

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Li-O<sub>2</sub> PİL LABORATUVAR AR-GE ÇALIŞMALARININ  
ÇEVRESEL ETKİSİ VE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nisan NASIF

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

ARALIK 2024



T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Li-O<sub>2</sub> PİL LABORATUVAR AR-GE ÇALIŞMALARININ  
ÇEVRESEL ETKİSİ VE OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nisan NASIF**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ahsen AKBULUT ULUDAĞ**

**ARALIK 2024**



Nisan NASIF tarafından hazırlanan “Li-O<sub>2</sub> Pil Laboratuvar Ar-Ge Çalışmalarının Çevresel Etkisi ve Optimizasyonu” adlı tez çalışması 25.12.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Tez Jürisi**

**Jüri Başkanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Ahsen AKBULUT ULUDAĞ (Danışman)**  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Doç. Dr. Aliye Suna ERSES YAY** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Doç. Dr. Hilal GÜNSEL** .....  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Li-O2 PİL LABORATUVAR AR-GE ÇALIŞMALARININ ÇEVRESEL ETKİSİ VE OPTİMİZASYONU” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

Nisan NASIF





***Babama***



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam sürecinde bana destek veren, geri bildirimleri, rehberliği, bana kattığı bilgiler ve gösterdiği yol için değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahsen AKBULUT ULUDAĞ'a sonsuz teşekkür ederim.

En büyük teşekkürü, sevgili babama borçluyum. Tüm hayatım boyunca verdiği destek, fedakarlık ve güç sayesinde bu noktaya geldiğim için minnettarım. Bana gösterdikleri sevgi ve sabır için anneme ve tüm aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Destegi, anlayışı ve sevgisiyle her adımda yanımda olan nişanlım S'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana inanan, beni destekleyen değerli arkadaşlarım Y,D,D sonsuz teşekkürler.

Nisan NASIF



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....                            | v         |
| TEŞEKKÜR .....                                                              | ix        |
| İÇİNDEKİLER .....                                                           | xi        |
| KISALTMALAR.....                                                            | xiii      |
| SİMGELER .....                                                              | xv        |
| TABLO LİSTESİ .....                                                         | xvii      |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                         | xix       |
| ÖZET.....                                                                   | xxi       |
| SUMMARY .....                                                               | xxiii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                       | <b>1</b>  |
| 1.1. Ar&Ge Çalışmalarının Tanımı.....                                       | 4         |
| 1.2. Ar&Ge Çalışmaları ile İlgili Literatür Taraması.....                   | 5         |
| <b>2. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....</b>                                   | <b>9</b>  |
| 2.1. Batarya Enerji Depolama Sistemi .....                                  | 11        |
| 2.2. Lityum İyon Piller .....                                               | 14        |
| 2.3. Lityum Oksijen Piller .....                                            | 17        |
| 2.3.1. Li-O <sub>2</sub> pil hücresi çalışma prensibi .....                 | 18        |
| <b>3. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA).....</b>                                  | <b>21</b> |
| 3.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Çerçevesi .....                            | 21        |
| 3.2. Yaşam Döngüsü Analizinin Adımları.....                                 | 23        |
| 3.2.1. Hedef ve kapsam tanımı.....                                          | 23        |
| 3.2.2. Envanter analizi.....                                                | 25        |
| 3.2.3. Etki değerlendirme .....                                             | 25        |
| 3.2.4. Yorumlama.....                                                       | 29        |
| 3.2.5. Yaşam döngüsü analizi veri tabanları ve programları.....             | 29        |
| 3.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirme EA ve LIB'lere Yönelik Bazı Çalışmalar ... | 29        |
| <b>4. MATERYAL VE METOT .....</b>                                           | <b>33</b> |
| 4.1. Hedef ve Kapsam .....                                                  | 33        |
| 4.2. Envanter Analizi.....                                                  | 35        |
| 4.2.1. Üretim Envanteri .....                                               | 36        |
| 4.2.1.1. Katot üretimleri .....                                             | 36        |
| 4.2.1.2. Elektrolit üretim süreçleri .....                                  | 44        |
| 4.2.1.3. Separatör ve Anot.....                                             | 45        |
| 4.2.2. Ulaştırma Aşaması .....                                              | 45        |
| 4.2.3. Hücre Birleştirme .....                                              | 45        |
| 4.2.4. Kullanım (elektrokimyasal test) aşaması .....                        | 46        |
| 4.2.5. Yaşam sonu aşaması .....                                             | 47        |
| 4.3. Optimizasyon .....                                                     | 47        |
| 4.4. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme .....                                 | 48        |
| 4.5. Hassasiyet ve Belirsizlik Analizi .....                                | 48        |
| <b>5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>                                        | <b>51</b> |

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi Sonuçları..... | 51        |
| 5.1.1. Üretim kaynaklı sonuçlar .....                  | 53        |
| 5.1.2. Kullanım aşamasındaki sonuçları.....            | 55        |
| 5.2. Optimizasyon sonuçları.....                       | 57        |
| 5.3 Hassasiyet Analizi .....                           | 60        |
| 5.4. Belirsizlik Analizi .....                         | 61        |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                       | <b>63</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                  | <b>65</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                   | <b>73</b> |



## **KISALTMALAR**

|                  |                                          |
|------------------|------------------------------------------|
| <b>Ar&amp;Ge</b> | : Araştırma ve Geliştirme                |
| <b>EA</b>        | : Elektrikli Araçlar                     |
| <b>GWP</b>       | : Küresel Isınma Potansiyeli             |
| <b>ISO</b>       | : Uluslararası Standartlar Organizasyonu |
| <b>LCIA</b>      | : Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme       |
| <b>LCA</b>       | : Yaşam Döngüsü Analizi                  |
| <b>LIB</b>       | : Lityum İyon Piller                     |



## **SİMGELER**

**CO<sub>2</sub>** : Karbondioksit

**Li-O<sub>2</sub>** : Lityum Oksijen Piller





## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.1.</b> Trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı .....                                       | 1  |
| <b>Tablo 2.1.</b> Araçlarda kullanılan pillerin teknolojilerine genel bir bakış (Jia, 2015) .                           | 14 |
| <b>Tablo 2.2.</b> Lityum iyon pil gelişimi (Wang, 2021).....                                                            | 16 |
| <b>Tablo 2.3.</b> Li-iyon ve Li-oksijen ile karşılaştırma (Linden, 2002).....                                           | 18 |
| <b>Tablo 3.1.</b> LCIA aşamaları (Taşkın, 2018).....                                                                    | 26 |
| <b>Tablo 3.2.</b> LCIA’da en çok kullanılan etki kategorileri (Huijbregts, 2017).....                                   | 28 |
| <b>Tablo 3.3.</b> LCA’da kullanılan yazılımlar (Bauer, 2015) .....                                                      | 29 |
| <b>Tablo 3.4.</b> EA ve LIB’lere yönelik çalışmalar .....                                                               | 31 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Hücre bileşenleri ve malzemelerinin açıklaması.....                                                   | 36 |
| <b>Tablo 4.2</b> $\alpha$ -MnO <sub>2</sub> katot üretim envanteri girdileri ve çıktıları .....                         | 37 |
| <b>Tablo 4.3.</b> $\alpha$ -MnO <sub>2</sub> + Ru katot üretim envanteri girdileri ve çıktıları .....                   | 38 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Ag <sub>0.4</sub> Mn <sub>8</sub> O <sub>16</sub> Katot Üretim Envanteri Girdileri ve Çıktıları ..... | 39 |
| <b>Tablo 4.5.</b> NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Katot Üretim Envanteri Girdileri ve Çıktıları .....                  | 41 |
| <b>Tablo 4.6.</b> Nikel nitrat heksahidrat ve kobalt nitrat heksahidrat modellemesi .....                               | 42 |
| <b>Tablo 4.7.</b> NiO Katot Üretim Envanteri Girdileri ve Çıktıları .....                                               | 43 |
| <b>Tablo 4.8</b> Ni köpük üretimine yönelik envanter verileri .....                                                     | 44 |
| <b>Tablo 4.9.</b> Elektrolitin malzeme girdileri (Huijbregts, 2016).....                                                | 44 |
| <b>Tablo 4.10.</b> Çalışmada kullanım aşamasında tüketilen elektrik miktarı.....                                        | 47 |
| <b>Tablo 5.1.</b> Li-oksijen pilin tüm etki kategorileri için LCIA sonuçları .....                                      | 52 |
| <b>Tablo 5.2.</b> Elektrokimyasal test sürecinde (LCIA) sonuçları .....                                                 | 55 |
| <b>Tablo 5.3.</b> CV test sürecinde (LCIA) sonuçları.....                                                               | 56 |
| <b>Tablo 5.4.</b> Optimizasyona ait sonuçlar .....                                                                      | 57 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.1.</b> Batarya teknolojilerinin evrimi: Geçmiş, Bugün ve Gelecek (Cheeweewattanakoon, 2014). ....                                                                                                                                                                         | 2  |
| <b>Şekil 1.2.</b> (a) 2010'dan 2020'ye kadar küresel elektrikli araç satışları ve stokları; (b) 2010'dan 2020'ye kadar elektrikli araçların toplam küresel satışları; (c) 2010'dan 2020'ye kadar elektrikli araç satışlarında ilk altı ülke; (d) 2019'dan 2030'a kadar küresel ..... | 2  |
| <b>Şekil 2.1.</b> Enerji kaynakları.....                                                                                                                                                                                                                                             | 9  |
| <b>Şekil 2.2.</b> Enerji birçok farklı biçimde depolanabilmektedir; mekanik, kimyasal, elektriksel, elektrokimyasal ve termal depolanma çeşitleridir (Karaman, 2022). ....                                                                                                           | 11 |
| <b>Şekil 2.3.</b> Bir hücrenin şeması (Reddy, 2020) .....                                                                                                                                                                                                                            | 12 |
| <b>Şekil 2.4.</b> IEA'ya göre beklenen pil teknolojisi ticarileştirme planı (IEA, 2018) .....                                                                                                                                                                                        | 15 |
| <b>Şekil 2.5.</b> LIB hücre tasarımı (Dunn, 2011) .....                                                                                                                                                                                                                              | 15 |
| <b>Şekil 2.6.</b> LIB şarjdeşarj mekanizması (Sashmitha, 2023) .....                                                                                                                                                                                                                 | 16 |
| <b>Şekil 3.1.</b> LCA genel tipleri (Messagie, 2010) .....                                                                                                                                                                                                                           | 22 |
| <b>Şekil 3.2.</b> LCA temel adımları (Messagie, 2010) .....                                                                                                                                                                                                                          | 23 |
| <b>Şekil 3.3.</b> LCIA küresel ısınma potansiyeli şematik olarak gösterme (Karaca, 2016) .....                                                                                                                                                                                       | 28 |
| <b>Şekil 4.1.</b> Çalışmanın sistem sınırlarına bakış .....                                                                                                                                                                                                                          | 34 |
| <b>Şekil 4.2.</b> Çalışma kapsamında kullanıldığı katot cinsleri .....                                                                                                                                                                                                               | 35 |
| <b>Şekil 4.3.</b> $\alpha$ -MnO <sub>2</sub> katot hazırlaması.....                                                                                                                                                                                                                  | 37 |
| <b>Şekil 4.4.</b> $\alpha$ -MnO + Ru katot hazırlaması.....                                                                                                                                                                                                                          | 38 |
| <b>Şekil 4.5.</b> Ag <sub>0.4</sub> Mn <sub>8</sub> O <sub>16</sub> Katot Hazırlaması.....                                                                                                                                                                                           | 40 |
| <b>Şekil 4.6.</b> NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Katot Hazırlaması .....                                                                                                                                                                                                           | 41 |
| <b>Şekil 4.7.</b> NiO katot hazırlaması .....                                                                                                                                                                                                                                        | 43 |
| <b>Şekil 4.8.</b> ECC-Air El-cell (El-Cell GmbH, n.d.). ....                                                                                                                                                                                                                         | 46 |
| <b>Şekil 5.1.</b> Katot tiplerine göre GWP sonuçları .....                                                                                                                                                                                                                           | 53 |
| <b>Şekil 5.2.</b> Hassasiyet analizi Türkiye, Fransa ve İsveç'e göre sonuçları .....                                                                                                                                                                                                 | 60 |
| <b>Şekil 5.3.</b> Monte Carlo analizinin sonuçları .....                                                                                                                                                                                                                             | 62 |



## Li-O<sub>2</sub> PİL LABORATUVAR AR-GE ÇALIŞMALARININ ÇEVRESEL ETKİSİ VE OPTİMİZASYONU

### ÖZET

21. yüzyılda enerji depolama teknolojileri, artan enerji talebi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu için büyük önem kazanmıştır. Etkili enerji depolama sistemleri, güç üretim maliyetlerini düşürürken verimliliği artırır ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlar. Özellikle enerji arz ve talep dengesizliklerini gidermek ve elektrik şebekelerinin esnekliğini artırmak için enerji depolama kritik bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin çevresel etkilerinin anlaşılması, malzeme geliştirme çalışmaları ve mevcut teknolojilerle ilişkilerinin değerlendirilmesiyle mümkündür.

Yaşam döngüsü analizi (LCA), ürünlerin veya süreçlerin çevresel etkilerini sistematik bir şekilde değerlendirmek için kullanılan kapsamlı bir yöntemdir. Bu analiz, enerji depolama teknolojilerinde çevresel iyileştirmeler yapılmasını sağlamak için kritik bir araçtır. Ayrıca, Ar-Ge çalışmaları, malzeme seçiminden üretim süreçlerine kadar sürdürülebilir çözümler geliştirilmesine olanak tanıyarak, enerji depolama sistemlerinin çevresel etkilerinin azaltılmasında önemli bir rol oynar.

Bu çalışmada, Li-O<sub>2</sub> pil hücresinin geliştirilmesine yönelik laboratuvar çalışmalarının çevresel etkileri yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemiyle incelenmiştir. Ar-Ge çalışmaları ise bu teknolojilerin performansını artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak için yenilikçi çözümler üretmede kritik bir rol oynamaktadır. Çalışma, fonksiyonel birim olarak “5 katot geliştirme” laboratuvar çalışması belirtilmiştir. Katot üretiminde kullanılan Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub> ve NiO malzemelerinin otoklav süreçlerinden dolayı yüksek çevresel etkilere yol açtığını göstermiştir. En yüksek çevresel etkilerin kullanım aşamasında olduğu ve bu etkilerin %89'unun Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) ile Kanserojen Toksisite Potansiyeli (HTPcancer) kategorilerinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmaları, çevresel etkileri %16 oranında azaltmayı mümkün kılmıştır.

Enerji üretim yöntemlerinin çevresel etkiler üzerindeki belirgin rolü de ortaya konmuştur. Türkiye’de fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin GWP’yi artırdığı, Fransa’da ise nükleer enerji kullanımıyla daha düşük çevresel etkiler gözlemlendiği tespit edilmiştir. Toplam GWP, 2010.90 kg CO<sub>2</sub>-eş olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, enerji depolama teknolojilerinin sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerini anlamak için önemli bilgiler sunmaktadır.

LCA analizlerinde SimaPro 9.5.0.0 yazılımı ve ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) etki değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, çevresel etkilerin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımış ve enerji depolama teknolojilerinin çevresel etkilerinin azaltılmasında değerli bir referans sağlamıştır. Çalışma, Ar-Ge ve sürdürülebilirlik çalışmaları için rehber niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Yaşam Döngüsü Analizi, Lityum Oksijen Pilleri, Ar&Ge çalışmaları, Enerji depolama, optimizasyon.



## **ENVIRONMENTAL IMPACT AND OPTIMISATION OF Li-O<sub>2</sub> BATTERY LABORATORY R&D STUDIES**

### **SUMMARY**

In the 21st century, energy storage technologies have become increasingly critical due to growing energy demand and the integration of renewable energy sources. Effective energy storage systems not only reduce power generation costs but also enhance efficiency and enable the sustainable utilization of renewable energy resources. These technologies play a pivotal role in addressing energy supply demand imbalances and enhancing the flexibility of electrical grids. Moreover, understanding their environmental impacts requires the evaluation of materials development and their interrelations with existing technologies.

Energy storage technologies are essential for addressing the challenges associated with balancing energy supply and demand, especially with the increasing reliance on intermittent renewable energy sources such as solar and wind. These sources, while environmentally friendly, produce energy that is not always aligned with demand, creating the need for effective storage systems. Energy storage helps smooth out fluctuations in power generation by storing excess energy when demand is low and releasing it during peak demand periods. This capability enhances grid stability, reduces the need for backup power plants, and decreases overall energy production costs. Moreover, energy storage technologies can improve energy efficiency by reducing losses associated with energy transmission and distribution.

Common energy storage methods include batteries, supercapacitors, and thermal or mechanical storage systems. Batteries, such as lithium-ion and advanced options like lithium-oxygen (Li-O<sub>2</sub>) batteries, store electrical energy chemically and are widely used due to their high energy density and versatility. Supercapacitors, on the other hand, provide rapid bursts of power and are ideal for applications that require quick charging and discharging. Thermal storage systems, which store heat or cold for later use, and mechanical storage, such as pumped hydro and flywheels, offer additional solutions for balancing supply and demand.

Advanced systems, particularly lithium-ion and lithium-oxygen batteries, are at the forefront of energy storage due to their ability to store large amounts of energy in compact, lightweight designs, making them especially useful for electric vehicles (EVs) and mobile electronics. Li-O<sub>2</sub> batteries, in particular, promise even higher energy densities than lithium-ion batteries, offering significant advantages for long-duration storage and large-scale renewable energy applications. These technologies are crucial for achieving a sustainable energy future, as they enable the seamless integration of renewable energy sources into power grids. By storing excess energy generated during periods of high solar or wind output, these storage systems help ensure a reliable energy supply, even when renewable generation is low, thus facilitating the transition to a greener and more resilient energy infrastructure.

Lithium-oxygen (Li-O<sub>2</sub>) batteries offer several key advantages, including their exceptionally high theoretical energy density of approximately 3500 Wh/kg, which makes them ideal for energy-intensive applications. Their operation is based on relatively simple chemistry, relying on redox reactions between lithium ions and oxygen, both abundant and cost-effective resources. Furthermore, the use of atmospheric oxygen reduces dependence on limited materials, presenting a potentially sustainable energy storage solution. Developing effective catalysts and cathode materials, such as Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub> and NiO, is critical for enhancing reaction efficiency and minimizing side reactions, though these materials are associated with high environmental impacts due to energy-intensive manufacturing processes. Additionally, the production and disposal of Li-O<sub>2</sub> batteries pose environmental concerns, particularly due to the reliance on rare metals and autoclave processes. Another challenge is efficient oxygen management, which is essential for consistent performance but requires innovative design solutions. Addressing these issues is vital for realizing the full potential of Li-O<sub>2</sub> batteries in sustainable energy storage.

Li-O<sub>2</sub> batteries have the potential to revolutionize energy storage, particularly in sectors where weight and energy density are critical. Research is focused on improving the stability of materials, enhancing energy efficiency, and scaling up the technology for commercial applications. Advanced computational modeling and experimental techniques are being used to optimize material selection and battery design, paving the way for sustainable solutions.

The ongoing development of Li-O<sub>2</sub> batteries, coupled with advancements in life cycle assessment (LCA) methodologies, ensures that environmental impacts are continuously evaluated and mitigated. Through targeted research and development efforts, Li-O<sub>2</sub> batteries are expected to play a significant role in enabling a sustainable and energy efficient future.

Life Cycle Assessment (LCA) is a systematic method for analyzing the environmental impacts associated with every stage of a product's life, from raw material extraction and production to usage and end-of-life disposal. By providing a detailed understanding of a product's environmental footprint, LCA enables the identification of critical stages where improvements can significantly reduce impacts. For example, in energy storage technologies, such as lithium-ion and lithium-oxygen batteries, LCA assesses factors like greenhouse gas emissions, resource depletion, energy use, and toxicity potential. This method helps researchers and manufacturers pinpoint environmentally intensive processes, optimize material usage, and implement sustainable practices. Additionally, LCA is instrumental in comparing the environmental performance of different technologies or design choices, guiding policies and innovations toward achieving global sustainability goals.

Research and Development (R&D) plays a pivotal role in advancing technology by driving innovation, improving performance, and addressing existing limitations. In the context of energy storage systems, R&D efforts focus on discovering new materials, refining manufacturing processes, and optimizing system designs to enhance efficiency, reduce costs, and minimize environmental impacts. This includes exploring alternative and sustainable materials, improving energy density, increasing cycle life, and ensuring the safety and reliability of the technologies. R&D also involves developing new methodologies, such as advanced simulations and testing techniques, to better understand the behavior and performance of energy storage systems under real-world conditions. Furthermore, R&D fosters collaboration between academia,

industry, and government, enabling the rapid commercialization of emerging technologies and ensuring that energy storage solutions can meet the growing global demand for sustainable and reliable energy sources. Through continuous innovation, R&D accelerates the development of next-generation energy storage technologies, which are crucial for supporting the transition to a low-carbon economy and a more sustainable energy future. (R&D) efforts complement LCA by driving innovations in material selection, production techniques, and system optimization. These efforts aim to reduce environmental burdens, enhance performance, and promote scalability, ultimately contributing to the global transition toward cleaner and more efficient energy systems.

This study investigates the environmental impacts of laboratory-scale development of Li-O<sub>2</sub> battery cells using the LCA methodology, “5 cathodes development” laboratory study was used a functional unit. R&D initiatives, particularly in the production of cathode materials such as Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub> and NiO, have shown significant environmental impacts due to autoclave processes. The findings indicate that the highest environmental burdens occur during the usage phase, with 89% of these impacts concentrated in the Global Warming Potential (GWP) and Human Toxicity Potential (HTP, cancer) categories. Optimization efforts have demonstrated the potential to reduce environmental impacts by 16%.

The role of energy generation methods in environmental outcomes is also highlighted. In Turkey, fossil fuel-based energy production contributes significantly to GWP, while in France, nuclear energy usage results in comparatively lower environmental impacts. The total GWP for the analyzed process was calculated as 2010.90 kg CO<sub>2</sub>-equivalent. These findings provide valuable insights into the sustainability and environmental considerations of energy storage technologies.

The LCA analysis was conducted using the SimaPro 9.5.0.0 software and the ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) impact assessment method. This approach enabled a detailed evaluation of environmental impacts, serving as a valuable reference for reducing the carbon footprint of energy storage systems. The study underscores the importance of R&D and sustainability initiatives as guiding frameworks for improving energy storage technologies.

**Keywords:** Life Cycle Analysis, Lithium-Air Batteries, R&D Studies, Energy Storage, Optimization.



## 1. GİRİŞ

Dünyada hızla artan nüfus ve gelişmekte olan teknoloji ile birlikte, hareketliliği sağlamak için bireysel araçların ve toplu taşıma araçlarının kullanımı artırılmıştır. Enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtların küresel ısınma, iklim değişiklikleri, çölleşme, su kaynaklarının kirlenmesi, göçler ve hava kirliliği gibi hafife alınmaması gereken zararlı etkileri vardır. Bu zararlı etkileri en aza indirmek adına, teknolojinin gelişmesiyle beraber yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesi konusunda daha büyük adımlar atılmaya başlanmıştır.

Fosil yakıtların etkilerini azaltmak için yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji evlerimizde, sanayide ve ulaşım sektörü gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artışıyla beraber enerji depolama sistemleri de yaygınlaşmıştır (Şenpınar, 2006).

Türkiye’de 2023 yılında TÜİK verilerine göre:

**Tablo 1.1.** Trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı

| Trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı |                                    |                                                  |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 2023                                                      | Toplam araç sayısı 15.221.134      |                                                  |
|                                                           | Elektrik araç toplam sayısı 80.043 | Diğer yakıt cinsi araç toplam sayısı 151.057.060 |
|                                                           |                                    |                                                  |
| 2024(1)                                                   | Toplam araç sayısı 15.727.046      |                                                  |
|                                                           | Elektrik araç top. Sayısı 122.670  | Diğer yakıt cinsi araç top. Sayısı 155.690.570   |
|                                                           |                                    |                                                  |

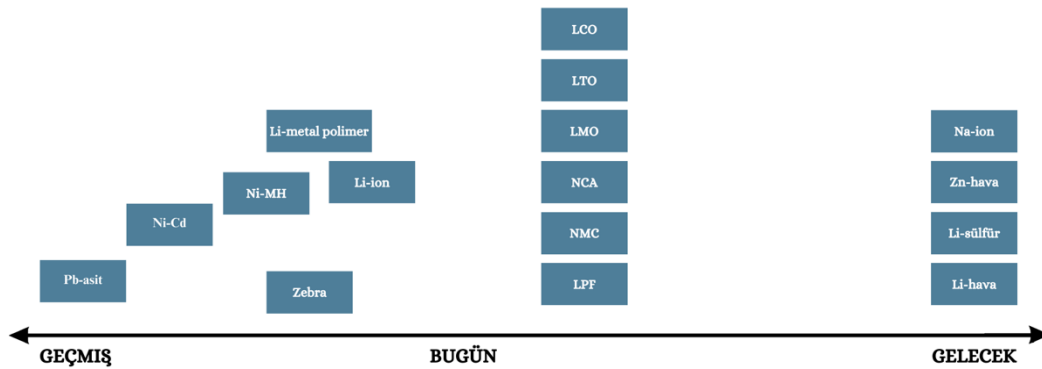
\*Veriler Haziran ayı sonu itibarıyladır.

Bu karşılaştırmadaki veriler dikkate alındığında ulaştırma sektöründeki çevresel etkilere vurgu yapılması gerekmektedir (Türkiye İstatistik Kurumu, n.d.).

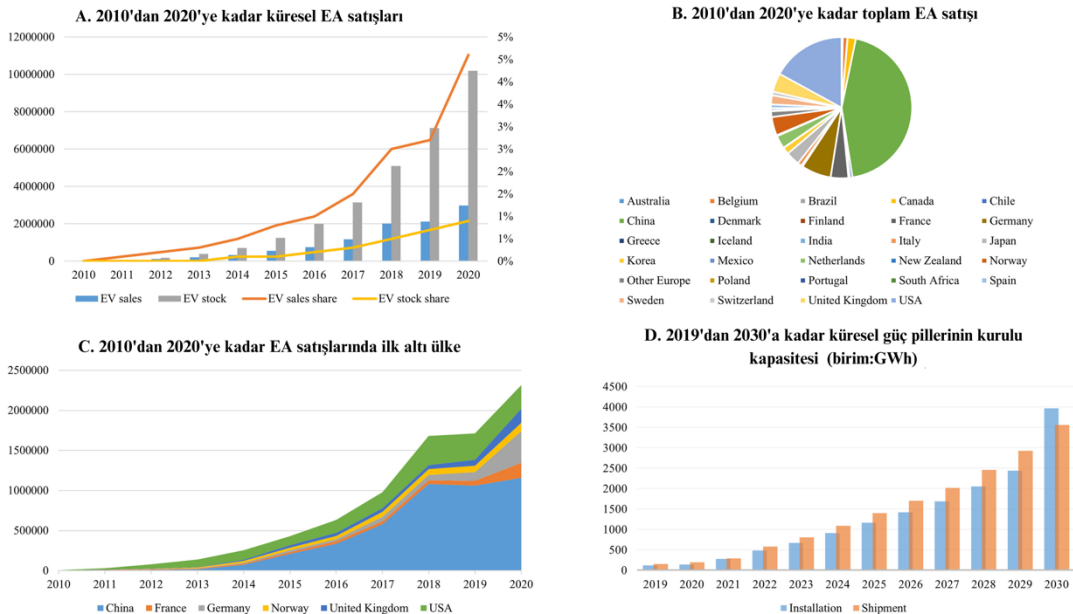
Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte elektrikli araçları oluşturan alt sistemler ve elektrikli araç teknolojileri de hızlı bir şekilde gelişmektedir. Elektrikli araçların en önemli bileşenlerinden biri enerji depolama sistemleridir (Gül, 2018).

Bu enerji depolama sistemlerinde yeniden şarj edilebilir batarya teknolojileri kullanılmaktadır (Ekici, 2019). Elektrikli araçlar (EA'lar) gibi alternatif araç

teknolojileri, dünyanın ulaşım için petrole olan bağımlılığını azaltmak ve ulaşım ile ilgili CO<sub>2</sub> emisyonlarını sınırlamak için geliştirilmektedir. Elektrikli araçların günümüze kadar olan gelişim sürecinde kullanılan batarya tercihi kurşun asit bataryalar ile başlayıp nikel metal hidrat ve lityum iyon şeklinde devam etmektedir. Son yıllarda lityum iyon bataryalarının hacimsel ve kütesel enerji yoğunluklarının diğer bataryalara kıyasla daha yüksek olması EA'larda kullanım oranını arttırmıştır (Rahman, 2014).



**Şekil 1.1.** Batarya teknolojilerinin evrimi: Geçmiş, Bugün ve Gelecek (Cheeweewattanakoon, 2014).



**Şekil 1.2.** (a) 2010'dan 2020'ye kadar küresel elektrikli araç satışları ve stokları; (b) 2010'dan 2020'ye kadar elektrikli araçların toplam küresel satışları; (c) 2010'dan 2020'ye kadar elektrikli araç satışlarında ilk altı ülke; (d) 2019'dan 2030'a kadar küresel

2020 sonu itibarıyla dünya çapında 10 milyon EA kullanıldı (Şekil 1.2.a ve 1.2.b). Bunlar arasında Çin dünyanın en büyük elektrikli araç satıcısı olup onu ABD, Almanya, Norveç, Fransa ve Birleşik Krallık takip etmektedir (Şekil 1.2.c) (IEA, 2021).

Gelecekte elektrikli araç satışlarının önemli ölçüde artmaya devam ederek 2025'te 18 milyona ve 2030'da 21 milyona ulaşması bekleniyor.

Küresel güç pillerinin kurulum ve sevkiyatlarının 2030 yılında 2963 GWh ve 3555 GWh'ye ulaşması bekleniyor (şekil 1.2.d) (Dolganova, 2020).

Elektrikli araçların yaygınlaşmasının ve tercih edilmesinin önündeki en büyük engellerden biri batarya sorunlarıdır ve maliyetleridir. Bu nedenle elektrikli araçların maliyetini düşürme çalışmaları yapılmaktadır. Batarya teknolojileri Geliştirerek ve artan ar-ge çalışmaları ile birlikte mevcut pillerin sorunlarının üstesinden gelmek ve çevre dostu olmalarını geliştirmek için birçok çalışma, elektrikli araçlara uygulanabilecek yeni nesil pil teknolojilerini araştırıldı. LNM, Li-S, Li-O<sub>2</sub> ve ZEBRA hücreleri, EA'lar için yeni nesil piller haline gelebilir (Çetin, 2021).

Elektrikli araçların temel bileşeni olan piller, çevresel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Önceki nikel-kadmiyum (Ni-Cd), kurşun-asit (Pb-Ac) ve nikel-metal hidrit (NiMH) pillerle karşılaştırıldığında lityum-iyon piller (LIB'ler), yüksek enerji, güç yoğunluğu, yüksek güvenilirlik ve çevre dostu avantajlarına sahiptir. Bu nedenle, lityum iyon fosfat (LFP), lityum nikel kobalt mangan oksit (NMC) ve lityum mangan oksit (LMO) gibi LIB'ler EA'larda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bai, 2020).

LCA, bir ürünün veya sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel performansını değerlendirmek için standartlaştırılmış bir metodolojidir. Uluslararası Standartlar Organizasyonu'na (ISO) göre, LCA'nın yürütülmesinde ISO 14.040 ve ISO 14.044 yaygın olarak kullanılmaktadır (Verma, 2021).

EA'ların çevresel etkilerini niceliksel olarak analiz etmek için yaşam döngüsü değerlendirmesinin (LCA) uygulanması, EA'ların gelişimini dengelemeye yardımcı olacak ve böylece EA'ların daha fazla teşvik edilmesi için talimatlar sağlayacaktır.

Bu çalışma, EA pillerinin erken gelişim aşamasında çevresel katkısını açıklığa kavuşturmak için pillerin araştırma ve geliştirme (Ar&Ge) süreçlerinden kaynaklanan üretim ve kullanım aşamaları ile yaşam sonu aşamalarındaki çevresel etkilerini

araştırmaktadır. Böylece, hem Ar&Ge süreçlerinden kaynaklı çevresel etkileri tespit etmek hem de henüz erken gelişim evresinde teknolojinin çevresel performanslarını iyileştirmeye yönelik optimizasyon potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Google Scholar, Science Direct ve Web of Science gibi veri tabanlarında şu anahtar kelimeler kullanılarak aranarak, literatür araştırması yapılmış ve literatüre katkı sunulabilecek başlıklar belirlenerek çalışma konusuna karar verilmiştir: (“yaşam döngüsü değerlendirmesi” VE “lityum iyon piller” VEYA “elektrikli araçlar”), (“yaşam döngüsü analizi” VE “EA pilleri” VEYA “LIB'ler”), (“enerji depolama” VE “LCA”).

### **1.1. Ar&Ge Çalışmalarının Tanımı**

Araştırma ve deneysel geliştirme (AR-GE) faaliyetlerinin tanımı şöyle yapılmaktadır: (AR-GE), insan, kültür ve toplumun bilgisinden oluşan bilgi dağarcının arttırılması ve bu dağarcığın yeni uygulamalar tasarlamak üzere kullanılması için sistematik bir temelde yürütülen yaratıcı çalışmalardır (TÜBİTAK, n.d.).

Ar-Ge kavramının araştırma kısmı; bilinmeyen bir konun anlaşılmasına yönelik yapılan bilimsel çalışmalar, geliştirme kısmı ise mevcut bir bilginin veya yeni teknolojinin yeniden düzenlenerek daha iyi ve verimli bir hale getirilmesi sürecidir (Ayhan, 2002).

AR-GE faaliyetleri, teknoloji geliştirmenin işlevsel bir aracı olup, yeni ürünün tasarım ve imalatında olduğu kadar, ürün geliştirmede de büyük öneme sahiptir. AR-GE altyapısı olmadan bir işletme ürünlerini rekabete açamaz, rekabet gücü sağlayacak bir ürün yelpazesi gerçekleştiremez. İmalat sanayinde teknolojinin gelişmesi için AR-GE vazgeçilmez bir olgudur (OECD, 2002).

Ar-Ge teknolojilerinin geniş bir alanda kullanılması, enerji verimliliği ve talep yönetimi yaklaşımlarına ek olarak sera gazı emisyonlarını azaltmak ve sonuçta dengeyi sağlamak için gereklidir (Figuerola, 2008).

Ar-Ge, işletmelerin yeni ürünler ve üretim süreçleri geliştirmeye yönelik sistematik ve yaratıcı faaliyetleridir. İşletmelerin mevcut sorunlara çözüm bulma gerekliliğinin yanı sıra, yeni üretim yöntemleri ve ürünler keşfetme, mevcut ürün ve üretim yöntemlerini iyileştirme ve büyümeye olan ihtiyaçları göz önüne alındığında, araştırma-geliştirme fonksiyonunun işletmeler için önemi daha iyi anlaşılabilir. Amaçları:

- Yeni ürün ve süreçleri geliştirmek
- Mevcut ürün ve malzemeler için yeni kullanım alanları bulmak
- Yeni üretim teknikleri bulmak veya mevcut üretim tekniklerini geliştirmek
- Rakip işletmelerin gelişmelerine ayak uydurarak rekabet gücünü korumak
- İşletmede verimliliği artırmak
- Üretim maliyetlerinin düşürülmesini sağlamak
- İşveren-işçi ilişkilerinin iyileştirilmesini sağlamak
- Yönetime doğru ve gerekli bilgilerin zamanında ulaşmasını sağlayacak yönetim bilişim sisteminin kurulmasını sağlamaktı (Zerenler, 2022) (Işık, 2007).

İnovasyon faktörü, kaynak verimliliğini artıran Ar-Ge faaliyetlerine ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını sağlamak ve yenilenebilir enerji kullanımını artırmak için ileri teknolojiler elde etmeyi amaçlayan yeşil yatırımlara odaklanarak ekolojik ayak izini azaltabilmekte ve ekonomik kalkınmayı sağlayabilmektedir (Ghita, 2018).

Ar-Ge faaliyetleri, hem enerji ve hammadde gereksinimini azaltıp sermaye maliyetlerini düşürmek hem de yenilenebilir enerji üretiminin verimliliğini artırmak suretiyle yenilenebilir enerji teknolojilerinin rekabet gücünü artırmaktadır. Bilgi sermayesinde bir artışı temsil eden Ar-Ge, teknolojik bilgi gelişimini ve yayılımını sağlayarak yenilenebilir enerji üretimini teşvik etmektedir (Paramati, 2020).

Bu tez çalışmasında da Li piller ve enerji depolama sistemleri üzerine yapılan bilimsel çalışmalar için, literatür araştırması yapılmış ve literatürde mevcut olan bilimsel çalışmalardan faydalanılmıştır. Faydalan kaynakların seçilirken odak noktası Li-oksijen piller olmuştur, ancak bunun yanında depolama sistemleri ile ilgili diğer detaylar üzerinde de durulmuştur.

Çalışma için ilgili literatür araması için belirli anahtar kelimeler tanımlanmış ve kullanılmıştır. Bu anahtar kelimeler arasında (enerji depolama, Li-iyon piller, Li-O<sub>2</sub> , AR-GE faaliyetleri).

## **1.2. Ar&Ge Çalışmaları ile İlgili Literatür Taraması**

Benjamin T. ve ark. (2011), Çin ve Avrupa otomotiv sektörlerinin Ar-Ge stratejilerini karşılaştırarak düşük maliyetli inovasyon ile sistem yeniliği yaklaşımlarının etkilerini

değerlendirmiş. CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması, Ar-Ge yatırımları, patent başvuruları ve verimlilik analizleri üzerine yapılan araştırma, enerji sektöründeki yenilikçi çözümlerle birlikte otomotivdeki yıkıcı inovasyon süreçlerini incelemiştir. Avrupa, premium segmentteki sistem entegrasyonu ve teknolojik üstünlüğüyle dikkat çekerken, Çin ise düşük maliyetli inovasyon ve elektrikli araç teknolojilerindeki gelişimiyle küresel rekabet avantajı elde etmeyi amaçlamıştır (Thoma, 2011).

Sinho Ch. Ve ark. (2018), modern elektronik cihazların ihtiyaçlarını karşılamak için lityum-iyon pillerin (LIB'ler) gelişimini ve performanslarını iyileştirme çabalarını ele almıştır. Araştırmalar, enerji yoğunluğu, hız kapasitesi, döngü ömrü ve güvenliği artırmak amacıyla yeni elektrot malzemelerine odaklanmıştır. Yeni geliştirilen malzemelerle yapılan tam hücre testleri, yüksek elektrokimyasal performans ve ticari kullanım potansiyeli göstermiştir. Ayrıca, lityum-oksijen ve lityum-kükürt piller gibi yeni nesil teknolojiler, daha yüksek enerji yoğunluğu ve hafiflik sunma potansiyeline rağmen ticari uygulamalarda çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Giyilebilir cihazlara yönelik esnek ve gerilebilir LIB'lerin geliştirilmesi ise pil performansı ile malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirerek yeni pazarlara hitap etmiştir (Choi, 2018).

Literatür araştırma yaparken bazı çalışmalar (LCA) metodu kullanılarak üniversite kampüslerinde mevcut uygulamaları inceleyerek, bulguları ve iyileştirme önerilerini sunmayı amaçlandığını göstermektedir.

Kuldip s. ve ark. (2018), BITS Pilani, Pilani kampüsünün karbon ayak izini ISO 14064 standardına göre entegre yaşam döngüsü analiziyle değerlendirmiştir. Ecoinvent v3.0 veri seti ve Umberto NXT Universal yazılımı kullanılmıştır. Sera gazı emisyonlarında en büyük pay, yılın sekiz ayı kullanılan klima sistemlerinin enerji tüketiminden kaynak olduğunu gözlenmiştir. Çalışma, veri toplanmasının zorluklarına rağmen, sera gazı azaltım potansiyeline yönelik farkındalığı artırmıştır ve diğer üniversiteler için bir karbon yönetim planı örneği sunulmuştur (Singh, 2018).

Alba A. ve ark. (2021), üniversite kampüslerini küçük bir şehir olarak ele alarak çevresel etkilerini değerlendirmiş ve AB'nin 2030 ve 2050 hedeflerine ulaşmak için iyileştirme stratejilerini analiz etmiştir. Çalışma, yaşam döngüsü boyunca inşaat, bakım ve yenileme gibi tüm aşamaları dikkate almıştır. Sonuçlar, pasif rehabilitasyon ve aktif iyileştirme stratejileriyle (örneğin, kamu aydınlatması değişimi, yalıtım, güneş

panelleri, biyokütle üretimi) 2030 hedeflerine ulaşılabilirliğini, ancak 2050 hedefleri için enerji tüketiminin daha fazla azaltılması ve yenilenebilir enerji üretiminin %94 artırılması gerektiğini göstermiştir (Alba, 2021).

Diogo A. ve ark. (2014), İspanya'daki UAB kampüsünde yapılan Malzeme Akış Analizi (MFA) ve (LCA) analizlerini yapmıştır. Sonuçlar, enerji tüketimi, tüm girdilerin %50'sini oluşturarak önemli bir yer tutmuş ve enerji tüketiminin %69,3'ü dolaylı akışlarla ilişkili olduğunu gösterilmiş. LCA sonuçları, enerji kaynaklarının tüketimi nedeniyle tüm etkilerin %92'sinin İklim Değişikliği Potansiyeli (CCP) etki kategorisinde yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Ayrıca, Katalonya bölgesindeki endüstriyel poligonlarla karşılaştırıldığında, hizmet poligonlarının çevresel yükleri daha düşük olduğunu hizmet poligonları maddi olmayan ürünler üretildiğini anlatmıştır (Gabarrell Durany, 2015).

Viachaslau F. ve ark. (2021), COVID-19 karantinası sırasında bir üniversitenin karbon ayak izini incelemiş ve çevrimiçi eğitimin karbon etkilerine dair tartışmaları ele almıştır. Birleşik Krallık'taki bir üniversite üzerinden yapılan vaka çalışması, çevrimiçi eğitimin karbon tasarrufu sağlama potansiyelinin başlangıçta tahmin edilenden daha düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, karma öğretimin tamamen çevrimiçi veya kampüsteki öğretimden daha az karbon salınımına yol açabileceği vurgulanmıştır. Çalışma, üniversite müfredatlarının tasarımı iklim etkilerinin dikkate alınması gerektiğini savunmuştur (Filimonau, 2021).

G. Bueno ve ark. (2021), Bask Ülkesi Üniversitesi UPV/EHU'nun akademik faaliyetlerinin çevresel ve sosyal etkilerini incelenmiştir. Çevresel etkilerde ulaşımın büyük bir payı olduğu, özellikle üniversite dışındaki faaliyetlerin de etkili olduğu vurgulanmıştır. Sosyal etkilerde ise emek faaliyetlerinin katkısı öne çıkmakta, çocuk işçiliği ve okuma yazma bilmemek gibi izlere rastlanmıştır. Çalışma, üniversitenin çevresel ve sosyal etkilerini azaltmak için çeşitli önlemler önerimekte bulunmuştur. Daha sürdürülebilir bir üniversite için büyük iyileştirme potansiyeline sahip olup, Çok Kriterli Karar Analizi (MCDA) metodolojisi ile paydaş katılımının da gerektiği belirtilmiştir (Bueno, 2021).

- **Tezin amacı**

İçinde bulunduğumuz hızla değişen düzende ilerleyen teknolojiyi yakalamak açısından elektrokimyasal performansı yüksek, maliyeti düşük pil teknolojileri

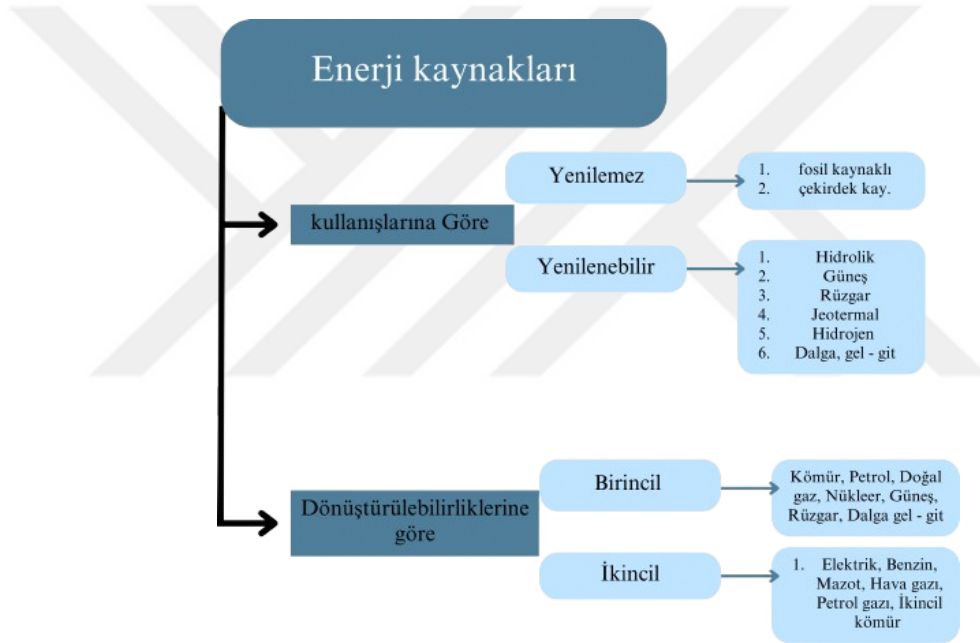
geliştirmek için yapılacak AR-GE faaliyetleri oldukça önemlidir. Bu amaç dikkate alındığında, mevcut tez çalışması lityum-oksijen pil teknolojileri için katot geliştirilmesi amacıyla yürütülen AR-GE faaliyetlerinin çevresel performansını artırır nitelikte sonuçlar içerdiği düşünülmektedir. Bu nedenle bu tezin amacı, gelecek nesil pil teknolojilerinin geliştirme faaliyetlerinin çevresel performansının değerlendirilmesi için yaşam döngüsü değerlendirmesinin (LCA) kullanılmasıdır. Mevcut durum tespiti ardından, yüksek etkiye sebep olan parametrelerin LCA sonuçlarına göre muhtemel optimizasyon modellemesini yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında incelenen noktalar şunlardır:

(1) Li-oksijen (Li-O<sub>2</sub>) pil üretimine ait mevcut AR-GE çalışmaları incelemektedir. (2) Yeni nesil piller Li-O<sub>2</sub> farklı katot üretimi incelemektedir. (3) LCA metodolojisini kullanarak Li-O<sub>2</sub> pili üretim, kullanım (elektrokimyasal testler) ve kullanım ömrü sonu aşamalarını incelemektedir. (4) Li-O<sub>2</sub> pili AR-GE çalışmalarından kaynaklı çevresel performansı, insan ve kaynaklar üzerindeki etkisini en aza indirmek amacıyla bir optimizasyon çalışması yapmaktadır. (5) optimizasyon çalışmasını desteklemek için bir hassasiyet analizi ve belirsizlik analizi geliştirmektedir.

## 2. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Enerji, toplum yaşamının kalitesini arttırmak için hem toplumun hem de endüstrinin kaliteli ve ekonomik anlamda hizmetine sunulan bir güç, aynı zamanda insan yaşamına ihtiyaç duyulan bir kaynaktır.

Enerji, soyut bir varlık olarak kabul edilen ve yalnızca biçimlerini ve dönüşümlerini gözlemleyerek anlaşılabilen bir kavramdır. Bu kavramın çeşitli tanımları bulunmakta ve farklı perspektiflerden ele alınmaktadır (Karakoç 2012).



Şekil 2.1. Enerji kaynakları

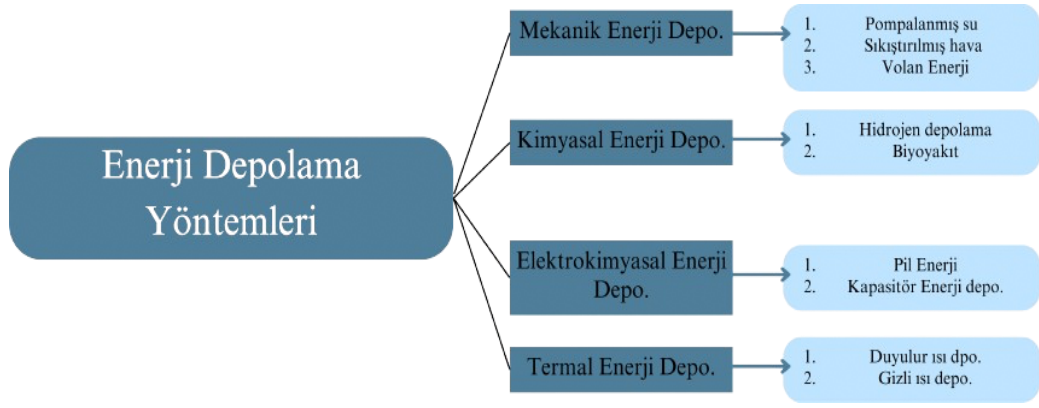
Enerji kaynakları, kullanışlarına göre (yenilenebilir ve yenilenemez) ve dönüştürülebilirliklerine göre (birincil ve ikincil) sistematik bir şekilde sınıflandırılarak anlaşılması kolaylaştırılabilir. Birincil enerji, doğrudan kullanılan doğal kaynakları (kömür, petrol, güneş vb.) ifade ederken, bu kaynakların dönüştürülmesiyle oluşan enerji türü ikincil enerji olarak tanımlanır. Tükenir enerji kaynakları sınırlı rezervlere sahip fosil yakıtları içerirken, tükenmez enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, hidroelektrik vb.) sürdürülebilir ve doğaya daha az zarar verir. Yenilenebilir enerji, karbon salınımını azaltma potansiyeliyle dünya genelinde artan yatırımlarla önem kazanmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2017).

Yenilenebilir enerji kaynakların kullanmanın en büyük sıkıntılardan biri de üretimde dalgalanmaların yaşanmasıdır. Bu da yenilenebilir enerji kaynağının olmadığı ya da yetersiz olduğu zamanlarda üretimin olmayacağı anlamına gelmektedir. Bu sıkıntısının üstesinden gelmenin en iyi yolu elde edilen enerjiyi depolamaktır. Enerji depolama yöntemi ile elde edilen fazla enerji depolanır ve kullanılan yenilenebilir enerjinin olmadığı veya yetersiz olduğu zamanlarda bu enerji kullanılabilir (BP Statistical Review of World Energy, 2022).

Enerji depolama; bir tür enerjinin daha sonra yeniden kullanılmak üzere başka bir türe veya aynı türe depolanması olarak tanımlanan ve aşılması gereken önemli bir sorundur. Enerji depolama fikri uzun yıllara dayanmaktadır (Dănilă, 2010).

Yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostudur, bu nedenle enerji üretiminde kullanımları sera gazı emisyonlarını azaltabilir. Dolayısıyla, enerji depolama teknolojisine duyulan ihtiyaç tamamen yenilenebilir enerjiye geçiş, modern enerji sistemleri için arz güvenliği ve istikrarının sağlanması, üretim sırasında enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması, maliyetlerin en aza indirilmesi ve enerjinin iletimi ve dağıtım sorunlarını azaltmak amacıyla enerji depolama teknolojisine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, tüketicilerin enerji ihtiyaçlarını her koşulda başarılı bir şekilde karşılayabilmek için enerji depolama teknolojisi büyük önem taşımaktadır (Hadjipaschalis, 2009).

Enerji Depolama Sistemleri (EDS), elektriğin ihtiyaç duyulduğunda üretilmesini ve üretimin talebi aşması durumunda depolanmasını sağlar. Düşük talep, düşük üretim maliyeti veya mevcut enerji kaynakları kesintili olduğu dönemlerde depolama yararlıdır (P. Medina, 2014).



**Şekil 2.2.** Enerji birçok farklı biçimde depolanabilmektedir; mekanik, kimyasal, elektriksel, elektrokimyasal ve termal depolanma çeşitleridir (Karaman, 2022).

Akla gelen ilk şeyin enerji depolama olduğu belirtildiğinde “Batteries”. Benjamin Franklin, Elektrik Bataryası terimini ortaya atan ilk kişilerden biriydi. Leaden gözlük kullanarak statik elektrikle ilgili çalışmalarını anlatırken İngiliz gazeteci Peter Collinson'a 1749 yılında yazdığı mektupta bundan bahsetmiştir. Zaman geçtikçe bugün kullanılan anlam haline geldi.

Enerji depolama teknolojileri akademik topluluk tarafından kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Piller, bu çalışmalarda spot ışığı altında olan konulardan biridir. Enerji depolama sistemlerinin biçimi olarak güç sistemi uygulamalarında pillerin kullanılması, günümüzde daha popüler bir araştırma ve uygulama konusu haline gelmiştir, bu tür sistemlere Pil Enerjisi Depolama Sistemi (BEDS) olarak adlandırılmaktadır. Yaygınlık nedeni, pillerin yenilenebilir kaynak üretiminin düzenlenmesi ve depolanması, izole edilmiş mikro şebekeler için ek rezerv, şebeke yardımcıları tarafından frekans kontrolü gibi derin uygulama alanlarına sahip olmasıdır (IEC Working Group & Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, 2011).

### 2.1. Batarya Enerji Depolama Sistemi

Batarya enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip en yaygın kullanılan enerji depolama sistemleri kategorisidir. (BEDS), küçük ölçekli yenilenebilir enerji kaynaklarının ana güç sistemi ağına entegrasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu, deşarj süresi, yaşam döngüsü, tepki süresi, maliyet ve verimlilik gibi özellikleri nedeniyle küçük ölçekli yenilenebilir

enerji entegrasyonu için en belirgin ve en uygun çözüm olarak görülebilir (Cheeweewattanakoon, 2014).

Çeşitli alternatif enerji depolama teknolojileri arasında elektrokimyasal enerji depolama, yüksek verimlilik, çok yönlülük ve esneklik gibi avantajlara sahiptir. Bir hücre, elektrik ve kimyasal enerji arasındaki enerjiyi iki yönlü olarak dönüştürebilir (Molina, 2013).

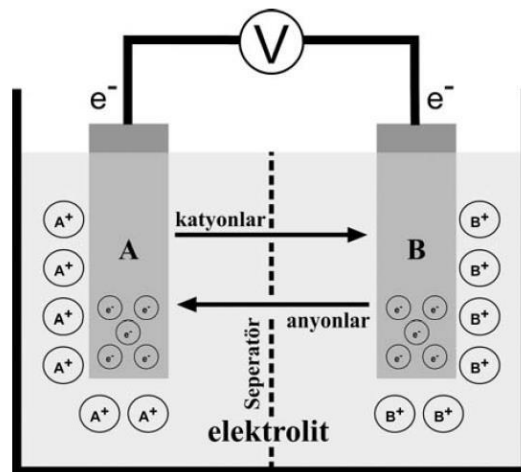
Piller, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çevirip bünyesinde depolayan sistemler olarak tanımlanabilir (TAP Derneği, 2004).

Pil, depolanan kimyasal enerjiyi doğrudan dış devre yoluyla negatiften pozitif bir elektrik geçişine dönüştüren, bir elektrik akımı üreten, pozitif ve negatif terminaller içeren bir cihazdır (Al-Ogaili, 2021).

Pil terminallerinde pozitif ve negatif elektrotlar arasındaki potansiyel farkı ile elektrik potansiyeli (voltaj) üretilen bir elektrokimyasal hücredir (Dhameja, 2002).

Bir pil hücresi beş ana bileşenden oluşur: ( 1 ) elektrotlar, ( 2 ) anot ve katot; ( 3 ) separatör; ( 4 ) terminaller; ve ( 5 ) bir kasa veya muhafaza (Dhameja, 2002).

Elektrolitler, katot ve anot arasında artı yüklü iyonları taşıma görevi üstlenmektedir. Separatör yani ayırıcı olarak kullanılan bölümde ise, sıvı elektrolitin kuruması sonucunda anot ve katot plakaların kısa devre olması ihtimalini ortadan kaldırmak için sistemde yer edinmektedir (Duffner, 2021).



Şekil 2.3. Bir hücrenin şeması (Reddy, 2020)

Bir galvanik hücre, anot ve katot olarak bilinen iki elektrot ve bir elektrolit içerir. İndirgenme işlemi daima katotta, oksidasyon ise her zaman anotta gerçekleşir.

Yukarıda gösterildiği gibi (şekil 2.3.), reaksiyon katodu anottan elektriksel izolasyon yoluyla kontrol altında tutulur. İki ayrı bölme, genellikle sıvı veya katı formda olan ve iyonları ileten ancak elektrik akımını geçirmeyen bir ortam ile birbirine bağlanır. Deşarj sırasında, iki elektrot arasında harici bir elektrik bağlantısı kurulur. Anotta gerçekleşen oksidasyon, katotta indirgenme tepkimesini sağlamak için devreden elektronları serbest bırakır. Hücredeki her iki bölümde yük dengesini korumak amacıyla, iyonlar bir tuz köprüsü yardımıyla karşılıklı olarak taşınır. Birincil hücrelerde, reaktantlar geri dönüşü olmayan bir tepkimeyle tamamen tüketilir. İkincil hücreler ise tersine çevrilebilir bir elektrokimyasal tepkimeye sahiptir ve bu nedenle şarj edilerek başlangıç durumlarına geri dönebilirler (Bunton, 2006).

Çoğunlukla aynı kimyasal yapıya, ölçülere ve elektrik kapasitelerine sahip piller, tek tek bir araya getirilerek pil grupları oluşturulabilir ve bunlara batarya bloğu veya kısaca adlandırıldığı gibi batarya denilebilir (Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği, n.d.).

Bir hücre tipik olarak 0,5 ile 5V arasında değişen nispeten düşük bir voltaj sağlar. Daha yüksek voltaj değerleri için hücreler seri bağlanır. Büyük kapasite için paralel bağlanırlar (Daniel, 2012).

Tek yönlü ise pil **primer** yapıda yani tek kullanımlık veya genel olarak kullanılan tabirle şarjsız bir sistemdir. Dönüşüm her iki yönde olabiliyorsa, yani elektrik enerjisi tekrar kimyasal enerjiye çevrilebiliyorsa ve bu suretle uzun sürelerle enerji kullanımı sağlanabiliyorsa pil **sekonder** yapıda veya diğer bir tabirle şarj edilebilir özelliklere sahip bir sistemdir (Brodd, 2005).

Endüstrinin hemen hemen her alanında kullanılan pek çok farklı pil çeşiti mevcuttur, içerdikleri elektrot ve seçilen elektrolitlerine bağlı olarak her biri farklılık göstermektedir. Tablo 2.1.'de gösterildiği gibi elektrikli araçların (EA) pil (Pb-asit: kurşun-asit, Ni-Cd: nikel-kadmiyum, NiMH: nikel-metal hidrit, ZEBRA, Li-iyon: lityum-iyon, LiPO: lityum Polimer, LiFePO<sub>4</sub>: lityum-Demir-fosfat, Zn-hava: çinko hava, Li-sülfür: lityum sülfür, Li-hava: lityum hava bataryalar) (Catenacci, 2015).

**Tablo 2.1.** Araçlarda kullanılan pillerin teknolojilerine genel bir bakış (Jia, 2015)

| Batarya Çeşitleri | Nominal Gerilim (V) | Enerji Yoğunluğu (Wh/kg) | Çevrim Ömrü (a) | Hafıza Etkisi | Çalışma Sıcaklığı Aralığı (0C) |
|-------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|
| Pb-acid           | 2                   | 35                       | 1000            | Yok           | -15 / +50                      |
| NiCd 50-802000    | 1,2                 | 50-80                    | 2000            | Var           | -20 / +60                      |
| NiMH              | 1,2                 | 70-95                    | <3000           | Nadir         | -20 / +60                      |
| Zebra             | 2,6                 | 90-120                   | >1200           | Yok           | +245/+350                      |
| Li-ion            | 3,6                 | 118-250                  | 2000            | Yok           | -20/+60                        |
| LiPo              | 3,7                 | 130-225                  | >1200           | Yok           | -20/60                         |
| LiFePO4           | 3,2                 | 120                      | >2000           | Yok           | -45/+75                        |
| Zn-air            | 1,65                | 460                      | 200             | Yok           | -10/+50                        |
| Li-S              | 2,5                 | 350-650                  | 300             | Yok           | -60/+60                        |
| Li-air            | 2,9                 | 1300-2000                | 100             | Yok           | -10/+70                        |

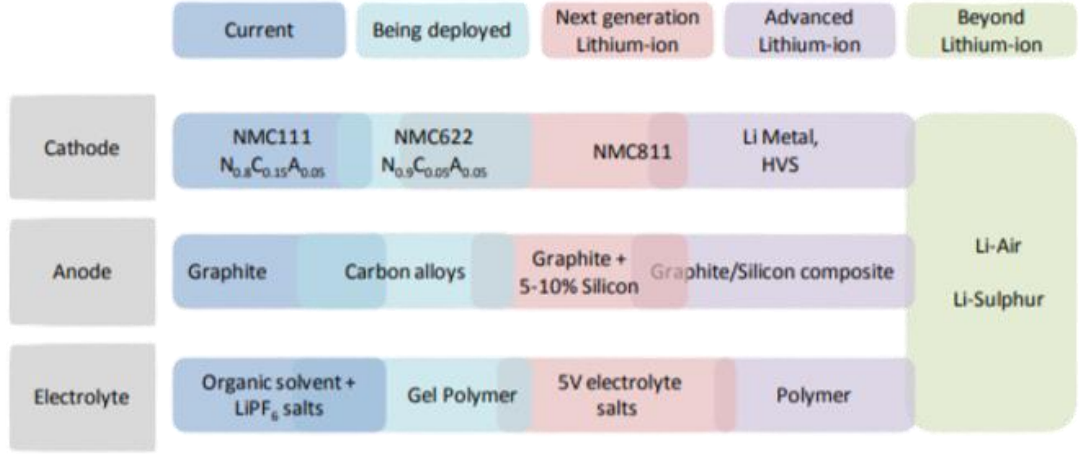
Batarya teknolojileri üzerine araştırma geliştirme çalışmaları (AR-GE) halen devam etmektedir. Verimli, güvenli ve kesintisiz bir enerji arzı sağlamak için bataryaların bir Batarya Yönetim Sistemi (BYS) tarafından yönetilmesi yapılan AR-GE çalışmalarında da görülmekte ve belirtilmektedir. BYS, bataryanın şarj, deşarj, sıcaklık kontrolü, hücre dengesi gibi işlevlerini izler ve yönetir. Ayrıca, bataryanın belirlenen kullanım sınırlarının dışına çıkmasını engelleyerek sistemin güvenliğini sağlar. Bu nedenle, depolama sistemleri kullanan elektrikli araçlarda BYS'nin olması zorunludur (Efe, 2021).

Enerji depolaması gelecekte herhangi bir zamandan daha önemli olacaktır. Sayısız enerji depolama teknolojileri arasında lityum piller, yüksek özgül ve enerji yoğunluğu nedeniyle giderek daha önemli bir rol oynayacaktır (Nagaura, 1990).

## 2.2. Lityum İyon Piller

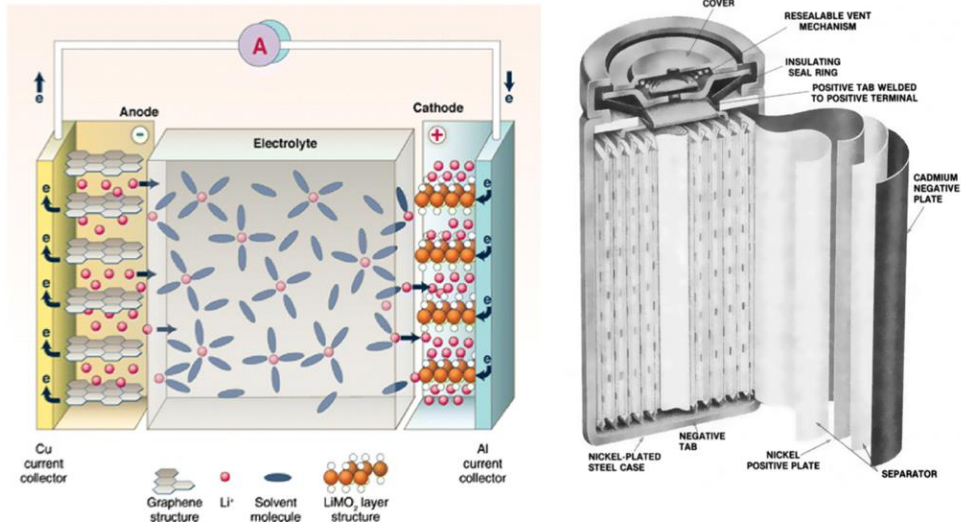
Li-iyon piller 1990'ların başından beri SONY tarafından ticari olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Li-iyon piller, yüksek verimleri ve uzun şarj döngüleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir (Meena, 2014).

Günümüzde, LIB'ler pazarı sadece taşınabilir elektrikli cihazlarda ve giyilebilir cihazlarda değil, aynı zamanda elektrikli araçlarda (EA'lar) ve akıllı şebekelerde de kullanımlarını kapsayacak şekilde genişlemektedir (Patil, 2008).



**Şekil 2.4.** IEA'ya göre beklenen pil teknolojisi ticarileştirme planı (IEA, 2018)

Lityum-iyon bataryalarının çeşitleri kimyasallarla hazırlanan diğer batarya çeşitlerine nazaran en üst düzeyde doldurulabilme yoğunluklarından ötürü daha hafiftirler. Küçük ve taşınabilir özelliktedir. Hafıza etkisi problemi yoktur, dolayısıyla da bu pilleri şarj etmek için bütünüyle boşalmalarını beklemek gerekli görülmemektedir. Ayrıca şarj yarıda kesmek pil açısından negatif bir etki meydana getirmeyecektir (Linden, 1995).



**Şekil 2.5.** LIB hücre tasarımı (Dunn, 2011)

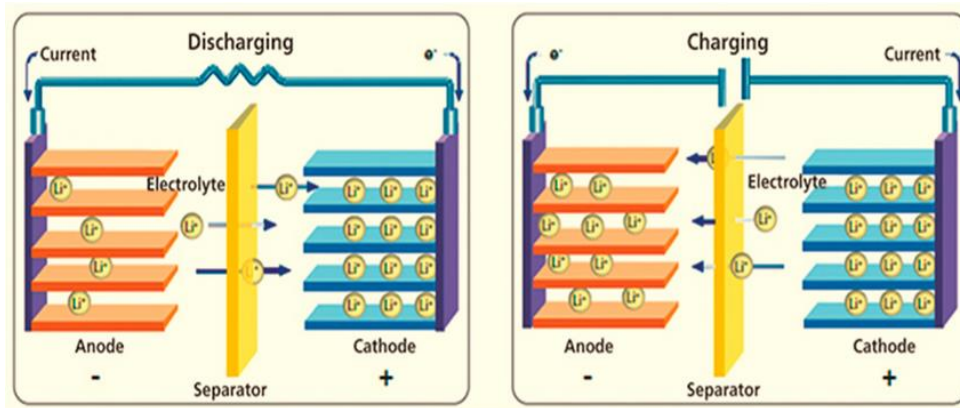
Şekil 2.5.'de gösterildiği gibi, Pil hücreleri genellikle düz veya silindirik tasarımlarda üretilir. Düz tasarımda, katot-anot katmanları kare şeklinde kesilip istiflenir ve koruyucu kutuya yerleştirilir. Silindirik tasarımda ise aynı büyük levhalar kullanılır, ancak hücre alüminyumdan yapılmış bir silindirik kutuya sarılır ve kapatılır. Silindirik tasarım, küçük ölçekli pillerde yaygın olup üretim maliyeti daha düşüktür (Romare, 2017).

Lityum İyon bataryalı, Elektrikli araçlar ve hibrit araçlarda lityum iyon bataryaları dominant bir batarya olma potansiyeline sahiptir. Örnek vermek gerekirse Mitsubishi iMiev ve Tesla Roadster gibi araçlar lityum iyon bataryasına sahiptir. Tüm metaller arasında lityum metali en yüksek standart potansiyele ve elektrokimyasal eş değere sahiptir. Bu özellikleri, tüm metaller arasında alüminyum ve magnezyum hariç en yüksek özgül enerji potansiyeline (Wh/kg) ve hacimsel enerji temeline (Wh/l) sahip olduğunu gösterir. Lityum, tüm metalik malzemeler arasında en hafif metaldir. Anot ve katodunda kullanılan malzemenin çeşidine göre bataryalar farklı özelliklere sahip olurlar (Vidyanandan, 2019).

**Tablo 2.2.** Lityum iyon pil gelişimi (Wang, 2021)

| Yıl         | katot             | Anot                                       | elektrolit | Pil sistemi                             |
|-------------|-------------------|--------------------------------------------|------------|-----------------------------------------|
| 1980 - 1990 | LiWO <sub>2</sub> | LiCoO <sub>2</sub> ,<br>LiNiO <sub>2</sub> | Polimer    | Li/MoO <sub>2</sub> , LiVO <sub>x</sub> |
| 1990 - 2000 | LiC <sub>6</sub>  | LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>           |            | C/LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>      |

Günümüzde anodunda birçok batarya örneği piyasada karşımıza çıkmaktadır. En yaygın kullanılan bataryaların katodu lityum kobalt oksit (LiCoO), lityum mangan dioksit (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) veya lityum demir fosfat (LiFePO<sub>4</sub>). Cep telefonları ve laptoplarda lityum kobalt oksit bataryalar kullanılır. Lityum sülfür dioksit (LiSO<sub>2</sub>) veya lityum tiyonil klorür (Li – SOCl<sub>2</sub>) gibi daha gelişmiş lityum bataryalar askeri uygulamalarda tercih edilir. Lityum iyon bataryalarının özgül enerji değeri 100 Wh/kg ile 250 Wh/kg arasında değişmektedir. Güç yoğunlukları ise 2000 W/kg değerine kadar ulaşmıştır (Bora, 2017).



**Şekil 2.6.** LIB şarj deşarj mekanizması (Sashmitha, 2023)

Bir lityum iyon pil (LIB), anot (negatif elektrot), katot (pozitif elektrot), elektrolit ve ayırıcı gibi temel bileşenlerden oluşur. Katot, genellikle lityum içeren metal oksitlerden (örneğin, lityum kobalt oksit) veya tünel yapılı malzemelerden (örneğin,

lityum manganez oksit) oluşurken, anot karbon,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , silisyum veya kalay gibi malzemelerden yapılır (Bruce, 2012). Deşarj sırasında, lityum iyonları ( $\text{Li}^+$ ) anottan serbest bırakılarak katoda doğru hareket eder. Organik elektrolitler, lityumun indirgenmesine karşı stabil olup, katotta oksidasyon gerektirir. Lityum iyonları katoda ulaştığında, katot malzemesine dahil edilir ve bu işlem tersine çevrilebilir. Bu hızlı ve geri çevrilebilir hareket, lityum iyon pillerin Pb-asit ve NiMH pillere göre daha hızlı şarj ve deşarj olmasını sağlar. Pil şarj olduğunda, lityum iyonları katoda göç eder ve burada karbon katmanları arasında birikir. Boşaltma işlemi ise bu sürecin tersini gerçekleştirir (Moseley, 2015).

Li-iyon pilin çok sayıda özelliği EA uygulamaları için uygundur. Bunlar:

- Yüksek enerji yoğunluğu (250-600 Wh/L).
  - Yüksek spesifik enerji (75-265 Wh/kg).
  - Uzun çevrim ömrü (400-1500).
  - Gücü yoğunluğu
  - Düşük bir kendi kendine deşarj (ayda yaklaşık %2-5), 250-2000 W/kg civarında belirli bir güç ve % 90-97 civarında çok yüksek çevrim verimliliği (Dhameja, 2002).
- Lityum iyon bataryaların en belirgin kusuru kullanım ömürlerinin üretim tarihlerinden itibaren başlamasıdır. Üretildiklerinden sonra şarj edilseler de edilmeseler de ömürleri üretim tarihinden itibaren azalmaya başlamaktadır. %100 şarj seviyesindeki ve çoğunlukla 25 °C derece sıcaklıkta bulunan tam dolu tipik bir dizüstü bilgisayar pili, geri dönüşü olmayacak şekilde her yıl kapasitesinin %20 sini kaybeder (Moseley, 2014).

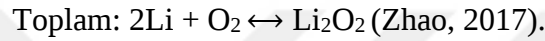
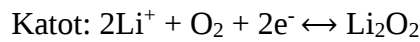
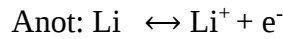
Li-O<sub>2</sub> piller yeni nesil EA'lar için umut verici olsa da sürdürülebilirlik performanslarını anlamak ve gelecekteki uygulamalarda sürdürülebilir gelişimlerini sağlamak için potansiyel çevresel etkileri de değerlendirilmelidir. Belirli bir ürün veya sistemin potansiyel çevresel etkilerine ilişkin kapsamlı bir fikir edinmek için LCA yaygın olarak kullanılan bir analiz aracıdır.

### 2.3. Lityum Oksijen Piller

Lityum-oksijen pili (LOB) umut vadeden bir enerji depolama sistemidir. Anot olarak lityum metal ve katot olarak oksijen kullanan bir pil türüdür (Shen, 2018). LOB'lar, son derece yüksek enerji yoğunluğuna (3.500 Wh kg<sup>-1</sup>) sahip olup çevre dostu olmaları ve oksijen kaynağının bol olması gibi avantajlara da sahiptir (Dou, 2022).

### 2.3.1. Li-O2 pil hücresi çalışma prensibi

Enerjiyi serbest bırakmak veya depolamak için lityum metal ve oksijen arasındaki geri dönüşümlü elektrokimyasal reaksiyonları kullanır (Feng, 2016). Deşarj işlemi sırasında, anotdaki lityum atomları elektron kaybederek  $\text{Li}^+$  iyonlarına dönüşürken, katottaki oksijen molekülleri, anottan gelen elektronlarla indirgenerek peroksianyonlar ( $\text{O}_2^{2-}$ ) oluşturur. Bu peroksianyonlar,  $\text{Li}^+$  iyonlarıyla birleşerek  $\text{Li}_2\text{O}_2$  meydana getirir. Bu süreç, tersine çevrilebilir bir mekanizmadır. Oksijenin şarj ve deşarj süreçlerinin tamamı, belirli bir denklemle ifade edilebilir (Lu, 2013).



Lityum-oksijen piller, mevcut lityum-iyon pillere kıyasla bazı değişiklikler göstermektedir. Aşağıdaki tablo 2.3.'te LOB'ların LIB'lerinden bazı farklılıkları açıklanmaktadır.

**Tablo 2.3.** Li-iyon ve Li-oksijen ile karşılaştırma (Zhao, 2017)

|                             | Li- İyon pil            | Li- oksijen pil             |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Katot materyal              | Sınırlı                 | Oksijen, sınırlı değil      |
| Anot materyal               | Sınırlı                 | Lityum, sınırlı değil       |
| Elektrolitin hacminin oranı | Katot ağırlığının %15'i | > Katot ağırlığının 10 katı |
| Paket / ambalaj             | Kapalı                  | Açık                        |

(LOB'lar), yüksek teorik enerji yoğunluğu sayesinde yeni nesil elektrikli araçlar için umut vadeden bir enerji depolama teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Ancak, bu pillerin ticari olarak uygulanabilirliğini sınırlayan birçok zorluk vardır. Deşarj kapasitesi, deşarj ve şarj aşırı potansiyelleri, güç yoğunluğu ve kararlılık gibi elektrokimyasal performans göstergeleri hâlâ istenen seviyelere gelmemiştir. Son yıllarda, bu alanda önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve katot malzemeleri üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Katot performansını iyileştirmek amacıyla sıcaklık optimizasyonu, yüzey mühendisliği, malzeme dokusunun düzenlenmesi ve oksijen boşluğu kontrolü gibi stratejiler ayrıntılı olarak tartışılmıştır (Fang, 2023).

Bu erken aşamada, pil kimyası üzerine temel araştırmalar hala en önemli konuların başında gelmektedir. Elektrokimyasal performansın nesnel olarak değerlendirilmesi, sorunları belirlemek ve çözüm yolları geliştirmek için bir ön koşuldur. LOB ile ilgili araştırmalar son on yılda önemli bir gelişme dönemi geçirmiştir. Hem temel

mekanizma çalışmaları hem de cihaz tasarımı konusunda kayda değer ilerlemeler sağlanmıştır. Bununla birlikte, LOB'un geliştirilmesi hala başlangıç aşamasındadır ve özellikle katot kimyası ile ilgili birçok kritik soru zlmeyi beklemektedir.





### 3. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA)

Bu bölümde ISO uyumlu yaşam döngüsü değerlendirme çerçevesi ve bunun Li- piller araştırma alanındaki uygulamaları tanıtılmaktadır. Li-oksijen piline ilişkin LCA çalışmalarındaki temel metodolojik seçimler, pil üretimi, kullanımı ve kullanım ömrü sonu için açıklanmaktadır.

#### 3.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Çerçevesi

Bir ürünün hammaddenin çıkarılmasından başlayarak, tüm proseslerde işlenmesi, sevkiyata hazır hale getirilmesi, taşınması, kullanımı, geri dönüştürülebilmesi, belirli işlemlerden geçirildikten sonra yeniden kullanılması, geri dönüşümünün mümkün olmadığı durumlarda atık olarak atılmasına kadar olan süreçte yaşam döngüsü adı verilmektedir (Öztürk, 2012).

LCA, bir ürün, hizmet veya faaliyetle ilgili çevresel yükleri değerlendirmek için kullanılan standartlaştırılmış niceliksel ve niteliksel bir yöntemdir. Bunu yapmak için, malzeme ve enerji akışlarının ayrıntılı bir yaşam döngüsü envanteri (LCI) derlenir ve bir ürünün kullanım ömrü boyunca çevreye salınan ilgili emisyonlar ve atıklar tanımlanır. Sonuçlar alternatifleri, farklı seçenekleri karşılaştırmak ve potansiyel çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve çevresel iyileştirme fırsatlarının belirlenmesi yoluyla karar almayı desteklemek için kullanılır (Liang, 2017).

LCA, farklı ürünlerin çevresel yükünün tamamını karşılaştırmak için en etkili araçlardan biridir. Bunun nedeni, farklı ürünlerin, yaşam döngülerinin farklı bölümlerinde çevresel yükler ortaya çıkarabilmesidir (Finnveden, 2000).

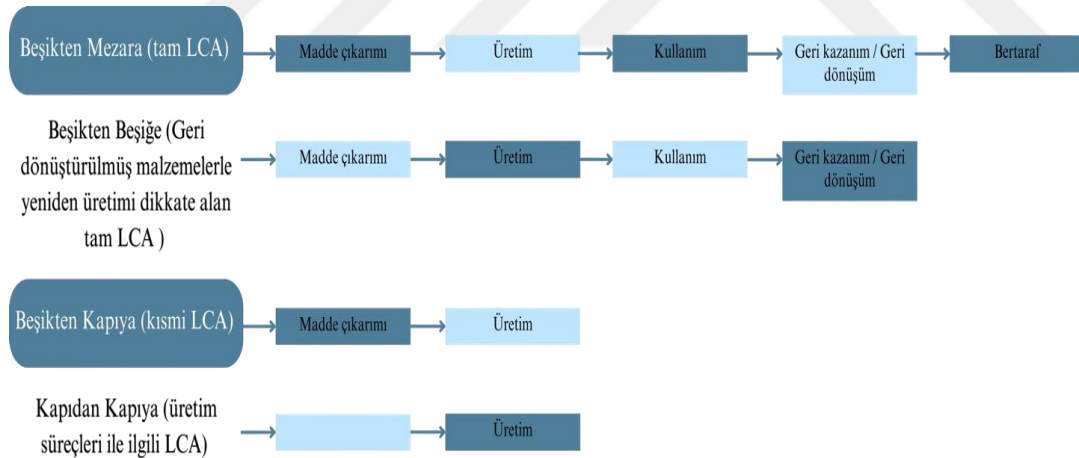
Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), her yaşam döngüsü evresi ile birlikte çevresel etkileri ölçme ve analiz etme kabiliyeti nedeniyle LIB'lerin çevresel performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang, 2020).

LCA, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından yayınlanan ISO 14040-2006 ve ISO 14044-2006'ya göre gerçekleştirilmiştir (ISO 14040, 2006) (ISO 14044, 2006).

Karbon emisyonları son yıllarda büyük ilgi görmüştür ve ilgili üç ana standart bulunmaktadır: ISO 14064, ISO 14065 ve ISO 14067. ISO 14064, sera gazı emisyonlarını tanımlamak için niceliksel standartları oluşturmuş, ISO 14065, sera gazı doğrulaması ve organizasyonlarına ilişkin gereklilikleri düzenlemiştir. ve ISO 14067, karbon ayak izlerini ölçmek ve iletmek için ilkeleri, koşulları ve yönergeleri belirlemek için kullanılmaktadır (Klopffer, 2005).

yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) yapmanın faydaları şu şekilde özetlenebilir:

- (1) Hükümetler, sanayi ve işletmeler, akıllı ve bilimsel kararlar almada destekliyor.
- (2) LCA, kaynak tüketimini ve maliyetleri azaltır, teknolojik süreçleri optimize edebilir, enerji tüketimi ve atık oluşumunu düşürür.
- (3) Çevresel yükleri azaltmak için uygun alternatifler ve çözümler sunar.
- (4) LCA, sürdürülebilir ürün tasarımlarına yardımcı olur ve çevresel, sosyal, ekonomik standartlara uygun ürünler geliştirir.
- (5) Ekonomik ve çevresel faktörlerin olumlu ilişkisinin vurgulanmasına yardımcı olur (Lai, 2022).

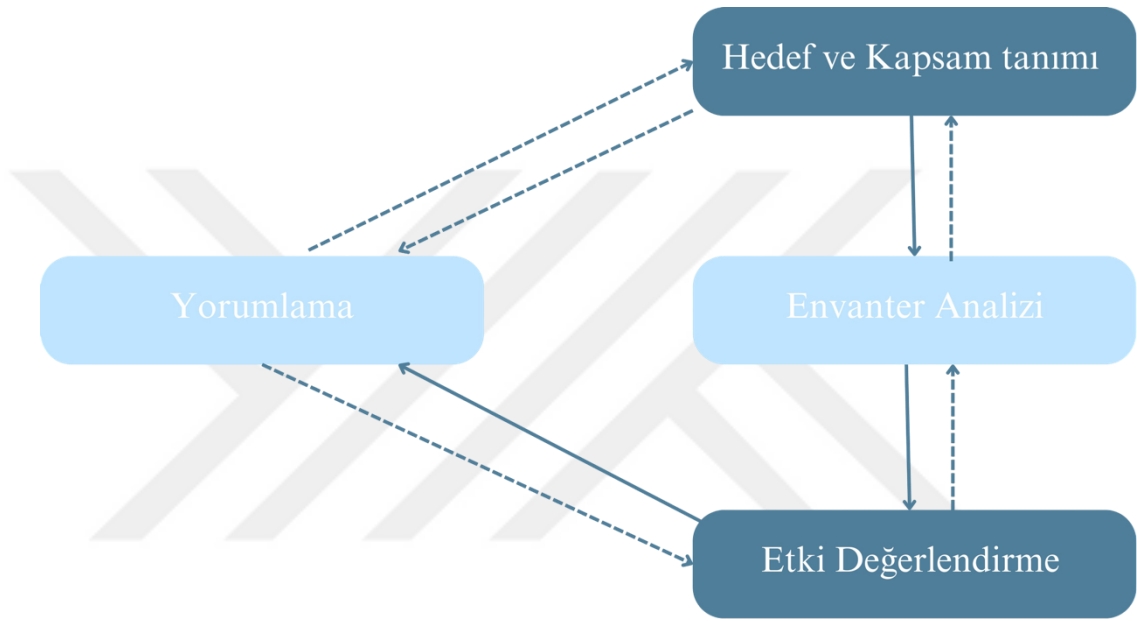


**Şekil 3.1.** LCA genel tipleri (Messagie, 2010)

LCA, beşikten mezara, beşikten beşiğe, beşikten kapıya veya kapıdan kapıya yaklaşımına dayanmaktadır. Özellikle “beşikten kapıya”, hammaddenin işlenmesinden araç üretim fabrikası kapısına (tüketiciye teslim edilmeden önce) kadar olan ürün yaşam döngüsünü ifade eder. Kullanım ve geri dönüşüm aşamaları hesaba katmamaktadır. “Beşikten mezara”, yaşam döngüsü boyunca hammadde çıkarılması, üretilmesi, ulaştırılması, kullanması ve son olarak bileşenlerinin sökülüp geri

dönüştürülmesini içeren, hammadde aşamasından (beşik) imha aşamasına (mezar) kadar tam bir yaşam döngüsünü ifade eder. “Beşikten Beşiğe”, önceki yaşam döngüsünün sonunda geri dönüştürülen fazla malzemelerin bir sonraki yaşam döngüsü için hammadde olarak tekrarlandığı kapalı döngülü bir yaşam döngüsüdür. Kapıdan kapıya ise, sadece ürün üretimi ile ilgili süreçleri ele alınır. Diğer aşamaları hesaba katmamaktadır (Messagie, 2010).

### 3.2. Yaşam Döngüsü Analizinin Adımları



Şekil 3.2. LCA temel adımları (Messagie, 2010)

1. Hedef ve Kapsam Tanımı (Goal and scope definition)
2. Envanter Analizi (Inventory analysis)
3. Etki Değerlendirme (Impact assessment)
4. Yorumlama (Interpretation)

#### 3.2.1. Hedef ve kapsam tanımı

LCA metodolojisinin ilk aşamasıdır. Hedef tanımı, LCA'nın temasını belirler ve kapsam tanımı için bir temel sağlar (Bjørn, 2018). Kapsam tanımı, hedef tanımına dayalı olarak gerçekleştirilir ve değerlendirilecek ürün veya sistem ile bu değerlendirmenin kapsamı vurgulanır. İncelenecek sistemi, sistem sınırını, işlevini ve işlevsel birimini dahil olmaktadır (EC-JRC, 2010).

Bir çalışmanın sistem sınırı; beşikten mezara, beşikten beşiğe, beşikten kapıya veya kapıdan kapıya olabilir. Çalışmanın sınırları temel olarak mevcut kaynaklara ve verilere dayanarak tanımlanmıştır (EC-JRC, 2010).

Başlangıçta çalışmanın amacının belirlenmesi, çalışmanın kapsam ve sınırlarının belirlenmesine yardımcı olacağı için oldukça önemlidir. ISO 14040'a göre hedef tanımı şunları içerir:

- çalışmanın gerçekleştirilmesinin nedenleri,
- amaçlanan uygulamanın spesifikasyonu,
- Hedef kitlenin belirlenmesi,
- sonuçların kamuya açıklanmak amacıyla karşılaştırmalı beyanlarda kullanılmasının amaçlanıp amaçlanmadığı.

Ayrıca standartlara göre kapsam tanımı şunları tanımlar:

- incelenen ürün sistemi,
- ürün sisteminin işlevleri,
- işlevsel birim,
- sistem sınırı,
- uygulanacak etki değerlendirme yöntemleri,
- kullanılacak yorumlama yöntemleri,
- veri ve yöntem konularına ilişkin varsayımlar,
- değer seçimleri, sınırlamalar ve veri kalitesi gereksinimleri,

Burada alınan kararlar LCA prosedürünün gelişimi üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Örneğin, sonuçların kamuya açıklanması ve bir ürünün rakip bir ürüne göre çevresel üstünlüğü hakkında açıklamalarda bulunulması amaçlanıyorsa, çalışmanın eleştirel bir incelemesine ihtiyaç duyulabilir (Curran, 2017).

Sistem sınırlarının çizilmesi, analizin nerede başlayacağını ve nerede biteceğini tanımlayarak teknik sisteme dahil edilecek süreçleri belirler. LCA çalışmalarındaki ortak sistem sınırları, yalnızca üretime atıfta bulunmak için yaygın olarak kullanılan kapıdan kapıya sistem sınırından farklı olarak, bir ürünün menşecini belirten “beşik” ile birlikte, herhangi bir yukarı akış sürecini de içeren, beşikten kapıya içerir. Teknik ve

doğal sistem arasındaki ilişkinin yanı sıra, mekansal ve zamansal gibi diğer boyutlarda da sistem sınırlarının çizilmesi gerekmektedir. Bunu takiben veri toplama süreci boyunca toplanan verilerin, belirtilen zaman ve mekân sınırlarını temsil eden veya amacına uygun olması sağlanmalıdır (Curran, 2017).

Fonksiyonel birimin tanımlanmasından sonra referans akışları tanımlanır. Referans akışı, fonksiyonel birimin yerine getirilmesi için gereken ürün akışı miktarını ifade eder (Bjørn, 2018).

### **3.2.2. Envanter analizi**

Envanter analizi, incelenen sistemin modellenmesi için verilerin toplanması, işlenmesi ve analizi ile ilgilidir.

Malzeme girdileri arasında ham maddeler, enerji ve doğal kaynaklar yer alırken, ürünler, emisyonlar ve atıklar malzeme çıktılarına örnektir (Bjørn, 2018). Envanter analizi için veri toplama esas olarak amaç ve kapsam tanımına dayanmaktadır (EC-JRC, 2010).

Envanter analizi, incelenen sistemdeki girdi ve çıktı verilerinin bir envanterini oluşturma sürecidir. Bu aşamada veriler literatür taramasıyla, pratik veri toplamayla veya her ikisiyle toplanır.

Yaşam döngüsü (çevresel) etki değerlendirmesi (LCIA), yaşam döngüsü envanterini toplayarak yorumlamayı kolaylaştırır. LCIA, girdi ve çıktı maddelerini seçilen etki kategorilerinin çevresel etki karakterizasyon faktörleriyle eşleştiren tam otomatik bir LCA yazılım süreci olarak kurulmuştur. Akılda tutulması gereken önemli bir faktör, yaşam döngüsü envanterinde (LCI) bir maddenin bulunmaması, kullanılan ÇED yönteminde bir karakterizasyon faktörünün bulunmaması veya madde adlarındaki bir uyumsuzluğun sıfır potansiyel etkiyle sonuçlanacağıdır (Roos, 2016).

### **3.2.3. Etki değerlendirme**

Çevresel etkilerin öneminin vurgulandığı, envanter analizi sonuçlarını kapsayan, sonuçların yorumlanması için gerekli bilgiyi sağlayan basamaktır.

LCIA, LCA'da kullanılan akışların fiziksel miktarına dayalı olarak ürün sisteminin potansiyel çevresel etkilerinin ölçülmesini amaçlamaktadır (PRé Sustainability, 2014).

Envanterde bulunan tüm girdi ve çıktılar belirli kategorilere göre sınıflandırılır ve her kategorideki girdi ve çıktılar belirli indikatörlere modellenir.

Etki değerlendirmesinin amacı, envanter analizi aşamasının sonuçlarına dayanarak ürün yaşam döngüsünün çevresel etkisini değerlendirmektir. Bu işlem, envanter verilerini belirli etki türlerine ve gösterge parametrelerine çevirir, bu da ürün yaşam döngüsünün çevresel etkilerini tanımayı kolaylaştırır.

ISO standardı, üçü zorunlu olan bir LCIA'nın tamamlanmasına yönelik dört adımı tanımlar. Bu adımlar Tablo 3.1.'de özetlenmiştir.

**Tablo 3.1.** LCIA aşamaları (Taşkın, 2018)

| zorunlu         | seçmeli         |
|-----------------|-----------------|
| Karakterizasyon | Normalizasyon   |
| Sınıflandırma   | ağırlıklandırma |

Karakterizasyon: Aynı çevresel soruna katkıda bulunan envanter öğeleri, ilgili katsayılarla çarpılarak ortak birim üzerinden toplanır ve her çevresel etki kategorisi için toplam etki hesaplanır. Örneğin, küresel ısınmaya neden olan CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O emisyonlarının tamamı kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak ifade edilir ve Küresel Isınma Potansiyeli belirlenir.

Envanter Öğelerinin Sınıflandırılması: Envanterde yer alan ayrı ayrı öğeler, ilgili çevresel etki kategorilerine atanır. Örneğin, CO<sub>2</sub> emisyonları “küresel ısınma” kategorisine yerleştirilir.

Normalizasyon: Kabul görmüş normalizasyon yöntemleri kullanılarak, farklı çevresel etki potansiyelleri ortak bir referans sistemine göre birimsiz hale getirilir ve birbirleriyle karşılaştırılır. Normalizasyon, hangi çevresel etki potansiyelinin daha yüksek olduğunu belirlemeye yardımcı olur.

Ağırlıklandırma: Normalizasyon sonuçları, kabul görmüş ve her çevresel etki kategorisi için belirlenen azaltım hedeflerine dayanan ağırlıklandırma yöntemlerinden biri kullanılarak katsayılarla çarpılır. Bu hesaplama, hangi çevresel etki potansiyelinin daha önemli olduğunu ortaya koyar (Taşkın, 2018).

Bir yaşam döngüsü etki analizini gerçekleştirmek için kullanılacak farklı yöntemler bulunmaktadır. Bunlar sürekli farklı metodolojilere ait farklı gruplar tarafından araştırılıp geliştirilmiş olup CML, TRACI, ReCiPe, Eco Indicator 99, EDIP ve Impact 2002 gibi yöntemler mevcuttur.

1990'larda LCA'nın ortaya çıkışından bu yana aşağıdakileri içeren bir dizi karakterizasyon modeli geliştirilmiştir:

İlk olarak 1992 yılında Leiden Üniversitesi Çevre Bilimleri Enstitüsü tarafından geliştirilen ve o zamandan beri revize edilen CML yöntemi, Belirsizliklerin sınırlandırılması için neden-sonuç zincirinde kantitatif modellemeyi erken aşamalara sınırlayan bir etki değerlendirme yöntemidir. CML 2001'in ortalama Avrupa karakterizasyon faktörleri, dünyada ve Avrupa'da şu anda mevcut en iyi uygulama olarak önerilmektedir (van Oers, 2016).

ReCiPe, 2008'de sanayi ve akademik iş birliğiyle geliştirilmiş ve 2016'da revize edilmiştir. Bu yöntemin ana hedefi, yaşam döngüsü envanteri sonuçlarını daha az sayıda gösterge puanına indirgemektir. ReCiPe, etkileri iki seviyede değerlendirir: orta nokta ve son nokta. Orta nokta seviyesinde, örneğin iklim değişikliği için etkiler kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri cinsinden ifade edilirken, son nokta seviyesinde etkiler ekosistem ve insan sağlığına göre ayrılmaktadır (Goedkoop, 2009).

TRACI metodolojisinde etki kategorileri, neden-sonuç ilişkisi içinde modellemenin kesinliklerine ilişkin daha yüksek bir toplumsal anlaşıma düzeyi dahil olmak üzere, orta nokta seviyesinde tanımlanmıştır. Asidifikasyon, duman oluşumu, ötrofikasyon, insan sağlığı kanser, insan sağlığı kriteri gibi etki kategorilerinde yapılan araştırmalar, ABD ve Kanada koşullarına uygun girdi verilerini kullanarak özellikle ABD koşullarına yönelik olarak geliştirilmiştir (Masoni, 2016).

Yaşam döngüsü etki değerlendirmeleri (LCIA), envanter aşamasından elde edilen tüketim ve emisyon verilerini kullanarak, insan sağlığı ve çevresel etkilerle ilgili çeşitli kategorilerde tahminler sunan bir analiz çerçevesi oluşturur.

En çok kullanılan etki kategorileri aşağıdaki tablo 3.2.'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.2.** LCIA 'da en çok kullanılan etki kategorileri (Huijbregts, 2017)

| Etki kategori                        | Birim                            | Açıklama                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Küresel Isınma Potansiyeli           | Kg CO <sub>2</sub> eq            | Bir sera gazının atmosferde ne kadar ısı tutabileceğinin göreceli bir ölçüsüdür. Birim başına meydana gelen sera gazı salınımları kg CO <sub>2</sub> eşdeğeri birimiyle ifade edilir. Gazların atmosferde kalma süresi hesaplamaya dahil edildiği için, değerlendirme genellikle 100 yıllık bir zaman aralığı tanımlanır.                                                       |
| Asidifikasyon Potansiyeli            | Kg SO <sub>2</sub>               | Toprakların ve suların asitleşmesi, predominat olarak hava kirleticilerinin asitlere dönüşmesiyle gerçekleşir; bu, yağmur suyunun ve sisin pH değerinin düşmesine yol açar. TAP, belirli maddelerin H <sup>+</sup> iyonları oluşturma ve salma yeteneği olarak tanımlanır ve genellikle 100 yıllık bir zaman diliminde hesaplanan kükürt dioksit eşdeğerleri cinsinden verilir. |
| Fotokimyasal Ozon Oluşum Potansiyeli | Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | Metan Dışı Uçucu Organik Bileşikler, azot oksitlerin ve hidrokarbonların varlığında ozon gibi agresif reaksiyon ürünleri oluşturan güneşten gelen radyasyonla etkileşime girebilir. Bu ölçüm kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eşdeğeri ve kg NMVOC (metan olmayan uçucu organik bileşikler) birimleriyle ifade edilir.                                                          |
| Ötrofikasyon Potansiyeli             | Kg PO <sub>4</sub> -3            | Ötrofikasyona neden olan emisyonların ölçüsü, örneğin gübre kullanımı, sucul bitki ve hayvan türlerinde büyük kayıplara yol açar. Temiz su ötrofikasyonu, fosfor salınımları ile atık su arıtma sistemleri ve elektrik enerjisi üretiminde gerekli maden faaliyetleri sonucunda meydana gelmektedir.                                                                            |
| Ozon Tükenme Potansiyeli             | Kg CFC-11                        | bir maddenin ozon gazını yok etme potansiyelini, referans değeri 1 olarak atanan kloroflorokarbon-11'in potansiyeli ile karşılaştırarak gösteren göreceli bir değeri ifade eder. Bu, toplam ozon azalması durumuna bir denge durumunda ulaşır.                                                                                                                                  |
| Toksisite Potansiyelleri             |                                  | Bir maddenin kimyasal yapısı, fiziksel özellikleri ve noktasal salınım kaynaklarına bağlı olarak toksisite potansiyeli, maddenin çevreye salınmasına göre karakterize edilir. Toksisite potansiyelleri belirsizlik içerir çünkü bir maddenin etkisi farklı potansiyel etkiler ve maruz kalma sürelerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir.                                   |
| Fosil Tükenme Potansiyeli            | Kg Petrol                        | fosil kaynakların kullanımını ve bunların küresel ölçekteki kullanılabilirliğini azaltma üzerindeki etkisini yansıtır. Petrol eşdeğerlerinde ölçülür.                                                                                                                                                                                                                           |

**Şekil 3.3.** LCIA küresel ısınma potansiyeli şematik olarak gösterme (Karaca, 2016)

### 3.2.4. Yorumlama

LCA'nın son aşamasıdır. Çalışmanın sonucunun analizini ve yorumlanmasını içerir. Yorumlama, verilerin kalitesi, yapılan varsayımlar, çalışmanın amacı ve kapsamı dikkate alınarak yapılır (Olsen, 2018).

Yorumlama, amaçların ve kapsamın karşılanıp karşılanmadığını belirlemek için gerekli olan büyük katkıların, hassasiyet analizlerinin ve belirsizlik analizlerini içermektedir.

Hassasiyet analizi: Bazı parametrelerin değişikliklerinden kaynaklanan LCA sonuçlarındaki dalgalanmaları ölçmek için kullanılmaktadır (Gu,2019).

Belirsizlik analizi: envanterdeki belirsizliklerin sonuçlar üzerindeki etkilerini tespit etmek için kullanılmaktadır.

### 3.2.5. Yaşam döngüsü analizi veri tabanları ve programları

En yaygın kullanılan yazılımlar ve veri tabanları aşağıdaki tablo 3.3.'te listelenmiştir

**Tablo 3.3.** LCA'da kullanılan yazılımlar (Bauer, 2015)

| Araç     | Yaklaşım        | grafikler          | Veritabanları                                                      |
|----------|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------|
| GREET    | Yakıtlı araçlar | Excel              | GREET veritabanı                                                   |
| SimaPro  | Kapsamlı        | Sankey diagram     | SimaPro veritabanı, Ecoinvent veritabanı, Endüstri veritabanı, vs. |
| GaBi     | Kapsamlı        | İntuitive flowpath | GaBi veritabanı, US veritabanı, İsveçre veritabanı, vs.            |
| eBalance | kapsamlı        | Chart, Excel       | Ecoinvent, Çin veritabanı, vs.                                     |

### 3.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirme EA ve LIB'lere Yönelik Bazı Çalışmalar

Otomotiv uygulamaları için lityum iyon pillerin (LIB'ler) yaşam döngüsü analizi (LCA) üzerine yapılan ilk çalışmalardan biri, Majeau-Bettez ve arkadaşları (2011) tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışma, nikel metal hidrit NiMH, NMC ve LFP pillerine odaklanmıştır. Daha sonra LIB'lerin çevresel performansını değerlendirmek için bir dizi çalışma tarafından kullanılan, halka açık ve ayrıntılı bir envantere katkıda bulunmuştur (Majeau-Bettez, 2011).

Ellingsen ve arkadaşları (2014), Lityum iyon pil hücreleri ve paketlerinin üretimine ilişkin birincil verilerle envanterlerini doldurarak NMC333-Gr kimyalarının çevresel etkisini tahmin etmeye odaklanmıştır (Ellingsen, 2014).

Wang ve arkadaşları (2016), pil tasarımına ve üretimine rehberlik etmek için LCA'yı farklı katot malzemelerine sahip piller üzerinde gerçekleştirmiş (Wang, 2017).

Hao ve arkadaşları (2017), GREET modeline dayalı olarak pil üretiminin sera gazı emisyonlarını değerlendiren bir çalışma yayınlanmıştır (Hao, 2017).

Mostert ve arkadaşları (2018), LCA aracılığıyla yönetim çözümlerini optimize etmek için elektrik enerjisi depolama sistemlerindeki 5 pilin karbon ayak izini karşılaştırdı (Mostert, 2018).

Dai ve arkadaşları (2019), NMC lityum iyon pillerin üretiminin çevresel etkilerini analiz etmek için lityum iyon pil üreticilerinden birincil endüstriyel veriler toplamış ve pil malzemeleri için üretim envanterlerine yönelik bir dizi değişiklik önermiştir (Dai, 2019).

Wang ve arkadaşları (2020), Lityum-oksijen, lityum-kükürt ve sodyum-iyon pillerin çevre dostluğunu bir karşılaştırma yapmıştır (Wang, 2020).

Sun ve arkadaşları (2020), NMC622 kimyalarının LCA'sını gerçekleştirmek için Çin'deki 30 GWh kapasiteli bir tesisten hücre üretimi ve paket montaj aşamalarına ilişkin birincil verileri toplamıştır (Sun, 2020).

Melzack N ve arkadaşları (2021), Farklı pil türlerinin ve pil malzemelerinin üretim veya geri dönüşüm aşamasında çevreye etkisi LCA kullanılarak karşılaştırılmıştır (Melzack, 2021).

Degen ve Schütte (2022), tarafından yapılan son modelleme çalışmaları, LIB hücre üretimi için enerji talebine odaklanarak, farklı pil kimyalarının enerji kullanımını kıyaslamak ve gerçek verileriyle karşılaştırmak için esnek araçlar sağlamıştır (Degen, 2022).

**Tablo 3.4.** EA ve LIB'lere yönelik çalışmalar

| Çalışma                      | Çalışmada kullanıldığı kimya | Fonksiyonel birim | LCIA metodu     | LCIA referansı                                 |
|------------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------------------|
| Majeau-Bettez ve ark. (2011) | NMC442                       | W h               | ReCiPe          | Ecoinvent 2.2 / birincil data                  |
| Ellingsen ve ark. (2014),    | NMC333                       | kW h              | ReCiPe          | birincil data ve Majeau-Bettez et al. (2011)   |
| Wang ve ark. (2016),         | L(R)NM Li-rich materyal      | 16 kWh            | IMPACT 2002+    | Eco-indicator 99 and CML 2002                  |
| Hao ve ark. (2017),          | NMC333                       | kW h              | GHG             | REET                                           |
| Mostert ve ark. (2018),      | SL-B ve LiI-B                | MWh               | Karbon ayak izi | OpenLCA                                        |
| Dai ve ark. (2019),          | NMC333                       | kWh               | ILCD ve CED     | Birincil endü. data ve REET                    |
| Wang ve ark. (2020),         | LieS ve Li-hava              | kW h              | Simapro         | Ecoinvent 3.3                                  |
| Sun ve ark. (2020),          | NMC622                       | kW h              | CML-IA          | REET ve birincil data                          |
| Melzack N ve ark. (2021),    | Al-iyon                      | kW h              | OpenLCA         | EUEF midpoin                                   |
| Degen ve Schütte (2022)      | NMC622                       | kW h              | Enerji talebi   | Hücre montaj süreci için bottum - up modelleme |

Elektrikli araçlara ve LIB'lere yönelik yaşam döngüsü analizi (LCA) çalışmaları yıllar içinde artış göstermiştir. Başlangıçta, yazarların çoğu yalnızca iklim değişikliği ile ilgili etkileri değerlendirmeye odaklanmıştır. Ancak zamanla, kullanımı ve yaşam sonu ile ilgili çalışmalar daha yoğun bir şekilde incelenmeye başlanmıştır.

Bu çalışmada LCA'nın Li-oksijen pilin tüm yaşam döngüsündeki uygulaması kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmiş olup, başlıca katkıları şu şekilde özetlenmiştir:

- LCA'nın standartları, temel çerçevesi ve perspektifleri açıklanmıştır.
- Li-oksijen pili beşikten mezara LCA çerçevesi (pil üretimi, kullanımı, yaşam sonu) oluşturulmuş olup ve her aşamadaki malzeme ve enerji akışı ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.
- Pil üretimi ve optimizasyon yöntemiyle elde edilen sonuçları kullanılarak pilin yeniden üretilmesi konusunda LCA çalışmaları yürütülmüştür.

Li-O<sub>2</sub> pil teknolojisine gelince, Li-O<sub>2</sub> pil hücresi küçük ölçekli AR-GE faaliyetlerinin çevresel etkilerinin anlaşılması, ölçülmesi ve optimize edilmesine yönelik kapsamlı

bir yaşam döngüsü değerlendirme modeli mevcut literatürde mevcut değildir. Bu tezin amacı, Li-O<sub>2</sub> pillerin laboratuvar Ar&Ge çalışmalarından kaynaklı çevresel etkileri analiz ederek literatürdeki bu boşluğu doldurmaktır. Böylece, bir teknolojinin sadece ticari üretiminin değil, teknoloji geliştirme aşamalarının da çevresel performansının önemini vurgulamak amaçlanmaktadır.

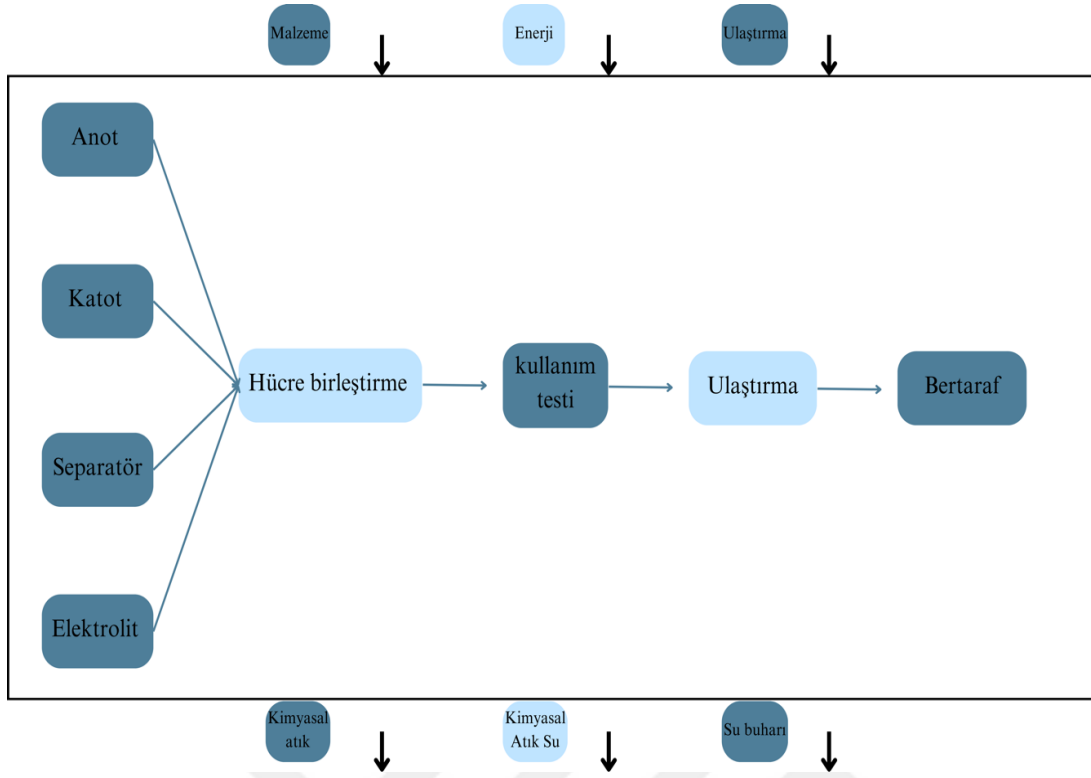


#### 4. MATERYAL VE METOT

Mevcut çalışmada, Li-O<sub>2</sub> pilleri laboratuvar süreçlerine ait potansiyel çevresel etkiler LCA metodolojisi ile belirlenmiştir. Bu bölüm, mevcut çalışmaya ait çalışma süreçlerini ayrıntılı olarak içermektedir.

##### 4.1. Hedef ve Kapsam

Mevcut çalışmada amaç, 2023 yılında üniversite Ar&Ge laboratuvarlarında gerçekleştirilen 5 katotun küçük ölçekli bir laboratuvar çalışmasından kaynaklı çevresel ve ekonomik etkileri tespit etmek ve muhtemel optimizasyon imkanını analiz etmektir. Çalışmanın sistem sınırı, üretim, kullanım ve yaşam sonu faaliyetlerini kapsayacak şekilde beşikten-mezara seçilmiştir. Şekil 4.1. Çalışmaya ait beşikten-mezara sistem sınırlarını göstermektedir. Çalışma kapsamında SARGEM LIPGUM laboratuvarlarında üretilen  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>,  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>/Ru, Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub>, NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiO katotların, TEGDME+LiClO<sub>4</sub> ve DMSO+LiClO<sub>4</sub> elektrolitlerin üretim sürecinde kullanılan sarf malzemeler, cihazların tükettiği elektrik ve üretim prosesi kaynaklı atık ve emisyonlar, anot ve separatör üretim envanterini oluşturmaktadır. Pil hücresinin glove box içerisinde birleştirilmesi, elektrokimyasal testler ve son olarak da malzemelerin bertarafı sistem sınırlarına dahil edilmiştir. Ayrıca, laboratuvar çalışmaları için gerekli olan sarf malzemelerin temini ve en son ömrünü tamamlayan pil bileşenlerinin bertarafa gönderilmesi esnasında gerçekleşen ulaştırma da sistem sınırları içerisinde dahil edilmiştir. Pil hücreleri üretiminden sonra, elektrokimyasal test süreçleri pil hücresinin kullanımından kaynaklı envanteri oluşturmaktadır. Pil hücreleri için üretilen katotlara yapılan fiziksel karakterizasyon testleri, bina ısıtılmasından kaynaklı enerji tüketimi sistem sınırları dışında tutulmuştur. Ayrıca, pil hücre keseleri de tekrar kullanılabilir keseler olduğundan sistem sınırlarına dahil edilmemiştir.



**Şekil 4.1.** Çalışmanın sistem sınırlarına bakış

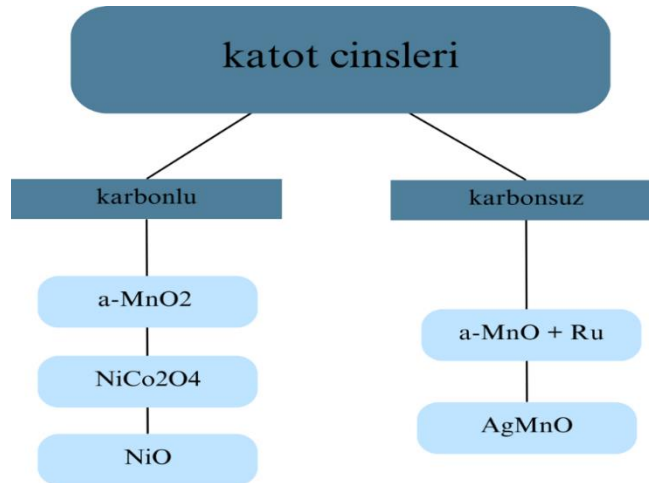
Daha önceki araştırmalar incelendiğinde, çoğunda “sağlanan 1 kWh'lik enerji” fonksiyonel birim olarak seçilmiştir. Diğer durumlarda, araçların seyahat mesafesi çalışmanın fonksiyonel birimi olarak kabul edilmektedir. Örneğin referanslarda (Nordelöf, 2014), (Notter, 2010). 1 km yolculuk fonksiyonel birim olarak seçilmiştir. Ayrıca bazı çalışmalar sonuçları kütle birimi cinsinden rapor etmektedir (Ellingsen, 2014). Bu çalışmalar pillerin batarya paketine modellenmesi ve elektrikli araçta kullanılması sonucu oluşan muhtemel çevresel etkileri incelediğinden, bahsedilen bu fonksiyonel birimler bu çalışmalar için uygundur. Ancak, mevcut çalışma pil teknolojisi geliştirmeye ait muhtemel çevresel etkilerin belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu nedenle, literatürdeki bu kabuller, mevcut çalışma için uygun değildir. Dolayısıyla, mevcut çalışmada fonksiyonel birim “5 katot geliştirme” laboratuvar çalışması kaynaklı potansiyel çevresel etkiler olarak kabul edilmiştir.

Tüm materyaller, esas olarak Ecoinvent veri tabanındaki beşikten kapıya veriler kullanılarak kaynak çıkarma noktasına kadar takip edildi (Ruiz, 2014). Ecoinvent verileri, kayıp tahminleri de dahil olmak üzere doğadan ve emisyonlardan elde edilen ilgili girdileri içerir. Ecoinvent veritabanında veya mevcut diğer veritabanlarında bulunmayan malzemeler, molar hesaplamalar ve enerji kullanımı tahminleri kullanılarak (veritabanlarında bulunan kimyasallardan) modellenmiştir.

Çalışmanın çevresel etkileri ReCiPe 2016 Orta nokta etki değerlendirme metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Çevresel etkilerin analizinde SimaPro 9.5.0.0 yazılımı kullanılmıştır. Çalışmalar esnasında kullanılan elektrik ülke karışımının sonuçlar üzerindeki etkisini görmek amacıyla hassasiyet analizi çalışması yapılmıştır. Çalışmadaki belirsizlikler Monte Carlo simülasyonu ile analiz edilerek, farklı koşullardaki potansiyel GWP etkilerinin nasıl değişeceği değerlendirilmiştir.

#### 4.2. Envanter Analizi

Bu tez çalışmasında  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>,  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>/Ru, Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub>, NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve NiO olmak üzere 5 farklı katot üretimi yapılan bir projenin potansiyel çevresel etkileri analiz edilmiştir. Öncelikle 3 farklı katot tozu ( $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>, NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve NiO) üretilmiş ve bunların içinde en yüksek elektrokimyasal performansa sahip  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> katot, rutenyum ve gümüş ilavelerle karbonsuz olarak üretilerek bu yeni malzemelerin elektrokimyasal performansı incelenmiştir. Malzeme geliştirme çalışmalarının pilot ölçekli diğer pil üretim süreçlerinden farkı, başlangıç aşamasında enerji yoğunluğunu dikkate almadan, sadece farklı malzemeler ve pil bileşen kombinasyonlarına hücrenin tepkisini ölçmektir. Bu nedenle üretim süreci belirli bir spesifik kapasite hedefi ile gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 4.2. Çalışma kapsamında kullanıldığı katot cinsleri

Katot tozu üretim süreçlerinde karıştırıcı, otoklav, vakum filtre, etüv gibi cihazlar kullanılmıştır. Toz üretiminden sonra nihai akım toplayıcılı katot; üretilen toz ve çeşitli bağlayıcıların karıştırılması, üretilen çamurun Dr. Blade ile manuel olarak akım toplayıcı yüzeyine kaplanması ve etüvde kurutulması şeklinde elde edilmiştir. Bu

cihazların kullanıldıkları süre ve sıcaklıkta elektrik tüketimleri hesaplanmış ve deneysel süreçler için gerekli elektrik ihtiyacı bu yolla tespit edilmiştir.

Hücre bileşeni malzemeleri ve miktarlarına genel bir bakış Tablo 4.1.'de sunulmaktadır. Kural olarak, ticari malzemeler ortalama Türkiye elektrik karışımıyla modellenmiştir.

**Tablo 4.1.** Hücre bileşenleri ve malzemelerinin açıklaması

| MALZEMELER                                                                                                                                                             | MIKTARLAR | BİRİM |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|
| Anot,<br>Li Metal                                                                                                                                                      | 24        | mg    |
| Katot,<br>$\alpha$ -MnO <sub>2</sub><br>$\alpha$ -MnO <sub>2</sub> +Ru<br>Ag <sub>0.4</sub> Mn <sub>8</sub> O <sub>16</sub><br>NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub><br>NiO | 1         | mg    |
| Separatör                                                                                                                                                              | 30        | mg    |
| Elektrolit,<br>DMSO + LiClO <sub>4</sub><br>TEGDME + LiClO <sub>4</sub>                                                                                                | 0,2789    | mg    |
| Akım toplayıcı,<br>Nikel Köpük                                                                                                                                         | 80        | mg    |

Anot lityum folyodan yapılmıştır. *Lityum folyo Ecoinvent süreci Lithium {GLO}| market for | Alloc Rec*, S. temsil edilmektedir. 167 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg iklim etkisine sahiptir, Lityum, lityum klorürün elektrolizi ile üretilir. Swagelok tipi pil hücresinde 24 mg lityum folyo kullanılmıştır (Zackrisson, 2017).

#### 4.2.1. Üretim envanteri

##### 4.2.1.1. Katot üretimleri

$\alpha$ -MnO<sub>2</sub> katot üretim envanteri

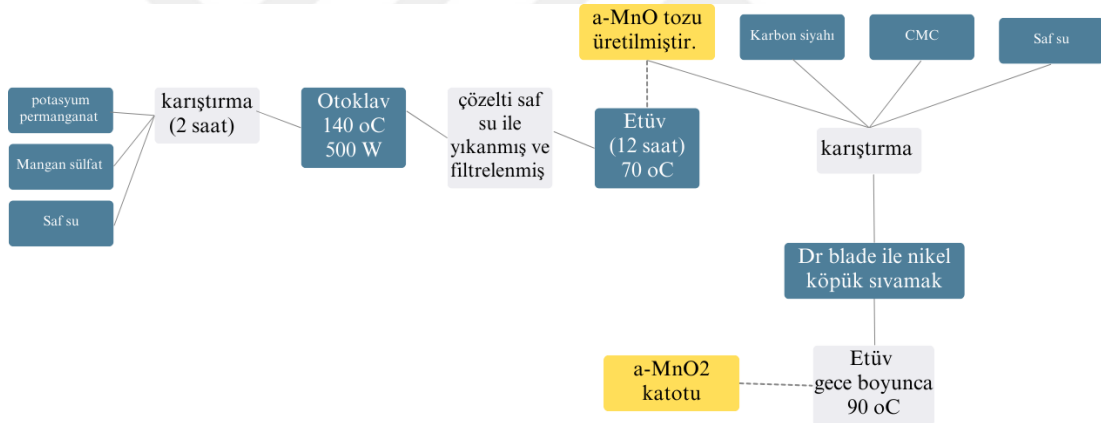
Bu çalışmada, Li-O<sub>2</sub> pillerinin üretimi için çeşitli malzemeler ve işlemler kullanılmıştır.

İlk adımda, potasyum permanganat (KMnO<sub>4</sub>), Mangan sülfat (MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) ve distile su oda sıcaklığında 2 saat karıştırılarak bir çözelti elde edilmiştir. Elde edilen çözelti 140°C ve 500 W'ta otoklavda termal işleme tabi tutulmuştur. Ardından, çözelti saf su ile yıkanmış, filtrelenmiş ve 70°C'de 12 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Bu işlemler sonucunda elde edilen  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> tozu, karbon siyahı, karboksi metil selüloz (CMC) ve saf su ile oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Elde edilen çamur, Dr. Blade ile

Nikel köpük üzerine manuel olarak sıvanmıştır. Ardından 90°C’de etüvde gece boyunca kurutulmuş ve nihai akım toplayıcılı katot elde edilmiştir (Cetinkaya, 2014).

**Tablo 4.2.**  $\alpha$  -MnO<sub>2</sub> katot üretim envanteri girdileri ve çıktıları

| Girdiler                            |          |       |
|-------------------------------------|----------|-------|
| Malzeme/Süreç                       | Miktar   | Birim |
| KMnO <sub>4</sub>                   | 84,267   | mg    |
| MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O | 135,2    | mg    |
| Saf Su                              | 141667   | mg    |
| Karbon Siyahı                       | 25       | mg    |
| CMC                                 | 25       | mg    |
| Nikel Köpük                         | 20000    | mg    |
| Elektrik                            | 8        | kWh   |
| Ulaştırma                           | 6,20     | Kg.km |
| Çıktılar                            |          |       |
| $\alpha$ -MnO <sub>2</sub>          | 20250    | mg    |
| Kimyasal Atık                       | 0.533    | mg    |
| Kimyasal Atık Su                    | 139571,8 | mg    |
| Su buharı                           | 3002,66  | mg    |



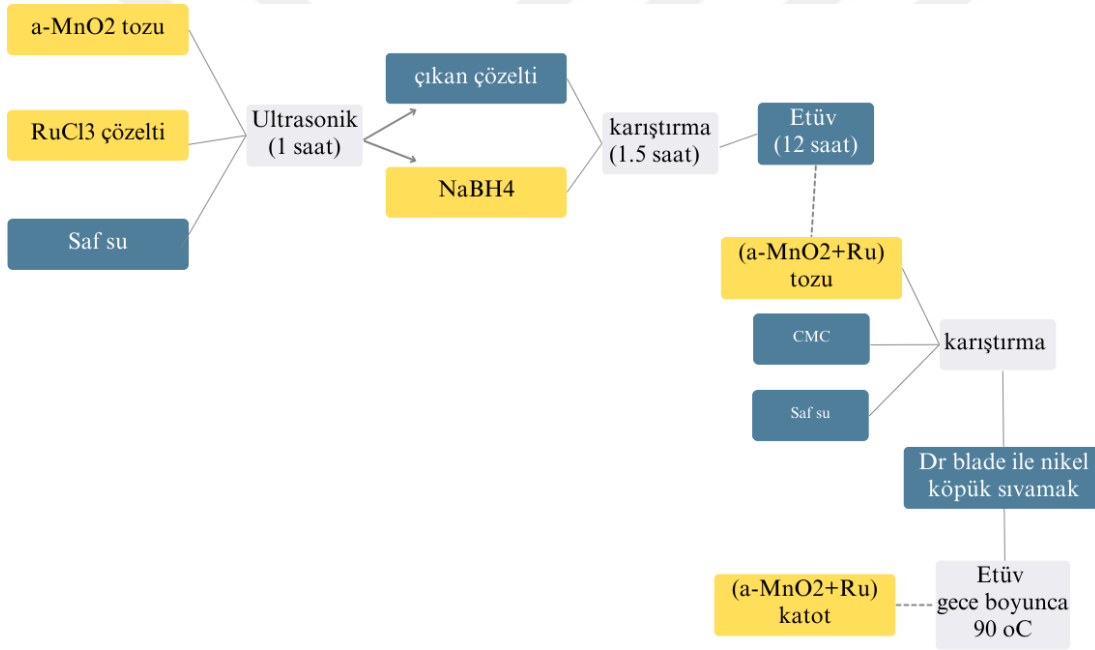
**Şekil 4.3.**  $\alpha$  -MnO<sub>2</sub> katot hazırlaması

$\alpha$  -MnO<sub>2</sub>+Ru katot üretim envanteri

Rutenyum katkılı katot üretiminde, öncelikle  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> katot tozu üretimi yukarıda anlatıldığı şekilde gerçekleştirilir. Ardından,  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> tozu ve RuCl<sub>3</sub> ayrı ayrı saf su ile karıştırılarak ultrasonik altında 1 saat işleme tabi tutulur. Ultrasonik işleminin sonunda  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> ve RuCl<sub>3</sub>, NaBH<sub>4</sub> ile 1.5 saat oda sıcaklığında karıştırılır. Elde edilen çözelti filtre edilir, saf su ile yıkanır ve 12 saat etüvde kurutularak  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>+Ru tozu elde edilir. Karbonsuz katot üretimi için elde edilen katot tozu, CMC ve saf su karıştırılarak çamur elde edilir ve  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>’de anlatıldığı basamaklar izlenerek nihai akım toplayıcılı katot elde edilir (Oncu, 2021).

**Tablo 4.3.**  $\alpha$  -MnO<sub>2</sub> + Ru katot üretim envanteri girdileri ve çıktıları

| Girdiler                            |          |       |
|-------------------------------------|----------|-------|
| Malzeme/Süreç                       | Miktar   | Birim |
| KMnO <sub>4</sub>                   | 67,41    | mg    |
| MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O | 108,16   | mg    |
| Rutenyum Klorür                     | 83       | mg    |
| Sodyum Bor Hidrat                   | 214      | mg    |
| Saf Su                              | 1429670  | mg    |
| CMC                                 | 50       | mg    |
| Nikel Köpük                         | 20000    | mg    |
| Elektrik                            | 11.92    | kWh   |
| Ulaştırma                           | 6,28     | Kg.km |
| Çıktılar                            |          |       |
| $\alpha$ -MnO <sub>2</sub> +Ru      | 20250    | mg    |
| Kimyasal Atık                       | 2        | mg    |
| Kimyasal Atık Su                    | 426915,1 | mg    |
| Su buharı                           | 3022,13  | mg    |

**Şekil 4.4.**  $\alpha$  -MnO + Ru katot hazırlaması

Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub> katot üretimi:

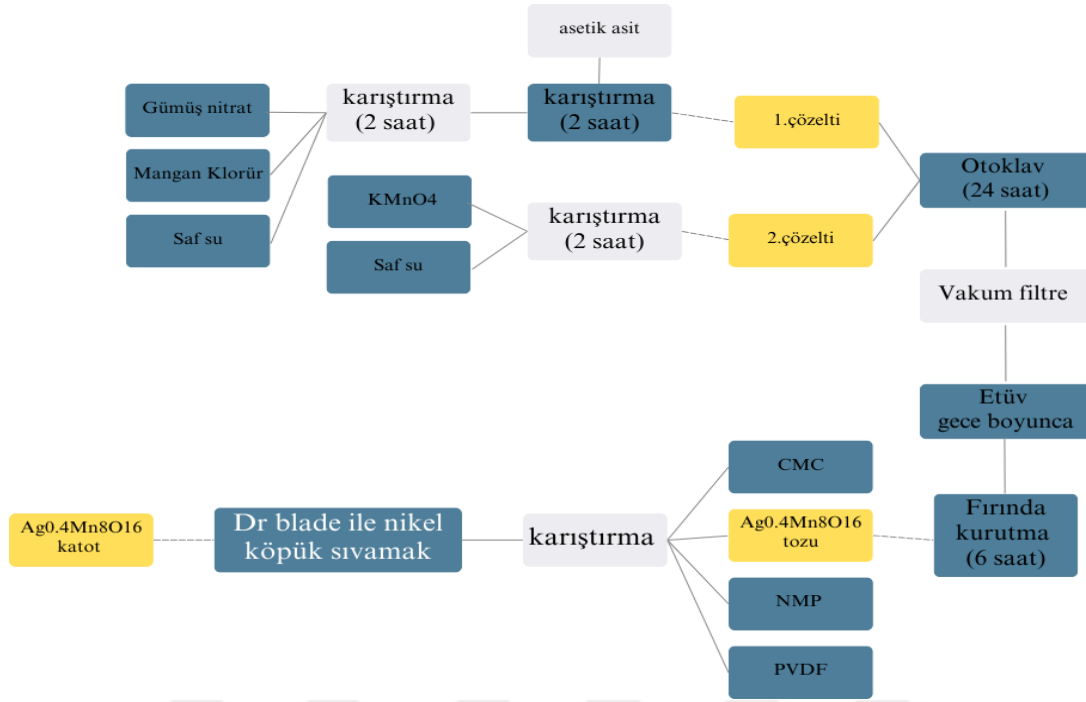
İlk adımda, Gümüş nitrat (AgNO<sub>3</sub>), Mangan Klorür (MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O) ve distile su oda sıcaklığında 2 saat karıştırılarak bir karışım elde edilir. Elde edilen karışıma asetik asit eklenerek 2 saat daha karıştırılır. Bu sırada, ayrı bir beherde KMnO<sub>4</sub> ve saf su oda sıcaklığında 2 saat karıştırılır. Elde edilen çözeltiler birbiriyle karıştırılır ve 24 saat otoklavda termal işleminden geçirilir. Isıl işlem sonrasında, çözelti saf su ile yıkanır ve filtre edilir. Filtreleme işlemini gece boyunca etüvde kurutma prosesi takip eder,

kurutmanın ardından 300°C de 6 saat ısıtma işlemine tabi tutulduktan sonra  $Ag_{0.4}Mn_8O_{16}$  katot tozu elde edilir.

Katot hazırlanması sürecinde, Carboxymethyl cellulose (CMC),  $Ag_{0.4}Mn_8O_{16}$ , N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) ve Polyvinylidene fluoride (PVDF) karıştırılarak çamur elde edilmiştir. Bu çamur, nikel köpük üzerine kaplanmış ve kurutulmuştur. Sonuç olarak, katot üretimi sırasında belirli miktarda malzeme kullanılmış, enerji tüketilmiş ve atık oluşmuştur.

**Tablo 4.4.**  $Ag_{0.4}Mn_8O_{16}$  Katot Üretim Envanteri Girdileri ve Çıktıları

| Girdiler                             |        |       |
|--------------------------------------|--------|-------|
| Malzeme/Süreç                        | Miktar | Birim |
| AgNO <sub>3</sub>                    | 21,1   | mg    |
| MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O | 410    | mg    |
| Asetik Asit                          | 349,77 | mg    |
| KMnO <sub>4</sub>                    | 211,44 | mg    |
| Saf Su                               | 166665 | mg    |
| CMC                                  | 25     | mg    |
| NMP                                  | 1200   | mg    |
| PVDF                                 | 25     | mg    |
| Nikel Köpük                          | 20000  | mg    |
| Elektrik                             | 116,16 | kWh   |
| Ulaştırma                            | 6,81   | kgkm  |
| Çıktılar                             |        |       |
| $Ag_{0.4}Mn_8O_{16}$                 | 20250  | mg    |
| Kimyasal Atık                        | 1,7    | mg    |
| Kimyasal Atık Su                     | 167265 | mg    |
| Su buharı                            | 190.6  | mg    |
| NMP buharı                           | 1200   | mg    |



**Şekil 4.5.**  $\text{Ag}_{0.4}\text{Mn}_8\text{O}_{16}$  Katot Hazırlaması

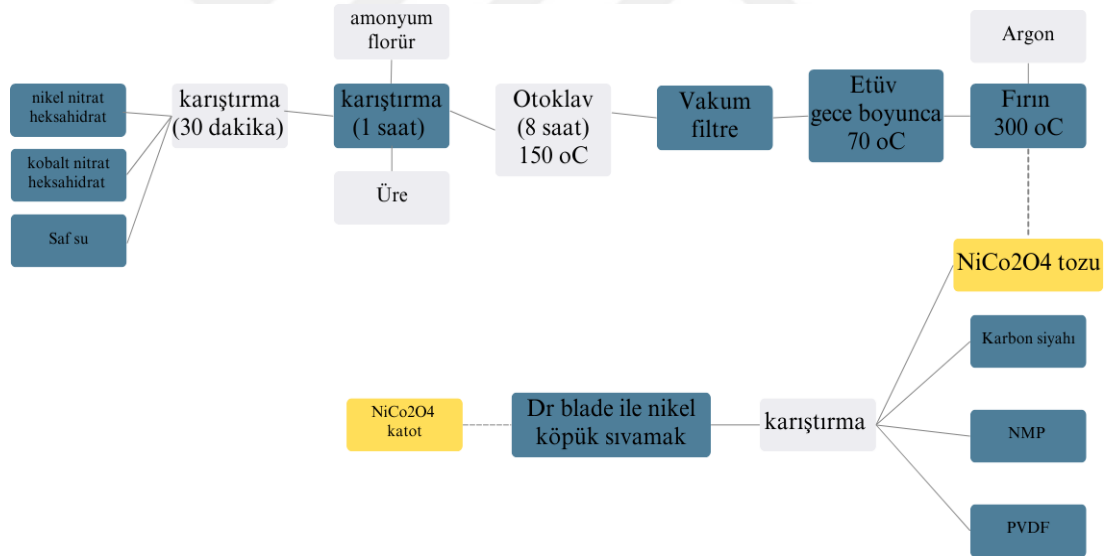
$\text{NiCo}_2\text{O}_4$  katot üretimi:

$\text{NiCo}_2\text{O}_4$  üretim süreci, altı aşamadan oluşan detaylı bir prosedürü kapsamaktadır. İlk aşamada, nikel nitrat heksahidrat ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), kobalt nitrat heksahidrat ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ve distile su oda sıcaklığında 30 dk boyunca karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. İkinci aşamada, karışıma amonyum florür ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) ve Üre ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) eklenir ve bu karışım 1 saat boyunca karıştırılır. Üçüncü aşamada, önceden hazırlanan karışım otoklavda yüksek sıcaklıkta ( $150^\circ\text{C}$ ) 8 saat ısıtılma işlemi görür. Bu işlem sırasında kimyasal reaksiyonlar tamamlanır. Ardından, karışım yıkanır ve vakum filtrasyonu ile filtre edilir. Bu işlem sırasında istenmeyen bileşenler ve atık maddeler ayrıştırılır. Beşinci aşamada, filtrasyon sonrası kalan karışım düşük sıcaklıkta ( $70^\circ\text{C}$ ) gece boyunca kurutulur. Bu işlem sırasında su ve diğer uçucu maddeler buharlaşır. Altıncı ve son aşamada, kurutulmuş karışıma Argon ekleyerek yüksek sıcaklıkta ( $300^\circ\text{C}$ ) bir fırında ısıtılarak  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$  bileşiği elde edilir. Tüm bu aşamalar sırasında enerji tüketimi ve atık yönetimi dikkatlice izlenmekte ve kontrol edilmektedir.

Katot hazırlanması sürecinde, Karbon siyahı,  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$ , N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) ve polivinilidin florür (PVDF) karıştırılarak karışım elde edilmiştir. Bu karışım, nikel köpük üzerine kaplanmış ve kurutulmuştur. Sonuç olarak, katot üretimi sırasında belirli miktarda malzeme kullanılmış, enerji tüketilmiş ve atık oluşmuştur.

**Tablo 4.5.** NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Katot Üretim Envanteri Girdileri ve Çıktıları

| Girdiler                                             |         |       |
|------------------------------------------------------|---------|-------|
| Malzeme/Süreç                                        | Miktar  | Birim |
| Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O | 442,756 | mg    |
| Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O | 221,2   | mg    |
| NH <sub>4</sub> F                                    | 197,51  | mg    |
| CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O                     | 640,62  | mg    |
| Saf Su                                               | 35555   | mg    |
| Argon                                                | 1284,48 |       |
| Karbon siyahı                                        | 25      | mg    |
| NMP                                                  | 1200    | mg    |
| PVDF                                                 | 25      | mg    |
| Nikel Köpük                                          | 20000   | mg    |
| Elektrik                                             | 52,58   | kWh   |
| Ulaştırma                                            | 7,36    | Kg.km |
| Çıktılar                                             |         |       |
| NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                     | 20250   | mg    |
| Kimyasal Atık                                        | 0.89    | mg    |
| Kimyasal Atık Su                                     | 36523,4 | mg    |
| Su buharı                                            | 333,33  | mg    |
| NMP buharı                                           | 1200    | mg    |

**Şekil 4.6.** NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Katot Hazırlaması

Nikel nitrat heksahidrat ve kobalt nitrat heksahidrat SimaPro Ecoinvent veritabanından onu temsil edecek bir veri bulunmamıştır, bu nedenle literatüre göre modellenme yapılmıştır (Hoydonckx, 2007).

**Tablo 4.6.** Nikel nitrat heksahidrat ve kobalt nitrat heksahidrat modellemesi

|                                                                                   |          |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|------|
| Nickel nitrate hexahydrate (Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O) |          |      |
| Water, ultrapure                                                                  | 3.10E+02 | g    |
| Nickel, 99.5%                                                                     | 2.02E+02 | g    |
| Electricity, medium voltage                                                       | 8.25E+02 | KJ   |
| Nitric acid, without water, in 50% solution state                                 | 4.33E+02 | g    |
| Transport, freight train                                                          | 3.81E-01 | T*km |
| Transport, freight, lorry 16 - 32 metric ton, EURO6                               | 1.27E-01 | T*km |
| Cobalt nitrate hexahydrate (Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O) |          |      |
| Water, ultrapure                                                                  | 2.48E+02 | g    |
| cobalt                                                                            | 2.02E+02 | g    |
| Nitric acid, without water, in 50% solution state                                 | 8.66E+02 | g    |
| Transport, freight train                                                          | 6.41E-01 | T*km |
| Transport, freight, lorry 16 - 32 metric ton, EURO6                               | 2.14E-01 | T*km |

Çalışmada katot hazırlama esnasında Argon yerine sıvı Argon kullanılmıştır. SimaPro Ecoinvent veritabanında bulunan veri: *argon, liquid market for argon, liquid | argon, liquid | Consequential, U – RER* kullanılmıştır.

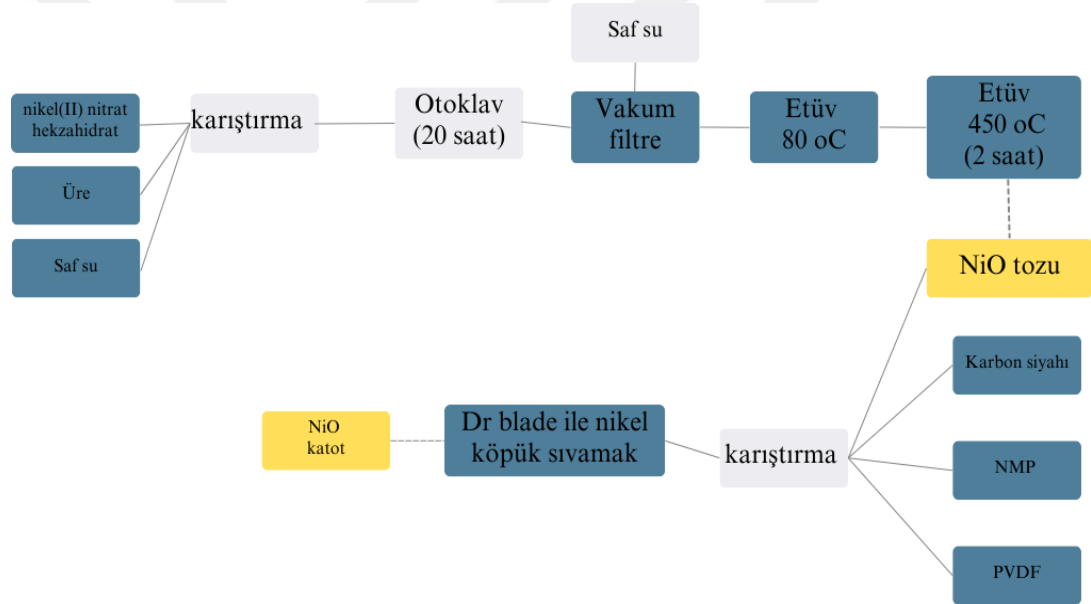
NiO katot üretimi:

NiO katot tozu üretimi için beş aşamadan oluşan detaylı bir prosedürü içermektedir. İlk aşamada, CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O, Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O ve distile su oda sıcaklığında karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. bu karışım 20 saat boyunca yüksek sıcaklıkta otoklavlanır. Üçüncü aşamada, otoklavlanmış karışım distile su ile yıkanarak vakum filtreleme işlemine tabi tutulur. Bu aşamada, atık su ayrıştırılır. Dördüncü aşamada, elde edilen karışım 80°C sıcaklıkta kurutularak su buharı ve diğer uçucu maddeler uzaklaştırılır. Son aşamada, kurutulmuş karışım 450°C sıcaklıkta 2 saat ısıtılma tabi tutularak nihai NiO bileşiği elde edilir.

Katot hazırlanması sürecinde, karbon siyahı, NiO, N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) ve PVDF karıştırılarak karışım elde edilmiştir. Bu karışım, nikel köpük üzerine kaplanmış ve kurutulmuştur. Sonuç olarak, katot üretimi sırasında belirli miktarda malzeme kullanılmış, enerji tüketilmiş ve atık oluşmuştur.

**Tablo 4.7.** NiO Katot üretim envanteri girdileri ve çıktıları

| Girdiler                                             |            |       |
|------------------------------------------------------|------------|-------|
| Malzeme/Süreç                                        | Miktar     | Birim |
| Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O | 549,78     | mg    |
| CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O                     | 624,89     | mg    |
| Saf Su                                               | 1301195,55 | mg    |
| Karbon siyahı                                        | 25         | mg    |
| NMP                                                  | 1200       | mg    |
| PVDF                                                 | 25         | mg    |
| Nikel Köpük                                          | 20000      | mg    |
| Elektrik                                             | 93,47      | kWh   |
| Ulaştırma                                            | 6,86       | Kg.km |
| Çıktılar                                             |            |       |
| NiO                                                  | 20250      | mg    |
| Kimyasal Atık                                        | 1          | mg    |
| Kimyasal Atık Su                                     | 1301446    | mg    |
| Su buharı                                            | 725        | mg    |
| NMP buharı                                           | 1200       | mg    |

**Şekil 4.7.** NiO katot hazırlaması

Her pil hücresinde yoğunluk ve hacim farklarından dolayı farklı miktarlarda Nikel Köpük kullanılmıştır. Ancak, çalışmada her bir katot için ortalama 20000 mg Nikel köpük kullanıldığı kabul edilmiştir.

Akım toplayıcı için, Nikel köpü SimaPro Ecoinvent veritabanından onu temsil edecek bir veri bulunmamıştır, bu nedenle literatüre göre modellenme yapılmıştır (Uppsala University, n.d.).

**Tablo 4.8** Ni köpük üretimine yönelik envanter verileri

| Malzeme girdileri          |                                                                                            |                      |    |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----|
| Enerji                     | heat, district or industrial, natural gas [17300: Steam and hot water]                     | 3.38                 | KJ |
| Ni                         | Nickel [Metals]                                                                            | 0.0021               | Kg |
| Polyurethane flexible köpü | Polyurethane flexible foam (PU) [Plastics]                                                 | 4.1*10 <sup>-5</sup> | Kg |
| Çıktılar                   |                                                                                            |                      |    |
| Ni köpü                    | Ni Foam [Metals]                                                                           | 0.0021               | Kg |
| Polyurethane atıkm yakma   | CH: disposal, polyurethane, 0.2% water, to municipal incineration [municipal incineration] | 4.1*10 <sup>-5</sup> | Kg |
| Atık ısı                   | Waste heat [Other emissions to air]                                                        | 3.38                 | MJ |

**4.2.1.2. Elektrolit üretim süreçleri**

Üretilen katotlarla farklı elektrolitler kullanılarak, malzemelerin birlikte sergiledikleri elektrokimyasal performans değişimleri gözlemlenmiştir. Bu amaçla, 1 M konsantrasyonlu iki farklı elektrolit hazırlanmıştır. Bu elektrolitlerde elektrolit çözücüsü olarak TEGDME ve DMSO çözücülerini kullanılmıştır. Her iki elektrolitte kullanılan elektrolit tuzu ise LiClO<sub>4</sub> olarak seçilmiştir. Elektrolitler 1 M konsantrasyonlu olacak şekilde çözücüye elektrolit tuzu eklenip glove box içerisinde 3 saat karıştırılarak hazırlanmıştır. Bu süre boyunca karıştırıcının enerji tüketimi 2.46 kWh, MBRAUN LabMaster Pro marka glovebox elektrik tüketimi ise 5.52 kWh olarak belirlenmiştir. TEGDME'nin etilen oksit ve dimetil eterin reaksiyonu yoluyla üretildiği ve etilen glikol dimetileter üretiminde olduğu gibi enerji kullanımı, emisyonlar ve atıklarla aynı seviyede olduğu varsayılmıştır. TEGDME toksik olarak değerlendirilmektedir. Özellikle çalışma ortamında önlem alınması gerekiyor. Çalışma ortamında TEGDME'yi, veri eksikliği nedeniyle modellenmemiştir (Vogt, 2000).

**Tablo 4.9.** Elektrolitin malzeme girdileri (Huijbregts, 2016)

| Malzeme girdileri                       |                                                                                                                 |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TEGDME Tetra etilen glikol dimetil eter | Ethylene oxide, at plant/RER S<br>Dimethyle ether, at plant/RER S<br>Lithium hexafluorophosphate, at plant/CN S |

#### **4.2.1.3. Separatör ve Anot**

Pil hücrelerinde kullanılan saf lityum metal anot ve cam fiber separatörler hazır olarak temin edilmektedir. Test çalışmaları için üretilen 60 hücre için toplam 1440 mg lityum metali ve 1800 mg separatör kullanılmıştır.

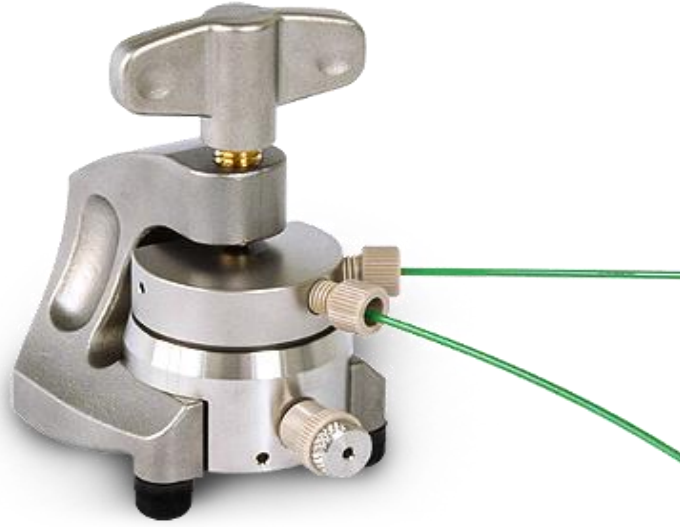
Separatör için deneysel çalışmalarda lityum hava pil hücrelerinde separatör olarak cam fiber separatör kullanılmıştır. Ecoinvent veritabanında cam fiber separatöre ait verilerin bulunamamasından dolayı “Separator, lithium-ion battery, at plant/CN S” ile ifade edilen lityum iyon pil hücrelerinde kullanılan separatör kullanıldığı kabul edilmiştir (Akbulut, 2021).

#### **4.2.2. Ulaştırma aşaması**

Bu çalışmada yaptığımız nakliye hesaplaması için, Pil bileşenlerin Türkiye’de üretildiği varsayılıyor. Hammadde üreticilerinden (Süper cam – Ankara) Sakarya laboratuvara kadar 306 km’dir. Bu da bir kilogram başına laboratuvara taşınması için yeni değerin 0,306 (t·km) olduğu anlamına geliyor.

#### **4.2.3. Hücre birleştirme**

Katot ve elektrolit hazırlandıktan sonra, 18 mm çapında swagelok tipi hücrelerin birleştirilmesi işlemi glove box içerisinde gerçekleştirilmiştir. 1 adet ECC-Air El-cell hücre birleştirmesi için gerekli süre ortalama 10 dk olarak kabul edilmiştir. Bu süre için glovebox’ın elektrik tüketimi 0.306 kWh’tir. Her bir katot ve elektrolit kombinasyonu için CV ve şarj/deşarj çevrim testleri 3’er tekrarlı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle 1 katot tipine ait CV testleri için 6, elektrokimyasal testler için de 6 hücre hazırlanmaktadır. 5 farklı katotun her biri için 12 hücre hazırlandığından, testler için toplam 60 hücre hazırlanmaktadır. 60 hücre birleştirme için toplam elektrik tüketimi 18,36 kWh’tir.



**Şekil 4.8.** ECC-Air El-cell (El-Cell GmbH, n.d.).

#### **4.2.4. Kullanım (elektrokimyasal test) aşaması**

Kullanım aşaması, pil hücrelerinin elektrokimyasal testler öncesi oksijene doyulması, şarj/deşarj testleri ve CV testlerini içermektedir. Katotların fiziksel karakterizasyon testleri sistem sınırlarına dahil edilmemiştir. Bu çalışmada Elektrokimyasal test süreçlerindeki enerji tüketimi ve CV toplam enerji tüketimi dikkate alınmıştır.

- Çevrim sayısı ve tüketilen elektrik miktarı

Elektrokimyasal testler ve CV testler için farklı cihazların elektrik tüketim bilgileri ve diğer parametreler verilmiştir. Farklı pil konfigürasyonları ve elektrolitler kullanılarak yapılan testlerin elektrik tüketim miktarları belirtilmiştir. CV testlerinin süreleri ve elektrokimyasal testlerin toplam süreleri de belirtilmiştir.

Çeşitli pil konfigürasyonlarının değerlendirilmesi için yapılan elektrokimyasal şarj/deşarj ve CV testlerinin enerji tüketimi ve oksijen kullanımı ayrıntılı bir şekilde hesaplanmıştır. Anahtar parametreler, bilgisayarlar (50 W/saat), ekranlar (40 W/saat) ve Gamry cihazları (260 W/saat) gibi temel ekipmanların güç tüketimini ve oksijen akış hızını (480 ml/saat) içermektedir. Test edilen pil konfigürasyonları, katot malzemesi olarak NiO, NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>,  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>+Ru, Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub> kullanırken, elektrolit olarak TEGDME+LiClO<sub>4</sub> veya DMSO+LiClO<sub>4</sub>, anot olarak lityum ve separatör olarak cam fiber separatör kullanılmaktadır. Her bir elektrokimyasal test döngüsü 20 saat sürmekte ve toplamda 10 döngü ile 200 saate ulaşmaktadır. CV testleri

ise toplamda 75 saat sürmektedir. Her test türü için toplam enerji tüketimi ayrıntılı bir şekilde hesaplamakta ve elektrik ile oksijen gereksinimlerini vurgulayarak kapsamlı bir genel bakış sağlanmaktadır. Şarj/deşarj ve CV testi için envanter tablo 4.10.'da yapılmıştır.

**Tablo 4.10.** Çalışmada kullanım aşamasında tüketilen elektrik miktarı

| Elektrokimyasal test toplam tüketim miktarları |             |             |             |
|------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Bilgisayar (kWh)                               | Ekran (kWh) | Gamry (kWh) | Oksijen (L) |
| 300                                            | 240         | 1560        | 2880        |
| CV toplam tüketim miktarları                   |             |             |             |
| 112,5                                          | 90          | 585         | 1080        |
| Toplam test tüketim miktarları                 |             |             |             |
| Oksijene doyurma (L)                           |             | 345,6       |             |
| Bilgisayar (kWh)                               | Ekran(kWh)  | Gamry(kWh)  | Oksijen (L) |
| 412,5                                          | 330         | 2145        | 4305,6      |

#### 4.2.5. Yaşam sonu aşaması

Katot üretimi esnasında çıkan kimyasal atıklar ve test süreçleri sonunda atık hale gelen malzemeler yakılarak bertaraf edilmektedir. Kimyasal atıklar, Sakarya Üniversitesi'nin anlaşmalı olduğu tehlikeli atık yakma tesisine gönderilmektedir. Tesisin üniversiteye mesafesi 39 km'dir. Türkiye tehlikeli atık yakma tesisine ait spesifik birim proses ecoinvent veritabanında bulunmadığından, en yakın temsili birim proses "Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland}| treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration, with energy recovery | Cut-off, U" ecoinvent veritabanından seçilmiştir.

#### 4.3. Optimizasyon

Küçük ölçekli laboratuvar çalışmaları genellikle düşük verimli süreçler olmaktadır. Ayrıca, deneysel süreçler, uygulayıcının çalışma koşulları, tarzı ve saatlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Mevcut çalışmada malzemelerin elektromanyetik karıştırıcıda karıştırılma ve etüvde kurutulma süreleri laboratuvar şartlarında optimize edilmiştir. Ayrıca, çalışmada elektrokimyasal testlerden kaynaklı tüketimler tek pil hücresinin test edilmesi durumuna göre hesaplanmıştır. Ancak, 1 katot tipine ait 3 testin aynı anda elektrokimyasal testlerden geçirilmesi durumunda,

bilgisayar kasası ve ekran kullanımından kaynaklı etkilerde de değişiklik olacaktır. Çoğu durumda, laboratuvar ortamında küçük ölçekli üretim yapılırken çözeltilerin karıştırılmasına ayrılan süre ihtiyaç duyulandan uzun tutulmaktadır. Ayrıca, malzemelerin kurutulması için “gece boyunca” ifadesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu süre uygulayıcının çalışma saatlerine bağlı olarak 12-15 saat arasında değişebilmektedir. Ancak, yapılan çalışmalarda uygun sıcaklıkta 8 saatlik bir kurutmanın laboratuvar şartlarında yeterli olduğu görülmüştür. Laboratuvar süreçleri belirtilen koşullara göre optimize edilmiştir. Bunun sonucunda muhtemel çevresel etkilerdeki değişiklikler gözlenmiştir. Optimizasyon sonrası elektrik tüketimi üretim aşamasında toplam 269,15 kWh elde edilirken, test aşamasında 2325 kWh olarak elde edilmiştir.

#### **4.4. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme**

Bu çalışma için seçilen etki değerlendirme yöntemi, ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H. 'dır. Etki değerlendirmesinin (LCIA) bu yöntemi ilk kez 2008 yılında geliştirilmiştir. Genel olarak, etki değerlendirme yöntemlerinin birincil amacı, sınırlı sayıda nitel göstergede LCA etkilerinin uzun listesini sunmaktır. Temel model oluşturulup modifikasyon yapıldıktan sonra Bu modeller kullanılarak her bir Benzer şekilde, pil hücre üretiminde uygulanan bileşenlerin her birinin emisyonlarındaki etkiyi araştırılabilir ve uygulanabilir. Ecoinvent kullanılarak farklı etki kategorilerine ilişkin sonuçlara ulaşılabilir ve bu sonuçlar bir sonraki kısmına sunulacak ve tartışılacaktır. Toplam 12 kategori için tam yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA) lityum oksijen pillerin tüm aşamaları (üretim aşaması, kullanım aşaması, bertaraf aşaması) için sonuçlarını göstermektedir. En önemli etki kategorilerinden biri Küresel Isınma Potansiyeli, Asidifikasyon ve İnsan Kanserojen Toksisitedir.

#### **4.5. Hassasiyet ve Belirsizlik Analizi**

Pil hücresi üretimi ve test süreçleri enerji yoğun proseslerdir. Bu nedenle, kullanılan elektrik kaynağı potansiyel etki sonuçları üzerinde yüksek etkiye sahiptir. Mevcut çalışmada deneysel süreçler Türkiye’de gerçekleştirildiğinde Ecoinvent veritabanında Türkiye elektrik karışımı kullanılmıştır. Ancak, ülke elektrik karışımının değişmesi, sonuçları da yüksek oranda etkileyecek. Muhtemel değişiklikleri tespit edebilmek amacıyla, elektrik üretim kaynakları Türkiye’den ve birbirinden farklı olan iki ülke

İsveç ve Fransa ülke elektriği Ecoivent veri tabanından kullanılarak hesaplar bir de bu elektrik karışımı ile gerçekleştirilmiş ve deney sonuçlarının elektrik kaynağına hassasiyeti araştırılmıştır. ReCiPe metoduna göre, 1 kWh elektrik üretimi için Türkiye'nin GWP etkisi 622 g CO<sub>2</sub>-eş iken bu değer Fransa (FR) için 89,8 ve İsveç için 45,3 g CO<sub>2</sub>-eş'dir.

Belirsizlik analizi, belirli bir durum için girdi değişkenliğinden kaynaklanan çıktı değişkenliğini nicel olarak değerlendirmeyi amaçlar. Belirsizlik analizi ile, tek bir değer yerine, her çıktı için bir belirsizlik dağılımı oluşturulur. Mevcut çalışmada, çevrim testleri esnasında çevrim süreleri pil hücresinin elektrokimyasal davranışına göre farklılık gösterebilmektedir. Test süresine bağlı olarak elektrik tüketimleri ve oksijen sarfıyatı değişiklik göstermektedir. Mevcut çalışmada test süresi ortalama 20 saat/çevrim olarak belirlenmiştir. Test süreçlerinin minimum 12 saat/çevrim ve maksimum 30 saat/çevrim arasında olması ihtimallerinde gerçekleşecek potansiyel küresel ısınma etkisi %95 güven aralığıyla monte carlo simülasyonu kullanılarak analiz edilmiştir.



## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 5.1. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi Sonuçları

Tüm 12 kategori için tam yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA) lityum oksijen pillerin tüm aşamaları için sonuçlarını göstermektedir.



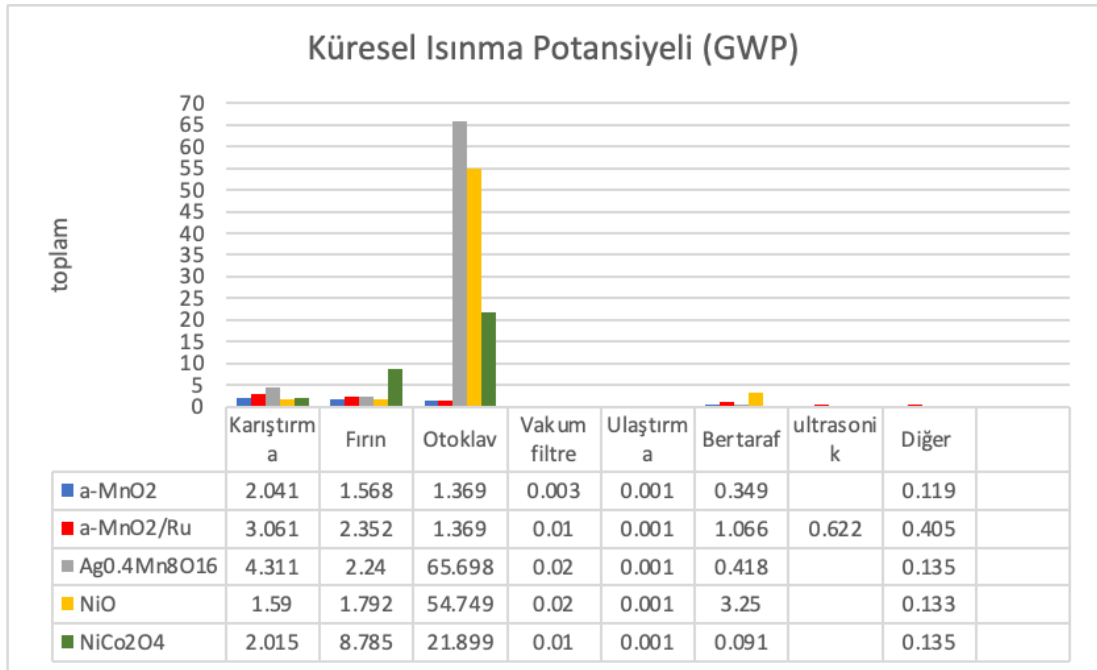
**Tablo 5.1.** Li-oksijen pilin tüm etki kategorileri için LCIA sonuçları

| Etki kategorisi                                                       | Birim                 | Toplam  | Katot<br>üretimi | Anot ve<br>separatör | Elektrolit<br>üretimi | Hücre<br>birleştirme | Test aşaması | Bertaraf |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------|----------|
| Küresel Isınma potansiyeli (GWP)                                      | kg CO <sub>2</sub> eq | 2010.90 | 181.63           | 0.18                 | 3.13                  | 11.42                | 1799.66      | 14.88    |
| Ozon Oluşumu,<br>İnsan Sağlığı (OFP <sub>hh</sub> )                   | kg NO <sub>x</sub> eq | 4.97    | 0.45             | 0.00                 | 0.01                  | 0.03                 | 4.47         | 0.01     |
| Ozon Oluşumu,<br>karasal Ekosistem (OFP <sub>te</sub> )               | kg NO <sub>x</sub> eq | 5.04    | 0.46             | 0.00                 | 0.01                  | 0.03                 | 4.54         | 0.01     |
| Karasal asidifikasyon (TAP)                                           | kg SO <sub>2</sub> eq | 10.11   | 0.90             | 0.00                 | 0.02                  | 0.06                 | 9.12         | 0.01     |
| Tatlı Su Ötrofikasyon (FWEP)                                          | kg P eq               | 2.27    | 0.20             | 0.00                 | 0.00                  | 0.01                 | 2.05         | 0.00     |
| karasal Ekosistem (TETP)                                              | kg 1,4-DCB            | 6637.98 | 595.46           | 0.85                 | 10.43                 | 37.96                | 5979.10      | 14.18    |
| Tatlı Su Ekotoksisite (FWETP)                                         | kg 1,4-DCB            | 174.61  | 16.53            | 0.01                 | 0.27                  | 0.99                 | 156.56       | 0.25     |
| Deniz Ekotoksisite (METP)                                             | kg 1,4-DCB            | 224.61  | 21.24            | 0.01                 | 0.35                  | 1.28                 | 201.39       | 0.34     |
| İnsan Kanserojen Ekotoksisite<br>(HTP <sub>cancer</sub> )             | kg 1,4-DCB            | 148.63  | 13.67            | 0.01                 | 0.23                  | 0.84                 | 132.26       | 1.63     |
| İnsan Kansorejen Olmayan<br>Ekotoksisite (HTP <sub>non-cancer</sub> ) | kg 1,4-DCB            | 3391.84 | 319.53           | 0.21                 | 5.25                  | 19.32                | 3041.59      | 5.96     |
| Fosil Kaynak Kıtılığı (FRSP)                                          | kg oil eq             | 480.79  | 42.97            | 0.05                 | 0.77                  | 2.75                 | 432.73       | 1.53     |
| Su Tüketimi (WCP)                                                     | m3                    | 21.50   | 1.92             | 0.00                 | 0.03                  | 0.12                 | 19.37        | 0.05     |

Tablo 5.1. Li-O<sub>2</sub> pil hücresi üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarının farklı çevresel etki kategorilerindeki potansiyel katkılarını ayrıntılı bir şekilde sunmaktadır. Özellikle her bir yaşam döngüsü aşamasının potansiyel çevresel etkilerdeki payını ortaya koyması, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) çalışmalarında hedeflenen çevresel iyileştirmeler için kritik bir yol haritası oluşturmaktadır. Tüm etki kategorileri incelendiğinde en büyük çevresel etkinin kullanım aşamasından kaynaklandığı görülmektedir. Özellikle GWP, HTPcancer, FWEP ve FWETP gibi insan ve doğa sağlığı için önemli etki kategorileri her bir yaşam döngüsü aşaması için ayrıntılı incelenerek potansiyel etkilerin nedenleri araştırılmıştır.

### 5.1.1. Üretim kaynaklı sonuçlar

Laboratuvar üretimi kaynaklı toplam GWP etkisi (katot ve elektrolit üretimleri) 184,76 kg CO<sub>2</sub>-eş olarak analiz edilmiştir. Bu etkilerin %98,3'ü katot üretim süreçlerinden, %1,7'si elektrolit üretim süreçlerinden ileri gelmektedir. Katot üretiminden kaynaklanan 181, 63 kg CO<sub>2</sub>-eş etkinin %40'ı Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub> katot üretiminden, %34 ve %18'i sırasıyla NiO ve NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> katotların üretim süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Katot tiplerinin farklı GWP etkilerine sahip olmaları, her bir katot tipinin üretimi için gerekli malzeme ve elektrik ihtiyaçlarının farklılığından kaynaklanmaktadır.



**Şekil 5.1.** Katot tiplerine göre GWP sonuçları

Şekil 5.1. Her bir katot tipinde kullanılan cihazların sebep olduğu GWP etkisini göstermektedir. Buna göre, Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub> katotun üretimi malzemelerin 24 saat

boyunca otoklavda ısıtıl işleminden geçirilmesi, yüksek enerji tüketimine ve dolayısıyla yüksek GWP etkisine neden olmuştur. Aynı şekilde, NiO ve NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> katotlarda da otoklav kullanımı, yüksek GWP etkilerinin gözlenmesine neden olmuştur. GWP etki kategorisine paralel şekilde, HTP<sub>cancer</sub>, FWEP ve FWETP etki kategorilerinde de elektrik tüketimi etkilerin ana sebebidir. Tüm etki kategorilerinde, elektrik tüketiminin yüksek etkiye sahip olmasının nedeni birim prosesler incelenerek araştırılmıştır. Buna göre, özellikle linyit kömür madenciliği potansiyel çevresel etkilerde yüksek etkiye sahip olmaktadır. Bu sonuç, enerji tüketiminin ve dolayısıyla fosil yakıt kaynaklı karbon emisyonlarının, toplam çevresel etkilerde baskın bir role sahip olduğunu göstermektedir.

Katot üretimi ise 181,63 kg CO<sub>2</sub>-eş ile üretim aşamasında en büyük katkıyı yapmaktadır. Toplam olarak 2010,90 kg CO<sub>2</sub>-eş etkiye sahiptir. Bu sonuç, malzeme seçiminde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik stratejilerin önemini vurgulamaktadır. Ozon oluşumu (OFP<sub>hh</sub> ve OFP<sub>te</sub>) ve karasal asidifikasyon (TAP) kategorilerinde, kullanım aşamasındaki etkiler %90'ın üzerinde bir katkı sağlamaktadır. Bu durum, enerji kaynağı seçiminin yanı sıra pil kullanım verimliliğini artıracak teknolojik iyileştirmelerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Tatlı su ve deniz ekosistemleri üzerindeki ekotoksik etkiler (FWETP ve METP) ile karasal ekotoksikite (TETP), büyük ölçüde kullanım aşamasından kaynaklanmaktadır (örneğin, TETP için 5979,10 kg 1,4-DCB). Bu, pilin çalışma sürecinde kullanılan enerji kaynaklarının ve yan ürünlerinin su ve toprak kirliliğine olan olumsuz katkılarını azaltmanın önemini vurgulamaktadır. Kanserojen ve kanserojen olmayan toksisite kategorilerinde (HTP<sub>cancer</sub> ve HTP<sub>non-cancer</sub>), kullanım aşaması (sırasıyla 132,26 ve 3041,59 kg 1,4-DCB), diğer tüm süreçlerden daha büyük bir katkıya sahiptir. Bu, enerji üretim süreçlerinde ortaya çıkan toksik maddelerin etkisinin ne kadar büyük olduğunu göstermektedir. Fosil kaynak kıtlığı (FRSP) ve su tüketimi (WCP) kategorilerine gelecek olursak, En büyük pay kullanım aşamasına aittir (sırasıyla 432,73 kg oil eq ve 19,37 m<sup>3</sup>). Bu, pil üretim süreçlerinin enerji kaynakları üzerinde oluşturduğu baskıyı ciddi anlamda etkilemektedir.

Çevresel etkilerin büyük bir kısmının kullanım aşamasından kaynaklandığını açıkça göstermektedir. Aynı zamanda aşağıdaki grafiğe göre, katot üretiminde çıkan sonuçlar ve etkiler detaylı olarak açıklanmıştır.

### 5.1.2. Kullanım aşamasındaki sonuçları

Ar&Ge süreçleri yaşam döngüsü aşamalarında en fazla potansiyel etkiye neden olan kullanım aşamasından kaynaklı etkiler, Tablo 5.2. ve 5.3.'te ayrıntılı olarak listelenmiştir.

**Tablo 5.2.** Elektrokimyasal test sürecinde (LCIA) sonuçları

| ŞARJ - DEŞARJ |                       |          |         |          |           |
|---------------|-----------------------|----------|---------|----------|-----------|
| Etki kategori | Birim                 | Toplam   | Oksijen | Elektrik | Ulaştırma |
| GWP           | kg CO <sub>2</sub> eq | 1308.617 | 2.11    | 1306.503 | 0.004     |
| OFPhh         | kg NO <sub>x</sub> eq | 3.253    | 0.004   | 3.249    | 0         |
| OFpte         | kg NO <sub>x</sub> eq | 3.3      | 0.004   | 3.296    | 0         |
| TAP           | kg SO <sub>2</sub> eq | 6.633    | 0.007   | 6.626    | 0         |
| FWEP          | kg P eq               | 1.489    | 0.002   | 1.488    | 0         |
| TETP          | kg 1,4-DCB            | 4345.41  | 3.453   | 4341.886 | 0.071     |
| FWETP         | kg 1,4-DCB            | 113.854  | 0.087   | 113.766  | 0         |
| METP          | kg 1,4-DCB            | 146.455  | 0.116   | 146.339  | 0         |
| HTPcancer     | kg 1,4-DCB            | 96.178   | 0.138   | 96.039   | 0         |
| HTPnon-cancer | kg 1,4-DCB            | 2211.863 | 2.55    | 2209.31  | 0.003     |
| FRSP          | kg oil eq             | 314.644  | 0.574   | 314.069  | 0.001     |
| WCP           | m <sup>3</sup>        | 14.083   | 0.123   | 13.96    | 0         |

Tablo 5.2. Şarj vedeşarj test süreçlerinden kaynaklanan potansiyel çevresel etkileri, farklı kategorilerde detaylandırarak Li-O<sub>2</sub> pil kullanımında enerji ve malzeme girdilerinin çevresel sonuçlarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir. Analiz edilen verilere göre, çevresel etkilerin büyük bir kısmı enerji tüketimine bağlı süreçlerden kaynaklanmaktadır ve bu durum enerji kaynaklarının karbon yoğunluğunun çevresel etkilerde belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir. Özellikle küresel ısınma potansiyeli (GWP), toplam 1308.617kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri hesaplanmış olup, bu değerin neredeyse tamamı (%99) elektrik tüketiminden kaynaklanmaktadır. Karasal Ekosistem (TETP) 4345.41 kg 1,4-DCB eşdeğeri ve İnsan Kanserojen Olmayan toksisite (HTPnon-cancer) 2211.863 kg 1,4-DCB eşdeğere sahip olan, kritik kategorilerdeki toplam etkilerin neredeyse tamamı elektrik tüketimine atfedilmiştir.

Ekotoksisite kategorilerinde (FWETP, METP) ve Fosil Kaynak Kısıtlığı (FRSP) etki kategorinde de, GWP ve HTPkanser kategorilerine paralel şekilde elektrik tüketimi birinci sırada yer almaktadır. Bu da elektrik üretim süreçlerinin karbon ayak izinin

azaltılmasının çevresel iyileştirme çabalarında öncelikli olduğu anlamına gelmektedir. Oksijen kullanımı ve taşıma süreçlerinin toplam etki içerisindeki payının ise oldukça düşük olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.3.** CV test sürecinde (LCIA) sonuçları

| CV              |                       |          |          |          |           |
|-----------------|-----------------------|----------|----------|----------|-----------|
| Etki kategorisi | Birim                 | Toplam   | Oksijen  | Elektrik | Ulaştırma |
| (GWP)           | kg CO <sub>2</sub> eq | 491.0469 | 0.865835 | 489.939  | 0.242     |
| (OFPhh)         | kg NO <sub>x</sub> eq | 1.220705 | 0.002    | 1.218    | 0.001     |
| (OFpte)         | kg NO <sub>x</sub> eq | 1.239    | 0.002    | 1.236    | 0.001     |
| (TAP)           | kg SO <sub>2</sub> eq | 2.488    | 0.003    | 2.485    | 0         |
| (FWEP)          | kg P eq               | 0.559    | 0.001    | 0.558    | 0         |
| (TETP)          | kg 1,4-DCB            | 1633.694 | 1.417    | 1628.207 | 4.07      |
| (FWETP)         | kg 1,4-DCB            | 42.704   | 0.036    | 42.662   | 0.006     |
| (METP)          | kg 1,4-DCB            | 54.934   | 0.047    | 54.877   | 0.01      |
| (HTPcancer)     | kg 1,4-DCB            | 36.084   | 0.057    | 36.015   | 0.012     |
| (HTPnon-cancer) | kg 1,4-DCB            | 829.725  | 1.046    | 828.491  | 0.188     |
| (FRSP)          | kg oil eq             | 118.089  | 0.235    | 117.776  | 0.077     |
| (WCP)           | m3                    | 5.286    | 0.051    | 5.235    | 0.001     |

Tablo 5.3. CV işlemi sırasında oluşan çevresel etkilerin detaylı bir analizini sunmaktadır. Verilere göre, GWP kategorisinde toplam 491.05 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri emisyonun %99'dan fazlası elektrik kullanımına atfedilmiştir. CV testi için elde edilen sonuçlar, şarj-deşarj sonuçları ile paralellik göstermektedir. Her etki kategorisinde elektrik kullanımı arttıkça, potansiyel çevresel etkiler de artmaktadır. Tüm etki kategorilerinde etkilerin %72,7'si şarj/deşarj testlerinden, %27,3'ü CV testlerinden kaynaklanmaktadır. Etki kategorilerinde görülen bu paralellik, her kategoride baskın kaynağın elektrik tüketimi olmasından ileri gelir. Oksijen kullanımının tüm kategorilerde toplam etkiler üzerinde oldukça düşük bir paya sahip olduğu görülmektedir. Bu, Ar&Ge süreçlerinde malzeme kullanımının elektrik tüketimi yanında çevresel etkiler açısından ihmal edilebilir bir rol oynadığını göstermektedir. Genel olarak, şarj –deşarj ve CV süreçlerinin elektrik tüketimi kaynaklı GWP etkileri %376,8 linyit, %33,14 antrasit kömür ve %9,11'i doğalgaz kaynaklarından üretilen elektrikten ileri gelmektedir. Tablo 19.'da verilen toplam 148,63 kg 1,4-DCB HTPcancer etkisinin %50,73'ü linyit, %13,95'i antrasit kömür madenciliği sonucu oluşan atıkların düzenli depolamasından kaynaklanır. FWETP, METP ve FWEP etki kategorilerinde ise, linyit madenciliği atıklarının düzenli depolanması sırasıyla %22,75, %24,13 ve %77,19 olarak belirlenmiştir. FWETP ve METP etki kategorilerinin sırasıyla %30,11'i ve %18,93'u hurda bakırın yakılarak bertarafından kaynaklanmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, elektrik üretiminin yanı sıra, çıkarılan

madenden kaynaklı atıklar ve bu atıkların bertarafı süreçlerinin de üretim proseslerinden kaynaklı toplam etkilerde yüksek payı olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi ve enerji verimliliğini arttırıcı teknolojilerin uygulanmasının çevresel etkileri azaltmada büyük bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, enerji tüketimini azaltmaya ve düşük karbonlu enerji kaynaklarına yönelmeye yönelik stratejiler geliştirmek, Li-O<sub>2</sub> pillerin özelinde tün Ar&Ge süreçlerinin çevresel sürdürülebilirliğini arttırmak için kritik bir adım olacaktır.

## 5.2. Optimizasyon sonuçları

Optimizasyona ait sonuçları, aşağıdaki tablo 5.4.'te verilmiştir.

**Tablo 5.4.** Optimizasyona ait sonuçlar

| Etki kategorisi                       | Birim                    | Gerçekleşen veriler | Optimize veriler |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------|------------------|
| Küresel Isınma                        | kg CO <sub>2</sub> eş    | 2018.582            | 1702.586         |
| Stratosferik Ozon Tükenmesi           | kg CFC11 eq              | 0.000582            | 0.000491         |
| İyonlaştırıcı Radyasyon               | kBq Co-60 eq             | 18.1777             | 15.641           |
| Ozon Oluşumu, İnsan Sağlığı           | kg NO <sub>x</sub> eq    | 4.976               | 4.190            |
| İnce Partikül Oluşumu                 | kg PM <sub>2.5</sub> eq  | 16.8885             | 14.206           |
| Ozon Oluşumu, Kara Ekosistemleri      | kg NO <sub>x</sub> eq    | 5.050               | 4.252            |
| Asidifikasyon                         | kg SO <sub>2</sub> eq    | 10.119              | 8.517            |
| Tatlı Su Ötrofikasyonu                | kg P eq                  | 2.275               | 1.915            |
| Deniz Ötrofikasyonu                   | kg N eq                  | 0.138               | 0.116            |
| Karasal Ekotoksosite                  | kg 1,4-DCB               | 6645.301            | 5591.916         |
| Tatlı Su Ekotoksosite                 | kg 1,4-DCB               | 174.738             | 147.237          |
| Deniz Ekotoksosite                    | kg 1,4-DCB               | 224.787             | 189.411          |
| İnsan Kanserojen Ekotoksosite         | kg 1,4-DCB               | 149.474             | 126.251          |
| İnsan Kanserojen Olmayan Ekotoksosite | kg 1,4-DCB               | 3394.916            | 2860.785         |
| Arazi kullanımı                       | m <sup>2</sup> a crop eq | 19.962              | 16.824           |
| Mineral Kaynak Kıtılığı               | kg Cu eq                 | 4.411               | 3.794            |
| Fosil Kaynak Kıtılığı                 | kg oil eq                | 481.577             | 405.596          |
| Su Tüketimi                           | m <sup>3</sup>           | 21.513              | 18.139           |

Beşikten-mezara çevresel etkilerde en fazla çevresel etkinin kullanım aşamasından kaynaklandığı ve bunun da elektrik tüketiminden ileri geldiği daha önceki bölümde vurgulanmıştır. Laboratuvar şartlarında bu etkileri azaltmak amacıyla alınabilecek tedbirler araştırılmıştır. Böylece, çevresel etkilerde ne kadar azaltım sağlanabileceği Tablo 5.4. Optimizasyon sonuçları tablosunda listelenmiştir.

Tablo 5.4'te verilen optimizasyon sonuçları, çevresel etkilerin neredeyse tüm kategorilerde anlamlı düzeyde azaltıldığını göstermektedir. Özellikle enerji yoğun

süreçlerin gözden geçirilmesiyle elde edilen bu sonuçlar, daha sürdürülebilir bir üretim yaklaşımının mümkün olduğunu ispatlamaktadır. Küresel Isınma Potansiyeli, Fosil Kaynak Kıtılığı, Karasal Ekotoksiste ve İnsan Kanserojen Olmayan Ekotoksiste kategorilerinde elde edilen iyileşmeler, çevre dostu üretim stratejilerinin önemini vurgulamaktadır.

Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) kritik bir kategoride sağlanan %15’lik azalma, basit uygulama değişiklikleriyle bile karbon emisyonlarının önemli ölçüde azaltılabileceğini ve iklim değişikliğiyle mücadelede katkı sağlanabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, Fosil Kaynak Kıtılığı (FRSP) kategorisinde %15,8’lik bir iyileşme, enerji tüketiminin daha verimli hale getirilmesi sayesinde fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılabileceğini, düşük enerji maliyetleri ve çevre dostu bir üretim süreci olduğunu gösteren önemli bir geliştirme adımıdır. Karasal ekotoksiste (TETP) kategorisindeki %15,8 oranındaki azalma, toprak ekosistemleri üzerindeki toksik etkilerin ciddi şekilde azaltıldığını göstermektedir. Aynı şekilde, Tatlı Su ve Deniz ekotoksitesi (FWETP)(METP) kategorilerinde elde edilen %15’in üzerindeki iyileşmeler, su ekosistemlerinin korunması ve temiz su kaynaklarının sürdürülebilir şekilde kullanımı açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır.

İnsan sağlığı üzerindeki etkiler (HTPnon-cancer) kategorilerinde gözlemlenen %15-16’lık azaltımlar, üretim sürecindeki toksik emisyonların kontrol altına alınmasının, halk sağlığına olan olumsuz etkileri ne ölçüde hafifletebileceğini açıkça göstermektedir.

Optimizasyon ile elde edilen bu iyileşmeler, çevresel etkilerin yalnızca belirli süreçlerle sınırlı olmadığını, üretim zincirinin tüm aşamalarında etkin bir değerlendirme ve uygulama gerektirdiğini vurgulamaktadır. Yaptığımız çalışmanın temel amacı, sürdürülebilir üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, enerji verimliliği odaklı süreçlerin benimsenmesi ve çevresel etkilerin tüm kategorilerde azaltılmasını yönleriyle üniversite Ar-Ge çalışmalarına katkı sunmaktadır.

Son 20 yılda üniversitelerin, çevresel performanslarını yönetme konusunda daha sorumlu yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Küçük şehirler olarak adlandırılan üniversiteler, iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında karbon ayak izlerini azaltmak ve sürdürülebilirliklerini artırmak için yoğun çaba göstererek önemli adımlar atmaktadır. Ancak, dünya genelinde bu üniversitelerin performansını değerlendiren

kuruluşların halen sınırlıdır (YÖK, 2024). Elde ettiğimiz sonuçlara göre, çevresel etkilerine en etki eden faktör enerji tüketimidir. Bu da üniversitelerde elektrik tüketimi kaynaklı çevresel etkilerinin yüksek olduğunu anlamına gelmektedir. Yukarıdaki Kısımında bahsettiğimiz gibi bazı yabancı çalışmalar üniversitelerin karbon ayak izini hesaplamaya çalışılmıştır (Singh, 2018), bulduğu bulgulara göre, en büyük pay, yılın sekiz ayı kullanılan klima sistemlerinin enerji tüketiminden kaynak olduğunu gözlenmiştir.

Türkiye'deki duruma geleceksen, YÖK 2023 yılının raporuna göre, 121 üniversitede toplam 66.520 ton CO<sub>2</sub> eşdeğer emisyon gerçekleşmiştir. Yıllık kişi başına düşen doğrudan karbon ayak izi ortalaması 168 kg CO<sub>2</sub> eşdeğer olarak hesaplanmıştır. Kişi başına 10 kg'dan az CO<sub>2</sub> eşdeğer emisyon üreten üniversite sayısı ise 26'dır (YÖK, 2024).

Sakarya Üniversitesi, karbon emisyonlarını azaltmak ve enerji yönetimini iyileştirmek için yenilenebilir enerjiye yatırım yapmakta ve 2023 yılında IREC sertifikaları aracılığıyla yenilenebilir enerji kullanımını desteklemiştir. Bu çabalar, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırırken sürdürülebilir enerji ticaretini teşvik etmektedir. Üniversite, 2053 yılına kadar karbon nötr olmayı hedeflemektedir (Sakarya University, 2023).

Ek olarak, Sakarya Üniversitesi'nin karbon ayak izi veya çevresel etkileri üzerine doğrudan bir tez veya akademik çalışma literatürde sınırlı görünmektedir. Bulunduğu çalışmalar aşağıda göstermektedir.

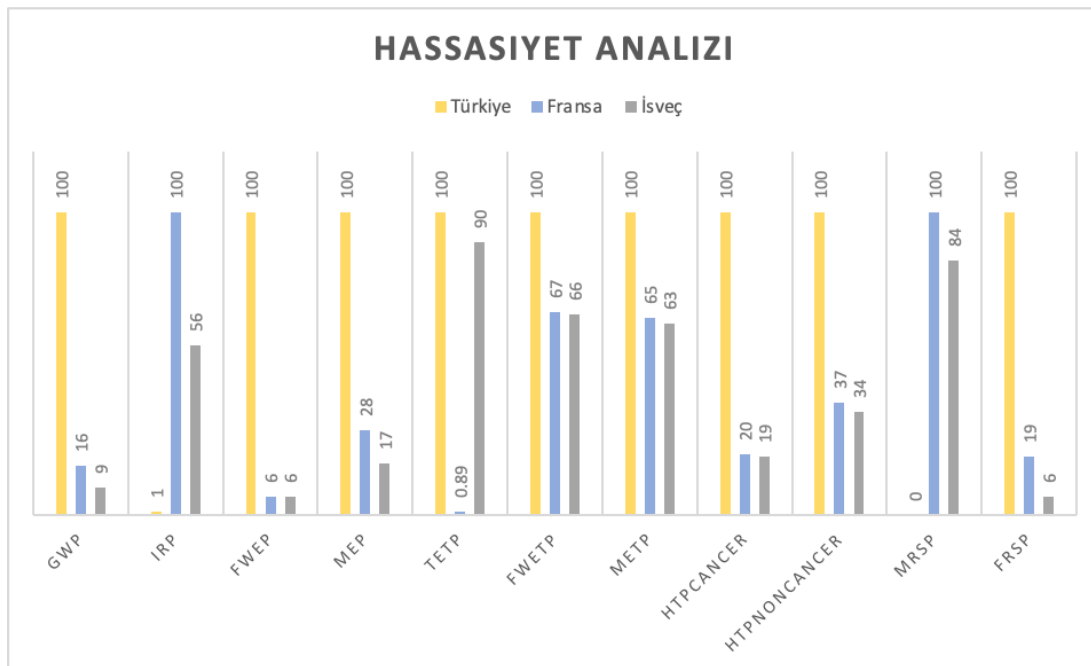
Ratha S., Mahnaz G. (2017), Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü'nün 2015 yılı karbon ayak izini hesaplamayı, sera gazı emisyonlarını ölçerek azaltım stratejileri geliştirmeyi amaçlamıştır. IPCC Tier 1 ve WRI/WBCSD Sınır Belirleme Metodları kullanılarak sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Çıkan sonuçlar, toplam Emisyonlar 12.330,73 ton CO<sub>2</sub> ve %65,4'ü elektrik tüketiminden kaynaklandığını açıklanmaktadır (Sreng, 2017).

Mahnaz G., Merve Ş., (2018), Belge, küresel ısınma sorununa karşı "yeşil bina" konseptinin karbon ayak izini azaltma üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Çalışmanın Bulguları, Geleneksel bir bina ile yeşil bir bina arasındaki karbon emisyonu ve maliyet farkları karşılaştırılmıştır. Yeşil bina yıllık enerji ve su tasarrufuyla 1.4 yıl içinde

maliyet farkını kapattığını, Yeşil bina ile yılda 2422 ton CO<sub>2</sub> emisyonu azaltılabileceğini görmektedir (Yiğit, 2018).

### 5.3. Hassasiyet Analizi

Kullanım aşamasında elde edilen sonuçlara göre, çevresel etkilere en fazla katkının elektrik tüketimi olduğu analiz edilmiştir. Bu yüzden Türkiye, Fransa ve İsveç'teki farklı elektrik üretim kaynaklarının potansiyel çevresel etkilere katkısını değerlendirmek amacıyla bir hassasiyet analizi yapılarak, ülkeler arasında genel bir karşılaştırma yapılmıştır.



**Şekil 5.2.** Hassasiyet analizi Türkiye, Fransa ve İsveç'e göre sonuçları

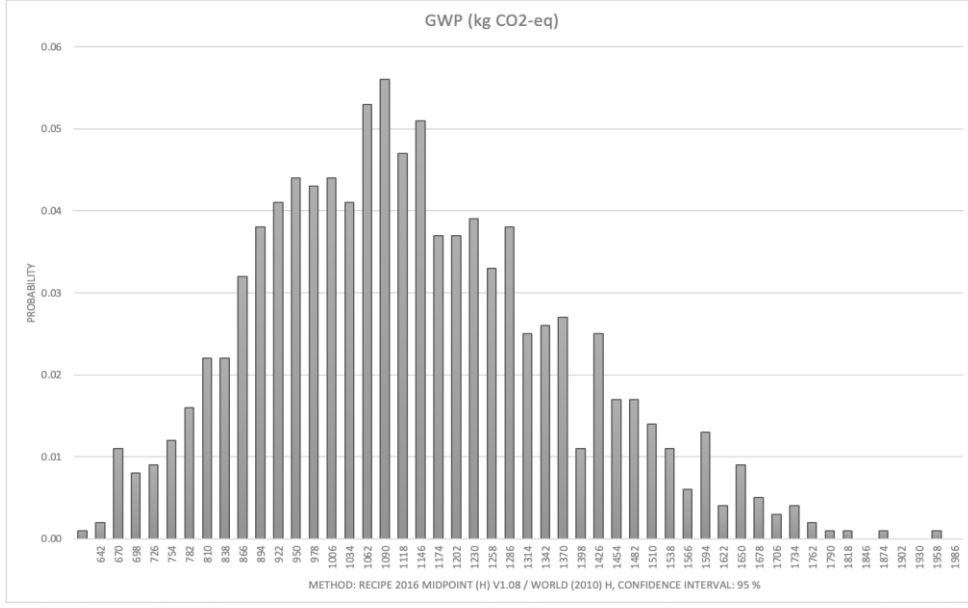
Şekil 5.2.'de Türkiye, Fransa ve İsveç için çeşitli çevresel etki kategorilerindeki performans karşılaştırmaları verilmiştir. Türkiye'nin GWP değerinin diğer iki ülkeye göre oldukça yüksek bir olduğu görülmektedir. Fransa'nın GWP değerlerinin düşük olması, enerji üretiminde %71 nükleer kaynakların yaygın kullanımı ile ilişkilendirilebilir. İsveç ise yenilenebilir enerji kullanımına %40 hidro enerjine öncelik verdiği için GWP açısından olumlu bir profil sergilemektedir. Öte yandan, IRP için Fransa en yüksek değere sahiptir. Bu, nükleer enerji kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyonun çevresel etkilerine işaret etmektedir. Türkiye'nin bu kategoride oldukça düşük bir değere sahip olduğu Şekil 5.2.'de görülmektedir. İsveç, özellikle tatlı su ve deniz ekotoksitesitesi (FWETP ve METP) kategorilerinde oldukça yüksek değerlere

sahiptir. Bu da, İsveç'in elektriğinin bir kısmını nükleer enerjiden sağlamasından kaynaklanmaktadır. Türkiye bu kategorilerde daha dengeli bir performans sergilerken, Fransa da İsveç'e kıyasla daha düşük değerler göstermektedir. Kanserojen ve kanserojen olmayan toksisite kategorilerinde (HTPcancer veHTPnon-cancer) Türkiye en yüksek değerlere sahiptir. Fransa ve İsveç ise bu kategorilerde daha iyi sonuçlar ortaya koymaktadır. Türkiye, enerji üretiminde fosil yakıtların yoğun kullanımı nedeniyle Fosil Kaynağı Kıtlığı (FRSP) kategoride en yüksek değeri almıştır. Fransa ise nükleer enerjiyi, İsveç'in yenilenebilir enerji kaynaklarına yaptığı yatırımlar, bu kategorideki düşük değerlerin en önemli nedenidir.

Hassasiyet analizi sonuçları, enerji politikası geliştirirken sadece karbon emisyonlarına odaklanmanın yük kaymalarına neden olabileceğini göstermektedir. Karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla nükleer enerjiye geçiş gibi politikalar, radyasyon etkisinin artmasıyla sonuçlanabilir. Bunun da çevre ve canlı sağlığı açısından farklı sonuçları olacaktır. Bu nedenle yaşam döngüsü perspektifi kullanılarak çevresel etkilerin analizi, uygulayıcıya kapsamlı bir değerlendirme imkanı sunmaktadır.

#### **5.4. Belirsizlik Analizi**

Şekil 5.3.'te gösterildiği gibi, Şarj - deşarj testlerinde muhtemel farklı uygulamalardan kaynaklı gerçekleşebilecek GWP etki değişimlerini göstermektedir. Optimize edilmiş verilere uygulanan Monte Carlo analizi neticesinde ortalama değer ve ortanca değer sırasıyla 1131,359 ve 1114,346 kg CO<sub>2</sub>-eq olarak bulunmuştur. Varyasyon katsayısı (CV) değeri %20 olarak tespit edilen analiz, çalışmada kullanılan verilerin homojen bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir.



**Şekil 5.3.** Monte Carlo analizinin sonuçları

## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma, bir enerji depolama teknolojisi olarak ortaya çıkan Li-O<sub>2</sub> pil hücresinin araştırma ve geliştirme çalışmalarına ait potansiyel çevresel etkilerinin belirlenmesini ve muhtemel optimizasyon analizini ele almıştır. “5 katot geliştirme” başına **beşikten mezara yaşam döngüsü değerlendirme (LCA)** analizi yapılmıştır. Gelecekteki pil hücresi çevresel etki değerlendirmelerine katkı sunmak amacıyla, pillerin enerji ve malzeme girdilerini içeren yaşam döngüsü envanterleri açıklanmıştır. Çevresel etkiler, ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H. yöntemine göre 12 standartlaştırılmış etki kategorisi için analiz edilmiştir.

Katotların üretim sürecinde, çeşitli cihazlar özellikle Otoklav kullanılması nedeniyle, Ag<sub>0.4</sub>Mn<sub>8</sub>O<sub>16</sub> ve NiO katotları diğer katot üretimine kıyasla daha yüksek çevresel etki göstermiştir. Toplam Küresel ısınma potansiyeli (GWP) etkisinin sırasıyla %40 ve %34’ünü oluşturmaktadır. Kullanım aşamasındaki elektrokimyasal testi şarj/deşarj ve CV testleri ise, bu aşamada büyük miktarda elektrik tüketimi olduğu için, en çok çevreyi etkileyen aşama kullanım aşaması olmuştur. Özellikle GWP ve HTPnon-cancer kategorilerinin her ikisinde de %89 oranında katkı sağlamıştır.

Optimizasyon sonuçlarına göre, çalışmanın çevresel etkilerini %16 oranıyla ciddi bir düşüş gözlenmiştir. Çevresel etkilerde elektrik kullanımı en yüksek etkiye sebep olmuştur. Bu da Türkiye’nin enerji üretiminin %37’sinin kömürden gelmesiyle açıklanmaktadır. Hassasiyet analizi sonuçları, ülkeler arasındaki enerji politikalarının çevresel etkileri üzerindeki farklılıkları açıkça ortaya koymaktadır. Türkiye fosil kaynaklara bağlı en yüksek GWP etkisine sahipken, Fransa’da nükleer enerjisi kaynaklı IRP etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, LCA metodolojisinin, üniversitelerin çevresel etkilerini veya pil üretim süreçlerini değerlendirmek için henüz standartlaşmamış olması, literatürdeki karşılaştırmaları zorlaştırmaktadır. LCA yönteminden elde edilen bulgular, Li – O<sub>2</sub> pil hücresi Ar&Ge faaliyetlerinden kaynaklanan toplam GWP etkisinin 2010.90 kg CO<sub>2</sub>-eş/1 yıllık proje olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada çevresel etkileri açısından Li-O<sub>2</sub> Ar&Ge süreçleri değerlendirilmiş olup, optimizasyon modeli gerçekleştirilmesi

birlikte bir Ar-Ge çalışmasının çevresel etkilerini azaltacak uygulamalar geliştirmeye katkıda bulunmaktadır. Bu alanda yapılacak ileri çevresel etki çalışmaları, daha uzun süren ve yoğun deneysel analizler gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarının üniversitelerin potansiyel çevresel etkilerine katkılarının analiz etmeye yardımcı olacaktır. Ayrıca, etkilerin azaltılması amacıyla üniversitenin enerji politikaları geliştirmesine destek olacak bir yol haritası çıkarılmış olacaktır.



## KAYNAKLAR

- Akbulut, A., & Yay, A. S. E. (2021). Life cycle analysis of lithium–air batteries designed with TEGDME-LiPF<sub>6</sub>/PVDF aprotic electrolytes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9\*(33), 15406–15418.
- Al-Ogaili, A. W. M., Cetinkaya, T., Pakseresht, S., & Akbulut, H. (2021). Graphene-based nanocomposite cathodes architecture with palladium and  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> for high cycle life lithium-oxygen batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 854, 157293.
- Alba, A., Iñigo, L., Xabat, O., & Cristina, M. (2021). Environmental assessment of university campuses: The case of the University of Navarra in Pamplona (Spain). *Sustainability*, 13,\* 8588.
- Ayhan, A. (2002). Dünden bugüne Türkiye’de bilim ve teknoloji ve geleceğin teknolojileri. Beta Basım Yayım.
- BP Statistical Review of World Energy. URL <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.
- Bai, Y., Muralidharan, N., Sun, Y. K., Passerini, S., Whittingham, M. S., & Belharouak, I. (2020). Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: Concept of battery identity global pass.
- Baptista, P., Ribau, J., Bravo, J., Silva, C., Adcock, P., & Kells, A. (2011). Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis. *Energy Policy*, 39(9), 4683–4691.
- Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H.-J., Del Duce, A., & Simons, A. (2015). The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Applied Energy*, 157, 871–883.
- Bjørn, A., Laurent, A., Owsianiak, M., & Olsen, S. I. (2018). Goal Definition. In M. Hauschild, R. Rosenbaum, & S. Olsen (Eds.), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (pp. 1–1216). Springer.
- Bora, Y. (2017). Elektrikli araç sistemlerinin incelenmesi (Master's thesis). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Brodd, R. (2005). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors. *Chemical Reviews*, 105, 1021.
- Bruce, P. G., Freunberger, S. A., Hardwick, L. J., & Tarascon, J. M. (2012). Li–O<sub>2</sub> and Li–S batteries with high energy storage. *Advanced Materials*, 24(44), 5732–5744.

- Bueno, G., de Blas, M., Pérez-Iribarren, E., Zuazo, I., Torre-Pascual, E., Erauskin, A., Etxano, I., Tamayo, U., García, M., Akizu-Gardoki, O., León, I., Marieta, C., Zulueta, G., & Barrio, I. (2021). The environmental and social footprint of the University of the Basque Country UPV/EHU. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128019.
- Bunton, R. S. (2006). Experimental study of the thermodynamic properties of hydrogen bonding and lattice dynamics of hydrogen and deuterium in palladium (Doctoral dissertation). California Institute of Technology. Retrieved from <http://thesis.library.caltech.edu/1833/1/thesis.pdf>
- Catenacci, M., Fiorese, G., Verdolini, E., & Bosetti, V. (2015). Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. In *Innovation under Uncertainty* (pp. 110-138). Edward Elgar Publishing.
- Cetinkaya, T., Tocoglu, U., Uysal, M., Guler, M. O., & Akbulut, H. (2014). A parametric study on the rapid synthesis of one-dimensional (1D)  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> nanowires. *\*Microelectronic Engineering*, 126\*, 54–59.
- Cheeweewattanakoon, N., Kaur, G., Chawla, N., & Bruno, O. (2014). Residential battery energy storage systems (BESS) modeling and effect on the smart grid from the classroom point of view. In *\*ASCE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings.\**
- Choi, S., & Wang, G. (2018). Advanced materials technology. *\*Advanced Materials Technology*, 3\*(1700376).
- Curran, M. A. (2017). Goal and scope definition in life cycle assessment. *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*. Springer.
- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L., & Wang, M. (2019). Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications. *\*Batteries*, 5\*(2), 48.
- Daniel, C., & Besenhard, J. O. (2012). Handbook of battery materials. John Wiley & Sons. Retrieved from [http://sutlib2.sut.ac.th/sut\\_contents/H142426\\_v2.pdf](http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H142426_v2.pdf)
- Degen, F., & Schütte, M. (2022). Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production. *\*Journal of Cleaner Production*, 330,\* 129798.
- Dhameja, S. (2002). *Electric Vehicle Battery Systems*. Newnes.
- Dolganova, I., Rödl, A., Bach, V., Kaltschmitt, M., & Finkbeiner, M. (2020). A Review of Life Cycle Assessment Studies of Electric Vehicles with a Focus on Resource Use. *Resources*, 9(3), 32. <https://doi.org/10.3390/resources9030032>
- Dou, Y., Xie, Z., Wei, Y., Peng, Z., & Zhou, Z. (2022). Redox mediators for high-performance lithium-oxygen batteries. *National Science Review*, 9, nwac040.
- Duffner, F., Mauler, L., Wentker, M., Leker, J., & Winter, M. (2021). Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs. *International Journal of Production Economics*, 232, 107982.
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery choices. *Science*, 334(6058), 928–935.

- Dănilă, E., & Lucache, D. D. (2010). History of the first energy storage systems. 3rd International Symposium on the History of Electrical Engineering and of Tertiary-Level Engineering Education (pp. 27–29). Iași: IEEE.
- EC-JRC. (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook—General guide for Life Cycle Assessment—Detailed guidance (1st ed.). Publications Office of the European Union.
- Efe, Ş., & Güngör, Z. (2021). Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi. Uluslararası Araştırma-Geliştirme ve Tasarım Konferansı, DOI: 10.31590/ejosat.1048673
- Ekici, Y. E. (2019). Batarya yönetim sistemleri (Master's thesis). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- El-Cell GmbH. (n.d.). Gas analysis test cells. URL <https://www.el-cell.com/products/test-cells/gas-analysis-test-cells/ecc-air/>
- Ellingsen, L. A. W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., & Strømman, A. H. (2014). Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack. *Journal of Industrial Ecology*, 18\*(1).
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2017 Strateji Geliştirme Başkanlığı ile Bağlı, 'Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü, URL [www.enerji.gov.tr/Resources/Sites/1/Pages/Sayi\\_15/mobile/index.html](http://www.enerji.gov.tr/Resources/Sites/1/Pages/Sayi_15/mobile/index.html)
- Fang, J., Cheng, Z., Zhang, H., Peng, X., Chen, L., Liu, Z., & Zhang, W. (2023). Recent advances in transition metal-based catalysts for oxygen evolution reaction in lithium-oxygen batteries. *Catalysis Today*.
- Feng, N. N., He, P., & Zhou, H. S. (2016). *Advances in Energy Materials*, 6, 1502303.
- Figuerola, J. D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H., & Srivastava, R. D. (2008). Advances in CO2 capture technology – The U.S. Department of Energy's carbon sequestration program. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2,\* 9–20.
- Filimonau, V., Archer, D., Bellamy, L., Smith, N., & Wintrip, R. (2021). The carbon footprint of a UK University during the COVID-19 lockdown. *Science of the Total Environment*, 756, 143964.
- Finnveden, G. (2000). On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5, 229–238.
- Gabarrell Durany, X. (2015). Combined MFA and LCA approach to evaluate the metabolism of service polygons: A case study on a university campus. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 157–168.
- Ghita, S. I., Saseanu, A. S., Gogonea, R. M., & Huidumac-Petrescu, C. E. (2018). Perspectives of ecological footprint in European context under the impact of information society and sustainable development. *Global Sustainability*, 10\*(9), 3224.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and endpoint level. First edition report I: Characterisation. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), Netherlands.

- Gu, F., Zhang, W., Guo, J., & Hall, P. (2019). Exploring “Internet+Recycling”: Mass balance and life cycle assessment of a waste management system associated with a mobile application. *Science of the Total Environment*, 649, 172–185.
- Gül, H. S. (2018). Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı (Master’s thesis). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6), 1513–1522.
- 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.
- Hoydonckx, H. E., Van Rhijn, W. M., De Vos, D. E., & Jacobs, P. A. (2007). *\*Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry.\** Wiley-VCH.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., & Stam, G. (2016). RIVM Report 2016-0104. National Institute for Public Health and the Environment.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138–147.
- IEA. (2018). Analysis based on Howell (2016); Meeus (2018); Nationale Plattform Elektromobilität (2016); NEDO (2018); Pillot (2017).
- IEC Working Group and Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme. (2011). Electrical energy storage. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, White Paper.
- ISO. (2006). ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO. (2006). ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- International Energy Agency (IEA). (2021). Global EV outlook 2021. IEA, Paris. (IEA, 2021)
- Işık, N., & Kılınç, E. C. (2017). Ulaştırma sektöründe CO2 emisyonu ve enerji AR-GE harcamaları ilişkisi. *\*Maliye Araştırmaları Dergisi (MARD)*, 3\*(3), 321–341. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- Jia, Y. Y. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicles, its impacts, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365–385.
- Karaca, G. (2016). Environmental and economic assessment of water reuse application. (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği.
- Karakoç, H., Karakoç, N., Erbay, B., & Aras, H. (2012). Enerji Analizi. (Y. Ergün & M. Tanışlı, Eds.) (1st ed.). Eskişehir: T. C. Anadolu Üniversitesi.

- Karaman, C. (Ed.). (2022). TEKNOBİLİM-2022: Enerji Krizi ve Yenilenebilir Enerji. Efe Akademi Yayınları
- Klopffer, W. (2005). Life cycle assessment in the mirror of Int J LCA - Past, present, future. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(6), 379–380.
- Lai, X., Chen, Q., Tang, X., Zhou, Y., Gao, F., Guo, Y., Bhagat, R., & Zheng, Y. (2022). Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective. *eTransportation*, 9, 100132.
- Liang, Y., Su, J., Xi, B., Yu, Y., Ji, D., Sun, Y., Cui, C., & Zhu, J. (2017). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 1–9.
- Linden, D. (1995). Handbook of batteries. *Fuel and Energy Abstracts*, 265.
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). Handbook of Batteries (3rd ed.). McGraw-Hill, New York.
- Lu, Y., Gallant, B. M., Kwabi, D. G., et al. (2013). Lithium-oxygen batteries: Bridging mechanistic understanding and battery performance. *Energy & Environmental Science*, 6, 750–768.
- Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel-metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 45, 1–51.
- Masoni, P. (2016). LCA compendium—the complete world of life cycle assessment (Book series). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(4), 595.
- Meena, N., et al. (2014). Charging and discharging characteristics of lead acid and Li-ion batteries. *2014 Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy*, 1–3.
- Melzack, N., Wills, R. G. A., & Cruden, A. (2021). Cleaner energy storage: Cradle-to-gate life cycle assessment of aluminum-ion batteries with an aqueous electrolyte. *\*Frontiers in Energy Research*, 9.\*
- Messagie, M., Boureima, F., Matheys, J., Sergeant, N., Turcksin, L., Macharis, C., & Van Mierlo, J. (2010). Life cycle assessment of conventional and alternative small passenger vehicles in Belgium. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–5.
- Molina, M. G. (2013). Emerging advanced energy storage systems: dynamic modeling, control and simulation (1st ed.). Nova Science Publishers.
- Moseley, P. T., & Garche, J. (2014). Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing. Newnes.
- Moseley, P. T., & Garche, J. (2015). Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing (1st ed.). Newnes.
- Mostert, C., Ostrander, B., Bringezu, S., & Kneiske, T. M. (2018). Comparing electrical energy storage technologies regarding their material and carbon footprint. *\*Energies*, 11\*(12).
- Nagaura, T., & Tozawa, K. (1990). Lithium ion rechargeable battery. *Progress in Batteries and Solar Cells*, 9, 209–217.

- Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A. M., Söderman, M. L., & Van Mierlo, J. (2014). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19\*, 1866–1890.
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wager, P., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H. J. (2010). Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 44\*, 6550–6556.
- OECD. (2002). *Frascati manual: Proposed standard practice for surveys on research and experimental development*. OECD Publishing, Paris.
- Olsen, S. I., Borup, M., & Andersen, P. D. (2018). Future-oriented LCA. In M. Hauschild, R. Rosenbaum, & S. Olsen (Eds.), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (pp. 499–518). Springer.
- Oncu, A., Cetinkaya, T., & Akbulut, H. (2021). Enhancement of the electrochemical performance of free-standing graphene electrodes with manganese dioxide and ruthenium nanocatalysts for lithium-oxygen batteries. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46\*(33), 17173–17186.
- P. Medina, A.W. Bizuayehu, J.P.S. Catalao, E.M.G. Rodrigues, & J. Contreras. (2014). Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-economic Benefits and Applications Analysis. In *Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2295–2304.
- PRé Sustainability. (2014). *SimaPro 8: Introduction to Life Cycle Assessment*. Retrieved from <https://pre-sustainability.com/files/2014/05/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>
- Paramati, S. R., Alam, M. S., Hammoudeh, S., & Hafeez, K. (2020). Long-run relationship between R&D investment and environmental sustainability: Evidence from the European Union member countries. *International Journal of Finance & Economics*.
- Patil, A., Patil, V., Shin, D. W., Choi, J.-W., Paik, D.-S., & Yoon, S.-J. (2008). *Material Research Bulletin*, 43, 1913.
- Rahman, M. A., Wang, X., & Wen, C. (2014). A review of high energy density lithium–air battery technology. *Journal of Applied Electrochemistry*, 44\*(5), 5–22.
- Reddy, M. V., Mauger, A., Julien, C. M., Paoletta, A., & Zaghbi, K. (2020). Brief history of early lithium-battery development. *Materials*, 13(8), 1884.
- Romare, M., & Dahllöf, L. (2017). The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries: A study with focus on current technology and batteries for light-duty vehicles. IVL Swedish Environmental Research Institute.
- Roos, S. (2016). *Advancing life cycle assessment of textile products to include textile chemicals*. Chalmers University of Technology.
- Ruiz, M., Althaus, H., Bauer, C., Doka, G., Jungbluth, N., Nemecek, T., Stucki, M., Sutter, J., & Tuchschnid, M. (2014). Documentation of changes implemented in ecoinvent version 3.1. *Ecoinvent*.

- Sakarya University. (2023). Sustainability report 2023. Retrieved from [https://sustain.sakarya.edu.tr/sites/sustain.sakarya.edu.tr/file/SAU\\_Sustainability\\_Report\\_2023.pdf](https://sustain.sakarya.edu.tr/sites/sustain.sakarya.edu.tr/file/SAU_Sustainability_Report_2023.pdf)
- Sashmitha, K., Rani, M.U. A comprehensive review of polymer electrolyte for lithium-ion battery. Polym. Bull. 80, 89–135 (2023).
- Shen, X., Liu, H., Cheng, X., Yan, C., & Huang, J. (2018). Beyond lithium-ion batteries: Higher energy density battery systems based on lithium metal anodes. Energy Storage Materials, 12, 161–175.
- Singh, K. S., Vikrant, B., Vinti, A., & Prem, S. (2018). Measuring carbon footprint of an Indian university using life cycle assessment. \*Procedia CIRP, 69,\* 475–480.
- Sreng, R., & Gümrükçüoğlu Yiğit, M. (2017). Carbon footprint studies on Esentepe Campus of Sakarya University, Turkey in 2015. \*Sakarya University Journal of Science, 21\*(5), 1095–1099.
- Sun, X., Luo, X., Zhang, Z., Meng, F., & Yang, J. (2020). Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. \*Journal of Cleaner Production, 273\*, 123006.
- TAP Derneği. (2004). Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği (TAP). Retrieved from <https://www.tap.org.tr>
- Taşkın, C. (2018). Çevresel Etki Değerlendirme ve Sürdürülebilirlik: Yeni Yaklaşımlar ve Uygulamalar. Ankara: Akademi Yayıncılık.
- Thoma, B., & O'Sullivan, D. (2011). Study on Chinese and European automotive R&D: Comparison of low-cost innovation versus system innovation. \*Procedia - Social and Behavioral Sciences, 25,\* 537–542.
- TÜBİTAK. (n.d.). Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu. Retrieved December 6, 2024, from <https://tubitak.gov.tr/tr>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (n.d.). Retrieved December 6, 2024, from <https://cip.tuik.gov.tr>
- Uppsala University. (n.d.). Prospective life cycle assessment of an electrochemical hydrogenation process over a nickel foam cathode. Retrieved from <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1687817/FULLTEXT01.pdf>.
- Verma, S., Dwivedi, G., & Verma, P. (2021). Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. \*Materials Today: Proceedings.\*
- Vidyanandan, K. (2019). Batteries for electric vehicles. Power Management Institute.
- Vogt, R., & Balej, J. (2000). Chlorine oxides and chlorine oxygen acids.
- Wang, L., Hu, J. X., Yu, Y. J., Huang, K., & Hu, Y. C. (2020). Lithium-air, lithium-sulfur, and sodium-ion: Which secondary battery category is more environmentally friendly and promising based on footprint family indicators? \*Journal of Cleaner Production, 276.\*
- Wang, X., Fang, Q., Dai, H., Chen, Q., & Wei, X. (2021). Investigation on cell performance and inconsistency evolution of series and parallel lithium-ion battery modules. Energy Technology, 9(7), 2100072.

- Wang, Y. Q., Yu, Y. J., Huang, K., Chen, B., Deng, W. S., & Yao, Y. (2017). Quantifying the environmental impact of a Li-rich high-capacity cathode material in electric vehicles via life cycle assessment. *\*Environmental Science and Pollution Research*, 24\*(2), 1251–1260.
- Xia, X., & Li, P. (2022). A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. *\*Science of The Total Environment*, 806,\* 152870.
- Yiğit, M. G., & Şeneren, M. (2018). Küresel ısınmaya karşı karbon ayak izi azaltılmış yeşil bina. *\*Proceedings of the 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management (ISHAD 2018)\**, 803–808. Retrieved from <https://www.ishad.info>.
- Yükseköğretim Kurulu (YÖK). (2024). Üniversite izleme ve değerlendirme genel raporu 2024. Retrieved from <https://www.yok.gov.tr/Documents/2024/universite-izleme-ve-degerlendirme-genel-raporu-2024.pdf>
- Zackrisson, M. (2017). Electrode for electric vehicle batteries: Cells for Leaf, Tesla, and Volvo bus. *\*Project Report 24603/2.\**
- Zerenler, M., Türker, N., & Şahin, E. (2022). Küresel teknoloji, araştırma-geliştirme (AR-GE) ve yenilik ilişkisi. *\*Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 24\*(3), 651–670.
- Zhang, S., Cui, L., Kong, L., Jiang, A., & Li, J. (2020). Summarize on the lithium mineral resources and their distribution at home and abroad. *Nonferrous Metals Engineering*, 10, 95–104.
- Zhao, Z., Wu, Y., Dong, S., Wang, Y., Ma, D., & Yang, X. (2017). Recent advances in cathode materials for lithium–oxygen batteries: Strategies for performance improvement. *Advanced Energy Materials*, 7(2), 1602938.
- Van Oers, L. (2016). CML-IA Characterisation Factors: Guide to 2016 Version. Leiden University, Institute of Environmental Sciences (CML).
- Çetin, M., Karakaya, B., & Gençoğlu, M. (2021). Elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların modellenmesi. *\*Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33\*(2), 755–763. (Çetin, 2021)
- Öztürk, Y. (2012). Otomotiv endüstrisinde kullanılan tampon ve turbo emiş borusunun yaşam döngüsü değerlendirmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Şenpınar, A., & Tunay Gençoğlu, M. (2006). Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel etkileri açısından karşılaştırılması. *\*Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları.\**

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Nisan NASIF

### ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2022, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği
- Yükseklisans** : 2024, Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği ana bilim dalı

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER: