



Kapalı Otoparklara Yerleştirilen Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarında Bekleme Süresini En Aza İndirecek Bir Tasarım Yaklaşımı

A Design Approach to Minimize Waiting Time in Electric Vehicle Charging Stations Placed in Indoor Parking Lots

Recep ÇAKMAK^{*1}, Murat Han ÇİÇEK²

¹Samsun Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55420, Samsun, TÜRKİYE

²Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, 29000, Gümüşhane, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 10/10/2023

Kabul/Accepted: 27/12/2023

Çevrimiçi Basım/Published Online: 30/01/2024

Son Versiyon/Final Version: 30/01/2024

Öz

Elektrikli araçlar çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir ulaşım alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Ancak elektrikli araçların daha fazla yaygınlaşması için karşılaşılan temel zorluklardan biri, yeterli ve erişilebilir bir şarj altyapısının eksikliğidir. Bu nedenle, şarj istasyonlarının erişilebilirliği, bu alandaki önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Otoparklar, bu erişilebilirliği sağlamak için ideal ve etkili kullanım alanları sunmaktadır. Otoparklara yerleştirilen şarj istasyonları sayesinde, elektrikli araç sahipleri günlük yaşamlarının bir parçası olarak araçlarını rahatlıkla şarj edebileceklerdir. Bu durum, elektrikli araçları daha çekici hale getirirken, aynı zamanda çevre dostu bir ulaşım çözümü sunmaktadır. Bu çalışmada kapalı otoparklara yerleştirilen elektrikli araç şarj istasyonlarında bekleme süresini en aza indirecek bir tasarım yaklaşımı önerilmektedir. Bu amaçla, Gümüşhane il merkezinde bulunan bir kapalı otoparkın bir yıllık araç giriş-çıkış verileri kullanılarak, otoparka en az bekleme süresi sağlayacak ve en düşük maliyetli olacak şekilde kaç adet şarj ünitesinin yerleştirilmesi gerektiği, kuyruk teoremi ve Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Otopark verileri incelenerek, farklı araç giriş sayılarına göre AC ve DC şarj istasyonu durumları için senaryolar oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryolar için en iyi bekleme süresini sağlayacak şarj istasyonu sayıları ve tipleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar dikkate alınarak öneriler ve tavsiyeler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“Elektrikli araçlar, Kuyruk teoremi, Otopark, Şarj istasyonu”

Abstract

Electric vehicles (EVs) have emerged as an environmentally friendly and sustainable alternative in transportation. However, a fundamental challenge hindering the widespread adoption of EVs is the lack of adequate and accessible charging infrastructure. Therefore, the accessibility of charging stations (CSs) is considered a crucial parameter in addressing this issue. Parking lots, by their nature, offer ideal and effective spaces to ensure this accessibility. Through the installation of CSs in parking lots, owners of EVs can conveniently charge their vehicles as part of their daily routines. This not only enhances the attractiveness of EVs but also provides an eco-friendly transportation solution. In this study, a design approach is proposed to minimize waiting times at EV CSs installed in indoor parking lots. For this purpose, using the one-year vehicle entry-exit data of a closed parking lot located in the center of Gümüşhane province, the number of charging units to be placed in the parking lot for the least waiting time and the lowest cost has been calculated using queue theory and the Nelder-Mead simplex optimization algorithm. By examining parking data, scenarios were developed for different vehicle entry circumstances, considering both AC and DC charging station. The optimal numbers and types of CSs were determined for the created scenarios to provide the best waiting times. Based on these results, recommendations and insights are presented.

Key Words

“Electric vehicles, Charging station, Queuing theorem, Parking lot”

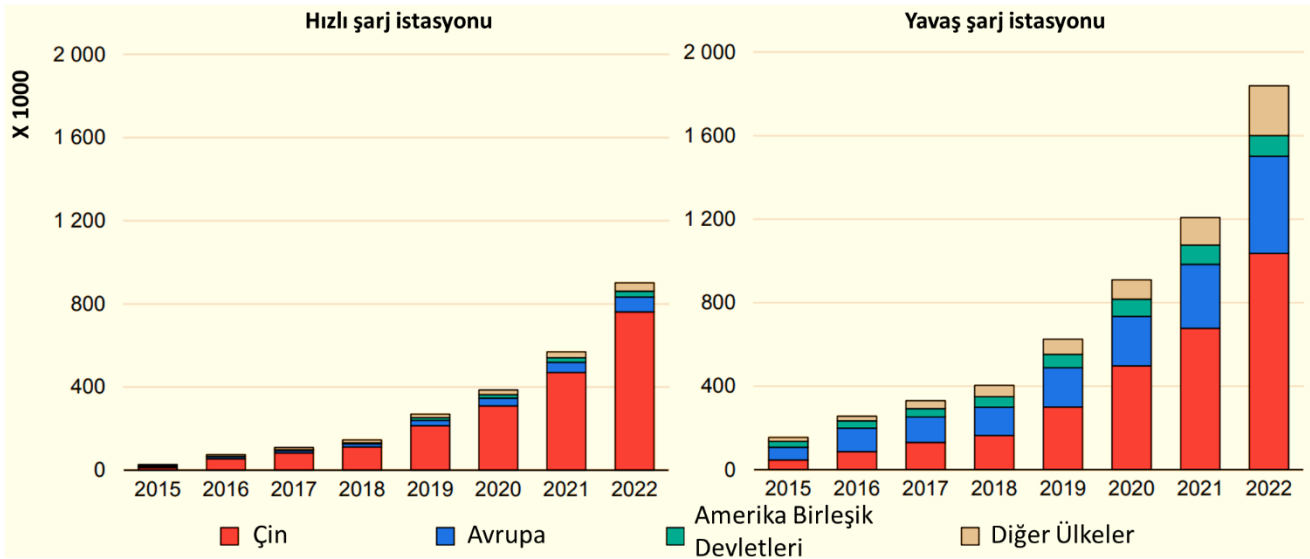
1. Giriş

Günümüzde fosil yakıt kullanan taşıtlar, küresel ulaşım sektöründe belirgin bir paya sahiptir ve çevresel olarak önemli zararlara yol açmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan karbondioksit ve diğer sera gazları, küresel iklim değişikliğine katkıda bulunmakta, iklim sistemlerini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, fosil yakıt temelli araçların çevresel etkilerinin anlaşılması ve alternatif çözümlerin geliştirilmesi, sürdürülebilir bir gelecek için büyük bir öneme sahiptir.

Ulaşım, ısınma ve elektrik üretimi gibi önemli endüstri sektörlerinde, yaygın ve genellikle tercih edilen enerji kaynağı, fosil yakıtlardır (IEA, 2020a; Ritchie ve Roser, 2020). Günümüzde, neredeyse tüm tekerlekli kara taşıtları içten yanmalı motorlar kullanmaktadır ve içten yanmalı motorlar, fosil yakıtların en sık kullanıldığı alanlardan biridir (Çakmak ve Turan, 2022). Bu bağlamda, fosil yakıtlara alternatif olarak elektrikli motorları tercih etmek, çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir çözüme katkı sağlamaktadır. Ayrıca, elektrikli motorlar, geleneksel içten yanmalı motorlara göre çok daha yüksek bir verime sahiptir. Bu nedenlerden dolayı çevre dostu elektrikli araçların kullanımı hızla artmaktadır ve bu artışı teşvik etmek amacıyla çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Ayrıca, yakıt fiyatlarının artışı ve mekanik parçaların bakım maliyetlerinin yükselmesi, elektrikli araçları bu noktada daha cazip hale getirmektedir. Bu nedenle, birçok ülke, elektrikli araçların gelişimini ve kullanımını artırmak için teşvik politikalarına başvurmaktadır.

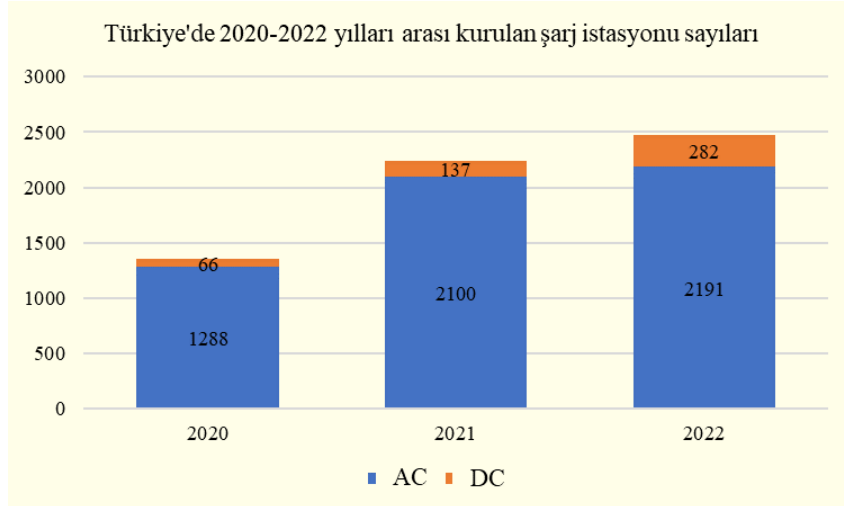
Elektrikli araçların (EA) ilk üretildiği günden bugüne kadar menzil ve performansları önemli ölçüde teknolojik gelişmelere dayalı olarak artış göstermiştir. Birçok ülke, elektrikli araç üretimini ve kullanımını yaygınlaştırmak için çaba harcamaktadır, ancak bu hedefe ulaşmanın temel şartlarından biri, bu araçlar için yeterli şarj altyapısının sağlanmasıdır (Xylia vd., 2017). Elektrikli araç sayısının artışıyla birlikte, iyi planlanmış ve stratejik olarak konumlandırılmış şarj istasyonlarının oluşturulması da büyük bir önem taşımaktadır (Karasu Asnaz ve Özdemir, 2021). Kurulacak olan şarj istasyonlarının altyapısında, kullanıcıların kolay erişim sağlayabilmesi bireysel kullanıma sahip konut tipi şarj istasyonlarının kullanılması önemlidir. Ancak, ülkemizde yaygın olan dikey mimari yapılardan dolayı, konut tipi şarj istasyonlarının kurulumu her zaman uygun bir seçenek olmamaktadır. Ayrıca, dağıtım şebekesi sistemlerinin zarar görmemesi için dağınık ve kontrolsüz şarj istasyonları yerine toplu alanlara kurulan, kontrollü şarj istasyonlarının tercih edilmesi ve kurulması gereken önemli bir husustur (Kılıç, 2022).

2022'nin sonu itibariyle dünya genelinde 2.7 milyon adet halka açık şarj noktası bulunmaktadır ve bunların 900 binden fazlası 2022 yılında kurulmuştur. Bu durum, 2021 stokuna göre yaklaşık %55'lik bir artışı temsil etmekte olup, 2022 sonu itibariyle Çin, dünya genelindeki halka açık yavaş şarj noktalarının yarısından fazlasına ev sahipliği yapmaktadır. Avrupa, 2022'de toplamda 460 bin yavaş şarj noktasıyla ikinci sıradadır ve bu, bir önceki yıla göre %50'lik bir artışa karşılık düşmektedir. Öte yandan hızlı şarj cihazlarının dünya genelindeki sayısı 2022'de 330 bin adet artmış olmakla birlikte bu artışın büyük çoğunluğu (%90'dan fazlası) yine Çin'de gerçekleşmiştir. Avrupa'da toplam hızlı şarj istasyonu stoku, 2022 yılının sonunda 2021'e kıyasla yaklaşık %55 artarak 70000'i aşmış durumdadır. En büyük hızlı şarj istasyonu stoklarına sahip ülkeler Almanya (12000'den fazla), Fransa (9700) ve Norveç (9000) şeklinde sıralanmaktadır (IEA,2023). Şekil 1'de dünya genelinde EA şarj noktası sayılarının yıllara göre değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 1. Dünya Genelinde EA Şarj Noktası Sayılarının Yıllara Göre Değişimi ((IEA,2023)'ten uyarlanmıştır)

Şekil 2’de Türkiye’de 2020-2022 yılları arasında kurulan AC ve DC şarj istasyonu noktalarının sayıları yer almaktadır. 2030 yılı orta büyüme senaryosuna göre Türkiye’de 2.5 milyon elektrikli araç ve 781325 adet elektrikli araç şarj istasyonu olması öngörülmektedir (Saygın vd., 2019). Ayrıca Avrupa Birliği her 10 EA için 1 şarj istasyonu önermektedir (ECA, 2021). Dolayısıyla EA’ların kullanabileceği şarj istasyonlarına olan ihtiyacın hızla artacağı öngörülebilmektedir. Bu öngörüye cevap vermek üzere şehir içi ve şehirlerarası otoparkların, aynı zamanda elektrikli araç (EA) şarj istasyonları olarak kullanılması, şarj istasyonu sorununun çözümü için en uygun önerilerden biri olarak kabul edilmektedir (Çakmak vd., 2018). Türkiye’de Resmi Gazete’de yayınlanan otopark yönetmeliğine göre, yeni inşa edilen bölgesel ve genel otoparklarda, ilgili standartlara uygun olarak en az %10 oranında otopark alanının elektrikli araçlar için (şarj ünitesi dahil) düzenlenmesi gerekmektedir. Aynı yönetmelik, yeni inşa edilen yapılar için zorunlu otopark adedi 20 veya daha fazla olması durumunda, yapı ruhsatı başvurularında bu otopark alanlarının 1 adetten az olmamak üzere en az %5’inin ilgili standartlara göre elektrikli araçlara uygun olarak düzenlenmesini şart koymuştur. (Resmi Gazete, 2022).



Şekil 2. Türkiye’de Yıllara Göre Şarj İstasyonu Sayıları ((EAFÖ,2023)’ten uyarlanmıştır)

Araç yoğunluğu yüksek olan otoparklarda, elektrikli araç (EA) kullanıcılarının aynı anda şarj talebinde bulunmaları sıkça karşılaşılan bir durumdur ve bunun sonucunda da bir bekleme söz konusu olmaktadır (Yağcıtekin, 2014). Bu noktada, elektrikli araç (EA) sahipleri şarj işlemine daha hızlı erişim sağlamak isterken, otopark hizmet yönetimi de müşteri memnuniyetini artırmak için bekleme süresini en aza indirmek amacıyla yeterli ve minimum sayıda şarj istasyonuna sahip olmak zorundadır. Çünkü şarj taleplerine hızlı bir yanıt vermek, EA kullanıcılarının memnuniyetini sağlamaktadır. Bu şarj taleplerinin etkili bir şekilde yönetilmesi için de yöneylem araştırma teknikleri kullanılmaktadır (Lee vd., 2022). Bu teknikler arasında kuyruk teoremi gibi yöntemler, bekleme sürelerini en aza indirmeye ve tahmin etme konusunda yardımcı olmaktadır. Ayrıca bu teoremi kullanarak maliyet optimizasyonu planlaması da yapılabilmektedir. Bununla birlikte literatürde elektrikli araçların şarjlarının yönetimi üzerine (Akıl vd., 2020; Meral and Bayrak, 2023) ve güç kalitesi problemlerinin tespiti (Bayrak vd., 2023) konularında da çalışmalar yer almaktadır.

Bu çalışmada kapalı otoparklara yerleştirilen elektrikli araç şarj istasyonlarında bekleme süresini en aza indirecek bir tasarım yaklaşımı Gümüşhane'deki kapalı otopark verileri kullanılarak önerilmiştir. Bu amaçla şarj istasyonları ve kuyruk teoremi modelleri ile ilgili literatür taraması yapılmış ve otopark verilerine dayalı olarak çeşitli senaryolara en uygun kuyruk teoremi modeli uygulanmıştır. Otopark verilerinden elde edilen saatlik araç giriş sayıları ve senaryolarda belirlenen araç tipleri ile şarj istasyonu türlerine göre hizmet süreleri hesaplanmıştır. Bu veriler temel alınarak, şarj sırasında beklemeyi en aza indirmek amacıyla optimum şarj istasyonu sayısını ve tipini belirlemek için kuyruk teoremi ile hesaplanan, kuyrukta bekleyen araç olmamasını sağlayan parametre ve şarj istasyonu maliyeti parametrelerine dayalı bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. Farklı tipteki şarj istasyonu durumlarına göre senaryolar oluşturulmuş ve bu senaryolar için Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması kullanılarak önerilen amaç fonksiyonunu minimum yapan şarj istasyonu sayısına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki kısmı şu şekilde bölümlendirilmiştir. 2. Bölümde literatür araştırması sunulmuş, 3. Bölümde meteryal ve yöntem açıklanmış, 4. Bölümde elde edilen bulgular verilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgulara dayalı olarak çalışmanın sonuçları ve değerlendirmeler 5. Bölümde aktarılmıştır.

2. Literatür Araştırması ve Çalışmanın Literatüre Katkısı

Otoparklarda elektrikli araç (EA) şarj istasyonu kapasitesi belirleme konusunda literatürde çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Zhenpo vd.(2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elektrikli araçların (EA) şarj ihtiyacını karşılamak için araç şarj istasyonlarının kapasitesini optimize etmek amacıyla bir kuyruk teorisi matematik modeli sunulmuştur. Bu çalışma, EA’ların ve şarj

istasyonunun özelliklerine dayalı olarak, istasyonda bulunması gereken off-broad şarj cihazı sayısını optimize etmek için kuyruk teoremi modelini kullanmıştır.

Shaoyun vd.'nin (2012) çalışmalarında ise şehir içindeki elektrikli araç şarj istasyonlarının planlaması için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışma, yol ağı yapısı, araç trafiği bilgileri, elektrik dağıtım sistemi yapısı ve kapasite sınırları gibi faktörleri dikkate alarak şarj istasyonlarının yerlerini belirlerken, kullanıcıların maddi kayıp maliyeti ile istasyon hatlarının yatırım maliyetlerini minimize etmeye odaklanmıştır. Ayrıca, kuyruk teoremi kullanılarak istasyon kapasiteleri ve maliyet optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Yağcıtekin (2014) doktora tezinde, Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa yerleşkesindeki otopark verilerini kullanarak optimum şarj istasyonu sayısını belirlemiştir. Daha sonra, elektrik şebekesi ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre çok amaçlı çok kriterli optimizasyon yöntemleri kullanarak bir akıllı şarj yönetimi sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, elektrikli araçların en uygun şarj noktalarına yönlendirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve şebeke üzerindeki aşırı yüklenmenin önlenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları, tezde önerilen kapsamlı yapı ile gerçek veriler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve çeşitli senaryolarla karşılaştırılmıştır.

Aydın vd. (2018) çalışmalarında, elektrikli araçların kullanımının artmasıyla ortaya çıkan şarj istasyonlarına daha kolay erişilebilirlik sorununa bir çözüm olarak, şehirlerdeki açık veya kapalı otoparkların etkili bir şekilde şarj istasyonu olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada, otoparkların nasıl kullanılacağı tasarım aşamaları ile belirlenmiş ve aynı zamanda bu uygulamanın otoparkların kapasitesini nasıl etkileyebileceği de ele alınmıştır.

Çakmak vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte şehirlerdeki açık veya kapalı otoparklara kurulacak şarj istasyonlarının elektrik şebekesine olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, elektrikli araç teknolojilerinin yanı sıra trafik ve ulaşım parametreleri de göz önünde bulundurularak, bu şarj istasyonlarının yerleştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Bu kapsamlı çalışma, elektrikli araçların yaygınlaşması ve şehirlerdeki ulaşımın elektrikli araçlarla sağlanması konusunda önemli bir araştırma olarak değerlendirilmektedir.

Şengör (2019) doktora tezinde, elektrikli araçların şarj işlemlerini düzenleyen yeni bir enerji yönetim stratejisi geliştirmiştir. Bu strateji, elektrikli araçların park bölgelerinin elektrik şebekesine olan olumsuz etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır. Model, gün öncesi planlama ve gerçek zamanlı planlama temelinde test edilmiştir. Ayrıca, elektrikli araç sahiplerinin konforunu dikkate alarak yeni bir optimal teklif verme stratejisi geliştirmiştir. Bu strateji, elektrikli araçların enerji piyasasında daha etkin bir rol oynamasına olanak sağlamayı hedeflemektedir.

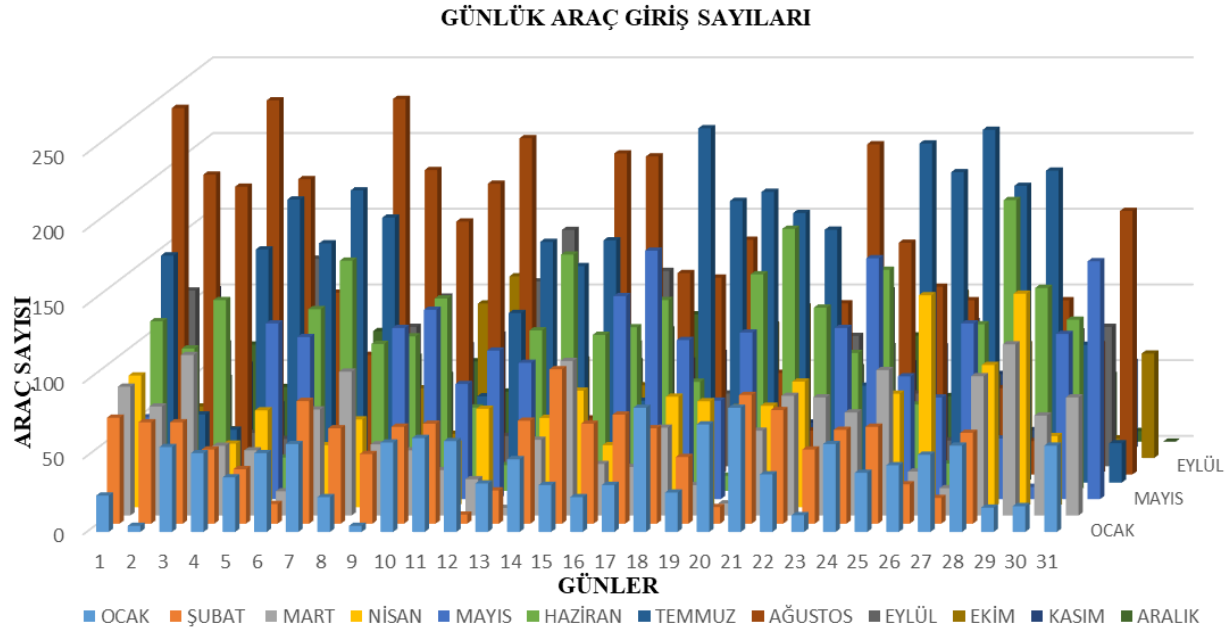
Karasu, Asnaz ve Özdemir (2021) çalışmalarında, elektrikli araçlara yönelik şarj istasyonu altyapısı planlamasına odaklanılmışlardır. Bu çalışma için Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü uygulama modelini kullanmışlardır. Araç giriş-çıkış verileri toplanmış ve sürücülerin kullanım alışkanlıklarını belirlemek için anketler yapılmıştır. Anket sonuçları değerlendirilerek kampüse yerleştirilecek optimum sayıda şarj istasyonu, kuyruk teorisi kullanılarak belirlenmiştir. Kampüs içindeki otoparklar, şarj istasyonlarının yerleştirileceği alanlar olarak seçilmiş ve bu şarj istasyonlarının otoparklara dağıtımı için çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Otopark doluluk oranları, otopark kapasiteleri ve trafo merkezine uzaklık gibi kriterler belirlenmiş ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (FAHP) yöntemi kullanılarak bu kriterler öncelik sırasına konulmuştur. Alternatif konumların performansı, diğer çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu makalede ise, Gümüşhane il merkezinde yer alan ve en yoğun kullanılan kapalı otoparkın gerçek kullanım verileri temel alınarak EA şarj istasyonu kurulumuna yönelik bir tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşım, kuyruk teoremi ve Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması kullanarak en az bekleme süresi sağlayacak olan şarj istasyonu sayısını tespit etmeyi amaçlamaktadır. AC ve DC şarj istasyonu kullanım senaryolarına göre iki farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha önceki çalışmalarda, şarj süresi genellikle anket verileriyle elde edilen parklanma süresi olarak kullanılmıştır. Ancak, bu çalışmada, oluşturulan senaryolardaki şarj üniteleri ve elektrikli araç kataloglarından alınan verilerle şarj süreleri belirlenmiştir. Optimum şarj istasyonu sayıları, kuyruk teoremiyle elde edilen parametreye dayalı olarak bu çalışmada özgün olarak tasarlanan amaç fonksiyonu ve bu amaç fonksiyonunu minimum yapan değerleri tespit eden Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Taranan literatürde genellikle örnek test sistemleri kullanılmış ve çoğu kez daha büyük otopark kapasitelerinden yola çıkılarak analizler yapılmıştır, bu da abartılı ve maliyetli kurulumlara neden olmuştur. Bu çalışmada ise 1 yıllık gerçek kullanım verileri ve elektrikli araç kataloglarından alınan şarj süreleri kullanılarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, Gümüşhane'de şarj istasyonu altyapısına dair ilk çalışma olması, bu çalışmayı özgün kılan unsurlardan biridir. Gerçek otopark kullanım verileriyle oluşturulan senaryolar doğrultusunda, Gümüşhane ilindeki otoparka kurulacak şarj istasyonu altyapısı için veriler sunulmuştur. Bu verilerin, diğer illerdeki otoparklar için bir referans oluşturması amaçlanmaktadır.

3. Materyal ve Yöntem

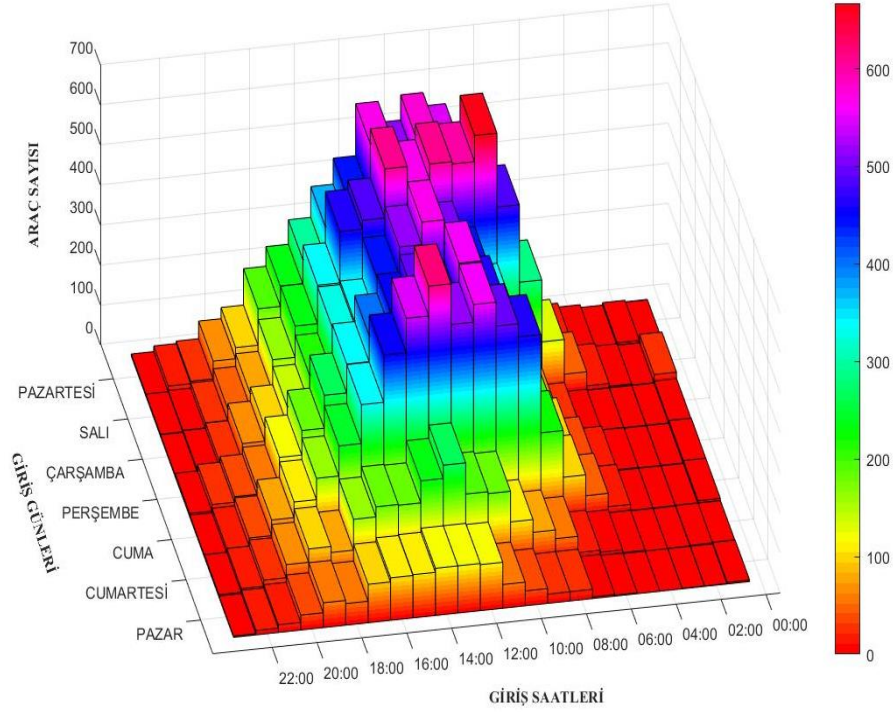
3.1. Verilerin Elde Edilmesi ve Analizi

Çalışma, Gümüşhane ili merkez ilçesinde bulunan 150 araç kapasiteli ve iki kat olarak hizmet veren 15 Temmuz Zafer Meydanı katlı otoparkı için gerçekleştirilmiştir. 01.01.2022 ile 31.12.2022 tarihleri arasında 1 yıl boyunca gerçekleşen araç giriş ve çıkışlarına ilişkin veriler analiz edilmiştir. Şekil 3'te otoparkın bir yıllık dönemdeki araç girişlerini aylık olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde yaz aylarında otoparkın araç girişlerinin daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Bir günde en fazla giriş yapan araç sayısı 248 araç girişi ile 8 Ağustos gününe aittir. Aylık bazda en düşük araç giriş sayısı Ocak ayında 1304 iken en yüksek araç giriş sayısı ise Ağustos ayında 4491 olarak kaydedilmiştir. Araç giriş trafiği, bahar ve yaz aylarında artmakta iken (Nisan:1619, Mayıs:2369, Haziran:3029, Temmuz:4086, Ağustos:4491) kış ve sonbahar aylarında (Eylül: 2482, Ekim:2013, Kasım:1551) azalmıştır. Aralık ayı ise 1445 araç girişiyle yılın en düşük ikinci ayıdır.



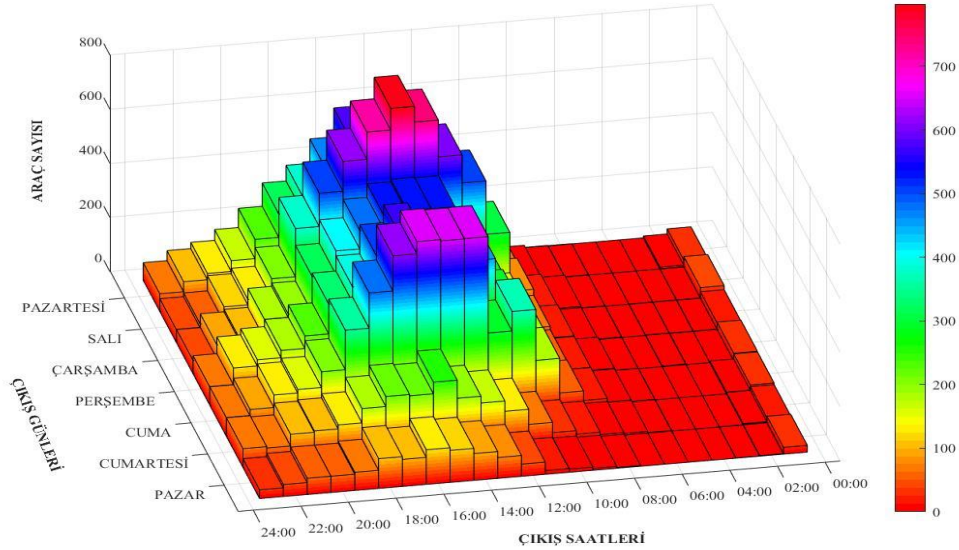
Şekil 3. Aylara Göre Günlük Giriş Yapan Araç Sayıları

Araç giriş sayılarının saat dilimlerine ve günlere göre grafiğini gösteren Şekil 4'e göre en yoğun araç girişi Salı günleri sabah saatlerinde gerçekleşmiştir. Otoparka giriş yapan araçların hafta içi genel olarak saat 10:00 ile 15:00 arasında ve hafta sonları ise de 12:00 ile 14:00 arasında daha yoğun olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra gece saatlerinde araç girişi minimum seviyelere gerilemektedir.



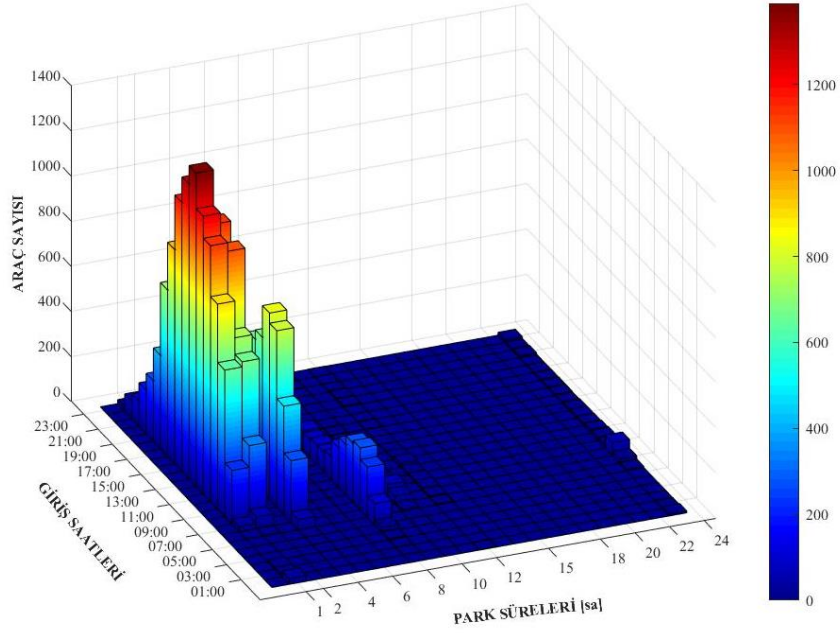
Şekil 4. Araç Girişlerinin Günlere Ve Saatlere Göre Dağılımları

Araç çıkış sayılarının saat dilimlerine ve günlere göre grafiğini gösteren Şekil 5'e göre en yoğun araç çıkışı Salı günleri öğleden sonra gerçekleşmiştir. Otoparktan çıkış yapan araçların hafta içi saat 13:00 ile 17:00 arasında ve hafta sonları ise 14:00 ile 18:00 arasında yoğun olduğu görülmüş ve gece saatlerinde de araç çıkışının en düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir.



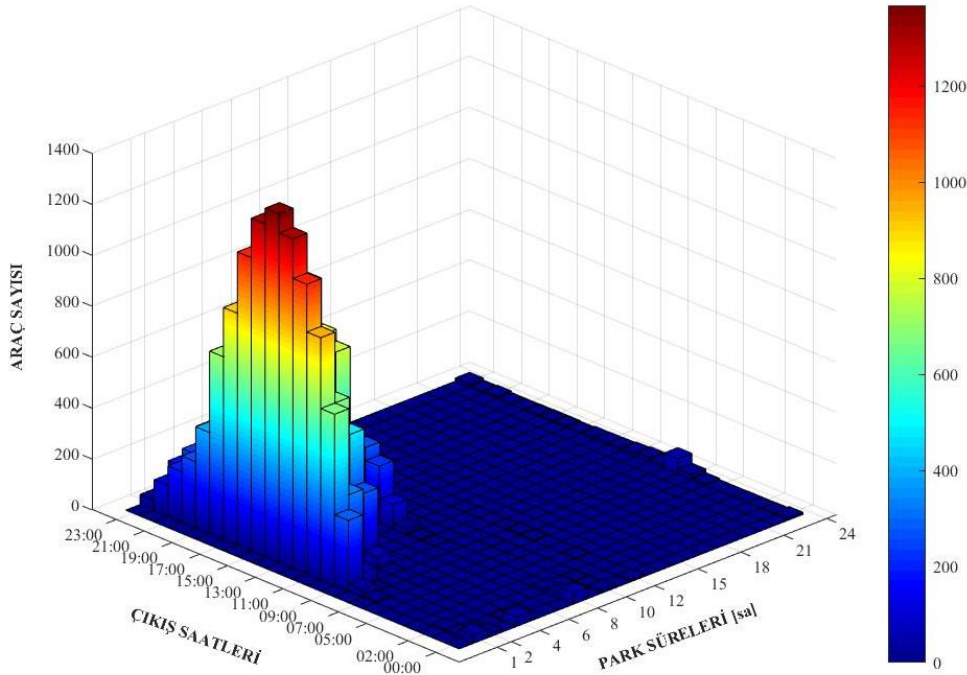
Şekil 5. Araç Çıkışlarının Günlere ve Saatlere Göre Dağılımları

Araçların otoparkta kalma sürelerinin grafiğini içeren Şekil 6'da otoparkta bir yıl boyunca giriş yapan araç sayıları baz alınmıştır. Giriş Saatleri sütunu, araçların otoparka giriş yaptığı saati göstermekte iken Park Süresi (Saat) sütunu da her aracın otoparkta kaldığı toplam süreyi göstermektedir. Araç Sayısı sütunu ise giriş saatlerine göre her bir parklanma süresi aralığındaki araç sayısını göstermektedir. Grafik incelendiğinde, otopark kullanıcıların kısa süreli parkları daha fazla tercih ettikleri görülmektedir. En fazla parklanma süresi olan 1-2 saatlik park eden araçların en çok 14:00-16:00 saatleri arasında giriş yaptığı görülmektedir. Ayrıca, parklanma sürelerinin 4 saatten az olan sürelerde daha yoğunlaştığı görülmektedir.



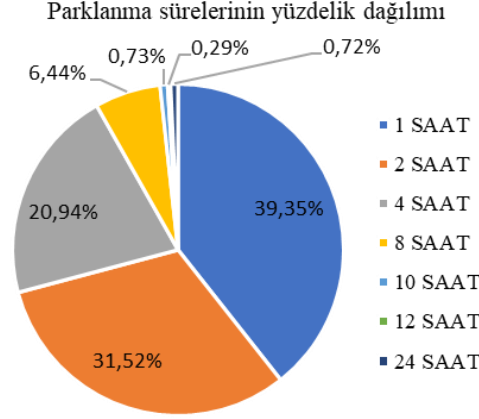
Şekil 6. Araçların Otoparka Giriş Zamanlarına Göre Kalma Sürelerinin Dağılımı

Şekil 7’de otoparkın bir yıllık dönemdeki çıkış saatleri ve parklanma sürelerine göre araç sayıları gösterilmektedir. Her çıkış saati için, o saatte otoparktan ayrılan araç sayısı ve bu araçların otoparkta kaldıkları süreler belirtilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, otoparktan ayrılışların en yoğun saatleri 13:00-15:00 ve 17:00-19:00 saatleri olduğu görülmektedir. Bu saatlerde, otoparktan ayrılan araçların en çok tercih edilen kalış süreleri 1-2 saat arasında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. Araçların Otoparktan Ayrılış Zamanlarına Göre Kalma Sürelerinin Dağılımı

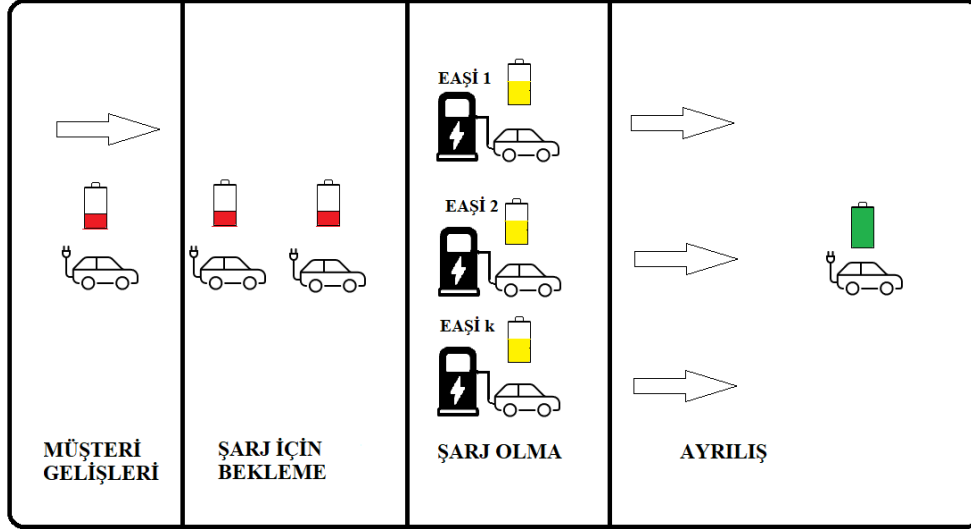
Parklanma sürelerinin yüzdeler olarak pasta dilimleri içerisinde gösterildiği Şekil 8’de en yüksek dilim 1 saatlik park süresine karşılık gelmektedir ve araçların yaklaşık %39’u bu sürede park etmiştir. 1 ve 2 saat arasındaki sürelerde park eden araç sayısı toplam araç sayısının %71’ini kapsamaktadır. 2 ve 4 saatlik park süresi aralığındaki araç sayısı ise yaklaşık olarak toplam araçların %21’ine denk gelmektedir. Grafikte uzun süreli parkların çok daha düşük bir orana sahip olduğu da ayrıca görülebilmektedir. 10 saatten fazla park yapan araçların sayısı ise oldukça azdır ve toplam araç sayısının yaklaşık %8’ini oluşturmaktadır. Bu durum, yukarıdaki şekillerden de görüleceği üzere, otoparkın daha çok kısa süreli park için tercih edildiğini, uzun süreli park için ise daha az tercih edildiğini göstermektedir. Bölüm 3.2’de yapılan hesaplamalarda saatlik araç giriş sayısı 42 olarak seçilmiştir. Bu değer, otoparkın en yoğun kullanım zamanında kaydedilen azami araç giriş sayısıdır.



Şekil 8. Parklanma Sürelerinin Yüzdelik Dağılım Grafiği

3.2. Çok Kanallı Kuyruk Modeli (M/M/s)

Bu kuyruk sistemi müşterilerin geliş ve servis sürelerinin üstel dağılıma uyduğu ve sistemde sadece bir adet müşteri hattının bulunduğu bir yapıya sahiptir. Müşteriler Poisson dağılımında olduğu gibi rastgele aralıklarla gelmektedir ve sırayla hizmet almaktadırlar. Bu sistemde hizmet veren birden fazla servis kanalı vardır. Bu paralel kanalların birinden servis almak için bekleyen tek bir müşteri hattı bulunmaktadır. Bu modele örnek olarak çağrı merkezleri ve banka gişeleri verilebilir. Şekil 9'da Şarj olmak için kuyrukta bekleyen araçların oluşturduğu M/M/s model kuyruk yapısı gösterilmektedir.



Şekil 9. Elektrikli Araç Şarj İstasyonunun Kuyruk Modeli

M/M/s modelinde geliş süreleri λ (araç/saat) ve servis süreleri μ (araç/saat) ve s servis sayısı olmak üzere ρ sistem yoğunluğunu Eşitlik 1'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} \quad (1)$$

Sistemin boş olma olasılığı ya da müşteri bulunmama olasılığı Eşitlik 2'ye göre hesaplanmaktadır.

$$P_0 = \left[\left(\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} \right) + \frac{(\lambda/\mu)^s}{s!} \left(\frac{1}{1-\rho} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

Hizmet bekleyen sıradaki ortalama müşteri veya birim sayısı Eşitlik 3'e göre hesaplanmaktadır.

$$L_q = \frac{P_0(\lambda/\mu)^s \rho}{s!(1-\rho)^2} \quad (3)$$

Bir müşterinin veya birimin kuyrukta hizmet için beklediği ortalama süre Eşitlik 4'e göre hesaplanmaktadır.

$$W_q = \frac{L_q}{\mu} \quad (4)$$

Bir birimin bekleme hattında veya serviste geçirdiği ortalama toplam süre Eşitlik 5'e göre hesaplanmaktadır.

$$W = W_q + 1/\mu \quad (5)$$

Sistemdeki ortalama müşteri veya birim sayısı Eşitlik 6'da gösterilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$L = \lambda W \quad (6)$$

Sistemde herhangi bir anda n sayıda müşteri veya birim bulunma olasılığı Eşitlik 7'ye göre hesaplanmaktadır.

$$P_n = \begin{cases} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} P_0, & n \leq s \\ \frac{(\lambda/\mu)^n}{s!s^{n-s}} P_0, & n > s \end{cases} \quad (7)$$

Bu kuyruk modelinde $\frac{s\mu}{\lambda} > 1$ kuyruk uzunluğunun sürekli artmaması için bu eşitlik sürekli sağlanmalıdır (Yağcıtekin, 2014).

Bu çalışmadaki şarj istasyonunun servisi; tek sıra, tek faz, çoklu sunucu kuyruk teoremi modeliyle kurulmuştur. Tek sıra seçilmesinin nedeni otoparkta tek bir kapıdan giriş ve çıkış yapılması ve tek faz seçilmesinin nedeni ise araçların sadece şarj olacak olmasıdır. Çoklu sunucu seçilmesi de otoparkta birden fazla şarj istasyonu olduğundan dolayı gelen müşterinin istediğini kullanabilecek olmasıdır. Uygulamada böyle bir model kurulabilmesi için elektrikli araçlar ve şarj istasyonlarıyla ilgili bazı kabuller yapılmalıdır;

- Gelen her bir elektrikli araç kuyruğa girmeli ve kuyruğu terketmemelidir.
- Her bir şarj ünitesine birbirinden bağımsız ve sınırsız elektrikli araç gelmektedir.
- Elektrikli araçlar şarj istasyonuna poisson dağılımına uygun geliş yaptığı ve negatif exponansiyel dağılım şeklinde bir çıkış sergiledikleri varsayılmıştır.
- Tüm şarj istasyonlarının verimleri aynı kabul edilmiştir.
- Otoparka gelen elektrikli araçların teknik verilerde paylaşılan şarj verilerine göre şarj olup otoparktan ayrılacakları kabul edilmiştir.
- Servis disiplini ise (FIFO) ilk giren ilk çıkar şeklinde kabul edilmiştir.

Bütün senaryolarda bir saatte giren araç sayısının %5'i elektrikli araç olması esasına göre kabul edilmiştir. Seçimin bu şekilde yapılmasını nedeni birçok makale ve raporda 2020 yılı gerçekçi rakamlarının tüm iyimser senaryolarda ortalama %5 olarak alınmasıdır (Yağcıtekin, 2014). Farklı bir raporda ise yüksek büyüme senaryosu için 2030 yılında elektrikli araç payının %10 olacağı, orta büyüme senaryolarında ise bu payın %5 civarı olacağı öngörülmektedir (Saygın vd., 2019). Bölüm 3.1'de bir yıl boyunca otoparka giriş yapan araç sayısının bir saatte en fazla 42 olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere bağlı olarak senaryoların tümünde bir saatte giriş yapan araç sayısı olan 42'nin %5'i olma durumunda, bir saatte otoparka giriş yapan elektrikli araç sayısı 2 olarak kabul edilecektir.

Hesaplama işlemleri için ilk olarak kuyruk teoremi ile şarj istasyonu sayısına göre hizmet bekleyen sıradaki ortalama müşteri sayısı (L_q) hesaplanmıştır. Eşitlik 8'de hizmet bekleyen sıradaki ortalama müşteri ve şarj istasyonu maliyeti (C) parametrelerini kullanan amaç fonksiyonu (f) oluşturulmuştur. Eşitlik 8'deki amaç fonksiyonunda;

C : Şarj istasyonu maliyeti

$EAŞİS$: Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Sayısı

L_q : Hizmet bekleyen sıradaki ortalama müşteri ifade etmektedir.

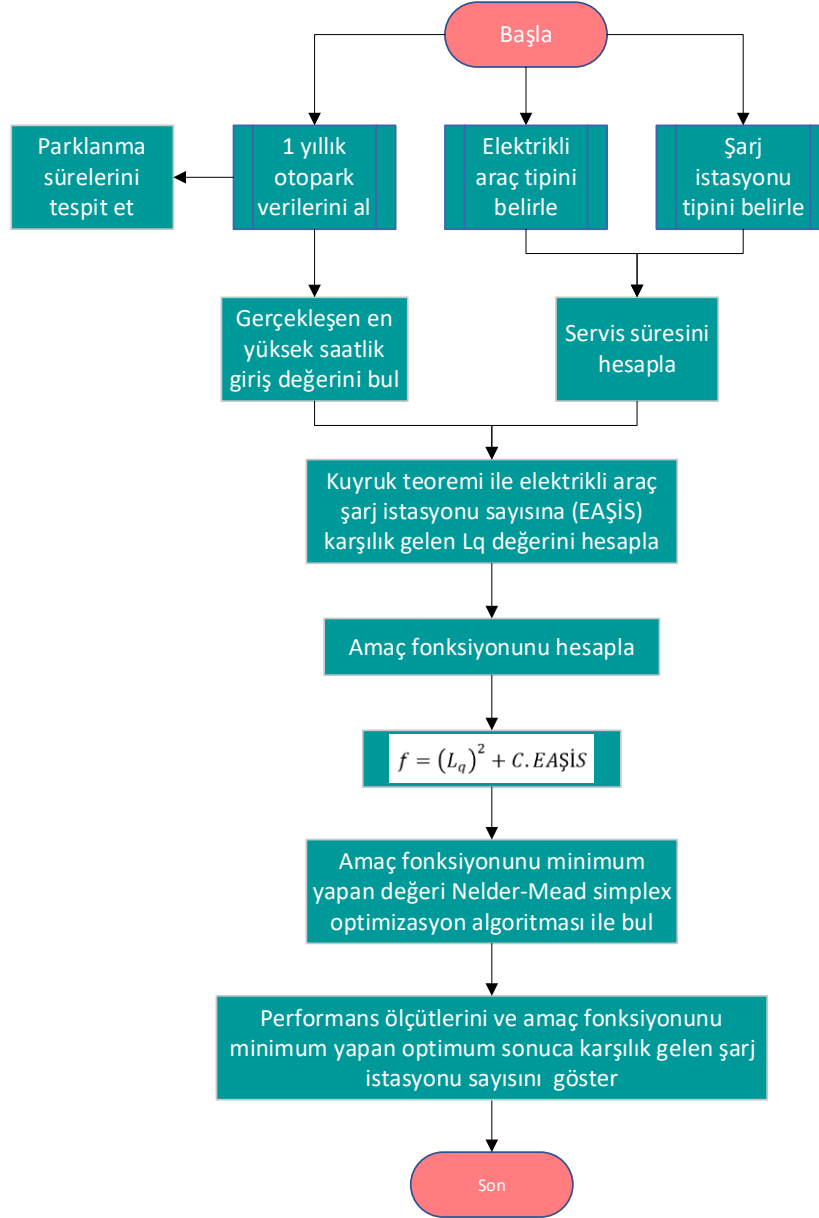
$$f = (L_q)^2 + C \cdot EAŞİS \quad (8)$$

Bu çalışmada Eşitlik 8'deki amaç fonksiyonunu minimum yapan değer Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması (Lagarias vd., 1998) kullanılarak hesaplanmaktadır. Birden fazla değişkenli fonksiyonların yerel minimumlarını tespit etmek amacıyla geliştirilen oldukça basit bir yöntem Nelder ve Mead tarafından ortaya konmuştur. Bu yöntem, iki değişken için bir üçgen şeklini alır ve bu üçgenin köşelerindeki fonksiyon değerlerini karşılaştırarak bir arama gerçekleştirir. En kötü köşede fonksiyon değeri en yüksek olan reddedilir ve başka bir köşe ile değiştirilir. Yeni bir üçgen oluşturulur ve arama süreci devam eder. Köşelerdeki fonksiyon değerleri ve üçgenin alanı giderek azalır. Bu süreç, bir sonlandırma kriteri karşılanana veya maksimum iterasyon sayısına ulaşılan kadar devam eder. Şekil 10'da Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması verilmiştir (Karaboğa,2023)

<i>W</i> : En kötü köşe	
<i>G</i> : İyi köşe	
<i>B</i> : En iyi köşe	
$M = \frac{B + G}{2}$	
$R = 2M - W$	
$E = 2R - M$	
$S = \frac{B + W}{2}$	
Eğer $f(R) < f(G)$ ise	
Süreç 1(Yansıtma ve Genişletme işlemleri)'i uygula	
değilse	
Süreç 2'yi(Daraltma veya Küçültme işlemlerini) uygula	
Süreç 1	Süreç 2
Eğer $f(B) < f(R)$ ise	Eğer $f(R) < f(W)$ ise
<i>W</i> ile <i>R</i> çözümlerini yer değiştir	<i>W</i> ile <i>R</i> çözümlerini yer değiştir
değilse	$C = \frac{W + M}{2}$ ve $f(C)$ hesapla
<i>E</i> ve $f(E)$ 'yi hesapla	Eğer $f(C) < f(W)$ ise
Eğer $f(E) < f(B)$ ise	<i>W</i> ile <i>C</i> çözümlerini yer değiştir
<i>W</i> ile <i>E</i> çözümlerini yer değiştir	Değilse $S = \frac{W+B}{2}$ ve $f(S)$ hesapla:
değilse	<i>W</i> ile <i>S</i> çözümlerini yer değiştir
<i>W</i> ile <i>R</i> çözümlerini yer değiştir	<i>G</i> ile <i>M</i> çözümlerini yer değiştir

Şekil 10. Nelder-Mead Simplex Optimizasyon Algoritması

Amaç fonksiyonunda iki parametre ele alınmaktadır. Bunlardan birincisi Lq değeri, diğeri ise elektrikli araç şarj istasyonu maliyetidir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın Elektrikli Araçlar İçin Şarj İstasyonu Kurulumu Ön Fizibilite Raporu'na göre (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021) AC şarj cihazı maliyeti 6000 \$ iken DC şarj cihazı maliyeti 18000 \$'dır. Bu nedenle amaç fonksiyonundaki şarj istasyonu maliyetleri AC şarj istasyonları için Senaryo 1'de $C = 1$, Senaryo 2'de ise DC şarj istasyonu kullanıldığından maliyet katsayısı $C = 3$ olarak kullanılmıştır. Amaç fonksiyonunu minimum yapan değer, o senaryoda en az bekleme gerçekleştirecek olan elektrikli araç şarj istasyonunu vermektedir. Oluşturulan senaryolara ilişkin hesaplamalarda izlenen adımlara ilişkin akış diyagramı Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Uygulamada İzlenen Adımları Gösteren Akış Diyagramı

Senaryolarda kurulan modellerin sağlamasını ve elde edilen sonuçların ne kadar geçerli olduğunu tespit etmek için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Duyarlılık analizi, model parametrelerindeki tek bir değişkenin değişiminin sistem performans değerlerini nasıl değiştirdiğini gösteren bir analizdir. Örneğin kurulması planlanan şarj istasyonu sayısındaki artışın kuyrukta bekleme sürelerinin ya da kuyrukta bekleyen araç sayılarının nasıl etkilendiği incelenmektedir (Köfteci ve Gerçek, 2010).

4. Bulgular ve Sonuçları

4.1. Senaryo 1

Bu senaryo da saatte otoparka giriş yapan elektrikli araç sayısı 2, tüm araçlar TOGG T10X standart menzillik modeli ve kurulacak olan şarj istasyonları AC tip seçilmiştir. T10X standart menzillik modelin teknik özelliklerine göre AC 11 kW şarj istasyonu ile %20' den %80 şarja 195 dakikada ulaşmaktadır. Bu nedenle şarj istasyonu servis süresi 3 saat 15 dakika olarak belirlenmiştir. Kuyruk teoremi kullanılarak yapılacak hesaplamaların tümü kuyruk teoreminin M/M/s modeline göre yapılmıştır. Farklı senaryo ve şarj sürelerine göre farklı sayılarda ve tipte optimum şarj istasyonu sayısı elde edilebilmektedir. Şekil 11'deki akış diyagramına göre yapılan hesaplamalarda kuyrukta bekleyen araç olmaması durumunu sağlayacak optimum şarj istasyonu sayısının 9 adet olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Senaryo 1 için saatlik müşteri gelişi 2, sunucu sayısı 9 ve servis oranı ise 0.31 olarak hesaplanmış ve bu veriler WinQSB programına girilmiştir. Tablo 1'de WinQSB programına Senaryo 1 için girişi yapılan değerler ve parametreler gösterilmiştir. Bu değerler ve parametrelere göre Tablo 2'de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 1. Senaryo 1 İçin WinQSB Programı Veri Girişi

Veri Tanımı	Giriş
Sunucu Sayısı	9
Servis Oranı (Her Sunucu İçin Saatte)	0.31 araç/saat
Müşteri Gelişleri (Saatlik)	2 araç/saat
Kuyruk Kapasitesi	M
Müşteri Popülasyonu	M

Tablo 2. Senaryo 1'in Analiz Çıktıları

Performans Ölçütleri	Sonuç
Sistem : M/M/9	
Saatlik Müşteri Gelişleri	2 araç/saat
Saatlik Servis Oranı	0.31 araç/saat
Sistem Kullanımı	% 71.68
Sistemdeki Ortalama Müşteri Sayısı	7.13 araç
Kuyruktaki Ortalama Müşteri Sayısı	0.6878 araç
Meşgul Sistemdeki Kuyruktaki Ortalama Müşteri Sayısı	2.53 araç
Sistemde Harcanan Ortalama Süre	3.56 saat
Kuyrukta Harcanan Ortalama Süre	0.34 saat
Meşgul Sistemdeki Kuyrukta Harcanan Ortalama Müşteri Süresi	1.26 saat
Tüm Şarj istasyonlarının Boşta Kalma Olasılığı	% 0.14
Gelen Müşterinin Bekleme ya da Sistemin Meşgul Olma Olasılığı	% 27.16

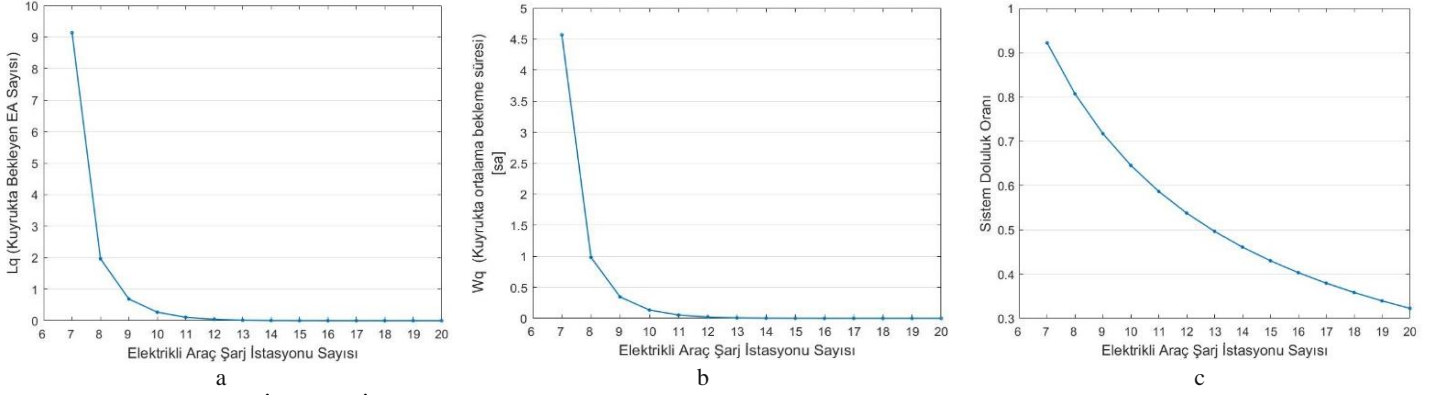
Tablo 2'deki sonuçlardan görüleceği üzere şarj istasyonu sayısının 9 olması durumunda sistem kullanım oranı %71 olmuştur. Sistemde bulunan ortalama müşteri sayısı 7.13 kuyruktaki ortalama müşteri sayısı ise 0.6878 adettir. Kuyrukta harcanan ortalama süre de 0.3439 saattir. Tüm şarj istasyonlarının boşta kalma olasılığı %0.14 ve gelen müşterinin bekleme ya da sistemin meşgul olma olasılığı ise %27.16'dır. Hizmet veren şarj istasyonu sayısı 1'den 15'e doğru artırılarak saatlik gelen müşteri sayısına göre duyarlılık analizi yapılmıştır ve analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Senaryo 1 İçin Hizmet Veren Şarj İstasyonu Sayısına Göre Duyarlılık Analizi

EA Şarj İstasyonu Sayısı	Müşteri Gelişleri (Saatlik)	Sistem Doluluk Oranı	L (araç)	Lq (araç)	W (saat)	Wq (saat)	P0	Pw
1	2	Kararsız						
2	2	Kararsız						
3	2	Kararsız						
4	2	Kararsız						
5	2	Kararsız						
6	2	Kararsız						
7	2	0.9217	15.5908	9.1392	7.7954	4.5696	0.0007	0.7768
8	2	0.8065	8.4169	1.9653	4.2085	0.9827	0.0012	0.4717
9	2	0.7168	7.1394	0.6878	3.5697	0.3439	0.0014	0.2717
10	2	0.6452	6.7207	0.2691	3.3603	0.1345	0.0015	0.148
11	2	0.5865	6.5595	0.1079	3.2798	0.054	0.0016	0.0761
12	2	0.5376	6.4945	0.0429	3.2472	0.0214	0.0016	0.0369
13	2	0.4963	6.4682	0.0166	3.2341	0.0083	0.0016	0.0168
14	2	0.4608	6.4578	0.0062	3.2289	0.0031	0.0016	0.0073
15	2	0.4301	6.4538	0.0022	3.2269	0.0011	0.0016	0.003

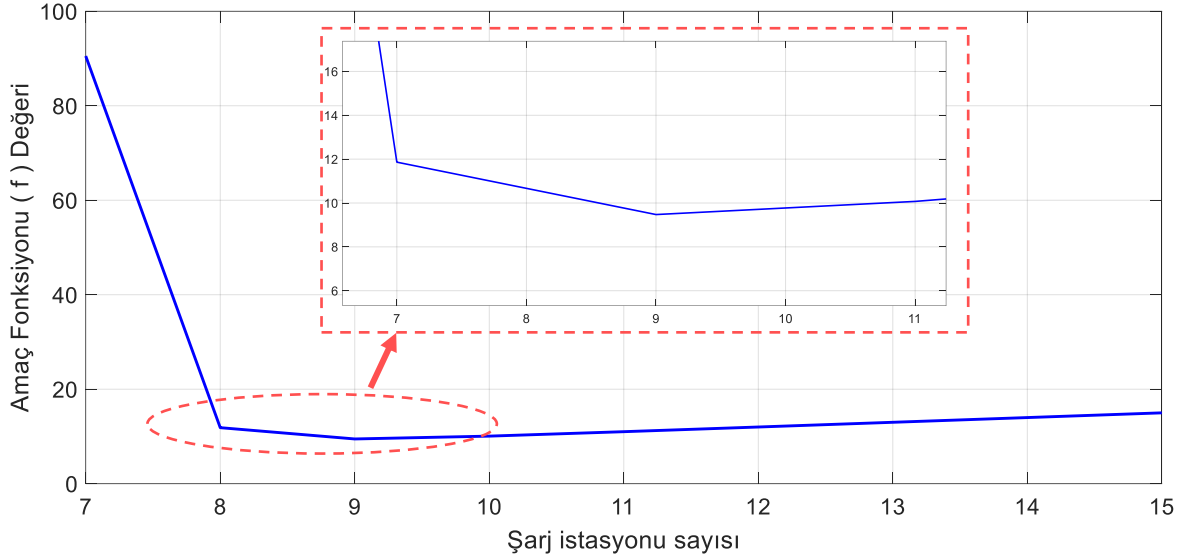
Tablo 3'e göre şarj istasyonu sayısı 7 iken kuyrukta bekleyen araç sayısı 9.13'tür Hizmet veren şarj istasyonu sayısı arttıkça sistem doluluk oranı azalmakta, 9. şarj istasyonunun hizmet vermeye başlamasıyla birlikte (Lq) kuyruktaki bekleyen EA sayısı 1'in altına düşmektedir. Hizmet veren şarj istasyonu sayısı arttıkça sistem bekleme süresi 4.56 saatten 15. şarj istasyonunun devreye girmesiyle 0.0011 saate düşmektedir. 7 adet şarj istasyonu varken doluluk oranı %92 iken 15 adet şarj istasyonunun hizmet vermesi durumda

doluluk oranı da %43'e düşmektedir. Şekil 12'de şarj istasyonu sayısına bağlı olarak kuyrukta bekleyen araç sayısı, kuyrukta bekleme süresi ve sistem doluluk oranındaki değişimler gösterilmiştir.



Şekil 12. Senaryo 1 için Şarj İstasyonu Sayısına Bağlı Olarak Kuyrukta Bekleyen Araç Sayısı (a), Kuyrukta Bekleme Süresi (b) ve Sistem Doluluk Oranı (c).

Şekil 13'te amaç fonksiyonunun şarj istasyonu sayısına göre değişimi görülmektedir. Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması ile amaç fonksiyonunun minimum yapan değer 9 olarak bulunmuştur. Bu değer, Senaryo 1 için optimum şarj istasyonu sayısının 9 olması gerektiğini belirtmektedir.



Şekil 13. Senaryo 1 için Amaç Fonksiyonu Değerinin Değişimi

4.2. Senaryo 2

Bu senaryoda saatte otoparka giriş yapan elektrikli araç sayısı 2, tüm araçlar TOGG T10X modeli ve kurulacak olan şarj istasyonları DC tip seçilmiştir. T10X standart menzilli modelin teknik özelliklerine göre DC 180 kW şarj istasyonu ile %20'den %80 şarja 28 dakikada ulaşmaktadır. Kuyruk teoremi kullanılarak yapılacak hesaplamaların tümü kuyruk teoreminin M/M/s modeline göre yapılmıştır. Saatlik müşteri gelişi 2, sunucu sayısı 2 ve servis oranı ise 2.14 olarak hesaplanmış bu veriler WinQSB programına girilmiştir. Şekil 11'deki akış diyagramına göre yapılan hesaplamalarda kuyrukta bekleyen araç olmaması durumunu sağlayacak optimum şarj istasyonu sayısının 2 adet olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen veriler WinQSB programına girdi olarak verilerek sonuçlar incelenmiştir. Programa girilen veriler Tablo 4'te WinQSB programına Senaryo 2 için girişi yapılan değerler ve parametreler gösterilmiştir. Bu değerler ve parametrelere göre Tablo 5'te gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4. Senaryo 2 için WinQSB Programı Veri Girişi

Veri Tanımı	Giriş
Sunucu Sayısı	2
Servis Oranı (Her Sunucu İçin Saatte)	2.14 araç/saat
Müşteri Gelişleri (Saatlik)	2 araç/saat

Kuyruk Kapasitesi	M
Müşteri Popülasyonu	M

Tablo 5. Senaryo 2'nin Analiz Çıktıları

Performans Ölçütleri	Sonuç
Sistem : M/M/2	
Saatlik Müşteri Gelişleri	2 araç/saat
Saatlik Servis Oranı	2.14 araç/saat
Sistem Kullanımı	% 46.72
Sistemdeki Ortalama Müşteri Sayısı	1.19 araç
Kuyruktaki Ortalama Müşteri Sayısı	0.2611 araç
Meşgul Sistemdeki Kuyruktaki Ortalama Müşteri Sayısı	0.87 araç
Sistemde Harcanan Ortalama Süre	0.5978 saat
Kuyrukta Harcanan Ortalama Süre	0.1305 saat
Meşgul Sistemdeki Kuyrukta Harcanan Ortalama Müşteri Süresi	0.4386 saat
Tüm Şarj istasyonlarının Boşta Kalma Olasılığı	% 36.30
Gelen Müşterinin Bekleme ya da Sistemin Meşgul Olma Olasılığı	% 29.76

Tablo 5'te görüldüğü gibi şarj istasyonu sayısının 2 olması durumunda sistem kullanım oranı %46 olmuştur. Sistemde bulunan ortalama müşteri sayısı 1.19, kuyruktaki ortalama müşteri sayısı 0.26 adet ve kuyrukta harcanan ortalama süre 0.13 saattir. Tüm şarj istasyonlarının boşta kalma olasılığı %36.30 ve gelen müşterinin bekleme ya da sistemin meşgul olma olasılığı ise %29.76'dır. M/M/2 modeli için Senaryo 2 çıktılarının açıklamaları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Senaryo 2 Çıktılarının Açıklaması

Birim zamanda (bir saat) gelen EA sayısı (λ)	2 araç/saat
Birim zamanda (bir saat) servis alan EA sayısı (μ)	2.14 araç/saat
Sistemin ortalama etkinliği – doluluk oranı (kullanım faktörü)	%46.72
Sisteme gelen bir EA bekleme olasılığı P_w	%29.76
Sistemde bulunan ortalama EA sayısı (L)	1.19 araç
Kuyrukta bekleyen ortalama EA sayısı (L_q)	0.2611 araç
Bir EA sistemde ortalama bekleme süresi (W)	0.5978 saat
Kuyrukta bekleme süresi (W_q)	0.1305 saat

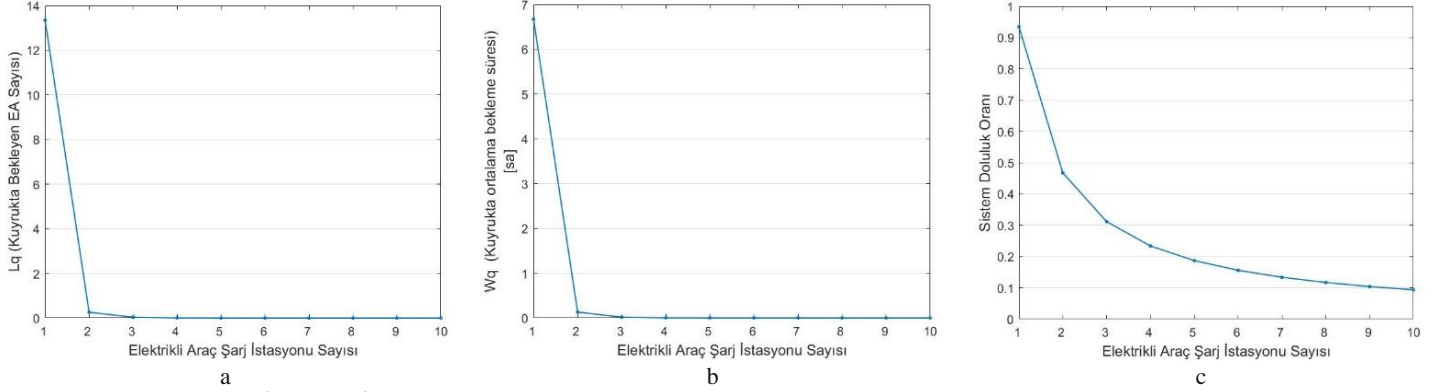
Hizmet veren şarj istasyonu sayısı 1'dan 15'e doğru artırılarak saatlik gelen müşteri sayısına göre duyarlılık analizi yapılmıştır ve analiz sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Senaryo 2 İçin Hizmet Veren Şarj İstasyonu Sayısına Göre Duyarlılık Analizi

EA Şarj İstasyonu Sayısı	Müşteri Gelişleri (Saatlik)	Sistem Doluluk Oranı	L (araç)	L_q (araç)	W (saat)	W_q (saat)	P_0	P_w
1	2	0.9346	14.2857	13.3511	7.1428	6.6756	0.0654	0.9346
2	2	0.4673	1.1957	0.2611	0.5978	0.1305	0.3631	0.2976
3	2	0.3115	0.9694	0.0348	0.4847	0.0174	0.3893	0.0769
4	2	0.2336	0.9395	0.0050	0.4698	0.0025	0.3923	0.0163
5	2	0.1869	0.9352	0.0007	0.4676	0.0003	0.3927	0.0029
6	2	0.1558	0.9347	0.0001	0.4673	0	0.3927	0.0004
7	2	0.1335	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0.0001
8	2	0.1168	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0
9	2	0.1038	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0
10	2	0.0935	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0
11	2	0.0850	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0
12	2	0.0779	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0
13	2	0.0719	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0

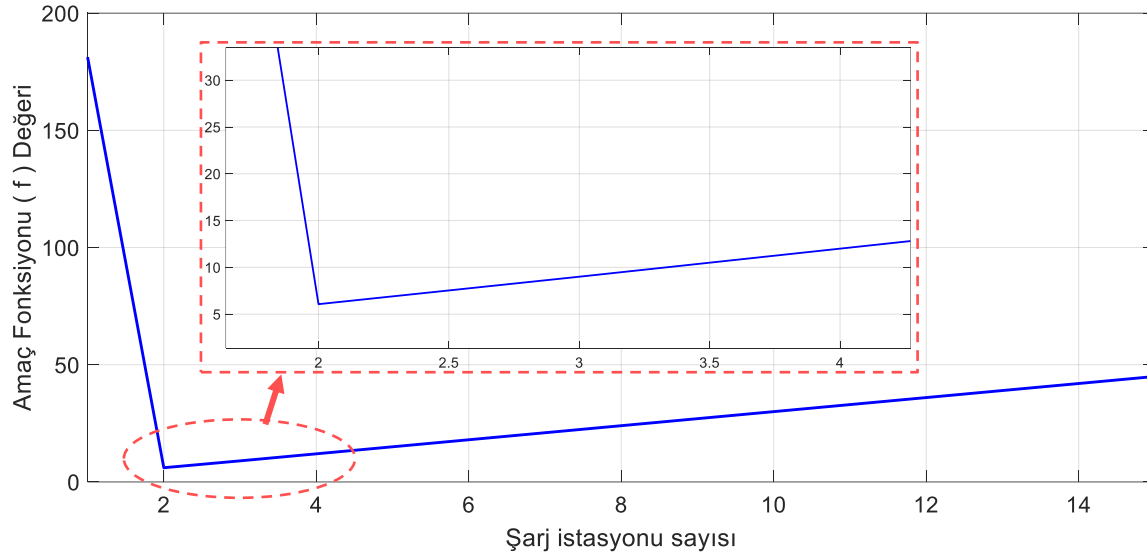
14	2	0.0668	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0
15	2	0.0623	0.9346	0	0.4673	0	0.3928	0

Tablo 11'e göre şarj istasyonu sayısı 1 iken kuyrukta bekleyen araç sayısı 13.35'tir. 2.şarj istasyonunun hizmet vermeye başlamasıyla birlikte (L_q) kuyrukta bekleyen EA sayısı 1'in altına düşmektedir. Hizmet veren şarj istasyonu sayısı arttıkça sistem doluluk oranı da azalmaktadır. Hizmet veren şarj istasyonu sayısı arttıkça sistem bekleme süresi 7.14 saatten başlayarak 6. istasyonun devreye girmesiyle 0.4673 saate sabitlenmiş ve 15. şarj istasyonuna kadar 0.4673 saate sabit kalmıştır. 1 adet şarj istasyonu varken doluluk oranı %93 iken 9. şarj istasyonundan sonra doluluk oranı %10'un altına düşmektedir. Şekil 14'te şarj istasyonu sayısına bağlı olarak kuyrukta bekleyen araç sayısı, kuyrukta bekleme süresi ve sistem doluluk oranındaki değişimler gösterilmiştir.



Şekil 14. Senaryo 2 için Şarj İstasyonu Sayısına Bağlı Olarak Kuyrukta Bekleyen Araç Sayısı (a), Kuyrukta Bekleme Süresi (b) ve Sistem Doluluk Oranı (c)

Şekil 15'te amaç fonksiyonunun şarj istasyonu sayısına göre değişimi görülmektedir. Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması ile amaç fonksiyonunu minimum yapan değer 2 olarak bulunmuştur. Bu değer, Senaryo 2 için optimum şarj istasyonu sayısının 2 olması gerektiğini belirtmektedir.



Şekil 15. Senaryo 2 için Amaç Fonksiyonu Değerinin Değişimi

Tablo 8'de Senaryo 1 ve Senaryo 2 için elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Buna göre Senaryo 1 için şarj istasyonu AC tipte seçilirse kuyrukta bekleme olmamasını sağlayacak optimum şarj istasyonu sayısı 9 olarak tespit edilmiştir. Senaryo 2 için ise şarj istasyonu DC tipte seçilirse için kuyrukta bekleme olmamasını sağlayacak optimum şarj istasyonu sayısı 2 olarak tespit edilmiştir

Tablo 8. Senaryo Sonuçları

	Tipi	Saatlik 2 EA girişi için kuyrukta bekleme olmamasını sağlayacak optimum EA şarj istasyonu sayısı
Senaryo 1	AC	9
Senaryo 2	DC	2

5. Sonuçlar ve Değerlendirme

Yapılan anket çalışmalarına göre elektrikli araç satın alacak kişilerin en büyük kaygılarının EA'ların uzun şarj süresi, menzilin uzun olmaması, yetersiz altyapı ve yüksek batarya fiyatları gibi birçok probleminin hala çözüm bekliyor olmasıdır. Bu makalede, uzun şarj süresinden kaynaklı yetersiz altyapı sorununu dikkate alarak, ihtiyaca göre şarj altyapısı planlamasını ele almaktadır. Bu amaçla optimum şarj istasyonu sayıları, kuyruk teoremiyle elde edilen parametreye dayalı olarak bu çalışmada özgün olarak tasarlanan amaç fonksiyonu ve bu amaç fonksiyonunu minimum yapan değerleri tespit eden Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Kuyruk teoremi kullanılarak yapılan bu çalışmada elde edilmek istenen temel dinamik EA'sını şarj etmek için otoparka gelen araç sahiplerinin kabul edilebilir sürelerde kuyrukta bekleyerek hizmet almalarını sağlamaktır. Çalışma kapsamında, Gümüşhane ili 15 Temmuz Zafer Meydanı Kapalı Otoparkına ait bir yıllık araç-giriş çıkış verileri ele alınmıştır. Bir yıllık verilerin kullanılmasındaki temel amaç, otoparkın yoğun kullanım periyotlarının ve kullanım karakteristiklerinin belirlenmesidir. Bu bağlamda toplamda 27717 adet araç giriş verisi çalışmanın tüm aşamasında kullanılmıştır. Bu gerçek veriler analiz edilerek otoparka giriş yapan elektrikli araç sayısına bağlı olarak kurulması gereken şarj istasyonu tipi ve sayısı belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen verilerle çeşitli senaryolar kurularak farklı şarj istasyonu tipleri için sonuçlar elde edilmiştir. Elektrikli araçların kuyrukta beklemeden şarj olmaları ya da farklı bekleme sürelerine göre hizmet almaları için optimum şarj istasyonu sayısını bulmak bu çalışmanın temel amacının ana parametresini oluşturmuştur. Tüm senaryolar otoparka yıl boyunca bir saatte en fazla giriş yapan araç sayısının %5'inin EA olduğu varsayılarak tasarlanmıştır.

Analizler sonucunda, kurulması gereken şarj istasyonu sayısının belirlenmesinde en etkili rolün şarj için gelen elektrikli aracın desteklediği şarj gücü olduğu görülmüştür. DC şarj üniteleri ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı oluşan ön yargıların aksine, kısa şarj süreleriyle şarj işlemlerinin planlamasında esnek bir şekilde çalışılmasına imkân verdiği anlaşılmıştır. Otopark verilerine göre otopark kullanıcılarının yaklaşık %71'i kısa süreli (1 ya da 2 saat) park tercih etmişlerdir. DC şarj istasyonun kurulması da bu bağlamda otopark kullanıcılarının %71'inin park etme süresi içerisinde araçlarını en az %80 şarj etmelerine imkân sağlayacaktır. Bu yönüyle de DC hızlı şarj istasyonu daha fazla müşteriye hitap edeceğinden fazlasıyla avantajlı olacaktır.

Sonuç olarak; bu makalede en az bekleme süresi sağlayacak ve en düşük maliyetli olacak şekilde kaç adet şarj ünitesinin yerleştirilmesi gerektiği, kuyruk teoremi ve Nelder-Mead simplex optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Otoparklara konumlandırılması gereken şarj istasyonlarının kurulumunda ve şarj istasyonu içeren yeni otoparkların yapımında çözüm önerileri ve yaklaşımlar sunulmuştur. Bu yaklaşım birçok farklı işletmede kolayca uygulanabilir ve bu sayede optimum verileri her işletme kendi dinamiklerine göre hesaplayabilir. Burada ele alınan veriler ışığında EA'ların altyapısı sağlıklı bir şekilde tasarlanmasının önemi vurgulanmaktadır. Bu bağlamda kapalı otoparklara elektrikli araç şarj istasyonu tasarımı aşamasında otopark verilerin analizi detaylıca yapılarak ve uygun optimizasyon yöntemleri ile ihtiyaca cevap verebilen sürdürülebilir tasarımlar gerçekleştirilmelidir.

Referanslar

A. Murat, E. Dokur & R. Bayındır, "Energy management for EV charging based on solar energy in an industrial microgrid," in Proc. 9th Int. Conf. Renew. Energy Res.Appl. (ICRERA), 2020, pp. 489–493.

Asnaz, M. S. K. & Özdemir, B. (2021). Elektrikli araç şarj istasyonlarının çok kriterli karar verme yöntemleri ile optimal konumlandırması. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 4(2), 175-187.

Aydın, M. M., Çakmak, R. & Yıldırım, M. S. (2018). Şehir içi Otoparklarda Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Kurulumu İçin Gerekli Tasarım Aşamalarının Belirlenmesi. Presented at the International Congress on Engineering and Architecture, Alanya.

Bayrak, G., Yılmaz, A., & Çakmak, R. (2023). A new Fuzzy&Wavelet-based adaptive thresholding method for detecting PQDs in a hydrogen and solar-energy powered EV charging station. International Journal of Hydrogen Energy, 48(18), 6855-6870.

Çakmak, R. & Turan, A. (2022). Türkiye'de İller Bazında Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Altyapısı: Ölçevler Aracılığıyla Analizi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 12(1), 246-268.

Çakmak, R., Aydın, M. M. & Yıldırım, M. S. (2018). Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Elektrik Şebekesi Elektrikli Araç Teknolojileri Trafik ve Ulaşım Parametreleri Altında Değerlendirilmesi. Presented at the International Congress on Engineering and Architecture (ENAR), Antalya.

EAF0 (2020). European Alternative Fuels Observatory. 11 Mart 2023 tarihinde <https://www.eaf0.eu/countries/european-union-efta-turkey/23682/summary> adresinden erişildi.

ECA (European Court of Auditors) (2021). Report 05/2021: infrastructure for charging electric vehicles: more charging stations but uneven deployment makes travel across the EU complicated, 2021. Retrieved from

- https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR21_05/SR_Electrical_charging_infrastructure_EN.pdf. Energy Research, 46(8), 10040-10051.
- Ge, S. Y., Liang, F. E. N. G., Hong, L. I. U. & Long, W. A. N. G. (2012, September). The planning of electric vehicle charging stations in the urban area. In 2nd International Conference on Electronic ve Mechanical Engineering and Information Technology, Atlantis Press, (pp. 1598-1604).
- IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- IEA (2020), World Energy Balances: Overview, IEA, Paris. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>
- Karaboga, N. (2023). Optimizasyon Yöntemleri ve Matlab Uygulamaları. Nobel Yayınevi.
- Kaya, R. (2022). Elektrikli araçların şehir şebekesine entegrasyonu: Mardin örneği (Master's thesis, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Kılıç, E. (2022). Elektrikli araç şarj istasyonlarının enerji yönetimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Köfteci, S. & Gerçek, H. (2010). Yük taşımacılığında taşıma türü seçimi için lojistik maliyetlere dayalı ikili lojit model. Teknik Dergi, 21(103), 5087-5112.
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions. SIAM Journal on optimization, 9(1), 112-147.
- Lee, L. Y., Choi, W. S. & Choi, S. G. (2022, February). Investment Cost Minimization of Autonomous-Electric Vehicles based on Queueing Model. In 2022 24th International Conference on Advanced Communication Technology, (ICACT) IEEE, (pp. 172-178).
- Meral, H., Bayrak, G. (2023). A Machine Learning-Based Load Management Method For Ev Charging Stations. Proceedings of 9th International Congress On Engineering And Technology Management. (pp:2-12). E-ISBN:978-625-7367-98-1.
- Resmi Gazete (2022). Otopark Yönetmeliği 31868 (16 Haziran 2022). 1 Ocak 2023 tarihinde <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=24408&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> adresinden erişildi
- Ritchie, H. and Roser, M. (2020). Energy. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from <https://ourworldindata.org/energy>
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2021). İstanbul İli Elektrikli Araçlar İçin Şarj İstasyonu Kurulumu Ön Fizibilite Raporu, Retrieved from <https://www.yatirimadestek.gov.tr/pdf/assets/upload/fizibilite/istanbul-ili-elektrikli-araclar-sarj-istasyonu-on-fizibilite-raporu2021.pdf>
- Saygın, D., Bülent, O., Teimourzadeh, S., Hildermeier, J., Koç, M. & Kolokathis, C. (2019). Türkiye ulaştırma sektörünün dönüşümü: Elektrikli araçların Türkiye dağıtım şebekesine etkileri. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. 12 Nisan 2023 tarihinde www.shura.org.tr adresinden erişildi.
- Şengör, İ. (2019). Elektrik dağıtım sisteminde elektrikli araç park bölgelerinin talep tarafı esnekliği dikkate alınarak optimum işletimi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Xylia, M., Leduc, S., Patrizio, P., Kraxner, F. & Silveira, S. (2017). Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 78, 183-200.
- Yağcıtekin, B. (2014). Elektrikli araç şarj altyapısı tasarımı ve akıllı şarj sisteminin geliştirilmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhenpo W., Peng L. & Tao X., (2010). "Optimizing the Quantity of Off-Broad Charger for Whole Vehicle Charging Station". IEEE 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing (ICOIP), China, 93–96.