

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ DÖNGÜSEL EKONOMİ
KAPSAMINDA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rabia DİŞÇİOĞLU

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mühendislik Yönetimi Programı

OCAK 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ DÖNGÜSEL EKONOMİ
KAPSAMINDA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Rabia DİŞÇİOĞLU
(507171217)**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mühendislik Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şeyda SERDAR ASAN

OCAK 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 507171217 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Rabia DİŞÇİOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ DÖNGÜSEL EKONOMİ KAPSAMINDA İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Şule İtir Satoğlu**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr.Öğr.Üye. Saliha Karadayı Usta
Fenerbahçe Üniversitesi

Teslim Tarihi : **23 Ocak 2022**
Savunma Tarihi : **16 Şubat 2022**





Babama,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, son zamanlarda hızla artan küresel iklim krizi, farklı enerji arayışı ihtiyacı ve kısıtlı mineral rezervleri konularından yola çıkılarak kullanımı yüksek oranda artan elektrikli araç bataryalarının döngüsel ekonomide incelenmesi konusunda yapılmıştır. Yapılan uygulamada kullanıcılardan elde edilen kullanılmış bataryalar döngüsel ekonomi konseptinde ele alınarak toplama merkezi, geri dönüşüm tesisi ve imha tesisi aday noktaları 2 farklı amaç fonksiyonuna göre optimum konumlarda seçilmiştir. Çoklu amaç fonksiyonu için epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır. Bu konudaki atılacak adımlar, ülkemizdeki belirlenecek yol haritaları için faydalı bir çalışma olmasını temenni ediyorum.

Bu çalışmanın hazırlanmasında ufkumu açan, tez dönemimde benden sabrını ve bilgisini esirgemeyen danışmanım ve hocam Doç. Dr. Şeyda Serdar Asan'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda hayatımın en zor dönemine denk gelen bu tez sürecimi tamamlamamda verdikleri sınırsız destek ve gösterdikleri anlayış için aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu çalışma ile kendisiyle her zaman gurur duyduğum canım babamı biraz da olsa gururlandırabilmiş olmayı diliyorum.

Ocak 2022

Rabia Dişçioğlu
(Endüstri Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Elektrikli Araç Nedir?	5
2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar	8
2.3 Döngüsel Ekonomi	13
2.3.1 Lityum iyon batarya kullanımının döngüsel ekonomi ile ele alınması	16
2.3.1.1 Yeniden kullanım	17
2.3.1.2 Geri dönüşüm	18
2.3.1.3 Yeniden üretim	21
2.3.1.4 Farklı amaçla kullanım	22
2.4 Elektrikli Araç Bataryalarının Karbon Ayak İzi Etkisi	24
3. METODOLOJİ	29
3.1 Kapalı Çevrim Tedarik Zinciri	29
3.1.1 Lityum iyon bataryalar ve kapalı çevrim tedarik zinciri	30
3.2 Çok Amaçlı Matematiksel Programlama	32
3.2.1 Epsilon kısıt yöntemi	33
4. UYGULAMA	39
4.1 Problem Tanımı	39
4.2 Değerlerin Elde Edilmesi ve Varsayımlar	45
4.3 Çözüm Yaklaşımı	50
4.4 Sonuç Analizleri ve Senaryo Değerlendirmeleri	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
5.1 Gelecek Çalışmalar	61
KAYNAKLAR	62
EKLER	68
ÖZGEÇMİŞ	76

KISALTMALAR

CE	: Circular Economy
EOL	: End-of-Life
ESS	: Energy Storage System
EV	: Electric Vehicle
LIB	: Lityum iyon batarya
LFP	: Lityum Demir Fosfat
LMO	: Lityum Manganez Oksit
NCA	: Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NMC	: Nikel Manganez Kobalt
OEM	: Original Equipment Manufacturer
SAW	: Simple Additive Weighting
TEHAD	: Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği
UDHB	: Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı



SEMBOLLER

gWh : Gigawatt saat

kWh : Kilowatt saat

Li+ : Lityum iyonu





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : 25 kWh kapasiteye sahip bazı bataryaların özellikleri ve yapısında bulunan maddeler (Olivetti ve diğ.,2017).	9
Çizelge 2.2 : Batarya içeriklerindeki temel parametrelerin yıllara göre değişimi (Whittingham,1976).	9
Çizelge 2.3 : Hidrometalurjik geri dönüşüm yöntemine göre metallerin geri dönüşüm oranları.	19
Çizelge 4.1 : Referans alınan parametreler.	46
Çizelge 4.2 : Toplama Merkezi Aday Lokasyonun Belirlenmesi.	48
Çizelge 4.3 : Geri Dönüşüm Tesisi Aday Lokasyonun Belirlenmesi.	48
Çizelge 4.4 : İmha Tesisi Aday Lokasyonun Belirlenmesi.	49
Çizelge 4.5 : Ödünleşme Çizelgesi.	50
Çizelge 4.6 : Grid Nokta Değerleri.	51
Çizelge 4.7 : Pareto Çözüm Kümesi.	51
Çizelge 4.8 : SAW yöntemine göre normalize matris.	52
Çizelge 4.9 : Çözüm kümelerine göre karar değişkenleri.	53
Çizelge 4.10 : Senaryo 1'e göre pareto çözüm kümesi.	54
Çizelge 4.11 : Çözüm kümelerine göre karar değişkenleri.	54
Çizelge 4.12 : Senaryo 2'ye göre pareto çözüm kümesi.	54
Çizelge 4.13 : Senaryo 2'ye göre normalize matris tablosu.	54
Çizelge 4.14 : Çözüm kümelerine göre karar değişkenleri.	55
Çizelge 4.15 : Senaryo 3'e göre pareto çözüm kümesi.	55
Çizelge 4.16 : Senaryo 3'e göre normalize matris tablosu.	55
Çizelge 4.17 : Çözüm kümelerine göre karar değişkenleri.	56



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Temiz Enerji Teknoloji Minerallerinin Toplam Talep İçindeki Payı (Dünya Enerji Konseyi, 2021).	3
Şekil 2.1: 2030 yılına kadar binek araç ve hafif ticari araçlar satış tahminleri grafiği (Deloitte, 2010).	7
Şekil 2.2 : 2030 yılına kadar Amerika, Avrupa ve Çin'deki elektrikli araç pazar payı oranları (Deloitte, 2010).	7
Şekil 2.3 : 2000-2040 yılları arasında kullanılmış elektrikli araç batarya sayıları (Ai ve Zheng, 2016).	11
Şekil 2.4 : Temiz enerji teknolojileri için mineral talebi (Dünya Enerji Konseyi Raporu, 2021).	12
Şekil 2.5 : Minerallerin çıkarıldıkları ve işlendikleri ülkeler (Dünya Enerji Konseyi Raporu, 2021).	13
Şekil 2.6 : Döngüsel Ekonomi Değer Piramidi (European Commission, 2021).	15
Şekil 2.7 : Temiz Enerji Teknolojilerinde Kullanılan Mineraller (Dünya Enerji Konseyi, 2021).	17
Şekil 2.8 : Kullanım sonrası doğrudan imha etme ve yeniden kullanım akış şeması (Ahmadi ve diğ., 2014).	18
Şekil 2.9 : Elektrikli araç bataryalarında geri dönüştürülen ve yeniden kullanılan mineraller (Dünya Enerji Konseyi Raporu, 2021).	21
Şekil 3.1 : Kapalı çevrim tedarik zinciri modeli.	32
Şekil 3.2 : AUGMECON2 yöntemindeki hesaplama akışı (Mavrotas ve Florias, 2013).	36
Şekil 4.1 : Batarya tiplerine göre gelecek yıllardaki pazar payları (Wood Mackenzie Energy Storage Service, 2020).	45
Şekil 4.2 : Türkiye'deki aday tesis lokasyonları.	49
Şekil 4.3 : Optimum Sonuca Göre Kapalı Çevrim Batarya Akışı.	53
Şekil 4.4 : Senaryolara göre optimum normalize çözüm değerleri.	56



LİTYUM İYON BATARYA GERİ DÖNÜŞÜM SÜRECİNİN DÖNGÜSEL EKONOMİ KAPSAMINDA İNCELENMESİ

ÖZET

Dünya’da son yıllarda nüfusun ve dolaylı olarak tüketimin artmasıyla birlikte küresel iklim krizi konusu da insan sağlığını tehdit eder boyutlara ulaşmıştır. Son yıllarda küresel iklim krizinin bu denli artmasının nedenlerinden birisi de ulaşım sektörünün yarattığı karbon emisyon değerlerinin insan sağlığına olan etkileridir. Ulaşımında kullanılan fosil yakıtlar ile ilgili birçok ülke devreye aldıkları regülasyonlar ile strateji haritaları oluşturmuş ve bu doğrultuda önlemlerini almaya başlamışlardır. Birçok ülke tarafından kabul gören ve ülkemizde Kasım 2021 tarihinde imzalanan Paris Anlaşması’na göre 2030 yılındaki karbon emisyonunu yarıya indirme hedefi kapsamında Avrupa Birliği, sanayiden ekonomiye, enerji sektöründen ulaşım sektörüne kadar çeşitli alanlardaki izlediği politikalarını iklim değişikliği ekseninde yeniden şekillendirmeye başlamıştır.

Ulaşım sektöründe alternatif yakıtlı araç pazarında elektrikli araçlar oldukça ilgi görmektedir. Daha az sera gazı salınımı ile temiz enerji sunması, yüksek performans özellikleri, sessiz oluşu ve yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalardan etkilenmemesi gibi özellikleri ile elektrikli araçların pazar payı ileriki yıllarda daha da hızlı şekilde artacaktır. Otomotiv sektöründeki bu dönüşüm Paris Anlaşması, Yeşil Mutabakat ve iklim krizi konuları ile şekillenmektedir. Bu dönüşümün bir parçası da elektrikli araç bataryalarını kapsamaktadır.

Elektrikli araçlarda 8-10 yıl arasında kullanım ömrünü tamamlayan elektrikli araç bataryalarının bu aşamadan sonraki döngüsü bu çalışmada ele alınmaktadır. Yapılan tez çalışmasında ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının döngüsel ekonomi konsepti ile ele alınarak ikincil kullanım, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve yeniden üretimde kullanılma stratejileri ile döngü içinde maksimum fayda sağlamak amaçlanmıştır. Ele alınan döngüsel ekonomi stratejileri ile batarya üretiminde kullanılan ve kritik olarak adlandırılan lityum ve kobalt minerallerinin de satınalma ve geri dönüştürülme miktarlarına karar verilmektedir. Aynı zamanda Yeşil Mutabakat Eylem Planı ile yol haritası oluşturulmuş elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrünü tamamladıktan sonra uyması gereken regülasyonlara da bu çalışmada değinilmektedir. Çalışmada ele alınan uygulama kapalı çevrim tedarik zinciri maliyet minimizasyonu ve bu döngüdeki karbon emisyon değerinin minimizasyonu olarak modellenmiştir. Çok amaçlı optimizasyon modeli epsilon kısıt yöntemi ile GAMS yazılımı ile çözülmüştür.

Türkiye’de hali hazırda kullanılmış elektrikli araç bataryaları için kullanıcılara uçtan uca bir hizmet sunulmamaktadır. Çalışmada lokasyon seçme metodolojisi ile 2030 yılındaki durum simüle edilerek alternatif geri dönüşüm tesisi, imha tesisi ve servis ve toplama merkezi lokasyonlarından optimum olan seçilmektedir. Ele alınan senaryolar ile üretim kapasitelerinin ve elektrikli araç bataryalarına olan talebin yüzdesel dağılımı ile amaç fonksiyonu değerlerinin ve aday lokasyonlarının değişimleri incelenmektedir.

Özellikle 2030 yılından sonra devreye girecek kullanılmış bataryaların izlenebilirliği ve geri dönüştürebilme oranları regülasyonları ile ilgili ölkemizde bu tür yol haritalarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasının ileriki aşamaları, toplanan bataryaların kalite durumu istatistiksel olarak dağılımlar ile incelenerek ve aynı zamanda çalışmaya zaman periyotunun da dahil edilmesiyle literatüre katkı yapıcı nitelikte olacaktır.



EXAMINATION OF LITHIUM ION BATTERY RECYCLING PROCESS WITHIN THE SCOPE OF CIRCULAR ECONOMY

SUMMARY

With the increase in population, urbanization and indirectly consumption in the world in recent years, the issue of global climate crisis has reached dimensions that threaten human health. One of the reasons why the global climate crisis has increased so much in recent years is the effects of carbon emission values created by the transportation sector on human health. More than half of the carbon emissions produced globally come from transportation. Many countries related to fossil fuels used in transportation have created strategy maps with the regulations they have put into use and have started to take measures in this direction. According to the Paris Agreement, which has been accepted by many countries and signed in November 2021 in our country, within the scope of halving carbon emissions in 2030 and zero emission by 2050, the European Union has started to reshape its policies in various fields, from industry to economy, from the energy sector to the transportation sector, on the axis of climate change. . In addition to countries, companies in both the automotive sector and the energy sector have started to invest in regulations.

In the transportation sector, electric vehicles attract a lot of attention compared to other alternative fuel vehicles in the alternative fuel vehicle market. The market share of electric vehicles will increase even more rapidly in the coming years, with features such as providing clean energy with less greenhouse gas emissions, high performance features, being quiet, having high efficiency and being unaffected by fluctuations in fuel prices. The general prediction of the studies is that more than half of the vehicles sold in 2030 will be electric vehicles and the number of electric vehicle models will increase every year. This transformation in the automotive sector is shaped by the Paris Agreement, the Green Agreement and the climate crisis. Part of this transformation includes electric vehicle batteries.

The performance of electric vehicle batteries decreases to 80% in 8-10 years. Electric vehicle batteries, which have completed their service life of 8-10 years in electric vehicles, cannot be used in a vehicle that requires performance again. The secondary life cycle of batteries after this stage is discussed in this study. In the thesis study, it is aimed to provide maximum benefit in the cycle with the strategies of secondary use, reuse, recycling and remanufacturing by considering the end-of-life electric vehicle batteries with the concept of circular economy. With the circular economy strategies discussed, the purchasing and recycling strategies and amounts of lithium and cobalt minerals, which are used in battery production and are called critical according to battery type, are decided. At the same time, the content document that electric vehicle batteries, whose roadmap was created with the Green Reconciliation Action Plan, should have especially for 2030 and beyond, is taken as a basis in the study. According to this document, mandatory recycling rates are determined according to battery types. One of the subjects of the thesis is the consideration of both the regulations that have been put into use and the critical minerals whose constraints have reserves in terms of sustainability. As it is known, although electric vehicles are introduced as zero emissions, they require 6 times more minerals than internal combustion vehicles during battery and vehicle production.

The application discussed in the study is modeled as closed loop supply chain cost minimization and minimization of carbon emission value in this loop. The multi-objective optimization model was taken with the epsilon constraint method and the AUGMECON2 model. The model was solved with GAMS software.

An end-to-end service is not provided to users for currently used electric vehicle batteries in Turkey. In the study, with the location selection methodology, the situation in Turkey in 2030 is simulated and the optimum one is selected from the alternative recycling facility, disposal facility and service and collection center locations. With the different scenarios discussed, the percentage distribution of production capacities and demand for electric vehicle batteries, changes in objective function values and candidate locations are examined. In addition, the recycling or purchasing strategies of critical minerals are decided.

It is necessary to determine such road maps in our country regarding the traceability and recycling rate regulations of used batteries that will be activated after 2030. The quality status statistics of the batteries collected for the next stage of this thesis will

contribute to the literature by including social issues for time period and location selection.





1. GİRİŞ

Küresel iklim krizinin toplum sağlığına etkisi her geçen gün daha ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Küresel iklim krizine etki eden faktörlerin en başında sürekli artan enerji talebi, kontrolsüz sanayileşme ve yükselen şehirleşme oranıyla birlikte kontrol edilemeyen sera gazı salınımı gelmektedir. Avrupa'da sera gazı emisyonunun %75'i karayolu ulaşımından kaynaklanmaktadır (Albertsen ve diğ.,2021). Küresel olarak sera gazından kaynaklı emisyonun yarattığı etkinin üçte ikisi ve İngiltere'de %50'den fazlası enerji ve ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır (Kamran ve diğ., 2021). Atmosfere büyük oranda karbon emisyonu salınımına neden olan ulaşım sektörünün, 2010 yılından itibaren küresel ısınmayı tetikleyen en önemli etken haline geldiği düşünülmektedir. Nüfus artışına bağlı olarak ulaşım yoğunluğunun artması, fosil yakıt kullanan motorlu taşıt sayısının da her geçen gün artmasına neden olmuş ve dolayısıyla artan sera gazı emisyonları, sera etkisi ve iklim değişikliği gibi sorunları gündeme getirmiştir (Güven ve Gedik, 2019).

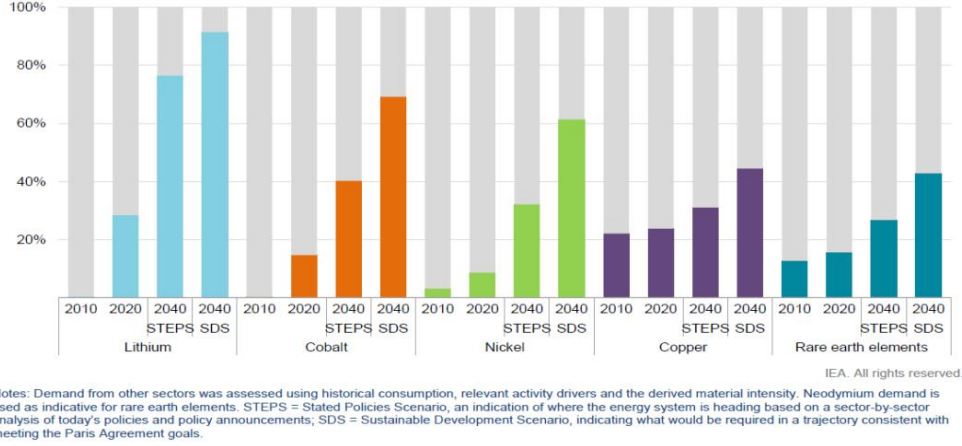
Kullanımda olan araç sayısının gün geçtikçe artması, kısıtlı petrol rezervleri, yüksek yakıt fiyatları ve insan sağlığını olumsuz etkileyecek boyutlara ulaşan sera gazı kaynaklı hava kirliliği konuları sektörde farklı enerji kaynağı arayışı ve kalıcı önlemler bulma ihtiyacı doğurmuştur. İçten yanmalı motorlu araçların kullanımı ile ilgili ülkeler arası imzalanan Avrupa Yeşil Mutabakatı (Green Deal) ile 2030 yılına kadar karbon salınımının %50 azaltılması, 2050 yılında ise 0 emisyon seviyesi hedeflenmektedir. Bu hedefin gerçekleşmesine en büyük katkı ise yaygınlaşan elektrikli araç kullanımı olacaktır. Günümüzde fosil yakıt tüketimini azaltmak ve gelecekte oluşabilecek potansiyel enerji krizlerinin önüne geçmek için alternatif yakıtlı ve elektrik enerjisi ile çalışan otomobiller geliştirilmeye başlanmıştır. Ulaşım sektörü, dünyadaki toplam enerji tüketiminin %27'sine ülkemizde ise toplam enerji tüketiminin %20'sine karşılık gelmektedir. Ülkemizde ulaşım sektörü kapsamında harcanan enerjinin %99'u petrol ve türevlerinden karşılanmaktadır (UDHB, 2011).

Yapılan çalışmalara göre global elektrikli araç pazar hacmi 50 milyon seviyesinden 2030 yılında 130 milyon seviyelerine ulaşacaktır (International Energy Agency(IEA), 2018). Bununla birlikte 2017 yılından günümüze kadar ilk kez elektrikli otomobil satış rakamları dizel otomobil satış rakamlarını Ekim 2021 tarihi itibariyle geçmiştir. Bu veriler dizel araç satışlarının önemli oranda azaldığını ve elektrikli araç satışlarının istikrarlı şekilde arttığını göstermektedir (Ardiyok ve diğ.,2021). Elektrikli araç kullanımına teşviklerin artmasının nedenleri arasında sadece CO₂ salınımı ile ilgili regülasyonlar değil aynı zamanda artan yakıt fiyatları ve içten yanmalı motor ile elektrikli araçlar arasındaki toplam sahip olma maliyet farkı da yer almaktadır. Bu konular elektrikli araç teknolojilerine olan yatırımın artmasına neden olmaktadır. Artan elektrikli araç kullanımı ise çevresel, teknolojik ve sosyal açılardan yeni konuları gündeme getirmektedir.

Elektrikli araç kullanımının artması, sera gazı etkisini azaltma yolunda önemli bir gelişme adımı olarak görülse de elektrikli araç bataryalarını şarj etmek için kullanılan elektrik enerjisinin konvansiyonel teknolojilerle üretilmesi sonucu elektrikli araçların %100 temiz bir teknoloji olmadığından söz edilmektedir (Güven ve Gedik, 2019). Elektrikli araçların faydaları gözardı edilemez bir boyuttadır fakat bu dönüşümün çevresel ve sağlık etkilerinin tam anlamıyla ele alınabilmesi için üretimden araç bataryalarının ömür tükenme safhasına kadar incelenmesi ve bu yaşam döngüsünde çevreye negatif katkısı olan işlemlerin minimize edilmesi gerekmektedir.

Laptop ve cep telefonu gibi elektronik ekipmanların güç kaynağı olarak kullanılan lityum iyon bataryalar, elektrikli araçlarda da kullanılmaya başlanarak fosil yakıt tüketimini ve yol açtığı kirliliği azaltmaktadır (Ahuja ve diğ., 2020). Lityum iyon bataryalar elektrikli araçlarda kullanılan ana komponentlerin başında gelmektedir. Bu bataryalar enerji yoğunluğu yüksek, uzun yaşam döngüsüne sahip ve düşük kapasite kaybı oranına sahiptirler. Aynı zamanda elde edilmesi zor olan Nikel, Kobalt ve Manganez gibi mineralleri içeriğinde bulundurmaktadır.

Dünya Enerji Konseyi'nin 2021 yılında yayınlanan Temiz Enerji Dönüşümünde Kritik Minerallerin Rolü Raporu'na göre atılan politika adımlarına (STEPS) ve sürdürülebilir gelişim senaryolarına göre kritik olarak nitelendirilen minerallerin 2040 yılındaki olası talepleri şekil 1.1'de gösterilmektedir. Rapora göre lityum, kobalt, nikel, bakır ve nadir toprak elementlerine olan talep ortalama %50 civarında artacaktır (Dünya Enerji Konseyi, 2021).



Şekil 1.1 : Temiz Enerji Teknoloji Minerallerinin Toplam Talep İçindeki Payı (Dünya Enerji Konseyi, 2021).

Elektrikli araçlardaki lityum iyon bataryaların ömrü 8 ile 10 yıl arasındadır. Yapılan araştırmaya göre 2028 yılı itibariyle İngiltere’de her sene 8000 ton kullanım ömrünü tamamlamış batarya oluşacaktır. Global olarak ise 2030 yılı itibariyle hacmi 11 milyon ile 16 milyon arasında değişen kullanım ömrü tamamlanmış lityum iyon batarya oluşacaktır (Ahuja ve diğ., 2020). Lityum iyon bataryaların ilk yaşam evresini tamamlama periyodu (8-10 yıl) sonunda kapasiteleri %80 seviyesine düşmektedir. Bu seviyelerden sonra araç içerisinde kullanıma uygun olmamaktadır. Lityum iyon bataryaların içeriğindeki değerli ve kritik minerallerin elde edilme maliyetlerinin yüksek olması, yüksek yatırım oranı gerektirmesi ve çıkarıldıkları ülkeler için tedarik, çevresel ve etik açıdan problem yaratacak konularla ilişkili olması bu konunun Döngüsel Ekonomi ile ele alınmasını avantajlı hale getirmektedir. Döngüsel ekonomi faaliyetleri içinde lityum iyon bataryaların yeniden kullanım, yeniden üretim, farklı amaçla kullanım ve geri dönüşüm aktiviteleri ile alınması çevresel etkileri azaltmaktadır (Mossali ve diğ., 2020).

Bu tez çalışmasının amacı Türkiye’de elektrikli araç bataryalarının döngüsel ekonomi konseptinde ele alınması ve yeniden kullanım, yeniden üretim, farklı amaçla kullanım ve geri dönüşüm faaliyetleri için lokasyon seçiminin incelenmesidir. Bununla birlikte amaç fonksiyonunda sadece maliyet minimizasyonu yapılmamış aynı zamanda elektrikli araçlar için üretilen lityum iyon bataryalarının döngüde yarattığı karbon emisyon değeri de çevresel bir etki olarak modele dahil edilmiştir. Lokasyon seçimi

probleminde batarya üretim merkezi, hammadde tedarikçisi, geri dönüşüm tesisi, ürün toplama merkezleri ve imha tesisleri yer almaktadır.

Tezin akışı şu şekilde özetlenebilir; 2. Bölümde hem dögüsel ekonomi kavramı, hem de elektrikli araç bataryaları kapsamında kapalı çevrim tedarik zinciri literatürü incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda hangi yöntemlerin kullanıldığı, hangi sektörler açısından ele alındığı özetlenmiştir .

Çalışmanın 3. Bölümünde lityum iyon batarya kullanımının dögüsel ekonomi ve kapalı çevrim tedarik zinciri açısından lokasyon seçme metodolojisi ile incelenmesi yer almaktadır. Ayrıca çok amaçlı karar verme yönteminin çözüm metodlarından biri olan epsilon kısıt yöntemi anlatılmaktadır.

4. Bölümde ise bahsedilen metodolojiler ile Türkiye’de lokasyon seçimi problemi ele alınmaktadır. Kurulan matematiksel modellerden, varsayımlardan, parametrelerden ve senaryolardan bahsedilmekte, model çalıştırılması ile ortaya konan sonuçlar tartışılmaktadır.

Tezin 5. Bölümünde ise sonuç ve öneriler ile genel çıkarımlar yapılmış ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Elektrikli Araç Nedir?

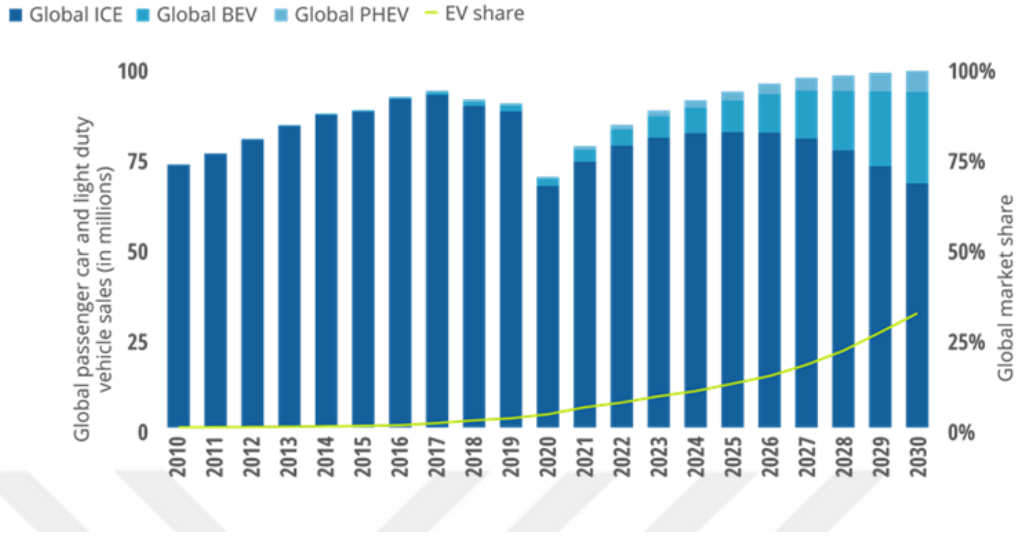
Elektrikli otomobillerin tarihi 1800'lü yıllara dayanmakla birlikte 1920'li yıllarda içten yanmalı motorların yaygınlaşması ile gelişimleri yavaşlamıştır. Fakat 2000'li yıllarda fosil yakıt rezervlerinin azalması, içten yanmalı motorların çevre üzerindeki etkileri konusunda bilinçlenmenin artması ve fiyatlardaki dengesizleşme alternatif yakıtlı araçların popülaritesinin artmasına sebep olmuştur. Alternatif yakıtlı araçlar arasında elektrikli araçlar, hibrit araçlar, hidrojen yakıtlı araçlar ve doğalgazlı araçlar sayılabilir. Bu kategoride öne çıkan elektrikli araçlar, sadece elektrik motorlu tümü elektrikli araç, elektrik motor ve içten yanmalı motorun birarada bulunduğu hibrit araçlar ve bataryalı yada bataryasız olmak üzere yakıt pilli araçlar olarak sınıflandırılmaktadır. Hibrit elektrikli araçları mikro hibrit, yarı hibrit, full hibrit, plug-in elektrikli araç ve elektrikli araç olarak farklı sınıflara ayırmıştır. Başka bir çalışmada ise elektrikli araçların sahip oldukları konfigürasyonlara ve enerji akışlarına göre tümü elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve bataryalı/bataryasız araçlar olarak üç gruba ayrılmaktadır (Kerem, 2014).

Elektrikli araç tanımı tahrik yani ileri itiş için elektrik motorunun kullandığı araç sistemini ifade etmektedir. Elektrikli otomobiller de elektrikli araçların bir türüdür. Elektrikli araç, bir veya daha fazla elektrik motoru kullanarak, bataryalardan ve diğer enerji depolama cihazlarında depoladığı elektrik enerjisi kullanarak hareket eden otomobillere verilen addır. Elektrik motorları sağladığı ani tork ile dengeli ve yüksek kuvvette bir hızlanma sağlar. Elektrikli araçlar, elektrik motoru, elektronik kontrol modülü, pil, pil yönetim sistemi, akıllı akü şarj cihazı, kablolama sistemi, jeneratif fren sistemi, araç gövdesi, soğutma, fren gibi temel bileşenlerden oluşmaktadır. (Algül, 2015).

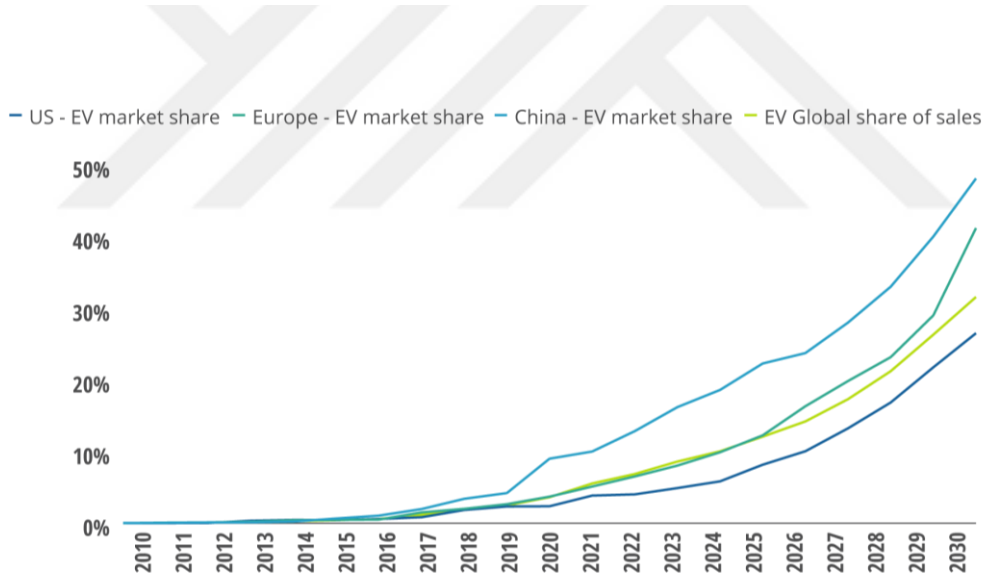
Küresel ısınma, iklim krizi ve petrol türevi yakıtların fiyatlarındaki istikrarsızlık sonucu önem kazanan elektrikli otomobilin icadında birçok mucidin adı geçmektedir. 1828’de, Macar Ányos Jedlik tasarımı yaptığı bir elektrik motoru ile çalışan küçük ölçekli bir araç modelini, 1832 ve 1839 (tam yıl belirsiz) arasında ise, İskoçyalı Robert Anderson elektrikle çalışan bir araba icat etmiştir. 1835’de elektrikli araç modeli, Hollandalı Profesör Stratingh tarafından tasarlanmıştır. 1800’lü yıllarda icat edilen elektrikli araçlar, 1900-1912 yılları arasında altın dönemini yaşamış, 1921-1960 döneminde içten yanmalı motorlu araçların yaygınlaşması ile yok olmaya başlamış, 1960-1990 döneminde önceki dönemlere nazaran daha az şekilde tekrar görülmeye başlamıştır. Elektrikli araçlar, 1990 sonrasında, yakıt tasarrufu sağlanması ve çevrenin korunması bağlamında yeni batarya teknolojileri ile ortaya çıkmıştır (www.energy.gov, Erişim tarihi : 18.11.2021)

Elektrikli araç satışları incelendiğinde 2019’daki global elektrikli araç satışlarının 2018’e göre 6 puan arttığı ve araç satışlarının %74’ünün bataryalı elektrikli araçlara ait olduğu görülmektedir (www.insideevs.com). Bu artışın nedenleri arasında Avrupa’da emisyon standartları ile ilgili alınmış ciddi önlemlerin olması ve dolayısıyla üreticilerin sıfır emisyon araç üretmeye teşvik edilmesine ek olarak içten yanmalı motorlu araçlar ile elektrikli araçlar arasındaki toplam sahip olma maliyeti arasındaki farklar da etken olmaktadır(www.nickelinstitute.org). Elektrikli araç pazarındaki büyümenin analiz edilmesi için gelecek satış tahminlerine bakıldığında 2020 yılında 2.5 milyon olan elektrikli araç satışının 2025 yılında 11.2 milyon ve 2030 yılında ise 31.3 milyon olacağı öngörülmektedir (Şekil 2.1) (www2.deloitte.com). Bununla birlikte Şekil 2.2’de 2030 yılında global elektrikli araç pazarının %49’unda Çin’in etkin olacağı, %27 ve %14’lük payların ise sırasıyla Avrupa ve Amerika’ya ait olacağı öngörülmektedir (Deloitte, 2020). Bir başka çalışmaya göre ise elektrikli araç satışının 2040 yılında 2.3 milyona ulaşacağı yönündedir (Ai ve Borucki, 2018). International Energy Agency (2018)’e göre 2030 yılında 140 milyon elektrikli araç global olarak piyasada olacaktır. Bloomberg (2020)’in bataryalı araçlar için yaptığı tahmine göre 2017’de 155 model olan bataryalı araçlar 2022 yılında yaklaşık olarak 290 modele kadar çıkacaktır. Bu çalışmaya ek olarak global olarak satılan araçların %55’inin elektrikli olacağı bilgisi paylaşılmıştır. Berggren and Kågeson (2017), Avrupa Birliği’nin 2050 yılındaki karbon emisyon hedefinin sağlanması için araç filolarının fosil yakıtlardan uzaklaştığını öne sürmektedir. Varsayımlarına göre 2050 yılında araç

filolarının en az %80'i ya full elektrikli yada kısmi elektrikli olacaktır. 2030 yılında yeni araç satışlarının %50'si bataryalı araçlardan oluşacaktır.



Şekil 2.1: 2030 yılına kadar binek araç ve hafif ticari araçlar satış tahminleri grafiği (Deloitte, 2010).



Şekil 2.2 : 2030 yılına kadar Amerika, Avrupa ve Çin'deki elektrikli araç pazar payı oranları (Deloitte, 2010).

Elektrikli araçların pazardaki penetrasyonunun artması sera gazı emisyonlarının azaltılması için büyük bir fırsat olarak görülsede sıfır emisyon sağlanması mümkün görünmemektedir. Elektrikli araçların sağladığı en önemli çevresel etkilerden biri elektrik ihtiyacı ve bu ihtiyacın karşılanması için kullanılan teknolojidir. Elektrikli araçların çevresel ve sağlık etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, elektrikli araçların

insanlarda yol açtığı toksik etkisinin %45-47 oranında elektrikli araç bataryalarından kaynaklandığından söz edilmektedir. (Girardi ve diğ., 2015).

2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar

Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine doğrudan dönüştürerek yapısında depolayan cihazlara pil, çoğunlukla aynı kimyasal yapıya, ölçülere ve elektrik kapasitelerine sahip pillerin tek tek bir araya getirilerek oluşturdukları pil gruplarına ise batarya adı verilmektedir (TAP, 2021).

Bataryalar kimyasal yapısına göre aşağıdaki gibi gruplandırılabilir :

Kurşun asit bataryalar (Pb-asit); Kullanılan en eski tipteki bataryadır. Öne çıkan özelliklerinden biri, yapısında bulunan asidin ve kurşunun işlenmesi ve kullanım sonrası imha edilmesidir. Yaşam ömürleri yaklaşık olarak 20 yıldır. Verimlilik oranları da %95-%99 arasında değişkenlik göstermektedir.

Nikel-kadmiyum bataryalar (NiCd); Kullanım ömrü en uzun olan bataryalardır. İçeriğinde bulunan kadmiyum sebebiyle çevre ve insan sağlığı üzerinde negatif etkilere sahip olduğundan kullanımı sınırlandırılmıştır.

Nikel-metal-hidrit bataryalar (NiMH); Bataryanın üretim ve çalışma süreçleri NiCd bataryalara benzemektedir. Düşük depolama özelliği nedeni ile yüksek güç gerektiren durumlarda yüksek kapasiteli pillerin kullanılması gerekmektedir.

Lityum-ion bataryalar (Li-ion); Yüksek enerji depolama kapasitesine sahip ancak maliyeti yüksek, ısınması fazla ve kullanım ömrü kısadır.

Lityum-ion polimer bataryalar; Lityum iyon bataryalara göre daha uzun ömürlü ancak fazla enerji yüklenme durumunda ve şarjı kritik seviyenin altına düştüğü durumlarda fonksiyonel açıdan daha kararsız yapıdadır.

Sodyum nikel klorür bataryalar (NaNiCl); Zebra batarya olarak da bilinir. Yüksek depolama kapasitesine sahip olup işletme ve uzun süre depolanması konularında dezavantajlıdır.

Genellikle kullanımı tercih edilen batarya çeşitlerinin yapılarındaki maddeler Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 : 25 kWh kapasiteye sahip bazı bataryaların özellikleri ve yapısında bulunan maddeler (Olivetti ve diğ.,2017).

Batarya Çeşidi	Ağırlık (kg)	Yapısında bulunan maddeler	Kaynak
Pb-Asit	500	Kurşun, kurşun-oksit, asit(%22-26 H ₂ SO ₄),cam elyaf, keçe, çelik veya polipropilen dış kaplama	(Gaines ve Singh,1995)
NiCd	439	Cd(%15), Ni(%22)	(Gaines ve Singh,1995)
NiMH	330	KOH elektrolit, çelik, eser elementler(%33), geçiş metalleri (%60), diğer metaller(%7)	(Gaines ve Singh,1995)
Li-ion	167.5	Batarya tipi ve kullanım alanına göre farklı lityum bileşikleri (LiCoO ₂ , LiMn ₂ O ₄ , LiNiMnCoO ₂ , LiFePO ₄ , LiNiCoAlO ₂ , Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	(BU, 2016; ULTRALIFE,2016)

Çizelge 2.2’de batarya içeriklerindeki temel parametrelerin yıllara göre değişimi gösterilmektedir.

Çizelge 2.2 : Batarya içeriklerindeki temel parametrelerin yıllara göre değişimi (Whittingham,1976).

Yıl	Katot Tipi	kWh(LiB) /kg(LiB)	kWh(Li) /kg(LiB)	kWh(Ni) /kg(LiB)	kWh(Mn) /kg(LiB)	kWh(Co) /kg(LiB)
2020	NMC-622	0.15	0.126	0.641	0.2	0.214
2035	NMC-811	0.25	0.111	0.75	0.088	0.094
2050	NMC-811	0.275	0.111	0.75	0.088	0.04

İlk lityum iyon batarya 1970’li yıllarda Michael Whittingham tarafından lityum metali ve titanyum sülfat kullanılarak bulunmuştur (Whittingham,1976). Lityum iyon bataryalar, aracın elektrifikasyonunu sağlayan etkili bir enerji depolama mekanizmasıdır. Tipik bir lityum iyon batarya hücresi, bir grafit anottan, bir metal oksitten veya fosfat katottan ve sıvı elektrolitten oluşmaktadır. Kullanılan katot türü formülasyonu, lityum iyon bataryanın özelliklerini ve performansını belirler bu nedenle geliştirilmesinde hayati bir rol oynar (Liu ve diğ., 2016).

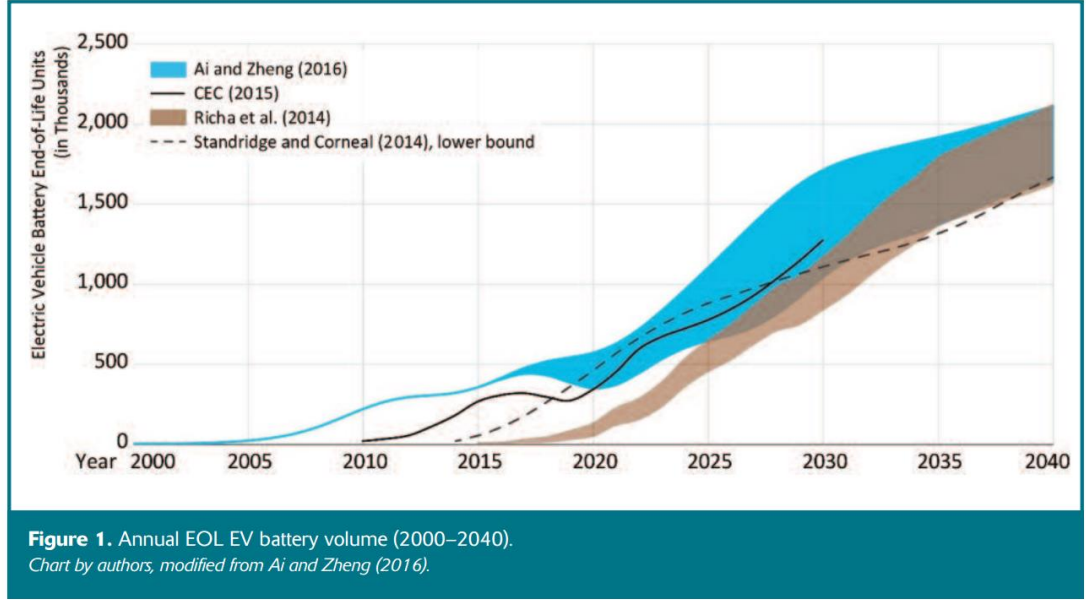
Elektrikli araç üreticileri tarafından genellikle kullanılan katot kimyasalları lityum demir fosfat (LFP), nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) ve nikel manganez kobalt

(NMC) 'tır. Lityum demir fosfat tipi batarya genellikle Çin'de kullanılmaktadır ve kısa mesafe menziller için daha çok kullanışlıdır. Fakat NMC ve NCA'nın artan performanslarına bağlı olarak tercih edilme oranlarının artmasıyla bu tip bataryaya olan talep son yıllarda azalmaktadır (Kamran ve diğ., 2021). NMC tip bataryanın artan menzil performansı sebebiyle 2050 yılına kadar elektrikli araç pazarını domine etmesi beklenmektedir.

Elektrikli araç bataryalarının tasarlanan yaşam ömürleri 8 ile 10 yıl arasında değişmektedir. Batarya ömürleri, batarya tipi, batarya kapasitesi, bozulma etkisi (yüksek sıcaklık, fazla şarj etme, voltaj kararsızlıkları gibi), inovasyon, bireysel kullanım ve sürüş tarzları gibi faktörlerden etkilenmektedir (Standridge ve Hasan, 2015). Bir elektrikli aracın ömrü yaklaşık 200.000 km veya 15 yıl olarak kabul edilirken kullanılan bataryanın ömrü 8-10 yıl olarak kabul edilmektedir (Hacker ve diğ., 2009). Bataryaların ömrünü belirlemede diğer bir yaklaşım ise bataryanın depolama kapasitesinin başlangıç kapasitesine göre %20-30 düşmesi durumunda ömrünü tamamladığı şeklindedir. Bataryaların ömrünü ve kullanım süresini etkileyen parametreler; fazla şarj etmek, şarjını tamamen boşaltmak, hızlı şarj etmek, kullanım sırasında yüksek sıcaklığa maruz kalması olarak belirtilmektedir (Ahmadi ve diğ., 2014). Yapılan bir çalışmaya göre lityum iyon bataryanın ömrü iki şekilde incelenebilmektedir. Bunlar, toplam yaş ve döngü kararlılığıdır. Döngü kararlılığı, kaç kez şarjın tamamıyla bitip tekrar şarj olarak ilk kapasitesinin %20 düştüğü kısmı ifade etmektedir. Bir çok uzmana göre bataryanın ilk değeri %80'in altına düştüğünde bu bataryalar, güç vermek için otomobillerde kullanılamaz. Toplam yaş ise bataryanın fonksiyonlarını doğru bir şekilde yerine getirebildiği zamandır (Casals ve diğ., 2019). Başka bir çalışmada ise elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların yaşam ömrünün 4 unsura bağlı olduğu tanımlanmıştır. Bunlar takvim yaşı, batarya sağlık durumu, çalışma sıcaklığı ve şarj olma hızıdır (Tadaros ve diğ., 2020). Bu çalışmada elektrikli araç bataryaları, takvim yaşı unsuruna göre incelenmektedir. Bu bağlamda modelde elektrikli araçlar için yaşam ömrü olan 8-10 yıl süresini tamamlayan bataryalar döngüsel ekonomi konseptinde ele alınmıştır.

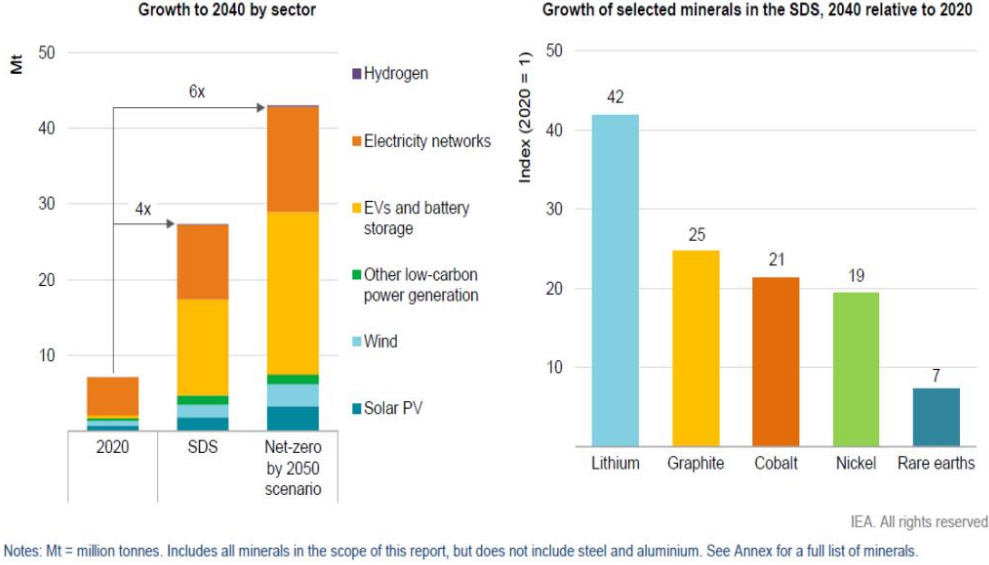
Yapılan araştırmalara göre 2035 yılı itibariyle birincil ömrünü tamamlayan batarya sayısı 1.376 milyon ile 6.759 milyon değeri arasında değişecektir ve yeniden üretim, farklı amaçla kullanım ve geri dönüşüm için kullanılabilir durumda olacaktır (MNTC Report). Yapılan başka bir çalışmaya göre kullanılmış elektrikli araç bataryalarının

sayısı 2025 yılında 1 milyon seviyesinde iken 2040 yılında 2 milyon seviyesine çıkacaktır (Ai ve Borucki, 2018). Şekil 2.4'te özetlendiği üzere çalışmaların genel yaklaşımı özellikle 2030 yılından sonra yaşam ömrünü tüketmiş elektrikli araç batarya hacminin katlanarak artacağı yönündedir.



Şekil 2.3 : 2000-2040 yılları arasında kullanılmış elektrikli araç batarya sayıları (Ai ve Zheng, 2016).

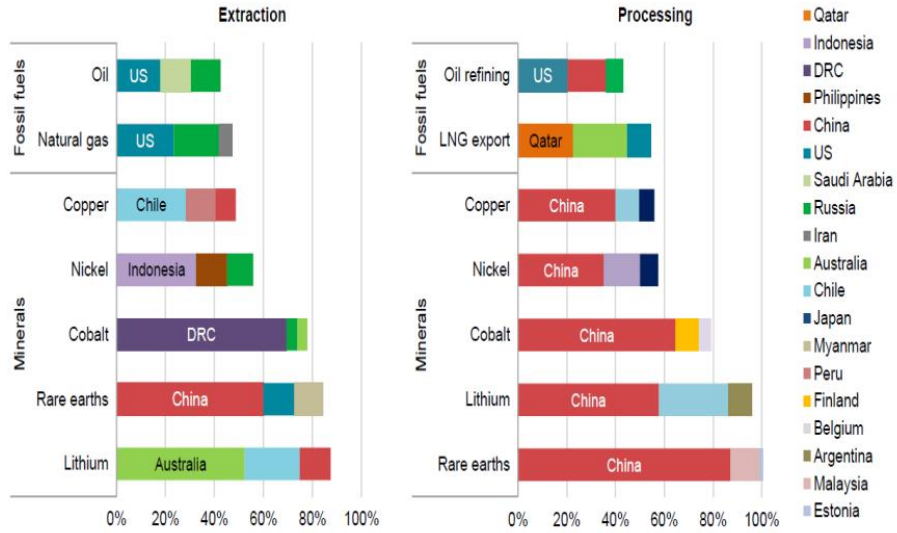
Lityum iyon bataryalarda kullanılan ve kritik hammadde olarak isimlendirilen mineraller lityum, kobalt, nikel ve manganez mineralleridir. Güncel yıllık lityum üretimi yükselen elektrikli araç talep trendine cevap verecek yeterlilikte değildir (IEA;2021). Lityum rezervlerinin kapasitesinin ekonomik olarak karşılanabilir düzeyde olup olmadığı halen belirsizlik içerisinde. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın yaptığı bir çalışmada 2040 yılındaki mineral talebinin yüksek oranda elektrikli araç ve batarya enerji depolama sektöründeki hacim artışından kaynaklanacağı öngörülmektedir. Bu oranlar Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Temiz enerji teknolojileri için mineral talebi (Dünya Enerji Konseyi Raporu, 2021).

Bununla birlikte ticari olarak işletilebilir lityum rezervlerinin önemli bir kısmı nispeten kısıtlı coğrafi alanların sınırları içinde yerleştirilmiştir. Güney Amerika'daki "beyaz altın üçgen" olarak isimlendirilen alan bunların arasında yer almaktadır (Choubey ve diğ., 2017). Kobalt mineralinin bulunabilirliği de gerçek anlamda kritik olarak değerlendirilmekte ve kısıtlar içerisinde. Kobalt minerali lityum iyon batarya üretimi için bulunması gereken minerallerin başında gelmektedir. Dünya'daki kobalt mineral rezervlerinin %60'dan fazlası Kongo Cumhuriyeti'nde yer almaktadır (Dünya Enerji Konseyi Raporu, 2021). Kobalt mineralinin elde edilmesinin ve işlenmesinin ekolojik toksik dengesi, etik ve insani değerler açısından etkisi bazı problemlere konu olmaktadır. Şekil 2.5'te temiz enerji sektörü için gerekli minerallerin çıkarıldığı ve işlendiği ülkeler gösterilmiştir. Örnek olarak fosil yakıt ve doğal gazın büyük miktarı Amerika'da çıkarılırken özellikle elektrikli araç batarya üretimi için gerekli minerallerden kobalt Kongo Cumhuriyeti'nde, lityum Avustralya'da ve nikel öncelikli olarak Endonezya'da çıkarılmaktadır (Dünya Enerji Konseyi Raporu, 2021). Bu mineralleri işleyen ülkelerin başında ise elektrikli araç ve elektrikli araç batarya sektörünün en hızlı geliştiği ülke olan Çin gelmektedir. Bu bilgilerin ışığında sürdürülebilir bir döngüsel ekonomi stratejisi için kaynakların en etkin biçimde kullanılarak dışa bağımlılığın azaltılması sağlanmalıdır. Kritik olarak nitelendirilen kobalt ve lityum mineralleri bu çalışmada ana incelenme unsuru olarak izlenmektedir.

Bununla birlikte bu bağımlılığın maddi etkileri olacağı gibi taşımacılık sırasında karbon emisyonundan kaynaklı çevresel bir etkisi de olacaktır. Bu sebeple mineral rezervlerinin bulunduğu ülkeler ve minerallerin elde edilme koşulları önem arz etmektedir.



Notes: LNG = liquefied natural gas; US = United States. The values for copper processing are for refining operations.
Sources: IEA (2020a); USGS (2021), World Bureau of Metal Statistics (2020); Adamas Intelligence (2020).

IEA. All rights reserved.

Şekil 2.5 : Minerallerin çıkarıldıkları ve işlendikleri ülkeler (Dünya Enerji Konseyi Raporu, 2021).

2.3 Döngüsel Ekonomi

Döngüsel ekonomi, atık oluşumunu en aza indimeyi hedeflerken malzemeleri ve kaynakları kullanımlarının sonunda ürün döngüsüne tekrar geri döndürerek değerlerini döngü içinde maksimum sürede korumayı hedefler (Döngüsel Ekonomi Platformu, 2021). Başka bir tanıma göre ise döngüsel ekonomi, kaynaklardan elde ettiği değeri maksimumda tutarken atık oluşumunu minimumda tutmaktır (Ahuja ve diğ., 2020).

Döngüsel ekonomi konusu, sürdürülebilir gelişim için en olanaklı ve optimum çözümlerden biri olarak görülmektedir (Hrabec ve diğ., 2019). Döngüsel ekonomi, geleneksel lineer ekonomi modeli al-yap-tüket -imha et yapısına alternatif olarak ortaya çıkmıştır.

Döngüsel ekonomi ve tedarik zinciri yönetiminin entegrasyonu sürdürülebilirliğin sınırlarını genişletirken hammaddeye olan ihtiyacı azaltır ve kaynakların döngü içinde kullanımının artmasına olanak sağlamaktadır. Döngüsel ekonomide bir ürün yaşam döngüsünün sonuna geldiğinde öncelikli içerik ve atık miktarı azaltılmış şekilde bu

ürün ek bir değer yaratmak için tekrar üretilebilmektedir (Cusenza ve diğ., 2019). Döngüsel ekonomi konsepti, doğrusal üretim modelini üretim seviyesini ve limitli ulaşılabilir kaynak tüketimini optimum hale getirmek için döngüsel modele çevirmektedir (Bal ve Badurdeen, 2021).

Döngüsel ekonominin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için tersine tedarik zinciri, ürün hizmet sistemi tasarımı, yaşam ömrü ve politikalar ile bütünsel olarak ele alınması gerekmektedir. Döngüsel ekonomi stratejileri, komponentlerin yeniden üretimi, ürünlerin yeniden kullanımı, ürünün tamiri, yenilenmesi ve malzemelerin geri dönüşüm adımlarını içermektedir (Bal ve Badurdeen, 2021).

Jayal ve diğ., 2010, tarafından öne sürülen azaltma, yeniden kullanım, geri dönüştürme, tamir etme, yeniden tasarlama ve yeniden üretim adımlarını içeren 6R yöntemi (reduce, reuse, recycle, recover, redesign, remanufacture) döngüsel ekonomi için tedarik zinciri yapısını oluşturmaktadır.

Circle Economy tarafından geliştirilen değer piramidi, döngüsel ekonomi konularını 4 ana başlık altındaki toplam 14 kategori altında incelemektedir(Achterberg ve diğ.,2016). Şekil 2.7’de gösterilen değer piramidinin tepesi ürün değerinin maksimum olduğu noktadır ve buradaki amaç katma değer korularak ürünün sadece üretim değil aynı zamanda kullanım aşaması da olan bu noktada farklı döngüsel stratejilerle olabildiğince uzun süre kalmasını sağlamaktır.

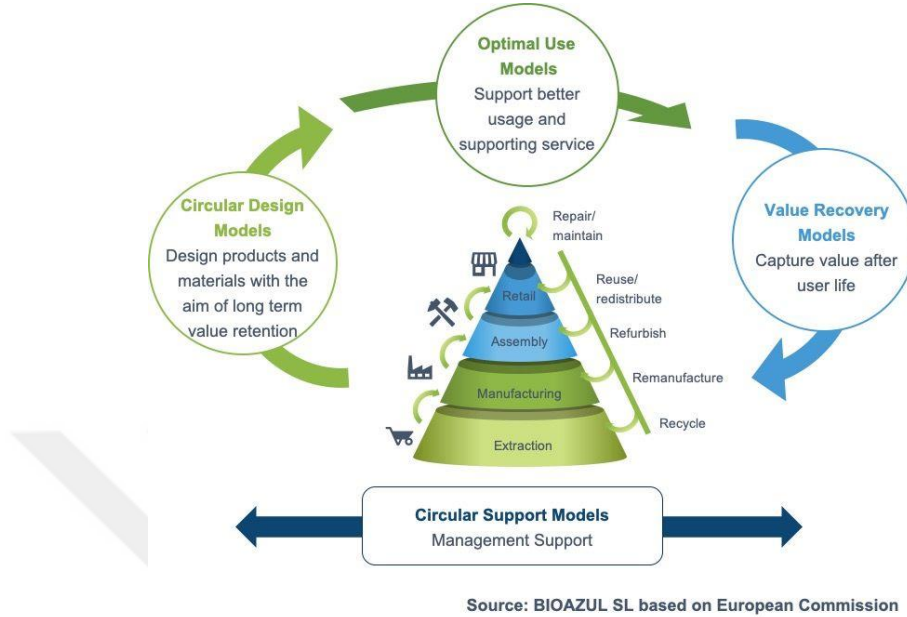
Ürünlerin değer piramidinde yer aldığı konumlar dört farklı kategorideki döngüsel iş modeliyle açıklanabilmektedir;

1- Döngüsel Tasarım Modelleri: Bu iş modelleri ürünün kullanım öncesi ve ürünün tasarım aşamasına odaklanır. Amaç, ürünün kullanım safhasını uzatmak ve ürünlerin döngüdeki kaynak verimliliğini artırmaktır.

2- Optimal Kullanım Modelleri: Bu iş modellerinin amacı ürünlerin yaşam ömrünü uzatarak ürünün kullanım safhasını optimize etmektir. Değer piramidinin en üst noktasıyla ilişkilendirilmektedir.

3- Değer Geri Kazanım Modelleri: Bu iş modelleri bir ürünün kullanım sonrası safhasıyla ilişkilendirilmektedir. Modelin amacı, yaşam süresinin sonuna gelmiş ürünlerden değer elde ederek ürünü döngü içinde tutmaktır.

4- Döngüsel Destek Modelleri: Bu iş modelleri, tüm döngüsel ekonomi modelleri ve döngüsel ağların içerdiği destekleyici faaliyetleri içerir (Döngüsel Ekonomi Platformu, 2021).



Şekil 2.6 : Döngüsel Ekonomi Değer Piramidi (European Commission, 2021).

Döngüsel ekonomi çerçevesinde tedarik zinciri problemlerinin çözümü için birçok farklı metot ve yaklaşım uygulanmıştır. Badurdeen ve diğ. (2018), toner kartuşlarının çoklu yaşam döngüsünde kullanımı için çok amaçlı bir optimizasyon uygulamıştır. Anvari ve Turkyay (2017), Türkiye’deki dijital ürünler için 3 amaçlı bir optimizasyon yapısı ortaya çıkarmışlardır. Bal ve Satoglu (2018), küresel bir dayanıklı eşya üreticisi için modellerine tersine lojistik ağı entegre ederek yaşam ömrü bitmiş ürünlerin toplanmasını ve yeniden kullanımını ele alan çok amaçlı bir optimizasyon modeli kullanmışlardır. Kılıç ve diğ. (2015), yaşam ömrü bitmiş ürünlerin farklı toplanma oranlarını karma tamsayı doğrusal model kullanarak tersine lojistik sistemi içinde ele almışlardır. Sherafati ve diğ. (2019), ise döngüsel ekonomi konusunun ekonomik, çevresel ve sosyal olarak 3 başlıkta ele almış ve kar maksimizasyonu problemi için tedarik zinciri ağı tasarlamıştır. Bu çalışmada da benzer şekilde ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının döngüsel ekonomide kullanılması konseptinde maliyet ve karbon emisyon minimizasyonu için çok amaçlı bir optimizasyon uygulanmıştır.

2.3.1 Lityum iyon batarya kullanımının döngüsel ekonomi ile ele alınması

Elektrikli araç bataryaları içeriğinde çok farklı mineraller bulundurmaktadır. Sektörün yeni gelişmesinden kaynaklı olarak sınırları çizilmiş bir standart bulunmamakta ve üreticiler ve sektör içindeki diğer oyuncular bu minerallerin menzile, güç ve diğer avantaj yaratacak durumlara etkisi konusunda yeterli bilgi birikimine sahip değillerdir (Spears, 2015). Batarya içeriğindeki mineraller ile ilgili bir diğer konu da minerallerin elde edilme maliyetleri, çevreye olan zararları ve bulunabilirlikleridir. Avrupa Birliği'nin kritik olarak listelediği Kobalt ve Grafit mineralleri batarya içerisinde farklı oranlarda bulunmaktadır. Spears (2015)'e göre öngörülen batarya üretim miktarlarına göre bu minerallerin miktarı yeterli olmayacaktır. Bunun nedenleri arasında coğrafik konum, jeopolitik konular, maliyet dengesizliği veya etik ve çevresel konular yer almaktadır (Spears, 2015).

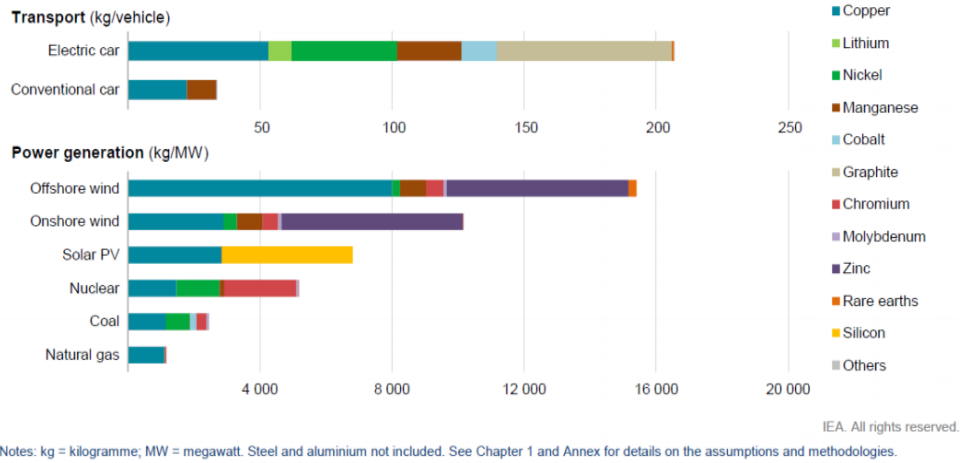
Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların kullanım ömrü tamamlandığında geri dönüşümü ve geri kazanımı, yapısında bulunan kritik ve değerli olarak adlandırılan minerallerin ve metallerin yeniden kullanılarak tekrar batarya üretiminde kullanılması yönüyle çevresel ve ekonomik öneme sahiptir (Olapiriyakul ve Caudill, 2008). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bataryaların kullanım sonrası için geri dönüşüm yöntemi uygulanmasının en uygun yöntem olduğu düşünülmekle birlikte bu bataryaların yeniden üretim sürecine dahil edilme metodunun yeni bir batarya üretmekten daha ekonomik ve çevresel açılarından daha avantajlı olduğu belirtilmektedir (Ramonı ve Zhang, 2013). Başka bir çalışmaya göre ise lityum iyon bataryalar, global ölçüde enerji sürdürülebilirliği için kritik bir parça haline gelme potansiyeline sahiptir (İskeceli ve diğ., 2020). Tadaros ve diğ.(2020)'ye göre tersine tedarik zincirinin amaçları indirgemek, yeniden kullanmak, yerini almak veya geri dönüşüm iken, kullanılmış lityum iyon bataryalar için sadece geri dönüşüm veya yeniden kullanım amaçları geçerlidir. Toplanan bataryaların çok büyük kısmı geri dönüştürülürken bazı bataryalar yeniden kullanılır veya farklı uygulamalara güç kaynağı olacak şekilde ikincil kullanım için değerlendirilirler. Literatürde geri kazanma ağırları, toplama, ayırma, yeniden işleme, imha etme ve yeniden dağıtma gibi süreçleri içermektedir.

Elektrikli araç bataryalarının ilk yaşam evresi sonucundaki kapasitelerine döngü yaşı ve takvim yaşı kombinasyonlarına bakılarak karar verilmektedir (Redondo-Iglesias ve diğ., 2018). Döngü yaşı, bataryanın kaç kere şarjının bittiği ve şarj edildiği ile ilgilidir.

Takvim yaşı ise doğal süreçlerindeki geçen zamanla ilgilidir. Belirlenen elektrikli araç menziline göre döngü yaşı ve takvim yaşı belirlenebilmektedir. Bu sonuçlara göre elektrikli araç batarya kapasiteleri ilk yaşam evresi sonucunda özel araçlar için yaklaşık %30 seviyelerinde, toplu taşıma sistemlerinde ise yaklaşık %20 seviyelerinde seyretmektedir (Redondo-Iglesias ve diğ., 2018).

Yapılan bir çalışmaya göre 8 ile 10 yıl arasında ilk ömürleri değişen elektrikli araç bataryalarının kullanıldıkları ikincil yaşam aplikasyonuna göre ilave ömürleri 5 ile 10 yıl arasında değişmektedir (Kamran ve diğ., 2021).

Kullanılmış elektrikli araç bataryaları için şimdiden birçok firma yol haritalarını belirlemiş durumdadır. Bu girişimlere en iyi örnekler arasında Daimler'in "Daimler Mobility House" girişimi, Renault'un "Advanced Battery Storage" ile 60 MWh kapasiteli bataryaları yenilenebilir enerji için kullanması ve "SmartHubs Connected Energy" pilot projesi ile 2021 yılında 14.4 MWh kapasiteli kullanılmış elektrikli araç bataryasının şebeke dengeleme hizmetleri için kullanılması sayılabilir.



Şekil 2.7 : Temiz Enerji Teknolojilerinde Kullanılan Mineraller (Dünya Enerji Konseyi, 2021).

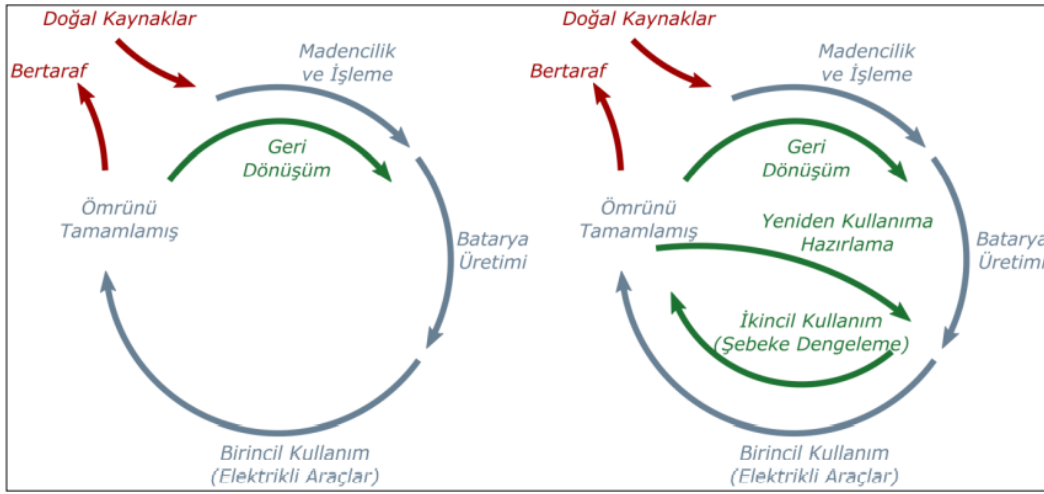
2.3.1.1 Yeniden kullanım

Elektrikli araç bataryaları belirli bir konfigürasyondaki çok sayıda hücreden oluşmaktadır. Bazı hücreler bozulduğunda ise batarya artık şarj olmak için yeterli enerjiyi tutmamaya başlar. Yeniden kullanım, bozulan hücrelerin yerini belirlemek ve bunların yerini yeni hücreler ile değiştirme işlemidir. Ömrünü tamamlamış elektrikli

araç bataryalarının yeniden kullanımına karar verilme aşaması genellikle toplama merkezlerinde toplanan bataryaların gateway testing işlemi sonrasında olmaktadır.

2030 yılında yeni batarya üretimin yaklaşık %25'i yerini yeniden üretilmiş bataryalara bırakacaktır (Standridge ve Hasan, 2015).Yapılan bir çalışmaya göre bataryayı yeniden kullanma işlemi yeni bir batarya üretmeye göre %55 daha az maliyetli olacaktır (Ai ve Barucki, 2018). Kapasitesinin %80'ine sahip olan bataryaların yeniden kullanım sürecine dahil edilmeleri atık azaltılmasının yanı sıra çevresel ve ekonomik açıdan da kullanıcılara katkı sağlayacaktır. Elektrikli araçlarda kullanım ömrü tamamlanmış bataryaların yeniden üretim aşamasında değerlendirilmesinin çevresel açıdan ele alındığı bazı çalışmalarda, bataryanın kullanım süresinin uzamasından dolayı yeniden kullanım sürecinde CO₂ ve sera gazı emisyonunda azalma sağlanacağından söz edilmektedir (Güven ve Gedik, 2019).

Şekil 2.8'de kullanım sonrası doğrudan imha etme ve yeniden kullanım akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : Kullanım sonrası doğrudan imha etme ve yeniden kullanım akış şeması (Ahmadi ve diğ., 2014).

2.3.1.2 Geri dönüşüm

Birincil ömürleri tükenmiş elektrikli araç bataryalarının tipik bertaraf şekli genellikle geri dönüşüm yöntemidir. Son yıllarda lityum iyon bataryaların geri dönüşüm sürecine olan ilgi artmaktadır. Tüm süreç tamamlanmasa da hem yasal olarak hem de metalurjik işleme perspektifine göre yerine getirilmesi gereken aktiviteler ve süreçler bulunmaktadır. Batarya farklı sebeplerden araçtan çıkarıldığı durumda bataryanın test edilmesi ve kalitesine karar verilmesi gerekmektedir. Elde edilen bulgulara göre tekrar

kullanım için uygun olup olmadığı, herhangi bir iyileştirmeye gereksinim duyup duymadığı veya ikincil kullanıma uygun olma durumu gibi konulara karar verilir. Bu seçeneklerden birine uygun değilse de imha edilmek için regülasyonlara uygun şekilde imha tesislerine gönderilmektedir. (Tadaros ve diğ., 2020).

Demontaj işlemi elektrikli araç bataryalarının sürdürülebilirliğine katkısı yüksek olan işlemlerin başında gelmektedir. Ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryaları için farklı geri kazanım yöntemleri uygulanmakla birlikte genellikle uygulanan yüksek sıcaklık gereksinimi olan pirometalurji ve düşük sıcaklıkta uygulanan hidrometalurji süreçleridir (Güven ve Gedik, 2019). Lityum iyon batarya geri dönüşümü için günümüze kadar yaygın olarak kullanılmış olan yöntem pirometalurjik geri dönüşüm yöntemidir. Bu yöntem yüksek enerji gereksinimi gerektirmesine karşın düşük metal elde etme oranı ve olumsuz çevresel etkilere sahiptir (Arambarri ve diğ., 2019). Metal elde etme konusunda yüksek etkinliğe sahip geri dönüşüm yöntemi hidrometalurjik yöntemidir. Avrupa ve Amerika’da son yıllarda sayıları artan geri dönüşüm tesisleri genellikle bu yöntemi tercih etmektedir. Çizelge 2.3’te hidrometalurjik geri dönüşüm yöntemi ile kritik hammaddelerin elde edilme oranları gösterilmektedir.

Çizelge 2.3 : Hidrometalurjik geri dönüşüm yöntemine göre metallerin geri dönüşüm oranları.

Metaller	Elde Edilme Etkinliği	Referans
Li	%95	Greim ve diğ., 2020
Ni	%99	Cheret ve Santen, 2007
Mn	%95	Chen ve Zhou, 2014; Melin, 2019
Co	%94	Cheret ve Santen, 2007

İleriki yıllarda elektrikli araç pazarının genişlemesiyle birlikte lityum iyon bataryalara olan talebin de artması beklenmektedir (T.C.Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021). Uluslararası Enerji Konseyi’ne(IEA) göre ileriki yıllardaki talepleri karşılamak için lityum üretiminin de artması gerekmektedir. Eğer lityuma olan talep aynı seviyede ilerler ve geri dönüşüm teknolojileri de yine bugüne benzer seviyede kalırsa 2050 yılında lityum elde edilmesi önemli problemlerimizden biri haline gelecektir (Tadaros ve diğ., 2020). Lityum iyon bataryalar yaşam ömrünü tamamladıklarında en sürdürülebilir yol olarak geri dönüşüm metodu tercih edilmektedir. Fakat geri dönüşüm süreci tam anlamıyla gelişmiş değildir ve etkilerinin, potansiyel

ihtiyaçlarının doğru Şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Circular Energy Storage'a göre 2025 yılında piyasada 750.000 ton yaşam ömrünü tamamlamış batarya olacakken bunun 400.000 tonu geri dönüştürülmüş bataryalardan oluşacaktır. Altyapı ve geri dnŐŐm süreçleri tamamiyle geliŐmemiŐ olsa bile gelecekte yüksek miktarlarda geri dönüştürülmüş batarya olacağı n görülmektedir (Tadoros ve diğ., 2020).

Elektrikli araç bataryalarının geri dnŐŐm sonrasında kritik hammadde olarak nitelendirilen lityum, nikel, manganez ve kobalt mineralleri elde edilmektedir. Lityum minerali, laptop, cep telefonu ve dijital kameraların yeniden Şarj edilebilir bataryalarında kullanıldığı için talebi yüksek olan bir mineraldir. Fakat lityum mineralini direkt elde etme işlemi mevcut durumda geri dnŐŐm yoluyla elde etme iŐlemine göre çok daha az maliyetlidir (IEA).

Elektrikli araçlara olan talebin her geçen gün artması ve elektrikli araçlarda kullanılan batarya ömürlerinin 8 ile 10 yıl arasında deęiŐmesi sonucunda pazarda kullanılmış olan batarya sayısının araç sayısından fazla olması beklenmektedir. Ortaya çıkması beklenen bu senaryoda, elektrikli araç bataryalarının içeriğinde bulunan ve çevreye zararlı kimyasalların olması ciddi miktarda kimyasal üretimini ve sonrasında bunların çevreye yayılımını beraberinde getirecektir(Kerem, 2014). Yüksek miktardaki bataryanın birincil yaşam ömrünü tamamlayarak atık kategorisine geçmesi ile çevreye zararlı yüksek miktarda toksik atık oluşacaktır. Bu bataryaların içerdiği zehirli maddeler regülasyonlara ve çevreye duyarlı bir Şekilde bertaraf edilmelidir (Manzetti ve Mariasiu, 2015).

Çin'deki yeni regülasyona göre elektrikli araç üreticileri pillerin geri kazanımından, kullanılmış bataryaların toplanması ve geri dnŐŐm tesislerine aktarım hizmetlerden sorumlu tutulmaktadır. Dünya'da birçok ülkede faaliyete geçen lityum iyon batarya geri dnŐŐm tesisleri bir çok Őirkete hizmet vermeye başlamıştır. Dünyanın farklı bölgelerinde kurulan ve bilinirlikleri her geçen gün artan (rneğin Singapur:TES-AMM, Güney Kore: SungEel, Belçika: Umicore, Amerika ve Kanada: Retrie Technologies, Avustralya: Envirostream Australia, ve Büyük Britanya: Belmont Trading) lityum iyon batarya geri dnŐŐm tesisleri bulunmaktadır.(Pagliaro ve Meneguzzo, 2019).

Bataryanın geri dnŐŐm süreci ile çevreye verilen zarar azaltılırken (Messagie ve ark., 2014) konu, enerji tüketimi yönüyle ele alındığında aynı derecede avantajlı

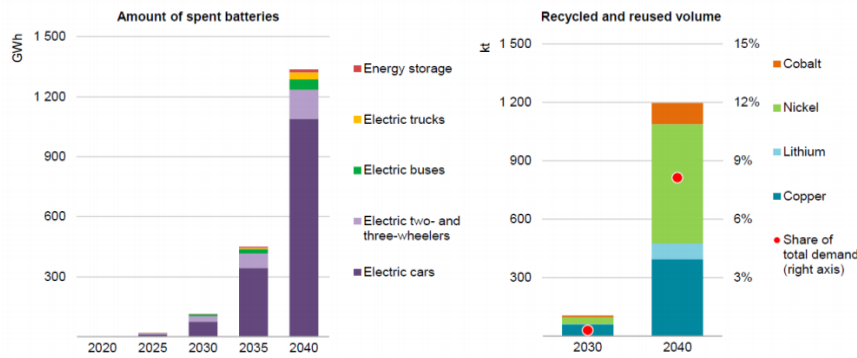
olmamaktadır (Samaras ve Meisterling, 2008; Buekers ve ark., 2014). Bir lityum iyon bataryanın üretim safhasında kullanılan enerji 25-30 kWh/kg iken (Buekers ve ark., 2014) geri dönüşüm süreci için tüketilen enerji 47 kWh/kg'dır (Güven ve Gedik,2019).

Batarya komponentlerinin değişimi, yeni teknolojiler ve düşük malzeme maliyetleri, geri dönüşümü ve ikincil kullanım batarya pazarını olumsuz etkilemektedir (Ai ve Bucks, 2018). Bununla birlikte yapılan bir çalışmada geliştirilen yeşil kimya teknolojisi ile kullanılmış lityum iyon bataryaların pirometalurjik veya hidrometalurjik yöntemle geri dönüştürülme aşamasındaki değerli mineral elde edilmesindeki seçiciliğin arttırılabildiği ifade edilmektedir (Pagliaro ve Meneguzzo, 2019).

2.3.1.3 Yeniden üretim

Birincil yaşam ömrünü tamamlamış lityum iyon bataryalardan uygun geri dönüşüm yöntemi uygulandıktan sonra elde edilen kritik mineraller tekrar yeni batarya üretiminde kullanılmaktadır. Bu adımın minerallerin elde edilme yöntem ve konumlarına göre hem ekonomik hem sosyal olarak birçok faydası bulunmaktadır. Geri dönüşüm işleminin ardından ham maddelerin yeniden kullanımı sayesinde sürdürülebilirlik sağlanıp sağlanmayacağı göz önünde bulundurulmaktadır.

Yapılan bir çalışmaya göre 2030 yılında yeni batarya üretiminin %25'i, yeniden üretilmiş bataryalardan oluşacaktır. Ayrıca yeniden üretim süreci, bataryaların ilk üretim sürecine göre daha az maliyetlidir (Standridge ve Hasan, 2015). Dünya Enerji Konseyi'nin 2021 yılında yayınladığı rapora göre 2040 yılında kullanılmış bataryaların yarısından fazlası elektrikli araçlardan kaynaklanacaktır. Bu kullanılmış lityum iyon bataryalarda geri dönüştürülen ve yeniden kullanılan mineral oranlarından en yüksek oran sırasıyla nikel, bakır, kobalt ve lityuma aittir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : Elektrikli araç bataryalarında geri dönüştürülen ve yeniden kullanılan mineraller (Dünya Enerji Konseyi Raporu, 2021).

2.3.1.4 Farklı amaçla kullanım

Farklı bir kullanım için yeniden tasarlama, ürünün orijinal tasarlanma amacının yeniden düzenlenerek ürünün farklı bir alanda kullanılmasını ifade etmektedir. Elektrikli araçlarda kullanılan birincil yaşam ömrünü tamamlamış bataryalar bu safhasının sonunda orijinal depolama kapasitelerinin %70-80'ine sahiptir (Ramoni ve Zhang, 2013). Yeniden kullanım ile ilgili yapılan çalışmalarda ömrünü tamamlamış bataryaların yeniden kullanımının 5-10 yıl içinde ekonomik olarak fayda sağlayacağı belirtilmiştir. Ayrıca ömrünü tamamlamış lityum iyon bataryaların güneş veya rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları, frekans regülatörü, iletim ve dağıtım dengeleyicisi, enerji zamanının ayarlanması, voltaj düzenlemesi, ani voltaj yüklemesinin dengelenmesi ve vites değişikliklerinde gecikmenin önlenmesi gibi uygulamalarda tekrar kullanılabilirdiğinden bahsedilmiştir (Güven ve Gedik,2019). Kullanımı artan lityum iyon bataryalar için son zamanlarda yapılan yatırımlar sadece geri dönüşüm süreçleri için değil aynı zamanda yeniden kullanım ve tadil etme süreçleri içinde yapılmaya başlanmıştır (Pagliaro ve Meneguzzo, 2019).

Lityum iyon bataryaların ilk yaşam evreleri sonunda yüksek miktarda kalan (ortalama %80) kapasiteleri elektrikli araçta yeniden güç kaynağı olarak kullanılmasına müsaade etmese de daha az enerji gerektiren alanlar için yüksek potansiyelli kullanıma sahiptirler (Ahuja ve diğ., 2020). Otomotiv için kullanım ömrünü tamamlamış %80 civarında kapasiteye sahip lityum iyon bataryalar alternatif olarak hafif ticari araç, bina, baz istasyonu, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları için enerji depolama sistemi olarak kullanılabilir (Ahmedi ve diğ., 2015). Gelecekte ilk yaşam evresini tamamlamış çok sayıda elektrikli araç bataryası şebekelere enerji depolama sistemi olarak kullanılacaktır. 2050 yılında enerji depolama sistemlerinin 56.2 GWh kapasiteye sahip olması beklenmektedir ve bu senaryonun gerçekleşmesi kullanılmış elektrikli araç bataryalarının bu sisteme dahil edilmesiyle mümkün olacaktır (Kamran ve diğ., 2021).

Lityum iyon bataryaların yeniden kullanımı endüstri paydaşları için yeni pazar fırsatları yaratırken farklı iş alanları için de olanak sunmaktadır. Kullanılmış lityum iyon bataryaların tadilat ve satışları için yeni şirketlerin açılması beklenmektedir. Bu şirketler aynı zamanda bu bataryaların toplanması, ulaşımı, demontajı, diagnostik ve ekran testlerinin yapılarak batarya kimyasının belirlenmesi, tamir edilmesi,

montajlanması ve yeniden satılması gibi hizmetleri de sunabilecektir (Curtis ve diğ., 2021).

2018 yılındaki Avrupa Komisyon raporununun yayınlanmasından sonra birçok şirket lityum iyon bataryaların geri dönüşüm süreçleri için adım atmaya başlamıştır. Amsterdam Arena’da kurulan bir enerji depolama sistemi 590 batarya paketinden oluşmaktadır. Bunların 340 adedi yeni batarya paketlerinden 250 adedi ise ikinci yaşam döngüsündeki kullanılmış elektrikli araç batarya paketlerinden oluşmaktadır. Kullanılan elektrikli araç bataryaları orijinal kapasitesi 24kWh olan ve ikinci yaşam evresinde 20 kWh kapasiteli olan bataryalardır. Benzer şekilde Çin’deki dünyanın en büyük telekomünikasyon kuleleri kurşun asit batarya satınalmayı 2018 yılında bırakmıştır. Baz istasyonlarındaki kurşun asit bataryaların yerini ikincil kullanımda olan elektrikli araç bataryaları almıştır (Pagliaro ve Meneguzzo, 2019).

Lityum iyon pillerin diğer pil türlerine göre birçok avantajı vardır. Çok sayıda üretilebilir olmalarına ve toksik olmamalarına ek olarak hafif olmaları ve elektropozitif olmaları onları depolama potansiyeli için daha yüksek değerlere sahip uygun seçenekler haline getirmektedir (İskeceli ve diğ., 2020).

İkincil kullanım kendi içinde birçok belirsizliği barındırmaktadır. İlk yaşam evresi bitmiş lityum iyon bataryanın ikincil kullanım için güvenli olup olmadığı, ilk kullanıcıya ait bataryanın sağlık durumu ve ikincil kullanıma elverişli olup olmadığı konuları bu alanda incelenmesi gereken hususlardır. Bununla birlikte lityum iyon pillerin diğer pil türlerine göre önemli miktarda avantajı olmasına rağmen bazı dezavantajlar da barındırmaktadır. Bunlardan biri lityumun oldukça reaktif olması ve bu nedenle güvenli pil hücreleri oluşturmanın teknolojik açıdan sahip olduğu zorluklardır. Bu dezavantaj daha önce metalik lityum kullanımından kaçınarak bunun yerine lityum iyonları (Li⁺) kullanımına sebep olmuştur (İskeceli ve diğ., 2020).

2012 yılında rüzgar enerji çıkışının artırılması için esnek batarya depolama üniteleri kullanımı önerilmiştir. Lityum iyon bataryaların farklı amaçla kullanım çalışmalarından biri de Loukato ve diğ.ne aittir. Çalışmada rüzgar çiftliği gelirini arttırmak için batarya üniteleri kullanılmış ve bataryaların yaşam süreleri modellenmiştir. 2020 yılında yapılan çalışma ise lityum iyon bataryalarının enerji depolama sistemi olarak kullanılması ile gün öncesi teklif sapmalarını ve pazar asimilasyon problemlerini azaltmaya odaklanmıştır (İskeceli ve diğ., 2020).

2.4 Elektrikli Araç Bataryalarının Karbon Ayak İzi Etkisi

10 yıldan fazla bir süredir lityum iyon bataryalar, dekarbonizasyon ve sera gazı etkisi azaltılması konularında önemli hale gelmiştir. Küreselleşmenin artması, şiddetli rekabet ortamı ve müşteri farkındalığının artması ile firmalar çevresel ayak izi değerlerini kontrol altına almak için stratejik yollar düşünmeye başlamıştır (Govindan ve diğ., 2020). Bu bağlamda iş süreçlerinin çevresel etkilerinin ölçülmesi ve kontrol edilmesi çalışmaları ciddi oranda dikkat çekmektedir. Lityum iyon batarya kullanımı sahip olduğu yüksek elektrokimyasal performansı ve çevre dostu oluşu ile günümüz araçlarından otomobil, otobüs, kamyonlarda kullanılmasına ek olarak yeni tip uygulamalar olan scooter, elektrikli bisiklet, otonom robot gibi uygulamaları da mümkün hale getirmektedir. Ayrıca fosil yakıt kaynaklı enerji depolama sistemlerinden rüzgar ve güneş gibi daha temiz yenilenebilir enerji depolama sistemlerine geçişte önemli bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrikli araçlarda artan pazar penetrasyonu ile lityum iyon batarya üretimi ve yarattığı etkiler de önem kazanmaya başlamıştır. Lityum iyon bataryaların ikincil kullanım oranlarının artması ve endüstriyel entegrasyon konuları ile birlikte lityum iyon bataryaların üretim, taşıma ve geri dönüşüm gibi faaliyetleri çevresel konular açısından önemli hale gelmeye başlamıştır. Küresel ısınmaya ve ikincil batarya kullanım konularının önem kazanmasıyla bu tip bataryaların karbon ayak izi değerlendirmeleri odak konulardan biri haline gelmiştir (Wang ve diğ., 2017).

Sera etkisi, iklim krizi ve karbon ayak izi konuları, politikacılar, iş adamları ve tüketiciler tarafından odak konular haline gelmiştir. Tüketiciler artık düşük karbonlu ürünleri tercih etmeye başlamıştır. Örneğin Çin'de 2012 yılında yayınlanan China Ecological Footprint Report'a göre hesaplanan karbon ayak izi değeri %54 olarak bulunmuştur fakat 1961'de yapılan aynı çalışmada bu değer sadece %10 olarak bulunmuştu. Aynı şekilde başka bir çalışmada global olarak karbon ayak izi değeri 2013 yılında 36.1 milyar tona ulaşmıştı ve bu değer 10 milyar tonu Çin'e aitti (Hammond, 2007) Amerika ve Avrupa Birliği'nin sahip olduğu değerler ise 5.2 milyar ve 3.5 milyar ton olarak belirtilmiştir. Bu değerler sonucunda özellikle Çin'de yeni enerji kazanımlı teknoloji uygulamaları devreye alınmış ve ileriki yıllar için karbon salınımı azaltımı ile ilgili hedefler konulmuştur. Örnek olarak Çin'in 5 yıllık planı ile karbon dioksit salınımını %17 azaltma hedefi bulunmaktadır. Bununla birlikte China-

US Joint Statement(www.fmprc.gov.c, Erişim tarihi: 15.01.2022) ile de Çin belirlediği hedefler doğrultusunda karbon salınımını azaltmaya başlamıştır (Wang ve diğ.,2017).

Elektrikli araçlar yapısal olarak sıfır emisyon değerine sahip gibi görüneler ve bir bataryaya sahip olmasalar bile bir enerji kaynağı ile güçlendirilme zorunluluğu olduğu için üretim aşamasından itibaren bir sera gazı etki değerine sahiptirler. Batarya için gerekli minerallerin çıkarılıp depolanması, batarya hücresi ve modül üretimi ciddi miktarda enerji gereksinimi olan konulardır. Genel olarak bakıldığında içten yanmalı motorlu araç üretiminden elektrikli araçlara geçişte çevreye yayılan sera gazı bir yerden alınıp başka bir biçimde karşımıza çıkıyor gibi görünmektedir (Circular Energy Storage). Temiz enerji ile çalışan sistemler, geleneksel hidrokarbon ile çalışan enerji sistemlerinden oldukça farklıdır. Güneş ve rüzgar santralleri kurmak, elektrikli araç üretmek genellikle fosil yakıtlı muadillerinden daha fazla mineral ihtiyacı gerektirmektedir. Tipik bir elektrikli araba üretim süreci içten yanmalı motorlu araba üretimindeki gerekli mineralin 6 katına ihtiyaç duymaktadır. 2010 yılından günümüze kadar yeni bir elektrik üretim kapasitesi birimi için ihtiyaç duyulan ortalama mineral miktarı, yenilenebilir enerjinin payı arttıca %50 artmıştır (Dünya Enerji Konseyi, 2021).

Batarya hücresi üretimi, tüm dünyada bulunan yaklaşık 20 farklı minerali kullanarak gerçekleştirilmektedir ve bu minerallerin bazıları direkt olarak kullanıma uygunken bazıları enerji yoğun süreçlerden geçmek zorundadır. Bu minerallerin elde edilmesinde kullanılan enerji kaynağı tüm sürecin sera gazı etkisinin hesaplanmasında önemli rol oynamaktadır. Bu sürecin zorluğu sadece değer zinciri kısmında değil aynı zamanda batarya tipine göre içerilen minerallerin farklılığından da gelmektedir.

Lityum iyon bataryalarının çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için 1999 yılından günümüze kadar 100'ün üzerinde çalışma yapılmıştır. Yapılan alışma sonuçlarına göre çıkan CO₂ değerleri birbirinden çok farklıdır ve bunun sebepleri arasında verinin kaynağı, hesaplama yaklaşımı ve farklı enerji kaynakları, batarya tipi ve elde etme metodu sayılabilmektedir (Circular Energy Storage, 2020).

Hao ve diğ. (2017), yaptıkları çalışmada NMC, LFP ve LMO olmak üzere 3 tip lityum iyon bataryayı yaşam döngüsü erevesi ile inceleyerek bu bataryaların üretim sürecinde neden oldukları sera gazı etki analizini ortaya koymuşlardır. Çalışmada bu 3 tip bataryanın yarattığı sera gazı etkisinin içten yanmalı araç üretimine göre %30

daha fazla olduğu vurgulanmaktadır. Wang (2012), yaptığı çalışmada NMC, LFP ve LMO tip bataryaların çevresel etkisini ve yaşam döngüsü maliyetini incelemiştir. Sonuca göre en fazla çevresel yararı olan LMO tip batarya iken çevresel maliyeti en düşük olan tip ise LFP tip bataryadır. Bu sırayı LMO ve NMC izlemektedir. Lu (2014) yaptığı çalışmada LFP tip bataryanın tüm yaşam boyunca başlangıç aşamasından kullanım aşamasına kadar yarattığı enerji tüketim ve sera etkisi değerlerini listelemiştir. Bununla birlikte bir diğer çalışmada ise NMC, LNM, LFLM ve LFP tip bataryaların çevresel etkileri incelenmiş ve bu değerler sırasıyla 275 Pt, 129 Pt, 142 Pt ve 100 Pt olarak listelenmiştir (Bo, 2015). Başka bir çalışmada ise LFP, NMC ve LMO tip bataryaların üretim sürecinde yol açtıkları sera gazı etkisi yaşam döngüsü metodu (LCA) ile incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre 28kWh kapasiteye sahip olunan durumda en yüksek etkiye sahip tip sırasıyla LFP, NMC ve LMO'dur. Bununla birlikte bataryayı oluşturan minerallerin incelenmesi sonucuna göre de anot aktif malzeme ve işlenmiş alüminyum sera gazı etkisine katkısı en yüksek olan etkenlerdir(Hao ve diğ.,2017). Melin (2019)'in yaptığı çalışmada öncelikle batarya yapısı incelenerek en yüksek sera gazı etkisine sahip kısmın batarya hücresi ve sonrasında batarya paketi ve batarya yönetim sistemi olduğu bulunmuştur. NCM111 tip batarya paketinin enerji tüketim değerleri incelendiğinde en yüksek değere sahip kısımların işlenmiş alüminyum ve montaj işlemleri olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu çalışmada aynı tip bataryanın Çin ve Avrupa'da üretildiği durumda Çin'de daha fazla CO₂ etki değerinin olacağı üzerinde durulmaktadır. Bunun sebebi ise Avrupa'da enerji kaynağı olarak daha az fosil yakıtlı kaynaklar kullanılmasıdır. Wang ve diğ. (2017)'de ise lityum iyon ikincil batarya endüstrisi, lityum iyon batarya üretimi ve batarya üretimi için gerekli minerallerin üretimini sağlayan firma olarak iki kısma ayrılacak yaşam döngüsü değerlendirme modeli ile sera gazı etkileri incelenmiştir. Çalışmada lityum iyon batarya üretim kısmı ise üretim, satın alma, pazarlama ve atık işlemleri olmak üzere 4 kısım olarak incelenmektedir. Bu çalışmada hesaplanan sera gazı değerleri üretim ve taşıma işlemleri için değerlendirilmektedir. Elde edilen verilerin yaşam döngüsü değerlendirme metodu ile kullanılabilmesi için SimaPro 8.0 yazılımı kullanılmıştır (Wang ve diğ.,2017).

Yukarıda bahsedilen çalışmaların çoğu daha başlangıç aşamasında olan çalışmalardır. Lityum iyon bataryalara olan talep ve odaklanma daha çok elektrikli araçlardaki trend ile orantılı olduğu için bu alanda çok daha fazla detay çalışmaya ihtiyaç

bulunmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında ele alınan karbon emisyon değerleri, minerallerin elde edilmesi, bataryaların üretilmesi ve taşınması sırasında ortaya çıkan değerlerdir. Tesis kurma, tedarikçiden satın alınan minerallerin hem tedarikçi açısından elde edilirken yaratılan karbon emisyonu hem de taşınma sırasındaki karbon emisyon değerleri gözardı edilmiştir.





3. METODOLOJİ

3.1 Kapalı Çevrim Tedarik Zinciri

Son yıllarda döngüsel ekonomi ve tedarik zinciri yönetimi konularının birlikte ele alınması ile ilgi yalnızca ileri veya tersine akışı içeren modellerden döngüsel ve kapalı çevrim modellere kaymaya başlamıştır (Mardan ve diğ., 2019)

Pishvae ve Torabi (2010) kapalı döngü tedarik zinciri probleminde belirsizlik ve risk altında karma tamsayılı programlama kullanarak ileri ve tersine akış problemine çözüm sunmuştur. Ayrıca bu çalışmada stratejik olarak malzeme akışları ile stratejik ağ tasarımı kararı verilmiştir. Benzer şekilde, Shi ve diğ. (2011) kapalı çevrim tedarik zinciri olarak kurulan bir ağ tasarımında çok ürünlü, çok periyotlu ve belirsiz parametreler ile oluşturulan problemi bulanık modelleme yardımı ile çözmüştür. Bunlara ek olarak Govindan ve diğ. (2020) kapalı döngü tedarik zincirinde tedarikçi seçimi ve atama problemi için bulanık analitik ağ süreci ve çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modellerine dayalı hibrit bir yaklaşım önermiştir..

Amin ve Zhang (2013), kapalı çevrim tedarik zinciri ağ tasarımı için genel bir maliyet minimizasyonu modeli sunmanın yanısıra geri dönüştürülebilir malzeme ve temiz teknoloji kullanımını da dikkate alacak şekilde modeli çok amaçlı hale genişletmiştir. Çok amaçlı modeli ağırlıklandırılmış toplam ve epsilon kısıt yöntemleri ile çözdükten sonra aynı model talep ve iadelerdeki belirsizliği de dikkate alacak şekilde senaryo bazlı stokastik programlama ile çözülmüştür. Sonuçlara göre epsilon kısıt yöntemi daha etkin çözüm sunmaktadır (Amin ve Zhang, 2013). Soleimani ve diğ.(2017)'de tedarikçi, üretici, dağıtım merkezi, müşteri, merkezi depo, geri toplama merkezi, ve geri dönüşüm tesisinin yer aldığı bir kapalı çevrim tedarik zinciri problemi ele alınmıştır. Bu problemin amaç fonksiyonunda müşteri talebini maksimum oranda karşılamak, toplam karı maksimize etmek ve çalışılan işgünü sayısını azaltmak yer almaktadır.

Sahebjamnia ve diğ. (2018) lastik endüstrisi için çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama kullanarak açılacak merkezlerin çevresel olarak etkisi, operasyon

süreçleri, merkezler arasındaki ulaşım, iş fırsatı ve meslek hastalıkları gibi sosyal konuları dikkate alan kapalı çevrim tedarik zinciri ağı optimizasyonu yapmıştır.

Tez çalışmasında ele alınan problem, maliyet minimizasyonu ve çevresel etkiler olarak farklı noktalara değinmektedir. Yapılan çalışmalar incelenerek tez çalışmasında kurulan model çok amaçlı doğrusal tamsayı modeli ile çözülmüştür.

3.1.1 Lityum iyon bataryalar ve kapalı çevrim tedarik zinciri

The Batteries Directive (Directive 2006/66/EC), kullanılmış bataryaların toplanmasını, işlenmesini ve geri dönüşüm süreçlerini üreticinin sorumluluğu olarak belirlemiştir. Bu sorumluluk genişletilmesi ise 2 amaca hizmet etmektedir. Bu amaçlar, ürünün yaşam ömrü sonucunda yol açacağı çevresel etkileri minimize etmek ve bunun ürünün tasarımına etki etmesini sağlamak olarak sayılabilir.

İngiltere’de Düşük Emisyonlu Araçlar Ofisi’nin 2015’te yayınladığı raporda yaşam ömrünü tamamlamış bataryaların geri toplanması ile ilgili olarak elektrikli araçların yeni sahip olma yapısı ile ilgili hizmetleştirme modeli kavramı öne atılmıştır. Bu model, yaşam ömrünü tamamlamış bataryaların sürdürülebilir şekilde yönetimini sağlamaktadır. Sunulan model, elektrikli araç bataryalarının sahipliğini üreticiye verirken aracın kalanını ise kullanıcıya vermektedir. Hizmetleştirme modeli, ürünün kendisinden daha çok satılan bir alt ürün için üretici firmaya ürünün yaşam ömrü boyunca sahipliğini verirken kullanıcının ise ürünün bulunabilirliğinden ve güvenilirliğinden emin olmasını sağlayan ve iş modelleri arasında popüleritesi artan bir modeldir. Bu modelin avantajları arasında daha yüksek oranda batarya toplama ve bataryaların güvenli şekilde tesislere dönmesi, toplama, taşıma, onarma ve geri dönüşüm süreçlerinin etkili yönetimini sağlamak sayılabilir (Ahuja ve diğ., 2020). Yapılan bu çalışma, tezde ele alınan akış ile bataryaların tesislere dönmesi, toplanması, onarılma ve geri dönüşüm süreçlerinin yönetimi süreçleri açısından benzerlik göstermektedir.

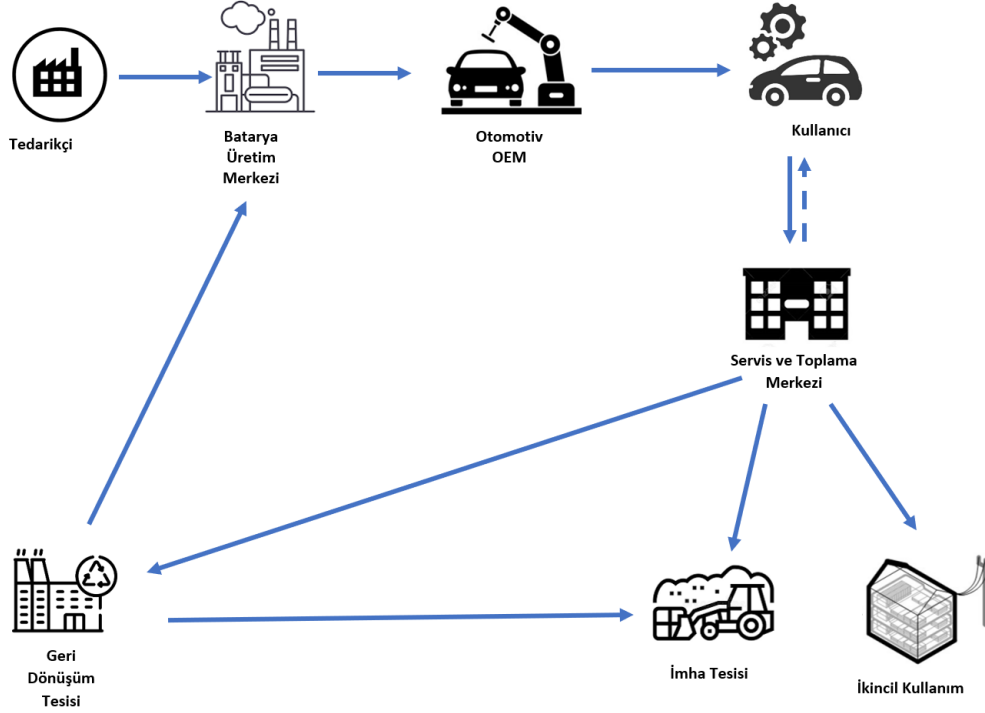
Tedarik zinciri birbirleri ile ilişkili olan aktivite merkezlerini birbirine bağlayan bir ağıdır. Tedarik zinciri ağ tasarımı ise amaç fonksiyonuna konu edilen maliyet, kar, performans, sosyal beklentiler gibi konuların maksimizasyon veya minimizasyonuna hizmet etmektedir. Bu sürecin amacı etkili bir ağ tasarımı ile tedarik zincirinin değerini arttırmaktır. Tesis yeri seçimi problemleri en az bir amacı optimize ederek en uygun

yeri önermektedir ve tedarik zinciri ağ tasarımının en kritik parçası olarak görülmektedir. Ağ tasarımı probleminde amaç fonksiyonu maliyet minimizasyonu, taşınma uzaklığı, bekleme zamanı veya kar, gelir veya servis seviyesi maksimizasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Tesis yeri seçimi problemlerindeki amaç fonksiyonu bazı durumlarda iki veya daha fazla amacın kombinasyonundan oluşmaktadır.

Genel olarak maliyet odak noktasında çalışılan ağ tasarımı problemleri çok farklı konuları da amaç edinebilmektedir. Bu amaçlar arasında sosyal, kültürel, düzenlemeler, ekonomik kalkınma ve sürdürülebilirlik gibi konular sayılabilmektedir. Ortaya çıkan bu durum araştırmacıların da çok amaçlı modeller geliştirmesinin önünü açmıştır. Govindan ve diğ. (2016) sürdürülebilirliğin içerdiği üç konuyu (ekonomik, sosyal ve çevresel) hesaba katarak bulanık matematiksel programlama modeli kullanmış ve çok amaçlı parçacık sürü algoritması uygulanmıştır. Kannan ve diğ. (2012) karbon ayak izi konusunu amaç fonksiyonu olarak belirleyerek tersine lojistik ağ tasarımı için karma tamsayılı lineer programlama modeli oluşturmuştur. Modelin içerdiği amaç fonksiyonu, ürünlerin toplanması, imha edilmesi, taşınması ve tesis açma maliyetlerine ek olarak karbon emisyon maliyetini de hesaba katmaktadır. El Korchi ve Millet (2011) farklı tersine lojistik ağ yapılarını ele alan bir çalışma ortaya koymuşlardır. Kullanımda olan ağ yapıları analiz edilmiş ve hem ekonomik olarak daha verimli hem de çevreye daha az zararı olan bir ağ yapısı önerisi sunulmuştur. Yu ve Solvang (2017) düşük karbon emisyonunu amaçlayan tek periyotlu ve çok ürünlü stokastik bir optimizasyon modeli tasarlamıştır. Ele alınan modelde devlet teşviki ile kullanım süresi tamamlanmış ürünlerin atık depolama alanlarından ayrıştırılıp, geri kazanım uygulamalarının kalitesinin artırılması hedeflenmektedir. Model, çeşitli emisyon seviyeleri düşünülerek test edilmiştir ve çıkan sonuçlar emisyon değerleri azaldığında sistemin kârının azaldığını göstermektedir. Bal ve Badurdeen (2021) , karma tamsayılı optimizasyon modeli ile amaç fonksiyonunu hem ekonomik hem de sosyal konular açısından oluşturmuştur. Amaç fonksiyonunun sosyal kısmı açılacak tesisin yerini belirlerken ilgili yerin gelir seviyesi, güvenlik seviyesi, eğitim seviyesi ve sağlık olanaklarına erişim seviyeleri gibi konularını dikkate almaktadır.

Şekil 3.1’de bu tezde uygulama konusu için seçilen problemin kapalı çevrim tedarik zinciri modeli gösterilmektedir. Modelde tedarikçiden ve geri dönüşüm tesisinden elde edilen mineraller batarya üretim merkezine gönderilerek batarya üretim süreçlerinde kullanılmaktadır. Üretilen bataryalar önce otomotiv üretim tesislerine ve ardından

talep miktarlarına göre kullanıcılara aktarılmaktadır. Kullanım ömrü biten elektrikli araç bataryaları toplama merkezine aktarılmaktadır. Bu aşamadan sonra ürünlerin dağılım oranlarına göre yeniden kullanım, ikincil kullanım, imha edilme ve geri dönüştürülme süreçlerine dahil edilmektedir. Modelde de görüldüğü üzere kısıtlı rezervlere sahip minerallerin döngü içinde kalması hedeflenmektedir.



Şekil 3.1 : Kapalı çevrim tedarik zinciri modeli.

3.2 Çok Amaçlı Matematiksel Programlama

Çok amaçlı matematiksel programlama, bir matematiksel programlama yapısı ile birden fazla amacın aynı zamanda gerçekleşmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. Bu alandaki çalışmaların çoğu 1970 yılından sonra ortaya çıkmaktadır (Evans, 1984). Çok amaçlı programlama, uygulamalı mühendislik, yönetim bilimi ve yöneylem araştırmaları alanlarında sıkça kullanılan bir yöntemdir. Teorik olarak modellenen problemlerin çoğu tek amaçlı olarak ele alınmaktadır. Fakat bu problemlerin pratik uygulamaları teorik modellerinden farklı olarak içinde birden fazla amaç barındırır. Bir amaçta minimizasyon hedeflenirken başka bir amaçta maksimizasyon hedeflenebilir. Dolayısıyla çoğu problemde, alternatif seçeneklerden yalnız birini seçmek gerçek hayat problemlerini her zaman başarı ile modelleyememektedir. Örneğin; yatırım planlama, ulaştırma problemleri, üretim planlaması problemleri, stok problemleri, lokasyon seçimi problemleri ve kapasite artırım problemleri çok amaçlı

problemlere örnek olarak verilebilir. Bu tür problemlerin çok amaçlı olmasının nedenleri arasında bir üretim işletmesinde kapasite artırımı amaçlandığında, buna ek olarak araştırma ve sermaye maliyetlerini minimize etme amacı, çevre koşullarına uygun üretim amacı ve müşteri memnuniyeti amacı sayılabilir.

Çok amaçlı optimizasyon problemi matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$enk/enb f_m(x) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3.1)$$

$$\text{öyle ki } g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3.2)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3.3)$$

$$x_i^{alt\ sınır} \leq x_i \leq x_i^{üst\ sınır} \quad (3.4)$$

Denklem 3.1 M adet amaç fonksiyonunu göstermektedir. 3.2 ve 3.3 numaralı denklemler sırasıyla eşitsizlik kısıtlarını ve sonrasında eşitlik kısıtlarını göstermektedir. 3.4 numaralı denklem ise karar değişkenleri için oluşturulmuş alt ve üst sınır değerlerini göstermektedir.

Literatürde çok amaçlı problemlerin çözümü için farklı yöntemler ele alınmaktadır. Bu yöntemlerden öne çıkanları hedef programlama, epsilon kısıtı, önceliklendirme ve ağırlıklandırılmış toplam tekniğidir (Mavrotas, 2009). Bu çalışmada çok amaçlı modellerin çözümünde en çok tercih edilen yöntemlerden biri olan epsilon kısıt yöntemi tercih edilmiştir.

3.2.1 Epsilon kısıt yöntemi

Çok amaçlı problemde Pareto kümesini bulmaya yardımcı bir yöntem ilk kez Haimes ve diğ. (1971) tarafından önerilen epsilon kısıt yöntemidir. Epsilon kısıt yöntemi, literatürde öncelikli olarak iki amaçlı ve genellikle çok amaçlı problemlerin çözümü için oldukça sık kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde seçilen amaç fonksiyonu optimize edilirken diğer amaç fonksiyonları kısıt olarak ele alınarak model çözülmektedir. Yöntem, her çözümde amaçlarından biri eniyilenirken diğer amaç değerleri bir eşitsizlik kısıtı olarak modele eklenerek tek amaçlı hale getirilen problemin birden fazla kez çözümlenmesine dayanmaktadır. Her iterasyonda kısıtlarla kontrol edilen amaç değerleri önceki çözümdeki değerlerine göre daha fazla kısıtlanır. Kurulan algoritma çözmeye çalıştığı alt problem olursuz olduğunda sonlanmaktadır.

Bu yöntem hem konveks hem de konveks olmayan problemler için kullanılabilir. Buna ek olarak bulunan epsilon vektörünün amaç fonksiyonlarının minimum ve maksimum değerleri arasında kalması önem taşımaktadır. (Mavrotas, 2009; Mavrotas ve Florios, 2013)

Mavrotas (2009), epsilon kısıt yöntemini geliştirerek genişletilmiş epsilon kısıt yöntemini (AUGMECON) ortaya koymuştur. Bu yöntem sadece etkili Pareto-optimal sonuçlarını bulurken etkili olmayan sonuçları model çözümüne dahil etmemektedir.

$$\max(f_1(x) + \text{eps} x \left(\frac{S_2}{r_2} + \frac{S_3}{r_3} + \dots + \frac{S_p}{r_p} \right))$$

Öyle ki, (3.5)

$$\begin{aligned} f_2(x) - S_2 &= e_2 \\ f_3(x) - S_3 &= e_3 \\ \dots \\ f_p(x) - S_p &= e_p \\ x \in S, s_i &\in R^+ \end{aligned}$$

Denklem 3.5'e göre 2. Amaç fonksiyonundan p. amaç fonksiyonuna kadar grid noktalardan e_2 den e_p noktasına kadar parametreler elde edilmektedir. Bu parametreler r_2 den r_p aralığında sıralı olarak değişmektedir. S_2 den S_p ye kadar belirlenen gevşek değişkenler ilgili kısıtlara karşılık gelmektedir. Ayrıca eps değeri 10^{-6} ile 10^{-3} arasında değişmektedir.

Mavrotas ve Floritas (2013), bu yöntemi her iterasyonda gevşek değişkenlerden gelen bilgilerden faydalanacak şekilde geliştirerek AUGMECON2 yöntemini önermiş ve çözümün hesaplanma süresini de azaltmışlardır. AUGMECON2 yöntemi diğer çok amaçlı programlama çözüm yöntemlerine göre daha çok tercih edilen ve kapsamlı bir yöntemdir (Nikas ve diğ., 2020).

AUGMECON2 yönteminin gösterimi aşağıdaki gibidir :

$$\min(f_1(x) + \text{eps} x \left(\frac{S_2}{f_{\max_2} - f_{\min_2}} + 10^{-1} + \frac{S_3}{f_{\max_3} - f_{\min_3}} + \dots + \right))$$

Öyle ki,

(3.6)

$$f_2(x) + s_2 = fmin_2 + t x \frac{fmax_2 - fmin_2}{q_2}$$

$$f_3(x) + s_3 = fmin_3 + t x \frac{fmax_3 - fmin_3}{q_3}$$

...

$$f_p(x) + s_p = fmin_p + t x \frac{fmax_p - fmin_p}{q_p}$$

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

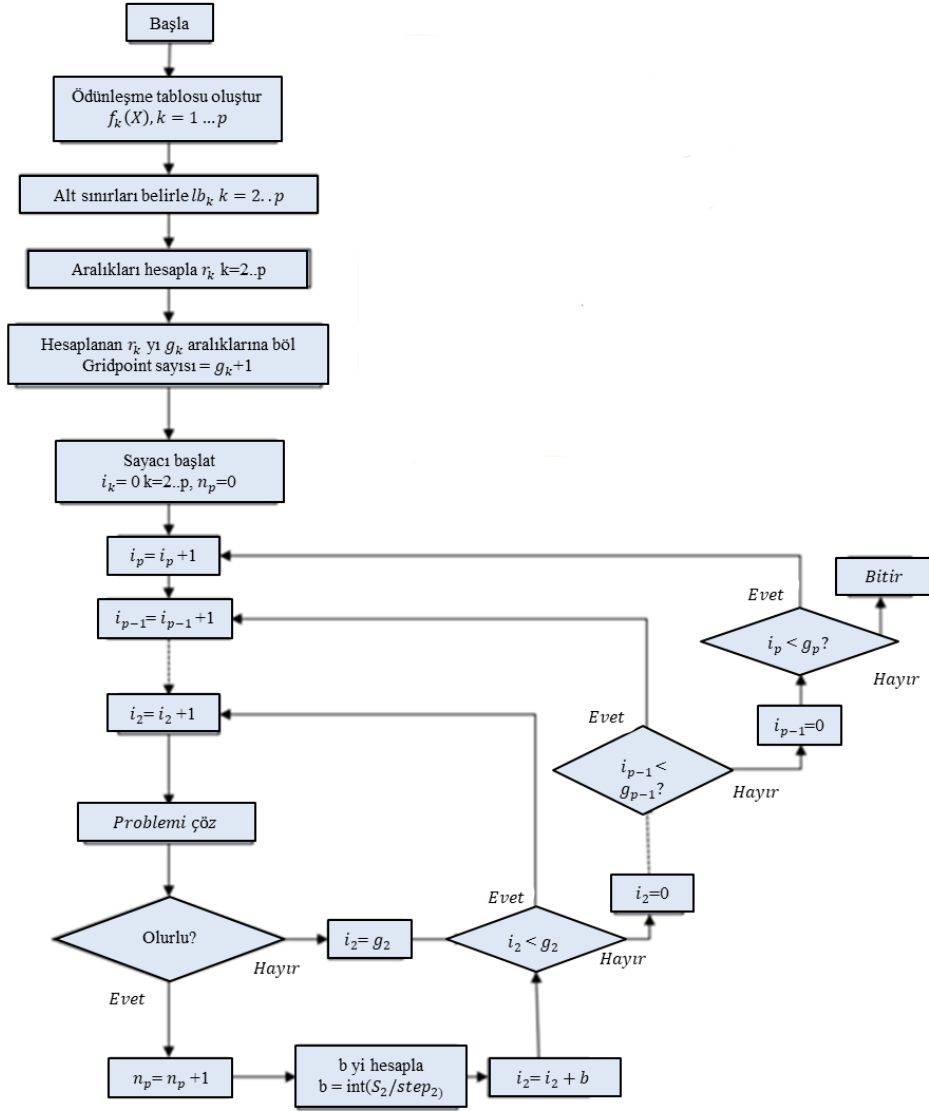
AUGMECON2 yöntemindeki hesaplama formülleri aşağıdaki gibidir:

$$step_k = \frac{r_k}{q_k}$$

Belirlenen amaç fonksiyonundaki ilgili kısıtın sağ tarafı t. iterasyonda aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır :

$ek_t = fmin_k + t x step_k f_{min}$ değeri ödünleşme tablosundaki minimum değeri ifade etmektedir.

AUGMECON2 yöntemindeki akış Şekil 3.2'de özetlenmiştir.



Şekil 3.2 : AUGMECON2 yöntemindeki hesaplama akışı (Mavrotas ve Florias, 2013).

Şekil 3.2’de gösterilen AUGMECON2’nin işleyişi, 2’den p’ye her bir amaç fonksiyonunun ayrı ayrı çözümlere minimum ve maksimum değerlerinin bulunmasıyla başlamaktadır. Değerler arasındaki uzaklık bulunur. Denklem 3.6’da yer alan S_2, S_3, \dots, S_p değerleri sırası ile amaç fonksiyonlarına ait gevşek değişkenlerin değerleridir ve $\epsilon \in [10^{-6}, 10^{-3}]$ olarak ifade edilmektedir. Bu modifikasyon, belirlenen diğer amaç fonksiyonları için farklı alternatif çözümler olduğu durumda performanslarını arttırmak için yapılmaktadır. Örneğin, bu formülasyon ile optimal f_1 amaç fonksiyonu bulunduğundan sonra f_2 ve f_3 amaç fonksiyonları optimize edilmeye çalışılmaktadır. Amaç fonksiyonu aralıkları hesaplandıktan sonra k. amaç fonksiyonu için değerler q_k eşit aralıklarına bölünmektedir. Bu işlemde grid noktaları elde edilmektedir. Bu

değerler kullanılarak k. amaç fonksiyonunun ek değeri belirlenmektedir. Bu şekilde kısıta dönüştürülen k. amaç fonksiyonunun sağ tarafı, her bir iterasyonda k amaç fonksiyonu için belirlenen aralık uzunluğu kadar artırılarak model çözülür. Bu döngü, adımlar tamamlanana kadar tekrarlanır ve elde edilen sonuçlara göre Pareto optimal çözüm kümesi tablosu elde edilir.





4. UYGULAMA

4.1 Problem Tanımı

Kapalı çevrim tedarik zinciri olarak tasarlanan kullanılmış elektrikli araç bataryalarının incelenmesi probleminde elektrikli araçlarda en yaygın olarak kullanılan 2 tip batarya ele alınmıştır. Bunlar lityum demir fosfat (LFP ve Nikel Manganez Kobalt (NMC) tip bataryalardır. Geri dönüşüm sürecinde elde edilen ve izlenen kritik mineraller ise lityum ve kobalt mineralleridir.

Problemde batarya üretim merkezi olarak Manisa ve Kayseri olmak üzere 2 lokasyon seçilmiştir. Elektrikli araç taleplerinin incelendiği 4 farklı kullanıcı olarak problemde belirtilen lokasyonlar nüfus sayısı ve gelir düzeylerinden yola çıkılarak seçilen İstanbul, Ankara, İzmir ve Antalya'dır. Otomotiv üretim merkezi lokasyonu otomotiv sanayisinin yoğunluğundan dolayı Bursa olarak belirlenmiştir. Geri dönüşüm tesisi kurulumu için aday olarak gösterilen lokasyonlar Kocaeli ve Konya'dır. Toplama merkezi için aday lokasyonlar Bilecik ve Adana olarak belirlenmiştir. Batarya imha tesisi için aday yerler ise Samsun ve Konya'dır. Döngüdeki amaç maliyet minimizasyonu sağlamak ve kullanılan batarya tipine göre döngüdeki toplam karbon ayak izinin yol açtığı etkiyi minimize etmektir. Aday lokasyonların belirlenme süreci başlık 4.7'de detaylı şekilde aktarılmaktadır.

b Batarya tipi kümesi $b \in B$

c Komponent tipi kümesi $c \in C$

i Batarya üretim merkezi kümesi $i \in I$

j Potansiyel servis ve toplama merkezi kümesi $j \in J$

k Kullanıcı kümesi $k \in K$

l Geri dönüşüm tesisi kümesi $l \in L$

v İmha tesisi kümesi $v \in V$

s Hammadde tedarikçisi kümesi $s \in S$

o Otomotiv OEM kümesi $o \in O$

r İkincil kullanım alanı kümesi $r \in R$

d Batarya emisyon tipi kümesi $d \in D$

a Amaç fonksiyonu kümesi $a \in A$

fl_j Servis ve toplama merkezi sabit açılış maliyeti

fr_l Geri dönüşüm merkezi sabit açılış maliyeti

fl_v İmha tesisi sabit açılış maliyeti

$Prco_b$ Bir birim tip b bataryanın batarya üretim merkezinde üretim maliyeti

Tc_b Kilometre başına tip b bataryanın ulaşım maliyeti

$Tc1_b$ Kilometre başına kullanılmış tip b bataryanın ulaşım maliyeti

$Tc2_c$ Kilometre başına tip c komponentin ulaşım maliyeti

Puc_{cs} Batarya üreticisi i için tedarikçi s den tip c komponent satınalma maliyeti

$Recob_l$ Tip b bataryanın geri dönüşüm tesisinde geri dönüştürülme maliyeti

$Disco_b$ Tip b bataryanın imha edilme maliyeti

De_{bk} Tip b bataryanın kullanıcı k tarafından talep miktarları

$Dispr_b$ Tip b bataryasının imha edilme oranı

Alf_b Tip b bataryanın geri dönüştürülme oranı

W_b Tip b bataryanın ağırlığı

a_{cb} Kullanılmış tip b bataryadan çıkan komponent oran matrisi

$a1_{cb}$ Yeni batarya üretimi için gerekli komponent oran matrisi

$capoem_{bo}$ Otomotiv OEM'in tip b batarya için kapasitesi

cap_{bj} Toplama merkezi j nin tip b batarya için kapasitesi

$hcap_{bj}$ Toplama merkezi j için kullanılmış tip b batarya kapasitesi

$capp_{bi}$ Batarya üretim merkezi i de tip b batarya üretim kapasitesi

$recap_{bl}$ Tip b batarya için geri dönüşüm tesisi l kapasitesi

$d0_{io}$ Batarya üretim merkezi ve OEM arasındaki uzaklık

$d1_{ok}$	OEM ve kullanıcı arasındaki uzaklık
$d2_{kj}$	Kullanıcı k ve toplama merkezi j arasındaki uzaklık
$d3_{jl}$	Toplama merkezi j ve geri dönüşüm merkezi l arasındaki uzaklık
$d4_{jv}$	Toplama merkezi j ve imha tesisi v arasındaki uzaklık
$d5_{li}$	Geri dönüşüm tesisi l ve üretim merkezi i arasındaki uzaklık
$centers_j$	1, depo j açıksa, 0 dd.
$recycle_l$	1, geri dönüşüm merkezi açıksa, 0 dd.
$landf_v$	1, imha tesisi açıksa, 0 dd.
q_{bi}	Batarya üretim merkezi i de üretilen tip b batarya miktarı
cs_{cs}	Tedarikçi s den satın alınan komponent c miktarı
$x1_{bio}$	Üretim merkezi i de üretilen tip b bataryanın OEM o ya aktarılan miktarı
$x2_{bok}$	OEM o dan kullanıcı k ya giden tip b batarya miktarı
$x3_{bjk}$	Tip b bataryanın kullanıcı k dan toplama merkezi j ye aktarılan miktarı
$x4_{bjv}$	Tip b bataryanın toplama merkezi j den imha tesisi v ye aktarılan miktarı
$x5_{blv}$	Tip b bataryanın geri dönüşüm tesisi v'den imha tesisine aktarılan miktarı
$x6_{bjl}$	Tip b bataryanın toplama merkezi j'den geri dönüşüm tesisi l ye aktarılan miktarı
$x7_{cli}$	Komponent c'nin geri dönüşüm tesisi l'den batarya üretim merkezi i' ye aktarılan miktarı
$x8_{bjk}$	Batarya tipi b için toplama merkezi j'den yeniden kullanım için kullanıcıya giden miktar
$x9_{bjr}$	Batarya tipi b için toplama merkezinden ikincil kullanım için aktarılan miktar

Problemin çözümü için çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

Birinci amaç fonksiyonu kapalı döngü tedarik zinciri maliyetini minimize etmek için kurulmuştur. Amaç fonksiyonu, sabit açılış maliyeti (FC), taşıma maliyeti (TC),

üretim maliyeti (PC), imha maliyeti (DC), geri dönüşüm maliyeti (RC), hammadde satın alma maliyeti (PUC) kalemlerinden oluşmaktadır.

İkinci amaç fonksiyonu modellenen kapalı çevrim tedarik zinciri süreçlerinde ortaya çıkan karbondioksit emisyonunu minimize etmek için kurulmuştur. Amaç fonksiyonu, problemde kritik olarak belirlenen minerallerin elde edilme aşamasında ortaya çıkan karbon emisyonu (MPE), batarya montaj aşamasında ortaya çıkan karbon emisyonu (PAE) ve taşıma süreçlerinde ortaya çıkan karbon emisyonununun (TE) toplamının minimize etmeye çalışmaktadır.

$$\text{Min } Z1 = FC + TC + PC + DC + RC + PUC \quad (4.1)$$

Sabit Açılış Maliyeti (FC)

$$\sum_{j \in J} f1_j * centers_j + \sum_{r \in R} fr_r * recycle_r + \sum_{v \in V} fl_v * landf_v \quad (4.2)$$

Taşıma Maliyeti (TC)

$$\sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} x3_{bkj} * tc1_b * d2_{kj} + \sum_{b \in B} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} x4_{bjv} * tc1_b * d4_{jv} + \sum_{b \in B} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} x6_{bjl} * tc1_b * d3_{jl} + \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} x7_{cli} * tc2_c * d5_{li} \quad (4.3)$$

Üretim Maliyeti (PC)

$$\sum_{b \in B} \sum_{i \in I} Q_{bi} * Prco_b \quad (4.4)$$

İmha Maliyeti (DC)

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} (x4_{bjv} + x5_{blv}) * Discob \quad (4.5)$$

Geri Dönüşüm Maliyeti (RC)

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} x6_{bjl} * Recobl \quad (4.6)$$

Hammadde Satınalma Maliyeti (PUC)

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} cs_{cs} * Puc_{cs} \quad (4.7)$$

$$\text{Min } Z2 = MPE + PAE + TE \quad (4.8)$$

Mineral Elde Etme Aşamasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyonu (MPE)

$$\sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} x7_{cli} * procost_d \quad (4.9)$$

Batarya Montaj Aşamasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyonu (MPE)

$$\sum_{i \in I} \sum_{b \in B} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} x1_{bio} * assecost_d \quad (4.10)$$

Taşıma Süreçlerinde Ortaya Çıkan Karbon Emisyonu (TE)

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{o \in O} \sum_{v \in V} \sum_{k \in K} ghgtrans_c * (d0_{io} + d1_{ok} + d2_{jl} * centers_j + d3_{jl} * recycle_l + d4_{jv} * landf_v + d5_{li} * recycle_l) \quad (4.11)$$

Kısıtlar 4.12. ile 4.28. maddeler arasında listelenmiştir.

$$\sum_{b \in B} \sum_{k \in K} x3_{bkj} \leq centers_j * cap_{bi} \quad \forall j \quad (4.12)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in J} x6_{bjl} \leq recycle_l * recap_{bl} \quad \forall l \quad (4.13)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i \in I} x1_{bio} \leq Q_{bi} \quad \forall b \quad (4.14)$$

$$\sum_{i \in I} Q_{bi} \leq capp_{bi} \quad \forall b \quad (4.15)$$

$$\sum_{o \in O} x2_{bok} \geq DE_{bk} \quad \forall k, \forall b \quad (4.16)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{i \in I} x2_{bok} = x1_{bio} \quad \forall b, \forall o \quad (4.17)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{j \in J} x2_{bok} = x3_{bkj} \quad \forall b, \forall k \quad (4.18)$$

$$\sum_{j \in J} x3_{bkj} * 0.1 = x8_{bjk} \quad \forall b, \forall k \quad (4.19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} x3_{bkj} * 0.2 = x9_{bjr} \quad \forall b, \forall j \quad (4.20)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} x4_{bjv} + x6_{bjl} + x8_{bjk} + x9_{bjr} = x3_{bkj} \quad \forall b, \forall j \quad (4.21)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} x6_{bjl} * a_{cb} = x7_{cli} \quad \forall l, \forall c \quad (4.22)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{b \in B} x7_{cli} + cs_{cs} = q_{bi} * a1_{cb} \quad \forall c \quad (4.23)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} x6_{bjl} - x7_{cli} = x5_{blv} \quad \forall b, \forall c \quad (4.24)$$

$$x3_{bkj} \leq M * centers_j \quad \forall b, \forall j, \forall k \quad (4.25)$$

$$x4_{bjv} \leq M * landf_v \quad \forall b, \forall j, \forall v \quad (4.26)$$

$$x5_{blv} \leq M.lanf_v \quad \forall b, \forall l, \forall v \quad (4.27)$$

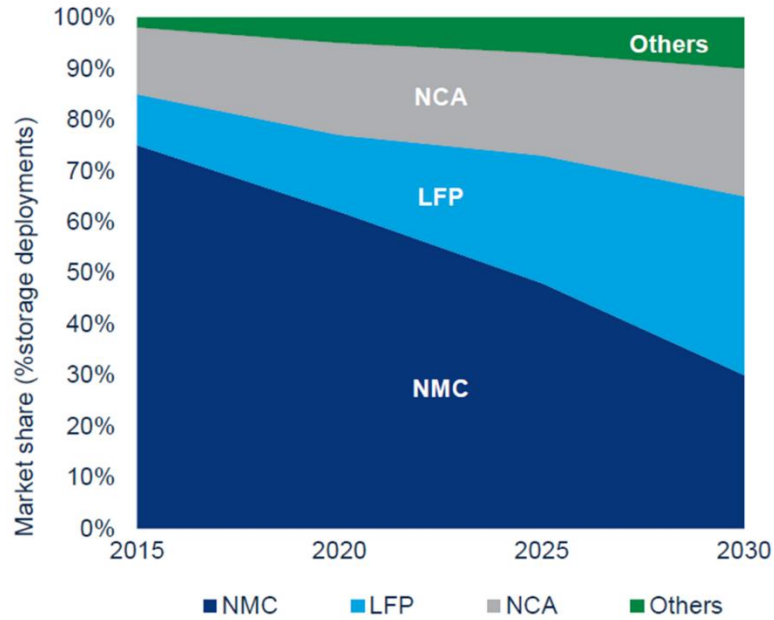
$$x6_{bjl} \leq M.recycle_l \quad \forall b, \forall j, \forall l \quad (4.28)$$

4.12. kısıta göre kullanıcılardan potansiyel servis ve toplama merkezlerine akış varsa o toplama merkezi açık olmalıdır aksi takdirde akış yoksa o toplama merkezinin kapalı olması gerekmektedir. Aynı şekilde 4.13. kısıta göre de servis ve toplama merkezinden geri dönüşüm tesisine akış varsa o geri dönüşüm tesisi açık olmalıdır. Geri dönüşüm tesisine akış yok ise hiçbir geri dönüşüm tesisi açık olmamalıdır. 4.14. kısıt batarya üretim merkezinden otomotiv OEM'e giden batarya miktarının batarya üretim merkezinde üretilen miktardan küçük veya o miktara eşit olması gerektiğini ifade etmektedir. 4.15. Kısıta göre batarya üretim merkezinde üretilen batarya miktarı, batarya üretim merkezinin kapasitesinden küçük olmalıdır. 4.16. kısıt, OEM'den kullanıcılara aktarılan miktarın o kullanıcıların talebini karşılayacak büyüklükte olması gerektiğini ifade eder. 4.17. kısıta göre batarya üretim merkezinden OEM'e giden miktar ile OEM'den kullanıcılara aktarılan miktar aynıdır. 4.18. kısıt, kullanıcılara aktarılan batarya miktarının kullanıcılardan toplama merkezlerine aktarılan miktarla aynı olmasını sağlar. Bu kısıt ile tüm kullanıcıların kullanılmış bataryalarını toplama merkezlerine aktardığı varsayılmaktadır. 4.19.kısıta göre toplama merkezlerine aktarılan kullanılmış batarya miktarının %10'u test aşamasından sonra yeniden kullanım için kullanıcılara geri gönderilmektedir. 4.20.kısıtta ise toplama merkezlerine aktarılan batarya miktarının %20'si ikincil kullanım için aktarılmaktadır. 4.21. kısıta göre toplama merkezlerine aktarılan bataryalar, yeniden kullanım, ikincil kullanım, geri dönüşüm ve imha süreçleri için ilgili kısımlara gönderilir. 4.22. kısıtta geri dönüşüm tesisine gönderilen batarya miktarı komponentlere göre geri dönüşme oranı ile çarpılarak elde edilen komponent miktarı bulunmaktadır. 4.23. kısıt ise batarya üretimi için gerekli komponent miktarının geri dönüşüm tesisinden elde edilen komponent miktarı ile tedarikçiden satın alınan komponent miktarının toplamına eşit olduğunu ifade etmektedir. 4.24. kısıtta geri dönüşüm tesisinde geri dönüştürülemeyen komponent miktarının imha tesisine gönderilmesi ifade edilmektedir.

4.25, 4.26, 4.27 ve 4.28. kısıtlar döngüdeki akış kontrolünü sağlamak için eklenmiş kısıtlardır.

4.2 Değerlerin Elde Edilmesi ve Varsayımlar

Problem çözümünde kullanılan model, 2030 yılında elektrikli araçlarda kullanılmış lityum-iyon batarya sayısının artacağı tahminlerinden yola çıkılarak kurulmuştur. Bu sebeple kullanıcı olarak seçilen İstanbul, Ankara, İzmir ve Antalya şehirlerinin batarya talepleri Shura Enerji Dönüşüm Merkezi'nin Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü çalışmasındaki 2030 yılı elektrikli araç sayısı tahmininden yola çıkılarak oluşturulmuştur. Şehirlere göre dağılımı ise TÜİK'in Temmuz 2021'de illere göre motorlu taşıt sayısı verilerinden oluşturulan oran ile oluşturulmuştur. Toplam batarya talebi NMC ve LFP tip batarya olan toplam talep olarak değerlendirilmiştir. Talep oranları Wood Mackenzie Energy Storage Service tarafından 2020 yılında yayınlanan bu iki tip bataryanın 2030 yılındaki pazar paylarına göre oranlanarak oluşturulmuştur.



Source: Wood Mackenzie Energy Storage Service

Şekil 4.1 : Batarya tiplerine göre gelecek yıllardaki pazar payları (Wood Mackenzie Energy Storage Service, 2020).

Batarya içeriğindeki kritik olarak adlandırılan lityum ve kobalt minerallerinin geri dönüşüm sonunda elde edilmesi istenen yüzde değeri ise Yeşil Mutabakat Anlaşması ile birlikte devreye alınan Döngüsel Ekonomi Eylem Planı içinde yer alan Pil Takvimine göre 1 Ocak 2030 yılı itibariyle tüm lityum iyon pillerinde aranacak olan Geri Kazanılmış İçerik Belgesi'ndeki değerlerdir. Kullanılan değerler modelin 2030 yılına uyumlu olmasını kanıtlar niteliktedir.

Problemde kullanılan kritik minerallerin satınalma maliyeti İsviçre’de bulunan Nadir Toprak ve Metaller Enstitüsü AG (ISE)’nin 2020 yılında yayınladığı maliyet listesinden alınmıştır.

Modelde yer alan uzaklık değerleri, potansiyel merkezler olarak seçilen şehirlerin birbirlerine olan gerçek uzaklık değerleri olarak hesaplanmıştır. Parametrelerde yer alan sabit lokasyon açma maliyeti, ulaştırma maliyeti, batarya taşıma maliyeti, imha etme maliyeti, geri dönüştürme maliyet değerleri Subulan ve diğ., 2015 çalışmasından uyarlanmıştır (Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1 : Referans alınan parametreler.

Parametreler	Değer	Tez Çalışmasındaki Değerler
Üretim maliyeti	25-65	25
Batarya taşıma maliyeti	0.001-0.003	0.001
Kullanılmış batarya taşıma maliyeti	0.002-0.004	0.002
Malzeme taşıma maliyeti	0.008-0.015	0.01
Geri dönüşüm maliyeti	0.47-1.0	0.50-1.0
Servis ve toplama merkezi açma sabit maliyeti	60.000-120.000	60.000
Geri dönüşüm tesisi açma sabit maliyeti	400.000-600.000	600.000

İmha tesisinin kapasitesi sonsuz olarak kabul edilmiştir.

Kuruluş lokasyonu seçimini etkileyen faktörler arasında pazara olan yakınlık, işgücü olanakları, hammadde, malzeme ve hizmetlere ulaşılabilirlik ve kalitesi, ulaşım olanakları, devlet tarafından verilen teşvikler ve vergi politikaları, finansal olanaklar, su ve arıtma tesislerinin varlığı, enerji ve yakıt, toplumsal yapı ve davranışlar, arazi özellikleri ve güvenlik konuları sayılabilmektedir. Kuruluş lokasyonu seçiminde kullanılan yöntemlerin başlıcaları ise görünür maliyetleri kıyaslama yöntemi, görünmez maliyetleri kıyaslama yöntemi, karlılık analizi, faktör ağırlıklandırma yöntemi, başabaş noktası analizi, ağırlık merkezi yöntemi, yük-mesafe yöntemi, ulaştırma modeli gelmektedir.

Bu çalışmada problemde yer alan aday tesis yerlerinin belirlenmesi için iki yaklaşım kullanılmıştır: ağırlık merkezi yöntemi (Gravity method) ve sosyal ve ekonomik

kriterler. Ağırlık merkezi yöntemi; tesis yeri seçiminde kullanılan ve taşıma maliyetlerini minimize eden bir yöntemdir. Taşıma maliyetlerini uzaklık ve taşınan miktarın bir fonksiyonu olarak ele alır. Farklı lokasyonlara hizmet eden tek bir tesisin yerini seçer. Yöntemde aşağıdaki formül kullanılmaktadır :

$$C_x = \frac{\sum X_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (4.29)$$

$$C_y = \frac{\sum Y_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (4.30)$$

Q_i : i lokasyonuna sevk edilecek miktar veya i lokasyonunun maliyeti

X_i : i lokasyonunun x koordinatı

Y_i : i lokasyonunun y koordinatı

Ağırlık merkezi yönteminin yanı sıra aday tesis yerlerinin belirlenmesinde sosyal ve ekonomik kriterler dikkate alınmıştır. Bu kapsamda TÜİK ve Türkiye İş Kurumu'nun yayınladığı istihdam ve işsizlik oranlarına ek olarak 2021 Ocak-Ekim Dönemi İtibariyle İl Düzeyinde Program Türlerine Göre Aktif İşgücü Piyasası Programları raporundan yararlanılmıştır (Ek-B). Rapora göre seçilen kullanıcı şehirler gözardı edilerek aktif işgücü piyasa değerinin yüksek olduğu iller aday lokasyon olarak seçilmiştir. Örnek olarak İstanbul ve İzmir'den sonra aktif işgücü piyasasının yüksek olduğu Adana ili servis ve toplama merkezi için 1. Aday nokta olarak seçilmiştir. Servis ve toplama merkezi için 2. Aday lokasyon ağırlık merkezi yöntemine göre belirlenmiştir. Benzer şekilde imha tesisi için 1. Aday lokasyon aktif işgücü piyasa raporuna göre en yüksek değere sahip kullanıcı illerden ve seçilen aday lokasyonlardan sonra gelen il Samsun ilidir. İmha tesisi için 2. Aday lokasyon yine ağırlık merkezi yöntemine göre belirlenmiştir. Geri dönüşüm sektörünün güçlü olduğu illerden biri olan Kocaeli ili geri dönüşüm tesisi için 1. Aday lokasyon seçilirken 2. Aday lokasyon ise ağırlık merkezi yöntemi ile belirlenmiştir.

Toplama merkezinin seçimi için kullanıcı olarak belirlenen şehirlerin koordinatları ve talep miktarları dikkate alınarak ağırlık merkezi yöntemi uygulanmıştır.

Çizelge 4.2 : Toplama Merkezi Aday Lokasyonun Belirlenmesi.

Lokasyonlar	X (km)	Y (km)	Miktar (Q)
İstanbul	41,00	28,97	1265299
Ankara	39,92	32,85	661450
İzmir	38,41	27,1	343256
Antalya	36,88	30,70	229996

Ağırlık merkezi yöntemine göre toplama merkezi aday lokasyonlarından biri Bilecik ili olarak belirlenmiştir. Diğer bir aday lokasyon ise Türkiye İş Kurumu'nun "2021 Ocak-Ekim Dönemi İtibariyle İl Düzeyinde Program Türlerine Göre Aktif İşgücü Piyasası Programları" kapsamında oluşturulan istatistiklerden yararlanılarak Adana ili olarak belirlenmiştir.

Geri dönüşüm tesisi için bölgede halihazırda var olan geri dönüşüm tesisi sayısından ve olanaklarından kaynaklı olarak Kocaeli 1. Aday lokasyon olarak tercih edilmiştir. 2. Aday lokasyonun belirlenmesi için ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Probleme toplama merkezlerinden geri dönüşüm tesisine ve geri dönüşüm tesisinden de batarya üretim merkezine akış bulunmaktadır. Problemin amaç fonksiyonlarından birisinin içeriğinde taşıma maliyetine bağlı maliyet minimizasyonu amacı bulunduğundan ağırlık merkezi yöntemi uygulanırken geri dönüşüm tesisinin ilişkili olduğu tüm lokasyonlar dikkate alınmıştır. Çizelge 4.3'te ilgili lokasyonlar, koordinat ve akış miktarları listelenmektedir.

Çizelge 4.3 : Geri Dönüşüm Tesisi Aday Lokasyonun Belirlenmesi.

Lokasyonlar	X (km)	Y (km)	Miktar (Q)
Bilecik	40,05	30,06	625000,3
Adana	37,00	35,21	625000,3
Kayseri	38,73	35,47	1375000
Manisa	38,61	27,41	1500000

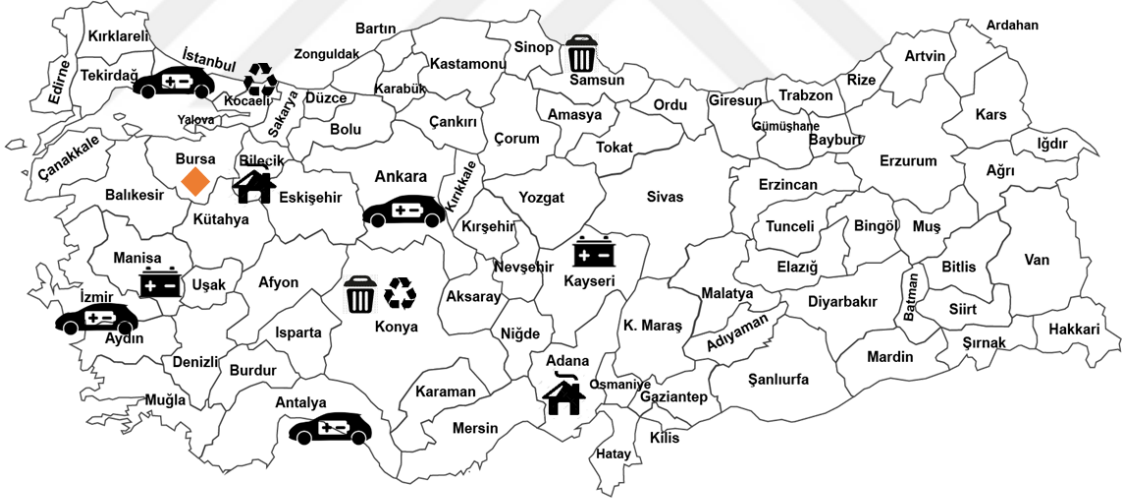
Geri dönüşüm tesisi için 2. Aday lokasyon ağırlık merkezi yöntemine göre Konya ili olarak belirlenmiştir.

İmha tesisi noktaları hem toplama merkezlerinden hem de geri dönüşüm tesislerinden gelen akış ile beslenmektedir. Aday lokasyonlarından biri ağırlık merkezi yöntemiyle Konya ili olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4 : İmha Tesisi Aday Lokasyonun Belirlenmesi.

Lokasyonlar	X (km)	Y (km)	Miktar (Q)
Bilecik	40,05	30,06	625000,3
Adana	37,00	35,21	625000,3
Kocaeli	40,85	29,88	375000,2
Konya	37,86	32,48	375000,2

Diğer aday lokasyon ise Türkiye İş Kurumu'nun "2021 Ocak-Ekim Dönemi İtibariyle İl Düzeyinde Program Türlerine Göre Aktif İşgücü Piyasası Programı raporundaki illere göre toplam aktif işgücü değerlerine göre problemde daha önce seçilmiş aday lokasyonlar çıkarılarak Samsun ili olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2 : Türkiye'deki aday tesis lokasyonları.

	Batarya Üretim Merkezleri
	Otomotiv OEM
	Kullanıcılar
	Geri Dönüşüm Tesisi
	İmha Tesisi
	Toplama Merkezi

4.3 Çözüm Yaklaşımı

Çok amaçlı modeller çözülmesi kompleks modellerdir. Optimal sonuçlar elde etmek için literatürde başarılı şekilde kullanılan tekniklerden biri olan epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon modeli CPLEX solver kullanılarak AMD Ryzen 4000 işlemcili ve 8 GB RAM'e sahip bilgisayar ile çözülmüştür. Problem boyut olarak 96 denklem, 98 değişken ve 435 sıfır olmayan eleman içermektedir. Sonucun bulunma süresi 0.547 saniye olarak hesaplanmıştır.

4.4 Sonuç Analizleri ve Senaryo Değerlendirmeleri

Çözüm yöntemi olarak AUGMECON2 yöntemi seçildiği için amaç fonksiyonlarında yer alan tamsayı çarpanlardan dolayı amaç fonksiyonları 10 ile çarpılarak sonuçlar elde edilmiştir. Epsilon kısıt modelinden elde edilen çözümlere göre ödünleşme sonuçları ödünleşme çizelgesinde (payoff table) verilmiştir.

Verilen çizelgeye göre minimum maliyet eniyilendiğinde elde edilen değer $2.804462E+9$ iken elde edilen karbondioksit emisyon değeri $4.29849E+11$ olmaktadır. Karbondioksit emisyon değeri en iyilendiğinde $3.00154E+11$ iken maliyet değeri $3.095036E+9$ olarak listelenmektedir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 : Ödünleşme Çizelgesi.

	Z1(Maliyet)	Z2 (Emisyon)
Min Z1 (Maliyet)	$2.804462E+9$	$4.29849E+11$
Min Z2 (Emisyon)	$3.095036E+9$	$3.00154E+11$

Kısıt olarak değerlendirilen 2. Amaç fonksiyonu olan karbon emisyonu için epsilon kısıt yöntemine göre grid noktalar (olurlu değerler) Çizelge 4.6'da listelenmiştir.

Çizelge 4.6 : Grid Nokta Değerleri.

	Z2 (Emisyon)
G0	4.29849E+11
G1	4.16880E+11
G2	4.03910E+11
G3	3.90941E+11
G4	3.77971E+11
G5	3.65002E+11
G6	3.52032E+11
G7	3.39063E+11
G8	3.26093E+11
G9	3.13124E+11
G10	3.00154E+11

Model, maliyet ve karbon emisyonunu hedef alarak 2 farklı amaç fonksiyonunda kurulduğu için amaç fonksiyonu değerleri bu hedeflerden etkilenmektedir. Epsilon kısıt yöntemine göre elde edilen olası çözüm kümesi Çizelge 4.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7 : Pareto Çözüm Kümesi.

	Z1(Maliyet)	Z2 (Emisyon)
S1	2.804462E+9	4.29849E+11
S2	2.831798E+9	4.16880E+11
S3	2.862490E+9	4.03910E+11
S4	2.893181E+9	3.90941E+11
S5	2.923873E+9	3.77971E+11
S6	2.954565E+9	3.65002E+11
S7	2.985256E+9	3.52032E+11
S8	3.015948E+9	3.39063E+11
S9	3.046640E+9	3.26093E+11
S10	3.077331E+9	3.13124E+11
S11	3.095036E+9	3.00154E+11

Pareto çözüm kümesi elde edildikten sonra karar verme yöntemi olarak normalizasyon yöntemi belirlenmiştir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde karar verme aşamasında birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden literatürde en çok tercih edilen yöntemlere ağırlıklı toplam metodu, ağırlıklı çarpım metodu, basit toplam ağırlıklandırma, TOPSIS, AHP, ELECTRE, PROMETHEE yöntemleri örnek olarak verilebilir (Kolios ve diğ,2016). Bu çalışmada karar verme yöntemi olarak Basit

Toplamlı Ağırlıklandırma (SAW) yöntemi kullanılmıştır. Basit toplamlı ağırlıklandırma yöntemi, uygulanması kolay, farklı durumlara hızlı bir şekilde uygulanabilen ve çok özellikli problemlere uygulanabilen bir yöntemdir. Yöntem süreci, karar matrisinin normalizasyonu ile bir ölçüt uyarlanarak alternatiflerin karşılaştırılmasından oluşmaktadır. Kriterler belirlendikten sonra kriterlerin değerleri belirlenmektedir. Bu adımdan sonra kriterlere ait ağırlık faktörü hesaba katılmaktadır. Matris normalizasyonundan sonra sıralama süreci uygulanır. Son adım olarak sonuçlar sıralanarak en optimum çözüm seçilmektedir (Nurmalini ve Rahim, 2017).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\text{Max}(x_{ij})} \quad (4.31)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{Min}(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (4.32)$$

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (4.33)$$

Denklem 4.31 bir yarar sağlanması amacı varsa kullanılırken denklem 4.32 maliyet amacı varsa kullanılmaktadır. r_{ij} tüm alternatifler için normalize edilmiş performans puanlamasıdır. Ele alınan tez çalışmasında maliyet ve karbon emisyonundan oluşan amaç fonksiyonu SAW yöntemine göre değerlendirilirken iki amaç fonksiyonunun da ağırlıkları eşit olarak değerlendirilmiştir.

Normalize matris Çizelge 4.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.8 : SAW yöntemine göre normalize matris.

	Z1(Maliyet)	Z2 (Emisyon)	Sıralama
S1	1,0000E+00	6,9828E-01	1,6983E+00
S2	9,9035E-01	7,2000E-01	1,7103E+00
S3	9,7973E-01	7,4312E-01	1,7228E+00
S4	9,6934E-01	7,6777E-01	1,7371E+00
S5	9,5916E-01	7,9412E-01	1,7533E+00
S6	9,4920E-01	8,2234E-01	1,7715E+00
S7	9,3944E-01	8,5263E-01	1,7921E+00
S8	9,2988E-01	8,8525E-01	1,8151E+00
S9	9,2051E-01	9,2046E-01	1,8410E+00
S10	9,1133E-01	9,5858E-01	1,8699E+00
S11	9,0612E-01	1,0000E+00	1,9061E+00

Normalize matris değerlendirilmesine göre maliyet ve emisyon minimizasyonu gözönünde bulundurulduğunda en iyi sonuç 1. Küme olarak seçilmektedir. Bu çözüm

Çizelge 4.10 : Senaryo 1'e göre pareto çözüm kümesi.

	Z1(Maliyet)	Z2 (Emisyon)
S1	3.506268E+9	5.36422E+11

Elde edilen Pareto çözüm kümesine göre bir optimum sonuç elde edilmektedir. Sonuca göre servis ve toplama merkezi olarak Bilecik ve Adana illeri, geri dönüşüm ve imha tesisi lokasyonu ise Konya ili olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.11 : Çözüm kümelerine göre karar değişkenleri.

	Servis ve Toplama Merkezi	Geri Dönüşüm Tesisi	İmha Merkezi
S1	Bilecik ve Adana	Konya	Konya

Senaryo 2'ye göre üretim kapasitesi %25 arttırıldığında elde edilen Pareto çözüm kümeleri aşağıdaki tabloda listelenmiştir.

Çizelge 4.12 : Senaryo 2'ye göre pareto çözüm kümesi.

	Z1(Maliyet)	Z2 (Emisyon)
S1	2.831393E+9	4.16880E+11
S2	2.862281E+9	4.03910E+11
S3	2.893169E+9	3.90941E+11

Senaryo 2 ye göre en iyi sonuç 1. Çözüm kümesi olarak verilmektedir.

Çizelge 4.13 : Senaryo 2'ye göre normalize matris tablosu.

	Z1(Maliyet)	Z2 (Emisyon)	Sıralama
S1	1,0000E+00	9,3778E-01	1,9378E+00
S2	9,8921E-01	9,6789E-01	1,9571E+00
S3	9,7865E-01	1,0000E+00	1,9786E+00

Seçilen en optimum çözüm kümesine göre servis ve toplama merkezi olarak Bilecik ili seçilirken, geri dönüşüm tesisi Kocaeli ve İmha merkezi Samsun olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.14 : Çözüm kümelerine göre karar değişkenleri.

	Servis ve Toplama Merkezi	Geri Dönüşüm Tesisleri	İmha Merkezi
S1	Bilecik	Kocaeli	Samsun
S2	Bilecik	Kocaeli	Konya
S3	Bilecik	Konya	Konya

Senaryo 3'e göre kullanılmış bataryalardan elde edilen kritik minerallerden olan lityumun geri dönüştürülme zorunluluğu, Yeşil Mutabakat Döngüsel Eylem Planı'na göre kobalt yüzdesi ile eşit olduğunda elde edilen pareto optimal çözüm kümesi Çizelge 4.15'te özetlenmektedir.

Çizelge 4.15 : Senaryo 3'e göre pareto çözüm kümesi.

	Z1(Maliyet)	Z2 (Emisyon)
S1	2.743912E+9	4.76110E+11
S2	2.780528E+9	4.58515E+11
S3	2.817145E+9	4.40919E+11
S4	2.853762E+9	4.23324E+11
S5	2.890379E+9	4.05728E+11
S6	2.926995E+9	3.88132E+11
S7	2.963612E+9	3.70537E+11
S8	3.000211E+9	3.52941E+11
S9	3.035759E+9	3.35346E+11
S10	3.071307E+9	3.17750E+11
S11	3.095036E+9	3.00154E+11

Elde edilen pareto optimal çözüm kümesine göre normalizasyon değerleri incelenmiştir. Çizelge 4.15'e göre en iyi senaryo 1. senaryo olarak belirlenmektedir.

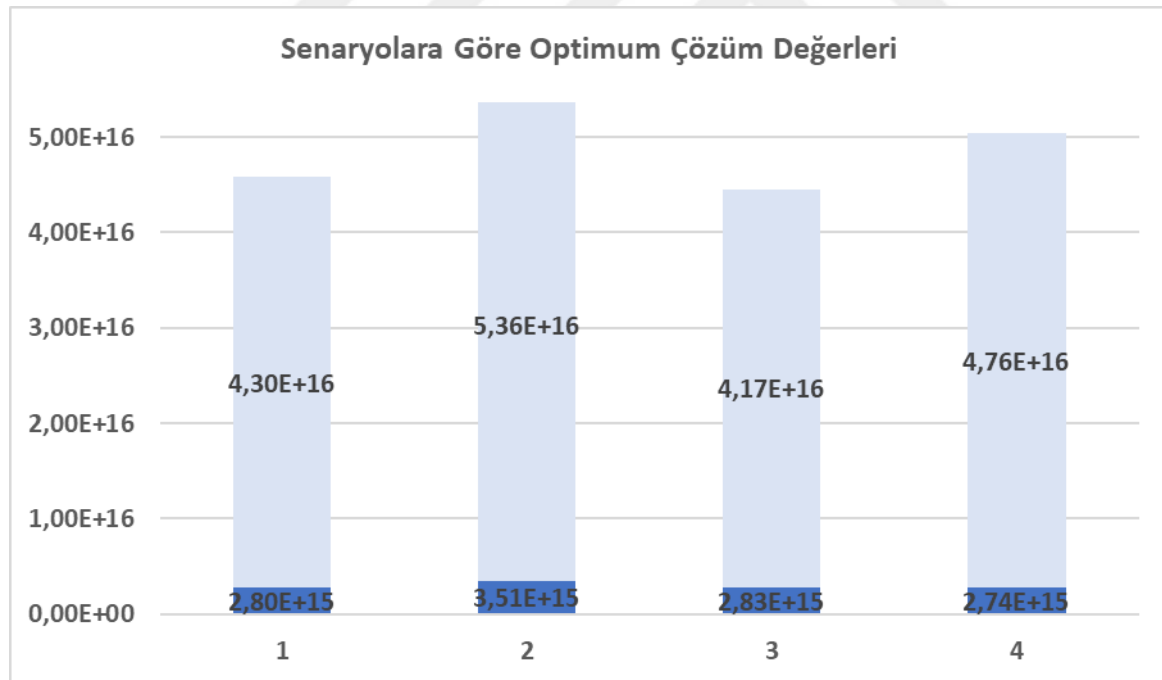
Çizelge 4.16 : Senaryo 3'e göre normalize matris tablosu.

	Z1(Maliyet)	Z2 (Emisyon)	Sıralama
S1	1,0000E+00	6,3043E-01	1,6304E+00
S2	9,8683E-01	6,5462E-01	1,6415E+00
S3	9,7400E-01	6,8075E-01	1,6548E+00
S4	9,6151E-01	7,0904E-01	1,6705E+00
S5	9,4933E-01	7,3979E-01	1,6891E+00
S6	9,3745E-01	7,7333E-01	1,7108E+00
S7	9,2587E-01	8,1005E-01	1,7359E+00
S8	9,1457E-01	8,5044E-01	1,7650E+00
S9	9,0386E-01	8,9506E-01	1,7989E+00
S10	8,9340E-01	9,4462E-01	1,8380E+00
S11	8,8655E-01	1,0000E+00	1,8866E+00

Seçilen en optimum senaryoya göre servis ve toplama merkezi olarak Bilecik ili ve imha merkezi olarak Konya ili seçilirken geri dönüşüm tesisinin açılmaması optimum çözüm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.17 : Çözüm kümelerine göre karar değişkenleri.

	Servis ve Toplama Merkezi	Geri Dönüşüm Tesis	İmha Merkezi
S1	Bilecik	Kocaeli	Konya
S2	Bilecik	Kocaeli	Konya
S3	Bilecik	Kocaeli	Konya
S4	Bilecik	Kocaeli	Konya
S5	Bilecik	Kocaeli	Konya
S6	Bilecik	Kocaeli	Konya
S7	Bilecik	Kocaeli	Konya
S8	Bilecik	Konya	Konya
S9	Bilecik	Konya	Konya
S10	Bilecik	Konya	Konya
S11	Bilecik	-	Konya



Şekil 4.4 : Senaryolara göre optimum normalize çözüm değerleri.

Senaryoların her biri için seçilmiş en iyi değerler Şekil 4.4'teki grafikte gösterilmektedir.

Elde edilen ilk sonuçlara bakıldığında geri dönüşüm tesisi ve imha tesisi noktaları çözüm kümelerine göre değişmektedir. Bu değişimin asıl sebebi batarya taşıma

maliyeti, malzeme taşıma maliyeti ve kullanılmış batarya taşıma maliyetlerinin uzaklıklara göre amaç fonksiyon değerine olan etkisinden kaynaklanmaktadır. Problem kısıtlar için olurlu çözüm verirken seçilen aday noktalar değişmektedir. Senaryo 1’de tez çalışmasının ana konseptlerinden biri olan elektrikli araçlara olan talebin artacağı ve dolayısıyla da piyasada kullanılmış elektrikli batarya sayısının artma tahminlerinden yola çıkılarak talep %25 arttırılarak çözümler incelenmiştir. Burada batarya sayısının artmasından kaynaklı olarak servis ve toplama merkezi sayısı ikiye çıkartılarak hem Bilecik hem de Adana lokasyonu servise açılmaktadır. Senaryo 2’de üretim kapasitesinin arttırıldığı durumda da açılan lokasyonlar çözüm kümelerine göre farklılık göstermektedir. Kullanıcı illerin orta noktası olan Bilecik ili servis ve toplama merkezi olarak seçilmeye devam ederken en iyi çözümde geri dönüşüm tesisi Kocaeli ve imha tesisi Samsun olarak belirlenmiştir. Senaryo 3’e göre olurlu çözümlerden birinde geri dönüşüm tesisi açmama çözümü üretilirken en iyi çözümde lokasyonlar servis merkezi Bilecik, geri dönüşüm tesisi Kocaeli ve imha tesisi noktası Konya olarak seçilmektedir. Bir lokasyondan diğerine ürün taşıma maliyetleri amaç fonksiyonundan önemli alan oluşturmaktadır. Yakın lokasyonlar seçilmesi veya ulaşım maliyetlerinin düşürülmesi aday lokasyonların değişmesine etki edecektir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında elektrikli araç bataryalarının artan kullanım oranları ve Yeşil Mutabakat Anlaşması'yla birlikte devreye giren batarya regülasyonlarına göre 2030 yılında kullanılmış elektrikli araç bataryalarının geri dönüşüm ve imha stratejileri için Türkiye'de optimum tesis lokasyonları kurulan modelle seçilmektedir.

Çok amaçlı modelleme yaklaşımı ile kullanım ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryaları, döngüsel ekonomi yöntemleri ile tekrar değerlendirilerek farklı stratejiler ortaya konulmuştur. Bu stratejiler arasında kullanım kapasitesi %80'in altında olan elektrikli araç bataryaları toplama merkezlerinde test edilerek tekrar kullanılabilir duruma getirilerek kullanıcılara geri gönderilme durumu, ikincil kullanım alanlarında enerji depolama sistemi olarak kullanılma durumu ve geri dönüştürülerek içerdikleri kritik minerallerin elde edilme durumu ve geri dönüştürülemeyen minerallerin imha edilme durumları göz önünde bulundurulmuştur. Modelde genellikle lokasyon seçme modellerinde kullanılan maliyet minimizasyonunun yanında karbon ayakizi değeri de bir amaç fonksiyonu olarak eklenerek döngüsel ekonomi konularına da değinilmektedir.

Modele dahil edilen elektrikli araç bataryalarındaki kritik olarak adlandırılan minerallerden lityum ve kobalt mineralleri için farklı stratejiler ortaya çıkmaktadır. Lityum mineralinin bulunurluğundan kaynaklı olarak satınalma maliyetlerinin düşük olması bu mineralin geri dönüştürülme stratejisinin satınalma stratejisine göre tercih edilmemesine yol açmaktadır. Bu yaklaşımın tam tersi olarak kobalt mineralinin kısıtlı rezervlerinden dolayı satınalma maliyetinin yüksek olması karar vericileri geri dönüşüm stratejisi izlemeye itmektedir. Bununla birlikte Yeşil Mutabakat ile birlikte devreye giren Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'na göre de 2030 yılındaki bataryaların izlenebilirlik stratejisi olarak bataryalarda en az %12 geri dönüştürülmüş kobalt minerali bulunması zorunluluğu da geri dönüşüm stratejisini destekler niteliktedir. Kobalt mineralinin satınalma fiyatının yüksek olmasının yanında bu mineralin elde edilme aşamasındaki çevresel, sosyal ve etik konular da geri dönüşüm stratejisine katkı yapmaktadır. Bununla birlikte karbon emisyon değerinin amaç fonksiyonunda yapılan çalışmalardan elde edilen mineral elde etme ve bu mineralleri batarya montaj aşaması

sırasında ortaya çıkan CO₂ emisyon değerleri ve batarya taşıma sırasında ortaya çıkan emisyon değeri de hesaba katılmaktadır. Mineral elde etme sürecinde ortaya çıkan karbon emisyonu, mineralin madenden çıkarılması sırasındaki maruz kaldığı işlemler esnasında çevreye yayılan karbon emisyonudur. Mineralin batarya montaj aşamasında ortaya çıkan karbon emisyonu ise bataryanın üretim tesisinde üretim işlemi esnasında ortaya çıkan karbon emisyonudur. Geri dönüşüm yöntemi ile mineralin madenden elde edilme safhasındaki karbon emisyonu azaltılabilir veya tamamen ortadan kaldırılabilmektedir. Mineral eğer geri dönüştürülmeyip satın alınıyorsa yine maden elde etme aşaması geçilerek sadece mineralin batarya üretiminde kullanım aşamasında ortaya çıkan karbon emisyonu hesaba katılmalıdır. Bu amaç fonksiyonu genel olarak her iki kritik mineral için de mineral elde etme sürecinin minerali batarya yapım aşamasında kullanma sonucuna göre çevreye daha yüksek oranda karbon emisyonu yaydığını göstermektedir. Burada genel hatlarıyla ortaya çıkan strateji mineralleri satın alma yönündedir. Bu bilgiler ışığında modelin sonuçlarıyla birlikte öne çıkan kritik mineralin satın alma maliyeti ve geri dönüşüm için belirlenen oranlarla birlikte mineralin elde edilme stratejisine karar verilebilmektedir. Modelde batarya ve malzeme taşıma unsurları dahil edilmekle birlikte tedarikçiden alınan mineraller için ayrıca bir uzaklık durumu modele eklenmemiştir. Modelin literatüre katkılarından biri de farklı tip elektrikli araç bataryalarının izlenmesiyle birlikte hem regülasyonların gözönünde bulundurulması hem de karbon ayak izi değerlerinin amaç fonksiyonunda incelenmesiyle sürdürülebilirlik çalışmalarına da katkı sağlamasıdır.

Maliyet ve karbon emisyon minimizasyonu ile kurulan çoklu amaç optimizasyon modeli, epsilon kısıt yöntemi (AUGMECON2) ile ele alınarak 6 farklı olurlu çözüm kümesi elde edilmiştir. Bu elde edilen çözüm yöntemine göre aday tesisler olan geri dönüşüm tesisi, imha tesisi ve servis ve toplama merkezleri lokasyonlarına karar verilmektedir.

Türkiye’de hali hazırda elektrikli araç bataryalarının geri dönüşüm ve imha tesisi için yatırımlar ön planda olmasa da birçok uluslararası şirket kendi üretim alanlarında bu tür dögüsel ekonomi konuları için yatırımlar yapmaya başlamıştır.

Önerilen optimizasyon modeli, kurulan akıştaki batarya üreticileri, kullanıcılar, otomotiv üreticileri, geri dönüşüm tesisi, imha tesisi ve servis ve toplama merkezi adımlarını içeren otomotiv sektörüne uygulanabilecek şekilde geliştirilmiştir.

5.1 Gelecek Çalışmalar

Oluşturulan çok amaçlı optimizasyon modeli ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının 2030 yılındaki muhtemel senaryolarına göre çalıştırılmaktadır. Modelde maliyet minimizasyonunun yanında karbon emisyon değeri de göz önünde bulundurulmaktadır. Kurulan model 2030 yılı modellemesine göre oluşturulduğu için zaman periyotları gözardı edilmiştir. Fakat belirli bir yıl modellemesi için gelecek çalışmalarda zaman periyodu da hesaba katılarak elektrikli araç bataryalarının kullanıcılara verildiği andan itibaren 8-10 yıl sonrası simüle edilebilir. Bununla birlikte servis ve toplama merkezlerine gelen bataryaların ikincil kullanım ve yeniden kullanım oranları bataryaların kalite oranları da belirli bir dağılım ile karakterize edilerek modele katılabilir. Böylece modelde hazır olarak verilen oranlar kalite oranlarına göre güncellenebilir.

Epsilon kısıt yönteminin daha kararlı sonuç verebilmesi için 3. Amaç fonksiyonu sosyal etkiler ile oluşturularak aday lokasyonların işsizlik oranları, güvenlik oranları gibi konuları da model içinde değerlendirmeye alınarak daha kapsamlı bir optimum sonuç kümesi elde edilebilir.

KAYNAKLAR

Achterberg, E., Hinfelaar, J., & Bocken, N. (2016). Master circular business models with the Value Hill.

Ahmadi L, Yip A, Fowler M, Young SB, Frasera RA. (2014). Environmental Feasibility of Re-use of Electric Vehicle Batteries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 6: 64- 74.

Ahuja, J., Dawson, L., & Lee, R. (2020). A circular economy for electric vehicle batteries: driving the change. *Journal of Property, Planning and Environmental Law*.

Ai, Ning, and Katheryn Borucki. (2018). "End-of-Life Electric Vehicle Batteries: U.S. Projections and Management Strategies." *Magazine for Environmental Managers* (April 2018).

Ai, N.; Zheng, J. (2016). End-of-Life Electric Vehicle Battery Management: An Inventory Analysis. Presented at A&WMA's 109th Annual Conference & Exhibition, New Orleans, LA, June 20-23, 2016; Paper 1161.

Albertsen, L., Richter, J. L., Peck, P., Dalhammar, C., & Plepys, A. (2021). Circular business models for electric vehicle lithium-ion batteries: An analysis of current practices of vehicle manufacturers and policies in the EU. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105658.

Algül İH, (2015). Elektrikli Araç Akü Sistemleri.

Anvari, S., & Turkay, M. (2017). The facility location problem from the perspective of triple bottom line accounting of sustainability. *International Journal of Production Research*, 55(21), 6266-6287.

Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165-4176.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.039>

Arambarri, J., Hayden, J., Elkurdy, M., Meyers, B., Abu Hamatteh, Z. S., Abbassi, B., & Omar, W. (2019). Lithium ion car batteries: Present analysis and future predictions. *Environmental Engineering Research*, 24(4), 699-710.

- Ardiyok, S., Ikiler, B., & Köksal, E.** (2021). A Brief Overview of Charging Infrastructure in EU and Turkey. *Network Industries Quarterly Turkey*, 1(4), 14-18.
- 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.
- Berggren, C., & Kågeson, P.** (2017). Speeding up electro-mobility: How to electrify half of new car sales by 2030. *Transport and Environment*.
- Bloomberg, N. E. F.** (2020). *Electric Vehicle Outlook 2020*.
- Buekers, J., Van Holderbeke, M., Bierkens, J., & Panis, L. I.** (2014). Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 26-38.
- Casals LC, Barbero M, Corchero C,** (2019). Reused second life batteries for aggregated demand response services. *J Clean Prod* 212:99–108
- Choubey, P.K., Kim, M.-S., Srivastava, R.R., Lee, J.-C., Lee, J.-Y.,** (2016). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: lithium. Part I: from mineral and brine resources. *Miner. Eng.* 89, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.010>. combination of batteries in electric vehicles. *Microelectron. Reliab.* 88, 1212–1215.
- Curtis, T. L., Buchanan, H., Smith, L., & Heath, G.** (2021). *A Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials: Drivers, Barriers, Enablers, and US Policy Considerations* (No. NREL/TP-6A20-74550). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Cusenza, M. A., Guarino, F., Longo, S., Ferraro, M., & Cellura, M.** (2019). Energy and environmental benefits of circular economy strategies: The case study of reusing used batteries from electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 25, 100845.
- Dünya Enerji Konseyi,** (2021). *Temiz Enerji Dönüşümünde Kritik Minerallerin Rolü Raporu Özeti*, Londra.
- Düşük Emisyonlu Araçlar Ofisi, İngiltere.**(2015), “Uptake of ultra low emission vehicles in the UK”, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/464763/uptake-of-ulev-uk.pdf(Erişim tarihi:10.01.2022)

- El Korchi, A., & Millet, D.** (2014). Conditions of emergence of OEM's reverse supply chains. *Journal of Remanufacturing*, 4(1), 1-17.
- Girardi P, Gargiulo A, Brambilla PC.** (2015). A Comparative LCA of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle Using The Appropriate Power Mix: The Italian Case Study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20 (8): 1127-1142.
- Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. R.** (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological indicators*, 67, 753-768.
- Govindan, K., Mina, H., Esmaeili, A., & Gholami-Zanjani, S. M.** (2020). An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118317>.
- GÜVEN, E. C., & GEDİK, K.** (2019). Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(2), 726-737.
- Hacker F, Harthan R, Matthes F, Zimmer W,** (2009). Environmental Impacts and Impact On The Electricity Market of a Large Scale Introduction of Electric Cars in Europe-Critical Review of Literature. ETC/ACC Technical Paper: 56-90.
- Hammond, G.**(2007). Time to give due weight to the'carbon footprint'issue. *Nature*, 445(7125), 256-256.
- 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
- Hrabec, D., Kúdela, J., Šomplák, R., Nevrlý, V., & Popela, P.** (2020). Circular economy implementation in waste management network design problem: a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 28(4), 1441-1458.
- International Energy Agency (IEA).** (2021).”The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions”.
- International Energy Agency,** (2018). CO2 Status Report 2017. International Energy agency. 2017c.
- İskeceli, B. D., Kayakutlu, G., Daim, T. U., & Shaygan, A.** (2020). Optimization of battery and wind technologies: Case of power deviation penalties. *Technology in Society*, 63, 101322.

- Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon Jr, O. W., & Jawahir, I. S.** (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), 144-152.
- Kamran, M., Raugei, M., & Hutchinson, A.** (2021). A dynamic material flow analysis of lithium-ion battery metals for electric vehicles and grid storage in the UK: Assessing the impact of shared mobility and end-of-life strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105412.
- Kerem A.** (2014). Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5 (1): 1-13.
- Kılıç, H. S., Cebeci, U., & Ayhan, M. B.** (2015). Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 95, 120-132.
- Kolios, A., Mytilinou, V., Lozano-Minguez, E., & Salonitis, K.** (2016). A comparative study of multiple-criteria decision-making methods under stochastic inputs. *Energies*, 9(7), 566.
- Liu, C., Neale, Z.G., Cao, G.,** (2016). Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. *Mater. Today* 19 (2), 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.009>.
- M. Whittingham.** (1976). Electrical energy storage and intercalation chemistry, *Science* 192 (4244) (Jun. 1976) 1126–1127.
- Manzetti S, Mariasiu F.** (2015). Electric Vehicle Battery Technologies: From Present State to Future Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51: 1004-1012.
- Mardan, E., Govindan, K., Mina, H., & Gholami-Zanjani, S. M.** (2019). An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1499-1514.
- Mossali, E., Picone, N., Gentilini, L., Rodriguez, O., Pérez, J. M., & Colledani, M.** (2020). Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. *Journal of environmental management*, 264, 110500.
- Nurmalini, N., & Rahim, R.** (2017). Study approach of simple additive weighting for decision support system. *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol*, 3(3), 541-544.

- 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. In 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (pp. 1-6). IEEE.
- Olivetti, E. A., Ceder, G., Gaustad, G. G., & Fu, X.** (2017). Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. *Joule*, 1(2), 229-243.
- Pagliaro, M., & Meneguzzo, F.** (2019). Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. *Heliyon*, 5(6), e01866.
- Ramoni, M. O., & Zhang, H. C.** (2013). End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(6), 881-891.
- Redondo-Iglesias, E., Venet, P., & Pelissier, S.** (2018). Calendar and cycling ageing combination of batteries in electric vehicles. *Microelectronics Reliability*, 88, 1212-1215.
- 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.
- Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., & Jafari, H.** (2017). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & industrial engineering*, 109, 191-203.
- Spears, J.** (2015). "Electric vehicles and critical metals", SETIS Magazine, No. 8, p. 14
- Standridge, C. R., & Hasan, M. M.** (2015). Post-vehicle-application lithium-ion battery remanufacturing, repurposing and recycling capacity: modeling and analysis. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 8(3), 823-839.
- 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.
- Tadaros, M., Migdalas, A., Samuelsson, B., & Segerstedt, A.** (2020). Location of facilities and network design for reverse logistics of lithium-ion batteries in Sweden. *Operational Research*, 1-21.
- T.C.Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.**(2021). Ankara ili lityum iyon bataryası hücresi üretim tesisi ön fizibilite raporu.

Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102.

UDHB, (2011). T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı (UDHB), Strateji Geliştirme Başkanlığı. Ulaşımında Enerji Verimliliği. http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/761_15b4c60c5029_ek.pdf. (Erişim Tarihi:11.03.2016)

Yu, H., & Solvang, W. D. (2017). A carbon-constrained stochastic optimization model with augmented multi-criteria scenario-based risk-averse solution for reverse logistics network design under uncertainty. *Journal of cleaner production*, 164, 1248-1267.

Url-1<<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html> >, erişim tarihi 28.10.2021.

Url-2 <<https://insideevs.com/news/396177/global-ev-sales-december-2019/>>, Erişim tarihi : 06.01.2022).

Url-3<<https://nickelinstitute.org/about-nickel-and-its-applications/nickel-in-batteries/total-cost-of-ownership-tco-for-electric-vehicles-ev-vs-internal-combustion-engine-vehicles-ice/>>, Erişim tarihi : 06.01.2022).

Url-4<www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html, Erişim tarihi : 06.01.2022).

Url-5 <https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrikli_otomobil>, erişim tarihi 28.10.2021.

Url-6 < <https://tap.org.tr/pil-atik-pil/sss/pil-nedir/>>, erişim tarihi 29.10.2021.

Url-7<<https://tr.institut-seltene-erden.de/preise-fuer-strategische-metalle-im-februar-2020/>>, erişim tarihi 06.11.2021.

Url-8<<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car/>>, erişim tarihi 18.11.2021.

EKLER

EK A: GAMS Modeli Çıktıları

EK B: 2021 Ocak-Ekim Dönemi İtibariyle İl Düzeyinde Program Türlerine Göre Aktif İşgücü Piyasası



EK A

	OBJECTIVE VALUE	Q	cs	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
51	Maliyet = 2804462491.679 Karbon Emisyonu = 4298490000	Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000	Lityum 807368.272 Kobalt 212631.692	Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000	Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000 108397.000	Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000	Batarya2.Bilecik 153509.067	Batarya1.Konya 1149473.472 Batarya2.Konya 351228.005	Batarya1.Bilecik 1197368.200 Batarya2.Bilecik 399122.733	Lityum.Kocaeli 47894.728 Kobalt.Kocaeli 47894.728	Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.900 7263.000 39956.800 10839.700	Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800

₺	₺
Maliyet = 2862489606.016 Karbon Emisyonu = 4039100000	Maliyet = 2831797952.688 Karbon Emisyonu = 4168800000
Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000	Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000
Lityum 816472.626 Kobalt 221736.046	Lityum 811460.811 Kobalt 216724.231
Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000	Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000
Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000 108397.000 Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000	Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000 108397.000
Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000	Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000
Batarya1.Bilecik 227608.853 Batarya2.Bilecik 229378.684	Batarya1.Bilecik 102313.478 Batarya2.Bilecik 187613.559
Batarya1.Konya 930968.973 Batarya2.Konya 284462.742	Batarya1.Konya 1051252.533 Batarya2.Konya 321216.052
Batarya1.Bilecik 969759.347 Batarya2.Bilecik 323253.116	Batarya1.Bilecik 1095054.722 Batarya2.Bilecik 365018.241
Lityum.Konya 38790.374 Kobalt.Konya 38790.374	Lityum.Konya 43802.189 Kobalt.Konya 43802.189
Ankara Antalya Istanbul Izmir Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.900 7263.000 39956.800 10839.700	Ankara Antalya Istanbul Izmir Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.900 7263.000 39956.800 10839.700
Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800	Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800

55	54
Maliyet = 2923872912.672 Karbon Emissionsu = 3779710000	Maliyet = 2893181259.344 Karbon Emissionsu = 3909410000
Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000	Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000
Lityum 826496.256 Kobalt 231759.676	Lityum 821484.441 Kobalt 226747.861
Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000	Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000
Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000 108397.000	Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000 108397.000
Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000	Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000
Batarya1.Bilecik 478199.602 Batarya2.Bilecik 312908.934	Batarya1.Bilecik 352904.228 Batarya2.Bilecik 271143.809
Batarya1.Konya 690401.854 Batarya2.Konya 210956.122	Batarya1.Konya 810685.413 Batarya2.Konya 247709.432
Batarya1.Bilecik 719168.598 Batarya2.Bilecik 239722.866	Batarya1.Bilecik 844463.972 Batarya2.Bilecik 281487.991
Lityum.Konya 28766.744 Kobalt.Konya 28766.744	Lityum.Konya 33778.559 Kobalt.Konya 33778.559
Ankara Antalya Istanbul Izmir	Ankara Antalya Istanbul Izmir
Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.000 7263.000 30056.800	Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.000 7263.000 30056.800
Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800	Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800

S7	S6
Maliyet = 2985256219.328 Karbon Emissiyonu= 3520320000	Maliyet = 2954564566.000 Karbon Emissiyonu = 3650020000
Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000	Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000
Lityum 836519.886 Kobalt 241783.306	Lityum 831508.071 Kobalt 236771.491
Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000	Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000
Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000	Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000
Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000	Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000
Batarya1.Bilecik 728790.352 Batarya2.Bilecik 396439.184	Batarya1.Bilecik 603494.977 Batarya2.Bilecik 354674.059
Batarya1.Konya 449834.734 Batarya2.Konya 137449.502	Batarya1.Konya 570118.294 Batarya2.Konya 174202.812
Batarya1.Bilecik 468577.848 Batarya2.Bilecik 156192.616	Batarya1.Bilecik 593873.223 Batarya2.Bilecik 197957.741
Lityum.Konya 18743.114 Kobalt.Konya 18743.114	Lityum.Konya 23754.929 Kobalt.Konya 23754.929
Ankara Antalya Istanbul Izmir Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.000 7263.000 30056.800	Ankara Antalya Istanbul Izmir Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.000 7263.000 30056.800
Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800	Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800

56	58
Maliyet = 3046639525.984 Karbon Emisyonu=3260930000	Maliyet= 3015947872.656 Karbon Emisyonu= 3390630000
Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000	Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000
Lityum 846543.516 Kobalt 251806.936	Lityum 841531.701 Kobalt 246795.121
Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000	Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000
Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000	Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000
Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000	Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000
Batarya1.Bilecik 979381.101 Batarya2.Bilecik 479969.434	Batarya1.Bilecik 854085.726 Batarya2.Bilecik 438204.309
Batarya1.Konya 209267.615 Batarya2.Konya 63942.882	Batarya1.Konya 329551.175 Batarya2.Konya 100696.192
Batarya1.Bilecik 217987.099 Batarya2.Bilecik 72662.366	Batarya1.Bilecik 343282.474 Batarya2.Bilecik 114427.491
Lityum.Konya 8719.484 Kobalt.Konya 8719.484	Lityum.Konya 13731.299 Kobalt.Konya 13731.299
Ankara Antalya Istanbul Izmir Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.900 7263.000 39956.800 10839.700	Ankara Antalya Istanbul Izmir Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.900 7263.000 39956.800 10839.700
Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800	Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800

S11	S10
<p>Maliyet = 3095036425.020 Karbon Emisyonu = 3001540000</p>	<p>Maliyet = 3077331179.312 Karbon Emisyonu=3131240000</p>
<p>Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000</p>	<p>Batarya1 1710526.000 Batarya2 789474.000</p>
<p>Lityum 855263.000 Kobalt 260526.420</p>	<p>Lityum 851555.331 Kobalt 256818.751</p>
<p>Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000</p>	<p>Batarya1.Kayseri 1710526.000 Batarya2.Kayseri 789474.000</p>
<p>Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000</p>	<p>Batarya1.OEM 452571.000 157365.000 865731.000 234859.000 Batarya2.OEM 208879.000 72630.000 399568.000</p>
<p>Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000</p>	<p>Batarya1.Ankara 452571.000 Batarya1.Antalya 157365.000 Batarya1.Istanbul 865731.000 Batarya1.Izmir 234859.000 Batarya2.Ankara 208879.000 Batarya2.Antalya 72630.000 Batarya2.Istanbul 399568.000 Batarya2.Izmir 108397.000</p>
<p>Batarya1.Bilecik 1197368.200 Batarya2.Bilecik 552631.800</p>	<p>Batarya1.Bilecik 1104676.476 Batarya2.Bilecik 521734.559</p>
<p>(ALL 0.000)</p>	<p>Batarya1.Konya 88984.055 Batarya2.Konya 27189.572</p>
<p>(ALL 0.000)</p>	<p>Batarya1.Bilecik 92691.724 Batarya2.Bilecik 30897.241</p>
<p>(ALL 0.000)</p>	<p>Lityum.Konya 3707.669 Kobalt.Konya 3707.669</p>
<p>Ankara Antalya Istanbul Izmir Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.900 7263.000 39956.800 10839.700</p>	<p>Ankara Antalya Istanbul Izmir Batarya1.Bilecik 45257.100 15736.500 86573.100 23485.900 Batarya2.Bilecik 20887.900 7263.000 39956.800 10839.700</p>
<p>Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800</p>	<p>Batarya1.Bilecik 342105.200 Batarya2.Bilecik 157894.800</p>

EK B

İLLER	Erkek	Kadın	Toplam
İSTANBUL	17.747	20.650	38.397
İZMİR	7.738	15.041	22.779
SAMSUN	6.843	7.161	14.004
ADANA	8.822	7.939	16.761
ANKARA	6.713	9.806	16.519
BURSA	6.622	7.261	13.883
ANTALYA	4.467	5.088	9.555
KOCAELİ	4.815	5.422	10.237
SAKARYA	5.879	4.226	10.105
MERSİN	3.569	4.007	7.576
ÇORUM	2.465	2.856	5.321
GAZİANTEP	6.499	4.016	10.515
KONYA	2.571	3.726	6.297
AYDIN	2.952	4.094	7.046
MANİSA	2.487	3.261	5.748
TRABZON	1.432	1.465	2.897
DİYARBAKIR	3.284	5.380	8.664
AMASYA	1.923	1.467	3.390
KAHRAMANMARAŞ	2.553	2.273	4.826
MUĞLA	2.255	2.036	4.291

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Rabia DİŞÇİOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2016, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yükseklisans** :2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Mühendislik Yönetimi Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018-2019 yılları arasında BSH firmasında proje mühendisi olarak çalıştı.
- 2019 yılından bu yana Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş.'de Uzman Proje Mühendisi ünvanıyla çalışmaktadır.