




# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

## Heterojen Filolu Yeşil Araç Rotalama Probleminin Tavlama Benzetimi Yöntemi ile Çözümü<sup>1</sup>

 Yusuf ŞAHİN<sup>a,\*</sup>,  Kenan Karagül<sup>b</sup>,  Erdal Aydemir<sup>c</sup>

<sup>a</sup> İşletme Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Lojistik Bölümü, Honaz Meslek Yüksekokulu, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE

<sup>c</sup> Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ysahin@mehmetakif.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1011735

### ÖZ

Araç rotalama problemi, müşterilere siparişlerini ulaştırmak için minimum maliyetli rota kümesinin belirlendiği optimizasyon problemidir. Son yıllarda çevresel duyarlılıktaki artışla beraber, uygulayıcılar ve araştırmacılar fosil yakıtların çevreye olan etkilerini azaltmak için taşıma faaliyetlerinin çevre ile ilgili özelliklerine odaklanmaya başlamıştır. Araç rotalama probleminin bu duyarlılığı dikkate alan türü ise yeşil araç rotalama problemi olarak adlandırılmaktadır. Yeşil araç rotalama problemi son yıllarda üzerinde oldukça yoğun çalışılan bir konudur. Çalışmanın ana motivasyonu, güncel hayatta doğal olarak karşılaşılan heterojen araç filoları için yük toplama/dağıtma rotalarının işleme sonucu ortaya çıkan emisyon gazlarının minimize edilmesi amacıyla bir yaklaşım geliştirmektir. Çalışmada, bölge distribütörü olarak faaliyet gösteren bir firmanın dağıtım faaliyetleri heterojen filolu yeşil araç rotalama problemi olarak ele alınmış ve tavlama benzetimi yöntemiyle daha düşük emisyon değerleri sağlayan çevreci çözümler elde edilmeye çalışılmıştır. Çözüm yaklaşımında heterojen bir filo için emisyon değerleri araçların taşıdığı yük miktarı ve yüklerin taşındığı mesafe üzerinden hesaplanmıştır. Yeşil Araç Rotalama çözümleri, standart araç rotalama problemi olarak elde edilen çözümler üzerinden hesaplanan emisyon değerleri ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, yük miktarı, taşıma mesafesi ve emisyon salınımı ilişkileri nedeniyle önerilen yaklaşım bazı veri setlerinde daha yüksek dolaşım mesafesine karşın daha düşük emisyon miktarı içeren çözümler sağlamıştır. Bütün çözümlerin toplam değeri göz önüne alındığında, seyahat mesafesi bakımından %38,5 ve emisyon değeri bakımından ise %86,7 oranında daha iyi çözümler elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Heterojen filo, Yeşil araç rotalama, Tavlama benzetimi

## Heterogeneous Fleet Green Vehicle Routing Problem with Simulated Annealing Method

### ABSTRACT

The vehicle routing problem is an optimization problem in which the minimum cost set of routes is determined to deliver the orders to the customers. With the increase in environmental awareness in recent years, practitioners and researchers have started to focus on the environmental aspects of transportation activities to reduce the environmental impact of fossil fuels. The type of vehicle routing problem that takes this sensitivity into account is called the green vehicle routing problem. The green vehicle routing problem is a subject that has been studied extensively in recent years. The main motivation of the study is to develop an approach in order to minimize the emission gases resulting from the operation of load collection/distribution routes for heterogeneous vehicle fleets that are naturally encountered in daily life. In the study, the distribution activities of a company operating as a

<sup>1</sup>ICAIAME 2021 konferansında özet metin olarak sunulmuştur.

regional distributor were handled as a green vehicle routing problem with a heterogeneous fleet and environmental solutions that provide lower emission values were tried to be obtained by the simulated annealing method. In the solution approach, emission values for a heterogeneous fleet are calculated based on the amount of load carried by the vehicles and the distance the loads are transported. The green vehicle routing solutions were compared with the emission values calculated over the solutions obtained as the standard vehicle routing problem. As a result, due to the relationships between load amount, transport distance and emission, the proposed approach provided solutions with lower emission amount despite higher travel distance in some datasets. Considering the total value of all solutions, 38.5% better solutions in terms of travel distance and 86.7% better in terms of emission value are obtained.

*Key words: Heterogeneous fleet, Green vehicle routing, Simulated annealing*

## **I. GİRİŞ**

Lojistik kavramı, bireysel müşterilerin veya şirketlerin ihtiyaç duydukları hammadde, malzeme veya bitmiş ürünlerin ilk çıkış noktasından nihai tüketim noktasına doğru hareketi sırasında oluşan akışın planlı yönetimi olarak ifade edilmektedir. Tedarik ve malzeme yönetimi bu akışlardan üretim sürecine doğru olanı ifade ederken, dağıtım bitmiş ürünün müşteriye olan hareketine karşılık gelir [1]. Maliyet etkinliği sağlamak için bu ürünlerin nakliyesi ve depolanması ile ilgili faaliyetlerin stratejik olarak yönetilmesi gerekir. İşletmelerin üretim ve dağıtım operasyonlarının başarısında önemli etkisi olan lojistik faaliyetler, birçok fonksiyonel alandan oluşur. Bu fonksiyonel alanlarda gösterilen performans, hizmet kalitesinin artmasını ve işletme maliyetlerinin azalmasını sağlar. Etkili bir lojistik yönetimi, yüksek kaliteli hizmeti düşük veya kabul edilebilir bir maliyetle sağlama anlamına da gelir [2, 3].

Siparişlerin hazırlanmasının ardından sevkiyat işlemleri gerçekleştirilir. Bir veya daha fazla depodan homojen veya heterojen kapasiteli araçlar ile yapılacak sevkiyat sırasında araçların izleyecekleri rotanın belirlenmesi için dağıtım planları hazırlanır. Bu planlar kapsamında, ne kadar araca ihtiyaç duyulduğu, hangi müşteriye hangi araç ile taşıma yapılacağı gibi konular planlanır. Dağıtım araçlarının dolaştıkları toplam mesafeyi belirli kısıtlar altında minimize eden en uygun rotaların belirlenmesi ile ilgili olan bu konu literatürde Araç Rotalama Problemi (ARP) olarak isimlendirilir [4]. ARP, NP-Zor sınıfında yer alan ve optimizasyon alanında yoğun olarak çalışılan oldukça popüler bir problemdir. ARP, Gezgin Satıcı ile Kutulama Problemlerinin bir bileşkesi olarak ifade edilebilir ve böylece bir depodan coğrafi olarak farklı konumlarda bulunan müşterilere yapılacak olan teslimatlarda izlenecek en düşük maliyetli rotaları belirleme problemi olarak tanımlanabilir [5].

Yol ağı, depolar, müşteriler ve sürücüler gibi temel bileşenlerden oluşan ARP, genellikle araç kapasitesi veya rota mesafesi kısıtlamaları ile tanımlanmaktadır. Sadece kapasite kısıtının dikkate alındığı ARP ise Klasik Araç Rotalama Problemi (KARP) olarak adlandırılır. Mesafe ve kapasite kısıtlı (MKARP), zaman pencereli (ZPARP), geri toplamalı (GTARP), dağıtım ve toplamalı (DTARP) araç rotalama gibi türleri literatürde çalışılan diğer ARP türleridir. Son zamanlarda ise yeni ve güncel kısıtların eklenmesiyle açık (AARP), çoklu depo (ÇDARP), bölünmüş teslimatlı (BTARP), periyodik (PARP), heterojen filolu (HFARP) ve bulanık araç rotalama problemi (BARP) gibi türleri ortaya çıkmıştır [6].

Günümüzde enerjinin aşırı ve bilinçsiz kullanımı neticesinde ortaya çıkan kirlilik ile bu kirliliğin çevresel sonuçları yaşadığımız dünya için potansiyeli yüksek bir tehlike oluşturmaktadır. Yaşadığımız çevrenin daha fazla bu etkilere maruz kalmaması için son yıllarda sürdürülebilir lojistik uygulamalarına daha çok ağırlık verildiği gözlemlenmektedir. ARP'nin sürdürülebilir lojistik uygulamalar ile ilgili türü ise Yeşil Araç Rotalama Problemi (Y-ARP) olarak adlandırılır. Bu tip ARP'de orijinal ARP'den farklı olarak oluşturulan rotaya bağlı ortaya çıkan çevresel etkinin en aza indirilmesi amaçlanır. Araçların hareketine ve yüküne bağlı olarak enerji (yakıt) tüketiminin CO<sub>2</sub> emisyonları üzerinde doğrudan etkisinin olduğu bilinmektedir [5].

Çalışmada, bölgesel olarak faaliyet gösteren bir distribütör firmanın dağıtım faaliyetleri Y-ARP olarak ele alınmış ve tavlama benzetimi yöntemiyle etkin çözümlerin üretilmesi hedeflenmiştir. Çözümlerinin

kalitesini değerlendirmek için emisyon değerlerinin baz alındığı bir amaç fonksiyonu tercih edilmiştir. Ayrıca aynı veri setleri standart ARP baz alınarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar için hesaplanan emisyon değerleri Y-ARP'nin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde Y-ARP ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde Y-ARP açıklanmış, metodoloji ve kullanılan veri setlerinin detayları sunulmuştur. Dördüncü bölümde bulgular ve son bölümde de sonuç ve öneriler yer almaktadır.

## **II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

Geleneksel araç rotalama probleminde temel amaç, listede yer alan her bir müşteriyi sadece bir kez ziyaret ederek başlangıç noktasına dönecek olan aracın dolaşacağı toplam mesafeyi minimize etmektir. Y-ARP'de ise minimum mesafenin yanı sıra atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarının da minimize edildiği rotaların belirlenmesi hedeflenir. Y-ARP güncel yeşil tedarik zinciri uygulamaları arasında yer alan ve standart ara rotalama probleminin uzantısı olan NP-Zor sınıfı bir problemidir. Popüler bir optimizasyon problemi olması sebebiyle bu konu ile ilgili oldukça geniş bir literatürden bahsedilebilir.

Son yıllarda yeşil araç rotalama ile ilgili birçok literatür araştırması yapılmıştır. Choy vd. [7], Y-ARP'nin güncel durumunu gözden geçirmek, geleneksel VRP varyantlarının Y-ARP ile nasıl etkileşime girebileceğini tartışmak ve Y-ARP'ye yönelik gelecekteki çalışma alanları için öngörüler sunmak amacıyla bir literatür araştırması ortaya koymuştur. Çalışmaların yıllara göre dağılımı ve çalışmalarda kullanılan yöntemlere yer verilmiştir. Belbağ [8], Y-ARP ile ilgili olarak yakıt tüketimi ve gaz emisyonu gibi çevresel unsurları etkileyen faktörlerin değerlendirilmesi, kullanılan yöntemlerin belirlenmesi amacıyla 2007-2016 yılları arasında yayınlanmış 57 çalışmayı incelemiştir. Koç ve Özceylan [9], Y-ARP ile birlikte Elektrikli ARP çalışmalarının da incelendiği bir literatür araştırması yapmışlardır. Asgari vd. [10] araştırmaların gelişimine yön veren bazı ana özellikleri vurgulamak için her bir varyant (içten yanmalı, alternatif enerji kaynaklı ve hibrit araçlar) için farklı analitik özet tabloları oluşturmuştur. Moghdani vd. [11], 2006-2019 yılları arasında yayınlanan 309 çalışmayı incelemiş ve problem sınıflandırması, belirsizlikler, çözüm metodolojileri ve son olarak gelecekteki araştırma yönleri için amaç fonksiyonu yaklaşımlarına dayalı olarak bazı yeni araştırma alanları ortaya koymuştur. Çalışmanın sonuçları, Y-ARP'ler üzerine yapılan araştırmaların nispeten yeni olduğunu ve çeşitli alanlarda hala büyük iyileştirmeler için boşluklar olduğunu göstermektedir.

Y-ARP için sayıca az da olsa analitik yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar literatürde yer almaktadır. Afshar-Bakeshloo vd. [12], müşteri memnuniyeti, toplam maliyet ve emisyon seviyeleri arasında denge sağlayarak yönetim anlayışını zenginleştirmek amacıyla karışık tamsayılı bir doğrusal programlama modeli önermiştir. Sayısal bir örnek üzerinden modelin uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Bruglieri vd. [13], alternatif yakıt istasyonlarına (AFS'ler) yapılan ziyaretlerin yalnızca dolaylı olarak ele alındığı Y-ARP için yeni bir karma tam sayılı programlama formülasyonu önermiş ve CPLEX kıyaslama örnekleri için deneyler gerçekleştirmiştir. Koç ve Karaoğlan [14], Y-ARP'nin çözümünde alt sınırları iyileştirmek için literatürden türetilen birkaç geçerli eşitsizliği birleştiren kesin çözüm algoritması ile üst sınırları elde etmek için tavlama benzetimine dayalı bir sezgisel algoritma sunan dal ve kesme algoritması önermişlerdir. Leggeri ve Haouari [15], Y-ARP çözümü için bir karma tamsayılı doğrusal bir formülasyonu ile indirgeme prosedürünün kullanıldığı, orta boyutlu problemleri çözebilen pratik bir çözüm yaklaşımı önermiştir. Önerilen kesin çözüm yaklaşımının dal ve kesme algoritmasından daha tutarlı ve daha iyi performans gösterdiği, Y-ARP'leri en iyi şekilde çözmek için çekici ve pratik bir alternatif oluşturduğu sonucuna ulaşmıştır. Zhou ve Lee [16], üç boyutlu müşteri koordinatları, yerçekimi, araç hızı, araç çalışma süresi, araç kapasitesi gibi çeşitli gerçekçi faktörler göz önünde bulundurularak, Y-ARP'yi sera gazı emisyonlarını en aza indirmek için doğrusal olmayan bir tamsayılı programlama problemi olarak formüle etmiştir. Çözüm yöntemi olarak ise Lagrange gevşetmesi yaklaşımını kullanmıştır. Andelmin ve Bartolini [17], Y-ARP'yi sütunlarında uygun rotaların gösterildiği basit devrelere karşılık gelen bir çoklu grafikteki bir küme bölme problemi olarak modellemiştir. Küme bölme problemi için önerdikleri yaklaşımı geçerli eşitsizlikler k-yol (k-path)

kesme yaklaşımı dahil olmak üzere ekleme yaparak güçlendirmişler ve 110 müşteriye kadar olan problem örneklerine çözüm üretmişlerdir.

Araç rotalama ve türevi olan problemlerin kesin çözümünün matematiksel olarak kabul edilebilir bir sürede belirlenmesi oldukça zordur [18]. NP-Zor sınıfında yer alan ve gerçek hayatta sıklıkla karşılaşılan bir problem olması nedeniyle, kısıtlı bir zaman diliminde yüksek kalitede çözümlerin ortaya konabilmesi için sezgisel ve metasezgisel yöntemler ARP'nin çözümünde sıklıkla kullanılan yöntemlerdir [19]. Erdoğan ve Miller-Hooks [20] karma tamsayı doğrusal bir program olarak formüle ettikleri Y-ARP'yi modifiye edilmiş Tasarruf Algoritması, yoğunluk esaslı kümeleme algoritması ve özelleştirilmiş iyileştirme yöntemleri ile çözmüştür. Jemai vd. [21], mesafe ve CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin minimizasyonu için çok amaçlı Y-ARP'nin çözümünde NSGA-II evrimsel algoritmasını kullanmıştır. Jabir vd. [22, 23] çok depolu Y-ARP için karınca kolonisi ve değişken komşuluk arama yöntemlerinden oluşan hibrit bir yöntem önermiştir. Tamsayı programlama olarak modelledikleri problemin küçük boyutlu örneklerine LINGO programı ile çözüm üretilmiştir. Yine küçük ve orta büyüklükte problemleri karınca kolonisi optimizasyon (KKO) algoritması ile çözerken, büyük boyutlu problemlerin çözüm kalitesini geliştirmek için değişken komşuluk arama yöntemi karınca kolonisi yöntemine entegre olarak kullanılmıştır. Tiwari ve Chang [24], karbondioksit miktarının hesabında yük ve dolaşım mesafesinin dikkate alındığı Y-ARP'yi blok rekombinasyon algoritması ile çözmüştür. Küçüköglü vd. [25], karma tamsayı doğrusal programlama modeli olarak formüle ettikleri zaman pencereli Y-ARP için bellek yapısı uyarlanmış tavlama benzetimi (BYU-TB) metasezgisel algoritmasını kullanmıştır. Önerdikleri modelde araç teknik özelliklerini, araç yükünü ve nakliye mesafesini dikkate alan bir yakıt tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplama algoritmasını bütünleştirmiştir. Montoya vd. [26] alternatif yakıtlı araçlarla dağıtımın yapıldığı Y-ARP için iki aşamalı bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntemin ilk aşamasında önce rotala-sonra kümeleme esaslı bir yöntem ile rota havuzları oluşturulmuş, ikinci aşamada ise havuzda depolanan çözümler küme ayrıştırma algoritması ile bütünleştirilmiştir.

Zhang vd. [27], ürünlerin dağıtımında alternatif yakıtlı araçlarla dağıtımın yapıldığı Y-ARP için iki aşamalı sezgisel yöntem ve KKO algoritmasını kullanmıştır. Yavuz [28], homojen kapasiteli Y-ARP için iteratif ışın arama (Iterated Beam Search) algoritmasını kullanmıştır. Farklı alt ve üst sınır stratejilerini kullanabilen, kesin veya sezgisel algoritma olarak çalışabilen algoritmanın verimliliğini artırmak için bir baskınlık stratejisi önerilmiştir. Poonthalir ve Nadarajan [29], değişen hız kısıtlamalı, iki amaçlı, yakıt verimli Y-ARP'yi hem rota maliyetini hem de yakıt tüketimini en aza indirecek şekilde hedef programlama modeli olarak ifade etmiştir. Önerilen model aç gözlü mutasyon operatörü ve zamanla değişen hızlanma katsayısının yer aldığı parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmasıyla çözmüştür. Da Costa vd., [30], Y-ARP için genetik algoritma (GA) yöntemini kullanmıştır. Affi vd. [31], bir turun inşası için yakıt ikmal istasyonları ve yakıt deposu kapasite sınırının dikkate alındığı Y-ARP için değişken komşuluk arama yöntemini kullanmıştır. Sruthi vd. [32], kapasiteli araç rotalama problemi için enerji tüketimi ve emisyon değerlerini eş zamanlı olarak dikkate alan Y-ARP için genetik algoritma sezgiselini kullanarak geleneksel modellere kıyasla emisyon değerlerinde dikkate değer bir azalma sağlayan çözümler üretmiştir.

Li vd. [33], soğuk zincir lojistiğinde Y-ARP'yi ele almış ve çözüm için standart PSO ve değiştirilmiş PSO yöntemlerini kullanmıştır. Peng vd. [34], Y-ARP'nin çözümü için yerel arama prosedürü, çaprazlama operatörü ve nüfus güncelleme stratejisinden oluşan bir yöntem önermiştir. Normasari vd. [35], karma tamsayı programlama modeli olarak ifade ettikleri kapasiteli Y-ARP'nin çözümünde tavlama benzetimi yöntemini kullanmış, çözüm kalitesi ve süresi bakımından iyi çözümler elde etmiştir. Li vd. [36], geliri en üst düzeye çıkarmak, maliyetler ile zamanı ve emisyonu en aza indirmek amacıyla birden çok deponun bulunduğu Y-ARP'nin çözümünde karınca kolonisi algoritmasını kullanmıştır. Karagül vd. [5], homojen kapasiteye sahip araç filosu için Y-ARP'nin çözümünde benzetilmiş tavlama esaslı bir çözüm yöntemi önermiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda üç farklı modelin istatistiksel olarak anlamlı çözümler ürettiğini göstermişlerdir. Utama vd. [37], tek depolu Y-ARP'de dağıtım maliyetlerini minimize etmek için hibrit kelebek optimizasyon algoritmasını kullanmıştır.

Zhang vd. [38], alternatif yakıtlı araçların ve çoklu deponun olduğu bir taşıma ağında toplam karbon salınımını minimize etmek için iki aşamalı bir karınca kolonisi sistemi kullanmıştır. Önerilen yöntemin

belirgin özelliği, iki farklı amaç için iki farklı karınca türünün kullanılmasıdır. Sadati ve Çatay [39], çok depolu Y-ARP'yi karma tamsayılı bir doğrusal programlama modeli olarak formüle etmiş ve çözüm için özel yeni komşuluk yapılarının kullanıldığı hibrit bir genel değişken komşuluk arama ve tabu arama (TA) yaklaşımını kullanmıştır. Doğadan esinlenen diğer bir yaklaşım olan balina optimizasyon algoritması Dewi ve Utana [40] tarafından Y-ARP'nin çözümünde kullanılmıştır. Önerilen hibrit çözüm yönteminde, tabu arama ve yerel arama yöntemleri balina optimizasyon algoritması ile birlikte probleme uyarlanmıştır. Burada bahsedilen çalışmaların yanı sıra, Y-ARP'nin farklı versiyonlarına sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin uygulandığı çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır. Tablo 1'de literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir.

*Tablo 1. Literatürde yer alan çalışmalar*

Yazar(lar)	Kesin Çözüm Yöntemleri	Metasezgisel Yöntemler						Sezgisel Yöntem
		TA	GA	TB	KKO	PSO	Diğer	
Afshar-Bakeshloo vd. [12]	✓							
Bruglieri vd. [13]	✓							
Koç ve Karaoğlan [14]	✓			✓				
Leggieri ve Haouari [15]	✓							
Zhou ve Lee [16]	✓							
Andelmin ve Bartolini [17]	✓							
Erdoğan ve Miller-Hooks [20]								✓
Jemai vd. [21]			✓					
Jabir vd. [22, 23]					✓		✓	
Chang [24]							✓	
Küçüköğlü vd. [25]				✓				
Montoya vd. [26]							✓	
Zhang vd. [27]					✓		✓	
Yavuz [28]							✓	
Poonthalir ve Nadarajan [29]						✓		
Da Costa vd., [30]			✓					
Affi vd. [31]							✓	
Sruthi vd. [32]			✓					
Li vd. [33]						✓		
Peng vd. [34]								
Normasari vd. [35]								
Li vd. [36]								
Karagül vd. [5]				✓				
Utama vd. [37]							✓	
Sadati ve Çatay [39]		✓						✓
Dewi ve Utana [40]		✓					✓	✓

Tablo 1'de yer alan çalışmalar incelendiğinde, Y-ARP'nin farklı versiyonları (alternatif yakıtlı ARP, elektrikli ARP vb.) için çözümler geliştirilmiş olsa da fosil yakıt kullanılan araçlar için yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda homojen kapasiteli varyant için çözüm yaklaşımlarının önerildiği görülmektedir. Gerçek hayat problemlerinde ise taşıma etkinliğinin artırılabilmesi için kullanılan

filolardaki araçların daha çok heterojen kapasiteye sahip oldukları bilinmektedir. Buradan hareketle, daha gerçekçi çözümler elde edebilmek için Y-ARP çözümlerinde bu durumun dikkate alınması gerekir. Çalışma kapsamında, Y-ARP farklı kapasitelere sahip heterojen araç filosu için TB yöntemi kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Kullanılan çözüm metodolojisinin etkinliğini göstermek için aynı veri seti standart ARP olarak çözülmüş ve emisyon değerleri hesaplanarak önerilen yöntemin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu sayede, amaç fonksiyonunda yapılan değişikliğin çözümleri nasıl etkilediği de yapılan hesaplamalar ile gösterilmiştir. Takip eden bölümde önerilen yöntemin detaylarına yer verilmiştir.

### **III. METODOLOJİ VE VERİ SETİ**

Metasezgisel yöntemler belirli bir amacı gerçekleştirmek veya belirlenen hedefe ulaşmak için doğal fenomenlerden esinlenen, ancak çözüm uzayında optimum çözüme yakınsaması tam olarak ispat edilemeyen yaklaşımlar. Bu yöntemler, kolay anlaşılır ve uygulanabilir olması, küçük değişikliklerle farklı problemlere rahatlıkla uygulanabilir olması gibi sebeplerden dolayı günümüzde sıklıkla tercih edilen yöntemlerdir. Esin kaynağı, başlangıç çözüm oluşturma yöntemi, kullanılan amaç fonksiyonunun ile tercih edilen komşuluk yapısı ve hafıza durumu gibi kriterlere göre farklı sınıflara ayrılırlar [19, 41]. Karınca kolonisi, genetik algoritma, tavlama benzetimi, tabu arama, kabul eşiği ve parçacık sürüsü optimizasyon algoritması gibi yöntemler literatürde sıklıkla kullanılan yöntemlere örnek olarak verilebilir. Çalışma kapsamında yaygın olarak kullanılan bu yöntemlerden tavlama benzetimi yöntemi çözüm yöntemi olarak tercih edilmiştir. Takip eden alt bölümde yöntemin detayları anlatılmaktadır.

#### **A. TAVLAMA BENZETİMİ (TB)**

Katı malzemelerin tavlama işlemi, maddeyi yüksek enerjili halden düşük enerjili hale geçirme işlemidir. Yüksek enerji durumunda (veya yüksek sıcaklık durumunda), parçacıklar hareket edebilir veya kendilerini kolayca yeniden düzenleyebilir ve bu sayede farklı konfigürasyonlara geçiş yapabilir. Bu süreçteki ana konu, malzemeyi düşük enerji durumuna getirmek için en iyi şekilde nasıl indirileceği veya soğutulacağıdır. Katı malzeme hızlı bir şekilde soğutulursa, madde yarı kararlı veya optimal olmayan bir konfigürasyona sahip olacaktır. Tavlama işlemindeki iki önemli unsurun her sıcaklıkta optimum duruma ulaşmak ve işlemin soğutulma hızı olduğu söylenebilir [42]. Tavlama benzetimi yöntemi ise metallerin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması (ısıtma), bu sıcaklıkta belirli bir süre tutulması (bekleme) ve belirli bir stratejiye göre oda sıcaklığına kadar soğutulması suretiyle amaca uygun özellik değişimi prensibi üzerine inşa edilmiş metasezgisel bir yöntemdir [43]. Adımı metalürji biliminden alan ve metallerin tavlama prosesinden esinlenerek Kirkpatrick [44] tarafından geliştirilen tavlama benzetimi yöntemi, genellikle ayrık ve daha az ölçüde sürekli optimizasyon problemlerini çözmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yöntemin temel prensibi, küresel bir optimum bulma umuduyla tepe tırmanma hareketlerine izin veren, iyi çözümü feda ederek yerine kötü çözümü kabul etme olasılığı olan  $p$  değerinin dinamik bir şekilde ilerleyen iterasyonlarda azalmasıdır [57]. Bu sayede, çözümünün ilk kısımlarında çözüm bölgeleri arasında sıçrayış çok fazla olurken, iterasyon sayısı artıp elde edilen çözümler iyileştikçe sifira yaklaşır ve arama bölgesi daralmış olur. Metropolis Monte Carlo entegrasyonu algoritmasını [45] iç döngü olarak kullanan bu yöntem, fiziksel tavlama işleminin algoritmaya döndürülmüş halidir [46]. Tavlama Benzetimi yönteminin araç rotalama [47,48], quadratic atama [49], operasyonel orman planlama [50], kutulama problemi [51], su dağıtım ağı dizaynı [52], silindirik paketleme [53], kümeleme [54], ve elektrik enerjisinin bölgeler arası alışverişinin optimizasyonu [55] gibi problem türlerine uygulandığı çalışmalar yapılmıştır [56].

Yöntemin ilk adımı sistemin yüksek ve verimli bir sıcaklıkta "*ergitilmesinden*" oluşur. Isıtıldığında, katı bir iç parçacık yüksek sıcaklıkla düzensiz bir şekilde dönüşür. İkinci adımda, sistemin sıcaklığı hiçbir değişiklik olmayana kadar düşürülür. Her sıcaklıkta parçacıklar bir denge durumuna ulaşır. Sonunda odadaki sıcaklık taban durumuna ulaşır ve daha sonra iç enerji minimuma indirilir [5,43]. TB algoritması, başlangıç sıcaklığı, her sıcaklıkta üretilecek çözüm sayısı, sıcaklık düşürme fonksiyonu ve durdurma kriteri olmak üzere dört parametreye sahiptir. Yöntem rastgele bir başlangıç çözüm ( $\omega \in \Omega$ )

ile çözümlenmeye başlar. Bu çözüm üzerinde yine rastgele veya daha önceden belirlenmiş bir kural çerçevesinde ufak değişiklikler yapılarak komşu çözümler ( $\omega' \in N(\omega)$ ) elde edilir ve bu çözümlerin kabul olasılıkları Denklem (1) ile hesaplanır. Denklemde yer alan  $t_k$  ifadesi  $k$ . iterasyondaki sıcaklık parametresine karşılık gelir [57].

$$P \{ \omega' \text{ nin yeni çözüm olarak seçilmesi} \} = \begin{cases} \exp \left[ -\frac{f(\omega') - f(\omega)}{t_k} \right] & \text{eğer } f(\omega') - f(\omega) > 0 \text{ ise} \\ 1, & f(\omega') - f(\omega) \leq 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (1)$$

Bütün  $k$  değerleri için  $t_k > 0$  ve  $\lim_{k \rightarrow \infty} t_k = 0$

Yukarıda da bahsedildiği üzere Denklem (1) ile hesaplanan kabul olasılığı TB yönteminin asli unsurudur. Sıcaklık yeterince yavaş düşürülürse sistem her bir iterasyonda dengeli (kararlı) duruma ulaşabilir.  $f(\omega)$  ve  $f(\omega')$  sırasıyla mevcut çözüm ve komşu çözümlerin enerjilerini (amaç fonksiyonu değeri) ifade etmek üzere, sistemin  $T$  sıcaklığında  $\omega \in \Omega$  durumunda olma olasılığı Denklem (2) ile hesaplanır [58].

$$P \{ \text{sistemin } T \text{ sıcaklığında } \omega \in \Omega \text{ durumunda olması} \} = \frac{\exp \left( -\frac{f(\omega)}{t_k} \right)}{\sum_{\omega'' \in \Omega} \exp \left( -\frac{f(\omega'')}{t_k} \right)} \quad (2)$$

$\omega \in \Omega$  çözümünden  $\omega'$  komşu çözümü üretme olasılığı olan  $g_k(\omega, \omega')$  ise Denklem (3) ile hesaplanır. Ardından negatif olmayan bir kare stokastik matris  $P_k$  geçiş olasılıkları Denklem (4) ile tanımlanabilir [58].

$$\sum_{\omega' \in N(\omega)} g_k(\omega, \omega') = 1, \text{ bütün çözümler } (\omega \in \Omega) \text{ için, } k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$P_k(\omega, \omega') = \begin{cases} g_k(\omega, \omega') \exp \left( -\frac{\Delta_{\omega, \omega'}}{t_k} \right) & \omega' \in N(\omega), \omega' \neq \omega \\ 0 & \omega' \in N(\omega), \omega' = \omega \\ 1 - \sum_{\omega'' \in N(\omega), \omega'' \neq \omega} P_k(\omega, \omega'') & \omega' \neq \omega \end{cases} \quad (4)$$

Eğer elde edilen yeni çözüm mevcut çözümden daha iyi ise ( $\Delta < 0$ ) kabul edilir ve bu komşu çözüm mevcut çözüm olarak alınır. Komşu çözümün mevcut çözümden daha kötü olması durumunda ise yöntem bu çözümü belirli bir olasılıkla kabul eder. Algoritma başlangıçta belirlenen durdurma ölçütleri sağlanıncaya kadar devam eder [56]. TB algoritmasının sözde kodu Şekil 1'de verilmiştir [57].

---

```

1: Bir başlangıç çözüm belirle ( $\omega \in \Omega$ )
2: Sıcaklık değişim sayacını seç  $k = 0$ 
3: Bir sıcaklık soğutma programı seç,  $t_k$ 
4: Başlangıç sıcaklığını belirle  $T = t_0 \geq 0$ 
5: Bir tekrar programı belirle, ( $M_k$  her bir  $t_k$  sıcaklığında yapılacak iterasyon sayısı)
6: Repeat
7:   Set  $m = 0$ 
8:   while  $T > 0$  do
9:     Yeni bir komşu çözüm ( $\omega' \in N(\omega)$ ) belirle
10:    Komşu çözüm mevcut çözüm farkını hesapla ( $\Delta_{\omega,\omega'} = f(\omega') - f(\omega)$ )
11:    if  $\Delta_{\omega,\omega'} \leq 0$  then
12:       $\omega \leftarrow \omega'$ 
13:    else if random  $[0,1] < \exp(-\Delta_{\omega,\omega'}/t_k)$  then
14:       $\omega \leftarrow \omega'$ 
15:    else  $\omega'$  çözümünü iptal et
16:     $m = m + 1$ 
17:    until  $m = M_k$ 
18:   $k \leftarrow k + 1$ 
19: Until durdurma koşulu

```

---

Şekil 1. Tavlama Benzetimi sözde (psudeo) kodu

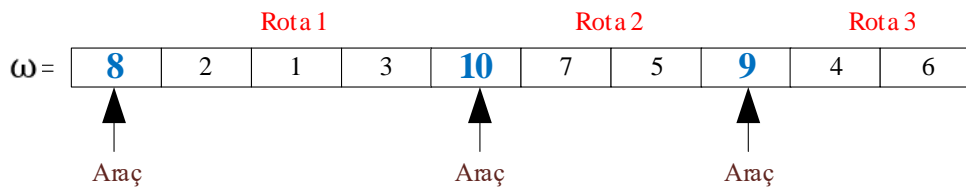
## B. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

TB algoritması Y-ARP'ye uygulanırken temelde 4 durumun belirlenmesi gerekir. Bunlar çözüm gösterimi, maliyet (amaç) fonksiyonu, yeni (komşu) çözüm üretme yöntemi ve soğutma çizelgesidir. Önerilen çözüm yaklaşımında aşağıda gösterilen yöntem ve parametreler kullanılmıştır.

*Çözüm gösterimi:* Çözümün kodlanması yöntemin en önemli kısmıdır. TB uygulamasına geçilmeden önce probleme uygun kodlama yapısının nasıl olacağı belirlenmelidir. Geliştirilen çözüm yönteminin doğru ve hızlı sonuçlar vermesi kullanılan kodlama yapısı ile doğrudan bağlantılıdır. Önerilen yöntemde Şekil 2'de gösterilen çözüm gösterimi kullanılmıştır. Bu örnek, 7 adet müşteri ve 1 depo (toplam 8 düğüm) ile 3 araçtan ( $i=8$  ve  $j=3$ ) oluşan bir problemi ifade etmektedir.

$$S = 1: (i + j - 1)$$

$$S = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 \text{ (8,9 ve 10 araçlara verilen numara);}$$



Şekil 2. Çözüm gösterimi

*Maliyet fonksiyonunun belirlenmesi:* TB algoritmasının uygunluk fonksiyonu oluşturulan araç rotalarına göre hesaplanan emisyon değeri şeklinde ifade edilmiştir. Son iterasyonda elde edilen en iyi çözüm, bütün iterasyonlar içerisinde en düşük emisyon değerlerini sağlayan çözümdür. Bu durumda, çözüm





Tablo 2. Problem setleri

Veri Seti	Veri Seti No	Düğüm Sayısı	Talep (kg)	Kullanılabilir Araç Sayısı
FB-VRP-002-15	1	15	14.389,18	10
FB-VRP-002-31	2	31	42.414,82	13
FB-VRP-003-11	3	11	9.429,71	7
FB-VRP-005-11	4	11	15.223,27	6
FB-VRP-006-13	5	13	20.715,76	7
FB-VRP-007-14	6	14	17.520,26	7
FB-VRP-007-26	7	26	33.282,26	8
FB-VRP-008-10	8	10	10.639,23	6
FB-VRP-008-19	9	19	26.427,23	10
FB-VRP-008-09	10	9	32.075,72	8
FB-VRP-008-31	11	31	27.983,64	8
FB-VRP-008-33	12	33	55.269,52	8
FB-VRP-008-37	13	37	40.365,32	8
FB-VRP-008-41	14	41	35.671,41	8
FB-VRP-008-49	15	49	36.705,94	8
FB-VRP-008-54	16	54	30.390,00	8
FB-VRP-008-64	17	64	29.006,41	8
FB-VRP-008-76	18	76	48.004,48	8
FB-VRP-008-87	19	87	42.175,88	8

Deneyisel çalışma için kullanılan gerçek yaşam problemlerinde araçlar özdeş olmayan (heterojen) kapasiteye sahip araçlardır. Araçların kapasiteleri, kiralama bedelleri, boş ve dolu emisyon değerleri Tablo 3’de, tavlama benzetimi yönteminin parametre değerleri ise Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Araç özellikleri

Tip No	Araç Kapasitesi (kg)	Kiralama Bedeli (TL/araç)	Emisyon değeri (kg/km)	
			Boş	Dolu
1	16.500	600	0,775	1,095
2	11.500	400	0,263	0,487
3	1.500	50	0,15	0,275

Tablo 4. Parametre değerleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Başlangıç çözüm	Rastgele	Başlangıç sıcaklığı	250
Komşuluk arama	Yer değiştirme (swap)	eta	0,1
Maksimum iterasyon	1200	Soğutma oranı	0,98

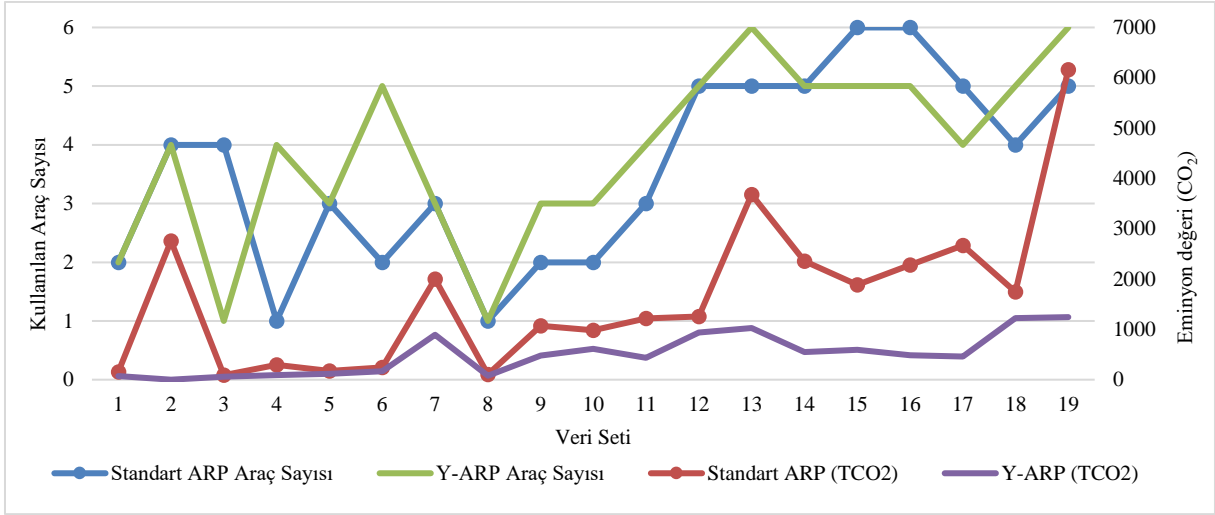
## IV. BULGULAR

Hazırlanan program ile yapılan deneyler sonucunda her bir problem için kullanılması gereken araçların kapasitesi (kg), araç rota mesafesi (km), araç emisyon değeri (kg), toplam mesafe (km), toplam emisyon değeri (CO<sub>2</sub>/kg), toplam maliyet (TL) ve çözüm süresi (sn) en iyi ve en kötü çözümler ile ortalama çözümler için ayrı ayrı Tablo 5’te gösterilmiştir. Tabloda kullanılan araç sayısı (n), toplam kapasite (Q), kullanılan kapasite oranı (r), toplam mesafe (d), toplam CO<sub>2</sub> miktarı (TCO<sub>2</sub>), toplam maliyet (TC) ve çözüm süresi (t) bilgileri standart ARP ve Y-ARP için ayrı ayrı Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. Standart ARP ve Y-ARP Çözüm Detayları

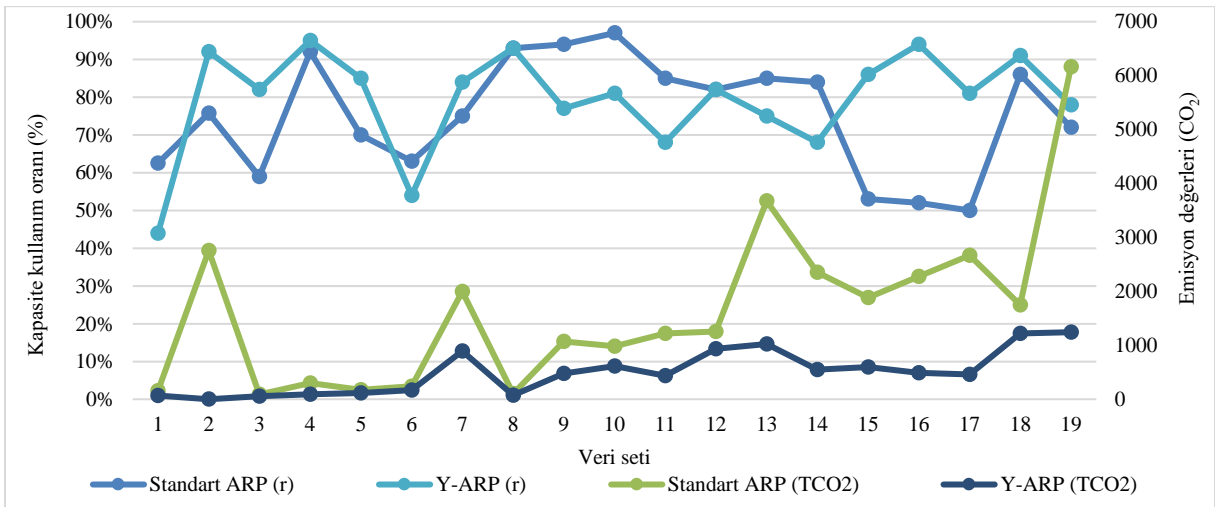
Veri Seti	Standart ARP							Y-ARP						
	<i>n</i>	<i>Q</i>	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>TCO<sub>2</sub></i>	<i>TC</i>	<i>t</i>	<i>n</i>	<i>Q</i>	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>TCO<sub>2</sub></i>	<i>TC</i>	<i>t</i>
1	2	23.000	%62,56	439,03	156,72	1.239,03	11,05	2	33.000	%44	233,17	70,74	1.023,17	7,55
2	4	56.000	%75,74	4.172,73	2.754,12	6172,73	16,87	4	46.000	%92	2.357,07	799,77	3.957,07	11,79
3	4	16.000	%59	366,84	89,33	916,81	8,34	1	11.500	%82	165,22	56,95	565,22	8,81
4	1	16.500	%92	314,25	297,90	914,25	8,91	4	16.000	%95	399,76	91,65	949,75	6,57
5	3	29.500	%70	437,40	174,62	1.487,40	9,22	3	24.500	%85	441,85	114,71	1.291,85	7,61
6	2	28.000	%63	377,18	241,17	1.377,18	9,80	5	32.500	%54	537,74	170,10	1.688,74	6,47
7	3	44.500	%75	2.490,79	1.999,48	4.090,79	14,12	3	39.500	%84	2.025,69	891,32	3.425,69	9,81
8	1	11.500	%93	307,10	103,35	707,10	9,19	1	11.500	%93	206,74	75,45	606,74	5,54
9	2	28.000	%94	1.585,87	1.069,70	2.585,87	12,37	3	34.500	%77	1.510,41	477,11	2.710,41	8,34
10	2	33.000	%97	1.082,51	981,12	2.282,51	5,57	3	39.500	%81	1.417,83	611,66	2.817,83	5,48
11	3	44.500	%85	2.155,00	1.217,04	3.755,00	11,79	4	41.000	%68	1.147,67	436,01	2.597,61	11,98
12	5	67.500	%82	1.950,85	1.255,67	4.350,85	12,53	5	67.500	%82	2.242,62	935,78	4.642,62	13,10
13	5	47.500	%85	4.242,30	3.677,02	5.942,30	16,90	6	54.000	%75	3.476,83	1.024,15	5.376,83	12,07
14	5	42.500	%84	4.626,35	2.355,15	6.126,35	24,44	5	52.500	%68	2.044,15	547,08	3.894,15	12,93
15	6	69.000	%53	3.345,36	1.885,94	5.795,36	22,44	5	42.500	%86	2.065,12	595,78	3.565,12	28,76
16	6	59.000	%52	3.476,69	2.278,35	5.576,69	23,36	5	32.500	%94	2.162,32	487,36	3.312,32	24,28
17	5	57.500	%50	8.037,12	2.669,89	7.087,12	26,57	4	36.000	%81	1.845,94	462,67	3.095,94	23,33
18	4	56.000	%86	2.860,88	1.747,50	4.860,88	31,30	5	52.500	%91	3.059,44	1.221,65	4.909,44	28,05
19	5	57.500	%72	8.276,31	6.163,62	10.326,31	35,52	6	54.000	%78	3.730,20	1.243,25	5.630,20	32,48
<b>ORT.</b>	<b>3,58</b>	<b>41421,05</b>	<b>75,28%</b>	<b>2660,24</b>	<b>1637,77</b>	<b>3978,66</b>	<b>16,33</b>	<b>3,89</b>	<b>37947,37</b>	<b>79,47%</b>	<b>1635,25</b>	<b>528,52</b>	<b>2950,56</b>	<b>13,94</b>

Çözümler için iki farklı yapı kullanılmıştır. Birinci durumda Denklem (5)'te gösterilen emisyon değeri esaslı amaç fonksiyonu kullanılarak problem Y-ARP olarak ele alınmıştır. İkinci durumda ise veri setleri amaç fonksiyonunda toplam mesafenin dikkate alındığı standart ARP olarak çözüldükten sonra emisyon değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4 ve Şekil 8 arasında yer alan grafiklerde Tablo 5'te yer alan verilerin kıyaslaması sunulmuştur. Yapılan ilk kıyaslama veri setlerine göre kullanılan araç sayıları ve emisyon miktarlarıdır. Veri setleri için kullanılan araç sayıları ve emisyon (CO<sub>2</sub>) değerleri Şekil 4'te bütünleşik olarak gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere kullanılan araç sayısından bağımsız olarak bütün veri setleri için Y-ARP çözümlerinin emisyon değerleri standart ARP çözüme kıyasla daha düşük çıkmıştır. Birçok veri setinde kullanılan araç sayısı fazla olsa da daha düşük emisyon sağlayan çözümler üretilebilmiştir. Standart ARP için kullanılan araçların ortalaması 3,58 iken Y-ARP için 3,89'dur.



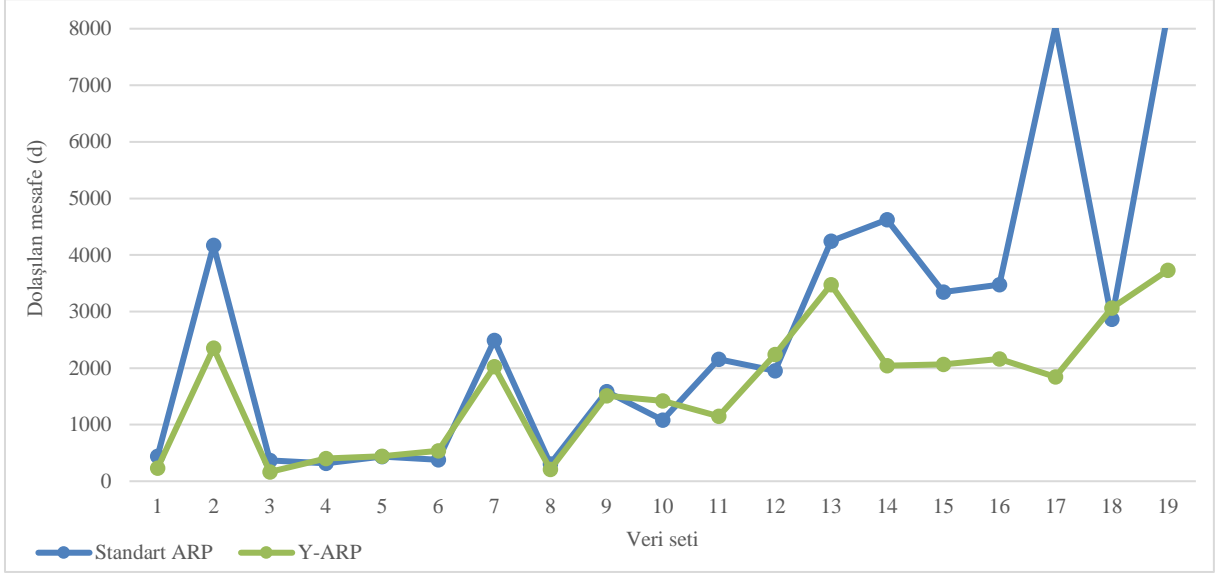
Şekil 4. Kullanılan araç sayıları ve emisyon ilişkisi

İkinci kıyaslama kapasite kullanım oranları ile birlikte emisyon değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Şekil 5'te yer alan grafiğin sol taraftaki dikey eksen kapasite kullanım oranlarını, sağ tarafta yer alan dikey eksen ise emisyon değerlerini (CO<sub>2</sub>) göstermektedir. Grafik incelendiğinde bazı veri setlerinde Y-ARP çözümünün kapasite kullanım oranı düşük iken bazı veri setlerinde standart ARP çözümünün kapasite kullanım oranı daha düşük çıkmıştır. Tüm veri setleri dikkate alındığında standart ARP çözümünün ortalama kapasite kullanım oranı %75 iken Y-ARP çözümünün ortalama kapasite kullanım oranı %79,47 olarak belirlenmiştir.



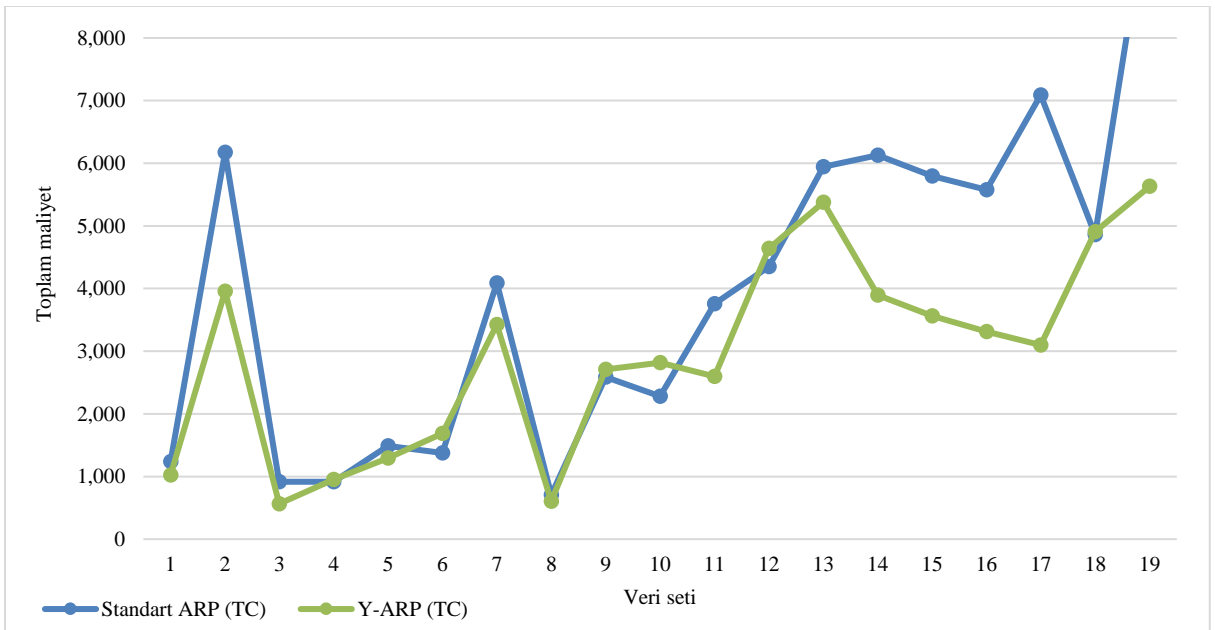
Şekil 5. Kapasite kullanım oranları ve emisyon ilişkisi

Üçüncü kıyaslama çözümlerde elde edilen toplam dolaşım mesafeleri için yapılmıştır. Şekil 6'dan görüleceği üzere FB-VRP-005-11 (4), FB-VRP-007-14 (6), FB-VRP-008-9 (10), FB-VRP-008-33 (12) ve FB-VRP-008-76 (18) dışında kalan 14 veri seti için Y-ARP çözümleri ile elde edilen dolaşım mesafeleri de daha düşüktür. Bütün veri setleri dikkate alındığında ise standart ARP çözümleri için ortalama dolaşım mesafesi 2.660,24 km iken Y-ARP için bu değer 1.635,25 olarak hesaplanmıştır. Bu durum emisyon ile birlikte dolaşım mesafelerinin de azaltılabileceğini göstermektedir.



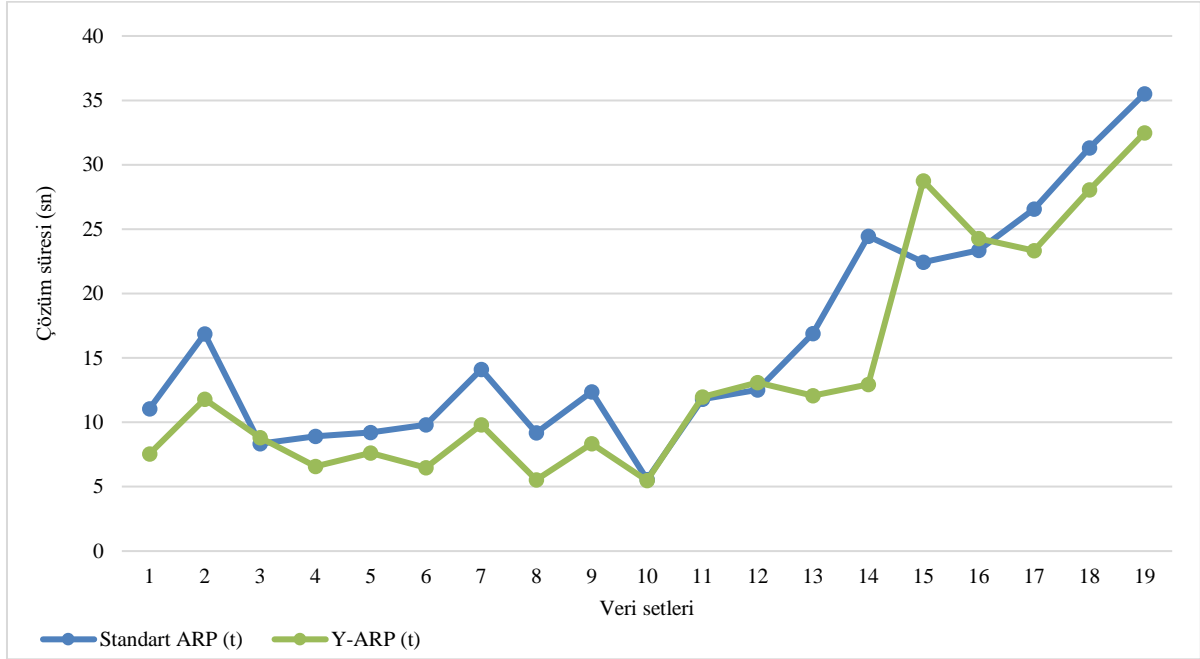
Şekil 6. Toplam dolaşım mesafeleri

Dördüncü karşılaştırma toplam maliyet değerleri için yapılmıştır. Standart ARP çözümleri dikkate alınarak belirlenen toplam maliyet değerleri Y-ARP ile elde edilen toplam maliyetler ile kıyaslaması Şekil 7'de sunulmuştur. Şekilde bütün veri setleri için verilen çözümlerin ortalaması standart ARP çözümleri için 3.978,66 iken Y-ARP çözümleri için 2.950,56 olarak belirlenmiştir. Ortalama değer bakımından Y-ARP ile daha çevreci çözümler elde edilmiştir.



Şekil 7. Toplam maliyet bakımından çözümlerin kıyaslaması

Nihai ve son karşılaştırma ise çözüm süreleri ile ilgilidir. Şekil 8 incelenecek olursa, Y-ARP çözümlenmeleri daha hızlı olduğu açıkça görülmektedir. Bütün veri setleri dikkate alındığında standart ARP çözümlenmesi için ortalama çözüm süresi 16,33 saniye iken Y-ARP çözümlenmesi için bu süre 13,94 saniye şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 8. Ortalama çözüm sürelerinin kıyaslanması

## V. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gün geçtikçe insanoğlunun çevre duyarlılığı artmaktadır. Bu duyarlılığın bir sonucu olarak ortaya çıkan yeşil tedarik zinciri uygulamalarından biri de operasyonel düzlemde yeşil araç rotalama problemidir. Bu çalışmada, kapasite kısıtlı araç rotalama problemi türlerinden biri olan Y-ARP, heterojen araç filosu ile dağıtım yapan bir firmanın araç rotalama problemi için gerçek yaşam verileri dikkate alınarak çözülmeye çalışılmıştır. Çalışmanın literatüre başlıca katkısı, problemin amaç fonksiyonunun gidilen yoldan ziyade taşıdığı ürün miktarına ve kullanılan aracın kapasitesine bağlı olarak değişiklik göstermesidir. Ayrıca bu araçların kiralama bedelleri de birbirinden farklıdır. Çözüm yöntemi olarak hızlı, etkili ve güvenilir çözümler üreten tavlama benzetimi metasezgiseli Julia® bilimsel hesaplama programlama dilinde geliştirilerek kullanılmıştır. Y-ARP'nin çözümünden elde edilen sonuçlar problemin standart ARP olarak çözülmesinin ardından elde edilen emisyon değerleri, çözüm süreleri ve kullanılan araç sayısı gibi özellikler bakımından kıyaslanmıştır. Bazı veri setleri için dolaşılacak mesafe standart ARP'ye göre daha büyük çıkmasına karşın gerek kullanılan araç türü gerekse emisyon değeri toplam maliyet unsurları dikkate alınarak yapılan çözümler çok daha çevreci sonuçlar ortaya koymuştur. Bunun başlıca sebebi emisyon değerinin sadece yola değil taşınan yükün miktarına da bağlı olmasıdır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, probleminin gerçek yaşam problemine biraz daha yaklaşması adına zaman penceresi kısıtının probleme eklenebileceği, mevcut durumda kiralanan araçlardan farklı kapasite ve emisyon değerlerine sahip araçların da portföye dahil edilerek daha etkili sonuçlar elde edilebileceği değerlendirilmektedir.

## **VII. KAYNAKLAR**

- [1] A. Rushton, P. Croucher, and P. Baker, *The Hand Book of Logistics and Distribution Management*, 3rd ed., London, United Kingdom: Kogan Page Limited, 2006, pp. 6-7.
- [2] R. Mason-Jones, and D.R. Towill, "Total cycle time compression and the agile supply chain," *International Journal of Production Economics*, vol. 62, no.1-2, pp. 61-73, 1999.
- [3] E.G., Dayıoğlu, K. Karagöl, Y. Şahin, and M.G. Kay, "Route planning methods for a modular warehouse system," *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, vol. 10, no. 1, pp. 17-25, 2020.
- [4] Y. Şahin, A. Eroğlu, "Hierarchical solution of order picking and capacitated vehicle routing problems," *Suleyman Demirel University Journal of Engineering Sciences and Design*, vol. 3, no. 1, pp. 15-28, 2015.
- [5] K. Karagul, Y. Sahin, E. Aydemir, and A. Oral, "A simulated annealing algorithm based solution method for a green vehicle routing problem with fuel consumption," in *Lean and Green Supply Chain Management*, 1st ed., vol. 273, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. 161-187.
- [6] F. Daneshzand, "The vehicle-routing problem", in *Logistics Operations and Management Concepts and Models*, 1st ed., Waltham, USA: Elsevier Insights, 2011, pp. 127-145.
- [7] C. Lin, K.L. Choy, G.T. Ho, S.H. Chung, and H.Y. Lam, "Survey of green vehicle routing problem: past and future trends," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 4, pp. 1118-1138, 2014.
- [8] S. Belbağ, "Yeşil kapasite kısıtlı araç rotalama problemi: bir literatür taraması," *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 19, s. 1, ss. 345-366, 2017.
- [9] Ç. Koç, ve E. Özceylan, "Yeşil ve elektrikli araç rotalama problemleri üzerine bir literatür taraması ve araştırma öngöröleri" *Gaziantep University Journal of Social Sciences*, c. 17, s. 3, ss. 1041-1053, 2018.
- [10] M. Asghari, and S. M. J. M. Al-e-hashem, "Green vehicle routing problem: a state-of-the-art review," *International Journal of Production Economics*, vol. 231, pp. 107899, 2021.
- [11] R. Moghdani, K. Salimifard, E. Demir, and A. Benyettou, "The green vehicle routing problem: a systematic literature review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, pp. 123691, 2021.
- [12] M. Afshar-Bakeshloo, A. Mehrabi, H. Safari, M. Maleki, and F. Jolai "A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria" *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 12, no. 4, pp. 529-544, 2016.
- [13] M. Bruglieri, S. Mancini, F. Pezzella, and O. Pisacane, "A new mathematical programming model for the green vehicle routing problem," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 55, no. 2016, pp. 89-92, 2016
- [14] Ç. Koç, and I. Karaoglan, "The green vehicle routing problem: a heuristic based exact solution approach," *Applied Soft Computing*, vol. 39, pp. 154-164, 2016.
- [15] V. Leggieri, and M. Haouari, "A practical solution approach for the green vehicle routing problem," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 104, pp. 97-112, 2017.

- [16] Y. Zhou, and G.M. Lee, “A Lagrangian relaxation-based solution method for a green vehicle routing problem to minimize greenhouse gas emissions,” *Sustainability*, vol. 9, no. 5, pp. 776, 2017.
- [17] J. Andelmin, and E. Bartolini, “An exact algorithm for the green vehicle routing problem,” *Transportation Science*, vol. 51, no. 4, pp. 1288-1303, 2017.
- [18] E. Aydemir and K. Karagül, “Solving a periodic capacitated vehicle routing problem using simulated annealing algorithm for a manufacturing company,” *Brazilian Journal of Operations Production Management*, vol. 17, no. 1, pp. 1–13, 2020.
- [19] Y. Şahin ve A. Eroğlu, “Kapasite kısıtlı araç rotalama problemi için metasezgisel yöntemler bilimsel yazın taraması,” *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 9, s. 4, ss. 337–355, 2014.
- [20] S. Erdoğan, and E. Miller-Hooks, “A green vehicle routing problem,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 48, no. 1, pp. 100-114, 2012.
- [21] J. Jemai, M. Zekri, and K. Mellouli, “An NSGA-II algorithm for the green vehicle routing problem,” in *12th European Conference (EvoCOP)*, 2012, pp. 37-48.
- [22] E. Jabir, V. V. Panicker, and R. Sridharan, “Multi-objective optimization model for a green vehicle routing problem,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 189, pp. 33-39, 2015.
- [23] E. Jabir, V. V. Panicker, and R. Sridharan, “Design and development of a hybrid ant colony-variable neighbourhood search algorithm for a multi-depot green vehicle routing problem,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 57, pp. 422-457, 2017.
- [24] A. Tiwari and P. C. Chang, “A block recombination approach to solve green vehicle routing problem,” *International Journal of Production Economics*, vol. 164, pp. 379-387, 2015.
- [25] İ. Küçükoğlu, S. Ene, A. Aksoy, and N. Öztürk, “A memory structure adapted simulated annealing algorithm for a green vehicle routing problem,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, no. 5, pp. 3279-3297, 2015.
- [26] A. Montoya, C. Guéret, J. E. Mendoza, and J. G. Villegas, “A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 70, pp. 113-128, 2016.
- [27] S. Zhang, Y. Gajpal, and S.S. Appadoo, “A meta-heuristic for capacitated green vehicle routing problem,” *Annals of Operations Research*, vol. 269, pp. 753–771, 2018.
- [28] M. Yavuz, “An iterated beam search algorithm for the green vehicle routing problem,” *Networks*, vol. 69, no. 3, pp. 317-328, 2017.
- [29] G. Poonthalir, and R. Nadarajan, “A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (F-GVRP),” *Expert Systems with Applications*, vol. 100, pp. 131-144, 2018.
- [30] P.R.D.O. da Costa, S. Mauceri, P. Carroll, and F. Pallonetto, “A genetic algorithm for a green vehicle routing problem,” *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 64, pp. 65-74, 2018.
- [31] M. Affi, H. Derbel, and B. Jarboui, “Variable neighborhood search algorithm for the green vehicle routing problem,” *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 9, no. 2, pp. 195-204, 2018.



- [32] A. Sruthi, S. P. Anbuudayasankar, and G. Jeyakumar, "Energy-efficient green vehicle routing problem," *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management (IJISSCM)*, vol. 12, no. 4, pp. 27-41, 2019.
- [33] Y. Li, M. K. Lim, and M. L. Tseng, "A green vehicle routing model based on modified particle swarm optimization for cold chain logistics," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 119, no. 3, pp. 473-494, 2019.
- [34] B. Peng, Y., Zhang, Y., Gajpal, and X. Chen, "A memetic algorithm for the green vehicle routing problem," *Sustainability*, vol. 11, no. 21, pp. 6055, 2019.
- [35] N. M. E. Normasari, V. F. Yu, and C. Bachtiyar, "A simulated annealing heuristic for the capacitated green vehicle routing problem," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, pp. 1-18, 2019.
- [36] Y. Li, H. Soleimani, and M. Zohal, "An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives," *Journal of Cleaner Production*, vol. 227, pp. 1161-1172, 2019.
- [37] D. Utama, D. Widodo, M. F. Ibrahim, and S. K. Dewi, "A new hybrid butterfly optimization algorithm for green vehicle routing problem," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2020, pp.1-14, 2020.
- [38] W. Zhang, Y. Gajpal, S. Appadoo, and Q. Wei, "Multi-depot green vehicle routing problem to minimize carbon emissions," *Sustainability*, vol. 12, no. 8, pp. 3500, 2020.
- [39] M. E. H. Sadati, and B. Çatay, "A hybrid variable neighborhood search approach for the multi-depot green vehicle routing problem," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 149, pp. 102293, 2021.
- [40] S. K. Dewi, and D. M. Utama, "A new hybrid whale optimization algorithm for green vehicle routing problem," *Systems Science & Control Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 61-72, 2021.
- [41] C. Blum, and A. Roli, "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison," *ACM computing surveys (CSUR)*, vol. 35, no. 3, pp. 268-308, 2003.
- [42] A. T. Murray and R. L. Church, "Applying simulated annealing to location-planning models," *Journal of Heuristics*, vol. 2, no. 1, pp. 31-53, 1996.
- [43] D. Karaboğa, *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, 2. Baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık, 2011, böl. 2, ss. 21-46.
- [44] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [45] N. Metropolis, R. Bivins, M. Storm, A. Turkevich, J. M. Miller, and G. Friedlander, "Monte Carlo calculations on intranuclear cascades. I. Low-energy studies," *Physical Review*, vol. 110, no. 1, pp. 185-203, 1958.
- [46] D. S. Johnson, C. R. Aragon, L. A. McGeoch, and C. Schevon, "Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation; part I, graph partitioning," *Operations Research*, vol. 37, no. 6, pp. 865-892, 1989.

- [47] R. Tavakkoli-Moghaddam, N. Safaei, M. M. O. Kah, and M. Rabbani, "A new capacitated vehicle routing problem with split service for minimizing fleet cost by simulated annealing," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 344, no. 5, pp. 406-425, 2007.
- [48] S. C. Leung, J. Zheng, D. Zhang, and X. Zhou, "Simulated annealing for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 22, no. 1-2, pp. 61-82, 2010.
- [49] M. R. Wilhelm, and T. L. Ward, "Solving quadratic assignment problems by simulated annealing," *IIE transactions*, vol. 19, no. 1, pp. 107-119, 1987.
- [50] A. T. Murray, and R. L. Church, "Heuristic solution approaches to operational forest planning problems," *Operations-Research-Spektrum*, vol. 17, no. 2, pp. 193-203, 1995.
- [51] N. İnak, S. Tokat ve K. Karagül, "Alt sınır temeline dayalı ağırlıklı tavlama yöntemi ile kutulama probleminin çözümü," *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 5, s. 3, ss. 549-567, 2018.
- [52] M. D. C. Cunha, and J. Sousa, "Water distribution network design optimization: simulated annealing approach," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 125, no. 4, pp. 215-221, 1999.
- [53] M. H. Correia, J. F. Oliveira, and J. S. Ferreira, "Cylinder packing by simulated annealing," *Pesquisa Operacional*, vol. 20, no. 2, pp. 269-286, 2000.
- [54] S. Z. Selim, and K. Alsultan, "A simulated annealing algorithm for the clustering problem," *Pattern Recognition*, vol. 24, no. 10, pp. 1003-1008, 1991.
- [55] B. Türkay, F. Küçüktezcan, ve A. Bulut, "Elektrik enerjisinin bölgeler arası alışverişinin optimizasyonu," *EMO Bilimsel Dergi*, c. 1, s. 1, ss. 31-38, 2011.
- [56] Y. Şahin, "Sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin gezgin satıcı problemi çözüm performanslarının kıyaslanması," *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, c. 19, s. 4, ss. 911-932, 2019.
- [57] A. G. Nikolaev, and S. H. Jacobson, "Simulated annealing," in *Handbook of Metaheuristics*, 2nd ed., vol. 146, Boston, USA: Springer, 2010, pp. 1-39.
- [58] D. Henderson, S. H. Jacobson, and A. W. Johnson, "The Theory and Practice of Simulated Annealing," in *Handbook of Metaheuristics*, 1st ed., Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 287-319.
- [59] L. Lin, and C. Fei, "The simulated annealing algorithm implemented by the MATLAB," *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 9, no. 6, pp. 357-360, 2012.
- [60] Y. Eren, İ. B. Küçükdemiral, and İ. Üstoğlu, "Introduction to optimization," in *Optimization in Renewable Energy Systems*, Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 27-74.