarj istasyonu talebini karşılamak için istasyonları ve kapasitelerini matematiksel modelin çözümüyle göstermektedir. 10. ve 11. zaman dilimlerinde bekleyen müşteriler bulunmaktadır. 10. zaman diliminde 1,4 ve 8 numaralı talep noktasından ve 11. zaman diliminde 5 ve 8 numaralı talep noktalarının her birinden hizmet almak için bekleyen 1 müşteri bulunmaktadır. Bu müşteriler haricinde, EA şarj istasyonlarının yerlerinin ve kapasitelerinin karşılanmamış talep olmaksızın minimum istasyon kurulum maliyeti, minimum servis maliyeti, minimum bekleme süresi ve minimum boşta kalma süresi maliyetine sahip olacak şekilde çözüm sağlanmıştır.

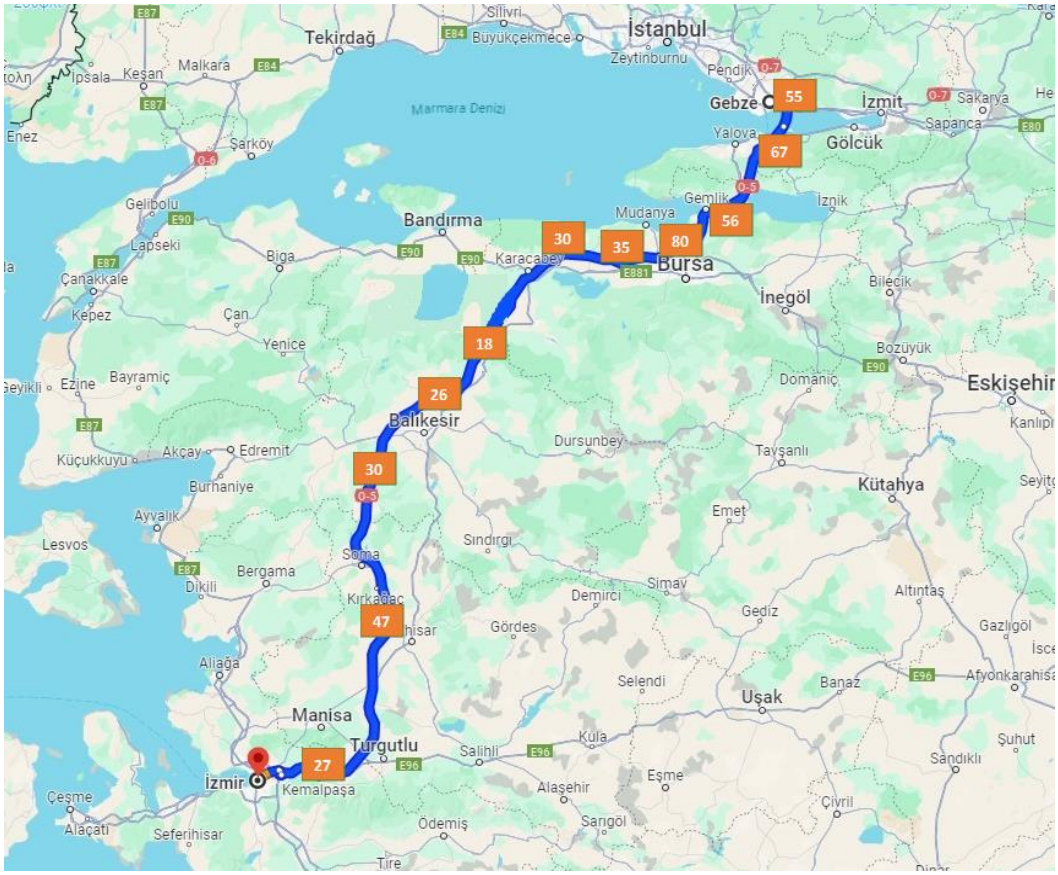
3.1.1.2 Gelecek Talep Tahminlerine Göre Sonuçlar

Matematiksel modelin güncel taleplere göre çözümünden sonra, EPDK'nın 2030 yılına ilişkin öngörülerinden düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı talep tahminine göre matematiksel modelin çözümleri simüle edilmiş ve sonuçlar Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

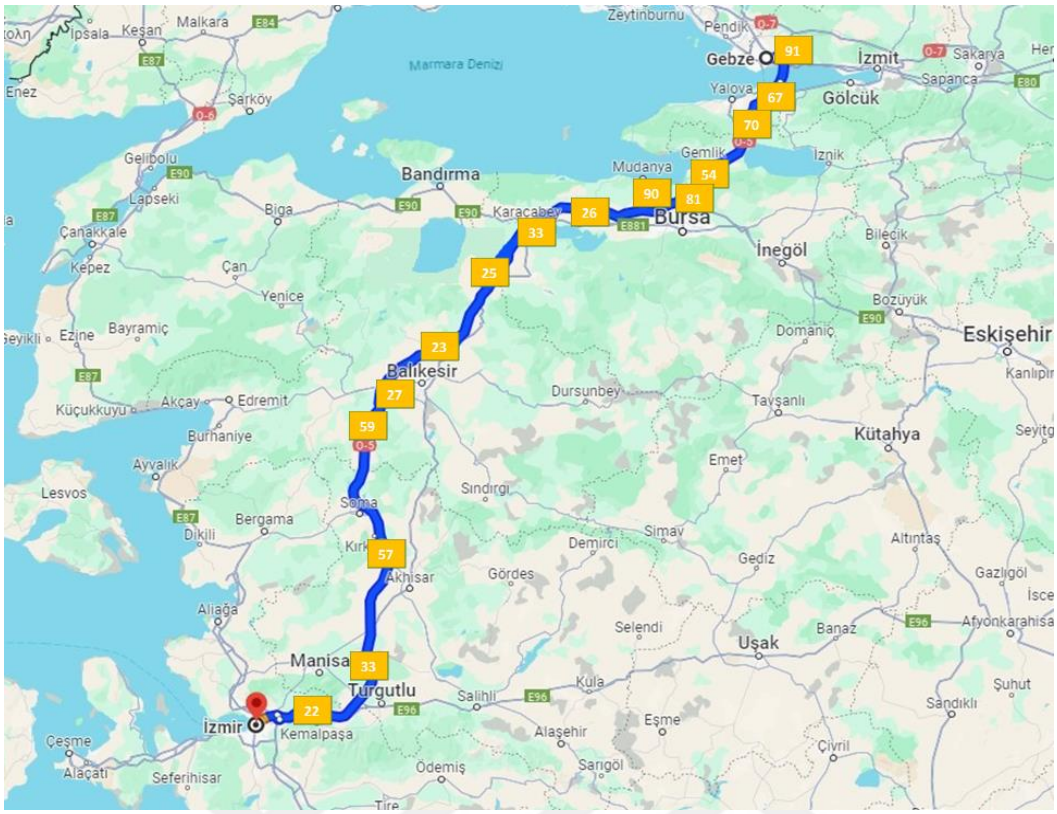
Tablo 3.3 Güncel ve 2030 Yılı İstasyon Lokasyonları Ve Kapasiteleri

İstasyon Alternatifleri	2023	2030 (Düşük)	2030 (Orta)	2030 (Yüksek)
x1	-	55	91	119
x2	8	67	67	85
x3	-	-	70	88
x4	-	-	-	-
x5	8	56	54	69
x6	-	-	81	104
x7	-	80	-	-
x8	8	35	90	113
x9	-	-	26	-
x10	-	30	33	75
x11	8	-	-	-
x12	-	-	-	-
x13	-	18	25	30
x14	-	-	-	-
x15	6	26	23	29
x16	-	-	27	61
x17	-	-	-	-
x18	-	30	59	46
x19	8	-	-	-
x20	-	-	-	-
x21	-	47	57	73
x22	-	-	-	-
x23	6	-	33	41
x24	-	27	22	27

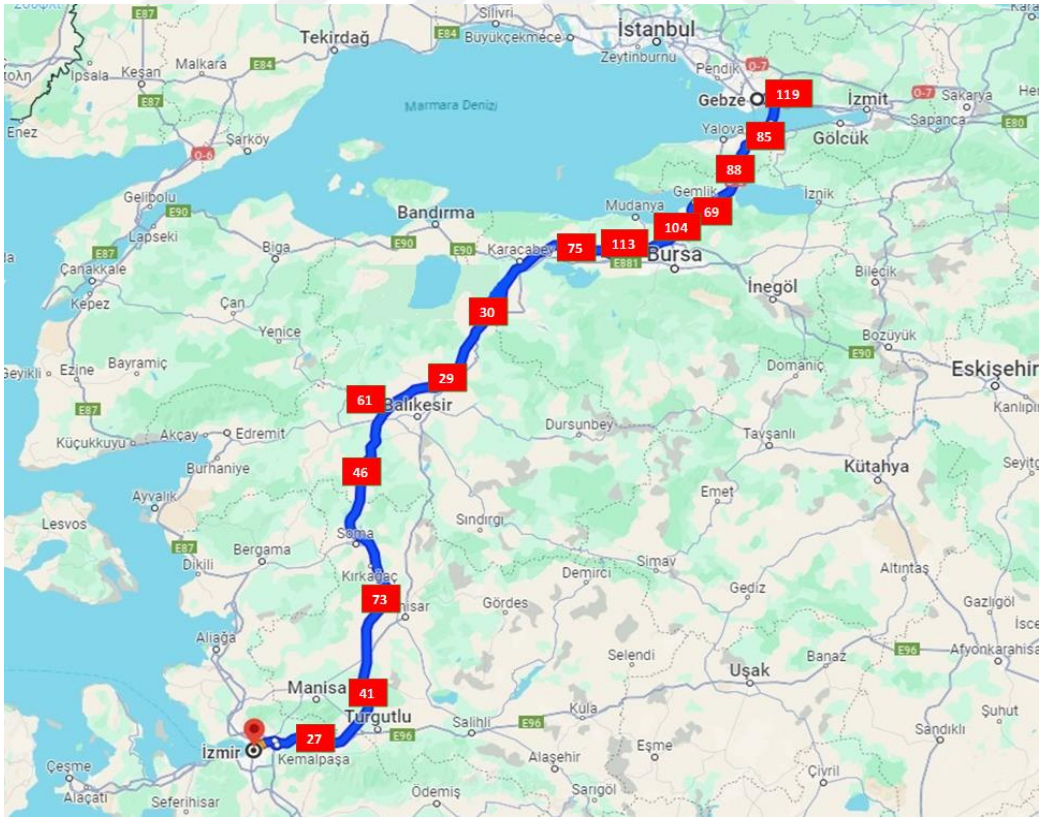
Hem istasyon sayılarında hem de istasyon kapasitelerinde gözle görülür bir artış mevcuttur. Bu sonuçlar, öngörülen yüksek talep artışı nedeniyle meydana gelmiş ve beklendiği gibi talepler karşılanmaktadır. 2030 yılı düşük, orta ve yüksek seviye talep tahminleri için haritadaki sonuçların konumları ve kapasiteleri Harita 3.5, Harita 3.6 ve Harita 3.7'de verilmiştir.



Harita 3.5 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2030-Düşük)



Harita 3.6 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2030-Orta)



Harita 3.7 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2030-Yüksek)

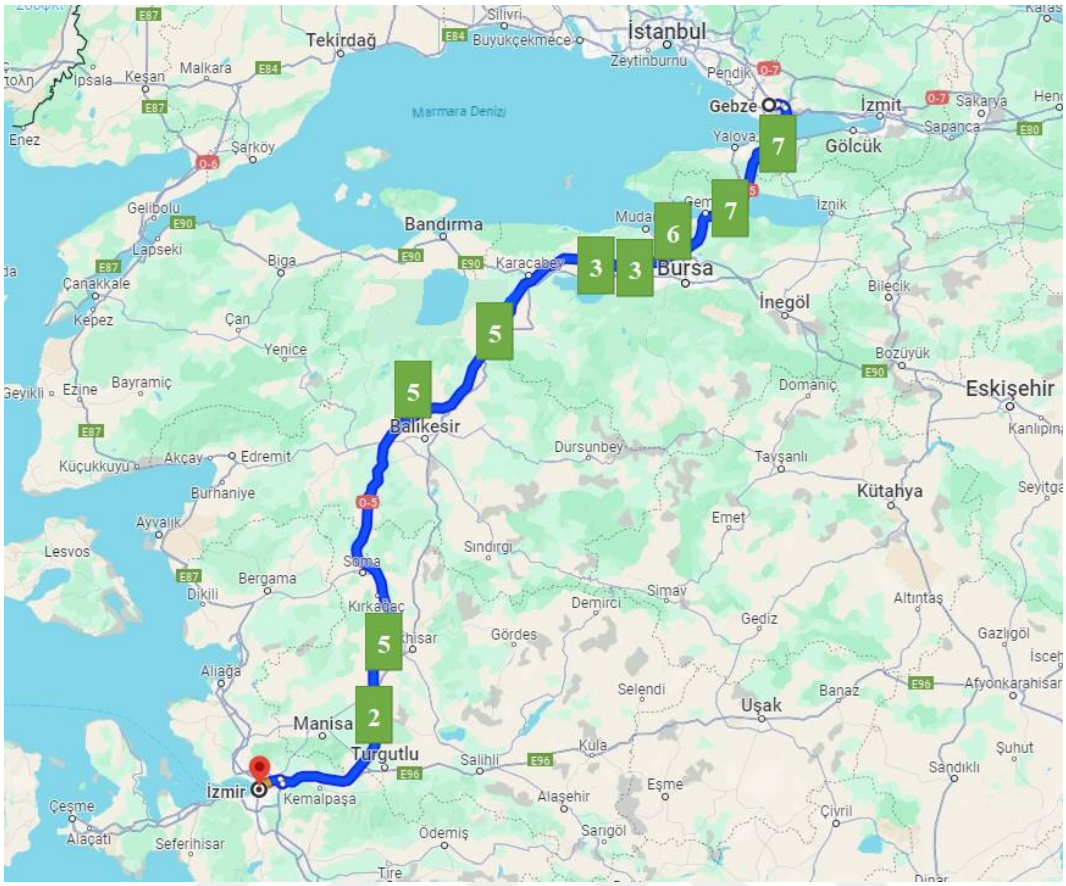
Talep noktalarının servis alım istasyonları beklendiği gibi bir kademeden daha uzakta değildir. Özellikle 2030 yılı talep tahminlerine göre, çalıştırılan modelde şarj istasyonu kapasitelerinin yüksek olmasının nedeni, şarj istasyonu sayısının akaryakıt istasyonları kadar sık olmaması ve elektrikli araçların şarj sürelerinin içten yanmalı araçlara göre oldukça fazla olmasıdır. Bunun dışında şarj istasyonu sayılarının ve kapasitelerinin fazla olmasının bir diğer nedeni de 2030 yılı tahminlerinin mevcut taleplere göre bir hayli fazla olmasıdır.

3.1.2 Genetik Algoritma ile Edinilen Sonuçlar

Oluşturulan matematiksel modelin çözümü deterministik olarak sağlanmaya çalışılmış olsa da problemin büyüklüğü sebebiyle belirtilen otoyol üç parçaya ayrılmış fakat buna rağmen GAMS üzerinde gerçekleştirilen çözümün sonunda hala optimal sonuca ulaşılamadığı görülmüştür. Ayrıca 2035 yılının çözümlerinde aksın üç parçaya ayrılması da yeterli olmamış ve 2035 yılı talepleri için deterministik çözüm sağlanamamıştır. Bunun üzerine daha önce de belirtildiği üzere oluşturulan matematiksel model Genetik algoritma ile PyCharm üzerinde çalıştırılmıştır. Daha önce olduğu gibi sonuçlar güncel taleplere göre ve gelecek talep tahminlerine göre olmak üzere iki ayrı başlık altında incelenmiştir.

3.1.2.1 Güncel Taleplere Göre Sonuçlar

Yukarıda gösterilen talep tablosuna göre, mevcut talepler sırasıyla 7, 7, 6, 3, 3, 5, 5, 5 ve 2 kapasiteli 9 şarj istasyonu ile karşılanabilir. Yukarıda verilen güncel taleplere göre açılması uygun bulunan istasyonların lokasyonları ve kapasiteleri harita üzerinde Harita 3.8'de gösterilmiştir.



Harita 3.8 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (GA-GT)

Sonuçlara göre bu senaryoda karşılanamayan talep bulunmamaktadır. EA şarj istasyonlarının sayı ve kapasitelerinin yüksek miktarlara çıkarılmasına mevcut talep miktarı göz önüne alındığında ihtiyaç olmamıştır.

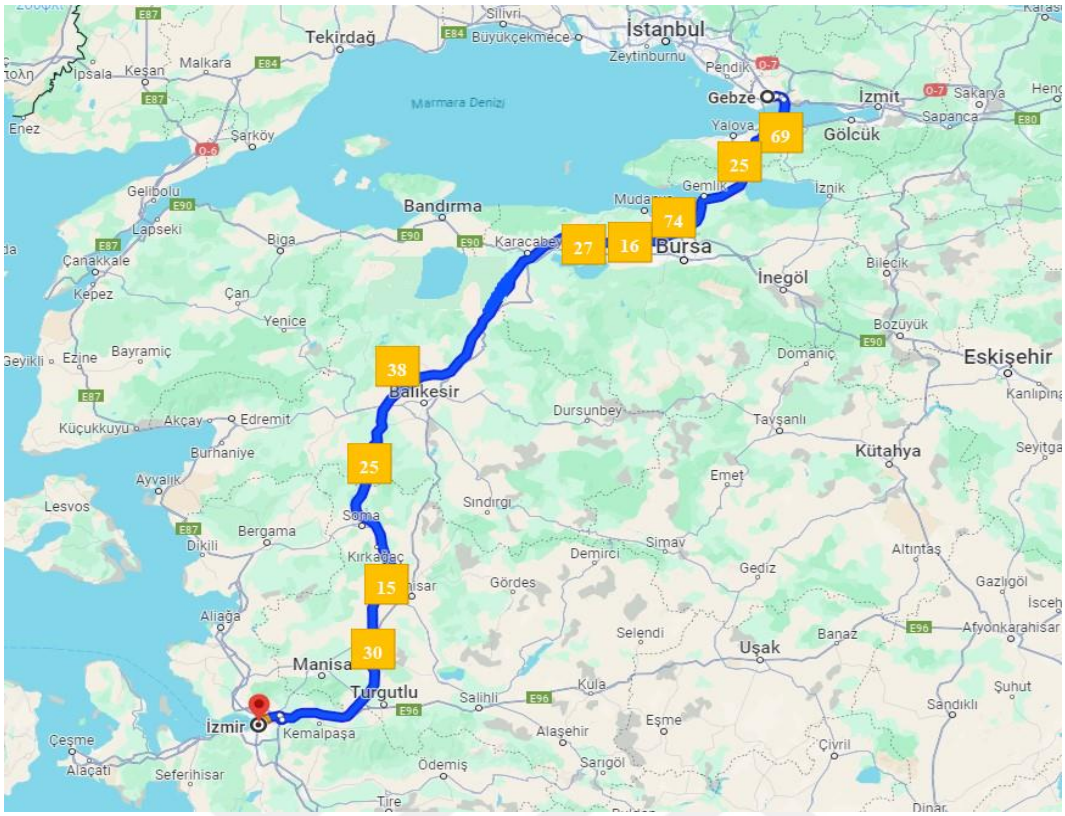
3.1.2.2 Gelecek Talep Tahminlerine Göre Sonuçlar

Matematiksel modelin güncel taleplere göre çözümünden sonra, EPDK'nın 2030 yılına ilişkin öngörülerinden düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı talep tahminine göre oluşturulan matematiksel model Genetik algoritma ile çözülmüş ve sonuçlar Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

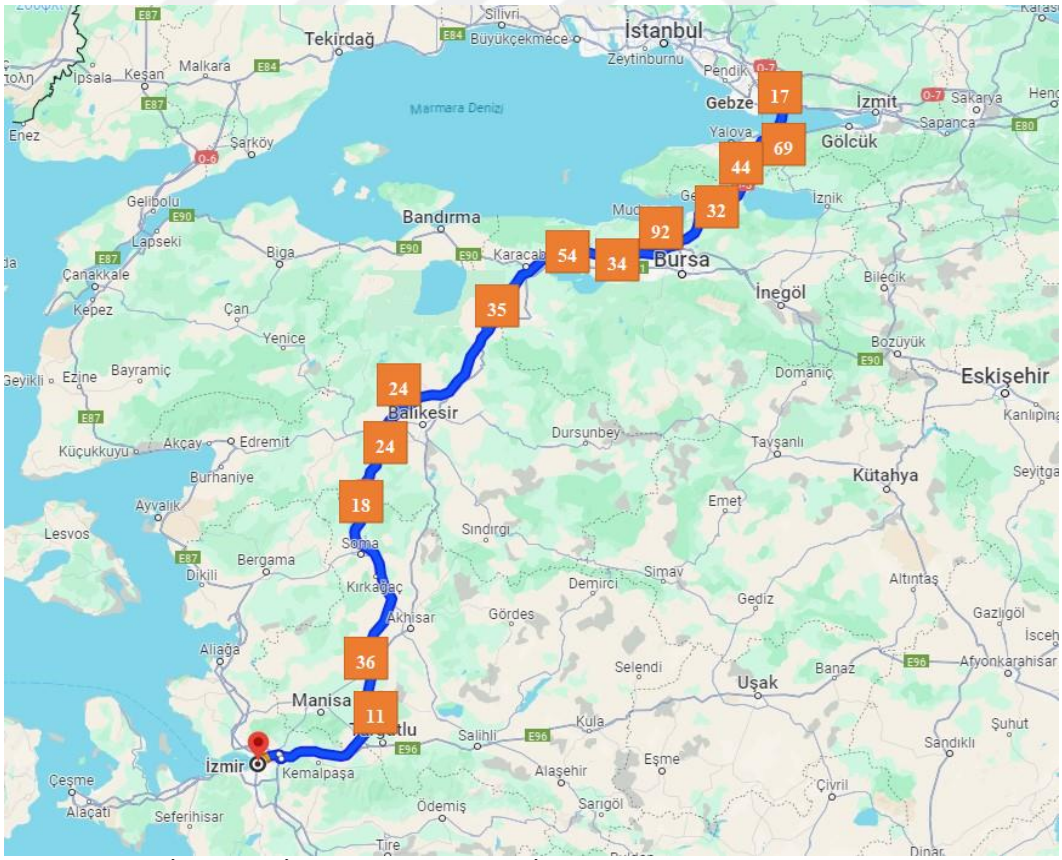
Tablo 3.4 Güncel ve 2030 Yılı İstasyon Lokasyonları Ve Kapasiteleri (GA)

GA Sonuçları	2023	2030(Düşük)	2030(Orta)	2030(Yüksek)
x1	-	-	17	30
x2	7	69	69	80
x3	-	-	44	67
x4	-	25	32	44
x5	7	-	-	-
x6	-	-	-	-
x7	6	74	92	88
x8	3	16	34	60
x9	3	27	54	70
x10	-	-	-	-
x11	-	-	-	-
x12	-	-	-	-
x13	5	-	35	38
x14	-	-	-	-
x15	-	-	-	-
x16	5	38	24	24
x17	-	-	24	43
x18	-	-	-	-
x19	-	25	18	36
x20	-	-	-	-
x21	5	15	-	-
x22	2	30	36	80
x23	-	-	11	-
x24	-	-	-	11

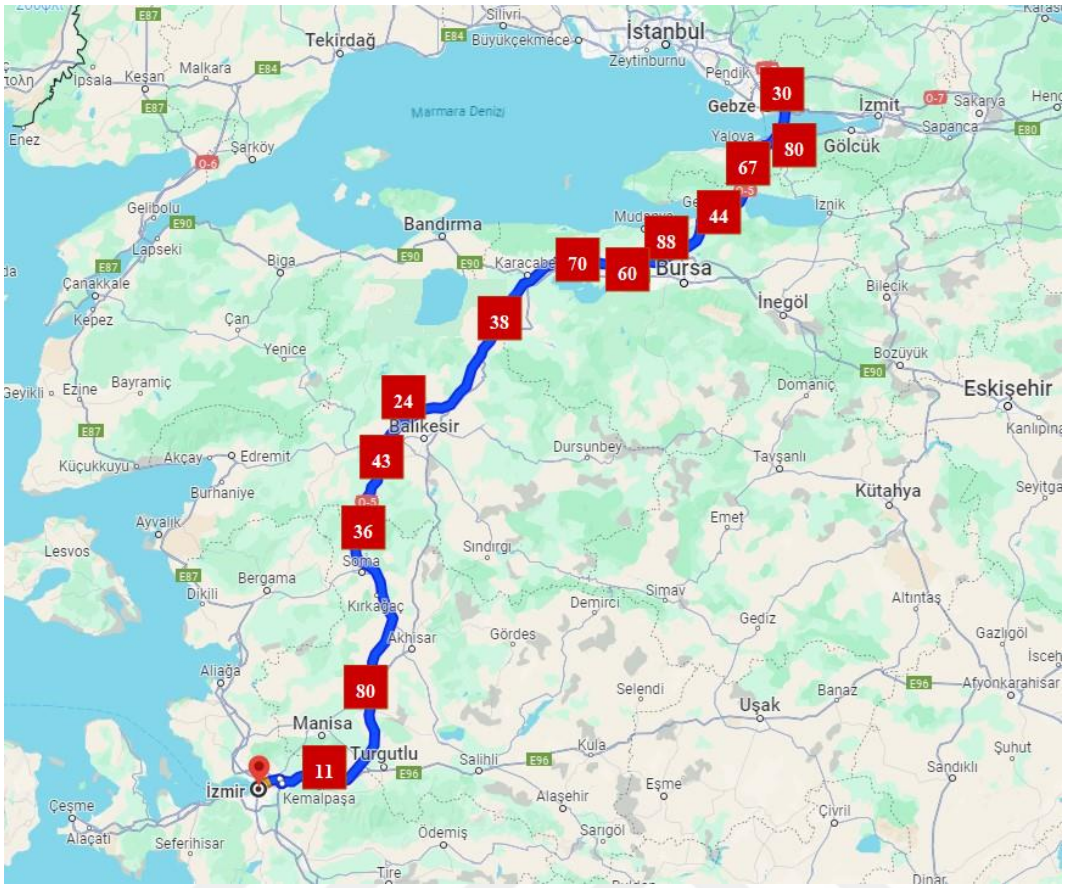
Deterministik çözümde olduğu gibi bu sonuçlarda da hem istasyon sayılarında hem de istasyon kapasitelerinde gözle görülür bir artış mevcuttur. Bu sonuçlar, öngörülen yüksek talep artışı nedeniyle meydana gelmiş ve beklenildiği gibi talepler karşılanmaktadır. 2030 yılı düşük, orta ve yüksek seviye talep tahminleri için haritadaki sonuçların konumları ve kapasiteleri Harita 3.9, Harita 3.10 ve Harita 3.11'de verilmiştir.



Harita 3.9 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri(GA-2030Düşük)



Harita 3.10 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri(GA-2030Orta)



Harita3.11 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri(GA-2030Yüksek)

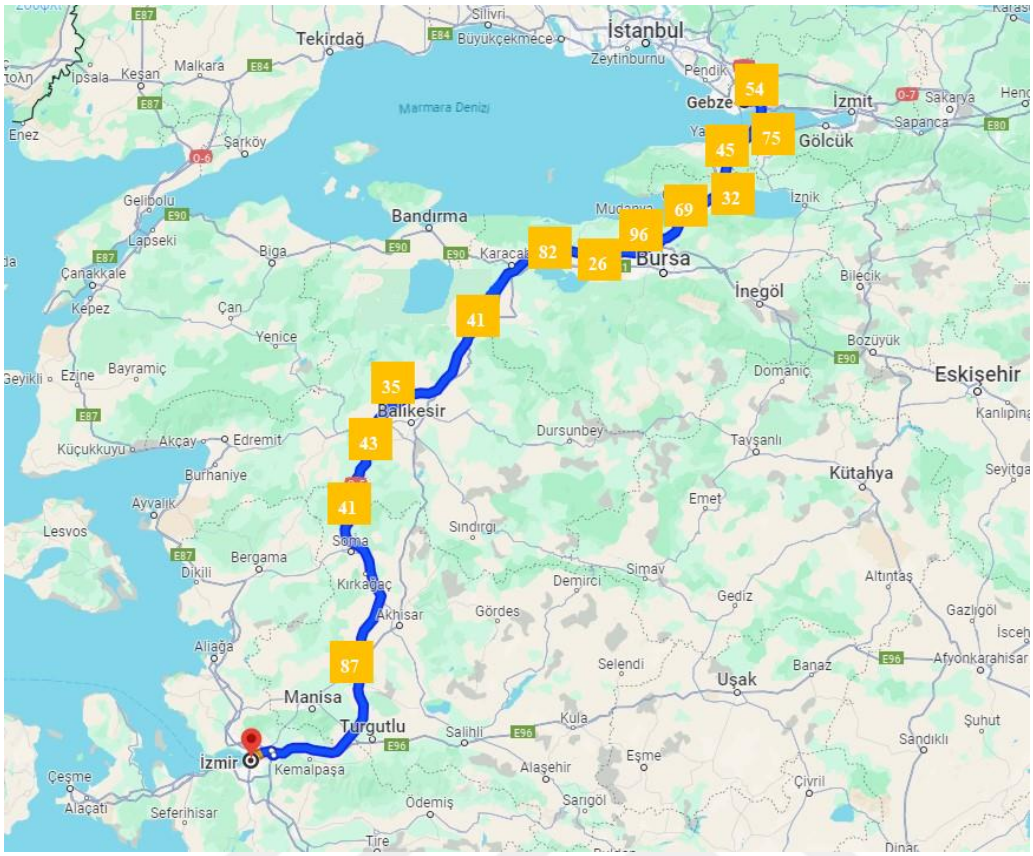
Daha önce 2030 yılının talep tahminlerine göre alınan sonuçlarda bahsedilen durumlar burada da geçerlidir. Yüksek kapasiteler için daha önce de bahsedilen elektrikli araçların şarj sürelerinin içten yanmalı araçların dolum sürelerine göre ortalama olarak 8-10 kat fazla olması burada da söylenebilir. Şarj istasyonu sayılarının ve kapasitelerinin fazla olmasının bir diğer nedeni yine 2030 yılı tahminlerinin mevcut taleplere göre bir hayli fazla olmasıdır.

EPDK'nın 2035 yılına ilişkin öngörülerinden düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı talep tahminine göre oluşturulan matematiksel model Genetik algoritma ile çözülmüş ve sonuçlar Tablo 3.5'de gösterilmiştir.

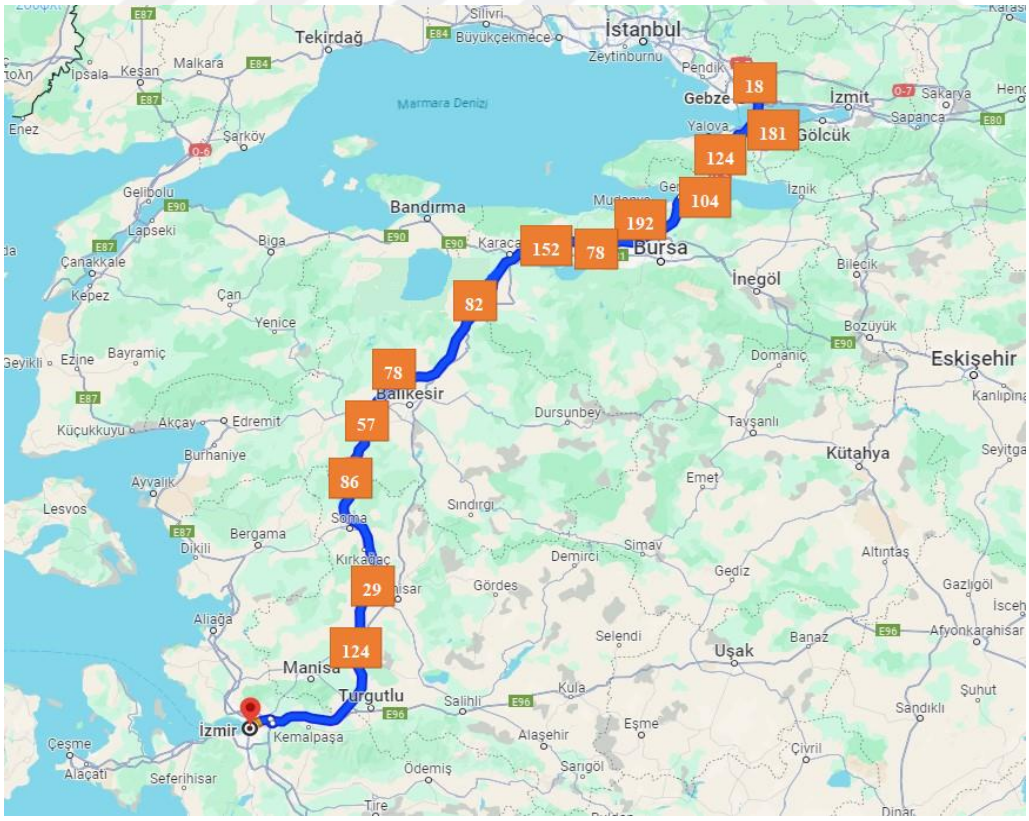
Tablo 3.5 Güncel ve 2035 Yılı İstasyon Lokasyonları Ve Kapasiteleri (GA)

GA Sonuçları	2023	2035(Düşük)	2035(Orta)	2035(Yüksek)
x1	-	54	18	87
x2	7	75	181	193
x3	-	45	124	139
x4	-	32	104	51
x5	7	69	-	151
x6	-	-	-	-
x7	6	96	192	221
x8	3	26	78	112
x9	3	82	152	137
x10	-	-	-	-
x11	-	-	-	36
x12	-	-	-	-
x13	5	41	82	80
x14	-	-	-	-
x15	-	-	-	-
x16	5	35	78	-
x17	-	43	57	155
x18	-	-	-	-
x19	-	41	86	83
x20	-	-	-	-
x21	5	-	29	30
x22	2	87	124	205
x23	-	-	-	-
x24	-	-	-	18

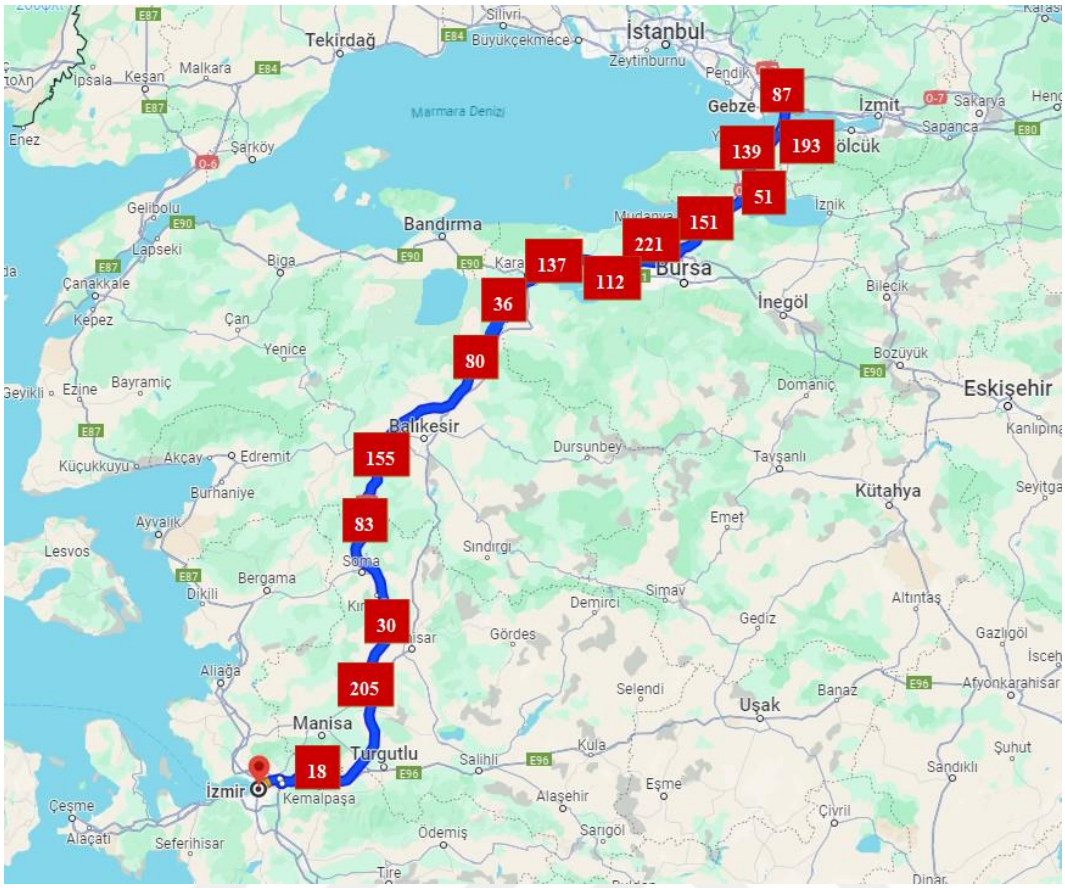
Daha önceki çözümlerde olduğu gibi bu sonuçlarda da hem istasyon sayılarında hem de istasyon kapasitelerinde gözle görülür bir artış mevcuttur. Bu sonuçlar, öngörülen yüksek talep artışı nedeniyle meydana gelmiş ve beklenildiği gibi talepler çoğunlukla karşılanmaktadır. 2035 yılı düşük, orta ve yüksek seviye talep tahminleri için haritadaki sonuçların konumları ve kapasiteleri Harita 3.12, Harita 3.13 ve Harita 3.14'de verilmiştir.



Harita 3.12 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (GA-2035Düşük)



Harita 3.13 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (GA-2030-Orta)



Harita3.14 İstanbul-İzmir Otoyolu Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri(GA-2035Yüksek)

Önceki talep artışlarında oluşan sonuçlar 2035 yılı talep tahminleri ile çözülen sonuçlar ile aynıdır. Buradaki fark talebin daha önceki yıllara göre en yüksek seviyede olması ve buna bağlı olarak istasyon sayılarının ve kapasitelerinin de önceki yıllara göre en yüksek seviyede olmasıdır.

Sonuçların duyarlılık analizleri, verimlilik analizleri ve değerlendirmesi uygulama bölümünün sonunda yapılmıştır.

3.2 İstanbul Avrupa Yakası- Şehir içi Alan Uygulaması

İkinci uygulama alanı, oluşturulan matematiksel modelin şehir içi performansını gözlemleyebilmek adına İstanbul Avrupa yakası olarak belirlenmiştir. Veri toplama bölümünde anlatıldığı üzere Karayolları Genel Müdürlülüğü'nün hacim haritasında bulunan araç geçiş noktaları talep noktası ve aynı zamanda şarj istasyon alternatifi olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu noktaların harita üzerindeki gösterimi Harita 3.15'de verilmiştir.



Harita 3.15 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonları Alternatifleri

Hem güncel hem de EPDK'nın 2030 ve 2035 yıllarındaki üç farklı EA tahminine göre bu noktalar için belirlenen talepler 2030 ve 2035 yılı olmak üzere aşağıda iki ayrı tablo olarak Tablo 3.6 ve Tablo 3.7 olarak sunulmuştur.

Tablo 3.6 İst.Avr. Güncel ve 2030 Yılı İçin Belirlenen Talepler

	2023 Verilerine Göre	EPDK'nın 2030 Yılı Tahminlerine Göre		
Talep Noktaları	**Güncel Talep**	**Düşük**	**Orta**	**Yüksek**
1	0,82	7,97	13,57	17,25
2	3,20	31,01	52,78	67,09
3	6,33	61,40	104,51	132,84
4	0,88	8,56	14,57	18,52
5	8,00	77,60	132,08	167,88
6	7,60	73,67	125,40	159,39
7	8,74	84,75	144,25	183,35
8	6,25	60,63	103,19	131,16
9	23,33	226,32	385,20	489,62
10	28,85	279,87	476,34	605,47
11	36,04	349,58	594,99	756,29
12	37,08	359,68	612,19	778,15
13	23,33	226,24	385,07	489,46
14	14,42	139,87	238,06	302,59
15	6,06	58,78	100,04	127,16
16	2,14	20,74	35,30	44,87
17	2,57	24,93	42,43	53,93
18	8,20	79,54	135,39	172,09
19	1,45	14,05	23,91	30,39
20	0,49	4,76	8,10	10,30
21	4,50	43,65	74,30	94,44
22	3,75	36,34	61,85	78,61

Tablo 3.7 İst.Avr. Güncel ve 2035 Yılı İçin Belirlenen Talepler

	2023 Verilerine Göre	EPDK'nın 2035 Yılı Tahminlerine Göre		
Talep Noktaları	**Güncel Talep**	**Düşük**	**Orta**	**Yüksek**
1	0,82	18,28	33,97	43,28
2	3,20	71,08	132,11	168,33
3	6,33	140,74	261,61	333,32
4	0,88	19,62	36,48	46,47
5	8,00	177,87	330,61	421,23
6	7,60	168,87	313,88	399,92
7	8,74	194,26	361,07	460,05
8	6,25	138,96	258,29	329,10
9	23,33	518,74	964,19	1.228,50
10	28,85	641,48	1.192,33	1.519,18
11	36,04	801,27	1.489,33	1.897,60
12	37,08	824,42	1.532,38	1.952,44
13	23,33	518,57	963,87	1.228,10
14	14,42	320,59	595,88	759,23
15	6,06	134,72	250,41	319,05
16	2,14	47,54	88,37	112,59
17	2,57	57,14	106,21	135,32
18	8,20	182,32	338,89	431,79
19	1,45	32,20	59,85	76,25
20	0,49	10,91	20,27	25,83
21	4,50	100,06	185,98	236,96
22	3,75	83,29	154,81	197,25

Belirlenen talepler PyCharm üzerinden oluşturulan matematiksel modelin Genetik algoritma ile çözümü esnasında yuvarlanarak tam sayı olarak kullanılmıştır.

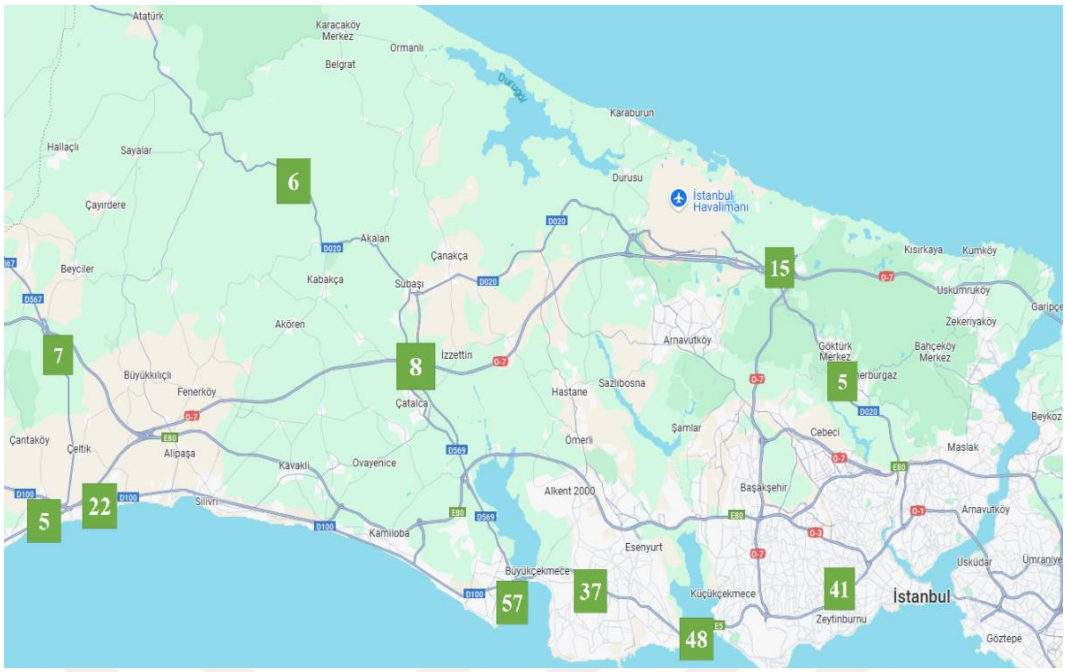
3.2.1 Güncel Taleplere Göre Sonuçlar

Tahminlenen talepler kullanılarak İstanbul Avrupa yakasında belirlenen 22 adet şarj istasyon alternatifinden hangi lokasyonların seçildiği ve seçilen alternatiflerin kapasiteleri Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8 İst.Avr. Güncel İstasyon Lokasyonları Ve Kapasiteleri

İst-Avr	2023
x1	-
x2	5
x3	22
x4	-
x5	7
x6	-
x7	-
x8	-
x9	57
x10	-
x11	37
x12	48
x13	41
x14	-
x15	-
x16	5
x17	15
x18	-
x19	8
x20	-
x21	-
x22	6

Sonuçlara bakıldığında sırasıyla 5, 22, 7, 57, 37, 48, 41, 5, 15, 8 ve 6 kapasiteli 11 adet şarj istasyonunun açılması maliyeti minimize ederken taleplerin karşılanmasında yeterli olmuştur. Tabloda verilen lokasyon ve kapasite değerlerinin harita üzerinden gösterimi Harita 3.16'da verilmiştir.



Harita 3.16 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (GT)

İstasyon alternatiflerinin sayısı, İstanbul Avrupa yakasının nüfusu ve büyüklüğü göz önüne alındığında düşük kaldığı için uygulama sonucunda elde edilen çıktılarda açılan şarj istasyonlarının kapasitelerinin yüksek olduğu görülmektedir.

3.2.2 Gelecek Talep Tahminlerine Göre Sonuçlar

Daha önce İstanbul-İzmir otoyolunda gerçekleştirilen uygulama İstanbul Avrupa yakası için de uygulanmış ve matematiksel modelin güncel taleplere göre çözümünden sonra, EPDK'nın 2030 yılına ilişkin tahminlerinden düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı talep tahminine göre, oluşturulan matematiksel model Genetik algoritma ile çözülmüş ve sonuçlar Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

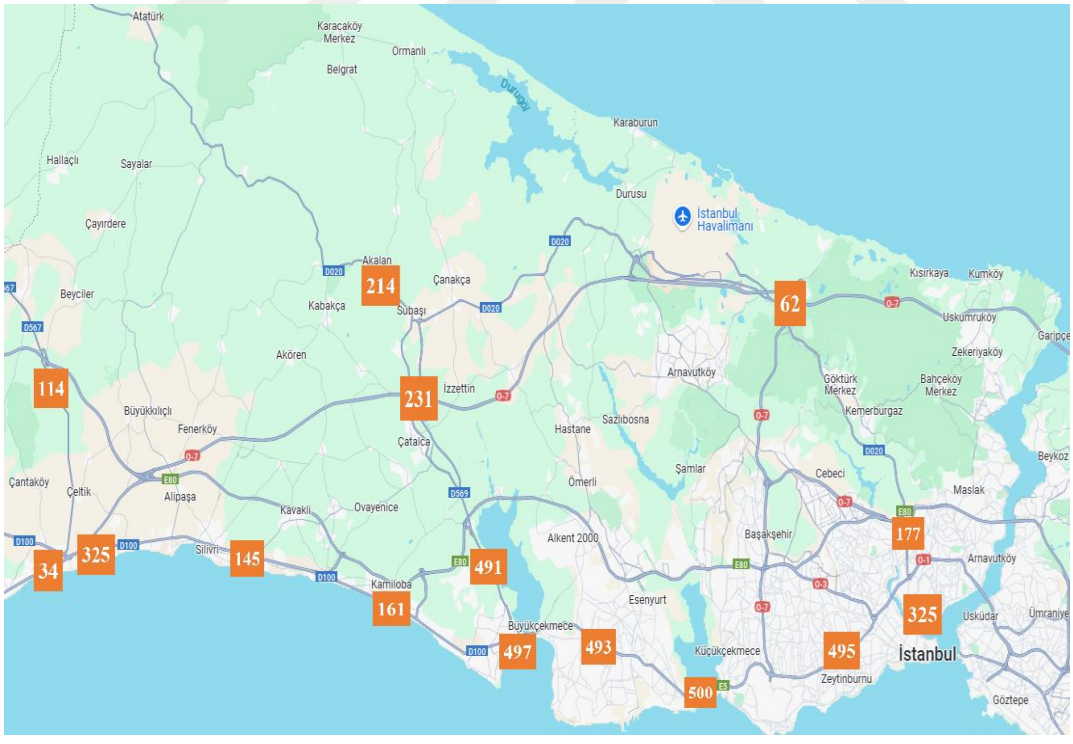
Tablo 3.9 İst.Avr. Güncel ve 2030 Yılı İstasyon Lokasyonları ve Kapasiteleri

İst-Avr	2023	2030(Düşük)	2030(Orta)	2030(Yüksek)
x1	-	-	-	-
x2	5	39	34	74
x3	22	166	325	396
x4	-	-	-	-
x5	7	55	114	-
x6	-	-	-	-
x7	-	55	145	244
x8	-	143	161	472
x9	57	297	497	431
x10	-	286	491	335
x11	37	299	493	492
x12	48	298	500	494
x13	41	299	495	487
x14	-	208	325	191
x15	-	90	177	413
x16	5	-	-	497
x17	15	127	62	461
x18	-	-	-	-
x19	8	-	231	-
x20	-	-	-	-
x21	-	158	214	340
x22	6	-	-	-

Daha önceki sonuçlarda olduğu gibi hem istasyon sayılarında hem de istasyon kapasitelerinde belirgin bir artış mevcuttur. Bu sonuçlar, öngörülen yüksek talep artışı nedeniyle meydana gelmiştir ve beklenildiği gibi talepler çoğunlukla karşılanmaktadır. 2030 yılı düşük, orta ve yüksek seviye talep tahminlerine göre elde edilen sonuçların lokasyonları ve kapasiteleri harita üzerinde Harita 3.17, Harita 3.18 ve Harita 3.19'da gösterilmiştir.



Harita 3.17 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2030-Düşük)



Harita 3.18 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2030-Orta)



Harita 3.19 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2030-Yüksek)

EPDK'nın 2035 yılına ilişkin öngörülerinden düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı talep tahminine göre oluşturulan matematiksel model Genetik algoritma ile çözülmüş ve sonuçlar Tablo 3.10'da gösterilmiştir.

Tablo 3.10 İst.Avr. Güncel ve 2035 Yılı İstasyon Lokasyonları ve Kapasiteleri

İst-Avr	2023	2035(Düşük)	2035(Orta)	2035(Yüksek)
x1	-	-	-	-
x2	5	76	168	75
x3	22	406	764	1077
x4	-	31	-	-
x5	7	84	151	190
x6	-	-	-	-
x7	-	225	430	498
x8	-	129	963	248
x9	57	698	994	2801
x10	-	629	552	-
x11	37	700	967	2159
x12	48	698	991	2160
x13	41	696	973	1860
x14	-	452	156	431
x15	-	252	991	-
x16	5	-	989	304
x17	15	74	712	641
x18	-	-	-	-
x19	8	320	-	335
x20	-	-	-	-
x21	-	239	643	-
x22	6	8	-	303

2035 yılı düşük, orta ve yüksek seviye talep tahminleri için haritadaki sonuçların lokasyonları ve kapasiteleri Harita 3.20, Harita 3.21 ve Harita 3.22'de verilmiştir.



Harita 3.20 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2035-Düşük)



Harita 3.21 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2035-Orta)



Harita 3.22 İstanbul Avrupa Yakası Şarj İstasyonlarının Lokasyonları ve Kapasiteleri (2035-Yüksek)

Önceki talep artışlarında oluşan kapasite artışı 2035 yılı talep tahminleri ile çözülen sonuçlarda da aynıdır. Buradaki fark talebin daha önceki yıllara göre en yüksek seviyede olması ve buna bağlı olarak istasyon sayılarının ve kapasitelerinin de önceki yıllara göre en yüksek seviyede olmasıdır. Kapasitelerin bu kadar yüksek çıkmasının bir diğer nedeni de daha önce bahsedilmiş olan az sayıdaki şarj istasyon alternatifi sayısıdır. Alternatif sayısı düşük olduğu için talebin karşılanabilmesi adına model kapasiteleri yüksek belirlemiştir. Alternatif sayısının bu kadar düşük olması, yine daha önce bahsedilen talep noktalarının ve istasyon alternatiflerinin Karayolları Genel Müdürlüğü'nün sayaç noktalarına göre kabulünden dolayı oluşmuştur.

Sonuçların duyarlılık analizleri, verimlilik analizleri ve değerlendirmesi uygulama bölümünün sonunda yapılmıştır.

3.3 Büyük Ölçekli Bölge Uygulaması

Bu bölümde, oluşturulan matematiksel modelin daha büyük ölçekli problemlerde nasıl performans verdiğinin belirlenmesi için 250 talep noktası ve 250 şarj istasyon alternatifi veri toplama bölümünde anlatıldığı şekilde belirlenmiştir. Her bir istasyon alternatifinin talebi ve şarj istasyonlarının birbirine olan uzaklıkları belirlenen sınırlar içerisinde rastgele olarak üretilmiştir. Belirlenen talepler diğer uygulamalarda olduğu gibi 2030 ve 2035 yılının farklı tahmin seviyelerine göre uyarlanmış ve her bir senaryo ayrı ayrı Genetik algoritma ile çözülmüştür.

3.3.1 Güncel Taleplere Göre Sonuçlar

Oluşturulan alternatif istasyonların lokasyonları, bu lokasyonlardaki talep yoğunlukları ve hangi alternatif lokasyonlara şarj istasyonlarının açıldığı Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 Ek-A'da verilmiştir.

3.3.2 Gelecek Talep Tahminlerine Göre Sonuçlar

EPDK'nın 2030 ve 2035 yılı düşük, orta ve yüksek seviyeli tahminlerine göre oluşturulan alternatif istasyonların lokasyonları, bu lokasyonlardaki talep yoğunlukları ve hangi alternatif lokasyonlara şarj istasyonlarının açıldığı Şekil 3.4, Şekil 3.5, , Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 Ek-A'da verilmiştir.

Sonuçların duyarlılık analizleri, verimlilik analizleri ve değerlendirmesi uygulama bölümünün sonunda yapılmıştır.

3.4 Duyarlılık Analizi

Matematiksel modellerde duyarlılık analizi, matematiksel modelin parametrelerindeki değişikliklerin sonuçlar üzerindeki etkisini incelemek için gerçekleştirilen bir işlemdir. Duyarlılık analizi, matematiksel modelin güvenilirliğini, sağlamlığını ve uygulanabilirliğini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, karar verme sürecini destekler ve matematiksel modelin iyileştirilmesine yardımcı olur.

Bu çalışmada kullanılan matematiksel model; talepler, servis süreleri, maksimum başlangıç kapasitesi, istasyon kurulum maliyeti, uzaktan servis maliyetleri, lokasyonlar arası mesafeler, boşta kalma cezası maliyeti, karşılanmayan talep cezası maliyeti ve kapasitenin kurulum maliyetine etkisi gibi parametreleri içermektedir. Bu noktada parametreleri ayrı ayrı incelemek yerine, tüm parametreleri etkilerine göre sınıflandırmak daha doğru olacaktır. Parametrelerin değerleri belirlenirken, her bir parametreyi ayrı ayrı belirlemek yerine, birlikte değerlendirerek belirlemek daha doğru olacaktır. Bu nedenle, matematiksel modelin düzgün çalışabilmesi için parametrelerin hem kendi aralarındaki hem de birbirleriyle olan bağlantıları dikkate alınarak parametre değerlerinin dikkatlice belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

3.4.1 Deterministik Sonuçların Duyarlılık Analizi

Buna göre, duyarlılık analizi için uygun parametrelerdeki değişimlerin sonuçları nasıl etkilediğini görmek için, 2030'un düşük seviye taleplerine göre çözüm paketinin ilk aksı duyarlılık analizi için incelenmiştir. Sonuçlar Tablo 3.11’de gösterilmiştir.

Tablo 3.11 Deterministik Yaklaşım İçin Duyarlılık Analizi

İstasyon Kurulum ve Kapasite Maliyeti	%50+	%25+	%25-	%50-
İstasyon Sayısı	-20,00%	-20,00%	0,00%	0,00%
Toplam İstasyon Kapasiteleri	-12,97%	-12,97%	0,00%	0,00%
Karşılanamayan Talep Miktarı	49,21%	49,21%	0,00%	0,00%
İstasyonların Boş Kalma Miktarı	3,92%	3,92%	0,00%	0,00%
Toplam Maliyete Etkisi	2,27%	2,02%	-0,93%	-1,33%
Karşılanamayan Talep Cezası	**%50+**	**%25+**	**%25-**	**%50-**
İstasyon Sayısı	20,00%	0,00%	-20,00%	-
Toplam İstasyon Kapasiteleri	18,32%	0,00%	-8,06%	-
Karşılanamayan Talep Miktarı	-100,00%	0,00%	57,14%	-
İstasyonların Boş Kalma Miktarı	36,55%	0,00%	-27,03%	-
Toplam Maliyete Etkisi	5,44%	0,55%	-0,79%	-
Maksimum İstasyon Kapasitesi	**%50+**	**%25+**	**%25-**	**%50-**
İstasyon Sayısı	0,00%	0,00%	0,00%	20,00%
Toplam İstasyon Kapasiteleri	0,00%	0,00%	0,00%	4,03%
Karşılanamayan Talep Miktarı	0,00%	0,00%	0,00%	-41,27%
İstasyonların Boş Kalma Miktarı	0,00%	0,00%	0,00%	15,52%
Toplam Maliyete Etkisi	0,00%	0,00%	0,00%	1,24%
Mesafe Servis Maliyeti	**%50+**	**%25+**	**%25-**	**%50-**
İstasyon Sayısı	-	0,00%	-40,00%	-
Toplam İstasyon Kapasiteleri	-	0,00%	-7,85%	-
Karşılanamayan Talep Miktarı	-	0,00%	87,30%	-
İstasyonların Boş Kalma Miktarı	-	0,00%	89,13%	-
Toplam Maliyete Etkisi	-	0,00%	8,00%	-

Duyarlılık analizi sonuçlarına göre, istasyon kurulum maliyetlerinin azaltılması matematiksel modelin çözümünde herhangi bir değişikliğe neden olmamaktadır. Çünkü, istasyon kurulum maliyetleri azaltılmış olsa da, gereksiz kurulan istasyonlar istasyonların boşta kalma süresini artıracağından ve dolayısıyla toplam maliyet artacağından model sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmamaktadır. Ancak, tam tersine, istasyon kurulum maliyetleri artırıldığında kurulan istasyon sayısının ve istasyon kapasitelerinin azaldığı, aynı zamanda karşılanmayan taleplerin ve istasyonların boşta kalma sürelerinin arttığı görülmüştür.

Karşılanmayan talep ceza katsayısında %25'lik bir artış herhangi bir değişikliğe neden olmazken, ceza katsayısı daha da artırıldığında, model karşılanmayan talepleri tamamen ortadan kaldırmak için istasyon sayısını ve istasyon kapasitelerini artırdı. Sonuç olarak, karşılanmayan talep miktarı sıfıra düştü, ancak istasyonların boşta kalma süresi ve toplam maliyet arttı.

Maksimum istasyon kapasitelerindeki artışların sonuçlar üzerinde bir etkisi olmadı. Çünkü matematiksel model zaten daha düşük istasyon kapasiteleriyle çalışıyor. Öte yandan, maksimum istasyon kapasiteleri çok fazla azaltıldığında, yeni istasyonlar açılmak zorunda kaldı ve toplam istasyon kapasitelerinde küçük bir artış oldu. Parametre değişikliği karşılanmamış talep miktarında önemli bir artışa neden oldu. Beklendiği gibi, istasyonların boşta kalma süresinde ve toplam maliyette bir artış oldu.

Son olarak, lokasyonlar arası hizmet sağlamanın maliyeti düşürülmüştür. Ancak bu durum istasyon sayısının ve kapasitesinin azalmasına yol açmış ve dolayısıyla karşılanmayan talepler istasyonların boşta kalma süresini ve toplam maliyeti önemli ölçüde artırmıştır.

Yapılan duyarlılık analizleri ile çalıştırılan matematiksel modelin parametrelerinin doğru bir şekilde belirlendiği ve tutarlı olarak çalıştığı söylenebilir.

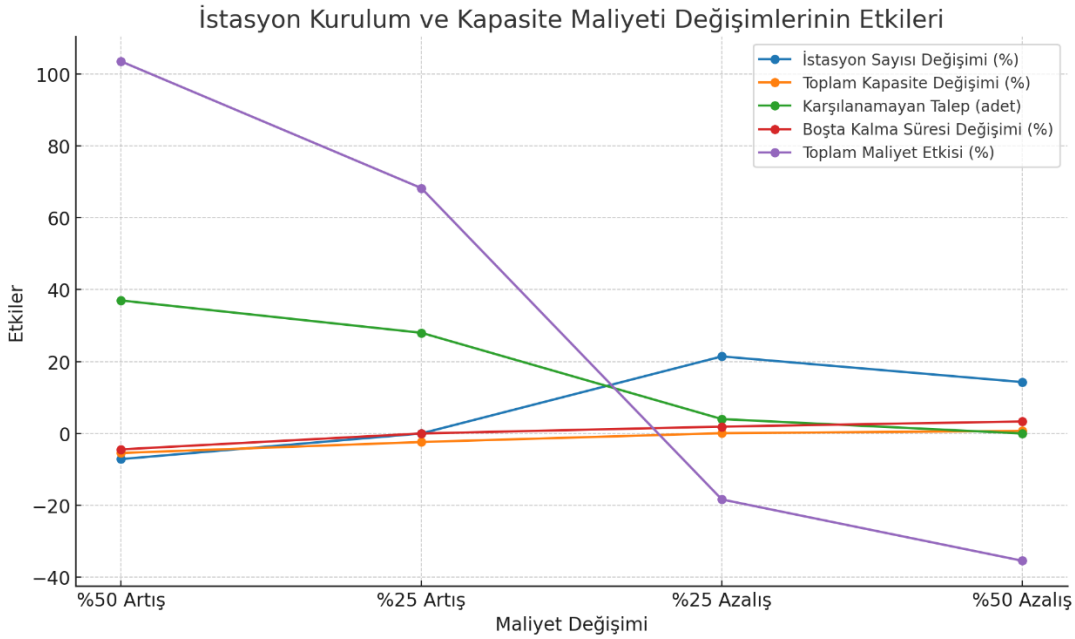
3.4.2 Genetik Algoritma Kullanılan Çözümlerin Duyarlılık Analizi

Genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerin duyarlılık analizi için İstanbul Avrupa yakası 2030 yılı düşük tahmin seviyeli senaryo belirlenmiştir. Bir önceki analizde belirlenen parametreler ve değişim oranları baz alınarak oluşturulan duyarlılık analizi Tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.12 Genetik Algoritma ile Çözüm İçin Duyarlılık Analizi

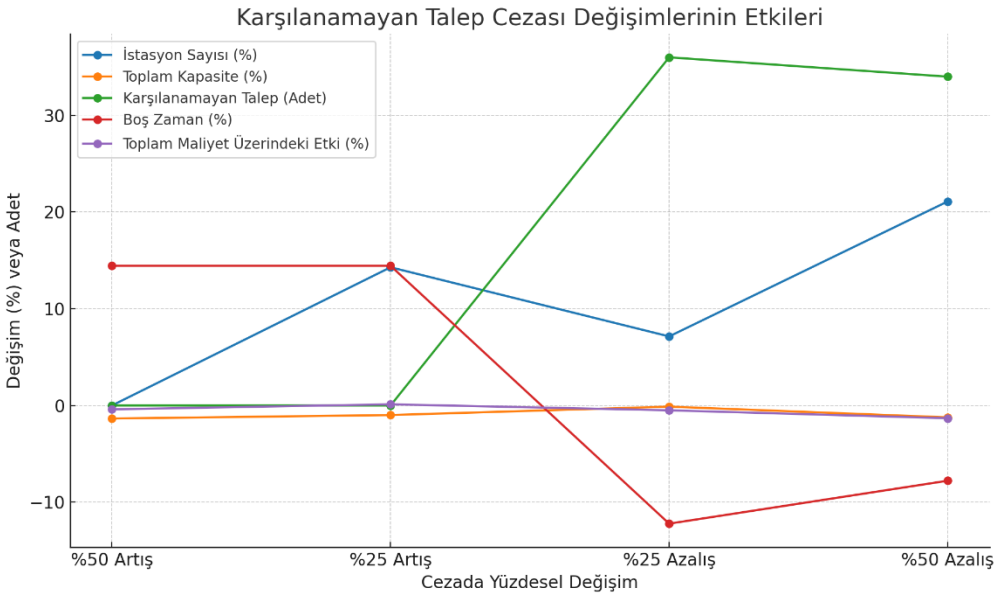
İstasyon Kurulum ve Kapasite Maliyeti	%50+	%25+	%25-	%50-
İstasyon Sayısı	-7,14%	0%	21,43%	14,29%
Toplam İstasyon Kapasiteleri	-5,44%	-2,38%	0,079%	0,714%
Karşılanamayan Talep Miktarı	0-->37	0-->28	0-->4	0,00%
İstasyonların Boş Kalma Miktarı	-4,44%	0%	1,9%	3,33%
Toplam Maliyete Etkisi	103,51%	68,24%	-18,35%	-35,41%
Karşılanamayan Talep Cezası	**%50+**	**%25+**	**%25-**	**%50-**
İstasyon Sayısı	0,00%	14,29%	7,14%	21,10%
Toplam İstasyon Kapasiteleri	-1,35%	-0,99%	-0,12%	-1,23%
Karşılanamayan Talep Miktarı	0,00%	0,00%	0-->36	0-->34
İstasyonların Boş Kalma Miktarı	14,44%	14,44%	-12,22%	-7,78%
Toplam Maliyete Etkisi	-0,40%	0,12%	-0,50%	-1,32%
Maksimum İstasyon Kapasitesi	**%50+**	**%25+**	**%25-**	**%50-**
İstasyon Sayısı	7,14%	7,14%	14,29%	35,71%
Toplam İstasyon Kapasiteleri	-3,10%	-1,39%	-1,98%	-2,34%
Karşılanamayan Talep Miktarı	0,00%	0-->3	0-->3	0-->71
İstasyonların Boş Kalma Miktarı	-42,22%	-33,33%	1,11%	32,22%
Toplam Maliyete Etkisi	-4,12%	-3,68%	9,50%	28,75%
Mesafe Servis Maliyeti	**%50+**	**%25+**	**%25-**	**%50-**
İstasyon Sayısı	14,29%	14,29%	-7,14%	-14,28%
Toplam İstasyon Kapasiteleri	0,87%	0,36%	-0,08%	-4,72%
Karşılanamayan Talep Miktarı	0,00%	0-->1	0-->3	0-->2
İstasyonların Boş Kalma Miktarı	16,67%	16,67%	-11,11%	-27,78%
Toplam Maliyete Etkisi	10,63%	4,93%	-5,34%	-10,36%

Duyarlılık analizi sonuçlarına göre, istasyon kurulum maliyetlerinin azaltılması açılan istasyon sayısını arttırırken toplam maliyeti azaltmaktadır. Öte yandan istasyon kurulum maliyetlerinin arttırılması açılan istasyon sayısını azaltırken karşılanamayan talep miktarını ve toplam maliyeti fazlaca arttırmıştır. Bunun haricinde, istasyon kurulum maliyetlerinin değişimi toplam istyasyon kapasitelerini ve istasyonların boş kalma miktarlarını pek de etkilememiştir. İstasyon kurulumu ve kapasite maliyetindeki değişikliklerin etkileri Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



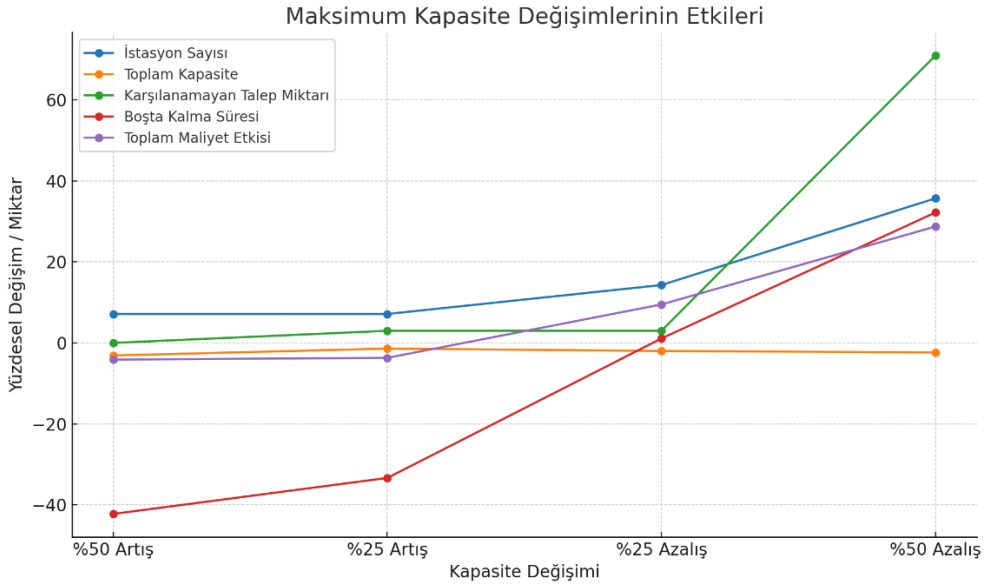
Şekil 3.22 İstasyon Kurulumu ve Kapasite Maliyeti Değişikliklerinin Etkileri

Karşılanamayan talep ceza katsayısındaki artışın genel olarak pek bir etkisi olmamıştır. Çünkü zaten karşılanamayan talep miktarı 0'dır. Fakat, karşılanamayan talep ceza katsayısı azaltıldığında karşılanamayan talep miktarının bir hayli arttığı ama toplam maliyetin küçük bir değişikliğe uğradığı görülmüştür. Karşılanmayan talep cezası değişikliklerinin etkileri Şekil 3.23'de gösterilmiştir.



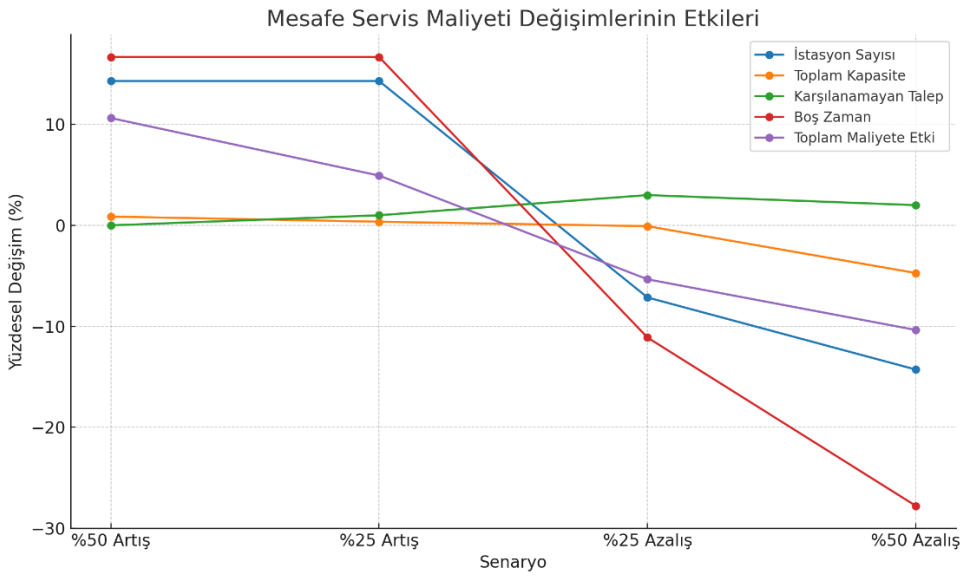
Şekil 3.23 Karşılanmayan Talep Cezası Değişikliklerinin Etkileri

Maksimum istasyon kapasitesinin azalması, beklendiği gibi açılan istasyon sayılarını arttırmıştır. Çünkü talebin karşılanabilmesi için toplam kapasitenin belirli bir düzeyde kalması gerekmektedir. Fakat maksimum istasyon kapasitesi %50 düşürüldüğünde, karşılanamayan talep miktarının fazlaca yükseldiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak toplam maliyet de yükselmiştir. Bu kapasite değişimleri istasyonların boş kalma miktarını yüzde olarak etkiliyor gözükse bile aslında boş kalma miktarları normalde çok düşük olduğu için bu yüzdesel değişimlerin çok da fazla önemi bir olmamaktadır. Maksimum istasyon kapasitesindeki değişikliklerin etkileri Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



Şekil 3.24 Maksimum İstasyon Kapasitesi Değişikliklerinin Etkileri

Son olarak, mesafe servis maliyetlerinin değişiminin açılan istasyon sayısı ile paralel ilerlediği görülmüştür. Mesafe servis maliyeti arttırıldığında, uzaklara servis vermek maliyetli olacağından dolayı istasyon sayısında artış görülmüştür. Aynı şekilde, mesafe servis maliyetlerinin azaltılması ile uzaklara servis vermek kolaylaşacağı için istasyon sayısında düşüş görülmüştür. İstasyon sayısının artış ve azalışına bağlı olarak toplam maliyet artmış ve azalmıştır. Bunların haricince, mesafe servis maliyetinin değişiminin diğer değişkenler üzerindeki etkisi önemsiz düzeyde kalmıştır. Mesafe hizmet maliyetindeki değişikliklerin etkileri Şekil 3.25'de gösterilmiştir.



Şekil 3.25 Mesafe Servis Maliyet Değişikliklerinin Etkileri

Yapılan duyarlılık analizleri ile hem deterministik olarak çözümü sağlanan hem de Genetik algoritma kullanılarak çözümü sağlanan matematiksel modelin tutarlı olarak çalıştığı ve parametrelerinin toplam maliyeti minimize ederken gelen talebi karşılayacak şekilde belirlendiği söylenebilir.

3.5 Matematiksel Modelin Değerlendirilmesi

Oluşturulan matematiksel modelin başarı durumunu anlamak için sonuçlarda iki önemli göstergeye bakılmıştır. Bunlardan ilki, sonuçlara göre kurulan EA şarj istasyonlarının boşta kalma süreleri veya doluluk oranları, diğeri ise verimlilik oranlarıdır. Bu noktada boşa geçirilen zaman ne kadar az olursa model açısından o kadar iyi kabul edilmektedir.

Matematiksel modelin başarısını ölçmek için bir diğer gösterge ise verimlilik oranlarıdır. Bu, modelin gerçek yaşam senaryolarına ne kadar uygulanabilir olduğunu gösterir. Uygulandığında modelin karar vericiye bir avantaj sağlayıp sağlamayacağını gösteren bir göstergedir. Aynı zamanda, gerekli altyapı sağlandığında, problemin büyütüldüğü durumlarda modelin istenen performansı gösterip gösteremeyeceğini anlamak adına önemlidir. Matematiksel modelimizin verimliliği, talepteki artışın şarj istasyonu kapasitelerindeki artışla karşılaştırılmasıyla ölçülebilir.

Gerçekleştirilen üç farklı uygulama ve İstanbul-İzmir otoyolu uygulamasındaki deterministik yaklaşımla edinilen sonuçların analiz ve değerlendirmesi ayrı ayrı yapılmıştır.

3.5.1 İstanbul İzmir Otoyolu

İstanbul-İzmir otoyolunda deterministik yaklaşım ile elde edilen her talep seviyesi için açılan istasyonların ortalama boşta kalma yüzdeleri ve doluluk oranları Tablo 3.13 ve Tablo 3.14'de gösterilmiştir.

Tablo 3.13 Deterministik Yaklaşım İçin Boş Kalma Yüzdeleri (2030)

Talep Seviyeleri	Boş Kalınan Zaman Yüzdeleri
Güncel	18,18%
2030-Düşük	20,57%
2030-Orta	22,84%
2030-Yüksek	21,99%
Ortalama	**20,89%**

Tablo 3.14 Deterministik Yaklaşım İçin İstasyon Doluluk Yüzdeleri (2030)

Talep Seviyeleri	İstasyon Doluluk Yüzdeleri
Güncel	81,82%
2030-Düşük	79,43%
2030-Orta	77,16%
2030-Yüksek	78,01%
Ortalama	**79,11%**

Tablo 3.13'de görüldüğü gibi tüm yüzdeler %20 civarındadır. Bu sonuçlar göz önüne alındığında istasyonların harcadığı boş zamanların ortalamasının kabul edilebilir olduğu söylenebilir[101].

Talep artış tablosu, kapasite artış tablosu ve verimlilik tablosu Tablo 3.15, Tablo 3.16 ve Tablo 3.17'de gösterilmiştir.

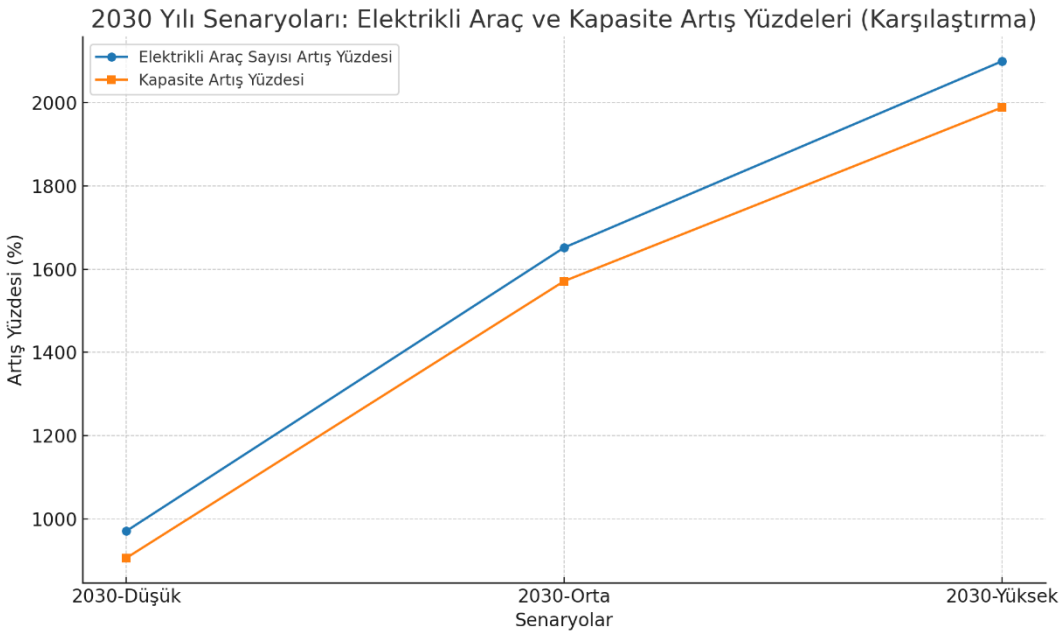
Tablo 3.15 Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri (2030)

	Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri
2030-Düşük	% 970,45
2030-Orta	% 1651,74
2030-Yüksek	% 2099,5

Tablo 3.16 Deterministik Yaklaşım İçin Kapasite Artış Yüzdeleri (2030)

	Kapasite Artış Yüzdeleri
2030-Düşük	% 905,77
2030-Orta	% 1571,15
2030-Yüksek	% 1988,46

Şekil 3.26'da elektrikli araç sayısının ve istasyon kapasitelerinin artışı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.26 İstanbul-İzmir Otoyolu için EV ve Kapasite Artış Oranları

Tablo 3.17 Deterministik Yaklaşım İçin Verimlilik Yüzdeleri (2030)

	Verimlilik
2030-Düşük	% 107,1
2030-Orta	% 105,1
2030-Yüksek	% 105,6
Ortalama	**% 106,0**

Oluşturulan matematiksel modelin deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçları için %106 verimlilik bulunmuştur. Bu, oluşturulan matematiksel modelin deterministik yaklaşım ile maliyet ve iş tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu noktada aynı aksın Genetik algoritma ile elde edilen sonuçların aynı tablolar ile karşılaştırılması gerekmektedir. Kıyaslama sadece güncel talepler ve 2030 yılındaki 3 farklı talep senaryosu için yapılabilmiştir. Çünkü deterministik yaklaşım ile 2035 senesindeki talep artışının getirdiği problem büyüklüğü meta-sezgisel algoritmalar

kullanılmadan çözülememiştir. Güncel ve 2030 yılına ait boş kalınan zaman yüzdeleri, istasyon doluluk yüzdeleri, kapasite artış yüzdeleri ve verimlilik değerleri Tablo 3.18, Tablo 3.19, Tablo 3.20 ve Tablo 3.21'de gösterilmiştir.

Tablo 3.18 Genetik Algoritma Çözümü İçin Boş Kalma Yüzdeleri (2030)

GA-2030	Boş Kalınan Zaman Yüzdeleri
Güncel (2023)	1,25%
2030-Düşük	0,16%
2030-Orta	0,16%
2030-Yüksek	0,09%
Ortalama	**0,42%**

Tablo 3.19 Genetik Algoritma Çözümü İçin İstasyon Doluluk Yüzdeleri (2030)

GA-2030	İstasyon Doluluk Yüzdeleri
Güncel (2023)	98,75%
2030-Düşük	99,84%
2030-Orta	99,84%
2030-Yüksek	99,91%
Ortalama	**99,59%**

Tablo 3.20 Genetik Algoritma Çözümü İçin Kapasite Artış Yüzdeleri (2030)

2030-GA	Kapasite Artış Yüzdeleri
2030-Düşük	741,86%
2030-Orta	1139,53%
2030-Yüksek	1560,47%

Tablo 3.21 Genetik Algoritma Çözümü İçin Verimlilik Yüzdeleri (2030)

2030-GA	Verimlilik
2030-Düşük	130,81%
2030-Orta	144,95%
2030-Yüksek	134,54%
Ortalama	**136,77%**

Genetik algoritma ile elde edilen sonuçların hem isasyonların boş kalma oranı hem de verimlilik açısından deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçlara göre daha iyi çıktığı görülmektedir. Deterministik optimizasyon yöntemlerinin genellikle optimal çözümler üretmesi beklenmesine rağmen, bunun pratikte geçerli olmadığı senaryolar vardır. Normal şartlarda bu tip durumlar beklenmese de, burada sonucu etkilenen bir takım durumlar söz konusu. Oluşturulan matematiksel model Karma

Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (MINLP) problemi olduğundan hem ayrık karar değişkenlerinin hem de doğrusal olmayan ilişkilerin varlığı nedeniyle deterministik yöntemleri kullanarak çözmek doğası gereği zordur. Bu modeller hem tamsayı hem de doğrusal olmayan bileşenleri birleştirir ve bu da genellikle dışbükey olmayan bir çözüm alanıyla sonuçlanır. Zaten bu durumdan dolayı deterministik çözüm sağlanmaya çalışılırken aks optimalliği bozma pahasına üç parçaya bölünmüştür. DICOPT çözücüsü kullanılarak GAMS aracılığıyla MINLP modeli deterministik olarak çözülmeye çalışırken, süreç erken sonlandırılmıştır. Sonuç olarak, tamsayı çözümü bulunamamış ve gevşetilmiş bir NP çözümü bildirilmiştir. Pratikte, deterministik çözücüler sıklıkla gevşetmeler uygulayabilir. Böylece problemin karmaşıklığını azaltır ve hesaplamalı uygulanabilirliği garanti eder. Ancak, bu gevşetme optimum altı veya daha az doğru çözümlere yol açabilir. Sonuç olarak, klasik çözücüler küresel eniyiliği garanti edemeyebilir ve genellikle uygulanabilir çözümler bulmak için gevşemelere, yerel aramalara veya meta-sezgisel yöntemlere güvenir. Buna karşılık, genetik algoritmalar gibi meta-sezgisel yaklaşımlar, dışbükeylik veya türevlenebilirlik ihtiyacı olmadan daha geniş bir çözüm alanını keşfedebildikleri için MINLP problemleri için oldukça uygundur. Teoride eniyiliği garanti etmeseler bile, pratikte duruma göre daha kaliteli çözümler sağlayabilirler. Bu nedenle, genetik algoritmanın bu durumda hem verimlilik hem de boşta kalma süresi açısından deterministik yaklaşımdan daha iyi performans göstermesi şaşırtıcı değildir. Deterministik çözümdeki gevşeme, zaman sınırlamaları, hesaplama karmaşıklığı veya çözücü sınırlamaları nedeniyle tetiklenmiş olabilir ve bu da yaklaşık veya optimum olmayan bir çözüme yol açmış olabilir. Deterministik çözümde bildirilen değerler tamsayılara yakın görünse de, orijinal modelin tamsayı kısıtlamalarına uyumu garanti etmezler. Deterministik yaklaşımla elde edilen sonuçların, meta-sezgisel arama yoluyla geçerli tamsayı çözümleri bulabilen Genetik algoritmaya kıyasla neden daha kötü olduğunu açıklar. Bu, deterministik çözümün kendi içerisinde başarılı olmasına rağmen, daha geniş bir çözüm alanını keşfedebilen ve erken yakınsamayı önleyebilen Genetik algoritma ile karşılaştırıldığında neden daha kötü performans gösterdiğini açıklayabilir.

İstanbul-İzmir otoyolu uygulamasında deterministik yaklaşım problem büyüklüğü sebebi ile çözülemeyen 2035 yılı talep senaryoları ancak Genetik algoritma ile

çözülebilmiştir. Güncel ve 2035 yılına ait boş kalınan zaman yüzdeleri, istasyon doluluk yüzdeleri, kapasite artış yüzdeleri ve verimlilik değerleri Tablo 3.22, Tablo 3.23, Tablo 3.24, Tablo 3.25 ve Tablo 3.26'da gösterilmiştir.

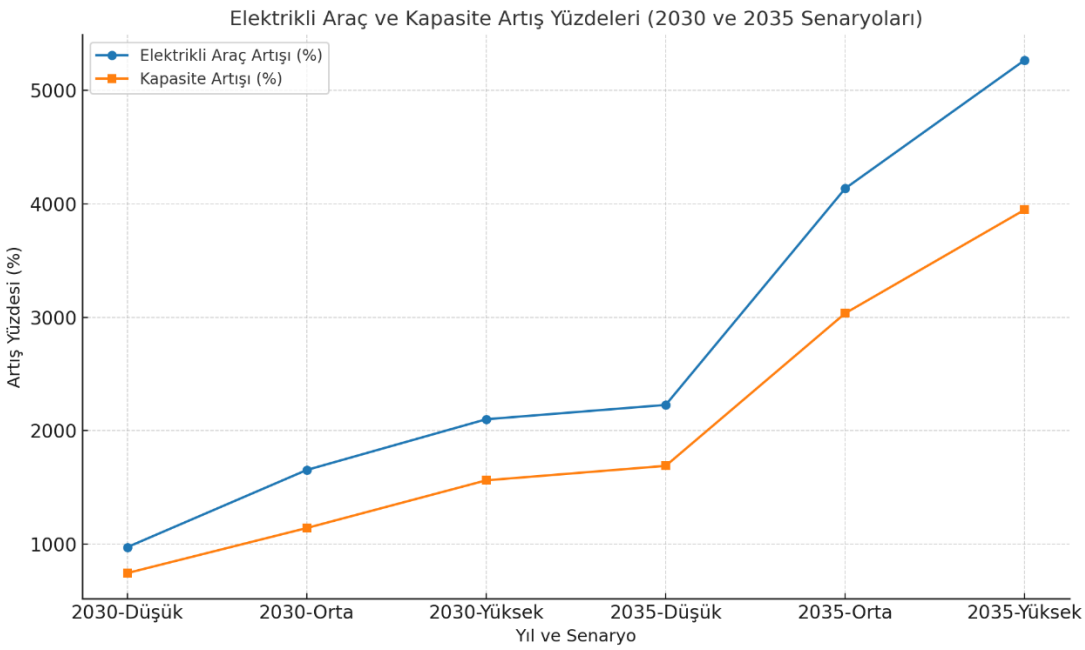
Tablo 3.22 Genetik Algoritma Çözümü İçin Kapasite Artış Yüzdeleri (2035)

2035-GA	Kapasite Artış Yüzdeleri
2035-Düşük	1688,37%
2035-Orta	3034,88%
2035-Yüksek	3948,84%

Tablo 3.23 Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri (2035)

2035	Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri
2035-Düşük	2226,19%
2035-Orta	4136,37%
2035-Yüksek	5269,09%

Şekil 3.27'de elektrikli araç sayısının ve istasyon kapasitelerinin artışı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.27 İstanbul-İzmir Otoyolu GA için EA ve Kapasite Artış Oranları

Tablo 3.24 Genetik Algoritma Çözümü İçin Verimlilik Yüzdeleri (2035)

2035-GA	Verimlilik
2035-Düşük	131,85%
2035-Orta	136,29%
2035-Yüksek	133,43%
Ortalama	133,86%

Tablo 3.25 Genetik Algoritma Çözümü İçin Boş Kalma Yüzdeleri (2035)

GA-2035	Boş Kalınan Zaman Yüzdeleri
Güncel (2023)	1,25%
2035-Düşük	0,09%
2035-Orta	0,06%
2035-Yüksek	0,11%
Ortalama	0,38%

Tablo 3.26 Genetik Algoritma Çözümü İçin İstasyon Doluluk Yüzdeleri (2035)

GA-2035	İstasyon Doluluk Yüzdeleri
Güncel (2023)	98,75%
2035-Düşük	99,91%
2035-Orta	99,94%
2035-Yüksek	99,89%
Ortalama	99,62%

Görüldüğü üzere hem istasyonların boş kalma yüzdeleri hem de verimlilik oranları 2030 senesi için uygulanan senaryolardan çok da farklı değildir. Genetik algoritma ile gerçekleştirilen ve bir aksa uygulanan matematiksel modelin oldukça verimli çalıştığı ve istasyon doluluk oranlarının da oldukça yüksek olduğu söylenebilir.

3.5.2 İstanbul Avrupa Yakası

Oluşturulan matematiksel modelin şehir içi alanlardaki performansını görebilmek adına Genetik algoritma ile gerçekleştirilen çözümler sonrasında elde edilen analiz verileri İstanbul-İzmir otoyolunda olduğu gibi burada da belirlenmiştir. Güncel, 2030 ve 2035 yıllarının düşük, orta ve yüksek talep tahminli senaryolarına ait boş kalınan zaman yüzdeleri, istasyon doluluk yüzdeleri, kapasite artış yüzdeleri ve

verimlilik değerleri Tablo 3.27, Tablo 3.28, Tablo 3.29, Tablo 3.30, Tablo 3.31, Tablo 3.32, Tablo 3.33, Tablo 3.34, Tablo 3.35 ve Tablo 3.36'da gösterilmiştir.

Tablo 3.27 İstanbul Avrupa Yakası 2030 Yılı Boş Kalma Yüzdeleri

GA-2030	Boş Kalınan Zaman Yüzdeleri
Güncel (2023)	0,66%
2030-Düşük	0,90%
2030-Orta	1,05%
2030-Yüksek	0,69%
Ortalama	**0,83%**

Tablo 3.28 İstanbul Avrupa Yakası 2030 Yılı İstasyon Doluluk Yüzdeleri

GA-2030	İstasyon Doluluk Yüzdeleri
Güncel (2023)	99,34%
2030-Düşük	99,10%
2030-Orta	98,95%
2030-Yüksek	99,31%
Ortalama	**99,18%**

Tablo 3.29 İstanbul Avrupa Yakası 2035 Yılı Boş Kalma Yüzdeleri

GA-2035	Boş Kalınan Zaman Yüzdeleri
Güncel (2023)	0,66%
2035-Düşük	0,88%
2035-Orta	0,74%
2035-Yüksek	0,22%
Ortalama	**0,63%**

Tablo 3.30 İstanbul Avrupa Yakası 2035 Yılı İstasyon Doluluk Yüzdeleri

GA-2035	İstasyon Doluluk Yüzdeleri
Güncel (2023)	99,34%
2035-Düşük	99,12%
2035-Orta	99,26%
2035-Yüksek	99,88%
Ortalama	**99,40%**

Tablo 3.31 2030 Yılı Elektrikli Araç Artış Yüzdeleri

	Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri
2030-Düşük	% 970,45
2030-Orta	% 1651,74
2030-Yüksek	% 2099,5

Tablo 3.32 İstanbul Avrupa Yakası 2030 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri

2030-GA	Kapasite Artış Yüzdeleri
2030-Düşük	1003,98%
2030-Orta	1698,80%
2030-Yüksek	2122,31%

Tablo 3.33 İstanbul Avrupa Yakası 2030 Yılı Verimlilik Yüzdeleri

2030-GA	Verimlilik
2030-Düşük	96,66%
2030-Orta	97,23%
2030-Yüksek	98,93%
Ortalama	**97,60%**

Tablo 3.34 2035 Yılı Elektrikli Araç Artış Yüzdeleri

2035	Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri
2035-Düşük	2226,19%
2035-Orta	4136,37%
2035-Yüksek	5269,09%

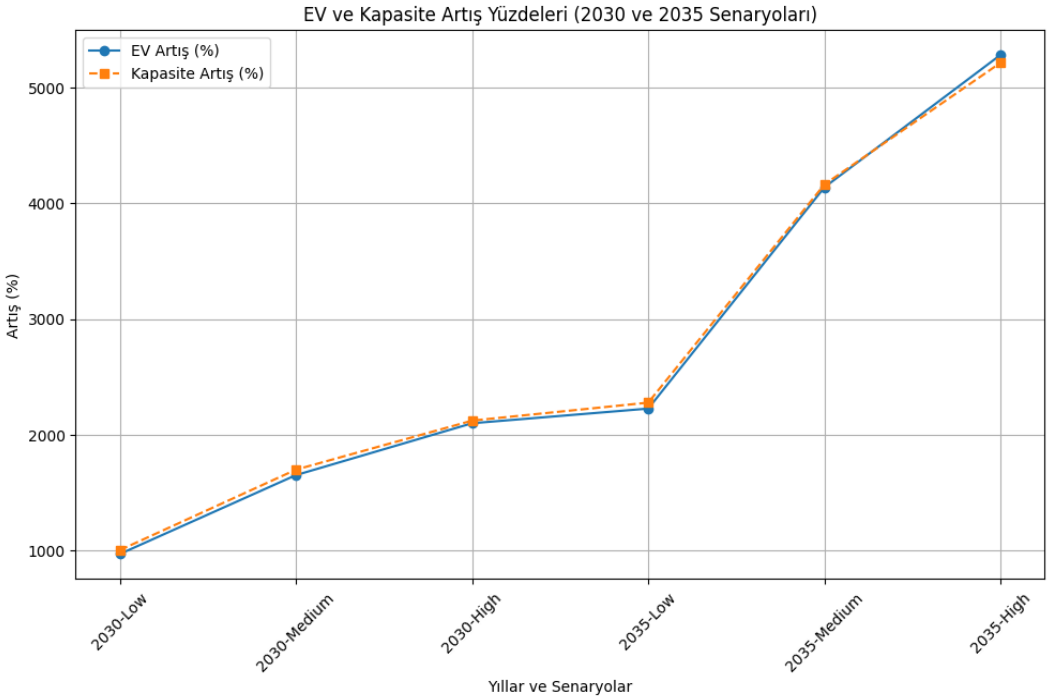
Tablo 3.35 İstanbul Avrupa Yakası 2035 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri

2035-GA	Kapasite Artış Yüzdeleri
2035-Düşük	2277,69%
2035-Orta	4160,96%
2035-Yüksek	5211,95%

Tablo 3.36 İstanbul Avrupa Yakası 2035 Yılı Verimlilik Yüzdeleri

2035-GA	Verimlilik
2035-Düşük	97,74%
2035-Orta	99,41%
2035-Yüksek	101,10%
Ortalama	**99,41%**

Şekil 3.28'de elektrikli araç sayısının ve istasyon kapasitelerinin artışı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.28 İstanbul Avrupa Yakası için EA ve Kapasite Artış Oranları

Elektrikli araç sayısının ve istasyon kapasitelerinin artışının grafik boyunca birlikte ilerlediği görülmektedir. Tablolardan görüldüğü üzere istasyonların doluluk oranlarında aks üzerindeki Genetik algoritma uygulamasına göre kayda değer bir fark bulunmamaktadır. Öte yandan verimlilik oranlarında aks üzerindeki uygulamaya göre gözle görülür bir azalma vardır. Bu haliyle bile yine de rahatlıkla matematiksel modelin verimli bir şekilde çalıştığı söylenebilir. Şehir içi uygulama alanında karşılaşılan verimlilik azalması durumunun analizi ve olası sebepleri, büyük ölçekli uygulama sonuçlarının analizi ile birlikte değerlendirilecektir.

3.5.3 Büyük Ölçekli Bölge Uygulaması

Daha önce gerçekleştirilen İstanbul Avrupa yakası çalışma alanlı şehir içi uygulamadaki alternatif sayıları gerçek hayatta yapılacak olası bir uygulama için düşük olabilceğinden dolayı, herhangi bir alanda istasyon alternatifleri ve talep noktaları arttırıldığında oluşturulan matematiksel modelin performansını nasıl etkileyeceğini anlayabilmek adına 250 talep noktalı ve 250 istasyon alternatifli bir

bölge uygulaması gerçekleştirilmişti. Bu uygulamaya ilişkin güncel, 2030 ve 2035 yıllarının düşük, orta ve yüksek talep tahminli senaryolarına ait boş kalınan zaman yüzdeleri, istasyon doluluk yüzdeleri, kapasite artış yüzdeleri ve verimlilik değerleri Tablo 3.37, Tablo 3.38, Tablo 3.39, Tablo 3.40, Tablo 3.41, Tablo 3.42, Tablo 3.43, Tablo 3.44, Tablo 3.45 ve Tablo 3.46'da gösterilmiştir.

Tablo 3.37 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı Boş Kalma Yüzdeleri

GA-2030	Boş Kalınan Zaman Yüzdeleri
Güncel (2023)	1,50%
2030-Düşük	0,15%
2030-Orta	0,75%
2030-Yüksek	0,10%
Ortalama	**0,63%**

Tablo 3.38 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı İstasyon Doluluk Yüzdeleri

GA-2030	İstasyon Doluluk Yüzdeleri
Güncel (2023)	98,50%
2030-Düşük	99,85%
2030-Orta	99,25%
2030-Yüksek	99,90%
Ortalama	**99,38%**

Tablo 3.39 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı Boş Kalma Yüzdeleri

GA-2035	Boş Kalınan Zaman Yüzdeleri
Güncel (2023)	1,50%
2035-Düşük	0,66%
2035-Orta	0,20%
2035-Yüksek	0,14%
Ortalama	**0,62%**

Tablo 3.40 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı İstasyon Doluluk Yüzdeleri

GA-2035	İstasyon Doluluk Yüzdeleri
Güncel (2023)	98,50%
2035-Düşük	99,44%
2035-Orta	99,80%
2035-Yüksek	99,86%
Ortalama	**99,40%**

Tablo 3.41 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri

2030	Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri
2030-Düşük	970,45%
2030-Orta	1651,74%
2030-Yüksek	2099,50%

Tablo 3.42 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri

2030-GA	Kapasite Artış Yüzdeleri
2030-Düşük	988,50%
2030-Orta	1695,29%
2030-Yüksek	2167,91%

Tablo 3.43 Büyük Ölçekli Bölge 2030 Yılı Verimlilik Yüzdeleri

2030-GA	Verimlilik
2030-Düşük	98,17%
2030-Orta	97,43%
2030-Yüksek	96,84%
Ortalama	**97,48%**

Tablo 3.44 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri

2035	Elektrikli Araç Sayısı Artış Yüzdeleri
2035-Düşük	2226,19%
2035-Orta	4136,37%
2035-Yüksek	5269,09%

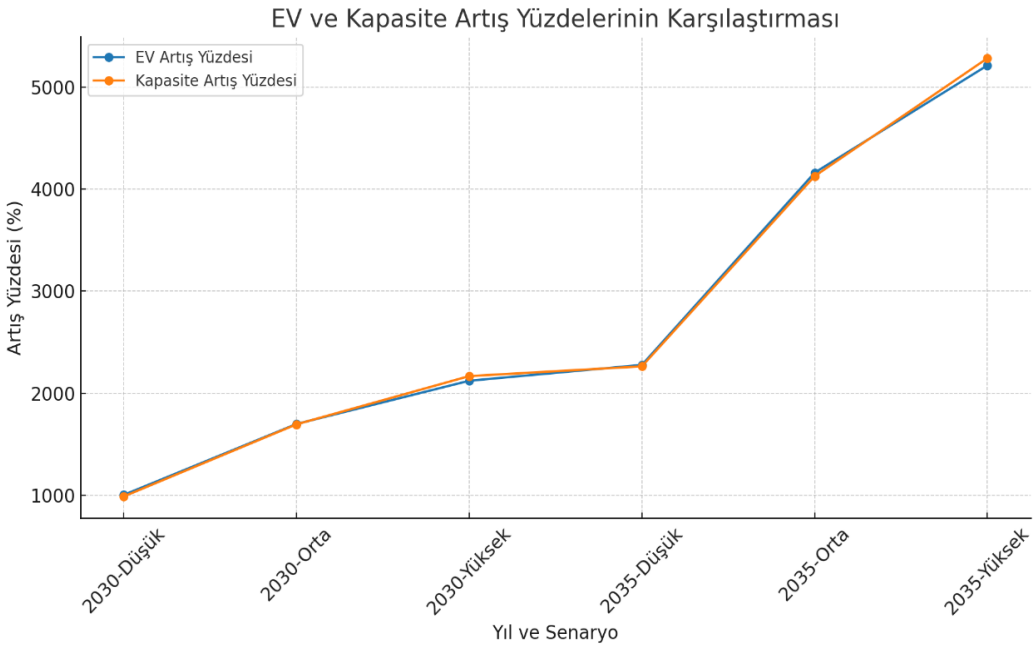
Tablo 3.45 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı Kapasite Artış Yüzdeleri

2035-GA	Kapasite Artış Yüzdeleri
2035-Düşük	2263,55%
2035-Orta	4126,81%
2035-Yüksek	5282,00%

Tablo 3.46 Büyük Ölçekli Bölge 2035 Yılı Verimlilik Yüzdeleri

2035-GA	Verimlilik
2035-Düşük	98,35%
2035-Orta	100,23%
2035-Yüksek	99,76%
Ortalama	**99,45%**

Şekil 3.29'da elektrikli araç sayısının ve istasyon kapasitelerinin artışı aşağıda gösterilmiştir.

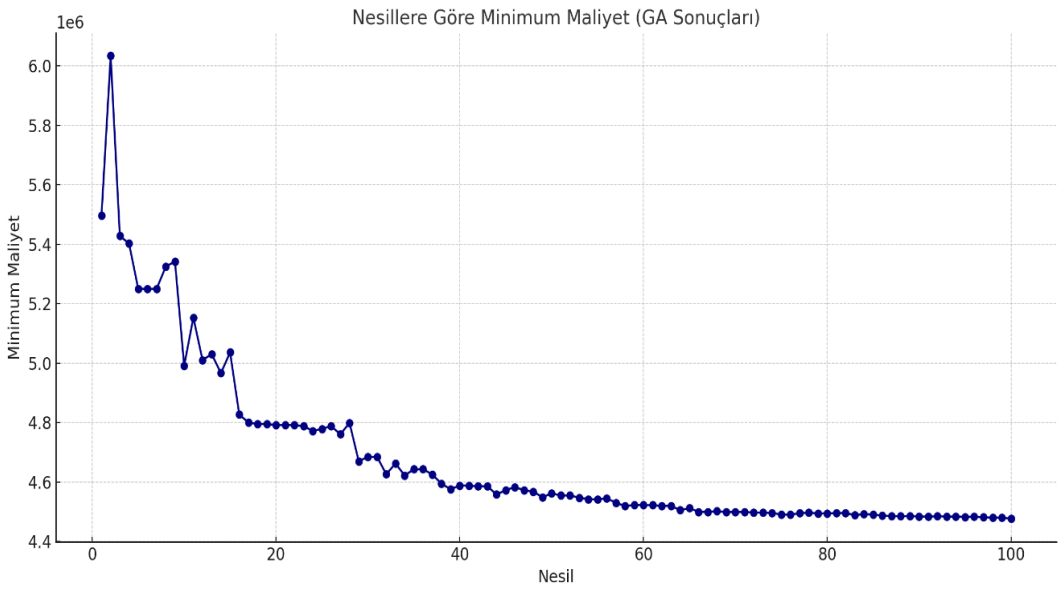


Şekil 3.29 Büyük Ölçekli Bölge için EA ve Kapasite Artış Oranları

EA sayısının ve istasyon kapasitelerinin artışının grafik boyunca birlikte ilerlediği görülmektedir.

Sonuçlara bakıldığında istasyonların boş kalma oranları pek bir değişiklik göstermese de, verimlilik oranlarında gözle görülür bir düşüş görülmektedir. Bunun yegane sebebi uygulama alanlarının birinin oyoyol veya aks diğerlerinin şehir içi alan veya bölge olmasıdır. Modelin otoyol ve kentsel uygulamaları arasındaki gözlemlenen verimlilik farkı birkaç faktöre atfedilebilir. Bir otoyol ekseninde, talep noktaları tipik olarak doğrusal olarak hizalanır ve daha seyrek dağılır, bu da genetik algoritmanın talebi daha az sayıda, optimum şekilde yerleştirilmiş istasyonla karşılamasına olanak tanır, bu da daha yüksek kapasite kullanımı ve genel verimlilikle sonuçlanır. Buna karşılık, kentsel alanlar daha karmaşık ve dağınık bir talep dağılımı sunar, potansiyel olarak yetersiz kullanılan kapasiteye sahip daha fazla istasyon gerektirir ve bu da verimliliği azaltabilir.

Ayrıca, genetik algoritma sonuçlarının farkı, sonuçların ne kadar sağlam olduğunu gösteren bir diğer faktördür. Aşağıda Şekil 3.30'de örnek olarak İstanbul Avrupa yakası 2030-düşük senaryosu için genetik algoritma sonuçlarının farkları gösterilmektedir.



Şekil 3.30 Nesiller Göre Minimum Maliyet (GA Sonuçları)

Grafikte görüldüğü gibi algoritma başlangıçta dağınık bir şekilde başlamış ancak nesiller ilerledikçe yakınsayarak istenilen seviyeye ulaşmıştır.

Kentsel ortamlardaki çözüm alanı, daha yüksek lokasyonel karmaşıklık nedeniyle daha geniştir ve bu da algoritmanın küresel olarak optimum çözümler bulmasını zorlaştırır. Dahası, otoyollar boyunca yoğunlaşmış talep kümeleri, merkezi olmayan ve değişken kentsel talep modellerine kıyasla daha iyi optimizasyon sağlar. Bu yapısal ve lokasyonel farklılıklar, otoyol tabanlı uygulamanın yoğun şehir ortamlarındakilere göre neden daha yüksek verimlilik oranları sağladığını açıklamaktadır.

Şehir içi alanlarda elde edilen %98'lik verimlilik, model açısından kesinlikle kötü değildir, hatta oldukça başarılı bir sonuçtur. Şehir içi bölgelerde talep dağılımı daha karmaşık, noktalar arası mesafeler daha kısa ama yoğunluk yüksek olduğu için istasyon yerleşimi ve kapasite tahsisi çok daha zor hale geliyor. Bu kadar karmaşık bir ortamda bile kapasite artışının neredeyse talep artışını birebir karşıladığını gösteren %98'lik oran, modelin yüksek adaptasyon kabiliyeti ve etkinliğini göstermektedir. Özellikle istasyonların boş zaman oranları da bu kadar düşükken, bu verimlilik oranı, modelin şehir içi gibi zorlu senaryolarda bile güçlü performans sergilediğini kanıtlar.

4
SONUÇ

Elektrikli araçlar, temel ekolojik zorlukları ele alarak çevresel sürdürülebilirliği ilerletmede önemli bir rol oynamaktadır. Küresel düzeyde kullanıcıların elektrikli araçlara geçtiği bu dönemde, sürecin önündeki en büyük engel altyapı eksiklikleridir. EA şarj istasyonlarını verimli bir şekilde kullanabilmek için bu istasyonların optimizasyonu önemli hale gelmiştir. Yapılan optimizasyonun gerçek hayatla uyumlu ve aynı zamanda kullanışlı olabilmesi için optimizasyonun çok yönlü olmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, EA kullanıcılarının en büyük ihtiyaçlarından birisi olan şarj istasyonlarının çok yönlü optimizasyonu ele alınmıştır. EA şarj istasyonlarının yeri ve kapasitesi belirlenirken, istasyonların kurulum maliyetini, servis maliyetini, karşılanmayan talebi, bekleme sürelerini ve boşta kalma sürelerini en aza indiren ve MINLP olarak formüle edilen özgün bir matematiksel model oluşturulmuştur.

Çalışmadaki matematiksel model otoyollarda, şehir içi alanlarda, akslarda ya da yerleşim farketmeksizin istenilen bölgelerde kullanılabilecek şekilde oluşturulmuştur. Uygulama alanları da bu durumu doğrulayabilmek üzere seçilmiştir. İlk uygulama alanı olarak İstanbul-İzmir otoyolu seçilmiştir. Daha sonra oluşturulan matematiksel modelin şehir içi alanlardaki perfonmansının gözlemlenebilmesi için İstanbul Avrupa yakası ikinci uygulama alanı olarak seçilmiştir. Son olarak modelin büyük ölçekli bölgelerde nasıl performans verdiğinin anlaşılabilmesi adına 250 talep noktalı ve 250 istasyon alternatifli rastgele oluşturulmuş bir bölge uygulama alanı olarak seçilmiştir.

Kullanılan veriler TÜİK, Karayolları Genel Müdürlüğü, EPDK ve Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığın'dan edinilmiştir. Çalışmada sadece güncel talepler değil aynı zamanda EPDK'nın 2030 ve 2035 yılları elektrikli araç sayılarının üç farklı seviyedeki tahminleri kullanılarak oluşturulan farklı senaryolara oluşturulan matematiksel model uygulanmıştır.

Oluşturulan matematiksel modelin deterministik çözümleri GAMS yazılımda gerçekleştirilmiştir. Problem büyüklüğü ve model karmaşıklığı sebebiyle deterministik çözüm edinilemeyen noktalara gelindiğinde PyCharm yazılımı üzerinde çözüm için meta-sezgisel algoritmalardan Genetik algoritma kullanılmıştır.

Deterministik yaklaşım ilk uygulama alanı olan İstanbul-İzmir otoyolunun güncel ve 2030 yılı talep tahminlerine göre oluşturulan senaryolarda aks üç parçaya bölünerek kullanılabilmiştir. Bunun dışındaki İstanbul-İzmir otoyolunun güncel, 2030 ve 2035 yıllarının talep tahminlerine göre oluşturulan senaryolarda çözüm için Genetik algoritma kullanılmıştır. Uygulama sonuçlarına bakıldığında hem istasyonların boş geçirdikleri zaman hem de verimlilik oranları göz önüne alındığında Genetik algoritma ile edinilen sonuçların daha başarılı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi deterministik çözümün optimalliğe ulaşamadan gevşetme ile sonlandırılması olarak saptanmıştır. Zaten bu kadar karmaşık matematiksel modellerde problem büyüklüğü de arttırılınca bu durum kaçınılmaz bir hale gelmektedir. Fakat bu deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçların başarısız olduğu anlamına gelmemektedir. İstasyonların boş geçirdikleri zaman oranı ortalama %20 civarı iken verimlilik oranı ortalama %106 çıkmıştır ki bu başarı sayılan bir sonuçtur. Öte yandan aynı senaryolarda Genetik algoritma ile edinilen sonuçlara bakıldığında istasyonların boş geçirdikleri zaman oranı ortalama %1'i dahi bulmamakta ve verimlilik oranı ortalama %136 çıkmıştır.

İkinci uygulama olan İstanbul Avrupa yakası ve büyük ölçek bölge uygulamasının hem güncel, hem 2030 hem de 2035 senaryolarının tümü Genetik algoritma ile çözülmüştür. Deterministik yaklaşımla bu senaryoların çözümüne ulaşılamamıştır. İstasyonların boş geçirdikleri zaman oranı ortalaması yine %1'i dahi bulmamaktadır. Fakat verimlilik oranları ortalaması %98-99 civarı çıkmıştır. Bu düşüşün sebebi uygulama alanının şehir içi olmasıdır. Bir otoyol ekseninde, talep noktaları tipik olarak doğrusal olarak hizalanır ve daha seyrek dağılır, bu da genetik algoritmanın talebi daha az sayıda, optimum şekilde yerleştirilmiş istasyonla karşılamasına olanak tanır, bu da daha yüksek kapasite kullanımı ve genel verimlilikle sonuçlanır. Buna karşılık, kentsel alanlar daha karmaşık ve dağınık bir talep dağılımı sunar, potansiyel olarak yetersiz kullanılan kapasiteye sahip daha fazla istasyon gerektirir ve bu da verimliliği azaltabilir.

Bu yapısal ve lokasyonel farklılıklar, otoyol tabanlı uygulamanın yoğun şehir ortamlarındakilere göre neden daha yüksek verimlilik oranları sağladığını açıklamaktadır.

Şehir içi alanlarda elde edilen %98'lik verimlilik, model açısından oldukça başarılı bir sonuçtur. Şehir içi bölgelerde talep dağılımı daha karmaşık, noktalar arası mesafeler daha kısa ama yoğunluk yüksek olduğu için istasyon yerleşimi ve kapasite tahsisi çok daha zor hale geliyor. Bu kadar karmaşık bir ortamda bile kapasite artışının neredeyse talep artışını birebir karşıladığını gösteren %98'lik oran, modelin yüksek adaptasyon kabiliyeti ve etkinliğini göstermektedir. Özellikle istasyonların boş zaman oranları da bu kadar düşükken, bu verimlilik oranı, modelin şehir içi gibi zorlu senaryolarda bile güçlü performans sergilediğini kanıtlar.

Genel olarak bakılacak olursa, oluşturulan matematiksel modelin düşük istasyon boş zaman oranları ve yüksek verimlilik oranlarıyla farklı tip uygulama alanlarında stabil bir şekilde çalıştığını söylemek mümkün. Oluşturulan matematiksel modelin deterministik yaklaşımı gerçekten yüksek sistem özelliklerine sahip bilgisayarlarda ilerleyen zamanda denenebilir. Ayrıca, bu çalışmanın çeşitli meta-sezgisel algoritmaların kullanımı yoluyla daha ileri gelişmeler için temel oluşturduğunu belirtmekte fayda vardır. Bu noktada, hem büyük ölçekli problemleri çözmek hem de ortaya konulan çözüm metodolojilerini geliştirmek için farklı meta-sezgisel algoritmaların kullanımı faydalı olacaktır. Elbette bu noktada olası meta-sezgisel çalışmalarda hangi meta-sezgisel algoritmanın iyi performans göstereceği ve birbirleri arasındaki karşılaştırmalarda nasıl sonuçlar elde edileceği önemli olacaktır. Ayrıca, gelecekteki çalışmalarda tesis planlaması için önerilen MINLP modeline, istasyon arızaları veya bakım periyotları gibi operasyonel belirsizlikleri entegre ederek modeli gerçek dünya koşullarına daha duyarlı hale getiren sağlam optimizasyon senaryoları eklenebilir. Bunun haricinde uygulamalarda istasyon alternatileri belirlenirken gerçekçi arazi koşulları dikkate alınabilir ve istasyonların araç kapasiteleri belirlenirken enerji kapasitelerinin de yeterli olup olmama durumları modele entegre edilebilir.

KAYNAKÇA

[1] A. R. Kizhakkan, A. K. Rathore, and A. Awasthi, “Review of Electric Vehicle Charging Station Location Planning,” in *2019 IEEE Transportation Electrification Conference, ITEC-India 2019,* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2019. doi: 10.1109/ITEC-India48457.2019.ITECIndia2019-226.

[2] F. Ahmad, A. Iqbal, I. Ashraf, M. Marzband, and I. khan, “Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review,” Nov. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.egyr.2022.01.180.

[3] Y. K. K. Rajnath, “E-Mobility in electrical energy systems for sustainability,” in *E-Mobility in Electrical Energy Systems for Sustainability,* IGI Global, 2024, pp. 18–41. doi: 10.4018/979-8-3693-2611-4.ch002.

[4] S. Hutterer, F. Auinger, and M. Affenzeller, “Metaheuristic Optimization of Electric Vehicle Charging Strategies in Uncertain Environment,” 2012. [Online]. Available: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/,

[5] F. Ahmad, L. Al-Fagih, S. A. Qadir, and M. Khalid, “EV Charging Station Placement using Nature-Inspired Optimisation Algorithms,” *2023 Int. Conf. Power, Instrumentation, Energy Control. PIECON 2023*, 2023, doi: 10.1109/PIECON56912.2023.10085885.

[6] S. Barakat, A. I. Osman, E. Tag-Eldin, A. A. Telba, H. M. Abdel Mageed, and M. M. Samy, “Achieving green mobility: Multi-objective optimization for sustainable electric vehicle charging,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 53, May 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101351.

[7] S. Qahtan, H. A. Alsattar, A. A. Zaidan, M. Deveci, D. Pamucar, and W. Ding, “A novel fuel supply system modelling approach for electric vehicles

under Pythagorean probabilistic hesitant fuzzy sets," *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 622, pp. 1014–1032, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ins.2022.11.166.

[8] S. Qahtan, H. A. Alsattar, A. A. Zaidan, D. Pamucar, and M. Deveci, "Integrated sustainable transportation modelling approaches for electronic passenger vehicle in the context of industry 5.0," *J. Innov. Knowl.*, vol. 7, no. 4, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jik.2022.100277.

[9] Y. He, Y. Zhang, T. Fan, X. Cai, and Y. Xu, "The charging station and swapping station site selection with many-objective evolutionary algorithm," *Appl. Intell.*, vol. 53, no. 14, pp. 18041–18060, Jul. 2023, doi: 10.1007/S10489-022-04292-8/METRICS.

[10] J. Yang, W. Liu, K. Ma, Z. Yue, A. Zhu, and S. Guo, "An optimal battery allocation model for battery swapping station of electric vehicles," *Energy*, vol. 272, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127109.

[11] F. Farhadi, S. Wang, R. Palacin, and P. Blythe, "Data-driven multi-objective optimization for electric vehicle charging infrastructure," *iScience*, vol. 26, no. 10, p. 107737, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.ISCI.2023.107737/ASSET/4963A968-2AA9-43C4-9CE0-BE2CA077B185/MAIN.ASSETS/GR18.JPG.

[12] N. Erdogan, D. Pamucar, S. Kucuksari, and M. Deveci, "An integrated multi-objective optimization and multi-criteria decision-making model for optimal planning of workplace charging stations," *Appl. Energy*, vol. 304, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117866.

[13] M. Campaña and E. Inga, "Optimal deployment of fast-charging stations for electric vehicles considering the sizing of the electrical distribution network and traffic condition," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 5246–5268, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.04.355.

[14] M. Shukla, D. K. Singh, A. Yadav, A. K. Singh, N. A. Jumaa, and A. Mohammed, "Optimizing Electric Vehicle Charging Station Placement in Urban Areas: A Data-Driven Approach," *2023 3rd Int. Conf. Adv. Comput. Innov. Technol. Eng. ICACITE 2023*, pp. 2835–2838, 2023, doi: 10.1109/ICACITE57410.2023.10183075.

[15] K. Yenchamchalit, Y. Kongjeen, K. Bhumkittipich, and N. Mithulananthan, “Optimal Sizing and Location of the Charging Station for Plug-in Electric Vehicles using the Particle Swarm Optimization Technique,” 2018.

[16] S. Mateen, M. Amir, A. Haque, and F. I. Bakhsh, “Ultra-fast charging of electric vehicles: A review of power electronics converter, grid stability and optimal battery consideration in multi-energy systems,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 35, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.SEGAN.2023.101112.

[17] J. Liikkanen, S. Moilanen, A. Kosonen, V. Ruuskanen, and J. Ahola, “Cost-effective optimization for electric vehicle charging in a prosumer household,” *Sol. Energy*, vol. 267, p. 112122, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.SOLENER.2023.112122.

[18] R. Massarat and M. S. Thomas, “A Review of the Optimal Allocation of Electric Vehicle Charging Stations,” *2023 Int. Conf. Recent Adv. Electr. Electron. Digit. Healthc. Technol. REEDCON 2023*, pp. 547–553, 2023, doi: 10.1109/REEDCON57544.2023.10151058.

[19] I. Ullah, J. Zheng, A. Jamal, M. Zahid, M. Almoshageh, and M. Safdar, “Electric vehicles charging infrastructure planning: a review,” *Int. J. Green Energy*, vol. 21, no. 7, pp. 1710–1728, May 2024, doi: 10.1080/15435075.2023.2259975.

[20] R. Gopalakrishnan, A. Biswas, A. Lightwala, S. Vasudevan, P. Dutta, and A. Tripathi, “Demand Prediction and Placement Optimization for Electric Vehicle Charging Stations,” Apr. 2016, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1604.05472

[21] I. Ullah, K. Liu, T. Yamamoto, M. Shafiullah, and A. Jamal, “Grey wolf optimizer-based machine learning algorithm to predict electric vehicle charging duration time,” *Transp. Lett.*, vol. 15, no. 8, pp. 889–906, Sep. 2023, doi: 10.1080/19427867.2022.2111902.

[22] B. Yin, X. Liao, B. Qian, J. Ma, and R. Lei, “Optimal Scheduling of Electric Vehicle Integrated Energy Station Using a Novel Many-Objective Stochastic Competitive Optimization Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 129043–129059, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3332904.

[23] S. A. Parah and M. Jamil, “Techniques for optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations: A review,” *2023 Int. Conf. Power, Instrumentation, Energy Control. PIECON 2023*, 2023, doi: 10.1109/PIECON56912.2023.10085887.

[24] X. J. Dong, J. N. Shen, C. W. Liu, Z. F. Ma, and Y. J. He, “Simultaneous capacity configuration and scheduling optimization of an integrated electrical vehicle charging station with photovoltaic and battery energy storage system,” *Energy*, vol. 289, p. 129991, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.129991.

[25] M. Ahmadi, S. H. Hosseini, and M. Farsadi, “Optimal Allocation of Electric Vehicles Parking Lots and Optimal Charging and Discharging Scheduling using Hybrid Metaheuristic Algorithms,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 2, pp. 759–770, Mar. 2021, doi: 10.1007/s42835-020-00634-z.

[26] H. Ma, W. Pei, Q. Zhang, D. Xu, and Y. Li, “Location of Electric Vehicle Charging Stations Based on Game Theory,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 14, no. 5, May 2023, doi: 10.3390/WEVJ14050128.

[27] M. Akbari, M. Brenna, and M. Longo, “Optimal locating of electric vehicle charging stations by application of Genetic Algorithm,” *Sustain.*, vol. 10, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/su10041076.

[28] J. Jordán, J. Palanca, E. del Val, V. Julian, and V. Botti, “Using Genetic Algorithms to Optimize the Location of Electric Vehicle Charging Stations,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Verlag, 2019, pp. 11–20. doi: 10.1007/978-3-319-94120-2_2.

[29] C. A. Vandet and J. Rich, “Optimal placement and sizing of charging infrastructure for EVs under information-sharing,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 187, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.techfore.2022.122205.

[30] B. Desticioglu Tasdemir, E. Koç, and A. İ. Simsek, “Capacited range coverage location model for electric vehicle charging stations: A case of Istanbul-Ankara highway,” *Case Stud. Transp. Policy*, vol. 19, p. 101320, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.cstp.2024.101320.

[31] Y. Zhuang, L. Cheng, N. Qi, X. Wang, and Y. Chen, “Real-time hosting capacity assessment for electric vehicles: A sequential forecast-then-optimize method,” *Appl. Energy*, vol. 380, p. 125034, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.125034.

[32] A. Niccolai, L. Bettini, and R. Zich, “Optimization of electric vehicles charging station deployment by means of evolutionary algorithms,” *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 36, no. 9, pp. 5359–5383, Sep. 2021, doi: 10.1002/int.22515.

[33] D. Gong, M. Tang, B. Buchmeister, and H. Zhang, “Solving location problem for electric vehicle charging stations - A sharing charging model,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 138391–138402, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2943079.

[34] S. Türk, M. Deveci, E. Özcan, F. Canıtez, and R. John, “Interval type-2 fuzzy sets improved by Simulated Annealing for locating the electric charging stations,” *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 547, pp. 641–666, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ins.2020.08.076.

[35] Z. Gan, “Do electric vehicle charger locations respond to the potential charging demands from multi-unit dwellings? Evidence from Los Angeles County,” *Transp. Policy*, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.tranpol.2023.04.012.

[36] K. Chraibi, A. Chraibi, I. Chaker, A. Zahi, and A. Bekrar, “Hybrid metaheuristic to solve location problem for electric vehicles charging stations,” *2018 IEEE Int. Conf. Technol. Manag. Oper. Decis. ICTMOD 2018*, pp. 12–17, Jul. 2018, doi: 10.1109/ITMC.2018.8691281.

[37] V. K. B. Ponnam and K. Swarnasri, “Multi-Objective Optimal Allocation of Electric Vehicle Charging Stations and Distributed Generators in Radial Distribution Systems using Metaheuristic Optimization Algorithms,” 2020. [Online]. Available: www.etasr.com

[38] Wang Meng and Liu Kai, *Optimization of Electric Vehicle Charging Station Location Based on Game Theory*. IEEE, 2011.

[39] C. Hsu *et al.*, “Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations in Distribution

System," *Energy Sci. Eng.*, Jul. 2025, doi: 10.1002/ese3.70223.

[40] S. Subash and N. Narmadhai, "Optimal location for electric vehicle charging station using multiobjective assessment method," *Sustain. Energy Res.*, vol. 12, no. 1, p. 36, Jul. 2025, doi: 10.1186/s40807-025-00184-w.

[41] C. Liu *et al.*, "Planning public electric vehicle charging stations to balance efficiency and equality: A case study in Wuhan, China," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 124, p. 106314, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.scs.2025.106314.

[42] C. Loaiza Quintana, A. Arbelaez, and L. Climent, "Robust eBuses Charging Location Problem," *IEEE Open J. Intell. Transp. Syst.*, vol. 3, pp. 856–871, 2022, doi: 10.1109/OJITS.2022.3229647.

[43] H. M. Al-Alwash, E. Borcoci, M. C. Vochin, I. A. M. Balapuwaduge, and F. Y. Li, "Optimization Schedule Schemes for Charging Electric Vehicles: Overview, Challenges, and Solutions," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 32801–32818, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3371890.

[44] S. Chen, Y. Shi, X. Chen, and F. Qi, "Optimal Location of Electric Vehicle Charging Stations Using Genetic Algorithm," 2015.

[45] J. Hassler, Z. Dimitrova, M. Petit, and P. Dessante, "Optimization and coordination of electric vehicle charging process for long-distance trips," *Energies*, vol. 14, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14134054.

[46] Mavrovouniotis Michalis, Georgios Ellinas, and Polycarpou Marios, *Electric Vehicle Charging Scheduling Using AntColony System*. 2019.

[47] LIU Zi-fa, ZHANG Wei, and L. K. P. I. A. 2012 15695265111 I Xing, "Optimal Planning of Charging Station for Electric Vehicle Based on Particle Swarm Optimization," 2012.

[48] J. García-Álvarez, M. A. González, and C. R. Vela, "Metaheuristics for solving a real-world electric vehicle charging scheduling problem," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 65, pp. 292–306, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2018.01.010.

[49] S. Deb, X. Z. Gao, K. Tammi, K. Kalita, and P. Mahanta, "A novel chicken swarm and teaching learning based algorithm for electric vehicle charging station placement problem," *Energy*, vol. 220, Apr. 2021, doi:

10.1016/j.energy.2020.119645.

[50] S. Mehar and S. M. Senouci, “An Optimization Location Scheme for Electric Charging Stations,” 2013.

[51] G. Zhou, Z. Zhu, and S. Luo, “Location optimization of electric vehicle charging stations: Based on cost model and genetic algorithm,” *Energy*, vol. 247, May 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123437.

[52] T. Yi, X. Bin Cheng, H. Zheng, and J. P. Liu, “Research on location and capacity optimization method for electric vehicle charging stations considering user’s comprehensive satisfaction,” *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019, doi: 10.3390/en12101915.

[53] J. Ma and L. Zhang, “A deploying method for predicting the size and optimizing the location of an electric vehicle charging stations,” *Inf.*, vol. 9, no. 7, Jul. 2018, doi: 10.3390/info9070170.

[54] D. Ji, M. Lv, J. Yang, and W. Yi, “Optimizing the Locations and Sizes of Solar Assisted Electric Vehicle Charging Stations in an Urban Area,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 112772–112782, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3003071.

[55] D. Efthymiou, K. Chrysostomou, M. Morfoulaki, and G. Aifantopoulou, “Electric vehicles charging infrastructure location: a genetic algorithm approach,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 9, no. 2, Jun. 2017, doi: 10.1007/s12544-017-0239-7.

[56] H. Zhang, L. Tang, C. Yang, and S. Lan, “Locating electric vehicle charging stations with service capacity using the improved whale optimization algorithm,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 41, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.aei.2019.02.006.

[57] Mariana T. Sebastiani, Ricardo Lüders, and Keiko Verônica O.Fonseca, *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference : exploring big data through simulation : December 7-10, 2014, Westin Savannah Harbor Resort, Savannah, GA.* 2014.

[58] H. M. Sistig and D. U. Sauer, “Metaheuristic for the integrated electric vehicle and crew scheduling problem,” *Appl. Energy*, vol. 339, p. 120915,

Jun. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120915.

[59] H. Woo, Y. Son, J. Cho, S. Y. Kim, and S. Choi, “Optimal expansion planning of electric vehicle fast charging stations,” *Appl. Energy*, vol. 342, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121116.

[60] J. M. Wang, Y. Liu, Y. F. Yang, W. Cai, D. X. Wang, and Z. W. Jia, “The Location of Electric Vehicle Charging Stations based on FRLM with Robust Optimization,” *Int. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.*, vol. 33, no. 8, Jul. 2019, doi: 10.1142/S0218001419590274.

[61] S. Karakatič, “Optimizing nonlinear charging times of electric vehicle routing with genetic algorithm,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 164, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2020.114039.

[62] N. A. Khofiyah, A. Vania, A. Putri, and W. Sutopo, “Location Optimization Charging Station of Three-Wheel Electric Vehicle: A Case Study,” 2021.

[63] Z. Tian, W. Hou, X. Gu, F. Gu, and B. Yao, “The location optimization of electric vehicle charging stations considering charging behavior,” *Simulation*, vol. 94, no. 7, pp. 625–636, Jul. 2018, doi: 10.1177/0037549717743807.

[64] Y. Zhang, Q. Zhang, A. Farnoosh, S. Chen, and Y. Li, “GIS-Based Multi-Objective Particle Swarm Optimization of charging stations for electric vehicles,” *Energy*, vol. 169, pp. 844–853, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.062.

[65] D. Hu, J. Zhang, and Q. Zhang, “Optimization design of electric vehicle charging stations based on the forecasting data with service balance consideration,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 75, pp. 215–226, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2018.07.063.

[66] H. Utreras and R. Armas, “Optimal Location of the Electric Vehicle Charging Stands Using Multi-objective Evolutionary Algorithms: Cuenca City as a Case Study,” *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 1885 CCIS, pp. 309–323, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-45438-7_21.

[67] S. E. Comert and H. R. Yazgan, “A new approach based on hybrid ant

colony optimization-artificial bee colony algorithm for multi-objective electric vehicle routing problems," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 123, p. 106375, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2023.106375.

[68] H. Zhang and F. Shi, "A multi-objective site selection of electric vehicle charging station based on NSGA-II," *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 293–306, Dec. 2024, doi: 10.5267/J.IJIEC.2023.9.009.

[69] A. Subramaniam and L. R. S. Ravi Singh, "Optimal planning and allocation of Plug-in Hybrid Electric Vehicles charging stations using a novel hybrid optimization technique," *PLoS One*, vol. 18, no. 7, p. e0284421, Jul. 2023, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0284421.

[70] K. Kathiravan and P. N. Rajnarayanan, "Application of AOA algorithm for optimal placement of electric vehicle charging station to minimize line losses," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, p. 108868, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2022.108868.

[71] S. Zapotecas-Martínez, R. Armas, and A. García-Nájera, "A multi-objective evolutionary approach for the electric vehicle charging stations problem," *Expert Syst. Appl.*, vol. 240, p. 122514, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.ESWA.2023.122514.

[72] M. H. Abbasi, Z. Arjmandzadeh, J. Zhang, V. Krovi, B. Xu, and D. K. Mishra, "A Coupled Game Theory and Lyapunov Optimization Approach to Electric Vehicle Charging At Fast Charging Stations," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3407068.

[73] R. Piedra-de-la-Cuadra and F. A. Ortega, "Bilevel optimization for the deployment of refuelling stations for electric vehicles on road networks," *Comput. Oper. Res.*, vol. 162, p. 106460, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.COR.2023.106460.

[74] H. Pourvaziri, H. Sarhadi, N. Azad, H. Afshari, and M. Taghavi, "Planning of electric vehicle charging stations: An integrated deep learning and queueing theory approach," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 186, p. 103568, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.TRE.2024.103568.

[75] T. Uslu and O. Kaya, "Location and capacity decisions for electric bus

charging stations considering waiting times," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 90, p. 102645, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.TRD.2020.102645.

[76] "https://www.kgm.gov.tr."

[77] "https://www.epdk.gov.tr."

[78] Frank R. Giordano, William P. Fox, Steven B. Horton, and Maurice D. Weir, *A First Course in Mathematical Modeling: Giordano, Frank R., Fox, William P., Horton, Steven B., Weir, Maurice D.: 9780495011590: Amazon.com: Books*, 4th ed. Cengage Learning, 2008. Accessed: Dec. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.amazon.com/First-Course-Mathematical-Modeling/dp/0495011592

[79] M. Alolaiwy, T. Hawsawi, M. Zohdy, A. Kaur, and S. Louis, "Multi-Objective Routing Optimization in Electric and Flying Vehicles: A Genetic Algorithm Perspective," *Appl. Sci. 2023, Vol. 13, Page 10427*, vol. 13, no. 18, p. 10427, Sep. 2023, doi: 10.3390/APP131810427.

[80] B. Zhang, Q. Yan, H. Zhang, and L. Zhang, "Optimization of Charging/Battery-Swap Station Location of Electric Vehicles with an Improved Genetic Algorithm-Based Model", doi: 10.32604/cmes.2022.022089.

[81] D. L. Wang, A. A. Chen, and L. Zhang, "A combined genetic algorithm and A* search algorithm for the electric vehicle routing problem with time windows," *J. home apem-journal.org*, vol. 18, no. 4, pp. 403–416, 2023, doi: 10.14743/apem2023.4.481.

[82] F. L. E. Usseglio-Viretta *et al.*, "Optimizing Fast Charging and Wetting in Lithium-Ion Batteries with Optimal Microstructure Patterns Identified by Genetic Algorithm," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 170, no. 12, p. 120506, Dec. 2023, doi: 10.1149/1945-7111/AD0A7A.

[83] C. L. Chen, V. S. Vempati, and N. Aljaber, "An application of genetic algorithms for flow shop problems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 80, no. 2, pp. 389–396, Jan. 1995, doi: 10.1016/0377-2217(93)E0228-P.

[84] J. H. Holland, "Genetic Algorithms and the Optimal Allocation of Trials," in *SIAM Journal on Computing*, vol. 2, no. 2, 1973, pp. 88–105. doi:

10.1137/0202009.

[85] J. H. Holland, “Genetic Algorithms and Adaptation,” in *Adaptive Control of Ill-Defined Systems*, Boston, MA: Springer US, 1984, pp. 317–333. doi: 10.1007/978-1-4684-8941-5_21.

[86] E. A. Rene, W. S. Tounsi Fokui, and P. K. Nembou Kouonchie, “Optimal allocation of plug-in electric vehicle charging stations in the distribution network with distributed generation,” *Green Energy Intell. Transp.*, vol. 2, no. 3, p. 100094, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.GEITS.2023.100094.

[87] D. Mazumdar, P. K. Biswas, C. Sain, and T. S. Ustun, “GAO Optimized Sliding Mode Based Reconfigurable Step Size Pb&O MPPT Controller With Grid Integrated EV Charging Station,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 10608–10620, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3344275.

[88] S. Chupradit *et al.*, “Modeling and Optimizing the Charge of Electric Vehicles with Genetic Algorithm in the Presence of Renewable Energy Sources,” *J. Oper. Autom. Power Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 33–38, Apr. 2023, doi: 10.22098/JOAPE.2023.9970.1707.

[89] M. Altaf *et al.*, “PSO-based optimal placement of electric vehicle charging stations in a distribution network in smart grid environment incorporating backward forward sweep method,” *IET Renew. Power Gener.*, 2023, doi: 10.1049/RPG2.12916.

[90] Z. Zhaoyun, L. linjun, and W. Xinghua, “Researh on dynamic time-sharing tariff orderly charging strategy based on NSGA2 in PV-Storage-Charging stations,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 225, p. 109784, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2023.109784.

[91] M. Choi, Y. Van Fan, D. Lee, S. Kim, and S. Lee, “Location and capacity optimization of EV charging stations using genetic algorithms and fuzzy analytic hierarchy process,” *Clean Technol. Environ. Policy*, pp. 1–14, Aug. 2024, doi: 10.1007/S10098-024-02986-W/METRICS.

[92] V. Lazari and A. Chassiakos, “Multi-Objective Optimization of Electric Vehicle Charging Station Deployment Using Genetic Algorithms,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 8, p. 4867, Apr. 2023, doi: 10.3390/APP13084867/S1.

[93] D. Fadranski, A. M. Syré, A. Grahle, and D. Göhlich, “Analysis of Charging Infrastructure for Private, Battery Electric Passenger Cars: Optimizing Spatial Distribution Using a Genetic Algorithm,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 14, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/wevj14020026.

[94] K. Yenchamchalit, Y. Kongjeen, P. Prabpal, and K. Bhumkittipich, “Optimal placement of distributed photovoltaic systems and electric vehicle charging stations using metaheuristic optimization techniques,” *Symmetry (Basel).*, vol. 13, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/sym13122378.

[95] B. A. Kumar, B. Jyothi, A. R. Singh, M. Bajaj, R. S. Rathore, and M. B. Tuka, “Hybrid genetic algorithm-simulated annealing based electric vehicle charging station placement for optimizing distribution network resilience,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-58024-8.

[96] A. Dastanpour, R. Azlina, and R. Mahmood, “Feature Selection Based on Genetic Algorithm and Support Vector Machine for Intrusion Detection System”, doi: 10.13140/2.1.4289.4721.

[97] A. Saba, M. Liu, and M. Mansourvar, “Application of meta-heuristic algorithms in intrusion detection system,” *Int. J. Nonlinear Anal. Appl*, vol. 13, pp. 2008–6822, 2022, doi: 10.22075/ijnaa.2022.27338.3563.

[98] Z. Shu, H. Xiao, and R. Li, “Capacity optimization of highway charging station considering charging guidance mechanism,” *https://doi.org/10.1117/12.2689463*, vol. 12790, pp. 1426–1439, Sep. 2023, doi: 10.1117/12.2689463.

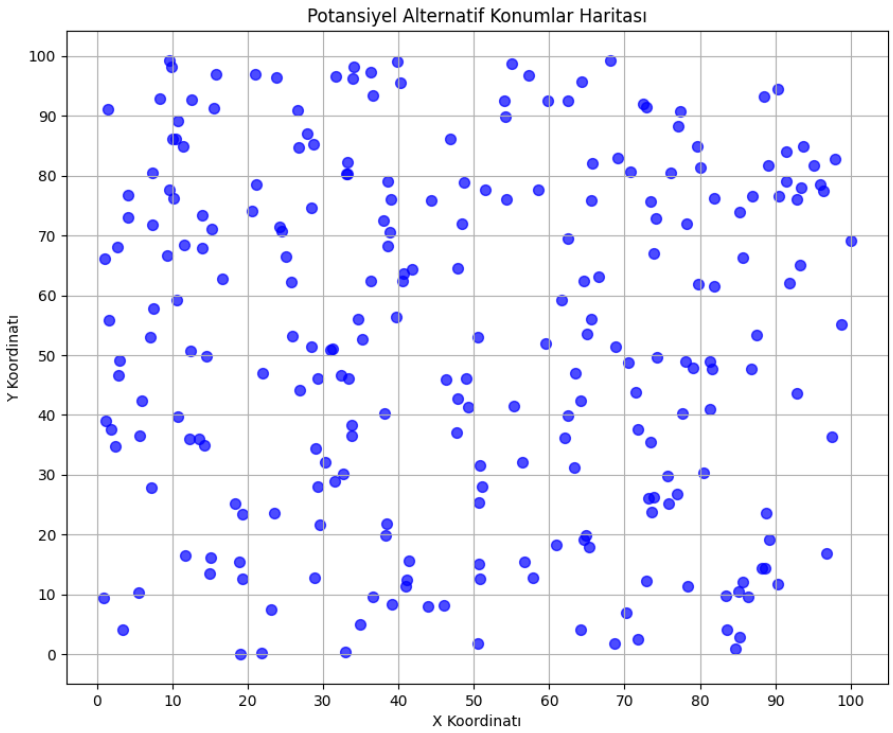
[99] J. Wu, H. Su, J. Meng, and M. Lin, “Electric vehicle charging scheduling considering infrastructure constraints,” *Energy*, vol. 278, p. 127806, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.127806.

[100] R. S. F. Ferraz, R. S. F. Ferraz, A. C. Rueda Medina, and J. F. Fardin, “Multi-objective approach for optimized planning of electric vehicle charging stations and distributed energy resources,” *Electr. Eng.*, vol. 105, no. 6, pp. 4105–4117, Dec. 2023, doi: 10.1007/S00202-023-01942-Z/METRICS.

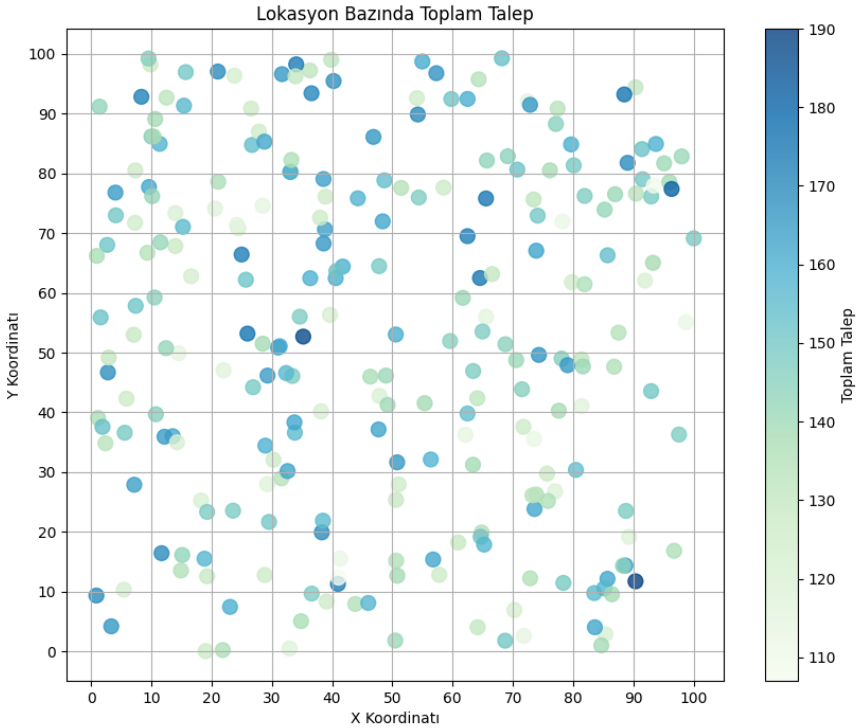
[101] M. Fischer, C. Hardt, W. Michalk, and K. Bogenberger, “CHARGING OR

IDLING: METHOD FOR QUANTIFYING THE CHARGING AND THE IDLE TIME OF PUBLIC CHARGING STATIONS," in *Transport Research Board Annual Meeting*, 2022, p. 26. Accessed: Dec. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/357900426_Charging_or_Idling_Method_for_Quantifying_the_Charging_and_the_Idle_Time_of_Public_Charging_Stations

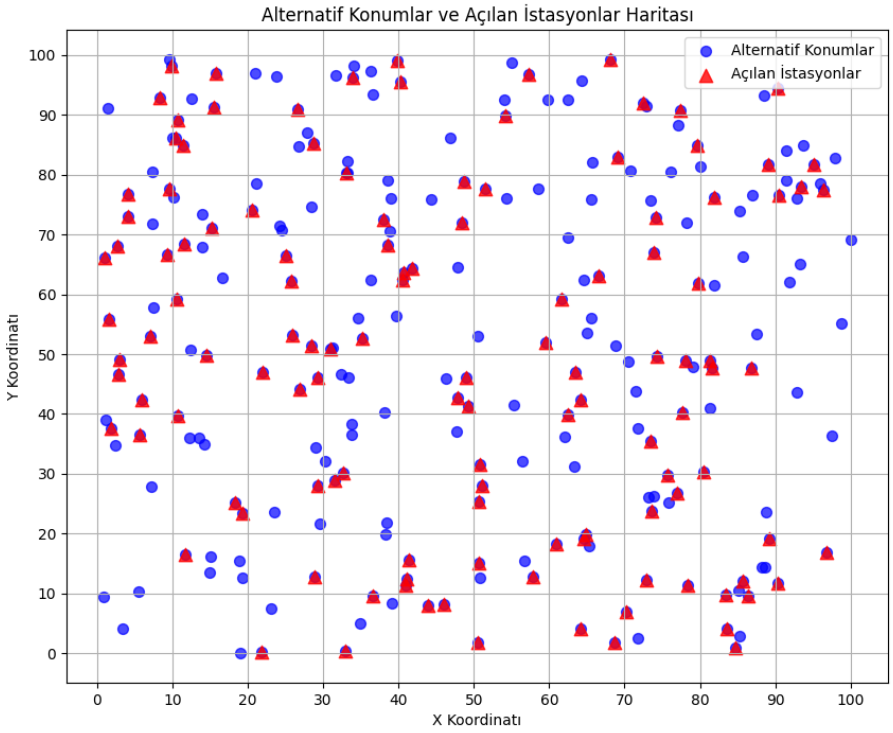
A
EK



Şekil 3.1 Alternatif Konumlar Haritası (Güncel)

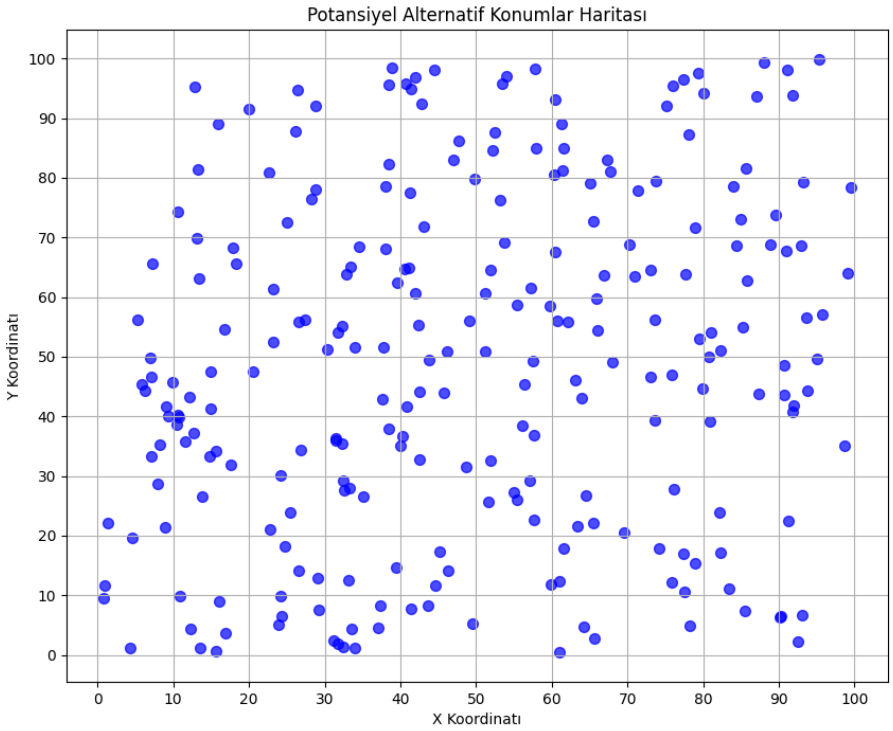


Şekil 3.2 Lokasyon Bazında Toplam Talep (Güncel)

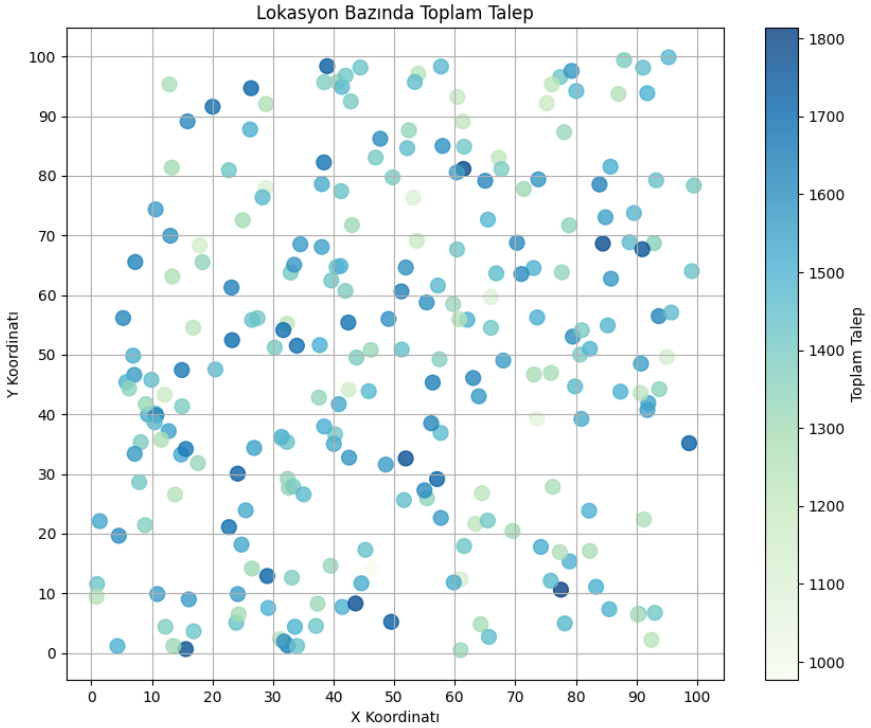


Şekil 3.3 Açılan İstasyonlar Haritası (Güncel)

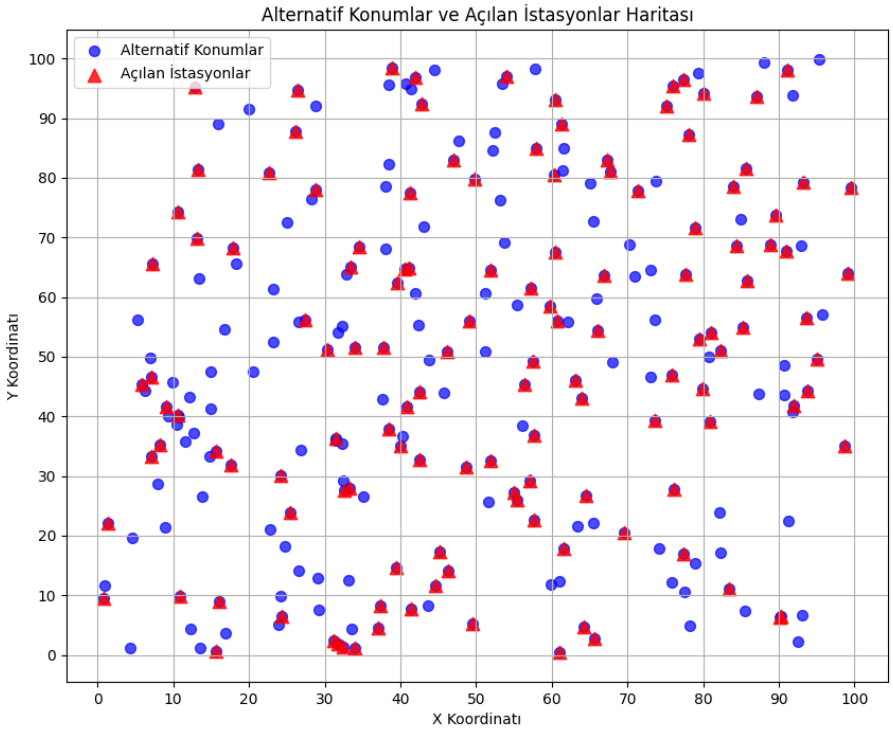
2030-Düşük



Şekil 3.4 Alternatif Konumlar haritası (2030-Düşük)

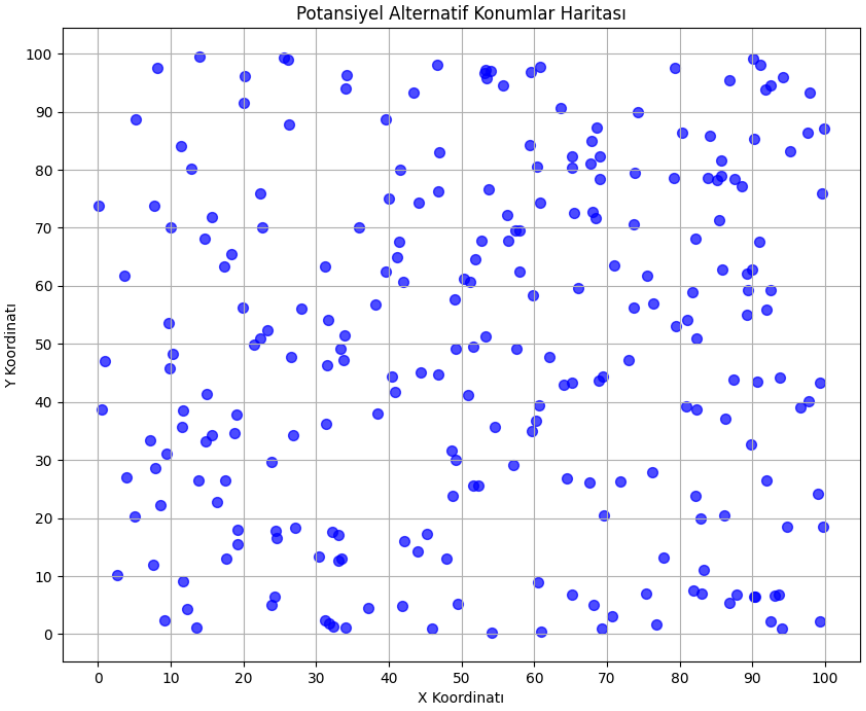


Şekil 3.5 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2030-Düşük)

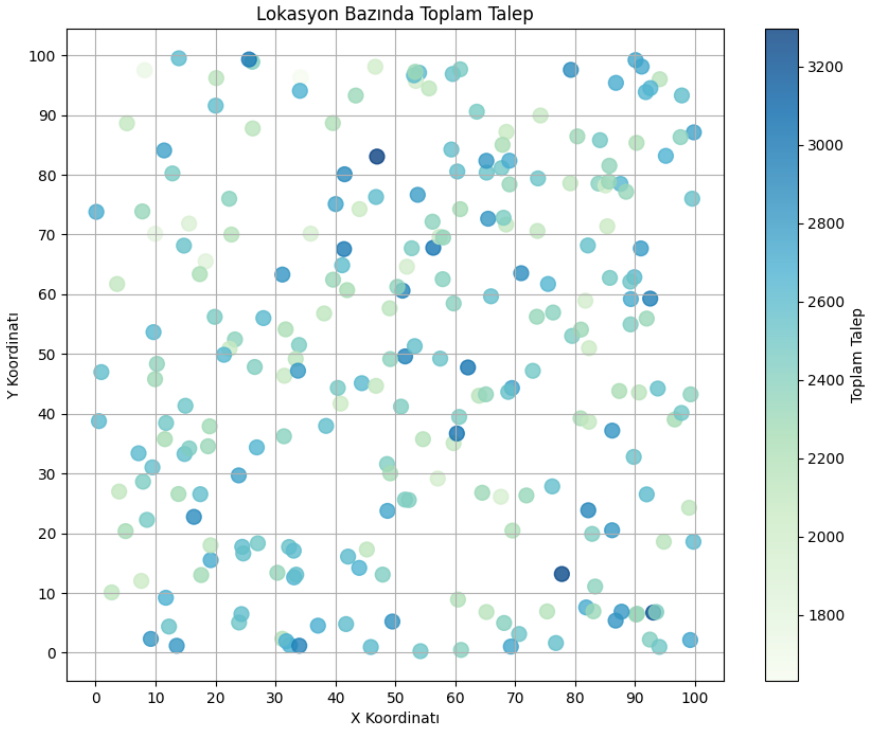


Şekil 3.6 Açılan İstasyonlar Haritası (2030-Düşük)

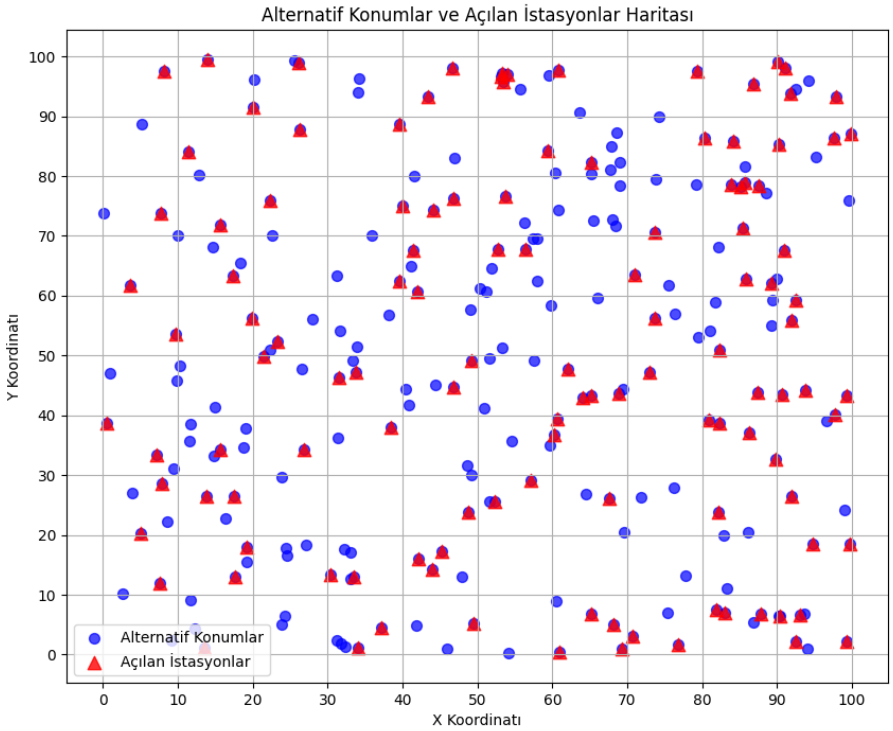
2030-Orta



Şekil 3.7 Alternatif Konumlar haritası (2030-Orta)

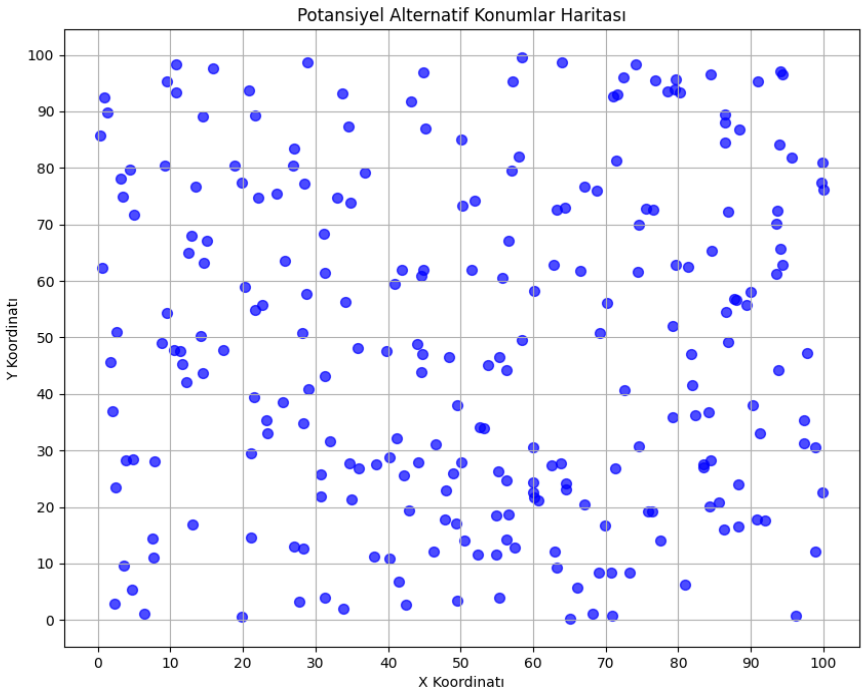


Şekil 3.8 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2030-Orta)

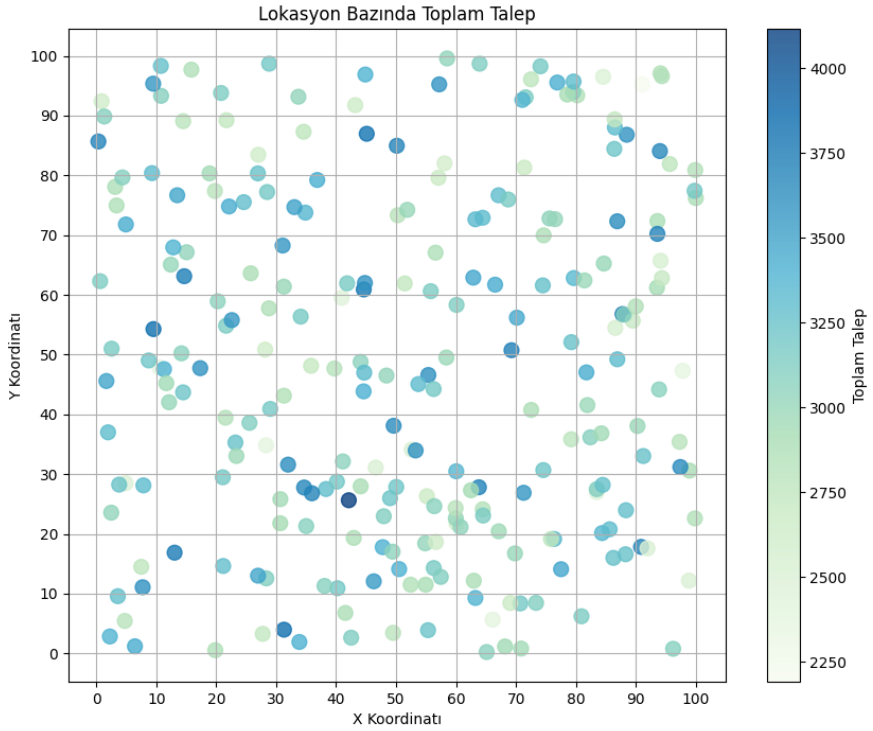


Şekil 3.9 Açılan İstasyonlar Haritası (2030-Orta)

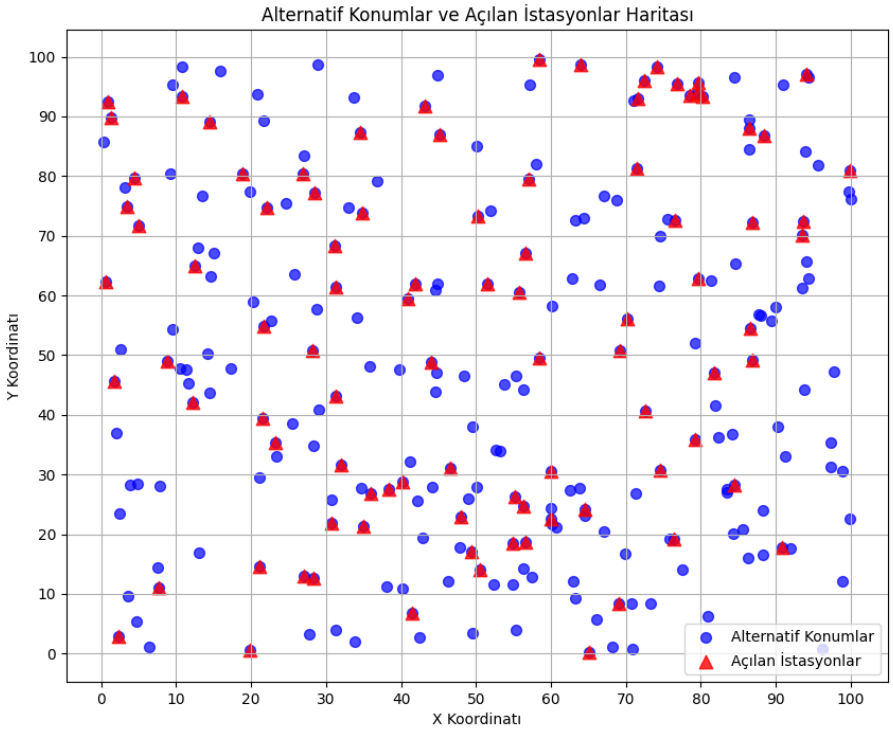
2030-Yüksek



Şekil 3.10 Alternatif Konumlar haritası (2030-Yüksek)

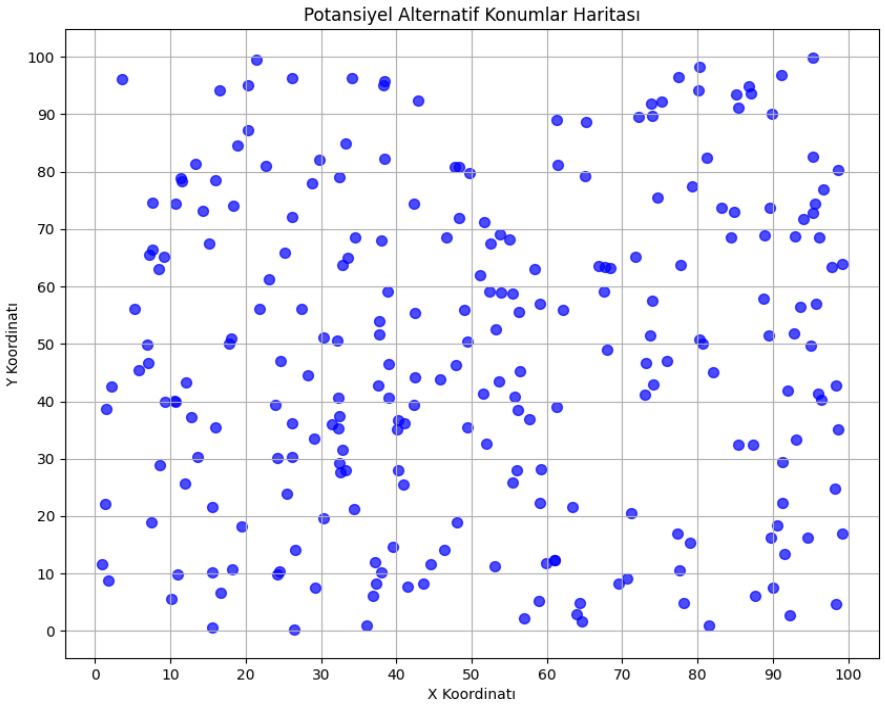


Şekil 3.11 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2030-Yüksek)

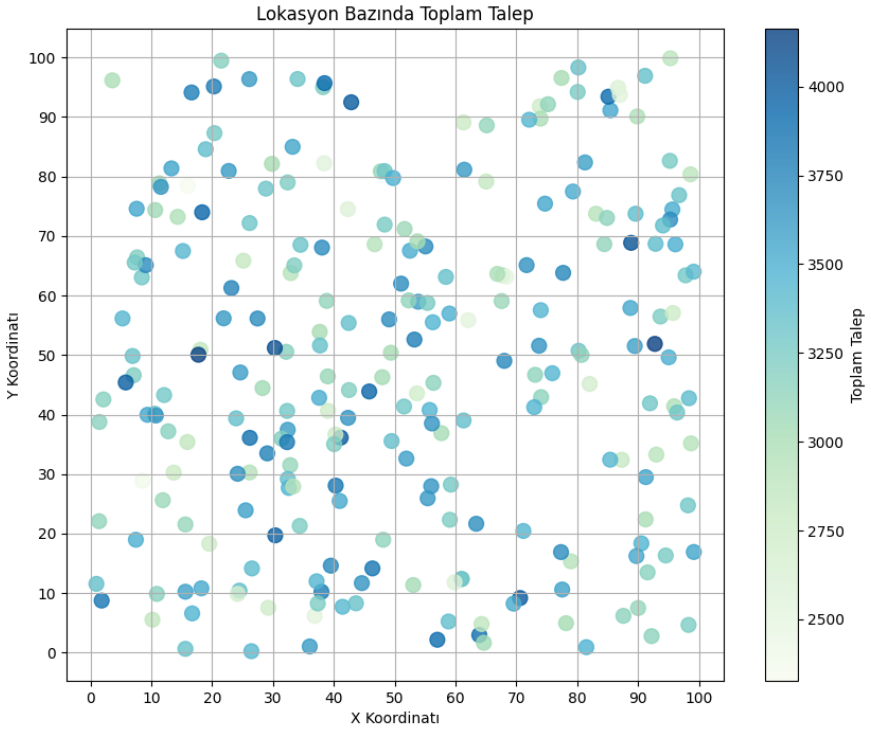


Şekil 3.12 Açılan İstasyonlar Haritası (2030-Yüksek)

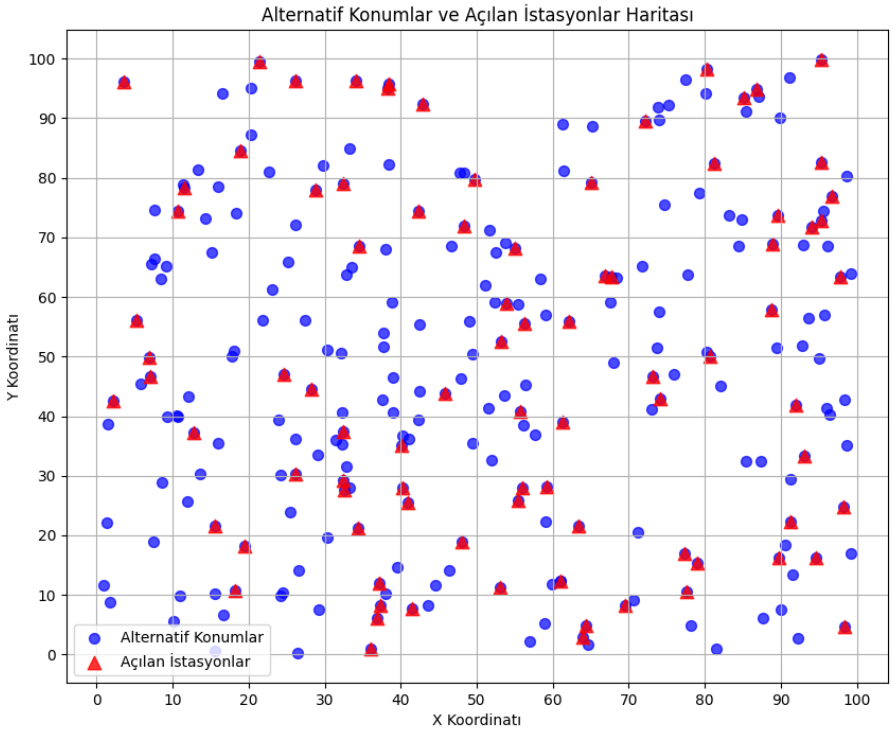
2035-Düşük



Şekil 3.13 Alternatif Konumlar haritası (2035-Düşük)

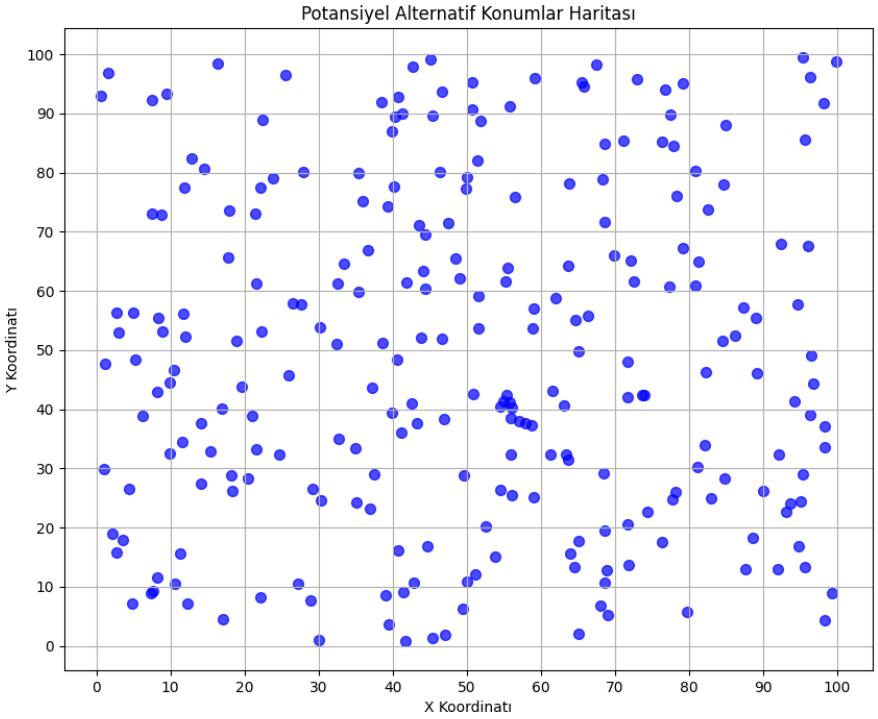


Şekil 3.14 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2035-Düşük)

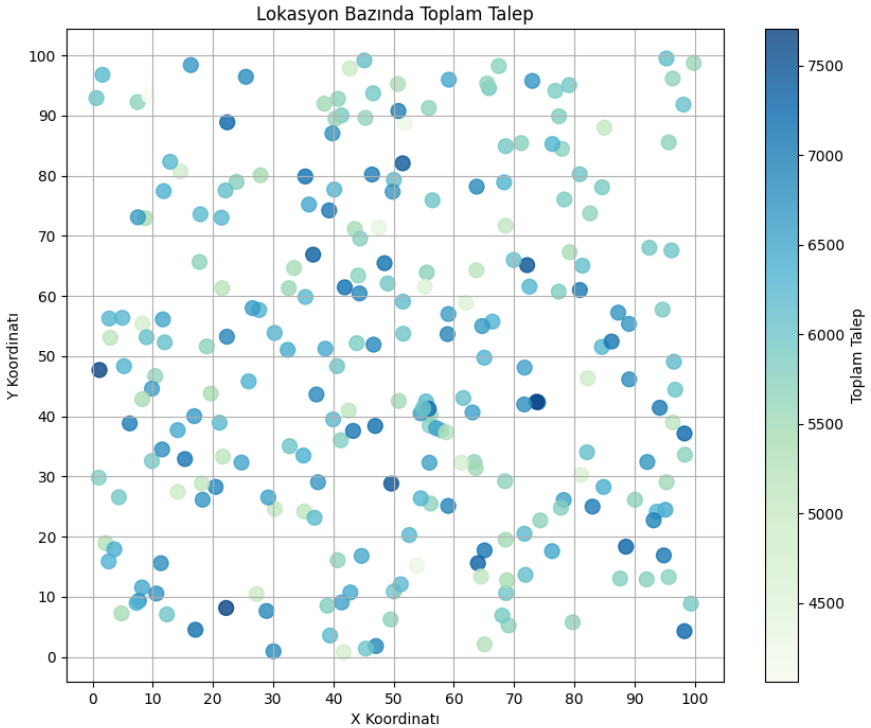


Şekil 3.15 Açılan İstasyonlar Haritası (2035-Düşük)

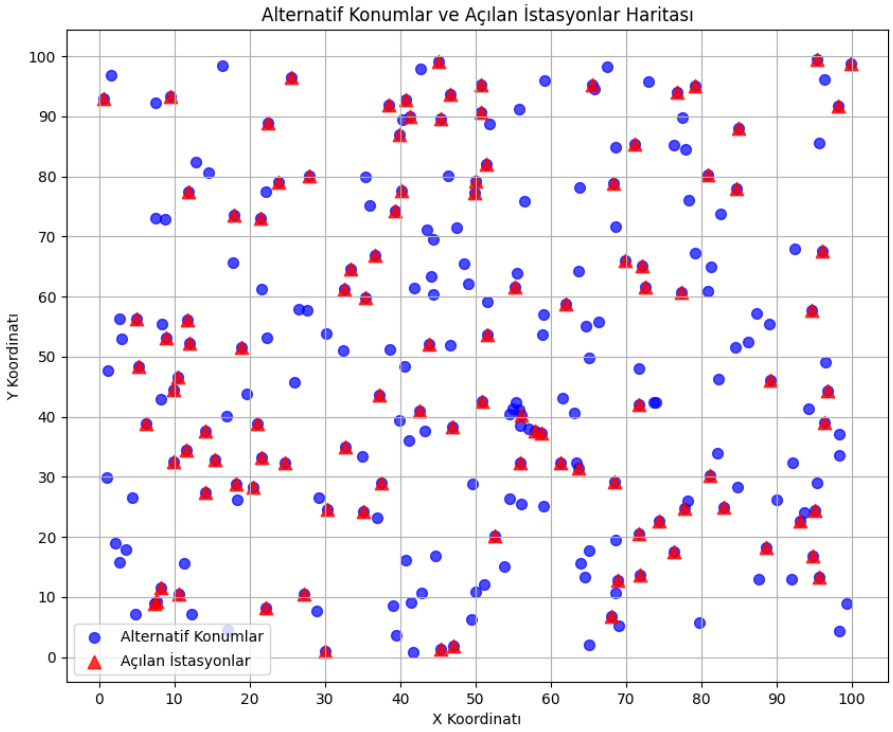
2035-Orta



Şekil 3.16 Alternatif Konumlar haritası (2035-Orta)

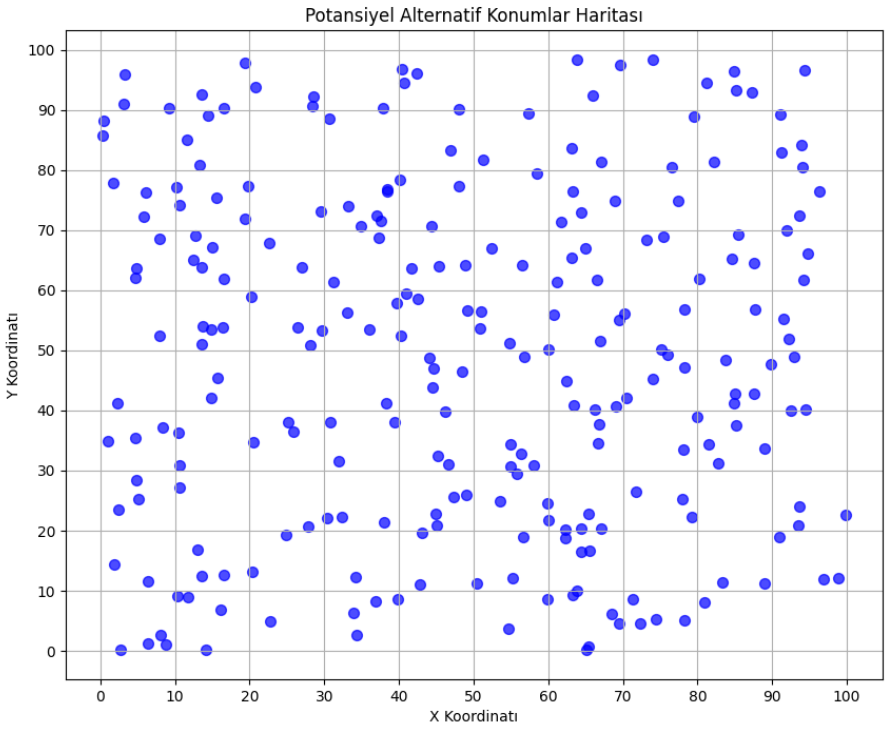


Şekil 3.17 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2035-Orta)

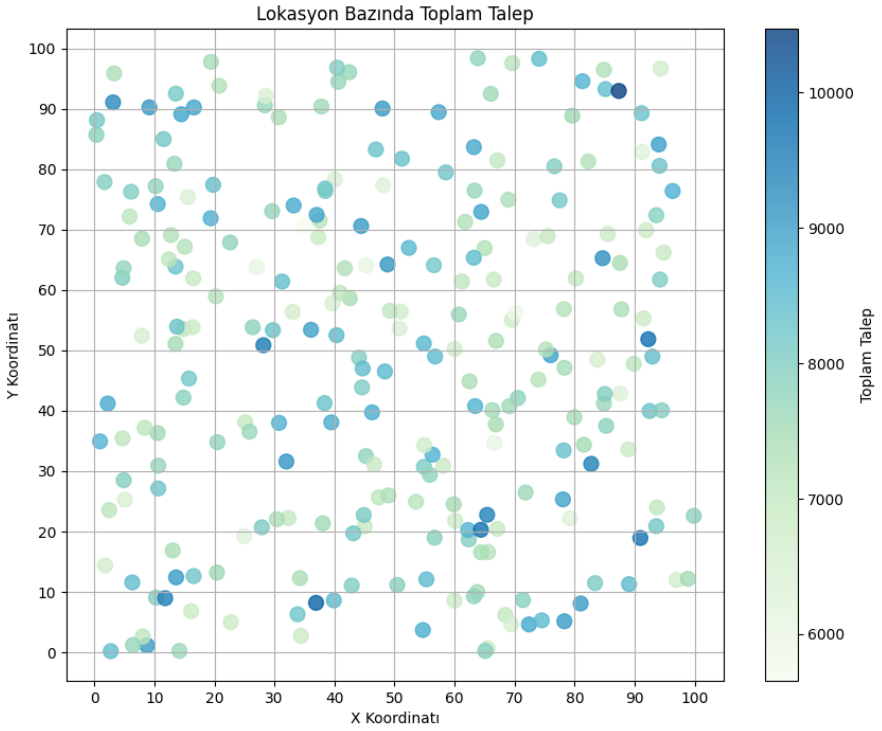


Şekil 3.18 Açılan İstasyonlar Haritası (2035-Orta)

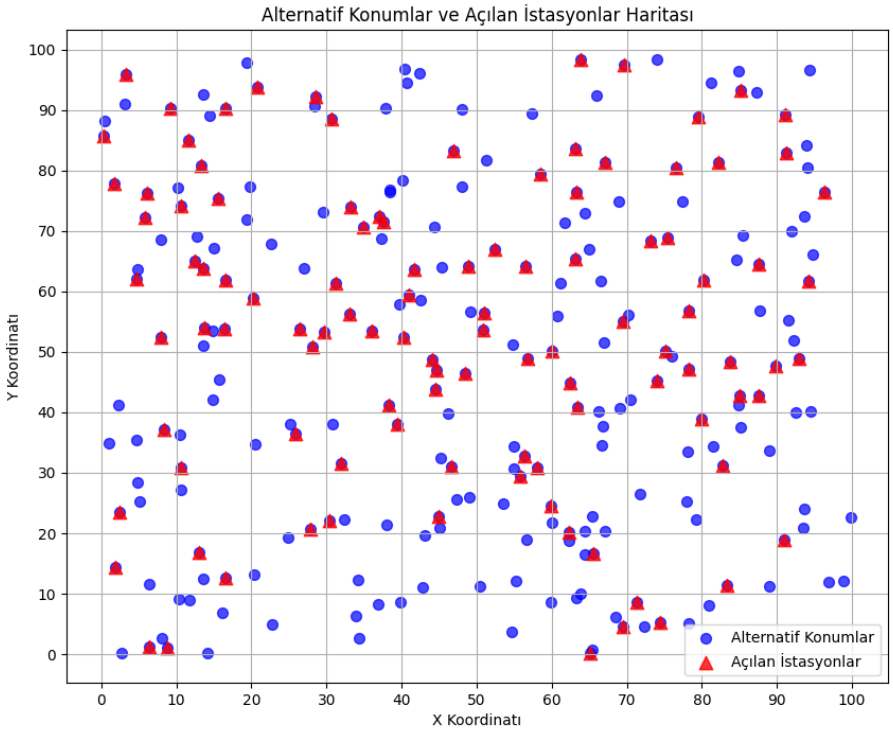
2035-Yüksek



Şekil 3.19 Alternatif Konumlar haritası (2035-Yüksek)



Şekil 3.20 Lokasyon Bazında Toplam Talep (2035-Yüksek)



Şekil 3.21 Açılan İstasyonlar Haritası (2035-Yüksek)

TEZDEN ÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

Konferans Bildirileri

1. Y. Ardiçoğlu, T. Demirel. A Case Study About Implementation Of Genetic Algorithm to Optimize Electric Vehicle Charging Stations For The European Side Of Istanbul, 12. Uluslararası Mardin Artuklu Bilimsel Araştırmalar Kongresi, p.259- 260, 17-19 Ağustos 2024, MARDİN.

Makaleler

1. Ardiçoğlu, Y., & Demirel, T. (2025). Solving a Created MINLP Model for Electric Vehicle Charging Station Optimization Using Genetic Algorithms: Urban and Large-Scale Synthetic Case Studies. *Applied Sciences*, *15*(16), 9029. https://doi.org/10.3390/app15169029