

Araştırma Makalesi

Elektrikli araç şarj istasyonlarının optimum yerleşimine yönelik coğrafi analiz araçlarının geliştirilmesi

Arif Çağdaş Aydınoglu^{1,2*}, Tansu Çetin², Abdullah Uğur Topal², Süleyman Şişman¹

¹ Harita Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

² Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

*Correspondence: aydinoglu@gtu.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1525522

Özet: Elektrikli araçlar, iklim değişikliği ile mücadele, sıfır emisyon hedeflerine ulaşma, sürdürülebilir ulaşım ve enerji verimliliği gibi küresel konulara çevre dostu bir çözüm olarak görülmektedir. Gelişen üretim teknolojileri ve genişleyen satış pazarıyla elektrikli araçların yaygınlaşması beraberinde şarj ekosistemi kavramını getirmiştir. Sunulan bu çalışma, elektrikli araç şarj istasyonlarının uygun yerlere konumlandırılması için coğrafi analiz araçlarının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Şarj istasyonları yer seçiminde kritik rol oynayan kentsel parametrelerden çevresel, enerji, kentsel tesisler, sosyoekonomik özellikler ve ulaşım ana kriterler olmak üzere 32 kriter belirlenmiştir. Karmaşık coğrafi verilerin analiz edilmesini kolaylaştırmak ve karar verme sürecinde daha etkili bir yaklaşım benimsemek amacıyla Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri bir arada kullanılmıştır. Kriterlerin önem sıralaması 20 uzman karar vericiye uygulanan ankete göre yapılmış ve en iyi-en kötü yöntemi kullanılarak ağırlıkları hesaplanmıştır. Pendik ve Tuzla ilçeleri çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Model geliştirme ortamında 8 adet analitik araç geliştirilmiş, bunlar çeşitli coğrafi veri analiz tekniklerini içermekte ve yer seçimi için uygunluk haritalarının üretilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, farklı çalışma gruplarına uygulanan değerlendirme endeksi sistemi sonuçlarına göre öncelikleri belirlenen kriterler ve geliştirilen analiz araçları, elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi sürecinde karar vericilere ve politika yapıcılara geniş bir bakış açısı sunarak sürecin kapsamlı ve bilimsel bir yaklaşımla yönetilmesini kolaylaştırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Coğrafi bilgi sistemi, çok kriterli karar verme, elektrikli araç şarj istasyonu, en iyi-en kötü yöntemi, yer seçimi

Development of geographic analysis tools for optimal placement of electric vehicle charging stations

Abstract: Electric vehicles are seen as an environmentally friendly solution to global issues such as climate change, zero-emission targets, sustainable transportation, and energy efficiency. Their proliferation, driven by evolving production technologies and expanding sales markets, has introduced charging ecosystem concept. This study develops geographic analysis tools for optimal siting of electric vehicle charging stations. 32 criteria were identified, comprising environmental, energy, urban facilities, socioeconomic characteristics, and transportation as main criteria influencing location selection of charging stations. To facilitate analysis of complex geographic data and adopt a more effective approach in decision-making process, Geographic Information Systems and Multi-Criteria Decision Making techniques were combined. Criteria prioritization was based on a survey of 20 expert decision-makers, with weights calculated using best-worst method. Pendik and Tuzla districts were selected as study area. 8 analytical tools were developed using GIS model development platform; they encompass various geographic data analysis techniques and enable generation of suitability maps for location selection. Ultimately, this study facilitates comprehensive and scientifically managed decision-making process for selection of electric vehicle charging station locations by providing decision-makers and policymakers with a broad perspective based on results of evaluation index systems and developed analysis tools.

Keywords: Best-worst method, electric vehicle charging station, geographic information system, multi-criteria decision making, site selection

1. Giriş

Günümüzde artan şehirleşme ve nüfus yoğunluğu sebebiyle ortaya çıkan dünya enerji krizi ve yükselen küresel ısınma bilinci şehirlerin mevcuttaki ulaşım planında ve çevresel düzeninde değişikliği zorunlu hale getirmektedir. Bu bağlamda, şehirlerin sürdürülebilir kentsel ulaşım stratejileri, enerji verimliliği ve çevre dostu altyapılar gibi konulara odaklanması gerekmektedir. Çevresel etkileri azaltmak ve yaşanabilir kentler inşa etmek amacıyla toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi, bisiklet ve yaya yollarının genişletilmesi, araç paylaşımı modellerinin teşvik edilmesi gibi önlemlerin yanı sıra elektrikli araçların üretimi ve yaygınlaştırılması çevreye duyarlı projelerin başında gelmektedir.

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motora sahip türdeşlerinin aksine petrol ve türevi yakıtlara ihtiyaç duymazken; araçlarda bulunan lityum iyon ve benzeri pillerden oluşan setler sayesinde elektrik motoruna güç aktararak aracın sessiz şekilde çalıştırılması sağlanmaktadır. Bu anlamda elektrikli araçlar giderek artan motor güçlerine rağmen hava ve gürültü kirliliğine karşı doğa dostu profil sergilemektedir (Url-1).

Küresel araç pazarında elektrikli araç satışlarının gittikçe daha büyük paya sahip olduğu ve 2023 yılı raporlarına göre ilk 6 ay içerisinde %40 artışla toplam 6 milyon yeni araç sahiplerine teslim edildiği bilinmektedir (Irle, 2023). Bir başka pazar araştırması sonucuna göre elektrikli araç pazarının 2020'den 2027'ye kadar %33,6'lık bir bileşik büyüme oranıyla 2495,4 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Meticulous Market Research, 2022). 2050 net sıfır emisyon senaryoları dahilinde içten yanmalı motorlu araç satışının 2035 yılında durdurulması ve elektrikli araçların toplam pazar payının 2050 yılında %60 olması hedeflenmektedir (IEA, 2022). Ülkemizde ise 2022 yılında elektrikli araç sayısının da bir önceki yıla göre %132,2'lik bir artışla 14 bin 552'ye yükselirken, hibrit araçların sayısı da bir önceki yıla göre %55,3'lük bir artışla yaklaşık 135 bine ulaştığı raporlanmıştır (TÜİK, 2024).

Elektrikli araçların üretiminde, yeniden doldurulabilir bataryalar tercih edilmektedir. Bu sayede sürücüler, şarj istasyonları vasıtasıyla planladıkları seyahati mümkün kılacak enerjinin araçlarına oldukça kısa sürede aktarılmasını sağlayabilmektedir. Ancak, elektrikli araçların kullanımı adına yeterli şarj altyapısının olmaması, yüksek maliyetler, menzil endişeleri ve hala geleneksel içten yanmalı araçlara kıyasla daha az çeşitlilikte model bulunması gibi çeşitli zorluklar ve engeller bulunmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için devletlerin teşvik politikaları, şarj altyapısının genişletilmesi, mali destekler ve teknolojik gelişmeler gibi çeşitli önlemler alması gerekmektedir.

Elektrikli araçların yaygınlaşması, Avrupa'nın öncülük ettiği karbon salınım azaltma hedefini güvence altına almaktadır. Bu kapsamda gelişmiş ülkelerde 5, 10 ve 20 yıllık kalkınma planları dahilinde içten yanmalı motorlu araçların dönüşümlerinin tamamlanması için özel elektrikli araç şirketleriyle çalışmalar yapılmakta ve elektrikli araç üretici şirketler yeni marka ve modellerini otomotiv sektörüne sunmak üzere çalışmalarını sürdürmektedir (EU, 2020).

Elektrikli araçların yaygınlaşması, araç üretim teknolojilerinin iyileştirilmesi ve satış pazarının geliştirilmesiyle mümkün olduğu gibi en önemli rolün elektrikli araçların şarj ekosistemi teknolojileri olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Kapsamı; elektrik enerjisi üreticilerinden son kullanıcı elektrikli araç sahiplerine, elektrik şebekesi altyapısından Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarına (EAŞİ) uzanan şarj ekosisteminde yüksek verimli şarj istasyonlarının sayısının artması ve kolay erişilebilir olması, hızlı şarj istasyonlarının tasarlanıp kurulması başlıca ihtiyaçlardandır. Bu bağlamda elektrikli araçların yaygın olarak benimsenmesi için şarj istasyonlarının uygun kapasitede ve konumda yerleşimi son derece önemlidir.

Daha planlı, sürdürülebilir ve yaşanabilir şehirler için şehir yöneticileri, politikacılar ve karar vericiler, EAŞİ optimum yerleşimi stratejisi belirlerken ihmali mümkün olmayan; elektrikli araç sürücülerinin araç bataryası şarjının bitmesi, sürüş menzili ve coğrafi koşullar sebebiyle şarj istasyonlarına sınırlı erişim ile ilgili endişeleri dolayısıyla elektrikli araç satın alma sayısındaki azalma ihtimali, elektrik şebekesinin mevcut yükünde oluşacak mevsimsel talep değişkenliği, şebekede enerji arz güvenliği ve güç kalitesi problemlerini değerlendirerek ve nüfus, arazi yapısı, ulaşım ve erişilebilirlik gibi tüm kentsel parametreleri dikkate alarak bütüncül bir coğrafi bakış açısı ile karar vermelidir. Böylece elektrik şebekesinde alınacak önlemler, maliyet etkin kurulum metodolojileri ve uygun yatırım kararları değerlendirilebilecektir. Bu kapsamda, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) teknikleri kullanılarak EAŞİ için en uygun yer analizinin yapılması literatürde sunulan

metodolojilerden biridir. CBS konumsal verileri yakalamak, depolamak, analiz etmek ve görüntülemek için kullanılan bir bilgisayar sistemini ifade ederken; yer seçim analizlerinde kullanılan en önemli yaklaşımlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle konumsal verileri işleme ve analiz etme yeteneği ile EAŞİ yer seçiminde coğrafi faktörlerin dikkate alınmasını sağlarken; bu faktörleri haritalandırarak görsel olarak inceleme ve analiz etme imkanı sunar. ÇKKV tekniklerinin ise yer seçimi için önem derecesi birbirinden farklı olan kriterleri sıralamak ve karar sürecini rasyonel bir hale getirmek için kullanıldığı bilinmektedir. ÇKKV analizi kullanılarak CBS tabanlı yöntemin çalıştırılmasıyla EAŞİ gibi yer seçimi problemlerinde coğrafi kriterleri ve bunların ağırlıklarını dikkate alarak işlem yapma imkanı sağlayarak daha optimum ve bilimsel bir yaklaşım sunulmaktadır (Topal, Sisman ve Aydınoglu, 2023).

İstanbul gibi büyük bir metropol şehir için Elektrikli Taksi Şarj İstasyonu (ETŞİ) konum seçimi problemini ele alan bir çalışmada (Kaya, Alemdar ve Çodur, 2020), 6 ana kriter grubu ve 25 alt kriter belirlenmiş ve bunlar Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (fuzzyAHP) ile ağırlıklandırılmıştır. Kriterlerin konumsal analizi coğrafi bilgi sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve belirlenen istasyonların önceliği performans değerlerine göre Benzerlik İdeal Çözüme Göre Sıralama Tekniği (TOPSIS) kullanılarak sıralanmıştır. Önerilen metodolojiyle, İstanbul'da Avrupa yakasının güneydoğu ve Anadolu yakasının güneybatı kısmının ETŞİ için daha uygun olduğu görülmüş ve bu çözümün yüksek belirsizlik derecesi olan problemler için daha doğru olduğu sunulmuştur.

Etkili karar verme için CBS tabanlı yer seçimi modellerinin tasarlanması amacıyla EAŞİ yer seçimi uygulamasını akıllı şehir konseptinde yatırım planlaması sürecinde vaka çalışması olarak belirleyen bir çalışmada (Sisman, Ergul ve Aydınoglu, 2021) çevresel/coğrafi, ekonomik ve kentsellik olmak üzere 3 ana kriter grubu tarafından 15 kriter belirlenmiş, bu kriterlerin ağırlıkları ÇKKV teknikleriyle elde edilmiş ve bir model tasarlanmıştır. Bu model İstanbul'un Pendik ilçesindeki EAŞİ uygunluk haritasını analiz etmek için uygulanmış ve ilgili modellerin iyileştirilerek akıllı şehir yatırımlarında kentsel kaynakların etkileyici ve verimli kullanımı için entegre ve planlı bir yatırım mekanizmasının geliştirilebileceği vurgulanmıştır.

ÇKKV metotları ile EAŞİ'lerin optimum konumlandırılması üzerine Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde bulunan araç ve kullanıcı verileri ile gerçekleştirilen çalışmada (Asnaz ve Özdemir, 2021) ilk olarak araç giriş-çıkış verileri ve sürücülerin kullanım alışkanlıklarına dair anket sonuçları kullanılarak Kuyruk Teorisi (QT) ile kampüsteki otoparklara kurulması planlanan EAŞİ'lerin toplam sayısı tespit edilmiştir. Ardından kampüs içindeki otoparklar, şarj istasyonlarının yerleştirileceği alanlar olarak belirlenmiş ve otoparklara dağılım için otopark doluluk oranları, otopark kapasiteleri, trafo merkezine uzaklık gibi kriterler ÇKKV metotlarıyla çözümlenmiştir. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (FAHP) kullanılarak kriterler önceliklerine göre sıralanmış ve tüm alternatif konumlar Tercih Sıralama Organizasyon Metodu (PROMETHEE) ve Basit Çok Kriterli Değerlendirme Tekniği (SMART) yöntemleri ile sıralanarak karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir.

EAŞİ için en sürdürülebilir yerin seçilmesinde karar vericilerin öznel değerlendirmelerinden elde edilen çelişkili kriterlerin dikkate alınmasının önemi üzerine Pekin'in Changping bölgesinde yapılan bir çalışma (Guo ve Zhao, 2015) toplam 11 alt kriterle ilişkilendirilen çevresel, ekonomik ve sosyal kriterlerden oluşmaktadır. Burada çeşitli alternatiflerin kriter performansları ve kriter ağırlıkları, çevre, ekonomi, toplum, elektrik enerji sistemi ve ulaşım sistemleri alanlarından 5 uzman panel tarafından değerlendirilmiş ve Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak EAŞİ için yer alternatifleri sıralanmıştır. Karar vericilerin ekonomik kriterlerden daha çok çevresel ve sosyal kriterlere önem verdiği belirlenirken öznel değerlendirmelerinden kaynaklanan belirsizlik anlamlı olarak değerlendirilmiştir.

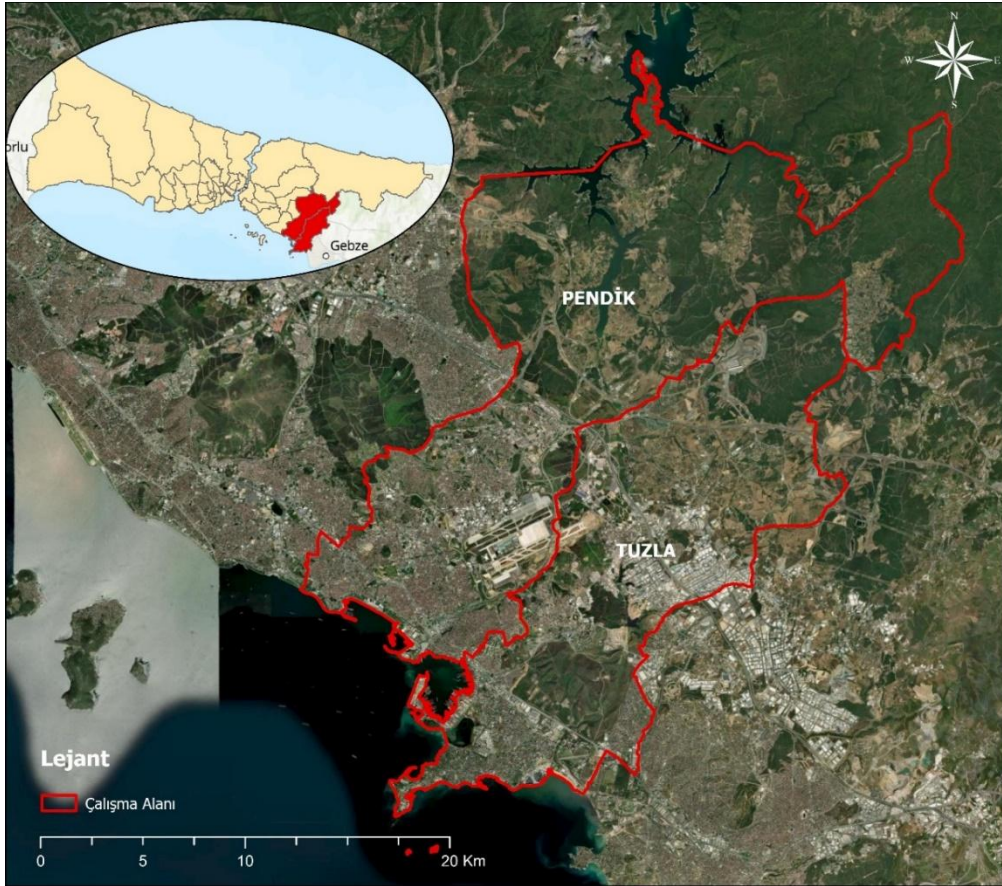
Özetle, CBS ile farklı ÇKKV yöntemlerinin bir arada kullanıldığı bir dizi çalışma literatürde bulunmaktadır. Bu çalışma ile EAŞİ'lerin optimum konumlarının seçimi için güvenilir bir coğrafi analiz aracı oluşturmak amaçlanmıştır. Bu kapsamda İstanbul ili Pendik ve Tuzla ilçeleri pilot bölge olmak üzere akademik literatürden, fizibilite araştırma raporlarından ve farklı alanlardaki uzman görüşlerinden yararlanarak Çevresel, Enerji, Kentsel tesisler, Sosyoekonomik özellikler, Ulaşım olmak üzere 5 ana kriter grubunda tanımlanan 32 kriter belirlenmiştir. Bu kriterlerin birbirine göre tercih oranları/öncelikleri karar verici 20 kişiye uygulanan değerlendirme endeksi sistemi (anket) ile belirlenmiş ve BWM (best-worst method) yöntemi ile kriterler ağırlıklandırılmıştır. Kriterlere ait veriler,

CBS platformunda yakınlık ve enterpolasyon gibi konumsal analizlerle işlenmiştir. Her bir kriter için oluşturulan analiz sonuçları birleştirilerek, EAŞİ yer seçimi için CBS tabanlı final uygunluk haritası çıkarılmıştır. Bu çalışma, sürdürülebilir kentsel ulaşım hedeflerine ulaşmada önemli bir yol haritası olurken EAŞİ'ler için hem kapasite hem de konumlandırma ile ilgili optimum kurulum metodolojilerini tanımlayan gelecekteki çok aşamalı çalışmalar adına motivasyon oluşturmaktadır.

Materyal ve metot

1.1. Çalışma alanının belirlenmesi ve verilerin temini

Hava, kara, deniz ve demir yolu ulaşım modlarını bir arada bulandıran hem kentsel yoğunluğa hem de kırsal unsurlara sahip olması sebebiyle Türkiye'de birçok yönüyle model olabilecek İstanbul iline bağlı Pendik ve Tuzla ilçeleri, çalışma alanı olarak belirlenmiştir ve Şekil 1'de gösterilmiştir. TÜİK tarafından açıklanan verilere göre, bu alanların toplam yüzölçümü 315 km²'dir ve nüfusu yaklaşık olarak 1 milyon kişidir. Bu bakımdan da birçok Avrupa şehrine denk büyüklükte ve yoğunlukta kentsel bir alan oluşturduğu söylenebilir.



Şekil 1. Çalışma alanı: İstanbul ili Pendik ve Tuzla ilçeleri.

EAŞİ'lerin optimum yer seçimi için literatürde geçen tüm kriterler irdelenmiş ve bu ilçeler ölçeğinde elde edilebilir verilere sahip kriterler seçilmiştir. Çevresel, enerji, kentsel tesisler, sosyoekonomik özellikler ve ulaşım olmak üzere 5 ana kriter çatısı altında 32 kriter tanımlanmıştır. Belirlenen kriterlere ait, yaklaşık son yılın verileri olduğu teyit edilerek veri sağlayıcılar tarafından servislerde sunulmuş mevcut ve güncel veri setleri toplanmış ve tek bir veri tabanında organize edilmiştir. Yol ağı, kavşaklar ve trafo merkezleri için OpenStreetMap (OSM, 2024) kaynağı kullanılmıştır. Ormanlar, yerleşim yerleri, su kaynakları ve yeşil alanlarla ilgili veriler ise Urban Atlas (UrbanAtlas, 2024) tarafından

sağlanmıştır. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verileri, AlosPalsar platformu (AlosPalsar, 2024) üzerinden elde edilmiştir. İlçelere ait sağlık kuruluşları, kültürel tesisler, akaryakıt (benzin) istasyonları, taksi durakları, otopark gibi veriler için İstanbul Büyükşehir Belediyesi Açık Veri Portalı (İBB, 2024) kullanılmıştır. Ayrıca bu portaldan elde edilen trafik verileri ile trafik hacmi verisi hesaplanmıştır. İlçe ve mahalle nüfusu, hane geliri, ulaşım harcamaları gibi veriler Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK, 2024) temin edilmiştir. Aktif EAŞİ verisi, şarj istasyonu kurulumu yapan firmaların kendi sitelerinden alınan haritaların karşılaştırmalı analiziyle Google My Maps (ZES, 2024; Eşarj, 2024) üzerinden elde edilmiştir. Elektrikli araç sahipliği verisi, TÜİK verilerine dayanarak elektrikli ve hibrit araç sayısının mahalle nüfus bilgilerine oranlanması yoluyla elde edilmiştir. Deprem verileri AFAD deprem tehlike haritasından (AFAD, 2024) alınmıştır. Hava kalitesi verisi Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı'ndan (T.C. ÇŞİDB, 2024) elde edilmiştir.

1.2. Elektrikli araç şarj istasyonları yer seçiminde etkili kriterler

Farklı çalışma gruplarına uygulanan anket sonuçlarına göre öncelikleri belirlenecek; akademik literatürden, fizibilite raporlarından ve uzman görüşlerinden yararlanılarak tespit edilmiş kriterler 5 ana kriter grubu altında toplanmış olup Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. EAŞİ yer seçiminde etkili kriterler

Ana kriterler		Alt kriterler
Çevresel	Çevresel faktörler	Eğitim
		Hava kalitesi
		Jeotehlike
		Ormanlara mesafe
		Su kaynaklarına mesafe
Enerji	Arazi kullanımı	Yerleşim bölgelerine mesafe
		Yeşil alanlara mesafe
		Elektrik trafo merkezlerine mesafe
		Sürdürülebilir enerji kaynağı potansiyeline mesafe
		Alışveriş tesislerine mesafe
Kentsel tesisler	Eğitim merkezlerine mesafe	İş yerlerine mesafe
		Kamu tesislerine mesafe
		Kültürel tesislere mesafe
		Sağlık kuruluşlarına mesafe
		Spor tesislerine mesafe
Sosyoekonomik özellikler	Maliyet	Araç sayısı
		Elektrik araç sahipliği
		Nüfus yoğunluğu
		Arazi maliyeti
		Hane gelir oranı
		İstasyon yapım maliyeti
		Ulaşım harcamaları

Tablo 1 (Devamı). EAŞİ yer seçiminde etkili kriterler

	Erişilebilirlik	Aktarım istasyonlarına mesafe
		Ana yollara mesafe
Ulaşım		Kavşak noktalarına mesafe
		Trafik hacmi
		Bakım ve servis tesislerine mesafe
		Akaryakıt istasyonlarına mesafe
	Hizmet altyapısı	Mevcut elektrikli araç şarj istasyonlarına mesafe
		Otoparklara mesafe
		Taksi duraklarına mesafe

1.3. En iyi-en kötü yöntemi (best-worst method)

Karar verme, bir dizi alternatif arasından bir seçenek belirlemeyi ve seçim yapmayı içerir. Bu seçim sürecinde çeşitli kriterler değerlendirilir. Bu nedenle, bu tür problemlere çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemleri denir. En İyi-En Kötü Yöntemi, Best-Worst Method, 2015 yılında Jafar Rezaei tarafından geliştirilen çok kriterli karar verme yöntemidir. Bu yöntem daha spesifik olarak, özellikle alternatiflerin değerlendirilmesi için objektif metrikler mevcut değilse alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, problemin ana hedefini karşılamak için bir çözüm bulmada kullanılan kriterlerin önemini (ağırlık) bulmak için de kullanılabilir. Bu amaçla kullanılacak yöntemin uygulama adımları şu şekilde sıralanmıştır (Rezaei, 2015):

Adım 1: Karar verme sürecinde kararın niteliğine bağlı olarak kullanılacak olan kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu adımda karar verici tarafından karar vermek için kullanılan n sayıda olmak üzere $\{C_1, C_1, \dots, C_n\}$ kriterleri belirlenmektedir.

Adım 2: Karar verme sürecinde kullanılacak olan kriterlere dayalı olarak en iyi (en çok istenen, en önemli) ve en kötü (en az istenen, en az önemli) kriterler belirlenmektedir.

Adım 3: Seçilen en iyi kriterin diğer tüm kriterlere göre önceliği/tercih oranı 1 ile 9 arasında bir sayı kullanılarak belirlenmektedir. Burada 1: eşit derecede önemli, 3: orta derecede daha önemli, 5: yüksek derecede önemli 7: çok daha yüksek derecede önemli, 9: son derece daha önemli olarak tanımlanmıştır. Bu adımın sonucunda en iyiden diğerlerine doğru ilerleyen Best-Others (AB) adı verilen bir vektöre ulaşılmaktadır. A_B olarak ifade edilen vektör içerisindeki a_{Bj} , en iyi B kriterinin j kriterine göre önceliğini/tercihini göstermektedir ve Denklem (1)'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (1)$$

Burada a_{BB} , 1 değerini almaktadır. Bu da en önemli kriterin kendisiyle karşılaştırıldığı anlamına gelmektedir.

Adım 4: Diğer tüm kriterlerin tercih edilen en kötü kriterine göre önceliği 1 ile 9 arasında bir sayı kullanılarak belirlenmektedir. Bu adımın sonucunda diğer kriterlerin en kötüsüne sahip vektör elde edilir. A_W olarak ifade edilen vektör içerisindeki a_{jW} , j kriterinin en kötü kriter W kriterine göre önceliğini/tercihini göstermektedir ve Denklem (2)'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad (2)$$

Burada a_{WW} , 1 değerini almaktadır. Bu en kötü kriterin kendisiyle karşılaştırıldığı anlamına gelmektedir.

Adım 5: Karar verme sürecinde kullanılacak olan kriterlerin önem derecelerini belirlemek için ağırlıklar atanması gerekmektedir. Bu adımda her bir kriter için en uygun ağırlık $(W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*)$

belirlenmektedir ve maksimum mutlak farkların en aza indirildiği bir çözüm gerekir. Bunu sağlayacak şekilde kriterlerin optimum ağırlıkları belirlenmektedir. Kriterler için en uygun ağırlık, her bir W_B/W_j ve W_j/W_W çifti için sırasıyla $W_B/W_j = a_{Bj}$ ve $W_j/W_W = a_{jW}$ olarak tanımlanmaktadır. Maksimum mutlak farkların minimize edildiği $\{|W_B - a_{Bj}W_j|, |W_j - a_{jW}W_W|\}$ bir j kriteri bulunmalıdır. Bu problem aşağıdaki gibi *min-max* modeline dönüştürülmüştür:

$$\min \max_j \{|W_B - a_{Bj}W_j|, |W_j - a_{jW}W_W|\} \quad (3)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (4)$$

$$W_j \geq 0 \text{ ve } \forall j \text{ için} \quad (5)$$

Model denklemi doğrusal programlama problemi olarak çözümlenmiştir:

$$\min \xi^L \quad (6)$$

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j \text{ için} \quad (7)$$

$$\left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \forall j \text{ için} \quad (8)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (9)$$

$$W_j \geq 0 \text{ ve } \forall j \text{ için} \quad (10)$$

Belirlenen amaç fonksiyonu kısıtlar altında çözüldüğünde optimum ağırlıklar $(W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*)$ ve tutarlılık oranı değeri ξ elde edilmektedir. ξ değeri, yapılan analizlerin tutarlılık oranlarını göstermektedir. Bu değer arttıkça kriter karşılaştırmalarının daha az güvenilir ve tutarlılıklarının zayıf olduğu, azaldıkça ise tutarlılık oranlarının yüksek olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

2. Bulgular ve tartışma

2.1. Kriter ağırlık düzeylerinin belirlenmesi

Çevresel, Enerji, Kentsel tesisler, Sosyoekonomik özellikler, Ulaşım, ana kategorilerinde tanımlanan 32 kriter BWM yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Bu yöntemde ilk olarak karar verme sürecinde kullanılacak olan kriterler arasından en iyi (en çok istenen, en önemli) ve en kötü (en az istenen, en az önemli) kriterler karar verici 20 kişi tarafından belirlenmiş, ardından en iyi kriteri diğer kriterlerle ve diğer tüm kriterleri en kötü kriterle karşılaştıran karşılaştırmalar 1 ile 9 arasında tanımlı sayılar kullanarak yapılmıştır. Son olarak yöntemin geliştiricisi tarafından sunulmuş olan, kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için maksimum matematiksel bir model ve yöntemin güvenilirliğini kontrol etmek için tutarlılık oranı üzerine kurulu BWM çözücüsü kullanılarak her bir ana kriterin ve alt kriterlerin ağırlıkları ortalaması hesaplanmıştır. Tablo 2'de kriterlerin sahip oldukları ağırlık değerleri gösterilmiştir. Bu tablo incelendiğinde en yüksek önem düzeyine sahip ana kriter grubu 0,2798 ile Ulaşım olurken, en düşük önem düzeyine sahip ana kriter grubu 0,1444 ile Sosyoekonomik özellikler olmuştur. Alt kriterler incelendiğinde en yüksek ağırlık değerine (0,1208) hizmet bölgesindeki elektrik trafo merkezine olan mesafe kriteri sahipken, en düşük ağırlık değerine (0,0067) taksi duraklarına mesafe kriteri olmuştur.

Tablo 2. EAŞİ yer seçiminde etkili kriterlerin ağırlıkları

Ana kriterler		Alt kriterler	Ağırlık
Çevresel (0,1582)	Çevresel faktörler (0,0978)	Eğim	0,0457
		Hava kalitesi	0,0256
		Jeotehlike	0,0275
	Arazi kullanımı (0,0603)	Ormanlara mesafe	0,0084
		Su kaynaklarına mesafe	0,0071
		Yerleşim bölgelerine mesafe	0,0304
	Yeşil alanlara mesafe	0,0134	
Enerji (0,2171)	Elektrik trafo merkezlerine mesafe (0,1133)		0,1208
	Sürdürülebilir enerji kaynağı potansiyeline mesafe (0,1038)		0,0963
Kentsel tesisler (0,2005)	Alışveriş tesislerine mesafe (0,0519)		0,0578
	Eğitim merkezlerine mesafe (0,0215)		0,0211
	İş yerlerine mesafe (0,0425)		0,0362
	Kamu tesislerine mesafe (0,0286)		0,0279
	Kültürel tesislere mesafe (0,0206)		0,0216
	Sağlık kuruluşlarına mesafe (0,0233)		0,0229
	Spor tesislerine mesafe (0,0122)		0,0128
Sosyoekonomik özellikler (0,1444)	Araç kullanımı (0,0829)	Araç sayısı	0,0144
		Elektrik araç sahipliği	0,0394
		Nüfus yoğunluğu	0,0179
	Maliyet (0,0615)	Arazi maliyeti	0,0133
		Hane gelir oranı	0,0182
		İstasyon yapım maliyeti	0,0266
	Ulaşım harcamaları	0,0146	
Ulaşım (0,2798)	Erişilebilirlik (0,1863)	Aktarım istasyonlarına mesafe	0,0290
		Ana yollara mesafe	0,0693
		Kavşak noktalarına mesafe	0,0328
	Hizmet altyapısı (0,0935)	Trafik hacmi	0,0689
		Bakım ve servis tesislerine mesafe	0,0179
		Akaryakıt istasyonlarına mesafe	0,0135
	Mevcut elektrikli araç şarj istasyonlarına mesafe	0,0298	
	Otoparklara mesafe	0,0119	
	Taksi duraklarına mesafe	0,0067	

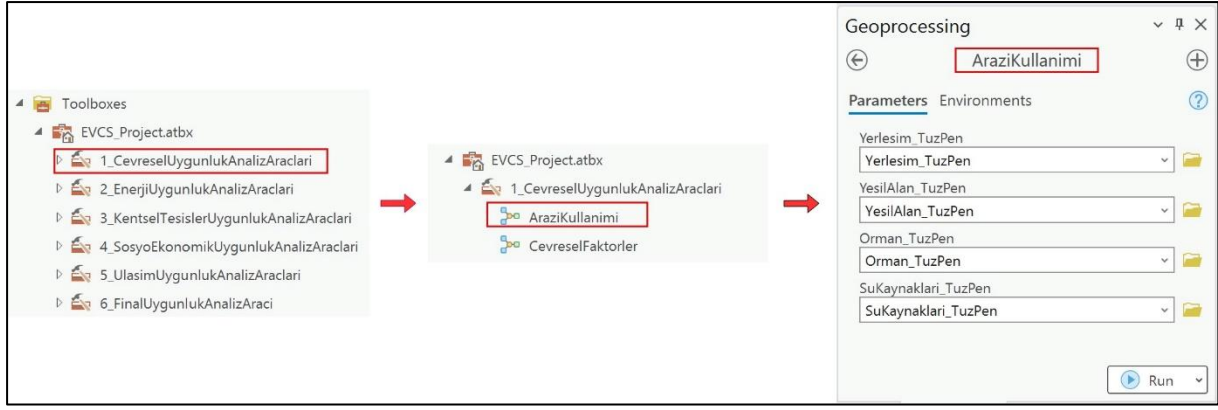
2.2. Elektrikli araç şarj istasyonları yer seçimi analiz araçlarının geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında belirlenen EAŞİ optimum yer seçiminde değer kriterlerinin analizi ve parametrik değer hesaplarının yapılabilmesi için coğrafi analiz araçları geliştirilmiştir. Bu araçlar, ArcGIS Model Builder platformunda oluşturulmuş ve çeşitli vektör (Euclidean Distance) ve raster (Inverse Distance Weighting) tabanlı coğrafi analiz teknikleri tanımlanarak iş akışlarının birleştirilmesiyle geliştirilmiştir. Şekil 2’de örnek olarak arazi kullanımı alt kriteri için model arayüzü verilmiştir.



Şekil 2. Analiz modeli arayüzü: arazi kullanımı alt kriter örneği.

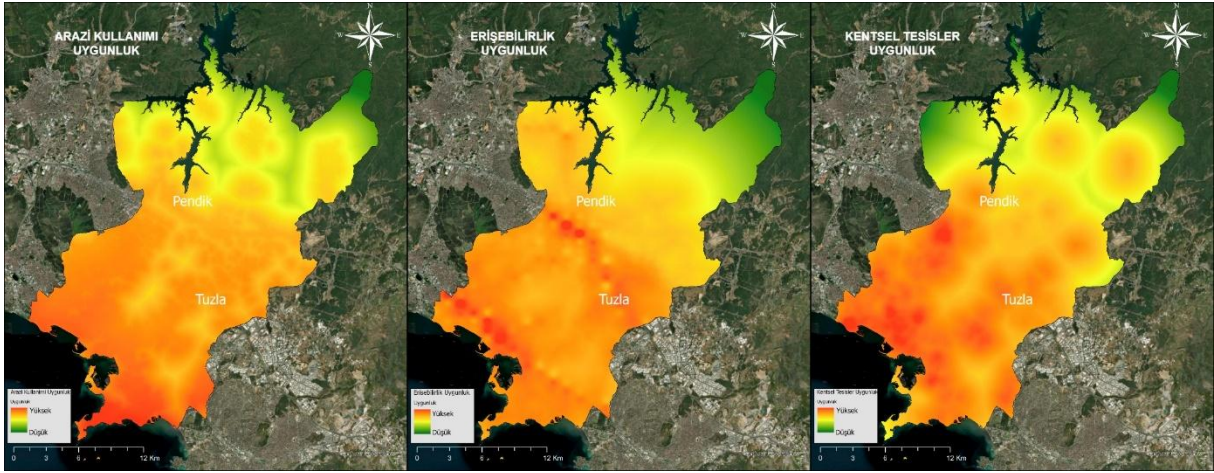
Bu bağlamda, Çevresel ana kriter grubu için çevresel faktörler ve arazi kullanımı; Enerji ana kriter grubu için enerji, Kentsel Tesisler ana kriter grubu için kentsel tesisler, Sosyoekonomik Özellikler ana kriter grubu için araç kullanımı ve maliyet; Ulaşım ana kriter grubu için erişilebilirlik ve hizmet altyapısı olmak üzere toplamda 8 adet analiz aracı geliştirilmiştir. Çevresel Uygunluk Analiz Araçlarının altındaki Arazi Kullanımı analiz aracının parametre değer ekranı ise Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Analiz aracı parametre değer ekranı: arazi kullanımı aracı örneği.

2.3. Elektrikli araç şarj istasyonları yer seçimi analiz araçlarının geliştirilmesi

Kriterlere ait veri kümeleri, Euclidean Distance ile yapılan yakınlık analizi, Inverse Distance Weighting (IDW) yöntemi ile yapılan enterpolasyon ve eğim gibi coğrafi analiz yöntemleri kullanılarak sonraki aşama için hazır hale getirilmiştir. Ardından verileri karşılaştırılabilir hale getirmek için 0-1 aralığında bulanık mantık üyelikleri kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te, bazı kriterlere ilişkin konumsal analiz sonucu elde edilen haritalar örnek olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Analiz araçları ile üretilen örnek haritalar.

Haritaların üretiminden sonra, ana kriterler olarak kabul edilen Çevresel, Enerji, Kentsel tesisler, Sosyoekonomik özellikler ve Ulaşım'a yönelik gerçekleştirilen konumsal analizlerin sonuçları, ilgili kriterlerin ağırlıklarına göre birleştirilerek EAŞİ Uygunluk Haritası oluşturulmuş ve Şekil 5'te verilmiştir. Bu harita, çeşitli faktörlerin coğrafi dağılımını göstererek, EAŞİ yer seçimi sürecinde karar vericilere önemli bilgiler sağlamaktadır.

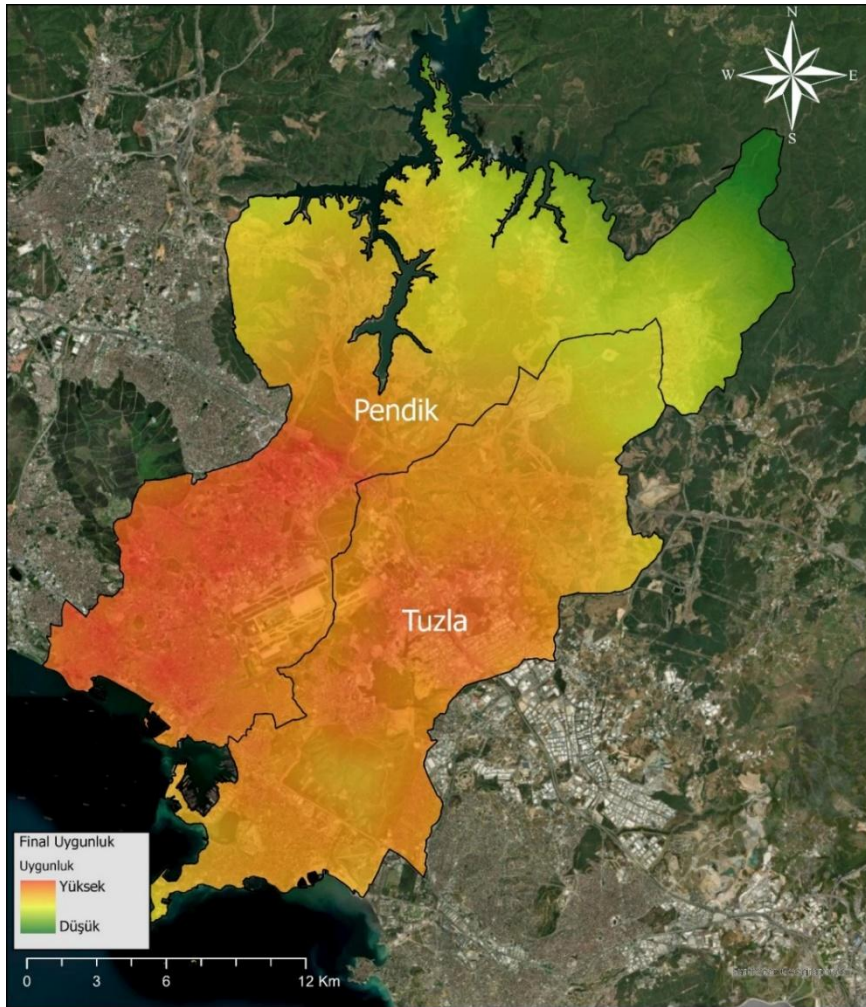
3. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada, iklim değişikliği, sıfır emisyon ve sürdürülebilir ulaşım hedefleri kapsamında önemli bir adım olarak görülen EAŞİ yer seçimine yönelik coğrafi analiz araçları geliştirilmiştir. Bu araçlar, karmaşık analiz süreçlerini otomatikleştirmek, iş akışlarını yönetmek ve tekrarlanabilirliği sağlamak için güçlü bir araçtır. Araçların geliştirilmesi öncesinde, EAŞİ yer seçimini etkileyen kriterler belirlenmiştir. Bu kriterler, Çevresel, Enerji, Kentsel tesisler, Sosyoekonomik özellikler ve Ulaşım olmak üzere 5 ana kriter çatısı altında 32 kriter olarak tanımlanmıştır. Kriterlerin birbirleriyle olan tercih oranları ve

öncelikleri, 20 karar vericiye uygulanan değerlendirme endeksi sistemi ile belirlenmiş ve BWM kullanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır.

Geliştirilen araçların test edilebilmesi için İstanbul Pendik ve Tuzla ilçesinde EAŞİ yer seçimi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu pilot alan, hem İstanbul'un diğer ilçeleri hem de diğer bölgeler için referans teşkil edebilecek bir ölçekte bulunmaktadır. Ek olarak, bu ilçeler hem şehir içi hem de şehirler arası ulaşım akslarına ve farklı ulaşım modlarına bağlıdır, bu da elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi için daha kapsamlı ve genel bir araştırma yapılması için uygun bir alan olduğunu göstermektedir.

Uygulama sürecinde, kriter kategorileri için parametrik değerler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, bu değerler kullanılarak en uygun EAŞİ yerleri belirlenmiştir. Kriterlere yönelik gerçekleştirilen konumsal analizlerin sonuçları, ilgili kriterlerin ağırlıklarına göre birleştirilerek EAŞİ Uygunluk Haritası elde edilmiş ve EAŞİ yerleşimi için ilçelerin kamusal alan yoğunluğu olan bölgelerinin kırsal bölgelerine göre daha uygun olduğu gözlemlenmiştir. Uygulama sonuçları, ilgili kriterleri temsil eden coğrafi veri altlıklarının varlığı durumunda, geliştirilen analitik analiz araçlarının EAŞİ yer seçimi sürecinin otomasyonunda başarıyla kullanılabilceğini göstermektedir.



Şekil 5. EAŞİ yer seçimi için uygunluk haritası.

Bu çalışmada belirlenen kriterler ve geliştirilen analiz araçları, yerel yönetimler, politika yapıcılar ve karar vericiler için sürdürülebilir kentlerin inşası ve elektrikli araç kullanımının teşviki gibi süreçlerde önemli bir kılavuz olacaktır. Örneğin, bir belediye, ilgili hizmet birimlerinden temin ettiği sürekli güncel veriyi erişilebilir kılarak EAŞİ'lerin optimum yerleşimi için analiz yaparken belediye ulaşım dairesi özelinde fizibilite faaliyeti gerçekleştirmiş olur ve yalnızca bugüne göre değil gelecek veri projeksiyonlara göre tahmin yoluyla planlamalar yapabilir. Böylece yerel yönetim, vatandaşların

bireysel elektrikli araç kullanımını desteklerken toplu taşıma hizmetlerinin de elektrikli araçlarla gerçekleştirilmesini sağlayabilir ve ayrıca durak yeri optimizasyonu ile şarj istasyonu yerleşim algoritmasını geliştirilebilir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizin farklı ilçelerde yapılacak diğer uygulamalarla karşılaştırılmasıyla ortaya çıkabilecek yeni çalışmalar ve şehirler arası otoyollarda yol ağı dikkate alınarak yapılacak EAŞİ için yer seçimi algoritmalarının geliştirilmesi mümkün görülmektedir.

Bu çalışma, artan elektrikli araç sayısı ile aynı anda ve araç kullanıcılarının şarj etme alışkanlıklarına bağlı olarak öngörülemez zaman dilimlerinde araçların şarj olması sebebiyle elektrik şebekesinin mevcut yükünde oluşacak mevsimsel talep değişkenliği ve şebekede enerji arz güvenliğinde problemleri; hızlı şarj imkanı sunarken şarj istasyonunun yüksek güç talebi nedeniyle elektrik şebekesine ani yük getirme ve dolayısıyla trafo ömürlerinin kısılması, trafo kapasitelerinin yükseltilmesi gibi önemli miktarda maliyet potansiyeli; mevcut elektrik şebeke sistemlerinin ekstra yükleri uzun süre kaldıracak şekilde tasarlanmamış olmasından kaynaklı elektrikli araçlar şarj edilirken faz ve gerilim dengesizlikleri, harmonik akım bozulması, güç kaybı gibi güç sistemlerinde meydana gelebilecek diğer sorunları gibi EAŞİ'lerin elektrik şebekesi üzerine etkilerinin değerlendirilmesiyle şarj istasyonlarının uygun kapasitede ve konumda yerleşimi için yeni stratejilerin geliştirilebilmesi için gelecek motivasyonu oluşturmaktadır.

Elektrikli araçların sayısının hızla artması ve şarj altyapısının gelişmesiyle birlikte, şarj istasyonlarının gelecekte üstleneceği rol daha kritik hale gelmektedir. Örneğin, enerji talebini karşılamak için güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen şarj istasyonları, daha temiz bir enerji altyapısına katkıda bulunarak karbon emisyonunu düşürülebilir. Şebeke üzerindeki yük yönetimi açısından elektrikli araçların şarj işlemi, yoğun olmayan saatlere göre planlanabilir; bu sayede şebeke dengesi korunarak enerji arz-talep yönetimi daha verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Örneğin, şarj istasyonlarında akıllı ücretlendirme sistemleri ile belirli saatlerde daha düşük maliyetle şarj yapılması teşvik edilerek kullanıcılar yönlendirilebilir. Ayrıca devlet teşvikleri ile şarj istasyonlarının kurulum ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi hem bireysel hem de toplu taşımada elektrikli araç kullanımını teşvik eden sürdürülebilir bir ulaşım ağına katkıda bulunabilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Arif Çağdaş Aydınoglu: Araştırma tasarımı, Metodoloji geliştirilmesi

Tansu Çetin: Literatür araştırması, Makale metni hazırlanması

Abdullah Uğur Topal: Verilerin hazırlanması, veri analizi, görselleştirme

Süleyman Şişman: Verilerin hazırlanması, veri analizi

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma YÖK – ADEP 2024 programı 2024-A-113-09 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Kaynaklar

AlosPalsar. (2024). ALOS PALSAR. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar>

Asnaz, M. S. K. ve Özdemir, B. (2021). Elektrikli araç şarj istasyonlarının çok kriterli karar verme yöntemleri ile optimal konumlandırılması. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 4(2), 175-187. doi: 10.51513/jitsa.1015108.

- Eşarj.** (2024). Eşarj İstasyon Haritası. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://esarj.com/harita>
- AFAD.** (2024). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları. Erişim:15 Ocak 2024, <https://tdth.afad.gov.tr>
- T.C. ÇŞİDB.** (2024). Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://sim.csb.gov.tr/SERVICES/airquality>
- Rezaei, J.** (2015). Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method. *Omega*, 53, 49-57. doi: 10.1016/j.omega.2014.11.009.
- EU.** (2020). *European Electric Vehicle Factbook*. Erişim: 10 Ocak 2024, <https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-EU-Factbook-2020.pdf>
- Guo, S. and Zhao, H.** (2015). Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective. *Applied Energy*, 158, 390-402. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.082.
- IEA.** (2022). *By 2030 EVs represent more than 60% of vehicles sold globally, and require an adequate surge in chargers installed in buildings*. Erişim: 10 Ocak 2024, <https://www.iea.org/reports/by-2030-evs-represent-more-than-60-of-vehicles-sold-globally-and-require-an-adequate-surge-in-chargers-installed-in-buildings>.
- Irle, R.** (2023). *Global EV sales for 2023*. Erişim: 10 Ocak 2024, [https://ev-volumes.com/news/ev/global-ev-sales-for-2023/#:~:text=A%20total%20of%2014%2C2,Range%20Extender%20EVs%20\(EREV\)](https://ev-volumes.com/news/ev/global-ev-sales-for-2023/#:~:text=A%20total%20of%2014%2C2,Range%20Extender%20EVs%20(EREV))
- İBB.** (2024). İBB Açık Veri Portalı. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://data.ibb.gov.tr>
- Kaya, Ö., Alemdar, K. D., and Çodur, M. Y.** (2020). A novel two stage approach for electric taxis charging station site selection. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102396. doi: 10.1016/j.scs.2020.102396.
- Meticulous Market Research.** (2022). *Electric Vehicle Market to Grow at a CAGR of 33.6% from 2020 to Reach \$2,495.4 Billion by 2027 - Market Size, Share, Forecasts, & Trends Analysis Report with COVID-19 Impact by Meticulous Research*. Retrieved January 10, 2024, from [prnewswire.com](https://www.prnewswire.com/news-releases/electric-vehicle-market-to-grow-at-a-cagr-of-33-6-from-2020-to-reach-2-495-4-billion-by-2027---market-size-share-forecasts--trends-analysis-report-with-covid-19-impact-by-meticulous-research-301499046.html). <https://www.prnewswire.com/news-releases/electric-vehicle-market-to-grow-at-a-cagr-of-33-6-from-2020-to-reach-2-495-4-billion-by-2027---market-size-share-forecasts--trends-analysis-report-with-covid-19-impact-by-meticulous-research-301499046.html>
- OSM.** (2024). Open Street Map. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://www.openstreetmap.org>
- Sisman, S., Ergul, I., and Aydinoglu, A.C.** (2021). Designing GIS-based site selection model for urban investment planning in smart cities with the case of electric vehicle charging stations. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 515-522. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W5-2021-515-2021.
- Topal, A. U., Sisman, S., and Aydinoglu, A.C.** (2023). Developing An Implementation Approach For Electric Vehicle Charging Station Location Selection For Sustainable Urban Transportation: The Case Of Pendik and Tuzla Districts. *V. International Cappadocia Scientific Research Congress*, Nevşehir, Türkiye, November 5-7, 2023.
- TÜİK.** (2024). Türkiye İstatistik Kurumu İstatistik Veri Portalı. Erişim: 10 Ocak 2024, <https://www.data.tuik.gov.tr>
- UrbanAtlas.** (2024). Urban Atlas. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://land.copernicus.eu/en/products/urban-atlas>

Url-1 <<https://suvmodelleri.com/elektrikli-araclarin-avantajlari>>, erişim tarihi 10.01.2024.

ZES. (2024). Şarj İstasyonları. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://zes.net/sarj-istasyonlari>