

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KURŞUN ASİT AKÜ SİSTEMLERİNİN Li-İYON BATARYALAR İLE
DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
GÜRKAN GÜNDÜZ**

Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. SERDAR ALTIN

EKİM 2022

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KURŞUN ASİT AKÜ SİSTEMLERİNİN Li-İYON BATARYALAR İLE
DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
GÜRKAN GÜNDÜZ
36193628037**

Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. SERDAR ALTIN

EKİM 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez alıőması İnönü Üniversitesi BAP birimi FYL-2022-2852 nolu proje kapsamında gerçekleőtirilmiőtir.

Bu tez çalıőmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemededen beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Serdar Altın'a,

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi, çalıőmalarım süresince de benden desteklerini esirgemeyen aileme,

Teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “KURŞUN ASİT AKÜ SİSTEMLERİNİN Li-İYON BATARYALAR İLE DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Gürkan GÜNDÜZ



İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----------|
| TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ | i |
| ONUR SÖZÜ | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | v |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | vi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | vii |
| ÖZET | viii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KURŞUN ASİT PİLLER..... | 4 |
| 2.1 Kurşun-Asit Pillerin Dayanıklılıklarını Sınırlayıcı Faktörler | 9 |
| 2.2 Kurşun Asit Pil Geri Dönüşümü..... | 11 |
| 3. LİTYUM İYON PİL TASARIMI..... | 13 |
| 3.1 Pil Tasarım Esasları | 13 |
| 3.2 Pil Boyutlandırma..... | 16 |
| 3.3 Paket Performans Hedefleri..... | 20 |
| 3.4 Hücre Tasarımı | 21 |
| 3.5 Güvenlik | 25 |
| 3.6 Elektrikli Araçlar İçin Pil Paketlerinin Mekanik Tasarımı ve Paketlenmesi..... | 25 |
| 3.7 Tasarım Hususları..... | 26 |
| 3.7.1 Termal kaçak koruma | 29 |
| 3.7.2 Gaz çıkış noktası | 29 |
| 3.7.3 Termal bariyer..... | 31 |
| 3.7.4 Yapısal kararlılık..... | 32 |
| 3.7.5 Çarpışma koruması | 33 |
| 3.7.6 Titreşim izolasyonu..... | 36 |
| 3.8 Pil Hücresi Seçimi | 38 |
| 3.8.1 Nihai tasarım: taban plakası..... | 39 |
| 3.8.2 Nihai tasarım: gövde | 39 |
| 3.8.3 Nihai batarya paketi: montajı..... | 40 |
| 4. ENERJİ DEPOLAMADA LİTYUM BATARYALARIN GELECEĞİ..... | 44 |
| 4.1 Elektrik Araçlarından Lityum Talep Tahmini | 45 |
| 4.1.1 Elektrik araç pazarının gelecekteki durumu | 45 |
| 4.1.2 Lityum yoğunluk tahmini | 46 |
| 4.1.3 Lityumun jeolojik özellikleri | 47 |
| 4.1.4 Üretim ve rezervler | 48 |
| 4.1.5 Geri dönüşüm..... | 50 |
| 4.1.6 Gelecekteki arz tahminleri | 51 |
| 4.1.7 Lityum arz ve talep dengesi | 52 |
| 5. TÜRKİYE’DE LİTYUM İYON VE KURŞUN ASİT ÜRETİM TESİSLERİ | 56 |
| 5.1 Aspilsan | 56 |
| 5.2 Birikim Pilleri | 56 |
| 5.3 Aküsan | 57 |
| 5.4 Mutlu Akü..... | 57 |
| 5.5 Yiğit Akü | 58 |
| 5.6 Kontrolmatik..... | 58 |

| | |
|--|-----------|
| 5.7 Bursa-Gemlik Batarya Fabrikası | 58 |
| 5.8 Vestel Pil Fabrikası..... | 59 |
| 5.9 Ford Otosan Batarya Montaj Fabrikası | 59 |
| 6. SONUÇ VE YORUM..... | 61 |
| KAYNAKLAR..... | 64 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 71 |



ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: Bir Kurşun-Asit Pilin kimyası ve temel bileşenleri | 5 |
| Şekil 3.1: Hızlanma güç eğrisi | 19 |
| Şekil 3.2: Hücre kasa geometrileri..... | 22 |
| Şekil 3.3: ISO 16898 hücre ölçüleri..... | 25 |
| Şekil 3.4: Elektrikli bir aracın basitleştirilmiş gösterimi. HVAC ısıtma, havalandırma, klima; PDU güç dağıtım ünitesi, L/RHS sol/sağ taraf..... | 27 |
| Şekil 3.5: a- İçi boş kılavuzları veya egzoz gazı kanalları olan akü paketi sistemi ve b-Paketin çalışması ve termal kaçak olayları sırasında üretilen sıcak gazları ve atık suları boşaltmak için her akü bölmesine takılan çoklu egzoz nozulu tertibatları..... | 30 |
| Şekil 3.6: Pil paketleme tasarımı: a-GM Chevrolet Volt'ta kullanılan T şeklinde bir tasarımı ve b-Audi e-tron Sportback konseptinde kullanılan tasarımı | 35 |
| Şekil 3.7: Kompakt bir pil takımı tasarımıyla kullanılan çerçeveleme düzenlemesinin perspektif görünümü | 38 |
| Şekil 3.8: Pil montaj çerçevesinin perspektif görünümü | 38 |
| Şekil 3.9: SS304'ten yapılmış bölme duvarlı pil taban plakası ve çerçeve yapısı | 41 |
| Şekil 3.10: Terminaller ve -basınç tahliye deliği için boşluk delikleri olan hücreler üzerinde oturan üst plastik katman l'i gösteren pil takımı | 42 |
| Şekil 3.11: Ek yalıtım bandı, metal hücre tutma kayışı ve ek aksesuarlar içeren pil takımı; BMS, akü kontrolörü, akım sensörü, kontaktörler, sigortalar ve diğer aksesuarlar ayrı bir plaka üzerine monte edilmiş ve metal kayışa cıvatalanmıştır | 42 |
| Şekil 3.12: Otobüse takılmaya hazır komple pil takımı..... | 43 |
| Şekil 4.1: 2016 yılında lityum üretimi ve rezervlerin dağılımı..... | 48 |
| Şekil 4.2: Lityum cevheri ve minerallerden cevher konsantresi ile tuzlu sulardan lityum karbonatın brüt aralığına göre 1900-2015 yılları arasında dünyadaki yıllık üretim..... | 49 |
| Şekil 4.3: USGS ve diğer çalışmalardan tahmin edilen rezerv milyon ton lityum..... | 50 |
| Şekil 4.4: Gerçek üretim ile karşılaştırıldığında gelecekteki lityum üretimin tahmin aralığının karşılaştırılması | 52 |
| Şekil 4.5: Elektrikli araçlar için lityumun tarihsel üretimi, tahmini arz ve tahmini talep karşılaştırılması..... | 54 |
| Şekil 5.1: Lityum-iyon üretim tesisi | 60 |
| Şekil 5.2: Lityum-iyon üretim tesisi | 60 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 3.1: Uluslararası sürüş döngüsü özeti (UDDS-şehir içi sürüş emisyon testi, HWY-otoyol sürüş emisyon testi, US06-agresif sürüş emisyon testi, EUC-EUDC hafif ticari araç sürüş emisyon testi) | 17 |
| Çizelge 3.2: Elektrikli araç hedefleri | 21 |
| Çizelge 3.3: Farklı tipteki pil hücrelerinin yapısal özelliklerinin karşılaştırılması..... | 33 |
| Çizelge 4.1: Lityum akü üretimine karşılık potansiyel malzeme sınırlamasına yönelik birkaç çalışmanın karşılaştırılması..... | 44 |
| Çizelge 4.2: IEA adı altında "MAVİ Harita" ve "MAVİ Elektrik araç değişiklikleri" 2030 ve 2050 yılları içerisinde yıllık araç satışları(milyon) | 46 |
| Çizelge 4.3: 2030-2050 yıllarında pazarda BEV-PHEV'ler için küresel yıllık lityum talep tahminleri," düşük" ve "yüksek" durumlar..... | 53 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|------------------------|--|
| Q | : Kapasite |
| n | : Elektron Sayısı |
| F | : Faraday Sabiti |
| M | : Elektroaktif Bileşenin Hücredeki Kütlesi |
| E_g | : Enerji Aralığı |
| X | : Mol Miktarı |
| E⁰ | : Standart Potansiyel |
| E | : Potansiyel |
| k_B | : Boltzman Sabiti |
| R | : Elektriksel Direnç |
| T | : Sıcaklık (K) |
| e | : Elektron yükü |
| m | : Kütle |
| χ | : Manyetik Alınganlık |
| χ⁰ | : Kalıcı Manyetik Alınganlık |
| C | : Curie-Weiss Sabiti |
| θ | : Weiss Sıcaklığı |
| μ_{eff} | : Etkin Manyetik Moment |
| EV | : Elektrikli Araç |
| BEV | : Bataryalı Elektrikli Taşıtlar |
| HEV | : Melez Elektrikli Araç |
| PHEV | : Prizli Melez Elektrikli Araç |
| ICE | : İçten Yanmalı Motora Sahip Araçlar |
| FTIR | : Kızıl Ötesi Spektroskopisi |
| XAFS | : X-ışını Absorpsiyonu |
| XANES | : Yakın Kenar X-ışını Soğurma İnce Yapısı |
| C_v | : Döngüsel Voltmetri |
| PVDF | : Polivinilidin Florür |
| NMP | : N-Metil-2-pirolidon |

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KURŞUN ASİT AKÜ SİSTEMLERİNİN Li-İYON BATARYALAR İLE DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ

Gürkan GÜNDÜZ

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

71+ix sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Serdar Altın

Elektrik enerjisini depolamada kullanılan aküler, en önemli ve verimli yollardan biri olarak kabul edilir. Kurşun-asit aküler hem otomotiv hem de endüstriyel uygulamalarda enerji depolamak için kullanılmış ancak enerji depolama için kullanılan Li-ion, sodyum-kükürt aküleri gibi gelişen teknolojiler yerini almaya başlamıştır. Li-ion ve diğer pil türlerinin teknik özellikleri kurşun pillerle karşılaştırılmaktadır. Lityum-iyon pillerin otomobillere son zamanlarda uygulanması, elektrikli araçların tasarımında ve ticarileştirilmesinde önemli değişikliklere neden olmuştur. Ticari elektrikli araçlarda (EV'ler) son zamanlarda yeniden canlanma, lityum iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğunun mümkün kıldığı elektrik menzilineki önemli gelişmeler sayesinde mümkün olmuştur. EV pil geliştirmede, lityum iyon gravimetrik ve hacimsel enerji yoğunluklarının daha da iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kurşun asit aküler ile Li-iyon bataryaların temel özellikleri incelenerek elektrikli araçlarda kullanılan Li-iyon batarya paketlerinin tasarım parametreleri ortaya çıkarılmıştır. Son olarak ise ülkemizde kurşun asit ve Li-iyon batarya tesisleri ile ilgili bilgiler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Li-iyon, EV, PHEV, BEV

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE CONVERSION OF LEAD ACID BATTERY SYSTEMS WITH Li-ION BATTERIES

Gürkan GÜNDÜZ

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Energy Science and Technologies

71+ix pages

2022

Supervisor: Prof. Dr. Serdar Altın

Batteries are considered one of the most important and efficient ways to store electrical energy. Lead batteries have been used to store energy in both automotive and industrial applications, but emerging technologies such as Li-ion and sodium-sulfur batteries used for energy storage have begun to take their place. The technical characteristics of Li-ion and other battery types are compared with lead batteries. The recent application of lithium-ion batteries to automobiles has resulted in significant changes in the design and commercialization of electric vehicles. The recent resurgence in commercial electric vehicles (EVs) has been made possible by significant advances in the electric range made possible by the high energy density of lithium-ion batteries. Future activity in EV battery development is focused on further improvement of lithium-ion gravimetric and volumetric energy densities. In this study, the design parameters of the Li-ion battery package were found out by investigating of the basic properties of the Li-ion cells. In the last part, the battery facilities in Turkey were investigated related to information about the lead acid and Li-ion battery production

Keywords: Li-ion, EV, PHEV, BEV

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisini depolamada kullanılan aküler, en önemli ve verimli yollardan biri olarak kabul edilmektedir. Her akünün kendine özgü farklı pil kimyaları bulunmaktadır. Kurşun-asit aküler hem otomotiv hem de endüstriyel uygulamalarda enerji depolamak için kullanılırken, teknolojik gelişmelerle birlikte Li-iyon batarya sistemleri, sodyum-kükürt aküleri gibi teknolojiler kurşun akülerin yerini almaya başlamıştır.

Kurşun-asit aküler uzun döngü ve raf ömrüne sahiptir. Son yıllarda, pilin tam şarjlı duruma getirilmediği koşullarda bile daha uzun döngü ömürlerine sahip olacak şekilde geliştirilmiştir. Kurşun en verimli şekilde geri dönüştürülen metallere sahiptir ve kurşun akülerin %99'undan fazlası Avrupa ve ABD'de toplanıp geri dönüştürülmektedir [1-6].

Elektrik şebekelerinde enerji depolama ihtiyacı, günümüzde kesintili olan enerji kaynakları kullanıldığından giderek daha önemli hale gelmektedir. Büyük şebekeler, artan enerji ihtiyaçlarıyla birlikte güç kalitesini koruyamaz hale gelmiştir. Bu durumun çözümü ise elektrokimyasal olarak enerji depolama sistemlerini öne çıkarmaktadır. Kurşun piller, farklı türdeki enerji depolama uygulamalarına uyarlanabilen güvenilir, uygun maliyetli bir çözüm ortaya koymaktadır. Ayrıca bu kurşun asit piller hem satış değeri hem de enerji üretim açısından şarj edilebilir piller için en büyük pazar payına sahiptir. Kurşun asit akülerin kullanıldığı yerler incelendiğinde, 25 milyar dolarlık ciroya sahip otomotiv aküleri ve endüstriyel aküler öne çıkmaktadır. Endüstriyel pillerin çoğu, telekomünikasyon, veri ağları, ulusal güvenlik ve elektrik kaynağının sürekliliğinin gerekli olduğu çok çeşitli uygulamalar için dengeli ve temiz güç sağlamak üzere kullanılır [7].

Elektrik şebekelerinin geliştirilmesinin ilk zamanlarında, büyük şehirlerdeki yerel topluluklara düşük voltajlı DC gücü dağıtılmıştır ve tepe gücü ve kısa süreli enerji depolaması sağlamak için kurşun-asit piller kullanılmıştır. Ancak DC gücün yerini kısa sürede AC sistemler almış ve voltajı yükseltmek veya düşürmek için transformatörler kullanarak enerji ağları geliştirilmiştir. Ağların boyutu büyüdükçe pil enerji depolama sistemlerinin kullanımı hızla azaldığı görülmüştür. Ancak günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları daha önemli hale geldiğinden, daha yüksek düzeyde batarya sistemlerine ihtiyaç duyulur. Kısa süreli depolama için yüksek verimlilik sunan kurşun pillerle bu ihtiyaç karşılanabilir. Pillerin şebeke

desteği, akıllı Şebekeler, yerel sistemler, ev ve k¼¼k ticari enerji sistemleri gibi alanlarda kullanımları g¼¼n ge¼tikçe artması beklenmektedir [8]. Gelişmiş kurşun piller, bir¼ok sistemde, k¼¼k ¼l¼ekli evsel ve ticari enerji depolama uygulamaları i¼in kullanılmaktadır. Kurşun asitli ak¼¼ler sulu veya sızdırmaz valf ayarlı (VRLA) tiplerde olabilir. Plakalar d¼¼z yapıştırılmış veya boru Şeklinde de dizayn edilebilir. Boru plakalı ak¼¼ler d¼¼z levhalı olan ak¼¼lere g¼¼re daha uzun ¼evrim ¼m¼rleri sunar. Yenilenebilir enerji kaynakları i¼in kurşun asit batarya sistemlerinin kullanımlarında da negatif plakaların geri d¼¼n¼Ő¼ olmayan s¼¼lfatlaŐmasına yol a¼tıđı i¼in ak¼¼ler zarar g¼¼r¼r ve bu sorunun ¼¼z¼m¼ i¼in ¼alıŐmalar devam etmektedir [9-10].

Lityum iyon piller (Li-ion) bir ¼eŐit yeniden doldurulabilir pil grubundandır. ¼ođunlukla elektronik cihazlarda ve ara¼larda kullanılırlar. Ağırlılıklarına-b¼¼y¼kl¼klerine oranla verebildikleri y¼¼ksek enerji ile en iyi pil ¼eŐitlerinden biridir ve son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Li-iyon pillerde hafıza etkisi yoktur ve kullanılmadıkları zamanlardaki enerji kayıpları Nikel bazlı Şarj edilebilir pillere g¼¼re daha yavaŐtır. Bununla birlikte uygunsuz kullanılmaları halinde tehlikeli olabilirler. Eğer gerekli ¼nlemler alınmaz ise diğer pil t¼¼rlerine g¼¼re ¼m¼rleri daha kısa olabilir.

Lityum iyon piller diğer kurşun asit ve nikel metal hidr¼¼r bataryalara g¼¼re ¼ok daha hafiftirler. Bunun sebebi lityum iyon pillerin en ¼st seviyede doldurulabilme yoğunluklarıdır. Li ion piller k¼¼¼k ve taŐınabilirdir. Li iyon piller i¼in hafıza etkisi sorunu yoktur, dolayısıyla bu pilleri Şarj etmek i¼in tam olarak boŐalmalarını beklemek gerekmez. Ayrıca yine aynı nedenden dolayı Şarjı yarıda kesmek pil i¼in olumsuz bir etki yaratmaz. Lityum iyon pillerin en belirgin kusuru kullanım ¼m¼rlerinin ¼retim tarihlerinden itibaren baŐlamasıdır. ¼retildiklerinden sonra Şarj edilseler de edilmeseler de ¼m¼rleri ¼retim tarihinden itibaren azalmaya baŐlamaktadır. %100 Şarj seviyesindeki ve ¼ođunlukla 25 °C derece sıcaklıkta bulunan tam dolu tipik bir diz¼st¼ bilgisayar pili, geri d¼¼n¼Ő¼ olmayacak Şekilde her yıl kapasitesinin %20 sini kaybeder [9-10]. DeđiŐik depolama/saklama dereceleri deđiŐik pil ¼m¼r¼ kayıplarına yol a¼maktadır. 0 °C derecede %6, 25 °C derecede %20 ve 40 °C derecede %35 kayıpla karŐılaŐılabilir.

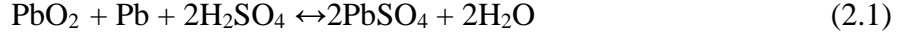
Eğer lityum iyon pil %40 dolu olarak depolanırsa/saklanırsa pil kapasitesindeki kayıp değerleri d¼¼Őer. Bu değerler %40 dolu pilde 0 °C derecede %2'ye, 25 °C derecede %4'e, 40 °C derecede ise %15'e d¼¼Őer.

Eğer pil %0 a kadar boşaltılırsa bu durum "tam boşaltma" olarak adlandırılır ve bu durum pilin kapasitesini düşürür. Yaklaşık olarak 100 tam boşaltma pilin kapasitesinde %75 ten %80'e kadar bir kapasite kaybına yol açar. Dizüstü bilgisayarlarda ya da cep telefonlarında kullanıldığında bu kayıpların anlamı üç-beş yıllık bir kullanımın ardından pilin kapasitesinin kullanılmayacak kadar düşecek olmasıdır.

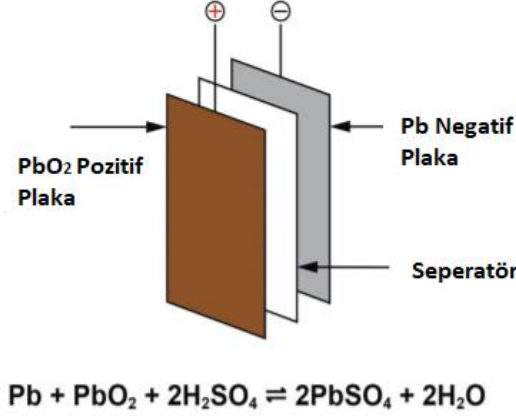


2. KURŞUN ASİT PİLLER

Bir kurşun asit aküdeki genel deşarj reaksiyonu aşağıdaki denklem ile ve Şekil 2.1.de verilmektedir (Şekil 2.1):



Burada kurşun asit aküler için nominal hücre voltajı 2.05 V'tan nispeten yüksektir. Pozitif aktif malzeme, gözenekli kurşun dioksit ve negatif aktif malzeme ise ince bölünmüş kurşundur. Elektrolit ise boşaltma işleminde yer alan seyreltik sulu sülfürik asittir. HSO deşarjında sülfür iyonları negatif elektrota geçmesi sonucunda H⁺ iyonları ve kurşun sülfat ortaya çıkar. Pozitif elektrotta kurşun dioksit elektrolit ile reaksiyona girerek kurşun sülfat kristallerini ve suyu oluşturur. Her iki elektrotta zayıf bir iletken olan kurşun sülfata deşarj edilir. Deşarj devam ettikçe elektrolit kademeli olarak seyreltilir. Şarjda tersi reaksiyonlar gerçekleşir. Hücreler şarjın üst seviyesine yaklaştıkça elektrotlar aşamalı olarak kurşun dioksit ve kurşuna dönüşür. Sülfat konsantrasyonu arttıkça elektrolitin özgül ağırlığı da artar. Daha fazla şarj, hidrojen ve oksijene elektroliz edildiğinden su kaybına neden olacaktır. Ancak bunun meydana getirdiği potansiyel, su kaybının şarj voltajını yönetilebilmesi için yeterince yüksektir. Sulu aküler için, ızgara alaşımlarının ve şarj parametrelerinin doğru seçimi, su kaybını çok düşük seviyelere indirir. Bu nedenle akü bakımı için su seviyesinin her zaman kontrol edilmesi gerekir. Bununla birlikte, elektrolitin emici bir cam mat (AGM) ayırıcıda sabit hale getirileceği veya ince dağılmış silika ile jelleştirileceği (jel akü) şekilde sızdırmaz bir hücre tasarlanırsa, pozitif ve negatif plakalar arasında AGM'de gaz gözenekliliği olarak kanallar kontrol edilebilir.



Şekil 2.1: Bir Kurşun-Asit Pilin kimyası ve temel bileşenleri.

Dolayısı ile şarj ve deşarj reaksiyonlar aşağıdaki gibi verilir:



(2.3)

Gaz fazında oksijenin pozitiften negatife difüzyonu sıvı elektrolitten çok daha hızlıdır. Oksijen, normal deşarj ürünü olan kurşun sülfat üretmek için kimyasal olarak yeniden birleştirilir, plakayı depolarize eder ve daha sonra normal şarj işleminde olduğu gibi yeniden şarj edilir. Kapalı hücrelerde, negatifte hidrojen oluşumunu azaltmak ve hem aktif malzemeler hem de ızgaralar için yüksek saflıkta malzemelere sahip olmak için, yüksek hidrojen potansiyeline sahip ızgara alaşımları seçilmelidir. Ek olarak, hücrelerin küçük miktarlarda hidrojen salınımına izin vermek ve havanın hücrelere girmesini önlemek için tek yönlü valflere sahip olması gerekir. Bu tür hücrelere sahip piller, önceden belirlenmiş bir iç basınçta hücreden gaz çıkışı için tek yönlü bir valfe sahip olduklarından ve çevreden hücreye hava girmesini engellediklerinden valf ayarlı kurşun asit piller olarak adlandırılır.

Kurşun asit hücreleri, pozitif ve negatif aktif malzemeleri mekanik olarak destekleyen ve akım toplayıcı olarak hareket eden kurşun alaşımlı ızgaralardan yapılmıştır. Izgaralar, pozitif ve negatif plakalar olarak montajlanır ve gözenekli, elektriksel olarak yalıtkan bir ayırıcı ile ayrılır. Plakalar, hücre bileşenlerini, pozitif ve negatif plakaların birbirine bağlı olduğu elektroliti, terminalleri, bir kapağı ve havalandırma düzenlemelerini içerecek şekilde uygun bir kalıplanmış polimer kasaya yerleştirilir. İki ana tip pozitif plaka vardır; düz yapıştırılmış plakalar ve boru şeklindeki plakalar. Negatif plakalar her zaman düz

yapıştırılmış tiplerdir. Ayrıca spiral sargılı plaka tipleri ve bipolar tasarımlar da vardır. Ancak bunlar daha küçük kapasitelerle sınırlıdır. Farklı plaka tiplerine ek olarak, hücreler sulu veya VRLA tipleri olabilir. Yapıştırılmış plakalar için ızgaralar, kurşun alaşımli levhaların dilimleme ve genişletilmesi veya kurşun alaşımli levhaların zımbalanması yoluyla yapılabilir. Yapılan çalışmalarda kurşun alaşımı değişen miktarlarda antimon eklenerek daha yüksek performanslı aküler geliştirilmiştir. Ayrıca kalsiyum, kalay ve diğer elementlerle alaşımlanarak daha yüksek performanslı aküler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Antimonlu alaşımlar, derin döngü uygulamaları için tasarlanmış hücrelerin pozitif ızgaraları için kullanılır. VRLA hücrelerinin pozitif ızgaraları için kalsiyum-kalay içeren alaşımlar ve saf kurşun kullanılır. Döngü çevrimi için negatif ızgaralarda daha düşük antimon seviyelerine sahip farklı alaşımlar kullanılabilir. Bazı türlerde, negatif ızgaralarda kalsiyum ve daha düşük kalay seviyelerine sahip hücre alaşımları kullanılır. Bu alaşımlar VRLA-tipi hücreler içindir. Aktif maddeler, kurşun oksit ve sülfürik asitten formüle edilmiş gözenekli bir macun formunda ızgaralara uygulanır. Macun karıştırma sırasında bazik kurşun sülfatlar geliştirilir. Bunlar, ızgaralara iyi bağlanmış sağlam, birbirine kenetlenen bir yapıya sahiptir. Yapıştırılan plakalar daha sonra sıcak nemli koşullarda kütleme işlemi uygulanır. Böylece macun parçacıkları birbirine ve ızgara yüzeylerine güçlü bir şekilde bağlanır. Pozitif aktif malzeme, küçük katkı maddeleri veya güçlendirici lifler içerir. Ancak negatif aktif malzemeler baryum sülfat, lignosülfonatlar, karbon siyahı ve ayrıca liflerden oluşan özel katkı maddelerine sahiptir. Bunlar, bataryanın düşük sıcaklık performansını ve çevrim ömrünü iyileştirmek için aktif kütlemin mikro gözenekli ve iletken yapısını korumasını sağlar. Kurşun asit akülerde ayırıcılar, mikro gözenekli polietilen, polivinil klorür (PVC), kauçuk veya diğer malzemeler olabilir. İyonik iletkenlikte yeterli asidin oluşmasını sağlamak, yüksek gözeneklilik ve ayırıcının kurşun tarafından nüfuz etmesini önlemek için, pozitif plakanın çevrim sırasında aktif madde kaybına karşı korunması gerekir. Bu basitçe, ayırıcıya tutturulan ve pozitif plakalara bastırılan bir cam elyaf hasır levhasıyla veya cam hasırların ve ince kumaşların pozitif levhaların etrafına sarıldığı, delikli bir polimer levha tarafından sıkıştırılarak tutulduğu bir yapı olmalıdır. VRLA hücresi için AGM ayırıcılar da kullanılır. Bunlar cam mikrofiberlerden yapılır ve plakalar arasında ayrımı sağlar. Ancak asidik formdaki elektroliti tamamen emer ve gaz fazındaki oksijen difüzyonu sağlar. Yapıştırılmış plaka hücrelerde jel elektrolit de kullanılabilir, bu durumda mikro gözenekli plastik ayırıcıların kullanılması ve spesifikasyonun bu hücre tipine uygun hale getirilmesi gerekir. VRLA yapıştırılmış plaka hücrelerinde, pozitif aktif malzemenin döngüde dayanıklılığını sağlamak için yeterli yoğunluğa sahip olması gerekir. Bataryanın şarj ve deşarj

işlemi boyunca hacim ve şekildeki değişiklikleri içeren yeniden yapılandırma dönüşümleri ortaya çıkar. Bu durum, daha yüksek sıcaklık ve nem koşullarında daha iyi döngüsel performans gösteren tetra-bazik kurşun sülfatla ve kürlenme-kurutma aşamasında modifikasyonlar yapılarak çözülebilir. Kürlenmedeki doğru koşullar ayrıca aktif malzemenin ızgaralara iyi yapışmasını ve aktif malzeme ile ızgara arasındaki ara yüzün tamamen iletken olmasını sağlar. Kırmızı kurşun (Pb₃O₄) macun formülasyonuna pozitif aktif kütlelerin oluşumunu ve yapısını iyileştirmek için eklenebilir. Pozitif aktif maddeye fosforik asit (H₃PO₄) eklenebilir. Bu işlem pozitif aktif malzeme ile ızgaralar arasındaki yapışmayı ve aktif malzemenin kohezyonunu artırır. Boru şeklindeki pozitif plakalar, uzun bir tarak gibi bir üst çubuğa tutturulmuş bir dizi diken şeklinde ızgaraya sahiptir. ızgaralar, aktif malzemeyi tutmaya yarayan dokuma veya dokuma olmayan, cam veya polyester elyaftan yapılmış tüplerle çevrilidir. Tüpler genellikle omurganın üzerine oturan ve üst kısımdaki küçük daha geniş bir parçayı kapatan bir yapıya sahiptir. Omurga ve tüp arasındaki halka, kurşun oksit, kırmızı kurşun tozu, aynı malzemelerden bir macun, ya da bulamaç olarak aktif malzeme ile doldurulur. Halkanın tabanı plastik bir kapakla kapatılır. Plakalar daha sonra oksitleri kurşun sülfata dönüştürmek için asit içinde ıslatılır, işlenir, kurutulur. Daha sonra elektrokimyasal olarak oluşturulan hücrelere birleştirilir. Pozitif aktif kütlelerin yapısı ve yoğunluğu için yapıştırılan pozitif plakalar ile aynı hususlar, yüksek sıcaklıkta sertleştirme kullanılmamasına rağmen boru şekilli plakalar için de geçerlidir. Sulu ve jelle yapıştırılmış plaka VRLA hücreleriyle aynı tipte ayırıcılar kullanılabilir. Boru şeklindeki plakalar, borular çok sağlam olduğundan ve dökülmenin meydana gelmesine izin vermediğinden, aktif malzemenin tutulması açısından avantajlıdır.

Yakıt ekonomisini iyileştirmek ve egzoz emisyonlarını azaltmak için otomotiv endüstrisinin stop-start veya mikro hibrit teknolojisini benimsemesi, tek bir motor çalıştırma yerine kurşun asitli akülerin performansını arttırmanın yollarını aramayı gerekli kılmıştır. Otomobil hareketi sırasında, motor birçok kez çalışır ve durur. Bu durumda akü sürekli olarak döngüye girer. Bu çalışma modu, yüksek hızlı kısmi şarj durumu görevi olarak adlandırılır. Pil performansı, çalışma moduna uyarlanmadıkça, ömrü bir süre sonra azalır. İndirgemenin nedeni, negatif plakanın şarj ve deşarj reaksiyonunun tamamen tersine çevrilemez olması ve kurşun sülfatın tam olarak şarj edilmesinin zorlaşmasıyla negatif plakanın yükü kabul edememesidir. Pil, şarjı kabul etmek ve enerjiyi geri kazanmak için tam olarak şarj edilemediği için sorun daha da büyür. Bununla birlikte, sektördeki büyük bir araştırma faaliyetleri sonucunda gereksinimleri karşılayabilen hem sulu hem de VRLA olan yeni pil

tasarımları geliştirmektedir. Burada en temel yaklaşım negatif plakaların davranışını iyileştiren özel karbonların geliştirilmesi olmuştur. Enerji depolama sistemlerinde, özellikle güneş PV ve şebeke destek sistemlerinde benzer problemler mevcuttur. Otomotiv aküleri için araştırılan çözümlerin çoğu endüstriyel aküler için kullanılabilir [11-13].

Karbonun kurşun asitli bir akünün negatif plakasının performansını değiştirmesinin birkaç yolu vardır. Bunlar; (i) kapasitif etkilerle, (ii) elektrokimyasal yükleme ve deşarj işlemlerinin gerçekleştiği yüzey alanını genişleterek ve (iii) fiziksel işlemlerle sağlanabilir. Kapasitif etkiler (i), geniş spesifik yüzey alanlarına sahip olan, akım toplayıcı ve aktif kütlenin süngerimsi kurşun matrisi olarak ızgara ile iyi temas halinde olan karbonlar tarafından tercih edilir. Bununla birlikte, karbonun sünger kurşun ile karıştırılmaması gerekir. Yüzey alanı etkileri için (ii) karbonun da iletken olması ve akım toplayıcı ile temas halinde olması gerekir, ancak karbon, yüzey işlemlerinden ziyade hacimsel olarak katkıda bulunduğundan, yüzey alanı kapasitif süreçten daha azdır. Karbonun fiziksel işlemlerden yararlanmak için kullanıldığı durumlarda (iii) iletken olması gerekmez, ancak sünger kurşun ile çok yakından karıştırılması ve işlevinin zamanla azalmaması için yeterli parçacık boyutuna sahip olması gerekir. Bu gereksinimlerin birçok değişkeni olduğu ve çok çeşitli farklı karbon malzemeleri olduğu için, farklı karbon kombinasyonlarını optimize etmeye yönelik birçok araştırma yapılmaktadır. Ancak mekanizmaları aydınlatmak için yapılması gereken çok sayıda temel çalışma da bulunmaktadır. Bu durumun çözülmesi ile birlikte enerji depolama uygulamaları için kurşun pillerde daha fazla iyileştirme durumu söz konusu olacaktır.

Negatif ızgaranın metalik parçalarının bir kısmını veya tamamını karbon ile değiştirmek mümkündür. Hem sert karbon köpükler hem kurşun elektrolizle kaplanmış grafit folyo ve esnek karbon keçeler ile çeşitli yöntemler üzerinde çalışılmaktadır. Sert karbon köpükler olağanüstü bir ömre ve aktif kütle kullanımına sahiptir. Ancak bu malzemelerin kırılğan yapısı üretimini sorunlu hale getirmektedir [14]. Kurşun elektrolizle kaplanmış grafit folyo, düşük oranda kullanılmasına rağmen çevrim performansında dayanıklılığı yüksektir. Bu durum kurşun sülfat oluşumunun inhibe edildiğini gösterir [15]. Yapılan çalışmalarda kurşun ızgaranın kontrollü koşullar altında bir elektrik arkıyla aktive edilen bir karbon keçe ile değiştirilerek daha umut verici bir konsept geliştirilmiştir [16]. Keçe aktif malzeme ile emprenye edilir ve kurşun alaşımlı akım toplayıcılara bağlanır [17-21].

2.1 Kurşun-Asit Pillerin Dayanıklılıklarını Sınırlayıcı Faktörler

Kurşun asit akülerde pozitif ızgara, şarj voltajında tutulur, sülfürik aside batırılır ve en yüksek şarj voltajına ulaşırsa korozyona uğrar ve bu durumlar akü performansını ciddi olarak etkilemektedir. Kurşun-antimon, kurşun-kalsiyum-kalay, kurşun-kalay veya saf kurşun olan ızgara alaşımı, yüksek korozyon direncine sahiptir. Izgara kalınlığı ve diğer ızgara tasarım parametreleri, pilin beklenen ömrü için yeterli ızgara metali sağlamak üzere seçilmelidir. Izgara üretim süreci ve ızgara alaşımının mikro yapısı önemlidir. Akü çalışırken ortaya çıkan korozyon, daha yüksek şarj voltajları ile hızlanır. Batarya şarj gerilimi, aşırı su kaybı olmadan tam şarjlı bir pil elde etmek için ayarlanmalıdır. Bataryanın uzun ömürlü olması için korozyon düşük oranda kalmalıdır. Dolayısı ile şarj voltajının doğru ayarlanması önemlidir. Ayrıca ızgara korozyonu da sıcaklığa duyarlıdır. Pil ömrü boyunca iç direnci artar ve ömrünün sonuna doğru bu artış hızlanır.

Aktif malzeme ve korozyon, ürününün hacmindeki değişikliklere ve pil yaşlandıkça bozulabilen ızgaralar üzerinde istenmeyen gerilimlere neden olur. Izzaralar, negatif grup çubuğuna temas edecek şekilde büyümesi kısa devrelere neden olabilir. Ayrıca plakaların kenarlarında istenmeyen yapılar oluşturabilir. Bu durum kasa çatlamasına ve sızıntı problemlerine yol açar. Voltaj artışı aynı zamanda şebeke ve aktif malzeme arasındaki bağlantı kaybına, iç direncin artmasına, kapasitenin azalmasına neden olacaktır. Izzgara büyümesi, ızgara alaşımının doğru seçilmesi, ızgara kalınlığının ve tel bölümlerinin yeterli olması sağlanarak azaltılabilir. Tübüler pozitif plakalar genellikle ızgara büyümesinin etkilerine yapıştırılan plakalardan daha dirençlidir. Çünkü yanal büyüme kumaş eldivenler tarafından kısıtlanır. Dikey büyüme hücre tasarımı ile engellenebilir. Kurşun-antimon alaşımları, daha yüksek çekme mukavemeti ve sürünme direncine sahip oldukları için kurşun-kalsiyum-kalay alaşımlarına göre ızgara büyümesine daha dayanıklıdır. Ancak VRLA pillerde su kaybını önlemek için ızgaralarda kurşun-kalsiyum-kalay, kurşun-kalay veya saf kurşun kullanılmalıdır.

Hem pozitif hem de negatif plakalardaki normal deşarj ürünü kurşun sülfattır. Bu normalde çok ince bir şekilde ayarlanır ve yeniden şarj edilerek geri kazanılması kolaylaştırılır. Ancak zamanla yeniden şarj edilmesi daha zor hale gelir ve kapasite kaybına yol açar. Bu durumda hücrenin iç direncinde artış ve performans kaybı olacaktır. Akü uzun süre kısmen veya tamamen boşalmış halde bırakılırsa sülfatlaşma artacaktır. Karbon katkı

maddelerinin kullanılması ise sülfatlaşmanın etkilerini azaltmak için kullanılan önemli bir yöntemdir.

Yeniden doldurma sırasında kurşun sülfat negatif plakada indirgendiği ve pozitif plakada oksitlendiği için her iki plakadan da sülfürik asit üretilir. Bu nedenle yoğunluk hücrenin dibine doğru hareket etme eğilimi gösterir. Asit, hücrenin tepesinden altına bir yoğunluk gradyanı ile tabakalanır. Bu, asit konsantrasyonunun daha yüksek olduğu alanlarda sülfatlaşma eğilimini artıracak ve ayrıca aktif maddenin kullanımında farklılıklara neden olacaktır. Bu problem basit asit devridaim pompaları ile ortadan kaldırılabilir. Sorun, taşmış hücreleri etkiler ve VRLA hücreleri, AGM ayırıcısı veya jeli, elektroliti hareketsiz hale getirdiği için tabakalaşmadan daha az etkilenir. AGM tipi akülerde ayırıcı fitillerinin yüksekliği, hücrenin genişliği ve uzunluğu ile sınırlıdır ve akü çalışırken asit yoğunluğu sabit kalacak şekilde ayarlanmalıdır.

Ömrünün sonunda veya aşırı şarj voltajları gibi belirli arıza durumlarında VRLA piller için, hücrelerden su kaybı olacaktır. Bu da ayırıcı malzemenin büzülmesine, basınç kaybına ve azalmaya neden olacaktır. Bu koşullar kapasite kaybına ve iç direncin artmasına neden olur. Daha yüksek çalışma sıcaklıkları da kuruma riskini artırır. Örneğin uygulanan yüksek voltajın bir sonucu olarak kuruma daha hızlı gerçekleşirse, termal kaçaklara yol açabilir. Kuruma, mekanik bir kusur, yüksek ortam sıcaklığı, yanlış şarj gibi faktörlerin bir kombinasyonunun sonucu olabilir veya ömrünün sonuna gelmiş bir hücrede meydana gelebilir. Şarj voltajı doğru bir şekilde kontrol edilirse, kuruma bir arıza kaynağı olmaz. Sulu aküler için düzenli bakım suyu ilaveleri ile kuruma riski yoktur.

Sütun contaları, üretim hatalarının bir sonucu olarak çalışma sırasında sızıntı yapabilir. VRLA hücreleri kuruyabilir ve akü yüzeyindeki asit toprak arıza akımlarına neden olabilir. Bu da aşırı ısınmaya ve termal kaçaklara neden olabilir.

Kapak contaları, sütun contası sızıntısına benzer sonuçlara sahip üretim kusurlarının bir sonucu olarak da sızıntı yapabilir. İyi üretim ve montaj uygulamaları çözümdür.

VRLA için havalandırma delikleri eksik, çıkmış veya kapatılamayabilir durumda olması, kapasitenin azalmasına, hızlı kurumaya, elektrolit kaybına neden olabilir. Sulu hücreler için, havalandırma delikleri hasar görürse hücreye herhangi bir zarar gelmez.

Kaza sonucu meydana gelen mekanik hasar, hücrelerin sızıntı yapmasına neden olarak sütun contası sızıntısına benzer bir arızaya neden olabilir. Elektrolit kaybı kurumaya ve kapasite kaybına neden olabilir.

Plaka pabuçlarına olan grup çubuğu bağlantısı paslanabilir ve muhtemelen bağlantısı kesilebilir. Grup çubuk alaşımının doğru bir şekilde belirtilmesi, grup çubuğu ile plaka pabuçları arasındaki bağlantının dikkatli bir şekilde yapılması gerekir.

Bunlar, ayırıcının hasar görmesinden veya delinmesinden kaynaklanabilir. Arızaya yol açan sert kısa devreler veya kusurun nispeten küçük olduğu yumuşak kısa devreler olabilir. Kısa devre hataları başlangıçta belirgin olmayabilirler. Dahili kısa devre kullanımdan önce kendi kendine boşalarak kapasite kaybına neden olacaktır. Bu hatalar VRLA hücrelerinde termal kaçaklara neden olabilir.

Piller, şarj olurken küçük miktarlarda hidrojen yayar. Bu durum normal çalışmada ve iyi havalandırılan bir ortamda havadaki hidrojen için yanıcı sınıra ulaşmaz. Ancak arıza koşulları altında meydana gelebilir. Alev geciktirici menfezler kullanılmalıdır ve gerekli güvenlik önlemleri alınmalıdır.

Hücreler arası veya monobloklar arası bağlantılar güvenli değilse, yüksek direnç nedeniyle özellikle deşarj sırasında aşırı ısınabilir ve yangına neden olabilir. VRLA akülerinde termal kaçak, şarj voltajının uygulanmasının akü sıcaklığını kontrolsüz bir şekilde yükselttiği ve aşırı durumlarda yangına veya akü patlamalarına yol açabileceği dengesiz bir durumdur. Batarya, deşarj döngüsünden sonra yeniden şarj için önemli akımlar çekebileceğinden, akım sınırlı değildir. Belirtildiği gibi termal kaçakların birkaç nedeni vardır. Kuruma, dahili kısa devreler, hücre ters çevrilmesi ve diğer kusurlar termal kaçak ile sonuçlanabilir. Ayrıca aşırı şarj voltajından da kaynaklanabilir ve ortamdaki artan sıcaklıklar ile hızlanacaktır.

2.2 Kurşun Asit Pil Geri Dönüşümü

Kurşun en verimli şekilde geri dönüştürülen metaldir. AB ve ABD'de kurşun bazlı pillerin %99'dan fazlası kapalı devre bir sistemde toplanıp geri dönüştürülür. Bu oran, herhangi bir toplu tüketici ürününden daha yüksek bir geri dönüşüm oranıdır. Batı ülkelerinde ömrünü tamamlamış pillerin %95-99'u geri dönüştürülür. Piller tipik olarak ağırlıkça %65 kurşun içerir ve bunun çoğu geri kazanılabilir. Toplanan hurdanın büyük kısmı kullanılmış otomotiv akülerinden ve küçük bir kısmı ise endüstriyel akülerden gelir. Prosesler, polipropilen kasa malzemelerini geri kazanmak için tasarlanmıştır. Bazı endüstriyel pillerde

kullanılan akrilonitril-bütadien-stiren veya stiren-akrilonitril gibi diğer polimerler genellikle geri kazanılmaz. Karışımda daha büyük miktarlarda hurda endüstriyel pil varsa, diğer polimerleri geri kazanma süreçleri ekonomik hale gelebilir. Endüstriyel piller için pirinç uçlar, bakır konektörler ve antimon içeren alaşımlar da hurdaya değer katabilir. Geri dönüşüm süreci, pilleri kırarak asidin boşaltılması ve toplanmasıyla başlar. Piller daha sonra küçük parçalara ayrılır ve polipropileni metalik kurşun, pil macunu ve diğer plastiklerden ayırmak için yüzdürme işlemleri kullanılır. Pil macunu, sodyum karbonat kullanılarak ve harici satış için asit sodyum sülfata dönüştürülerek kükürttten arındırılabilir. Polipropilen yıkanır ve yeniden kullanım için satılır. Macun ve metalik kurşun daha sonra kurşun külçe üretmek için indirgeyici maddeler ve flukslarla eritilir. Daha sonra gerekli saf kurşun üretmek için rafine edilir. Bu, pil üretimi için bu formda veya müşteri şartnamesine göre alaşımlı olarak sağlanabilir. Rafine edilen cüruflar, antimon, kalay ve bakır gibi metalleri geri kazanmak için eritilir. Gümüş de geri kazanılabilir. Süreç oldukça gelişmiştir ve yüksek verimler elde edilir. Değer olarak her bir ton hurda akü için 650 kg kurşun geri kazanılmaktadır. Polipropilen ve sodyum sülfat ek değer katacaktır.

3. LİTYUM İYON PİL TASARIMI

Son yıllarda hayatımıza hızla giren Li-iyon piller kurşun asit akülere göre çok yüksek hacimsel ve kütleli enerji yoğunluklarından dolayı mikro boyuttan makro boyuta kadar birçok elektronik cihazın enerjisinin sağlanmasında kullanılmaktadır. Bu amaçla özellikle kurşun asit akülere göre büyük uygulamalardaki durumlarının detaylı olarak anlaşılması gerekmektedir. Bu durumun daha detaylı anlaşılması için gerekli özellikler aşağıda incelenmiştir.

3.1 PİL TASARIM ESASLARI

Elektrikli araç akü paketleri, araç elektrik gücü ve enerji talebini karşılamanın yanı sıra çeşitli otomotiv teknik gereksinimlerini karşılamak için gereklidir. Hücrelerin modüller ve ardından paketler halinde birleştirilir. Mekanik olarak, akü paketlerinin mevcut araç şasi yapısına entegre edilmesi gerekmektedir. Paketler ayrıca elektronik kontrol arayüzünü araç kontrol modüllerinin geri kalanıyla yönetmek, hücrelerini yaşam ve güvenlik için önceden belirlenmiş çalışma parametreleri içinde tutmak için gereklidir. Ek olarak, pil paketleri, performans ve güvenlik değerlendirmeleri için termal kontrol bileşenlerine sahiptir. Lityum iyon kimyalarının tasarım spesifikasyonlarının dışındaki mekanik, elektrik ve termal durumlara duyarlılığı, sağlam pil takımı tasarımına ek önem verir.

Modüller/Paketler: Otomotiv uygulamalarında, yalnızca hücre düzeyindeki değer rakamlarını değil, aynı zamanda modülde (genellikle elektrik/termal algılama ve arayüzler içeren mekanik bir hücre montajı) ve pil paketi düzeyinde (mekanik bir montaj) dikkate almamız gerekir Genellikle elektriksel, termal kontrol donanımı ve yazılımı içeren modüller). Modül ve paket tasarımları önemli ölçüde farklılık gösterebilir de bunların tümü hücre düzeyindeki performans değerlerini etkin bir şekilde düşüren ekstra ağırlık ve hacim ekler.

Elektrik motorları, kablolar ve güç elektroniği ile ilgili pratik hususlar akım akışını <500 A ile sınırladığından, bireysel hücre voltajları, elektrikli araçlar için gereken kilovat gücü sağlamak için yetersizdir. Mekanik olarak pil modülü olarak bilinen bir alt montaj yapı bloğu oluşturur. PİL modülleri tipik olarak, kullanım kolaylığı ve güvenlik için voltaj 50 V ve ağırlık 22 kg olacak şekilde hücre düzenlemeleri içerir.

Akü modülleri, elektrikli araçlar için tam güç ve enerji ihtiyacını sağlamak için elektrikselsel olarak (seri ve paralel olarak) birleştirilir. Araç tipine ve tasarımına bağlı olarak, elektrokimyasal hücreler, paket maliyetinin, ağırlığının ve hacminin %50 ila %75'ini oluşturabilir. Bu nedenle, pil takımı sisteminin özgül performansı her zaman modüllerinkinden ve modüller de hücrelerinkinden daha düşüktür. Elektrikli araç pil paket performans hedefleri bu nedenle otomotiv tasarımcıları için en uygun olacak şekilde belirlenir.

Mekanik: Akü paketleri, çarpma durumunda ve normal araç kullanımı ve titreşim sırasında güvenli olacak şekilde fiziksel olarak araç içinde tutulmalıdır. Tipik bir araç yolcu bölgesi, tekerlek aksları arasındaki ve her iki taraftaki külbütör panellerinin içindeki alan olarak tanımlanır. Bu bölgenin dışına bir pil takımı yerleştirmek mümkündür, ancak çarpışma bütünlüğünü sağlamak için eklenecek önemli yapısal iyileştirme gerektirir ve bu durum pakete önemli maliyet, ağırlık ve hacim yükleri ekler. Pil paketindeki hacim sınırlamalarının kısıtlı olması nedeniyle, pil ambalaj ve yerleştirme mühendisliği, bir elektrikli aracın tasarımında her zaman kritik bir özelliktir.

Elektrik: Elektronik kontroller, pil paketini normal çalışma koşulları içinde tutarken gerekli tahrik gücünü sağlamada pil paketine yardımcı olur. Geleneksel bir 12 V kurşun-asit pil, yüksek voltajlı pilin kazara aşırı boşalmasını önlemek için, motor kapalıyken elektrikli araç yardımcı yüklerine (ışıklar, alarm sistemleri, radyo vb.) güç sağlamak için yaygın olarak kullanılır. Bir motor sinyali alındığında, 12 V besleme, yüksek voltajlı pili araca elektronik olarak bağlamak için birkaç sistem kontaktörünü kapatacaktır. Paketler, bir arıza durumunda (yani kaynaklı kontaktörler) veya bakım sırasında bir paketi elektronik olarak manuel devre dışı bırakılabilir (MSD). Düşük voltajlı akü paketleri araç şasisine topraklanırken, yüksek voltajlı sistemlerin elektronik olarak yalıtılması gerekir. Ek güvenlik için, paketler genellikle, kırıldığında aracı olası bir izolasyon hatasına karşı uyarı yüksek voltajlı kilitleme (HVIL) devreleri içermelidir.

Paket/modül/hücre voltajları ve akımları, paket pil yönetim sistemi (BMS) tarafından ölçülür ve kontrol edilir. BMS, şarj durumu (SOC), yaş ve sıcaklık gibi faktörlere dayalı olarak pil için hücre voltajı/akımı, paket enerji/güç sınırlarını ayarlamak için genellikle arama tablolarına ve önceden tanımlanmış algoritmalara başvurur. BMS ayrıca, genel paket elektrik çıkışını ve girişini denetlemenin yanı sıra, paket kontaktörlerinin durumu, HVIL, MSD ve sıcaklık bilgilerinin araç kontrolörleri ile iletilmesinden de sorumludur. Harici olarak şarj edilebilen araçlar (PHEV ve EV'ler) için, BMS'nin ayrıca yerleşik şarj cihazını ve harici fiş

arayüzünü denetlemesi, kontrol etmesi gerekir. Zamanla bireysel hücreler, montajlarındaki, kapasitelerindeki, güçlerindeki ve termal geçmişlerindeki kusurlar nedeniyle SOC'lerini ortak veya ortalama bir değerden sapacaktır. Periyodik olarak, BMS, aşırı deşarjı önlemek ve paket alt birimlerini daha sıkı bir SOC penceresine döndürmek için pasif (yani, bir dirence deşarj) veya aktif (yani, yüksek ve düşük SOC hücreleri arasında enerjinin yeniden dağılımı) hücre dengeleme olaylarını gerçekleştirmeye çalışabilir.

Termal: Elektrikli araç batarya sistemleri, hücre sıcaklıklarını normal bir çalışma aralığında tutmak için tasarlanmış bir termal yönetim sistemi kullanır. Elektrolit bileşimi gibi lityum iyon pil hücresi tasarım parametreleri, tercih edilen çalışma sıcaklığı aralığını güçlü bir şekilde etkileyecektir. Pratik bir konu olarak farklı kimyalara sahip çoğu bataryalarda, 10-40 °C aralığında enerji ve güç dengesi elde edebilir. Hava soğutmalı sistemlerde bu sıcaklık aralığı, araç içindeki sıcaklık değeriyle aynıdır. Bu, ayarlanan termal ortam ile pil takımı arasında küçük bir sıcaklık farkıyla sonuçlanır. Ne yazık ki, sıvı soğutma sistemleri için bu sıcaklık aralığı, mevcut motor/şanzıman (*100 °C) ve güç elektroniği (*80 °C) soğutma sıvısından farklıdır. Sıcaklık pencerelerindeki bu fark, mevcut araç soğutma donanımından yararlanmak için mevcut soğutma sıvısı döngülerini yaygınlaştırmanın şu anda mümkün olmadığı anlamına gelir.

Hibrit elektrikli araçlar, ısıtma işlevlerini gerçekleştirmek için motorun termal verimsizliklerinden kaynaklanan atık ısı enerjisinden yararlanır. Elektrikli araçların aşırı ısı sağlayacak bir motoru olmadığından, yolcu kabinini ve potansiyel olarak pil takımını ısıtmak için pozitif termal katsayılı (PTC) ısıtıcılar kullanırlar. Bu ısı kaynakları, lityum iyon pil deşarjının/şarjının ekzotermik doğası ve paket bileşenlerinin joule ısınması (paketin sağladığı gücün %10'u düzeyinde), çoğu sıcaklık kontrol sisteminin ısıtma yerine paketi soğutmaya odaklandığını göstermektedir.

Soğutma sistemleri karmaşıklık ve tasarım açısından farklılık gösterebilir ancak tipik olarak üç kategoriye ayrılır: pasif hava, aktif hava veya sıvı sıcaklık kontrolü sistemler. Üretilen bazı araçlar (Nissan Leaf) doğal konveksiyonla soğutulur; ancak çoğu tasarımda yeterli ısı transferi sağlamak için bir veya birden fazla fan bulunur. Pasif hava yaklaşımı, yolcu kabininden hava alır ve iklimlendirme (yani yazın soğutma ve kışın ısıtma) sürücüyeye bağlıdır. Bu yaklaşım daha basittir ve sonuç olarak çoğu ticari elektrikli hava soğutmalı araçta (Toyota Prius) kullanılır. Aktif hava yaklaşımı, aracın klima sisteminden gelen havayı akü paketine doğrudan bağlayarak (Birinci Nesil Ford Escape Hybrid, ABD Model Yılı 2004-2006) veya yalnızca aküye özel ikinci bir klima sistemi ekleyerek elde edilir (Lexus LS 600 h,

ABD Model Yılı 2006–2012). Bu şekilde, aktif hava yaklaşımı, batarya paketi için optimum sıcaklık aralığında çalışmayı sağlayacaktır. Dahil edilen ek hava kanalları, ikinci soğutma sistemi, eklenen ağırlık, hacim ve maliyet nedeniyle, aktif hava yaklaşımı pasif yaklaşımına göre daha dezavantajlıdır.

Sıvı soğutma, özel bir ısı eşanjörü ve soğutucu döngüsü kullanma ihtiyacı göz önüne alındığında, hava soğutmadan daha yüksek derecede termal kontrol sağlar. Ek olarak, sıvı soğutma, soğutma ortamının (tipik olarak su/etilen glikol %50/50 karışımı) ve kanallarının (borulara karşı plenumlar) çok daha büyük özgül ısı kapasitesi nedeniyle havayla soğutmadan hacimsel olarak daha verimlidir. Ne yazık ki sıvı soğutma, pasif hava soğutmaya kıyasla ağırlığı, maliyeti, parça sayısını ve üretim karmaşıklığını artırır. Sonuç olarak, yalnızca sıvı soğutmadan (tipik olarak büyük EV veya PHEV ler için) daha yüksek derecede termal kontrol gerektiren araçlar bu çözümü uygular (Ford Focus EV, Chevrolet Volt PHEV).

Tüm termal yönetim sistemlerinin amacı, ortalama pil sıcaklıklarını normal çalışma aralığında tutmak ve tüm pil paketi boyunca eşit sıcaklıklar sağlamaktır. Çalışma sıcaklığına göre değişen batarya performansı nedeni ile hücre voltaj değişikliklerini en aza indirmek için tek tip pil hücresi sıcaklıklarına ihtiyaç vardır. Kendi kendine deşarj da sıcaklığa bağlı olduğundan, şarj durumunu korumak için hücreler arası sıcaklık değişikliklerinden kaçınmak da aynı derecede önemlidir. Sonuç olarak batarya paketinin ömrünün maksimum olması ve batarya hücrelerini optimum değerlerde çalışabilmesi için sıcaklık kontrolü çok önemlidir ve üzerinde çalışılarak yeni teknikler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

3.2 Pil Boyutlandırma

Elektrikli bir aracı kullanmak için uygun pil enerjisinin ve gücünün belirlenmesi, çeşitli rekabet gereksinimlerinin sağlanması için geliştirilmesi gerekir. Her araç sınıfının elektrikli özelliklerine göre farklı ihtiyaçları vardır. Sonuç olarak, elektrifikasyonun amacı aracın yakıt ekonomisini iyileştirmektir. Bu nedenle sürüş çevrimlerinin anlaşılması gereklidir. Araç sürüş talebi dikkate alındıktan sonra bir aracın enerjisini ve gücünü ölçmek mümkündür. Paketin toplam enerjisi ve gücü belirlendikten sonra, bu hedeflere ulaşmak için hücrelerin miktar ve düzeninin belirlenmesi gerekir. Nihai hücre seçimini çeşitli iş faktörleri belirlemektedir.

Sürüş Döngüleri: Düzenleyici yakıt ekonomisi, bir aracın öngörülen sürüş döngülerini, hız ve süre izlerini takip etmesini zorunlu kılarak hükümetler tarafından takip edilir. Yakıt tüketimi, şehir içi ve yüksek hızlı (otoyol) çevrim sonuçlarına bağlıdır. Çizelge 3.1,

karşılaştırma amacıyla ABD, Avrupa Ekonomik Komisyonu (ECE) ve Japonya'nın temsili sürüş döngülerini göstermektedir [22]. Yüksek hızlı döngüler arasında, US06 modeli en fazla sayıda hız değişikliğine sahipken, EUDC döngüsü birkaç sıfır-hızlanma periyoduna sahiptir. Düşük hızdaki izler, UDDS modelinin en yüksek hız maksimumuna ve en büyük hız değişim frekansına sahip olduğunu, dolayısıyla muhtemelen en büyük güç talebine sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.1: Uluslararası sürüş döngüsü özeti (UDDS-şehir içi sürüş emisyon testi, HWY-otoyol sürüş emisyon testi, US06-agresif sürüş emisyon testi, EUC-EUDC hafif ticari araç sürüş emisyon testi) [22].

| Adı | Zaman (sec) | Uzunluk (km) | Hız(kph) | | Mutlak Hızlanma | | |
|---------|----------------|-----------------|----------|-------|-----------------|------|------|
| | | | Avg | Max | Avg | Max | |
| USA | UDDS | 1369 | 11.99 | 31.51 | 91.25 | 0.40 | 1.48 |
| | HWY | 765 | 16.51 | 77.58 | 96.40 | 0.17 | 1.48 |
| | US06 | 596 | 12.89 | 77.86 | 129.23 | 0.61 | 3.76 |
| EU | EUC | 195 | 0.99 | 18.26 | 50 | 0.27 | 1.06 |
| | EUDC | 400 | 62.44 | 62.44 | 120 | 0.19 | 1.39 |
| Japonya | 10-15 | 892 | 25.58 | 25.58 | 70 | 0.27 | 0.83 |

Her bir çevrim hızının (km/h) ve mutlak ivmenin (m/sn^2) ortalamasını ve maksimumunu gözden geçirerek, daha detaylı bir çevrim karşılaştırması yapmak mümkündür. US06 ve HWY çevrimleri benzer ortalama hızlara sahiptir, ancak çok farklı hız maksimumları ve hızlanma değerleri vardır. Bu nedenle US06 bir araç güç aktarma organlarında avantajlı olacaktır. Daha önce tarif edilmesi gereken araç tahriki bağlamında hız ve ivmenin benzer bir karşılaştırması, çevrim gücü talebi US06> HWY> EUDC> UDDS> EUC > 10-15 şeklindedir.

Güç: Pil takımı güç gereksinimi, aracın ihtiyacına göre belirlenir. Hibrit araçlar için, bir motoru soğuk kranklamak için gereken güç, kritik bir ihtiyaçtır. Çekiş gücüne katkıda bulunması gereken araçların pil gücü talebi, elektrifikasyon derecesinin bir fonksiyonu olarak değişir.

Bir içten yanmalı motora kurşun-asit akülerle gerçekleştirilen soğuk marş uygulamak, aydınlatma ve ateşleme akünün kritik işlevlerindedir [23]. HEV'lerin ve PHEV'lerin çoğunun, motor kapalıyken araç yardımcılarını çalıştırmak ve yüksek voltajlı pil takımı ile

aracın elektrik sistemi arasındaki kontaktörleri açmak/kapatmak için araçta ek olarak kurşun asitli pillerin bulunması da gerekir. Sonuç olarak, gerçek motor marş işlevi, yüksek voltajlı aküye atanır ve geleneksel araçlara kıyasla destekleyici kurşun asitli akünün boyutunun küçültülmesini sağlar. Bu işlevin güç beklentisi (6 kW) yüksek voltaj tasarımı için büyük olmasa da bu gücü -30 °C'de sağlama ihtiyacı pil boyutunu belirlemek için kritik bir konu haline gelmektedir. Lityum iyon piller, Arrhenius kinetik davranışını izleyen sıvı elektrolitler kullanır ve bu da düşük sıcaklıklarda mevcut güçte düşümlere yol açmaktadır.

US06 döngüsüne dayalı bir akü boyutlandırma çalışması yaparak, çekiş aküsü gereksiniminin üst sınırını belirlemek mümkündür. Orta boy (C/D sınıfı) sedan bir araç için gerekli yol yükünden gelen mutlak güçle birlikte US06 araç hızı izini gösterir. Şekil 3.1 incelendiğinde orta boy bir sedanın US06 modelini tamamen elektrikli moda çalıştırabilmesi için yaklaşık 83 kW güç verebilen bir elektrikli güç aktarma organına ihtiyacı olduğunu anlaşılmaktadır. Pratik bir konu olarak, aracın elektrik bileşenlerindeki elektrik kayıpları, hedef yol yükü gücünü sağlamak için yaklaşık 110 kW'lık bir pil paketi gücünün gerekli olduğu anlamına gelmektedir.

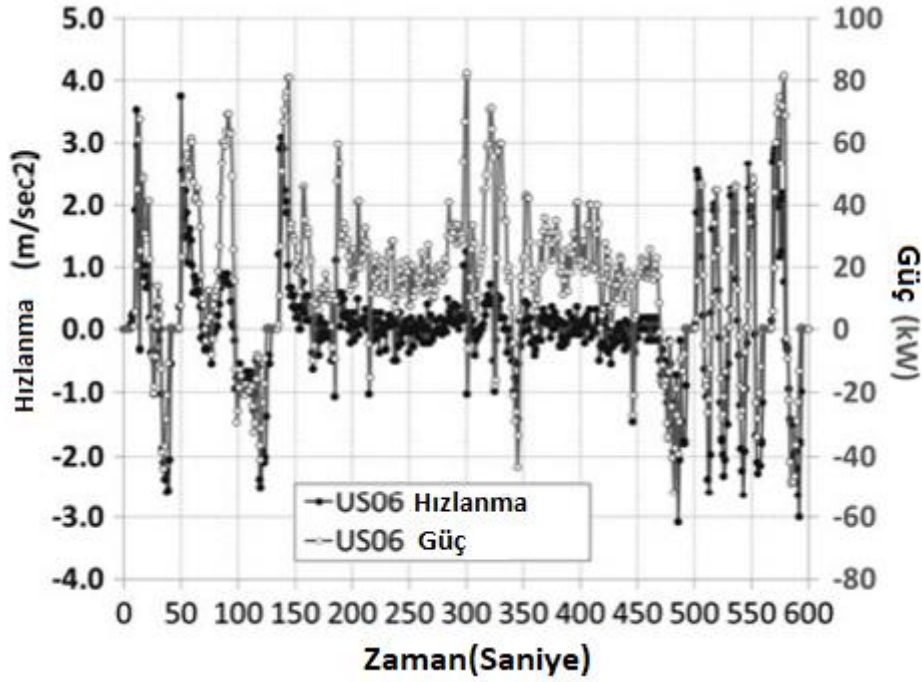
Belirli bir araç tasarımı ve sürüş çevrimi için hız zaman histogramları ve bunun gibi verileri kullanarak, pil gücünün bir fonksiyonu olarak ortaya çıkan yakıt tasarrufunu belirlemek mümkündür. Bu korelasyon bir kez bilindiğinde, otomotiv tasarımcısı, araca ne kadar elektrik pil gücü yerleştirileceğini belirlerken diğer tasarım kısıtlamalarını (maliyet, ağırlık, hacim vb.) dengelemelidir.

Elektrik Menzili: Sürüş çevrimi belirli bir hız değerini sürdürmek için gereken kuvvetle doğrusal orantılı olarak tanımlanabilen enerji tüketimi (Wh/km) için aşağıdaki ifade verilebilir.

$$\text{Tüketim} = \text{Enerji/Mesafe} = (\text{Güç} * \text{Zaman}) / \text{Mesafe} = \text{Güç} / \text{Hız} = (\text{Kuvvet} * \text{Hız}) / \text{Hız} = \text{Kuvvet} \quad (3.1)$$

En yoğun güç döngüsü olan US06'ya tekrar bakılarak tüketimin nicel bir anlayışı elde edilebilir. US06 hız izi, döngü boyunca harcanan kümülatif enerji ile karşılaştırılır. Rejeneratif frenlemenin potansiyel etkisi, araç yavaşlama durumu sırasında ortaya çıkar; bu bir yol yükü grafiği olduğundan, US06 sırasında 2.54 kWh net tüketim (tipik bir orta boy sedan için) alt sınır olarak görülmelidir. Elektrikli bileşenlerin joule ısınması, motor ve invertördeki elektrik kayıpları gibi verimsizlikleri hesaba katmak için pil gücü her zaman gereken yol gücünü aşması beklenmektedir. Sonuç olarak, bu teorik hesaplama gerçek dünyadaki kayıpları ve tüm US06'yı elektrikli modunda çalıştırmak için paket gücünü

boyutlandırmadaki zorlukları (83 ve 52 kW deşarj ve şarj gücü) hesaba katarken yaklaşık 240 Wh/km'lik bir tüketime dönüşecektir.[23]



Şekil 3.1: Hızlanma güç eğrisi [24].

Voltaj/Kapasite: Bir pil takımının toplam enerji ve güç gereksinimlerinin boyutlandırılması, öncelikle araç yol yükü hesaba katılarak hesaplanmalıdır. Bir pil paketi için hücre sayısı ve seri paralel elektrik düzenlemesine karar vermek, esas olarak mevcut hücre teknolojisi ve araç elektrik bileşeni ihtiyaçları göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Bir pil takımının istenen voltaj aralığı, elektrikli bileşenlerin (motorlar, güç elektroniği, kablolama, vb.) boyutu, verimliliği ve maliyetinden büyük ölçüde etkilenir. S/S hibritlerin voltaj gereksinimleri, mevcut araç elektrik bileşenleri, özellikle alternatör [23] tarafından kontrol edilir. HEV'ler 200 ile 300 V arasında değişen paket voltajlarına sahiptir (100-150 V dereceli bazı hafif hibritler hariç), EV'ler 275-375 V'dir ve PHEV'ler ise bu iki bant arasında voltaj değerine sahiptir. Lityum-iyon kimyalarının yüksek hücre voltajları sayesinde, bu S/S ve HEV paket voltajlarını, seri halinde birçok hücreden oluşan tek bir dizi kullanarak elde etmek mümkündür. Bazı üreticiler, akü DC voltajını ve ilgili inverter AC voltajını ayırmak için akü paketlerine DC/DC yükseltici dönüştürücüler eklemiştir.

Bir pil takımına paralel hücre dizileri eklemek, mevcut hücrelerin kapasitesi (Ah) istenen paket enerjisiyi tek bir seri dizinin yetersiz kaldığı durumlarda yapılır. Sonuç olarak,

paralel diziler, daha yüksek enerji ihtiyaçları nedeniyle yalnızca PHEV ve EV paketi tasarımlarında görülür. Tasarlanan paket kapasitesi, enerji penceresi uygulamalarından da etkilenir. Lityum iyon pillerin şarj durumu (SOC) penceresinin farklı bölgelerinde çalışmak, hücrenin güç kapasitesi ve bozulma hızı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak, her elektrikli araç tipi, mevcut enerji, güç ve bozulma oranlarının etkili olduğu bir SOC değerine sahip olacaktır [25].

Her otomobil üreticisi ve hücre üreticisi, sırasıyla paketleri ve hücreleri için farklı SOC değerleri belirleyecektir. Daha önce belirtildiği gibi, bir S/S pilinin voltaj aralığı, gereken alternatör voltajları tarafından detaylı bir şekilde belirlenmelidir. HEV'lerin öncelikle yüksek güç, düşük enerji darbeleri sağlaması beklenmektedir, bu nedenle bozulmayı en aza indirmek ve mevcut gücü şarj ve deşarj direnci arasında dengelemek için yaklaşık %50 SOC'ye sahip şarj sürdürme (CS) özelliğine sahip olması beklenmektedir. Bir PHEV'nin şarj tüketen (CD) değeri, elektrik voltaj aralığını verir. Bununla birlikte, CD bölgesinin alt sınırı, CS işlevini sürdürmek için yeterli deşarj gücünü (>%15) korurken aşırı deşarjdan dolayı bozulmaları (yani %0'a yakın) önlemek için önemlidir.

3.3 Paket Performans Hedefleri

Araç elektrifikasyonu küresel bir kavramdır ve gelişiminin değerlendirilmesi de benzer şekilde geniş bir bakış açısıyla yapılmalıdır. En iyi üç otomotiv üretim bölgesinin (Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa ve Japonya) her biri EV pil hedeflerini yayınlamışlardır. ABD'de, Amerika Birleşik Devletleri Gelişmiş Pil Konsorsiyumu (USABC), ABD Enerji Bakanlığı ile ortaklaşa Fiat Chrysler, Ford ve General Motors'dan oluşmaktadır [26]. Avrupa Otomotiv Araştırma ve Geliştirme Konseyi (EUCAR), Avrupa'daki benzer bir organizasyondur [27]. Japonya'da Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (METI), Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Örgütü (NEDO) adlı yeni enerji teknolojilerinin gelişimini teşvik etmek için bir ajans kurmuştur [28]. Bu ilgili kuruluşların her biri, USABC, EUCAR ve NEDO, sırasıyla 2013, 2009 ve 2008 yıllarında endüstrinin teknoloji gelişimine rehberlik etmek için EV pil hedefleri oluşturmuştur. Çeşitli zaman periyotları için en alakalı hedefler Çizelge 3.2'te gösterilmiştir [29-31]. USABC hedefleri, 2020'de ticarileştirme için sistem (paket) ve hücre düzeyinde performans iyileştirmeleri için hazırlanmıştır. EUCAR ve NEDO hedefleri ise 2030 yılına kadar 5 yıllık süreci kapsamaktadır.

Çizelge 3.2'de farklı kuruluşların farklı zamanlara göre araç ile ilgili belirli parametrelerin karşılaştırılması sunulmuştur. Spesifik enerjinin değerlendirildiğinde

2020'lerin başında rekabetçi bir elektrikli araç için paket düzeyinde en az 200 Wh/kg'lık bir değer gerekli olduğu göstermektedir. Güç için EUCAR ve NEDO hedefleri, USABC değerlerinden belirgin şekilde daha fazladır. Bir pilin enerjisi, malzeme seçimi, bunların voltaj ve kapasitenin elektrokimyasal özellikleri ile belirlenen içsel bir özelliktir. Öte yandan güç, malzeme davranışından etkilenen, ancak aynı zamanda belirli tasarım seçimleriyle büyük ölçüde kontrol edilen bir özelliktir. Uzun menzilli EV'lerin çoğu, araçta önemli miktarda pil paketlerine sahiptir, bu da gereken göreceli özgül gücün oldukça düşük olduğu anlamına gelir. Ömür hedeflerinin değerlendirilmesi, aracın 10-15 yıllık bir kullanım ömrü beklentisiyle uyumlu olduğunu göstermektedir

Çizelge 3.2: Elektrikli araç hedefleri [29-31].

| Organizasyon | USABC(2013) | | EUCAR(2009) | | | NEDO(2008) | | | |
|----------------|-------------|-------|-------------|---------|----------|------------|------|-------|-------|
| | Paket | Hücre | Paket | | | Modül | | | |
| Zamanlama | 2020 | 2010 | 2015 | 2020 | 2008 | 2015 | 2020 | 2030 | |
| Enerji(Wh/kg) | 235 | 350 | 90-100 | 130-150 | 180-200 | 100 | 150 | 250 | 500 |
| Güç(W/kg) | 470 | 700 | 400-750 | 500-950 | 600-1250 | 1000 | 1200 | 1500 | 1000 |
| Ömür (Y) | 15 | 15 | 8-10 | 10 | 15 | 5-8 | 8-10 | 10-15 | 10-15 |
| Maliyet(\$/Wh) | 0.125 | 0.10 | 0.4-0.5 | 0.30 | 0.15 | 1-2 | 0.30 | 0.20 | 0.10 |

USABC ve NEDO'nun yüksek güçlü (HEV) pil hedeflerini karşılaştırmak da mümkündür. Bu hedeflerde, öncelikle kullanılabilir enerji ve güce odaklanan USABC hedefleri modül değerlerinde NEDO nedeniyle açık bir fark görülmektedir. Ek olarak, \$/100 yen senaryosunda, USABC ve NEDO fiyat hedeflerinin yaklaşık 2012'de kesiştiğini görmek önemlidir. EV enerji pili hedeflerinde olduğu gibi, HEV pillerinde de 15 yıllık pil ömrü beklentisine ulaşılması düşünülmektedir.

3.4 Hücre Tasarımı

Otomotiv için lityum iyon hücre tasarımları, otomotiv akü mühendislerin belirli hücre boyutlarını dikkate almak zorundadır. Bir önceki pil boyutlandırma bölümünde bir aracın enerji ve güç ihtiyacının nasıl belirleneceği anlatılmıştır. Bu değerlere ek olarak, geometri, kasa, terminaller, havalandırma delikleri, boyutlar ve standardizasyon gibi ek hücre tasarımı hususları da önemlidir.

Geometri: Silindirik, kese ve prizmatik olmak üzere üç ana geometri seçeneği Şekil 3.2’de gösterilmektedir [32]. Tarihsel olarak silindirik form faktörü, daha önce açıklanan 18650 boyutundaki dizüstü bilgisayar uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Prizmatik hücreler ve poşetler (Pouch cell), azaltılmış kalınlıkları ve daha büyük ambalaj yoğunlukları nedeniyle cep telefonlarında kullanılmıştır. Otomotiv uygulamaları için ticari olarak çok çeşitli hücre form faktörleri kullanılmaktadır. Silindirik hücreler, jöle rulosu olarak bilinen şeyi oluşturmak için ortak bir mandrel üzerine sarılmış iç katot/ayırıcı veya/anot tabakalarına sahiptir. Prizmatik ve kese hücrelerinin iç elektrotları üst üste istiflenir veya daha sonra kasalarına sığması için düz bir şekilde sıkıştırılan bir jellyroll şekline sarılabilir.

Kasa: Lityum iyon bataryaların hücre kasaları için kullanılan yaygın malzemeler paslanmaz çelik ve alüminyumdur. Prizmatik ve silindirik hücreler için, kasa kalınlıkları tipik olarak ağırlık tasarrufu ve şekillendirilebilirlik açısından optimize edilmiştir. Prizmatik ve silindirik kasanın hava almayacak şekilde kapatılmasının ardından, terminalleri, gaz çıkış portunu ve elektrolit doldurma portunu içeren bir kafa tertibatı kasanın geri kalanına lazerle kaynaklanır. Kese hücreleri çeşitli dış (15 µm polyester filmler, poliimidler, vb.) ve iç bariyerler (<100 µm polipropilen (µm=milimetrenin binde birine eşit olan uzaklık birimi)) ve yapışkan tabakalarla kaplanmış ince alüminyum folyodan (<50 µm) oluşturulur. Kurşun-asit veya nikel-metal hidrit kimya hücrelerinde kullanılan plastik kasalar, lityum iyon hücrelerde malzeme dayanıklılık sorunlarına yol açacaktır..

| | Tip A | Tip B | Tip C | Oryantasyon |
|-----|-------------|--------------|-------------|-------------|
| (R) | | | | |
| (P) | | | N/A | |
| (F) | | | N/A | |
| Key | Terminaller | Havalandırma | Elektrotlar | Seperatör |

Şekil 3.2: Hücre kasa geometrileri [32].

Mevcut hücre kasaları, gerekli mekanik dayanımı sağlayacak şekilde tasarlanmamıştır; otomotiv tasarımcıları, hücrelerin araç içerisinde gerekli mekaniksel dayanımı sağlamaları

için paket tasarımına ek olarak batarya paketlerine mekanik bileşenler eklemek zorunda kalmaktadır. Elektrotları ile elektronik temas halinde olan bileşenler var olan potansiyeli etkileyecektir. Pozitif polariteye sahip kılıflar genellikle harici izolasyona (tipik olarak bir shrink çözgü polimer film) ihtiyaç duyarken, nötr olanlar kasayı jellyroll'un elektrokimyasal çiftinden korumak için yalıtım malzemesi ile donatılır.

Terminaler: Lityum iyon hücrelerinde terminal konumlandırmanın üç farklı permütasyonu kullanılmaktadır [32]. En yaygın yaklaşım hem pozitif hem de negatif terminaleri aynı yüzde, Tip A (şekil 3.2.) üzerinde konumlandırmaktır. Bu yaklaşım, bir ortak hücre yüzünün hem terminal ara bağlantılarını hem de dahili jöle rulosuna kaynak noktalarını içermesine izin verir. Her iki terminali bir tarafta bulundurarak, ortaya çıkan paket yapısında elektrik kablolarını basitleştirmek mümkündür. B Tipi terminal düzeni, karşılıklı yüzlerde terminale sahiptir ve bazen HEV'lerde kullanılır. B Tipi yerleşim tipik olarak, artan paketleme ve üretim karmaşıklığı için akım ve ısı dağılımında iyileştirmeler yapar, dolayısıyla yüksek güçlü uygulamalarda kullanılırlar. Tip C tasarımı, kasa yapısını negatif elektrot olarak kullanır ve bu nedenle yalnızca bir özel terminal gerektirir. C tipi düzenler sadece silindirik hücrelerde bulunur ve herhangi bir endüstride çok yaygın değildir.

Havalandırmalar: Lityum iyon hücreler, yeniden kullanılabilir basınç valflerine sahip birçok kurşun-asit ve nikel-hidrit bazlı pillerin aksine, sızdırmaz sistemler olarak tasarlanmıştır. Arızalı bir lityum iyon pil, genellikle malzemelerinin ayrışmasından kaynaklanan gazlar üretecektir. Böyle bir arıza sırasında büyük basınçların oluşmasını önlemek için prizmatik ve silindirik hücrelerde bir kez kullanılan havalandırma delikleri kullanılır. Elektrikli araçlarda yolcu bölmesinin yanına monte edilmiş pil paketlerinden dolayı gaz çıkışı endişeleri, bazı otomobil üreticilerinin her hücrenin havalandırma portu üzerinden gaz yönlendirme kanalları kullandığı görülmektedir. Sızdırmazlıklarının doğası gereği, kese hücrelerinde havalandırmanın yerini tahmin etmek daha zor olabilir. Olası havalandırma olaylarına bir yön sağlamak için hücre üreticileri, tercihi folyo arızası bölgesi oluşturmak için poşet tasarımının zayıf noktalarında havalandırma valflerini yerleştirmektedir.

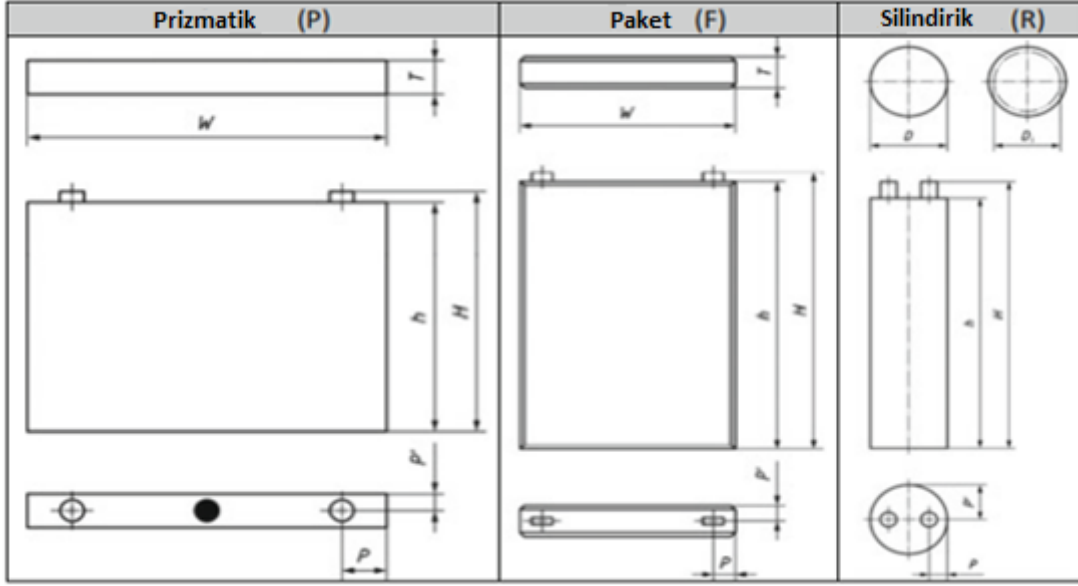
Boyutlandırma: Otomotiv paketleme ve lityum iyon hücre tasarımında her bir parametre farklı öneme sahiptir. Tipik otomotiv aküsü montaj yerleri koltukların, orta kolonların veya bagajların altındadır. Sonuç olarak, yolcu ve depolama alanlarına müdahaleyi önlemek için paket yükseklik yönü azaltılacak en önemli yöndür. Paket genişliği ve uzunluk kısıtlamaları, belirli araç ve paket montajı bağlamında belirlenmelidir.

Elektrotların üretimi sırasında, her uygulama için hedef jellyroll genişliğine kadar kesilen çok geniş bir rulo oluşturulur. Bu işlem sonucunda jellyroll uygulamasının genişliğini değiştirmek ve buna bağlı olarak elektrotları ve ayırıcıları değiştirmek çok maliyetli ve zahmetlidir. Farklı uzunluklarda elektrot/ayırıcı kullanılacağından jellyroll kalınlığını ve yüksekliğini değiştirmek daha kolaydır.

Paket tasarımlarının çoğu, yol yüzeyine normal eksende yönlendirilmiş A Tipi terminallere sahip hücreler içerir. Bu tasarımla, silindirik bir hücrede yükseklik ekseninin azaltılması, elektrot genişliğinin azaltılmasını gerektirecektir. Bu, yüksekliğin azaltılmasının rulo uzunluğundaki basit değişikliklerle gerçekleştirilebildiği prizmatik ve kese tasarımlarıyla çelişir. Hücre ve jellyroll boyutlandırmasının bu incelemesi, hücre üreticilerinin mevcut ve olası gelecekteki hücre boyutlarına hizmet etmek için özel üretim hatlarına yatırım yapmadan önce yapması gereken hususları göstermektedir.

Standardizasyon: Otomobillerin ve diğer yüksek hacimli cihazların seri üretimi, standartlaştırılmış parçalar kullanılarak mümkün olmaktadır. Ölçek ekonomilerinin imalatı ekonomik olarak rekabetçi hale getirebilmesi parça standardizasyonu ile sağlanır. Otomotiv lityum iyon pil hücresi boyutlarını standart hale getirmek için son zamanlarda birçok çalışma yapılmaktadır. Bireysel şirketlerde, aynı hücreler aynı tipteki çeşitli araçlar için kullanılır; ancak, şirketler ve ülkeler arasında iletişim kurma çabaları daha zordur ve dolayısıyla batarya firmalarının standartlarına araç üreticileri ayak uydurma zorunda kalmaktadır.

Yakın geçmişte (2010'dan itibaren), üç farklı ülke otomotiv lityum-iyon hücre boyutları için ulusal standartlar açıklamıştır. Almanya (DIN 91252) ve Çin (QC/T 840) tarafından sırasıyla 10 ve 8 boyutu tanımlayan ulusal standartlar yayınlanmıştır. USABC, üyeleri arasında tercih edilen 6 boydan oluşan bir liste belirlemiştir. Bu bağlamda, ISO uluslararası bir standart yayınlamaya çalıştığında boyut listesinin 63'e çıkması şartı olmuştur. ISO 16898 (Şekil 3.3), hücre uygulamasını, şeklini, terminal tipini ve boyutlarını tanımlayan lityum iyon hücreler için özel bir adlandırma standardı belirlemiştir. Bu adlandırma şeması, adı aşağıdaki gibi oluşturmak için Şekil 3.3'deki boyut atamalarını ve etiketleri kullanır: A1A2A3A4N1/N2 N3. ISO 16898 sözleşmesinin bir örneği olarak, aynı yüzdeki terminallere ve 26,5 mm kalınlığa, 148 mm genişliğe ve 91 yüksekliğe sahip, tahrik amaçlı (V) prizmatik (P) bir lityum iyon (I) hücre mm, VIPA27/ 148/91 hücresi olarak adlandırılır.



Şekil 3.3: ISO 16898 hücre ölçüleri [32].

3.5 Güvenlik

Uygun ürün güvenliği seviyelerini sağlamak, bir otomotiv sistemi, pil veya tasarımlar için ön koşuldur. Mekanik, termal ve elektrikli pil testlerini tanımlayan çeşitli yasal düzenlemeler ve endüstri standartları mevcuttur. Bir pilin (hücre, modül veya paket) bu testlerdeki performansı, EUCAR tarafından geliştirilen derecelendirme sistemlerine göre karakterize edilebilir.

Mekanik: Mekanik test alanında, tüm standart ve yönetmeliklerin üzerinde anlaşmaya vardığı tek bir test türü yoktur. Tüm standartlar arasında ortak bir test, bir çarpma darbesine benzer şekilde tasarlanmış, dayanıklılık için daha agresif bir titreşim testi çeşidi olan mekanik şok testidir. İncelenen 9 referanstan 7'si arasında bulunan bir diğer popüler test türü de düşürme testidir. Bu testin yükseklik parametresi, SAE J2929'un araç bakım koşullarına benzeyen 1 m'lik düşüşten, yakıt hücreli araçlar için hidrojen depolama tanklarını test etmek için tasarlanmış benzer bir prosedürden sonra modellenen SAE J2464'ün 10 m yüksekliğine kadar geniş bir aralıkta değişmektedir.

3.6 Elektrikli Araçlar İçin Pil Paketlerinin Mekanik Tasarımı ve Paketlenmesi

Paris anlaşması, sera gazı emisyonlarını sınırlamak ve kademeli olarak karbonsuz bir toplum inşa etmek gibi ortak bir hedefi paylaşan dünyanın 195 ülkesini bu konuda birleştirmiştir. Bu nedenle, bu bölgelerde üretilen toplam enerji içinde yenilenebilir enerjinin payını artırmaya yönelik önemli çabalar yoğunlaşmaktadır. Ancak kesinti sorunu tüm yenilenebilir enerji kaynaklarını etkilemektedir [33]. Bir enerji tamponu eklemek ve elektrik

şebekelerinin esnekliğini artırmak için pil paketlerinin kullanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilişkili kesinti sorunu için hem güvenilir hem de sürdürülebilir bir çözüm olarak kabul edilir [34-36]. Ayrıca, pille çalışan araçlar, ulaşım sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Ulaştırma sektörünün elektrifikasyonu bu nedenle tüm ulusların uzun vadeli iklim kontrol politikalarının ayrılmaz bir parçasıdır.

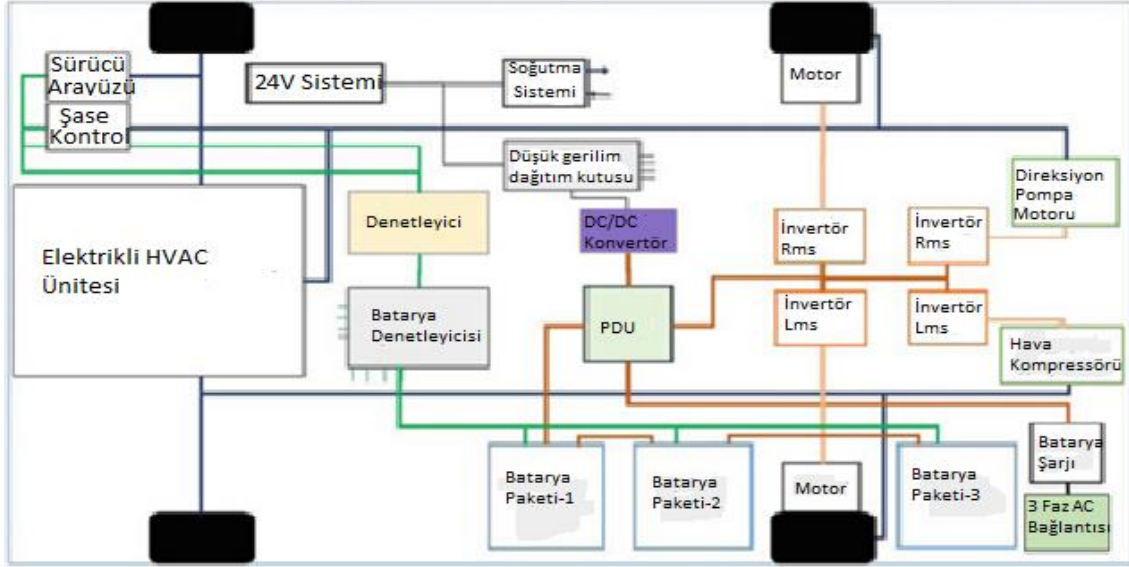
Piyasada bulunan pil kimyaları arasında, Li-ion piller, tümü verimli bir enerji depolama sistemi kurmak için gerekli olan yüksek verimlilik, yüksek gravimetrik ve hacimsel yoğunluklar, daha uzun ömür ve düşük bakım gereksinimleri gibi özellikler sunmaktadır [37-39]. Şu anda, bir EV pil takımı üretmenin maliyeti kWh başına yaklaşık 500 dolardır. Bununla birlikte, Li-ion piller için elektrot malzemelerinin mikro yapısını değiştirme çabalarıyla, maliyetin 2020 yılına kadar kWh başına 200 dolara ve 2025 yılına kadar 160 dolara düşmesi beklenmektedir [38-44,45]. Son olarak, demir, nikel, manganez, kobalt gibi toksik olmayan metaller içeren Li-iyon piller, ABD hükümeti tarafından “tehlikeli olmayan atık ve normal belediye atık akışına atılması güvenli” olarak sınıflandırılmıştır [46]. Bu nedenlerle, günümüzde yüksek enerji veya yüksek güç uygulamalarının çoğunluğu için tercih edilmektedir.

Li-iyon piller uzun süredir küçük taşınabilir elektronik cihazlar için tek hücre formatında kullanılmaktadır. Bu tür pillerin oldukça sınırlı enerji içeriği nedeniyle, kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve nispeten iyi anlaşılmış olan tek bir hücrenin düşük performansı batarya paketindeki diğer hücrelerin performansı üzerinde çok az etkisi olacağına inanılmaktadır [47-51]. Bununla birlikte, bu hücreler artık elektrik şebekeleri ve araç elektrifikasyon programları için enerji depolama sisteminde uygulanabilir bulmak üzere ölçeklendirilip yapılandırıldığından, çevresindeki hücreleri etkileyen ve tüm pil paketine zarar veren tek hücreli arızalar düzenli olarak bildirilmektedir. Kötüye kullanım koşulları altında büyük pil paketlerinin davranışını anlamamızda bir boşluk vardır [274,275]. Bu nedenle, hedeflenen uygulama için bir Li-ion pil tabanlı enerji depolama sistemi tasarlamak için dikkatli bir değerlendirme yapılmalıdır.

3.7 Tasarım Hususları

Bir elektrikli veri yolunun basitleştirilmiş bir temsili Şekil 3.4'de sunulmaktadır. Elektrik motorları, elektrikli HVAC ünitesi, elektrikli hava kompresörü gibi çeşitli

elektromekanik sistemleri ve enerji talep eden veya sistem için yük görevi gören çeşitli kontrol türlerini blok formatında göstermektedir.



Şekil 3.4: Elektrikli bir aracın basitleştirilmiş gösterimi. HVAC ısıtma, havalandırma, klima; PDU güç dağıtım ünitesi, L/RHS sol/sağ taraf [24].

Bu arabirimlerin her biri aracılığıyla pil takımının güvenilirliğini anlaşılabilir ve güvenliğini etkileyen etkenler kontrol edilebilir. Örneğin, güvenli çalışma için ortam sıcaklığının 50 °C'nin altında tutulması önerilmiştir. Araç süspansiyon sisteminin tipik doğal frekanslarında rezonansı önlemek için pil takımının titreşim frekansları da bastırılmalıdır ve bu arayüzlerin her biri aracılığıyla iletişim, pil takımının güvenilirliğini ve hücre güvenliğini etkileyebilir [56,56]. Araç süspansiyon sisteminin tipik doğal frekanslarında ve 0 ila 7 Hz arasında yaylı kütlede, araç güç aktarma sisteminde, yani güç aktarma organında ve dişli kutusunda 7 ila 20 Hz arasında rezonansı önlemek için akü grubunun titreşim frekansları da bastırılmalıdır [57]. Tasarlanan sınırdan marjinal sapmalar, pil takımının çevrim ömrünü tehlikeye atabilir. Ayrıca, duman veya zehirli gaz salınımına ve erken arıza, yangın ve patlamalara yol açan yüksek basınç olaylarının gelişmesine neden olan kontrolsüz bir ekzotermik reaksiyonlar zincirini harekete geçirebilir. Bu marjinal sapmalar, pil paketlerinin aşırı ısınmasından veya pil paketlerinin delinmesi veya ezilmesi de dahil olmak üzere fiziksel olarak kötüye kullanılmasından kaynaklanabilir [58].

Güvenilir bir pil ambalaj tasarımı, mikro ve makro düzeyde termal kararlılık, titreşim yalıtımı ve darbe direnci ile ilgili sorunları ele almalıdır. Ayrıca, pil paketinin farklı birimleri arasındaki her düzeyde, yani hücre ve modül düzeyinde termal ve mekanik etkileşimleri en aza indirmeli, böylece pil paketinin kendisinin arızalanma olasılığını azaltmalıdır. Mevcut kaynaklar üzerinde fazla etki olmaksızın gerekli koruma seviyesini elde etmek için kolayca optimize edilebilen tasarım öğelerine kontrol faktörleri denir [54]. Bir EV pil takımının en kritik kontrol faktörlerinden bazıları şunlardır: pil hücreleri ve hücre ara parçası tipi, gaz egzoz memelerinin sayısı ve konumu, pil soğutma sistemi ve yalıtım kaplama kalınlığıdır. Kontrol faktörlerinin tanımlanması için temel bir kural şudur: sistem sınırlarının dışında kalan herhangi bir faktör, bir kontrol faktörü olarak kabul edilmez.

Daha önce de belirtildiği gibi, pil hücresi tipi, pil paketlerinin tasarımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, 18650 tip hücreli bir pil takımının paketleme yoğunluğunun, büyük prizmatik hücrelerden oluşan bir pakete göre 114 kat daha fazla olduğu bulunmuştur. Ayrıca, bir kese hücresinin paketleme yoğunluğu, esas olarak daha küçük kalınlığı ve geniş yüzey alanı nedeniyle, benzer nominal kapasiteye sahip bir prizmatik hücreninkinden yaklaşık iki kat daha azdır. Bu nedenle, büyük prizmatik veya kese hücreleri kullanmaktan daha büyük miktarlarda daha küçük silindirik hücreleri mevcut alana paketleyerek pil takımının hacimsel verimliliğini artırmak nispeten daha kolaydır [59].

Ambalaj tasarımının kompaktlığı, pil takımının termal performansı üzerinde de kayda değer bir etkiye sahiptir. Araştırmalar, bir pil paketi için hücreden hücreye aralığın 1'den 10 mm'ye çıkarılmasının, üç fiziksel formatın tümü için sabit hal hücre çekirdek sıcaklığında yaklaşık 1°C'lik bir kayba yol açabileceğini göstermektedir [60]. NASA-Battery Safety Requirements Document'a (JSC 20.793 Rev C) göre, 80 Wh/kg'dan yüksek gravimetrik enerji yoğunluğuna sahip pil hücreleri kullanan paket tasarımları için hücre aralığı daha kritiktir [61]. Ayrıca, tek hücre arızası veya termal kaçak olayı durumunda hücreden hücreye ısı yayılımını hafifletmek için silindirik hücre formatları için minimum 2 mm'lik bir aralığın gerekli olduğu tespit edilmiştir [62]. Ek olarak, yan havalandırılmalı hücre formatlarını kullanan pil paketlerinde aynı nedenlerle komşu hücreler arasında fiziksel bir bariyer gereklidir. Diğer önemli tasarım gereksinimleri çeşitli uluslararası standartlarda belirtilmiştir.

3.7.1 Termal kaçak koruma

Fiziksel problem ve dahili kısa devre gibi üretim hataları gibi olaylar, bir pil hücrelerini termal kaçak durumuna itebilir. Termal kaçak, bir pil hücrelerinin kendi kendine ısınma hızının 0,2 °C/dk'dan fazla olduğu ekzotermik zincirleme reaksiyon olarak kategorize edilir [63]. Bataryanın büyük miktarlarda yanıcı gaz çıkarmasına, atık maddelerin püskürmesine ve hatta kendiliğinden yanmasına neden olabilir [64].

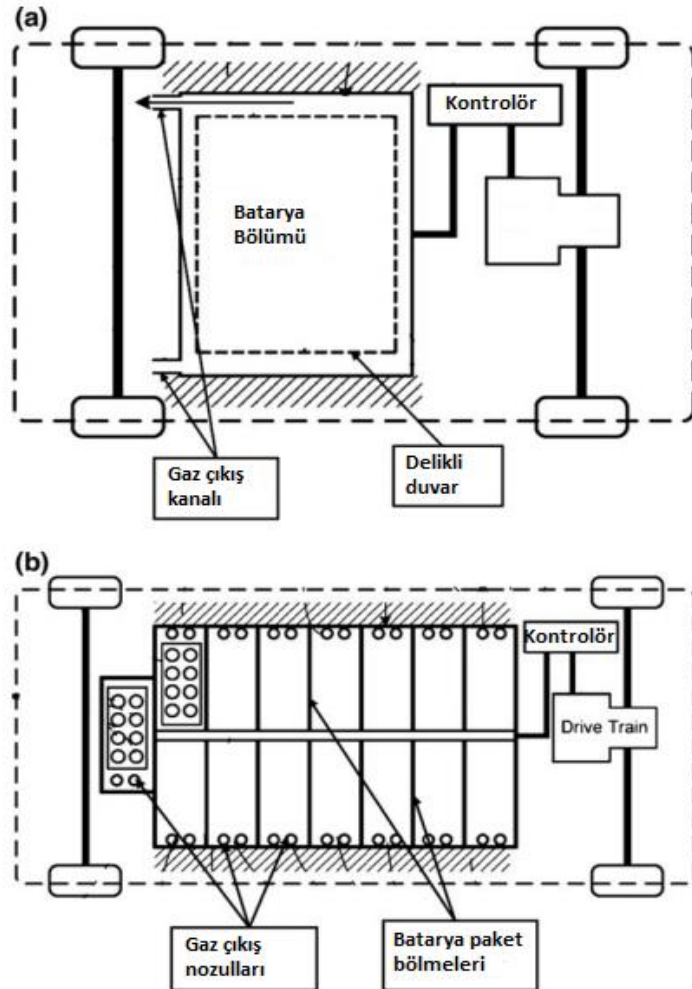
Hasarlı hücreden yayılan yüksek sıcaklıktaki gazlar ve atıklar, hücrenin yakınında bulunan parçalar için ve ayrıca araç yolcuları ve ilk müdahale ekipleri için güvenlik riski oluşturur. Yanıcı gazlar nedeniyle paket mahfazasının içinde oluşan yüksek basınç, gazlar batarya paketinden kolayca uzaklaşmıyorsa, pil paketinin patlayıcı şekilde bozulmasına da neden olabilir. Bu nedenle, bilinmeyen bir arıza noktasından EV'ye ve yolcularına yönelik güvenlik risklerini en aza indirmek için önceden belirlenmiş bir basınçta harekete geçmek üzere tasarlanmış en az bir basınç tahliye vanasının dahil edilmesi tavsiye edilir. Sıcak dumanların ve gazların ambalajdan salınma yönünün stratejik olarak kontrol edilmesiyle, araçtaki yolculara ve ilk müdahale ekiplerine yönelik mülkiyet ve güvenlik riskleri en aza indirilebilir. Hasar, pil takımının farklı ögeleri arasındaki termal etkileşimleri kısıtlayarak da kontrol edilebilir. Sıcak gazların çıkış noktası, bir pil termal kaçak olayı sırasında açılmak üzere tasarlanmış, bir veya daha fazla gaz egzoz nozülü dahil edilerek kontrol edilirken, termal kaçakların pil paketinin daha geniş alanına yayılması, ambalajın içine uygun termal bariyerler yerleştirilerek önenebilir.

3.7.2 Gaz çıkış noktası

Bir pil hücrelerinin, sıcak gazlar ve atıklar yayması için mutlaka bir termal kaçak durumunda olması gerekmez. Egzoz gazı nozulu, sıcak malzemeyi akü paketinden çıkan sıcak gazlardan kimsenin etkilenmeyeceği bir yöne yönlendirerek araç hasarını ve güvenlik risklerini en aza indirebilir. EV'nin normal çalışması sırasında, bir conta, nozul tertibatını kapalı tutar ve yol kalıntılarının ve nemin pil takımına girmesini kısıtlar. 0,5–1,0 psi aralığında, yani bir termal kaçak olayı sırasında karşılaşılan basınçtan çok daha düşük, çatlama basıncına sahip bir basınç dengeleme valfi, termal olmayan olaylardan kaynaklanan basınç farklarını idare etmek için egzoz memesine entegre edilmiştir (örneğin yükseklik değişimleri). Termal olayı yaşayan hücreden egzoz nozülüne sıcak gaz ve malzeme akışını yönlendirmek için pil paketi konfigürasyonuna içi boş yapısal elemanlar dahildir.

Normal çalışma sırasında gaz çıkış ağzını kapalı tutan meme contası bir somun ile yerinde tutulur. Termal kaçak sırasında, pil paketi muhafazası içindeki hem basınç hem de sıcaklık artar. Sonunda, somun erir veya paket muhafazası içindeki basınç meme contasını zorlayarak deforme eder. Ancak meme ve montaj düzeneği çelik veya seramik gibi yüksek sıcaklıktaki malzemelerden üretildiğinden, artan sıcaklıktan etkilenmez ve sıcak gazları herhangi bir kişisel kayıp veya maddi hasarı en aza indirecek şekilde yönlendirmeye devam eder.

Delikli pil bölmeleri kullanılarak termal tasarımın verimliliği daha da artırılabilir. Pil hücreleri tarafından üretilen atıklar, bu deliklerden pil takımı içinde oluşturulan içi boş kılavuzlara girer. Kılavuzlar, atık suları, onu pil takımından çıkaran bir gaz egzoz memesine yönlendirir [65].



Şekil 3.5:a- İçi boş kılavuzları veya egzoz gazı kanalları olan akü paketi sistemi ve b-Paketin çalışması ve termal kaçak olayları sırasında üretilen sıcak gazları ve atık suları boşaltmak için her akü bölmesine takılan çoklu egzoz nozulu tertibatları[24].

3.7.3 Termal bariyer

Termal kaçak ile ilişkili artan sıcaklıklar, termal kaçak bulunan pil bölgesinin yakın çevresindeki montaj braketlerinin erimesine veya buharlaşmasına neden olabilir. Sonuç olarak, pil artık orijinal konumunda sabit bir şekilde tutulamayabilir. Etkilenen pil hücresi/modülü hareket ettikçe, pil bileşenleri arasındaki boşluk azalabilir ve bu da termal kaçağın büyümesine neden olur. Pil hücresi/modülü hareketi, pil takımı soğutma sistemini de tehlikeye atabilir, böylece termal kaçak yayılma hızını daha da artırır. Son olarak, etkilenen hücre/modül yeterince hareket ederse, bitişik bir hücre/modül üzerinde durabileceği belirtilmelidir. Eğer öyleyse, iki bölge arasındaki ısı transferi süreci radyasyon ve konveksiyondan radyasyon, konveksiyon ve termal olarak daha verimli iletim prosesinin bir kombinasyonuna dönüşecektir. Ayrıca, istiflenmiş tipte bir pil konfigürasyonunun kullanıldığı, yani başka bir katman üzerinde dikey olarak düzenlenmiş bir pil hücresi katmanının kullanıldığı uygulamalarda, yerçekimi kuvvetleri, braket(ler) erimeye ve buharlaşmaya başladığında üst katmanın hareketini hızlandırabilir. Bu nedenle, termal kaçak yayılma riskini en aza indirmek için termal kaçak geçiren pil hücresinin veya modülün hareketini kısıtlamak önemlidir.

İlk olarak, pil takımını birden çok bölmeye bölmek için çapraz elemanlar kullanılabilir. ABD Patenti No. 8663824 tarafından sunulan ambalaj tasarımı ayrıca, güç ve veri hatlarını bağlamak için bir kanal sağlamanın yanı sıra sağ ve sol bölmeleri daha da ayırmak için bir merkezi pil paketi üyesinin nasıl kullanılabileceğini göstermiştir. Tasarımda, pil modülünün modül montaj flanşı, ambalaj çerçevesinin üst ve alt traversleri tarafından yakalanır. Düzenleme, pil modüllerinin bölmedeki yerlerinde kolayca konumlandırılmasını ve tutulmasını sağlar. Ayrıca, ambalajın üst ve alt yüzeyleri ile pil modülleri arasında bir hava boşluğu oluşturur [65]. Hava boşluğu, komşu akü modülleri arasında iletken ısı transferinin meydana gelme olasılığını azaltmaktadır.

İkinci olarak, pil hücreleri, pil modülünün komşu hücreleri arasında sürtünmeyle oturan veya bağlanan sert ara parçalar kullanılarak önceden belirlenmiş konumlarında tutulabilir. Genel olarak, hücre montaj braketi içinde entegrasyon için seçilen ara parçası tertibatı, pil paketinde kullanılan hücrelerin tipine ve şekline bağlıdır. Hücre ara parçalarının birincil işlevi, termal kaçak sırasında hücreleri yerinde sabit tutmak, kütlede tasarruf etmek ve pil takımı için daha yüksek bir spesifik enerji derecesi elde etmek olduğundan, üst ara parçalı ve alt ara parçalı daha küçük ara parça tercih edilir [66]. Hücrelerin üst veya alt kısmına veya merkezine yakın bir yerde olduğu gibi sadece bir ara parça kullanılabilsede

yine de bir miktar harekete izin verdiği için tek bir ara parçanın kullanılması tercih edilmez. Kullanılan ara parçaların yüksekliği genellikle toplam pil yüksekliğinin %1-5'i aralığındadır. Hücre ayırıcılar, prizmatik hücreler ve kese hücreleri durumunda ikili bir rol oynar. Birincil işlevlerinin yani hücre tutma işlevini sağlamalarının yanı sıra, iç yay kuvvetlerine karşı koymak ve bunun sonucunda hücre sargılarının genişlemesini önlemek için gerekli basıncı sağlarlar. Pil hücresi ara parçaları, hücre yüzey alanının çoğunu kaplamadan, soğutmanın etkisiz hale geldiği hücre yanlarında yeterli bağlanma oluşturur.

3.7.4 Yapısal kararlılık

Batarya iç yapısında var olan bileşenlerin düzgün bir teması sağlaması için gerekli olan yeterli sıkıştırma kuvvetinin yokluğunda, kese hücrelerinde ve prizmatik hücrelerde elektrot katmanlarının birbirinden ayrılır, bu da performanslarını ve güvenilirliklerini etkiler. Çizelge 3.3'de farklı hücre tipleri için yapısal özelliklerin değişimi verilmiştir. Elektrot katmanlarının ayrılması, pil hücresinin her iki tarafında istiflenmiş sert plakalar veya dişli çubuklardan yapılmış kelepçeler gibi yapıların kullanılmasıyla önlenabilir. İstifleme plakası yöntemi, pil paketlerinin montajı sırasında önemli avantajlar sağlamasına rağmen, seri üretim bazında daha yüksek maliyete neden olmaktadır. Ayrıca tutma kısıkaçları, kese hücrelerini montaj işleminde yanlış kullanıma ve dengesiz kenetleme kuvveti nedeniyle lokalize stres gelişimine karşı daha savunmasız hale getirebilir [59].

Prizmatik ve silindirik pil hücreleri için kullanılan metalik veya sert plastik mahfazalarla oluşturulan katı yapı, çivi gibi yabancı cisimlerin elektrokimyasal sisteme girmesini önler. Metalik mahfazalar, gaz üretimi ve havalandırma nedeniyle pil hücresinin içinde oluşan basınçlara karşı daha yüksek derecede tolerans sağlar; bu, yumuşak ambalajlarından dolayı kese hücrelerinde bulunmayan bir güvenlik özelliğidir.

Prizmatik hücrelerle ilgili temel yapısal sorun, eliptik sargılar nedeniyle köşelerinin boş bırakılabildesidir. Elektrotlarda eşit olmayan basınç dağılımına neden olur, ancak boş köşeleri katı malzeme ile doldurarak sorun hafifletilebilir.

Çizelge 3.3: Farklı tipteki pil hücrelerinin yapısal özelliklerinin karşılaştırılması [67].

| Kriterler | Küçük silindirik | Büyük silindirik | Prizmatik | Paket |
|----------------------------------|------------------------------------|--|--|---|
| Kasa Bağlantıları | Metal Kaynaklı nikel veya plakalar | Metal Cıvata için dişli saplama veya cıvata için dişli delik | Sert plastik ya da metal Cıvata için dişli delik | Yumuşak alüminyum paket Kenetlenmiş,kaynaklı veya lehimlenmiş tırnaklar |
| Genişleme karşı direnç | Silindirik şeklin doğasında var | Silindirik şeklin doğasında var | Pilin uçlarında tutma plakaları gerektirir | Pilin uçlarında tutma plakaları gerektirir |
| Üretim çalışmaları için uygunluk | İyi | İyi | Mükemmel | Mükemmel |
| Alan değiştirme | Mümkün değil | Mümkün değil | Mümkün | Mümkün |
| Delaminasyon | Mümkün değil | Mümkün değil | Mümkün | Mümkün |
| Basınç dayanıklılığı | Mükemmel | Mükemmel | Zayıf | Çok Zayıf |
| Lokal Stres | Yok | Yok | Yok | Yok |
| Güvenlik | PTC ile birlikte iyi | PTC ile birlikte iyi | PTC ile birlikte iyi | Zayıf |
| Isıyla daralma | Evet | Evet | Materyale bağlı | Yok |

3.7.5 Çarpışma koruması

Çarpışma koşulları sırasında pil takımının yapısal bütünlüğünü korumak, EV tasarımcıları için başka bir zorluktur. Bu amaçla, iki paketleme mimarisi – “T-şekilli” mimari ve “zemin” konfigürasyonu EV pil paketleri için çok önemlidir.

Şekil 3.6a'da gösterilen "T-şekilli" mimari, GM Chevrolet Volt'ta kullanılmaktadır. Akü modüllerinin aracın birincil güvenli bölgesi içinde, yani arka yolcu koltuklarının altındaki ve iki koltuk sırası arasındaki tünel boyunca uzanan alan içinde düzenlenmesini

sağlar. İç kabin alanı ve bazen de yolcu konforu pahasına araç yapısının bir çarpma bariyeri olarak kullanılmasıyla pil takımının doğrudan önden ve yandan çarpma yüklerinden korunmasını sağlar.

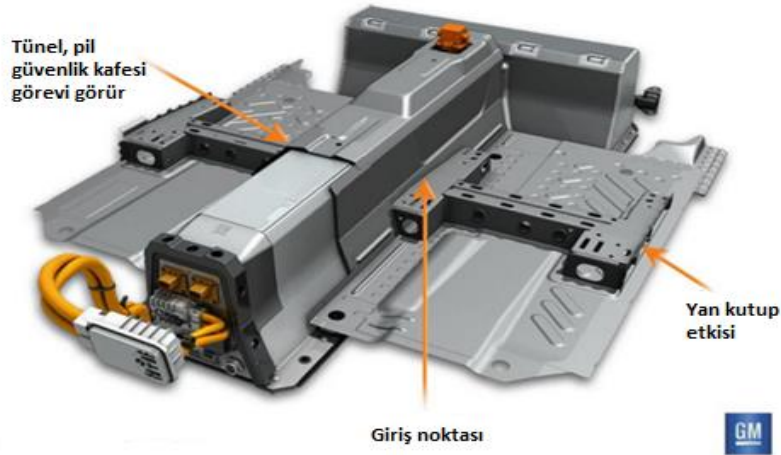
Buna karşılık, Şekil 3.6b'de gösterilen Tesla Model S ve Audi e-tron Sportback konseptinde kullanılan “zemin” konfigürasyonu, pil hücrelerinin araç tabanının altında bir levha formatında düzenlenmesini içerir. Araçta bulunanların kendileri tarafından veya bagajlarını saklamak için kullanılacak mevcut kabin alanını en üst düzeye çıkarır. Ek olarak, bu konfigürasyon, çeşitli sürüş manevraları sırasında ağırlık merkezini düşürerek aracın dengesini artırır. Bununla birlikte, aracın yerden yüksekliğini de azaltır, böylece pil takımını zeminden veya alttan çarpma tehlikeleri ile karşılaşılabılır..

Akü hücreleri, geleneksel olarak, modül ve akü paketi muhafazaları ve enine traversler, kapılar ve zemin dahil olmak üzere araç gövde yapısı ile bağlantılı metal veya plastik kabuk muhafazaları aracılığıyla alt darbeye karşı korunur. Ayrıca, döşeme paneli çakıllı bir yolda sadece küçük taşlardan gelen darbelere dayanabileceğinden, 1-6 mm kalınlığında metal levhadan yapılmış, monolitik veya sandviç yapılı veya hatta bunların kombinasyonu olan zırh, alttan çarpmaya karşı koruma olarak kullanılır. Pas koruması için üzerine polimerik kaplama uygulanır.

Araştırmalar, koruyucu zırh plakasına verilen hasarın ciddiyetinin, çarpma gövdesinin uç yarıçapından, girinti noktasının pil modülünün en yakın sınırına olan mesafesinden ve güç yasası sertleşme eğrisinin üstünden etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca, zırhın kırılmasından hemen sonra pil paketinin diğer daha ince koruyucu parçalarının kırıldığı ve böylece pil hücrelerini yol durumundan meydana gelecek olumsuzluklardan ve diğer keskin nesnelere zarar görmesine neden olduğu bildirilmiştir [70].

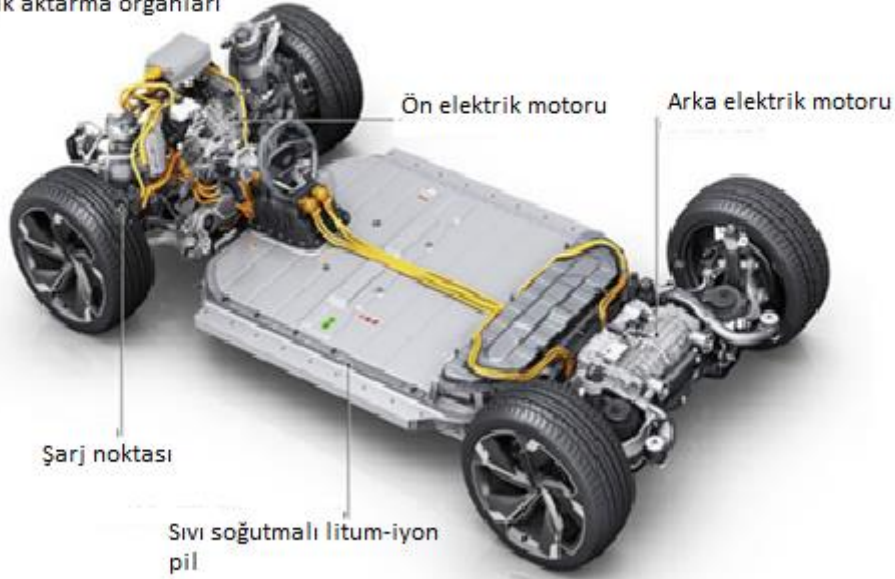
Bu hasarı en aza indirmek için, pil hücrelerinin katlanabilir metal borularla birlikte iki modlu bir paketleme düzeninde çok işlevli bir tanecikli pil takımı (GBA) paketi önerilmiştir. GBA, aynı anda bir enerji depolama sistemi ve stres kontrolü artı enerji dağıtım birimi olarak işlev görebilir. Simülasyon çalışmaları, çarpışma koşulları sırasında pil takımı arızası olasılığını azaltmada eşdeğer yoğunluğa sahip bir metal köpük yapısından 2,6 kat daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, geleneksel bir pil takımı yerine GBA kullanmanın dezavantajları, aracın hacimsel kapasitesinde %35'lik bir azalmaya neden olur.

(a)  **VOLT YAPI GELİŞTİRMELERİ**



(b)  **Audi e-tron Sportback concept**

Elektrik aktarma organları



Şekil 3.6: Pil paketleme tasarımı: a-GM Chevrolet Volt'ta kullanılan T şeklinde bir tasarımı ve b-Audi e-tron Sportback konseptinde kullanılan tasarımı [68,69].

Daha da önemlisi, bir GBA'nın metal boruları, yalnızca EV sürüş menzilini değil aynı zamanda yuvarlanma direncini de etkileyebilecek brüt araç ağırlığını yaklaşık %3 artırır [71]. Ek olarak, pil paketi tasarımına bir çift katlanabilir yan eşik tertibatı ve çoklu çapraz bileşenler dahil edilerek pil gruplarının yan darbe direnci artırılabilir. Genel olarak, içi boş

yapıların yüksek mukavemet/ağırlık oranlarından faydalanmak için içi boş traversler kullanılmalıdır. Alt Şasi, diğer adıyla travers, aracın ön tarafında bulunan neredeyse bütün parçalarını taşıyan ve ana şasiye bağlayan parçadır. Travers ana şaseyle aynı malzemedен imal edilir. Bununla birlikte, travers için kullanılan hem malzeme hem de konfigürasyon, akü paketindeki konumuna göre değişebilir. Örneğin, pil takımının ortasında bulunan traversler, koltuk montajı için kullanılan alanlarda ek güç sağlamak için diğer traverslerden daha kalındır [72].

Bununla birlikte, hava soğutmalı akülü EV'lerde, hava kanallarının geniş kesit alanı nedeniyle, akü tertibatı için traversler sağlamak için minimum paketleme alanı mevcuttur. ABD Patenti 8276696, hava soğutmalı bir pil için giriş/çıkış kanallarının değiştirildiği ve pil paketinin darbe direncini artırmak için kullanılan yapısal elemanlardır. Tasarım gereği, cebri hava sistemi, aküye hava sağlamak için bir giriş kanalı ve aküden çıkan egzoz havasını yönlendirmek için bir çıkış kanalı ve bir fan içerir. Bu kanallardan en az biri, destek sağlamak ve pil takımını korumak için yapısal bir eleman olarak konumlandırılır. Aracın karşılıklı yanları arasında uzanan kanal düzeni, her iki taraftaki şok kulesine takılır, akü grubuna destek ve koruma sağlar. Geleneksel olarak plastikten yapılan kanallar, EV uygulamalarında çelik, alüminyum, karbon fiber veya herhangi bir uygun malzemedен yapılabilir. Daha az parça kullanılması nedeniyle, daha verimli ve kompakt bir paketleme çözümü de sağlar [73]. Başka bir deyişle, bu tasarımla enerji yoğunluğu (Wh/L) açısından faydalı olabilir, ancak özgül güç (W/kg) ve sistemin maliyeti açısından taviz verilmesi gerekir.

3.7.6 Titreşim izolasyonu

Bir EV için dikey düşük frekanslı titreşimler, araç otoyolda sürülürken sürekli olarak araçta hissedilir. Ayrıca çukurlar, hemzemin geçitler veya köprü ayakları gibi düz olmayan yüzeylerde seyahat etmek, dikey titreşimlere neden olan şoklar üretir. Sonuç olarak, bir akü paketindeki terminal konektörleri ve baralar gibi elektrik alt sistemlerinde dinamik mekanik yükler eklenir ve bu da elektriksel sürekliliğin kaybolmasına ve kasanın yorulmasına neden olabilir [74].

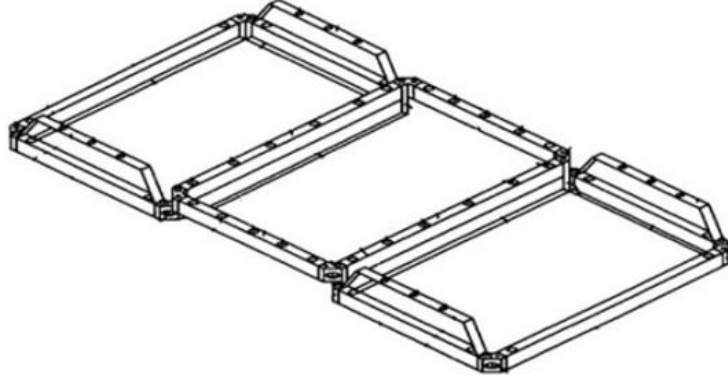
Bunu önlemek için, genellikle akü gruplarının üst yüzeyine gerdirme civataları ve tutucu çerçeve aracılığıyla bir sıkıştırma kuvveti uygulanır. ABD Patenti 7507499, batarya paketi düzenlemesi kullanarak EV'lerde bir pil paketini stabilize etmek için böyle bir tasarımı uygular. Tasarım, dikdörtgen bir çerçeve yapısı oluşturmak için dört konektör aracılığıyla birbirine dik açıyla bağlanan dört kirişten oluşur. Her ışıın, pil takımının dört tarafından birine

geçer. Çerçeve ve akü grubu arasındaki pozitif bağlantı, gerdirme cıvataları ile sağlanır. Düzenleme, titreşimi emmek ve modüllerin Z eksenini boyunca birbirine göre hareketini önlemek için düz ve L şeklinde olmak üzere iki tip sönümleme pedi kullanılır. L şeklindeki sönümleme pedleri, köşe konektörlerinin her birine bitişik olarak yerleştirilmiştir. Köşelerde nispeten küçük basınç alanları sağlamak için çerçeve yapısına dayanırlar ve pil takımının ayrı pil modüllerini yanal olarak birbirine doğru iterler; diğer yandan, yassı sönümleme pedleri, bitişik pil modüllerinin birbirine bakan taraflarının alt ve üst köşelerinde konumlandırılmıştır. Araç yapısının bir kısmına cıvatalanabilen bir alüminyum çerçeve, pil takımına destek sağlar.

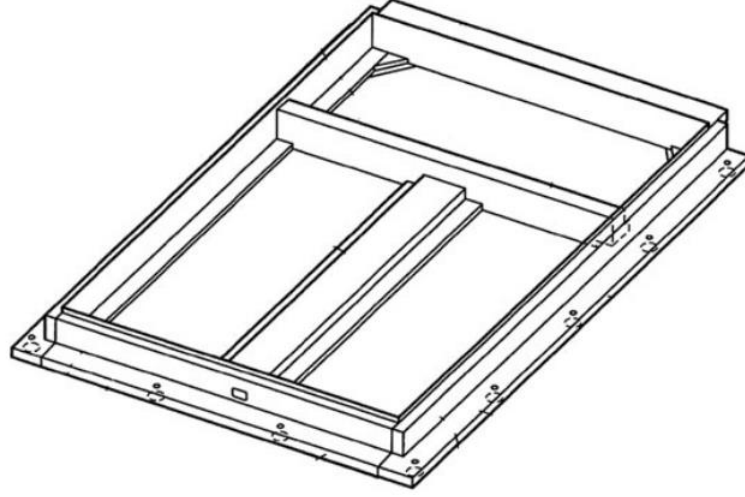
Çerçeve monte edildikten sonra germe cıvataları sıkılır, böylece kırılganlar, pil takımının pil modüllerini birbirine doğru çevresel olarak sıkıştırmak için uzunlamasına ve yanal yönlerde köşe yastıklarına karşı çekilir. Cıvataların sabitlenmesi aynı zamanda ayrı akü modülleri arasına yerleştirilen sönümleme pedlerini sıkıştırarak onları birbirine göre sabit hale getirir. Şekil 3.7, tasarımın perspektif bir görünümünü sunmaktadır [75].

Araçın ağırlık dağılımı aynı zamanda titreşim izolasyonunun derecesini ve sürüş kalitesini de etkileyebilir. Tek tip araç ağırlık dağılımı elde etmek ve düşük bir ağırlık merkezini korumak için bir akü montaj çerçevesi yapısı ABD Patenti 8561743 ile sunulmuştur. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi, dikdörtgen montaj çerçevesi, ön ve arka olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır ve çerçeveye kaynak yapılmıştır.[76] Ayrıca, bir kırılgan elemanı ön bölümü iki eşit dikdörtgen alana böler. Öndeki iki dikdörtgen alanda, piller uzun kenarı aracın enine, kısa kenarı aracın boyuna yönüne yönlendirilecek şekilde dikey yönde düzenlenirken, arka dikdörtgen bölümdeki piller öyle düzenlenmiştir ki, en kısa taraf aracın enine yönüne yönlendirilir.

Bu düzenlemenin bir sonucu olarak, arka bölüme monte edilen pil grubunun ağırlığı, iki ön sütuna monte edilen pil grubunun toplam ağırlığına büyük ölçüde eşittir. Akabinde, akü grubunun ağırlık merkezi, araçtaki akü grubunun ortancasının kesiştiği bir nokta etrafında yer alır.



Şekil 3.7: Kompakt bir pil takımı tasarımıyla kullanılan çerçeveleme düzenlemesinin perspektif görünümü [76].



Şekil 3.8: Pil montaj çerçevesinin perspektif görünümü [76].

3.8 Pil Hücresi Seçimi

K2 firması tarafından üretilen enerji pilleri küçük hücrelerdir ve yüksek termal dayanıklılığa ve daha uzun yaşam döngüsüne sahiptirler. Bununla birlikte, bu hücrelerin boyutları daha küçüktür ve paketler içinde düzenlendiğinde %27 hacimsel azalmaya neden olmuştur. A123 firması tarafından üretilen piller ise, modül içindeki yedi hücrenin seri, üçünün paralel olduğu modüler bir konsept sağlamaktadır. A123 modülünün paketlenmesi kolay bulunur ve yüksek enerji-ağırlık oranı gibi mükemmel özellikleri nedeniyle yüksek voltajlarda çalışabilir ve düşük kendi kendine deşarj oranları gösterebilir. CALB CAM72 firmasının ürettikleri pil hücreleri Thunder Sky pillerine benzer ve hazır bulunmaları ve kapasite gereksinimini karşılamaları onları bu araştırmaya uygun hale getirir.

CALB CAM72 hücreleri, eBus gereksinimi için seçilmiştir. Bu hücreler, alüminyum alaşım kapaklı, şarj edilebilir lityum-demir fosfat enerji hücresidir. Frekans kontrolü, yüksek güçlü yenilenebilir enerji entegrasyonu ve diğer yüksek güçlü uygulamalar için yüksek hızlı enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar.

3.8.1 Nihai tasarım: taban plakası

eBus'un altından yükleme kısıtlaması nedeniyle, paket alanını artırmak ve araca güvenli bağlantı sağlamak için bir "dış" montaj sistemi önerilmiştir. Bu montaj sistemi, dolu yakıt deposu ile benzer bir kütleyi tutacak şekilde tasarlanmış otobüs yakıt deposu montajına benzerdir. Cıvata boyutlandırması, paketin 1.5 güvenlik faktörü ile gerekli yükleme altında tutulmasına dayanmaktadır. "Dış" montaj sistemi, minimum toleransları sağlamak için hem taban plakasının hem de çerçevenin aynı sacdan lazer/su ile kesilmesini gerektirir; ancak, veri yolu çerçevesi sınırlamaları, kontrol edilmesi gereken her iki tarafta ayrı montaj gerektirir. Taban plakası, ağırlığı azaltmak için oyuklara ve dış elemanlardan yalıtım için üstüne kaynak yapılmış ince bir levhaya sahiptir.

"Dış" montaj sistemi, pil takımının veri yolu montaj alanını dikey olarak geçmesine ve ardından yanal öteleme ile montaj deliklerini hizalamasına olanak tanımaktadır. Paketi araca kaldırmak için bir kaldırma aleti/cihazı gerektirir ve hem dikey hareket hem de yanal hareket için hizalama pozisyonuna yardımcı olmak için küçük ayarlamalara izin verir. Üst paketlerin konumlandırılması, veriyolu çerçevesi içinde 0,5 m'lik dikey bir yükselme gerektirir; bu, aletin boyutlarının paket boyutlarıyla (700 850- ek boşluklara izin verilir) sınırlı olacağı anlamına gelir.

3.8.2 Nihai tasarım: gövde

Dış muhafaza, yük taşıyan bir parça değildir. Sağlam ve dayanıklı malzemelerle imal edilerek dış bağlantıların sızdırmazlığına ve montajına yardımcı olur. Bununla birlikte, sızdırmazlık kaybına neden olacak veya çok fazla ağırlık ekleyecek kadar sert olamaz. Kompozit malzemeler, kıyılmış şerit karışımları ve daha fazlası ile malzeme seçiminde çok fazla esneklik sağlayabilir. Bir diğer önemli konu, bir EV'deki sıkı paketleme kısıtlamalarının, pakete iyi bir sızdırmazlık sağlarken kasayı taban plakasına monte etmek için mevcut alanı kısıtlamasıdır. İyi bir sızdırmazlık, sızdırmazlık maddesinin (sıkıştırma malzemesi) her zaman devreye girmesini ve çalışmasını sağlamak için paketin dış kenarı etrafında düzgün bir sıkıştırma yükü gerektirir. Bu da bu gereksinimin karşılandığından emin olmak için montaj

aralığının analizini gerektirir. Uygun bir sızdırmazlığın sağlandığından emin olmak için pil kutusunun çevresinde her zaman manuel silikon conta kullanılabilir.

3.8.3 Nihai batarya paketi: montajı

Nihai paket düzeneği, taban plakası için paslanmaz çelik bir plakadan (4 mm kalınlıkta) ve taban plakasının altına takviye olarak kaynaklanmış kanal bölümlerinden (20 20 3 mm) oluşmaktadır. Taban plakası, paketi araç çerçevesine monte etmek için uzunlamasına uçta dişli profile sahiptir. Pil takımı, 6 sıra 22 hücrede 132 CAM72 prizmatik tip hücre içerir (Bağlantı: 66S2P). Uzunlamasına olarak, sıralar ortada 2 mm paslanmaz çelik sac ile iki bölüme (10 ve 12 pil hücresi ile ayrılmış) ayrılmıştır. Her hücre sırası ayrı ayrı yerleştirilir ve bir yan metal plaka ile sınırlandırılır. Akü bağlantı çubuklarının kısıtlanması ve hücrelerin basınç tahliye delikleri için boşluk da tasarımda dikkate alınır.

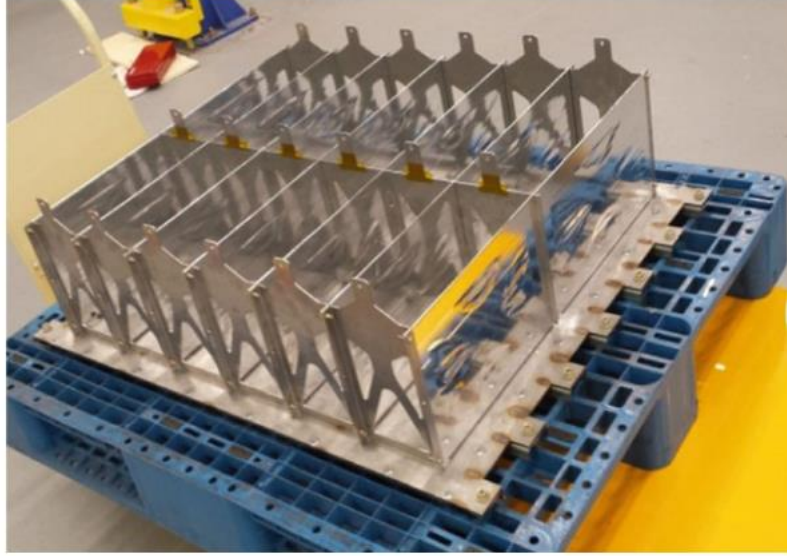
Tasarım, dahili ve harici arayüzler için gerekli elektrikli yardımcı eklentileri (BMS, kontaktörler, sensörler, vb.) içerir. Tümü ambalajı, işlevi ve güvenli çalışmayı optimize edecek bir konuma monte edilmiştir. Ayrıca, planlı bakım sırasında pil paketlerinin hızlı ve güvenli bir şekilde izole edilmesini sağlayan Manuel Servis Bağlantısını Kesme (MSD) ve terminal konektörleri de dahil edilmelidir. Hücreler ve her iki taraftaki metal çerçeve arasındaki elektrik yalıtımı, gerektiğinde yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) levhaların dahil edilmesiyle sağlanır.

EN 60664-1:2007 ve VDE 0110-1 standartlarına göre boşluk mesafesi (iki iletken parça arasındaki veya iletken bir parça ile hava yoluyla ölçülen ekipmanın sınırlayıcı yüzeyi arasındaki en kısa mesafe) gerekli darbeye dayanacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Alçak gerilim şebekesine sahip bağlantılar için, nominal darbe gerilimi, gerekli darbe dayanım gerilimi olarak kabul edilir. Bununla birlikte, titreşim ve uygulanan kuvvetler gibi mekanik etkileri hesaba katmak için ek boşluklar gerekli olabilir.

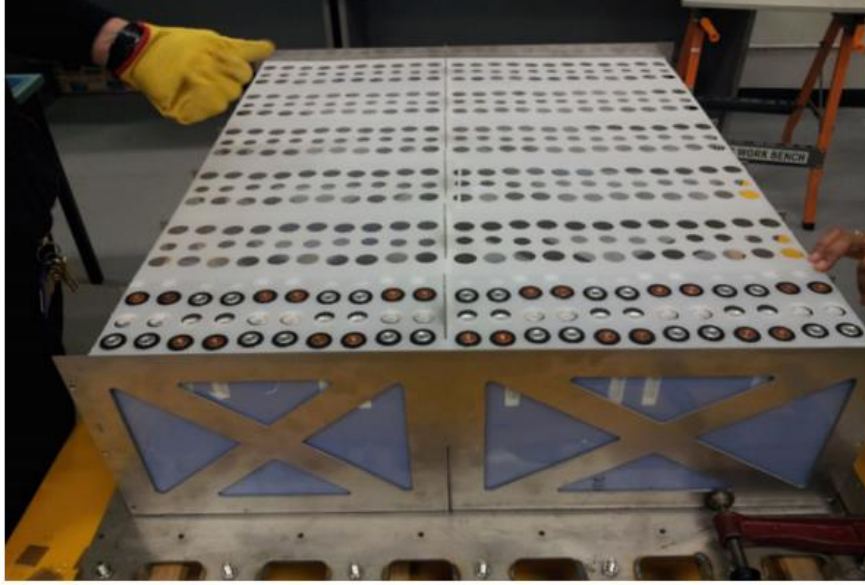
Genel bir kural olarak, gerekli boşluk, herhangi bir uygulama için en kısa kaçak mesafesine eşittir. Pil hücresinin dış yüzeyi, metal folyo, erişilebilir yalıtım malzemesi (plastik HDPE veya naylon, Şekil 3.10) yüzeyi ile temas edecek şekilde sınırlayıcı yüzey olarak kabul edilir.

250 V için önerilen hava boşluğu 5 mm ve kaçak mesafesi 8 mm olmalıdır. Bu durumda yalıtım malzemesi için sünme mesafesi 8 mm olarak alınmıştır (Şekil 3.11).

Dış kasa muhafazası (Şekil 3.12) pil takımını kapatmak için tasarlanmıştır. Muhafazanın üst kapağı, pil kontrolörü ve yönetim sistemi dahil olmak üzere elektrikli yardımcı eklentiler (kontaktörler, akım sensörü, sigorta) tüm dış kasayı paketten çıkarmadan erişim sağlar. Her akü grubuna bir manuel servis bağlantısı (MSD) bağlı, ancak akü kutusunun her iki tarafında MSD için montaj olanakları sağlanmıştır. Dokuz özdeş ve değiştirilebilir 30 kWh, 211 V (nominal) pil paketi, araca yerleştirilmek üzere tasarlanmıştır. Mevcut alanın en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak için pil takımları, seri halinde 3 paketten oluşan 3 paralel dizi olarak kurulmuştur. Batarya sisteminin gelecekteki genişlemesine izin vermek ve ağırlık dağılımına yardımcı olmak için modüler bir mimari seçilmiştir.

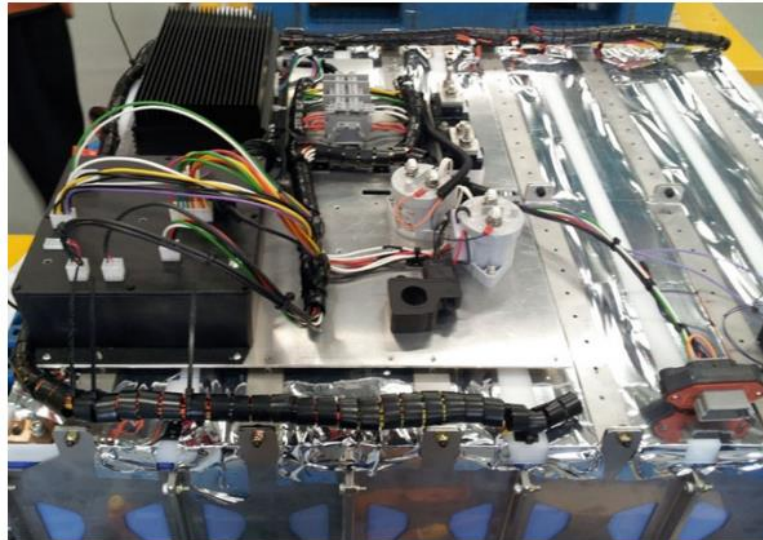


Şekil 3.9: SS304'ten yapılmış bölme duvarlı pil taban plakası ve çerçeve yapısı [24].



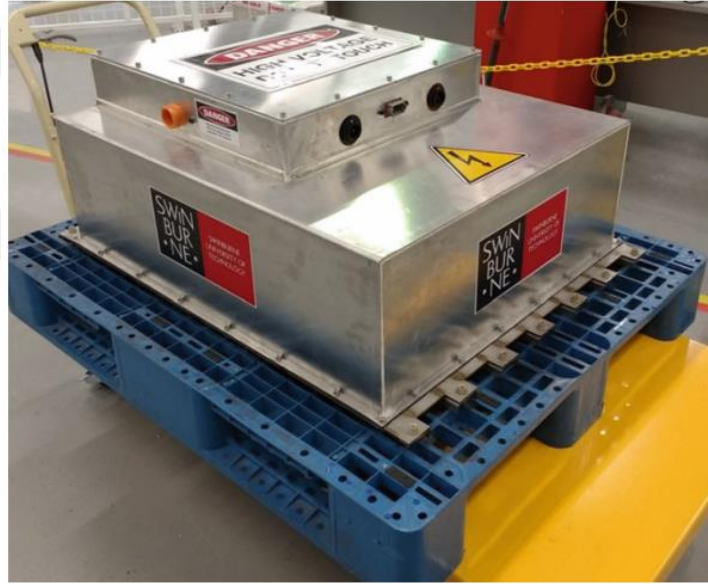
Şekil 3.10: Terminaller ve -basınç tahliye deliği için boşluk delikleri olan hücreler üzerinde oturan üst plastik katman 1'i gösteren pil takımı [24].

Pil paketi testi, bir araç üzerindeki gerçek enerji depolama sistemini simüle etmek için pil paketlerini ayrı ayrı test etmenin yanı sıra bunların çalışan pil dizisine entegrasyonunuda içermelidir. Pil takımı, 25 A'e kadar çeşitli akım kapasitelerinde 6 saatlik bir süre boyunca şarj ve deşarj testleri yapılır ve paketlerin dayanıklılıkları belirlenir.



Şekil 3.11: Ek yalıtım bandı, metal hücre tutma kayışı ve ek aksesuarlar içeren pil takımı; BMS, akü kontrolörü, akım sensörü, kontaktörler, sigortalar ve diğer aksesuarlar ayrı bir plaka üzerine monte edilmiş ve metal kayışa cıvatalanmıştır [24].

Son olarak, alçak tabanlı tasarım nedeniyle paketleme alanının büyük bir kısmı aracın arkasında kalmaktadır. Ancak arka aksa aşırı ağırlık verilmesi, araçta taşınabilecek yolcu sayısını kısıtlamaktadır. Bu nedenle, ağırlığı ileriye doğru dağıtmaya yardımcı olmak için pilleri arka aksın önüne yerleştirmeye öncelik verilmektedir, bu da paketleme kısıtlamalarının artması anlamına gelmektedir. Yüksek voltaj dağıtım ünitesi (HVDU), gücün gerektiği yerde ve zamanda dağıtılmasını sağlamak için veri yolundaki tüm elektrik enerjisi aktarımının, bağlantı akülerinin, yüksek voltajlı bileşenlerin ve şarj cihazlarının merkezi noktasıdır. Bu, aşırı kablo uzunluklarını azaltmak ve dolayısıyla özellikle büyük miktarda güç gerektiren motorlarda sistem enerji kayıplarını azaltmak için mümkün olduğunca merkezi olarak konumlandırılır. Kalan bileşenlerin konumlandırılması daha sonra 24 V sistem dağıtımına en yakın DC-DC dönüştürücü gibi işlevsel sistemlere yakınlığa veya giriş koruması gibi bileşen gereksinimlerine dayanmaktadır.



Şekil 3.12: Otobüse takılmaya hazır komple pil takımı [24].

4. ENERJİ DEPOLAMADA LİTYUM BATARYALARIN GELECEĞİ

Son yıllarda gelecekteki batarya ihtiyacının lityum piller ile sağlanması durumunda ham madde sıkıntılarından dolayı negatif bir algı oluşmaktadır. Lityum kullanılabilirliğinin elektrikli araç alımı arasındaki ilişkiyi ve elektrikli araç pazarı gelişimi yapılan çalışmalar incelendiğinde [77,78,80] Çizelge 4.1’de elde edilen sonuçlar elde edilmiştir [79]. Özellikle, yapılan çalışmalar incelendiğinde gelecekteki elektrik araç pazarının ihtiyacı olan lityumun açık bir şekilde yetersiz olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1: Lityum akü üretimine karşılık potansiyel malzeme sınırlamasına yönelik birkaç çalışmanın karşılaştırılması [79].

| Yazar | Elektrikli araç üretiminde tahmini lityum arz kısıtlaması | EV üretimi(milyon/yıl) | Yıl | Her araç için lityum yoğunluğu |
|--------------------|---|------------------------|-----------|---|
| Evans | Hayır | 5 EV | 2015 | HEV:0.23 PHEV:1.35 BEV:2.81 |
| Gaines and Nelson | Hayır | ~65 PHEV ve ~35 BEV | 2050 | HEV:0.17-0.64 PHEV:0.93-5.07 BEV:3.38-12.68 |
| Gruber at al. | Hayır | >600 EV | 2100 | HEV:0.05 PHEV:1.14 BEV:3.85 |
| Kushnir and Sanden | Hayır | 4500 EV | 2100 | PHEV:1.44 BEV:5.76 |
| Neubauer | Hayır | 60 PHEV ve 47 BEV | 2050 | PHEV:0.6-1.9 BEV:3.3-7.5 |
| Tahil | Evet | 4-8 PHEV | 2015-2020 | PHEV:1.5 |
| Yaksic and Tilton | Hayır | 3000 EV | 2100 | EV:1.27 |
| Martin et al. | Hayır | 7.5-9 | 2020 | PHEV:0.85 BEV:8.5 |

Sonuçlar incelendiğinde elde edilen değişkenler aşağıdaki gibidir:

- (i) Zaman görüşü
- (ii) Gelecekte belli noktada üretilen araç sayısı

- (iii) Farklı elektrik araç çeşitlerindeki akülerin boyutu
- (iv) Farklı elektrik araç çeşitleri tarafından gelecekte ele alınan elektrik araç pazarının sayısı

- (v) Akü kapasitesinin birim başına düşen lityum miktarı

Belirsizliklerin yanı sıra yapılan varsayımlar, elektrikli araç teknolojisinin gelişmesi ve piyasa etkilenmelerinden dolayı zaman içerisindeki değişikliğin gösterdiği eğilimlerdir.

Lityum talep tahminleri aşağıdaki değişikliklerden etkilenir:

- (i) Lityum rezervleri
- (ii) Gelecekteki lityum üretim oranları
- (iii) Gelecekteki geri dönüşüm oranları

Değişkenler ve ilgili varsayımlar dördüncü bölümde ayrıntılı şekilde tartışılmaktadır.

4.1 Elektrik Araçlarından Lityum Talep Tahmini

Yukarıda bahsedildiği üzere, elektrikli araçların lityum talebinin hesaplanması, çeşitli değişkenlerin tahmin edilmesini ele alır. Bu yüzden, hala belirsizlikler vardır.. Bununla beraber dikkate alınan değişkenler aşağıdaki gibi verilebilir:

- (i) Gelecekte üretilen elektrik araç sayısı
- (ii) Elektrik araç akülerinin kWh cinsinden boyutu
- (iii) Akünün kWh başına düşen lityum yoğunluğu

4.1.1 Elektrik araç pazarının gelecekteki durumu

Gelecekteki elektrik araç pazarının çeşitli senaryolar için ortaya çıkan sınırlı sayıda çalışma vardır. Literatürdeki senaryoları açıklamak için yapılan çalışmalarda [9], elektrik araçları çeşitlerine göre ayrıştırılarak alım senaryolarını düzenleyerek yüksek profilli çalışmaları karşılaştırılmıştır [17-21]. Karşılaştırılan bu senaryolar 2008’de başlayıp 2050’ye kadar olan zaman dilimini kapsayacağı öngörülmektedir. Yapılan çalışmalarda, 2050 yılında küresel PHEV satış tahminleri yılda 10 milyon ile 79 milyon araçla beraber BEV satış tahminlerinde ise yılda 12 milyon ile 84 milyon araç arasında değişmektedir [79]. Daha yakın zamanlarda yapılan çalışmalarda elektrik araç alım senaryolarında genellikle yapılan eski çalışmalarda aralığın üst ile alt limitlerini örtüştüğü belirlenmiştir [92-96].

Yapılan analizde seçilen senaryo Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) 2010 Enerji Teknoloji Perspektifleri (ETP) raporunda konu olan MAVİ Harita senaryosudur. Mavi

senaryolar, 2005'den 2050 yılına kadar küresel CO_2 emisyonlarının yarıya indirilmesinde az maliyetle masraf yapılan bir senaryodur [79]. MAVİ Harita senaryosu elektrik araç çeşitlerine göre küresel elektrik araç satışları Çizelge 4.2'de kısaca bahsedilmiştir.

Çizelge 4.2: IEA adı altında "MAVİ Harita" ve "MAVİ Elektrik araç değişiklikleri" 2030 ve 2050 yılları içerisinde yıllık araç satışları(milyon)[97].

| | PHEV | BEV |
|---------------|------|-----|
| BLUE MAP 2030 | 25 | 9 |
| BLUE MAP 2050 | 62 | 47 |

MAVİ senaryolar IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) tarafından durdurulmuştur ve ETP'(Enerji Teknolojisi Perspektifleri)nin son yayınlarında yayınlanan küresel sıcaklık artışının umulması beklenen seviyeye göre isimlendirilen diğer normatif senaryolar ile değiştirilmiştir [97]. Örneğin; 2^0C senaryosu (2DS) ve 2^0C 'nin altındaki senaryo (B2DS). 2010 ETP elektrik araç projeksiyonları ile 2017 ETP araç projeksiyonları karşılaştırılmıştır [94]. Son birkaç yılda pazar alımı ve son on yılda iklim değişikliğinden dolayı elektrik araçlar büyük rol oynamaktadır. Böylelikle, 2010 ETP MAVİ Harita Senaryosu (RTS) ile 2017 ETP Referans Teknoloji Senaryosu (RTS) karşılaştırılabilir. RTS bugünün politika önlemini uyguladığı ve mevcut olan politika eğilimlerine dayanarak gelecek için teknolojinin önerildiği bir senaryodur. Ancak projeksiyonların elektrik araç alımında lityum talebinin önemli olduğunu söylemek gerekir.

4.1.2 Lityum yoğunluk tahmini

Son on yılda ortaya çıktığından bu yana, elektrik araç üreticileri lityum iyon (Li-ion) akülerine güvenmektedirler [98]. Li-iyon ve Li-metal kimyası günümüz teknolojileriyle birlikte hızla geliştirilmektedir. Akülerin gelecekte elektrik araç pazarına uygun olması düşünülmektedir. Lityum yoğunluğu örneğin; araç başına uygun olan lityum ağırlığı, önceki zamanlarda tartışılan elektrik araç alım senaryosu için gelecekte elektrik araç lityum talebine göre yapılacaklar tahmin edilmelidir. Li-iyon aküleri için lityum yoğunluğunun üretilmesine uygun bilgiler aşağıda verilmiştir:

- (i) Akünün nominal voltajı (volt, V)
- (ii) Dikkate alınan akü kimyasının belirli kapasitesi (gram başına düşen amper-saat, Ah/g)

- (iii) Birleşme olduğu zaman akünün aktif madde içerisindeki lityum konsantrasyonu (ağırlığın yüzdesi, wt %)

BEV ve PHEV tasarımları için büyük aküler gerekirken, genellikle HEV ve FEV için 1-1.5 kWh civarında küçük aküler yeterlidir. Sadece rejeneratif frenleme (Rejeneratif frenleme, hareket eden bir aracı veya nesneyi kinetik enerjisini hemen kullanılabilir veya ihtiyaç duyulana kadar saklanabilecek bir forma dönüştürerek yavaşlatan bir enerji geri kazanım mekanizmasıdır.) yoluyla araç üzerinde enerji depolamak için kullanılır. PHEV-BEV akülerinin kapasitesi, HEV- FCV akülerinin 10-20 katı olacağı ve 2050 yılında HEV – FCV'lerin toplam araç pazarının küçük bir bölümü oluşturduğu Çizelge 4.2'de sunulan senaryo üzerinde gösterilmiştir.

Yukarıda bahsedildiği gibi; elektrik araç akü içerisinde depolanan lityum miktarı boyutunun, kimyasal türünün, yapısının ve değerlendirilmiş performansının bir fonksiyonudur. Bu nedenle, her bir elektrikli araç akü modelinin ihtiyaç duyacağı lityum miktarını kesin olarak tanımlamak mümkün değildir. Yine de kullanılan yaklaşımı takip edip bireysel elektrik araç akü içerisinde gereken lityum miktarını etkileyen temel faktörler incelenecektir.

Y yılı (hesaplama yapılan yıl) içerisinde elektrik araçlarından küresel lityum talebinin hesaplanması aşağıdaki denklemle özetlenebilir:

$$DL_{i,y}=(M*S*I)_{BEV}+(M*S*I)_{PHEV} \quad (4.1)$$

M, BEV/PHEV'nin (yıllık araç satışları) sayısının y içerisindeki pazar boyutudur.

S, BEV/PHEV aküsünün y yılı içerisindeki ortalama boyutudur (kWh)

I, BEV/PHEV aküsünün y yılı içerisindeki birim enerji kapasitesi (kWh) başına düşen lityum miktarının ortalama yoğunluğudur (bkz Çizelge 4.1).

4.1.3 Lityumun jeolojik özellikleri

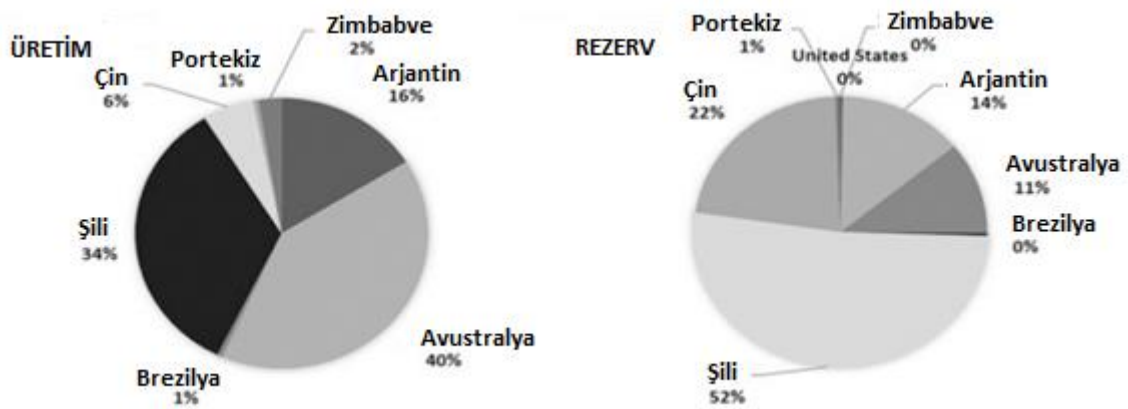
Reaktivistik nedeniyle, lityum metali doğada serbest halde değildir ve lityum bileşenleriyle dört ana şekilde bulunur: Tuzlu sular, mineraller, tortul kayalar ve deniz suyu. Mineraller ve sular, bu gün dünyanın temel lityum kaynağını oluştururlar. Lityum içeren mineraller spodumen, lepidolit, amblygonit ve öskriptit gibi pagmatik olarak kabul edilen kaba biçimli magmatik kayalardır [83]. Tuzlu su yatakları şu anda dünyanın en büyük ve en ucuz lityum kaynaklarıdır [80]. Çoğunlukla Şili'deki Atacama gibi kuru olan göllerde, jeotermal yataklarda bulunur. Üçüncü lityum kaynağı tortul kayalarda, özellikle hektorit gibi killer ve

yeni keşfedilen jedarit gibi buharlaşmalardır. Bu tortular ticari olarak geri kazanılmamaktadır. Son olarak, deniz suyu yaygın ve lityum miktarı fazladır [83,110]. Yoksic ve Tilton' a göre, dünya okyanusundan 44.8 milyar ton lityum elde edilebilir [110]. Deniz suyundan lityum elde etmenin ekonomik açıdan uygulanabilirliği kesin değildir. Yukarıdaki kaynaklardan geri elde edilen lityum, lityum karbonat, lityum hidroksit, lityum klörür ve diğerleri gibi bileşikler halinde üretilir. Farklı uygulamalarda farklı lityum bileşenleri kullanılır ve Li-iyon akülerde lityum karbonat kullanılır.

4.1.4 Üretim ve rezervler

Bilinen birçok lityum rezervleri mevcuttur ve birçok ülkede ticari olarak kullanılmaktadır. Bunların göreceli şekilde dağılım hali Şekil 4.1'de sunulmaktadır. Üretimin en büyük kazancı lityumun spodumen yataklarından geri kazanıldığı yer olan Avustralya'dır. Şili'deki ikinci en büyük yerdir ve And dağları boyunca tuzlu su havuzlarından kazanılan lityum rezervlerine sahiptir. Hem rezerv hem de üretimdeki coğrafi dağılım lityum arzının, nadir toprak metalleri veya indiyum gibi coğrafi olarak daha az kaynaklara sahip olan kısıtlamalardan etkilenme oranının düşük olduğunu gösterir [111-114].

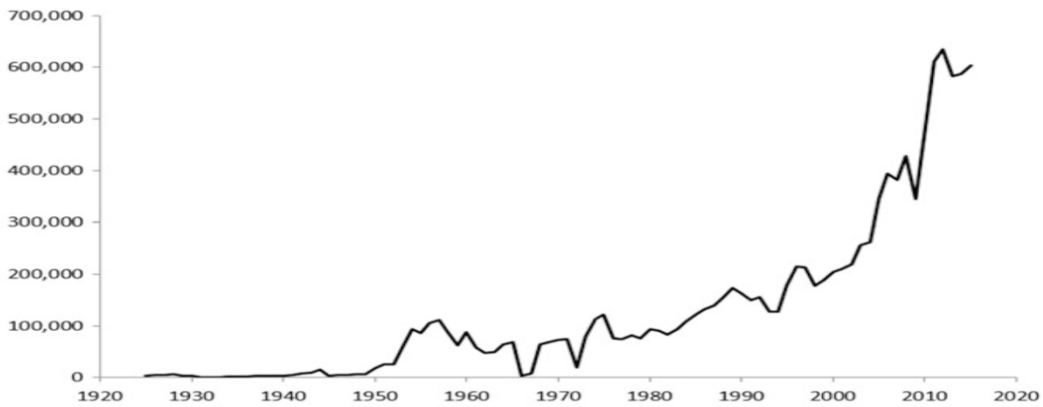
Lityum rezervlerinin ve üretimin gelecekteki potansiyelini anlamak için tarihsel sürecine bakmak gerekir. Şekil 4.2'de USGS tarafından ele alınan, ortaya çıkan, minerallerin ve bileşiklerin brüt aralığına göre tarihi dünya lityum üretim verilerini sunar [116]. 1967'den beri, lityum üretimi sayesinde madenlerden "cevher ve cevher konsantreleri" ve tuzlu su birikintilerinden lityum karbonat olarak rapor edilmiştir. Lityum karbonattaki lityum ağırlığının hesaplanması basittir. Bununla beraber, bu cevherlerin ve konsantrelerin bileşimi bilinemediği için cevherle beraber konsantresinin lityum içeriğinin hesaplanması zordur.



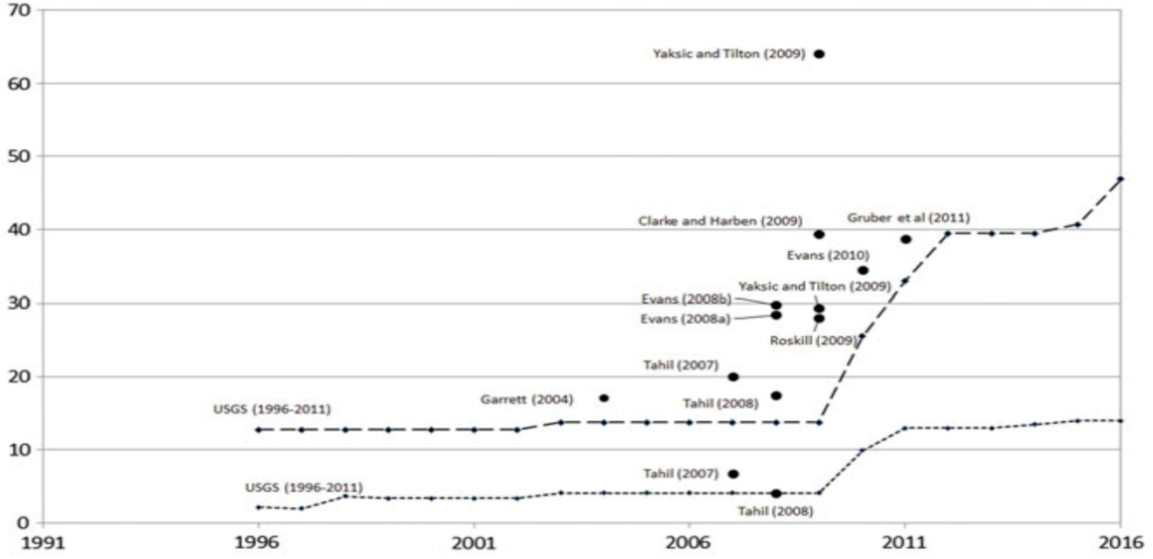
Şekil 4.1: 2016 yılında lityum üretimi ve rezervlerin dağılımı [115,79].

Aynı şekilde, devam eden keşifler yoluyla rezervler önemli şekilde artmaya devam etmektedir [79]. Şekil 4.3’de zaman içerisinde farklı lityum rezervleri ve kaynak tahminleri sunulmuştur. Tahminler farklı kaynaklardan dolayı sınıflandırılmaya ihtiyaç duyar. Bu yüzden, hepsi direkt olarak karşılaştırılmaz. Sorun, rezervlerin sınıflandırılmasında direkt olarak tanımların her zaman gerçeği yansıtmıyor olmasıdır.

Özellikle, USGS hem rezerv hem de rezerv tabanı için bilgiler sağlar fakat rezerv taban raporlaması 2010 yılında sonlandırılmıştır [79]. Roskill 2009 yılı için rezerv verilerini, Garrett 2004 yılı için ayrı olarak, Tahil 2005 ve 2007 yılları için rezerv ve rezerv tabanı tahminleri açıklamıştır [117]. Sonuç olarak Yaksicc ve Tilton 2009 yılında geri kazanılabilir kaynaklar ve yerinde olan kaynaklara dair tahminler sunmuşlardır [80]. Şekil 4.3’teki veriler 2009’da kaynaklar hakkında kıyaslama yapılarak %700’ün üzerinde olduğu gösterilmektedir. Bu resmen kullanılan rezerv sınıflandırmanın farklı olan yapısıyla açıklanabilir fakat aynı zamanda gelecekte lityum üretimi için beklentiler konusunda belirsizlik olacağını gösterir. USGS’nin kayıtlı üretimi veya rezerv olmayan Bolivya dahil olarak birçok ülke için bazı kaynaklara atıfta bulunduğunu bildirmek gerekir. USGS bu kaynakların 9 milyon ton kaynağına sahip olduğu düşünülüyor [115]. Bu kaynaklardan bazılarının USGS tarafından rezerv olarak rapora dahil olmasını engelleyen neden belirsizliktir. 2017’deki USGS rezerv tahminlerinin üç katından fazlası, Yaksic ve Tilton tahminlerinin altında olan dünya kaynaklarını 47 milyon ton olarak tahmin ediliyor.



Şekil 4.2: Lityum cevheri ve minerallerden cevher konsantresi ile tuzlu sulardan lityum karbonatın brüt aralığına göre 1900-2015 yılları arasında dünyadaki yıllık üretim [116,79].



Şekil 4.3: USGS ve diğer çalışmalardan tahmin edilen rezerv milyon ton lityum [77,78,80,81,106,115,117-119].

Üretim (Şekil 4.2) hızlı gelişen doğası ve zaman içerisinde (Şekil 4.3) yapılan tahmin artışı göz önünde bulundurulursa, lityum her yıl hızla artan ve rezerv tahminleri yeni kaynak keşfedildiğini ve üretim açısından olgunlaşmış olduğunu göstermektedir.

4.1.5 Geri dönüşüm

Tarihsel olarak, az miktarda lityum geri dönüştürülmüştür [115]. Birleşmiş Milletler Çevre Programı, lityum kullanım ömrünün geri dönüşüm oranları 2011’de %1’den daha az olduğu tahmin edilmektedir [120]. Ancak, son zamanlarda gelişen pazar büyüklükleri nedeniyle lityum akü geri dönüşüm oranı artmaktadır ve bu da yeni düzenlemeler getirmektedir. Avrupa’da üye olan devletler, 2012 yılına kadar ömrünü tüketen akülerin %25’ini ve 2016 yılına kadar %45’ini toplamak zorunda kalmıştır [121]. Aslında, bazı Li-iyon akü geri dönüşüm tesislerinde kobalt ve nikel hidroksitleri geri kazanılırken fakat lityumu geri kazandırılmamıştır [122].

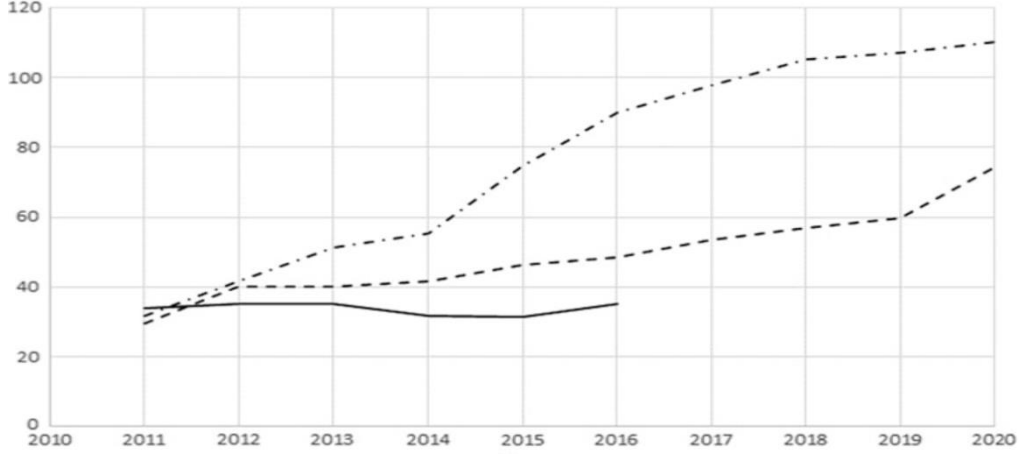
Buna rağmen, ömrünü tamamlayan aküde lityum geri dönüşüm potansiyeli için önemli bir tahmin söz konusudur. Gaines ve Nelson %100 geri dönüşüm oranı ve 10 yıllık akü ömrünü varsayarsak, 2050 yılına kadar ABD’de 40.000 tondan fazla lityum geri dönüştürülebileceğini tahmin etmişlerdir. Buchert vd. lityum modeli geri dönüşümü ve %90-100 geri dönüşüm oranını göz önünde bulundurarak, 2010-2100 yılları içerisinde kümülatif talebin %50 ile %63’ünü karşılayabileceğini tahmin etmiştir [83]. Bununla beraber, akü üretiminde gelişen büyüme önemli biçimde geri dönüşüm potansiyelini gösterir.

Ömrünü tamamlamış akülerden lityumun geri dönüşüme kazandırılmasındaki birinci problem, otomotiv sektöründen gelen Li-iyon akülerinin hepsinin aynı kimyaya sahip olmaması ve dolayısıyla toplanan atık akülerin ayrıştırılamamasıdır [123]. Faydalı olan geri dönüşüm süreci gerçekleştirmek için çalışacak akülerin bileşiminin bilinmesi gerekir. Bunu değerlendirmek için manyetik veya elektrodinamik sensörler, etiketin fotoğrafla tanınması ve X-ışını görüntülemesinde otomatik sistem geliştirilmiştir. Bunların hepsi, ayrılan fonksiyonların değişen saflık seviyeleri ile sonuçlanır [124]. Yukarıda özetlenen nedenlerden dolayı, kullanılmış akülerden lityumun geri kazanılmasından bir pazar halinde sunulmaya devam ediyor. Bundan dolayı, Gruber vd. tarafından [83] öneride bulunduğu gibi, geri dönüşüm lityumun gelecekteki arzın yarısına kadar katkıda bulunmasının sağlam mevzuat getirilmediği veya daha güçlü piyasa teşviki olmadığı sürece daha zor olduğu görülmektedir.

4.1.6 Gelecekteki arz tahminleri

Doğal kaynak olarak kullanılan lityumun olgunlaşmamış olmasından hem rezerv üretimi hem de rezerv tahminleri zaman içerisinde değişmektedir ve çoğu araştırmacı bu değişiklikleri gelecekte üretim veya bulunabilirlik tahminleri sırasında açıklamaya çalışmıştır. Toplam geri kazanılabilir kaynakların değerlendirilmesine bağlı olarak ya üretim aşamasında ya da beklenen lityum rezerv kullanım proje analizine ve gelecekte kullanılabilirliğine bakılarak 2020 yılına kadar gelecekteki üretime bağlı olan birçok tahmin incelenmiştir [79]. Bu tahminler 2020 yılında yılda 60-110 bin ton lityum metal üretimi ve metal üretim toplamda yaklaşık 2 ile 20 milyon ton aralığındadır [88]. Bu bölümde yapılan tahminleri ayrı olarak tartışılmayacaktır [126]. Bunun yerine Şekil 4.4'te birkaç yıl önce yapılan yüksek olay projeksiyonu ve düşük olay projeksiyonu ile 2020 yılına kadar yapılan üretim tahminleri aralığıyla beraber gerçek üretim aralığı arasında USGS tarafından öne sunulduğundan beri karşılaştırma yapılacaktır [115].

İncelediğimiz toplam geri kazanılabilir kaynakların değerlendirilmesi yapıldığında, bunların ölçülü eğilimi ve zamanla arttığını belirtmekte fayda vardır [79]. Yoksic ve Tilton lityum karbonat libresi başına 1.40-2 dolarlık bir fiyatla 22 milyon ton lityum olabileceğini tahmin etmişlerdir [80]. Bununla beraber lityum karbonat libresi başına 7-10 dolarlık bir fiyata, lityumun deniz suyundan çıkarılabileceğini ve elde edilen lityumun iki katından fazla olabileceğini tahmin ettiler. Böylelikle, gözden geçirilen tahmin aralığının büyük bölümü gelecekteki lityumun elde olan kısmını alt sınır olarak varsaymak pratik olacaktır.



Şekil 4.4: Gerçek üretim ile karşılaştırıldığında gelecekteki lityum üretimin tahmin aralığının karşılaştırılması [79,88,115,126].

4.1.7 Lityum arz ve talep dengesi

Çizelge 4.6’da 2030 ve 2050 yılları içerisinde BEV ve PHEV akülerinde üçüncü bölümde sunulan analize bağlı olarak elde ettiğimiz küresel lityum talep aralığını, ilgili değişiklikleri, gerektiği zaman güncellenen değerler tartışılmıştır. Elektrik araç akülerinde gelecek lityum talep tahminlerini “düşük” ve “yüksek” olarak sunmaktadır. Akülerin lityum içeriğini tahmin ederken yapılan karışıklık nedeniyle, depolanan birim enerji başına düşen lityum içeriği (gLi/kWh) veya lityum yoğunluğu için bir dizi rakamları kullanılmıştır ki Bölüm 3.2’de tartışılan [79] ile aynıdır. Akü boyutları “düşük” durumda PHEV için ortalama 8 kWh ve BEV için 30 kWh, “yüksek” durumda PHEV için 16 kWh ve BEV için 60 kWh kullanılır. Özellikle, BEV daha büyük pil kullanırken [79]’da orijinal olarak kullanılan rakamları revize edilmiştir (Çizelge 4.3 ve 4.4). Son olarak yıllık elektrik araç rakamları ile aynıdır. IEA’da sunulan MAVİ Harita Senaryosuna dayanmaktadır. Talep tahminlerine dayanarak lityumun diğer kullanımları dahil edilmemiştir ve bunlar tamamen elektrikli araçlar için satışlardır.

Çizelge 4.3: 2030-2050 yıllarında pazarda BEV-PHEV’ler için küresel yıllık lityum talep tahminleri,” düşük” ve “yüksek” durumlar [79].

| Değişken | Düşük | Yüksek |
|-----------------------|-------|--------|
| Pil boyutu (kWh)-PHEV | 4.3 | 16 |
| Pil boyutu (kWh)-BEV | 16 | 35 |
| Yoğunluk(gLi/kWh) | 190 | 380 |
| 2030 BLUE Map | | |
| Yıllık satış PHEV | 25 | 25 |
| Yıllık satış BEV | 6 | 6 |
| Li-ion Pazar payı | %100 | %100 |
| Talep aralığı | 89 | 357 |
| 2050 BLUE Map | | |
| Yıllık satış PHEV | 62 | 62 |
| Yıllık satış BEV | 47 | 47 |
| Li-ion pazar payı | %100 | %100 |
| Talep aralığı | 362 | 1449 |

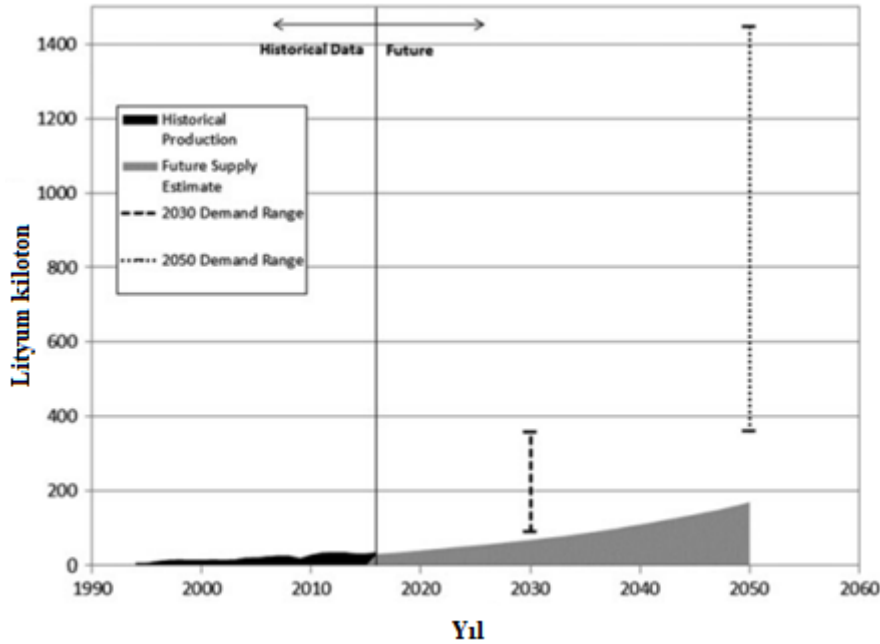
Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi, 2030 ile 2050 yılları arasında elektrikli araçlardan tahmini lityum talebi önemli derecede artmaktadır. Bunun nedeni, iki zaman dilimi içerisinde yıllık araç satışlarında büyüme ve farklı pil boyutları(kWh) sahip olan PHEV ve BEV satışları arasında oran değişiminin meydana gelmesidir. Gelecekteki lityum talep ölçeği ve 2050 yılı pazarında (çok büyük) yaklaşık olarak 1,5 milyon ton lityum talebinin gerçekleşmesidir.

Şekil 4.5’de lityum talebi ve üretim tahminlerini birleştirilerek, gelecekte karşılaşılabilecek lityum sorunları hakkında fikir edinmemize yardımcı olur. Şekil 4.5’in sol kısmında, yaklaşık geometrik bir büyüme eğilimi belirtilip Şekil 4.4’deki verileri kullanarak tarihsel lityum metal üretimini sunmaktadır. Şekil 4.5’in sağ kısmında, gelecekteki lityum arz ve talep tahminleri gösterilmektedir. Tarihsel üretimden varsayımlar yapılarak, Vikström vd. tarafından modellenmiştir. Şekil 4.4’te 2020 yılına kadar sağlanan üretim tahmin aralığının altındadır. Destekleme projeksiyonu 2050 yılına kadar uzanmaktadır [128].

Ekonomik teşvik eksikliği ve bugüne kadar gerçekleşen düşük geri dönüşüm oranı ile ilgili sorunlar ele alındığında, geri dönüşüm arz talebi üzerindeki etkiler incelenmektedir.

Eğer gelecekte lityum geri dönüşümü artarsa, Şekil 4.5’de sunulan tahminlere göre gelecekte var olan lityum üzerinde olumlu etki gerçekleşecektir.

Şekil 4.5’te sunulan talep aralığı çeşitli faktörler tarafından genişletilmiştir. İlk olarak, gelecekteki ortalama akü boyutundaki belirsizlik ve aküde lityum yoğunluğunun var olmasıdır. Bu etkenlerin zaman içerisindeki gelişimini, piyasada olan elektrik araç modelleri ile inceleme yapılan çalışmalar, çeşitli akü boyutları ve malzeme yoğunluklarını tartışan çok literatür vardır. Ek olarak hem BEV hem de PHEV’nin gelecekte yapılan satışları fazla spekülasyona uğraması ve literatürde fazla tahminlerin olmasıdır. Tüm bu faktörleri birleştiren elektrikli araç akülerinden gelecek lityum talebi için belirsizliğin açığa çıkmasıdır. Son on yılda otomotiv OEM’lerin BEV araçlarına uzun menzillerle beraber büyük akü donatarak eğilimin gerçekleştiğini gözlemlenmiştir. Bununla beraber, artan malzeme yoğunluğunun hem hücre hem de paket seviye içerisinde akü mühendisliği çalışmasında gelişmeler dengelenmiştir.



Şekil 4.5: Elektrikli araçlar için lityumun tarihsel üretimi, tahmini arz ve tahmini talep karşılaştırılması [128].

Gelecekteki arz ve talep grafiklerini kıyasladığımızda, üretim talebinin hızlı şekilde artmasından dolayı lityum elementinin temini problemlerini ortaya çıkarmakta ve batarya

paketi üretimini sıkıntıya sokmaktadır. Son birkaç yıl içerisinde yapılan Li talebinin hızlı artışı beraberinde lityum kaynaklarının hızlı fiyat artışına neden olmuştur. Gelecekte umulan talebin tahmin aralığı, elde olan arz talep aralığından daha fazladır. Lityum tüketiminde büyüme hızının ileriki yıllarda azalması beklenmektedir ve eğer büyüme önümüzdeki yirmi yılda devam ederse, gelecekteki talebi karşılamak imkânsız hale gelmektedir. Hangi lityum fiyat seviyelerinin geri dönüşümü uygulanabileceği belirlenmiş olmasa da deniz suyu hariç tanımlanmış önemli kaynaklara ek olarak kullanım sonu geri dönüşüm gelecekteki arz talebine faydalı olabilir.

Gelecekte akü başına talep edilen lityum miktarına bağlı olarak belirsizliği azaltmak için elektrikli araçlara yönelik malzeme talebine dayalı olarak analiz yapmak daha mantıklı görülmektedir. Belirlenen lityum kaynaklarının hangi bölümlerinin ekonomik olarak daha avantajlı olduğunu iyi bir şekilde değerlendirmek için lityum üretim potansiyeli analizine gereksinim duyulmaktadır. Literatürde bu adımların atıldığına dair kesin kanıtlar varken uzun kapsamlı değerlendirme, malzeme kullanılabilirliğinin işleyiş üzerindeki etkisi, ekonomik etki hem lityum üretimi hem de geri dönüşüm sırasında genişleme ve elektrik araç için potansiyelin çok daha iyi anlaşılmasını gerektirir.

5. TÜRKİYE'DE LİTYUM İYON VE KURŞUN ASİT ÜRETİM TESİSLERİ

5.1 Aspilsan

Aspilsan, Türkiye'de pil ve batarya teknolojisinde geliştirmek için 2017 yılında Ar-Ge çalışmalarına başlamıştır. Üretimi henüz ülkemizde olmayan Li-ion pil ve batarya üretimi, pil tasarımı, hammadde gibi konularda öncü olabilmek için Türkiye'nin ilk Li-ion pil üretim tesisini kurmaya başlamıştır. Üretilecek hücre, Li-NMC/grafit kimyasını kullanarak 18650 tipinde, 2800 mAh kapasitesinde ve 3,6 V gerilime sahip olması amaçlanmıştır.

Kayseri'de bulunan 25.000 m² kapalı alanı bulunan ve bunun 7600 m² 'si rezerv alana sahip olan 3 bloktan oluşan tesis Aralık 2021 tarihinde tamamlanmıştır. Üretim tesisindeki makinelerin devreye alınması ,altyapıların hazırlanması ve deneme üretiminden sonra Haziran 2022'de ise seri üretime başlanması planlanmaktadır. Tüm lisans ve patent hakları Aspilsan'a ait olan üretim tesisinde ise yıllık 21 milyon 600 bin adet hücre üretilmesi hedeflenmektedir.[129]

5.2 Birikim Pilleri

Birikim pilleri 2005 yılında kurularak müşteri istekleri doğrultusunda pil ve batarya çözümleri konusunda hizmet vermektedir. Kullanılan son teknolojilerle birlikte, Türkiye'de bulunan üretim tesisinde, farklı kimyalarda farklı elektronik cihazlar için ihtiyaç duyulan çözümleri sunmaktadır.

Ar-ge departmanı ile birlikte, Lityum ve Li-ion bataryalar üzerinde çalışmalar yapan firma, performans, çalışma süresi, maliyet gibi bir çok konuda rekabet etmektedir. [130]

Pil puntalama ve batarya grubu üretimi için düzenli olarak çalışılan başlıca alanlar:

*Medikal Cihazlar- (Defibrilatörler, Mikrobicaklar, Implante cihazlar, infuzyon pompaları, cerrahi aletler...)

* Acil Durum Aydınlatma Cihazları- Aydınlatma Bataryaları

* Tracking/Takip Sistemleri- Takip Sistemi Bataryaları (Takograf cihazları, Araç Takip Sistemleri, Elektronik Gişeler, Data Kaydedici Cihazlar, Otomatlar...)

*POS ve El Terminali Cihazları- GSM Pos Terminali Bataryaları, El Terminali Bataryaları

*Hobby RC Cihazları- Model Araç Bataryaları (Drone, Model Helikopter, Model Araçlar)

*Ölçüm Cihazları- Sayaç Okuma Cihazı Bataryaları, Sayaç Bataryaları (Elektrik, Gaz, Su sayaçları, Isıtma cihazları)

*Telsizler ve Kablosuz İletişim Cihazları- Telsiz Bataryaları, Telsiz Telefon Bataryaları, GPRS Bataryaları

5.3 Aküsan

Aküsan A.Ş 1977 yılında küçük bir atölyede başlayan ticari faaliyetine,yaklaşık 20.000 m²'lik alanda hizmet vermeye devam etmektedir.

1981 yılında Ford Traktör Fabrikasının tedarikçiliğine ebonit kutulu ziftli akümülatör ile başlamıştır.1983 yılında üretim tesisini Doğu Sanayi bölgesine taşıyarak önemli bir adım atmış1986 yılında ise bakımı daha az plastik kutulu akü üretimiyle sektörde adını duyurmaya başlamıştır.

Kuruluşundan itibaren prensiplerinden ödün vermeyerek,1988 yılında aldığı kalite sertifikaları belgeleriyle tescillenmiş bir akü üreticisi haline gelmiştir.

Yıllık yaklaşık 500.000 akü üretim kapasitesinde olan Aküsan A.Ş sektörde üretime devam etmektedir. [131].

5.4 Mutlu Akü

Ticari faaliyetlerine 1945 yılında başlayan firma, 1955 yılında akü üretimine başlamıştır. Yaklaşık 230 dönümlük arazi üzerinde, yılda 6 milyon akü üretim kapasiteli bir tesiste üretim faaliyetlerine devam etmektedir.

Otomotiv, endüstri gibi birçok önemli alanda çözümler sunarak, hem Türkiye'de hem de küresel pazarlarda hizmet vererek ülkemizi temsil etmektedir.

Otomotiv sektörünün temel taşlarından olan IATF 16949 sertifikası ile sektörün beklentilerini karşılayarak bir çok önemli otomotiv üreticisine orijinal ekipman üreticisi olarak tercih edilmektedir. Ülkemizde üretilen çoğu araçta Mutlu Akü kullanılmaktadır.

Birçok enerji, kalite ve çevre sertifikaları bulunan tesiste Ar-ge bölümü ile birlikte son teknolojik çözümleri takip etmekte ve geliştirmektedir. Kütahya Gediz’de bulunan 40.000 ton kapasiteli geri dönüşüm tesisiyle de sürdürülebilirlik konusuna da katkı sağlamaktadır.[132]

5.5 Yiğit Akü

1976 yılında Ankara’da kurulan, yaklaşık 40.000 ‘lik üretim tesisine sahip olan Yiğit Akü, yıllık 7 milyon akü üretim kapasitesiyle sektöre hizmet vermektedir.

Dünya standartlarına uygun birçok kalite belgesiyle, 100’den fazla ülkeye otomotiv, endüstriyel ve savunma sanayisi gibi birçok alanda ihracat yaparak ülkemizi temsil etmektedir.

Ar-ge ve inovasyon ürünü olarak geliştirilen Li-ion batarya Distalong’u ise Türkiye pazarına sunuldu. Elektrikli araçlara özel olarak üretilen bu batarya, 12-400V arasında projeye özel olarak üretilebiliyor. Ağırlık ve boyutlarına oranla yüksek enerji sağlayan, yüksek enerji ve verimlilik, hızlı şarj gibi konularda Li-ion bataryalar kurşun asit bataryalara göre avantaj sağlamaktadır. [133]

5.6 Kontrolmatik

Kendi geliştirdiği prizmatik lityum demir fosfat (LFP) pillerin üretimine Ankara’da kurulacak fabrikada geliştirmeyi planlayan Kontrolmatik firması, yaklaşık 180 milyon dolar yatırımla beraber yıllık üretim kapasitesini 250 MWh olarak hedeflemektedir.

Polatlı Organize Sanayi’ndeki 97 bin metrekarelik alanda ülkemizin ilk LFP üretim tesislerinden biri olacaktır. Tedarik konusunda sıkıntı yaşanan hammaddeler yerine LFP kullanarak farklı bir çözüm anlayışına gitmektedir. Bu sayede maliyetleri düşürerek elektrikli araç piyasasında rekabet etmeyi hedeflemektedir. [134]

5.7 Bursa-Gemlik Batarya Fabrikası

Çinli firma olan Farasis’le birlikte, Gemlik’te yaklaşık 30 milyar lira yatırım bedeliyle üretilmesi hedeflenen süper batarya, ağırlık, maliyet ve performans konusunda avantajlı olan bu bataryalar Mercedes gibi önemli otomotiv üreticilerinin yeni modellerinde kullanılması beklenmektedir.

Yaklaşık 8 dakikalık şarjla 250 km menzil sunan ve uzun ömür süresi beklenen batarya Gemlik’te üretilecek ve 2025 yılından itibaren pazara sunulacaktır. Bu bataryada anot malzemesi olarak grafit yerine silikon kullanılarak düşük ağırlıklarla yüksek performans

elde edilmesi amaçlanmıştır. Kullanım ömrünün ise 1.5 milyon kilometreyi aşması beklenmektedir.

TOGG ile Farasis firması Siro adlı şirketi kurarak otomotiv yanında yenilenebilir enerji, şarj istasyonları gibi farklı konularda da çözüm sunarak Avrupa'nın önemli üreticileri arasına girmesini hedeflemektedir. [135]

5.8 Vestel Pil Fabrikası

Yerli otomobilde de kullanılabilir olan nikel-kobalt piller için Manisa'nın Gödes ilçesinde 600 milyon dolarlık yatırımla üretim tesisi kuran Vestel, otomotiv, kimya, gemi, uçak sanayisi gibi birçok alan için nikel üretecektir. Türkiye'deki ilk nikel-kobalt işletme tesisi olan, Ar-ge ve yeni teknolojilere dayalı, elektrikli otomobil bataryaları için kullanılan nikeli değerli ürün haline getirerek ülke ekonomisine fayda sağlayan bir tesis olmuştur.

Elektrikli otomobillerde farklı pil teknolojisi kullanılması durumunda, otomotiv sektörü için pil üretmeye katkı sağlamayacaktır. 2015-2023 yılları arasında toplam 860 milyon dolar değerinde yatırımla birlikte 20 bin ton nikel metal üretim kapasitesine ulaşacaktır. [137]

5.9 Ford Otosan Batarya Montaj Fabrikası

Türkiye'de yapılacak 32 milyar liralık yatırımla üretime başlanması beklenen tesis, yıllık yaklaşık 30-45 GWh üretim kapasitesine sahip olması hedeflenmektedir. Diğer otomotiv firmalarında olduğu gibi Ford Otosan'ın da son yıllardaki elektrikli araç üretimini hızlandırması bu fabrikanın kurulması için yeterli sebeplerdendir. Ford Avrupa'nın üreteceği elektrikli araçlar için ihtiyacı olan bataryaları bu fabrikadan sağlaması beklenmektedir.

2025 yılında üretime girmesi beklenen fabrikada üretilecek bataryalar yüksek nikel NCM(nikel,kobalt,manganez) batarya olacaktır. 2025 yılında yıllık 220 GWh ve 2030 yılında yıllık 500 GWh üretim kapasitesine ulaşması beklenmektedir[138].



Şekil 5.1: Lityum-iyon üretim tesisi [129].



Şekil 5.2: Lityum-iyon üretim tesisi [129].

6. SONUÇ VE YORUM

Elektrik enerjisini depolamada aküler, en önemli ve verimli yollardan biri olarak kabul edilir. Bu akülerde kullanılan farklı pil kimyaları vardır. Kurşun aküler hem otomotiv hem de endüstriyel uygulamalarda enerji depolamak için kullanılmış ancak enerji depolama için kullanılan Li-ion, sodyum-kükürt aküleri gibi gelişen teknolojiler yerini almaya başlamıştır. Kurşun piller uzun döngü ve raf ömrüne sahiptir ve son yıllarda, pilin tam şarjlı duruma getirilmediği koşullarda, 20 yıl öncesine kıyasla çok daha uzun döngü ömürlerine sahip olacak şekilde geliştirilmiştir. Li-iyon pillerin enerji yoğunluğu ve özgül enerji açısından avantajları bulunur. Li-ion ve diğer pil türlerinin teknik özellikleri kurşun pillerle karşılaştırılmaktadır. Kurşun en verimli şekilde geri dönüştürülen metaldir ve kurşun piller, %99'undan fazlasının Avrupa ve ABD'de toplanıp geri dönüştürüldüğü, neredeyse tamamen geri dönüştürülen tek pil enerji depolama sistemidir.

Lityum-iyon pillerin otomobillere son zamanlarda kullanımının artması elektrikli araçların tasarımında ve ticarileştirilmesinde önemli değişikliklere neden olmuştur. Herhangi bir pil teknolojisinin başarılı bir şekilde uygulanması, araç tahrikinin ve elektrikli özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir. Taşıma alanının gereksinimleri anlaşıldıktan sonra, lityum iyon içeren pil paketi çözümlerini uygun şekilde boyutlandırmak ve tasarlamak mümkündür. Ticari elektrikli araçlarda (EV'ler) son zamanlarda yeniden canlanma, lityum iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğunun mümkün kıldığı elektrik menzilineki önemli gelişmeler sayesinde mümkün olmuştur. EV için yeni pillerin geliştirilmesi lityum iyon batarya sistemlerinin gravimetrik ve hacimsel enerji yoğunluklarının daha da iyileştirilmesi ile mümkün hale gelecektir. Li-iyon batarya sistemleri Güç yoğunluklarını koruyarak ve maliyetlerini en aza indirerek daha geniş voltaj aralığında çalışan yüksek enerji yoğunluklu PHEV araçları için gelecekteki araştırma ve geliştirme çabalarındaki en önemli hedeflerindedir. Hibrit elektrikli araçlar (HEV'ler) ve stop start (S/S) hibritlerinin her ikisinin de kurşun asit ve nikel-metal hidrit gibi rakip kimyalarla uzun bir ticarileştirme geçmişi vardır. Bu uygulamalar için, lityum iyon bataryalarda eşdeğer enerji ve güç gereksinimleri için ağırlık ve hacimde bir gelişme sağlamaktadır. Bu uygulamalar için

lityum iyonun gelecekteki başarısı, rakip kimyalara göre enerji ve güç performansı avantajlarını korurken maliyetleri düşürme çabalarına bağlı olacağı görülmektedir.

Pillerin maliyetinin düşmesi ile birlikte elektrikli araç (EV) politikası, günümüzde, belirli EV türlerinin maliyetine ve kullanılan şarj altyapısına nispeten daha az dikkat ederek, binek otomobillerin elektrifikasyonunu hızlandırmaya odaklanmaktadır. Uzun menzilli akülü elektrikli araçlara (BEV'ler) yönelik güçlü bir önyargıya sahip EV politikasının orta vadede daha yüksek toplam maliyetlere yol açma risklerini göstermektedir. Maliyetler muhtemelen hükümetlerin gerekli teşvikleri sürdürme ve otomotiv orijinal ekipman üreticilerinin pil maliyeti yeterince düşene kadar EV'leri dahili olarak sübvansetme kabiliyetini aşabilir. Araştırmalar, tüm binek araçlar üzerinde farklı EV ve altyapı karışımlarının artan maliyetinin oldukça farklı olabileceğini ve dengeli bir BEV karışımını teşvik etmenin önemli olduğunu göstermektedir. Plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV'ler), binek otomobillerin elektrifikasyonunu daha düşük riskli, daha düşük maliyetli bir yola sokabilir. Birleşik Krallık ve Kaliforniya'daki EV politikasını incelediğimizde, bunun genellikle BEV'ler ve PHEV'lerin dengeli karışımlarını elde etmekle uyumsuz olmadığını görülmektedir; ancak maliyet ve teknoloji geliştirme riskine daha fazla dikkat edilirse daha iyi tasarımlar ortaya çıkabilir.

EV pil paketinin güvenliğini ve güvenilirliğini etkileyen mekanik tasarım öğeleri tartışılmaktadır. Mekanik titreşim, darbe enerjisi ve ortam sıcaklığındaki değişimler gibi kuvvetler, farklı arabirimler aracılığıyla pil takımıyla etkileşime girer. Pil paketinin güvenli ve güvenilir çalışması için bu etkileşimlerin kontrol edilmesi gerekir. Pil hücresi hareketini kısıtlamanın, hepsine karşı daha yüksek derecede koruma elde etmek için başarılı stratejilerden biri olduğu tespit edilmiş ve bu amaçla kullanılacak mekanizmalar sunulmuştur. EV pil takımının çarpma dayanıklılığını ve titreşim yalıtımını artırmak için diğer mekanik tasarım çözümleri de tartışılmıştır. Pratik bir tasarım seçeneği, düşük voltajda daha küçük paketler üreterek paketlerin çalışmasını ve taşınmasını çok daha güvenli hale getirmiştir. Daha küçük bireysel pil takımlarının kullanılması, yalnızca kullanıcı güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda prototip üretimi ve paketlerin test edilmesi açısından da faydalar sağlar. Artan paket sayısı, bir sistem düzeyinde daha fazla karmaşıklık anlamına gelir ve bu da burada belirtilen avantajlarla birlikte ağır bir şekilde tartışılmalıdır.

Sonuç olarak bu çalışmada kurşun asit batarya sistemleri ile Li-iyon batarya sistemlerinin temel özellikleri incelenerek bir araştırma ortaya konulmuştur. Bu kapsamda kurşun asit akülerin yaklaşık 100 yıldır kullanılması ve stabil olmaları yakın gelecekte de varlıklarını devam ettireceklerini göstermektedir. Bu bağlamda Li-iyon ile çalıştırılan

elektrikli araçlar geliştirilse de kurşun asit aküler elektrikli araçlarda pasif elektriksel gücün sağlanmasında kullanılacakları açıktır. Kurşun asit akülerin en temel problemleri enerji yoğunlukların hem ağırlık başına hemde hacim başına düşük olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu duruma ek olarak çalışma voltajlarında Li-iyon bataryalara göre düşük olması güç yoğunluklarının da düşük olması anlamına gelmektedir.

Li-iyon pil teknolojisi 1990'lı yıllardan günümüze kadar hızla gelişmiş ve son yıllardaki elektrikli ve hibrit araçların günlük hayatımıza yer alması ile birlikte daha da önem kazanmıştır. Bu bağlamda Li-iyon bataryaların elektrikli araçlarda kullanılma potansiyelleri mühendislik tasarım parametrelerinin incelenmesi ve uygulanması ile ilgili temel kavramlar incelenerek ortaya çıkarılmıştır.

Çalışmanın son kısmında ise ülkemizde var olan önemi kurşun asit fabrikaları incelenerek değerlendirilmiş ve Li-iyon batarya fabrikası çalışmaları ortaya konulmuştur. Bu amaçla dünyadaki hızla batarya çalışmalarının artması ile birlikte ülkemizde de yatırımların hızlı bir şekilde arttığı ortaya çıkmaktadır. Yapılan yatırımlar ve faaliyet alanları incelendiğinde ise ülke olarak batarya sektöründe dünyadaki yerini almak için birçok faaliyet gerçekleştiği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **O. Palizban, K. Kauhaniemi**, *J. Energy Storage* 6 (2016) 248–259.
- [2] **X. Luo, J. Wang, M. Dooner**, *Appl. Energy* 137 (2015) 511–536.
- [3] **X. Tan, Q. Li, H. Wang**, *J. Electr. Power Energy Syst.* 44 (2013) 179–191.
- [4] **H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding**, *Prog. Nat. Sci.* 19 (2009) 291–312.
- [5] **H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron**, *Renew. Sust. Energy Rev.* 12 (2008) 1221–1250.
- [6] **P.J. Hall, E.J. Bain**, *Energy Policy* 36 (2008) 4352–4355.
- [7] **C. Pillot**, The rechargeable battery market and main trends 2014–2025, 15th European Lead Battery Conference, Valletta Malta, 2016.
- [8] **C.D. Parker, J. Garche**, in: D.A.J. Rand, P.T. Moseley, J. Garche, C.D. Parker (Eds.), *Battery Energy Storage Systems for Power Supply Networks*, in *ValveRegulated Lead-Acid Batteries*, Elsevier, 2004, pp. 295–326.
- [9] **D.A.J. Rand, P.T. Moseley**, in: P.T. Moseley, J. Garche (Eds.), *Energy Storage with Lead-Acid Batteries*, in *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, Elsevier, 2015, pp. 201–222.
- [10] **D. Pavlov**, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology*, Elsevier, 2011.
- [11] **P.T. Moseley, D.A.J. Rand, K. Peters**, *J. Power Sources* 295 (2015) 268–274.
- [12] **A. Jaiswal, S.C. Chalasani**, *J. Energy Storage* 1 (2015) 15–21.
- [13] **W.-L. Zhang, J. Yin, Z.-Q. Lin, J. Shi, C. Wang, D.-B. Liu, Y. Wang, J.-P. Bao, H.-B. Lin**, *J. Power Sources* 342 (2017) 183–191.
- [14] **Url-1** <www.fireflyenergy.com>
- [15] **J. Lannelongue, M. Cugnet, N. Guillet, A. Kirchev**, *J. Power Sources*, 352 (2017) 194–207.
- [16] **S. Christie, Y.S. Wong, G. Titelman and J. Abrahamson**, US Patent 9 543 589, 10 January 2017
- [17] **Y.M. Volkovich, T.M. Serdyuk**, *Russ. J. Electrochem* 38 (2002) 935.
- [18] **E. Buiel, E. Dickinson, A. Stoermer**, S. Schaeck, Dynamic charge acceptance of lead-Acid batteries in microhybrid board net, 12th European Lead Battery Conference, Istanbul, 2010.
- [19] **Url-2** <www.axionpower.com>
- [20] **L.T. Lam, N.P., Haigh, C.G. Phyland and D.A.J. Rand**, US Patent 8 232 006, 31 July 2012.
- [21] **A. Cooper, J. Furukawa, L.T. Lam, M. Kellaway**, *J. Power Sources* 188 (2009) 58.

- [22]. **Dynamometer Drive Schedules**. EPA. [Online] [Cited: January 12, 2017.] <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>
- [23] INL. Battery Test Manual for 12 Volt Start/Stop Vehicles. Idaho Falls: s.n., 2015. INL/EXT-12-26503
- [24] **G. Pistoia, Boryann Liaw**, Behavior of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles
- [25] **T. Duong**, Direction for Energy Storage R&D in the Vehicle Technologies Program (Scalable Energy Storage Beyond Li-Ion, Oak Ridge, 2010)
- [26] **USCAR**: U.S. Advanced Battery Consortium LLC. USCAR. [Online] [Cited: January 13, 2017] <http://www.uscar.org/guest/teams/12/U-S-Advanced-Battery-Consortium-LLC>
- [27] **EUCAR**: European Council for Automotive Research. EUCAR. [Online] [Cited: January 13, 2017. <http://www.eucar.be/>
- [28] **NEDO**. New Energy and Industrial Technology Development Organization. NEDO. [Online] [Cited: January 13, 2017] <http://www.nedo.go.jp/english/index.html>
- [29] Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. Idaho Falls: s.n., 2008. INL/EXT-14-32849
- [30] **NEDO**. Secondary Battery Technology Development Roadmap. 2010
- [31] **HELIOS** European Project and EUCAR/VDA Research Roadmaps. A. Teysot, EVS24, Stavanger, 2009
- [32] ISO. Electrically Propelled Road Vehicles—Dimensions and Designation of Secondary Lithium-Ion Cells. s.l.: ISO, 2012. ISO/IEC PAS 16898
- [33] UNFCCC. Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change and Call to Action. Electrifying Sustainable Transport. 2015. Available at: <http://newsroom.unfccc.int/lpaa/transport/the-paris-declaration-on-electro-mobility-and-climate-change-and-call-to-action/>. Accessed 25 Sept 2017
- [34] **L. Ahmadi, M. Fowler, S.B. Young, R.A. Fraser, B. Gaffney, S.B. Walker**, Sustain. Energy Technol. Assess. 8, 9 (2014)
- [35] **C. Jhu, Y. Wang, C. Wen, C. Shu**, Appl. Energy 100, 127 (2012)
- [36] **C. Julien**, Design Considerations for Lithium Batteries, in Materials for Lithium-Ion Batteries, ed. by C. Julien, Z. Stoyanov (Springer, Berlin, 2000), p. 1
- [37] **B. Diouf, R. Pode**, Renew. Energy 76, 375 (2015)
- [38] **D. Miranda, C. Costa, S. Lanceros-Mendez, J. Electroanal.** Chem. 739, 97 (2015)
- [39] **N. Alias, A.A. Mohamad, J.** Power Sour. 274, 237 (2015)
- [40] **H. Han, H. Park, K.C. Kil, Y. Jeon, Y. Ko, C. Lee, M. Kim, C. Cho, K. Kim, U. Paik**, Electrochim. Acta 166, 367 (2015)

- [41] **J. Lu, Y. Chang, B. Song, H. Xia, J. Yang, K.S. Lee, L. Lu, J.** Power Sour. 271, 604 (2014)
- [42]. **X. Sun, X. Zhang, B. Huang, H. Zhang, D. Zhang, Y. Ma, J.** Power Sour. 243, 361 (2013)
- [43] **G. Wang, Z. Ma, G. Shao, L. Kong, W. Gao, J.** Power Sour. 291, 209 (2015)
- [44] **M. Wu, M. Liu, G. Long, K. Wan, Z. Liang, T.S. Zhao,** Appl. Energy 136, 576 (2014)
- [45] **B. Nykvist, M. Nilsson,** Nat. Clim. Change 5, 329 (2015)
- [46] **E.V. Tech,** EV Batteries- Falling Prices for a Clean Air Future (2015). Available at: <http://myelectriccar.com.au2015>. Accessed 11 Aug 2017
- [47] **C. Arbizzani, G. Gabrielli, M. Mastragostino,** J. Power Sour. 196, 4801 (2011)
- [48] **C.L. Campion, W. Li, B.L. Lucht,** J. Electrochem. Soc. 152, A2327 (2005)
- [49] **D.H. Doughty, P.C. Butler, R.G. Jungst, E.P. Roth,** J. Power Sour. 110, 357 (2002)
- [50] **C. Jhu, Y. Wang, C. Wen, C. Chiang, C. Shu,** J. Therm. Anal. Calorim. 106, 159 (2011)
- [51] **G. Kim, A. Pesaran, R. Spotnitz,** J. Power Sour. 170, 476 (2007)
- [52] **J. Lamb, C.J. Orendorff, L.A.M. Steele, S.W. Spangler,** J. Power Sour. 283, 517 (2015) Mechanical Design and Packaging of Battery Packs ... 199
- [53] **N.S. Spinner, C.R. Field, M.H. Hammond, B.A. Williams, K.M. Myers, A.L. Lubrano,**
S.L. Rose-Pehrsson, S.G. Tuttle, J. Power Sour. 279, 713 (2015)
- [54] **S. Arora, W. Shen, A. Kapoor,** Designing a Robust Battery Pack for Electric Vehicles Using a Modified Parameter Diagram, SAE Technical Paper 2015-01-0041, 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-01-0041>
- [55] **Z. Rao, S. Wang, M. Wu, Z. Lin, F. Li,** Energy Convers. Manage. 65, 92 (2013)
- [56] **N. Sato,** J. Power Sour. 99, 70 (2001)
- [57] **J.M. Hooper, J. Marco,** J. Power Sour. 245, 510 (2014)
- [58] **S. Arora, W. Shen, A. Kapoor,** Renew. Sust. Energy Rev. 60, 1319 (2016)
- [59] **L.H. Saw, Y. Ye, A.A. Tay, J. Clean. Prod.** 113, 1032 (2016)
- [60] **B. Coleman, J. Ostanek, J. Heinzl,** Appl. Energy 180, 14 (2016)
- [61] **J.A. Jeevarajan,** E.C. Darcy, Can Cell to Cell Thermal Runaway Propagation be Prevented in a Li-ion Battery Module? JSC-CN-32020 (2014)
- [62] **J. Jeevarajan, C. Lopez, J. Oriekwu,** Preventing Cell-to-Cell Thermal Runaway in Lithium-Ion Battery Modules. NASA Tech. Briefs (2014)

- [63] **S. Al Hallaj, H. Maleki, J. Hong, J.R. Selman**, *J. Power Sour.* 83, 1 (1999)
- [64] **S.C. Levy**, *J. Power Sour.* 68, 75 (1997)
- [65] **P. Frey, D. Grace**, Battery Pack Exhaust Nozzle Utilizing an SMA Seal Retainer (Tesla Motors Inc, USA, 2013)
- [66] **W.A. Hermann**, Rigid Cell Separator for Minimizing Thermal Runaway Propagation within a Battery Pack (Tesla Motors Inc., USA, 2012)
- [67] **D. Andrea**, Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs, Artech House (2010)
- [68] GM Announce Structural and Battery Enhancements for Chevy Volt. 2012. Available at: <http://www.electric-vehiclenews.com/2012/01/gm-announce-structural-and-battery.html>. Accessed 25 Aug 2017
- [69] **A. Marino**, Audi E-Tron Sportback Concept Architecture of E-mobility. 2017. Available at: <https://www.driveandride.com/uk/audi-e-tron-sportback-concept/>. Accessed 25 Aug 2017
- [70] **Y. Xia, T. Wierzbicki, E. Sahraei, X. Zhang**, *J. Power Sour.* 267, 78 (2014)
- [71] **J. Kukreja, T. Nguyen, T. Siegmund, W. Chen, W. Tsutsui, K. Balakrishnan, H. Liao, N. Parab**, *Extreme Mech. Lett.* 9, 371 (2016)
- [72] **A. Charbonneau, M. Burgess, V. Attaluri, H.L. Gadhiya, A.P. Clarke, P.D. Rawlinson, R.D. Sumpf, B.P. Edwards**, System for Absorbing and Distributing Side Impact Energy Utilizing an Integrated Battery Pack and Side Sill Assembly (Tesla Motors Inc., USA, 2014)
- [73] **M. Lucas**, Structural Battery Duct Assembly. U.S. Patent 8,276,696 (2012)
- [74] **K. Watanabe, T. Abe, T. Saito, O. Shimamura, K. Hosaka, H. Sato, H. Horie**, Battery Structure, Assembled Battery, and Vehicle Mounting These Thereon. U.S. Patent 8,124,276 B2 (2012)
- [75] **S. Zhou, C.C. Husted, F.A. Benjamin**, Battery Pack Arrangements (General Motors Co., USA, 2009)
- [76] **M. Iwasa, S. Ogata, H. Kadota, T. Hashimura, N. Mori**, Vehicle Battery Mounting Structure (Nissan Motor Co., USA, 2013)
- [77] **W. Tahil**, The Trouble with Lithium: Implications of Future PHEV Production for Lithium demand. Meridian International Research. Martainville, France (2007)
- [78] **W. Tahil**, The Trouble with Lithium 2: Under the Microscope, Meridian International Research. Martainville, France (2008)
- [79] **J. Speirs et al.**, *Renew. Sust. Energy Rev.* 35, 183 (2014)
- [80] **A. Yaksic, J.E. Tilton**, *Resour. Policy* 34, 185 (2009)

- [81] **K.R. Evans**, The future of electric vehicles: setting the record straight on lithium availability. *J. Energ. Security* (2009) Available from: http://www.ensec.org/index.php?option=com_content&view=article&id=213
- [82] **L. Gaines**, P.A. Nelson, *Lithium-Ion Batteries: Examining Material Demand and Recycling Issues*. Argonne National Laboratory. Argonne, IL, USA (2009)
- [83] P.W. Gruber et al., *J. Ind. Ecol.* 15, 760 (2011)
- [84] **D. Kushnir**, B.A. Sandén, *Resour. Policy* 37, 93 (2012)
- [85] **J. Neubauer**, The Impact of Lithium Availability on Vehicle Electrification, Plug-In 2011 Conference. National Renewable Energy Laboratory. Raleigh, NC, USA
- [86] **G. Martin** et al., *Energy Storage Mater.* 6, 171 (2017)
- [87] **G. Angerer** et al., Raw materials for emerging technologies: A report commissioned by the German Federal Ministry of Economics and Technology (English Summary). Fraunhofer ISI 2009/pri09-02.php
- [88] **Dundee Capital Markets (DCM)**, *Lithium—Hype or Substance: A look at Lithium Demand and Supply* (Dundee Securities Corporation: Toronto, Canada, 2009)
- [89] **International Energy Agency (IEA)**, *Technology Roadmap: Electric and Plug-In Electric Hybrid Vehicles*. Paris, France (2011) The Future of Lithium Availability for Electric ... 55
- [90] **S. Marcus** et al., *A cleantech Resource Crisis: Will Rare Earth and Lithium Availability Thwart Cleantech Growth?* (Cleantech Insight, Cleantech Group LLC, 2010)
- [91]. **McKinsey and Company**, *Roads Toward a Low-Carbon Future: Reducing CO2 Emissions from Passenger Vehicles in the Global Road Transportation System*. New York, NY (2009)
- [92] BP Energy Outlook, 2017 Edition. London, UK
- [93] **International Energy Agency (IEA)**, *World Energy Outlook*. Paris, France (2016)
- [94] **International Energy Agency (IEA)**, *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*. Paris, France
- [95] **OPEC**, *World Oil Outlook* (Vienna, Austria, 2016)
- [96] **Energy Perspectives Statoil**, *Long-Term Macro and Market Outlook* (Stavanger, Norway, (2016)
- [97] **International Energy Agency (IEA)**, *Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios& Strategies to 2050*. Paris, France
- [98]**M. Rosenberg, E. Garcia**, *Known Lithium Deposits Can Cover Electric Car Boom*. Reuters, Feb. 11, 2010 [15/11/2011]
- [99] **B. Nykvist, M. Nilsson**, *Nat. Clim. Change* 5, 329 (2015)

- [100] CAR Magazine, 2017. [November 2017]; Available from: <http://www.carmagazine.co.uk/>
- [101] Green Car Congress, 2017. [November 2017]; Available from: <http://www.greencarcongress.com/>
- [102] **D. Kushnir**, B.A. Sandén, *Resour. Policy* 37, 93 (2012)
- [103] **I. Rade**, B.A. Andersson, *J. Power Sources* 93, 55 (2001)
- [104] **W. Tahil**, How Much Lithium does a Li-ion EV Battery Really Need? Meridian International Research. Martainville, France (2010)
- [105] **T. Engel**, Lithium bewegt die Welt. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. [International Solar Energy Society, German Section], 2007. [15/1/2012]; Available from: http://www.dgs.de/164.0.html?&tx_ttnews%5Btt_news%5D=1330&cHash=5cf989b243
- [106] **M. Engel-Bader**, Chemetall Corporate Presentation: Lithium and the National Economy (Seminar Sociedad Nacional de Minería, Santiago de Chile, 2010)
- [107] **M. Armand**, J.M. Tarascon, *Nature* 451, 652 (2008)
- [108] **A.G. Ritchie**, *J. Power Sources* 136, 285 (2004)
- [109] **E. Peled** et al., *J. Power Sources* 196, 6835 (2011)
- [110] **G.M. Clarke**, P.W. Harben, Lithium Availability Wallmap (LAWM) (2009)
- [111] **C. Candelise**, J. Speirs, R. Gross, *Renew. Sust. Energy Rev.* 15, 4972 (2011)
- [112] C. Hurst, China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? Institute for the Analysis of Global Security (IAGS). Fort Leavenworth, KS, USA, (2010)
- [113] J. Speirs et al., Materials Availability: Potential Constraints to the Future Low-Carbon Economy. Working Paper II: Batteries, Magnets and Materials. UK Energy Research Centre. London, UK (2013)
- [114] J. Speirs et al., Materials Availability: Potential Constraints to the Future Low-Carbon Economy—Working Paper I: A Thin-Film PV Case Study. UK Energy Research Centre. London, UK, 2011
- [115] **U.S. Geological Survey (USGS)**, Mineral Commodity Summaries 2017. U.S. Department of Interior. Reston, VA, USA
- [116] **T.D. Kelly**, J.A. Ober, B.W. Jaskula, Lithium Statistics. U.S. Geological Survey. Reston, VA, USA (2017)
- [117] **D.E. Garrett**, Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride (Academic Press, Cambridge, MA, 2004)
- [118] **K. Evans**, **An Abundance of Lithium**, 2008. [1/12/2011]; Available from: http://www.worldlithium.com/An_Abundance_of_Lithium_1_files/An%20Abundance%20of%20Lithium.pdf

- [119] **K. Evans**, An Abundance of Lithium: Part Two, 2008. [1/12/2011]; Available from: http://www.evworld.com/library/KEvans_LithiumAbundance_pt2.pdf
- [120] **United Nations Environment Programme (UNEP)**, Recycling Rates of Metals: A Status Report, in Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, 2011 56 J. Speirs and M. Contestabile
- [121] **European Parliament**, Directive 2006/66/EC on Batteries and Accumulators and Waste Batteries and Accumulators (Belgium, Brussels, 2006)
- [122] **M. Buchert**, D. Schüler, D. Bleher, Critical Metals for Sustainable Technologies and their Recycling Potential. United Nations Environment Programme (UNEP) and Oeko-Institut. Nairobi, Kenya (2009)
- [123] **M. Contestabile**, S. Panero, B. Scrosati, J. Power Sources 83, 75 (1999)
- [124] **A.M. Bernardes**, D.C.R. Espinosa, J.A.S. Tenório, J. Power Sources 130, 291 (2004)
- [125] **K. Kotaich**, S.E. Sloop, Recycling: Lithium and Nickel–Metal Hydride Batteries, in Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, J. Garche, Ed., 2009, p. 188, Elsevier. Amsterdam, Netherlands
- [126] **E.R. Anderson**, Sustainable Lithium Supplies through 2020 in the Face of Sustainable Market Growth, in: 3rd Lithium Supply & Markets Conference. TRUGroup. Toronto, Canada (2011)
- [127] **A. Ebensperger**, P. Maxwell, C. Moscoso, Resour. Policy 30, 218 (2005)
- [128] **H. Vikström**, S. Davidsson, M. Höök, App. Energy 110, 252 (2013)
- [129] **Url-4** <<https://www.aspilsan.com/kurumsal/hakkimizda/>>
- [130] **Url-5** <<https://www.birikimpilleri.com/hakkimizda/>>
- [131] **Url-6** <<https://www.akusan.com/Hakkimizda>>
- [132] **Url-7** <<https://www.mutlu.com.tr/hakkimizda>>
- [133] **Url-8** <<https://www.yigitaku.com/hakkimizda/>>
- [134] **Url-9** <<https://www.dolubatarya.com/haber/kontrolmatik-lityum-pil-fabrika-detaylari>>
- [135] **Url-10** <<https://www.star.com.tr/ekonomi/gemlik-super-bataryanin-uretim-merkezi-olacak-haber-1711684/>>
- [136] **Url-11** <<https://www.fordotosan.com.tr/tr/medya/basin-kitleri/ford-otosan-turkiyenin-ilk-batarya-montaj-fabrikasini-kurmak-icin-calismalara-basladi>>
- [137] **Url-12** <<https://donanimgunlugu.com/vestel-araba-fabrika-kurdu-149895>>
- [138] **Url-13** <<https://tr.motor1.com/news/594536/ford-otosan-batarya-fabrikasi-kuruyor/>>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Gürkan Gündüz

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Şeyh Edebalı Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2017-2021 Çalık Denim, Elektrik bakım mühendisi olarak çalıştı.
- 2021- Federal Mogul, Elektronik bakım mühendisi olarak çalışıyor.