

Araştırma Makalesi

Elektrikli araç şarj istasyonlarının çok kriterli karar verme yöntemleri ile optimal konumlandırması

Melike Sultan Karasu Asnaz^{1,*}, Beyza Özdemir²

^{1,2} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Balıkesir University, Balıkesir, Turkey

*Correspondence: karasu@balikesir.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1015108

Özet: Akıllı şehirlerin şekillendirilmesinde ulaşım sektörü önemli bir rol üstlenmektedir. Artan çevre bilinci ve fosil yakıtların tükenmesi sebebiyle ulaştırma sektöründe elektrikli araçların (EV) kullanımı hızla artmaktadır. Karbonsuz bir gelecek projeksiyonunda yollardaki EV sayılarının artması kadar iyi planlanmış ve konumlandırılmış şarj istasyonlarının yapılandırılması da önemli bir gündemdir. Ayrıca EV'ler normal araçlara göre daha uzun şarj olma sürelerine sahiptir. Metropol hayatı ve yoğun yaşam düzeni ile birlikte insanların uzun şarj sürelerine ayıracak vakti olmayacaktır. Bu sebeple şarj istasyonlarının doğru yerlere konumlandırılması ve dahası araç, şarj operatörü ve elektrik dağıtım şirketinin veri bağlantıları aracılığıyla bağlanmasını sağlayan akıllı şarj sistemi ile donatılması gerekmektedir. Bu çalışmada, EV'lere yönelik şarj istasyonu altyapısı planlaması üzerine odaklanılmış ve Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü uygulama modeli olarak kullanılmıştır. Öncelikle, araç giriş çıkışlarına dair veriler elde edildikten sonra, sürücülerin kullanım alışkanlıklarına dair anket yapılmıştır. Elde edilen anket verileri değerlendirilmiş ve kampüse yerleştirilecek optimum sayıdaki şarj istasyon sayısı kuyruk teorisi (QT) ile tespit edilmiştir. Kampüs içindeki otoparklar, şarj istasyonlarının yerleştirileceği alanlar olarak belirlenmiştir. Otoparklara dağıtım ise çok kriterli karar verme (ÇKKV) metodları ile çözümlenmiştir. Otopark doluluk oranları, otopark kapasiteleri, trafo merkezine uzaklık gibi kriterler belirlenmiş ve bu kriterlerin önceliklerinin belirlenmesi için Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (FAHP) kullanılarak kriterler önceliklerine göre sıralanmıştır. Her bir alternatif konumun kriterlere göre performansı değerlendirilerek, alternatiflerin sıralanması FAHP, The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) ve Simple Multi Attribute Rating Technique (SMART) yöntemleri ile ayrı ayrı yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, şarj istasyonu konumlandırma, kuyruk teorisi, çok kriterli karar verme, FAHP, SMART, PROMETHEE.

Optimal placement of electric vehicle charging stations with multi-criteria decision-making methods

Abstract: The transportation sector plays an important role in shaping smart cities. Due to increasing environmental awareness and depletion of fossil fuels, the use of electric vehicles (EV) in the transportation sector is increasing rapidly. In the projection of a carbon-free future, the structuring of well-planned and positioned charging stations is as important as the increase in the number of EVs on the roads. In addition, EVs have longer recharge times than regular vehicles. With metropolitan life and busy lifestyle, people will not have time to spare for long charging times. For this reason, charging stations should be located in the right places and moreover, they should be equipped with a smart charging system that enables the vehicle, charging operator and electricity distribution company to be connected via data connections. In this study, we focused on charging station infrastructure planning for EVs and Balıkesir University Çağış Campus was used as an application model. First of all, the number of incoming and outgoing vehicles obtained, a survey was conducted on the driving habits of the drivers. The obtained survey data were evaluated and the optimum number of charging units to be

* Corresponding author.

E-mail address: karasu@balikesir.edu.tr

Received 26.10.2021; accepted 30.11.2021

Peer review under responsibility of Bandirma Onyedi Eylül University.

placed on the campus was determined by queuing theory (QT). Parking lots within the campus are designated as areas where charging units will be placed. Distribution to the parking lots was solved with multi-criteria decision making (MCDM) methods. Criteria such as parking occupancy rates, parking capacities, distance to the transformer center were determined and the criteria were ranked according to their priorities by using the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) to determine the priorities of these criteria. The performance of each alternative location was evaluated according to the criteria, and the results were compared after ranking the alternatives separately with FAHP, The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) and Simple Multi Attribute Rating Technique (SMART).

Keywords: Electric vehicles, charging station placement, queuing theory, multi-criteria decision analysis, FAHP, SMART, PROMETHEE.

* Corresponding author.

E-mail address: karasu@balikesir.edu.tr

Received 26.10.2021; accepted 30.11.2021

Peer review under responsibility of Bandirma Onyedi Eylul University.

1. Giriş

20. yüzyılın sonlarında ortaya çıkan dünya enerji krizi ve küresel ısınma bilincinin sürekli yükselmesi nedeniyle sera etkisine sebep olabilecek salınımlarda bulunan içten yanmalı motorlu araçlar gözden düşmeye başlamış ve EV'ler, son yıllarda en umut verici ulaşım alternatiflerinden biri haline gelmiştir. ABD, İngiltere ve Almanya gibi çeşitli ülkelerde pil teknolojileri ve şarj istasyonu altyapılarına yapılan yatırımlar e-mobilitenin yükselişte olduğunu göstermektedir (Wagner vd., 2013).

Birçok ülke yakın gelecekte yollarına büyük miktarlarda EV getirmeyi planlasa da ön koşul olarak bu araçlara elektrik sağlamak için yeterli bir şarj altyapısına ihtiyaç duymaktadır (Xylia vd., 2017). Akıllı şehirlerde EV'lerin günlük yaşama entegre edilebilmesi için akademi camiası ve şehir planlamacılar birçok çalışma yapmaktadır. Harighi (2019), EV'lerin yaygınlaşmasıyla şarj istasyonlarının konumlanmasının elektrik dağıtıcıları için önemli bir problem olduğunu vurgulamaktadır. Çalışmada, transformatörlerin konumlarına göre, EV'ler için şarj istasyonlarının konumlandırılması senaryosu oluşturmuş ve şebeke altyapısının bazı özelliklerine göre; konum bulma, transformatörlerin kapasitesini sınıflandırma ve transformatör analizi bölümlerinden oluşan özgün çözüm algoritmaları sunmuştur. Elektrik tüketim miktarını algoritmasına entegre ederek daha sonra olası istasyonların konumlarını tanımlamıştır. Awasthi vd. (2017) çalışmalarında, şarj istasyonlarının optimum konumlandırılmasını çözmek için genetik ve parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasına dayalı bir hibrit algoritma uygulamışlardır. Sonuçlar toplandıktan sonra altyapı, simülasyonda gerçek zamanlı sistemle test edilmiştir. Xylia vd. (2017), Stockholm'de kullanılan elektrikli otobüsler için şarj altyapısını optimize etmek ve ulaşım maliyetlerini en aza indirmek için karmaşık tam sayılı doğrusal programlama kullanarak toplu taşıma yatırımları için karar vermede yardımcı olabilecek bir model sunmuşlardır. Micari vd. (2017), İtalya'daki tüm karayolu ağını kapsayan hem EV şarj istasyonlarının optimal sayısını hem de konumunu hesaplamak için iki aşamalı bir metodoloji geliştirmişlerdir. İlk aşamada şarj istasyonlarının optimal konumlandırılması için otonom araç ve menzil kaygısı parametreleri kullanılırken, ikinci aşamadaki

optimal şarj istasyonu sayısı içinse amplifikasyon faktörü, şarj soketi sayısı, günlük şarj edilebilen araç sayısı gibi parametreler ele alınmıştır.

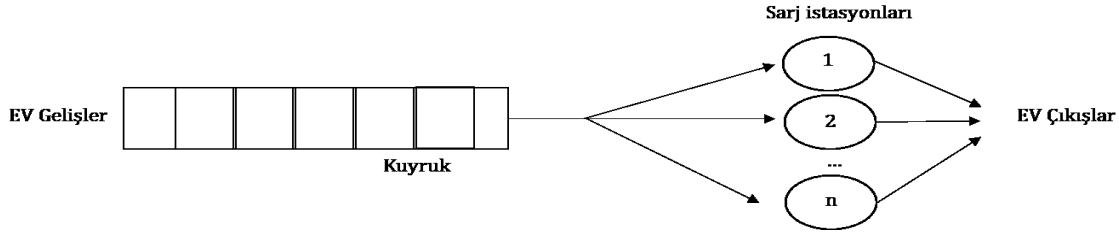
Konum belirleme gibi birden çok alternatifin olduğu ve karar vericinin birden fazla kriteri birlikte değerlendirmesi gerektiği problemlerde ÇKKV yöntemleri kullanılmaktadır. Küçüköğlü (2020), Türkiye'de nükleer enerji santrali kuruluş yerini belirlemek için AHP, ELECTRE ve PROMETHEE yöntemleri uygulamıştır. Kırçalı (2019), çalışmada, güneş tarlası kurulumu için en uygun sahanın seçilebilmesi için uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri teknolojilerinden yararlanılmış ve ÇKKV yöntemlerinden olan AHP tekniği kullanılarak uygun sahanın seçimini yapmıştır. Avdan (2018), Türkiye'de e-atık kazanım tesisi için kuruluş yeri belirlemede Türkiye'deki kentler için, Gri İlişkisel Analiz tekniğini uygulayarak bir e-atık geri kazanım tesisinin kurulumu için en iyi yer seçimi çalışmasını gerçekleştirmiştir.

Bu çalışma, EV şarj istasyonlarının ÇKKV metotları ile optimal konumlandırılması üzerinedir ve Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde bulunan araç ve kullanıcı verileri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısmı, kampüsteki mevcut otoparklara kurulması planlanan EV şarj istasyonlarının toplam sayısını hesaplamaktır. Bunun için anket sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda kullanıcı deneyiminin en iyi düzeyde sağlanması için minimum kuyrukta bekleyen araç sayısı kısıtı dikkate alınarak QT metodu ile optimal şarj istasyon sayısı tespit edilmiştir. İkinci kısım ise belirlenen toplam EV şarj istasyonlarının otoparklara olan dağılımıyla ilgilidir. Bu problem bir kara verme problemi olarak değerlendirilmiş ve ÇKKV metotlarından olan FAHP, PROMETHEE ve SMART kullanılarak üç farklı yöntemle şarj istasyonlarının optimal konumlandırılması yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Sarj İstasyon Sayısının Belirlenmesi: Kuyruk Teorisi

Çalışma, dokuz trafo merkezi ve on sekiz otoparka sahip Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde gerçekleştirilmiştir. Kampüste bulunan ana giriş kapısından bir hafta boyunca özel araç giriş-çıkış verileri temin edilmiştir.



Şekil 1. M/M/s kuyruk modeli

Ayrıca öğrencilere, akademisyenlere ve idari personele uygulanan anket ile sürücülerin en sık kullandıkları otoparklar ve araçların ortalama park halinde kalma süreleri verileri elde edilmiştir.

Çalışmanın ilk kısmı olan optimal şarj istasyon sayısını tespit edebilmek için QT'den faydalanılmıştır. Ele alınan modelde servis sağlayıcısı olan şarj istasyonu tek faz/tek sıra/çoklu sunucu (M/M/s) olup model Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çalışmada yapılan modele ait kabuller şöyledir;

1. Araçların gelişi poisson dağılımına uygundur (her sürücü davranışı birbirinden farklı ve bağımsız olarak ele alınır) (Wang vd., 2010).
2. Araçlar tek bir sıra oluşturur ve sisteme giriş anları farklıdır.
3. Araç sürücüleri kuyruğa girmeye razı olup herhangi bir anda kuyruğu terk etme eğilimi göstermezler.
4. Bütün şarj istasyonlarının verimleri aynıdır.

(M/M/s) modeline ait sistem yoğunluğu (ρ) hesaplaması Denklem (1)'deki gibidir;

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

Burada λ birim zamanda giriş yapan ortalama araç yoğunluğunu, s servis sağlayacak şarj istasyonu sayısını, μ ise bir aracın ortalama şarj olma zamanını ifade eder. Servis sağlayıcılarının herhangi bir anda boş olma olasılığı ise Denklem (2)'de verilmiştir.

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

P_0 , sistemde hiç araç bulunmama olasılığını gösterir. Kuyrukta servis almayı bekleyen araç sayısı (L_q) Denklem (3)'teki gibi hesaplanır;

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

Kuyruktaki ortalama bekleme süresi olarak gösterilen W_q değeri ise Denklem (4)'teki gibi hesaplanır;

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

Sistemde geçirilen ortalama toplam süre (W) (kuyrukta bekleme süresi + şarj süresi) ise Denklem (5)'teki gibidir;

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

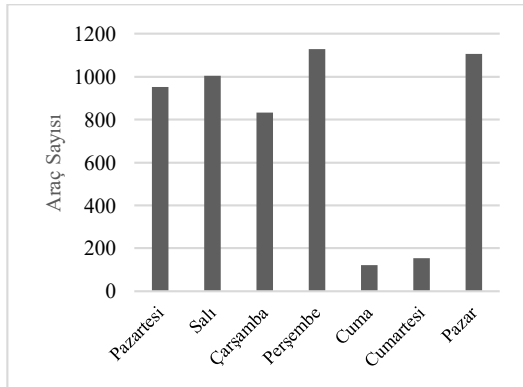
Sistemde bulunan toplam ortalama araç sayısı (L) ve kuyruk sisteminde herhangi bir anda n sayıda araç bulunma olasılığı (P_n) ise sırasıyla Denklem (6) ve (7) ile hesaplanır.

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

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

Kurulan bu kuyruk modeline göre, sistem içindeki kuyruk uzunluğunun sürekli artmaması yani EV'lerin şarj olmak için istasyonda hizmet sırası beklememesi için $(s\mu)/\lambda > 1$ eşitsizliğinin sağlanması gereklidir.

Personel, öğrenci ve misafirlerin kampüse giriş ve çıkışları tek bir ana kapıdan, bariyer kapı geçiş sistemi ile yapılmaktadır. Güvenliğin de bulunduğu bu kapıda kimlik kartlarıyla giriş yapılmaktadır, ayrıca araç plakalarının ve giriş saatlerinin de kaydedildiği bir otomasyona sahiptir. Kampüse giren araç yoğunluğunu belirleyebilmek için bu kapıdan toplanan veri ele alınmıştır. Verinin gerçek durumu yansıtması için araç giriş-çıkışın az olduğu tatil dönemleri ve araç giriş-çıkışının yoğun olduğu sınav dönemleri dikkate alınmamıştır. 16-22 Aralık 2019 tarihleri arasında kaydedilen bir haftalık veriye göre kampüse günlük giriş yapan özel araç yoğunluğu değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Buna göre kampüse en fazla giriş yapılan gün ve saat dilimi referans alınmıştır. Yağcıtekin (2014), 2020 yılı iyimser senaryolarında bir otoparktaki tüm araçların ortalama %5'inin elektrikli olabileceğini ifade etmiştir. Bu yüzden bu çalışmada otoparktaki tüm araçların %5'nin elektrikli olması ile şarj servisi almak isteyen araçların kuyruktaki minimum bekleme süresi durumları dikkate alınarak MATLAB programında hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 2. Günlük giriş yapan araç yoğunluğu değişimi.

Sistem yoğunluğu (ρ) ile birim zamanda ortalama giriş yapan araç yoğunluğunu (λ) ölçebilmek için Google Forms üzerinden sürücü davranışlarını anlamaya yönelik bir anket hazırlanmış ve dağıtılmıştır. Katılımları için öğrencilere, akademik ve idari personele kurumsal e-posta adreslerinden ulaşılmıştır. Bir hafta süreyle çevrimiçi yapılan ankete toplamda

136 kişi cevap vermiştir. Dört sorudan oluşan bu ankette (i) kişilerin kampüse ulaşımını nasıl sağladıkları, (ii) günlük ortalama kaç km mesafe kat ettikleri, (iii) kampüs içindeki hangi otoparkı en sık kullandıkları ve (iv) günlük ortalama ne kadar süre ile araçlarını otoparkta bıraktıkları sorulmuştur. 89 katılımcı kampüse ulaşımını özel araçları ile sağladığını ifade ederken, günde en az bir otoparkı kullandıklarını belirtmişlerdir. Anket sonucuna göre kullanıcıların çoğu günde 6 ila 9 saat araçlarının park halinde kaldığını belirtmişlerdir. Anketten elde edilen veriler doğrultusunda özel araçla kampüse ulaşan sürücülerin en sık kullandığı otoparklar tespit edilmiş ve araçların otoparkta kalma süreleri dikkate alınarak sistemde en az bekleme süresini sağlayan optimal şarj istasyonu sayısı belirlenmiştir.

Bunun içinse şarj istasyonunu, tek faz/tek sıra/çoklu sunucu (M/M/s) olarak kabul eden QT modeli kurulmuş ve buna göre bir aracın servis almak için en az bekleme süresini sağlayan toplam şarj istasyonu sayısı tüm kampüs otoparkları için 70 adet olarak hesaplanmıştır.

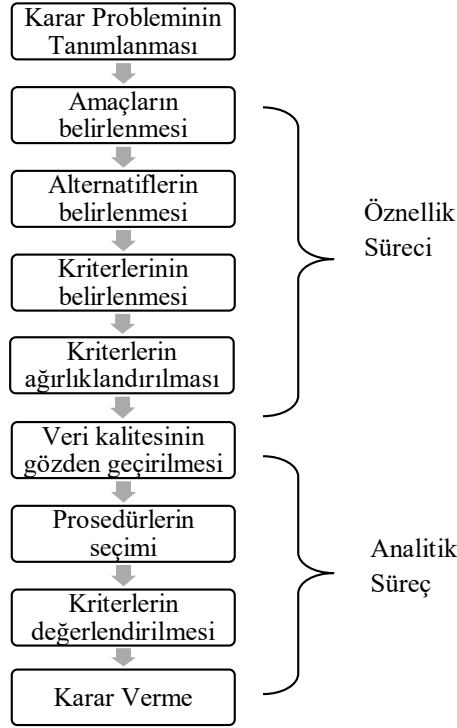
2.2. Sarj İstasyonlarının Dağılımı: Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi

ÇKKV yöntemi, alternatifin performansını çok sayıda, çelişkili, niteliksel ve/veya niceliksel kriterler arasında birleştiren ve fikir birliği gerektiren bir çözümle sonuçlanan bir tekniktir. ÇKKV'nin amacı en iyi kararı önermek değil, karar vericilere kısa listeye alınmış alternatifleri veya gereksinimlerini karşılayan ve tercihleriyle uyumlu tek bir alternatifi seçmede yardımcı olmaktır (Kırcalı, 2019). Bu bölümde, üç farklı ÇKKV yöntemi kullanılarak 70 adet şarj istasyonunun kampüs içindeki 12 otoparka belirlenen kriterler doğrultusunda optimal dağılımı çalışması yapılmıştır.

Kampüste bulunan tüm otoparklar şarj istasyonlarının yerleşimi için alternatif yer olarak tanımlanmıştır. Sürücü profillerinin değerlendirilmesinde ankettten faydalanılmış ve elde edilen sonuçlara göre en az tercih edilen ve hiç tercih edilmeyen bazı otoparklar çalışmaya dahil edilmemiştir. Tablo 1'de problem alternatifleri olarak tanımlanan otoparklar ve kapasiteleri verilmiştir.

Alternatiflerin sayısal analizini içeren herhangi bir karar verme tekniğinin kullanılmasında üç

işlem vardır; (i) ilgili kriterleri ve alternatifleri belirlemek, (ii) hem kriterlerin göreceli önemine hem de alternatiflerin bu kriterler üzerindeki etkilerine istatistiksel ölçümler eklemek ve (iii) her bir alternatifi sıralamak (Patel vd., 2017). ÇKKV'de genel işleyişi gösteren akış şeması Şekil 3' teki gibi gösterilebilir.



Şekil 3. ÇKKV'de Karar Verme Süreci

Karar verme probleminin diğer bir bileşeni olan kriterler belirlenirken literatürden faydalanılmış ve probleme uygun dört kriter belirlenmiştir. Bu çalışmada ele alınan kriterler (Cn) şöyledir;

1. *Otopark Araç Kapasitesi (C1)*: Gelecekteki EV ve sürücü yoğunluğu artışına dikkate alınır.
2. *Tercih Edilirlik (C2)*: İnsan yoğunluğu fazla olan noktalar daha çok kullanımı olan ve yürüme mesafesini kısaltacağı için en tercih edilen noktalar olacaktır. Bu yüzden yoğunluğunun fazla olduğu otoparkların daha fazla şarj istasyonuna ihtiyacı olacağı dikkate alınır.
3. *Değişkenliğe Duyarlılık (C3)*: Ziyaretçisi değişken olan (Rektörlük, Teknokent gibi) konumların doluluk oranlarının değişken olacağı düşünülmüş ve bu sebeple şarj istasyon sayısının anket sayısına göre belirlenecek sayıdan daha fazla olabileceği dikkate alınmıştır.
4. *Otoparkın Trafo Merkezi ile Arasındaki Uzaklık (C4)*: Enerjideki düşük kalitenin önüne geçmek, yatırım maliyetlerini ve enerji kayıplarını azaltmak için uzaklık dikkate alınır.

Kampüs içindeki mevcut otoparklar (P) ve trafo merkezlerinin (T) yerleşimi Şekil 4'te verilmiştir.

2.2.1. Kriter ağırlıklarının belirlenmesi

Karar verme sürecinde karşılaşılan soyut kavramlar günlük hayatta karar vermeyi büyük bir belirsizliğe yöneltmektedir. Bu belirsizlik anlarında karar verebilme sürecini yönetebilmek için, çeşitli çözüm yolları önerilmiş ve bulanık mantık fikri ortaya sürülmüştür. FAHP yöntemi bunlardan biridir ve bu yöntemde, uzman görüşünün kesin sayılar yerine bulanık sayılarla temsil edilmesi gerekir.

Tablo 1. Alternatifler ve kapasiteleri

Otoparklar	Alternatif Adı	Kapasite
Mühendislik Fakültesi Ek Bina	P1	62
Fen Edebiyat Fakültesi	P2	174
Mühendislik Fakültesi Ana Bina	P3	240
Turizm Fakültesi	P4	74
Veterinerlik Fakültesi	P5	94
Rektörlük Binası	P6	150
Sağlık Bilimleri Fakültesi	P7	160
Meslek Yüksek Okulu	P8	191
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi	P9	65
Spor Bilimleri	P10	139
Residorm Yurtları	P11	77
Teknokent	P12	70



Şekil 4. Kampüs otopark ve trafo merkezlerinin genel görünümü.

Çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenebilmesi için Tablo 2'deki gibi ifade edilen üçgen bulanık sayılar kullanılmıştır. Bu sayılar (l, m, u) parametreleri ile ifade edilir ve sırasıyla bulanık bir miktarı tanımlayan olası en küçük değeri, en umut verici değeri ve mümkün olan en büyük değeri ifade eder (Soltani ve Marandi, 2011). Çalışma özelinde FAHP hiyerarşi yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir.

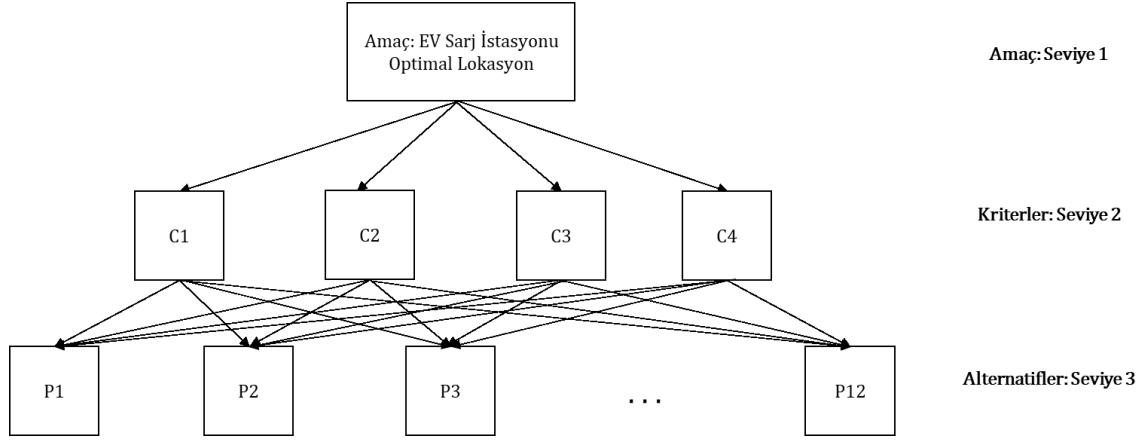
Belirlenen 70 adet şarj istasyonunun dağıtımının yapılması için sürücülerin fikirleri dikkate alınmış ve sözel mantıkla ifade

edilebilen bulanık sayılardan yararlanılarak çözüm gerçekleştirilmiştir. Karar vericiler tarafından FAHP ile kriterlerin ağırlık değerlendirmeleri yapılmış ve bu kriterler Tablo 2'de gösterilen bulanık sayılarla değerlendirilmiştir. Ardından ikili karşılaştırma yapmak için üçgensel bulanık karşılaştırma matrisi Denklem (8)'deki gibi tanımlanmıştır.

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} (111) & (l_{12}m_{12}u_{12}) & \dots & (l_{14}m_{14}u_{14}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (l_{41}m_{41}u_{41}) & (l_{42}m_{42}u_{42}) & \dots & (111) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Tablo 2. Dilsel ölçek ve bulanık sayılar (Rajabi vd., 2018)

Dilsel Ölçek	Bulanık Ölçek	Karşılık Ölçek
Kesin eşit	(1,1,1)	(1,1,1)
Eşit derece önemli	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Biraz daha önemli	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Kuvvetli derecede önemli	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Çok kuvvetli derecede önemli	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Tamamıyla önemli	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)



Şekil 5. FAHP hiyerarşi yapısı (Afolayan vd. (2020)'den uyarlanmıştır)

Tablo 3. Kriter karşılaştırma matrisi

	C1			C2			C3			C4		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
C1	1,00	1,00	1,00	0,90	1,44	1,95	0,63	1,14	1,65	0,90	1,44	1,95
C2	0,51	0,69	1,10	1,00	1,00	1,00	1,14	1,71	2,24	1,65	2,15	2,65
C3	0,60	0,87	1,58	0,44	0,58	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00	1,50	2,00
C4	0,51	0,69	1,10	0,37	0,46	0,60	0,50	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00

1

Buckley (1985)'in önerdiği gibi karar vericilerin bulanık değerlendirmeleri alındıktan sonra ikili karşılaştırmaların geometrik ortalaması alınarak kriter karşılaştırma matrisi hesaplanmıştır ve bu değerler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Son aşamada ise elde edilen bulanık kriter ağırlıklarının en iyi bulanık olmayan performans değerleri hesaplanmıştır. Durulaştırma olarak ifade edilen bu işlem Denklem (9)'da gösterilen alan merkezi (*center of area*) yöntemi ile hesaplanmıştır.

$$COA_{w_i} = \frac{[(u_{wi} - l_{wi}) + (m_{wi} - l_{wi})]}{3} + l_{wi} \quad (9)$$

Sonuç olarak yapılan FAHP ile kriter ağırlıklandırma işlemine göre en yüksek öneme sahip kriter C2, yani tercih edirlilik kriteri olarak belirlenirken, en az öneme sahip kriter

ise C4, yani otopark ve trafo merkezi arasındaki mesafe kriteri olmuştur. Nihai karar matrisi ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Nihai karar matrisi

	C1	C2	C3	C4
Ağırlık	0,313	0,347	0,259	0,183
Sıralama	2	1	3	4

2.2.2 FAHP ile Konumlandırma

FAHP ile kriter ağırlıkları belirlendikten sonra her bir kriter için alternatiflerin ağırlıklarının belirlenmesi yapılmıştır. Tüm alternatiflerin kriterlere göre değerlendirildiği nihai karar matrisi tabloları tüm kriterler için hesaplanmış ve Tablo 5'te gösterilmiştir. Ardından Tablo 4'te yer alan kriter ağırlık değerlerinden yararlanılarak her bir otopark için nihai karar matrisi değeri ile kriter ağırlık değeri çarpılarak toplam skorlar hesaplanmış ve yine Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Tüm kriterlerin nihai karar matrisleri ve alternatiflerin toplam skor tablosu

	C1	C2	C3	C4	Toplam Skor	Sıralama
P1	0,082	0,127	0,097	0,117	0,12	5
P2	0,139	0,138*	0,099	0,119	0,14	1
P3	0,141*	0,114	0,101	0,133*	0,13	2
P4	0,086	0,12	0,103	0,074	0,11	7
P5	0,089	0,068	0,105	0,094	0,10	9
P6	0,106	0,069	0,147*	0,133*	0,12	4
P7	0,118	0,09	0,109	0,078	0,11	6
P8	0,13	0,108	0,111	0,103	0,13	3
P9	0,058	0,1	0,113	0,063	0,09	10
P10	0,089	0,071	0,115	0,106	0,10	8
P11	0,063	0,047	0,115	0,063	0,06	12
P12	0,056	0,044	0,11	0,104	0,08	11

Tablo 6. FAHP yöntemi ile otoparklara göre şarj istasyonu dağılımı

Otoparklar	Şarj İstasyonu Sayısı
P1	6
P2	8
P3	7
P4	6
P5	5
P6	7
P7	6
P8	7
P9	5
P10	6
P11	3
P12	4

Burada toplam skor, ait olduğu alternatife ne kadar şarj istasyonu atanması gerektiğini belirten bir değerdir. Bu bağlamda hesaplanan 70 adet şarj istasyonu Tablo 6'daki gibi alternatiflere dağıtılmıştır.

2.2.2. PROMETHEE ile Konumlandırma

PROMETHEE, tanımlanan kriterler içinde en iyi alternatifin belirlenebilmesi için kullanılan ÇKKV yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, literatürde uygulamasına sık rastlanılan önceliklendirme metodlarının uygulanmasındaki zorlukları aza indirmek ve öznellikten arındırmak için geliştirilmiştir (Genç ve Urfalıoğlu, 2013).

Bu yöntemde kriterler, fayda ve maliyet olarak ele alınır. Buna göre bu çalışmada C1, C2, C3 fayda kriterleri, C4 ise maliyet kriteri olarak

belirlenmiştir. Buna göre fayda ve maliyet kriterleri için sırasıyla Denklem (10) ve (11) kullanılarak normalizasyon gerçekleştirilir. i kriterler ($i=1,2,\dots,n$); j , alternatifler ($j=1,2,\dots,m$); A satır ve x sütun değerleri olmak üzere Tablo 7'deki karar matrisi elde edilmiştir.

$$C_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \text{ (fayda)} \quad (10)$$

$$C_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \text{ (maliyet)} \quad (11)$$

C_{ij} değerlerinin hesaplanmasının ardından $P_i(A, x)$ olarak ifade edilen tercih edilebilirlik fonksiyonları belirlenmiş ve Denklem (12) ile hesaplanmıştır.

Tablo 7. Karar matrisi

	C1	C2	C3	C4
P1	62	3098	1	134,52
P2	174	3779	1,02	125,96
P3	240	1640	1,04	81,62
P4	74	1931	1,06	393,84
P5	94	285	1,07	169,06
P6	150	388	1,55	68,96
P7	160	1000	1,11	203,79
P8	191	6333	1,13	131,13
P9	65	1926	1,15	248,36
P10	139	975	1,17	83,62
P11	77	116	1,17	224,08
P12	70	160	1,12	44,35

$$\pi(A, x) = \sum_{i=1}^n (w_i P_i(A, x)) \quad (12)$$

Burada $\pi(A, x)$, A'nın hangi derecede x 'e göre tercih edildiğini ifade etmektedir. Tercih indeksleri belirlendikten sonra Denklem (13) ile Pozitif (Φ^+) ve Negatif (Φ^-) üstünlük tanımlamalarını yapılır ve bu işlem, tüm alternatifler için hesaplanır.

$$\Phi^+(A) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \pi(A, x) \text{ ve}$$

$$\Phi^-(A) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \pi(x, A) \quad (13)$$

Pozitif üstünlük, $\Phi^+(A)$, her bir alternatifin diğer alternatiflere göre toplu bir sıralama ölçütüdür, kısaca diğer alternatifleri nasıl geride bıraktığını gösterir. Negatif üstünlük, $\Phi^-(A)$, ise diğer alternatifler tarafından nasıl domine edildiğini gösterir.

Son olarak her bir alternatif için net üstünlük değeri Denklem (14) ile hesaplanır.

$$[\Phi(A_{net}) = \Phi^+(A) - \Phi^-(A)] \quad (14)$$

Bir karar için net üstünlük değeri ne kadar yüksekse, karar o kadar iyidir. Bu problemde, verilecek en iyi karar dikkate alınacağı için, net üstünlük değeri maksimize eden kararı seçilmiştir. Bu hesaplamalara göre 70 adet şarj istasyonu Tablo 8'de gösterilen şekilde alternatiflere dağıtılmıştır.

Tablo 8. PROMETHEE yöntemi ile otoparklara göre şarj istasyonu dağılımı

Otoparklar	Şarj İstasyonu Sayısı
P1	4
P2	11
P3	12
P4	0
P5	2
P6	4
P7	6
P8	17
P9	3
P10	7
P11	1
P12	3

2.2.3. SMART ile Konumlandırma

SMART yöntemi çok kriterli fayda teorisi yöntemlerinden biridir, fayda ve maliyet

unsurlarını dikkate alarak kriterlerin performans değerlerine göre hesaplamalar yapılır (Arslan, 2019). SMART'ta alternatiflerin derecelendirmeleri doğrudan atanır. Kriterlerin ağırlığını ve alternatiflerin derecesini mümkün olduğunca ayrı tutmak için, farklı kriter ölçeklerinin standart bir dahili ölçüğe dönüştürülmesi gerekir. Bu teknikteki süreç, bir değer fonksiyonu kullanılarak karar verici tarafından matematiksel olarak yapılır. Bir değer fonksiyonu yönteminin en yaygın olarak kullanılan biçimi toplamsal modeldir (Patel vd., 2017) ve bu çalışmada da bu yöntem uygulanmıştır.

Bu yöntemin çözümünde PROMETHEE'de olduğu gibi Tablo 4'te yer alan kriter ağırlıkları ve Tablo 7'de yer alan karar matrisi kullanılmıştır. Fayda ve maliyet kriterleri için sırasıyla,

$$C_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \text{ (fayda)} \quad (15)$$

$$C_{ij} = \frac{x_{ij}}{\min(x_{ij})} \text{ (maliyet)} \quad (16)$$

Denklem (15) ve (16) kullanılarak değerler normalize edilmiştir ve ardından, alternatiflerin puanını temsil eden değer fonksiyonu ve toplam ağırlıklı puanı gösteren P , Denklem (17)'deki gibi hesaplanmıştır. Burada; w_j , normalize edilmiş ağırlık olup x_{ij} niteliğinin ağırlığını ifade eder, r_{ij} ise, karar vericiler tarafından atanan özelliğin değeridir (Chen vd., 2010).

$$P = \sum_{i=1}^n w_j r_{ij} \quad (17)$$

Bulunan genel fayda değerleri Tablo 9'da gösterilmiştir ve 70 adet şarj istasyonu Tablo 10'da gösterilen şekilde alternatiflere dağıtılmıştır.

Tablo 9. Genel fayda değerleri

	C1	C2	C3	C4	P
P1	1346	1734	1,62	0,536	0,529
P2	1859	1857	1628	0,542	0,797
P3	2056	1391	1636	0,587	0,718
P4	1422	1472	1644	0,44	0,396
P5	1533	0,758	1648	0,514	0,257
P6	1774	0,844	1814	0,605	0,43
P7	1811	1172	1664	0,497	0,458
P8	1914	2221	1672	0,538	1

Tablo 9 (devamı). Genel fayda değerleri

P9	1366	1,47	1679	0,479	0,422
P10	1733	1161	1687	0,585	0,519
P11	1,44	0,555	1687	0,488	0,172
P12	1398	0,621	1668	0,656	0,248

Tablo 10. SMART ile otoparklara göre şarj istasyonu dağılımı

Otoparklar	Şarj İstasyonu Sayısı
P1	6
P2	9
P3	8
P4	5
P5	3
P6	5
P7	5
P8	12
P9	5
P10	6
P11	3
P12	3

3. Bulgular ve tartışma

Çalışmada, ÇKKV metotlarından FAHP, PROMETHEE ve SMART ile şarj istasyonlarının optimal noktalara yerleştirilmesi için karşılaştırılmalı çözüm önerileri sunulmuştur. Bu amaçla Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesi model olarak kullanılmıştır. EV'lerin kuyrukta minimum bekleyecek şekilde şarj istasyonlarından servis alabilecekleri bir sistem tasarımı yapılmıştır. Anket verilerinden yararlanılarak ortalama şarj süresi 6 saat, saatlik ortalama en yüksek giriş yapan araç sayısı ise 202 araç olarak saptanmıştır. Bu durumda, otoparktaki tüm araçların %5'inin EV olması durumunda 70 adet şarj istasyonunun yeterli olacağı hesaplanmıştır. Daha sonra optimum dağılım yapabilmek için alternatifler ve kriterler oluşturulmuştur. Kriter ağırlıklandırması için karar vericiler tarafından beyan edilen sözel ifadelerin bulanık mantıkla değerlendirilmesi uygun görülmüş ve FAHP ile kriter ağırlıklandırması gerçekleştirilmiştir. Ardından FAHP, PROMETHEE ve SMART teknikleri ile çözümler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 11, tüm çözüm yöntemlerinin otoparklara tayin ettiği şarj istasyonu sayısını

özetlemektedir. Buna göre, FAHP ile yapılan dağıtımın PROMETHEE ve SMART yöntemlerine göre daha dengeli olduğu dikkat çekmektedir. Bunun sebebi FAHP ile yapılan değerlendirmede karar matrisinin yani kriterlere göre alternatiflerin karşılaştırılmasının sözel ifade gibi düşünülerek bulanık mantık ile oluşturulmasıdır. Fakat kriterlere göre alternatiflerin karşılaştırılması için oluşturulan karar matrisi somut sayısal verilerden meydana gelmektedir. Sonuç olarak problem özelinde değerlendirildiğinde PROMETHEE ve SMART yöntemi ile yapılan dağıtım daha tutarlı sonuç vermektedir.

Tablo 11. Şarj istasyonlarının otoparklara dağılımı

Otoparklar	FAHP	PROMETHEE	SMART
P1	6	4	6
P2	8	11	9
P3	7	12	8
P4	6	0	5
P5	5	2	3
P6	7	4	5
P7	6	6	5
P8	7	17	12
P9	5	3	5
P10	6	7	6
P11	3	1	3
P12	4	3	3

4. Sonuç

Günümüzde taşımacılık sektörü büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlıdır ve son yıllarda bu sektörün yarattığı çevre sorunlarına daha fazla önem verilmektedir. Verimliliğinden ödün vermeden ulaşım sisteminde bir değişim zor görünse de EV'lerin hem çevre problemlerini azaltması hem de petrole olan bağımlılığı azaltması nedeniyle yakın gelecekte piyasada çok daha fazla tercih edilecekleri beklenmektedir. Bununla birlikte, EV şarj istasyonları planlarının gelecekteki ihtiyaçları karşılayacak kadar esnek olması önemlidir. Akıllı ve değer odaklı kararlar, fosil yakıt sonrası bir gelecek için EV şarjını mümkün kılmakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik büyüme, çevresel hedefler ve bölge sakinleri için hizmetler üzerinde olumlu bir etki yapabilir. Bu yüzden halihazırda devam eden veya planlanan birçok akıllı şehir girişimi

planlarına EV şarj istasyonlarının planlamasını da dahil etmelidir.

Bu öngörüyle, bu çalışma EV şarj istasyonu sayısı belirleme ve bu istasyonların optimal dağılımı üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmanın mevcut çalışmalardan farkı ihtiyaçlara göre yatırımcıların/kullanıcıların kolay karar almasına olanak sağlayacak esnek bir yapıda olmasıdır. Bu amaçla, iki optimizasyon yöntemi QT ve ÇKKV birleştirilerek, karar alabilecek ve amaca göre hızlı cevap verebilecek yöntem geliştirilmiştir. QT, şarj altyapısı kurulması planlanan bölgede belirlenen hedeflere göre kaç adet şarj istasyonunun beklentileri karşılayacağını hesaplanması için kullanılırken, üç farklı ÇKKV yöntemi şarj istasyonlarının kampüs içindeki otoparklara dağılımını tayin etmek için kullanılmıştır. Sonuçlara göre PROMETHEE ve SMART ile yapılan dağıtımın FAHP'ye oranla daha tutarlı çözümler ürettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışma herhangi bir destek almamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

Arslan, H. M., (2019). SMART-TOPSIS Hibrit Yöntemi İle Personel Seçimi: Demir-Çelik İşletmelerinde Bir Uygulama: *The 4th In Traders International Conference on International Trade Proceeding Book*, Sakarya, Turkey, 115-126.

Afolayan, A. H., Ojokoh, B. A., Adetunmbi, A. O., (2020). Performance analysis of fuzzy analytic hierarchy process multi-criteria decision support models for contractor selection. *Scientific African*, 9, e00471.

Avdan, E., (2018). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile E-Atık Geri Kazanım Tesisi Yer Seçimi. *Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli*, 159 s.

Awasthi, A., Venkitesamy, K., Padmanaban, S., Selvamuthukumar, R., Blaabjerg, F., Singh, A. K., (2017). Optimal Planning of

Electric Vehicle Charging Station at the Distribution System Using Hybrid Optimization Algorithm. *Energy*, 133, 70–78.

Buckley, J., (1985). Fuzzy Hierarchical Analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 9, 471.

Chen, Y., Okudan, G. E., Riley, D. R., (2010). Decision Support for Construction Method Selection in Concrete Buildings: Prefabrication Adoption and Optimization. *Automation in Construction*, 19, 665–675.

Genç, T., Urfaloğlu, F., (2013). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Türkiye' nin Ekonomik Performansının Avrupa Birliği Üye Ülkeleri ile Karşılaştırılması. *M.U. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 35, 329–329.

Kırcalı, Ş., (2019). Çok Kriterli Karar Verme Analizi Kullanılarak CBS Tabanlı Güneş Tarlası Yer Seçimi: Antalya İli Örneği. *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Ana Bilim Dalı, Antalya*, 81s.

Küçüköğlu, S., (2020). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Türkiye' de Nükleer Santral Kuruluş Yeri Seçimi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi / Sosyal Bilimler Enstitüsü / İşletme Ana Bilim Dalı, İstanbul*, 138s.

Micari, S., Polimeni, A., Napoli, G., Andaloro, L., & Antonucci, V., (2017). Electric Vehicle Charging Infrastructure Planning in a Road Network. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 98–108.

Patel, M. R., Vashi, M. P., Bhatt, B.V., (2017). SMART- Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities. *New Horizons in Civil Engineering (NHCE 2017)*, 1–6.

Rajabi, F., Jahangiri, M., Molaeifar, H., Honarbakhsh, M., Farhadi, P., (2018). Occupational Stress Among Nurses and Pre-Hospital Emergency Staff: Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Method. *EXCLI Journal*, 17, 808–824.

Soltani, A., Marandi, E. Z., (2011). Hospital Site Selection Using Two-Stage Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Process. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 5, 32-43

Wang, Z., Liu, P., Xin, T., (2010). Optimizing the Quantity of Off-Broad Charger for Whole Vehicle Charging Station. *Proceedings - 2010*

International Conference on Optoelectronics and Image Processing, ICOIP 2010, 2, 93–96.

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 Sistemin Geliştirilmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Tesisleri Bilim Dalı, 137s.*