

## Elektrikli Araç Şarj İstasyon Yerlerinin Akış Yakıt İkmal Yer Modeli Kullanılarak Belirlenmesi

Sena Dörtköşe<sup>ID\*1</sup>, Harun Reşit Yazgan<sup>ID\*2</sup>, Serap Ercan Cömert<sup>ID\*3</sup>

\*1,2,3 Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği, SAKARYA

(Alınış / Received: 08.05.2022, Kabul / Accepted: 26.07.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 23.08.2022)

### Anahtar Kelimeler

Çok Amaçlı Programlama,  
Elektrikli Araçlar,  
Yer Belirleme Problemi.

**Öz:** Dünyada elektrikli araçlara olan talebin artması ve elektrikli araçların gelişmekte olan bir pazar olması nedeniyle şarj istasyon konumlarının planlanmasını optimize etmek büyük önem arz etmektedir. Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaştırılması için ihtiyaç duyulan şarj istasyonları, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde bir sorun haline gelmektedir. Elektrikli araç şarj istasyonlarının en az maliyet ile en çok hizmeti sağlayacak şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Bu çalışmada Sakarya ili için elektrikli araçların şarj istasyon yerlerinin belirlenmesi problemi üzerinde durulmuştur. Probleme şarj istasyon kurulum maliyetleri en az, ilçeler arası tüm yolların akışı ise en çok olacak şekilde akış yakıt ikmal yer modeline dayanan çok amaçlı karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Çok amaçlı modelin çözümünde literatürde sıkça kullanılan ağırlıklı toplam metodu kullanılmıştır.

## Determination of Electric Vehicle Charging Station Locations Using the Flow Refueling Location Model

### Keywords

Multi-objective  
programming,  
Electric vehicles,  
Locating problem.

**Abstract:** It is important to optimize the planning of charging station locations due to the increasing demand for electric vehicles globally and the fact that electric vehicles are an emerging market. Charging stations, which are needed to expand electric vehicles, are becoming a problem, especially in developing countries such as Turkey. Electric vehicle charging stations should be positioned to provide the most service with the least cost. In this study, the problem of determining the charging station locations of electric vehicles for Sakarya province is emphasized. In the problem, a multi-purpose mixed-integer linear programming model based on the flow refueling location model is developed so that the charging station installation costs are the least and the flow of all roads between the districts is the highest. The weighted sum method, which is frequently used in the literature, solved the multi-objective model.

\*İlgili Yazar, email: senadrts@gmail.com

### 1. Giriş

Şehirlerdeki nüfus artışı ve bununla birlikte araç sayısındaki önemli artış, çok sayıda şehir içi ve şehirlerarası seyahati beraberinde getirmektedir. Bu artışın sonuçları olarak trafik sorunu ve buna bağlı atmosferik kirlilik karşımıza çıkmaktadır. Fosil yakıt kullanımı atmosferik kirliliğin ana nedenlerinden biridir. Fosil yakıtların ürettiği zehirli gazların çevreye verdiği zarar, elektrikli araçların kullanımı ile yönetilebilir. Artan nüfus ile birlikte ulaşımda kullanılan petrol ve türevleri, kentsel hava kirliliğinin yanında küresel ısınmayla birlikte ciddi çevresel problemlere yol açmıştır. Bu durum alternatif yakıtlı araçlar arasında, özellikle elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşmasına bağlı olarak istasyon yerlerinin belirlenmesi konusu araştırma konuları içinde popülerlik kazanmıştır.

Dünyada özellikle son 10 yılda elektrikli araçların pazar payı 41 kat artarak %8,3 e ulaşmıştır. 2021 yılında elektrikli araçlarda son 10 yılın en büyük yıllık büyümesi görülmüştür. Küresel elektrikli araç satışları 2021'de bir önceki yıla göre %108 artışla 6,75 milyona ulaşarak tüm zamanların en yüksek seviyesini görmüştür [1].

Elektrikli araçlara olan talebin artmasıyla ihtiyaç duyulan şarj istasyonlarına da talebin artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle yeterli şarj istasyonu altyapısına sahip olmak, bu teknolojinin piyasada tutulmasını gerekli kılmıştır. Yeterli şarj altyapısı sağlanırsa elektrikli araç sahiplerinin kilometre aralığı konusundaki mevcut endişeleri azaltılarak sürücülerin bu teknolojiye adaptasyonu artabilir. Şarj istasyonlarına erişim kolaylaştığında, elektrikli araçların benimsenme oranları, petrol talebi ve günün belirli saatlerinde elektrik tüketimi etkilenecektir [2].

Elektrikli araçların popülerlik kazanmasıyla şarj istasyon yerlerinin belirlenmesi ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar geliştirilmiştir. Bu çalışmalardan bahsedecek olursak: You ve Hsieh [3], elektrikli araçların menzili, şarj istasyonlarının yüksek altyapı maliyeti gibi sorunlarına işaret etmek için KTDP dayalı bir model önermişlerdir. Bu problemi çözmek için genetik algoritma ve hibrit sezgisel yaklaşım kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda ise, hibrit sezgisel yaklaşımın, diğer çözüm yöntemlerine kıyasla daha verimli olduğunu iddia etmişlerdir. Bouguerra ve Layeb [4], Tunus şehrini ele alarak, şarj istasyonlarının yerleşimi ve boyutlandırılması için 5 farklı tamsayılı doğrusal programlama modelleri önermişlerdir. Guo ve diğerleri [5], elektrikli taksilere batarya sağlayan altyapıların yerini belirlemeye yönelik, şarj ve batarya değişim istasyonlarının konum optimizasyonlarından oluşan iki alt problemi çözmek için minimum maliyetli model ve bir çözüm algoritması önermişlerdir. Önerilen model Çin'in Dalian şehrinde uygulanmıştır. Dinç ve diğerleri [6], şarj istasyonu sayısını ve her bölgenin en az bir şarj istasyonuna olan mesafesini ve şarj istasyonları arasındaki mesafeyi en aza indirmek için şarj istasyon yerlerinin belirlenmesine yönelik çok amaçlı matematiksel model geliştirmişlerdir. Model Eskişehir ilinde uygulanarak ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi ile çözmüşlerdir.

Elektrikli araç şarj istasyon yerlerinin belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda literatürde optimizasyon ile ilgili çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Optimizasyon tabanlı yaklaşımlar, talebin geometrik temsiline bağlı olarak nokta ve akış tabanlı olarak iki gruba ayrılır [7]. Nokta temelli yaklaşım noktalarla ifade edilen talebi karşılar. Nokta tabanlı yaklaşıma yönelik modellere P-medyan ve maksimum kapsama modelleri örnek olarak verilebilir. Akış tabanlı yaklaşım ise trafik akışları tarafından ifade edilen talebi karşılar. Akış yakalama konum modeli (AYKM) ilk olarak 1990 yılında, trafik akışı taleplerini karşılamak için marketler ve reklam panoları gibi tesisleri yol boyunca yerleştirmeye çalışan M. John Hodgson tarafından önerildi [8]. AYKM, yolda bir yakıt ikmali tesisi olduğunda, tüm trafik akışının yakalanabileceğini ve hedefe başarılı bir şekilde varılabileceğini varsaymaktadır. Ancak bu varsayımda, araçların maksimum sürüş mesafesi göz ardı edilmiştir. Akış yakalama konum tahsis modeline dayanarak, Kuby ve Lim [9], araçların en uzun seyahat mesafesini dikkate almış ve akış yakıt ikmal yer modelini geliştirmişlerdir.

Lim ve Kuby [10], hidrojen, etanol, biyodizel, doğal gaz veya elektrik gibi alternatif yakıtlı araçların istasyon yerlerini belirlemek için akış yakıt-ikmal yer modelini kullanmışlardır. Modelin çözümünde KTDP ek olarak ağgözlü toplama, ikameli ağgözlü toplama ve genetik algoritma olmak üzere üç sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Florida eyaletinde hidrojen yakıt ikmali istasyonlarını bulmak için geliştirdikleri algoritmaları uygulamışlardır. Bu algoritmaların karmaşık akış yakıt ikmal problemlerini çözmede etkili ve verimli olduğunu göstermişlerdir. Xylia ve diğerleri [11], elektrikli otobüslerin şarj istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi için Stockholm'un önerdiği otobüs ağını ele almışlardır. Yazarlar, sorunu çözmek için bir karışık tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Model, otobüs ağının ulaşım maliyetini en aza indirmeyi amaçlamıştır. He ve diğerleri [12], elektrikli araçların şarj istasyonlarının en uygun yerlerini bulmak için akış yakıt ikmali konum modeline dayalı iki seviyeli bir programlama modeli kullanmışlardır. Model, trafik akışının en çok olması amaçlanmıştır. Daha büyük problemler için sezgisel bir model oluşturularak her iki modelin sonuçları test edilmiştir. Honma ve Kuby [13], toplam seyahat süresini en aza indiren ve talepleri karşılayan iki farklı şarj istasyonu konum modellerini karşılaştırmışlardır. Bu amaçla, yol tabanlı akış yakıt-ikmal yer modelini ve düğüm tabanlı p-medyan modelini kullanmışlardır. Her iki modeli de Florida eyaletindeki hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının bulunmasında da uygulamışlardır.

Yukarıda verilen literatür araştırmasının özeti Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1** Literatür Araştırmasının Çözüm Yöntemleri Açısından Sınıflandırılması

Yazar	Kesin Çözüm Yöntemleri				Sezgisel Çözüm Yöntemleri			
	Karışık Tamsayı Programlama	Çok Amaçlı Model	Akış Yakıt İkmal Modeli	P-Medyan Problemi	Genetik Algoritma	Açgözlü İkame Algoritma	İkameli Açgözlü Toplam Algoritma	Açgözlü Toplam Algoritma
Hodgson (1990)			✓			✓		
Kuby ve Kim (2005)	✓		✓					
Lim ve Kuby (2010)	✓		✓		✓		✓	✓
You ve Hsieh (2014)					✓			
Xylia vd. (2017)	✓							
He vd. (2018)			✓					
Bouguerra ve Layeb (2019)	✓							
Honma ve Kuby (2019)	✓		✓	✓				
Guo vd. (2020)	✓							
Dinç vd. (2021)	✓	✓						

Bu çalışmada elektrikli araçların şarj istasyon yerlerinin belirlenmesi problemi incelenmiştir. Problem, istasyon kurulum maliyetleri en az, ilçeler arasındaki tüm yolların akışı en çok olacak şekilde çok amaçlı olarak ele alınmıştır. Akış yakıt ikmal modeline dayanan modelin çok amaçlı çözümünde ağırlıklı toplam metodu kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında çok amaçlı optimizasyon ve kullanılan çözüm metodu kısaca ele alınmıştır. Üçüncü bölümde çalışma kapsamında geliştirilen model açıklanmıştır. Dördüncü bölümde modelde kullanılan verilerin elde edilmesi ve probleme uygulanması açıklanmıştır. Son bölümde ise sonuç ve çıkarımlar sunulmuştur.

## 2. Çok Amaçlı Optimizasyon

Optimum değer veya en iyi çözüm, optimizasyon süreci ile bulunabilir. Optimizasyon problemleri, bir veya birden çok amaçlı olarak en çok veya en az değer aramayı içerir. Birden fazla amacı olan problemlere çok amaçlı optimizasyon adı verilir. Çok amaçlı optimizasyon, istenen birden fazla hedefin optimal çözüm değerlerini bulmayı ifade eder. Çok amaçlı optimizasyonda birçok modelin seçim ve uygunluk fonksiyonlarında kullandığı pareto kavramı ilk defa 1906 yılında Vilfred Pareto tarafından tanıtılmıştır [14]. Çok amaçlı optimizasyonda amaç fonksiyonunun bir vektörü vardır. Amaç fonksiyonunun her vektörü, çözüm vektörünün bir fonksiyonudur. Çok amaçlı optimizasyonda tüm amaçlar için tek bir en iyi çözüm yoktur, bunun yerine birkaç çözüm vardır.

Denklem (1)'de çok amaçlı bir optimizasyon probleminin genel gösterimi verilmiştir.

$$\text{Enk } [f_1(S), f_2(S), \dots, f_k(S)] \quad (1)$$

$$g_i(S) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$h_i(S) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

Denklem (2) m eşitsizlik, denklem (3) p eşitlik kısıtlarını göstermektedir.

$$\begin{cases} f_i(S) \leq f_i(S^*), & \forall i = 1, 2, \dots, k \\ f_j(S) \leq f_j(S^*), & \exists j \text{ için} \end{cases} \quad (4)$$

Karar değişkenleri  $S^*$  vektörü eğer 4'te belirtilen herhangi bir  $S$  mevcut değilse Pareto optimaldir. Başka bir deyişle, bu tanım, en az bir kriterde eşzamanlı bir artışa neden olmadan bazı kriterleri azaltacak uygun bir  $S$  karar değişkeni vektörü yoksa  $S^*$ 'nin Pareto optimal olduğunu söyler [15].

## 2.1. Ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi

Ağırlıklı toplam yöntemi, çok amaçlı optimizasyon probleminin tek amaçlı bir matematiksel optimizasyon problemi olarak oluşturulmasına izin verir. Bu yöntemde karar vericiler, hedefleri kendi tercihlerine göre önceliklendirme özgürlüğüne sahiptir. Çok amaçlı fonksiyonlar aşağıda gösterildiği gibi her amaç için belirlenen ağırlık katsayılarıyla tek amaçlı fonksiyona dönüştürülür.

Denklem (5)'te  $f_i$  amaç fonksiyonunu,  $w_i$  i. amaç fonksiyonunun ağırlığını ifade etmektedir.

$$Enb \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (6)$$

Her bir amaç fonksiyonu ( $f_i$ ) problemin kısıtları altında ayrı ayrı çözülür ve pozitif ideal çözümler (en iyi çözüm) bulunur. Daha sonra her bir çözümün karar değişkenleri girdi olarak girilir ve kalan amaç fonksiyonları dikkate alınarak model çözülür. Prosedür, tüm amaç fonksiyonları çözümlene kadar tekrarlanır. Tüm çözümler arasında, her bir amaç fonksiyonu için negatif ideal çözüm (en kötü) bulunur. Amaç fonksiyonları farklı ölçeklerde değişiklik gösterdiğinden, her bir amaç fonksiyonunu aynı ölçekte sunmak için normalleştirme süreci uygulanır. Denklem (7), hem en küçük hem de en büyük amaç fonksiyonları için normalleştirmeyi göstermektedir.

$$f'_i = \begin{cases} \frac{WS_{f_i} - f_i}{WS_{f_i} - BS_{f_i}'} & \text{en küçük amaç fonksiyonu için} \\ \frac{f_i - WS_{f_i}}{BS_{f_i} - WS_{f_i}'} & \text{en büyük amaç fonksiyonu için} \end{cases} \quad (7)$$

Denklem (7)'de  $f'_i$ , i. amaç fonksiyonunun normalleştirilmiş değerini,  $WS_{f_i}$   $f_i$  amaç fonksiyonunun en kötü çözümünü,  $BS_{f_i}$   $f_i$  amaç fonksiyonunun en iyi çözümünü ifade etmektedir.

## 3. Elektrikli Araç Şarj İstasyon Yerlerinin Belirlenmesi Problemi

Bu çalışmada elektrikli araçların şarj istasyon yerlerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Çalışma da optimum istasyon sayısının belirlenebilmesi için Kuby ve Lim [9] tarafından geliştirilmiş akış yakıt ikmal yer modeli geliştirilerek kullanılmıştır. Bu modele şarj istasyonu maliyetlerini en aza indirgeyen amaç fonksiyonu eklenmiştir. Bu sebeple problemimiz trafik akışını en çok, istasyon maliyeti en az olacak şekilde çok amaçlı modelle çözümlenmeye çalışılmıştır.

Akış Yakıt İkmal Yer Modeli, belirli bir ağ alanı üzerinde optimum yakıt ikmal istasyonu miktarını belirlemek için kullanılan modeldir. Model araçların izleyeceği sürüş menzili üzerinde yakıt ikmal yapılabilen başlangıç-hedef (O-D) çiftleri arasındaki trafik akışını dikkate alır. Hesaplamalarda kullanılacak olan modelin formülleri aşağıda verilmektedir:

$$Enb f_1 = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (8)$$

$$Enk f_2 = \sum_{k \in K} c_k x_k \quad (9)$$

$$\sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq y_q \quad \forall q \in Q \quad (10)$$

$$a_{hk} x_k \geq v_h \quad \forall h \in H ; k | a_{hk} = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} x_k = p \quad (12)$$

$$x_k, v_h, y_q \in \{0,1\} \quad \forall k, q, h \quad (13)$$

$q = 0 - D$  çiftlerinin indeksi (ve dolaylı olarak, her çift için en kısa yollar)

$Q =$  Tüm  $0 - D$  çiftlerinin kümesi

$f_q = 0 - D$  çifti ile  $q$  arasındaki en kısa yoldaki akış hacmi

$k =$  Potansiyel tesis yeri

$c_k =$  İstasyon maliyetleri

$K =$  Tüm potansiyel tesis konumlarının kümesi

$p =$  Yerleştirilecek tesis sayısı

$$y_q = \begin{cases} 1, & \text{eğer } f_q \text{ kapsanırsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{eğer tesis } k \text{ konumunda bulunuyorsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$h =$  Tesis kombinasyonlarının indeksi

$H =$  Tüm potansiyel tesis kombinasyonlarının kümesi

$$a_{hk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ tesisi } h \text{ kombinasyonundaysa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$b_{qh} = \begin{cases} 1, & \text{eğer tesis kombinasyonu } h, 0-D \text{ çifti } q \text{'da yakıt ikmali yapıyorsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$v_h = \begin{cases} 1, & \text{h kombinasyonundaki tüm tesisler açıksa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

Amaç fonksiyonu (8),  $p$  tesisleri ile yakıt ikmali yapılabilecek toplam akışı en üst düzeye çıkarır. Amaç fonksiyonu (9), şarj istasyon kurulum maliyetlerini en aza indirger. Kısıt (10), uygun bir tesis kombinasyonu ( $h$ ) seçilmedikçe  $q$  yolunun kapsanmasını önler. Kısıt (11),  $h$  kombinasyonundaki tüm tesisler açık olmadığı sürece  $v_h$ 'yi sıfırda tutar. Kısıt (12), açılan istasyon sayısının  $p$ 'ye eşitler. Kısıt (13), ikili kısıtlamaları sağlar.

#### 4. Uygulama

Bu çalışmada Sakarya ili için elektrikli araçların şarj istasyon yerlerinin belirlenmesi problemi ele alınarak çözülmüştür. Ele alınan problem çok amaçlı olarak modellenmiştir. Problemin amaçları yakıt ikmali yapabilecek akış hacminin en çok, şarj istasyon kurulum maliyetlerinin en az olmasıdır.

Yakıt ikmali yapabilecek akış hacminin maksimum olmasını amaçlayan fonksiyonda kullanılmak üzere oluşturulan veriler aşağıdaki tablolarda sunulmuştur. Tablo 2'de sunulan tüm potansiyel istasyon konumları ( $K$ ), Sakarya ilinin tüm ilçeleri olabileceği varsayımına göre belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Tüm potansiyel tesis konumları

Numara	$K$ : Tüm potansiyel istasyon konumları
1	Adapazarı
2	Serdivan
3	Akyazı
4	Erenler
5	Hendek
6	Karasu
7	Geyve
8	Arifiye
9	Sapanca
10	Pamukova
11	Ferizli
12	Kaynarca
13	Kocaeli

14	Söğütlü
15	Karapürçek
16	Taraklı

Tablo 3'te gösterilen tüm potansiyel tesis kombinasyonları ( $H$ ) ilçeler arası ulaşımda kullanılabilen fiziki yollardan oluşmaktadır.

**Tablo 3.** Tüm potansiyel tesis kombinasyonları

Numara	$H$ : Tüm potansiyel istasyon kombinasyonları
1	Adapazarı - Erenler - Arifiye - Sapanca
2	Serdivan - Sapanca
3	Adapazarı - Akyazı
4	Kaynarca - Karasu - Kocaali
5	Adapazarı - Hendek
6	Serdivan - Erenler
7	Akyazı - Hendek
8	Adapazarı - Erenler - Karapürçek
9	Akyazı - Erenler
10	Adapazarı - Söğütlü
11	Erenler - Arifiye
12	Adapazarı - Serdivan
13	Erenler - Arifiye - Sapanca
14	Erenler - Hendek
15	Adapazarı - Kaynarca
16	Karasu - Kocaali
17	Geyve - Pamukova
18	Adapazarı - Arifiye - Geyve - Taraklı
19	Adapazarı - Arifiye
20	Adapazarı - Erenler
21	Adapazarı - Arifiye - Serdivan
22	Adapazarı - Arifiye - Sapanca
23	Adapazarı - Arifiye - Geyve
24	Adapazarı - Erenler - Arifiye
25	Arifiye - Sapanca
26	Serdivan - Erenler - Arifiye
27	Adapazarı - Ferizli - Söğütlü
28	Adapazarı - Serdivan - Erenler - Arifiye
29	Adapazarı - Serdivan - Arifiye - Sapanca
30	Serdivan - Arifiye
31	Adapazarı - Arifiye - Geyve - Pamukova
32	Sapanca - Arifiye - Erenler - Karapürçek
33	Kocaali - Karasu - Ferizli - Söğütlü - Adapazarı - Akyazı - Hendek
34	Karasu - Ferizli - Söğütlü - Adapazarı - Erenler - Arifiye - Geyve - Taraklı
35	Erenler - Adapazarı - Söğütlü - Ferizli - Karasu

Tablo 4'te  $f_q$  değerinin belirlenmesinde kullanılmak üzere Sakarya'da bulunan tüm ilçelerin akaryakıt istasyon sayısı verileri sunulmuştur. Akaryakıt istasyon sayıları normalize edilerek ölçeklendirilmiştir.

**Tablo 4.** Akaryakıt istasyon sayısı verileri

İlçeler	Akaryakıt İstasyon Sayıları	Normalize edilmiş değerler
Adapazarı	33	0,160194
Serdivan	11	0,053398
Akyazı	23	0,11165
Erenler	18	0,087379
Hendek	14	0,067961
Karasu	15	0,072816
Geyve	21	0,101942
Arifiye	15	0,072816
Sapanca	4	0,019417
Pamukova	18	0,087379
Ferizli	5	0,024272

Kaynarca	7	0,033981
Kocaali	5	0,024272
Söğütlü	8	0,038835
Karapürçek	4	0,019417
Taraklı	5	0,024272
<b>Toplam</b>	<b>206</b>	<b>1</b>

Her bir istasyon için normalize edilmiş değerler hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$ND_i = A_i / \sum_{i=1}^n A_i \quad (14)$$

$A_i$  : i. ilçenin akaryakıt istasyon sayısı

$ND_i$  : i. ilçenin normalize edilmiş akaryakıt istasyon değeri

Problemde Sakarya ilinin tüm ilçelerine ulaşımı sağlayan belediye ve özel halk otobüs güzergahları, O-D çifti olarak kullanılmıştır. O-D çiftinin akış değerleri, Tablo 4'te verilen akaryakıt istasyon sayıları kullanılarak hesaplanmıştır.

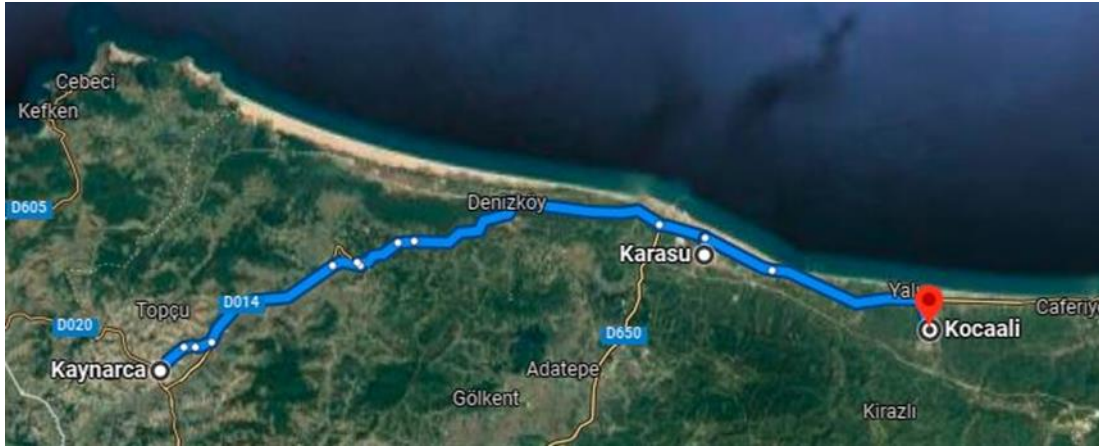
O-D çiftlerine ait akış değerleri hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$f_i = \sum_{i=0}^D A_i \quad (15)$$

O: O-D çifti için başlangıç istasyonu

D: O-D çifti için son istasyon

$f_i$  : i. istasyonun akış değeri



Şekil 1. q1 yolunun güzergahı

Örnek olarak Şekil 1. Kaynarca - Karasu - Kocaali güzergahını harita üzerinde göstermektedir. Kaynarca Karasu ve Kocaali için yolun akış değeri ( $f_q$ ), Tablo 4'te Formül 14 ile hesaplanan normalize edilmiş değerler konularak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\text{Kaynarca - Karasu - Kocaali} = 0,033981 + 0,072816 + 0,024272 = 0,13107$$

Tablo 5'te O-D çiftlerinin güzergahları ve güzergahların hesaplanan akış değerleri özetlenmiştir.

Tablo 5. O-D çiftleri ve akış değerleri

q	Yollar	Akış değerleri ( $f_q$ )
1	Kaynarca - Karasu - Kocaali	0,13107
2	Akyazı - Hendek	0,17961
3	Adapazarı - Söğütlü	0,19903
4	Adapazarı - Kaynarca	0,19417
5	Adapazarı - Serdivan	0,21359
6	Adapazarı - Söğütlü - Ferizli	0,2233
7	Adapazarı - Arifiye	0,23301
8	Adapazarı - Erenler	0,24757
9	Adapazarı - Arifiye - Sapanca	0,25243
10	Adapazarı - Arifiye - Serdivan	0,28641

11	Adapazarı - Erenler - Karapürçek	0,26699
12	Adapazarı - Söğütlü - Ferizli - Karasu - Kocaali	0,32039
13	Serdivan - Adapazarı - Erenler	0,30097
14	Adapazarı - Akyazı - Hendek	0,33981
15	Adapazarı - Arifiye - Geyve	0,33495
16	Adapazarı - Erenler - Arifiye	0,32039
17	Adapazarı - Erenler - Akyazı	0,35922
18	Adapazarı - Söğütlü - Ferizli - Karasu	0,29612
19	Adapazarı - Arifiye - Geyve - Taraklı	0,35922
20	Adapazarı - Erenler - Karapürçek - Akyazı	0,37864
21	Arifiye - Adapazarı - Söğütlü - Ferizli - Karasu - Kocaali	0,3932
22	Adapazarı - Arifiye - Geyve - Pamukova	0,42233
23	Adapazarı - Arifiye - Erenler - Akyazı - Hendek	0,5

Problemdede minimum olması hedeflenen elektrikli araçların şarj istasyon kurulum maliyetleri, şarj istasyonu açılacak ilçedeki arsaların metrekaresi birim fiyatlaması varsayımına dayandırılmıştır. Her bir ilçe için normalize edilmiş değerler hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$ND_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (16)$$

$M_i$  : i. ilçede akaryakıt istasyon kurulum maliyeti

$ND_i$  : i. ilçede akaryakıt istasyon kurulum maliyetinin normalize edilmiş değeri

İlçe bazında hesaplanan şarj istasyon kurulum maliyetleri Tablo 6'da gösterilmiştir [16].

**Tablo 6. İstasyon kurulum maliyetleri**

İlçeler	Kurulum maliyetleri(TL/m <sup>2</sup> )	Normalizasyon
Adapazarı	672	0,092651
Serdivan	1024	0,141183
Akyazı	382	0,052668
Erenler	485	0,066869
Hendek	337	0,046464
Karasu	393	0,054184
Geyve	178	0,024542
Arifiye	655	0,090307
Sapanca	769	0,106025
Pamukova	243	0,033503
Ferizli	300	0,041362
Kaynarca	210	0,028954
Kocaali	768	0,105887
Söğütlü	344	0,047429
Karapürçek	379	0,052254
Taraklı	114	0,015718
Toplam	7253	1

Çok amaçlı matematiksel modelin çözümünde ağırlıklı toplam metodu kullanılmıştır. Yakıt ikmali yapabilecek akış hacmini maksimum yapmayı amaçlayan  $f_1$  ile şarj istasyon kurulum maliyetinin minimum olmasını amaçlayan  $f_2$  amaç fonksiyonlarının, çok amaçlı matematiksel model çözümünde eşit derecede öneme sahip olduğu varsayılmıştır. Oluşturulan amaç fonksiyonların 16 ilçe için tek ve çok amaçlı optimum çözümleri Tablo 7'de sunulmuştur.

**Tablo 7. İstasyon yeri seçimi için optimum çözümler**

P (Yerleştirilecek tesis sayısı)	1. Amaç fonksiyonu	2. Amaç fonksiyonu	Çok amaçlı fonksiyon	
	Enb $f_1$ (akış hacmi)	Enk $f_2$ (kurulum maliyeti)	Enk = $f_1' + f_2'$ (ağırlıklı toplam)	
1	$f_1 = 0,35922$ (en iyi)	$f_2 = 0$ (en kötü)	$f_1 = 0,35922$	
	$f_2 = 0,09265$ (en kötü)	$f_2 = 0,01572$ (en iyi)	$f_2 = 0,01572$	
			$f_1' = 1$	$f_2' = 1$
			$f_{enk} = 1$	



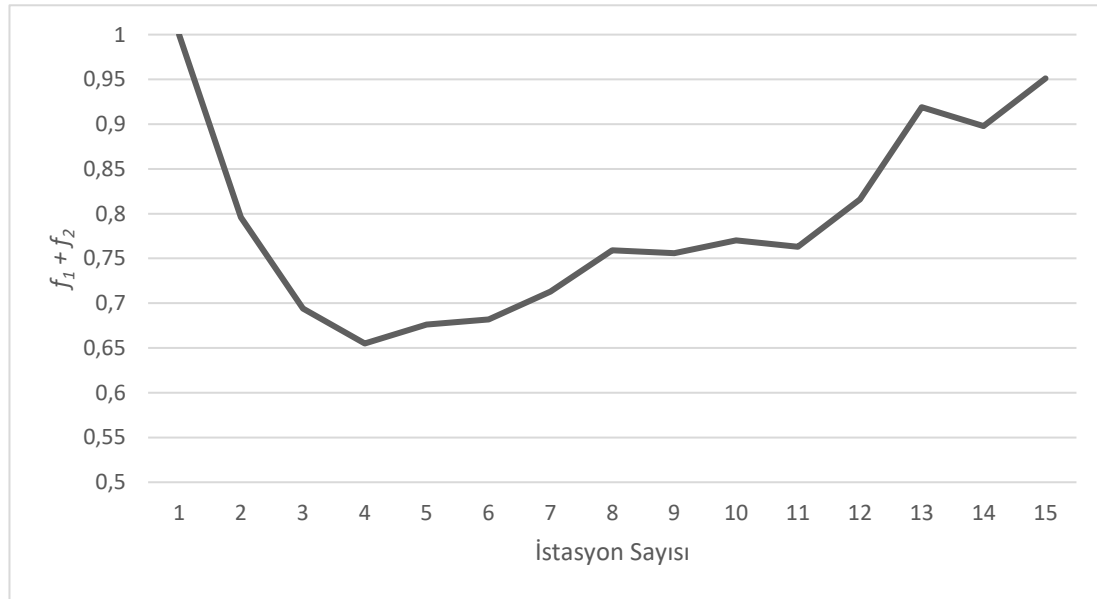
2	$f_1 = 0,60679$ (en iyi) $f_2 = 0,15952$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,04026$ (en iyi)	$f_1 = 0,35922$ $f_2 = 0,0426$	$f_1' = 0,592$ $f_2' = 1$ $f_{enk} = 0,796$
3	$f_1 = 0,92718$ (en iyi) $f_2 = 0,24983$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,06921$ (en iyi)	$f_1 = 0,35922$ $f_2 = 0,06921$	$f_1' = 0,387$ $f_2' = 1$ $f_{enk} = 0,694$
4	$f_1 = 1,42718$ (en iyi) $f_2 = 0,39101$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,10272$ (en iyi)	$f_1 = 0,97573$ $f_2 = 0,2104$	$f_1' = 0,684$ $f_2' = 0,626$ $f_{enk} = 0,655$
5	$f_1 = 1,76213$ (en iyi) $f_2 = 0,41555$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,14408$ (en iyi)	$f_1 = 1,684$ $f_2 = 0,308$	$f_1' = 0,956$ $f_2' = 0,397$ $f_{enk} = 0,676$
6	$f_1 = 2,18446$ (en iyi) $f_2 = 0,44906$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,19054$ (en iyi)	$f_1 = 1,917$ $f_2 = 0,32359$	$f_1' = 0,878$ $f_2' = 0,485$ $f_{enk} = 0,682$
7	$f_1 = 2,45145$ (en iyi) $f_2 = 0,50131$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,23797$ (en iyi)	$f_1 = 2,112$ $f_2 = 0,353$	$f_1' = 0,861$ $f_2' = 0,565$ $f_{enk} = 0,713$
8	$f_1 = 2,70388$ (en iyi) $f_2 = 0,60733$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,29023$ (en iyi)	$f_1 = 2,379$ $f_2 = 0,405$	$f_1' = 0,88$ $f_2' = 0,639$ $f_{enk} = 0,759$
9	$f_1 = 2,93689$ (en iyi) $f_2 = 0,62305$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,34289$ (en iyi)	$f_1 = 2,534$ $f_2 = 0,441$	$f_1' = 0,863$ $f_2' = 0,649$ $f_{enk} = 0,756$
10	$f_1 = 3,13592$ (en iyi) $f_2 = 0,67048$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,39708$ (en iyi)	$f_1 = 2,8$ $f_2 = 0,494$	$f_1' = 0,893$ $f_2' = 0,647$ $f_{enk} = 0,77$
11	$f_1 = 3,35922$ (en iyi) $f_2 = 0,71184$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,46395$ (en iyi)	$f_1 = 2,8$ $f_2 = 0,54$	$f_1' = 0,834$ $f_2' = 0,693$ $f_{enk} = 0,763$
12	$f_1 = 3,55339$ (en iyi) $f_2 = 0,7408$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,55425$ (en iyi)	$f_1 = 2,98$ $f_2 = 0,593$	$f_1' = 0,839$ $f_2' = 0,794$ $f_{enk} = 0,816$
13	$f_1 = 3,55339$ (en iyi) $f_2 = 0,79346$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,64691$ (en iyi)	$f_1 = 2,98$ $f_2 = 0,647$	$f_1' = 0,839$ $f_2' = 1$ $f_{enk} = 0,919$

14	$f_1 = 3,733$ (en iyi) $f_2 = 0,83993$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,75279$ (en iyi)	$f_1 = 2,98$ $f_2 = 0,753$	$f_1' = 0,798$ $f_2' = 0,998$ $f_{enk} = 0,898$
15	$f_1 = 3,733$ (en iyi) $f_2 = 0,94582$ (en kötü)	$f_1 = 0$ (en kötü) $f_2 = 0,85882$ (en iyi)	$f_1 = 3,364$ $f_2 = 0,859$	$f_1' = 0,901$ $f_2' = 1$ $f_{enk} = 0,951$

Tablo 7’de optimum çözüm kümesini bulmak için öncelikle birinci amaç fonksiyonu en iyilenerek model çözülmüştür. Birinci modelin çözümüne gidilirken ikinci amaç fonksiyonun aldığı değerler hesaplanmıştır. Sonrasında ikinci amaç fonksiyonu en iyilenerek çözüm sağlandığında birinci amaç fonksiyonunun aldığı değerler bulunmuştur. Bu şekilde her bir amaç fonksiyonunun almış olduğu en iyi ve en kötü değerler hesaplanmıştır. Ağırlıklı toplam yöntemine göre normalleştirme prosedürü uygulanarak istasyon sayısına göre değişen optimum çözümler elde edilmiştir.

Tablo 7’ye göre toplam amaç fonksiyon değerinin açılacak istasyon sayısında en aza gidildiğinde istasyon kurulum maliyetinde en iyi değeri aldığı ancak toplam akış olarak en kötü değeri aldığı görülmüştür. İstasyon sayısının en çok olduğu durumda ise akış değerleri en iyilenmiş ancak istasyon kurulum maliyeti istasyon sayısının artmasıyla en kötü değeri almıştır.

Tablo 7’deki verilere göre istasyon sayısına bağlı olarak değişen normalize edilmiş ağırlıklı toplam grafiği Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. İstasyon sayısına bağlı normalleştirilmiş ağırlıklı toplam değeri

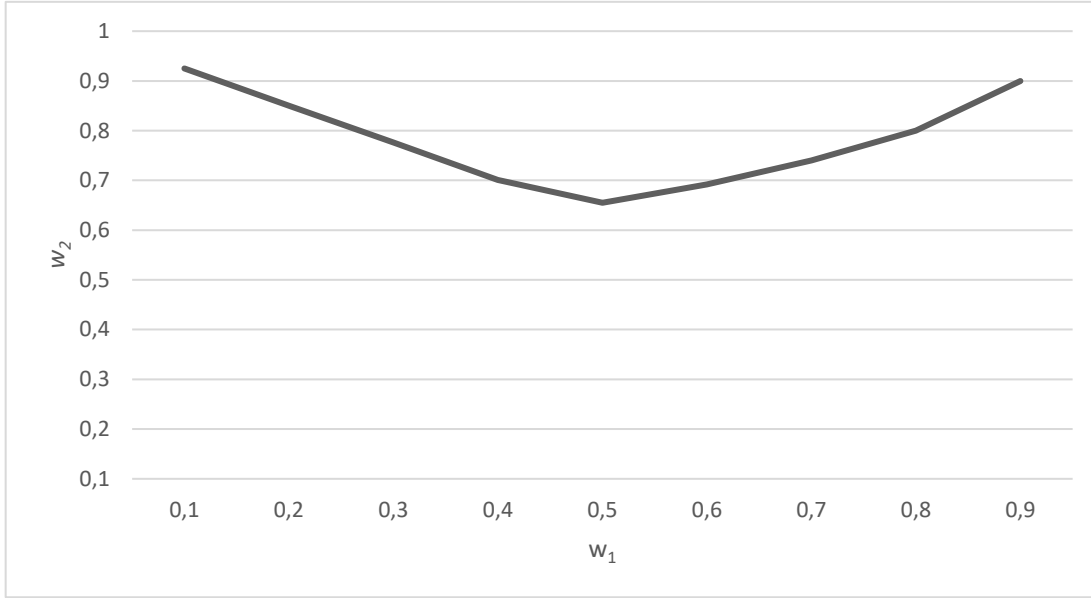
Şekil 2’ye göre Sakarya ilinde dört istasyondan daha az şarj istasyonu açılması durumunda model, maliyeti en aza indirgeyen amaç fonksiyonuna göre uygun çözümler bulmaktadır. Toplamda dört adet istasyon açılması durumunda, en düşük toplam istasyon maliyeti ile trafik akışını en çok yapacak şekilde en uygun çözüm elde edilmektedir. Dört istasyondan daha fazla açılması durumunda ise, istasyon sayısına bağlı olarak toplam maliyet ile trafik akışının da arttığı çözümler elde edilmektedir.

Tablo 8’de dört istasyon için farklı  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlıklarına göre değişen amaç fonksiyon değerleri ve açılacak istasyon konumları yer almaktadır.

**Tablo 8.** Farklı ağırlık değerleri için optimum çözümler

$w_1$	$w_2$	$f_{min}$	Açılacak istasyon konumları
0,1	0,9	0,925	Geyve - Pamukova - Kaynarca - Taraklı
0,2	0,8	0,85	Geyve - Pamukova - Kaynarca - Taraklı
0,3	0,7	0,776	Geyve - Pamukova - Kaynarca - Taraklı
0,4	0,6	0,701	Geyve - Pamukova - Kaynarca - Taraklı
0,5	0,5	0,655	Adapazarı - Ferizli - Kaynarca - Söğütlü
0,6	0,4	0,692	Adapazarı - Erenler - Geyve - Arifiye
0,7	0,3	0,74	Adapazarı - Erenler - Geyve - Arifiye
0,8	0,2	0,8	Adapazarı - Serdivan - Erenler - Arifiye
0,9	0,1	0,9	Adapazarı - Serdivan - Erenler - Arifiye

Şekil 3'te Tablo 8'de de ifade edildiği gibi, farklı  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlıklarına göre bulunan sonuçların Pareto optimal grafiği verilmiştir.

**Şekil 3.** Pareto optimal grafiği

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Gelişmekte olan ülkeler arasında Türkiye'de, çevre dostu elektrikli araçlara yapılan yatırımlar ile elektrikli araç kullanımının yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Elektrikli araç teknolojisine uyum sağlamak ve elektrikli araç kullanımını artırmak için erişilebilir ve yeterli sayıda şarj istasyonlarının konumlandırılması gerekmektedir. Yeterli şarj altyapısı sağlandığı takdirde elektrikli araç sahiplerinin kilometre aralığı konusundaki mevcut endişeleri azaltılarak sürücülerin bu teknolojiye adaptasyonunun artabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada Sakarya ilinde elektrikli araç kullanımını uygun hale getirebilmek adına yeterli şarj istasyon sayısının belirlenmesi ve şarj istasyonlarının konumlanması üzerine odaklandık. Bu doğrultuda istasyon kurulum maliyetleri en az, ilçeler arasındaki tüm yolların akışı ise en çok olacak şekilde akış yakıt ikmal yer modeline dayanan çok amaçlı karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Modelde kullanılan O-D verileri, belediye ve özel halk otobüslerinin kullandığı güzergâhlardan elde edilmiştir. İstasyon maliyetleri ise arsaların ilçelere göre değişen metrekaresine birim fiyatları üzerinden hesaplama yapılarak elde edilmiştir. Çok amaçlı modelin çözümünde literatürde sıkça kullanılan ağırlıklı toplam metodu kullanılmıştır. Elde edilen

optimum çözümlere göre, modelde belirlenen amaçların en iyilendiği Pareto optimali, dört adet şarj istasyonu açılması durumunda sağlanmıştır. En uygun çözümün sağlandığı şarj istasyon konumları Adapazarı, Ferizli, Kaynarca ve Söğütlü olarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada çok amaçlı matematiksel model trafik akışı en çok, şarj istasyon kurulum maliyeti en az olacak şekilde iki amaç fonksiyonu ile çözülmüştür. Daha sonra yapılacak çalışmalar için amaç fonksiyonlarının kapsamı genişletilerek, şarj esnasında harcanan süre, şarj kapasitesi vb. durumlar göz önünde bulundurularak daha geniş kapsamlı modeller elde edilebilir. Ayrıca çalışma Türkiye veya diğer ülkeler için genişletilerek sezgisel çözümler geliştirilebilir.

### Kaynakça

- [1] www.trthaber.com (26.06.2022).
- [2] Gavranovic, H., A. Barut, G. Ertek, O.B. Yüzbaşıoğlu, O. Pekpostalcı & Ö. Tomuş (2014). Optimizing the electric charge station network of EŞARJ. *Procedia Computer Science* 31: 15-21.
- [3] You, P.-S., & Hsieh, Y.-C. (2014). A hybrid heuristic approach to the problem of the location of vehicle charging stations. *Computers & Industrial Engineering*, 195-204.
- [4] Bouguerra S., Layeb S.B. 2019. Determining optimal deployment of electric vehicles charging stations: Case of Tunis city, Tunisia. *Case Studies on Transport Policy* 7(3):628-642.
- [5] Guo Z., Yu B., Li K., Yang Y., Yao B., Lin Q. 2020. Locating battery supplying infrastructures for electric taxis. *Transportation Letters* 12(2), 77-86.
- [6] Dinç Yalçın, G., Özsoy, C. Y., & Taşkın, Y. (2021). A multi-objective mathematical model for the electric vehicle charging station placement problem in urban areas. *International Journal of Sustainable Energy*, 1-17.
- [7] Kim, J. G., & Kuby, M. (2012). The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 37(6), 5406-5420.
- [8] Hodgson M. J. (1990). "A flow capturing location-allocation model." *Geographical Analysis*, 22, 270-9.
- [9] Kuby, M., and Lim, S. (2005). "The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles." *Socio-Economic Planning Sciences*, 39, 125-145.
- [10] Lim, S., & Kuby, M. (2010). Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations using the flow-refueling location model. *European Journal of Operational Research*, 204(1), 51-61.
- [11] Xylia, M., S. Leduc, P. Patrizio, F. Kraxner & S. Silveria (2017). Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transportation Research Part C* 78: 183-200.
- [12] He J., Yang H., Tang T.Q., Huang H.J. (2018) An Optimal Charging Station Location Model With The Consideration Of Electric Vehicle's Driving Range. *Transportation Research, Part C* (86), 641-654.
- [13] Honma Y., Kuby M. (2019). Node-based vs. Path-based location models for urban hydrogen refueling stations: comparing convenience and coverage abilities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 15246 - 15261.
- [14] Akçay, E. (2009). Akış tipi iş çizelgeleme problemlerinin yapay bağımsızlık sistemi ile çok amaçlı optimizasyonuna yönelik bir model önerisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Doktor Tezi.
- [15] Belgasmi, N., Said, L.B. ve Ghedira, K., (2008). "Evolutionary Multiobjective Optimization of the Multi-Location Transshipment Problem ", *Operational Research*, 8:167-183.
- [16] www.endeksa.com.tr (26.06.2022).