



Journal of Turkish Operations Management

Ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü problemi: Marmara Bölgesi'nde uygulama

Gulseli Isler^{*}, Harun Reşit Yazgan² Aslı Sultan Altınesik³

¹ Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye
gulseliisler@sakarya.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-0699-7262>

² Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye
yazgan@sakarya.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-8791-0458>

³ Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye
aslisultanaltnesik@gmail.com, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0001-6878-6877>

*Sorumlu Yazar

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi:

Geliş: 21.09.2024

Revize: 23.01.2025

Kabul: 14.05.2025

Anahtar Kelimeler

Ömrünü Tamamlamış Araç (ÖTA),
Tersine Lojistik,
Optimizasyon,
MILP,
Maliyet Minimizasyonu,
Atık Yönetimi

Özet

Ömrünü tamamlamış araçların (ÖTA) geri dönüşüm ve yeniden işleme süreci, atık yönetimi açısından önemli sorunlar barındırmaktadır. Özellikle, toplama noktalarından bertaraf tesislerine kadar olan süreçte, maliyetlerin yüksek olması ve tesislerin etkin kullanılmaması önemli problemlerdir. Bu makalede, ÖTA'ların geri dönüşüm sürecine yönelik bir tersine lojistik problemi ele alınmıştır. Araçların toplama noktaları, geçici depolama merkezleri, geri dönüşüm tesisleri, yeniden kazanım merkezleri ve bertaraf alanları dikkate alınarak karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeli geliştirilmiştir. Model, gerçek hayat verileri ile ticari bir yazılım kullanılarak çözülmüş, mevcut durum analizi ve iki farklı senaryo üzerinden önerilen ağ tasarımının operasyonel maliyetleri azaltma etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, tesislerin optimize edilmiş kullanımının mevcut sistemde maliyet etkinliğini artırarak önemli bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, literatüre ÖTA tersine lojistik sistemi için geliştirilen özgün bir matematiksel model kazandırarak benzer sürdürülebilir sistemlerin tasarımına yönelik geniş bir uygulama potansiyeli sunmaktadır. Ayrıca, sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerini güçlendirmek isteyen paydaşlara yol gösterici niteliği taşımaktadır.

Recycling end-of-life vehicles problem: Application in Marmara region

Article Info

Article History:

Received: 21.09.2024

Revised: 23.01.2025

Accepted: 14.05.2025

Keywords

End of Life Vehicle (ELV),
Reverse Logistics,
Optimization,
MILP,
Cost Minimization,
Waste Management

Abstract

The recycling and reprocessing of end-of-life vehicles (ELVs) presents significant challenges in waste management. Particularly, high costs and inefficient use of facilities throughout the process, from collection centers to disposal facilities, are major issues. This paper addresses a reverse logistics problem related to the recycling process of ELVs. A mixed-integer linear programming (MILP) model is developed, considering vehicle collection centers, temporary storage centers, recycling facilities, recovery centers, and disposal facilities. The model is solved using commercial software with real-life data, and the effect of the proposed network design on reducing operational costs is examined through the current situation analysis and two different scenarios. The results show that optimizing facility usage leads to significant improvements in cost efficiency within the existing system. These findings contribute a novel mathematical model to the literature for the ELV reverse logistics system, presenting broad potential for the design of similar sustainable systems. Additionally, it provides valuable insights for stakeholders aiming to enhance sustainable waste management strategies.

1. Giriş

Günümüzde, doğal kaynakların sınırlı olması ve çevresel etkilerin giderek artmasıyla birlikte atık yönetimi stratejileri, kurumlar için önemli bir mesele haline gelmiştir. Bu bağlamda, ömrünü tamamlamış araçların (ÖTA) etkili bir şekilde geri dönüştürülmesi, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan kritik bir konu olarak öne çıkmaktadır (Ayvaz ve Erdoğan, 2020). Marmara Bölgesi, Türkiye'nin en yoğun nüfuslu ve endüstriyel olarak gelişmiş bölgesi olması nedeniyle atık yönetimi stratejileri açısından özel bir öneme sahiptir. Bu makale, Marmara Bölgesi'nde ÖTA'ların geri dönüşüm süreçlerini optimize etmeye yönelik bir açık döngü tersine lojistik ağ tasarımı problemini ele almaktadır. Atık yönetimi, sadece çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda işletmelerin ekonomik performansı ve toplumun genel refahı için de kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, bölgede ÖTA'ların etkili bir şekilde geri dönüştürülmesi, bölge ekonomisi için değerli hammadde kaynaklarına dönüşüm sağlayarak sürdürülebilir bir kalkınmanın anahtarı olabilir (İşler ve diğ., 2023).

Türkiye'de çevre ve sürdürülebilirlik konularındaki önemli adımlardan biri, Çevre ve Orman Bakanlığı'nın 30.12.2009 tarihli 27448 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan "Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Hakkında Yönetmelik" ile atılmış, 01.01.2011 tarihinden itibaren uygulamaya başlanmıştır. ÖTA'ların kontrolü, geri kazanımı ve yeniden kullanımı düzenlenerek, çevresel etkileri en aza indirme amacı taşınmaktadır. Özellikle kullanım ve geri kazanım oranları belirlenerek sektördeki ekonomik operatörlere yönlendirici bir çerçeve sunulmaktadır. ÖTA'lardan çıkarılan parçaların kullanım ve geri kazanım oranları belirlenerek, bu oranların belirli bir ağırlık yüzdesine ulaşması hedeflenmektedir. Özellikle, kullanım-geri kazanım oranlarının ortalama araç ağırlığının en az %85'ine, kullanım-geri dönüşüm oranlarının ise en az % 80'ine çıkarılması istenmektedir. Yönetmelik, 01.01.2020 tarihinden itibaren bu oranların daha da artırılmasını öngörmekte olup, kullanım-geri kazanım oranlarının ortalama araç ağırlığının en az % 95'ine, kullanım-geri dönüşüm oranlarının ise en az %85'ine çıkarılması hedeflenmektedir. Yönetmelik, 1 Ocak 1980 tarihinden önce üretilmiş araçlarda yeniden kullanım-geri kazanım oranlarını daha esnek bir şekilde ele almaktadır. Bu araçlarda yeniden kullanım-geri kazanım oranı, ortalama araç ağırlığının %75'inden az olmamalı, yeniden kullanım-geri dönüşüm oranı ise ortalama araç ağırlığının %70'inden düşük olmamalıdır. Bu, kullanılmayan parçaların çevresel standartlara uygun bir şekilde geri dönüşüm ve kazanım süreçlerine dâhil edilmesini ifade etmektedir. ÖTA'lardan çıkarılan parçaların çevresel standartlara uygun bir şekilde yeniden kullanılmasını veya geri dönüştürülmesini zorunlu tutulmaktadır. Bu faaliyetler, hava emisyonları, gürültü kontrolü gibi çevresel gerekliliklere tam uyum içinde gerçekleştirilmelidir. Bu hedefler, hem ekonomik operatörleri hem de sektörde faaliyet gösteren diğer paydaşları, atık yönetimi süreçlerini daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir yönde şekillendirmeye teşvik etmektedir. Böylece, atık malzemelerin etkili bir şekilde değerlendirilmesi ve kullanım ömrünün tamamlanan araçlardan elde edilen parçaların ekonomiye kazandırılması, çevresel sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sağlayacaktır. ÖTA geri dönüşüm sürecindeki temel problem, geri dönüşüm tesislerinin optimize edilmemiş ağ yapısı nedeniyle maliyetlerin yüksek olması ve kaynak kullanımının verimsiz gerçekleşmesidir (Balci, 2017).

Açık döngü tersine lojistik ağı optimizasyonu, kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerin, çeşitli geri dönüşüm, yeniden kazanım ve bertaraf süreçlerine yönlendirilmesi için tasarlanan lojistik ağların maliyet, çevresel sürdürülebilirlik veya başka kriterler doğrultusunda optimize edilmesini ifade eder. Bu süreçte ürünler, başlangıçta belirli bir amaca hizmet eden konvansiyonel tedarik zincirinin aksine, kullanım ömrünün sonunda farklı türdeki tesislere (örneğin, geri dönüşüm tesisleri, bertaraf alanları) taşınarak yeniden değerlendirilir veya bertaraf edilir (Hagelüken, 2007). Çalışmada ele alınan problem, bu ağların en uygun şekilde tasarlanarak toplam maliyetlerin minimize edilmesini amaçlayan matematiksel bir modelle çözülmüştür.

Bu makalede, Marmara Bölgesi'ndeki ÖTA geri dönüşüm süreçleri için tersine lojistik ağı tasarlanmış ve mevcut durum analizi ile iki farklı senaryo üzerinden analizler yapılmıştır. Mevcut durum analizinde, mevcut sistem incelenmiş ve tüm geri dönüşüm tesislerinin aktif olduğu dikkate alınarak maliyetler hesaplanmıştır. İlk senaryoda, önerilen karma tam sayılı doğrusal programlama modeli kullanılarak, tesislerin dönemlik açılması ve talep ile maliyet gibi faktörlere göre optimize edilmesi sağlanmıştır. Son olarak, ikinci senaryoda, son yıllardaki trafikten kaydı silinen araç sayısındaki azalma dikkate alınarak 2024 yılı için bir tahmin yapılmış ve ağ modeli bu öngörülere göre yeniden optimize edilmiştir. Bu senaryoların her biri, maliyetleri azaltmaya yönelik somut adımlar sunarak, mevcut sistemin verimliliğini artırmayı hedeflemiştir.

Önerilen modelin uygulanması ve geliştirilmesi, bölge için stratejik kararlar alınmasına katkıda bulunarak atık yönetimi stratejilerini güçlendirebilir. Bu çalışma, atık yönetimi stratejilerini geliştirmek isteyen işletmeler, yerel yönetimler ve çevre aktivistleri için önemli bir rehberlik sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, atık yönetimi alanında çalışan araştırmacılar için de matematiksel modelleme ve optimizasyon konularında yeni bir bakış açısı sunabilir.

2. Literatür Araştırması

Literatürde ÖTA'ların geri dönüşümüne yönelik yapılan sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Cruz-Rivera ve Ertel (2008)'in çalışmasında, Meksika'daki ÖTA'lar için kapasitesiz bir toplama ağı modeli geliştirilerek geri dönüşüm ağının birimlerinin konumunun optimizasyon modeli sunulmuş ve çözüm için ise karma tam sayılı hedef programlama yaklaşımı önerilmiştir. Bölgesel dağıtım merkezlerinin lokasyonlarının başlangıçta belirlenen potansiyel lokasyonlar arasından seçilmemiş, model tarafından gösterilmiştir. Sonuç olarak, Meksika içinde toplama kapsamının sırasıyla %100, %90 ve %75'ini dikkate alan üç olası senaryoya karşılık gelen üç toplama ağının yapılandırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Harraz ve diğ. (2011) ise Mısır'da ÖTA'lar için sürdürülebilir bir kurtarma ağının tasarımı sunmuşlardır. Önerilen matematiksel model, farklı tesisler için konumları ve farklı Kullanım Ömrü Sonu (EoL) seçeneklerine tahsis edilecek malzeme miktarlarının bulunmasını sağlamıştır. Merksiz-Guranowska (2011), hurda araçların toplanması, sökülmesi ve geri kazanımını içeren geri dönüşüm ağının tasarımı ele almıştır. Çalışmada, araçların toplanması ve geri dönüşüm süreci için tersine lojistik ağı kurulmuş, maliyetleri minimize eden bir matematiksel model geliştirilmiş, çözüm için ise Evrimsel Algoritma kullanılmıştır. Farel ve diğ. (2013), araç camlarının geri dönüşümü için bir ağ optimizasyon modeli sunmuşlardır. EoL cam geri dönüşümünde karlılığı artırmak için maliyet-fayda analizi kullanılmış, çözüm için doğrusal programlama modeli önerilmiş, çeşitli senaryolar simüle edilerek en iyi geri dönüşüm uygulamaları belirlenmiştir. Mahmoudzadeh ve diğ. (2013) ise bir doğrusal programlama modeli kullanarak ÖTA'ların hurda sahaları için en iyi yer, tahsis ve malzeme akışlarını bulmaya çalışmışlardır. Model, ülke genelinde hurdalıkların optimum konumlarını ve bunların optimum tahsislerini ve malzeme akışlarını belirlemek için MILP aracılığıyla formüle edilmiştir. ÖTA'lar, farklı çıktı malzeme akışlarıyla üç kalite seviyesinde kategorize edilmiştir. Sonuçlar, tahsis sürecinde bir uzmanlaşma eğilimi olduğunu, yani hurdalıkların çoğunun yalnızca bir veya iki kalite seviyesinde hizmet vererek açıldığını göstermiştir. Ene ve Öztürk (2015) ise, AB'de ÖTA geri dönüşüm planlaması için bulanık riske açık bir MILP modeli formüle etmişlerdir. Ağ modelinin kapsamı, ağdaki tesislerin sayılarını, konumlarını ve bu tesisler arasındaki malzeme akışlarını belirlemektir. Simic (2015), belirsizlik altında hurda araçların tahsisini planlamak için çok aşamalı bir aralıklı-stokastik programlama modeli sunmuştur. Model, farklı bölgelerdeki araçların geri dönüşüm tesislerine tahsisini optimize ederek belirsizlikleri ele almıştır.

Demirel ve diğ. (2016), ÖTA'larının geri kazanımını verimli bir şekilde yönetmek ve ÖTA kurtarma sisteminde yer alan farklı aktörleri içeren ağ tasarımı için bir MILP modeli sunmuşlardır. Önerdikleri modelde yeniden kullanılabilir parça ve hurda metallerin satış gelirini dikkate almışlardır. Phuc (2017), bulanık parametrelerle kullanım ömrü sonu taşıtların geri yönlü tedarik zinciri sistemi modeli incelemiştir. Önerilen model daha sonra bulanık parametrelerle doğrusal programlama yoluyla eşdeğer yardımcı net modele dönüştürülmüş ve nihai tercih edilen uzlaşım çözümleri belirlenmiştir. Shankar ve diğ. (2018), hurda araçların geri kazanımını amaçlayan kapalı döngü tedarik zinciri için iki aşamalı bir karar modeli sunmuşlardır. İlk aşamada, kapalı döngü tedarik zinciri için talep, toplama oranı ve kapasite gibi parametrelerle karma tamsayılı bir matematiksel model oluşturulmuş; ikinci aşamada ise bu modelin çıktıları, stratejik kararların incelenmesi için kullanılmıştır. Kuşakçı ve diğ. (2019), İstanbul için ömrünü tamamlamış araçların tersine lojistik ağını optimize etmek için bulanık bir konum tahsisi modeli geliştirmişlerdir. ELV tedarikinin belirsiz olduğu varsayılarak tasarlanan model, geri dönüşüm sürecinin mevcut koşullar altında kârlı olmadığını ortaya koymuşlardır. Wenzhu Liao ve Luo (2022), elektrikli araç bataryalarının geri dönüşüm ve yeniden üretimi için çok katılımcılı bir tersine lojistik ağı tasarlamış ve sürdürülebilir gelişimi desteklemek için bulanık bir optimizasyon modeli kullanmışlardır. Çin'in Chongqing şehrindeki vaka çalışması, maliyet düşüşü ve verimlilik artışı sağlamıştır. He ve diğ. (2024), ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşüm ağını tasarlamak için belirsizlik altında bir karma tamsayılı doğrusal ve bulanık karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli önermişlerdir. Çin'in Jiangsu Eyaleti vaka çalışması sonuçları, geri dönüşüm hacmi ve tesis kapasitesindeki değişimlerin toplam maliyeti ve tesis seçimlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Sezgisel algoritmaların tercih edilmesinin temel sebepleri, büyük boyutlu problemlerde optimum sonuca ulaşmanın zorluğu ve klasik yöntemlerle çözümün çok uzun süre almasıdır. Bu durumlarda, MILP gibi matematiksel modellerin çözüm sürecini hızlandırmak ve uygulanabilir çözümler elde etmek için sezgisel yöntemlere başvurulmaktadır. Sezgisel yöntemlerle çözüm sağlayan çalışmalara örnek olarak; Mansour ve Zarei (2008), Avrupa Birliği Yönergesi doğrultusunda kullanım ömrünü tamamlamış araçların (ELV) geri kazanımı için bir tersine lojistik optimizasyon modeli sunmuşlardır. Modelde, maliyetler en aza indirilirken, araçların toplanması, demontajı ve farklı tesisler arasında malzeme akışı optimize edilmesi hedeflenmiştir. Çözüm için Çoklu Başlangıç Arama Algoritması ve sezgisel yöntemler uygulanmıştır. Zarei ve diğ. (2010), çok dönemli tersine lojistik optimizasyon yaklaşımına sahip bir tesis yerleşim problemi sunmuş ve karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) modeli kurmuşlardır. İleri lojistik ve tersine lojistik maliyetlerinin eş zamanlı minimizasyonuna dayanmaktadır. Genetik algoritmaya dayalı bir çözüm metodolojisi tasarlanmıştır. Govindan ve Gholizadeh (2021), çalışmalarında İran'daki kullanım ömrünü tamamlamış araçlar (ELVs) için sürdürülebilir ve

dayanıklı tersine lojistik ağının optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Belirsizlik durumlarına yönelik senaryo tabanlı modelleme ile toplam maliyetlerin minimize edilmesi amaçlanarak çözüm için Çapraz-Entropi algoritması kullanılmıştır. Hashemi (2021), çevresel maliyetleri ve tersine lojistik ağının toplam maliyetini minimize ederken müşteri talebini maksimize eden bir bulanık çok amaçlı model önermiştir. Modeli çözmek için bir elit strateji ve bir Meta-Sezgisel Arı Kolonisi Algoritması ile Genetik Algoritma kullanmıştır. Shafiee Roudbari ve diğ. (2021), geri dönüşümlü ürünlerin yeniden kullanımı, yenileme, yeniden üretim ve geri dönüşüm süreçlerini içeren tersine lojistik ağını, belirsizlikleri dikkate alarak iki aşamalı stokastik modelle tasarlamışlardır. Çözüm süresini kısaltmak için Genetik Algoritma ve Branch and Cut yöntemleri birleştirilmiştir. Reddy ve diğ. (2022), geliştirilmiş bir Benders ayrıştırma yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem MILP modelini çözerek daha hızlı bir çözüm sağlamak ve mevcut problemlerin doğal karmaşıklığını çözmektedir.

İncelenen bu çalışmaların özeti Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Literatür taraması tablosu

YAZARLAR (YIL)	MODEL TİPİ	ÇÖZÜM YÖNTEMİ
Mansour ve Zarei (2008)	MILP	Sezgisel
Zarei ve diğ. (2010)	MINLP	
Govindan ve Gholizadeh (2021)	MILP	
Hashemi (2021)	MILP	
Shafiee Roudbari ve diğ. (2021)	MILP	
Reddy ve diğ. (2022)	MILP	
Cruz-Rivera ve Ertel (2009)	MILP	Matematiksel model
Harras ve diğ. (2011)	MILP	
Merkisz-Guranowska (2011)	LP	
Farel ve diğ. (2013)	MILP	
Mahmoudzadeh ve diğ. (2013)	LP	
Ene ve Öztürk (2015)	MILP	
Simic (2015)	LP	
Demirel ve diğ. (2016)	MILP	
Phuc ve diğ. (2017)	Fuzzy LP	
Shankar ve diğ. (2018)	LP	
Kuşakcı ve diğ. (2019)	LP	
Wenzhu Liao ve Luo (2022)	MILP	
He ve diğ. (2024)	MILP	

Literatürde ömrünü tamamlamış araçların (ÖTA) geri dönüşüm süreçlerini optimize etmeye yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genellikle karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP), doğrusal programlama (LP), ve karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) gibi çeşitli modelleme teknikleri kullanılmaktadır. Genelde, problemin yapısı gereği lineer programlama modeli önerildiği görülmüştür. Büyük modeller için ise, sezgisel algoritma gibi kesin olmayan çözüm yöntemleri tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra, belirsizlik altında karar verme süreçleri üzerinde duran çalışmalar da mevcuttur.

Bu makalenin literatürdeki diğer çalışmalardan farkı, ÖTA geri dönüşüm süreci için gerçek hayattan esinlenen bir tersine lojistik ağ modeli önerilmiş olması, buna uygun geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modelinin global optimal sonuçlara ulaşması ve modelin gerçek verileri kullanılarak test edilmiş olmasıdır. Bununla birlikte, literatürde bazı büyük problemleri çözmek için kullanılan sezgisel yöntemler ile kesin sonuçlar sağlanamazken, bu makalede elde edilen çözüm global optimal olma özelliği taşımaktadır.

Çalışmanın temel katkısı, ÖTA’lar için çevresel sürdürülebilirlik ilke ve standartlarına uygun, geri dönüşüm süreçlerini içeren bir tersine lojistik ağı tasarlanması ve tasarlanan bu ağ için maliyeti en aza indirgeyerek süreçleri optimize eden özgün bir matematiksel model önerilmesidir. Bu problem, açık döngü, tek amaçlı ve tek ürünlü bir geri dönüşüm ağının tasarımını içerir. Bu makalede geliştirilen matematiksel model ile yalnızca maliyet minimizasyonuna odaklanılmamış, aynı zamanda mevcut durum analizi ve senaryolar ile modelin gerçek hayatta uygulanabilirliğinin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın, karar vericilerin sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinde daha bilinçli ve esnek kararlar alabilmesine yardımcı olabileceğini düşünüyoruz.

3. Ömrünü Tamamlamış Araçların Geri Dönüşüm Problemi

3.1. Problem Tanımı

Bu çalışma, Marmara Bölgesi'nde ÖTA'ların geri dönüşüm süreçlerini optimize etmeye odaklanan bir matematiksel model üzerine kurulu bir açık döngü, tek amaçlı ve tek ürünlü bir tersine lojistik ağı tasarımı problemi ele almaktadır.

Önerilen tersine lojistik ağında ÖTA'ların geri dönüşüm işlemleri ele alınmıştır. Teslim yerlerine ulaşan ÖTA'lar, doğrudan geçici depolama merkezine gönderilerek herhangi bir işleme tabi tutulmamaktadır. Geçici depolama merkezine gelen ÖTA'ların ilk olarak yakıt, motor yağı, transmisyon yağı, hidrolik yağ, soğutucu, klima sıvısı, fren sıvısı, direksiyon sıvısı gibi akışkan kısımları boşaltılmakta ve ardından sökülme işlemine geçilmektedir. Söküm işlemi sonucunda elde edilen plastik, cam gibi materyaller ile "hulk" olarak adlandırılan ÖTA gövdesi parçalara ayrıştırılarak geri dönüşüm tesislerine gönderilmektedir. Söküm işlemi sonucunda ortaya çıkan değerli ve yeniden kullanılabilir parçalardan motor, diferansiyel, transmisyon (şanzıman), gövde panelleri (kaporta, kapılar, tampon) ve tekerlekler ikincil pazarlara/marketlere satılmaktadır. Hulk adı verilen araç gövdesine uygulanan parçalama işlemi sonucunda ASR olarak bilinen araç parça kalıntıları ile demir ve demir içermeyen metaller (alüminyum, bakır, çinko ve kurşun) elde edilmektedir. ASR'ler bertaraf merkezine gönderilerek elden çıkarılırken, demir ve demir içermeyen metaller geri dönüşüm tesisine ulaştırılmaktadır. Geçici depolama ve geri dönüşüm tesisinden yeniden kazanım merkezine gönderilen materyaller, geri kazanım işlemine tabi tutularak ham materyallerin tedarikçilere satışı yapılmaktadır. Geri kazanımı sağlanamayan tehlikeli ve zararlı atıklar ise ASR'ler gibi bertaraf merkezine gönderilerek elden çıkarılmaktadır.

3.2. Matematiksel Formülasyon

Önerilen tersine lojistik ağ modeline yönelik tek amaçlı, tek ürünlü, karma tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Model için aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

- Teslim yerlerindeki ÖTA'ların tamamı toplanmalıdır.
- Tüm tesisler kapasitelidir.
- Taşınan malzemeler ağırlık birimi (ton) olarak tahsis edilebilir.
- Yeterli olan kapasiteden dolayı birikmiş siparişe veya stoğa izin verilmez.
- ÖTA'ların yüzdesel bileşenleri bilinmektedir.

Model formülasyonu aşağıdaki gibidir.

Kümeler:

- i : ÖTA teslim yeri $i \in \{1, 2, \dots, I\}$
 j : geçici depolama merkezleri $j \in \{1, 2, \dots, J\}$
 k : geri dönüşüm/öta işleme tesisleri $k \in \{1, 2, \dots, K\}$
 l : yeniden kazanım merkezleri $l \in \{1, 2, \dots, L\}$
 m : bertaraf tesisleri $m \in \{1, 2, \dots, M\}$

Parametreler:

- f_l : l yeniden kazanım merkezinin dönemlik sabit açılış maliyeti
 f_k : k geri dönüşüm tesisinin dönemlik sabit açılış maliyeti
 f_m : m bertaraf tesisinin dönemlik sabit açılış maliyeti
 c_k : k geri dönüşüm tesisinde parça işleme birim maliyeti
 c_l : l yeniden kazanım merkezinde parça işleme birim maliyeti
 t_{ij} : i ÖTA teslim yeri ile j geçici depolama tesisi arasında km başına taşıma maliyeti
 t_{jk} : j geçici depolama tesisi ile k geri dönüşüm tesisi arasında km başına taşıma maliyeti
 t_{kl} : k geri dönüşüm tesisi ile l yeniden kazanım merkezi arasında km başına taşıma maliyeti
 d_{ij} : i ÖTA teslim yeri ile j geçici depolama tesisi arasındaki mesafe (km)
 d_{jk} : j geçici depolama tesisi ile k geri dönüşüm tesisi arasındaki mesafe (km)
 d_{kl} : k geri dönüşüm tesisi ile l yeniden kazanım merkezi arasındaki mesafe (km)
 cap_j : j geçici depolama merkezi kapasitesi
 cap_k : k geri dönüşüm tesisi kapasitesi
 cap_l : l yeniden kazanım merkezi kapasitesi

cap_m : m bertaraf tesisi kapasitesi

$strc$: Geçici depolama merkezinden geri dönüşüm tesisine gönderilen atık miktarı

$stru$: Geçici depolama merkezinden yeniden kazanım merkezine gönderilen atık miktarı

$stds$: Geçici depolama merkezinden bertaraf tesisine gönderilen atık miktarı

$rcru$: Geri dönüşüm tesisinden yeniden kazanım merkezlerine gönderilen atık miktarı

$rcds$: Geri dönüşüm tesisinden bertaraf tesislerine gönderilen atık miktarı

Karar Değişkenleri:

Z_i : i ÖTA teslim yeri tarafından gönderilen ÖTA miktarı

X_{ij} : i ÖTA teslim yeri tarafından j geçici depolama merkezine gönderilen ÖTA miktarı

Y_{jk} : j geçici depolama merkezinden k geri dönüşüm tesisine gönderilen atık miktarı

T_{jl} : j geçici depolama merkezinden l yeniden kazanım merkezine gönderilen atık miktarı

V_{jm} : j geçici depolama merkezinden m bertaraf tesisine gönderilen atık miktarı

W_{kl} : k geri dönüşüm tesisinden l yeniden kazanım merkezine gönderilen atık miktarı

B_{km} : k geri dönüşüm tesisinden m bertaraf merkezine gönderilen atık miktarı

e_k : k geri dönüşüm tesisinin açılıp açılmama kararı (0 veya 1)

e_l : l yeniden kazanım Merkezinin açılıp açılmama kararı (0 veya 1)

e_m : m bertaraf tesisinin açılıp açılmama kararı (0 veya 1)

Amaç Fonksiyonu:

$$\begin{aligned} \text{En az } Z = & \sum_l^L f_l e_l + \sum_k^K f_k e_k + \sum_m^M f_m e_m + \sum_l^L \sum_k^K c_k W_{kl} + \sum_l^L \sum_k^K c_l W_{kl} + \\ & \sum_i^I \sum_j^J t_{ij} d_{ij} X_{ij} + \sum_j^J \sum_k^K t_{jk} d_{jk} Y_{jk} + \sum_k^K \sum_l^L t_{kl} d_{kl} W_{kl} \end{aligned} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_j^J X_{ij} \leq Z_i \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_i^I X_{ij} \leq cap_j \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j^J Y_{jk} \leq cap_k \times e_k \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_k^K W_{kl} + \sum_j^J T_{jl} \leq cap_l \times e_l \quad \forall l \quad (5)$$

$$\sum_j^J V_{jm} + \sum_k^K B_{km} \leq cap_m \times e_m \quad \forall m \quad (6)$$

$$\sum_i^I X_{ij} = \sum_k^K Y_{jk} + \sum_l^L T_{jl} + \sum_m^M V_{jm} \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_k^K Y_{jk} = \sum_l^L W_{kl} + \sum_m^M B_{km} \quad \forall j \quad (8)$$

$$strc \times \sum_i^I X_{ij} = \sum_k^K Y_{jk} \quad \forall j \quad (9)$$

$$stru \times \sum_i^I X_{ij} = \sum_l^L T_{jl} \quad \forall j \quad (10)$$

$$stds \times \sum_i^I X_{ij} = \sum_m^M V_{jm} \quad \forall j \quad (11)$$

$$rcru \times \sum_k^K Y_{jk} = \sum_l^L W_{kl} \quad \forall k \quad (12)$$

$$rcds \times \sum_j^J Y_{jk} = \sum_m^M B_{km} \quad \forall k \quad (13)$$

$$Z_i, X_{ij}, Y_{jk}, T_{jl}, V_{jm}, W_{kl}, B_{km} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, m \quad (14)$$

$$e_k, e_l, e_m \in \{0, 1\} \quad \forall k, l, m \quad (15)$$

(1) numaralı denklem modelin amaç fonksiyonudur. Açılma kararı verilen yeniden l kazanım merkezlerinin, k geri dönüşüm tesislerinin ve m bertaraf tesislerinin dönemlik sabit açılış maliyetleri, gönderilen ÖTA'ların k geri dönüşüm tesisinde ve l yeniden kazanım merkezinde parça işleme maliyetleri, i ÖTA teslim yeri ile j geçici depolama tesisi arasındaki, j geçici depolama tesisi ile k geri dönüşüm tesisi arasındaki ve k geri dönüşüm tesisi ile l yeniden kazanım merkezi arasındaki mesafeye ve atık miktarına bağlı atık taşıma maliyetlerinin toplamını içermektedir ve bu toplamın minimizasyonu gerçekleştirilir.

Kısıt (2), (3), (4) ve (5) kapasite kısıtlarıdır. Kısıt (2), teslim yerinden gönderilen ÖTA miktarının teslim yerinin, Kısıt (3) geçici depolama merkezlerinin, Kısıt (4) geri dönüşüm tesislerinin, Kısıt (5) yeniden kazanım merkezlerinin ve Kısıt (6) bertaraf tesislerinin kapasitelerinin aşılmamasını sağlar. Kısıt (7) ve (8), Atıkları tesislere yönlendirme kısıtıdır. Üç adet kısıt geçici depolama merkezindeki atıkların belirli oranlarda geri dönüşüm tesisine (Kısıt 9), yeniden kazanım merkezlerine (Kısıt 10) ve bertaraf tesislerine (Kısıt 11) gönderilmesini sağlar. Kısıt (12) ve (13) ise sırasıyla, geri dönüşüm tesisine gönderilen atıkların belirli oranlarda yeniden kazanım merkezlerine ve bertaraf tesislerine yönlendirilmesini gerektirir. Kısıt (14), karar değişkenlerinin negatif olmamasını garanti eder. Son olarak, Kısıt (15), geri dönüşüm tesisleri, yeniden kazanım merkezleri ve bertaraf tesislerine ilişkin açılma veya açılmama kararlarını modellemek amacıyla ilgili karar değişkenlerinin 0 veya 1 değerini almasını sağlar.

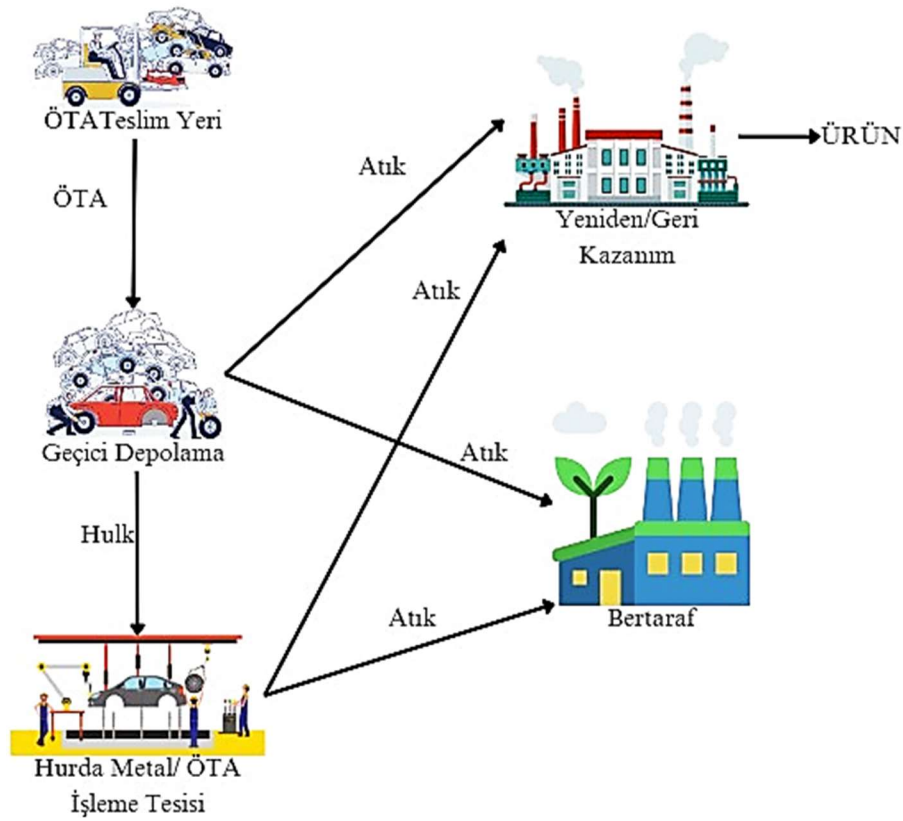
Geliştirilen model, ÖTA teslim yerleri, geçici depolama merkezleri, geri dönüşüm tesisleri, yeniden kazanım merkezleri ve bertaraf tesisleri gibi kritik bileşenlere odaklanır. Çeşitli parametreler ve karar değişkenleri aracılığıyla, taşıma miktarları ve tesislerin açılma/kapanma kararları gibi stratejik unsurlar matematiksel olarak ifade edilmiştir. Amaç fonksiyonu, toplam ağ maliyetini minimize etmeye yönelik stratejik bir hedefi temsil eder. Aynı zamanda, kısıtlar, teslim yerlerinin kapasiteleri, depolama merkezleri ve tesisler arası malzeme yönlendirmeleri gibi önemli faktörleri düzenler.

4. Uygulama

4.1. Mevcut durum analizi

Bu bölüm, Marmara Bölgesi'ndeki ÖTA'ların geri dönüşümü için tersine lojistik ağ tasarım probleminin uygulamasını içermektedir. Çalışmanın ana hedefi, ÖTA direktifi kapsamında Marmara Bölgesi'nde bulunan ÖTA'ların geri dönüşümü için bir ağ tasarımı yapmak, model parametrelerini belirleyerek minimum maliyetli bir tersine lojistik problemini çözmektir.

Belirtilen problemin çözümü için öncelikle mevcut durum analizinde, mevcut sistemin detaylı bir incelemesi yapılmış, maliyeti hesaplanmış ve bölgedeki atık yönetim tesislerinin kapasite durumları, kullanılan veriler ve ÖTA'ların özellikleri gibi faktörler analiz edilmiştir. Bu adım, mevcut problemlerin kök nedenlerini belirlemede temel bir rol oynamıştır. ÖTA'ların geri kazanımı için gerçek hayattan esinlenerek tasarlanan tersine lojistik ağ yapısı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan ÖTA geri dönüşüm ağ modeli

Bölgedeki lisanslı araç toplama merkezleri, geçici depolama tesisleri, geri dönüşüm ve yeniden kazanım merkezlerinin toplam maliyetleri değerlendirilmiştir. Bölgede faaliyet gösteren toplamda 56 ton malzeme kapasiteli 154 adet tesis, mevcut durumda açıktır. Mevcut durumda ve senaryolardaki ortak tüm parametreler Senaryo 1 bölümünde mevcuttur. İllere özgü otomobil sayıları, kaydı silinen araç sayıları ve atık yönetimi süreçlerine dair mevcut veriler toplanarak, modelin temel girdilerini oluşturmuştur. Bu verilerin analizi sonucunda, mevcut durumda toplam ağ maliyeti 11.020.460.000,00 TL olarak tespit edilmiştir.

4.2. Senaryo 1

Bu problemin incelenmesi için 2 farklı senaryo oluşturulmuştur. Senaryo 1’de önerilen tersine lojistik ağ modeli, ÖTA teslim yerleri, geçici depolama merkezleri, geri dönüşüm tesisleri, yeniden kazanım merkezleri ve bertaraf tesisleri gibi kritik bileşenlere odaklanarak, bu tesisler arasındaki malzeme taşıma miktarlarını belirleyen karar değişkenleri ve stratejik kararları içermektedir. Bu çerçevede, bölgedeki atıkların yönetim uygulamalarını optimize etmeye odaklanmıştır ve elde edilen sonuçlar, Marmara Bölgesi’nde sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerini güçlendirmeyi amaçlayan paydaşlara stratejik karar alma süreçlerine rehberlik etmeyi ve matematiksel optimizasyon modelleri kullanarak sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerini tasarlamak isteyen uzmanlara geniş bir uygulama potansiyeli sunmayı amaçlamaktadır.

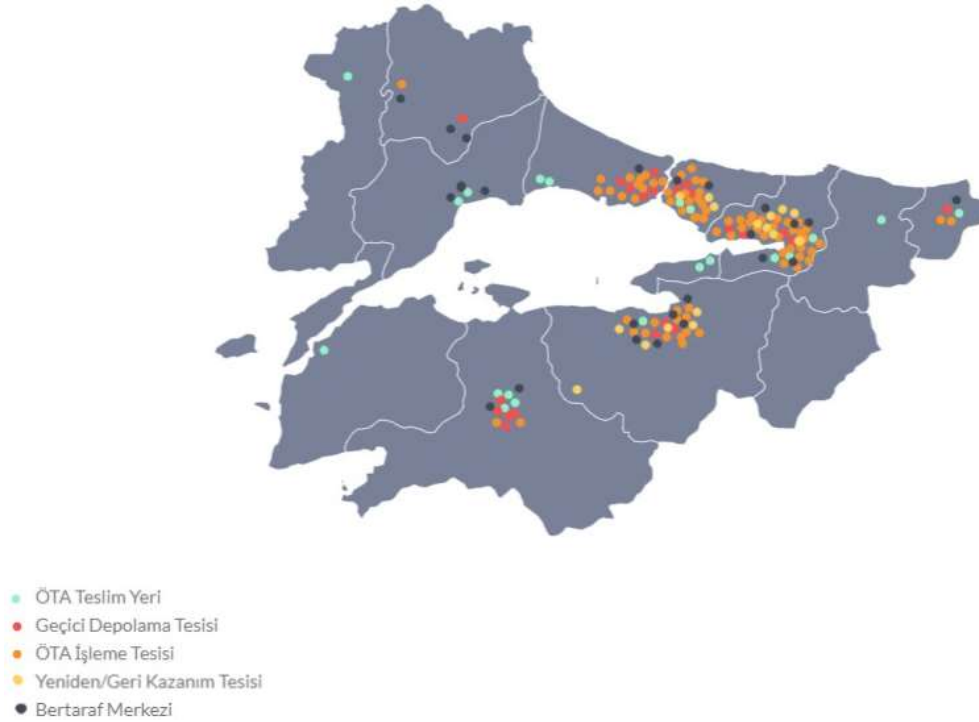
4.2.1. Kullanılan Veriler:

Marmara Bölgesi’nde ÖTA kaynağı olarak belirlenen Balıkesir, Bursa, Yalova, Tekirdağ, Edirne, Çanakkale, Kırklareli, Düzce, Sakarya, Bilecik, Kocaeli ve İstanbul olmak üzere toplamda 12 il ele alınmıştır. Bölgede faaliyet gösteren tesislerinin kapasiteleri, ÖTA akışlarını ve mevcut süreçlerini içermektedir ve piyasa araştırmaları sonucunda belirlenmiştir. ÖTA’ların toplandığı lisanslı araç toplayıcıları, araç söküm işlemlerinin yapıldığı yetkili geçici depolama/söküm tesisleri, söküm tesisinden gelen hulkun yeniden işleme tabi tutulduğu geri dönüşüm/ÖTA işleme tesisleri, akülerin, akışkanların, lastiklerin ve işlenmiş hulkaların geri dönüştürüldüğü yeniden kazanım tesisleri, tehlikeli ve zehirli atıkların elden çıkartıldığı bertaraf merkezlerinin sayıları ve kapasiteleri Tablo 2’de verilmiştir. Araçların her birinin ağırlığı 1.000 kg olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan tesislerin adetleri ve kapasiteleri (Kaynak: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı)

Tesis	Kapasite
ÖTA Teslim Yeri (Lisanslı Araç Toplayıcı)	20 adet, 4.000 ton
Geçici Depolama/Söküm Tesisi	22 adet, 5.000 ton
Geri Dönüşüm\ ÖTA İşleme Tesisi	73 adet, 9.000 ton
Yeniden Kazanım Tesisi	16 adet, 12.000 ton
Bertaraf Merkezi	23 adet, 26.000 ton

ÖTA teslim yerleri, geçici depolama tesisleri, geri dönüşüm işleme tesisleri, yeniden kazanım tesisleri ve bertaraf merkezleri gibi aktörlerin konumu ve tesisler arasındaki mesafelerin belirlenmesi için Google Haritalar kullanılmıştır. Şekil 2, ÖTA'ların geri dönüşüm sürecindeki aktörleri ve konumlarını göstermektedir.

**Şekil 2.** ÖTA'ların geri dönüşüm sürecindeki aktörleri ve konumları

2023 yılı itibarıyla Türkiye genelindeki trafiğe kaydı yapılan toplam taşıt sayısı 1.496.744, ÖTA sayısı 5.059'dur (TÜİK, 2024). Türkiye genelindeki bu sayılara göre, incelenen bölgedeki ÖTA teslim yerlerinden gönderilen ÖTA miktarları ise toplamda 1.833 adet araç olarak belirlenmiştir. İllerdeki otomobil sayısının toplam otomobil sayısına oranına göre bölgedeki toplam ÖTA miktarı illere paylaştırılmıştır. Tablo 3'te illerdeki otomobil sayıları verileri ile orantılı hesaplanan tahmini ÖTA sayıları verilmiştir.

Balıkesir, Bursa, Yalova, Tekirdağ, Edirne, Çanakkale, Kırklareli, Düzce, Sakarya, Bilecik, Kocaeli ve İstanbul illerinde toplam 20 tane teslim yeri bulunmaktadır ve bu illerin hepsi gerçek hayatta olduğu gibi ÖTA kaynağı olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3. 2023 yılı illerdeki araç sayıları ile orantılı olarak belirlenen il bazlı ÖTA sayıları

İller	Otomobil Sayısı	İllere göre otomobil sayıları oranı	Kaydı Silinen Araç Sayısı
İstanbul	3.530.325	%65,19	1.194
Bursa	619.285	%11,44	209
Kocaeli	292.000	%5,39	99
Balıkesir	241.996	%4,47	82
Sakarya	175.120	%3,23	59
Tekirdağ	164.098	%3,03	56
Çanakkale	106.290	%1,96	36
Edirne	76.683	%1,42	26
Kırklareli	67.096	%1,24	23

Düzce	63955	%1,18	22
Yalova	41.327	%0,76	14
Bilecik	37.058	%0,68	13
TOPLAM	5.415.233	%100	1833

Geçici depolama merkezine gönderilen atıkların %81'i geri dönüşüm tesisine (strc), %14'ü yeniden kazanım merkezlerine (stru) ve %5'i de bertaraf tesislerine (stds), bir geri dönüşüm tesisine gönderilen atıkların %88'i yeniden kazanım merkezlerine (rcru), %12'si bertaraf tesislerine (rcds) gönderilmelidir (Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Hakkında Yönetmelik, 2009).

Maliyet verilerinin gerçekçi bir şekilde belirlenmesi amacıyla Marmara Bölgesi'ndeki geri dönüşüm, yeniden kazanım ve bertaraf tesislerinde kapsamlı saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlgili veriler, Marmara Bölgesi'ndeki geri dönüşüm, yeniden kazanım ve bertaraf tesislerinde yapılan saha çalışmaları ve görüşmeler yoluyla derlenmiştir. Söz konusu tesislerin sabit açılış maliyetleri, birim işleme maliyetleri ve taşıma giderlerine ilişkin bilgiler, tesis yetkilileriyle yapılan görüşmeler sırasında elde edilmiştir. Görüşmeler sonucunda elde edilen maliyet verileri, gizlilik sebebiyle tesislere özgü detaylar belirtilmeden çalışmada genel şekilde sunulmuştur. Verilerin bu şekilde toplanması, çalışmada yer alan maliyet unsurlarının gerçek hayattaki koşulları yansıtmalarını ve modelin uygulanabilirliğinin artmasını sağlamıştır. Tablo 4, Marmara Bölgesi'nde ÖTA'ların geri dönüşüm süreçlerini optimize etmeye yönelik matematiksel modelde kullanılan maliyetleri göstermektedir.

Tablo 4. Maliyet verileri ve kaynakları

Maliyet Kalemi	Kaynak	Fiyat
Söküm tesisi açılış maliyeti	Piyasa araştırması	6.500.000 TL
Yeniden kazanım tesisi açılış maliyeti	Piyasa araştırması	25.000.000 TL
Sökme maliyeti	Yetkili bir söküm ve yeniden kazanım tesisi	5.000 TL
İşleme maliyeti	Yetkili bir söküm ve yeniden kazanım tesisi	2.500 TL
Bertaraf maliyeti	Yetkili bir bertaraf merkezi	1.250 TL
Geri dönüşüm yeniden kazanım maliyeti	Yetkili bir geri dönüşüm tesisi	1.000 TL
ÖTA taşıma maliyeti	Piyasa araştırması	1 TL/km*ton
Toplama merkezleri ile söküm tesisi arasındaki taşıma maliyeti	Piyasa araştırması	0.4 TL/km*ton
Hulk taşıma maliyeti	Piyasa araştırması	0.2 TL/km*ton
Bertaraf merkezine yapılan taşımaların maliyeti	Yetkili bir bertaraf merkezi	0.5 TL/km*ton

4.2.2. Analiz Sonucu:

ÖTA teslim yerlerinden çıkan atıkların geçici depolama/söküm tesislerine dağıtımı Tablo 5'te gösterilmiştir. ÖTA'lar ve ÖTA parça ve bileşenlerinin, geri dönüşüm ağı içerisinde geçici depolama tesislerinden hangi tesislere geçerek işlemlere tabi tutulduğu Tablo 6'da, geri dönüşüm tesislerinden yapılan taşımalar ise Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 5. ÖTA teslim yerlerinden yapılan taşımalar

ÖTA Teslim Yeri	Geçici Depolama Tesis
T1:Merkez/Yalova	G9:Gebze/Kocaeli
T2:Merkez/Yalova	G9:Gebze/Kocaeli
T3:Karesi/Balıkesir	G2:Karesi/Balıkesir
T4:Merkez/Balıkesir	G2:Karesi/Balıkesir
T5:Altıeylül/Balıkesir	G4:Gümüşçeşme/Balıkesir
T6:Altıeylül/Balıkesir	G4:Gümüşçeşme/Balıkesir
T7:Karesi/Balıkesir	G2:Karesi/Balıkesir
T8:Süleyman/Tekirdağ	G18:Silivri/İstanbul
T9:Süleymanpaşa/Tekirdağ	G18:Silivri/İstanbul
T10:Merkez/Edirne	G6:Lüleburgaz/Kırklareli
T11:Merkez/Çanakkale	G1:Bandırma/Balıkesir
T12:Merkez/Çanakkale	G1:Bandırma/Balıkesir
T13:Adapazarı/Sakarya	G8:Kartepe/Kocaeli
T14:Merkez/Düzce	G7:Merkez/Düzce
T15:Kartepe/Kocaeli	G8:Kartepe/Kocaeli
T16:İzmit/Kocaeli	G8:Kartepe/Kocaeli

T17:İzmit/Kocaeli	G8:Kartepe/Kocaeli
T18:Sancaktepe/İstanbul	G17:Maltepe/İstanbul
T19:Maltepe/İstanbul	G16:Ataşehir/İstanbul
T20:Nilüfer/Bursa	G20: Osmangazi/Bursa

Tablo 6. Geçici depolama tesislerinden yapılan taşımalar

Geçici Depolama Tesisi	Geri Tesisi	Dönüşüm Tesisi	Yeniden Kazanım Tesisi	Bertaraf Merkezi
G1				B2:Bandırma/ Balıkesir
G2				B1:Merkez/ Balıkesir
G4				B1:Merkez/ Balıkesir
G6				B14:Pınarhisar/Kırklareli
G7				B9:Merkez/ Düzce
G8	I57:Kartepe/Kocaeli	Y12:Kartepe Palet		B18:Kartepe/ Kocaeli
G9				B17:Darıca/ Kocaeli
G16				B21:Ataşehir/ İstanbul
G17				B21:Ataşehir/ İstanbul
G18				B10:Büyükçekmece/ İstanbul
G20				B5:Osmangazi/ Bursa

Tablo 7. Geri dönüşüm tesislerinden yapılan taşımalar

Geri Dönüşüm Tesisi	Yeniden Kazanım Tesisi	Bertaraf Merkezi
I57:Kartepe/Kocaeli	Y12:Kartepe Palet	18: Kartepe/Kocaeli

Optimal sonuçlara göre toplam 1.833 adet ÖTA, ÖTA teslim yerlerinden geçici depolama merkezine taşınmıştır. Geliştirilen tersine lojistik ağ modelinin minimum maliyeti 10.189.900.000 TL olarak bulunmuştur.

4.3. Senaryo 2

Senaryo 2’de, çözüme ulaştırılan problemin yanında, azalış trendi yaşanmakta olan trafikten kaydı silinen taşıt sayısındaki değişiklik için tahmin yapılarak model yeniden çözdürülmüş; sistem parametreleri hakkında yeni bilgiler ortaya çıktığında değişikliklerin çözümü nasıl etkilediği araştırılmıştır.

4.3.1. Kullanılan Veriler:

2021, 2022, 2023 yıllarında ve 2024’ün ocak ile temmuz ayları arasında trafikten kaydı silinen araç sayıları ve önceki yıla göre değişim oranları dikkate alınarak 2024 yılında trafikten kaydı silinen taşıt sayısının ortalamasının %14,45 azalacağı kabul edilmiştir. İlgili veriler Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Yıllara göre kaydı silinen taşıt sayısı, değişim oranı ve 2024 yılı tahmini (TÜİK, 2021, 2022, 2023, 2024)

	2021	2022	2023	2024 Ocak-Temmuz	2024 yılı tahmini verileri
Trafikten kaydı silinen taşıt sayısı	42.924	35.585	31.721	17.309	27.138
Önceki yıla göre değişim miktarı	- %11,2	- %17,1	- %10,9	- %18,6	- %14,45

4.2.2. Analiz Sonucu:

Trafikten kaydı silinen taşıtların sayısında bir azalış trendi görülmüş ve bu azalışın açılacak olan tesisleri nasıl etkilediği araştırılmıştır. Önerilen matematiksel model ile çözüme ulaşılmış, sonucunda açılma kararı verilen tesisler ve kategorileri ayrıntılı olarak Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9. Senaryo 2 sonuçları

Tesisler	Optimum sonuç (2023)	Optimum sonuç (2024 ve %14,45 azalış)
----------	----------------------	---------------------------------------

Geçici depolama\Söküm Tesisi	G1, G2, G4, G6, G7, G8, G9, G16, G17, G18, G20	G1, G2, G4, G6, G7, G8, G9, G13, G17, G21
Geri Dönüşüm\ ÖTA İşleme Tesisi	L57	L72, L25
Yeniden Kazanım Tesisi	Y12	Y6
Bertaraf Merkezi	B1, B2, B5, B9, B10, B14, B17, B18, B21	B1, B2, B3, B9, B14, B17, B18, B21

Beklendiği gibi, trafikten kaydı silinen taşıtların sayısındaki azalış yaşanması, azalış oranlarına bağlı olarak karar değişkenlerinin optimum değerleri ve tesis sayılarını etkilemiştir. Tablo 9, trafikten kaydı silinen taşıt sayısındaki %14,55'lik azalışın, mevcut tesislerin ve işlemlerin nasıl etkilendiğini göstermektedir. Azalış, özellikle geçici depolama/söküm tesisleri, geri dönüşüm/ÖTA işleme tesisleri, yeniden kazanım tesisleri ve bertaraf merkezleri için farklı sonuçlar doğurmuştur. Senaryo 2, trafikten kaydı silinen taşıt sayısındaki beklenen azalışın, açılacak tesisleri ve tesisler arası ürün akışlarını nasıl etkilediğini göstermiştir.

4.4. Uygulama Sonuçları

Bölgede faaliyet gösteren toplamda 56 ton malzeme kapasiteli 154 adet tesis, mevcut durumda açıktır. Mevcut durum için yapılan hesaplamalarla, toplam ağ maliyeti 11.020.460.000,00 TL olarak tespit edilmiştir.

Senaryo 1'de, önerilen tersine lojistik ağ modeli için geliştirilen karma tam sayılı doğrusal programlama modeli, ticari bir optimizasyon yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Sonucunda, ÖTA geri dönüşüm ağının aktörlerinden olan tesislerin optimum maliyeti tespit edilmiştir. Amaç fonksiyonu değeri, yani önerilen tersine lojistik ağ modelinin minimum maliyeti 10.189.900.000,00 TL olarak bulunmuştur.

Geliştirilen modelde, Marmara bölgesinde dönemlik olarak tüm tesisler açılmamış, talep miktarına, maliyete ve birçok diğer etkene göre optimum sayıda açılmıştır. Günümüzde ise bu tesislerin tamamı aktif olarak hizmet vermektedir. Makalede önerilen ağ modeli ile maliyet 830.560.000,00 TL azaltılmıştır. Böylece, önerilen ağ modeli ve geliştirilen matematiksel model ile mevcut sistemde %7,54 iyileştirme sağlanmıştır.

Senaryo 2'de ise son 3 yılın ve 2024 yılının ilk 7 ayının verileri doğrultusunda, trafikten kaydı silinen taşıt sayısının geçen yıla göre %14 azalacağı kabul edilerek model, optimizasyon yazılımı ile yeniden çözülmüştür. Bunun sonucunda 2024 yılında bölgede faaliyet gösteren tesislerin minimum maliyet tahmini 8.722.010.000 TL olmuş; önerilen model sayesinde mevcut duruma göre %20,86 iyileştirme sağlanacağı öngörülmüştür.

Üç senaryo için sonuçların özeti Tablo 10'da bulunabilir.

Tablo 10. Senaryo uygulama sonuçları özeti

	Mevcut Durum	Senaryo 1 (Önerilen Durum)	Senaryo 2 (Önerilen Durum 2024 Tahmini)
Toplam Ağ Maliyeti (TL)	11.020.500.000 TL	10.189.900.000 TL	8.722.010.000 TL
İyileştirme Miktarı (TL)	-	830.600.000 TL	2.298.490.000 TL
Mevcut Duruma Göre	-	%7,54	%20,86
İyileştirme Oranı			

Problemin çözümü, mevcut kapasite yetersizlikleri, maliyet artışları ve çevresel etkiler gibi sorunlara karşı kapsamlı bir yaklaşım sunarak, bölgede ÖTA'ların geri dönüşüm sürecini optimize etmeyi hedeflemiştir. Bu strateji, atık yönetiminde etkinliği artırmak ve sürdürülebilir bir atık yönetimi sistemini benimsemek adına somut çözümler sunmaktadır.

Geliştirilmiş senaryolar, mevcut tesislerin tamamının kullanılması yerine optimize edilmiş bir ağ yapısının maliyetleri daha da düşürebileceğini göstermiştir. Bu, sektörde kaynak kullanımını azaltırken, operasyonel verimliliği artırma potansiyeline sahiptir. Literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla, bu modelin gerçek verilerle desteklenmiş olması ve Marmara Bölgesi gibi geniş ve ticari anlamda kritik bir coğrafi alanda uygulanmış olması, çalışmanın kapsamını ve uygulama alanını genişleterek sektöre somut bir katkı sunmaktadır.

5. Sonuç

Ömrünü tamamlamış araçların (ÖTA) geri dönüşüm ve yeniden işleme sürecindeki mevcut sistemlerin, yüksek maliyetler ve tesislerin verimsiz kullanımı gibi önemli zorluklar içermektedir. Yürürlüğe konulan yeni yönetmelikler ve uygulamalarla birlikte üretimde atık yönetimi zorunlu hale getirilmiştir. Böylece atık yönetimi

konusunda var olan sistem dışında yeni ve daha iyi endüstriyel lojistik sistemlerine ihtiyaç vardır. Marmara Bölgesi, Türkiye'nin endüstri ve ticaret merkezlerinden biri olarak, atık yönetimi konusunda özel bir öneme sahiptir. Bölgedeki yoğun nüfus ve endüstri faaliyetleri, atık yönetimi süreçlerinin etkili bir şekilde planlanmasını ve uygulanmasını gerektirmektedir. Literatürde ÖTA'ların geri dönüşüm sürecine etkin bir şekilde dâhil edilmesi, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik getiriler açısından stratejik bir zorunluluk olarak ele alınmaktadır.

Bu doğrultuda çalışmada, Marmara Bölgesi'nde bulunan lisanslı araç toplama merkezleri, geçici depolama tesisleri, geri dönüşüm tesisleri, yeniden kazanım merkezleri ve bertaraf tesislerini içeren bir tersine lojistik ağı tasarlanmış ve karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeli geliştirilmiştir.

Geliştirilen modelin, Marmara Bölgesi'nde uygulaması yapılmış, belirlenen 12 il için önerilen çözümleri sunulmuştur. İllerdeki otomobil sayıları, kaydı silinen araç sayıları gibi verilerin toplanması, modelin temel girdilerini oluşturmuştur. Bu verilerin analizi, atık yönetimi süreçlerinin önceden belirlenmiş parametreler üzerinden şekillendirilmesini sağlamış ve modelin gerçek dünyadaki koşullara uygunluğunu güçlendirmiştir. İllere özgü araç sayıları ve atık miktarları, modelin çeşitliliği ve bölgesel farklılıkları dikkate almasını sağlamıştır. Mevcut durum ile yapılan kıyaslamada önerilen modelin daha düşük maliyet sonucu sağladığı görülmüştür.

Mevcut durum ve iki farklı senaryo üzerinden yapılan analizler şunları ortaya koymuştur: Mevcut sistemin maliyetleri yüksekken, önerilen tersine lojistik ağı modelinin uygulanması maliyetleri önemli ölçüde düşürmüştür. Ayrıca, 2024 yılındaki trafikten kaydı silinen araç sayısındaki değişimlerin tahminine göre modelin performansı değerlendirilmiş ve daha büyük maliyet iyileştirmeleri öngörülmüştür.

Bu çalışmanın sonuçları, ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesinde önemli bir adım olduğunu göstermektedir. Farklı politikalar ve seçeneklerin senaryolar ile değerlendirilmesi, karar vericilere daha geniş bir perspektif sunarak daha bilinçli kararlar almalarını sağlayabilir. Bu sonuçlar, sadece araştırılan bölge için değil, genel sürdürülebilir atık yönetimi politikalarının oluşturulmasında ve geri dönüşüm süreçlerinin yönetiminde karar vericiler için değerli bir rehber kaynak olabileceğini göstermektedir.

Makale, atık yönetimi süreçlerini etkinleştirmeyi ve bölgede geri dönüşüm süreçlerini optimize etmeyi amaçlayan kapsamlı bir lojistik model sunmuştur. Ancak, gerçek dünyada değişkenlik gösterebilecek birçok faktör olduğunu göz önünde bulundurulmalıdır. Atık yönetimi süreçlerinin etkinleştirilmesi, doğal kaynak kullanımında verimliliği artırarak enerji tasarrufuna ve sera gazı emisyonlarının azalmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, bölgesel ekonomik kalkınma ve istihdam artışı gibi toplumsal faydaların olası olduğu gözlemlenmektedir. Bu yüzden, modelin ekonomik başarıya ulaşabilmesi için yerel yönetimlerle, endüstri paydaşlarıyla ve toplumla etkileşimde bulunmak önemlidir. Maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirliği bir araya getiren bir çözümün, bölgede ve endüstride olumlu bir etki yaratma potansiyeli bulunmaktadır. Gelecekteki çalışmaların, bu alanda daha ileri adımlar atarak çevresel sürdürülebilirliği artırmaya odaklanması önerilir.

Bu çalışma, ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşüm süreçlerini optimize etmek için kapsamlı bir tersine lojistik ağı tasarımı sunmaktadır. Araştırmacıların bu konuda çalışabileceği potansiyel çalışma alanları arasında, modelin farklı senaryolar altında ve değişen sosyo-ekonomik koşullarda nasıl bir performans sergileyeceğinin araştırılması yer alabilir. Ayrıca, Marmara Bölgesi'nde elde edilen sonuçlar, diğer bölgeler veya ülkelerle karşılaştırılarak modelin genellenebilirliği ve farklı lojistik sistemlerde uygulanabilirliği değerlendirilebilir. Çalışmada maliyet minimizasyonu odaklı bir yaklaşım benimsenmiş olsa da ileride çevresel etkilerin azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve istihdam gibi çok amaçlı optimizasyon hedefleriyle daha kapsamlı modeller geliştirilebilir. Bunun yanı sıra, geri dönüşüm ağlarının zaman içinde dinamik yapısını ele alan modeller, tesislerin açılıp kapanma kararlarının uzun vadeli etkilerini değerlendirme fırsatı sunabilir. Bu tür çalışmalar, sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine yönelik önemli katkılar sağlayabilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Gülseli İşler ve Harun Reşit Yazgan, çözüm yönteminin önerilmesi, çözümün uygulanması, kavramsal çerçevenin oluşturulması, uygulama kısmının geliştirilmesi, makalenin oluşturulması ve düzenlenmesi konusunda, Aslı Sultan Altıneşik, literatür taraması, problemin ortaya konması, çözümün uygulanması, uygulama kısmının geliştirilmesi ve makalenin oluşturulması konusunda katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Ayvaz B., & Erdoğan, D. (2020). Ömrünü Tamamlamış Araçların Geri Kazanımı için Belirsizlik Altında Ağ Tasarımı. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 35-71. doi: <https://doi.org/10.46373/hafebid.654047>
- Balci, S. (2017). Ömrünü tamamlamış araçların geri kazanımı için sürdürülebilir çok amaçlı tersine lojistik ağ tasarımı (Publication No. 2000002371) [Yüksek lisans tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi].
- Cruz-Rivera, R., & Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of end-of-life vehicles in Mexico. *European journal of operational research*, 196(3), 930-939. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.04.041>
- Demirel, E., Demirel, N., & Gökçen, H. (2016). A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2101-2113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.079>
- Ene, S., & Öztürk, N. (2015). Network modeling for reverse flows of end-of-life vehicles. *Waste Management*, 38, 284-296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.007>
- Farel, R., Yannou, B., & Bertoluci, G. (2013). Finding best practices for automotive glazing recycling: a network optimization model. *Journal of Cleaner Production*, 52, 446-461. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.022>
- Govindan, K., & Gholizadeh, H. (2021). Robust network design for sustainable-resilient reverse logistics network using big data: A case study of end-of-life vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 149(1), 102279. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102279>
- Hagelüken, C. (2007). The challenge of open cycles-Barriers to a closed loop economy demonstrated for consumer electronics and cars. *Proceedings of R*, 7, 3-5.
- Harraz, N.A., & Galal, N.M. (2011). Design of sustainable end-of-life vehicle recovery network in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(3-4), 211-219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2011.09.006>
- Hashemi, S.E. (2021). A fuzzy multi-objective optimization model for a sustainable reverse logistics network design of municipal waste-collecting considering the reduction of emissions. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128577. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128577>
- He, M., Li, Q., Lin, T., Fan, J., Wu, X., & Han, X. (2024). Designing a Reverse Logistics Network for End-of-Life Vehicles in an Uncertain Environment. *World Electric Vehicle Journal*, 15(4), 140. doi: <https://doi.org/10.3390/wevj15040140>
- İşler, G., Akyol, D. E., & Yazgan, H. R. (2023). Theory and research concerning the circular economy model and future trend, *International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems*, Singapore, 769-782. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6062-0_74
- Kuşakcı, A. O., Ayvaz, B., Cin, E., & Aydın, N. (2019). Optimization of reverse logistics network of End of Life Vehicles under fuzzy supply: A case study for Istanbul Metropolitan Area. *Journal of cleaner production*, 215, 1036-1051. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.090>
- Liao, G. H. W., & Luo, X. (2022). Collaborative reverse logistics network for electric vehicle batteries management from sustainable perspective. *Journal of Environmental Management*, 324, 116352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116352>
- Mahmoudzadeh, M., Mansour, S., & Karimi, B. (2013). To develop a third-party reverse logistics network for end-of-life vehicles in Iran. *Resources, Conservation and Recycling*, 78, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.006>
- Mansour S., & Zarei M. (2008) A multi-period reverse logistics optimisation model for end-of-life vehicles recovery based on EU Directive. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(7), 764-777. doi: <https://doi.org/10.1080/09511920701685325>
- Merkisz-Guranowska, A. (2011). End-of-life vehicles recycling network design. *Journal of KONES*, 18, 261-268. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/266464034_End-of-life_Vehicle_Recycling_Network_Design
- Phuc, P. N. K., Vincent, F. Y., & Tsao, Y. C. (2017). Optimizing fuzzy reverse supply chain for end-of-life vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 757-765. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.11.007>

- Reddy, K. N., Kumar, A., Choudhary, A., & Cheng, T. E. (2022). Multi-period green reverse logistics network design: An improved Benders-decomposition-based heuristic approach. *European Journal of Operational Research*, 303(2), 735-752. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.014>
- Resmî Gazete. (2009, Aralık). Atık yönetimi genel esaslarına ilişkin yönetmelik. Retrieved from: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2009/12/20091230-5.htm>
- Roudbari, E. S., Ghomi, S. F., & Sajadieh, M. S. (2021). Reverse logistics network design for product reuse, remanufacturing, recycling and refurbishing under uncertainty. *Journal of manufacturing systems*, 60, 473-486. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.06.012>
- Shankar, R., Bhattacharyya, S., & Choudhary, A. (2018). A decision model for a strategic closed-loop supply chain to reclaim end-of-life vehicles. *International Journal of Production Economics*, 195, 273-286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.005>
- Simic, V. (2015). A two-stage interval-stochastic programming model for planning end-of-life vehicles allocation under uncertainty. *Resources, Conservation and Recycling*, 98, 19-29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.005>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (n.d.). Çevrimiçi çevre izin ve lisans portalı. Retrieved from: <https://eizin.cevre.gov.tr/Rapor/BelgeArama.aspx>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2022, Ocak). Motorlu kara taşıtları Aralık 2021. TÜİK. Retrieved from: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2021-45703>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023, Ocak). Motorlu kara taşıtları Aralık 2022. TÜİK. Retrieved from: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2022-49436>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024, Ocak). Motorlu kara taşıtları Aralık 2023. TÜİK. Retrieved from: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2023-49432>
- Zarei, M., Mansour, S., Husseinzadeh Kashan, A., & Karimi, B. (2010). Designing a Reverse Logistics Network for End-of-Life Vehicles Recovery. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010(1), 649028. doi: <https://doi.org/10.1155/2010/649028>