Diyaliz Hastası Taşıma Hizmetlerinde Elektrikli Araç Rotalama

Melek HOCAOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2025

Electric Vehicle Routing in Dialysis Patient Transportation Services

Melek HOCAOĞLU

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Industrial Engineering

July 2025

Diyaliz Hastası Taşıma Hizmetlerinde Elektrikli Araç Rotalama

Melek Hocaoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Üretim ve Servis Sistemleri Bilim Dalı
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. İnci SARIÇİÇEK
Temmuz 2025

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Melek HOCAOĞLU'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Diyaliz Hastası Taşıma Hizmetlerinde Elektrikli Araç Rotalama" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İnci SARIÇİÇEK
İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. İnci SARIÇİÇEK

Üye: Prof. Dr. Meryem ULUSKAN

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman YILDIZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. İNCİ SARIÇİÇEK danışmanlığında hazırlamış olduğum "Diyaliz Hastası Taşıma Hizmetlerinde Elektrikli Araç Rotalama" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 14/07/2025

Melek Hocaoğlu

İmza

ÖZET

Günümüzde sağlık sektöründe hasta taşımacılığı, yaşlı nüfusun artması ve buna paralel kronik rahatsızlıkların yaygınlaşması ve evde bakım hizmetlerine olan talebin artmasıyla birlikte, etkin plan ve sistematik yapı gerektiren bir konu haline gelmiştir. Hastalık çeşitlerine göre hastaların ihtiyaç ve taleplerinde özellikle, düzenli tedavi olması gereken ve tedavi süresince evlerinden sağlık kuruluşlarına ve sağlık kuruluşlarından evlerine zamanında ulaşım hizmeti sağlanması operasyonel katkılar ve hizmet kalitesi bakımından önem arz etmektedir. Günümüzde özellikle yaşlı nüfusun talebiyle birlikte gelişen ihtiyaç doğrultusunda, hasta taşıma süreçleri şehir içi taşımacılıkta önemli avantajlar sunan elektrikli araçlar ile yerine getirilebilir.

Çalışma, hastaneden evlere, evlerden hastaneye hastaların taşınmasında daha düşük maliyetlerle taşıma imkânı sunan elektrikli araçların kullanım önerisiyle rota optimizasyonu sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, hasta talep ve ihtiyaçları gözetilerek öncelikle sağlık sektöründe hasta taşımacılığına yönelik diyaliz hastalarının taşınması senaryosu ele alınmıştır. Çalışmada, hasta taleplerini karşılayacak şekilde, araç kapasite ve şarj-batarya kısıtı yanında hastaların farklı zaman penceresi kısıtları dikkate alınarak rota planlaması amaçlanmıştır. Bu amaçla, problem için sunulan matematiksel model küçük boyutlu problemler için GAMS (General Algebraic Modeling System) yazılımının CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Elektrikli aracın kat ettiği toplam mesafenin en küçüklenmesi amacı doğrultusunda elde edilen sonuçlar, önerilen metasezgisel sonuçları ile kıyaslanmıştır. Yirmi hasta içeren problemin matematiksel model ile çözüm süresinin makul olmadığı görülmüştür. Tavlama Benzetimi Algoritması ile elde edilen sonuçlar rota planlamasında önerilen algoritmanın kısa sürede iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hasta Taşımacılığı, Sağlık Lojistiği, Optimizasyon, Elektrikli Araç.

SUMMARY

Today, patient transportation in the health sector has become an issue requiring an effective plan and systematic structure with the increase in the elderly population and the spread of chronic diseases in parallel with it, and the increasing demand for home care services. In the needs and demands of patients according to the types of diseases, in particular, it is important to provide timely transportation services from their homes to health institutions and from health institutions to their homes, which should be regular treatment and during treatment, in terms of operational contributions and service quality. In line with the needs that are developing today, especially with the demand of the elderly population, patient transportation processes can be fulfilled with electric vehicles, which offer important advantages in urban transportation.

The study offers route optimization with the proposal of using electric vehicles that offer the possibility of transporting patients from hospital to homes, from homes to hospital at lower costs. Within the scope of this study, the scenario of transporting dialysis patients primarily for patient transportation in the healthcare sector was considered by taking into account patient demands and needs. In the study, it was aimed to plan the route by taking into account the different time window restrictions of the patients in addition to the vehicle capacity and charge-battery restrictions in order to meet the patient demands. For this purpose, the mathematical model presented for the problem has been solved with the CPLEX solver of the GAMS (General Algebraic Modeling System) software for small-sized problems. The results obtained in order to minimize the total distance traveled by electricity were compared with the proposed metaheuristics's results. It was found that the solution time of the problem involving twenty patients with a mathematical model was not reasonable. The results obtained by the Simulated Annealing algorithm have shown that the proposed algorithm for route planning gives good results in a short time.

Keywords: Patient Transportation, Healthcare Logistics, Optimization, Electric Vehicle.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimiyle bana rehberlik eden, yönlendirmeleriyle çalışmama değer katan saygıdeğer danışmanım **Prof. Dr. İnci Sarıçiçek'e** teşekkür ederim.

Akademik ve profesyonel gelişimime katkı sağlayan, çalışma sürecimde desteklerini esirgemeyen **Eker** ailesine ve yöneticilerime teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman yanımda olan, sabır ve anlayışla desteğini hissettiren aileme ve özellikle bu süreçteki en büyük destekçim **eşime** teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
SUMMARY vii
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ x
ÇİZELGELER DİZİNİ xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 4
2.1. Yeşil Lojistik ve Elektrikli Araçlar 5
2.2. Genel Topla-Dağıt Uygulamaları 11
2.3. Sağlık Sektöründe Topla-Dağıt Uygulamaları 15
3.MATERYAL VE YÖNTEM 23
3.1. Veri Seti 23
3.2. Genel Topla-Dağıt Problemleri 24
3.3. Çözüm Yöntemleri 27
3.3.1. Matematiksel modeller 28
3.3.2. Metasezgisel yöntemler 31
3.4. Problemin Tanımlanması 37
3.5. Matematiksel Model 39
3.6. Tavlama Benzetimi Algoritması 43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 46
4.1. Matematiksel Model Sonuçları 46
4.2. Tavlama Benzetimi Algoritması Sonuçları 52
4.3. Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi 64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 67
KAYNAKLAR DİZİNİ 68
EK AÇIKLAMALAR 74
Ek Açıklama-A: Tavlama Benzetimi algoritması sözde kod 74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2. 1. Yıllara göre EV yayın sayısı 7
2. 2. Güncel topla-dağıt uygulamaları 13
3. 1. Genel VRP proplemlerinin sınıflandırılması 24
3. 2. Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması 34
4. 1. Beş hasta içeren C5 problemi için en küçük mesafeyi veren rota 48
4. 2. On hasta içeren C10 problemi için en küçük mesafeyi veren rota 50
4. 3. Yirmi hasta içeren C20 problemi için elde edilen rota 52
4. 4. CPLEX ve SA algoritmasının çözüm sürelerinin karşılaştırması 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Topla-dağıt problemleri ve sağlıkta uygulamalar 16
3.1. Mevcut ve önerilen araç özellikleri 38
3.2. Kümeler 40
3.3. Parametreler 41
3.4. Karar değişkenleri 41
4.1. C5 test problemindeki hastalara ilişkin talep verisi 47
4.2. C10 test problemindeki hastalara ilişkin talep verisi 49
4.3. C20 test problemindeki hastalara ilişkin talep verisi 51
4.4. C5 probleminin SA algoritması çözüm sonucu 53
4.5. C10 probleminin SA algoritması çözüm sonucu 54
4.6. C20 probleminin SA algoritması çözüm sonucu 55
4.7. Senaryo 1_C20-Problem1 çözümü 57
4.8. Senaryo 1_C20-Problem2 çözümü 57
4.9. Senaryo 1_H10-Problem3 çözümü 58
4.10. Senaryo 1_H20-Problem4 çözümü 58
4.11. Senaryo 2_C20 çözümü 59
4.12. Senaryo 2_C20-Problem1 çözümü 60
4.13. Senaryo 2_C20-Problem2 çözümü 61
4.14. Senaryo 2_H10-Problem3 çözümü 62
4.15. Senaryo 2_H20-Problem4 çözümü 63
4.16. C5-C10-C20 test problemleri için sonuçların karşılaştırılması 64
4.17. Senaryo 1 için sonuçlar 65
4.18. Senaryo 2 için sonuçlar 66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
EV	Elektrikli Araç (Electric Vehicle)
VRP	Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem)
PDP	Alma–Bırakma Problemi (Pickup and Delivery Problem)
DARP	Ara_Bin Problemi (Dial-a-Ride Problem)
E-VRP	Elektrikli Araç Rotalama Problemi (Electric Vehicle Routing Problem
E-VRPTW	Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi (Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows)
MILP	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (Mixed Integer Linear Programming)
SA	Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Elektrikli araçlar, çevreye zararlı emisyonlar salmayan ve elektrik enerjisi ile işletilen taşıma araçları olarak tanımlanmaktadır. Gelişen teknoloji ve artan çevresel farkındalık, elektrikli araçların çevre dostu ulaşım alternatifleri olarak hızla popülarite kazanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durum, Türkiye de dahil olmak üzere dünya genelinde elektrikli araç satışlarının sürekli bir artış göstermesine neden olmaktadır. Günümüz teknolojisi ve her geçen gün meydana gelen yenilikçi çalışmalarda taşımacılık alanındaki sürdürülebilirlik konularına ilgi artmıştır. Özellikle son yıllarda elektrikli araçların kullanımı taşımacılık ve lojistik sektöründe önemli bir odak noktası haline gelmiştir. Elektrikli araçların kullanımı ile elde edilen kazanımlarda enerji verimli alternatifler ve çevre dostu uygulamalar; özellikle belli bir zaman aralığında, başlangıç ve bitiş noktaları arasında hem bireysel hem de toplu ulaşım taşımacılık hizmetini kapsayan çözümlere dikkat çekmektedir.

Çalışma, hastaneden evlere, evlerden hastaneye hastaların taşınmasında daha düşük maliyetlerle taşıma imkânı sunan elektrikli araçların kullanım önerisiyle rota optimizasyonu sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, sağlık sektöründe hasta taşımacılığına yönelik diyaliz hastalarının taşınması senaryosu ele alınmıştır.

Yaşlı nüfusun artmasıyla birlikte kronik böbrek yetmezliği, dünya genelinde yaygınlaşan bir sağlık problemi haline gelmiştir. Bu hastalığın başlangıç ve son evresindeki durumda hasta bireyler için diyaliz tedavisi, yaşamın sürdürülebilirliği açısından zorunlu bir tedavi şeklidir. Diyaliz tedavisinde, hastalar genellikle haftada en az üç kez, düzenli aralıklarla diyaliz merkezlerine gitme-gelme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu nedenle taşıma hizmetleri, diyaliz tedavisinde oldukça kritik bir öneme sahiptir.

Diyaliz hastalarının büyük bir bölümü yaşlı, engelli veya fiziksel engeli bulunan bireylerden oluşmaktadır. Bu sebeple belirli nedenlerle hastalığı bulunan bireylerin tedavi merkezlerine ulaşımı zor bir durum olmakla birlikte; bu süreçte düzenli, güvenli ve zamanında bir ulaşım hizmetine duyulan ihtiyaç da artmaktadır. Uygun olmayan veya düzensiz taşıma hizmetleri; tedaviye geç kalma, tedavinin aksaması veya hastaların fiziksel/psikolojik olarak etkilenmesi vb. problemlere yol açmaktadır. Özellikle yaşlı, engelli

ya da kendi imkanlarıyla ulaşım sağlayamayan hastalar için bu hizmetin düzenli, zamanında ve konforlu olması hayati önem taşımaktadır.

Diyaliz tedavisi, hastaların haftada en az üç kez belirli saatlerde tedavi merkezlerine gitmelerini gerektirdiği için, etkin planlama kritik bir öneme sahiptir. Bu süreçte, hasta taşıma hizmetlerinde hastaların ve ailelerin beklentileri arasında zamanında ulaşım, rahat ve temiz araç kullanımı, bekleme sürelerinin asgariye indirilmesi, refakat hizmeti ile kişiye özel ihtiyaçlara duyarlılık bulunmaktadır. Kamu ve özel sektör tarafından sunulan bu hizmetlerin hasta memnuniyeti ve tedavi başarı oranları ile doğrudan ilişkisi vardır.

Birçok ülkede, belediyeler veya sağlık hizmet sağlayıcıları diyaliz hastalarına yönelik planlı taşıma hizmetleri sunmaktadır. Örneğin, Birleşik Krallık'ta NHS, diyaliz hastalarının taşınmasını planlamakta ve rota optimizasyonu sistemleri kullanarak hastaların merkezlere zamanında ulaşımını sağlamaktadır. Benzer şekilde, Hollanda, Belçika ve İsveç gibi ülkelerde de hasta taşımacılığı politikaları, sağlık politikaları ve lojistik çözümlerle bir araya getirilmekte, bu alanda maliyet ve hizmet kalitesi optimize edilmektedir.

Literatürde elektrikli araçlarla topla-dağıt problemi içeren sağlık sektörü ve diyaliz hastaları özelinde yapılan çalışmalar mevcuttur. Cordeau ve Laporte (2007), özellikle yaşlı, hasta ve engelli bireylerin taşınması gibi sosyal odaklı ulaşım hizmetlerinde kullanılan, zaman pencereli ve kullanıcı odaklı bir araç rotalama problemi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada statik ve dinamik, tekli ve çoklu araç, sabit/serbest servis sıralamaları gibi kapsamlı bir analiz sunmuşlardır. Çalışma kapsamında, Tamsayılı programlama ve metasezgisel algoritmalar kullanılmış, zaman pencereleri, maksimum sürüş süresi ve araç kapasitesi gibi kısıtlar altında minimum toplam maliyet veya toplam seyahat süresi amaçlanmıştır. Braekers vd. (2016), çok merkezli ve heterojen araç filosuna sahip hasta taşımacılığı problemi üzerine çalışmış, çözüm için Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) ve metasezgisel algoritmalar kullanmıştır.

Literatüre yönelik yapılan incelemelerde, mevcut çalışmaların genellikle kısıtlı bir perspektiften ulaşım sistemlerinin elektrikli araçlarda optimizasyon problemlerini ele aldığı göze çarpmaktadır. Bu çalışmanın amacı, hasta taşımacılığı için önerilen modelle toplam seyahat mesafesini minimize etmektir. Önerilen model, hasta taşımıcılığı gibi hassasiyet

gerektiren taşımacılıkta zaman penceresi sınırları dahilinde ve minimum rota mesafesi ile taşımayı sağlayarak operasyonel verimliliği arttırmak ve dolaylı olarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Bu hususlar, ulaşım sektöründeki uygulayıcılar ve politika yapıcılar için değerli ve uygulanabilir öneriler sunma potansiyeli taşımaktadır.

Literatür incelendiğinde, hasta taşımacılığında fosil yakıtlı araçlarla yapılan çalışma (WOS- Patient Transport) dikkat çekmektedir. Buna karşın son on yıldan beri elektrikli araçlarla gerçekleştirilen çalışmalar ise giderek artan bir ilgiyle göz önüne çıkmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın literatüre katkısı, hasta taşımacılığında minimum rota mesafesini hedefleyerek çevresel sürdürülebilirliği sağlamakta ve operasyonel gerçekçilikle uyumlu bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışma, elektrikli araçların entegrasyonuyla hem ulaşım hizmetlerinin kalitesini artırmayı hem de fosil yakıt bağımlılığını azaltarak çevresel etkileri en aza indirmeyi hedeflemektedir.

Tezin birinci bölümünde çalışmanın önemi, amaç ve kapsamı ortaya konmuştur. İkinci bölümde, elektrik araçlarla hasta taşımacılığında topla dağıt problemleri ile ilgili literatür verilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışmada ele alınan problem tanımlanmış, matematiksel model ve metasezgisel algoritma sunulmuştur. Dördüncü bölümde çözüm yöntemleri olarak Karma Tamsayılı Matematiksel Model ve Tavlama Benzetimi (SA) algoritmasıyla elde edilen çözüm sonuçları verilmiştir. Son bölüm ise genel değerlendirmeler ve geleceğe yönelik önerileri içermektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Elektrikli araçların çevre dostu özellikleri ve enerji verimliliği sunması, bu araçların dünya genelinde hızlı bir şekilde benimsenmesine yol açmıştır. Bu bağlamda, elektrikli araçların karbon emisyonları ve enerji tüketimi üzerine pek çok akademik çalışmaya yer verilmektedir.

1990'lı yıllarda gerçekleştirilen araştırmalara bakıldığında, elektrikli araçlar ile elektrik şebekeleri arasındaki etkileşim incelenmiş Kempton ve Letendre (1997) elektrikli araçları elektrik şebekesine entegre bir güç kaynağı olarak önermiştir. Chau vd. (1999) ise elektrikli araçların enerji kaynaklarına dair kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Bu çalışmalar, elektrikli araçların enerji sistemleri üzerindeki etkilerini ve potansiyel faydalarını analiz etmektedir.

Son yıllarda, ulaşımda kullanılan araçların sayısı, teknolojik gelişmeler ve artan talep doğrultusunda önemli bir artış göstermiştir. Bu durumun başlıca sonuçları arasında enerji verimliliği ile çevresel kirlilik öne çıkmaktadır. Küresel ölçekte bir enerji krizi yaşandığı bu süreçte, petrol fiyatlarının yükselmesi ve çevresel sorunların derinleşmesi, elektrikli ve hibrit araçların otomotiv sektöründeki önemini artırmıştır; bu araçların sayısı ve geliştirilmesi hızla artmaktadır. Bu gelişmeler, birçok akademik araştırmanın da önünü açmıştır (Durmuş ve Kaymaz, 2020).

Elektrikli ve hibrit araçlar üzerine yapılan araştırmalar, genellikle mekanik, elektrik ve elektronik teknolojilerine odaklanmaktadır. Bu alanlardan biri, batarya ve şarj sistemlerinin geliştirilmesidir. Birçok çalışma, farklı şarj yöntemlerinin incelenmesi ve optimize edilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Ayrıca, elektrikli araçların en önemli sorunlarından biri olan hızlı şarj konusuna ilişkin de çeşitli araştırmalar yürütülmektedir (Kakillioglu, 2022).

2.1. Yeşil Lojistik ve Elektrikli Araçlar

Lojistik temelli taşımacılık sistemlerinde verimliliği artırmak, maliyetleri azaltmak ve yüksek müşteri memnuniyeti amaçları doğrultusunda taşıma ve dağıtım faaliyetlerinin etkin şekilde planlanması kritik öneme sahiptir. Taşıma ve dağıtım süreçlerindeki işleyişin matematiksel modellerle ifade edilmesi, karar destek sistemlerinin geliştirilmesi ve süreçlerin optimizasyonunda kullanılan temel bir analitik yapı haline gelmiştir. Lojistik ve taşımacılık alanındaki literatür çalışmalarında en sık ele alınan problemlerden biri, Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem – VRP)'dir.

VRP, ilk kez Dantzig ve Ramser (1959) tarafından formalize edilmiştir. Geçmişten günümüze birçok farklı senaryo ile çalışmalar yapılarak geliştirilmiş ve gerçek dünya lojistik ve taşımacılık problemlerine uyarlanabilir hâle getirilmiştir. Literatürde, birçok VRP türevi geliştirilmiştir (Braekers vd., 2016; Toth ve Vigo, 2014). Fosil yakıtlı araçlardan sonra elektrikli araçlarla yapılacak taşımaları içeren problemler literatürde ilgili kısıt ve özelliklerle modellenmektedir. Şarj istasyonu seçimi, şarj olma süresi vb. kısıtlar en çok çalışılan kısıtlar arasındadır.

Küresel iklim değişikliği beraberinde getirdiği çoğu riskle lojistik ve ulaşım hizmetindeki çevresel etkilerin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Sera gazı emisyonlarının artışı, doğal kaynakların tükenme riski, fosil yakıt tüketimi etkileri tüm dünyada taşımacılık kapsamındaki faaliyetlerin yeniden değerlendirilmesini konu almaktadır. Bu bağlamda, çevresel sürdürülebilirliği esas alan yeşil lojistik yaklaşımları hem akademik çalışmalarda hem de uygulama alanında önemli bir değişimi beraberinde getirmiştir. Lojistik sektöründeki karbon emisyonlarının yüksek payı dikkate alınırsa, enerji etkin kaynak kullanımı, atıkların azaltılması, alternatif yakıt sistemlerine geçiş ve çevre dostu taşıma çözümleri kaçınılmaz bir gerekliliği ortaya koymaktadır. Bu dönüşüm sürecinde elektrikli araçlara (EV – Electric Vehicle), olan ilgi giderek artmış ve bu araçların sahip olduğu düşük emisyon değerleri, gürültüsüz çalışma alternatifi ve yüksek enerji verimi özelliği sayesinde şehir içi taşımacılık faaliyetleri için güçlü bir alternatif haline gelmiştir (Chen vd., 2016).

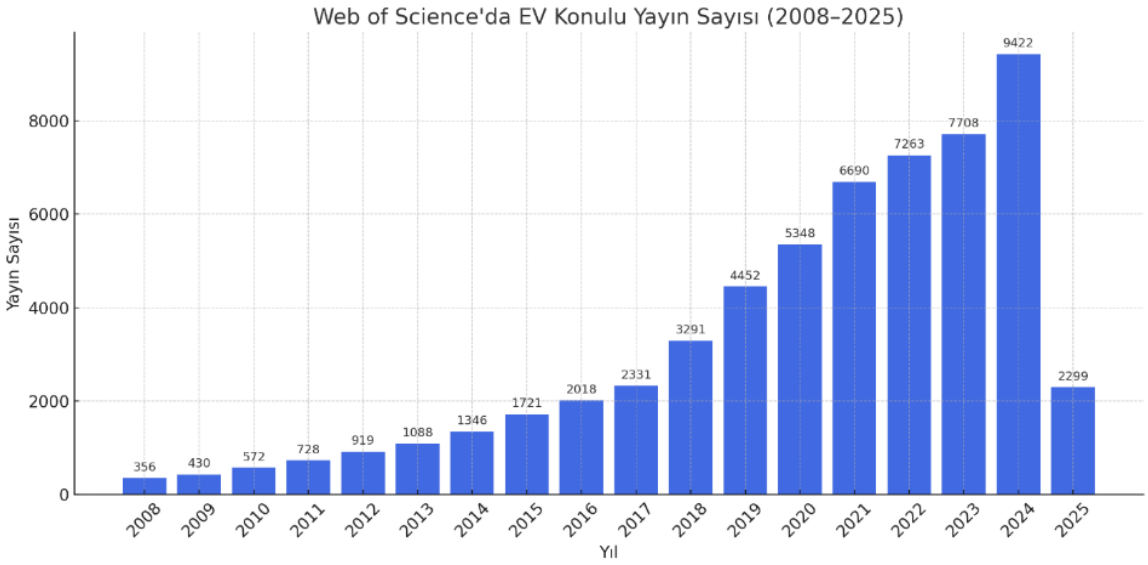
EV teknolojileri son yıllarda şarj özelliği kapsamında batarya enerji yoğunluğu, şarj süresi, batarya ömrü ve enerji yönetimi gibi alanlarda büyük gelişmeler göstermiştir. Bu gelişmeler, özellikle kullanım alanı daha yaygın kısa menzilli, sık tekrarlanan rotalarda lojistik faaliyetlerine katkı sağlamaktadır. EV'lerin en önemli avantajlarından; gürültü ve hava kirliliğini elimine etme potansiyeli sürdürülebilir çevreci yaşam hedefleriyle doğrudan paralellik göstermektedir (Chen vd., 2016). Ancak, bu avantajlara rağmen EV'lerin lojistik sistemlere entegrasyonunda önemli operasyonel ve teknik zorluklar da bulunmaktadır. Literatürde sıkça vurgulanan başlıca kısıtlar batarya ve şarj konuları ile ilgilidir:

- Sınırlı menzil kapasitesi (~100–150 km) (Pelletier vd., 2016),
- Şarj altyapısının yetersizliği (Chen vd., 2016),
- Uzun şarj süreleri ve batarya ömrü (Element Energy, 2013).

Enerji tüketiminin rotaya, yük miktarına ve dış koşullara göre değişmesi de ele alınan özelliklerdir (Ehsani vd., 2018). Bu zorluklar, klasik lojistik planlama modellerinin yetersiz kaldığı durumları doğrulamakta ve elektrikli araçlara özgü optimizasyon çalışmalarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle literatür çalışmalarında, enerji tüketimini, şarj planlamasını, menzil kısıtlarını ve rotalama kararlarını birlikte değerlendiren çok kriterli ve çok amaçlı modellemeler ön plana çıkmaktadır (Pelletier vd., 2016).

Mühendislik alanında EV teknolojileri üzerine yapılan akademik çalışmalarda bir artış mevcuttur. Özellikle son dönem literatür çalışmalarında araç tasarımı, batarya yönetimi, şarj altyapısı planlaması, enerji verimliliği ve taşıma sistemlerine entegrasyon gibi çok amaçlı konulara odaklanılmış, teorik ve pratik uygulamalar artmıştır. Bu alandaki çalışmalara olan ilginin pozitif eğilimi göstermek amacıyla, Web of Science (WoS) veri tabanında yapılan bir analizde, *"Electric Vehicle"* ve *"Engineering"* filtreleri kullanılarak SCI indeksli yayın sayıları yıllara göre incelenmiştir. Şekil 2.1'de sunulan verilere göre, 2008 yılında yalnızca 356 olan yayın sayısı, 2024 yılı itibarıyla 9.422'ye ve 2025 yılı analiz tarihine göre çıkan sonuçlarda 2299'a ulaşmıştır. Bu çalışmalardaki artış, yalnızca teknolojik gelişmelerin değil, küresel enerji çalışmalarının, sürdürülebilir ulaşım hedefleri ve çalışmalarının aynı zamanda finansal teşvik mekanizmalarının bilimsel çalışmalara yansıdığının göstergesidir. Ayrıca elektrikli araçların yalnızca mühendislik tasarımı açısından değil, sürdürülebilir taşımacılık faaliyetleri, rota optimizasyon çalışmaları şarj ve

batarya kapsamında enerji yönetimi gibi alanlarda da güçlü bir araştırma trendine sahip olduğunu göstermektedir (Larminie ve Lowry, 2003).



Şekil 2. 1. Yıllara göre EV yayın sayısı

Elektrikli araçların (EV) taşımacılık sistemlerine entegrasyonu, özellikle çevresel sürdürülebilirlik ve karbon emisyonlarının azaltılması konularındaki küresel hedefler doğrultusunda önemli bir gelişme göstermektedir. Bu bağlamda, hasta taşımacılığı gibi özel taşımacılık uygulamalarında da elektrikli araçların kullanımı giderek artan bir araştırma alanı haline gelmiştir. Literatürde, hasta taşımacılığı ile ilgili elektrikli araç çalışmaları incelendiğinde, 2010 yılından itibaren toplamda 100'den fazla çalışma bulunduğu gözlemlenmektedir. Bu çalışmaların büyük bir kısmı, hasta taşımacılığı süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi amacıyla elektrikli araçların kullanımı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Çalışmalarda kullanılan yöntemler açısından, hasta taşımacılığı çalışmalarında kullanılan matematiksel modellerin oranı oldukça yüksektir. Literatürde, bu tür çalışmaların yaklaşık %70'i matematiksel modelleme tekniklerine dayanmaktadır. Bu matematiksel modeller, enerji tüketimi, batarya kapasitesi, şarj süreleri ve şarj istasyonları gibi elektrikli araçlara özgü parametreleri dikkate alarak, daha gerçekçi ve uygulanabilir çözümler sunmayı hedeflemektedir (Yang vd., 2022).

Gelişen teknolojiyle birlikte, yapay zeka ve makine öğrenmesi gibi modern yöntemlerin de bu problemlerin çözümünde kullanılmaya başlandığı gözlemlenmektedir. Bu

tür yöntemler, hasta taşımacılığı süreçlerinin optimizasyonunu sağlamakta ve sistemin genel verimliliğini artırmaktadır. Bu çerçevede, elektrikli araçların hasta taşımacılığındaki rolü, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda giderek artmakta ve bu alanda yapılan araştırmalar, gelecekte sağlık hizmetlerinin daha çevre dostu ve etkili bir şekilde sunulmasına katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Bu alanda güncel kaynaklarla yapılan araştırmalar, elektrikli araçların entegrasyonunun gerekliliğini ve faydalarını vurgulamaktadır (Yang vd., 2022).

Çevresel sürdürülebilirlik, karbon emisyonu ve salımının azaltılması konusundaki çalışmalar, alternatif enerji kaynaklarına yönlendirme gibi toplumu etkileyen küresel hedefler, elektrikli araçların (EV) lojistik ve taşımacılık sistemlerine entegrasyonunu hızlandırmıştır. Bu konudaki evrilme, klasik Araç Rotalama Problemleri'nin (VRP) yeniden modellenmesini gerekli kılmış ve literatürde Elektrikli Araçlarla Araç Rotalama Problemi (Electric Vehicle Routing Problem – EVRP) olarak adlandırılan yeni bir araştırma konusu ortaya ve Erdogan ve Miller-Hooks, (2012) EVRP'yi literatürde ilk kez tanımlayarak formüle etmişlerdir.

Elektrikli park tesisleri ile yardımcı güç ünitelerinin entegre bir biçimde değerlendirildiği bir problem, Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (Mixed Integer Linear Programming) modeli çerçevesinde tanımlanmış ve kapsamlı deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Koç vd. (2016b), şehir içi yük taşımacılığına yönelik depo yeri, araç filosu ve rotalama kararlarının araç emisyon salınımı üzerindeki birleşik etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, ürünlerin şehir içindeki depolardan müşterilere ulaştırılması hedeflenmektedir. Problemin çözümü için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama Algoritması (ALNS- Adaptive Large Neighborhood Search) ile yöntem geliştirilmiş ve çeşitli yeni test problemleri üzerinde etkinliği değerlendirilmiştir. Depo yerleşimi, maliyet, müşteri dağılımı ve heterojen araç filosu gibi parametrelerin yakıt tüketimi, emisyon salınımı ve operasyonel maliyetler üzerindeki etkileri kapsamlı deneylerle analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, şehir içindeki depoların banliyölere taşınmasının ve heterojen araç filosunun kullanılmasının avantajlarını sayısal verilerle ortaya koymaktadır.

Eshtehadi vd. (2017), talep ve seyahat süresi belirsizliklerini yeşil ulaşım planlaması bağlamında incelemiş ve bu çerçevede çeşitli dayanıklı optimizasyon tekniklerini önermişlerdir.

Yeşil lojistik üzerine yapılan daha fazla çalışma için Eglese ve Bektaş (2014), Demir vd. (2014b) ve Lin vd. (2021) eserleri incelenebilir. Bu kaynaklar, yeşil ulaşım stratejileri ve uygulamaları hakkında derinlemesine bilgiler sunmaktadır.

E-VRP, klasik VRP yapısına ek olarak, elektrikli araçlara özgü enerji tüketimi, batarya kapasitesi, şarj istasyonları, şarj süreleri ve enerji yönetimi stratejileri gibi teknik parametreleri içerir. Bu parametreler, rotalamayı teorik ve pratik anlamda daha karmaşık bir yapıya dönüştürürken, enerji verimliliği ve çevreci yaklaşım hedefleriyle uyumlu daha gerçekçi çalışmaların modellenmesini sağlamaktadır (Pelletier vd., 2016).

İzleyen kısımda E-VRP yapısının içerdiği başlıca kısıtlar ve bu kısıtların literatürde nasıl ele alındığı ve ele alınan özellikler temelinde açıklanmıştır.

Batarya kapasitesi ve menzil kısıtı: Elektrikli araçların sınırlı batarya kapasitesine sahip olması günlük taşıma operasyonlarında hedeflenen menzilin üzerine çıkamama durumu gibi problemleri beraberinde getirir. Bu bağlamda, elektrikli aracın batarya seviyesinin, toplam enerji tüketiminin ve rota güzergahlarının etkin bir şekilde planlanması kritiktir. Schneider vd. (2014), batarya kapasitesi ve menzil kısıtını E-VRPTW (VRP with Time Windows for Electric Vehicles) modeline entegre ederek, rotaların şarj noktalarına erişimini zorunlu kılan bir yapı geliştirmiştir. Montoya vd. (2017) ise enerji tüketiminin sabit varsayılmasının gerçekçi olmadığını ortaya koyarak; yük, yol eğimi ve hız gibi faktörlere bağlı dinamik enerji tüketimi modeli geliştirmiştir.

Şarj altyapısı ve istasyon yerleşimi: Şarj istasyonlarının taşıma alanında konumlandırılması, araçların güzergahlarında doğrudan etkiye sahiptir. Bu nedenle şarj istasyonların doğru konumlandırılması, aracın batarya kullanım süresini ve rota verimliliğini belirleyen çok önemli kritik bir faktördür. Goeke ve Schneider (2015), elektrikli ve içten yanmalı motorlu araçların birlikte çalıştığı karma filo sistemlerinde şarj istasyonu yerleşimini modellemiş ve istasyon sayısının operasyonel verimlilik üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Keskin ve Çatay (2016), İstanbul'un şehir içi yol ağı üzerinde tasarladıkları modelde, şarj istasyonlarının yerleşiminin rota maliyeti, enerji kullanımı ve hizmet seviyesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

Şarj süresi ve stratejileri: Elektrikli araçların şarj süresi, operasyonel anlamda zamanlamayı direkt etkiler. Bu noktada tam şarj (full charging), kısmi şarj (partial charging) veya pil değiştirme seçenekleri farklı çalışma konularının ortaya çıkmasını sağlar. Felipe vd. (2014), çok teknolojili araç filolarında kısmi şarj stratejilerinin, toplam rota süresini azaltarak zaman kazancı sağladığını göstermiştir. Keskin ve Çatay (2016), kısmi şarj stratejilerini rotalama modellerine entegre etmiş, bu stratejilerin enerji tüketimini azaltarak güzergâh maliyetlerini düşürdüğünü ve araç başına müşteri sayısını artırabildiğini ortaya koymuştur.

Enerji tüketiminin rotaya bağlı değişkenliği: Elektrikli araçların enerji tüketimi gerçek hayatta sabit olmamakla birlikte; araç yükü, araç kapasitesi, yolun eğimi, yol yüzeyinin düz veya tırtıklı olması ve araç hızı gibi faktörlere bağlı değişkenlik gösterir. Bu durum, aracın rota boyunca enerji tüketiminin sürekli değişken bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Montoya vd. (2017), enerji tüketimini doğrusal olmayan fonksiyonlarla modelleyerek, güzergâh yapısına göre batarya tükenme eğrilerini hesaplamış ve klasik sabit tüketim varsayımlarının yetersizliğini göstermiştir. Schneider vd. (2014) ise modelinde araçların batarya durumunu her yolculuk sonrasında güncelleyerek, gerçek zamanlı tüketim takibi üzerinden çözüm üretmiştir. Müşterilerin belirli zaman aralıklarında hizmet almasının gerekli olduğu durumlarda, E-VRP modellerinde zaman penceresi (time windows) kısıtı oluşur. Bu kısıt, taşıma süresi, aracın şarja gitme zamanını ve bekleme süresi gibi durumları etkiler. Ayrıca yazarlar zaman penceresi kısıtlarını şarj gereksinimleriyle birleştirerek, EV'lerin hem müşteri taleplerini hem de batarya ihtiyaçlarını zamanında karşılayabilecek rotaları optimize etmiştir. Goeke ve Schneider (2015), zaman pencerelerinin çok dar olduğu durumlarda karma filo yapılarının (EV + ICEV) zamanlama da esneklik sağladığını göstermiştir.

E-VRP problemleri, çok sayıda kompleks yapıda kısıtlara sahip olduğundan farklı amaçlara hizmet edecek çeşitli çözüm yöntemleriyle ele alınmaktadır. Schneider vd. (2014), EVRP-TW için Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) modeli önermiştir. Büyük boyutlu problemler için ise araştırmacılar Genetik Algoritma (GA), Yasaklı Arama (TS), Tavlama Benzetimi (SA) ve Değişken Komşuluk Arama (VNS) gibi metasezgisel algoritmalar kullanmaktadır. Keskin ve Çatay (2016), kısmi şarj stratejisini entegre ettikleri modelde GA ve SA algoritmalarıyla çok amaçlı çözüm elde etmişlerdir. Heterojen filo

sistemleri üzerine çalışan Goeke ve Schneider (2015), elektrikli ve konvansiyonel araçları birlikte kullanarak gerçek filo yapısına çok yakın ve operasyonel anlamda uygulanabilirliği yüksek bir model yapısı geliştirmiştir.

2.2. Genel Topla-Dağıt Uygulamaları

Literatüre 1959 yılında Dantzing ve Ramser (1959) tarafından kazandırılan VRP, çözümü oldukça zor bir kombinatoriyel (combinatorial) optimizasyon problemidir. Dantzing ve Ramser (1959) VRP'yi literatüre kazandırdıktan sonra problem ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Farklı amaçlar, kısıtlar, araç sayısı ve özelliklerine göre birçok çeşidi olan VRP 1980'lerde Topla-Dağıt VRP olarak kendine VRP'nin içinde özel bir yer edinmiştir. VRP'nin bu özel türü ile ilgili günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Topla-Dağıt VRP'nin üç farklı tipi bulunmaktadır. Bunlar (Koç ve Karaoğlan, 2015);

1) Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi,
2) Karışık Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi
3) Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi

Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemlerinde (Vehicle Routing Problem with Backhauls) müşteriler dağıtım ve toplama müşterileri olmak üzere iki guruba ayrılır. Bu problemde bir rota üzerinde, dağıtım müşterilerine toplama müşterilerinden önce hizmet verilmektedir. Bu varsayım genelde, araç içerisinde dağıtılacak ürünler ile toplanan ürünlerin tekrar yerleştirilmesinin mümkün olmadığı durumlar için söz konusudur. Yani araç dağıtım müşterilerinin talepleri ile yüklenip, bütün ürünler dağıtılıp araç boşaldıktan sonra toplama müşterilerine hizmet verilmektedir. Ana depolardan marketlere sebze-meyve dağıtımından sonra üreticilerden yeni ürünlerin depoya taşınması bu problem tipine örnek olarak verilebilir (Ropke ve Pissinger, 2006) .

Karma Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminde (Vehicle Routing Problem with Mixed Pickup and Delivery), önce dağıt sonra topla VRP'deki müşteri öncelikleriyle ilgili yapılan varsayımın kaldırılması ile elde edilen problem tipidir. Yani bir rota üzerinde toplama ve dağıtım müşterilerine karışık sırayla hizmet verilebilmektedir. Araç içerisinde yeniden yüklemenin mümkün olduğu bir problem tipidir. Hizmet sektöründe, depodan

müşterilere kargolar dağıtılırken diğer müşterilerden depoya götürülmek üzere kargoların müşterilerden toplanması; sağlık sektöründe, kanların merkezlerden hastanelere dağıtımı esnasında toplama kamplarından merkeze yeni kanların götürülmesi bu problem tipine örnek olarak verilebilir.

Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminde (Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery), dağıtım ve toplama müşterileri aynı müşteriler olup bu müşterilere eşzamanlı olarak hizmet verilmektedir. Müşterilere uğranıldığında dağıtılacak ürün bırakılıp toplanılacak ürün alınmaktadır. Gıda sektöründe, içecek endüstrisinde bos şişelerin taşınması, otomotiv sektöründe yedek parçaların geri dönüşüm için fabrikalara geri gönderilmesi VRPSPD'ye örnek olarak verilebilir.

Literatürde topla-dağıt yapıların kullanıldığı uygulama alanlarının başlıcaları:

- Sağlık taşımacılığı (özellikle yaşlı ve kronik hasta taşımaları)
- Okul servisleri ve öğrenci taşımacılığı
- Engelli birey taşımacılığı
- Kurumsal çalışan servis planlaması
- Toplu taşımaya entegrasyon (first/last mile problems)
- Afet sonrası yardım ve mobil sağlık lojistiği
- Mobil laboratuvar, klinik ve test araçlarının yönlendirilmesi

Belirtilen her bir uygulama alanı, problem özelinde çeşitli senaryo ve kısıtları içermektedir. Bu bağlamda ele alınan problemin modellenmesinde sektöre özgü değerlendirmeler yapmak ve bu doğrultuda stratejik yapıyı oluşturmak kritik öneme sahiptir. Şekil 2.2'de farklı sektör bazlı kullanım alanları bir görsel ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.2. Güncel topla-dağıt uygulamaları

Sağlık sektörü uygulamaları hariç önemli bir uygulama alanı olan öğrenci ve okul servis taşımacılığı, özellikle belirli yaş gruplarındaki bireylerin evlerinden alınıp eğitim kurumlarına güvenli, zamanında ve operasyonel açıdan verimli bir şekilde taşınmasını amaçlamaktadır. Bu bağlamda ortaya çıkan taşıma planlamaları, zaman pencereleri, kapasite kısıtları, rota süresi sınırları ve öğrenci çeşitliliği gibi çok sayıda parametreyi içermesi nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptir. Özellikle elektrikli araçların bu sistemlere entegre edilmesi, taşımacılığın çevresel etkilerini azaltmakta ve sürdürülebilir ulaşım hedefleriyle uyumlu çözümler üretmektedir. Bu kapsamda literatürdeki çalışmalara bakıldığında;

Hou vd. (2022) tarafından yürütülen çalışmada, çok amaçlı okul servis rotalama problemi ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilmiş bir NSGA-II algoritması kullanılarak rota optimizasyonu, toplam otobüs-servis sayısı ve toplam seyahat mesafesi gibi amaçların optimizasyonu sağlanmıştır.

Shang vd. (2020) çalışmasında, birden fazla okul için karışık yüklemeli okul servis rotalama problemini çözmek amacıyla bir model önermiştir. Model, farklı okulların başlangıç saatlerini ve öğrenci dağılımını dikkate alarak toplam seyahat süresini minimize etmeyi hedeflemiştir.

Elektrikli araçların öğrenci taşımacılığına entegrasyonu, dünya genelinde henüz yaygınlık kazanmamıştır. Fakat bu kapsamda ihtiyaç doğrultusunda çalışmaların artması ve çevreci yaklaşım stratejilerinin benimsenmesi ile de şehir içi taşımacılıkta karbon emisyonu hedefleri, karbon ayak izi azaltımı ve enerji verimliliği politikaları bir dönüşüm çerçevesinde değerlendirilmektedir. Bu bağlamda yapılacak gelecekteki akademik ve uygulamalı çalışmalarda aşağıdaki konulara öncelik verilmesi muhtemeldir:

- Batarya kapasitesi ve şarj istasyonuna gitme zamanlaması gibi EV'ye özgü değişkenlerin dikkate alındığı dinamik ve esnek rota planlama modelleri
- Yapay zekâ destekli veri analitiği ile öğrenci yoğunluğu, trafik verisi ve servis dağılımının eş zamanlı analiz edildiği entegre sistemler
- Gerçek zamanlı konum takibi ile öğrenci yoklama sistemlerinin senkronize biçimde çalıştığı akıllı taşımacılık altyapıları
- Öğrencilerin yaş grubu, engellilik durumu, sosyal güvenlik ihtiyaçları gibi faktörlere dayalı farklılaştırılmış hizmet senaryoları

Kurumsal çalışan taşımacılığı, kamu kurumu veya devlet çalışanları baz alınarak, sabah belirli noktalardan kişilerin alınıp iş yerine bırakılması, mesai bitiminde ise ilgili kişilerin yine belirlenen noktalara bırakılmasını konu alan rotalama çeşidini kapsar. Bu taşımacılık senaryosunda, trafik yoğunluğunun en yüksek olduğu zaman dilimleri, araç sayısı, şarj planlaması, rotalamada oluşabilecek yoğunluk ve esnek mesai saatleri gibi unsurlar; modeli oldukça karmaşık bir yapıya dönüştürmektedir. Bu bağlamda, ulaşım sisteminin etkin ve verimli yönetimi için söz konusu etkenlerin dikkate alınması gerekmektedir. Böylece hem hizmet kalitesinin artırılması hem de operasyonel verimliliğin sağlanması mümkündür. Örneğin; Bongiovanni vd. (2022), otonom elektrikli araçlarla yapılan ofis transfer planlamalarında, makine öğrenmesi destekli rota güncelleme stratejileriyle rota süresini %15, maliyeti %9 oranında azaltmayı başarmıştır.

Gelecek çalışmalarda, özellikle 2021 pandemi etkisinden sonra çalışanların evden çalışma-esnek mesai gibi faktörleri, çevre dostu taşıma teşviğini ele alan ve ayrıca işveren maliyetlerine odaklı modellerle bütünleşik yeni nesil servis optimizasyon modelleri geliştirilmelidir.

Günümüzde en yaygın kullanılan taşımacılık sistemlerinden birisi de toplu taşıma sistemleridir. Toplu taşıma sistemlerinde entegrasyon, bireylerin evlerinden metro, otobüs veya tren gibi ana hat toplu taşıma sistemlerine ulaştırılması veya bu ulaşımın tam ters hareketle yapılması sürecini kapsamaktadır. Bu taşımacılık senaryosu kapsamına ise, kırsal-şehir taşımacılığı, uber hizmetler, banliyö taşımacılığı ve büyük kampüs sistemlerindeki hizmetler kritik rol oynamaktadır. Literatür çalışmalarında bazı örneklere bakıldığında;

Zhang vd. (2024) çalışmasında, elektrikli araçlar için kaynak planlaması ve enerji yönetimini ele almıştır. Çalışmada, derin pekiştirmeli öğrenme (Multi-Agent Deep Reinforcement Learning) algoritması kullanılmıştır. Gerçek zamanlı filo yönetimi ve enerji tüketimi optimizasyonu sağlanmıştır. Çalışmanın gelecek çalışmalarında ise otonom araçların, talep tahmin modelleriyle desteklenmesi ve mobil uygulamalarla entegrasyon yapılarak rota planlamasının geliştirilmesi önerilmektedir.

2.3. Sağlık Sektöründe Topla-Dağıt Uygulamaları

Yaşlı nüfusun artışıyla birlikte, kronik hastalıklarda yaygınlaşma, evde bakım hizmeti taleplerinde artma meydana gelmiş demografik ve sistemsel dönüşümler sebebiyle de sağlık sektörü özelinde taşımacılık alanında özel planlama çözümlerine ihtiyaç artmıştır. Bu kapsamdaki hasta grupları, özellikle yaşlı, engelli veya hareket kabiliyeti sınırlı bireylerin tedavi, kontrol ya da bakım amaçlı olarak hastane, poliklinik, fizik tedavi merkezine ulaşımını kapsamakta ve lojistik açıdan yüksek hassasiyet gerektirmektedir. Bu nedenle topla-dağıt problemleri, özellikle kişiye özel lojistik uygulamaları, kısıtlı zaman ve kapasite sınırları altında hizmet verme, öncelik sıralaması ve müşteri memnuniyetine bağlı konfor unsurlarını içeren taşımalar vb. taleplerin olduğu uygulamalarda önemli derecede avantaj sağlamaktadır. Özellikle toplu taşıma senaryolarında, hasta çeşitleri ve taşıma türleri bazında değerlendirme yapıldığında; engelli birey taşımacılığı, yaşlı bakım hizmetleri, mobil klinik taşımacılığı gibi taşıma çeşitliliği ve problem senaryolarında, sadece taşımanın yapılması değil, verilen hizmetin kalitesi ve kullanıcının deneyimi de önemlidir. Bu nedenle özellikle sağlık sektöründeki taşımacılık problemleri, matematiksel modellemenin yansıra operasyonel planlama doğrultusunda da çok katmanlı bir yapıya sahiptir.

Çizelge 2.1'de topla-dağıt problemleri kapsamındaki özellikler, özelliklere bağlı açıklamalar ve bu özelliklerin sağlık taşımacılığı bağlamındaki değerlendirmeleri verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Topla-Dağıt problemleri ve sağlıkta uygulamalar

ÖZELLİK	AÇIKLAMA	SAĞLIK TAŞIMACILIĞI
Alma ve Bırakma Noktaları (Alma-Bırakma Çifti)	Her yolcunun bir başlangıç (alma) ve bir bitiş (drop-off) noktası vardır. Alma noktası her zaman bırakmadan önce gelmelidir.	Örneğin evden hastaneye giden bir hasta sabah alınır, akşam tekrar evine bırakılır. Bu sıralama her yolcu için ayrı ayrı korunmalıdır.
Sıra ve Bağlılık Kısıtı (Precedence Constraint)	Alma işlemi, ona karşılık gelen bırakma işleminden önce gerçekleştirilmek zorundadır.	Kronik hastaların randevu saatlerine göre alma-bırakma sıralarının dikkatli planlanması gerekir (Parragh vd., 2008).
Zaman Penceresi (Time Windows)	Hem alma hem de bırakma noktaları belirli saat aralıklarında hizmet almalıdır.	Diyaliz hastalarının tedavi saatleri gibi sabit zaman dilimleri içinde hizmet verilmelidir (Cordeau ve Laporte, 2003).
Yolculuk Süresi Sınırı (Maximum Ride Time)	Her yolcunun araç içinde geçireceği süre maksimum değeri aşmamalıdır.	Konforu ve sağlık durumu nedeniyle yolculuk süresi kısa tutulmalıdır (Molenbruch vd., 2017).
Araç Kapasitesi	Araçlar belirli bir yolcu kapasitesine sahiptir, bu sınır aşılamaz.	Evde bakım hizmetleri veya belediye taşımalarında minibüs tipi araçlar genellikle 6–10 kişi taşımaktadır.
Hizmet Kalitesi Ölçütleri	Bekleme süresi, zamanında alma/bırakma, seyahat memnuniyeti gibi müşteri merkezli ölçütler dikkate alınır.	Bekleme süresinin yüksek olması hasta konforunu ve hastane/klinik zamanlamasını doğrudan etkileyebilir (Jaw vd., 1986).

Sağlık taşımacılığı ve hasta transferi: Sağlık sektöründe, zaman duyarlılığının yüksek olması, bireyselleştirilmiş hizmet gerektiren taşıma operasyonları kapsaması bu sektör bazında en uygun ve yaygın uygulandığı alan olarak ele alınabilir. Özellikle yaşlı, engelli ya da kronik hastalık sahibi bireylerin tedavi, kontrol veya bakım hizmetlerine erişiminde taşımacılık lojistik alanında önemli bir bileşendir. Bu bağlamda hasta konforu, seyahat süresi

sınırları, öncelik dereceleri, zaman pencereleri ve eş zamanlı kapasite yönetimi gibi insana özgü kısıtlarla genişletilmektedir (Ho vd., 2018).

Bu kapsamdaki probleme özgü örnek uygulama senaryolarına aşağıda yer verilmiştir.

- Diyaliz gibi düzenli tedavi gören hastaların evlerinden alınarak hastaneye ulaştırılması, hastanedeki hastaların da alınarak evlerine bırakılmasını konu alan kapsam,
- Kemoterapi veya fizik tedavi gibi belirli zaman aralıklarında verilen sağlık hizmetlerine yönelik kısıtlı zaman çerçevesinde planlı ulaşım sağlama,
- Acil olmayan medikal transferler (Non-Emergency Medical Transport-NEMT) için kamu ya da özel filolarla çalışan taşımacılık sistemleri.

Bu uygulamalar, özellikle şehir içi taşımacılıkta bölgesel bazlı zamanlama, konfor ve enerji verimliliğini aynı anda optimize etmek için planlı bir rotalama kurgusu oluşturmayı gerektirmektedir.

Engelli birey taşımacılığı: Engelli birey taşımacılığı tanımında, bireysel hareket kabiliyeti kısıtlı yolcuların evlerinden alınıp çeşitli kamu hizmet noktalarına (örneğin hastane, rehabilitasyon merkezi, belediye hizmetleri) güvenli, konforlu ve erişilebilir şekilde taşınması yer almaktadır. Hastaların alınması ve bırakılması hizmeti kapsamında engelli birey taşımacılığını konu alan taşımalar, özel donanımlı araç gereksiniminin yanı sıra, bireylerin taşınma talebiyle birlikte personel tahsisinin yapılmasını ve buna bağlı araç kapasitesi kısıtlarını, birey ihtiyacına yönelik bekleme süresi kısıtlarını ve bireyin seyahat süresi kısıtları gibi parametreleri içerir. Elektrikli araçlarla bu taşıma prensibine entegre edilen sistemlerde enerji optimizasyonunun sağlanması ve kısa rota mesafesi önceliklendirilmelidir. Bu kapsamda literatür çalışmalarından bazı örneklere bakıldığında; Masmoudi vd. (2018), batarya değişim istasyonları kullanan bir modelle, engelli birey taşımacılığında hem enerji hem de bekleme süresi optimizasyonu sağlamıştır. Modelde heterojen filo kullanımı ve yolcu tipine göre farklı zamanlama stratejileri başarıyla entegre edilmiştir. Ho vd. (2018), engelli bireylerin taşıma prensibine duyarlı çözümler için sistematik bir sınıflandırma önerisinde bulunarak, özellikle erken zaman penceresine ulaşma durumunda bekleme süresi, fiziksel yardım gereksinimi, randevu hassasiyeti gibi faktörleri optimize eden modellerin gerekliliğine vurgu yapmıştır.

Gelecek araştırmalarda dijital sağlık verileriyle talep entegrasyonu, bireysel sağlık durumuna bağlı yardım ihtiyacı verisini öngörebilen akıllı planlama sistemleri kritik önem taşıyacaktır.

Afet Sonrası Yardım ve Mobil Sağlık Lojistiği: Afet bölgelerinde hasta, yaşlı veya yaralı bireylerin ihtiyaç duyulan konuma zamanında ve güvenli şekilde taşınması yüksek ve kritik önceliğe sahip olmakla birlikte, dinamik yapıdaki topla-dağıt problemlerini öncelikli olarak ortaya çıkarmaktadır. Bu taşımacılık senaryosunda rota planlaması; trafikteki sıkışma ya da kapanmalar, yıkım durumları, şarj altyapısına ulaşım kısıtları gibi çok çeşitli değişkenlerden kaynaklı oldukça zorludur.

Literatürde, Molenbruch vd. (2023), sabit rota üzerinde elektrikli araçlarla yapılan esnek duraklı taşımacılık sisteminde, toplam tur sayısını ve bekleme sürelerini minimize eden bir MILP modeli geliştirmiştir ve gerçek hayattaki afet senaryolarında yapılan testler sonucunda, çözümün esnekliği sayesinde %75 oranında bekleme süresi azaltılmıştır.

Ülkemizde yaşanan son yaşanan Kahramanmaraş depreminden sonra gelecekte, gerçek zamanlı coğrafi bilgi sistemleri (GIS) ile bağlantılı ve afet tahmin sistemleriyle entegrasyonu sağlanan acil taşımacılık senaryolarının geliştirilmesi elzemdir.

Mobil Laboratuvar, Klinik ve Test Araçları: Mobil sağlık hizmetleri, hastane alanında yapılması gereken işlemlerden, kan alma, röntgen, tahlil ve aşı gibi faaliyetleri, sağlık ünitelerinin elektrikli taşıma araçlarıyla bireylerin bulunduğu yere taşınması kapsamına dayanır. Bu sistemlerin planlanmasında rotalama ve durak optimizasyonları önem arz ederken, elektrikli araçlarla verilen hizmetler kapsamında gürültüsüz, çevre dostu ve düşük operasyon maliyeti sağlamakta kritiktir. Literatür çalışmalarından bazı örneklere bakıldığında;

Ma vd. (2024), MILP tabanlı hibrit metasezgisel bir çözümle, 1000 müşteri kapasiteli mobil sağlık sisteminde %25 rota azaltımı ve %80 işlem süresi tasarrufu sağlamıştır. Masson vd. (2012), transfer içeren modelleriyle mobil hizmet birimlerinin ara merkezlerden yönlendirilmesini sağlayan çözüm yapılarını test etmiştir.

Sağlık taşımacılığına özgü topla-dağıt uygulamaları ise, aşağıdaki ihtiyaçlar çerçevesinde çeşitlenmektedir:

- Diyaliz hastalarının haftalık olarak kliniklere taşınması: Diyaliz hastaları, haftada genellikle 2 ila 3 kez sabit saat aralıklarında tedaviye gitmek zorundadır. Bu taşıma sürecinde bekleme süresi, yolculuk süresi ve şarj süresi gibi kısıtların minimize edilmesi gerekir. Tedavi sonrasında hastaların yorgunluk seviyesi, dönüş seyahatinin daha kısa ve konforlu olması gerekliliğini meydana getirmektedir.

- Onkoloji veya kemoterapi hastalarının düzenli randevulara ulaştırılması: Kemoterapi tedavisi gören hastaların bağışıklık sistemi göz önüne alınırsa, taşıma rotaları oluşturulurken, trafik yoğunluğunun az ve kısa şarj sürelerinde daha etkin senaryoların oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca bu hastalık kapsamındaki randevularda zaman pencereleri kritiktir. Minimum bekleme süresini oluşturacak seyahat rotası önemlidir. Topla-dağıt yapısı bu noktada; hastaları tekli taşıma ile rotalayıp bekleme zamanlarına uyum da maksimum düzeyde sağlanırsa oluşabilecek enfeksiyon riskini en aza indirir ve hassas zamanlama gerektiren seans gecikmeleri önlenebilir. Bu doğrultuda şarj altyapısıyla kısa mesafeli çoklu görevlerde verimlilik artar.

- Evde bakım hizmeti alan yaşlı bireylerin mobil kontrol birimlerine yönlendirilmesi: Genellikle mobil klinikler aracılığıyla evden hastaneye veya doğrudan mobil birimlere taşıma şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu senaryoda, hasta konforu, belirli bir hızda taşıma ve güvenli ulaşım öncelikli unsurlardır. Elektrikli Araç ve topla-dağıt modelleri kullanılarak, araçların sessiz, çevre dostu ve konforlu bir şekilde hizmet vermesi mümkün kılınmaktadır. Ayrıca, batarya yönetimi sayesinde daha az enerji tüketimi ile birlikte kısa ve etkin rotalar oluşturulması sağlanabilir.

- Fizik tedavi ve rehabilitasyon gibi zamanlama hassasiyeti yüksek seanslar: Fizik tedavi gören hastaların taşınmasında düzenli frekans, sabit rotalar ve kısa yolculuklar önemlidir. Bu taşıma, genellikle haftanın belirli günlerinde tekrar eder. Tedavi sonrası aşırı yorgunluk ve fiziksel hassasiyet oluşabileceği için rotaların optimize edilmesi şarttır. Elektrikli araçlarla topla-dağıt kapsamı bu noktada; kullanıcı memnuniyeti önceliklerini ve hizmet kalitesini birlikte optimize edebilir.

- Engelli bireylerin erişilebilirlik standartlarına uygun şekilde taşınması: Erişilebilirlik, rampa veya asansör entegrasyonu ve koltuk yerleşimi gibi tasarım unsurları, engelli yolcuların taşınmasında çok kritik bir öneme sahiptir. Aynı zamanda engellilik çeşidine göre özel bakım ihtiyacı olan bireylerde personel desteğine ihtiyaç da olmaktadır. Engelli erişimi olan özelleştirilmiş EV tasarımlarına uygun şekilde entegrasyon sağlanarak ve rotalamada özel durak eklenerek ilave zaman tanımlaması yapılabilir.

- Postoperatif hastaların taşınmasında titreşim, hız ve seyahat süresi gibi konfor parametrelerinin önceliklendirilmesi: Ameliyat sonrası taşınan hastalar için titreşim, yolculuk süresi ve hız gibi fiziksel faktörler hayati önem taşır. Bu noktada problemin oluşma senaryosunda yolun yapısı bile ciddi öneme sahiptir ve bu hastalık kapsamındaki bireyler de çoğunlukla yatay pozisyonda seyahat etmek zorunda olduğundan süre ve yol kalitesi önceliklendirilmelidir. Araçların sessiz ve yumuşak sürüş özellikleri iyileştirme kapsamında değerlendirilirken, zaman pencereleri tedavi merkezinin kapasitesine göre optimize edilebilir ve acil durumda şarj yönetimi ile en yakın şarj noktası planlaması yapılabilir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; Yazır vd. (2023) çalışmasında, aynı tip elektrikli araçlarla (homojen filo) planlanan ve kısıtlı zaman pencerelerine sahip evde sağlık hizmeti rotalama ve çizelgeleme problemini (multi-period home healthcare routing and scheduling problem) ele almaktadır. Problem, haftalık bir program dahilinde sağlık personelinin (hemşirelerin), coğrafi olarak dağınık bölgelerde yaşayan hastalara hizmet vermesi üzerine kurgulanmıştır. Varsayımlar arasında, bazı hastaların aynı iş gününde ve/veya aynı hafta içinde birden fazla kez ziyaret edilmesi gerektiği yer almaktadır. Şarj politikası bakımından incelendiğinde araçlar; gün içinde şarj istasyonlarında veya günün sonunda depoda şarj edilebilmektedir. Depoda yapılan şarj işlemleri, ilgili hemşirenin iş bitiminde depodan kendi evine transfer edilmesini de gerektirebilir. Problem için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Arama (ALNS- Adaptive Large Neighborhood Search) algoritmasına dayalı bir metasezgisel çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu algoritma, problemin özel senaryolarına göre entegre edilmiş ve yüksek performans sağlamayı hedeflemiştir. Yapılan kapsamlı deneyler sonucunda, algoritmanın rekabetçi olduğu, yani diğer yöntemlere kıyasla etkili çözümler ürettiği ifade edilmiştir. Ayrıca analizler, hemşire-hasta yetkinlik eşleşmesinin de önemini vurgulayarak yanlış eşleşme olması durumunda evde bakım hizmetleri için maliyetlerin önemli ölçüde artacağı belirtilmiştir. Bu bağlamda

ilgili sistemler, sadece taşıma odaklı değil, bireye özgü sağlık yönetimi açısından da stratejik bir rol üstlenmektedir. Aşağıdaki sağlık sektörü kapsamlı alanlar, gelecek çalışmalarda öncelikli araştırma konuları olabilir.

Farklı hasta grupları (diyaliz hastaları, onkoloji hastaları, pediatrik bireyler, post-operatif hastalar) için ayrı konfor ve zaman penceresi kriterleri oluşturularak, taşıma süreçleri kişiselleştirilebilir. Bu yapı, klinik önceliklerin ve lojistik ihtiyaçların daha iyi entegre edilmesini sağlar. Taşıma sürecinde hastaların nabız, tansiyon, oksijen gibi yaşamsal verileri anlık izlenerek, aracın güzergâhı veya istasyon durağı gerektiğinde değiştirilebilir. Bu tür sağlık telemetrisi destekli rota yönetimi, yüksek riskli bireyler için hayat kurtarıcı olabilir.

Şarj altyapısının yetersiz olduğu kırsal bölgelerde, EV ve dizel araçlardan oluşan hibrit filolar ya da aktarma merkezleri kullanılarak taşımacılık kesintisiz sürdürülebilir. Böylece, şarj süresi sınırlamaları rotalama esnekliğiyle dengelenmiş olur.

Kan alma aracı, röntgen ünitesi, mobil tarama istasyonu gibi birimlerin entegre çalışması, taşımadan çok hizmet servisine dayalı bir sağlık lojistiği modeline dönüşebilir. Bu senaryolar, taşınabilir klinik sistemleri için yeni optimizasyon modelleri gerektirir.

Geçmiş veri setlerine dayalı öğrenen algoritmalar, hasta taleplerini, trafik yoğunluklarını ve hava durumunu öngörerek proaktif rota planlaması yapabilir. Bu, sadece taşıma değil, kaynak yönetimini de (şarj, araç dağılımı, personel planlaması) iyileştirecektir.

Çalışmada üzerinde durulacak problem çeşidi olarak topla-dağıt problem yapısının seçilmesi, gerçek yaşam senaryolarına uygunluk, hizmet eşitliği, verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik gibi çok boyutlu hedeflerin aynı anda modellenmesine olanak tanıyan yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu bölümde tek tek ele alınan ve literatür çalışmalarına konu olan başlıklar, çalışma özelinde her biri için geliştirilmiş özel algoritma ve modeller içermekte ayrıca, Topla-Dağıt probleminin gerçek hayat uygulamalarıyla doğrudan bütünleştiğini ortaya koymaktadır.

Literatür taraması, elektrikli araç rotalama, sağlık lojistiği ve metasezgisel yöntemler üzerine yapılan güncel çalışmaları özetlemiştir. Bu değerlendirmeler, mevcut yaklaşımların güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarak, çalışmamızın özgün katkısını daha görünür kılmıştır. Sonuç olarak, bu araştırmanın, sağlık lojistiğinde elektrikli araçlarla hasta taşımacılığına yönelik metasezgisel optimizasyon yaklaşımıyla literatürdeki boşluğu dolduracağı görülmektedir.

3.MATERYAL VE YÖNTEM

Günümüzde taşımacılık sektöründe bireysel ihtiyaçlara olan talebin artması özellikle taşımacılık ve toplu taşıma sistemlerinde büyük bir alternatif olarak hızla önem kazanmakta ve çalışma potansiyeli yüksek bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Yaşlı ve engelli bireyler, evde bakım hizmeti veya sağlık hizmeti alan diyaliz hastaları vb. hasta grupları gibi hareketi sınırlı kullanıcı taşımacılığı için planlı, esnek ve bireysel ihtiyaç temelli taşıma sistemlerine olan talep artmakta ve bu kapsamda diyaliz hastalarının elektrikli arçlarla hastaneye taşınması ve hastaneden evlerine bırakılması senaryosuna dayalı rota optimizasyonu sağlık taşımacılığı alanında kritik rol oynamaktadır.

Bu bölümde, diyaliz hastalarının taşınmasına yönelik oluşturulacak senaryoda elektrikli araçlarla topla-dağıt problemlerinin özelliklerine değinilecek; problemin kullanım alanları ve sağlık sektörü kapsamındaki uygulama potansiyelleri detaylı olarak değerlendirilecektir. Problem yapısının matematiksel ve operasyonel karmaşıklığı, literatürden örnekler verilerek açıklanacak, bu çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel model ve Tavlama Benzetimi (SA) algoritması detaylıca sunulacaktır.

3.1. Veri Seti

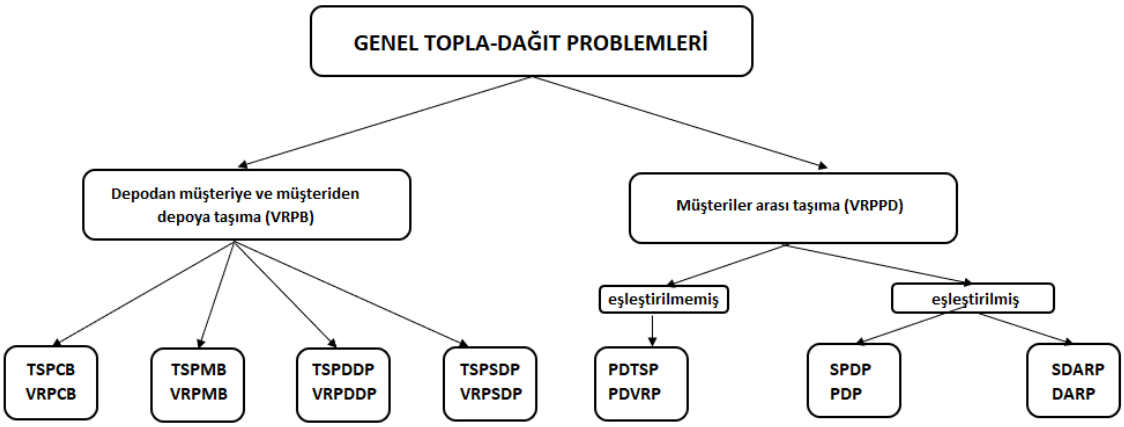
Bu tez çalışmasında, *Routing with Pickup and Delivery via Deep Reinforcement Learning* adlı çalışmada kullanılan veri seti kullanılmıştır (Aslan Yıldız vd., 2024). Söz konusu veri seti, Eskişehir Büyükdere Mahallesi'nden elde edilen müşteriler için alma ve bırakma noktaları içermektedir. Bu kapsamda kullanılan veri seti, şehir içi taşımaya uygun veri içermesi bakımından diyaliz hastalarının düzenli olarak tedavi merkezlerine taşınmasına yönelik gerçekçi operasyonel koşulları yansıtacak biçimde çalışmaya uyarlanmıştır. Veri seti kullanımında, hasta sayıları, araç kapasitesi, hasta kabul ve tedavi süreleri, zaman pencereleri, güzergâh mesafeleri ve elektrikli araçların batarya ile şarj kısıtları dikkate alınmıştır. Bu unsurlar, hem lojistik planlamada karşılaşılan kısıtları temsil etmekte hem de çalışmanın pratik uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Diyaliz hastalarının belirli gün ve saatlerde tedavi merkezlerine ulaştırılmaları zorunlu olduğundan, veri setinde zaman pencereleri modelin ürettiği çözümlerin uygulanabilir olması açısından önemlidir. Hasta taşımacılığında rota optimizasyonu, zaman pencereleri, batarya kısıtı, araç kapasitesi gibi kısıtlar altında gerçekleştirilir.

Veri setinin kullanımı, matematiksel modelin doğruluğunu test etmeyi, Tavlama Benzetimi (SA) algoritmasının performansını gerçekçi koşullarda değerlendirmeyi ve sonuçların sağlık lojistiği alanına uygulanabilirliğini sağlamayı mümkün kılmıştır.

3.2. Genel Topla-Dağıt Problemleri

Genel Topla-Dağıt Problemlerinnde problemin yapısal bir taksonomisini veren Parragh vd., (2008a, 2008b)'nin çalışması yol göstericidir. Şekil3.1'de taksonomi verilmiştir.



Şekil 3. 1. Genel VRP problemlerinin sınıflandırması (Parragh vd., 2008a,2008b)

Genel topla-dağıt problemleri iki ana problem sınıfı altında toplanmaktadır. İlk sınıf, teslim edilecek tüm yüklerin bir veya birkaç depodan yüklendiği ve alınacak tüm yüklerin yine bir veya birkaç depoya taşındığı durumları kapsar. Bu sınıf genellikle Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem with Backhauls -VRPB) olarak adlandırılır (Parragh vd., 2008a; Granada-Echeverri vd., 2020).

VRPB, dört temel alt sınıfa ayrılmaktadır. Bu alt sınıflar, müşterilerin sadece teslimat veya toplama talep etmesi ya da her ikisini birlikte içermesi durumlarına göre

şekillenmektedir: Kümelenmiş Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem with Clustered Backhauls –VRPCB), Karma Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem with Mixed Linehauls and Backhauls -VRPMB), İşlerin Bölünebildiği Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem with Divisible Delivery and Pickup –VRPDDP) ve Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup-VRPSDP) bu grupta yer almaktadır.

Kümelenmiş Önce Dağıt Sonra Topla VRP (VRPCB – Vehicle Routing Problem with Clustered Backhauls): Bu alt sınıfta, müşteriler ya yalnızca teslimat ya da yalnızca toplama müşterisidir. Her müşteri sadece tek tür hizmet alır. Ayrıca, rotalarda önce tüm teslimat müşterileri, ardından toplama müşterileri ziyaret edilir. Bu sıra zorunludur ve "kümeleme kısıtı" olarak adlandırılır. İlk olarak Goetschalckx ve Blecha (1989) tarafından önerilmiş; tek araçlı (rotalı) hali TSPCB (Traveling Salesman Problem with Clustered Backhauls) olarak adlandırılmıştır.

Karma Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (VRPMB – Vehicle Routing Problem with Mixed Linehauls and Backhauls): Bu sınıfta, müşteri türleri yine ayrıdır (sadece teslimat veya sadece toplama), fakat önce-teslimat-sonra-toplama kısıtı yoktur. Araçlar, rotaları sırasında teslimat ve toplama işlemlerini karışık sırayla yapabilir.

İşlerin Bölünebildiği Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (VRPDDP – Vehicle Routing Problem with Divisible Delivery and Pickup): Bu problemde her müşterinin hem teslimat hem de toplama talebi vardır. Fakat müşterinin bir kez ziyaret edilme gibi bir koşulu yoktur; müşteri teslimat ve toplama için iki kez de ziyaret edilebilir. Yani müşteriye önce teslimat yapılır, sonra başka bir zamanda toplanabilir.

Eş Zamanlı Topla Dağıt VRP (VRPSDP – Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup): Bu alt sınıfta teslimat ve toplama işlemi eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir; her müşteri bir kez ziyaret edilir ve her müşterinin hem teslimat hem de toplama talebi bulunmaktadır. Gerçek hayatta, mağazalara ürün teslimatında boş ambalajların toplanması senaryosu buna örnek olarak verilebilir. Bu tür problemlerin

modellenmesi ve çözümü, taşıma süreçlerinin optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Şekil 3.1'deki ikinci ana sınıf, yüklerin doğrudan müşteri noktaları arasında, yani bir alma noktası ile bir bırakma noktası arasında taşındığı durumları kapsar ve Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problems with Pickups and Deliveries -VRPPD) olarak adlandırılır (Parragh vd., 2008b). Topla Dağıt Araç Rotalama Problemleri toplama ve dağıtma noktalarının eşleştirilmiş ya da eşleştirilmemiş olmasına göre alt sınıflara ayrılır:

Eşleştirilmemiş Toplama ve Dağıtma Noktaları: Bu sınıflamadaki problemlerde, toplama ve dağıtma noktaları önceden eşleştirilmez ve genellikle tek tip homojen ürün taşıması yapılır. Her alınan ürün teslimat yapılacak herhangi bir müşterinin talebini karşılayabilir. Literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla tek araçlı (rotalı) senaryolar (Pickup and Delivery Traveling Salesman Problem - PDTSP) incelenmiştir (Anily ve Bramel, 1999; Hernández vd., 2003; Pérez ve González, 2004a). Tek araçlı senaryolarla birlikte çok araçlı uygulamalar da literatürde yer almaktadır (Dror ve Trudeau, 1989). Bu problem sınıfı, Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem (PDVRP) olarak adlandırılır.

Eşleştirilmiş Toplama ve Dağıtma Noktaları: Eşleştirilmiş toplama ve dağıtım noktaları içeren grup, klasik PDP ve DARP (Ara_Bin Problemi _Dial-a-Ride Problem) problemlerinde alma ve bırakma noktaları eşleştirilmiş olmalıdır. Örneğin her müşteri için önceden belirlenen alma ve bırakma noktasını içermektedir.

Topla-Dağıt Problemleri (Pickup and Delivery Problems -PDP), taşıma taleplerinin bir alma ve bir bırakma noktasıyla eşleştiği lojistik problemleri kümesi olarak tanımlanmaktadır. Müşteri hizmetlerinin optimizasyonunu hedeflemenin yanı sıra, rota planlamasında da yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu problem türleri, talebin yapısal özelliklerine ve taşımanın çeşidine göre sınıflandırılmıştır.

Bu çalışmada ve amaçlanan hedeflerinde öncelikle sağlık sektöründe hasta taşımacılığı; diyaliz hastaları, engelli bireyler, özel taşıma ihtiyacına sahip hasta bireylere odaklanılmış olup çalışma kriterleri doğrultusunda minimum rota mesafesi ile hastalara zaman penceresi sınırları dahilinde hizmet sunulması ön planda tutulmaktadır. Sağlık sektöründe taşımacılık hizmetleri, yaşlılar, kronik hastalar veya evde bakım hizmeti alması

zorunlu bireyler gibi özel gruplar için zamanında erişimi önceliklendirerek güvenilir ve kesin çözüm yöntemi sağlamak durumundadır. Bu nedenle, özellikle sağlık sektöründeki çalışma kapsamında araç rotaları oluşturulurken en kısa mesafeyi elde etme prensibi, hastaların tedavi süreçlerini zamanında tamamlamasını sağlamak açısından kritiktir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan problem, mesafenin en küçüklenmesini gözeterek hastaneden hareket eden aracın bazı diyaliz hastalarını bıraktığı ve diğer diyaliz hastalarını aldığı fakat bu işlemi karışık biçimde gerçekleştirecek hasta bırakma ve hasta alma işlemlerinin gerçekleştirilebildiği bir hasta taşıma senaryosunu modellemektedir. Rota boyunca araç, hastaneden tedavisi tamamlanan bazı hastaları evlerine bırakırken, tedavi olacak hastaları da evlerinden alıp hastaneye ulaştırmaktadır. Teslimat ve toplama işlemleri arasında önceden tanımlı bir sıra kısıtı bulunmamakta, dolayısıyla rota planlamasında esnek (karışık) bir servis sıralaması uygulanabilmektedir.

Bu problem yapısı, Parragh vd. (2008a) göre Vehicle Routing Problem with Mixed Linehauls and Backhauls (VRPMB) sınıfına karşılık gelmektedir. Hastaların evlerinden alınması ve hastaneye bırakılması ya da hastaneden evlerine bırakılması ve evlerinden hastaneye taşınması hizmeti elektrikli araç ile sıra bağımlılığı olmadan karışık bir şekilde planlandığından problem VRPMB olarak adlandırılmaktadır. Elektrikli araçların kısıtlarını da içeren yapısından dolayı E-VRPMB olarak adlandırılmıştır. Uygulama senaryosu olarak diyaliz hastalarının hastaneye ve/veya evlerine taşınması üzerinden modellenen bu yapı, sağlık taşımacılığı alanında gerçekçi ve operasyonel olarak kritik bir problemi yansıtmaktadır.

3.3. Çözüm Yöntemleri

Gerçek dünya taşımacılık problemleri, büyük boyutlu, kompleks ve çok kısıtlı yapıya sahip olduğundan bu problemlerin çözülmesinde etkin modelleme ve farklı çözüm teknikleri gerekmektedir. Bu doğrultuda Genel Topla-Dağıt Problemleri de gerçek hayat senaryolarında kullanıldığından oluşturulan matematiksel model ve varsayımlar kapsamında klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumda metasezgisel algoritmalar ile ele alınabilir. Matematiksel modeller, genellikle kesin çözüm sunar ve belirli boyutlar altında

uygulanabilirlik sağlarken; metasezgisel yöntemler, büyük boyutlu problemlerde optimal ya da optimale yakın sonuçlara ulaşmayı hedefler.

3.3.1. Matematiksel modeller

Elektrikli araçlarla yolcu-hasta taşıma problemleri, belirli varsayımlar ve kısıtlar altında matematiksel olarak tanımlanıp, çözümlemesi yapılabilir. Genel Topla-Dağıt Problemlerinin çözümünde kullanılan kesin çözüm yaklaşım, Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama modelleridir. Bu modeller oluşturulurken, belli amaç fonksiyonları için müşteri talepleri, araç kapasitesi, zaman pencereleri ve seyahat süreleri gibi kısıtlar dikkate alınarak matematiksel modelleme yapılır. Bu problem kapsamında amaç fonksiyonu genellikle toplam seyahat süresini, toplam mesafeyi, toplam enerji maliyetini ya da toplam sistem maliyetini minimize etmektir.

E-VRPMB kapsamında litatürdeki çalışmalar incelendiğinde; EVRP ilk olarak Conrad vd. (2011) tarafından önerilmiştir; burada elektrikli araçların (EV'ler) seyahatlerini yenilemek için belirli müşteri lokasyonlarında yeniden şarj olmalarına izin verilmiştir. Erdoğan ve Miller-Hooks (2012) ise VRP'ye EV'leri entegre ederek, sınırlı batarya kapasitesinden dolayı seyahat mesafelerini uzatmak için dağınık şarj istasyonlarını ek ziyaret etmeleri gerektiğini belirtmişlerdir. Ancak, bu çalışmalardan hiçbiri müşteri hizmetleri için zaman penceresi kısıtlamalarını dikkate almamıştır. Elektrikli Araç Rotalama Problemi (EVRP) üzerine çalışmalar öncelikle matematiksel model önerileriyle başlamıştır Schneider vd. (2014) EVRPTW için Karma Tamsayılı Matematiksel Model önermiştir. EVRPTW için, EV'lerin bataryalarının lineer bir şarj fonksiyonuna göre şarj olma varsayımı ile tam şarj stratejisi içeren bir model sunmuşlardır.

EV'lerin tek bir şarj için elektrik hacmini artırma stratejisi tam ve kısmi şarj olarak sınıflandırılabilir. Uzun süreli tam şarj, elektrik yüklemesini yenilemek amacıyla lojistik hizmetinin zamanlılığını etkileyebilir ve müşteri memnuniyetini artırabilir. Bu nedenle, bazı çalışmalar EVRPTW'yi kısmi şarj stratejisi ile incelemeye odaklanmıştır. Bruglieri vd. (2015), her istasyondaki bir EV için şarj seviyesini bir karar değişkeni olarak tanımlayarak kısmi şarj stratejileri tasarlamış ve ardından toplam seyahat süresi, bekleme ve şarj sürelerini minimize etmeyi amaçlayan bir EVRPTW modeli sunmuşlardır. Keskin ve Çatay (2016)

EVRPTW için kısmi şarj stratejisi içeren bir matematiksel modeli literatüre kazandırmıştır. Desaulniers vd. (2016), rotada tek veya çoklu şarj ve tam veya kısmi şarj stratejileri ile dört varyant sunmuşlardır. Bazı çalışmalarda, şirketlerin tamamen elektrikli araçlardan oluşan bir filosu karşılama olanağı bulamaması nedeniyle, konvansiyonel araçlar ve EV'lerden oluşan hibrit filolar dikkate alınmıştır. Goeke ve Schneider (2015) konvansiyonel araçların aksine, EV'lerin hız, arazi eğimi ve kargo yük dağılımını içeren bir enerji tüketim fonksiyonu benimseyeceği bir hibrit filoya sahip EVRPTW modelini önermişlerdir. Hiermann ve diğerleri, kapasiteleri ve maliyetleri farklı çeşitli araç türleri ile EVRPTW'yi incelemiş ve her araç türünün de kendi şarj istasyonu kümesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, EV rotalarının ve şarj istasyonu konumlarının eşzamanlı olarak optimize edilmesine yönelik çok sayıda çaba sarf edilmiştir (Hiermann vd., 2016). Wang ve Song (2015), zaman pencereleri ve birden fazla şarj istasyonu içeren elektrikli araç lokasyon-rotalama problemini inceleyerek, sadece kapasiteli EV'lerin güzergâh planını değil, aynı zamanda şarj stratejisini de optimize etmeyi amaçlamışlardır. Schiffer ve Walther (2017), EV'lerin şarj istasyonu yerleşimini ve araç rotasını eşzamanlı olarak optimize etmek için bir konum-rotalama çerçevesi tasarlamışlardır. Keskin vd. (2019) şarj istasyonlarındaki sınırlı kapasite ışığında, zaman pencereleri ve zaman bağımlı kuyruk süreleriyle ilişkili EVRPTW modelini incelemişlerdir.

Literatürde en çok çalışılan VRP varyantlarından biri Karma Topla Dağıt Araç Rotalama Problemleridir (VRPMB). Güncel çalışmalarda bu model elektrikli araç bağlamında da çalışılmıştır. Xiao vd. (2023) tarafından önerilen EVRPTWMB modeli, klasik VRPMB yapısını elektrikli araçların batarya kapasitesi, şarj istasyonları ve yük–mesafe bağımlı enerji tüketimi gibi kısıtlarla genişleterek literatürde önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Bu tez kapsamında, elektrikli araçlarla hasta taşımacılığı probleminde kullanılan model, literatürdeki EVRPTWMB formülasyonuna dayandırılmaktadır.

Xiao vd. (2023), çalışmasında EVRPTWMB için önerilen modele göre, elektrikli araç, rotasına depo ile başlayıp depo ile sona erer. V_0, müşterileri içeren depo setini temsil etmek için kullanılır. Bir şarj istasyonuna birden fazla ziyaret yapılabileceğinden, F setindeki ziyaretleri temsil etmek ve ayırmak için F' seti kullanılır. Bu nedenle, V', tüm müşterileri ve ziyaret edilen şarj istasyonlarını kapsar ve $V' = V \cup F'$ şeklinde tanımlanır. F'_0, ziyaret edilen şarj istasyonları ile depo arasındaki bağlantıyı ifade eder ve $F'_0 = F' \cup \{0\}$ olarak tanımlanır;

V′₀ ise deponun da dahil olduğu tüm düğümleri belirtir ve V′₀ = V′ ∪ {0} şeklindedir. G = (V′₀, A′) olmak üzere, A′ = {(i, j) : i, j ∈ V′₀, i ≠ j} ifadesi, müşteriler, ziyaret edilen şarj istasyonları ve depo arasındaki tüm olası bağlantıları temsil etmektedir. Bir elektrikli aracın (EV) i. düğümünden j. düğümüne gittiği mesafe *dij* ile temsil edilmektedir. Amaç, tüm toplama ve dağıtma müşterilerine hizmet etmek için rotaları optimize ederek toplam seyahat mesafesini minimize etmektir.

EVRPTWMB için matematiksel model izleyen kısımda verilmiştir (Xiao vd., 2023).

Amaç fonksiyonu:

$$min \sum_{j\epsilon v_0' j\neq i} x_{ij}d_{ij} \qquad (3.1.)$$

k.a.

$$\sum_{j\epsilon v_0' j\neq i} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in v \qquad (3.2.)$$

$$\sum_{j\epsilon v_0' j\neq i} x_{ij} \leq 1 \qquad \forall i \in F' \qquad (3.3.)$$

$$\sum_{j\epsilon v_0' j\neq i} x_{ij} - \sum_{j\epsilon v_0' j\neq i} x_{ji} = 0, \qquad \forall j \in V' \qquad (3.4.)$$

$$\tau_i + s_i + t_{ij}x_{ij} - M(1 - x_{ij}) \leq \tau_j \qquad \forall i \in V0, \forall j \in v_0', i \neq j \qquad (3.5.)$$

$$\tau_i + t_{ij}x_{ij} + g(Q - yi) - (M + \mathrm{gQ})(1 - x_{ij}) \leq \tau_j \qquad \forall i \in F', \forall j \in v_0', i \neq j \qquad (3.6.)$$

$$e_j \leq \tau_j \leq l_j \qquad \forall j \in V0' \qquad (3.7.)$$

$$0 \leq u_i \leq C \qquad \forall i \in V0' \qquad (3.8.)$$

$$-q_i \leq u_i \leq C \qquad \forall i \in B \qquad (3.9.)$$

$$0 \leq u_i \leq C - q_i \qquad \forall i \in L \qquad (3.10.)$$

$$0 \leq u_i \leq u_j + q_i x_{ij} + \mathrm{C}(1 - x_{ij}) \qquad \forall (i,j) \in A', i \neq j \qquad (3.11.)$$

$$0 \leq y_j \leq y_i - ((\mathrm{h} + \mathrm{w}u_i)d_{ij})x_{ij} + \mathrm{Q}(1 - x_{ij}) \qquad \forall i \in V, j \in V0', i \neq j \qquad (3.12.)$$

$$0 \leq y_j \leq Q - ((\mathrm{h} + \mathrm{w}u_i)d_{ij})x_{ij} + \mathrm{Q}(1 - x_{ij}) \qquad \forall i \in F0', j \in V0', i \neq j \qquad (3.13.)$$

$$\sum_{i\epsilon v'} x_{i,0} \leq K \qquad (3.14.)$$

$$\sum_{i\epsilon v'} x_{O,j} \leq K \qquad (3.15.)$$

$$\sum_{i\epsilon v'} x_{i,O} = \sum_{i\epsilon v'} x_{O,j} \qquad (3.16.)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall (i,j) \in A', i \neq j \qquad (3.17.)$$

Amaç fonksiyonu toplam rota mesafesini (3.1.) en küçüklemektir. Kısıt (3.2.), her müşteri için bir giriş ve bir çıkış olmasını garanti eder. Kısıt (3.3.) herbir istasyona ait sanal düğümlerin birden fazla kez ziyaret edilemeyeceğini ifade eder. Kısıt (3.4.), her düğüm için giriş çıkış dengesinin eşit olmasını sağlayarak akış korunumu sağlanır. Kısıt (3.5.)-(3.7.) araçların müşteri konumlarına göre belirlenen zaman pencereleri içinde ulaşmasını sağlar. Kısıt (3.8.) aracın yük ağırlığının maksimum taşıma kapasitesini aşmamasını sağlar. Kısıt (3.9.)-(3.11.) düğüm i-j arasındaki yük ilişkisi tanımlanır. Her bir düğüm için qi>0 teslimat talebini, qi<0 toplama talebini, qi=0 ise şarj istasyonları ve depo için talebin olmadığını ifade eder. Kısıt (3.12.) ve (3.13.) batarya durumundaki değişimleri belirtir. Kısıt (3.14.) ve (3.15.) mevcut elektrikli araçların maksimum sayısını ifade eder. Kısıt (3.16.) aracın mutlaka depoya dönmesini sağlar.

Literatürde E-VRPMB ve E-VRPTWMB için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modellerde, problemin yapısı detaylıca ifade edilebilmekte ve küçük ölçekli örneklerde optimal çözümler elde edilmesine olanak tanınmaktadır. Ancak bu problemler NP-zor sınıfında yer aldığından, problem boyutu arttıkça çözüm süreleri hızla artmakta ve matematiksel modellerin uygulanabilirliği sınırlı kalmaktadır. Gerçek hayat uygulamalarında karşılaşılan büyük ölçekli problemlerde en iyi çözüme ulaşmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, en iyiyi garanti etmeyen ama kısa sürede kaliteli çözümler üretebilen metasezgisel yöntemler literatürde yaygın biçimde kullanılmakta ve pratik çözümler sunmaktadır.

3.3.2. Metasezgisel yöntemler

Araç rotalama problemleri ve özellikle topla dağıt yapısındaki sağlık lojistiği uygulamaları, büyük boyutlu ve karmaşık yapıları nedeniyle çoğu zaman kesin çözüm yöntemleriyle makul sürede çözülememektedir. Bu noktada metasezgisel algoritmalar, büyük boyutlu problemlerde ön plana çıkmaktadır. Bu algoritmaların temel avantajı, çözüm uzayında farklı bölgeleri etkin şekilde tarayarak yerel minimumlara sıkışma riskini azaltmaları ve büyük boyutlu problemlerde kısa sürede iyi çözümler üretebilmeleridir.

Elektrikli araç rotalama problemlerinde çözüm yolu olarak kullanılan ve karmaşık optimizasyon problemleri için geliştirilen modern yöntemler arasında metasezgisel algoritmalar, esneklikleri ve geniş uygulama alanlarıyla öne çıkmaktadır

Literatürde yapılan birçok çalışma incelendiğinde, metasezgisel yöntemlerin, genel topla dağıt problemlerinde enerji tüketimini azaltma, rota süresini ve mesafesini kısaltma, şarj altyapısını daha verimli kullanma, bekleme sürelerini düşürme gibi amaçlar doğrultusunda etkili sonuçlar verdiği görülmektedir.

Hasta taşıma gibi anlık yeniden planlama gerektiren sağlık uygulamalarında metasezgisel algoritmaların reaktif (tepki verebilen) ve adaptif (uyum sağlayabilen) yapıları sayesinde önemli avantajlar elde edilmektedir. Böylece metasezgisel algoritmalar hem statik senaryolarda hem de gerçek zamanlı değişkenleri içeren dinamik senaryolar da yüksek başarı göstermektedir.

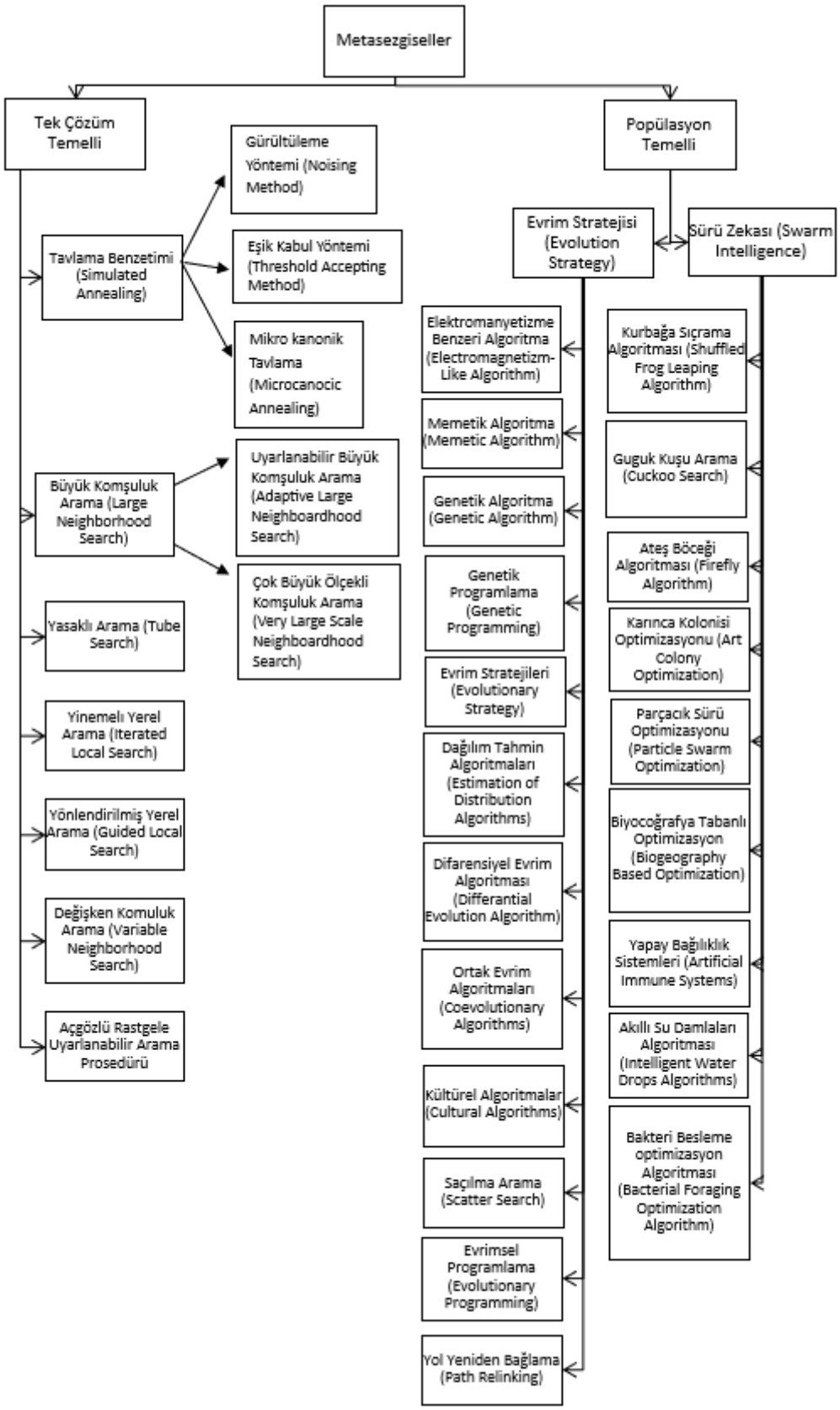
Metasezgisel algoritmalar, araç rotalama problemleri gibi NP-zor yapıya sahip büyük ölçekli optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan güçlü yöntemlerdir. Bu algoritmalardaki asıl hedef, kısa sürelerde yüksek kaliteli çözümler bulmaktır. Ancak bu algoritmalar deterministik algoritmalardan farklı olarak, optimal çözümü garanti etmezler. Bunun yerine, çözüm uzayını farklı stratejilerle keşfederek "iyi" çözümler elde etmeyi amaçlarlar. Bu noktada metasezgisellerin başarısı çeşitlendirme ve yoğunlaştırma stratejisi olmak üzere iki temel stratejiye dayandırılabilir.

Çeşitlendirme (Diversification): Algoritmanın, çözüm uzayında farklı yerel noktalarda yeni çözümler bulmasını sağlar. Özellikle popülasyon tabanlı yöntemler (PSO, GA, ACO vb.) bu stratejiyi güçlü biçimde uygular. Çeşitlendirme sayesinde algoritmalar yerel optimumlara sıkışmaktan kurtulur.

Yoğunlaştırma (Intensification): Algoritmanın, çözüm uzayında bulduğu iyi çözümlere yoğunlaşarak daha kaliteli sonuçlar elde etmesini sağlar. Örneğin Tabu Arama veya Değişken Komşuluk Arama, iyi çözümlerin yakınında sistematik arama stratejileri uygular. Elshaer ve Awad (2020), çalışmasında bu iki stratejinin birbirine zıt gibi görünse de aslında tamamlayıcı olduğunu ifade etmiştir. Metasezgisel algoritmaların başarısında,

yoğunlaştırma ile mevcut iyi çözümler iyileştirilirken; çeşitlendirme ile yeni ve keşfedilmemiş alanlara yönelme sağlanır. Bu denge, algoritmaların kalitesini ve performansını doğrudan belirler.

Metasezgisel algoritmaların bu alandaki uygulamaları, artan çalışmalar ile, farklı şekilde sınıflandırılarak sistematik hale getirilmiştir. Elshaer ve Awad (2020) tarafından yapılan taksonomik incelemeye göre, metasezgisel algoritmalar genel olarak tek çözüm temelli (örneğin Tabu Search, Simulated Annealing, Variable Neighborhood Search) ve popülasyon temelli (örneğin Genetic Algorithm, Ant Colony Optimization, Particle Swarm Optimization) olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Popülasyon temelli yöntemler ayrıca evrimsel algoritma ve sürü zekâsı yaklaşımları altında detaylandırılmaktadır. Şekil 3.2'de metasezgisel yaklaşımların sınıflandırma taksonomisi verilmektedir.



Şekil 3. 1. Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması (Elshaer ve Awad, 2020)

Literatürde metasezgisel algoritmaların farklı sınıflandırma yaklaşımları bulunsa da bu tezde Elshaer ve Awad (2020) tarafından önerilen taksonomi sunulmuştur. İlgili sınıflandırmaya göre metasezgisel algoritmalar, tek çözüm temelli ve popülasyon temelli olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

Tek çözüm temelli yöntemler: Bu sınıfta bir başlangıç çözüm üzerinde çalışılarak çözüm uzayında yinelemeli iyileştirmeler yapılır. Bu grupta en çok bilinen yöntemler arasında Tavlama Benzetimi (SA), Yasaklı Arama (TS), Değişken Komşuluk Arama (VNS), Yinelemeli Yerel Arama (ILS), GRASP ve Büyük Komşuluk Arama (LNS) gibi algoritmalar yer almaktadır. Bu yöntemlerin ortak özelliği, tek bir çözümü adım adım geliştirmeleri ve komşuluk ilişkileri ile çözüm uzayını keşfetmeleridir.

Popülasyon temelli yöntemler: Bu sınıfta ise yöntemler, birden fazla çözüm üzerinde aynı anda çalışarak çözümler arasındaki etkileşimlerden faydalanırlar. Bu grup iki alt kategoriye ayrılmaktadır:

- Evrimsel algoritmalar (Evolutionary Computation – EC): Genetik Algoritmalar (GA), Evrimsel Programlama (EP), Evrim Stratejileri (ES), Diferansiyel Evrim (DE), Memetik Algoritmalar (MA), Saçılma Arama (SS) ve Yol Yeniden Bağlama (PR) gibi yöntemler bu sınıfta yer almaktadır. Bu algoritmalar, biyolojik evrim süreçlerini (seçilim, çaprazlama, mutasyon vb.) taklit ederek çözüm üretirler.

- Sürü zekâsı algoritmaları (Swarm Intelligence – SI): Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Kolonisi (ABC), Ateşböceği Algoritması (FA), Guguk Kuşu Arama (CS), Bakteri Beslenme Optimizasyonu (BFOA) gibi yöntemler bu sınıfta yer alır. Bu algoritmalar doğada gözlemlenen topluluk davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir (Elshaer ve Awad, 2020).

Literatürde, bu algoritma gruplarının elektrikli araçlarla topla-dağıt kapsamında hasta randevularına göre rotalama, hasta bekleme süresini azaltma, batarya kullanım verimliliğini artırma ve sağlık tesislerine zamanında erişimi sağlama gibi pek çok optimizasyon hedefinde başarıyla kullanıldığı örnekler yer almaktadır. Özellikle çok amaçlı

ve çok kısıtlı modellerde, metasezgisel yapıların adaptif, hızlı ve hesaplama dostu olmaları tercih edilmelerini sağlamıştır.

Klasik metasezgisel yöntemler, çeşitli NP-zor problemleri çözmek için başarıyla uygulanmakta olup, tek çözüm temelli algoritmalar da EVRP ve türevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle çalışmalarda çözüm bulma süreçlerinde etkinlik ve verimlilik sağlamak amacıyla, Tavlama Benzetimi (SA), Yasaklı Arama, Değişken Komşuluk Arama ve diğer yerel arama tabanlı metasezgisel stratejilerden sıkça yararlanılmıştır.

Tavlama Benzetimi Algoritması, bir yerel arama algoritması olup EVRP ve varyantlarının çözümünde sıkça tercih edilmekte ve özellikle hızlı, pratik ve yüksek kaliteli çözümler sunmaktadır. Metalurjide kullanılan tavlama sürecinden esinlenen bu yöntem, yüksek sıcaklıkta başlatılan rastgele çözümleri zamanla soğutarak daha düzenli ve istikrarlı çözümlere ulaşmayı hedefler. Arama sürecinde, kötü çözümlerin belirli bir olasılıkla kabul edilmesi sayesinde algoritma, yerel optimumlara sıkışmadan çözüm uzayında küresel optimuma daha yakın sonuçlara ulaşabilir.

Bununla birlikte, EVRP'ye özel bazı çalışmalarda Tavlama Benzetimi algoritmasının performansını artırmak için diğer yöntemlerle entegrasyon yapıldığı görülmektedir. Örneğin, tavlama benzetimi algoritmasının yerel arama algoritmalarıyla veya uyarlamalı stratejilerle birleştirilmesi, çözüm kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca son yıllarda, makine öğrenmesi ve yapay zekâ tekniklerinin SA ile birlikte kullanılarak, talep tahmini, araç enerji tüketimi analizi ve rota optimizasyonu gibi alanlarda daha kesin kararlar elde edilmesine yönelik çalışmalar artmaktadır.

Sonuç olarak, EVRP üzerindeki araştırmalar, Tavlama Benzetimi gibi tek çözüm temelli yöntemlerin yanı sıra farklı metasezgisel yaklaşımların hibritleştiği yenilikçi modellerle birlikte gelişmekte ve giderek daha karmaşık hale gelen problemlere etkin çözümler sunmaktadır.

İzleyen bölümde hasta taşımacılığına ilişkin problem tanımlanarak önerilen yöntemler ile çözülmüştür. Matematiksel model için karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtlar detaylı biçimde verilecektir.

3.4. Problemin Tanımlanması

Kronik böbrek yetmezliği yaşayan diyaliz hastalarının haftanın belirli günlerinde belirli saat aralığında hastaneye veya diyaliz merkezlerine tedavi görmek için taşınması, sağlık sektöründeki en kritik ve planlı lojistik operasyonlardan birisidir. Bu kapsamda Türkiyede incelenen özel bir hastanenin verilerine göre haftada toplam ortalama 400 diyaliz hastasına haftada üç gün ve seansta üç saat olacak şekilde hizmet verilmektedir. Hastane bir günde üç farklı seansta hasta alabilmekte, tek seansta altmış beş hastaya kadar tedavi hizmeti verilirken bir günün toplam seanslarında iki yüz hastaya kadar tedavi uygulanabilmektedir.

Rota planlaması sabit zaman pencereleri doğrultusunda yapılmak zorundadır. 400 hasta kapasitesinden yaklaşık 100 hasta kendi imkanları ile ulaşım sağlayamayacak olup, hastanenin sağlamış olduğu imkanlarla evlerinden alınıp hastaneye götürülmekte ve seans sonrasında tekrar evlerine bırakılmaktadır. Bu noktada hastanenin ulaşım hizmetlerinde yaklaşık 8-10 hasta kapasiteli Fiat Ducato tipi fosil yakıtla çalışan minibüs kullanılmaktadır fakat bu araçların kullanımı, rota mesafesine bağlı yüksek yakıt tüketimi ve emisyon değerleri nedeniyle uzun vadede sürdürülebilir değildir.

Bu çalışmada önerilen çözüm, fosil yakıtlı mevcut aracı ortalama 20-22 kişi kapasiteli elektrikli Karsan E-Jest araçlarla ya da alternatif olarak 10-12 kişi kapasiteli EC11 E-CREW elektrikli araçlarla değiştirmeyi içermektedir. Bu noktada çözüm için seçilen elektrikli araçlar, rota mesafesine bağlı çok daha az yakıt tüketimi ve elektrik enerjisinin yenilenebilir nerji kaynaklarından elde edildiği varsayımıyla sıfır karbon emisyonu hedefi ile uyumludur. Çalışma kapsamında çözüm için seçilen ve mevcut taşıma sistemindeki aracın hasta kapasitesi, yakıt türü, menzil vb. bilgiler Çizelge3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Mevcut ve önerilen araç özellikleri

ARAÇ ÖZELLİKLERİ	ARAÇ-KAPASİTE / KİŞİ	MENZİL / KM	YAKIT TÜRÜ	ORT TÜKETİM	CO_2 EMİSYONU (g/km)	TL/YAKIT	100 km MALİYET	KAZANÇ
FİAT DUCATO 	16+1 KİŞİ	1200	DİZEL	7.5 L/ 100 KM	*199	*47.04 TL/L	₺352.80	
KARSAN E-JEST 	20-22 KİŞİ	210	ELEKTRİK	24 kWh/ 100km	*0	*7.45 TL-7.99TL/kWh	₺191.76	**45.64%**
EC11 E-CREW 	10-12 KİŞİ	250	ELEKTRİK	24 kWh/ 100km	*0	*7.45 TL-7.99TL/kWh	₺191.76	

Karbon emisyonu T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Kurumsal Karbon Ayak İzi Hesaplama Rehberi, 2023; EUR Lex, 2023; IPCC. 2006'da belirtildiği gibi verilmiştir. (EUR Lex, 2023; Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023; IPCC. 2006).

Türkiye'de, her yıl Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Çevresel Göstergeler Raporu'na göre, ulaştırmadan kaynaklanan karbondioksit (CO_2) emisyonlarının en büyük kısmının karayolu ulaşım faaliyetlerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Veriler, Türkiye'deki ulaşım sektöründeki sera gazı emisyonlarının büyük bir kısmının kara yolu taşımacılığından oluştuğunu ve bu emisyonların zaman içerisinde sürekli bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, 1990 yılında kara yolu emisyonları 24.777 kiloton CO_2 eşdeğeri olarak kaydedilirken, 2020 yılında bu rakam 76.601 kiloton CO_2 eşdeğerine yükselmiştir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023).

Ulaşımdan kaynaklanan emisyonların azaltılması yönünde uluslararası düzeyde çeşitli antlaşma ve sözleşmeler gündeme gelmiştir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), Kyoto Protokolü, Paris Anlaşması, Avrupa Birliği (AB) Yeşil Mutabakatı ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma için 2030 gündemi gibi çeşitli protokol ve anlaşmalar, sera gazı emisyonlarına ilişkin standartların oluşturulmasını

hedeflemektedir. Türkiye, bu antlaşmalardan bazılarına taraf olmuş ve belirli taahhütlerde bulunmuştur. 2015'te Paris'te düzenlenen 21. Taraflar Konferansı'nda kabul edilen Paris Anlaşması'nı imzalayarak kabul eden Türkiye, 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %41 oranında azaltma taahhüdünde bulunmuş ve 2038 yılına kadar emisyonların en yüksek seviyeye ulaşmasını planlamaktadır (Dışişleri Bakanlığı, 2023).

Problem kapsamında çözüm önerisi olarak elektrikli araçların kullanılması Çizelge 3.1'de belirtildiği gibi sadece 100 km. için %45,64 yakıt maliyeti avantajı sağlamaktadır. Bu doğrultuda fosil yakıtlı araç kullanımına karşın elektrik araç kullanımı önerisiyle ele alınan çalışmada;

Hastaların elektrikli araç ile taşınması problemi "Elektrikli Araçlarla Karışık Topla-Dağıt Problemi" (E-VRPMB) olup, aracın toplam kat ettiği mesafenin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Seyahat süresi, hasta alınması/bırakılması süresi yanında hastaların zaman pencerelerine uygun olacak şekilde bekleme süresi ve şarj zamanının planlanması da dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda; hizmet verilecek hastanın tedavi gün ve saatine uygun olarak zamanında evinden alınması ve bırakılması, elektrikli araç kapasitesi, menzil ve şarj kısıtlarını göz önünde bulundurulması, çözümde hizmet kalitesini korumak (araç içinde hasta varken aracın şarja gitmeme kısıtını sağlamak) gereksinimleri ön plana çıkmaktadır.

3.5. Matematiksel Model

Bu çalışmada ele alınan problem (E-VRPMB), diyaliz hastalarının elektrikli araçlarla evlerinden alınıp hastaneye götürülmesi ve seans bitiminde tekrar evlerine bırakılması senaryosu üzerine kurgulanmıştır. Ayrıca elektrikli araçların sınırlı menzil ve şarj ihtiyaçları, modelde önemli kısıtlar olarak yer almakta ve çözüm stratejilerini doğrudan etkilemektedir.

Varsayımlar:

- Elektrikli aracın batarya kapasitesi sınırlıdır ve bu kapasite bilinmektedir. Araç, hastaneden belli bir şarj seviyesi ile çıkmaktadır.
- Araç, hastaneden çıkarken evlerine bırakılacak diyaliz hastalarını alarak hareket etmekte ve hastaneye getirilecek diğer hastaları da alarak geri dönmektedir.

- Evlerine bırakılacak ve evlerinden alınacak hastalar için zaman penceresi kısıtları bulunmaktadır.
- Araç, şarj istasyonunda tam şarj olacaktır.
- Araç, içerisinde hasta varken şarj istasyonuna gitmesi istenmemektedir.
- Elektrikli aracın yolcu kapasitesi 20-10 kişi ile sınırlıdır.
- Enerji tüketimi, yalnızca mesafeye bağlı olarak hesaplanmaktadır; yük, eğim vb. enerji tüketimini etkileyen diğer faktörler göz ardı edilmiştir.
- Araçta hastaların evlerinden araca geterilmelerinde, araçtan evlerine bırakılmalarında yardımcı olacak bir refakatçi olacaktır.
- Hastaların bazılarının alma talebi, bazılarının bırakma talebi, ya da alma bırakma talebi birlikte olabilir.
- Zaman penceresi kısıtları dikkate alınarak, hastaların belirlenen zaman diliminde alınması ve bırakılması gerekmektedir.
- Test problemlerinde aracın enerji tüketim katsayısı (h) 1 olarak alınmıştır. Aracın aldığı yol ile orantılı enerji harcadığı varsayılmıştır.

Amaç, toplam mesafenin minimize edilmesidir. Literatürde CEVRP-TW için Schenider et al, (2014) tarafından önerilen Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) modeli probleme uyarlanarak GAMS (General Algebraic Modeling System) CPLEX çözücü ile eniyi sonuçlar elde edilmiştir. Modeldeki kümeler Çizelge 3.2'de, parametreler Çizelge 3.3'de, karar değişkenleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kümeler

Küme	Açıklama
I	Tüm düğümler
dp0	Hastaneden çıkış düğümü
f	Şarj istasyonu düğümü
dpf	Hastaneden çıkış ve şarj istasyonu düğümleri
albırak	Hasta alma ve bırakma düğümleri
dpalbırak	Hastaneden çıkış, hasta alma ve bırakma düğümleri
falbırak	Şarj istasyonu ile hasta alma ve bırakma düğümleri

Küme	Açıklama
dpfalbırak	Hastaneden çıkış, şarj istasyonu, hasta alma ve bırakma düğümleri
dp10	Hastaneye dönüş düğümü
dp10falbırak	Hastaneye varış, şarj istasyonu, hasta alma ve bırakma düğümleri
dp010falbırak	Hastaneden çıkış, hastaneye varış, şarj istasyonu, hasta alma ve bırakma düğümleri

Çizelge 3.3. Parametreler

Parametre	Açıklama
Qc	Aracın hastaneden çıkıştaki batarya şarj seviyesi
q(i)	Düğüm *i*'deki hasta sayısı
s(i)	Düğüm *i* için servis süresi
e(i)	Düğüm *i* için en erken hizmete başlama zamanı
l(i)	Düğüm *i* için en geç hizmete başlama zamanı
d(i,j)	*i* ve *j* düğümleri arasındaki mesafe
C	Aracın yolcu kapasitesi
g	Araç için şarj olma hızı
h	Araç için enerji tüketim katsayısı
M	Yeterince büyük pozitif sabit
v	Aracın şehir içi ortalama hızı

Çizelge 3.4. Karar değişkenleri

Değişken	Açıklama
z	Amaç fonksiyonu (en küçük mesafe)
p(i)	Düğüm *i*'ye varıldığında kalan batarya seviyesi
y(i)	Düğüm *i*'de servise başlama zamanı
u(i)	Düğüm *i*'deki araç yükü (kişi)
x(i,j)	Araç *i*'den *j*'ye gidiyorsa 1, aksi takdirde 0

Tanımlanan parametreler, değişkenler ve kümeler doğrultusunda, bu çalışmada ele alınan E-VRPMB çözümünü sağlayacak matematiksel model izleyen kısımda verilmiştir.

Literatürde CEVRP-TW için Schenider et al, (2014) tarafından önerilen Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) modelinden probleme uyarlananan Matematiksel Model:

$$Z_{\min\ _distance} = \Sigma_{i,j} d(i,j)x(i,j) \qquad (3.18.)$$

k.a.

$$\Sigma_{i \neq j} x(i,j) = 1 \qquad \forall i \in albırak,\ j \in dp10falbırak \qquad (3.19.)$$

$$\Sigma_{i \neq j} x(i,j) \leq 1 \qquad \forall i \in f,\ j \in dp10falbırak \qquad (3.20.)$$

$$\Sigma_{i \neq j} x(j,i) - \Sigma_{i \neq j} x(i,j) = 0 \qquad \forall j \in falbırak,\ i \in dp10falbırak \qquad (3.21.)$$

$$p(i) + \frac{d(i,j)}{v} x(i,j) + s(i)x(i,j) - M\big(1 - x(i,j)\big) \leq p(j) \qquad \forall i \in dpalbırak,\ j \in dp10falbırak,\ i \neq j \qquad (3.22.)$$

$$p(i) + \frac{d(i,j)}{v} x(i,j) + g(\mathrm{Qc} - \mathrm{yi}) - (M + \mathrm{gQc})\big(1 - x(i,j)\big) \leq p(j) \qquad \forall i \in f, j \in dp10falbırak,\ i \neq j \qquad (3.23.)$$

$$e(j) \leq p(j), \qquad \forall j \epsilon\ dp010falbırak \qquad (3.24.)$$

$$p(j) \leq l(j) \qquad \forall j \epsilon\ dp010falbırak \qquad (3.25.)$$

$$u(j) \leq u(i) - q(i)x(i,j) + C\big(1 - x(i,j)\big) \qquad \forall i \in dpfalbırak,\ j \in dp10falbırak,\ i \neq j \qquad (3.26.)$$

$$0 \leq u(i) \leq C \qquad \forall i\ \epsilon\ I, \qquad (3.27.)$$

$$y(j) \leq y(i) - hd(i,j)x(i,j) + Qc\big(1 - x(i,j)\big) \qquad \forall i\ \epsilon\ albırak,\ j \in dp10falbırak,\ i \neq j \qquad (3.28.)$$

$$y(j) \leq Qc - hd(i,j)x(i,j), \qquad \forall i\ \epsilon\ dpf,\ j \in dp10falbırak,\ i \neq j \qquad (3.29.)$$

$$\mathrm{x(i,j)} = 0 \qquad \forall i,j \epsilon dpf, i \neq j \qquad (3.30.)$$

$x(i,j) \in \{0,1\}$ $\forall(i,j) \in I, i \neq j$ (3.31.)

Amaç fonksiyonu (3.18.) en küçük mesafeyi verir. Kısıt (3.19.) ve (3.20.), her hasta alma noktasından yalnızca bir çıkış yapılmasını ve her bir düğüme yalnızca bir kez girilmesini zorunlu kılar. Kısıt (3.21.), rotadaki giriş-çıkış akış dengesini korur; her düğüme giren aracın mutlaka oradan çıkış yapmasını sağlar. Böylece düğüm bazlı geçiş bütünlüğü korunur ve modelin mantıksal tutarlılığı sağlanır.

Zaman yönetimi açısından kritik olan Kısıt (3.22.) ve (3.23.), araçların iki düğüm arasındaki yol süresi, hizmet süresi ve şarj süresi gibi bileşenlerin rota planlamasına dahil edilmesini sağlar. Kısıt (3.24.) ve (3.25.) ise her bir düğüme zaman penceresi dahilinde veya öncesinde ulaşımı sağlar. Hasta taşımasında hasta taleplerinin zaman penceresi dahilinde karşılanması önemlidir. Kısıt (3.26.) her düğümde yükün güncellenmesini sağlar. Kısıt (3.27.) yükün maksimum kapasiteyi aşmamasını sağlar. Kısıt (3.28.) ile, aracın batarya tüketimi hesaplanır. Kısıt (3.29.), düğüme gidildiğindeki kalan bataryayı hesaplar. Kısıt (3.30.) ile hastaneden şarj istasyonundan şarj istasyonuna geçiş engellenir. Kısıt (3.31.), $x(i,j)$'nin 0 ya da 1 değer alacağını ifade eder.

Bu bölümde detaylı olarak açıklanan model yapısı ve matematiksel kısıtlar doğrultusunda, tanımlanan hasta taşıma senaryosu için CPLEX çözücüsü kullanılarak çözümler elde edilmiştir. İzleyen bölümlerde model çözümünde kullanılacak Tavlama Benzetimi (SA) algoritması da verilerek sonuçlar karşılaştırılacaktır.

3.6. Tavlama Benzetimi Algoritması

Tavlama Benzetimi (SA) algoritması, fiziksel sistemlerin düşük enerji seviyesine ulaşmak için kullandığı tavlama sürecinden esinlenilerek geliştirilmiş bir metasezgisel arama algoritmasıdır. Bu yöntem, çözüm uzayında iteratif olarak hareket ederken sadece daha iyi çözümleri değil, belirli bir olasılıkla daha kötü çözümleri de kabul edebilme özelliğine sahiptir. Bu sayede lokal optimumlara sıkışma riski azaltılırken, daha geniş bir arama alanında daha kaliteli çözümler keşfedilebilir. Kombinatöryel problemlerde metasezgisellerin başarısı kanıtlanması ve metasezgisellerin kısa sürede kaliteli çözüm vermesi gerçek hayat problemlerinde kullanılma sebeplerinden biridir.

Bu çalışmada kullanılan Tavlama Benzetimi (SA) algoritması, metalurjideki ısıl işlem sürecinden esinlenmektedir. Yüksek sıcaklıkta serbest hareket eden atomların soğutma süreci boyunca daha kararlı ve düşük enerjili bir yapıya ulaşması gibi, Tavlama Benzetimi algoritması da çözüm uzayında başlangıçta geniş bir arama yapar, ardından sıcaklığın düşürülmesiyle daha kararlı çözümlere yönelir.

SA algoritmasının temel adımları şu şekildedir:

1. Başlangıç çözümü rastgele veya basit bir kuralla belirlenir.
2. Komşuluk yapısı kullanılarak mevcut çözüm üzerinde küçük değişikliklerle yeni çözümler üretilir.
3. Amaç fonksiyonu (örneğin toplam seyahat mesafesi veya maliyet) hesaplanarak çözümün kalitesi değerlendirilir.
4. Daha iyi çözümler her zaman kabul edilirken, daha kötü çözümler belirli bir olasılıkla kabul edilir. Bu olasılık sıcaklık parametresine bağlıdır.
5. Soğutma programı uygulanarak sıcaklık her iterasyonda azaltılır, böylece algoritma daha istikrarlı hale gelir ve en iyi çözüm korunur.

Bu özellikleri sayesinde SA algoritması, yerel minimumlardan çıkabilme esnekliğine sahiptir ve büyük boyutlu hasta taşımacılığı senaryolarında kısa sürede tatmin edici çözümler üretebilmektedir. Bu çalışmada, özellikle matematiksel modelin çözüm süresinin uzun olduğu durumlarda Tavlama Benzetimi algoritması ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tavlama Benzetimi metasezgiseli kullanılarak rota mesafesini minimize eden iyi komşu çözüm rota aranır. Bulunan rota, detaylı bir rapor halinde sunularak, ilgili paydaşların karar alma süreçlerine önemli katkılar sağlar. Modelde, başlangıçta bir rota oluşturulup ve her iterasyonda yeni çözümler üretilir ve mevcut en iyi çözümlerle karşılaştırılarak kabul kriterleri doğrultusunda uygun olanlar seçilir. Tüm bu süreçler sona erdikten sonra, elde edilen sonuçlar analiz edilir.

Tavlama Benzetimi (SA) algoritmasının başarısı 1 adet hastane (depo), 10 adet şarj istasyonu (cs1–cs10) ve toplam 5, 10 ve 20 hasta konumunu içeren test problemleri ile test edilmiştir. Tavlama Benzetimi (SA) algoritması, hem hastaneye taşınması gereken (alma) hem de hastaneden evine bırakılması gereken (bırakma) hastaları içeren senaryolar için

rastgele bir başlangıç çözümle başlamaktadır. Belli bir iterasyon sonra elde edilen çözümler, matematiksel modelden elde edilen rotalarla mesafe açısından kıyaslanmıştır.

Bu bölümde araştırmanın veri seti, modelleme süreci ve kullanılan çözüm yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Özellikle Tavlama Benzetimi algoritmasının detaylı biçimde tanıtılması, çalışmanın hesaplama temellerini güçlendirmiştir. Böylece, ilerleyen bulgular bölümünde sunulacak sonuçların hangi yöntemsel temele dayandığı net bir şekilde ortaya konmuştur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Elektrikli araçlarla gerçekleştirilen hasta taşımacılığı lojistiği çok kapsamlı operasyonları bir araya getirmekte ve özellikle, çevresel sürdürülebilirlik ile verimliliği entegre ederek yeni nesil lojistik trendleri arasında yerini almaktadır. Bu bölümde, daha önceki bölümlerde de kapsamlı bir şekilde anlatılan sağlık sektörüne özgü ihtiyaç ve kısıtlamalar dikkate alınarak oluşturulan E-VRPMB için çözüm yöntemleri ve uygulama sonuçları detaylı şekilde verilecektir. Literatürdeki E-VRPMB modelleri detaylıca incelenmiş ve diyaliz hastalarının hastaneye ve evlerine ulaştırılması için rota planlaması gerektiren problemin çözümü matematiksel model ve metasezgisel ile elde edilmiştir. Beş, on ve yirmi hasta içeren senaryolar GAMS ortamında CPLEX çözücü ve Python ortamında Tavlama Benzetimi (SA) algoritması ile çözülmüştür. Bu çalışma, hasta taşımacılığında çevre dostu ve optimizasyon temelli bir yöntem önerisi sunmaktadır.

E-VRPMB için çözüm yöntemi, gerçek hayatta karşılaşılan kısıtları ve sağlık odaklı gereksinimleri göz önünde bulundurarak geliştirilmiştir. Test problemlerinde;

- 20 hasta taşıma kapasitesine sahip Karsan E-JEST ve
- 10 hasta taşıma kapasitesine sahip EC11-E-CREW aracı

için çözümler elde edilmiştir. Amaç; toplam seyahat mesafesini minimize etmektir. Bu doğrultuda oluşturulan model, belirtilen amaç fonksiyonu kapsamında çözülmüş ve GAMS CPLEX çözücü ile elde edilen sonuçlar Tavlama Benzetimi (SA) metasezgisel algoritması sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Senaryolar:

Senaryo 1: 20 hasta kapasiteli Karsan E-JEST aracının kullanılması

Senaryo 2: 10 hasta kapasiteli EC11 E-CREW aracının kullanılması

olup beş, on ve yirmi hasta içeren test problemleri (C5, C10, C20: Problem1 / Problem2 / Problem3 / Problem4) kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

4.1. Matematiksel Model Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan E-VRPMB matematiksel modeli, GAMS 30.3.1 ortamında, CPLEX 22.1 çözümleyicisi ile çözülmüştür. Modellemenin çözümü, Intel Core i7-12700H işlemcili, 32 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda 5-10-20 hasta içeren test problemleri için

gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi yerleşkesi ortam verilerini içeren, şehir içi taşıma için uygun ESOGU_EVRP-PDP-TW veri seti probleme uyarlanarak kullanılmıştır (Aslan vd., 2025a; Aslan vd., 2025b). Problem setindeki P ve D sütununda yer alan yükler yerine hasta sayıları girilmiştir. Her bir lokasyondan bir hasta alınacak ya da bir hasta bırakılacak şekilde veri setleri düzenlenmiştir.

C5 test problemi: Beş hasta içeren probleme ait hasta taleplerine ilişkin veriler Çizelge 4.1' de özetlenmiştir. Hastane ve şarj istasyonu verileri tüm problemlerde C5 problem setinde verildiği gibidir.

Amaç fonksiyonu toplam mesafenin minimize edilmesidir. Senaryolarda, yolcu sayıları dışında, bir elektrikli araç, 10 şarj istasyonu, bir hastane yer almaktadır. Modelde zaman penceresi ile birlikte batarya şarj durumu kısıtı da göz önünde bulundurulmuştur. Araç için enerji tüketme katsayısı mesafe ile paralel (h=1) olarak alınmıştır. Batarya kapasitesi test problemlerinde 6000 kWsn alınmıştır. Araç şarj istasyonuna uğraması durumunda tam batarya dolumu kadar şarj olacaktır.

Çizelge 4. 1. C5 test problemindeki hastalara ilişkin talep verisi

ID	Tip	Lokasyon		D	P	En erken başlama zamanı (sn)	En geç başlama zamanı (sn)	Servis süresi (sn)
48	Hastane	39750124	30485116	0	0	0	7000	0
10	D	39750316	30491958	1	0	81	6301	120
13	D	39750779	30491320	1	0	106	6734	120
14	D	39750497	30491334	1	0	87	5881	120
154	P	39750448	30478030	0	1	732	6070	240
22A	P	39750725	30489306	0	1	227	6336	240
cs1	cs	39744075	30469333	0	0	0	7000	0
cs2	cs	39748305	30477105	0	0	0	7000	0
cs3	cs	39746605	30474623	0	0	0	7000	0
cs4	cs	39753933	30484572	0	0	0	7000	0
cs5	cs	39751670	30480422	0	0	0	7000	0
cs6	cs	39751182	30487697	0	0	0	7000	0
cs7	cs	39752908	30489350	0	0	0	7000	0
cs8	cs	39750889	30492715	0	0	0	7000	0
cs9	cs	39750132	30474637	0	0	0	7000	0
cs10	cs	39749569	30482477	0	0	0	7000	0

V: Elektrikli aracın hızı /12.5 m/s (45 km/h)/
C: Araç kapasitesi /10 hasta/20 hasta

Q: Aracın batarya kapasitesi /6000 kWsn)/

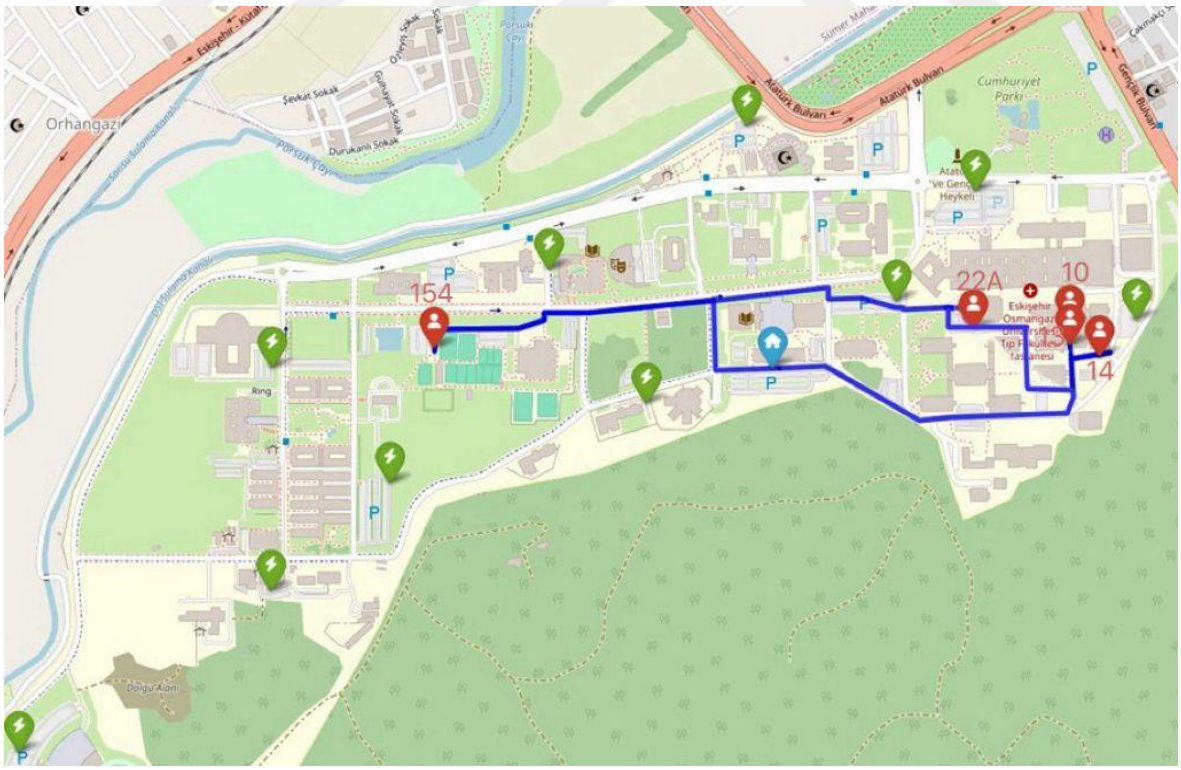
h(r): Aracın enerji tüketim katsayısı /1.0/

g: Batarya dolum hızı /0.18/

Bu test probleminde; düğüm (48) hastaneyi, (154) ve (22A) numaralı düğümler hasta alma (P) noktalarını, (10), (13) ve (14) numaralı düğümler hasta bırakma (D) noktalarını "cs"ler şarj istasyonlarını temsil etmektedir. CPLEX çözücüden en küçük mesafeyi veren rota;

48 (hastane) → ('P',154) → ('P',22A) → ('D',10) → ('D',13) → ('D',14) → 48 (hastane) olarak elde edilmiştir. Toplam mesafe 3610.59 m ve çözüm süresi 0.88 saniyedir.

Şekil 4.1'de C5 problemi için minimum mesafeyi veren çözüm, OSM (OpenStreetMap) haritası üzerinde gösterilmiştir. Mavi simge hastane noktasını, kırmızı simgeler hasta düğüm noktalarını ve mavi çizgi araç rotasını göstermektedir.



Şekil 4. 1. Beş hasta içeren C5 problemi için en küçük mesafeyi veren rota

Rota incelendiğinde araç hastaneden hareket ederek önce 154 numaralı düğümden hastayı almış ve 22A düğümüne giderek diğer hastayı da alıp alma taleplerini karşılamıştır. 22A düğümünden sonra sırasıyla 10-13-14 numaralı düğümlere hastaları bırakmış ve hastaneye dönüş yaparak rotasını tamamlamıştır. Araç şarj istasyonuna uğramadan tüm talepleri karşılamış ve hastaneye dönüş yaparak sonraki turlar için tam şarj (şarj durumu-SoC=%100) olmuştur.

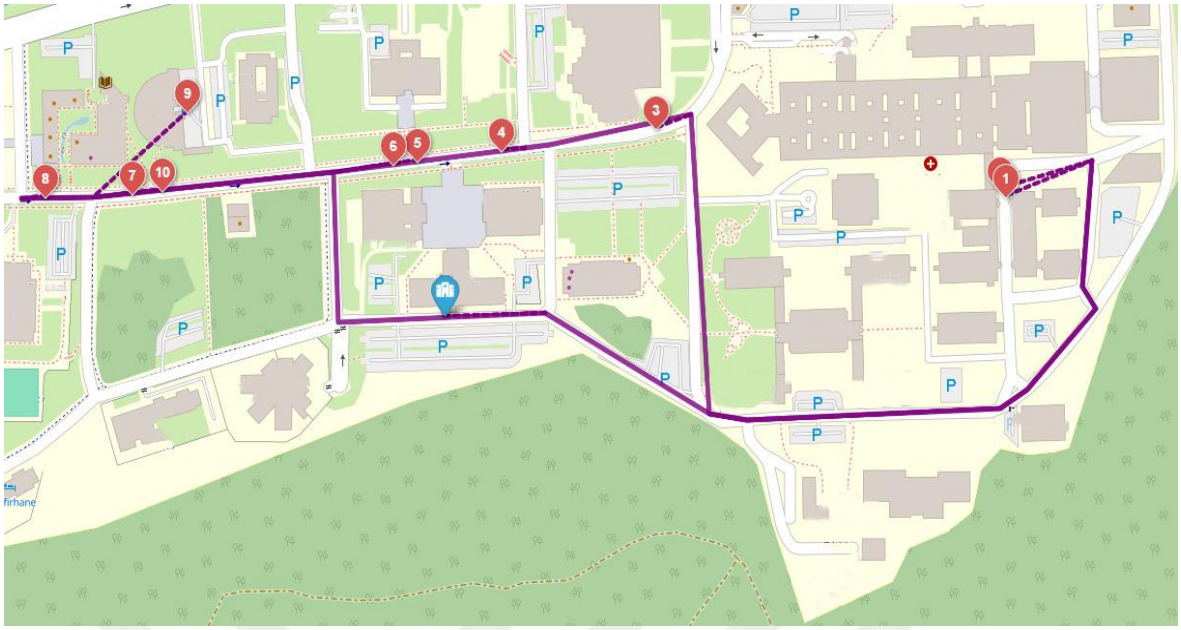
C10 test problemi: 10 hasta içeren probleme ait hasta taleplerine ilişkin veriler Çizelge 4.2' de özetlenmiştir. Hastane ve şarj istasyonu verileri tüm problemlerde C5 problem setinde verildiği gibidir.

Çizelge 4. 2. C10 test problemindeki hastalara ilişkin talep verisi

ID	Tip	Lokasyon		D	P	En erken başlama zamanı (sn)	En geç başlama zamanı (sn)	Servis süresi (sn)
11	P	39751078	30491364	0	1	19	5963	120
12	P	39751132	30491299	0	1	827	5853	120
33	P	39751610	30487475	0	1	311	6541	180
36	P	39751436	30485759	0	1	54	6087	180
37B	P	39751355	30484827	0	1	146	5827	180
37A	P	39751335	30484563	0	1	63	6449	180
40	D	39751745	30482277	1	0	148	6959	120
41	D	39751122	30481994	1	0	155	6908	180
42C	D	39751074	30480695	1	0	706	6299	240
42A	D	39751097	30481668	1	0	633	6579	240

Bu test senaryosunda düğüm (48) hastane, (11)- (12)- (33)- (36)- (37B)- (37A) numaralı düğümler hasta alma (P) noktalarını, (40)- (41)- (42C) ve (42A) numaralı düğümler hasta bırakma (D) noktalarını temsil etmektedir. CPLEX çözücüden en küçük mesafeyi veren rota; 48 (hastane) → ('P',11) → ('P',12) → ('P',33) → ('P',36) → ('P',37B) →('P',37A) →('D',42A) →('D',42C) → ('D',40) →('D',41) → 48 (hastane) olarak elde edilmiştir. Toplam mesafe 3169.35 m., çözüm süresi 0.33 saniyedir.

Şekil 4.2'de C10 problemi için minimum mesafeyi veren rota, OSM (OpenStreetMap) haritası üzerinde gösterilmiştir. Mavi simge hastane noktasını, kırmızı simgeler hasta düğüm noktalarını ve mor çizgi araç rotasını göstermektedir. 10 hasta taşıma senaryosuna ait minimum mesafeyi veren rota görselleştirilmiştir.



Şekil 4. 2. On hasta içeren C10 problemi için en küçük mesafeyi veren rota

Rota incelendiğinde araç hastaneden hareket ederek sırasıyla; 11-12-33-36-37B-37A düğümlerinden hastaları almış sonrasında 42A-42C-40-41 numaralı düğümlere de hastaları bırakarak hastaneye geri dönmüştür.

C20 test problemi: 20 hasta içeren probleme ait hasta taleplerine ilişkin veriler Çizelge 4.3' de özetlenmiştir. Hastane ve şarj istasyonu verileri tüm problemlerde C5 problem setinde verildiği gibidir.

Bu test probleminde düğüm (48) hastane, (22C)-(52)-(56)-(60B/1)-(60B/2)-(60A/1)-(60A/2)-(61B)-(61A/1)-(61A/2) numaralı düğümler hasta alma noktalarını (P), (117)-(121)-(122)-(16)-(17)-(18)-(20)-(21)-(22E)-(22B) numaralı düğümler hasta bırakma noktalarını (D) temsil etmektedir. CPLEX çözücü makul sürede optimal sonucu veremediğinden model üç saat çalıştırılmıştır.

Üç saat sonrasında rota;

48 (hastane) → ('P',60A/1) → ('P',60A/2) → ('P',60B/2) → ('P',60B/1) → ('D',121) →('P',56) →('D',122) →('P',61A/2) → ('P',61A/1) → ('P',61B) → ('P',52) →('D',18) → ('D',17) → ('D',117) → ('D',16) →('D',20) →('D',22B) →('D',22E) → ('P',22C) →('D',21) → 48 (hastane) olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4. 3. C20 test problemindeki hastalara ilişkin talep verisi

ID	Tip	Lokasyon		D	P	En erken başlama zamanı (sn)	En geç başlama zamanı (sn)	Servis süresi (sn)
117	D	39749351	30491168	1	0	120	720	6271
121	D	39749195	30474898	1	0	100	493	5833
122	D	39749195	30476336	1	0	100	54	6063
16	D	39749308	30491449	1	0	120	152	6764
17	D	39749178	30489155	1	0	180	316	6150
18	D	39748798	30488982	1	0	120	89	6028
20	D	39749416	30489487	1	0	180	719	6093
21	D	39749471	30489002	1	0	180	393	5999
22E	D	39749475	30489244	1	0	180	302	6420
22B	D	39749472	30489346	1	0	180	820	6280
22C	P	39749469	30489109	0	1	180	379	6905
52	P	39748937	30480167	0	1	120	322	5943
56	P	39749427	30476711	0	1	180	338	6399
60B/1	P	39749234	30474840	0	1	180	469	6093
60B/2	P	39749234	30474840	0	1	240	624	6650
60A/1	P	39749362	30474844	0	1	180	313	5969
60A/2	P	39749362	30474844	0	1	240	223	6085
61B	P	39749062	30476333	0	1	180	230	6431
61A/1	P	39749131	30476333	0	1	180	740	6117
61A/2	P	39749131	30476333	0	1	240	146	6560

Üç saat sonrasında elde edilen toplam mesafe 4361.21 metredir. Şekil 4.3'de 20 hasta taşıma senaryosuna ait rota görselleştirilmiştir. C20 problemi için çözüm, OSM (OpenStreetMap) haritası üzerinde gösterilmiştir. Mavi simge hastane noktasını, yeşil simgeler hasta düğüm noktalarını ve yeşil çizgi araç rotasını göstermektedir.



Şekil 4. 3. Yirmi hasta içeren C20 problemi için elde edilen rota (optimal değil)

Rota incelendiğinde araç hastaneden hareket ederek 60A/1, 60A/2, 60B/2) ve 60B/1 düğümlerinden hastaları almıştır. Sonrasında 121 nolu düğüme hastayı bırakmış 56 numaralı düğümden hasta almıştır. 122 numaralı düğüme hasta bırakmış, 61A/2 ve 61A/1 hastalarını aynı düğümden almış, 61B ve 52 nolu düğümlerden de hasta aldıktan sonra sırasıyla 18, 17, 117, 16, 20, 22B ve 22E nolu düğümlere hasta bırakmıştır. Turun devamında 22C hastasını alıp 21 nolu hastayı da evine bırakarak hastaneye dönüş yapmıştır.

GAMS ortamında CPLEX çözücüsü ile beş ve on hasta içeren problemler makul sürede çözülmüş ancak yirmi hastalı problem için üç saat içinde optimal çözüme ulaşılamamıştır. CPLEX çözücü beş ve on hastalı problemlerde bir saniye sürenin daha da altında çözüm üretirken yirmi hastalı senaryoda çözüm süresi açısından sınırlı kalmıştır. Bu doğrultuda tez kapsamında önerilen SA algoritması sonuçları izleyen başlıkta verilmektedir.

4.2. Tavlama Benzetimi Algoritması Sonuçları

Matematiksel model ile elde edilen çözümler, küçük boyutlu problemler için ne kadar başarılı olsa da problem boyutu arttıkça çözüm süresi uzamaktadır. Bu nedenle, özellikle gerçek yaşam koşullarını yansıtan hasta taşımacılığı senaryolarında, artan problem boyutlarının yönetimi, alternatif çözüm yöntemlerinin kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Bu kapsamda, büyük ölçekli hasta taşıma problemlerinin çözümü için geliştirilen Tavlama Benzetimi (SA) algoritması Python 3.11 programlama dili kullanılarak kodlanmıştır. Algoritmanın testleri ve parametre analizleri, Intel Core i7-12700H işlemcili, 32 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Tavlama Benzetimi, özellikle karmaşık yapılı problemlerinde yüksek yakınsama kabiliyeti ve parametrik esneklik sunan bir metasezgisel algoritmadır. Bu çalışma kapsamında GAMS ortamında, CPLEX çözücüsü ile elde edilen 5, 10 ve 20 hastalı problemler, aynı kısıtlar altında SA algoritması ile çözülerek en iyi çözüme yaklaşma başarısı ve çözüm süresi açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen, gerçek hayatla uyumlu çözümler, algoritmanın farklı problem boyutları altında sergilediği performans ve esnekliğin değerlendirilmesine zemin oluşturmaktadır. Algoritmada başlangıç sıcaklığı 10.000 olarak belirlenmiş ve minimum sıcaklık olan 0.1 değerine ulaşılana dek, 0.99 soğutma oranı ile iterasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen çözümler; toplam rota mesafesi açısından analiz edilmiştir. Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da sırasıyla GAMS ortamında çözülen C5, C10 ve C20 problemlerinin SA algoritması ile çözüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4. 4. C5 probleminin SA algoritması çözüm sonucu

Düğüm	Tip	Bat. (kWh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	6000.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç
154	Hasta	5232.01	87.2	767.99	61.44	670.56	240.00	972.00	TW: (732, 6070) Svc: 240
22A	Hasta	4091.54	68.2	1908.46	1063.24	0.00	240.00	1303.24	TW: (227, 6336) Svc: 240
10	Hasta	3233.62	53.9	2766.38	1371.87	0.00	120.00	1491.87	TW: (81, 6301) Svc: 120
13	Hasta	3105.38	51.8	2894.62	1502.13	0.00	120.00	1622.13	TW: (106, 6734) Svc: 120
14	Hasta	3074.52	51.2	2925.48	1624.60	0.00	120.00	1744.60	TW: (87, 5881) Svc: 120
1	Hastane	2389.41	39.8	3610.59	1799.41	0.00	0.00	1799.41	-

Görev Sırası: 1 -> 154 -> 22A -> 10 -> 13 -> 14 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 3610.59
Toplam Tur Süresi: 1799.41
Depodaki Son Batarya Durumu: 2389.41 (SOC: 39.8%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 0.0802 saniye

Çizelge 4.4 incelendiğinde CPLEX çözücüsü ile aynı rota sonucu ve minimum mesafe değeri elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tur detayı incelenirse; araç başlangıç noktası hastaneden %100 şarj ile çıkış yapmış düğüm 154'e geldiğinde şarjı %87.2 hesaplanmıştır. Düğüm 154'teki müşteriyi almak için zaman penceresi kapsamında 670.56 sn bekleme yapılmıştır. Turun devamında düğüm 22A'dan da hastayı almış ve 10-13-14 nolu düğümlere hastaları bırakarak turunu hastanede bitirmiştir. Araç 154 nolu hastadan sonra gittiği düğümlerde en erken başlama zamanı ve en geç varış zamanlarına göre hiç bekleme yapmamış algoritma zaman penceresi kısıtları dahilinde (Bknz: Çizelge 4.4. Toplam cezalar: 0) çözüm bulmuştur. Araç hastaneye döndüğünde batarya %39.8 hesaplanmıştır. Bu senaryo sonucunda toplam tur süresi 1799.41 sn. olarak hesaplanmış ve SA algoritması ile 0.0802 saniyede en iyi çözüm ile aynı sonuç elde edilmiştir.

Çizelge 4. 5. C10 probleminin SA algoritması çözüm sonucu

Düğüm	Tip	Bat. (kWh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	6000.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç
11	Hasta	5183.39	86.4	816.61	65.33	0.00	120.00	185.33	TW: (19, 5963) Svc: 120
12	Hasta	5134.14	85.6	865.86	189.27	637.73	120.00	947.00	TW: (827, 5853) Svc: 120
33	Hasta	4364.04	72.7	1635.96	1008.61	0.00	180.00	1188.61	TW: (311, 6541) Svc: 180
36	Hasta	4222.88	70.4	1777.12	1199.90	0.00	180.00	1379.90	TW: (54, 6087) Svc: 180
37B	Hasta	4141.59	69.0	1858.41	1386.40	0.00	180.00	1566.40	TW: (146, 5827) Svc: 180
37A	Hasta	4119.84	68.7	1880.16	1568.14	0.00	180.00	1748.14	TW: (633, 6449) Svc: 180
42A	Hasta	3866.24	64.4	2133.76	1768.43	0.00	240.00	2008.43	TW: (633, 6579) Svc: 240
42C	Hasta	3785.95	63.1	2214.05	2014.86	0.00	240.00	2254.86	TW: (706, 6299) Svc: 240
40	Hasta	3364.30	56.1	2635.70	2288.59	0.00	120.00	2408.59	TW: (148, 6959) Svc: 120
41	Hasta	3352.29	55.9	2647.71	2409.55	0.00	180.00	2589.55	TW: (155, 6908) Svc: 180
1	Hastane	2830.65	47.2	3169.35	2631.28	0.00	0.00	2631.28	-

Görev Sırası: 1 -> 11 -> 12 -> 33 -> 36 -> 37B -> 37A -> 42A -> 42C -> 40 -> 41 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 3169.35
Toplam Tur Süresi: 2631.28
Depodaki Son Batarya Durumu: 2830.65 (SOC: 47.2%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 0.5810 saniye

Çizelge 4.5 incelendiğinde CPLEX çözücüsü ile aynı rota sonucu elde edilmiştir. Ayrıca tur detayı incelenirse; araç başlangıç noktası hastaneden %100 şarj ile çıkış yapmış düğüm 11'e geldiğinde şarjı %86,4 hesaplanmıştır. Turun devamında sırasıyla 12 nolu hastayı almış, burada 12 nolu hastanın en erken hizmet süresine karşın 673.73 sn bekleme yapmıştır, 33-36-37B-37A nolu düğümlerdeki hastaların bekleme süresi olmadan alma talebini karşılamıştır. 37A nolu düğümdeki hasta alındığında aracın şarj seviyesi %68,7 hesaplanmıştır. 42A-42C-40 ve 41 nolu düğümler hasta bırakma talebi olduğundan algoritma aracın kalan şarj seviyesinin bu talepleri karşılayacağına karar vermiş ve araç hastaları en erken hizmete başlama ve en geç bırakma zaman penceresi sınırları içinde bekleme süresi olmadan hizmetini tamamlayarak hastaneye dönüş yapmıştır. Araç hastaneye döndüğünde batarya %47,2 hesaplanmıştır. Bu problemde toplam tur süresi 2631.28 sn olarak hesaplanmış ve SA algoritması ile 0.581 saniyede en iyi çözüm ile aynı sonuç elde edilmiştir.

Çizelge 4. 6. C20 probleminin SA algoritması çözüm sonucu

Düğüm	Tip	Bat. (kWh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	6000.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç
60A/2	Hasta	4824.95	80.4	1175.05	94.00	129.00	240.00	463.00	TW: (223, 6085) Svc: 240
60A/1	Hasta	4824.95	80.4	1175.05	463.00	0.00	180.00	643.00	TW: (313, 5969) Svc: 180
60B/1	Hasta	4808.08	80.1	1191.92	644.35	0.00	180.00	824.35	TW: (469, 6093) Svc: 180
60B/2	Hasta	4808.08	80.1	1191.92	824.35	0.00	240.00	1064.35	TW: (624, 6650) Svc: 240
121	Hasta	4786.03	79.8	1213.97	1066.11	0.00	100.00	1166.11	TW: (493, 5833) Svc: 100
56	Hasta	4418.29	73.6	1581.71	1195.53	0.00	180.00	1375.53	TW: (338, 6399) Svc: 180
122	Hasta	4333.99	72.2	1666.01	1382.28	0.00	120.00	1502.28	TW: (54, 6063) Svc: 120
61A/1	Hasta	4323.11	72.1	1676.89	1503.15	0.00	180.00	1683.15	TW: (740, 6117) Svc: 180
61A/2	Hasta	4323.11	72.1	1676.89	1683.15	0.00	240.00	1923.15	TW: (146, 6560) Svc: 240
61B	Hasta	4316.96	71.9	1683.04	1923.64	0.00	180.00	2103.64	TW: (230, 6431) Svc: 180
52	Hasta	3700.20	61.7	2299.80	2152.98	0.00	120.00	2272.98	TW: (322, 5943) Svc: 120
18	Hasta	2786.52	46.4	3213.48	2346.07	0.00	180.00	2526.07	TW: (89, 6028) Svc: 180
17	Hasta	2602.79	43.4	3397.21	2540.77	0.00	180.00	2720.77	TW: (316, 6150) Svc: 180
117	Hasta	2411.83	40.2	3588.17	2736.05	0.00	120.00	2856.05	TW: (0, 6271) Svc: 120
16	Hasta	2358.30	39.3	3641.70	2860.33	0.00	120.00	2980.33	TW: (152, 6764) Svc: 120
20	Hasta	2174.14	36.2	3825.86	2995.06	0.00	120.00	3115.06	TW: (719, 6093) Svc: 120
22B	Hasta	2044.72	34.1	3955.28	3125.42	0.00	180.00	3305.42	TW: (820, 6280) Svc: 180
22E	Hasta	2033.66	33.9	3966.34	3306.30	0.00	180.00	3486.30	TW: (302, 6420) Svc: 180
22C	Hasta	2022.38	33.7	3977.62	3487.21	0.00	180.00	3667.21	TW: (379, 6905) Svc: 180
21	Hasta	2007.47	33.5	3992.53	3668.40	0.00	180.00	3848.40	TW: (393, 5999) Svc: 180
1	Hastane	1638.79	27.3	4361.21	3877.89	0.00	0.00	3877.89	-

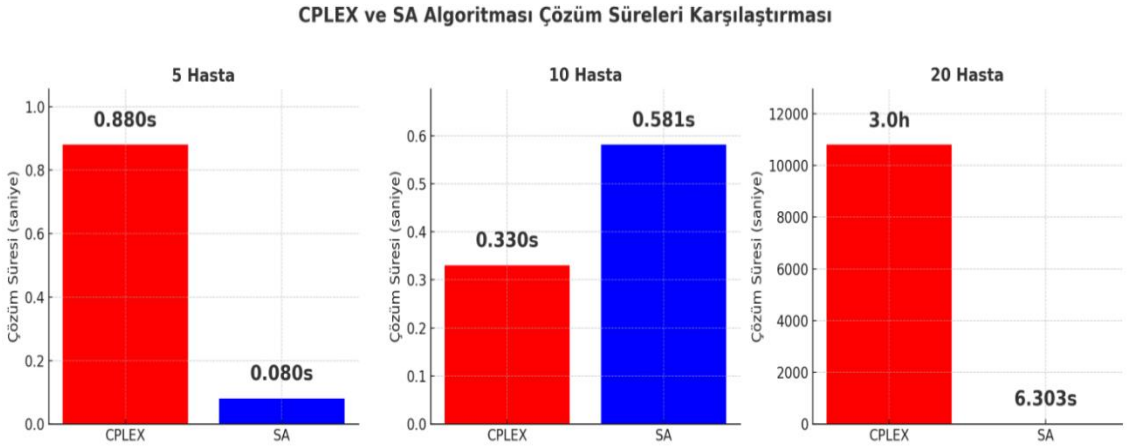
Görev Sırası: 1 -> 60A/2 -> 60A/1 -> 60B/1 -> 60B/2 -> 121 -> 56 -> 122 -> 61A/1 ->61A/2 ->
61B -> 52 -> 18 -> 17 -> 117 -> 16 -> 20 -> 22B -> 22E -> 22C -> 21 -> 1

Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 4361.21
Toplam Tur Süresi: 3877.89
Depodaki Son Batarya Durumu: 1638.79 (SOC: 27.3%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 6.3035 saniye

Çizelge 4.6 incelendiğinde CPLEX çözücüsü ile aynı rota sonucu elde edilmiştir. Ayrıca tur detayı incelenirse; araç başlangıç noktası hastaneden %100 şarj ile çıkış yapmış, gittiği düğümde 60A/2 hastasını almak için 129 sn. beklemiştir. 60A/2 ve 60A/1 hastaları aynı düğümden alınacağından tekrar 60A/1 de bekleme süresi oluşmamıştır. Turun devamında sırasıyla 121 nolu hastayı bırakmış, 56 nolu hastayı almış ve 122 nolu hastayı bırakmıştır. 61A/2 ve 61A/1 hastalarını aynı düğümden aldığında aracın şarj seviyesi %72.1 dir. Daha sonrasında 61B ve 52 nolu hastaları almış, 18-17-117-16-20-22B-22E hastalarını evlerine bırakarak, 22C hastasını almış, 21 nolu hastayı bırakmış ve hastaneye dönüş yaparak turunu tamamlamıştır. Araç başlangıçta sadece 60A/2 hastasının en erken hizmete başlama talebine göre beklemiş diğer hastaların hizmetini zaman penceresi sınırlarında bekleme yapmadan tamamlamıştır. Hastaneye dönüşte batarya %27.3 seviyesindedir. Bu senaryo sonucunda toplam tur süresi 3877.89 sn olarak hesaplanmış ve SA algoritması ile 6.3035 sn de çözüm bulunmuştur.

Tavlama Benzetimi algoritması ile geliştirilen model, beş, on ve yirmi hastalı test problemlerinde GAMS ortamında çözülen modellerle karşılaştırıldığında özellikle 20 hastalı test probleminde GAMS modelinin yaklaşık üç saat sürede çözüm üretmesine karşın, Tavlama Benzetimi (SA) algoritması aynı problemi yalnızca 6.3 saniyede çözmüştür. Bu

durum, Tavlama Benzetimi algoritmasının özellikle büyük boyutlu problemler için hesaplama süresi açısından oldukça etkin olduğunu göstermektedir. Bu durum, grafiksel olarak Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4. 4. CPLEX ve SA algoritmasının çözüm sürelerinin karşılaştırması

Şekil 4.4 incelendiğinde, beş hastalı senaryoda tavlama benzetimi algoritması çözücü ile aynı sonucu 11 kat daha hızlı elde etmiştir. 10 hastalı senaryoda ise tavlama benzetimi algoritması aynı sonucu 2 sn daha geç bulmuştur. Fakat 20 hastalı problemde tavlama benzetimi algoritması çözücüye göre aynı sonucu 1713 kat daha hızlı bulmuştur ki bu sonuç büyük boyutlu problemlerde tavlama benzetimi algoritmasının başarısını ortaya koymaktadır.

Çizelge4.7 ve izleyen çizelgelerde tavlama benzetimi algoritması ile elde edilen 20 hasta kapasiteli Karsan E-Jest aracı için C20 probleminden türetilen C20-Problem1 (12 nolu hastanın hizmeti alma yerine bırakma olarak değiştirilmiştir), C20-Problem2 (4-5 ve 8 nolu hastanın hizmeti alma, 14-19 nolu hastanın hizmeti bırakma olarak değiştirilmiştir) ve H10-Problem3 ve H20-Problem4 sonuçları verilmiştir.

Senaryo 1: Karsan E-Jest aracı ile taşıma

Çizelge 4. 7. Senaryo 1_ C20-Problem1 çözümü

Düğüm	Tip	Bat.(kwh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Yük	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	6000.00	100.0	0.00	11	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç/Tur 1
4	Hasta (D)	4929.84	82.2	1070.16	10	85.61	0.00	100.00	185.61	TW: (54, 6063) Svc: 100
3	Hasta (D)	4507.81	75.1	1492.19	9	219.38	273.62	100.00	593.00	TW: (493, 5833) Svc: 100
16	Hasta (P)	4490.98	74.8	1509.02	10	594.35	29.65	240.00	864.00	TW: (624, 6650) Svc: 240
15	Hasta (P)	4490.98	74.8	1509.02	11	864.00	0.00	180.00	1044.00	TW: (469, 6093) Svc: 180
18	Hasta (P)	4400.75	73.3	1599.25	12	1051.22	0.00	240.00	1291.22	TW: (223, 6085) Svc: 240
17	Hasta (P)	4400.75	73.3	1599.25	13	1291.22	0.00	180.00	1471.22	TW: (313, 5969) Svc: 180
14	Hasta (P)	4036.87	67.3	1963.13	14	1500.33	0.00	120.00	1620.33	TW: (338, 6399) Svc: 120
19	Hasta (P)	3935.49	65.6	2064.51	15	1628.44	0.00	180.00	1808.44	TW: (230, 6431) Svc: 180
20	Hasta (P)	3863.97	64.4	2136.03	16	1814.16	0.00	180.00	1994.16	TW: (740, 6117) Svc: 180
21	Hasta (P)	3863.97	64.4	2136.03	17	1994.16	0.00	240.00	2234.16	TW: (146, 6560) Svc: 240
13	Hasta (P)	3240.98	54.0	2759.02	18	2284.00	0.00	120.00	2404.00	TW: (322, 5943) Svc: 120
8	Hasta (D)	2365.67	39.4	3634.33	17	2474.02	0.00	180.00	2654.02	TW: (719, 6093) Svc: 180
6	Hasta (D)	2279.55	37.9	3720.45	16	2660.91	0.00	180.00	2840.91	TW: (316, 6150) Svc: 180
11	Hasta (D)	2161.00	36.0	3839.00	15	2850.43	0.00	180.00	3030.43	TW: (820, 6280) Svc: 180
10	Hasta (D)	2149.94	35.8	3850.06	14	3031.31	0.00	180.00	3211.31	TW: (302, 6420) Svc: 180
12	Hasta (D)	2138.66	35.6	3861.34	13	3212.21	0.00	180.00	3392.21	TW: (379, 6905) Svc: 180
9	Hasta (D)	2123.75	35.4	3876.25	12	3393.40	0.00	180.00	3573.40	TW: (393, 5999) Svc: 180
7	Hasta (D)	1935.92	32.3	4064.08	11	3588.42	0.00	120.00	3708.42	TW: (89, 6028) Svc: 120
2	Hasta (D)	1626.18	27.1	4373.82	10	3733.19	0.00	120.00	3853.19	TW: (720, 6271) Svc: 120
5	Hasta (D)	1572.65	26.2	4427.35	9	3857.47	0.00	120.00	3977.47	TW: (152, 6764) Svc: 120
1	Hastane	987.11	16.4	5012.89	9	4024.31	0.00	0.00	4024.31	Tur 1 Sonu

```
Görev Sırası : 1 -> 4 -> 3 -> 16 -> 15 -> 18 -> 17 -> 14 -> 19 -> 20 -> 21 -> 13 -> 8 -> 6 -> 11 -> 10 -> 12 -> 9 -> 7 -> 2 -> 5 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 5012.89
Toplam Tur Süresi: 4024.31
Depodaki Son Batarya Durumu: 987.11 (SOC: 16.4%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 86.95 saniye
```

Çizelge 4.7 incelendiğinde 20 hasta kapasiteli Karsan E-Jest aracı için araç kapasitesi, şarj kısıtları sağlanmıştır. Araç tek turda rotayı tamamlamış ve algoritmadan 86.95 saniyede 5012.89 metre toplam rota mesafesi elde edilmiştir.

Çizelge 4. 8. Senaryo 1_ C20-Problem2 çözümü

Düğüm	Tip	Bat.(kwh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Yük	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	6000.00	100.0	0.00	3	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç/Tur 1
19	Hasta (D)	4912.78	81.9	1087.22	2	86.98	143.02	180.00	410.00	TW: (230, 6431) Svc: 180
14	Hasta (D)	4812.17	80.2	1187.83	1	418.05	0.00	120.00	538.05	TW: (338, 6399) Svc: 120
3	Hasta (D)	4398.53	73.3	1601.47	0	571.14	0.00	100.00	671.14	TW: (493, 5833) Svc: 100
15	Hasta (P)	4381.70	73.0	1618.30	1	672.49	0.00	180.00	852.49	TW: (469, 6093) Svc: 180
16	Hasta (P)	4381.70	73.0	1618.30	2	852.49	0.00	240.00	1092.49	TW: (624, 6650) Svc: 240
17	Hasta (P)	4291.47	71.5	1708.53	3	1099.70	0.00	180.00	1279.70	TW: (313, 5969) Svc: 180
18	Hasta (P)	4291.47	71.5	1708.53	4	1279.70	0.00	240.00	1519.70	TW: (223, 6085) Svc: 240
4	Hasta (P)	3962.95	66.0	2037.05	5	1545.99	0.00	100.00	1645.99	TW: (54, 6063) Svc: 100
21	Hasta (P)	3952.07	65.9	2047.93	6	1646.86	0.00	240.00	1886.86	TW: (146, 6560) Svc: 240
20	Hasta (P)	3952.07	65.9	2047.93	7	1886.86	0.00	180.00	2066.86	TW: (740, 6117) Svc: 180
5	Hasta (P)	2259.01	37.7	3740.99	8	2202.30	0.00	120.00	2322.30	TW: (152, 6764) Svc: 120
8	Hasta (P)	2074.85	34.6	3925.15	9	2337.03	0.00	180.00	2517.03	TW: (719, 6093) Svc: 180
1	Hastane	1649.36	27.5	4350.64	9	2551.07	0.00	0.00	2551.07	Tur 1 Sonu
1	Hastane	1649.36	27.5	4350.64	5	2551.07	0.00	0.00	2551.07	Başlangıç/Tur 2
11	Hasta (D)	1156.51	19.3	4843.49	4	2590.50	0.00	180.00	2770.50	TW: (820, 6280) Svc: 180
10	Hasta (D)	1145.45	19.1	4854.55	3	2771.39	0.00	180.00	2951.39	TW: (302, 6420) Svc: 180
7	Hasta (D)	931.43	15.5	5068.57	2	2968.51	0.00	120.00	3088.51	TW: (89, 6028) Svc: 120
9	Hasta (D)	709.22	11.8	5290.78	1	3106.28	0.00	180.00	3286.28	TW: (393, 5999) Svc: 180
6	Hasta (D)	627.44	10.5	5372.56	0	3292.83	0.00	180.00	3472.83	TW: (316, 6150) Svc: 180
27	Şarj	89.33	1.5	5910.67	0	3515.88	0.00	1063.92	4579.80	Şarj Süresi: 1063.9206
13	Hasta (P)	5160.24	86.0	6750.43	1	4646.98	0.00	120.00	4766.98	TW: (322, 5943) Svc: 120
1	Hastane	4567.60	76.1	7343.07	1	4814.39	0.00	0.00	4814.39	Tur 2 Sonu
1	Hastane	4567.60	76.1	7343.07	2	4814.39	0.00	0.00	4814.39	Başlangıç/Tur 3
2	Hasta (D)	3949.97	65.8	7960.70	1	4863.80	0.00	120.00	4983.80	TW: (720, 6271) Svc: 120
12	Hasta (D)	3653.04	60.9	8257.63	0	5007.55	0.00	180.00	5187.55	TW: (379, 6905) Svc: 180
1	Hastane	3269.45	54.5	8641.22	0	5218.24	0.00	0.00	5218.24	Tur 3 Sonu

```
Görev Sırası :
1. Rota: 1 -> 19 -> 14 -> 3 -> 15 -> 16 -> 17 -> 18 -> 4 -> 21 -> 20 -> 5 -> 8 -> 1
2. Rota: 1 -> 11 -> 10 -> 7 -> 9 -> 6 -> 27 -> 13 -> 1
3. Rota: 1 -> 2 -> 12 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 8641.22
Toplam Tur Süresi: 5218.24
Depodaki Son Batarya Durumu: 3269.45 (SOC: 54.5%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 234.22 saniye
```

Çizelge4.8 incelendiğinde 20 hasta kapasiteli Karsan E-Jest aracı için araç kapasitesi, şarj kısıtları sağlanmıştır. Araç üç turda rotayı tamamlamış ve algoritma 234.22 sn de 8641.22m rota mesafesi hesaplamıştır.

Çizelge 4. 9. Senaryo 1_H10-Problem3 çözümü

Node	Type	Load	SoC (Left)	SoC (%)	Cum. Dist	Arrival	Wait	Service	Depart	Info
1	Hastane	4	6000.00	100.0%	0.00	-	-	0.00	0.00	Start of Tour. TW: [0-5000]
2	Hasta (P)	5	5363.43	89.4%	636.57	50.93	449.07	500.00	620.00	TW: [500-650], Svc: 120.0
3	Hasta (P)	6	4512.40	75.2%	1487.60	688.08	111.92	800.00	920.00	TW: [800-2550], Svc: 120.0
4	Hasta (P)	7	4302.52	71.7%	1697.48	936.79	0.00	936.79	1056.79	TW: [850-2400], Svc: 120.0
5	Hasta (P)	8	3595.51	59.9%	2404.49	1113.35	0.00	1113.35	1233.35	TW: [166-1250], Svc: 120.0
8	Hasta (D)	7	2295.59	38.3%	3704.41	1337.34	0.00	1337.34	1457.34	TW: [685-1700], Svc: 120.0
10	Hasta (D)	6	2035.01	33.9%	3964.99	1478.19	121.81	1600.00	1720.00	TW: [1600-2200], Svc: 120.0
11	Hasta (D)	5	1952.36	32.5%	4047.64	1726.61	0.00	1726.61	1846.61	TW: [1175-2500], Svc: 120.0
7	Hasta (P)	6	930.44	15.5%	5069.56	1928.37	0.00	1928.37	2048.37	TW: [985-1950], Svc: 120.0
9	Hasta (D)	5	739.65	12.3%	5260.35	2063.63	0.00	2063.63	2183.63	TW: [1368-2100], Svc: 120.0
6	Hasta (P)	6	419.00	7.0%	5581.00	2209.28	0.00	2209.28	2329.28	TW: [1000-2250], Svc: 120.0
1	Hastane	0	203.48	3.4%	5796.52	2346.52	-	-	2346.52	End of Tour

```
Görev Sırası: 1 -> 2 -> 3 -> 4 -> 5 -> 8 -> 10 -> 11 -> 7 -> 9 -> 6 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 5796.52
Toplam Tur Süresi: 2346.52
Depodaki Son Batarya Durumu: 203.48 (SOC: 3.4%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 96.8 saniye
```

Çizelge 4.9 incelendiğinde 20 hasta kapasiteli Karsan E-Jest aracı için araç kapasitesi, şarj kısıtları sağlanmıştır. Araç tek turda rotayı tamamlamış ve algoritma 96.8 sn de 5796.52 m. toplam rota mesafesi vermiştir.

Bu test senaryosunda 20 hasta kapasiteli Karsan E-Jest aracı için *H20-Problem4* için tavlama benzetimi algoritmasından elde edilen rota Çizelge4.10' da verilmiştir.

Çizelge 4. 10. Senaryo 1_ H20-Problem4 çözümü

Düğüm	Tip	Bat. (kwh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Yük	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	6000.00	100.0	0.00	8	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç/Tur 1
14	Hasta (D)	5055.14	84.3	944.86	7	75.59	824.41	120.00	1020.00	TW: (900, 6600) Svc: 120
15	Hasta (D)	4573.02	76.2	1426.98	6	1058.57	0.00	120.00	1178.57	TW: (360, 5560) Svc: 120
10	Hasta (D)	3560.43	59.3	2439.57	5	1259.58	340.42	180.00	1780.00	TW: (1600, 7200) Svc: 180
17	Hasta (D)	3145.24	52.4	2854.76	4	1813.22	0.00	100.00	1913.22	TW: (1100, 7000) Svc: 100
16	Hasta (D)	2655.83	44.3	3344.17	3	1952.37	0.00	120.00	2072.37	TW: (1260, 6750) Svc: 120
11	Hasta (D)	2203.38	36.7	3796.62	2	2108.56	0.00	120.00	2228.56	TW: (1175, 7500) Svc: 120
20	Hasta (D)	1997.47	33.3	4002.53	1	2245.04	0.00	120.00	2365.04	TW: (900, 6400) Svc: 120
21	Hasta (D)	1908.59	31.8	4091.41	0	2372.15	0.00	120.00	2492.15	TW: (1200, 6800) Svc: 120
23	Şarj	1553.07	25.9	4446.93	0	2520.59	0.00	800.45	3321.04	Şarj Süresi: 800.4474
4	Hasta (P)	5821.29	97.0	4625.64	1	3335.33	0.00	180.00	3515.33	TW: (850, 7400) Svc: 180
5	Hasta (P)	5440.27	90.7	5006.66	2	3545.81	0.00	120.00	3665.81	TW: (166, 6250) Svc: 120
2	Hasta (P)	4626.91	77.1	5820.02	3	3730.88	0.00	120.00	3850.88	TW: (500, 5650) Svc: 120
6	Hasta (P)	3982.10	66.4	6464.83	4	3902.47	0.00	120.00	4022.47	TW: (1000, 7250) Svc: 120
3	Hasta (P)	3546.49	59.1	6900.44	5	4057.32	0.00	120.00	4177.32	TW: (800, 7550) Svc: 120
7	Hasta (P)	3198.07	53.3	7248.86	6	4205.19	0.00	120.00	4325.19	TW: (985, 6950) Svc: 120
8	Hasta (P)	2974.84	49.6	7472.09	7	4343.05	0.00	180.00	4523.05	TW: (685, 6700) Svc: 180
9	Hasta (P)	2859.65	47.7	7587.28	8	4532.26	0.00	240.00	4772.26	TW: (1368, 7100) Svc: 240
1	Hastane	1978.68	33.0	8468.25	8	4842.74	0.00	0.00	4842.74	Tur 1 Sonu
1	Hastane	1978.68	33.0	8468.25	4	4842.74	0.00	0.00	4842.74	Başlangıç/Tur 2
13	Hasta (D)	1686.48	28.1	8760.45	3	4866.12	0.00	120.00	4986.12	TW: (795, 6450) Svc: 120
18	Hasta (D)	1166.62	19.4	9280.31	2	5027.71	0.00	120.00	5147.71	TW: (1500, 7100) Svc: 120
19	Hasta (D)	735.04	12.3	9711.89	1	5182.23	0.00	120.00	5302.23	TW: (1562, 7200) Svc: 120
12	Hasta (D)	338.15	5.6	10108.78	0	5333.98	0.00	180.00	5513.98	TW: (280, 5630) Svc: 180
26	Şarj	88.96	1.5	10357.97	0	5533.92	0.00	1864.43	7398.35	Şarj Süresi: 1864.4345999999998
1	Hastane	5438.55	90.6	10919.42	0	7443.27	0.00	0.00	7443.27	Tur 2 Sonu

```
Görev Sırası :
1. Rota: 1 -> 14 -> 15 -> 10 -> 17 -> 16 -> 11 -> 20 -> 21 -> 23 -> 4 -> 5 -> 2 -> 6 -> 3 -> 7 -> 8 -> 9 -> 1
2. Rota: 1 -> 13 -> 18 -> 19 -> 12 -> 26 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 10919.42
Toplam Tur Süresi: 7443.27
Depodaki Son Batarya Durumu: 5438.55 (SOC: 90.6%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 600.56 saniye
```

Çizelge 4.10 incelendiğinde 20 hasta kapasiteli Karsan E-Jest aracı için araç kapasitesi, şarj kısıtları sağlanmıştır. Araç iki turda rotayı tamamlamış ve algoritmadan 600.56 saniyede 10919.42 metre toplam rota uzunluğu elde edilmiştir.

Senaryo 2'de 10 hasta kapasiteli EC11 E-CREW aracı için aynı test problemleri çözülmüş ve C5 ve C10 test problemlerinde senaryo1 ile aynı çözümler söz konusu olduğundan diğer problemler için sonuçlar sırasıyla Çizelge 4.11, Çizelge 4.12,' Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, de verilmiştir.

Senaryo 2: EC11 E-CREW aracı ile taşıma

Çizelge 4. 11. Senaryo 2_C20 çözümü

Düğüm	Tip	Bat. (kwh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Yük	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	6000.00	100.0	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç/Tur 1
4	Hasta (D)	4929.84	82.2	1070.16	0	85.61	0.00	100.00	185.61	TW: (54, 6063) Svc: 100
20	Hasta (P)	4918.96	82.0	1081.04	1	186.48	553.52	180.00	920.00	TW: (740, 6117) Svc: 180
19	Hasta (P)	4912.81	81.9	1087.19	2	920.49	0.00	180.00	1100.49	TW: (230, 6431) Svc: 180
14	Hasta (P)	4812.20	80.2	1187.80	3	1108.54	0.00	120.00	1228.54	TW: (338, 6399) Svc: 120
21	Hasta (P)	4717.05	78.6	1282.95	4	1236.15	0.00	240.00	1476.15	TW: (146, 6560) Svc: 240
17	Hasta (P)	4344.82	72.4	1655.18	5	1505.93	0.00	180.00	1685.93	TW: (313, 5969) Svc: 180
18	Hasta (P)	4344.82	72.4	1655.18	6	1685.93	0.00	240.00	1925.93	TW: (223, 6085) Svc: 240
16	Hasta (P)	4327.95	72.1	1672.05	7	1927.28	0.00	240.00	2167.28	TW: (624, 6650) Svc: 240
15	Hasta (P)	4327.95	72.1	1672.05	8	2167.28	0.00	180.00	2347.28	TW: (469, 6093) Svc: 180
1	Depo	2983.54	49.7	3016.46	8	2454.83	0.00	0.00	2454.83	Tur 1 Sonu
1	Depo	2983.54	49.7	3016.46	1	2454.83	0.00	0.00	2454.83	Başlangıç/Tur 2
9	Hasta (D)	2453.44	40.9	3546.56	0	2497.24	0.00	180.00	2677.24	TW: (393, 5999) Svc: 180
12	Hasta (P)	2357.79	39.3	3642.21	1	2684.89	0.00	180.00	2864.89	TW: (379, 6905) Svc: 180
1	Depo	1974.20	32.9	4025.80	1	2895.58	0.00	0.00	2895.58	Tur 2 Sonu
1	Depo	1974.20	32.9	4025.80	1	2895.58	0.00	0.00	2895.58	Başlangıç/Tur 3
3	Hasta (D)	760.23	12.7	5239.77	0	2992.70	0.00	100.00	3092.70	TW: (493, 5833) Svc: 100
24	Şarj	435.31	7.3	5564.69	0	3118.69	0.00	1001.64	4120.34	Şarj Süresi: 1001.6442000000001
13	Hasta (P)	5375.17	89.6	6189.52	1	4170.32	0.00	120.00	4290.32	TW: (322, 5943) Svc: 120
1	Depo	4782.53	79.7	6782.16	1	4337.73	0.00	0.00	4337.73	Tur 3 Sonu
1	Depo	4782.53	79.7	6782.16	7	4337.73	0.00	0.00	4337.73	Başlangıç/Tur 4
7	Hasta (D)	4267.83	71.1	7296.86	6	4378.91	0.00	120.00	4498.91	TW: (89, 6028) Svc: 120
11	Hasta (D)	4082.87	68.0	7481.82	5	4513.71	0.00	180.00	4693.71	TW: (820, 6280) Svc: 180
10	Hasta (D)	4071.81	67.9	7492.88	4	4694.59	0.00	180.00	4874.59	TW: (302, 6420) Svc: 180
6	Hasta (D)	3963.84	66.1	7600.85	3	4883.23	0.00	180.00	5063.23	TW: (316, 6150) Svc: 180
8	Hasta (D)	3914.20	65.2	7650.49	2	5067.20	0.00	180.00	5247.20	TW: (719, 6093) Svc: 180
2	Hasta (D)	3738.53	62.3	7826.16	1	5261.25	0.00	120.00	5381.25	TW: (720, 6271) Svc: 120
5	Hasta (D)	3685.00	61.4	7879.69	0	5385.54	0.00	120.00	5505.54	TW: (152, 6764) Svc: 120
1	Hastane	3099.46	51.7	8465.23	0	5552.38	0.00	0.00	5552.38	Tur 4 Sonu

```
Görev Sırası :
1. Rota: 1 -> 4 -> 20 -> 19 -> 14 -> 21 -> 17 -> 18 -> 16 -> 15 -> 1
2. Rota: 1 -> 9 -> 12 -> 1
3. Rota: 1 -> 3 -> 24 -> 13 -> 1
4. Rota: 1 -> 7 -> 11 -> 10 -> 6 -> 8 -> 2 -> 5 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 8465.23
Toplam Tur Süresi: 5552.38
Depodaki Son Batarya Durumu: 3099.46 (SOC: 51.7%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 193.13 sn
```

Çizelge 4.11 incelendiğinde on hasta kapasiteli araç için dört rotalı zaman penceresi kısıtlarını sağlayan çözüm bulunmuştur. Araç ilk turda hastaneden bırakacağı bir hasta ile tura başlamış ve öncelikle 4 nolu hastayı evine bırakarak 20 nolu hastanın alma hizmeti için en erken hizmete başlama zamanına göre 553.52 sn beklemiştir. Sırasıyla -19-14-21-17-18-16-15 nolu hastaları alarak hastaneye dönüş yapmış ve ilk turun sonunda şarj seviyesi %49,7 olarak hesaplanmıştır. Algoritma tarafından şarjın yeterli olduğuna karar verilerek ikinci tura

başlanmış ve bu turda bırakacağı bir hasta ile hastaneden çıkış yapmıştır. İkinci turda 9 nolu hastayı bırakarak ve 12 nolu hastayı alarak hastaneye dönüş yapmış ve turu tamamlamıştır. İkinci turun sonunda şarj seviyesi %32,9 olarak hesaplanmıştır. Üçüncü tur başlangıcında araç 3 nolu hastayı bırakmak için yola çıkmış ve bıraktıktan sonra 13 nolu hastayı almak için şarjının yetmeyeceği belirlenerek 24 nolu şarj istasyonuna tam batarya dolumu için uğramıştır. %100 şarj dolumu yapıldıktan sonra 13 nolu hastayı almış ve tekrar hastaneye dönüş yapmıştır. Son turda aracın sadece bırakacağı hastalar kalmış ve hastaneden yedi hasta ile yola çıkarak sırasıyla 7-11-10-6-8-2-5 nolu hastaları bırakmış ve hastaneye %51,7 şarj ile dönerek rotasını tamamlamıştır. Araç sadece 20 nolu hastayı alma hizmetinde bekleme yapmış, turun geri kalanında tüm hastaların talebi zaman penceresi sınırlarında gerçekleşmiş ve bekleme yapılmamıştır. Elde edilen rota mesafesi 8465,23 m., toplam tur süresi 5552.35 sn. olarak hesaplanmış ve algoritma bu çözümü 193.13 saniyede hesaplamıştır.

Çizelge 4. 12. Senaryo 2_C20-Problem1 çözümü

Düğüm	Tip	Bat. (kwh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Yük	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Depo	6000.00	100.0	0.00	2	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç/Tur 1
4	Hasta (D)	4929.84	82.2	1070.16	1	85.61	0.00	100.00	185.61	TW: (54, 6063) Svc: 100
3	Hasta (D)	4507.81	75.1	1492.19	0	219.38	273.62	100.00	593.00	TW: (493, 5833) Svc: 100
16	Hasta (P)	4490.98	74.8	1509.02	1	594.35	29.65	240.00	864.00	TW: (624, 6650) Svc: 240
15	Hasta (P)	4490.98	74.8	1509.02	2	864.00	0.00	180.00	1044.00	TW: (469, 6093) Svc: 180
18	Hasta (P)	4400.75	73.3	1599.25	3	1051.22	0.00	240.00	1291.22	TW: (223, 6085) Svc: 240
17	Hasta (P)	4400.75	73.3	1599.25	4	1291.22	0.00	180.00	1471.22	TW: (313, 5969) Svc: 180
14	Hasta (P)	4036.87	67.3	1963.13	5	1500.33	0.00	120.00	1620.33	TW: (338, 6399) Svc: 120
19	Hasta (P)	3935.49	65.6	2064.51	6	1628.44	0.00	180.00	1808.44	TW: (230, 6431) Svc: 180
20	Hasta (P)	3863.97	64.4	2136.03	7	1814.16	0.00	180.00	1994.16	TW: (740, 6117) Svc: 180
21	Hasta (P)	3863.97	64.4	2136.03	8	1994.16	0.00	240.00	2234.16	TW: (146, 6560) Svc: 240
13	Hasta (P)	3240.98	54.0	2759.02	9	2284.00	0.00	120.00	2404.00	TW: (322, 5943) Svc: 120
1	Depo	2648.34	44.1	3351.66	9	2451.41	0.00	0.00	2451.41	Tur 1 Sonu
1	Depo	2648.34	44.1	3351.66	9	2451.41	0.00	0.00	2451.41	Başlangıç/Tur 2
8	Hasta (D)	2172.03	36.2	3827.97	8	2489.52	0.00	180.00	2669.52	TW: (719, 6093) Svc: 180
6	Hasta (D)	2085.91	34.8	3914.09	7	2676.41	0.00	180.00	2856.41	TW: (316, 6150) Svc: 180
11	Hasta (D)	1967.36	32.8	4032.64	6	2865.89	0.00	180.00	3045.89	TW: (820, 6280) Svc: 180
10	Hasta (D)	1956.30	32.6	4043.70	5	3046.77	0.00	180.00	3226.77	TW: (302, 6420) Svc: 180
12	Hasta (D)	1945.02	32.4	4054.98	4	3227.68	0.00	180.00	3407.68	TW: (379, 6905) Svc: 180
9	Hasta (D)	1930.11	32.2	4069.89	3	3408.87	0.00	180.00	3588.87	TW: (393, 5999) Svc: 180
7	Hasta (D)	1742.28	29.0	4257.72	2	3603.90	0.00	120.00	3723.90	TW: (89, 6028) Svc: 120
2	Hasta (D)	1432.54	23.9	4567.46	1	3748.68	0.00	120.00	3868.68	TW: (720, 6271) Svc: 120
5	Hasta (D)	1379.01	23.0	4620.99	0	3872.96	0.00	120.00	3992.96	TW: (152, 6764) Svc: 120
1	Depo	793.47	13.2	5206.53	0	4039.80	0.00	0.00	4039.80	Tur 2 Sonu

```
Görev Sırası :
1. Rota: 1 -> 4 -> 3 -> 16 -> 15 -> 18 -> 17 -> 14 -> 19 -> 20 -> 21 -> 13 -> 1
2. Rota: 1 -> 8 -> 6 -> 11 -> 10 -> 12 -> 9 -> 7 -> 2 -> 5 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 5206.53
Toplam Tur Süresi: 4039.80
Depodaki Son Batarya Durumu: 793.47 (SOC: 13.2%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 102.74 saniye
```

Çizelge 4.12 incelendiğinde sadece 12 nolu hastanın alma-bırakma hizmetinin almadan bırakmaya çevrilerek algoritmanın çalıştırılması sonucunda iki turda rota tamamlanmıştır. Araç ilk turda 4-3 nolu hastayı bırakmış, sırasıyla 16-15-18-17-14-19-20-21-13 hastalarını alarak hastaneye dönüş yapmıştır. İlk turda sadece 3-16 nolu hastalarda bekleme yapılmıştır ve ilk turun sonunda aracın bataryası % 44.1 seviyesindedir. Araç ikinci

turda bırakacağı dokuz hasta ile tura başlamış ve sırasıyla 8-6-11-10-12-9-7-2-5 hastalarını bırakmıştır. Bu turda hiçbir hastada zaman penceresi dahilinde bekleme yapılmamıştır ve tur sonunda araç %13.2 şarj seviyesi ile hastaneye dönmüştür. 10 hasta kapasiteli EC11 E-CREW elektrikli aracında hasta kapasitesi aşılmadan tur tamamlanmıştır. İyi çözüm veren mesafe 5206.53 m, tur süresi 4039.80 sn olarak hesaplanmış ve iki turda da araç şarj istasyonuna uğrama ihtiyacı olmadan rotasını tamamlamıştır. Algoritma 102.74 sn de çözüm bulmuştur.

Senaryo 2 için C20-Problem2 (20 hasta içeren, 10 hasta kapasiteli ve hastaların mevcut alma-bırakma özelliklerinden 4, 5 ve 8 nolu hastanın hizmeti alma, 14 ve 19 nolu hastanın hizmeti bırakma olarak değiştirilmiş ve çözülen problem için rota Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. Senaryo 2_C20-Problem2 çözümü

Düğüm	Tip	Bat. (kwh)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Yük	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	6000.00	100.0	0.00	4	0.00	0.00	0.00	0.00	Başlangıç/Tur 1
7	Hasta (D)	5485.30	91.4	514.70	3	41.18	47.82	120.00	209.00	TW: (89, 6028) Svc: 120
14	Hasta (D)	3940.89	65.7	2059.11	2	332.55	5.45	120.00	458.00	TW: (338, 6399) Svc: 120
19	Hasta (D)	3839.51	64.0	2160.49	1	466.11	0.00	180.00	646.11	TW: (230, 6431) Svc: 180
3	Hasta (D)	3434.59	57.2	2565.41	0	678.50	0.00	100.00	778.50	TW: (493, 5833) Svc: 100
15	Hasta (P)	3417.76	57.0	2582.24	1	779.85	0.00	180.00	959.85	TW: (469, 6093) Svc: 180
21	Hasta (P)	3052.48	50.9	2947.52	2	989.07	0.00	240.00	1229.07	TW: (146, 6560) Svc: 240
20	Hasta (P)	3052.48	50.9	2947.52	3	1229.07	0.00	180.00	1409.07	TW: (740, 6117) Svc: 180
16	Hasta (P)	2663.38	44.4	3336.62	4	1440.20	0.00	240.00	1680.20	TW: (624, 6650) Svc: 240
17	Hasta (P)	2573.15	42.9	3426.85	5	1687.42	0.00	180.00	1867.42	TW: (313, 5969) Svc: 180
18	Hasta (P)	2573.15	42.9	3426.85	6	1867.42	0.00	240.00	2107.42	TW: (223, 6085) Svc: 240
4	Hasta (P)	2244.63	37.4	3755.37	7	2133.70	0.00	100.00	2233.70	TW: (54, 6063) Svc: 100
13	Hasta (P)	1610.76	26.8	4389.24	8	2284.41	0.00	120.00	2404.41	TW: (322, 5943) Svc: 120
1	Hastane	1018.12	17.0	4981.88	8	2451.82	0.00	0.00	2451.82	Tur 1 Sonu
1	Hastane	1018.12	17.0	4981.88	3	2451.82	0.00	0.00	2451.82	Başlangıç/Tur 2
11	Hasta (D)	525.27	8.8	5474.73	2	2491.25	0.00	180.00	2671.25	TW: (820, 6280) Svc: 180
10	Hasta (D)	514.21	8.6	5485.79	1	2672.13	0.00	180.00	2852.13	TW: (302, 6420) Svc: 180
2	Hasta (D)	280.27	4.7	5719.73	0	2870.85	0.00	120.00	2990.85	TW: (720, 6271) Svc: 120
29	Şarj	18.79	0.3	5981.21	0	3011.77	0.00	1076.62	4088.39	Şarj Süresi: 1076.6178000000002
12	Hasta (P)	5493.13	91.6	6488.08	1	4128.94	0.00	180.00	4308.94	TW: (379, 6905) Svc: 180
1	Hastane	5109.54	85.2	6871.67	1	4339.62	0.00	0.00	4339.62	Tur 2 Sonu
1	Hastane	5109.54	85.2	6871.67	1	4339.62	0.00	0.00	4339.62	Başlangıç/Tur 3
6	Hasta (D)	4617.92	77.0	7363.29	0	4378.95	0.00	180.00	4558.95	TW: (316, 6150) Svc: 180
5	Hasta (P)	4373.43	72.9	7607.78	1	4578.51	0.00	120.00	4698.51	TW: (152, 6764) Svc: 120
8	Hasta (P)	4189.27	69.8	7791.94	2	4713.24	0.00	180.00	4893.24	TW: (719, 6093) Svc: 180
1	Hastane	3763.78	62.7	8217.43	2	4927.28	0.00	0.00	4927.28	Tur 3 Sonu
1	Hastane	3763.78	62.7	8217.43	1	4927.28	0.00	0.00	4927.28	Başlangıç/Tur 4
9	Hasta (D)	3233.68	53.9	8747.53	0	4969.69	0.00	180.00	5149.69	TW: (393, 5999) Svc: 180
1	Hastane	2865.00	47.8	9116.21	0	5179.19	0.00	0.00	5179.19	Tur 4 Sonu

```
Görev Sırası :
1. Rota: 1 -> 7 -> 14 -> 19 -> 3 -> 15 -> 21 -> 20 -> 16 -> 17 -> 18 -> 4 -> 13 -> 1
2. Rota: 1 -> 11 -> 10 -> 2 -> 29 -> 12 -> 1
3. Rota: 1 -> 6 -> 5 -> 8 -> 1
4. Rota: 1 -> 9 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 9116.21
Toplam Tur Süresi: 5179.19
Depodaki Son Batarya Durumu: 2865.00 (SOC: 47.8%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 250 sn
```

Çizelge 4.13 incelendiğinde araç dört turdan ilkinde bırakacağı dört hasta ile yola çıkmış ve sırasıyla 7-14-19-3 hastalarını bırakmış ve 7-14 nolu hastada bekleme yapımıştır. İlk turun devamında sırasıyla 15-21-20-16-17-18-4-13 hastalarını almış ve %17 şarj seviyesi ile hastaneye dönüş yapmıştır. İkinci turda bırakacağı 3 hasta ile yola çıkmış ve sırasıyla 11-

10-2 nolu hastaları bırakmıştır ve bu noktada şarj seviyesi %4.7 dir. Algoritma ikinci turdaki 12 nolu hastanın hasta alma hizmetine şarjının yetmeyecğine karar vermiş ve araç 29 nolu şarj istasyonuna giderek tam batarya dolumu kadar şarj olmuştur, 12 nolu hastayı alarak hastaneye dönüş yapmış ve ikinci turu tamamlamıştır. Üçüncü turda 6 nolu hasta bırakılmış, 5 ve 8 nolu hasta alınarak %62.7 şarj seviyesi ile üçüncü tur tamamlanmıştır. Son turda 9 nolu hasta bırakılarak %47.8 şarj seviyesi ile hastaneye dönüş yapılmış ve rota tamamlanmıştır. Bu senaryoda sadece 7-14 nolu hastlaarda bekleme yapılmış rotanın geri kalanında bekleme süresi olmamıştır. İyi çözüm veren mesafe 9116,21 m, toplam tur süresi 5179.19 sn olarak hesaplanmış ve araç dört turda sadece bir kez şarj istasyonuna uğrama ihtiyacı duymuştur. %47.8 şarj seviyesi ile rota tamamlanmıştır. 250 saniyede çözüm bulunmuştur.

H10-Problem3'te 6 hastayı evinden alma 4 hastayı evine bırakma hizmeti vardır. Çizelge 4.14'de H10 hasta içeren problem çözümü için rota verilmiştir.

Çizelge 4.14. Senaryo 2_H10-Problem3çözümü

Node	Type	Load	SoC (Left)	SoC (%)	Cum. Dist	Arrival	Wait	Service	Depart	Info
1	Hastane	4	6000.00	100.0%	0.00	-	-	0.00	0.00	Start of Tour. TW: [0-5000]
2	Hasta (P)	5	5363.43	89.4%	636.57	50.93	449.07	500.00	620.00	TW: [500-650], Svc: 120.0
3	Hasta (P)	6	4512.40	75.2%	1487.60	688.08	111.92	800.00	920.00	TW: [800-2550], Svc: 120.0
4	Hasta (P)	7	4302.52	71.7%	1697.48	936.79	0.00	936.79	1056.79	TW: [850-2400], Svc: 120.0
5	Hasta (P)	8	3595.51	59.9%	2404.49	1113.35	0.00	1113.35	1233.35	TW: [166-1250], Svc: 120.0
8	Hasta (D)	7	2295.59	38.3%	3704.41	1337.34	0.00	1337.34	1457.34	TW: [685-1700], Svc: 120.0
10	Hasta (D)	6	2035.01	33.9%	3964.99	1478.19	121.81	1600.00	1720.00	TW: [1600-2200], Svc: 120.0
11	Hasta (D)	5	1952.36	32.5%	4047.64	1726.61	0.00	1726.61	1846.61	TW: [1175-2500], Svc: 120.0
7	Hasta (P)	6	930.44	15.5%	5069.56	1928.37	0.00	1928.37	2048.37	TW: [985-1950], Svc: 120.0
9	Hasta (D)	5	739.65	12.3%	5260.35	2063.63	0.00	2063.63	2183.63	TW: [1368-2100], Svc: 120.0
6	Hasta (P)	6	419.00	7.0%	5581.00	2209.28	0.00	2209.28	2329.28	TW: [1000-2250], Svc: 120.0
1	Hastane	0	203.48	3.4%	5796.52	2346.52	-	-	2346.52	End of Tour

```
Görev Sırası: 1 -> 2 -> 3 -> 4 -> 5 -> 8 -> 10 -> 11 -> 7 -> 9 -> 6 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 5796.52
Toplam Tur Süresi: 2346.52
Depodaki Son Batarya Durumu: 203.48 (SOC: 3.4%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 96.8 saniye
```

Çizelge 4.14 incelendiğinde, araç depodan %100 şarj ile çıkmakta ve sırasıyla 2-3-4 ve 5 numaralı düğümlerdeki hastayı hastaneye götürmek için almaktadır. Bu noktada şarj seviyesi %59.9 olarak hesaplanmıştır. Araç bataryası, araçtaki hastaların 8-10-11 numaralı düğümlere bırakılması için yeterli olup 11 nolu hasta bırakıldığında batarya şarj seviyesi %32.5 olarak hesaplanmıştır. Algoritma diğer düğümlerin ihtiyacını karşılamak için kalan araç bataryasının yeterli olduğuna karar vermiş ve sırasıyla 7 numarlaı düğümden hasta almış, 9 numaralı düğüme hasta bırakmış ve son olarak 6 numaralı düğümden de hasta alarak hastaneye dönüş yapmıştır. Hastaneye dönüş yaptığı durumdaki araç batarya şarj seviyesi %3.45 olarak hesaplanmış ve bu test senaryosunda 2-3-10 nolu hastalarda zaman penceresi kısıtları dahilinde bekleme yapılmış, diğer tüm hastalar için bekleme yapılmadan hizmet

tamamlanmıştır. Bu iyi komşu çözüme göre; min mesafe: 5796,52 m, toplam tur süresi 2346.52 sn hesaplanmıştır. Araç şarj istasyonuna gitme ihtiyacı duymamış ve hasta alma-bırakma hizmetini karışık bir şekilde batarya seviyesi ve zaman pencelerine uygun gerçekleştirmiştir.

Çizelge 4.15. Senaryo 2_H20-Problem4 çözümü

Düğüm	Tip	Yük	Bat. (Kalan)	Bat. (%)	Küm. Mes.	Varış	Bekleme	Servis	Ayrılış	Bilgi
1	Hastane	10	6000.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Tur 1 Başlangıcı
17	Bırakma (D)	9	5568.87	92.8	431.13	34.49	1065.51	120.00	1220.00	TW: [1100-7000], Svc: 120
16	Bırakma (D)	8	5079.46	84.7	920.54	1259.15	0.85	120.00	1380.00	TW: [1260-6750], Svc: 120
11	Bırakma (D)	7	4627.01	77.1	1372.99	1416.20	0.00	120.00	1536.20	TW: [1175-7500], Svc: 120
20	Bırakma (D)	6	4421.10	73.7	1578.90	1552.67	0.00	120.00	1672.67	TW: [900-6400], Svc: 120
21	Bırakma (D)	5	4332.22	72.2	1667.78	1679.78	0.00	120.00	1799.78	TW: [1200-6800], Svc: 120
19	Bırakma (D)	4	3700.41	61.7	2299.59	1850.32	0.00	120.00	1970.32	TW: [1562-7200], Svc: 120
18	Bırakma (D)	3	3583.57	59.7	2416.43	1979.67	0.00	100.00	2079.67	TW: [1500-7100], Svc: 100
10	Bırakma (D)	2	3293.08	54.9	2706.92	2102.91	0.00	180.00	2282.91	TW: [1600-7200], Svc: 180
14	Bırakma (D)	1	2325.26	38.8	3674.74	2360.34	0.00	120.00	2480.34	TW: [900-6600], Svc: 120
15	Bırakma (D)	0	1843.14	30.7	4156.86	2518.91	0.00	120.00	2638.91	TW: [360-5560], Svc: 120
28	Şarj İst.	0	6000.00	100.0	4548.75	2670.26	0.00	818.78	3489.03	Zorunlu Şarj. Süre: 818.78
2	Alış (P)	1	5517.72	92.0	5031.03	3527.61	0.00	120.00	3647.61	TW: [500-5650], Svc: 120
4	Alış (P)	2	5386.38	89.8	5162.37	3658.12	0.00	18.00	3676.12	TW: [850-7400], Svc: 18
5	Alış (P)	3	5005.36	83.4	5543.39	3706.60	0.00	120.00	3826.60	TW: [166-6250], Svc: 120
6	Alış (P)	4	3961.04	66.0	6587.71	3910.15	0.00	120.00	4030.15	TW: [1000-7250], Svc: 120
3	Alış (P)	5	3525.43	58.8	7023.32	4065.00	0.00	120.00	4185.00	TW: [800-7550], Svc: 120
7	Alış (P)	6	3177.01	53.0	7371.74	4212.87	0.00	120.00	4332.87	TW: [985-6950], Svc: 120
8	Alış (P)	7	2953.78	49.2	7594.97	4350.73	0.00	180.00	4530.73	TW: [685-6700], Svc: 180
9	Alış (P)	8	2838.59	47.3	7710.16	4539.94	0.00	240.00	4779.94	TW: [1368-7100], Svc: 240
1	Hastane	8	1957.62	32.6	8591.13	4850.42	0.00	0.00	4850.42	Tur 1 Sonu
13	Bırakma (D)	1	1665.42	27.8	8883.33	4873.80	0.00	120.00	4993.80	TW: [795-6450], Svc: 120
12	Bırakma (D)	0	1260.01	21.0	9288.74	5026.23	0.00	180.00	5206.23	TW: [280-5630], Svc: 180
1	Hastane	0	844.24	14.1	9704.51	5239.49	0.00	0.00	5239.49	Tur 2 Sonu

```
Görev Sırası:
1. Rota: 1 -> 17 -> 16 -> 11 -> 20 -> 21 -> 19 -> 18 -> 10 -> 14 -> 15 -> 28 -> 2 -> 4 -> 5 -> 6 -> 3 -> 7 -> 8 -> 9 -> 1
2. Rota: 1 -> 13 -> 12 -> 1
Uygulanabilir Toplam Maliyet (Mesafe): 9704.51
Toplam Tur Süresi: 5239.49
Depodaki Son Batarya Durumu: 844.24 (SOC: 14.1%)
Toplam Cezalar: 0.00
Problemin Çözüm Süresi: 188.6 sn
```

Çizelge 4.15 incelendiğinde, H20 için iki rota elde edilmiştir. Algoritma ilk turda on hastayı bırakma ile tura başlamış ve sırasıyla 17-16-11-20-21-19-18-10-14-15 nolu hastalar bırakıldıtıktan sonra diğer hizmetler için şarjın yetmeyeceğine karar verilerek 28 nolu şarj istasyonuna yönlendirme yapılmıştır. Araç tam batarya şarj olduktan sonra sırasıyla 2-4-5-6-3-7-8-9 nolu hastaları almış ve %32.6 şarj seviyesi ile dönerek birinci turu tamamlamıştır. İkinci turda ise 13-12 hastalarının bırakma hizmetini gerçekleştirerek %14.1 şarj seviyesi ile hastaneye dönüş yapmış ve rotayı tamamlamıştır. Bu senaryoda araç sadece 17 nolu hastada bekleme yapmış diğer tüm turlarda bekleme yapılmadan rota tamamlanmıştır. Elde edilen çözümde, min mesafe: 9704.51 m, toplam tur süresi 5329.49 sn, hesaplanmıştır.

Senaryo1 ve senaryo2 için çözülen test problemlerinde Tavlama Benzetimi algoritması ile CPLEX çözücüsünün çözüm üretme süresine göre kısa sürede (ort 2-3 dk) çözüm üretebilmektedir.

Bu senaryolar, özellikle diyaliz gibi düzenli sağlık hizmeti gerektiren hastaların taşınması bağlamında oluşturulmuştur. Böylece hem araç kapasitesi verimli kullanılmış, şarj-batarya kısıtları sağlanmış hem de hasta için kritik olan zaman penceresine uyumlu rotalar hedeflenmiştir.

Bulgular, geliştirilen model ve SA algoritmasının farklı senaryolardaki performansını göstermiştir. Matematiksel model küçük boyutlu problemleri başarılı bir şekilde çözerken, Tavlama Benzetimi algoritması daha büyük ölçekli problemlerde kısa sürede iyi çözümler sunaak üstünlük sağlamıştır.

4.3. Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Çizelge 4.16'da C5-C10-C20 test problemleri için matematiksel model ve metasezgisel algoritma ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4. 16. C5-C10-C20 test problemleri için sonuçların karşılaştırılması

	Matematiksel model CPLEX çözücü		**Tavlama Benzetimi sonuçları (Araç kapasitesi 10)**		**Tavlama Benzetimi sonuçları (Araç kapasitesi 20)**	
Problem	Mesafe (m)	Çözüm süresi (sn)	Mesafe (m)	Çözüm süresi(sn)	Mesafe (m)	Çözüm süresi(sn)
C5	3610.59	0.88	3610.59	0.0802	3610.59	0.0802
C10	3169.35	0.33	3169.35	0.5810	3169.35	0.5810
C20	4361.21	10800	8465.23	193.13	4361.21	6.3035

Çizelge 4.16 incelendiğinde C5 ve C10 test problemlerinde rota mesafesi için matematiksel model ve tavlama benzetimi algoritması sonuçları aynı hesaplanmış, çözüm süreleri farklılık göstermiştir. C20 test problemi için metasezgisel algoritma sonuçlarında performansta farklılık gözlenmiştir.

Tavlama Benzetimi algoritması özellikle büyük ölçekli hasta taşıma problemlerinde uygulanabilirliği yüksek bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Her iki yöntemde de enerji ihtiyacı göz önünde bulundurulmuş ve batarya kapasitesi kısıtı altında araç şarj istasyonuna

yönlendirilmiştir. Tavlama Benzetimi algoritması çözüm üretme süresi yönüyle çok sayıda hasta içeren test senaryolarında çok kısa sürede en iyi komşu çözümü bulmuştur. Problem çözümlerinde algoritmanın araç içinde hasta olmadan aracı şarj istasyonuna yönlendirmesi ise hasta taşımacılığı alanında gerçek hayat senaryosuyla uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu performans hasta taşımacılığında operasyonel açıdan oldukça önemlidir ve sağlık sektörü gibi zaman duyarlı taşımacılığın istenilen zaman aralıklarında yapılması yüksek öneme sahiptir. Bu bağlamda önerilen algoritma, belirli zaman aralıklarında zaman penceresi kısıtlarını ihlal etmeden geçerli rotalar üretebilmiştir.

Çalışma kapsamında tavlama benzetimi algoritması ile Senaryo1 ve Senaryo2 kapsamında çözülen test problemlerinin sonuçları Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18'de verilmiştir. "N" test problemindeki hasta sayılarını (5-10-20), "P" hasta alma, "D" hasta bırakma, "Q" araç kapasitesi, Z1 Karsan E-JEST aracının (senaryo 1) – Z2 EC11 E-CREW aracının (senaryo 2) minimum rota mesafesini, "U" algortimanın çözüm süresini, "T" tur sayısını, "S" tur süresini temsil etmektedir.

Çizelge 4. 17. Senaryo 1 için sonuçlar

No.	İsim	N	P	D	Q	Z1	U (sn)	T	S (sn)
1	C5	5	2	3	20	3611	0.0802	1	1799
2	C10	10	6	4	20	3169	0.581	1	2631
3	C20	20	10	10	20	4361	6.3035	1	3878
4	C20-Problem1	20	9	11	20	5013	86.95	1	4024
5	C20-Problem2	20	11	9	20	8641	234.22	3	5218
6	H10-Problem3	10	6	4	20	5797	96.8	1	2347
7	H20-Problem4	20	8	12	20	10919	600.56	2	7443

Çizelge 4. 18. Senaryo 2 için sonuçlar

No.	İsim	N	P	D	Q	Z2	U (sn)	T	S (sn)
1	C5	5	2	3	10	3611	0.0802	1	1799
2	C10	10	6	4	10	3169	0.581	1	2631
3	C20	20	10	10	10	8465	193.13	4	5552
4	C20-Problem1	20	9	11	10	5206	102.74	2	4040
5	C20-Problem2	20	11	9	10	9116	250	4	5179
6	H10-Problem3	10	6	4	10	5796	96.8	1	2347
7	H20-Problem4	20	8	12	10	9704	188.6	2	5239

Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18'de senaryo1 ve senaryo2 nin sonuçları incelendiğinde; C5 ve C10 test problemlerinde Karsan E-jest ve EC11 E-CREW aracı içinde aynı rota mesafeleri, aynı çözüm süresi, tur sayısı ve tur süresi elde edilmiştir. Çözülen test problemlerinde Karsan E-Jest aracı için; C20 test probleminde %94.1, C20-Problem1 için %3.86, C20-Problem2 %5.5, daha kısa rota mesafesi elde edilmiştir. Bu bağlamda, fosil yakıtlı Fiat Ducato tipi araç yerine 20 hasta kapasiteli Karsan E-Jest elektrikli aracının kullanımı önerilmektedir. Çözülen tüm test problemlerinde zaman pencerelerine uyulması, tekli ve çoklu tur ile araç kapasitesinin aşılmaması, araç içinde hasta varken şarj istasyonuna gidilmemesi gibi kısıtlar sağlanmıştır. Metasezgisel çözüm yaklaşımının kullanılabilirliği gösterilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, elektrikli araçlarla hasta taşımacılığı problemlerine değinilmiş ve bu kapsamda sağlık sektörüne özgü, bir elektrikli araçla Karma Topla-Dağıt Problemi (E-VRPMB) çözülmüştür. Önerilen Tavlama Benzetimi algoritmasısının performansı Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama modeli sonuçları ile karşılaştırılmıştır. SA'nın kısa sürede iyi çözümler vermesi uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Tavlama Benzetimi algoritması hem hasta alma bırakma durumunu hem enerji ihtiyacına dayalı şarj kararlarını dikkate alarak uygun şekilde yapılandırılmıştır. Tavlama Benzetimi algoritması ile 10 hasta ve 20 hasta kapasiteli iki araç senaryosu için rota optimizasyonu yapılmıştır. Doğrusal programlama gibi kesin çözüm (optimal) veren yöntemler küçük boyutlu problemler için etkili olurken, literatürde başarısı kanıtlanmış bir algoritma olan Tavlama Benzetimi algoritmasının yirmi hasta içeren problemde kısa sürede uygulanabilir çözümler ürettiği gösterilmiştir. Sonuçlar, hasta taşıma hizmetlerinde elektrikli araçların rota optimizasyonu için önerilen çözüm yönteminin başarısını kanıtlamıştır.

Bu tez çalışması, elektrikli araçlarla sağlık lojistiği alanında çözüm modelleri geliştirmek isteyen araştırmacılar ve uygulayıcılar için bir çalışma sunmayı hedeflemiştir. Gelecek çalışmalarda önce bırakma sonra alma olacak şekilde hastalar için rotalar oluşturulması, bekleme sürelerinin azaltılması, çoklu hastane senaryoları ve hetorojen araç filoları için karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik çevresel optimizasyon hedeflerinin de modele entegre edildiği çalışmalar yapılabilir. Ayrıca sektörel uygulanabilirliği arttırmak için rota bazında optimizasyon yanında haftalık ya da aylık çizelgeler oluşturulabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Anily, S., & Bramel, J. (1999). An asymptotic analysis of the capacitated traveling salesman problem with pickups and deliveries. *Operations Research, 47*(6), 892–908.

Aslan Yıldız, Ö., Sarıçiçek, İ., Özkan, K., & Yazıcı, A. (2024). Routing with pickup and delivery via deep reinforcement learning. 2024 32nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 1–4. IEEE.

Aslan, Ö., Sarıçiçek, İ., & Yazıcı, A. (2025a). ESOGU-CEVRPTW. *Mendeley Data, V1. 2025* https://data.mendeley.com/datasets/7vjzvxh72d/1

Aslan Yıldız, Ö., Sarıçiçek, İ., & Yazıcı, A. (2025b). A reinforcement learning-based solution for the capacitated electric vehicle routing problem from the last-mile delivery perspective. *Applied Sciences, 15*(3), 1068.

Bongiovanni, C., Kaspi, M., Cordeau, J.-F., & Geroliminis, N. (2022). A machine learning-driven two-phase metaheuristic for autonomous ridesharing operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 165, 102835.

Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313.

Bruglieri, M., Pezzella, F., Pisacane, O., & Suraci, S. (2015). A variable neighborhood search branching for the electric vehicle routing problem with time windows. *Electronic Notes in Discrete Mathematics, 47,* 221–228.

Chau, K. T., Wong, Y. S., & Chan, C. C. (1999). An Overview Of Energy Sources For Electric Vehicles. *Energy Conversion And Management*, 40(10), 1021-1039.

Chen, T. D., Kockelman, K. M., & Hanna, J. P. (2016). Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 94*, 243–254.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2007). The Dial-a-Ride Problem: Models and Algorithms. *Annals of Operations Research, 153*(1), 29–46.

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). Çevresel göstergeler. Erişim tarihi: 25.06.2025. https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80–91.

Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research, 237*(3), 775–793.

Desaulniers, G., Errico, F., Irnich, S., & Schneider, M. (2016). Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Operations Research*, 64(6), 1388–1405. https://doi.org/10.1287/opre.2016.1573

Dror, M., & Trudeau, P. (1989). Savings by Split Delivery Routing. *Transportation Science*, *23*(2), 141–145.

Durmuş, F.S. ve Kaymaz, H., "Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri", Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 2020, 3 (2): 123-139.

Eglese, R. & Bektaş, T. (2014). Green vehicle routing. *In P. Toth & D. Vigo (Eds), Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, 437–458: MOS-SIAM Series on Optimization, Philadelphia.

Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press.

Element Energy. (2013). *Pathways to high penetration of electric vehicles: Final report for The Committee on Climate Change*.

Elshaer, R., & Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering, 140*, 106242.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 48(1), 100–114. https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.002

Eshtehadi, R., Fathian, M. & Demir, E. (2017). Robust solutions to the pollution-routing problem with demand and travel time uncertainty. *Transportation Research Part D,* 51, 351–363.

EURLex.(2023).*Document*32022D0591.Erişimtarihi:29.06.2025. https://eurlex.europa.eu/eli/dec/2022/591/oj.

Felipe, Á., Ortuño, M. T., Righini, G., & Tirado, G. (2014). A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 71,* 111–128.

Granada-Echeverri, M., Cubides, L. C., & Bustamante, J. O. (2020). The electric vehicle routing problem with backhauls. *International Journal of Industrial Engineering*, 10(1), 135–152.

Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research, 245*(1), 81–99.

Goetschalckx, M., & Jacobs-Blecha, C. (1989). The vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operational Research, 42*(1), 39–51.

Hernández, P., Fernández, E., & Schilling, D. (2003). Heuristics for the pickup and delivery traveling salesman problem with multiple use of vehicles. *Transportation Science, 37*(3), 282–298.

Hiermann, G., Puchinger, J., Røpke, S., & Hartl, R. F. (2016). The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. *European Journal of Operational Research, 252*, 995–1018.

Ho, S. C., Szeto, W. Y., Kuo, Y. H., Leung, J. M. Y., Petering, M., & Tou, T. W. H. (2018). A survey of dial-a-ride problems: Literature review and recent developments. *Transportation Research Part B: Methodological*, 111, 395–421.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Hou, Y., Zhao, N., & Dang, L. (2022). Solving Multi-objective School Bus Routing Problem Using An Improved NSGA-II Algorithm. *Engineering Letters*, *30*(2), 1-10.

Kakillioglu, E.A., Aktaş, M.Y., ve Fescioglu-Unver, N., "Self-controlling resource management model for electric vehicle fast charging stations with priority service", Energy, 2022, 239, 122276.

Kempton, W., & Letendre, S. E. (1997). Electric Vehicles As A New Power Source For Electric Utilities. Transportation Research Part D: Transport And Environment, 2(3), 157-175.

Keskin, G. Laporte, B. Çatay, Electric vehicle routing problem with timedependent waiting times at recharging stations, Comput. Oper. Res. 107 (2019) 77–94.

Keskin, M., & Çatay, B. (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 65,* 111–127.

Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O. & Laporte, G. (2016). *The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics.* Transportation Research Part B, 84, 81–102

Koç, C., & Karaoğlan, İ. (2015). A branch-and-cut algorithm for the vehicle routing problem with multiple use of vehicles. *International Journal of Lean Thinking, 6*(1), 21–46.

Larminie, J., Lowry, J. 2003. *Electric Vehicle Technology Explained*, John Willey & Sons LTD, Oxford.

Lin, B., Ghaddar, B., & Nathwani, J. (2021). Deep reinforcement learning for the electric vehicle routing problem with time windows. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23(8), 11528–11539.

M. Schneider, A. Stenger, D. Goeke, (2014) The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations, Transp. Sci. 48 (4) 500–520.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ma, T.-Y., Fang, Y., Connors, R. D., Viti, F., & Nakao, H. (2024). A hybrid metaheuristic to optimize electric first-mile feeder services with charging synchronization constraints and customer rejections. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 185, 103505.

Masmoudi, M. A., Hosny, M., Demir, E., Genikomsakis, K. N., & Cheikhrouhou, N. (2018). The dial-a-ride problem with electric vehicles and battery swapping stations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 118, 392–420.

Molenbruch, Y., Braekers, K., Eisenhandler, O., & Kaspi, M. (2023). The electric dial-a-ride problem on a fixed circuit. *Transportation Science*, *57*(3), 594–612.

Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. G. (2017). The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B: Methodological, 103*, 87–110.

Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2008a). A survey on pickup and delivery problems. Part I: Transportation between customers and depot. *Journal für Betriebswirtschaft (JfB), 58*(1), 21–51.

Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2008b). A survey on pickup and delivery problems: Part II: Transportation between pickup and delivery locations. *Journal für Betriebswirtschaft, 58*(2), 81–117.

Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). Goods distribution with electric vehicles: Review and research perspectives. *Transportation Science*, *50*(1), 3–22.

Pérez, J. A., & González, J. J. (2004a). A branch and cut algorithm for the pickup and delivery traveling salesman problem. *Annals of Operations Research, 130*(1–4), 339–359.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 40(4), 455–472.

Shang, P., et al. (2020). Solving school bus routing problem with mixed-load allowance for multiple schools. Computers & Industrial Engineering, 149, 106828.

Schiffer, M., & Walther, G. (2017). The electric location routing problem with time windows and partial recharging. European Journal of Operational Research, 260(3), 995–1013. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.042

Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications* (2nd ed.). SIAM.

Wang, L. Y., & Song, Y. B. (2015). Multiple charging station location-routing problem with time window of electric vehicle. Journal of Engineering and Technology Review, 8(5), 190–201.

Xiao, J., Du, J., Cao, Z., Zhang, X., & Niu, Y. (2023). A diversity enhanced memetic algorithm for electric vehicle routing problems with time windows and mixed backhauls. *Applied Soft Computing, 134*, 110025.

Yang, H., Wang, D., Guo, R., Xie, M., Zang, Y., Wang, Y., ... & Zhang, Y. (2022). 8 Ocak 2022 MS 6.9 Menyuan depreminin hızlı raporu, Qinghai, Çin. *Deprem Araştırma Gelişmeleri*, *2* (1), 100113.

Yazır, O. A., Koç, Ç., & Yücel, E. (2023). The multi-period home healthcare routing and scheduling problem with electric vehicles. *OR Spectrum, 45*, 853–901.

Zhang, Z., Yu, C., & Tian, B. (2024). Multi-Agent DRL-Based Resource Scheduling and Energy Management for Electric Vehicles. *Electronics, 13*(16), 3311.

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A: Tavlama Benzetimi algoritması sözde kod

```
GİRDİ:
• Problem_data: Müşteri verileri, konumlar, zaman pencereleri (TW), servis süreleri, mesafe matrisi.
• SA_parameters: Başlangıç sıcaklığı T₀, soğutma oranı α, maksimum iterasyon sayısı.

ÇIKTI:
• S_best: En iyi ve uygulanabilir görev sırası.
• Report: S_best için oluşturulmuş detaylı operasyonel rapor.


PROSEDÜR: RunE-VRPMB_Optimization (problem_data, SA_parameters)

1.  // 1. Aşama: Optimizasyon - En iyi görev sırasını bul
2.  S_initial ← RastgeleBaşlangıçÇözümüOluştur(problem_data.customers)
3.  S_best ← SimulatedAnnealing(S_initial, problem_data, SA_parameters)
4.
5.  // 2. Aşama: Raporlama - sırayı simüle et ve raporla
6.  Report ← DetaylıRaporOluştur(S_best, problem_data)
7.
8.  DÖNDÜR S_best, Report
BİTİR PROSEDÜR

//---------------------------------------------------------------------

PROSEDÜR: SimulatedAnnealing(S, problem_data, SA_params)
1.  S_current ← S
2.  S_best ← S
3.  T ← SA_params.T₀
4.
5.  best_cost ← AmaçFonksiyonu(S_best, problem_data)
6.  current_cost ← best_cost
7.
8.  DÖNGÜ i ← 1'den SA_params.maxIter'e KADAR:
9.      S_new ← KomşuÇözümÜret(S_current) // (Örn: Swap, Insertion)
10.     new_cost ← AmaçFonksiyonu(S_new, problem_data)
11.
12.     // Metropolis Kabul Kriteri
13.     EĞER new_cost < current_cost İSE
14.         S_current ← S_new
15.         current_cost ← new_cost
16.     DEĞİLSE
17.         ΔE ← new_cost - current_cost
18.         kabul_olasiligi ← exp(-ΔE / T)
19.         EĞER random(0,1) < kabul_olasiligi İSE
20.             S_current ← S_new
```

```
                    current_cost ← new_cost
                BİTİR-EĞER
            BİTİR-EĞER

            // En iyi çözümü güncelle
            EĞER current_cost < best_cost İSE
                S_best ← S_current
                best_cost ← current_cost
            BİTİR-EĞER

            // Sıcaklığı düşür
            T ← T × SA_params.α
        BİTİR-DÖNGÜ

        DÖNDÜR S_best
BİTİR PROSEDÜR

//---------------------------------------------------------------------

FONKSİYON: AmaçFonksiyonu(sequence, problem_data)
    // Verilen bir rotanın maliyetini (toplam mesafe + cezalar) hesaplar.
    // Karmaşık kısıtları (batarya, zaman penceresi, yük) kontrol eder.

    total_distance ← 0
    total_penalty ← 0
    // ... batarya, yük, zaman gibi durum değişkenlerini başlat ...

    tours ← SıralamadanTurlarıOluştur(sequence, VEHICLE_CAPACITY)

    HER tur İÇİN tours:
        HER düğüm İÇİN tur:
            // Batarya yeterliliğini kontrol et
            EĞER batarya bir sonraki düğüme yetmiyorsa İSE
                // Rota arasına en yakın şarj istasyonunu ekle
                // total_distance, batarya ve zamanı güncelle
            BİTİR-EĞER

            // Zaman penceresi (TW) kontrolü yap
            EĞER varış_zamanı > düğüm.tw_end İSE
                // Geç kalma cezası ekle
                total_penalty ← total_penalty + ceza_miktarı
            BİTİR-EĞER

            // ... diğer değişkenleri (zaman, yük, batarya) güncelle ...
        BİTİR-HER
    BİTİR-HER
    DÖNDÜR total_distance
BİTİR FONKSİYON
```