

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BATARYALARI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR
DÖNGÜSEL TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Samet ÇAKIR

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şeyda SERDAR ASAN

OCAK 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BATARYALARI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR
DÖNGÜSEL TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Samet ÇAKIR
(507201140)**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Endüstri Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şeyda SERDAR ASAN

OCAK 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 507201140 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Samet ÇAKIR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BATARYALARI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR DÖNGÜSEL TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Şeyda SERDAR ASAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özgür KABAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Arzum ÖZGEN
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05.01.2024**
Savunma Tarihi : **26.01.2024**





Aileme,



ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmamın yürütülmesinde desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen ve beni her daim yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Şeyda SERDAR ASAN'a teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Aynı zamanda tez sürecimi tamamlamamda verdikleri her türlü desteklerden ötürü aileme ve arkadaşlarıma ayrıca bir teşekkürü borç bilirim.

OCAK 2024

Mehmet Samet Çakır
(Endüstri Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
GİRİŞ	1
1. DÖNGÜSEL EKONOMİ KAPSAMINDA ELEKTRİKLİ ARAÇ	
BATARYALARI	5
1.1 Elektrikli Araçlar (EV).....	5
1.2 Elektrikli Araç Bataryaları	8
1.3 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Li-ion Bataryaların Döngüsel Ekonomi	
Kapsamında İncelenmesi	13
1.3.1 Yeniden üretim.....	15
1.3.2 Yeniden kullanım	16
1.3.3 Geri dönüşüm	18
2. LİTERATÜR TARAMASI	21
2.1 Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı	21
2.2 Sürdürülebilir Ağ Tasarımı	25
3. METODOLOJİ	33
3.1 Entropi Yöntemi.....	34
3.2 Çok Amaçlı Matematiksel Programlama	35
3.3 Basit Toplamlı Ağırlıklandırma (SAW).....	38
4. UYGULAMA.....	39
4.1 Aday Şehirlerin Belirlenmesi	39
4.2 Varsayımlar ve Değerlerin Elde Edilmesi.....	42
4.3 Problemin Matematiksel Modeli.....	44
4.4 Matematiksel Model Sonuçları	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR	67
EKLER.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	75



KISALTMALAR

AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci
CE	: Döngüsel Ekonomi
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
EV	: Elektrikli Araç
HEV	: Hibrit Elektrikli Araç
IBBS	: İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflandırması
LFP	: Lityum Demir Fosfat
MHEV	: Hafif Hibrit Elektrikli Araç
NCA	: Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NMC	: Nikel Manganez Kobalt Oksit
PHEV	: Plug in Hibrit Araç
SAW	: Basit Toplamlı Ağırlıklandırma
SEGE	: Sosyo Ekonomik Gelişmişlik Endeksi
SDG	: Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri
TBL	: Üçlü Bilanço
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
2L	: İkinci Yaşam



SEMBOLLER

CO₂ : Karbondioksit





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Lityum iyon bataryalarda sıklıkla kullanılan lityum oksitler ve kullanım alanları (Özcan vd., 2021).....	10
Çizelge 1.2: Batarya tiplerinin avantaj ve Dezavantajları (Ayuso ve diğ., 2021)	12
Çizelge 2.1: Problemin kapsamına ve çözüm yöntemine göre literatür.	23
Çizelge 2.1 (devam): Problemin kapsamına ve çözüm yöntemine göre literatür.	24
Çizelge 2.2: Sürdürülebilirliği dikkate alan çok amaçlı modeller literatür taraması.	27
Çizelge 4.1: İstatistikî Bölge Birimleri Sınıflandırması (ka.gov.tr).	40
Çizelge 4.2: Sabit açılış ve operasyon maliyetler ve yararlanılan çalışmalar.....	43
Çizelge 4.3: SEGE kademelerine göre sabit açılış ve operasyon maliyetleri.....	43
Çizelge 4.4: Sosyal fayda kriter ağırlıkları.	44
Çizelge 4.5: Ödünleşme çizelgesi.....	52
Çizelge 4.6: Grid noktalar.....	53
Çizelge 4.7: Pareto optimal çözüm kümesi.	54
Çizelge 4.8: Normalize pareto optimal çözüm kümesi.....	56
Çizelge 4.9: 2.senaryonun pareto optimal çözüm kümesi.	57
Çizelge 4.10: 2. senaryonun normalize pareto optimal çözüm kümesi.	58
Çizelge 4.11: Senaryo 3'e göre pareto optimal çözüm kümesi.	59
Çizelge 4.12: Senaryo 3'e göre normalize pareto optimal çözüm kümesi.....	60
Çizelge A.1: Sabit Açılış ve Operasyon Maliyeti (€).	73
Çizelge A.2: Hammadde Satın Alma Maliyeti (€).	74
Çizelge A.3: Çeşitli Maliyetler (€).	74
Çizelge A.4: Emisyon Çeşidi.....	74
Çizelge A.5: Talep Miktarı.	74
Çizelge A.6: Toplanan Batarya Sayıları.	74



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Yıllara göre elektrikli araç sayısı (https://www.virta.global).	6
Şekil 1.2: 2020-2040 arası elektrikli araç satış oranı (www.goldmansachs.com).	7
Şekil 1.3: Türkiye’de yıllara göre elektrikli araç sayısı (SHURA, 2019).	8
Şekil 1.4: Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların temsili zaman çizelgesi (Balcı ve diğ., 2023).	9
Şekil 1.5: Batarya tiplerinin gelecekteki pazar payları (Wood Mackenzie, 2020)	11
Şekil 1.6: 2020 yılına göre 2040 yılında minerallere olan talep artış oranı (Uluslararası Enerji Ajansı, 2021).	13
Şekil 1.7: Ömrünü tamamlamış bataryaların 2L alternatifleri(Akram & Abdul-Kader, 2023).	15
Şekil 1.8: Li-ion Bataryaların EOL sonrası yeniden üretim süreci (Akram & Abdul-Kader, 2023).	16
Şekil 1.9: Olası ikinci yaşam döngüsü (Kotak ve diğ., 2021).	17
Şekil 1.10: Yeniden kullanım sürecinin aşamaları (Akram & Abdul-Kader, 2023).	17
Şekil 1.11: Geri Dönüşüm sürecinin aşamaları (Akram & Abdul-Kader, 2023).	19
Şekil 2.1: Problemin kapsamına ve çözüm yöntemine göre KDTZAT	21
Şekil 2.2: Çalışmada önerilen kapalı döngü tedarik zinciri modeli	25
Şekil 3.1: Problemin akış şeması.	33
Şekil 4.1: SEGE Sıralaması (SEGE il raporu, 2017).	41
Şekil 4.2: Alternatif iller.	41
Şekil 4.3: Alternatif iller ve tesislerin harita üzerinde gösterimi.	42
Şekil 4.4: Ekonomik amaca göre oluşan tedarik zinciri ağı.	54
Şekil 4.5: Çevresel amaca göre oluşan tedarik zinciri ağı.	55
Şekil 4.6: Sosyal amaca göre tedarik zinciri ağı.	55
Şekil 4.7: Optimum sonuç için tedarik zinciri ağı.	57
Şekil 4.8: Senaryo 2’ye göre tedarik zinciri ağı.	58
Şekil 4.9: Senaryo 3’ye göre tedarik zinciri ağı.	60
Şekil 4.10: Ekonomik amaç fonksiyonunun senaryolara göre aldığı değerler.	61
Şekil 4.11: Çevresel amaç fonksiyonunun senaryolara göre aldığı değerler.	61
Şekil 4.12: Sosyal amaç fonksiyonunun senaryolara göre aldığı değerler.	62



ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR DÖNGÜSEL TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI

ÖZET

Dünya genelinde artan nüfus ve enerji tüketimi, iklim krizini derinleştiren faktörler arasında bulunmaktadır. Hızla büyüyen nüfus, fosil yakıt tüketimini ve atmosfere sera gazı salınımını artırmıştır. Aralarında Türkiye'nin de bulunduğu 175 ülke temsilcileri tarafından 22 Nisan 2016 tarihinde imzalanan Paris Antlaşması gereğince 2053 yılında net sıfır emisyon hedeflenmektedir. Bu hedef kapsamında geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar yerine elektrikli araçların kullanımının yaygınlaştırılması için gelişmiş ve sürdürülebilir ulaşım politikaları benimsenmeye başlamıştır. Elektrikli araçların bataryaları, Avrupa Komisyonu tarafından Döngüsel Ekonomi Eylem Planı kapsamında öncelikli ürün gruplarından birisi olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, elektrikli araç bataryaları döngüsel ekonomi kapsamında ele alınmıştır. Elektrikli araçların bataryalarının ortalama olarak 8-10 yıl süren faydalı ömrü sonunda yeniden üretim, yeniden kullanım ve geri dönüşüm gibi stratejiler ile ekonomiye yeniden kazandırılması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, 2036 yılındaki durum ve sürdürülebilirliğin üç boyutu (ekonomik, çevresel ve sosyal) dikkate alınarak tedarik zinciri ağ tasarımı için çok amaçlı bir model kurulmuştur. Ekonomik amaç tedarik zinciri maliyet minimizasyonu, çevresel amaç tedarik zinciri süreçlerinde ortaya çıkan karbon emisyon minimizasyonu, sosyal amaç ise seçilen tesislerin bulunduğu coğrafyalardaki sosyal fayda maksimizasyonu şeklinde tanımlanmıştır. Sosyal fayda değerlendirirken Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda şehirlerdeki işsizlik oranı, iş bulma sebebiyle dışarıya gerçekleşen göç oranı, yoksulluk oranı, gelir eşitsizliği ve kadın-erkek istihdam eşitsizliği kriterleri kullanılmıştır. Belirlenen bu kriterler ENTROPİ yöntemi kullanılarak ağırlandırılmıştır ve modelde kullanılmıştır. Oluşturulan model, Türkiye örneği için literatürde çok amaçlı modellerde etkin bir çözüm algoritması sunan AUGMECON2 tekniği GAMS programı ile çözüme kavuşturulmuş ve Pareto Optimal çözüm kümesi elde edilmiştir. Sonuç olarak Pareto optimal çözüm kümesinde Basit Toplamlı Ağırlıklandırma (SAW) yöntemi kullanılarak amaçları en iyileyen servis ve toplama merkezi, geri dönüşüm merkezi ve imha merkezinin yerleri alternatif iller arasından belirlenmiştir. Bu çalışma, elektrikli araç bataryalarının döngüsel sürdürülebilir tedarik zinciri ağ tasarımı kapsamında ele alınmasının sosyal, çevresel ve ekonomik faydalarını ortaya koymaktadır.



SUSTAINABLE CLOSED LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN FOR ELECTRIC VEHICLE BATTERIES

SUMMARY

Increasing population and energy consumption worldwide are among the factors deepening the climate crisis. The rapidly growing population has increased fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions into the atmosphere. According to the Paris Agreement signed on April 22, 2016 by representatives of 175 countries, including Turkey, net zero emissions are targeted by 2053. Within the scope of this target, advanced and sustainable transportation policies have started to be adopted to expand the use of electric vehicles instead of traditional internal combustion engine vehicles. The European Commission has identified electric vehicle batteries as one of the priority product groups under the Circular Economy Action Plan. In this study, electric vehicle batteries are considered within the scope of circular economy. At the end of the useful life of the batteries of electric vehicles, which lasts 8–10 years on average, they are aimed at being reintroduced to the economy through strategies such as remanufacturing, reuse, and recycling. Accordingly, a multi-objective model for supply chain network design is established, considering the situation in 2036 and the three dimensions of sustainability (economic, environmental, and social). The economic objective is defined as supply chain cost minimization, the environmental objective as carbon emission minimization in supply chain processes, and the social objective as social benefit maximization in the geographies where the selected facilities are located. In line with the Sustainable Development Goals, the unemployment rate in cities, the migration rate due to finding a job, the poverty rate, income inequality, and gender employment inequality were used to evaluate social benefits. These criteria were weighted using the ENTROPY method and used in the model. The model was solved for Turkey using the GAMS program and the AUGMECON2 method, which is a good solution algorithm for multi-objective models. This led to the discovery of a Pareto optimal solution set. So, in the Pareto optimal solution set, the Simple Additive Weighting (SAW) method was used to find the best locations for the service and collection center, recycling center, and disposal center based on the different provinces. This study demonstrates the social, environmental, and economic benefits of considering electric vehicle batteries in the context of a circular, sustainable supply chain network design.



GİRİŞ

Küresel iklim değışikliği, dünya genelinde hızla artan sıcaklık, ekstrem hava olayları, deniz seviyelerinde yükselme ve ekosistemlerde bozulma gibi belirgin değışimlere işaret eden bir tehdittir. Fosil yakıtların aşırı kullanımı, sanayileşme ve diğer insan faaliyetleri sonucunda atmosferde biriken sera gazları, gezegenimize giderek artan bir şekilde zarar vermektedir. Küresel iklim kriziyle mücadele, sürdürülebilir enerji kullanımına geçiş ve karbon salınımlarının azaltılması gibi çeşitli önlemleri içermektedir. Bu durum, ulaşım sektöründe geleneksel içten yanmalı motorlu araçlardan elektrikli araçlara geçişı içeren köklü bir değışimi beraberinde getirmektedir. Goldman Sachs Araştırma Merkezinin tahminlerine göre dünya genelinde elektrikli araç satışının 2040 yılında yaklaşık 73 milyon adede yükselmesi beklenmektedir (www.goldmansachs.com).

Elektrikli araçlar, ulaşım sektöründe önemli bir dönüşümü temsil ederken, bu araçların enerji depolama sistemleri, yani bataryaları, özellikle dikkat çeken kritik bileşenler arasında bulunmaktadır. Elektrikli araçlarda ilk kullanım ömrü 8-10 yıl arasında değışen bataryaların ömrünü tamamladıktan sonraki süreç, gelecek nesillere sürdürülebilir bir dünya bırakmak için büyük önem arz etmektedir. Bataryaların içeriğinde bulunan mineralleri çıkartma maliyetlerinin yüksek olması ve tedarığının çeşitli riskler barındırması nedeniyle döngüsel ekonomi kapsamında incelenmesi önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, elektrikli araçların bataryaları Avrupa Komisyonu tarafından Döngüsel Ekonomi Eylem Planı kapsamında öncelikli ürün gruplarından birisi olarak belirlenmiştir (Avrupa Birliği Resmi Gazetesi, 2023) İlk ömrü sonunda bataryaların ekonomiye yeniden kazandırılması ve piyasada uzun yıllar kullanılması için yeniden üretim, yeniden kullanım ve geri dönüşüm gibi stratejiler bulunmaktadır. Servis ve toplama merkezlerinde toplanan bataryaların sağlık durumuna göre bu stratejilerden hangisinin uygulanacağına karar verilip, gerekli işlemler gerçekleştirildikten sonra ikincil kullanım için piyasaya sunulmaktadır. Bataryaların döngüsel ekonomi bağlamında ikincil ömürleri üzerine odaklanılırken,

sürdürülebilir tedarik zinciri için çevresel, ekonomik ve toplumsal etkileri göz önünde bulundurmak ayrıca önemlidir.

Sürdürülebilirlik için ekonomik kalkınma, ekolojik denge ve sosyal adaletin bir arada ele alınması gerektiğini vurgulayan Üçlü Bilanço (*ing. Triple Bottom Line -TBL*) Elkington, (1997) yaklaşımının kullanımı yaygındır. Literatürde sürdürülebilirlik yaklaşımını el alan döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmaları çok amaçlı matematiksel modeller kullanılarak optimize edilmek istenmiştir. Çeşitli sektörlerde gerçekleştirilen çalışmalarda ekonomik kalkınma genellikle tedarik zinciri maliyetlerini minimize etmek üzerine kurulmuştur. Ekolojik denge boyutunda, tedarik süreçleri boyunca ortaya çıkan karbon emisyon değeri, su ayak izi gibi çevresel faktörlerin olumsuz etkilerini en küçükmek istenmiştir. Sosyal boyut için ise kullanılan çeşitli kriterler vasıtasıyla toplumsal fayda maksimize edilmektedir. Elektrikli araçların bataryaları için tedarik zinciri ağ tasarımı konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde sürdürülebilirlik boyutlarını ekonomik ve çevresel açıdan ele aldıkları görülmektedir.

Fan ve diğ.(2023), elektrikli araçların bataryaları için çok ürünlü ve çok teknoloji tersine lojistik ağ tasarımı çalışması gerçekleştirmiştir. Oluşturulan çok amaçlı matematiksel modelde sürdürülebilirlik ilkelerini ekonomik ve çevresel açıdan incelemiştir. Ekonomik amaç fonksiyonu, tedarik zinciri maliyetini minimize etmeye odaklanırken, çevresel amaç fonksiyonu karbon emisyon miktarını minimize etmeyi hedeflemektedir.

Tavana ve diğ. (2023) çalışmasında, belirsizlik altındaki elektrikli araç lityum-iyon pillerinin üretimini, yeniden üretimini ve dağıtımını yönetmek amacıyla IoT ve büyük verileri kullanarak sürdürülebilir bir döngüsel tedarik zinciri tasarlamak için iki amaçlı bir karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Sürdürülebilirlik bakış açısının ekonomik ve çevresel boyutlarının kullanıldığı bu çalışmada, toplam maliyetlerin ve CO2 emisyonlarının aynı anda en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada, elektrikli araçların bataryaları için sürdürülebilir döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı yapılmış ve sürdürülebilirliğin üç boyutu için çok amaçlı matematiksel model oluşturulmuştur. Ekonomik amaç fonksiyonu, tedarik zinciri maliyetini en aza indirmeyi hedeflerken, çevresel amaç fonksiyonu minerallerin elde edilme aşamasından itibaren imha edilinceye kadarki süreçlerde ortaya çıkan

karbon emisyon miktarını minimize etmektedir. Sosyal boyut ise alternatif tesis yerleri arasından bölgeye en fazla toplumsal fayda sağlayacak alternatiflerin seçilmesini sağlamaktadır. Oluşturulan model literatürde çok amaçlı modellerde sıklıkla kullanılan AUGMECON2 yöntemi ile çözülmüştür ve Pareto optimal çözüm kümesi elde edilmiştir.

Tezin akışı şu şekildedir. Birinci bölümde elektrikli araçların bataryaları döngüsel ekonomi kapsamında incelenmiştir. Elektrikli araçlarda kullanılan li-ion bataryaların hakkında bilgilendirme yapılmıştır ve ardından ilk ömürleri sonucunda ekonomiye yeniden kazandırılması için kullanılan stratejilerden bahsedilmiştir. İkinci bölümde literatürde çeşitli sektörlerde yapılan kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmaları incelenmiştir. Ayrıca sürdürülebilirlik boyutlarını dikkate alan tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmaları incelenmiştir. Elektrikli araçların bataryaları için yapılan döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmalarında kullanılan ekonomik ve çevresel boyuta ek olarak bu çalışmada sosyal boyut için kullanılan kriterler açıklanmıştır. Üçüncü bölümde bu çalışma kapsamında kullanılan Entropi, AUGMECON2 ve Basit Toplamlı Ağırlıklandırma yöntemlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü kısımda ise bu çalışma doğrultusunda oluşturulan çok amaçlı matematiksel model, aday şehirlerin belirlenmesi, varsayımlar ve değerlerin elde edilmesinden bahsedilmiş olup, sonuçlar paylaşılmıştır. Ayrıca, son bölümde bu çalışma için genel çıkarımlardan bahsedilmiştir ve gelecek çalışmalarda kullanılması adına öneriler sunulmuştur.



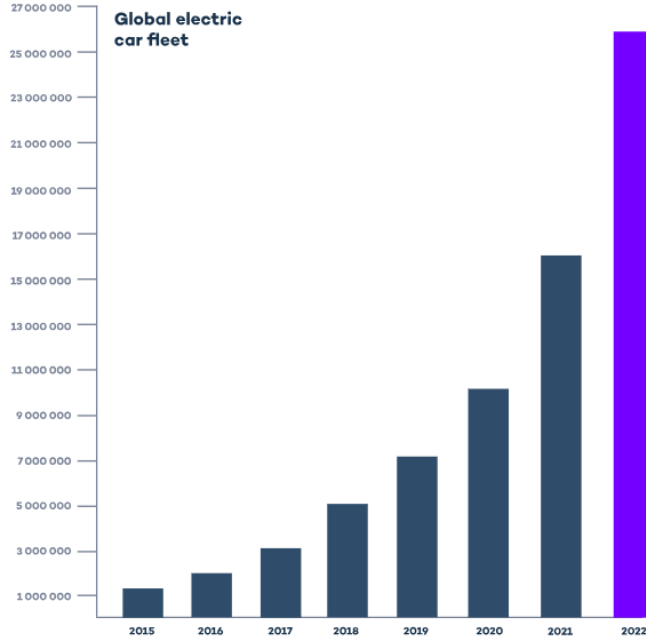
1. DÖNGÜSEL EKONOMİ KAPSAMINDA ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI

Bu bölümde elektrikli araçlar, elektrikli araçların bataryaları, sürdürülebilir döngüsel tedarik zinciri ve sürdürülebilirliğin üç boyutu için çok amaçlı modelleme literatürü incelenmiştir.

1.1 Elektrikli Araçlar (EV)

İleri itiş için bir veya birden fazla elektrik motoru kullanarak bataryalardan gelen elektriği harekete dönüştüren araçlara elektrikli araçlar denilmektedir. Elektrikli araçların tarihi 19.yy'a dayanmaktadır. O dönemde araçların elektrikli motorlarla çalıştırılabileceği düşünülmesine rağmen, düşük pil kapasitesi ve yarı iletken teknolojisinin ihtiyacı karşılayabilecek düzeyde olmamasından rota tamamen içten yanmalı motorlara çevrilmiştir. (Özbay ve diğ., 2020). 20.yy ile birlikte içten yanmalı motorlu araçlar, altyapısal ve ekonomik avantajları nedeniyle ulaşım sektöründe önemli bir konum elde etmiştir. Çevresel endişelerin artması ve teknolojik ilerlemelerinde etkisiyle 21.yy başlarında elektrikli araçlara olan ilgi yeniden artmıştır. Son yıllarda hükümet teşvikleri, çevresel düzenlemeler ve teknolojik yeniliklerle birlikte, birçok otomobil üreticisi elektrikli araç segmentine önemli yatırımlar yaparak, sürdürülebilir ulaşımın ve düşük karbonlu ekonominin hedeflerine katkıda bulunma çabası içindedir. Ayrıca elektrikli araçlar, sera gazı emisyonlarını ve hava kirliliğini azaltmanın etkili bir yolu olarak kabul edilmekte ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır (Peters ve diğ., 2020). Küresel çapta artmakta olan enerji sürdürülebilirliği arayışı, çevresel endişeler ve teknolojik ilerlemeler, ulaşım sektörünü kökten değiştirmeye yönelik önemli bir dönüşümü beraberinde getirmektedir. Bu dönüşüme öncülük edenlerden biri de elektrikli araçlardır. Son yıllarda Dünya'daki EV satışları incelendiğinde, 2022 yılında 10 milyonu aşmıştır ve bu durum toplam yeni araç satışlarının %14'ünü oluşturmaktadır. Bu oran, 2021'deki %9 ve 2020'deki %5'e ile kıyaslandığında küresel çaptaki benimsenen sürdürülebilir ulaşım çözümlerine artan ilgiyi ifade etmektedir. Ayrıca 2022 itibarıyla, Dünya

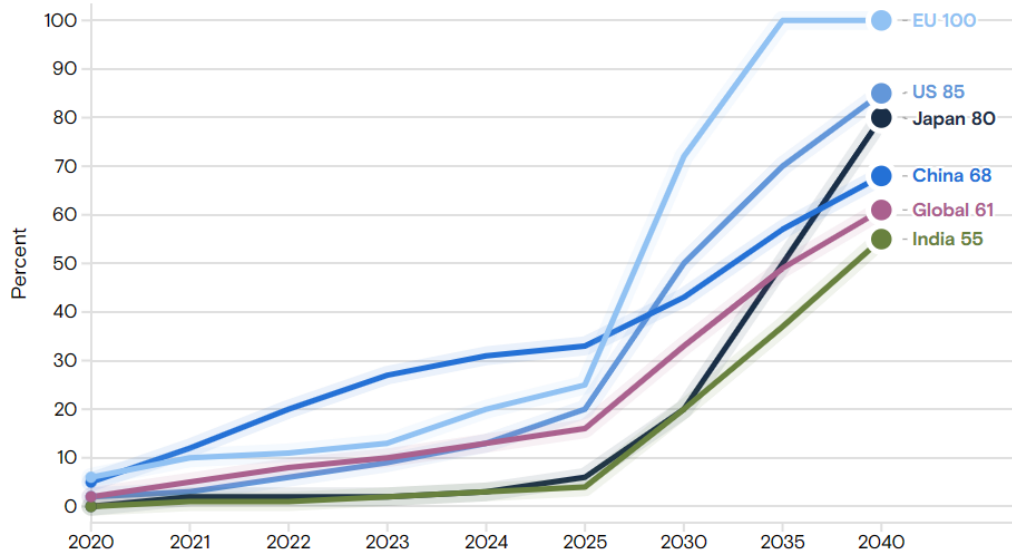
genelindeki elektrikli araç sayısı bir önceki yıla göre %60 artarak 26 milyonun üzerine çıkmıştır (<https://www.virta.global>).



Şekil 1.1: Yıllara göre elektrikli araç sayısı (<https://www.virta.global>).

2023'ün ilk çeyreğinde EV satışları geçen yılın aynı dönemine göre %25 artarak 2.3 milyon olmuştur (<https://www.virta.global>). Bir başka çalışmaya göre 2023 yılı sonunda satılacak EV sayısı 14.1 milyona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu sayı geçen yıla göre %34'lük artışa tekabül etmektedir(www.ev-volumes.com). Dünya genelinde EV'lere geçisin giderek hızlanacağı tahmin edilmektedir. Goldman Sachs Araştırma Merkezinin tahminlerine göre EV satışları 2020 yılında gerçekleşen yaklaşık 2 milyon adetten 2040'ta yaklaşık 73 milyon adede yükselecek (www.goldmansachs.com). Böylece dünya çapındaki otomobil satışlarında elektrikli araçların yüzdesinin bu aralıkta %2'den %61'e yükselmesi beklenmektedir. Birçok gelişmiş ülkede ise satışlarda elektrikli araç payının %80'in üzerinde olması bekleniyor (www.goldmansachs.com).

Electric vehicle sales ratio (%)



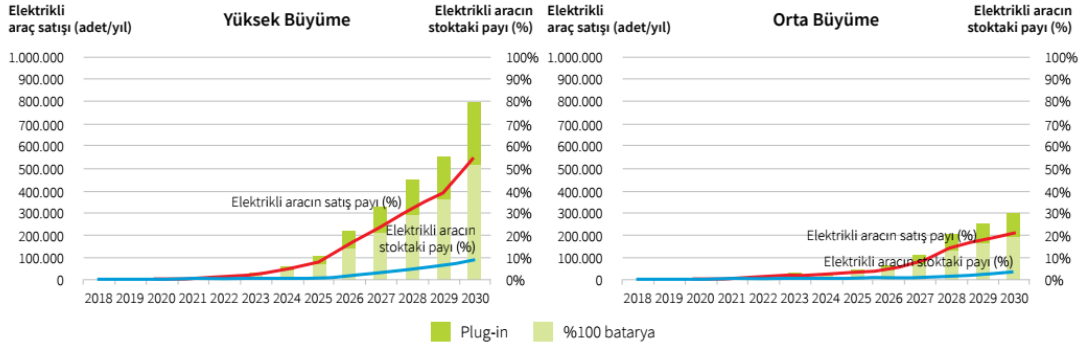
Source: IHS Global Insight, Goldman Sachs Research • 2022-2040 are forecasts

Goldman
Sachs

Şekil 1.2: 2020-2040 arası elektrikli araç satış oranı (www.goldmansachs.com).

Son yıllarda Türkiye'deki EV satışları incelendiğinde 2022 Ocak - Kasım döneminde satılan tüm elektrikli araç sayısı (HEV, PHEV, MHEV) 55.593 iken bu rakam 2023 Ocak - Kasım periyodunda %60,1 artarak 89.013 olmuştur. 2023 yılının aynı dönemde satılan BEV sayısı ise geçen yıla oranla %867,2 artarak 60.101'e ulaşmıştır. 2022 yılında %12,2 olan EV pazar payı 2023 yılında %17,7'ye yükselmiştir. (ODMD, 2023).

Shura Enerji Dönüşüm Merkezinin 2019 yılındaki yayınladığı rapordaki Yüksek Büyüme senaryosuna göre Türkiye'de 2030 yılında toplam binek araç satışlarının %55'inin PHEV ve BEV'den oluşacağı öngörülmüştür. Ayrıca 2030 yılı sonunda kullanılan toplam elektrikli araç sayısının 2.5 milyon seviyesine çıkacağı düşünülmektedir (Şekil 2.3) (SHURA, 2019).

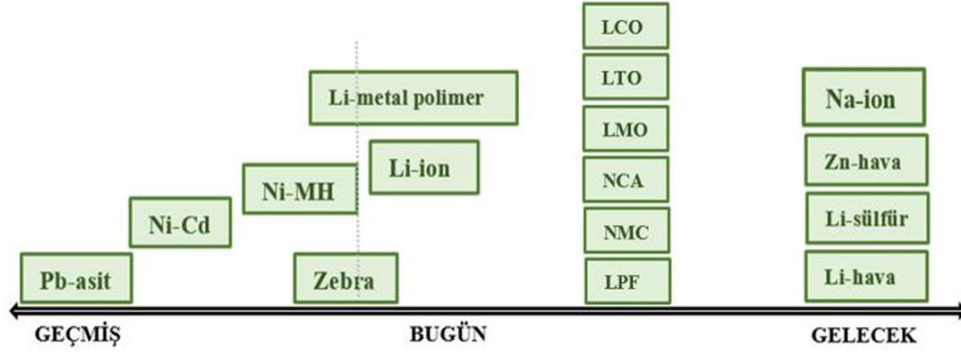


Şekil 1.3: Türkiye’de yıllara göre elektrikli araç sayısı (SHURA, 2019).

EV pazar payının artması, her ne kadar sera gazı emisyonlarını azaltacağı beklentisi doğurmuş olsa da, elektrikli araçların ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin karşılanması için kullanılan teknoloji çevresel açıdan önemlidir. Elektrikli araçlar genellikle şebeke elektriği ile şarj edildiğinden, bu elektriğin ne kadarının yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği büyük bir önem arz etmektedir. Fosil yakıtlara dayalı elektrik üretimi, elektrikli araçların çevresel avantajlarını azaltabilir. Ayrıca, elektrikli araçların sağlıksal ve çevresel etkilerini inceleyen bir çalışmada, elektrikli araçların insan sağlığına olan toksik etkisinin %45-47 oranının elektrikli araç bataryalarından kaynaklandığı belirtilmektedir (Dişcioğlu, 2022).

1.2 Elektrikli Araç Bataryaları

Bir cihazın çalışması için ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini sağlayan ve depolayan cisme batarya denilmektedir. Temelde bataryalar şarj edilebilme duruma göre ikiye ayrılmaktadır. Tek kullanımlık bataryalara primer, birden çok kez şarj edilebilen bataryalara ise sekonder piller denilir. Elektrikli araç bataryalarında geçmişten günümüze birçok farklı batarya çeşidi kullanılmıştır. Kurşun – asit (Pb-Asit), nikel – kadmiyum (Ni-Cd), nikel – metal hibrit(Ni-MH), sodyum nikel klorür(Zebra) ve lityum – ion bataryalar elektrikli araçlarda kullanılan bataryalara örnek verilebilir. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların temsili zaman çizelgesi Şekil 2.4’da verilmiştir (Balcı ve diğ., 2023).



Şekil 1.4: Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların temsili zaman çizelgesi (Balcı ve diğ., 2023).

Tarih boyunca kullanılan en eski akü teknolojilerinden birisi olan kurşun-asit(Pb-asit) piller kurşun elektrotları ve asidin birleşiminden oluşmaktadır. Kurşun toksik bir element olmasına karşın maliyet açısından en uygun pil çeşitleri arasında yer almaktadır. Günümüzde elektrikli scooter, tekerlekli sandalye, golf arabası gibi hafif elektrikli araçlarda temel enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (Özbay ve diğ., 2020).

Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) bataryalar geçmiş dönemlerde oyuncaklar, taşınabilir elektronik cihazlar ve kameralar gibi alanlarda kullanılmıştır. Ni- Cd bataryalar hem uzun şarj süreleri, uzun süre kullanılmadığın kendini boşaltması olumsuz özelliklerini olması hem de içeriğinde bulunan kadmiyum ağır metalinin çevreye olan zararından dolayı kullanımı azalmıştır (Yong ve diğ., 2015).

Nikel-metal hibrit(Ni-MH) bataryalar özellik ve üretim bakımından Ni-Cd bataryalara benzer niteliktedir. İçeriğinde kadmiyum ağır metali bulundurmaması, yüksek çevrim ömrü ve enerji yoğunluğu Ni-MH bataryaların avantajları arasında yer almaktadır. Elektrikli araçlarda Ni-MH ile yaklaşık aynı zamanlarda kullanılmaya başlanan sodyum nikel klorür olarak adlandırılan ZEBRA bataryalar, 245 ile 350 yüksek sıcaklık aralığında çalışan şarj edilebilir bataryalardır. Lityum-iyon bataryalara kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olsalar da, belirli uygulamalarda uygun bir enerji depolama çözümü olarak tercih edilebilirler.

Lityum-iyon (Li-ion) piller, çeşitli avantajları nedeniyle elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu piller yüksek enerji yoğunluğu, uzun kullanım ömrü ve hafiflik sunduğundan elektrikli araçlara güç sağlamak için uygundur (Farzan Moghaddam & Van den Bossche, 2019). Elektrikli araçlarda Li-ion pillerin yaygın olarak kullanılmasına rağmen, yangın ve patlama sonuçlarına yol açabilecek termal

kaçakla ilgili güvenlik endişeleri vardır. Bununla birlikte, bu güvenlik sorunlarını ele almak ve elektrikli araçlarda Li-ion pillerin genel güvenliğini artırmak için çaba sarf edilmektedir (Barelli ve diğ., 2021).

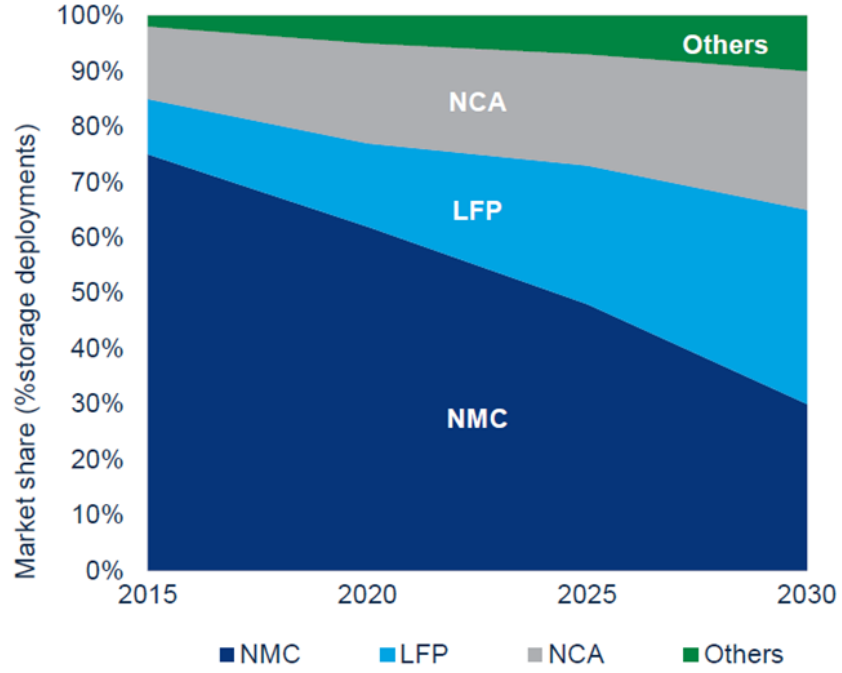
Li-ion bataryaların temel bileşenleri arasında pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), elektrolit ve ayırıcı bulunur (Özbay ve diğ., 2020). Katot ve anot için seçilecek bileşen türü, bir araya geldiklerinde ortaya çıkan özelliklerle birlikte, bataryanın karakteristiklerini ve performansını belirlemektedir. Bu nedenle, hücre tasarımı veya batarya sistemi seçerken katodun dikkatlice seçimi önemlidir (Erciyes, 2020). Lityum iyon pillerde, lityum metal oksitlerin kullanılması, diğer materyallere kıyasla düşük toksit, yüksek kapasite ve uygun maliyet gibi avantajlar sunmaktadır (Özbay ve diğ., 2020). Lityum iyon bataryalarda sıklıkla kullanılan lityum oksitler ve kullanım alanları Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1: Lityum iyon bataryalarda sıklıkla kullanılan lityum oksitler ve kullanım alanları (Özcan vd., 2021).

Tür	Kısaltma	Kullanım Alanı
Lityum Kobalt Oksit	LCO	Cep Telefonları, Tabletler, Dizüstü Bilgisayarlar, Kameralar
Lityum Manganez Oksit	LMO	Elektrikli Aletler, Tıbbi Cihazlar, Güç Aktarma Organları
Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit	NMC	E-Bisikletler, Tıbbi Cihazlar, Elektrikli Araçlar
Lityum Demir Fosfat	LFP	Elektrikli Araçlar
Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit	NCA	Tıbbi, Endüstriyel, Elektrikli Araçlar
Lityum Titanat Oksit	LTO	Elektrikli Araçlar, Güneş Sokak Aydınlatması

Elektrikli araçlarda çoğunlukla li-ion bataryalara ait lityum demir fosfat (LFP), lityum nikel manganez kobalt oksit (NMC) ve lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) katot malzemeleri kullanılmaktadır. Günümüzde NMC bataryalar elektrikli araçlarda daha çok tercih edilmektedir. Ancak, Wood Mackenzie tarafından 2020 yılında yayınlanan raporda LFP bataryaların önümüzdeki yıllarda NMC bataryaları geride bırakacağına değinilmiştir. “LFP, on yıl içinde NMC üzerinde üstünlük sağlamaya

hazırlanıyor; 2015'te pazarın %10'undan 2030'da %30'un üzerine çıkması bekleniyor."(Wood Mackenzie, 2020).



Şekil 1.5: Batarya tiplerinin gelecekteki pazar payları (Wood Mackenzie, 2020)

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar çeşitlerinin güvenlik, performans, ömür, özgül güç, özgül enerji ve maliyet bakımından dezavantajları ve avantajları vardır. LFP tip batarya diğer batarya tiplerine göre yüksek çevrim ömrüne ve güvenliğe sahiptir ancak enerji yoğunlukları düşüktür (Erciyes, 2020). Fosfat, kobalt mineralinden daha çevreci ve maliyet bakımından uygun olması bu tip bataryaların avantajları arasında yer almaktadır. Ancak özgül enerjisinin düşük olması dezavantaj olarak yorumlanabilir. NMC tip bataryalar günümüzde en yaygın kullanılan li-ion bataryalardan birisidir. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları en büyük avantajlarındandır. NCA bataryalar, LFP bataryalara kıyasla yüksek enerji yoğunluğuna ve güce sahip olmaları bakımından NMC tip bataryalara benzemektedir. Düşük güvenlik düzeyine ve yüksek maliyete sahip olmaları en büyük dezavantajlarıdır. LFP, NMC ve NCA tip bataryaları Tablo 2.2’de avantaj ve dezavantaj bakımından karşılaştırılmıştır.

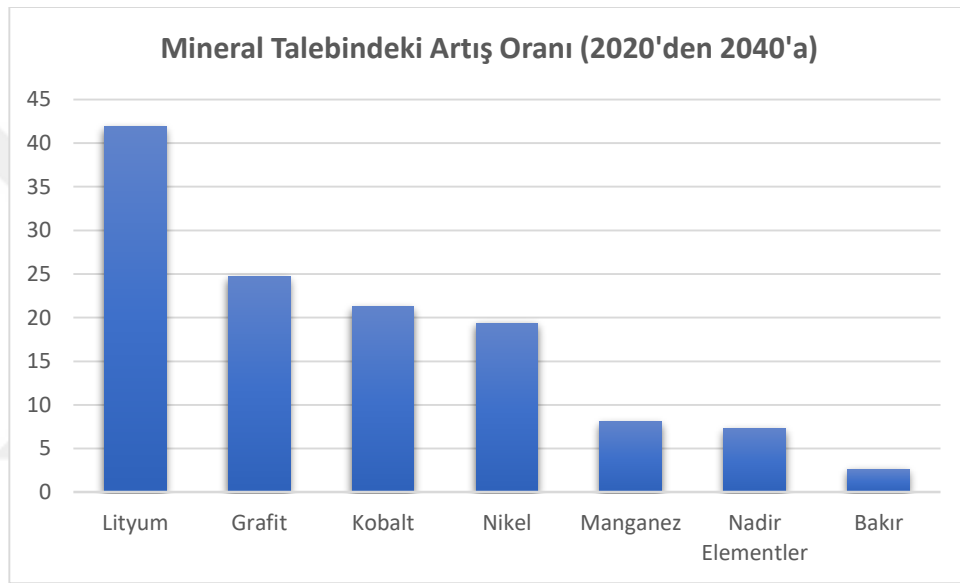
Çizelge 1.2: Batarya tiplerinin avantaj ve Dezavantajları (Ayuso ve diğ., 2021)

Tür	Avantaj	Dezavantaj
LFP	Çevrim Ömrü Güvenlik Performans Maliyet	Düşük Özgül Enerji Düşük Özgül Güç
NMC	Performans Maliyet Yüksek Özgül Enerji	-
NCA	Performans Yüksek Özgül Enerji Yüksek Özgül Güç	Yüksek Maliyet Düşük Güvenlik

Bataryaların kullanım ömrünü belirleyen etkenler arasında yüksek sıcaklık, şarj-deşarj hızı ve kullanım sırasındaki şarj seviyeleri yer almaktadır (Güven ve Gedik, 2019). Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların belirli bir şarj döngüsünden sonra pil kapasitesi %80'in altına düştüğünde artık kullanım için uygun olmayacaktır. Bu süre ortalama olarak 8 ile 10 yıl arasında değişmektedir. Avustralya'da yapılan çalışmada gelecek yıllarda elektrikli araçlara olan talebin artacağı düşünüldüğünde li-ion pil üretmek için gereken mineral miktarının karşılanamayabileceğinden bahsedilmiştir (Wilson ve diğ., 2021). Elektrikli araçlarda ömrünü tamamlamış bataryaların sonrasındaki geri dönüşümü ve geri kazanımı, içerdikleri değerli metallerin tekrar kullanılması hem çevresel hem de ekonomik açıdan önem teşkil etmektedir (Olapiriyakul & Caudill, 2008). Elektrikli araç pillerinde kullanılan lityum, kobalt, nikel ve manganez gibi kritik mineraller, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan li-ion pillerin üretimi için gereklidir. Kullanılan li-ion pillerin geri dönüşümü, bu kritik metallerin tedarikine katkıda bulunabilir ve bu malzemelere yönelik artan küresel talebi karşılayabilir (Gmar ve diğ., 2022).

"Li-ion pillerin üretimi, AB için Kritik Hammaddeler kategorisine giren bir dizi farklı hammaddeye duyulan yüksek ekonomik bağımlılığı ve beraberinde getirdiği tedarik riskleri nedeniyle dikkat çekmektedir. LIB'lerin üretiminde kullanılan malzemeler arasında özellikle Kobalt ve Lityum, gelecekteki kaynak kısıtlamaları ile karşılaşabilir(Kastanaki & Giannis, 2023). Kobalt minerali, nikel ve bakır minerallerinin yan ürünü olarak çıkarılmaktadır ve kobalt pazarının büyümesi

doğrudan her iki elemente bağlıdır. Ayrıca, Demokratik Kongo Cumhuriyet’indeki maden üretimi ve rezervleri, yüksek derecede merkezileşmiş durumda olup, bu durumun yanı sıra Çin’in rafineri ve madencilik mülkiyetinin rolü gün geçtikçe artmaktadır (Baars ve diğ., 2021). Sonuç olarak, kobalt mineralinin tedariğinin kısıtlı, talebinin yüksek ve endüstride yaygın kullanımının olması sebebiyle bu çalışmada inceleme unsuru olmuştur. Şekil 2.5’te 2020 yılına göre 2040 yılında minerallere olan talepteki artış oranı verilmiştir. Gelecek yıllarda, kritik minerallere olan talep oranları incelendiğinde en çok artış gösteren element lityum olduğundan bu çalışmada incelenecek olan bir diğer mineral olarak belirlenmiştir.



Şekil 1.6: 2020 yılına göre 2040 yılında minerallere olan talep artış oranı (Uluslararası Enerji Ajansı, 2021).

1.3 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Li-ion Bataryaların Döngüsel Ekonomi Kapsamında İncelenmesi

Sürdürülebilir ve döngüsel tedarik zinciri, çevresel sürdürülebilirliği ve ekonomik verimliliği teşvik etme potansiyeli nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Döngüsel tedarik zinciri kavramı, döngüsel ekonomi (CE) ilkelerinin tedarik zinciri yönetimi uygulamalarına entegrasyonunu içerir ve atıkların azaltılmasını, malzemelerin yeniden kullanılmasını ve ürün yaşam döngülerinin uzatılmasını vurgular (Farooque ve diğ., 2019). Bu yaklaşım, çevresel etkiyi en aza indirmeyi, sosyal sorumluluğu teşvik etmeyi ve uzun vadeli ekonomik uygulanabilirliği

sağlamayı amaçlayan sürdürülebilir tedarik zincirinin hedefleriyle uyumludur (Carter & Rogers, 2008).

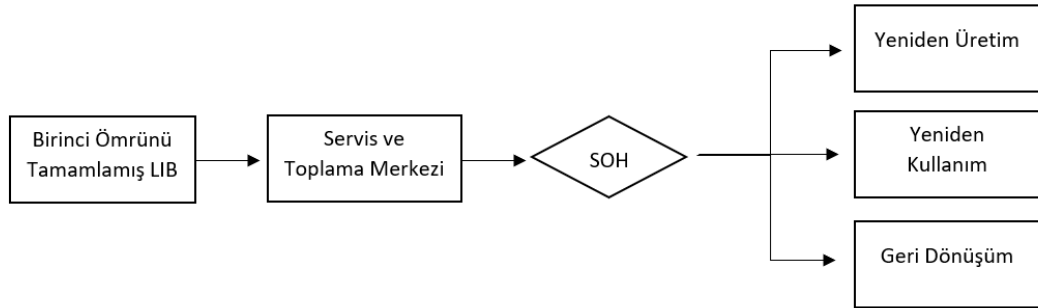
Son yıllarda CE kavramı araştırmacıların ve politikacıların dikkatini çekmektedir. CE, sürdürülebilirlik stratejisi olarak çevresel etkileri azaltmak ve kaynak verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için ekonomideki malzeme ve ürünlerin doğrusal akışı yerine döngüsel akışları teşvik eder. Gelecek nesillere sürdürülebilir bir dünya bırakmak için çevresel kaliteyi ve sosyal eşitliği korurken ekonomik refahı karşılamayı amaçlamaktadır (Alamerew & Brissaud, 2020). Bal ve Badurdeen (2021), CE'yi geleneksel al-yap-tüket-at uygulamalarının olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için bir çözüm stratejisi olarak tanımlamaktadır.

CE (Circular Economy) kavramında, malzemeleri "azaltmak", "yeniden kullanmak" ve "geri dönüştürmek" anlamına gelen "3R" ilkesine atıfta bulunmak, gereksiz girdileri ve sızıntıları en aza indirme amacını ifade eder. Bu hedefe ulaşmak için çeşitli yaklaşımlar kullanılırken, birden fazla kullanıma sahip ürünlerin tasarımı, ürün yaşam döngülerinin artırılması, atıkların yeniden kullanımı gibi stratejiler benimsenmektedir. CE modelleri, politikacılar arasında yaygın kabul görmekte olup, birçok ülke bu modellere dayalı olarak yeni yasalar ve politikalar oluşturmaktadır. Örneğin, Almanya'da "Kapalı Madde Döngüsü ve Atık Yönetimi Yasası", Japonya'da "Geri Dönüşüme Dayalı Bir Toplum Kurmak İçin Temel Yasa" ve Çin'de "Çin Halk Cumhuriyeti'nin CE Teşvik Yasası" gibi yasal düzenlemeler bu çerçevede örnek olarak gösterilebilir (Tavana ve diğ., 2023). Ülkemizde, "Ticaret Bakanlığı tarafından yayımlanan "Yeşil Mutabakat Eylem Planı" kapsamında, "Döngüsel Ekonomi Alanında Öncelikli Sektörlerin Belirlenmesi" ve "Detaylı Etki ve İhtiyaç Analizlerinin Yapılması" için bir eylem tanımlanmıştır." (dongusel.csb.gov.tr).

Elektrikli araçlarda kullanılan li-ion pil endüstrisi, CE'nin maliyetleri önemli ölçüde düşürmede ve çevresel etkileri azaltmada önemli bir rol oynayabileceği bir sektördür. Son on yılda, elektrikli araçların büyük bir gelişim kaydettiği gözlemlenmiştir. Elektrikli araç bataryaları, ömrü boyunca 120.000 ila 240.000 km mesafe kat edebilir ve 8 ila 10 yıl ömrü olabilir. Özellikle elektrikli araçlarda kullanılan pillerin yaklaşık 230 kg ağırlığında olması nedeniyle, gelecek yıllarda çok yüksek miktarlarda ömrünü tamamlamış batarya ortaya çıkacağı bilinmektedir (Tavana ve diğ., 2023).

Li-ion pillerin tekrar ekonomiye kazandırılması, elektrikli araç pillerinin ömrü sona erdiğinde ortaya çıkan çevresel kirliliği ve pil üretiminden kaynaklanan etkileri potansiyel olarak azaltabilecek olumlu bir ömür sonu seçeneği olarak değerlendirilmektedir (Xiong vd., 2020). Ayrıca, bu bataryaların tekrar kazandırılması, özellikle bu malzemelerin arzının büyük ölçüde diğer ülkelerden kobalt ve nikel ithaline bağlı olduğu göz önüne alındığında, muhtemel mantıksız fiyat artışlarını kontrol altına alabilir ve pil malzemelerinin arzında aksamayı önleyebilir (Rallo ve diğ., 2020).

Li-ion bataryaların elektrikli araçlarda faydalı ömrünü tamamladıktan sonra yeniden ekonomiye kazandırılması adına en etkili CE modeli, Yeniden Üretim (yeniden elektrikli araçlarda kullanılacak şekilde), Yeniden Kullanım (farklı uygulamalarda), Geri Dönüşüm ve en nihayetinde atık yönetimidir (Wrålsen ve diğ., 2021). Elektrikli araçların bataryalarının ömrünü tamamladıktan sonraki süreçte izleyeceği yol servis ve toplama merkezlerinde bataryanın sağlık durumu(SOH)'na göre karar verilmektedir. Ömrünü tamamlamış bataryaların 2L alternatifleri Şekil 2.5'da gösterilmiştir (Akram & Abdul-Kader, 2023).



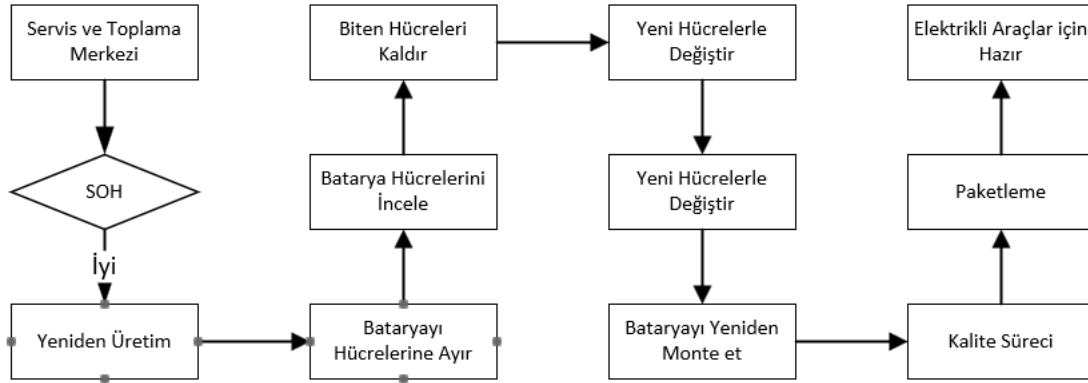
Şekil 1.7: Ömrünü tamamlamış bataryaların 2L alternatifleri(Akram & Abdul-Kader, 2023).

Ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının döngüsel ekonomi uygulamaları kapsamında yeniden üretilmesi, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi ile bataryanın toplam kullanım süresi uzayacağından karbondioksit ve sera gazı emisyonunda azalma sağlanması beklenmektedir.

1.3.1 Yeniden üretim

Yeniden üretim, Lund (1984), tarafından bileşenleri değiştirerek veya kullanılmış bileşen parçalarını yeniden işleyerek kullanılmış ürünleri yeniden kullanılmaya

yönelik endüstriyel bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Elektrikli araç bataryalarının ilk ömürleri tamamlanıp servis ve toplama merkezlerinde toplandığında bataryanın sağlık durumuna sınıflandırılmaktadır. Yeniden üretime uygun bataryalar tekrar elektrikli araçlarda kullanılmak üzere yeniden üretilmektedir. Yeniden üretim sürecinin aşamaları Şekil 2.6’da verilmiştir.

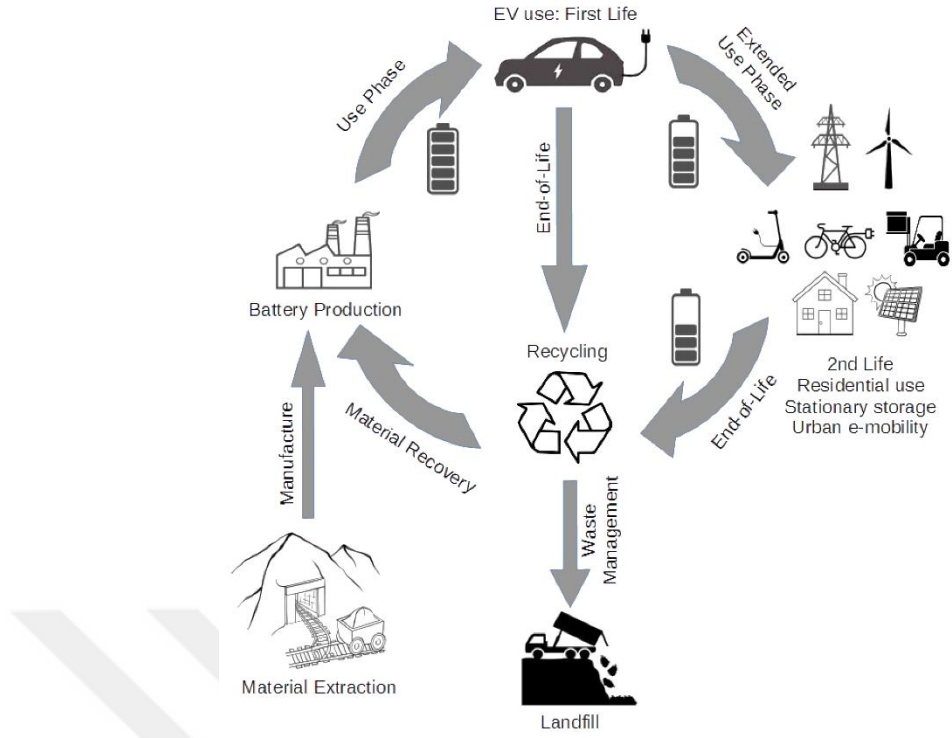


Şekil 1.8: Li-ion Bataryaların EOL sonrası yeniden üretim süreci (Akram & Abdulkader, 2023).

Foster ve diğ. (2014), çalışmasında lityum-İyon pillerin yeniden üretilmesi, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesinin maliyet-kazanç analizini yapmıştır. Yeniden üretilmiş bir pilin, yepyeni bir pilin maliyetinin %60'ına eşit olduğunu göstermiştir.

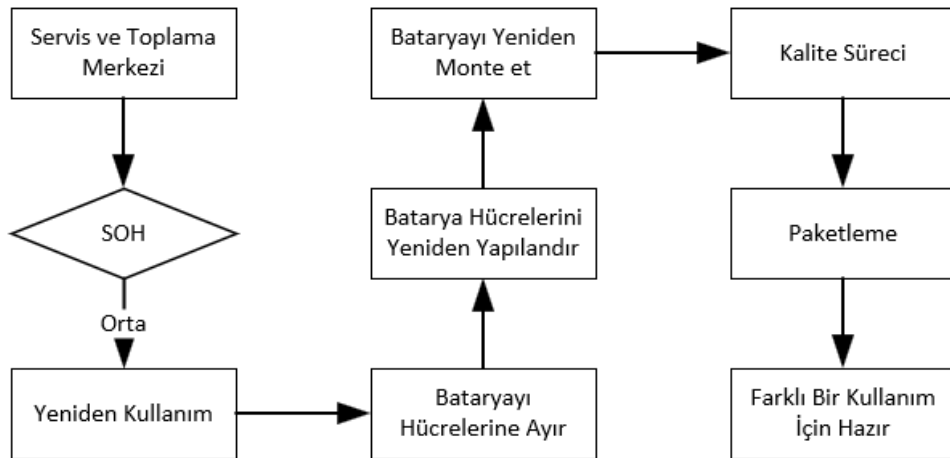
1.3.2 Yeniden kullanım

Elektrikli araçların kullanılan li-ion bataryalar ilk ömürlerini tamamladıktan sonra hala başlangıç kapasitesinin yaklaşık %80'ine sahip olduğundan, daha az zorlu uygulamalarda yeniden kullanılabilir. Bu sayede, bataryanın ömrü ortalama olarak 5-10 yıl daha uzatıldığından yeni pil üretimi için gereken hammadde talebi azaltılabilir. Şekil 2.9’da elektrikli araçların bataryaları için olası ikinci yaşam (2L) döngüsü verilmiştir.



Şekil 1.9: Olası ikinci yaşam döngüsü (Kotak ve diğ., 2021).

Olası 2L uygulamaları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimini destekleyen enerji depolama sistemi, sokak aydınlatmaları, soğutmalı araçlar ve forkliftler için kullanımlar yer alır (Kastanaki & Giannis, 2023). Örneğin, rüzgârda birçok düzensizlik olduğundan rüzgâr türbinlerinden gelen enerjiyi yönetmek zordur, bu nedenle yeniden tasarlanmış piller bunu muhtemelen geleneksel tekniklerden daha düşük bir maliyetle desteklemektedir (Akram & Abdul-Kader, 2021).Yeniden kullanım sürecinin aşamaları Şekil 2.7’da verilmiştir.

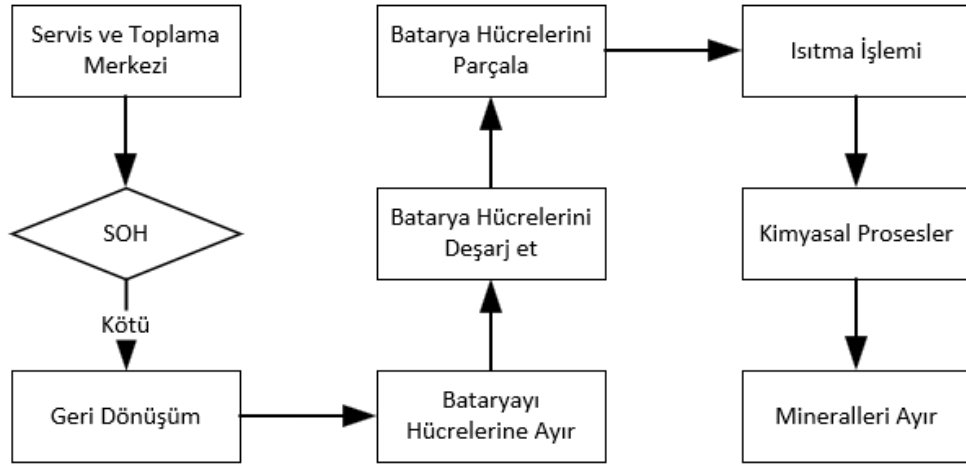


Şekil 1.10: Yeniden kullanım sürecinin aşamaları (Akram & Abdul-Kader, 2023).

Yeniden tasarlanmış pil paketleri, emisyonları azalttıkları ve yenilenebilir bir enerji kaynağına destek sağladıkları için tüketiciler açısından avantajlıdır. Elektrikli araçlardaki li-ion bataryaların orijinal maliyeti son derece yüksektir. Pillerin yeniden kullanılması, maliyeti li-ion bataryaların 18 yıllık yıllık ömrü boyunca ilk ve sonraki tüketiciler arasında bölüştürmektedir (Akram & Abdul-Kader, 2021).

1.3.3 Geri dönüşüm

Ömrü tükenmiş elektrikli araç bataryaları için ilk tercih ürünün ömrünün daha uzun olması ve piyasada uzun yıllarda kullanılması için yeniden üretim veya yeniden kullanım stratejileri olması tavsiye edilmektedir. Fakat ürünün en nihayetinde ömrü tamamlandıktan veya bir hasar aldıktan sonra değerlendirilmesi gereken seçenek imhadan ziyade geri dönüşüm olmalıdır. Pillerin geri dönüştürülmesi için iki temel yöntem -pirometalurji ve hidrometalurji- bulunmaktadır. Bu yöntemler genellikle ayrı ayrı veya birbirleriyle kombinasyon halinde kullanılabilir. Bu süreçler genellikle çeşitli kimyasal ayrılma işlemlerini, örneğin çökeltme, çözücü ekstraksiyonu, iyon değişimi ve elektrolitik ekstraksiyon gibi aşamaları içerir. Bu işlemler, genellikle belirli bir geri dönüşüm stratejisine bağlı olarak kombinasyonlar halinde uygulanır. Bu bağlamda, Lityum-iyon pillerin pirometalurjik işlemde eritildiği temel amaç, kobalt, bakır, nikel ve demir gibi yüksek katma değerli metallerin geri kazanılmasıdır. Elde edilen alaşımlar, hidrometalurjik bir işlemle beslenir, burada asitlerin kimyasal işlemi kullanılarak ayrıldıkları ve ardından tuzlara çöktürüldükleri bir süreç gerçekleşir. Bu aşamada lityum, alüminyum ve manganez cüruf akımından uzaklaştırılır ve pirometalurjik işlemde, lityum pilleri 1000 °C'de yakarak organik çözücülerin, lityumun ve florürlerin buharlaşmasına ve geri kazanılmamasına neden olur. Geriye kalan metaller, özellikle kobaltın geri kazanımı için hidrometalurji yoluyla ayırma işlemi yapılır (Kotak ve diğ., 2021). Geri dönüşüm sürecinin aşamaları Şekil 2.8'da verilmiştir.



Şekil 1.11: Geri dönüşüm sürecinin aşamaları (Akram & Abdul-Kader, 2023).

Geri dönüşüm stratejisi sadece ekolojik nedenlerden değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da yararlıdır. Özellikle, pil hücrelerinin katot kimyasalında kullanılan kobalt mineralinin arzının kısıtlı ve zor olduğu bilindiğinden geri dönüşüm seçeneği politikacıların dikkatini çekmektedir (Kotak ve diğ., 2021). Ayrıca lityum arzı üzerine yapılan çalışmalara göre, lityuma yönelik talep gelecek yıllarda malzemenin elde edilme miktarını aşabileceği göz önüne alındığında geri dönüşüm süreci paralel gerçekleştirilmezse gelecekteki talebi karşılamak zorlaşabilir (Sonoc & Jeswiet, 2014).

Avrupa Komisyonu tarafından belirlenen bataryalarla ilgili mevzuat çalışmaları, Döngüsel Ekonomi Eylem Planı kapsamında öncelikli ürün gruplarından biri olarak öne çıkmıştır. 10 Aralık 2020 tarihinde yayımlanmış olan Batarya ve Batarya Atıkları Tüzüğü taslağının yasalaşma süreci tamamlanarak 28 Temmuz 2023 tarihinde AB Resmi Gazetesinde yayımlanmıştır (www.ticaret.gov.tr). Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar da dahil olmak üzere tüm batarya türlerinin tasarımından atık haline dönüşene kadar yaşam döngüsünün her bir katmanını ilgilendirecek zorunluluklar ve gereklilikler bu mevzuata göre belirlenmiştir. Ticaret bakanlığının yayımladığı mevzuata göre; “18 Ağustos 2031 yılında mevzuat kapsamı bataryaların kobalt (%16), lityum (%6), nikel (%6) ve kurşun (%85) hammaddelerinde belirli miktarda geri dönüştürülmüş içerik barındırması zorunluluğu getirilirken, 18 Ağustos 2036 yılında bu miktarlar, kobalt (%26), lityum (%12), nikel (%15) ve kurşun (%85) olarak güncellenecektir. Bataryaların geri dönüştürülmüş içerik belgesi taşıması gerekecektir.” (www.ticaret.gov.tr). Ayrıca, aynı mevzuatta batarya içeriklerine göre belirlenen materyal geri kazanım hedefleri ve geri dönüşüm verimlilik hedefleri

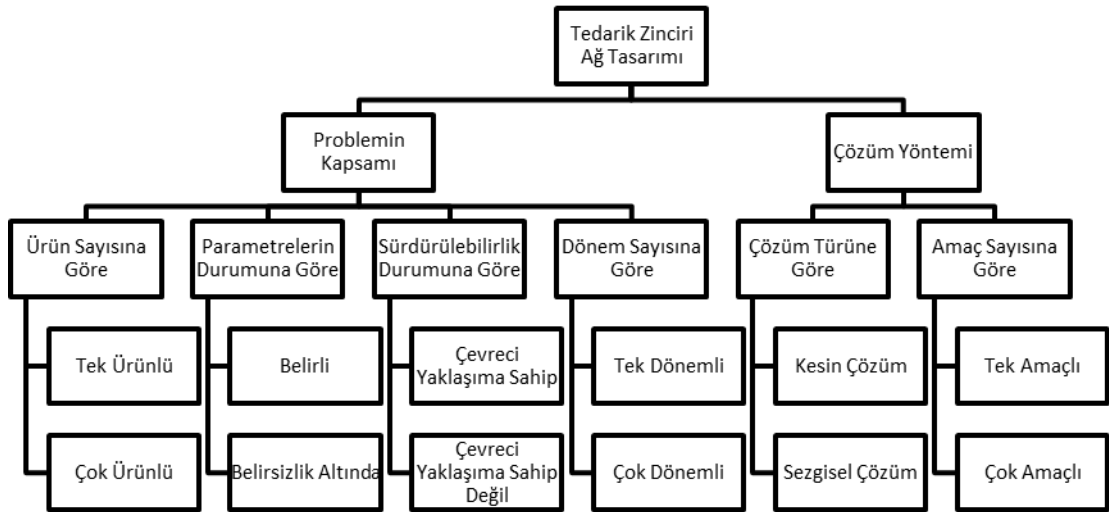
bulunmaktadır. Lityumda, materyal geri kazanım hedefi 2027 yılı için %50, 2031 yılı için ise %80 olarak belirlenmiştir. Lityum içerikli bataryalarda ise geri dönüşüm verimlilik hedefi, 2025 yılı sonu için %65 olarak belirlenirken, 2030 yılı sonu için %70 olarak saptanmıştır.

Elektrikli araç bataryalarının döngüsel ekonomi perspektifinden değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik açısından önemli yaklaşımdır. Bataryaların yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve yeniden üretimi gibi stratejilerle doğal kaynakların daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlarken, atık oluşumunu azaltarak çevresel etkileri en aza indirmektedir. Elektrikli araçların bataryalarının sağlık durumunun %80'nin altına düştüğü durumda otomobillerde kullanıma uygun durumda olmamaktadır. Karbon nötr hedefleri bağlamında ulaşımda geleneksel içten yanmalı motorlardan elektrikli araçlara geçişin hızla arttığı bu dönemde elektrikli araçların bataryalarının ilk ömürleri sonundaki akıbeti hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda elektrikli araçların bataryalarının döngüsel ekonomi kapsamında incelenmesi ile birlikte yeniden kullanım, yeniden üretim ve geri dönüşüm gibi stratejilerle yeniden ekonomiye kazandırılması politikacılar tarafından gündeme getirilmektedir. Bu doğrultuda, kullanılmış bataryaların toplanması, geri dönüştürülmesi, üretim süreçlerine entegre edilmesi ve sonunda tekrar kullanılabilir hale getirilmesi gibi adımların sistematik bir şekilde yönetildiği kapalı çevrim tedarik zinciri yaklaşımının benimsenmesi kaçınılmaz hale gelmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı

Kapalı döngü tedarik zinciri, yeniden üretim, geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi süreçlerle ürün iadelerinden ek değer elde etmek amacıyla ürün, malzeme ve bilgilerin ileri ve tersine akışlarını entegre eden bir sistemdir (Savaskan ve diğ., 2004). İleri tedarik zinciri hammaddenin elde edilmesinden, ürünün müşteriye ulaştırılmasına kadar ki süreçle ilgiliyken, tersine tedarik zinciri ise müşterilerden kullanım ömrü sonuna gelen ürünün çeşitli stratejilerle yeniden ekonomiye kazandırılma süreciyle ilgilidir. KDTZAT ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde KDTAZT, problemin kapsamı ve çözüm yöntemi olarak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Şekil 2.1’de problemin kapsamının ve çözüm yönteminin çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Problemin kapsamına ve çözüm yöntemine göre KDTZAT

Gholian-Jouybari ve diğ. (2023) soya endüstrisi için sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi odaklı bir kapalı döngü tarım ve gıda tedarik zinciri modeli sunmaktadır. Bu model, müşteri memnuniyetini ve CO2 emisyonlarını incelerken aynı zamanda toplam

net karı yönetmeye odaklanmaktadır. Çözüm yaklaşımı çeşitli geleneksel ve hibrit meta-sezgisel algoritmaları içermektedir.

Mavi ve diğ. (2023) Bu çalışma, lastik endüstrisinde sürdürülebilir bir kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarlamak için yeni çok amaçlı karışık tam sayılı lineer programlama modeli önermektedir. Modelin amacı, tesislerin kurulması, lastik işleme ve taşıma ile ilgili çevresel sorunları dikkate alarak ağın genel maliyetini optimize etmektir.

Subulan & Baykasoğlu (2023), belirsizlik altında entegre bir sürdürülebilir filo planlama ve kapalı döngü tedarik zinciri (CLSC) ağ tasarımı problemi için bütüncül bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Çalışmada, kullanım ömrü sona eren veya iade durumundaki kurşun asit piller için stokastik bir model oluşturulmuş ve bu modelde bulanık hedef programlama yaklaşımı kullanılarak çelişen sürdürülebilirlik hedefleri için çeşitli Pareto optimal çözümler elde edilmiştir.

Hanczar & Azadehranjbar (2022), tedarik zinciri ağının sürdürülebilirlik açısından yeniden tasarımı sırasında bölgenin ekolojik özellikleri ve depo ile bölge arasındaki ekolojik ilişkiyi ele almaktadır. Bu yeniden tasarım sürecinde depolar kapatılabilir, yeni depolar kurulabilir ve eski depolar birleştirilebilmektedir. İki amaç fonksiyonu içeren problemde, tedarik zincirinin toplam maliyeti birinci amaç fonksiyonunu oluştururken, ikinci amaç fonksiyonu depoların açılması veya kapatılması durumundaki çevresel etkileşimleri içermektedir. Sonuç bölümünde AUGMECON yöntemi ile matheuristic yöntemi dört metrik bakımından kıyaslanmıştır.

Khatami ve diğ. (2015), cep telefonu, kulaklık vb. ürünler üreten bir firmanın iade süreciyle ilgilenmektedir. Belirsizlik altında çok dönemli ve çok ürünlü bir KDTZ ağı tasarlamak için yeni bir model önerilmiştir. Perakendecilerdeki talep ve perakendecilere iade edilen ürünlerin miktarı stokastik parametreler olarak kabul edilmektedir. Tedarik zinciri ağ tasarımı uzun dönemli, geri dönülmesi zor ve yüksek maliyetli kararlar içerdiğinden, sezgisel yöntemler yerine kesim çözüm veren yöntemlerin kullanılması tavsiye edilmiştir.

Y.-W. Chen ve diğ. (2017), çalışmasında, güneş pili endüstrisinde kapalı döngü tedarik zinciri problemi ele almıştır. Problem ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirildiği için iki amaçlı olacak şekilde modellenmiştir. Problemin geniş kapsamlı olması nedeniyle optimale yakın sonuç aramak için sezgisel yöntem kullanılmıştır. Çok

amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemi kullanılarak ekonomik ve çevresel boyutu dikkate alan optimale yakın bir sonuç elde edilmiştir.

İncelenen tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmaları problem kapsamına ve çözüm yöntemine göre Çizelge 2.1’de değerlendirilmiştir.

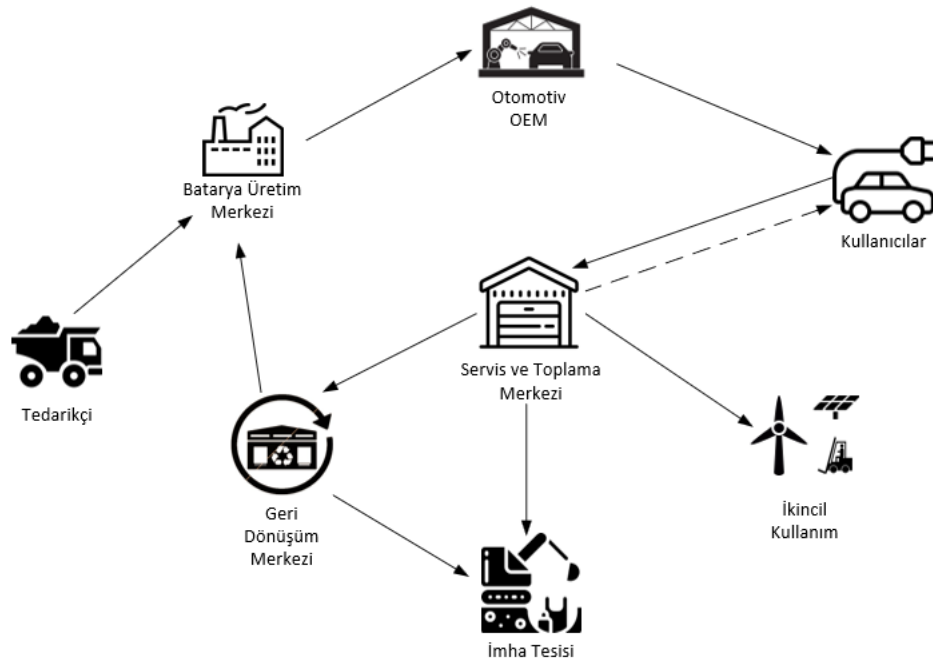
Çizelge 2.1: Problemin kapsamına ve çözüm yöntemine göre literatür.

Problemin Kapsamı					Çözüm Yöntemi	
	Ürün Sayısı	Belirsizlik Durumu	Sürdürülebilirlik	Dönem Sayısı	Çözüm Türü	Amaç Fonksiyonu Sayısı
(Hanczar & Azadehranjbar, 2022)	Tek	Belirli	Ekonomik Çevresel	Tek	Kesin ve Sezgisel	2
(Khatami, Mahootchi, & Farahani, 2015)	Çok	Belirsizlik Altında	Ekonomik	Çok	Kesin	1
(Ghassemi, Asl-Najafi, & Yaghoubi, 2017)	Çok	Belirli	Ekonomik	Çok	Kesin	2
(Chen , Wang, Wang, & Chen, 2015)	Tek	Belirli	Ekonomik Çevresel	Tek	Sezgisel	2
(Mavi ve diğ., 2023)	Çok	Belirli	Ekonomik Çevresel	Tek	Sezgisel	2
(Subulan & Baykasoğlu, 2023)	Çok	Belirsizlik Altında	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Kesin	3
(Gholian-Jouybari ve diğ., 2023)	Çok	Belirli	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Sezgisel	3
(Naeeni & Sabbaghi, 2022)	Çok	Belirli	Ekonomik Çevresel Sosyal	Tek	Kesin	3
(Yadegari ve diğ., 2023)	Çok	Belirsizlik Altında	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Kesin	3
(Motevalli-Taher ve diğ., 2020)	Çok	Belirsizlik Altında	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Kesin	3
(Shahedi ve diğ., 2022)	Tek	Belirsizlik Altında	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Kesin	3
(Krishnan ve diğ., 2022)	Çok	Belirsizlik Altında	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Kesin	3

Çizelge 2.2 (devam): Problemin kapsamına ve çözüm yöntemine göre literatür.

Problemin Kapsamı				Çözüm Yöntemi		
	Ürün Sayısı	Belirsizlik Durumu	Sürdürülebilirlik	Dönem Sayısı	Çözüm Türü	Amaç Fonksiyonu Sayısı
(Foroozesh ve diğ., 2023)	Çok	Belirsizlik Altında	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Kesin	3
(Ala ve diğ., 2024)	Çok	Belirsizlik Altında	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Sezgisel	3
(Lotfi ve diğ., 2023)	Çok	Belirli	Ekonomik Çevresel Sosyal	Çok	Kesin	3
(Fan ve diğ., 2023)	Çok	Belirli	Ekonomik Çevresel	Tek	Kesin	2
(Tavana ve diğ., 2023)	Çok	Belirsizlik Altında	Ekonomik Çevresel	Çok	Kesin	2
Bu Çalışma	Çok	Belirli	Ekonomik Çevresel Sosyal	Tek	Kesin	3

Bu tezde uygulama konusu olarak belirlenen elektrikli araçların bataryaları için önerilen tedarik zinciri modeli Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Batarya türü olarak seçilen LFP ve NMC tip bataryalar için döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı yapılmıştır. 2036 yılı senaryosuna göre simüle edilen modelde ürün akış miktarları ve çeşitli tesislerin yer seçimi kararı verilmektedir. Talep sayısı ve toplanan batarya sayısı gibi parametreler deterministik olarak verilmiş olup dördüncü bölümde duyarlılık analizi ile senaryolara göre değerlendirmeler yapılmıştır. Çok amaçlı model sürdürülebilirlik yaklaşımı doğrultusunda kurulmuştur ve kesin çözüm yöntemlerinden birisi olan AUGMECON2 yöntemi kullanılarak pareto optimal çözüm kümesi elde edilmiştir.



Şekil 2.2: Çalışmada önerilen kapalı döngü tedarik zinciri modeli

2.2 Sürdürülebilir Ağ Tasarımı

Sürdürülebilirlik, yaşam kalitesini iyileştirmek için çevresel, sosyal ve ekonomik hususların dengelendiği geleceği düşünmeye yönelik bir kavramdır (Birleşmiş Milletler Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu,1987). Basiago (1998)’ya göre kelime anlamıyla sürdürülebilirlik, bir varlığı, sonucu veya süreci zaman içinde devam ettirme kapasitesi anlamına gelmektedir. Bu argümanı desteklemek üzere sürdürülebilirlik kavramının özünde, gezegenin yaşamı destekleyen ekosistemlerinin yenilenme kapasitesi açısından toplum, ekonomi ve çevre arasında uygun uyum ve dengeyi sağlamak olduğunu ileri sürülmektedir (Mensah, 2019). Sürdürülebilirliği yorumlamanın ve tanımlamanın en yaygın yolu, ekonomik, çevresel ve sosyal performanslarını içeren “Triple Bottom Line(TBL)” denilen üçlü bilanço yaklaşımıdır (Elkington, 1997).

Sürdürülebilirlik analizinin zorlu yanlarından biri de temel faktörler arasındaki çıkar çakışmalarıdır. Şirketlerin varlıklarını sürdürebilmeleri için kârlılıklarını korumaları gereklidir; ancak aynı zamanda doğa ve toplumla olan sorumluluklarını da göz ardı etmemelidirler. Çevresel sorumluluk alanında, şirketleri zorlayan çeşitli rehberler (örneğin ISO 14001) ve yönetmelikler bulunmaktadır. Tedarik zincirinin performansı

konusunda, sadece ekonomik ve çevresel yönler değil, sosyal faktörler de önem taşır (Bal & Satoglu, 2018).

Sürdürülebilirlik girişimleri, mevcut literatürde genel olarak sürdürülebilir tedarikçi seçimi, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi, sürdürülebilir imalat/üretim ve sürdürülebilir bilgi teknolojileri tasarımı şeklinde yer almaktadır (Bai ve diğ., 2017). Tedarik zincirlerinin ekonomik, çevresel ve sosyal performansları üzerinde etkisi olan bir dizi farklı ve birbirine bağlı faktör söz konusudur ve bu da oldukça karmaşık modellerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Örneğin tesis yeri kararları, tedarik zincirlerindeki hem maliyetlerin hem de çevresel etkinin en büyük payından sorumlu faaliyet olan taşımacılığın maliyetlerini ve çevresel etkisini doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte, bu kararların tesislerin bulunduğu toplum üzerinde de etkisi vardır (Mota ve diğ., 2015).

Sürdürülebilirliği dikkate alan tedarik zinciri ağ tasarımı için çok amaçlı modellerde genellikle ekonomik ve çevresel faktörler dikkate alınsa da sosyal boyutu da inceleyen çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Literatürde döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı problemlerinde sürdürülebilirliğin üç boyutu için oluşturulan çok amaçlı modeller incelendiğinde; ekonomi boyutu için genellikle tedarik zinciri maliyetinin minimizasyonu, çevre boyutu için tedarik zincirinin karbon emisyon değerinin minimizasyonu, sosyal boyut için belirlenen faktörlerin maksimizasyonu olarak öne çıkmaktadır. Tablo 2.5'te literatürde sürdürülebilirliği dikkate alan çok amaçlı modellerde kullanılan parametreler verilmiştir.

Çizelge 2.3: Sürdürülebilirliği dikkate alan çok amaçlı modeller literatür taraması

Yayın	Ekonomik Amaç Fonksiyonu	Çevresel Amaç Fonksiyonu	Sosyal Amaç Fonksiyonu
(Sherafati ve diğ., 2019)	Kar	GHG, S	GeD,
(Motevalli-Taher ve diğ., 2020)	Maliyet	S	İF
(Bal & Badurdeen, 2020)	Kar	-	SH, K, E, GüD
(Shahedi ve diğ., 2022)	Kar	GHG	İF, D
(Moreno-Camacho ve diğ., 2023)	Maliyet	GHG	İF, D
(Goodarzian ve diğ., 2023)	Maliyet	GHG	N
(Krishnan ve diğ., 2022)	Maliyet	GHG	İF
(Naeeni & Sabbaghi, 2022)	Maliyet	GHG, D	İF, K, İO, GüD
(Ala ve diğ., 2024)	Maliyet	D	İF
(Foroozesh ve diğ., 2023)	Maliyet	GHG	P
(Gholian-Jouybari ve diğ., 2023)	Kar	GHG	MM
(Lotfi ve diğ., 2023)	Maliyet	GHG	İF, İO, MM
(Yadegari ve diğ., 2023)	Kar	GHG	İF, İO, Ged

GHG: Karbon Salınımı, **S:** Su Kullanımı veya Kirlenmesi, **D:** Diğer **İF:** İş Fırsatı Yaratma, **İO:** İşsizlik Oranı, **SH:** Sağlık Hizmetleri, **K:** Kazanç Düzeyi, **E:** Eğitim Düzeyi, **GüD:** Güvenlik Düzeyi, **GeD:** Gelişmişlik Düzeyi, **P:** Paydaş Farkındalığı, **N:** Nüfus Yoğunluğu, **MM:** Müşteri Memnuniyeti

Sürdürülebilirlik odaklı tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmalarında, ekonomik boyutun göz önünde bulundurulması genellikle çeşitli maliyet kalemlerinin minimize edilmesini veya belirli durumlarda satış fiyatının maksimize edilmesini içerir. Bu maliyet kalemleri arasında ilk kurulum maliyeti, taşıma maliyeti, üretim maliyeti, stok maliyeti, geri dönüşüm maliyeti, imha maliyeti ve diğer spesifik maliyet kalemleri yer almaktadır.

Çevresel boyutun değerlendirilmesi ise genellikle tedarik zinciri süreçlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarına odaklanır. Ayrıca, bazı çalışmalarda su ayak izinin minimizasyonu da incelenmiştir. Bu tür analizler, çevresel etkilerin azaltılması ve doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına odaklanarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemeyi amaçlar. (Ala ve diğ., 2024), sağlık

sektöründe kullanılan malzemeler için sürdürülebilir tedarik zinciri ağ tasarımı yaptığı çalışmada, çevresel boyutu farklı bir şekilde ele alarak açılan çeşitli tesislerdeki çevresel etkileri minimize etmeye odaklanmıştır. (Naeeni & Sabbaghi, 2022) çalışmada, sadece karbon emisyonlarını değil aynı zamanda operasyonlar sırasında oluşan atık miktarını ve enerji tüketimini de en aza indirmeyi hedeflemiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle ekonomik ve çevresel boyutlara benzer perspektiflerle odaklanılmış olmasına rağmen, sosyal boyutun değerlendirilmesi aşamasında oldukça farklı kriterler ve değerlendirmeler ortaya konmuştur.

Sherafati ve diğ. (2019), çalışmada sosyal boyutu değerlendirirken gelişmişlik düzeyi az olan bölgelere tesis kurulmasını sağlayacak şekilde amaç fonksiyonunu oluşturmuştur. Bölgelerin gelişmişlik düzeyini çeşitli kriterler kullanarak TOPSİS yöntemi ile sıralamıştır. Ayrıca matematiksel model içerisinde çalışma koşulları asgari düzeyi sağlayamayan adayların üretici olarak seçilmemesi kısıtı bulunmaktadır.

Motevalli-Taher ve diğ. (2020) buğday üretimi için sürdürülebilir bir tedarik zinciri ağ tasarımı geliştirmiştir. Bu çalışma, sosyal boyutu ele alarak, buğday üretimi sürecinde açılacak olan tesislerle birlikte yaratılacak iş fırsatlarını maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Benzer şekilde, (Krishnan ve diğ., 2022) ve (Ala ve diğ., 2024) çalışmalarında açılacak tesislerle birlikte yaratılacak iş fırsatlarını sosyal boyut açısından maksimize etmeyi hedeflemektedir.

Bal & Badurdeen (2020) tarafından yürütülen çalışma, beyaz eşya sektöründe döngüsel ekonomi çerçevesinde tesis yer seçimini ele almaktadır. Sosyal boyutun değerlendirilmesi aşamasında, şehirlerin sağlık hizmetleri, kazanç düzeyleri, güvenlik düzeyleri ve eğitim düzeyi gibi faktörler, AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmış ve amaç fonksiyonunda dikkate alınmıştır.

Moreno-Camacho ve diğ. (2023) çalışmada Kolombiya süt ürünleri sektöründe sürdürülebilir tedarik zinciri ağ tasarımı problemini gerçekleştirmiştir. Çalışmada sosyal boyutu incelerken açılacak tesisler vasıtasıyla iş fırsatlarını yaratmanın yanı sıra tedarikçi seçiminde yerel üreticilerin seçilmesine vurgu yapılmıştır.

Naeeni & Sabbaghi (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Asya'daki bir cam üreticisi için sürdürülebilir tedarik zinciri ağ tasarımı incelenmiştir. Sosyal boyutun

değerlendirilmesi sırasında, tesislerin kurulmasıyla birlikte yaratılan iş fırsatlarını maksimize etmeyi amaçlamıştır. Bu bağlamda, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH) en düşük olan bölgeler ile işsizlik oranı en yüksek olan bölgeler öncelikli olarak seçilmiştir. Ayrıca, operasyonel süreçler sırasında çalışanlar üzerindeki olumsuz etkileri ve teknoloji ve ürün tipi seçimi ile müşterilerin karşılaşabileceği potansiyel riskleri azaltmayı hedeflemektedir.

Foroozesh ve diğ. (2023), sosyal boyutu ele alırken tedarik zinciri paydaşlarının sosyal sorumluluk bilincini değerlendirmek amacıyla TOPSİS metodu kullanılarak sıralamıştır. Tedarikçi seçimini toplumsal faydayı maksimize edecek tedarikçilerin seçilmesi şeklinde belirlemiştir.

Gholian-Jouybari ve diğ. (2023), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, soya fasulyesi endüstrisinde sürdürülebilirlik boyutlarını dikkate alan çok amaçlı kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, tedarik zincirinin karını maksimize etme ve karbon emisyonlarını minimizasyonunun yanı sıra, sosyal boyutu da müşteri memnuniyetini dikkate alacak şekilde ele alınmıştır. Müşteri taleplerinin ne kadarının karşılandığı 0 ile 1 arasında bir ölçekte sonuçlandırılmaktadır.

Yadegari ve diğ. (2023), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sosyal boyut iki ana konuda ele alınmıştır. Bu hususlar; yaratılan iş fırsatlarını işsizlik oranı ile birlikte değerlendirdiği dengeli istihdam endeksi ve bölgesel gelişmişlik düzeyidir. Bu iki kriter, AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmış ve sosyal faydayı maksimize etmeye yönelik olarak ele alınmıştır.

Lotfi ve diğ. (2023), ilaç sektörü için sürdürülebilir kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmasını gerçekleştirmiştir. AHP metodu kullanarak yeşil tedarikçi seçiminin yapıldığı bu çalışmada, sosyal boyutu ele alırken yaratılan iş fırsatını maksimize etmenin yanında işsizlik oranı ve müşteri memnuniyeti amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir.

Literatürde çeşitli alanlarda sürdürülebilirlik ilkelerini dikkate alan tedarik zinciri ağ tasarımı problemleri yukarıda incelenmiştir. Elektrikli araçların bataryaları için tedarik zinciri ağ tasarımı konusunda yapılan çalışmalarda sürdürülebilirlik boyutlarını ekonomik ve çevresel açıdan ele aldıkları görülmektedir.

Fan ve diğ. (2023), elektrikli araçların bataryaları için çok ürünlü ve çok teknolojlili tersine lojistik ağ tasarımı çalışması gerçekleştirmiştir. Oluşturulan çok amaçlı matematiksel modelde sürdürülebilirlik ilkelerini ekonomik ve çevresel açıdan incelemiştir. Ekonomik amaç fonksiyonu, tedarik zinciri maliyetini minimize etmeye odaklanırken, çevresel amaç fonksiyonu karbon emisyon miktarını minimize etmeyi hedeflemektedir.

Tavana ve diğ. (2023), çalışmasında, belirsizlik altındaki elektrikli araç lityum-iyon pillerinin üretimini, yeniden üretimini ve dağıtımını yönetmek amacıyla IoT ve büyük verileri kullanarak sürdürülebilir bir döngüsel tedarik zinciri tasarlamak için iki amaçlı bir karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Sürdürülebilirlik bakış açısının ekonomik ve çevresel boyutlarının kullanıldığı bu çalışmada, toplam maliyetlerin ve CO2 emisyonlarının aynı anda en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Belirsizlik altındaki bu iki amaçlı optimizasyon modelini çözmek için bulanık çok amaçlı bir yöntem ve önerilen modelin etkinliğini değerlendirmek için bir simülasyon algoritması kullanılmaktadır.

Elektrikli araç bataryalarının tedarik zinciri ağ tasarımı üzerine yapılan literatür incelemesi, sürdürülebilirlik kapsamında özellikle sosyal boyutun yeterince değerlendirilmediğini ortaya koymaktadır. Bu alandaki mevcut çalışmalar genellikle ekonomik ve çevresel faktörlere odaklanmaktadır. Bu boşluğu doldurmak üzere sosyal sürdürülebilirlik perspektifini içeren daha kapsamlı ve ayrıntılı bir tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez kapsamında amaç sadece minimum maliyetle 2036 yılında Türkiye'deki elektrikli araçların bataryaları için döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı planı yapmaktan ziyade; bu bataryaların hammadde elde edilme aşamasından itibaren müşteriye ulaşıncaya kadar ve ardından birincil ömrü sonunda çeşitli stratejilerle değerlendirilmesinden en nihayetinde imha edilinceye kadar ki süreçlerde çevresel ve toplumsal etkiyi de değerlendirerek sürdürülebilir bir döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı elde etmektir. Servis ve toplama merkezi, geri dönüşüm merkezi ve imha merkezinin açılacağı bölge seçilirken, sosyal faydayı maksimize edecek şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Sosyal boyut için faydayı maksimize edecek şekilde beş kriter kullanılmıştır.

İşsizlik Oranı: Literatürde sosyal faydayı arttırmak için sıklıkla kullanılan kriterlerin başında iş fırsatı yaratma gelmektedir. Tesislerin, açılacağı bölgelerde sabit miktarda istihdam yaratacağı düşünüldüğünde, alternatif bölgeler arasından işsizlik oranının

fazla olduğu bölgelere tesis kurulması toplumun yararına olacaktır. Alternatif bölgeler için işsizlik oranı verisi Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)’den alınmıştır.

İş Bulma Sebebiyle Dışarıya Gerçekleşen Göç Oranı: Toplumsal açıdan önemli olan, iş fırsatlarının yaratılması sürecinde istihdamın daha fazla ihtiyaç duyulan bölgelerde gerçekleştirilmesidir. İşsizlik oranına ek olarak, iş bulma sebebiyle diğer illere gerçekleşen göç oranı fazla olan alternatifin seçilmesi o bölgede yaşayan bireylerin ekonomik ve sosyal koşullarının şekillenmesinde etkili bir faktör olacaktır. İşsizlik oranı ve diğer illere gerçekleşen göç oranı, benzer kriterler olduğu için aralarındaki ilişki incelenmiştir; bu bağlamda, korelasyon değeri 0,11 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu düşük korelasyon değeri, iki kriter arasında belirgin bir yüksek ilişki bulunmadığını göstermektedir. Sonuç olarak iki parametre de sosyal fayda kriterleri olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Ayrıca literatürde sosyal fayda kriterleri arasında iş bulma sebebiyle dışarıya gerçekleşen göç oranı ilk kez bu çalışmada ele alınmıştır.

Yoksulluk Oranı: Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDG) içerisinde yer alan “Yoksulluğa Son” (hedef 1) hedefi kapsamında yoksulluk oranı fazla olan illerde tesislerin açılması amaçlanmaktadır. Alternatif illerin yoksulluk oranı verileri TÜİK’ten alınmıştır.

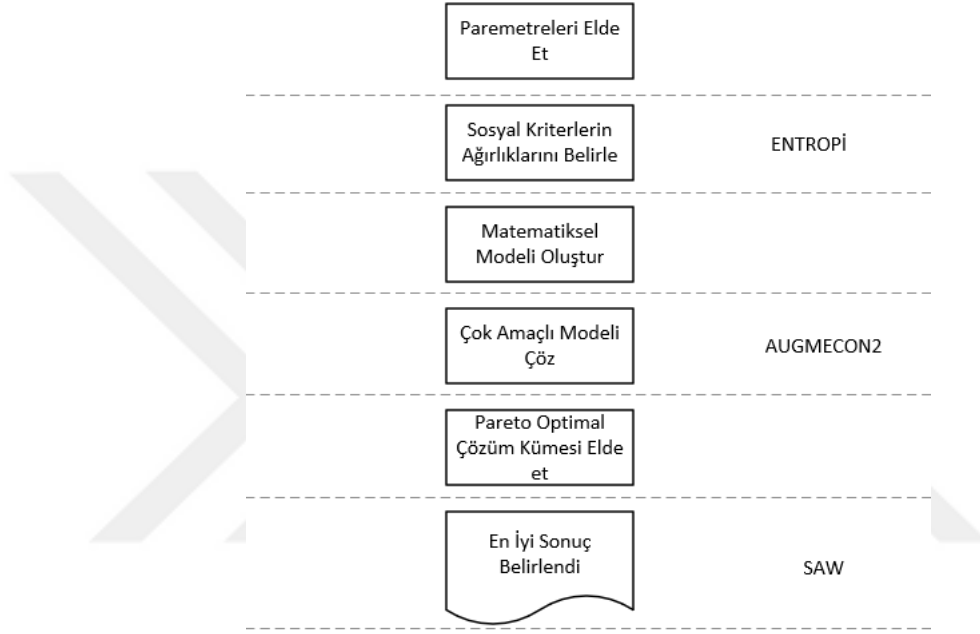
Gelir Eşitsizliği: Açılacak tesislerin bulunduğu bölgelerde gelir eşitliği ilkelerini sağlayacağı varsayılmıştır. SDG hedefleri arasında yer alan “Eşitsizliklerin Azaltılması (Hedef 10)” ilkesine istinaden açılacak tesislerin gelir dağılımının dengesiz olduğu bölgelere öncelik verilmiştir. Bu doğrultuda TÜİK veri tabanından ilgili illerin GİNİ indeksi kullanılmıştır.

Kadın-Erkek İstihdam Eşitsizliği: SDG hedeflerinden birisi olan “Toplumsal Cinsiyet Eşitliği (Hedef 5)” ilkesi doğrultusundan tesisin kurulduğu ilde cinsiyet ilkelerine uygun istihdam koşulları sağlayacağı düşünüldüğünden, kadın-erkek istihdam eşitsizliğinin yüksek olduğu bölgelere tesis açılması önerilmektedir. İlgili veriler TÜİK verilerinden elde edilmiştir.



3. METODOLOJİ

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan yöntemler açıklanacaktır. Çalışmanın akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Problemin akış şeması.

Bu çalışmada matematiksel modelde kullanılan değerler literatürdeki çalışmalar, araştırma merkezi raporları ve politikalar incelenerek belirlenmiştir. Ardından, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri kapsamında sosyal kriterler belirlenmiştir ve kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında Entropi yöntemi kullanılmıştır. Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı için çok amaçlı matematiksel model oluşturulmuştur. Oluşturulan model literatürde çok amaçlı modellerin çözümünde başarıyla uygulanan AUGMECON2 yöntemi kullanılarak Pareto optimal çözümler elde edilmiştir. En nihayetinde Basit Toplamlı Ağırlıklandırma yöntem ile birlikte Pareto optimal çözüm kümesi içerisinde en iyi çözümü bulunmuştur.

3.1 Entropi Yöntemi

Entropi yöntemi, bilgi teorisine dayanarak, bilginin göreceli ağırlığını objektif bir şekilde hesaplamak amacıyla Shannon (1948) tarafından geliştirilmiştir. Her bir kriterin entropi değerini hesaplayarak bilgi miktarını ölçmekte ve ardından ağırlık değerini belirlemektedir. Bu nedenle, karar verme sürecinde bilimsel bir temel sunan objektif bir yaklaşım olarak değerlendirilir (C.-H. Chen, 2020). Entropi yönteminin adımları şu şekildedir;

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması: Alternatiflerin satırlarda kriterlerin ise sütunlarda yer aldığı karar matrisi Denklem 3.1’de gösterilmiştir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Adım 2: Karar matrisinin normalize edilmesi: Karar matrisi oluşturulduktan sonra Denklem 3.2’deki normalizasyon işlemi yapılır.

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad \forall i, j \quad (3.2)$$

Adım 3: Her kriter için entropi değerinin hesaplanması: Her bir kriter için entropi değeri Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanır.

$$E_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m [P_{ij} \ln(P_{ij})] \quad \forall j \quad (3.3)$$

Adım 4: Farklılaşma derecesinin hesaplanması: d_j farklılaşma derecesin Denklem 3.4’deki gibi hesaplanır.

$$d_j = |1 - E_j| \quad \forall j \quad (3.4)$$

Adım 5: Kriter ağırlıklarının hesaplanması: Kriter ağırlıkları Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanır.

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad \forall j \quad (3.5)$$

İncelenen çalışmalarda Bal & Badurdeen (2020) ve Yadegari ve diğ. (2023) sosyal kriterlerin ağırlıklandırılmasında literatürde sıklıkla kullanılan AHP yöntemi kullanmışlardır. Literatürde ağ tasarımı çalışmalarında sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun ağırlıklandırılmasında Entropi yöntemi henüz kullanılmamıştır. Ancak bu çalışmada, karar vericilerin kişisel önyargı ve ön kabullerinin etkisini azalttığından ve bilgi teorisi temelinde çalıştığı için ağırlıkları objektif bir şekilde belirlediğinden Entropi yöntemi tercih sebebi olmuştur.

3.2 Çok Amaçlı Matematiksel Programlama

Çok amaçlı matematiksel programlama, birden fazla amaç fonksiyonunun optimize edilmesini sağlayan matematiksel bir optimizasyon dalıdır. Geleneksel matematiksel programlama, genellikle tek bir amaç fonksiyonunu optimize ederken, çok amaçlı matematiksel programlama, birden fazla birbiriyle çelişen hedefi aynı anda ele almaktadır. Çok amaçlı matematiksel programlamadaki temel zorluk, bir amaç fonksiyonunu optimize etmek amacıyla yapılan iyileştirmelerin diğer amaç fonksiyonlarını olumsuz yönde etkileme durumudur. Dengeli bir çözüm bulmak adına çözüm kümesi içerisinde çeşitli çözümlerin değerlendirilmesi gerekliliği de bu süreci daha karmaşık hale getirmektedir.

Literatürde optimizasyon problemlerinde çoğunlukla çalışmalarda tek amaçlı matematiksel programlama kullanılmaktadır fakat gerçek hayatta karar verme sırasında birçok faktör etkili olmaktadır. Çok amaçlı matematiksel programlama ile birden çok amaç eşzamanlı değerlendirilerek uygun çözüm elde edilebilmektedir. Bu yöntemle birlikte tedarik zinciri ağ tasarımı, yer seçimi, araç rotalama, çizelgeleme vb. problem çeşitleri modellenebilmektedir. Bu tür problemlerde, genellikle birçok çelişen amaç bulunur ve bu amaçlardan birinin iyileştirilmesi diğerlerine zarar vermektedir. En nihayetinde çeşitli amaçları dengelemek ve en uygun sonuca erişmek hedeflenmektedir. En genel haliyle çok amaçlı matematiksel modeller aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Bal, 2019);

$$\max \text{ ya da } \min f_m(x) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3.6)$$

$$\text{öyle ki } g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3.7)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3.8)$$

$$x_i^{alt\ sınır} \leq x_i \leq x_i^{üst\ sınır} \quad (3.9)$$

3.6 numaralı denklem M tane amaç fonksiyonunu tanımlamaktadır. 3.7 numaralı denklem eşitsizlik kısıtlarını gösterirken, 3.8 numaralı denklem eşitlik kısıtlarını göstermektedir. 3.9 numaralı denklem ise karar değişkenleri için alt ve üst sınırları belirtmektedir.

Literatürde çok amaçlı modellerin çözümünde çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Metasezgisel yöntemlerden genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu gibi yöntemlere ek olarak kesin çözüm yöntemlerinden hedef programlama, epsilon kısıt yöntemi gibi metotlarda sıkça kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında literatürde çok amaçlı modellerin çözümünde sıklıkla kullanılan epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde önceliklendirilen amaç fonksiyonu dışındaki amaç fonksiyonları kısıt olarak eklenir ve önceliklendirilen amaç fonksiyonu eniyilenir. (Mavrotas, 2009), epsilon kısıt yöntemini ileri taşıyarak zayıf pareto optimal çözümlerin üretilmesini önleyen ve gereksiz yinelemelerden kaçınarak süreci hızlandıran genişletilmiş epsilon kısıt yöntemi (AUGMECON)'ni önermiştir.

$$\max f_1(x) + eps \times \left(\frac{s_2}{fmax_2 - fmin_2} + \frac{s_3}{fmax_3 - fmin_3} + \dots + \frac{s_p}{fmax_p - fmin_p} \right) \quad (3.10)$$

Öyle ki,

$$f_2(x) - s_2 = fmin_2 + t \times \left(\frac{fmax_2 - fmin_2}{q_2} \right) \quad (3.11)$$

$$f_3(x) - s_3 = fmin_3 + t \times \left(\frac{fmax_3 - fmin_3}{q_3} \right) \quad (3.12)$$

...

$$f_p(x) - s_p = fmin_p + t \times \left(\frac{fmax_p - fmin_p}{q_p} \right) \quad (3.13)$$

$$x \in S, s_i \in R^+$$

Denklem 3.10’de bulunan ϵ 10^{-3} ile 10^{-6} arasında herhangi bir değer olacak şekilde belirlenmektedir. Her bir amaç fonksiyonu tek başına optimize edildiği durumda diğer amaç fonksiyonlarının aldığı değerler ödünleşme matrisinde tutulmaktadır. Bu matris kullanılarak her bir amaç fonksiyonunu aldığı maksimum ve minimum değerler belirlenerek aralık değerleri hesaplanmaktadır. Kısıtlarda yer alan t değeri her bir iterasyonu temsil etmektedir ve iterasyonlar sonucunda pareto optimal kümesi elde edilmektedir.

Mavrotas & Florios (2013), AUGMECON yöntemini geliştirerek birçok gereksiz yinelemelerden kaçınan ve işlem süresini azaltan AUGMECON2 yöntemini geliştirmiştir. Ayrıca bu yöntemin çok amaçlı tam sayılı programlama problemlerinde diğer yöntemlere göre daha etkili olduğunu göstermiştir. AUGMECON2 aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$\max f_1(x) + \epsilon \times \left(\frac{s_2}{f_{\max_2} - f_{\min_2}} + 10^{-1} \times \frac{s_3}{f_{\max_3} - f_{\min_3}} + \dots + 10^{-(p-2)} \times \frac{s_p}{f_{\max_p} - f_{\min_p}} \right) \quad (3.14)$$

Öyle ki,

$$f_2(x) - s_2 = f_{\min_2} + t \times \left(\frac{f_{\max_2} - f_{\min_2}}{q_2} \right) \quad (3.15)$$

$$f_3(x) - s_3 = f_{\min_3} + t \times \left(\frac{f_{\max_3} - f_{\min_3}}{q_3} \right) \quad (3.16)$$

...

$$f_{p-1}(x) + s_{p-1} = f_{\max_{p-1}} - t \times \left(\frac{f_{\max_{p-1}} - f_{\min_{p-1}}}{q_{p-1}} \right) \quad (3.17)$$

$$f_p(x) - s_p = f_{\min_p} + t \times \left(\frac{f_{\max_p} - f_{\min_p}}{q_p} \right) \quad (3.18)$$

$$x \in S, s_i \in R^+$$

AUGMECON yöntemine benzer olarak burada $s_2, s_3, \dots, s_p$ ilgili amaç fonksiyonlarının gevşek değişkenleridir. Denklem (3.15), (3.16) ve (3.18) verilen f_2, f_3 ve f_p amaç fonksiyonları maksimizasyon olarak tanıtılmıştır. Amaç fonksiyonlarından herhangi birinin minimizasyon olması durumunda kısıtlardaki ilgili gevşek değişkenin katsayısı pozitif olması gerekmektedir. Amaç fonksiyonlarından

f_{p-1} 'nin minimizasyon olması durumunda modele eklenmesi gereken kısıt, denklem (3.17)'da verilmiştir.

3.3 Basit Toplamlı Ağırlıklandırma (SAW)

Basit Toplamlı Ağırlıklandırma metodu, çok kriterli karar verme (ÇKKV) metodolojileri arasında en çok bilinen yöntemlerden biridir. Basit Toplamlı Ağırlıklandırma metodolojisinde, kriter katkılarını toplama işlemi gerçekleştirebilmek adına, verilerin aynı birime sahip olması gereklidir. Eğer bu şart sağlanmıyorsa, normalizasyon işlemi uygulanır. Tipik olarak, Basit Toplamlı Ağırlıklandırma metodu için kullanılan normalizasyon yaklaşımı genellikle lineer normalizasyondur. Normalizasyon sonrasında, her bir alternatifin toplam puanı; o alternatif için çeşitli kriterlerdeki normalize değerlerin, ağırlıklarla çarpılıp bulunan çarpım değerlerinin toplanmasıyla elde edilir (Öz & Manisalı, 2007). Denklem 3.19 basit toplamlı ağırlıklandırma metodunun formülasyonu verilmiştir.

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (3.19)$$

4. UYGULAMA

Bu çalışmada, elektrikli araçların bataryaları kapalı çevrim tedarik zinciri metodolojisi ile sürdürülebilirlik ilkeleri kapsamında ele alınmıştır. 2036 yılındaki durum Türkiye’deki elektrikli araç bataryaları için model işletilmiştir.

Çalışma kapsamında, sürdürülebilirliğin üç boyutu dikkate alınarak döngüsel bir tedarik zinciri ağ tasarımı için çok amaçlı model oluşturulmuştur. Ekonomik amaç maliyet minimizasyonu, çevresel amaç karbon emisyon minimizasyonu, sosyal amaç ise seçilen tesislerin bulunduğu coğrafyalardaki sosyal fayda maksimizasyonu şeklinde tanımlanmıştır. Oluşturulan model ile 2036 yılındaki senaryo için hammadde tedarikçisinden satın alınacak Lityum ve Kobalt mineral miktarlarını belirlenmektedir. Ayrıca, servis ve toplama, geri dönüşüm ve imha merkezlerinin kurulacağı yer, aday şehirler arasında yapılmaktadır. Aday şehirlerin belirlenme sürecine 4.1’de yer verilmiştir.

4.1 Aday Şehirlerin Belirlenmesi

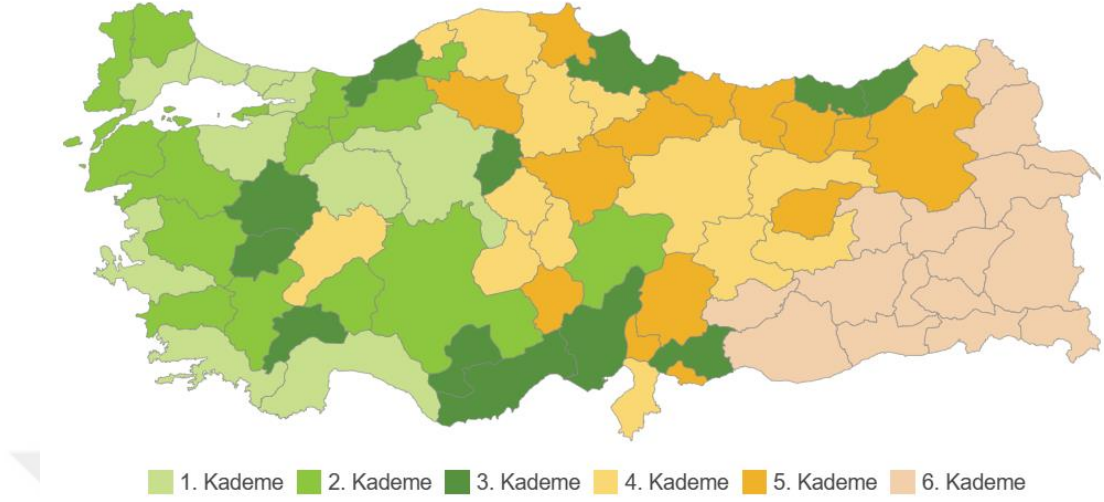
Elektrikli araçların bataryaları için sürdürülebilir ve döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı kapsamında servis ve toplama merkezi, geri dönüşüm merkezi ve imha merkezinin kurulacağı il, alternatif iller arasından seçilecektir. Bu iller, Devlet Planlama Teşkilatı ve TÜİK koordinasyonunda belirlenen İstatistikî Bölge Birimleri Sınıflandırması (IBBS)’ndan yararlanılmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1: İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflandırması (ka.gov.tr).

Düzy 1 Kod	Düzy 1 Bölge Adı	Düzy 2 Kod	Düzy 2 Bölgelerinin Kapsadığı İller (Düzy 3)
TR1	İstanbul	TR10	İstanbul
TR2	Batı Marmara	TR21	Tekirdağ, Edirne, Kırklareli
		TR22	Balıkesir, Çanakkale
TR3	Ege	TR31	İzmir
		TR32	Aydın, Denizli, Muğla
		TR33	Manisa, Afyonkarahisar, Kütahya, Uşak
TR4	Doğu Marmara	TR41	Bursa, Eskişehir, Bilecik
		TR42	Kocaeli, Sakarya, Düzce, Bolu, Yalova
TR5	Batı Anadolu	TR51	Ankara
		TR52	Konya, Karaman
TR6	Akdeniz	TR61	Antalya, Isparta, Burdur
		TR62	Adana, Mersin
		TR63	Hatay, Kahramanmaraş, Osmaniye
TR7	Orta Anadolu	TR71	Kırıkkale, Aksaray, Niğde, Nevşehir, Kırşehir
		TR72	Kayseri, Sivas, Yozgat
TR8	Batı Karadeniz	TR81	Zonguldak, Karabük, Bartın
		TR82	Kastamonu, Çankırı, Sinop
		TR83	Samsun, Tokat, Çorum, Amasya
TR9	Doğu Karadeniz	TR90	Trabzon, Ordu, Giresun, Rize, Artvin, Gümüşhane
TRA	Kuzeydoğu Anadolu	TRA1	Erzurum, Erzincan, Bayburt
		TRA2	Ağrı, Kars, Iğdır, Ardahan
TRB	Ortadoğu Anadolu	TRB1	Malatya, Elazığ, Bingöl, Tunceli
		TRB2	Van, Muş, Bitlis, Hakkâri
TRC	Güneydoğu Anadolu	TRC1	Gaziantep, Adıyaman, Kilis
		TRC2	Şanlıurfa, Diyarbakır
		TRC3	Mardin, Batman, Şırnak, Siirt

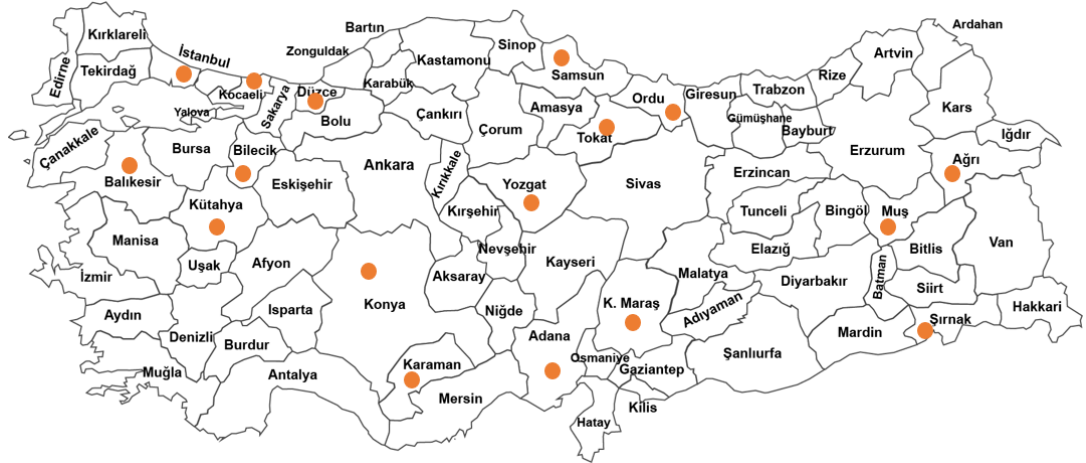
Düzy 1'deki bölgelerden hangi illerin seçileceğine T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından son olarak 2017 yılında yayınlanan İllerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Endeksi (SEGE)'ne göre karar verilmiştir (Şekil 4.1). Düzy-1'deki 12

bölge içerisindeki iller arasında SEGE sıralaması en düşük il Alternatif olarak belirlenmiştir.



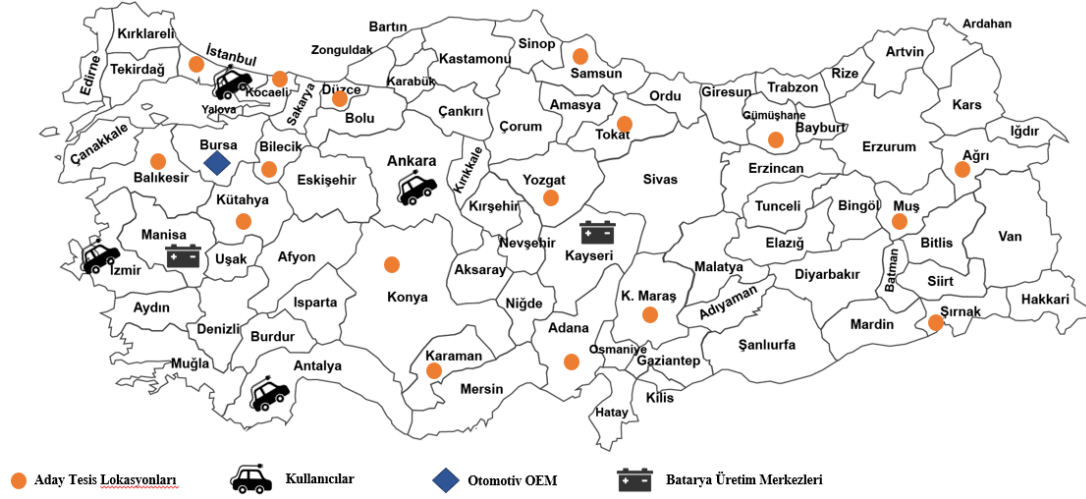
Şekil 4.1: SEGE Sıralaması (SEGE il raporu, 2017).

Düzyer 1'deki her bir ile ek olarak Konya, Samsun, Bilecik, Kocaeli ve Adana alternatif iller arasına eklenmiştir. Sonuç olarak belirlenen iller Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Alternatif iller.

Batarya üretim merkezi için Manisa ve Kayseri illeri belirlenmiştir. Otomotiv OEM olarak halihazırda birçok firmanın da o bölgeden olmasından kaynaklı Bursa ili seçilmiştir. TÜİK verilerine göre trafiğe kayıtlı araç sayısında ilk dört sıradaki İstanbul, Ankara, İzmir ve Antalya illeri kullanıcı olarak seçilmiştir. Alternatif iller ve tesislerin harita üzerinde yerleşimi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3: Alternatif iller ve tesislerin harita üzerinde gösterimi.

4.2 Varsayımlar ve Değerlerin Elde Edilmesi

Gelecek yıllarda elektrikli araçlara olan talebin artacağı yönündeki tahminlerden ve AB batarya mevzuatı kapsamında geri dönüşüm hedeflerinden yola çıkarak 2036 yılındaki durum simüle edilmiştir. SHURA enerji dönüşüm şirketi tarafından yayınlanan raporda elektrikli araçlara olan talep 2030 yılına kadar tahminlenmiştir. Bu rapordaki verilerden yola çıkarak 2036 yılı için elektrikli araç sayısı tahminlenerek problemde kullanılmıştır. Ayrıca elektrikli araç bataryalarının faydalı ömrünün 8 yıl olacağı varsayılarak 2036 yılında ömrünü tamamlamış elektrikli araç batarya sayısı hesaplanmıştır. Bataryaların ağırlık, lityum ve kobalt içerikleri gibi bilgileri LFP tip batarya için Prescouter firması tarafından 2022 yılında yayınlanan “State of Battery Recycling” isimli raporundan, NMC tip batarya için Makine Mühendisleri Odasının Elektrikli Araçlarda Batarya Teknolojileri isimli raporundan alınmıştır. Problemde kullanılan Lityum ve Kobalt minerallerinin satın alma maliyeti İsviçre Nadir Toprak ve Metaller Enstitüsü’nden alınmıştır. Ayrıca problemde yeniden üretim ve yeniden kullanım hazırlık maliyetleri göz ardı edilmiştir.

Yeşil Mutabakat Antlaşması ile birlikte devreye giren Döngüsel Ekonomi Eylem Planı kapsamında 18 Ağustos 2036 yılı itibariyle üretilen bataryaların içeriğindeki kritik mineral olarak adlandırılan lityum ve kobalt minerallerinin minimum geri dönüştürülmüş içerik barındırma oranı bu problemde ele alınmıştır. Bu oran 2036 yılı itibariyle lityum için %12, kobalt için %26’dır. Bununla birlikte geri dönüşüm verimlilik hedefi de parametre olarak yer almaktadır.

Subulan & Baykasoğlu (2023) çalışmasında yer alan parametrelerden sabit açılış ve operasyon maliyetleri ve imha maliyetinin yanı sıra geri dönüşümü ve imha edilmesi sırasında ortaya çıkan karbon emisyon değerleri problemde kullanılmıştır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2: Sabit açılış ve operasyon maliyetler ve yararlanılan çalışmalar

Tesisler	Maliyetler	Yararlanılan çalışma
Servis ve Toplama Merkezi	(320.000 – 1.804.000) €	(Subulan & Baykasoğlu, 2023)
Geri Dönüşüm Merkezi	(3.200.000 – 7.140.000) €	(Subulan & Baykasoğlu, 2023)
İmha Merkezi	(320.000 – 890.000) €	(Rosenberg ve diğ., 2023)

Tesislerin sabit açılış ve operasyon maliyetleri SEGE raporunda her bir kademedeki illerin ortalama arsa değerine göre oranlanarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3: SEGE kademelerine göre sabit açılış ve operasyon maliyetleri.

SEGE Kademe	Ortalama Arsa Değeri (TL)	Servis ve Toplama Merkezi Maliyeti	Geri Dönüşüm Merkezi Maliyeti	İmha Merkezi Maliyeti
1	4725	1804000	7140000	890000
2	3392	1393518	6050175	732335
3	3201	1098817	5267749	619141
4	2915	820705	4529366	512319
5	2848	567442	3856955	415042
6	2647	320000	3200000	320000

Bataryaların taşınma maliyeti ise (Subulan ve diğ., 2015) çalışmasından batarya ağırlığına göre oranlanarak elde edilmiştir. Hammaddenin elde edilmesi, bataryaların üretimi ve montajı ve bataryaların taşınması sırasında ortaya çıkan emisyon miktarı

ise (Hao ve diğ., 2017) çalışmasından elde edilmiştir. Modelde bulunan uzaklık değerleri alternatif şehirler arasındaki uzaklık değerleridir.

Sosyal amaç fonksiyonunda kullanılan kriterler bölüm 2.4'te bahsedildiği üzere;

- İşsizlik oranı
- İş bulma sebebiyle dışarıya gerçekleşen göç oranı
- Yoksulluk oranı
- Gelir Eşitsizliği
- Kadın - erkek istihdam eşitsizliği olarak belirlenmiştir.

Belirlenen bu kriterler ENTROPİ yöntemi kullanılarak ağırlıkları belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4: Sosyal fayda kriter ağırlıkları.

İşsizlik Oranı	İş Bulma Sebebiyle Dışarıya Gerçekleşen Göç Oranı	Yoksulluk Oranı	Gelir Eşitsizliği	Kadın Erkek İstihdam Eşitsizliği
0,24	0,46	0,18	0,02	0,10

4.3 Problemin Matematiksel Modeli

Çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama yöntemi ile kurulan matematiksel model şu şekildedir:

İndisler :

- b Batarya kümesi ($b \in B$)
- c Komponent kümesi ($c \in C$)
- s Tedarikçi kümesi ($s \in S$)
- i Batarya üretim merkezi kümesi ($i \in I$)
- o Otomotiv OEM kümesi ($o \in O$)
- k Kullanıcılar ($k \in K$)
- r Yeniden kullanım kümesi ($r \in R$)
- j Servis ve toplama merkezi ($j \in F$)

v	İmha tesisi kümesi ($v \in F$)
l	Geri dönüşüm merkezi kümesi ($l \in F$)
f	Alternatif iller kümesi ($f \in F$)
m	Sosyal kriterler kümesi ($m \in M$)

Parametreler :

$f1_j$	Servis ve toplama tesisi sabit açılış ve operasyon maliyeti
$f2_l$	Geri dönüşüm tesisi sabit açılış ve operasyon maliyeti
$f3_v$	İmha tesisi sabit açılış ve operasyon maliyeti
$Pcost_b$	b tipi bataryanın üretim maliyeti (€ / birim)
$Rcost_b$	b tipi bataryanın geri dönüşüm maliyeti (€ / birim)
$Tcost1_b$	b tipi bataryanın taşınma maliyeti (€ / km)
$Tcost2_b$	b tipi kullanılmış bataryanın taşınma maliyeti (€ / km)
$Tcost3_c$	c tipi komponenti taşıma maliyeti (€ / km)
$Dcost1_b$	b tipi bataryanın imha maliyeti (€ / birim)
$Dcost2_c$	c tipi komponentin imha maliyeti (€ / kg)
W_b	b tipi bataryanın ağırlığı (kg)
EP_b	b tipi bataryanın üretim emisyonu (CO ₂ / birim)
EA_b	b tipi bataryanın montajı sırasında ortaya çıkan emisyon miktarı (CO ₂ / birim)
$ET1_b$	b tipi bataryanın taşınması sırasında ortaya çıkan emisyon miktarı (CO ₂ / birim)
$ET2_c$	c tipi komponentin taşınması sırasında ortaya çıkan emisyon miktarı (CO ₂ / kg)
ER	Bataryanın geri dönüştürülmesi sırasında ortaya çıkan emisyon miktarı (CO ₂ / kg)
EV	Bataryanın imha edilmesi sırasında ortaya çıkan emisyon miktarı (CO ₂ / kg)

EE_c	c tipi komponentin elde edilmesi sırasında ortaya çıkan emisyon miktarı(CO ₂ /kg)
$MinR_c$	Minimum geri dönüştürülmüş içerik barındırma oranı (birim / kg)
De_{bk}	b tipi bataryanın kullanıcı k tarafından talep miktarı
EOL_{bk}	Ömrünü tamamlamış b tipi bataryanın kullanıcı k tarafından toplanan miktarı
Puc_{cs}	c tipi komponenti s tedarikçisinden satın alma maliyeti (€ / kg)
A_{bc}	b tipi bataryanın içerisinde bulunan c tipi komponent miktarı
$CapO$	Otomotiv OEM'nin batarya kapasitesi
$CapJ$	Toplama ve servis merkezinin batarya kapasitesi
$CapR$	Geri dönüşüm merkezinin batarya kapasitesi
$CapI$	Batarya üretim merkezinin batarya kapasitesi
$D0_{io}$	Batarya üretim merkezi i ile OEM o arasındaki uzaklık
$D1_{ok}$	Otomotiv OEM o ile kullanıcı k arasındaki uzaklık
$D2_{kj}$	Kullanıcı k ile servis ve toplama merkezi j arasındaki uzaklık
$D3_{ff}$	Alternatif iller arasındaki uzaklık
$D4_{li}$	Geri dönüşüm merkezi l ile batarya üretim merkezi i arasındaki uzaklık
SC_{fm}	Alternatif il f'deki sosyal kriter f değeri
SW_m	m sosyal kriterinin ağırlığı
Eff	Geri dönüşüm verim oranı
VR	Yeniden üretim oranı
RR	Yeniden kullanım oranı

Karar değişkenleri :

Q_{bi}	Batarya üretim merkezi i'de üretilen b tipi batarya miktarı
CS_{cs}	Tedarikçi s'den satın alınan komponent c miktarı
$X1_{bio}$	Üretim merkezi i'den OEM o'ya aktarılan b tipi batarya miktarı

$X2_{bok}$	OEM o'dan kullanıcı k'ya aktarılan b tipi batarya miktarı
$X3_{bkj}$	Kullanıcı k'dan servis ve toplama merkezi j'ye aktarılan b tipi batarya miktarı
$X4_{bjv}$	Servis ve toplama merkezi j'den imha merkezi v'ye aktarılan b tipi batarya miktarı
$X5_{clv}$	Geri dönüşüm merkezi l'den imha merkezi v'ye aktarılan komponent c miktarı
$X6_{bjl}$	Servis ve toplama merkezi j'den geri dönüşüm merkezi l'ye aktarılan b tipi batarya miktarı
$X7_{cli}$	Geri dönüşüm merkezi l'den batarya üretim merkezi i'ye aktarılan c tipi komponent miktarı
$X8_{bjk}$	Servis ve toplama merkezi j'den yeniden üretim için kullanıcıya gönderilen b tipi batarya miktarı
$X9_{bjr}$	Servis ve toplama merkezi j'den yeniden kullanım için aktarılan b tipi batarya miktarı
$Centers_j$	1, j şehrinde servis ve toplama merkezi açıldıysa 0, dd.
$Recycle_l$	1, l şehrinde geri dönüşüm merkezi açıldıysa 0, dd.
$Landf_v$	1, v şehrinde imha tesisi açıldıysa, 0, dd.
T_{jk}	1, k kullanıcısından j servis ve toplama merkezine batarya gönderiliyorsa, 0, dd

Amaç Fonksiyonları:

Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Maliyet Minimizasyonu

$$Min Z_1 = SM + HM + GM + İM + TM \quad (4.1)$$

Sabit Açılış ve Operasyon Maliyeti (SM)

$$\sum_{j \in F} f1_j * Centers_j + \sum_{l \in F} f2_l * Recycle_l + \sum_{v \in F} f3_v * Landf_v \quad (4.2)$$

Hammadde Satın Alma Maliyeti (HM)

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CS_{cs} * Puc_{cs} \quad (4.3)$$

Geri Dönüşüm Maliyeti (GM)

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{l \in F} X6_{bjl} * Rcost_b \quad (4.4)$$

İmha Maliyeti (İM)

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{v \in F} X4_{bjv} * Dcost1_b + \sum_{c \in C} \sum_{l \in F} \sum_{v \in F} X5_{clv} * Dcost2_c \quad (4.5)$$

Taşıma Maliyeti (TM)

$$\begin{aligned} & \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{o \in O} X1_{bio} * Tcost1_b * D0_{io} + \sum_{b \in B} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} X2_{bok} * Tcost1_b * D1_{ok} + \\ & \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{j \in F} X3_{bjk} * Tcost2_b * D2_{kj} + \sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{v \in F} X4_{bjv} * Tcost2_b * D3_{jv} + \\ & \sum_{c \in C} \sum_{l \in F} \sum_{v \in F} X5_{clv} * Tcost3_c * D3_{lv} + \sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{l \in F} X6_{bjl} * Tcost2_b * D3_{jl} + \\ & \sum_{c \in C} \sum_{l \in F} \sum_{i \in I} X7_{cli} * Tcost3_c * D4_{li} + \sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} X8_{bjk} * Tcost1_b * D2_{kj} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Karbon Emisyon Minimizasyonu

$$Min Z_2 = EE + \ddot{U}E + GE + \dot{I}E + TE \quad (4.7)$$

Mineral Elde Etme Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Miktarı (EE)

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CS_{cs} * EE_c \quad (4.8)$$

Bataryanın Üretimi Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Miktarı (ÜE)

$$\sum_{b \in B} \sum_{i \in I} Q_{bi} * EP_b \quad (4.9)$$

Bataryanın Geri Dönüşümü Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Miktarı (GE)

$$\sum_{c \in C} \sum_{l \in F} \sum_{i \in I} X7_{cli} * ER \quad (4.10)$$

Bataryanın İmha Edilmesi Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Miktarı (İE)

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{v \in F} X4_{bjv} * EV * W_b + \sum_{c \in C} \sum_{l \in F} \sum_{v \in F} X5_{clv} * EV \quad (4.11)$$

Bataryanın Taşınması Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Miktarı (TE)

$$\begin{aligned} & \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{o \in O} X1_{bio} * ET1_b * D0_{io} + \sum_{b \in B} \sum_{o \in O} \sum_{k \in K} X2_{bok} * ET1_b * D1_{ok} + \\ & \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{j \in F} X3_{bkj} * ET1_b * D2_{kj} + \sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{v \in F} X4_{bjv} * ET1_b * D3_{jv} + \\ & \sum_{c \in C} \sum_{l \in F} \sum_{v \in F} X5_{clv} * ET2_c * D3_{lv} + \sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{l \in F} X6_{bjl} * ET1_b * D3_{jl} + \\ & \sum_{c \in C} \sum_{l \in F} \sum_{i \in I} X7_{cli} * ET2_c * D4_{li} + \sum_{b \in B} \sum_{j \in F} \sum_{k \in K} X8_{bjk} * ET1_b * D2_{kj} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Sosyal Fayda Maksimizasyonu

$$Maks Z_3 = \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} SC_{fm} * SW_m * (Centers_j + Recycle_l + Landf_v) \quad (4.13)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{b \in B} \sum_{k \in K} X3_{bkj} \leq Centers_j * CapJ \quad \forall j \quad (4.14)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in F} X6_{bjl} \leq Recycle_l * CapR \quad \forall l \quad (4.15)$$

$$\sum_{b \in B} Q_{bi} \leq CapI \quad \forall i \quad (4.16)$$

$$\sum_{o \in O} X1_{bio} \leq Q_{bi} \quad \forall b, \forall i \quad (4.17)$$

$$\sum_{o \in O} X2_{bok} \geq De_{bk} \quad \forall b, \forall k \quad (4.18)$$

$$\sum_{k \in K} X2_{bok} = \sum_{i \in I} X1_{bio} \quad \forall b, \forall o \quad (4.19)$$

$$\sum_{j \in F} X3_{bkj} = EOL_{bk} \quad \forall b, \forall k \quad (4.20)$$

$$\sum_{j \in F} X3_{bkj} * VR = \sum_{j \in F} X8_{bjk} \quad \forall b, \forall k \quad (4.21)$$

$$\sum_{k \in K} X3_{bkj} * RR = \sum_{r \in R} X9_{bjr} \quad \forall b, \forall j \quad (4.22)$$

$$\sum_{v \in F} X4_{bjv} + \sum_{l \in F} X6_{bjl} + \sum_{k \in K} X8_{bjk} + \sum_{r \in R} X9_{bjr} = \sum_{k \in K} X3_{bkj} \quad \forall b, \forall j \quad (4.23)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in F} X6_{bjl} * A_{bc} * Eff = \sum_{i \in I} X7_{cli} \quad \forall l, \forall c \quad (4.24)$$

$$\sum_{l \in F} X7_{cli} + \sum_{s \in S} CS_{cs} = \sum_{b \in B} Q_{bi} * A_{bc} \quad \forall i, \forall c \quad (4.25)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in F} X6_{bjl} * A_{bc} = \sum_{v \in F} X5_{clv} + \sum_{i \in I} X7_{cli} \quad \forall l, \forall c \quad (4.26)$$

$$\sum_{l \in F} X7_{cli} \geq \sum_{b \in B} Q_{bi} * A_{bc} * MinR_c \quad \forall i, \forall c \quad (4.27)$$

$$X4_{bjv} \leq M * Landf_v \quad \forall b, \forall j, \forall v \quad (4.28)$$

$$X5_{clv} \leq M * Landf_v \quad \forall c, \forall l, \forall v \quad (4.29)$$

$$X6_{bjl} \leq M * Recycle_l \quad \forall b, \forall j, \forall l \quad (4.30)$$

$$\sum_{l \in F} Recycle_l \leq 1 \quad (4.31)$$

$$\sum_{v \in F} Landf_v \leq 1 \quad (4.32)$$

$$Recycle_l + Centers_j + Landf_v \leq 1 \quad \forall f \quad (4.33)$$

$$\sum_{b \in B} X3_{bkj} \leq M * T_{jk} \quad \forall k, \forall j \quad (4.34)$$

$$\sum_{j \in F} T_{jk} \leq 1 \quad \forall k \quad (4.35)$$

$$\sum_{k \in K} T_{jk} \leq Centers_j \quad \forall j \quad (4.36)$$

Birinci amaç fonksiyonu denklem (4.1)'de kapalı döngü tedarik zinciri maliyet minimizasyonu olarak tanımlanmıştır. (4.2) - (4.6) aralığındaki denklemler sabit açılış ve operasyon maliyeti (SM), hammadde satın alma maliyeti (HM), geri dönüşüm maliyeti (GM), imha maliyeti (İM) ve taşıma maliyeti (TM)'dir. İkinci amaç fonksiyonu denklem (4.7)'de kapalı döngü tedarik zinciri sırasında ortaya çıkan karbon emisyonunu enküçüklenmiştir. (4.8) – (4.12) aralığındaki denklemler kapalı döngü tedarik zinciri süreçlerindeki karbon emisyon türlerini ifade etmektedir. Denklem (4.13)'de üçüncü amaç fonksiyonu sosyal faydayı maksimize etmektedir. (4.14) numaralı denklemde açılacak servis ve toplama merkezlerine kullanıcılardan gelen bataryaların servis ve toplama merkezinin kapasitesini aşmaması sağlanmaktadır. Benzer şekilde (4.15) numaralı denklemde açılacak geri dönüşüm merkezlerinin servis ve toplama merkezlerinden gelen bataryaların geri dönüşüm merkezinin kapasitesini aşmaması gerekmektedir. Denklem (4.16)'de üretilen bataryaların batarya üretim merkezi kapasitesini aşmaması istenmiştir. (4.17) numaralı denklemde batarya üretim merkezinden otomotiv OEM'e aktarılan batarya miktarı üretilen batarya miktarını geçemez kısıtı getirilmiştir. Denklem (4.18)'de kullanıcıların talep miktarının karşılanması sağlanmıştır. (4.19) numaralı denklem otomotiv OEM'e gelen bataryaların kullanıcılara aktarılmasını sağlayan düğüm denge kısıtıdır. Denklem (4.20)'de servis ve toplama merkezlerine ömrünü tamamlamış bataryaların ataması yapılmıştır. Denklem (4.21) ve (4.22)'de servis ve toplama merkezinde toplanan ömrünü tamamlamış bataryalar belirli oranda yeniden kullanım ve yeniden üretim için gönderilmiştir. (4.23) numaralı denklem, servis ve toplama merkezinde toplanan ömrünü tamamlamış batarya miktarının bu tesisten gönderilen batarya miktarına eşit olmasını sağlayan denge kısıtıdır. Denklem (4.24)'de geri dönüşüm merkezine gelen bataryaların komponente dönüştürme miktarı ve verimlilik oranı ile çarpılarak elde edilen geri dönüştürülmüş mineral miktarı hesaplanmaktadır.

(4.25) numaralı denklemde üretilmesi gereken batarya miktarına göre satın alınması gereken hammadde miktarına karar verilmektedir. Denklem (4.26)'de geri dönüştürülemeyen komponent miktarının imha edilmesi kısıtıdır. (4.27) numaralı denklemde döngüsel ekonomi eylem planı kapsamında batarya üretiminde kobalt ve lityum minerallerinin minimum geri dönüştürülmüş içerik barındırma şartı sağlanmıştır. (4.28), (4.29) ve (4.30) numaralı denklemlerde bataryaların taşıma işlemi sadece açılan tesislere yapılması gerekliliği yerine getirilmiştir. Denklem (4.31) ve (4.32)'de geri dönüşüm ve imha merkezinin en fazla birer tane olması istenmiştir. (4.33) numaralı denklemde her ilde en fazla bir tesis açılması kısıdı getirilmiştir. Denklem (4.34), (4.35) ve (4.36) ile birlikte bataryaların her kullanıcıdan sadece bir servis ve toplama merkezine taşınması sağlanmıştır.

4.4 Matematiksel Model Sonuçları

Bu çalışmada çözüm yöntemi olarak, literatürde çok amaçlı modellerin çözümünde başarıyla uygulanan AUGMECON2 yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen model, GAMS® programında CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Modelin çözümünde, Windows işletim sistemine sahip Intel Core 11. Nesil i5 2.40 GHz işlemcili ve 8 GB RAM bulunan dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. En iyi çözüme ulaşılması 55,44 saniye sürmüştür. Çok amaçlı model 2251 değişken, 2090 kısıt içermektedir.

Modelde yer alan üç amaç fonksiyonu da ayrı ayrı optimize edildiğinde diğer amaç fonksiyonlarının aldığı değerler Çizelge 4.5'de ödünleşme çizelgesinde verilmiştir.

Çizelge 4.5: Ödünleşme çizelgesi.

	Z₁ – KDTZ Maliyeti	Z₂ – CO₂ Emisyon	Z₃ – Sosyal Fayda
Min Z ₁	151577360,61	42145968452,92	12,60
Min Z ₂	157177479,23	25092517710,96	26,90
Maks Z ₃	175306937,70	132231088852,08	36,54

Model ilk olarak ekonomik boyut için düzenlenen KDTZ maliyeti en küçüklenecek şekilde çalıştırıldığında 151577360.61€ değeri elde edilmiştir. Çevresel boyut en küçüklendiğinde 25092517710,96 kgCO₂ değerine ulaşılmıştır. Son olarak üçüncü

amaç fonksiyonu sosyal faydayı maksimize edecek şekilde düzenlediğinde 36.54 değeri elde edilmiştir.

Her bir adımda kullanılmak üzere kısıt olarak düzenlenecek olan çevresel ve sosyal boyut için grid noktalar Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6: Grid noktalar.

	Z₂ – CO₂ Emisyon	Z₃ – Sosyal Fayda
G0	132231088852,08	12,6
G1	110803374623,86	17,39
G2	89375660396	22,18
G3	67947946167	26,97
G4	46520231939	31,75
G5	25092517711	36,54

AUGMECON2 yöntemine göre G0 durumu için amaç fonksiyonu ve modele eklenen kısıtlar şu şekildedir;

$$\text{maks} [-Z_1 + 0,001 \times (\frac{s_2}{7142248,54} + 10^{-1} \times \frac{s_3}{23,94})] \quad (4.37)$$

$$Z_2 + s_2 = 132231088852,08 \quad (4.38)$$

$$Z_3 - s_3 = 12,60 \quad (4.39)$$

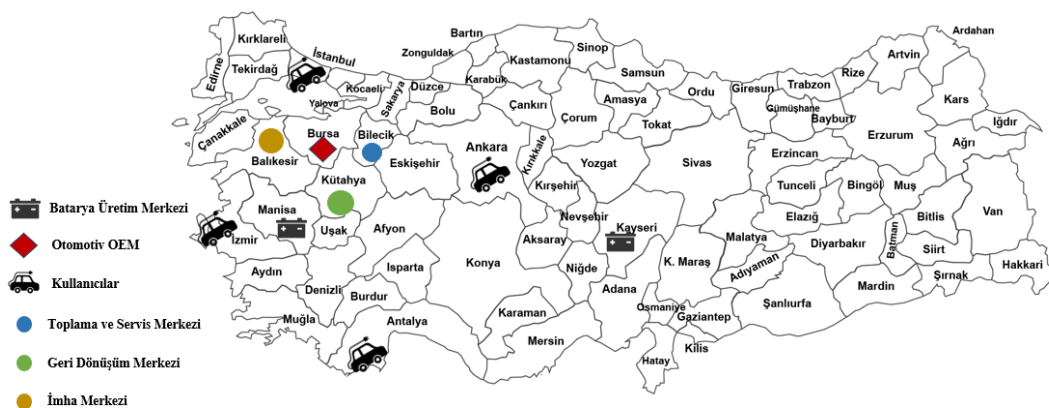
Diğer kısıtlar...

Denklem (4.37) AUGMECON2 yöntemine göre yeni amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. (4.38) ve (4.39) numaralı denklemler modele kısıt olarak eklenmiştir. Her bir grid nokta için model tekrar çözülerek 10 adet pareto optimal çözüm elde edilmiştir. Pareto optimal çözüm kümesi Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7:Pareto optimal çözüm kümesi.

#	Z ₁ – KDTZ Maliyeti	Z ₂ – CO ₂ Emisyon	Z ₃ – Sosyal Fayda
S1	151577361	42145968453	12,60
S2	157177479	25092517711	26,90
S3	152305156	32605183710	17,76
S4	157177479	25092517711	26,90
S5	153187953	39927076502	22,25
S6	157177479	25092517711	26,90
S7	154341803	42838904145	26,97
S8	159911265	64547976391	31,84
S9	165138324	43572668568	31,84
S10	175306938	132231088852	36,54

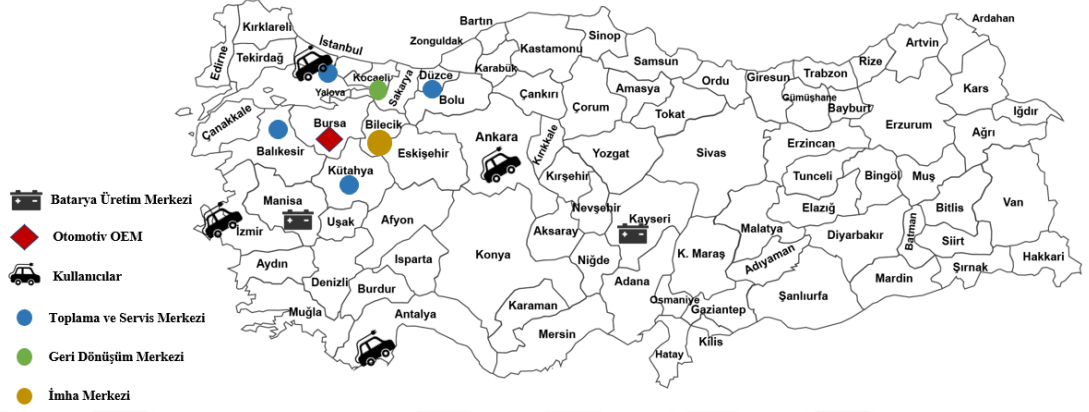
Sonuçlar incelenecek olursa, sadece ekonomik amaç dikkate alındığında alternatif lokasyonlar arasından servis ve toplama merkezi olarak Bilecik, geri dönüşüm merkezi olarak Kütahya, imha merkezi olarak ise Balıkesir ili belirlenmiştir. Ekonomik amaca göre oluşan tedarik zinciri ağı Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Ekonomik amaca göre oluşan tedarik zinciri ağı.

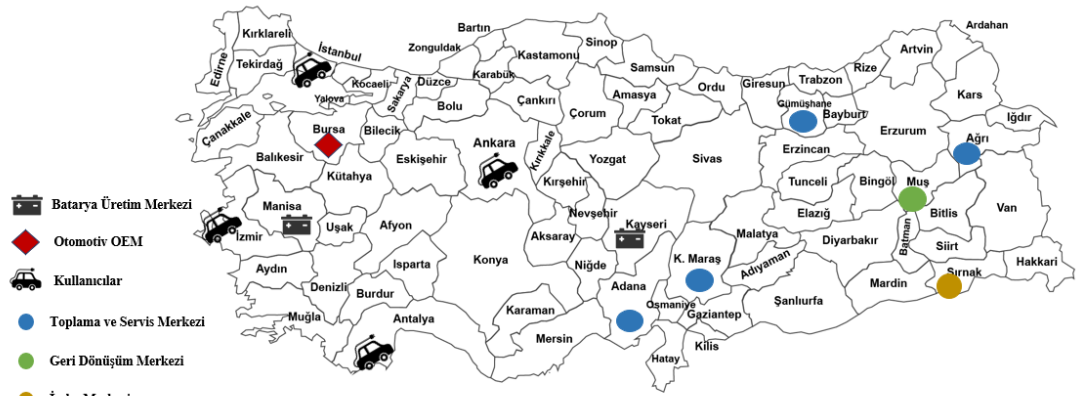
Çevresel amaç fonksiyonu için karbon emisyon miktarının minimize edildiği durumda oluşan tedarik zinciri ağında servis ve toplama merkezi olarak alternatif iller arasından

Kütahya, İstanbul, Balıkesir, Düzce, geri dönüşüm merkezi olarak Kocaeli, imha merkezi olarak ise Bilecik ili seçilmiştir. Çevresel amaca göre oluşan tedarik zinciri ağı Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Çevresel amaca göre oluşan tedarik zinciri ağı.

Sosyal faydanın tek başına maksimize edildiği durumda model, KDTZ maliyetine ve salınan karbon emisyon miktarına dikkat etmediğinden alternatif iller arasından maksimum sayıda tesis açma eğilimindedir ve açılan illere istihdam sağlayarak, toplumsal faydayı en üst düzeye çıkarmaya çalışmaktadır. Bu doğrultuda servis ve toplama merkezi dört ilde açılmıştır. Bunlar Kahramanmaraş, Adana, Gümüşhane ve Ağrı illeridir. Geri dönüşüm merkezi Muş ilinde kurulurken, imha tesisi için Şırnak ili seçilmiştir. Sosyal amaca göre oluşan tedarik zinciri ağı Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6: Sosyal amaca göre tedarik zinciri ağı.

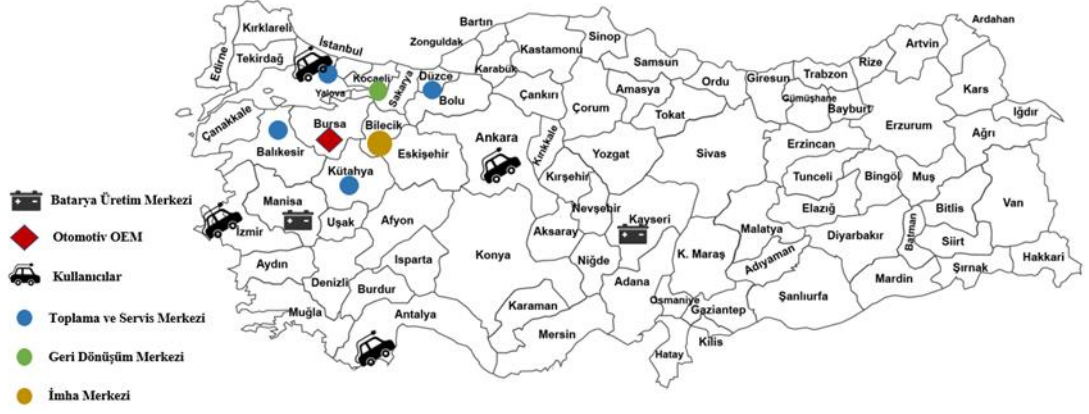
Pareto optimal kümesindeki sonuçlar arasından en uygun seçeneği belirlemek için çok amaçlı karar vermek yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, literatürde hızlı ve etkin çözümler elde etmek için kullanılan Basit Toplamlı Ağırlıklandırma (SAW) yöntemi tercih edilmiştir. Amaç fonksiyonlarının birimleri farklı olduğundan öncelikle

normalizasyon işlemi yapılmıştır. Doğrusal normalizasyon yöntemi kullanılarak elde edilen normalize pareto çözüm kümesi Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8: Normalize pareto optimal çözüm kümesi.

#	Z1 – KDTZ Maliyeti	Z2 – CO2 Emisyon	Z3 – Sosyal Fayda	SAW
S1	1	0,595372	0,344828	0,646733
S2	0,964371	1	0,73618	0,900183
S3	0,995221	0,769587	0,486043	0,750284
S4	0,964371	1	0,73618	0,900183
S5	0,989486	0,628459	0,608922	0,742289
S6	0,964371	1	0,73618	0,900183
S7	0,982089	0,585741	0,738095	0,768642
S8	0,947884	0,388742	0,871374	0,736
S9	0,917881	0,575877	0,871374	0,788377
S10	0,86464	0,189763	1	0,684801

Amaç fonksiyonlarının ağırlıkları eşit kabul edildiğinde en iyi sonuç 6. çözüm kümesi olarak belirlenmiştir. Seçilen çözüm kümesinde servis ve toplama merkezi Kütahya, Düzce, İstanbul ve Balıkesir olmak üzere 4 ilde açılmıştır. Geri dönüşüm merkezi için en uygun yer Kocaeli ili olarak belirlenirken, imha tesisinin Bilecik iline kurulması yönünde sonuç alınmıştır. Optimum sonuç için oluşturulan tedarik zinciri ağı Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Optimum sonuç için tedarik zinciri ağı.

2. Senaryo olarak toplanacak batarya sayısının %25 arttırıldığı durumda elde edilen pareto çözüm kümesi Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9: 2.senaryonun pareto optimal çözüm kümesi.

#	Z ₁ – KDTZ Maliyeti	Z ₂ – CO ₂ Emisyon	Z ₃ – Sosyal Fayda
S1	147836015,55	51893645498,93	12,60
S2	157834486,96	30138810772,25	26,90
S3	148267897,23	39941389135,15	17,76
S4	157834486,96	30138810772,25	26,90
S5	149123519,64	49119966277,59	22,25
S6	157834486,96	30138810772,25	26,90
S7	150423972,05	52759721211,64	26,97
S8	157915597,69	79947769856,37	31,84
S9	164221082,86	53728604638,39	31,84
S10	177071742,71	164410760492,82	36,54

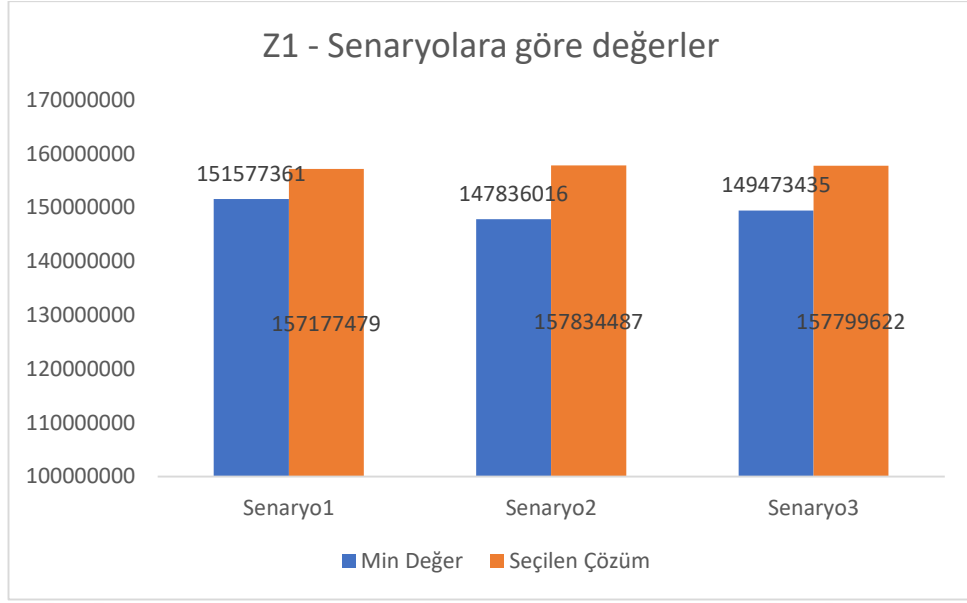
Senaryo 2’ye göre elde edilen normalize matris Çizelge 4.10’da bulunmaktadır. SAW yöntemi uygulandığında en iyi çözüm 6. sonuç olarak belirlenmiştir. Buna göre, dört ilde servis ve toplama merkezi açılma kararı verilmiştir. Bu iller, İstanbul, Balıkesir, Düzce ve Kütahya illeridir. Geri dönüşüm merkezi olarak Kocaeli ili, imha merkezi olarak ise Bilecik ili belirlenmiştir.

Sonuç olarak yeniden kullanım oranının %15 olduğu 3. Senaryonun pareto optimal çözüm kümesi Çizelge 4.11’de bulunmaktadır.

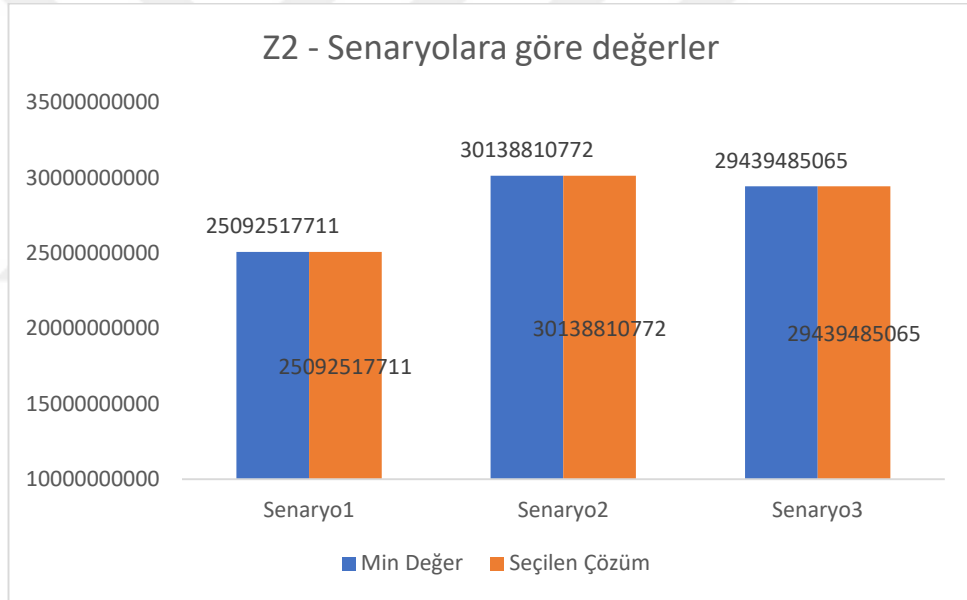
Çizelge 4.11: Senaryo 3'e göre pareto optimal çözüm kümesi.

#	Z ₁ – KDTZ Maliyeti	Z ₂ – CO ₂ Emisyon	Z ₃ – Sosyal Fayda
S1	149473434,65	51207497172,31	12,60
S2	157799621,89	29439485064,58	26,90
S3	149778008,47	38870887027,20	17,76
S4	157799621,89	29439485064,58	26,90
S5	150663855,47	37663123333,49	22,58
S6	157799621,89	29439485064,58	26,90
S7	151949240,39	51176648483,83	26,97
S8	158984482,79	77419571134,13	31,84
S9	164756626,72	51833492915,07	31,84
S10	178022456,02	161932701387,02	36,54

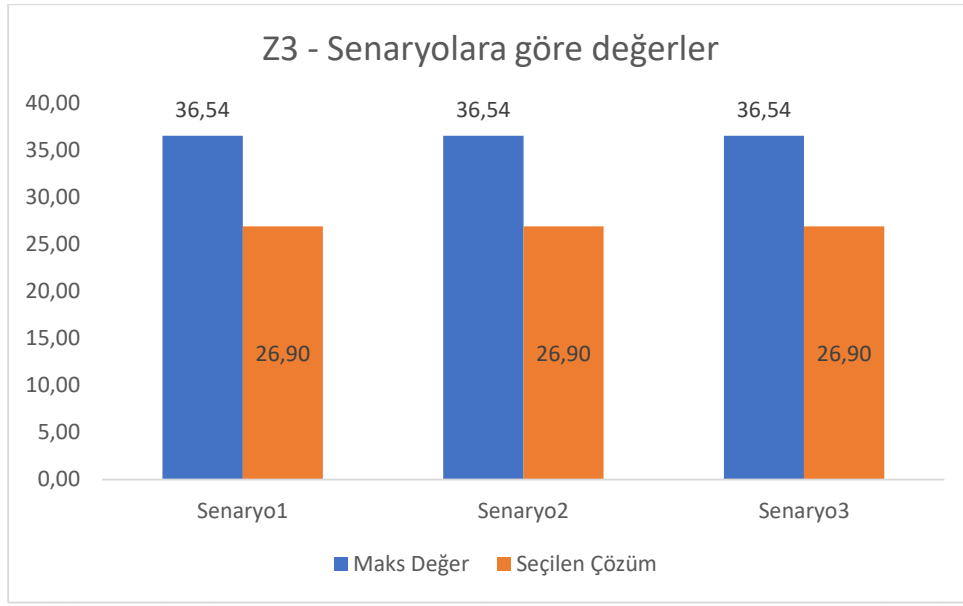
Senaryo 3’e göre elde edilen normalize matris Çizelge 4.12’de bulunmaktadır. SAW yöntemi uygulandığında en iyi çözüm 6. sonuç olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuca göre diğer senaryolarda olduğu gibi dört ilde servis ve toplama merkezi açılma kararı verilmiştir. Bu iller, İstanbul, Balıkesir, Kütahya ve Düzce illeridir. Geri dönüşüm merkezi olarak Kocaeli ili, imha merkezi olarak ise Bilecik ili belirlenmiştir.



Şekil 4.10: Ekonomik amaç fonksiyonunun senaryolara göre aldığı değerler.



Şekil 4.11: Çevresel amaç fonksiyonunun senaryolara göre aldığı değerler.



Şekil 4.12: Sosyal amaç fonksiyonunun senaryolara göre aldığı değerler.

Senaryolarda elde edilen pareto optimal çözüm kümesi içerisinde en iyi sonuca karar verilmesi için SAW yöntemi kullanılmıştır ve amaç fonksiyonlarının ağırlıkları bu çalışmada eşit kabul edilmiştir. AUGMECON2 yöntemi kullanılarak elde edilen pareto optimal çözüm kümesi içerisinde en uygun çözümü seçmek nispeten göreceli bir durumdur. Sektörün ileri gelenlerine ya da alanında uzman kişilerin görüşüne danışılarak AHP, TOPSİS, ELECTRE vb. yöntemler ile amaç fonksiyonlarının ağırlıklarının belirlendiği durumda pareto optimal çözüm kümesi arasından farklı sonuçlar ortaya çıkabilir.

Senaryo 2’de 2036 yılında ömrünü tamamlamış batarya sayısı %25 artırılarak model tekrar çözülmüştür. Toplanan batarya sayısındaki artışın, geri dönüştürülebilir mineral miktarında artışa neden olduğu ve bu durumun satın alınan hammadde miktarında bir azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu durumda, hammadde satın alma maliyeti geri dönüştürme maliyetinden fazla olduğu için ekonomik amaç fonksiyonu değerinde iyileşme meydana gelmiştir. Ancak çevresel amaç fonksiyonunda toplanan batarya sayısının artmasıyla birlikte geri dönüşüm, imha, taşıma gibi süreçlerde batarya sayısı arttığından ortaya çıkan emisyon değerinde artış meydana gelmiştir. Sosyal amaç fonksiyonu toplanan batarya miktarına doğrudan etkisi olmadığı için üçüncü amaç fonksiyonunun en iyilendiği durumlarda bir değişiklik meydana gelmemiştir.

3. senaryoya göre enerji depolama sistemlerinde kullanılmak üzere servis ve toplama merkezlerine gelen ömrünü tamamlamış bataryaların yeniden kullanım için

gönderilme oranı diğer senaryolardaki %10 değerinden %15 değerine çıkarılmıştır. İlk senaryoda yeniden kullanım oranının %15 yapıldığı durumda olurlu çözüm elde edilememiştir. Bunun sebebi 2036 yılında üretilen bataryaların içerisinde minimum geri dönüştürülmüş içerik barındırma zorunluluğudur. Model içerisinde sadece elektrikli araçların bataryalarından geri dönüştürülen mineraller kullanıldığından optimum sonuç elde edilememiştir. Toplanan batarya sayısının %25 arttırıldığı senaryoda yeniden kullanım oranının %15'e çıkarılması durumunda ekonomik amaç fonksiyonunda her ne kadar azalması yönünde beklentisi olsa da amaç fonksiyonunun değerinde artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi yeniden kullanıma giden bataryaların ekonomik amaç fonksiyonuna katkısının olmamasıdır. Ayrıca bu durum geri dönüştürülen mineral miktarında azalmaya yol açtığından dolayı yoldan satın alınan mineral miktarını arttırmaktadır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, küresel iklim krizinin etkilerini göz önüne alarak, karbon nötr hedeflerine uygun olarak giderek yaygınlaşan elektrikli araçların kilit bileşenlerinden biri olan bataryaların döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı problemini ele almaktadır. Çalışma, Türkiye'nin 2036 yılındaki durumunu analiz ederek bu bağlamda bir değerlendirme sunmaktadır. Çok amaçlı matematiksel programlama yöntemi ile bataryaların birincil ömrü sonundaki yeniden kullanım, yeniden üretim ve geri dönüşüm stratejileri kapsamında ekonomiye yeniden kazandırılma durumu değerlendirilmiştir. Ayrıca Yeşil Mutabakat kapsamında devreye alınan Döngüsel Ekonomi Eylem Planı doğrultusunda 2036 yılı itibariyle üretilen bataryaların içerisinde bulunması gereken minimum geri dönüştürülmüş içerik bulunma zorunluluğu bu problemde sağlanmıştır.

Sürdürülebilirliğin üç boyutu için oluşturulan model sonucunda servis ve toplama merkezi, geri dönüşüm merkezi ve imha merkezi için alternatif illerin arasından en uygun yerin seçilmesi planlanmıştır. Bu çalışmanın literatüre katkıları arasında öne çıkanlardan birisi, elektrikli araç bataryalarının sürdürülebilirlik perspektifinden ele alınmasında üç amaçlı bir yaklaşım sunmasıdır. Literatürde elektrikli araç bataryalarının döngüsel tedarik zinciri ağ tasarımı çalışmalarında kullanılan ekonomik ve çevresel boyutlara ek olarak sosyal boyut da dikkate alınmıştır. Sosyal boyutu değerlendirirken yaratılan iş fırsatlarının özellikle en çok ihtiyaç duyulan bölgelerde kullanılmasını sağlamak amacıyla Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda beş kriter kullanılmıştır. Bunlar işsizlik oranı, iş bulmak için dışarıya gerçekleşen göç oranı, yoksulluk oranı, gelir eşitsizliği ve kadın-erkek istihdam eşitsizliğidir. İş bulmak için dışarıya gerçekleşen göç oranı literatürde sosyal boyutun değerlendirmesinde ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. İncelenen çalışmalarda sosyal kriterlerin ağırlıklandırılmasında literatürde sıklıkla kullanılan AHP yöntemi kullanılmıştır. Literatürde ağ tasarımı çalışmalarında sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun ağırlıklandırılmasında Entropi yöntemi henüz kullanılmamıştır. Ancak bu çalışmada, karar vericilerin kişisel önyargı ve ön kabullerinin etkisini azalttığından ve bilgi teorisi

temelinde çalıştığı için ağırlıkları objektif bir şekilde belirlediğinden Entropi yöntemi tercih sebebi olmuştur.

Diğer çok amaçlı problemlerde olduğu gibi bu problemde de çelişen amaç fonksiyonları söz konusudur. Şöyle ki; Ekonomik amaç fonksiyonu tek başına en iyilenirken, olabilecek en az sayıda ve diğer tesislere en yakın konumda tesis açıp ilk kurulum ve taşıma gibi maliyet kalemlerinden oluşan KDTZ maliyetini en minimum düzeye çekmiştir. Maliyet minimizasyonu ile karbon emisyonu genellikle paralel hareket etmesine karşın, karbon emisyon miktarı en küçüklenirken ilk kurulum maliyetine dikkat edilmediğinden maliyet fonksiyonundan bazı noktalarda ayrılmaktadır. Sosyal amaç fonksiyonu ise olabilecek maksimum sayıda tesis açarak illerdeki istihdamı artırırken diğer tesislere olan uzaklığa dikkat etmeden belirlenen sosyal fayda kriterlerine göre en ihtiyacı olan bölgelere tesis açmayı önermektedir. Bu durum maliyeti ve ortaya çıkan karbon emisyon miktarını arttırmaktadır.

Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri dönüşüm ve imha tesisleri konusundaki yatırımlar henüz belli olmamasına karşın uluslararası düzeyde birçok şirket, kendi üretim sahalarında döngüsel ekonomi konularına yönelik girişimlerde bulunmuştur. Sürdürülebilirliğin üç temel boyutunu içeren çok amaçlı bir modelle birlikte, otomotiv sektöründeki paydaşlar için ekonomik kalkınmanın yanı sıra ekolojik denge ve toplumsal fayda durumlarını da dikkate alan tesis yatırım kararlarına ilişkin bir öneride bulunulmuştur.

Çalışmada 2036 yılındaki durum için batarya talep miktarı ve birincil ömrünü tamamlamış batarya miktarı deterministik olarak kullanılmıştır. Ancak bataryaların sağlık durumu çevresel koşullara ve araçların şarj döngüsü gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Gelecek çalışmalarda bataryaların kullanılmaya başladığı andan itibaren belirsizlik altında bataryaların sağlık durumlarına göre yeniden kullanım, yeniden üretim, geri dönüşüm ve imha durumları arasındaki geçişleri Markov Zinciri bakış açısıyla ele alan çok periyotlu model oluşturulabilir. Ayrıca bu çalışma kapsamında ekonomik, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonlarının amaç fonksiyonları eşit derecede öneme sahip olduğu kabul edilmiştir. Alanında uzman sektörün ileri gelenlerinden oluşan odak grup aracılığıyla ekonomik sosyal ve çevresel amaç fonksiyonlarının ağırlıkları hesaplanabilir. Bu doğrultuda Pareto optimal çözüm kümesinden sektörel bakış açısının yer aldığı farklı en iyi çözümler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Akram, M. N., & Abdul-Kader, W. (2021). Electric vehicle battery state changes and reverse logistics considerations. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(3), 390-403. doi:10.1080/19397038.2020.1856968
- Akram, M. N., & Abdul-Kader, W. (2023). Sustainable Development Goals and End-of-Life Electric Vehicle Battery: Literature Review. *Batteries*, 9(7). doi:10.3390/batteries9070353
- Ala, A., Goli, A., Mirjalili, S., & Simic, V. (2024). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable healthcare supply chain network design. *Applied Soft Computing*, 150, 111012.
- Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, 254. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120025
- Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R., Melin, H. E., & Heidrich, O. (2021). Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. *Nature Sustainability*, 4(1), 71-79.
- Bai, L., Li, Y., Du, Q., & Xu, Y. (2017). A Fuzzy Comprehensive Evaluation Model for Sustainability Risk Evaluation of PPP Projects. *Sustainability*, 9(10). doi:10.3390/su9101890
- Bal, A. (2019). *Atık elektrikli ve elektronik ekipmanlar için sürdürülebilirlik hedeflerini dikkate alan bir tersine tedarik zinciri modeli*. Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Bal, A., & Badurdeen, F. (2020). A multi-objective facility location model to implement circular economy. *Procedia Manufacturing*, 51, 1592-1599.
- Bal, A., & Satoglu, S. I. (2018). A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1081-1091. doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.104
- Balcı, E., GÜNDÜZ, G., Altundağ, S., & Altin, S. (2023). Elektrikli Araç Teknolojisinde Kullanılan Kurşun Asit ve Li-iyon Bataryaların Galvanostatik Test Sonuçlarının Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(2), 691-697. doi:10.35234/fumbd.1306028
- Barelli, L., Bidini, G., Ottaviano, P. A., Pelosi, D., Perla, M., Trombetti, L., . . . Serangeli, M. (2021). Electric vehicles fire protection during charge operation through Vanadium-air flow battery technology. *Heliyon*, 7(9), e08064. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08064
- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical*

- Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360-387. doi:10.1108/09600030810882816
- Chen, C.-H. (2020). A Novel Multi-Criteria Decision-Making Model for Building Material Supplier Selection Based on Entropy-Ahp Weighted TOPSIS. *Entropy*. doi:10.3390/e22020259
- Chen, Y.-W., Wang, L.-C., Wang, A., & Chen, T.-L. (2017). A particle swarm approach for optimizing a multi-stage closed loop supply chain for the solar cell industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 43, 111-123.
- Elkington, J. (1997). The triple bottom line. *Environmental management: Readings and cases*, 2, 49-66.
- Erciyas, M. (2020). *Elektrikli Araç Bataryalarının Sağlık Durumlarını Tespit Edecek İç Direnç Ölçüm Tabanlı Sistem Geliştirilmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Fan, Z., Luo, Y., Liang, N., & Li, S. (2023). A Novel Sustainable Reverse Logistics Network Design for Electric Vehicle Batteries Considering Multi-Kind and Multi-Technology. *Sustainability*, 15(13), 10128.
- Farooque, M., Zhang, A., Thürrer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 882-900. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.303
- Farzan Moghaddam, A., & Van den Bossche, A. (2019). An Efficient Equalizing Method for Lithium-Ion Batteries Based on Coupled Inductor Balancing. *Electronics*, 8(2). doi:10.3390/electronics8020136
- Foroozesh, N., Karimi, B., Mousavi, S., & Mojtahedi, M. (2023). A hybrid decision-making method using robust programming and interval-valued fuzzy sets for sustainable-resilient supply chain network design considering circular economy and technology levels. *Journal of Industrial Information Integration*, 33, 100440.
- Gholian-Jouybari, F., Hajiaghaei-Keshteli, M., Bavar, A., Bavar, A., & Mosallanezhad, B. (2023). A design of a circular closed-loop agri-food supply chain network—A case study of the soybean industry. *Journal of Industrial Information Integration*, 36, 100530.
- Gmar, S., Chagnes, A., Lutin, F., & Muhr, L. (2022). Application of electrodialysis for the selective lithium extraction towards cobalt, nickel and manganese from leach solutions containing high divalent cations/Li ratio. *Recycling*, 7(2), 14.
- Goodarzian, F., Ghasemi, P., Gonzalez, E. D. S., & Tirkolaee, E. B. (2023). A sustainable-circular citrus closed-loop supply chain configuration: Pareto-based algorithms. *Journal of Environmental Management*, 328, 116892.
- Hanczar, P., & Azadehranjbar, Z. (2022). A Bi-Objective Sustainable Supply Chain Redesign: What Effect Does Energy Availability Have on Redesign? *Energies*, 15(10), 3642.
- Hao, H., Mu, Z., Jiang, S., Liu, Z., & Zhao, F. (2017). GHG Emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China. *Sustainability*, 9(4), 504.
- Kastanaki, E., & Giannis, A. (2023). Dynamic estimation of end-of-life electric vehicle batteries in the EU-27 considering reuse, remanufacturing and recycling

options. *Journal of Cleaner Production*, 393. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136349

- Khatami, M., Mahootchi, M., & Farahani, R. Z. (2015). Benders' decomposition for concurrent redesign of forward and closed-loop supply chain network with demand and return uncertainties. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79, 1-21.
- Kotak, Y., Marchante Fernández, C., Canals Casals, L., Kotak, B. S., Koch, D., Geisbauer, C., . . . Schweiger, H.-G. (2021). End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle. *Energies*, 14(8). doi:10.3390/en14082217
- Krishnan, R., Arshinder, K., & Agarwal, R. (2022). Robust optimization of sustainable food supply chain network considering food waste valorization and supply uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 171, 108499.
- Lotfi, A., Shakouri, M., Abazari, S. R., Aghsami, A., & Rabbani, M. (2023). A multi-objective optimization for a closed-loop sustainable pharmaceutical supply chain network design: a case study. *Journal of Advances in Management Research*.
- Mavi, R. K., Shekarabi, S. A. H., Mavi, N. K., Arisian, S., & Moghdani, R. (2023). Multi-objective optimisation of sustainable closed-loop supply chain networks in the tire industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 107116.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
- Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied mathematics and computation*, 219(18), 9652-9669.
- Moreno-Camacho, C. A., Montoya-Torres, J. R., & Jaegler, A. (2023). Sustainable supply chain network design: a study of the Colombian dairy sector. *Annals of Operations Research*, 324(1-2), 573-599.
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Póvoa, A. (2015). Supply chain design and planning accounting for the Triple Bottom Line. In *12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering* (pp. 1841-1846).
- Motevalli-Taher, F., Paydar, M. M., & Emami, S. (2020). Wheat sustainable supply chain network design with forecasted demand by simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105763.
- Naeeni, H. S., & Sabbaghi, N. (2022). Sustainable supply chain network design: A case of the glass manufacturer in Asia. *International Journal of Production Economics*, 248, 108483.
- Olapiriyakul, S., & Caudill, R. J. (2008). *A framework for risk management and end-of-life (EOL) analysis for nanotechnology products: A case study in lithium-ion batteries*. Paper presented at the 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment.

- Öz, A. H., & Manisalı, E. (2007). *Yük Helikopteri Seçiminde Bulanik Çok Amaçlı Karar Verme Modeli*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,
- Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A., & Tektaş, M. (2020). Geleceğin Ulaşım Tercihi: Elektrikli Araçlar. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3 (1), 34-50. In.
- Peters, W., Bastos, A., Ciais, P., & Vermeulen, A. (2020). A historical, geographical and ecological perspective on the 2018 European summer drought. In (Vol. 375, pp. 20190505): The Royal Society.
- Rallo, H., Benveniste, G., Gestoso, I., & Amante, B. (2020). Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 159, 104785.
- Rosenberg, S., Gloser-Chahoud, S., Huster, S., & Schultmann, F. (2023). A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling - A case study of an OEM in Germany. *Waste Manag*, 160, 12-22. doi:10.1016/j.wasman.2023.01.029
- Savaskan, R. C., Bhattacharya, S., & Van Wassenhove, L. N. (2004). Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management science*, 50(2), 239-252.
- Shahedi, A., Nasiri, M. M., Sangari, M. S., Werner, F., & Jolai, F. (2022). A stochastic multi-objective model for a sustainable closed-loop supply chain network design in the automotive industry. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 6(1), 189-209.
- Sherafati, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvae, M. S. (2019). Supply chain network design considering sustainable development paradigm: A case study in cable industry. *Journal of Cleaner Production*, 234, 366-380.
- Sonoc, A., & Jeswiet, J. (2014). A Review of Lithium Supply and Demand and a Preliminary Investigation of a Room Temperature Method to Recycle Lithium Ion Batteries to Recover Lithium and Other Materials. *Procedia CIRP*, 15, 289-293. doi:10.1016/j.procir.2014.06.006
- Subulan, K., & Baykasoğlu, A. (2023). A case-oriented computational study for sustainable fleet planning in a battery closed-loop supply chain network under uncertainty. *Engineering Computations*, 40(7/8), 1947-2008. doi:10.1108/ec-09-2022-0582
- Subulan, K., Baykasoğlu, A., Özsoydan, F. B., Taşan, A. S., & Selim, H. (2015). A case-oriented approach to a lead/acid battery closed-loop supply chain network design under risk and uncertainty. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 340-361.
- Tavana, M., Sohrabi, M., Rezaei, H., Sorooshian, S., & Mina, H. (2023). A sustainable circular supply chain network design model for electric vehicle battery production using internet of things and big data. *Expert Systems*. doi:10.1111/exsy.13395
- Wilson, N., Meiklejohn, E., Overton, B., Robinson, F., Farjana, S. H., Li, W., & Staines, J. (2021). A physical allocation method for comparative life cycle assessment: A case study of repurposing Australian electric vehicle batteries.

Wrålsen, B., Prieto-Sandoval, V., Mejia-Villa, A., O'Born, R., Hellström, M., & Faessler, B. (2021). Circular business models for lithium-ion batteries - Stakeholders, barriers, and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 317. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128393

Yadegari, M., Sahebi, H., Razm, S., & Ashayeri, J. (2023). A sustainable multi-objective optimization model for the design of hybrid power supply networks under uncertainty. *Renewable Energy*, 219, 119443.

Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385. doi:10.1016/j.rser.2015.04.130

Url-1 <(www.goldmansachs.com). >, erişim tarihi 29.11.2023.

Url-2<(https://www.virta.global)>, erişim tarihi 10.12.2023.

Url-3<(www.ev-volumes.com)>, erişim tarihi 13.12.2023.

Url-4<(www.ticaret.gov.tr)>, erişim tarihi 14.12.2023.



EKLER

EK A: Parametreler

Çizelge A.1: Sabit Açılış ve Operasyon Maliyeti (€).

İller	Servis ve Toplama Merkezi	Geri Dönüşüm Merkezi	İmha Merkezi
İstanbul	1804000	7140000	890000
Balıkesir	1393518	6050175	732335
Kütahya	1098817	5267749	619141
Düzce	1098817	5267749	619141
Karaman	1098817	5267749	619141
Kahramanmaraş	567442	3856955	415042
Yozgat	567442	3856955	415042
Tokat	567442	3856955	415042
Gümüşhane	567442	3856955	415042
Ağrı	320000	3200000	320000
Muş	320000	3200000	320000
Şırnak	320000	3200000	320000
Konya	1393518	6050175	732335
Samsun	1098817	5267749	619141
Bilecik	1393518	6050175	732335
Kocaeli	1804000	7140000	890000
Adana	1098817	5267749	619141

Çizelge A.2: Hammadde Satın Alma Maliyeti (€).

Mineral	T1	T2
Kobalt	31,05	30,79
Lityum	24,35	23,24

Çizelge A.3: Çeşitli Maliyetler (€).

Maliyet Türü	Miktar
Geri Dönüşüm Maliyeti (€ /kg)	3,3
Batarya Taşıma Maliyeti (€ /km unit)	0,03
Kullanılmış Batarya Taşıma Maliyeti(€ /km unit)	0,04
Mineral Taşıma Maliyeti (€ / km kg)	0,008
İmha Maliyeti (€/kg)	0,07

Çizelge A.4: Emisyon Çeşidi.

Emisyon Çeşidi	Miktar
Mineral Elde Etme Sırasında CO2 (kgCO2)	Lityum: 13,2 Kobalt: 18,2
Batarya Üretimi Sırasında CO2 (CO2/unit)	LFP: 3060,4 NMC: 2912
Geri Dönüşüm Sırasında CO2 (kgCO2)	1,2
İmha Sırasında Emisyon (kgCO2)	1,3
Taşıma Emisyon (kgCO2/km)	Lityum: 1,13 Kobalt: 0,522

Çizelge A.5: Talep Miktarı.

Batarya Türü	Ankara	Antalya	İstanbul	İzmir
LFP	139812	48615	267449	72555
NMC	114392	39776	218822	59363

Çizelge A.6: Toplanan Batarya Sayıları.

Batarya Türü	Ankara	Antalya	İstanbul	İzmir
LFP	65484	22770	125265	33982
NMC	53577	18630	102484	27804

ÖZGEÇMİŞ

Ad – Soyad : Mehmet Samet ÇAKIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans:** (devam ediyor), İstanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER

- Lisans eğitimini bölüm birincisi olarak tamamladı.
- 2021-2022 Yıllarında sırasıyla Sodexo Entegre Yönetim ve İspak Ambalaj firmalarında OPEX mühendisi olarak çalıştı.
- 2022 yılından itibaren Samsun Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.