

**ELEKTRİKLİ ARAÇ ALÜMİNYUM BATARYA
KUTUSUNUN DİNAMİK ANALİZİ VE TASARIM
PARAMETRELERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Yalçın ŞENSOY



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇ ALÜMİNYUM BATARYA KUTUSUNUN DİNAMİK
ANALİZİ VE TASARIM PARAMETRELERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Yalçın ŞENSOY
0000-0003-3989-1763

Doç. Dr. Sevda TELLİ ÇETİN
0000-0002-3281-9112
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇ ALÜMİNYUM BATARYA KUTUSUNUN DİNAMİK ANALİZİ VE TASARIM PARAMETRELERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Yalçın ŞENSOY

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sevda TELLİ ÇETİN

Sürdürülebilirlik prensibi ile iklim değişikliğini azaltma taahhütleri çerçevesinde teknolojik gelişmeler ve yeniliklerle birçok alanda değişim ve gelişim yaşanmaktadır. Otomotiv sektörü de bir dönüşüm geçirmekte ve geleneksel içten yanmalı araçlardan hibrit ve tam elektrikli araç üretimi ve kullanımına doğru geçilmektedir. İçten yanmalı araçlar ve alt sistemleri için regülasyonlar oldukça gelişmişken elektrikli araç ve alt sistemleri için regülasyonlar ve firmalar tarafından oluşturulan özel isterler oluşturulmaya, tartışılmaya ve geliştirilmeye devam etmektedir.

Elektrikli araçların en önemli sistemlerinden birisi ise batarya paketleridir. Batarya paketi için mekaniksel, elektriksel, çevresel ve kimyasal gereklilikler bulunmaktadır. Bir sistem olarak batarya paketi, depoladığı enerji ve ağırlığı ile araç menzili ve araç dinamiklerini etkilemektedir. Hafif ve kompakt bir batarya paketi, tercih edilen bir elektrikli araç oluşturmak için önemli bir parametredir. Batarya kutusu ise batarya paketinin konstrüksiyonunu oluşturur. Çevrecilik, hafiflik ve özgül dayanım açısından öne çıkan alüminyum malzemeler batarya paketlerinde kullanılmakta ve kullanımı artarak devam etmektedir. Gereklilikleri sağlayan nihai kullanılabilir ürün ortaya çıkmadan önce mühendislik problemlerinden dolayı oluşabilecek tasarım iyileştirme, prototip imalatı ve test maliyetlerini azaltmak amacıyla tasarımların sanal ortamda test edilmesini imkân sağlayan sonlu elemanlar analizleri günümüzde havacılık uzay otomotiv ve inşaat gibi birçok sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Batarya paketini koruyan ve mekanik dayanımını oluşturan üst kapak, alt kapak, iç profiller ve dış profiller batarya kutusunun temel yapısal bileşenleridir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizleri ile batarya kutusunu oluşturan temel yapısal bileşenlerdeki kalınlık değişiminin mekanik dayanıma olan etkileri incelenmiş ve mekanik gereklilikleri sağlayan hafif bir batarya kutusu yaratılması amacıyla en uygun kalınlık değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Batarya Kutusu, Alüminyum Alaşımları, Sonlu Elemanlar Analizi

2023, ix + 86 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DYNAMIC ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF DESIGN PARAMETERS FOR
ELECTRIC VEHICLE ALUMINUM BATTERY BOX

Yalçın ŞENSOY

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sevda TELLİ ÇETİN

Within the framework of commitments to reduce climate change with the principle of sustainability, there are changes and developments in many areas with technological developments and innovations. The automotive industry is also undergoing a transformation and shifting from traditional internal combustion vehicles to the production and use of hybrid and full electric vehicles. While regulations for internal combustion vehicles and its subsystems are highly developed, regulations and special requirements created by companies for electric vehicles and its subsystems continue to be created, discussed, and developed.

One of the most important systems of electric vehicles is battery packs. There are mechanical, electrical, environmental, and chemical requirements for the battery pack. As a system, the battery pack affects vehicle range and vehicle dynamics with the energy and weight it stores. Lightweight and compact battery pack is an important parameter for achieve an electric vehicle of choice. The battery box is the construction of the battery pack. Aluminum materials, which stand out in terms of environmentalism, lightness, and specific strength, are used in battery packs and its preferability continues to increase. Nowadays, finite element analysis, which enable designs to be tested in virtual environment in order to reduce design improvement, prototype manufacturing and test costs that may occur due to possible engineering problems before the available product that meets the requirements is produced, is widely used in many sectors such as aviation, space, automotive and construction industry. The top and bottom covers, inner and side profiles which providing mechanical strength and protect the battery pack are the basic structural components of the battery box. In this study, the effects on mechanical strength of thickness variation in the basic structural components that make up the battery box, were examined and optimal thickness values were selected to create a lightweight battery box that meets the mechanical requirements with finite element analysis.

Key words: Electric Vehicles, Battery Box, Aluminum Alloys, Finite Element Analysis

2023, ix + 86 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca gösterdiği anlayış ve yardımları nedeniyle değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Sevda TELLİ ÇETİN 'e, çalışmayı yapma imkânı sağlayan Yeşilova Holding firmasına ve her zaman beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Batarya kutusu tasarımı Avrupa Birliği'nin Horizon 2020 araştırma ve yenilik programından 101006888 numaralı hibe sözleşmesi kapsamında fon alan LEVIS projesinin tasarım geliştirme çalışmalarındaki bir ara tasarımının parçasıdır. Paylaşımını ve destekleri için Yeşilova Holding AR-GE Merkezi çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Yalçın ŞENSOY
21/06/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM	7
3.1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları	7
3.2 Alüminyum Yan Ürünleri Üretim Yöntemleri	16
3.3 Otomotivde Alüminyum.....	18
3.4 Elektrikli Araçlar	21
3.5 Elektrikli Araç Batarya ve Batarya Paketi.....	25
3.6 Örnek Batarya Paketi Tasarımları ve Özellikleri.....	28
3.7 Bilgisayar Destekli Mühendislik ve Sonlu Elemanlar Analizleri.....	33
3.8 Batarya Paketi Mekanik Testleri	46
3.8.1 Doğal Frekans.....	47
3.8.2 Çarpışma	48
3.8.3 Ezme	49
3.8.4 Mekanik Şok.....	49
3.8.5 Titreşim Yorulması.....	50
3.9 Batarya Paketi Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Modeli.....	51
3.9.1 Batarya Paketi Tasarım ve Ölçüleri.....	52
3.9.2 Batarya Paketi Sonlu Elemanlar Modeli	53
3.9.3 Batarya Paketi Analizleri Deney Tasarımı Modeli.....	58
4. BULGULAR.....	60
4.1 Modal Analiz Sonuçları	60
4.2 Ezme Analizi Sonuçları	64
4.3 Çarpışma Analizi Sonuçları	67
4.4 Mekanik Şok Analiz Sonuçları	70
4.5 Titreşim Yorulması Analiz Sonuçları	73
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	76
KAYNAKLAR	78
EKLER.....	84
ÖZGEÇMİŞ	86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

€	Para birimi (Euro)
°C	Sıcaklık birimi Celcius derece
C	Sönüm matrisi
C ₁	Viskoz sönüm
C _{GE}	Malzemeye veya elemanlara ait sönümler
E	Elastiklik modülü
<i>f</i>	Kuvvet vektörü
f	Faktör sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
G	Yapısal sönüm
<i>i</i>	İmajiner birim
K	Rijitlik matrisi
L	Litre
<i>M</i>	Kütle atalet matrisi
<i>n</i>	Pekleşme üsteli
N	Toplam deney sayısı
Ø	Çap
s	Seviye sayısı
S _{tu}	Çekme gerilmesi
S _{ty}	Akma gerilmesi
<i>t</i>	Zaman
<i>x</i>	Yer değiştirme vektörü
σ	Standart Sapma
σ	Gerilme
Ω	Açısal frekans
ω	Açısal hız
ε _f	Çekme uzaması
π	Pi sayısı
σ	Gerilme
φ	Faz farkı

Kısaltmalar

Açıklama

AB	Avrupa Birliği
Al	Alüminyum
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Plastik (Carbon Fiber Reinforced Plastic)
COP	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (Conference of the Parties)
Cu	Bakır
FFT	Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform)
HAZ	Isıdan Etkilenmiş Bölge (Heat Affected Zone)

ICCT	Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi (International Council on Clean Transportation)
kg	Kilogram
kN	Kilo Newton
kWh	Kilowatt saat
L	Litre
ms	Milisaniye
N	Kuvvet Birimi Newton
PCA	Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis)
PSD	Güç Spektrum Yoğunluğu (Power Spectrum Density)
RMS	Karekök Ortalama (Root Mean Square)
s	Saniye
SUV	Sportif Çok Amaçlı Araç (Sports Utility Vehicle)
TBMM	Türkiye Büyük Millet Meclisi
Wh	Watt saat

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	PSD verilerinin ISO 12405 standardı ile karşılaştırması (X, Y ve Z yönü)..... 4
Şekil 2.2.	Batarya kutusu tasarım değişkenleri (Shui ve ark., 2018)..... 5
Şekil 2.3.	Batarya kutusu tasarım değişkenleri (Lin ve ark., 2016)..... 6
Şekil 3.1.	Al-Cu alaşımları denge diyagramı (Oğuz, 1990)..... 8
Şekil 3.2.	Çekme kupon testlerinden elde edilen gerilme gerinme eğrileri (Georgantzia ve ark., 2021)..... 15
Şekil 3.3.	Al Alaşım tipi süneklik ve çekme dayanımı ilişkisi (Cobden, 1994)..... 16
Şekil 3.4.	Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının akma ve çekme dayanımları (Georgantzia ve ark., 2021)..... 16
Şekil 3.5.	Haddelme prosesi (Erdin, 2017)..... 17
Şekil 3.6.	Döküm prosesi (Avcıoğlu, 2019)..... 17
Şekil 3.7.	Dövme prosesi (Avcıoğlu, 2019)..... 17
Şekil 3.8.	Ekstrüzyon prosesi (Saha, 2000)..... 18
Şekil 3.9.	Araç komponentlerine göre Al A)Miktarı B)Değişimi (European Aluminum, 2019)..... 19
Şekil 3.10.	Araç segmentine göre ortalama Al içeriği (2019) (European Aluminum, 2019)..... 19
Şekil 3.11.	Üretim prosesine göre araç başına alüminyum kütleleri (European Aluminum, 2019)..... 20
Şekil 3.12.	Üretim yöntemine göre otomobil şasesinde alüminyum kullanımı (Audi) (Hirsch, 2004)..... 20
Şekil 3.13.	Otomobilde alüminyum ekstrüzyon kullanılabilen komponentler (Anonim, 2018)..... 21
Şekil 3.14.	Avrupa Komisyonu'nun Avrupa Birliği'ndeki otomobiller ve kamyonetler için CO2 emisyon performans standartları önerisi, 2015-2040 (Bibra ve ark., 2022)..... 22
Şekil 3.15.	Elektrikli araçlar pazarı A) Kıtalar 2021-2022 B) Dünya 2013-2022 (Irlé, 2023)..... 24
Şekil 3.16.	Batarya hücre tipleri (Bala & Chaitanya Kamaraju, 2020; Höhne & Hirtz, 2013; Zwicker ve ark., 2020)..... 26
Şekil 3.17.	Batarya kutusu ve mevcut otomobillerdeki malzeme seçimleri (Afseth, 2021)..... 27
Şekil 3.18.	Batarya paketi maliyetleri (Henze, 2020)..... 27
Şekil 3.19.	Tesla model 3 batarya paketi (Second Life, 2020)..... 29
Şekil 3.20.	Audi e-Tron Batarya paketi komponentler (Anonim, 2021b).... 30
Şekil 3.21.	Audi e-Tron Batarya paketi malzemeler (Enderle ve ark., 2019)..... 30
Şekil 3.22.	Jaguar I-Pace Batarya paketi (Fuchss ve ark., 2019)..... 31
Şekil 3.23.	Volkswagen ID.4 Batarya paketi (Carney, 2022; John, 2021; Volkswagen, 2022) 31
Şekil 3.24.	BMW i3 Batarya paketi (Anonim, 2017; Elsa Liu, 2023; Schoewel & Hockgeiger, 2014)..... 32
Şekil 3.25.	Kompozit batarya paketi (Anonim, 2022a)..... 32
Şekil 3.26.	Sonlu elemanlar analojisi..... 33

Şekil 3.27.	Sonlu elemanlar analizleri eleman tipleri	34
Şekil 3.28.	Katı cisimler mekaniği mühendislik problemleri.....	35
Şekil 3.29.	Doğrusal ve doğrusal olmayan cevap örnek grafiği.....	36
Şekil 3.30.	Elastoplastik malzeme gerilme gerinme grafiği (Keles, 2010)...	36
Şekil 3.31.	Geometrik doğrusal olmayan çözümün kullanılmasının farkı (University, 2018).....	37
Şekil 3.32.	Tek serbestlik dereceli kütle yay damper sistemi.....	38
Şekil 3.33.	Serbest sönümlü titreşim türleri (Anonim, 2019b).....	41
Şekil 3.34.	Viskoz sönüm ve yapısal sönüm grafiği (Nastran, 2004).....	41
Şekil 3.35.	Zaman ve frekans alanında gösterim (Anonim, 2019a).....	42
Şekil 3.36.	Rastgele titreşim verisi grafikleri (Irvine, 2018).....	43
Şekil 3.37.	PSD momentlerinin hesaplanması (Altair, 2022).....	45
Şekil 3.38.	Çeşitli vücut bölümlerinin rezonans frekans aralıklarını gösteren insan vücudunun mekanik modeli (Basilio ve ark., 2019).....	47
Şekil 3.39.	Atalet yükü analizi için ivme zaman grafiği.....	49
Şekil 3.40.	Tam ve yarım ezme plakası.....	49
Şekil 3.41.	Batarya paketi boyutları.....	52
Şekil 3.42.	Batarya paketi komponentleri.....	52
Şekil 3.43.	Dış profil ve batarya modülü arası boşluk.....	53
Şekil 3.44.	Sonlu elemanlar modeli delik geometrileri etrafı ağ yapısı.....	54
Şekil 3.45.	Cıvata bağlantıları 1d eleman modellemesi ve 3d temsili modeli.....	54
Şekil 3.46.	HAZ Bölgesi sonlu elemanlar ağ modeli.....	55
Şekil 3.47.	Batarya modülü ağ modeli.....	55
Şekil 3.48.	Batarya paketi kutusu ve malzemeler.....	56
Şekil 3.49.	Kalınlık değişimi için belirlenmiş bölgeler.....	57
Şekil 4.1.	Deney tasarımı temel bileşen analizleri grafiği (Modal analiz)..	60
Şekil 4.2.	Modal analiz deney tasarımı sonuçları.....	62
Şekil 4.3.	Modal Analiz ilk 6 mod şekli.....	63
Şekil 4.4.	Üst kapak ilk mod şekli.....	63
Şekil 4.5.	Kütle katılım oranı %50 üzeri ilk 2 mod şekli.....	64
Şekil 4.6.	Deney tasarımı temel bileşenler analizi grafiği (Ezme analizi)...	65
Şekil 4.7.	Ezme analizleri plastik gerinme sonuçları.....	67
Şekil 4.8.	Ezme analizi sonuçları A) Plastik gerinme B) Deplasman	67
Şekil 4.9.	İvme zaman grafiği.....	68
Şekil 4.10.	Atalet 28g X analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman	69
Şekil 4.11.	Atalet 15g Y analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman	70
Şekil 4.12.	Mekanik şok analizi ivme zaman yükleme grafiği.....	70
Şekil 4.13.	Şok (30 X) analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman	72
Şekil 4.14.	Şok (50 Y) analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman	72
Şekil 4.15.	Şok (70 Z) analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman	72
Şekil 4.16.	Rastgele titreşim analizi gerilme sonuçları.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Bilimsel başlığa göre batarya paketi testleri.....	3
Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımları için temel tanımlama (Rice ve ark., 2003).....	9
Çizelge 3.2. Temper kodları(Anonim, 2021c).....	10
Çizelge 3.3. Soğuk işlenmiş alaşımlarda H simgesinden sonra gelen notasyon (Anonim, 2021c).....	10
Çizelge 3.4. Soğuk işlenmiş alaşımlarda H ve numara simgesinden sonra gelen notasyon (Anonim, 2021c).....	11
Çizelge 3.5. Isıl işlem görmüş alaşımlarda kullanılan notasyon (Anonim, 2021c).....	12
Çizelge 3.6. Yaygın olarak araştırılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri (Georgantzia ve ark., 2021).....	15
Çizelge 3.7. Araç üreticilerinin taahhütleri (HM Government, 2021).....	23
Çizelge 3.8. Örnek batarya paketi tasarımlarının özellikleri (Bala & Chaitanya Kamaraju, 2020).....	28
Çizelge 3.9. Rastgele titreşim verisi istatistikleri (Irvine, 2018).....	43
Çizelge 3.10. Standart sapmaya göre olasılık dağılımı.....	44
Çizelge 3.11. Araç sınıfları (Resmi Gazete, 2004; Vehicle category, 2016)....	46
Çizelge 3.12. M ve N araç sınıfları.....	47
Çizelge 3.13. Mekanik şok test parametreleri.....	50
Çizelge 3.14. ISO 6469-1 PSD değerleri.....	50
Çizelge 3.15. ISO 12405 PSD değerleri (Maeda & Takahashi, 2015).....	51
Çizelge 3.16. ECE R100 Vibrasyon testi için frekans ivme değeri tablosu.....	51
Çizelge 3.17. Sonlu elemalar modeli eleman kriterleri.....	53
Çizelge 3.18. Malzeme mekanik özellikleri.....	57
Çizelge 3.19. Batarya paketi kütle dağılımları.....	58
Çizelge 4.1. Deney tasarımı ve modal analiz sonuçları.....	61
Çizelge 4.2. Deney tasarımı ve ezme analizi sonuçları.....	65
Çizelge 4.3. Ezme analizi sonuçları 2.....	66
Çizelge 4.4. Deney tasarımı çarpışma analizi sonuçları.....	68
Çizelge 4.5. Çarpışma analizi sonuçları 2.....	69
Çizelge 4.6. Deney tasarımı mekanik şok analiz sonuçları.....	71
Çizelge 4.7. Mekanik şok analiz sonuçları 2.....	71
Çizelge 4.8. Yorulma dayanım tablosu (MakeltFrom, 2020).....	73
Çizelge 4.9. Deney tasarımı ve titreşim yorulması analiz sonuçları.....	74
Çizelge 4.10. Titreşim yorulması analizi sonuçları 2.....	74

1. GİRİŞ

Gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmak, enerji kaynaklarının doğru kullanımı, küresel ısınmanın ve iklim krizinin önüne geçebilmek için devletler, kurumlar ve komiteler konferanslar düzenleyerek verileri analiz etmekte, tartışmakta ve çevrecilik hedefleri ve çevre kirliliğine karşı kısıtlayıcı yönetmelikler oluşturmaktadırlar.

Gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmak için inşaat sektöründen otomotive kadar tüm sanayi sektörlerinde ve yaşam alanlarında enerji tüketimi ve verimliliği konusunda tüm bireylerin sorumluluk alması gerektiği bilinen bir gerçektir. Otomotiv sektörü özelinde araç emisyon kısıtlamaları ve karbon ayak izini azaltma hedefleri, otomotiv üreticilerini geleceğin araçlarını ve çevreci hedefler oluşturma noktasında baskılayıcı unsurlardır. Elektrikli araçlar, emisyon değerlerini azaltması sebebiyle emisyon ve çevrecilik hedeflerinin yakalanmasında otomotiv sektörü için odak çözüm konumundadır.

Elektrikli araç üretimi ve kullanımı tüm dünyada hızla artmaktadır. Konvansiyonel içten yanmalı araçlara göre farklılıkları bulunan elektrikli araçlarda yeni teknolojiler denenmekte ve sürekli olarak yeni ürünler geliştirilmektedir. Yeni teknolojiler ve uygulamalar beraberinde yeni riskler ve beklenmeyen sorunları getirmektedir. Konvansiyonel içten yanmalı araçlara göre farklılık oluşturan en önemli sistem, içten yanmalı motorun yerini alan elektrik motoru ve elektrikli araçlar için benzin ve benzin deposu gibi düşünebileceğimiz batarya ve batarya paketleridir. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketlerinde enerji çoğunlukla kimyasal reaksiyonlar ile sağlanmaktadır. Bataryada bulunan kimyasallar çevresel etkilerden dolayı (sıcaklık, kısa devre ve darbe gibi) dışarı sızarak insan sağlığını tehdit eden bir unsur haline dönüşmekte, parlayıcılık ve yanıcılık özellikleriyle yangın riski oluşturmaktadır. Kimyasal reaksiyon yangını olması sebebiyle de söndürülmesi kolay olmayan bir durum ortaya çıkmaktadır. Tüm bu riskleri önlemeye yönelik ülkeler ve komisyonlar tarafından elektrikli araçlar ve elektrikli araç alt sistemlerine yönelik standartlar oluşturulmakta ve mevcut standartlar güncellenmektedir.

Batarya paketleri depoladıkları enerji, sahip oldukları ağırlık, üretim maliyetleri ve araç fiyatı üzerindeki etkileri sebebiyle elektrikli araçların tercih edilebilirliğini etkileyen önemli bir alt sistemdir. Bu sebeple batarya paketi üzerinde batarya teknolojisinden batarya yönetim sistemlerine, malzeme biliminden sistem güvenliğine kadar birçok alanda araştırma geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir. Batarya paketleri, araç ağırlığının %30 una varan kütleleri, araçtaki konumu ve hacimleriyle araç rijitliğini ve araç dinamiklerini etkilemektedir. Batarya paketi mekanik ve elektronik sistemlerle bir bütündür. Batarya kutusu, elektronik ve mekanik sistemleri taşıyan ve bu sistemleri çevresel etkilerden koruyan batarya paketinin konstrüksiyonunu oluşturur.

Gereklilikleri sağlayan nihai kullanılabilir ürün ortaya çıkmadan önce olası mühendislik yetersizliklerinden dolayı oluşabilecek tasarım iyileştirme, yeniden üretim ve test maliyetlerini azaltmak amacıyla tasarımların sanal ortamda test edilmesine imkân sağlayan sonlu elemanlar analizleri günümüzde havacılık, uzay, otomotiv ve inşaat gibi birçok sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ürün henüz üretilmeden tasarım aşamasında tasarım değişkenlerinin ürünü nasıl etkileyebileceği ve ürünün istenen gereklilikleri karşılayıp karşılayamayacağı bilgisayar ortamında gerçek koşullar temsil edilerek hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmada öncelikle elektrikli araçların en önemli alt sistemlerinden olan batarya paketine ait teknik şartnameler ve isterler derlenmiş ve batarya kutusunun tasarım değişkenleri belirlenmiştir. Sonrasında belirlenen batarya kutusu tasarım değişkenlerinin, isterlerde beklenen hedef parametreler üzerinde oluşturdukları etkiler incelenmiş ve minimum ağırlık hedefi doğrultusunda gereklilikleri sağlayan batarya kutusunun tasarım iyileştirmesi yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ruiz ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada elektrikli araçların ve elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların kullanımının artarak devam edeceğini belirtmişler ve bu tür batarya kullanımı olan araçlar için çeşitli kötü kullanım durumları altında güvenlik testlerine yönelik eksiklikleri ve gelecekteki iyileştirme alanlarını belirlemek için ilgili standartları ve düzenlemeleri derlemişlerdir. Güvenlik testleri mekanik, elektriksel, çevresel ve kimyasal nitelikteki tehlikeler dahil olmak üzere listelenmiştir. Standartlar ve yasal düzenlemeler mekaniksel, elektriksel, çevresel ve kimyasal başlıklar şeklinde sınıflandırılmış batarya, modül ve batarya paketi kapsamında detaylandırılmış ve karşılaştırılmıştır. Çizelge 2.1’de bilimsel başlığa göre test başlıkları verilmiştir. Elektrikli araçların mevcut standartlar tarafından değerlendirilen aralığın dışında titreşim yüklerine maruz kalabileceği, mevcuttaki standart ve regülasyonların başlangıçta konvensiyonel araçlar için oluşturulan standartlardan dönüştürüldüğü, elektrikli araç özelliklerini kapsayan daha fazla analize ve veriye ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. Bilimsel başlığa göre batarya paketi testleri

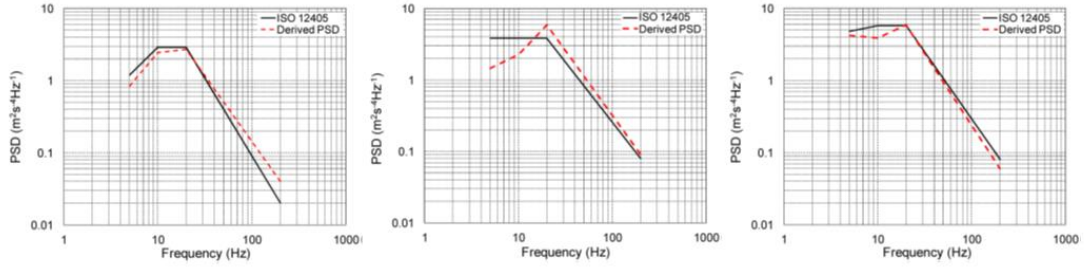
Mekanik	Elektriksel	Çevresel	Kimyasal
Mekanik şok	Dış kısa devre	Termal kararlılık	Emisyonlar
Penetrasyon	İç kısa devre	Termal şok ve çevrim	Yanıcılık
Sızdırma	Aşırı şarj	Aşırı ısınma	
Daldırma	Aşırı deşarj	Aşırı soğuk	
Ezme		Yanma	
Devrilme			
Vibrasyon			

Kotak ve ark. (2021) dünyada yaşanan batarya paketi ve batarya hasarına sebebiyet veren durumları derlemişlerdir. Dünya çapında çok sayıda batarya paketi kötüye kullanım standardı ve yönetmeliği bulunduğundan, batarya paketi üreticilerinin en güvenli olanı seçmede ikilem yaşadıklarını belirtmişler, ezme testi özelinde altı adet standardı incelemişlerdir.

Pan ve ark., (2021) çalışmalarında yüksek dayanımlı çelikler kullanılarak batarya paketini titreşim, mekanik şok ve çarpışma dayanımı açısından incelemişler ve optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle sonlu elemanlar modelini yaptıkları modal

testle doğrulamışlardır. Rastgele titreşim analizlerinden elde edilen RMS 3 Sigma gerilme değeri ile başlangıç kalınlıklarını belirlemişler, sabit genlikli titreşim, mekanik şok ve rastgele titreşim yorulma analizleri nümerik sonuçları üzerinden optimizasyon çalışması gerçekleştirmişler, oluşturdukları optimum tasarımı ezme ve çarpma analizleri ile doğrulamışlardır. Optimize edilmiş batarya paketi ile titreşim, mekanik şok ve çarpma dayanımı gerekliliklerini karşılamış ve toplam ağırlığı %10,41 oranında azaltmışlardır.

Maeda ve Takahashi (2015) ise bir elektrikli ve bir hibrit elektrikli araca ivme ölçerler yerleştirerek yedi farklı yol tipi ve farklı hızlar için elde ettikleri üç eksendeki güç spektrumu yoğunluklarını ISO 12405'in güç spektrumu yoğunlukları ile karşılaştırmışlardır. RMS ivme değerinin dikey yönde, yatay yönlere göre daha yüksek olma eğiliminde olduğunu göstermişlerdir. Elde ettikleri PSD verileriyle ISO 12405 standardındaki değerlerinin yakın olduğu sonucuna varmışlardır (Şekil 2.1).

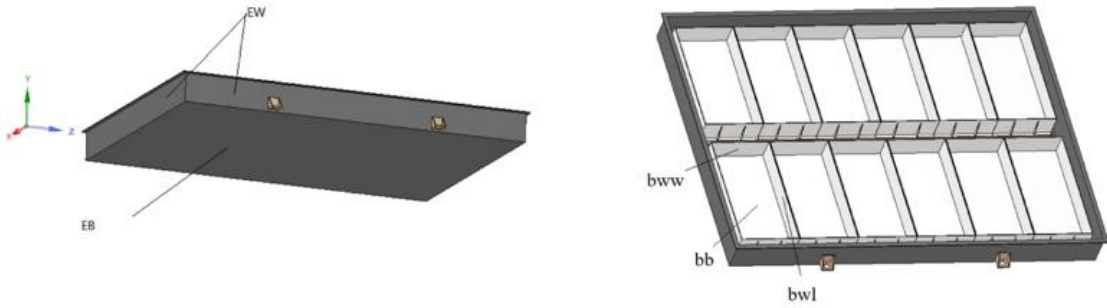


Şekil 2.1. PSD verilerinin ISO 12405 standardı ile karşılaştırması (X, Y ve Z yönü)

Yang ve ark., (2019) çalışmalarında batarya kutusunun engebeli yol yüzeyinde dik dönüş ve frenleme gibi aşırı koşullar altındaki durumlarını analiz ederek stres ve yer değiştirme dağılımını incelemişlerdir. Batarya paketinin doğal frekanslarını bulmuşlar, yapının yapısal sönümlenmesi 0,03 belirleyerek, dikey 1g ivme yükü ile 20 Hz ile 100 Hz aralığında harmonik cevap analizi yapmışlardır. Yapılan tasarım değişiklikleri ile gerilme konsantrasyonunu azaltmaya çalışmışlar. Geliştirdikleri farklı alt, üst ve yan profil tasarımlarının sonuçları karşılaştırmışlardır.

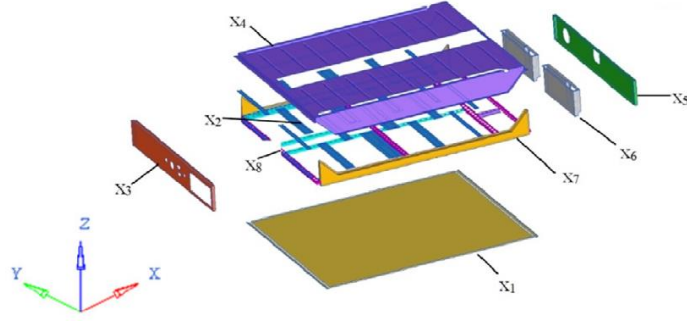
Shui ve ark., (2018) çalışmalarında alüminyum alaşımlı batarya kutusunu bileşenlerini ve tasarım değişkenlerini belirlemişler, tasarımının mekanik özelliklerini maksimuma çıkarılması, kendi ağırlığı altındaki deformasyonun en aza indirilmesi, minimum doğal frekansın en üst düzeye çıkarılması ve minimum ağırlık hedefleri altında optimize etmek

için bir tasarım optimizasyon metodolojisi önermişlerdir. Batarya kutusu dış duvar (EW), batarya kutusu taban (EB), batarya modülü taban (bb) batarya modülü boyuna duvar (bwl), batarya modülü enine duvar (bww) kalınlıkları ve ortam sıcaklığını değişken olarak belirlemişlerdir (Şekil 2.2). Optimizasyonlarında deney tasarım metodu olarak merkezi birleşik tasarım (CCD) ve latin hiper küp örneklemesini (LHS), analitik model olarak yüzey cevap metodolojisi (RSM) ve yapay sinir ağı (ANN) kombinasyonlarını kullanmışlardır. Çalışma ile minimum doğal frekansı %3 arttırmış ve toplam ağırlığı %11 azaltmışlardır.



Şekil 2.2. Batarya kutusu tasarım değişkenleri (Shui ve ark., 2018)

Lin ve ark., (2016) belirledikleri referans batarya kutusu sonlu elemanlar ağı modelinde panel ve profiller için Q235 çeliğinin malzeme özelliklerini, 2 boyutlu ağı elemanları ile lineer elastik izotropik malzeme modelini kullanılmışlardır. Kaynak dikişleri için RBE2 ve CWELD, cıvata bağlantıları için 1 boyutlu elemanlar kullanmışlardır. Referans batarya kutusu tasarımına 6 ms 40g ivme ile X ve Y eksenlerinde şok analizi gerçekleştirmişler, gerilme değerlerini malzeme çekme gerilmesinin üzerinde bulmuşlardır. Batarya kutusu üzerinde 7 farklı komponentin kalınlıklarını 0,5 mm ile 1,5 mm aralığı için tasarım değişkeni olarak belirlemişlerdir (Şekil 2.3). Şok analizinde genel maksimum stres kısıtlaması ile ve aynı anda toplam kütleyi en aza indirmek doğal frekansı maksimize etmek için meta model tekniği ve çok amaçlı parçacık sürüsü optimizasyonu (MOPSO) algoritması kullanılarak çok amaçlı bir optimizasyon çözümü oluşturmuşlardır. Meta model tekniğiyle sonlu elemanlar sonuçlarının tutarlılık gösterdiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.3. Batarya kutusu tasarım değişkenleri (Lin ve ark., 2016)

Bala ve Chaitanya Kamaraju, (2020) yüksek lisans tezi çalışmasında Volvo araç şirketinin SPA2 batarya platformuna eşdeğer çarpışma güvenliği performansına sahip, daha düşük malzeme maliyetli, daha hafif, sürdürülebilir ve daha çevreci bir batarya kutusu tasarımı amacıyla tasarım geliştirme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Batarya paketi bileşenlerini incelemişler ayrıntılı analizler ve tasarım iyileştirmesi için iç profilleri ve alt plakayı odak tasarım bölgesi olarak seçmişlerdir. Boşluklu yapıya sahip alüminyum bir alt plaka ve buna alternatif düz ve oluklu olmak üzere 2 adet çelik alt kapak tasarımı ile alt plakaya bütünleşmiş iç profil tasarımı, I ve kare iç profil alternatif tasarımları oluşturmuşlardır. Doğal frekans ve ezme şartları için topoloji ve topografya analizleri gerçekleştirmişler elde ettikleri sonuçlara göre bir final tasarım ortaya koymuşlardır. Çelik malzemeler kullanarak %6,3 ağırlık artışıyla birlikte malzeme maliyetini %65 azaltmışlardır.

E-mobility technology international dergisinde (Favero, 2019a) “Why e-mobility needs Smart Steels” başlığı altındaki çalışmada, çalışma ekibi yüksek dayanımlı çeliklerden yapılmış batarya paketini, standartları inceleyerek belirledikleri ezme , şok , düşürme, alt yüzeyden girişim , titreşim ve yorulma şartlarında analiz etmişlerdir. Kullanılan yüksek dayanımlı çelikler ile C segment bir araçta alüminyum çözümlerine kıyasla 80 € ile 100 € arasında maliyet tasarrufu ve %36 daha az karbondioksit (CO₂) emisyonu salınımı yapılabileceğini göstermişlerdir. Daha iyi performans gösteren yüksek dayanımlı çelikler ile otomotiv üreticilerinin güvenlikten ödün vermeden parça kalınlıklarını azaltarak hafifletme sağlayabilecekleri belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çevreci ve sürdürülebilir bir malzeme olma özelliğiyle alüminyum tüm dünyada ön plana çıkmaktadır. Seri üretime uygunluğu ve yeterli dayanıma sahip olması sebebiyle yapısal ürünlerde kullanımı yaygın olan alüminyum yan ürünleri batarya kutusu tasarımlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde öncelikle alüminyum alaşımları, alüminyum yan ürün üretim prosesleri hakkında temel bilgiler paylaşılmış ve alüminyumun otomotivde kullanımı hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra elektrikli araçlar ve batarya paketleri incelenerek, batarya paketleri için oluşturulan gereklilikler ve sonlu elemanlar metodolojisi özetlenmiştir. Son olarak, tasarım değişkenleri belirlenmiş batarya kutusu tasarımının sonlu elemanlar analiz modeline ait detaylar verilmiş ve analizlerden elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler paylaşılmıştır.

3.1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

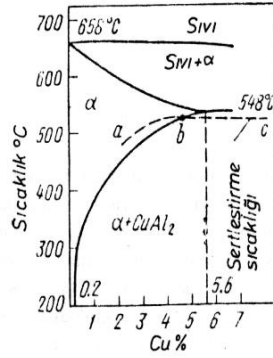
Sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğini azaltma taahhütleri çerçevesinde, son teknolojik gelişmeler, çeliklere kıyasla çevresel ve ekonomik açıdan daha verimli olan yenilikçi alüminyum alaşımlı konstrüksiyonların ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Alüminyum atom numarası 13, atom ağırlığı 26.981 g/mol, ergime sıcaklığı 660 °C olan gümüşümsü renkte ve 2.7 g/cm³ olan Dünya yer kabuğunda %8 ile en çok bulunan 3. elementtir. Oksijene afinitesi yüksek olduğundan doğada saf olarak değil oksit ya da silikat halde bulunur. Al, yer kabuğunda demir, silisyum, oksijen gibi elementlerle bileşik halde bulunur. Bu yapılardan en önemlilerinden biri de boksittir. Boksit, hidratlı alüminyum oksittir, saf alüminyum oksit Bayer prosesi ile elde edilir. Alüminyum oksit den Al eldesi ise Hall-Heroult prosesi ile gerçekleşir. Elde edilen alüminyum genellikle demir ve silisyum bulundurur ve %99,5-99,9 saflıktadır. Alüminyum, ekstrüzyon, haddeleme ve döküm işlemleri ile çeşitli yarı ürün ve ürünlere dönüştürülür. Alüminyum kalite kaybı olmaksızın %100 oranda sonsuza dek yeniden işlenebilir. Alüminyumun yeniden işleme süreci asıl üretime kıyasla %95 daha az enerji gerektirir ve dolayısıyla emisyon açısından çok önemli bir tasarruf anlamına gelir. Saf alüminyum düşük dayanıklılıkta bir malzemedir. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa iken uygun alaşım bileşenleri eklenerek alaşımlandığında bu değer 700 MPa'a çıkar.

Alüminyum alaşımlarında değişik dayanım artırma yöntemleri seçilebilir ,ancak en etkin dayanım artırma yöntemi , çökelme sertleşmesidir (Alüminyum, 2020; Cobden, 1994).

Alüminyum endüstrisi, karbon ayak izini azaltmak için çalışmalar yürütmektedir ve son 30 yılda, Kuzey Amerika alüminyum endüstrisi karbon ayak izini yarıdan fazla azaltmıştır. (Aluminum Association, 2021).

Al içinde bileşenlerin çoğunun eriyebilirlik kabiliyeti sıcaklıkla azalmaktadır (Şekil 3.1). Bu durum Al alaşımlarına sertleşme ve yaşlanma ile dayanımın artırma olanağını verir. Sertleştirme olayı, fazla metaller arası fazların tümünün ya da çoğunun Al içinde eriyebileceği bir sıcaklığa ısıtmak; bu sıcaklıkta tutmak ve fazla doymuş bir katı eriyik elde etmek üzere hızla soğutulmasından (daldırma) ibarettir. Yaşlandırma ise sertleştirme sonrası gerçekleştirilir. Doğal yaşlandırma için Al alaşımı birkaç gün oda sıcaklığında, yapay yaşlandırma için ise 10 ila 24 saat oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda tutulur. Fazla doymuş katı eriyik yaşlandırma sürecinde ayrışır ve bu durum alaşımı güçlendirir (Oğuz, 1990).



Şekil 3.1. Al-Cu alaşımları denge diyagramı (Oğuz, 1990)

Uluslararası alüminyum birliği şekillendirilebilir alüminyum alaşımlarını dört basamaklı bir sistem kullanarak 9 seri halinde sınıflandırır ve her seri farklı alaşım ilavesi kombinasyonlarını içerir. İlk basamak (Xxxx) ana bileşen alaşımı gösterirken, ikinci basamak (xXxx) orijinal alaşımda yapılan değişiklikleri gösterir. Son iki basamak (xxXX), belirli alaşımın seride tanımlanabilmesi için gelişigüzel sayılardır. Mekanik özellikleri nedeniyle inşaat ve otomotiv uygulamaları 5xxx ve 6xxx serileri üzerinde odaklanılmıştır (Georgantzia ve ark., 2021).

Dökme alüminyum alaşımları 3 basamak ile ondalık nokta ve sayı eklenerek gösterilir. İlk basamak (Xxx.x), alüminyum alaşımına eklenen ana alaşım elementini gösterir. İkinci ve üçüncü basamaklar (xXX.x), minimum alüminyum yüzdesini , ondalık noktadan sonraki sayı, alaşımın döküm (.0) veya külçe (.1 veya .2) olduğunu gösterir (Rice ve ark., 2003).

İlk basamak numarası için baskın alaşım elementine göre numaralandırma yapılmaktadır. Alüminyum alaşımları için temel tanımlama Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımları için temel tanımlama (Rice ve ark., 2003)

Dövme Al Alaşımları için temel tanımlama (Wrought Alloys)		Dökme Al Alaşımları için temel Tanımlama (Cast Alloys)	
Alaşım Grubu	Baskın Alaşım Elementleri	Alaşım Grubu	Baskın Alaşım Elementleri
1XXX	Minimum %99 alüminyum	1XX.X	Minimum %99 alüminyum
2XXX	Bakır	2XX.X	Bakır
3XXX	Mangan	3XX.X	Silikon artı Bakır ve/veya Magnezyum
4XXX	Silikon	4XX.X	Silikon
5XXX	Magnezyum	5XX.X	Magnezyum
6XXX	Magnezyum ve Silikon	6XX.X	Kullanılmayan Seriler
7XXX	Çinko	7XX.X	Çinko
8XXX	Diğer elementler	8XX.X	Teneke (Tin)
9XXX	Kullanılmayan Seri	9XX.X	Diğer elementler

Alaşım numaralandırmasından sonra ısıl işlem tanımlaması yer almaktadır. Temper tanımlamasının ilk karakteri olan büyük harf, gördüğü işlemin genel sınıflandırılmasıdır. Sınıflandırmaya ait açıklama Çizelge 3.2’de verilmiştir. Yapay yaşlandırma ısıl işlemi ekstrüzyon sektöründe termik operasyonu olarak da isimlendirilmektedir. Alüminyum alaşım serilerinden 4,5 ve 6 serileri otomotiv, 2 ve 7 serileri uçak endüstrisinde tercih edilmektedir. Saf alüminyum (1 serisi) düşük mukavemet özelliklerine karşın yüksek korozyon dayanımı, yüksek ısıl ve elektriksel iletkenlik ile elektrik ve kimya endüstrisinde tercih edilmektedir.

Çizelge 3.2. Temper kodları(Anonim, 2021b)

Temper	Açıklama
F	Fabrikasyondan sonraki halidir (üretildiği gibi). Çalışma koşullarında belirli malzeme özelliklerini elde etmek için ısı koşullar herhangi bir özel kontrol gerektirmez.
O	Tavlı, rekristallize olmuş halidir. Biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarının en yumuşak halidir.
H	Isıl işlem görmeyen alaşımların mukavemetlerini stabilize etmek için soğuk işlenmiş alaşımlar için kullanılır.
W	Çözelti ısı işleminden sonra doğal yaşlanmaya maruz kalan alaşımlar için kullanılır.
T	Doğal veya yapay yaşlanmaya tabi tutulmuş ısı işlem uygulanabilen alaşımlar için kullanılır.F,O ve H'den ziyade sabit sıcaklıkları belirtmektedir.

Her alüminyum alaşımının kimyasal içeriği aynı olmadığı gibi sertleştirmek için kullanılan yöntemlerde farklıdır. 2xxx, 6xxx ve 7xxx alaşımları ısıl işlemle sertleştirilebilirken, 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx alaşımları deformasyon ile sertleştirilebilir. Bu nedenle alaşım tercihi yaparken kimyasal özelliklerinden çok metale uygulanan işlemler de dikkate alınmalıdır. Soğuk işlenmiş alaşımlar H simgesi ile gösterilmektedir. H simgesinden sonra kullanılan numaralandırmaya ait açıklamalar Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Soğuk işlenmiş alaşımlarda H simgesinden sonra gelen notasyon (Anonim, 2021b)

Kodlar	Açıklama
H0	Sadece tavlama yapılmış
H1X	Tavllanmış, gerinim sertleşmesi yapılmış
H2X	Gerinim sertleşmesi yapılmış, kısmi tavllanmış
H3X	Gerinim sertleşmesi yapılmış, stabilize edilmiş
H4X	Gerinim sertleşmesi yapılmış, vernikleme veya boyama

HX (X:1,2,3,4 sayıları konulduğunda) sayısından sonra gelen rakamlar Çizelge 3.4'te verilmektedir.

Çizelge 3.4. Soğuk işlenmiş alaşımlarda H ve numara simgesinden sonra gelen notasyon (Anonim, 2021b)

Kodlar	Açıklama
H0	Yumuşak
HX1	0 ve 2 arası sertlik
HX2	¼ Sert (Örn.H12, H22)
HX3	2 ve 4 arası sertlik
HX4	½ Sert (Örn.H14, H24)
HX5	4 ve 6 arası sertlik
HX6	¾ Sert (Örn.H16, H26)
HX7	6 ve 8 arası sertlik
HX8	Tam Sert (Örn.H18, H28)
HX9	Ekstra Sert (Örn.H19)

Erişilebilen en sert durumu 8 rakamı ifade eder. Yumuşak ve sert değerleri ortasındaki sertlik için 4 rakamı, dörtte bir sertlik için ise 2 rakamı kullanılmaktadır.

Isıl işlem 2xxx, 6xxx ve 7xxx alüminyum serilerine yapılmaktadır. T notasyonu, ısıl işlem yapılarak elde edilen ısıl işlem seviyelerini ifade eder. "T" harfi daima bir veya daha fazla basamakla tanımlanmaktadır. Isıl işlemlerinin türleri Çizelge 3.5'te ifade edilmektedir. T harfi ve ilk rakam sonrası ek rakamlar gerilme gidermeyi gösterir (Anonim, 2021b; Cobden, 1994; Georgantzia vd., 2021; Serdar, 2019).

Alüminyum alaşımlı ekstrüzyon ürünlerinde T4 ve T6 ısıl işlemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekstrüzyon prosesinde sıcaklık en önemli parametredir. 420 °C ila 470 °C kadar ısıtılan biyet yaklaşık 450 °C kadar ısıtılmış bir kalıp içerisinde geçirildiğinde iç ve kalıpla olan sürtünmelerin etkisiyle kalıptan 500 °C'nin üzerinde çıkmaktadır.

Çözeltiye alma 520 °C üzerindeki sıcaklıklarda malzemenin belli bir süre tutularak ani soğutulmasıdır. 6060 ve 6063 gibi alüminyum alaşımlarında kalıp çıkışında malzeme hava veya su ile soğutulması da çözeltiye alma ısıl işlem özelliklerini verir. Bu nedenle ayrıca bir çözeltiye alma operasyonuna gerek kalmadan mukavemet artışı sağlanmış olur.

Çizelge 3.5. Isıl işlem görmüş alaşımlarda kullanılan notasyon (Anonim, 2021b)

T1	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
T2	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış
T3	Çözelti ısı işlemi görmüş, soğuk şekillendirilmiş, doğal olarak yaşlandırılmış
T351	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş, gerilimi alınmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış
T3510	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş, gerilimi alınmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış, düzlemselliği sağlanmış
T4	Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
T451	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, gerilimi alınmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış. Düzlemselliği sağlanmış
T4510	T451 ile aynı özelliklere sahiptir, stabilize edilmiştir. Toleransları daha düşüktür. (Ekstrüzyon için)
T5	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış.
T6	Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış
T651	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, gerilimi alınmış ve suni yaşlandırma yapılmış, gerilim giderme sonrası düzlemselliği sağlanmış.
T6510	T651 ile aynı özelliğe sahiptir stabilize edilmiştir. Toleransları daha düşüktür. (Ekstrüzyon)
T7	Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış.
T73	Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış. Korozyon dayanıklılığı artırılmıştır.
T7351	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, gerilimi alınmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış. Korozyon dayanıklılığı artırılmıştır
T7451	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, gerilimi alınmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış. Gerilim giderme sonrası düzlemselliği sağlanmış.
T8	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış
T9	Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlandırma yapılmış
T10	Yüksek bir sıcaklıktan soğutulmuş + yapay olarak yaşlandırılmış sonra soğuk işlenmiş

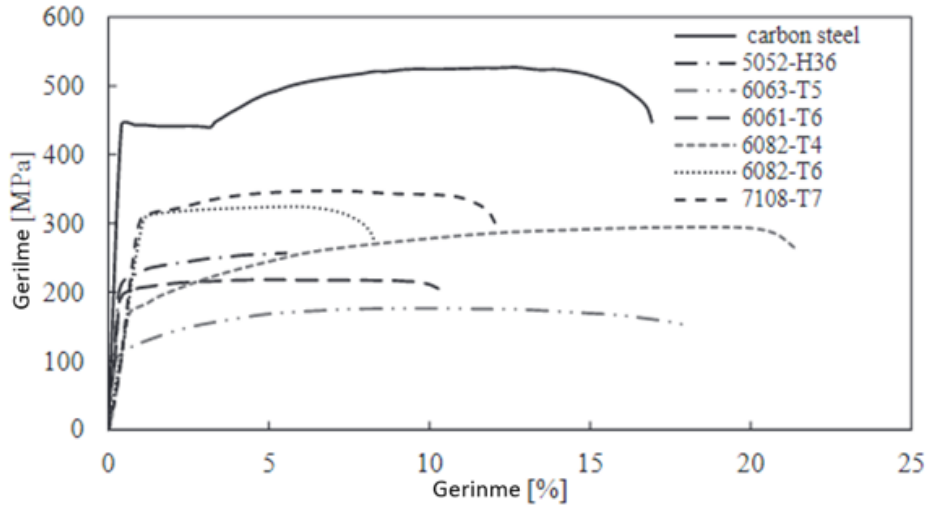
Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının avantajları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

Alüminyumun avantajları (Anonim, 2018; Cobden, 1994) ;

- 1) Geri dönüştürülebilirlik: Alüminyum herhangi bir bozulma veya kayıp olmaksızın tekrar tekrar geri dönüştürülebilir.
- 2) Spesifik mukavemet: Çelik, demir, pirinç veya bakırın yaklaşık üçte biri kadar ağırlığa sahip olan alüminyumun hafif özelliği, onu ulaşım ve dayanıklı tüketim malları gibi pazarlarda cazip hale getirmiştir. Ağırlık tasarrufu aynı zamanda enerji tasarrufu sağlar, titreşim kuvvetlerini azaltır, elle çalıştırılan ekipmanları kullanırken yorgunluğu azaltır, daha düşük nakliye, taşıma ve montaj maliyetleri sunar. Özel alaşımlarla sağlanan yüksek mukavemet ile düşük ağırlık, son altmış yıldır alüminyumu uçak yapımında ana malzeme haline getirmiştir.
- 3) Korozyon dayanımı: Alüminyum paslanmaz. Alüminyum, havaya maruz kaldığında oksijenle reaksiyona girerek korozyona dayanıklı ince bir oksit tabakası oluşturur. Koruyucu oksit tabakasını sıyrıldığında yeni bir tabaka oluşturur. Uygun şekilde alaşımlanmış alüminyum tuzlu su ve diğer çeşitli kimyasallar ve materyallerin neden olduğu korozyona karşı direnç gösterebilir.
- 4) Termal iletkenlik: Alüminyum hem soğutma hem de ısıtma uygulamaları için ısı transferinde yaygın olarak kullanılır. Ağırlık maliyet olarak en uygun ısı transfer malzemelerinden biridir. Yüksek termal iletkenlik, düşük ağırlık ve iyi şekillendirilebilirlik özelliklerinin bir araya gelmesi, alüminyumu ısı eşanjörlerinde, araba radyatörlerinde ve pişirme kaplarında kullanım için bariz bir kullanım malzemesi haline getirir. Döküm formunda yaygın olarak içten yanmalı motor silindir kapağı komponentinde kullanılır.
- 5) Zehirli olmama: Alüminyum katı formda toksik değildir, bu da onu gıda hazırlama ve paketlemeden kimyasal taşımaya kadar ürünler için mükemmel bir malzeme yapar. Pürüzsüz ve gözeneksiz yüzey kolayca temizlenir.

- 6) Yansıtıcılık: Alüminyum, doğal kaplaması ile yüzde 80' den fazla yansıtıcıdır. Alüminyum yalnızca ışığı değil, aynı zamanda radyo dalgalarını ve kızılötesi radyasyonu da yansıtır; bu durum alüminyum elektronik uygulamalarda radyo frekansı koruma ve ev aletleri gibi daha estetik uygulamalar için ideal hale getirir.
- 7) Elektrik iletkenliği: Düşük özgül ağırlığı nedeniyle, saf alüminyumun kütle başına elektrik iletkenliği diğer tüm metallerinkinden daha fazladır. Elektrik direnci 20°C'de 2.69 microhm cm'dir.
- 8) Manyetik olmama: Alüminyumun manyetik olmama özelliği, onu yüksek voltajlı donanım ve manyetik alanlarda kullanılan ekipman için kullanışlı hale getirir. Alüminyum profiller, günümüzün elektronik ekipmanlarının çoğunda yaygın olarak kullanılmakta ve askeri gemi yapımlarında değerli bir malzemedir.
- 9) Kriyojenik mukavemet: Alüminyum, sıcaklıklar düşürüldüğünde dayanımı artar ve bu da onu kriyojenik uygulamalar için tercih edilen bir metal haline getirir. Alüminyum, derin uzayın aşırı düşük sıcaklıklarına dayanmak için uygundur.
- 10) Kıvılcım çıkarmaz ve yanmaz: Alüminyumun kıvılcım çıkarmama özelliği, onu yanıcı veya patlayıcı durumlardaki uygulamalar için mükemmel bir malzeme yapar. Alüminyum yanmaz olmakla kalmaz, aynı zamanda yüksek ısıya maruz kaldığında hiçbir tehlikeli emisyon üretmez.
- 11) Özgül ısı değeri; Alüminyum, ağırlık bazında diğer metallerle karşılaştırıldığında nispeten yüksek bir özgül ısıya sahiptir, 100°C'de 921 J/kg.
- 12) Göze hitap eden alıcılık: Alüminyumun doğal metalik yüzeyi estetik açıdan hoştur ve ek bir kaplama olmaksızın bile korozyona dayanıklıdır. Alüminyumun doğal koruyucu oksit kaplaması şeffaftır ve metalin görünümünü etkilemeden ekstra koruma için anodize edilerek geliştirilebilir.

Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının tipik mühendislik gerilim gerinim eğrileri Şekil 3.2 'de verilmiştir.



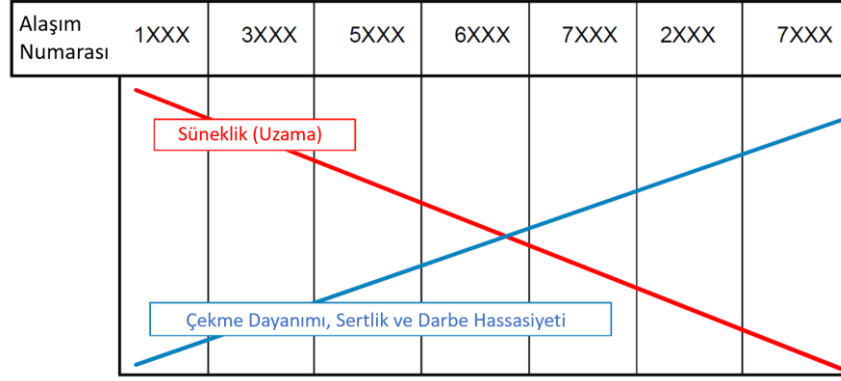
Şekil 3.2. Çekme kupon testlerinden elde edilen gerilme gerilme eğrileri (Georgantzia ve ark., 2021)

Mekanik özellikler ve alaşım tipleri arasındaki ilişki Çizelge 3.6, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te verilmiştir. Çizelgede, “E” elastiklik modülü , “ $f_{0.2}$ ”, %0.2 gerinimdeki gerilim değeri, “ f_u ” çekme gerilmesi ve “n” Ramberg–Osgood ampirik denkleminde (Ramberg, 1943) göre sertleşme üssüdür (Georgantzia ve ark., 2021).

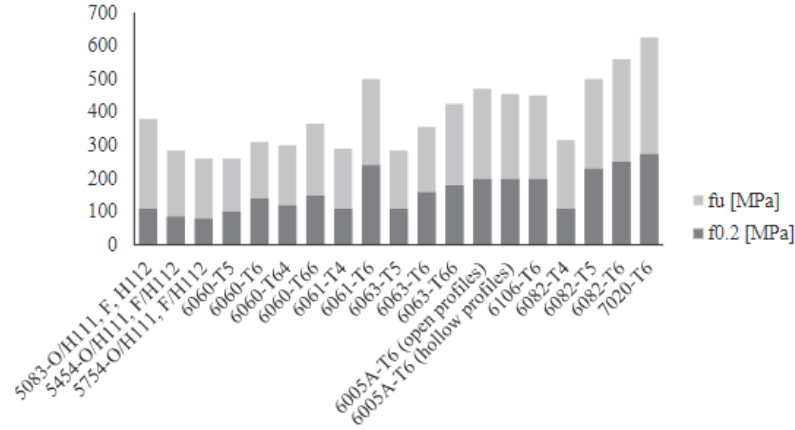
Çizelge 3.6. Yaygın olarak araştırılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri (Georgantzia ve ark., 2021)

Alaşım Sınıfı	$f_{0.2}$ [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]	$f_{0.2}/f_u$	n
5052-H36	211.6	257.8	64.2	0.8	-
6061-T6	234.0	248.0	66.0	0.9	12
6063-T5	179.0	220.0	69.0	0.8	10
6082-T4	120.1	221.0	66.9	0.5	26
6082-T6	312.2	324.2	66.7	1.0	74
7108-T7	314.0	333.4	66.9	0.9	65

Özellikle havacılık sektöründe kullanımı yaygın olan 7xxx serisi alüminyum alaşımları 6xxx serisi alüminyum alaşımlarına kıyasla daha yüksek akma gerilimine, ancak daha düşük süneklığe sahiptir. Yüksek mukavemetli ısı işlem görmüş alüminyum alaşımları (6xxx serisi) yapısal elemanlarla birleştirmek için kaynak yapıldığında, kaynak yapılan bölgenin çevresindeki mukavemetin önemli ölçüde azalmaktadır (Georgantzia ve ark., 2021).



Şekil 3.3. Al Alaşım tipi sünelik ve çekme dayanımı ilişkisi (Cobden, 1994)



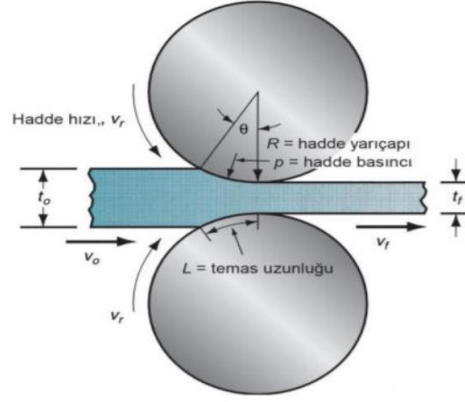
Şekil 3.4. Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının akma ve çekme dayanımları (Georgantzia ve ark., 2021)

Spesifik mukavemet yeterliliği ve üstünlüğü sebebiyle birçok endüstriyel üründe Al ve Al alaşımları kullanılmaktadır.

3.2 Alüminyum Yan Ürünleri Üretim Yöntemleri

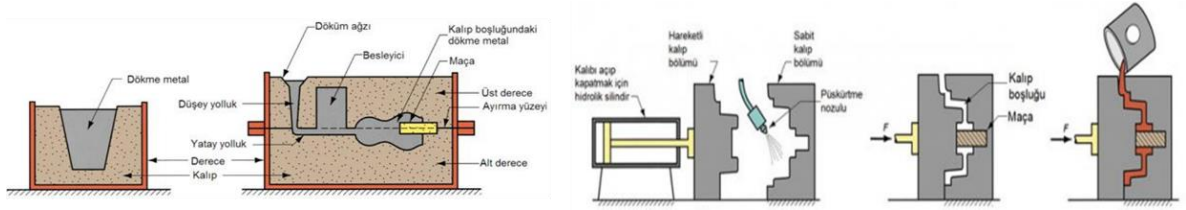
Alüminyum ürünler haddeleme, döküm, dövme ve ekstrüzyon temel prosesleri ile üretilmektedir. Haddeleme yöntemi ile plaka, levha ve folyo yassı ürünleri, ekstrüzyon yöntemi ile profil ve borular, döküm ve dövme prosesleri ile de çeşitli Şekil ve büyüklüklerde parçalar üretilmektedir.

Haddeleme iki tane döner merdänenin basma kuvvetinin etkisiyle araya giren malzemeye plastik şekil verme işlemidir (Şekil 3.5).



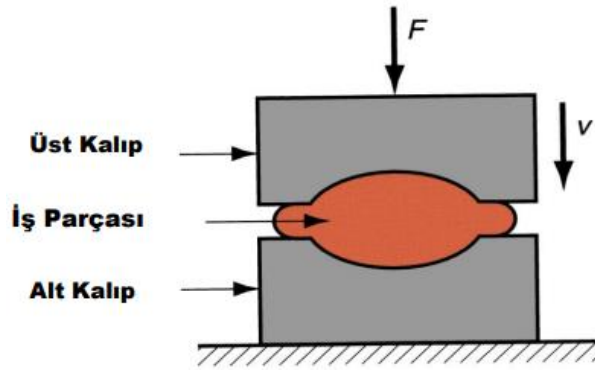
Şekil 3.5. Haddeleme prosesi (Erdin, 2017)

Döküm prosesinde, ergitilen metal veya alaşım kalıp boşluğuna dökülmesi ardından katılaşır, katılaşan metal kalıbın kırılması veya ayrılarak çıkarılır (Şekil 3.6).



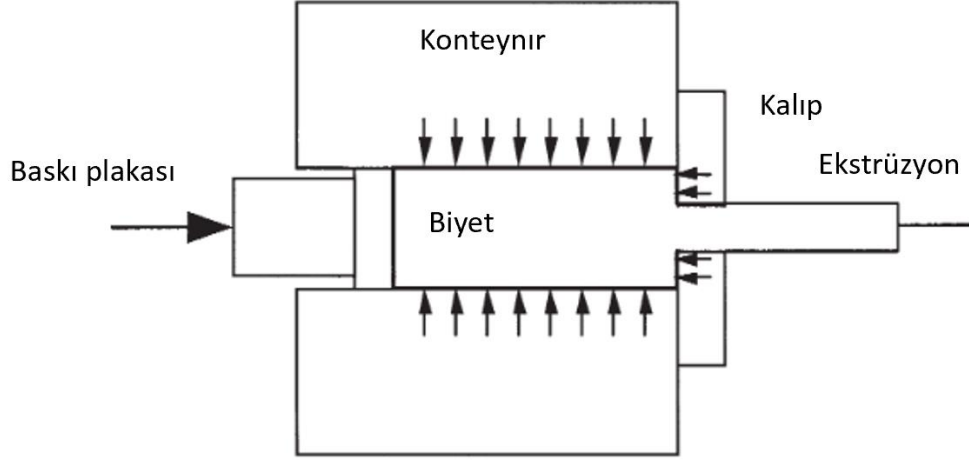
Şekil 3.6. Döküm prosesi (Avcıoğlu, 2019)

Dövme prosesi, iki kalıp arasında basınç uygulanarak gerçekleştirilen plastik şekillendirme işlemidir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Dövme prosesi (Avcıoğlu, 2019)

Ekstrüzyon prosesi, bir metal bloğunun (biyet), Şekil 3.8 de gösterildiği gibi, orijinal bloğun daha küçük bir enine kesit alanına sahip kalıp açıklığından baskı plakası ile sıkıştırma suretiyle akmaya zorlandığı bir plastik deformasyon işlemidir.

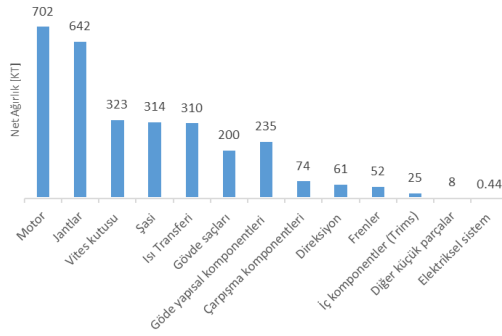


Şekil 3.8. Ekstrüzyon prosesi (Saha, 2000)

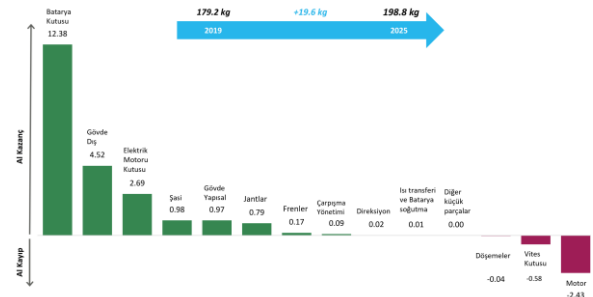
Alüminyumun kaynaklanması, kaynak çevresindeki malzeme özelliklerinde önemli değişikliklere neden olur. Kaynak işleminden kaynaklanan ısı girdisinden etkilenen alan, ısıdan etkilenen bölge (HAZ) olarak adlandırılır. Füzyon kaynağı ile birleştirilen yüksek mukavemetli 5xxx ve 6xxx serisi alaşımlar için HAZ, temel malzemedeki tipik olarak yüzde 30 ila 50 daha zayıf olmaktadır. HAZ bölgesi profil kalınlığının 3 katına kadar uzamaktadır. (Sensharma ve ark., 2010).

3.3 Otomotivde Alüminyum

Tüm otomobil pazarı için (elektrikli araçlar dahil) araç başına ortalama alüminyum içeriği 2019 yılında yaklaşık 179 kg'dır ve toplam alüminyum içeriğinin 2.989 kilo ton olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 3.9). 2025 yılında araç başına alüminyum oranının 198,8 kg olması beklenmektedir. Araç başına en yüksek ortalama Al içeriğine (442 kg) E-segmenti araçlar sahipken (Şekil 3.10), toplam C-segmenti araç üretim hacmi nedeniyle toplam Al talebinde en büyük paya (%36) C-segmenti araçlar sahiptir (European Aluminum, 2019).



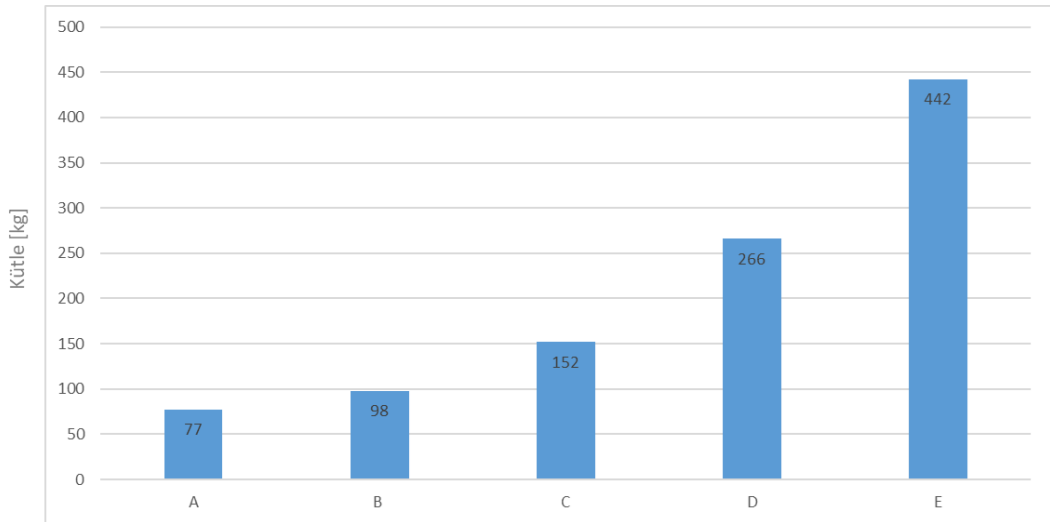
A



B

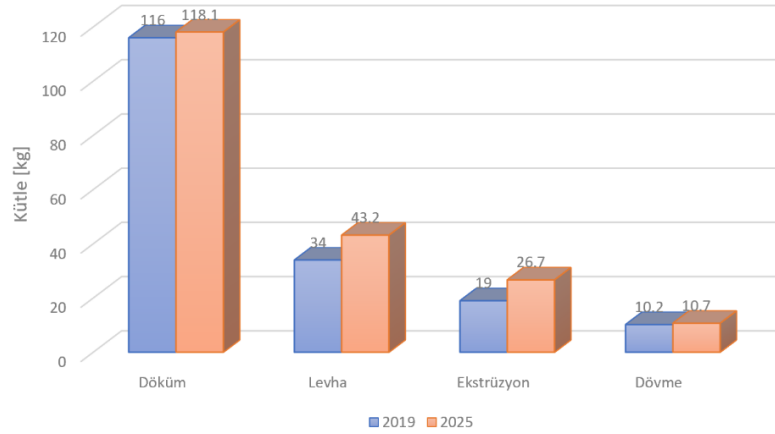
Şekil 3.9. Araç komponentlerine göre Al **A**) Miktarı **B**) Değişimi (European Aluminum, 2019)

Arabalardaki toplam alüminyum içeriğinin neredeyse yarısını motor ve jantlar oluşturmaktadır (Şekil 3.9). Batarya kutusu ve elektrik motoru kutusu elektrikli araç üretimlerinin artmasıyla hızla büyüyecektir (European Aluminum, 2019).



Şekil 3.10. Araç segmentine göre ortalama Al içeriği (2019) (European Aluminum, 2019)

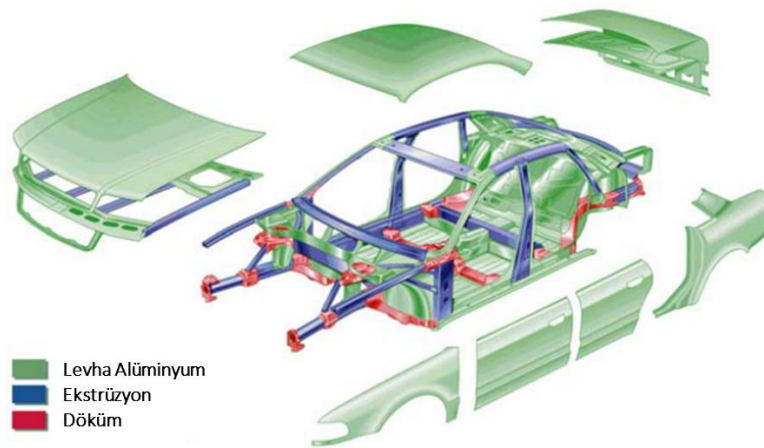
Şekil 3.11’de üretim prosesine göre araç başına alüminyum kütleleri verilmiştir. İlk sırada motor ve janttaki kullanımı sebebiyle 116 kg ile döküm yer alırken, ekstrüzyon malzeme kullanımı ortalama 19 kg’dır. Elektrikli araç sayılarındaki artış ve batarya kutularındaki Al ekstrüzyon kullanımı sebebiyle ekstrüzyon malzemelerin ortalama 19 kg’dan %40 artış ile ortalama 26,7 kg’a çıkarak en büyük artışı göstermesi beklenmektedir.



Şekil 3.11. Üretim prosesine göre araç başına alüminyum kütleleri (European Aluminum, 2019)

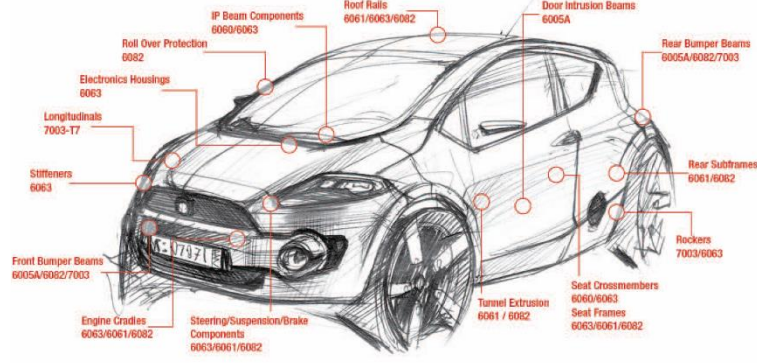
Elektrikli araçlarda kullanılan batarya kutusundaki Al kullanımı nedeniyle, Al içeriği elektrikli araçlarda içten yanmalı araçlardan önemli ölçüde daha yüksektir.

Yolcu ve hafif ticari araçlarda alüminyum ekstrüzyon yoğunluğunun artmaya devam etmesi beklenmektedir. Ayrıca, ağır vasıta (kamyon, otobüs) üreticileri daha yüksek verimlilik ve daha düşük emisyon değerleri için çalışmakta ve bu pazarlarda da ekstrüzyon kullanımı hızla artmaktadır. Şekil 3.12’de üretim yöntemine göre araç şasesindeki Al kullanım bölgeleri verilmiştir.



Şekil 3.12. Üretim yöntemine göre otomobil şasesinde alüminyum kullanımı (Audi) (Hirsch, 2004)

Şekil 3.13'te Al ekstrüzyon komponentlerinin araçtaki kullanımına ait örnekler verilmiştir. Tavan raylarından, ön çarpışma tamponuna, motor taşıyıcılarından elektronik ekipman koruma braketine yapısal eleman olarak birçok sistem ve komponentte ekstrüzyon Al alaşımları kullanılmaktadır.



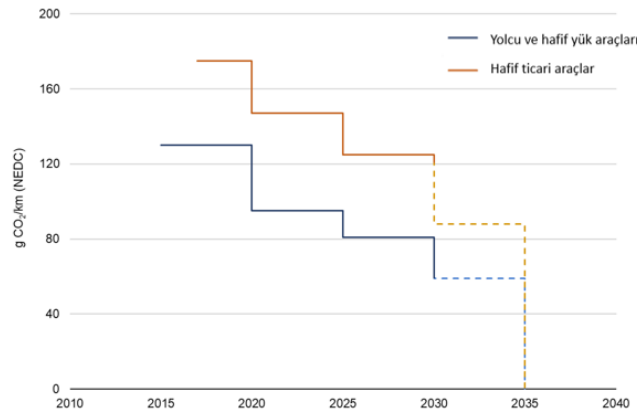
Şekil 3.13. Otomobilde alüminyum ekstrüzyon kullanılabilen komponentler (Anonim, 2018)

3.4 Elektrikli Araçlar

Gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmak için enerji kaynaklarının doğru kullanımı ciddi önem arz etmektedir. Çevreci olmayan enerji kaynaklarının fazla kullanımı küresel ısınmayı ve iklim krizini beraberinde getirmektedir. İklim krizine karşı uluslararası çabalar ortaya konmaktadır. İklim krizi ile mücadelede Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı COP21 zirvesinde imzalanan Paris Anlaşması kritik rol oynamaktadır. Anlaşma, tüm ülkelerin ortak çalışması ile 2050 yılına kadar küresel sıcaklık artışının endüstrileşme dönemi öncesine kıyaslandığında 1,5°C ile sınırlı kalmasını hedefliyor. Paris Anlaşması'nda alınan kararlara göre ülkelerin, 2050 yılına kadar net sıfır hedefine ulaşması gerekmektedir. Net sıfır, insan kaynaklı faaliyetler nedeniyle atmosfere salınan ve sera etkisine neden olan karbondioksit, metan, azot oksit gibi gazların miktarını yeryüzü tarafından doğal olarak emilen sera gazı miktarıyla eşitlemek anlamına geliyor. Yüzyılın ortasına veya hemen sonrasına kadar net sıfır emisyonu ulaşma sözü veren ülkelerin sayısı artmaya devam ediyor. Avrupa Birliği'nin Aralık 2019'da açıkladığı AB Yeşil Mutabakat (AYM) çerçevesine karşılık olarak Yeşil Mutabakat Eylem Planı'nı hazırlayan Türkiye, bu ivme ile Ekim 2021'de Paris Anlaşmasını TBMM'den geçirerek onaylamış durumda ve 2053 yılı için net sıfır

emisyonu ulaşma hedefini ilan etmiştir (Bouckaert ve ark., 2021; Erdoğan, 2021; İnanç, 2021; Turkonfed, 2021; Yıldız, 2021).

Net sıfır hedefine ulaşmak için alışılan yaşam biçimlerini, oturlan evlerden kullanılan otomobillere, enerji kaynaklarından üretim süreçlerine değiştirilmesi gereken birçok alan olduğu konusunda uzlaşa sağlanmıştır. Enerji, ulaşım, inşaat ve diğer birçok alanda gerçekleştirilmesi gereken hedefler belirlenmiştir. Otomotivde euro emisyon standartları oluşturularak üretilen araçların bu standartlara uyulması beklenmektedir. Avrupa komisyonu, emisyonları kısıtlayıcı nitelikteki Euro 7 standartlarının yürürlüğe girme tarihlerini hafif hizmet araçları (otomobil ve kamyonet) için 1 Temmuz 2025 ağır hizmet araçları (kamyon ve otobüs) için 1 Temmuz 2027 olarak belirlenmiş durumdadır. (European Commission, 2022). Ayrıca Avrupa Birliğinde sıfır emisyon araç satışlarını arttırmak için daha katı CO₂ standartları da öneriliyor (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Avrupa Komisyonu'nun Avrupa Birliği'ndeki otomobiller ve kamyonetler için CO₂ emisyon performans standartları önerisi, 2015-2040 (Bibra ve ark., 2022)

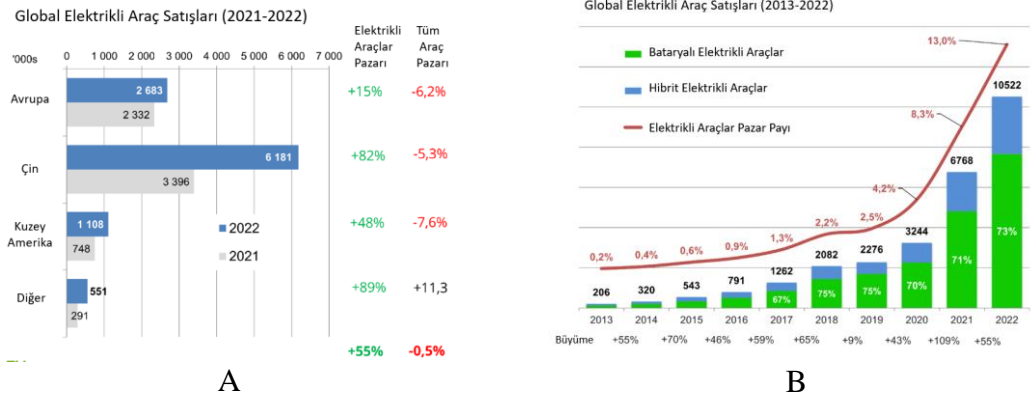
Konvansiyonel araçlar güçlerini tamamen içten yanmalı bir motordan alırken bataryalı elektrikli araçların (BEV) egzozu bulunmayıp tüm enerjisini bataryalardan almaktadır. Hibrit elektrikli araçlar (HEV) batarya paketine sahipken dışarıdan bir kablo ile batarya dolunu yapılamamakta ve içten yanmalı motor ile şarj olmaktadır. Kablolu hibrit elektrikli araçlarda (PHEV) bataryalar, dışarıdan şarj edilebilmektedir. Yakıt hücreli elektrikli araçlarda (FCV) kimyasal tepkime ile elektrik üretilerek elektrik motoru tahrik edilmektedir. Bir egzozu bulunmayan ve doğaya zehirli gaz salmayan araçlar sıfır emisyonlu araçlar olarak adlandırılmaktadır.

Net Sıfır hedefine ulaşılması için sıfır emisyonlu araç temini kritik öneme sahiptir. Araç üreticileri, daha temiz mobiliteye giden yolda öncülük etmektedir. Bir dizi şirketin artık içten yanmalı araçlarını aşamalı olarak kullanımdan kaldırma konusunda iddialı taahhütleri bulunmaktadır (Çizelge 3.7) (HM Government, 2021).

Çizelge 3.7. Araç üreticilerinin taahhütleri (HM Government, 2021)

Aston Martin	Aston Martin, 2024'ten itibaren tüm ürünler için tamamen elektrikli veya hibrit bir model piyasaya sürecek.
Audi	Audi, 2026'dan itibaren yalnızca yeni saf elektrikli modelleri piyasaya sürecek ve 2033'ten itibaren içten yanmalı motorlu araçları aşamalı olarak kaldıracak.
Bentley	Tüm Bentley modelleri 2030 yılına kadar tamamen elektrikli olacak.
Ford	Avrupa'da, otomobil satışlarının %100'ünün tamamen elektrikli olması ve ticari araçların üçte ikisinin 2030 yılına kadar tamamen elektrikli veya plug-in hibrit olması bekleniyor.
Honda	Honda satışları 2040 yılına kadar küresel olarak %100 sıfır emisyon olacak.
JLR	Jaguar araçları 2025'ten itibaren tamamen elektrikli olacak. Jaguar satışlarının 2030 yılına kadar %100 sıfır emisyon ve Land Rover satışlarının %60'ı sıfır emisyon olması bekleniyor.
MINI	2025'ten itibaren MINI, küresel satışlarının yarısının sıfır emisyonlu araçlar olmasını hedefliyor. 2030'lardan itibaren tamamen elektrikli bir marka olacak.
Nissan	2030 yılına kadar hibrit ve tamamen elektrikli araçlar da dahil olmak üzere tüm yeni Nissan modelleri elektrikli olacak.
Renault	2025 yılına kadar, Avrupa modellerinin yarısı tamamen elektrikli olacak ve tüm satışların %30'unu elektrikli araçlar oluşturacağını taahhüt etmekte.
Stellantis	Avrupa'da mevcut olan tüm modeller, 2025 yılına kadar hibrit veya tamamen elektrikli olacak.
Toyota	2025 yılına kadar 15 BEV modelini piyasaya sürmeyi planlıyor ve bir milyondan fazla sıfır emisyonlu araç dahil olmak üzere 5,5 milyondan fazla elektrikli araç satışı hedefliyor.
Vauxhall/Opel	2028'den itibaren satılan otomobillerin ve kamyonetlerin %100'ü tamamen elektrikli olacak.
Volvo	Volvo satışları 2030 yılına kadar %100 tamamen elektrikli olacak.
VW	VW, 2030 yılına kadar Avrupa'daki satışlarının %70'inin tamamen elektrikli olmasını bekliyor ve 2033 ile 2035 arasında Avrupa'da içten yanmalı araçlarını aşamalı olarak kaldıracak.

Tüm bu hedefler ve kısıtlamalarla birlikte çevreci oluşları ve avantajları sebebiyle elektrikli araçlara geçiş hızlanmakta ve tüm dünyada elektrikli araç satışları hızlı bir artış göstermektedir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Elektrikli araçlar pazarı **A)** Kıtalar 2021-2022 **B)** Dünya 2013-2022 (Irle, 2023)

Elektrikli araçların en önemli sistemlerinden biri de batarya paketleridir. Bir sistem olarak batarya paketi grubu, enerjisi ve ağırlığı ile araç menzilini ve araç dinamiklerini etkiler. Kompakt bir batarya paketi, tercih edilen bir elektrikli araç oluşturmak için önemli bir parametredir. Batarya paketindeki bataryalar, kimyasal bileşimleri nedeniyle yanıcıdır ve bu özellikleriyle güvenlik riski oluşturur. Batarya paketinin araç kullanım koşullarında ve çarpışma anında güvenlik riski oluşturmaması veya bu riskin azaltılması amaçlanmaktadır. Termal ve elektrik yangınlarına karşı önlem alınmasının yanı sıra bataryaların çarpışma anında diğer mekanik komponentlerle temas ederek ve ezilerek hasar görmesinin önlenmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle batarya paketini koruyan batarya kutusunun mekanik dayanımının yeterli olması beklenir. Otomotivde çeşitli kötü kullanım ortamlarında lityum iyon bataryaların güvenlik testleri için çeşitli uluslararası standartlar ve düzenlemeler oluşturulmuştur (Ruiz ve ark., 2018).

Elektrikli ve hibrit araç pazarı yıllar geçtikçe büyümekte ve bugün de büyümeye devam etmektedir. Hem hükümet düzenlemelerinden hem de tüketici talebinden etkilenen otomobil üreticileri, verimliliği ve yakıt ekonomisini iyileştirecek teknolojileri geliştirmekte ve takip etmektedirler. Özellikle, mevcut araştırmaların aracı geliştirmeyi amaçladığı üç ana alan vardır: elektrik motorları, güç elektroniği ve enerji depolama

(Sarlıoglu ve ark., 2015). Bir elektrikli araç batarya paketinin ortalama maliyeti, aracın toplam maliyetinin %30 ila %57'si arasındadır (Jones, 2022).




2040 yılına kadar, yeni arabaların %35 ila %47'si elektrikli motorla donatılacağı öngörülmektedir. Lityum-iyon batarya kullanmanın maliyeti batarya teknolojileri ve kimyasallarındaki gelişmeler ve üretim hacmindeki artış sebebiyle düşmektedir. 2020 yılında batarya paketi fiyatları ortalama 137 \$/kWh değerindedir. Bir elektrik motorunun maliyeti ise tüm elektrikli aracın maliyetinin %30 'una kadar çıkmaktadır. (Anonim, 2023; Henze, 2020; Reshetko ve ark., 2020; U.S Department of Energy, 2023).

Bataryanın enerji yoğunluğu (Wh/L) ve spesifik enerji (Wh/kg) nicelikleri de elektrikli araçlar pazarının büyümesi için eşit derecede önemlidir. Bir araçtaki ağırlık aracın menziline ve hızlanma performansını etkiler. Hacim de aynı derecede önemlidir çünkü bir araçta batarya paketi için çok sınırlı bir alan vardır, bu nedenle aynı miktarda alana daha fazla enerji koyabilmek çok değerlidir. Birçok batarya tipi mevcut olup araçlarda müşteri taleplerini optimize etmek için çeşitli tipler kullanılmaktadır (Mccall, 2021).

Elektrikli araçların temel avantajları çalıştırma ve bakımda önemli maliyet tasarrufu, CO₂ emisyonlarında çevre dostu tasarruf, sürüş yorgunluğunu ve stresini azaltarak inanılmaz sürüş deneyimi ve sağlanan vergi avantajları ile büyük depo alanlarına ihtiyaç duymayan ve yaygınlaşacak şarj istasyonlarıyla şarj kolaylığıdır (Vij, 2022).

3.5 Elektrikli Araç Batarya ve Batarya Paketi

Bir otomobilin, özellikle elektrikli bir aracın bataryası, otomobilin birincil güç merkezidir. Bataryalar, daha sonra otomobile güç sağlamak için elektrik enerjisine dönüştürülen kimyasal enerjiyi depolar. Geleneksel lityum iyon bataryalarda günden güne maliyet, enerji yoğunluğu ve ömür iyileştirmeleri olmaktadır. Maliyet, elektriksel davranış ve ömür açısından farklılıklar gösteren birçok farklı hücre kimyasının yanı sıra, kese, silindirik ve prizmatik hücreler gibi çeşitli hücre biçimleri vardır (Löbberding ve ark., 2020). Batarya hücre biçimlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları da bulunmaktadır (Şekil 3.16).

	Silindirik Hücre	Prizmatik Hücre	Kese Hücre
			
Enerji yoğunluğu	Orta	Yüksek	En yüksek
Mekanik stabilite	Yüksek	Orta	Düşük
Termal performans	Yüksek	En yüksek	Orta
Kapladığı alan	Düşük	Yüksek	En yüksek
Üretim maliyeti	Yüksek	Orta	Düşük
Basınç dayanımı	Yüksek	Orta	Düşük

Şekil 3.16. Batarya hücre tipleri (Bala & Chaitanya Kamaraju, 2020; Höhne & Hirtz, 2013; Zwicker ve ark., 2020)

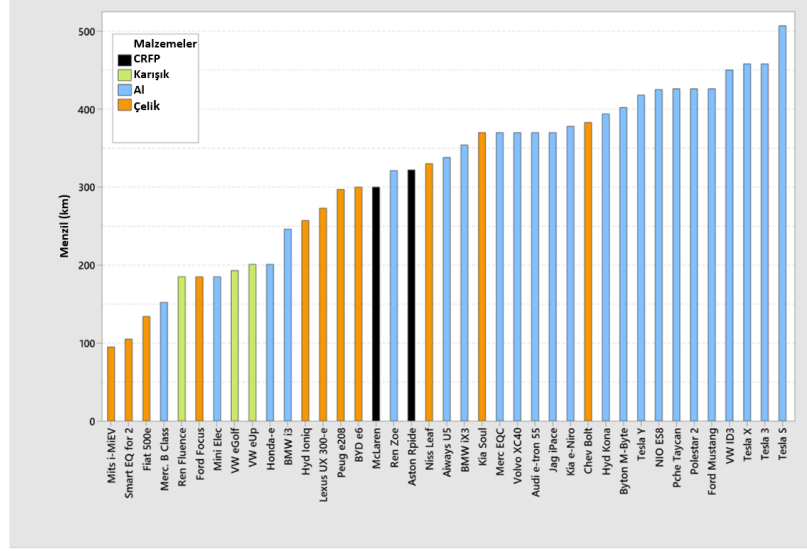
Batarya paketi tüm sistemi belirtirken, batarya kutusu bataryaları ve diğer tüm elektriksel ekipmanı taşıyan konstrüksiyondur. Aracın güç merkezini çevresel etkilerden ve bir araba kazası durumunda dış etkilerden korurlar. Bazı batarya kutuları yalıtkan görevi görebilir veya bataryanın soğutma sistemine de katkıda bulunabilir.

Batarya kutusu tasarımı, özellikle bir kaza durumunda bataryaları ve yolcuları ideal şekilde korur. Hafiflik, güvenli yalıtım, modüler tasarım ve emniyet, batarya paketinden beklenen temel unsurlardır. Batarya paketi araca güç sağlamak için elektrik enerjisine dönüşen kimyasalları depolar ve elektrik kaçaklarına karşı yalıtım sağlar, araba kazası durumunda yolcu güvenliği sağlamak içinde iyi bir dayanıma sahip olmalıdır.

Geleneksel olarak, elektrikli araçlar için batarya kutularının imalatında tercih edilen malzeme, esas olarak yapısal sağlamlığı ve hafifliği nedeniyle alüminyum alaşımlarıdır. (Anonim, 2022b). Ancak paslanmaz çelik, elyaf kompozitler, termoplastikler de batarya kutusu tasarımında kullanılmaktadır. Paslanmaz çelikler ağırlık dezavantajıyla birlikte dayanımı ve yüksek ısı direnci sebebiyle, elyaf kompozitler maliyet ve seri üretime uygunsuzluğuyla birlikte hafiflik, mukavemet, ısı ve yangına dayanıklılık sebebiyle, termoplastikler malzemeler uygun maliyetleri sebebiyle batarya kutusu üretiminde tercih edilebilmektedir.

Batarya kutuları için çelik veya karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) yerine alüminyum alaşımları daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.17). Kompozit endüstrisi ise şu

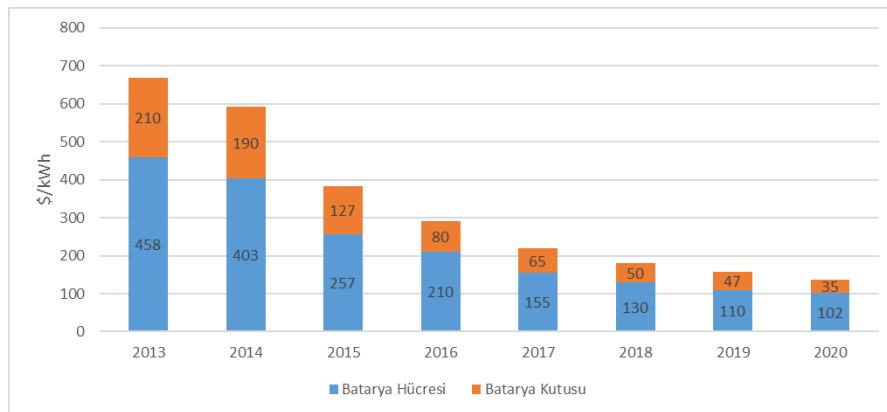
anda yüksek hacimli araçları destekleyecek kadar olgun değil ve yüksek maliyetli kalmaktadır (Scamans, 2018).



Şekil 3.17. Batarya kutusu ve mevcut otomobillerdeki malzeme seçimleri (Afseth, 2021)

Otomobil üreticileri şu anda bir elektrikli otomobilin toplam maliyetinin %30 ila %50'sini oluşturan batarya paketi maliyetlerinin gelecekte düşmesini beklemektedir (Djukanovic, 2019).

Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi'nin (ICCT) raporuna göre, 2025 yılına kadar tahmini maliyet 120 \$/kWh ila 135 \$/kWh arasında olacağı belirtilmiştir. Batarya paketinin 2013 ile 2020 yılları arasındaki maliyetler Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Batarya paketi maliyetleri (Henze, 2020)

3.6 Örnek Batarya Paketi Tasarımları ve Özellikleri

Batarya kutusu dört ana yapısal bölümden oluşmaktadır. Bunlar; üst kapak, alt kapak, çevre konstrüksiyonu ve modülleri ayıran iç konstrüksiyon komponentleridir. Batarya kutusu 2,5 x1,4 m ye varan boyutlarıyla 700 kg ağırlığa kadar ulaşmakta ve toplam araç ağırlığının %22-27'si oluşturmaktadır. Etkin bir batarya paketi tasarımı aracın çarpma enerjisini emme yeteneğine de büyük ölçüde katkı sağlamaktadır. Mekanik gereklilikleri yerine getirmek için, batarya paketinin maliyetinin ve ağırlığının %20'sini oluşturan batarya kutusu için en iyi malzemeleri ve üretim süreçlerini seçmek zorunludur. Çoğu batarya kutusu tasarımı, her ikisi de ekstrüzyon için ideal olan sabit kesitli çerçeve konstrüksiyonu ve iç konstrüksiyon elemanlarından oluşmaktadır.

Batarya kutusu üretiminde farklı malzeme ve teknolojiler kullanılabilir. Çelik, alüminyum, plastik ve kompozit malzeme uygulamaları, çalışma yapılmış örneklerdir. Bazı elektrikli araçların batarya paketlerine ait özellikler Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Örnek batarya paketi tasarımlarının özellikleri (Bala & Chaitanya Kamaraju, 2020)

	Audi E tron 55	Hyundai Kona	Jaguar I-Pace	Volkswagen e-Golf
Model yılı	2019	2018	2018	2018
Batarya paketi ölçüleri (Uzunluk-genişlik-yükseklik) [mm]	2160-1625-140	1970-1440-310	2310-1455-456	2312-1160-60
Menzil [km]	355	400	370	190
Batarya paketi kütle [kg]	681	450	603	344
Boş araç kütle [kg]	2490	1685	2133	1540
Batarya enerjisi [kWh]	95	64	90	36

Çizelge 3.8. Örnek batarya paketi tasarımlarının özellikleri (Bala & Chaitanya Kamaraju, 2020) (devam)

	Nissan leaf SV	Chevrolet Bolt EV	Tesla Model 3 Standart	BMW i3
Model yılı	2017	2017	2018	2019
Batarya paketi ölçüleri (Uzunluk-genişlik-yükseklik) [mm]	1540-1126-335	1815-1275-387	2156-1470-122	1660-964-157
Menzil [km]	172	238	402-518	246
Batarya paketi kütle [kg]	290	427	460	275
Boş araç kütle [kg]	1507	1624	1741	1486
Batarya enerjisi [kWh]	30	60	75	42

Tesla Model 3 batarya kutusunda silindirik bataryalar kullanılmış, batarya kutusunda kapaklar alüminyum levhalardan yapılmış ve 5000 serisi alüminyum ekstrüzyon profillerle birleştirilmiştir (Bala & Chaitanya Kamaraju, 2020) .



Şekil 3.19. Tesla model 3 batarya paketi (Second Life, 2020)

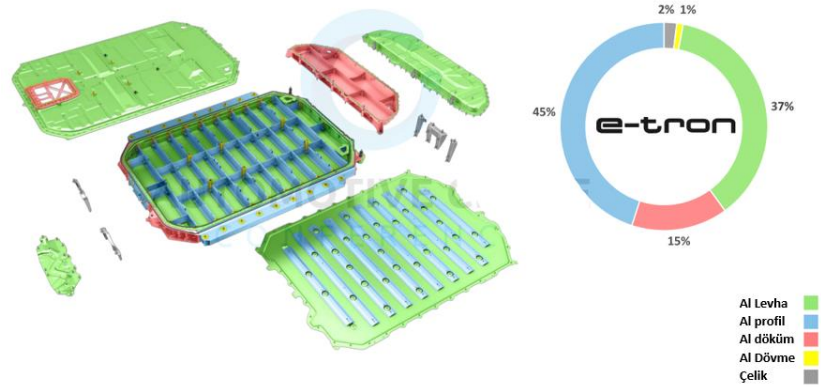
Audi e-Tron batarya paketi aynı katta duran 27 modülden oluşmaktadır. Döküm ve ekstrüzyon alüminyumdan oluşan güçlü bir çerçeve konstrüksiyon yapısı ile 3,5 mm kalınlığında bir alüminyum levha bulunmakta, bu kullanım ile aracın burulma sertliğinin

%27 oranında arttırıldığı belirtilmiştir. Batarya paketi gövde yapısına 35 noktadan bağlantı elemanı ile sabitlenmiştir. Geleneksel sportif çok amaçlı araç (SUV) ile karşılaştırıldığında Audi e-Tron, hassas kullanım ve akustik konfor için önemli bir parametre olan burulma rijitliğinin %45 oranında daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Anonim, 2021a). Audi e-Tron ait komponentlerine ait görsel Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Audi e-Tron Batarya paketi komponentler (Anonim, 2021a)

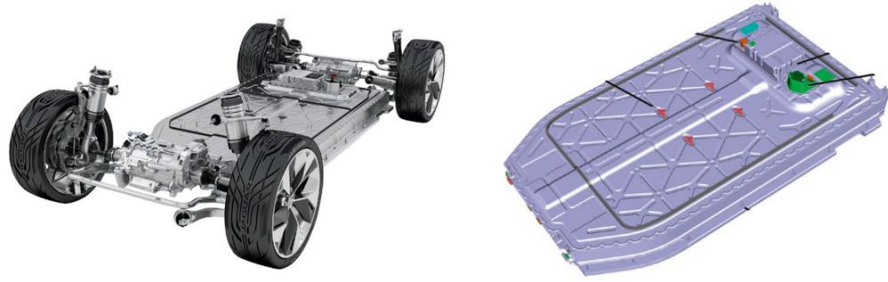
Audi e-Tron batarya kutusu %45 Al ekstrüzyon, %37 Al levha, %15 Al döküm parçalardan oluşturmaktadır (Şekil 3.21) (Anonim, 2021i).



Şekil 3.21. Audi e-Tron Batarya paketi malzemeler (Enderle ve ark., 2019)

Jaguar I-Pace batarya paketi 36 modülden oluşmaktadır ve hücreler -40 ile +60 °C arasındaki aşırı sıcaklıklarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Batarya paketini çevreleyen hacim 457 litredir. Aracın alt tarafı ile batarya hücreleri arasında 8 mm kalınlığında bir alüminyum plaka koruma yerleştirilmiştir. Batarya paketi yan duvarında

optimize edilmiş ekstrüzyon profiller kullanılmıştır. Araç gövdesinin altına monte edilmiş batarya paketinin araç gövde sertliğini %50 arttırdığı belirtilmiştir. I-Pace batarya paketi, aracın hizmet ömrü boyunca maksimum güvenilirlik ve güvenlik sağlamak için zorlu testlere tabi tutulduğu +25 ile +80 °C arasında, %70 ila %95'lik yüksek nemde korozyon dayanımına sahip olduğu, 4,9 m yükseklikten beton zemine düşme testleri de dahil olmak üzere tüm yasal çarpışma testlerini başarıyla tamamladığı belirtilmiştir (Fuchss ve ark., 2019). Jaguar I-Pace'e ait tasarım Şekil 3.22'de verilmiştir.



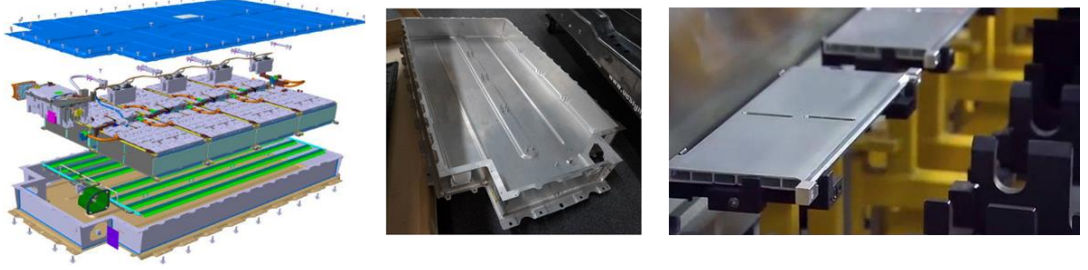
Şekil 3.22. Jaguar I-Pace Batarya paketi (Fuchss ve ark., 2019)

Volkswagen ID.4 batarya paketi optimum sürüş dinamikleri ve son derece dengeli ağırlık dağılımı için alçak bir ağırlık merkezi oluşturmak üzere alt gövdeye yerleştirilmiş 12 batarya modülünden ve 288 prizmatik batarya hücresinden oluşan bir batarya paketidir. Alüminyum ekstrüzyon bir çerçeve, çarpışma durumunda batarya sistemini hasara karşı korur ve değiştirilebilir bir alüminyum alt gövde paneli, bataryaları yola karşı korumaktadır (John, 2021). Volkswagen ID.4 batarya paketine ait tasarım Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Volkswagen ID.4 Batarya paketi (Carney, 2022; John, 2021; Volkswagen, 2022)

BMW i3 batarya paketi 8 modülden oluşan su soğutmalı bir sisteme sahiptir. Batarya kutusunda alüminyum alaşım ekstrüzyon profiller kullanılmıştır (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. BMW i3 Batarya paketi (Anonim, 2017; Elsa Liu, 2023; Schoewel & Hockgeiger, 2014)

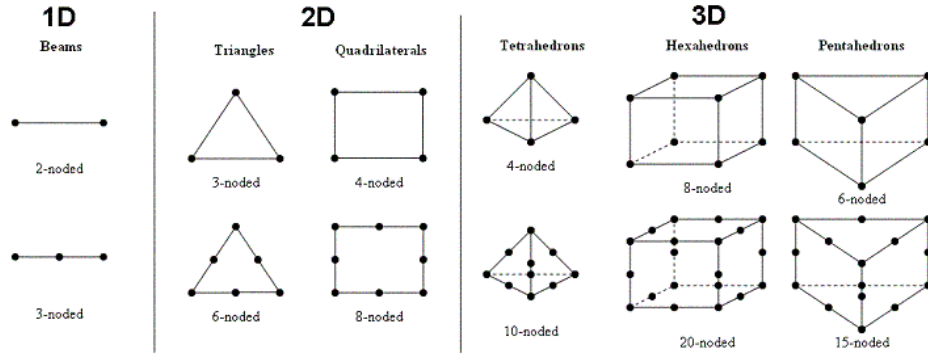
Basınçla kalıplanmış fiberglas kompozit malzemeler batarya paketlerinde çelik ve alüminyum kullanımına alternatif hafif ve maliyet uygunluğu sebebiyle tercih edilen ve araştırılan malzeme ve prosestir (Wu ve ark., 2021). Kompozit malzemelerle üretilmiş batarya paketi örneği Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. Kompozit batarya paketi (Anonim, 2022a)

Sonlu elemanlar analizlerinde, geometriye, analiz tipine ve proje süresine bağlı olarak eleman tipine ve eleman boyutuna karar verilir. Komponent geometrisinin bir boyutu, diğer 2 eksene göre büyükse (genel kabul 10 katıdır) 1 boyutlu, 1 boyut diğer 2 boyuta göre çok küçükse 2 boyutlu, 3 boyut birbirine yakın ise 3 boyutlu geometrik şekilli elemanlar kullanılır.

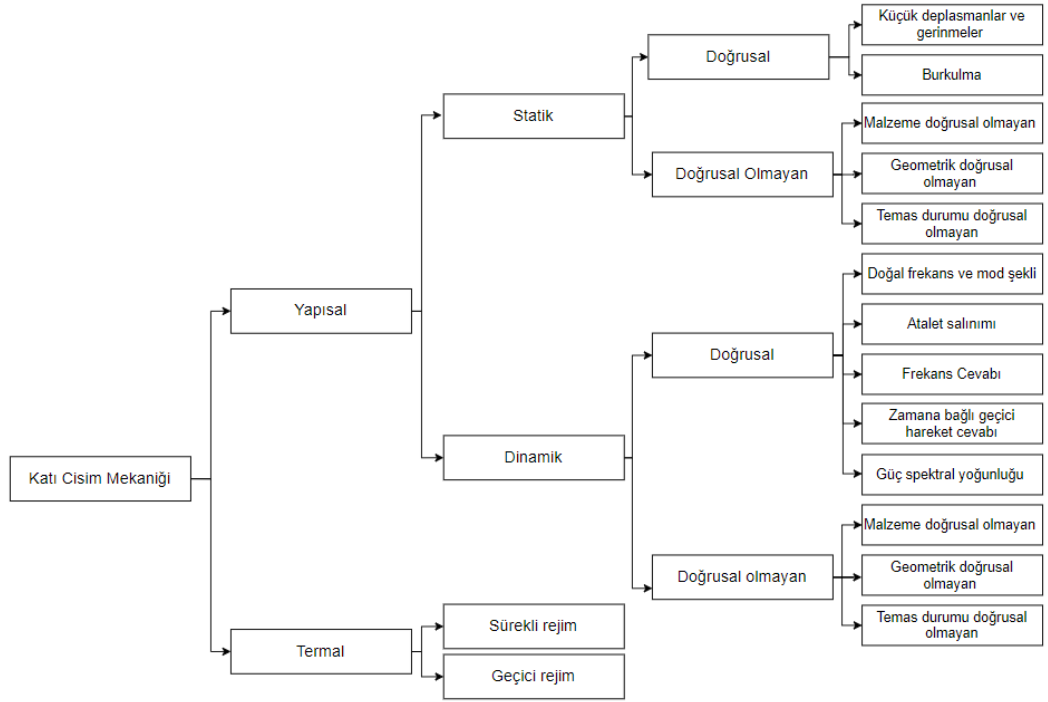
Eleman geometrileri Şekil 3.27’de verilmektedir. Elemanların köşe noktaları üzerinde düğüm noktaları bulunmaktadır. Seçime bağlı olarak sadece kenar birleşimlerinde düğüm noktası kullanılabilir (first order elemanlar) veya hesaplama süresini arttırmakla birlikte daha doğru sonuçlar için kenarların orta noktalarında da düğüm noktaları bulunan elemanlar (second order elemanlar) kullanılmaktadır. Ayrıca boyutsuz elemanlar ve düğüm noktaları arasındaki ilişkiyi tanımlayabileceğimiz boyutsuz elemanlarda bulunur (Altair, 2015).



Şekil 3.27. Sonlu elemanlar analizleri eleman tipleri

Mühendislik yazılımları ve yazılımlar içerisindeki algoritmalar mühendislik problemlerine göre özelleşmişlerdir. Bu sebeple problemin hangi tarz bir mühendislik problemi olduğu öncelikle tespit edilmeli, mühendislik problemine etki eden parametreler bilinmeli, ihmal edilebilecek unsurlar değerlendirilmelidir.

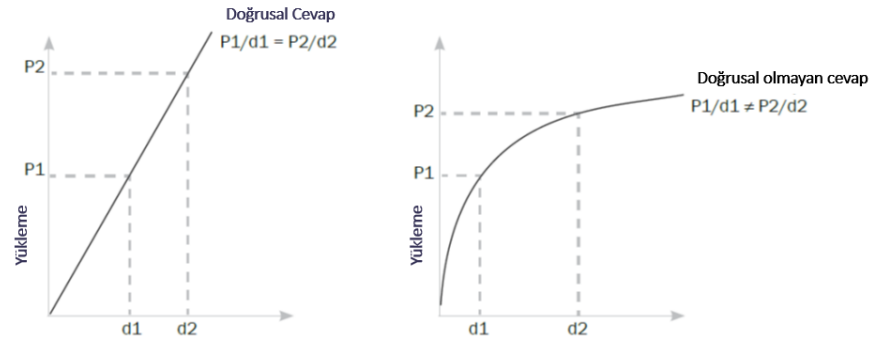
Bilgisayar destekli analizlerde katı cisimler mekaniği biliminde mühendislik problemleri Şekil 3.28’deki alt başlıklara ayrılabilir. Katı cisimler mekaniğini ilk olarak termal ve yapısal olarak, yapısal tarafı statik ve dinamik olarak, statik ve dinamik analizleri de doğrusal ve doğrusal olmayan mühendislik problemleri olarak sınıflandırmak mümkündür.



Şekil 3.28. Katı cisimler mekaniği mühendislik problemleri

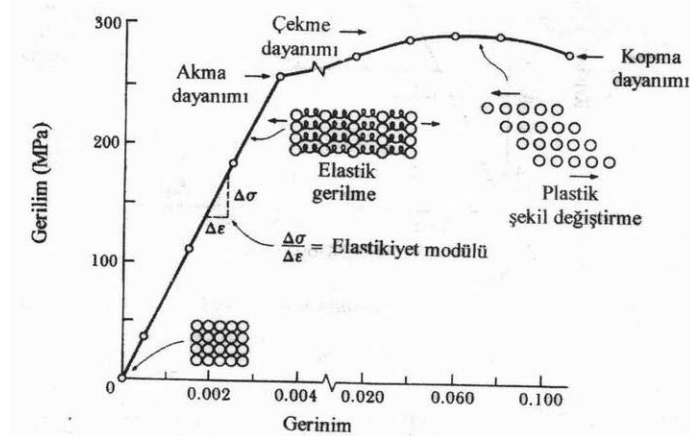
Statik problemler yapı üzerindeki atalet, sönüm ve rezonans etkisinin ihmal edilebildiği problemlerdir. Yükleme döngüsel ve yükleme frekansı yapının ilk doğal frekansının 1/4'ünden düşükse problem, statik problem olarak değerlendirilebilmektedir (Pickett, 2007; Pinto, 2013). Bası altındaki narin parçalar düşük yüklemelerde kararsız şekil değiştirmeler nedeniyle yüksek deformasyona uğrayabilmektedir. Burkulma, bası kuvvetleri altında sistemin yapısal kararlılığının sorgulandığı problemlerdir. Burkulma analizleri için modal analiz ile bulunan yapının mod şekilleri bilinmelidir. Modal analizler yapının serbest titreşim hareketlerini ve frekanslarını bulmayı sağlar. Modal analizler sonucunda incelenen titreşim frekansında yapının tümüne oranla harekete katılan kütle oranına (kütle katılım oranı) bakılarak, titreşimin bölgesel veya yapının tümünde etkili olup olmadığı bulunabilir.

Doğrusal analizlerde yönü değişmeyen yükleme şartında, artan yükleme ile sistemden alınan cevap doğrusal olmalıdır. Şekil 3.29'da doğrusal ve doğrusal olmayan cevap örneği verilmiştir.



Şekil 3.29. Doğrusal ve doğrusal olmayan cevap örnek grafiği

Doğrusal yaklaşımı bozan durumlardan biri malzeme eğrisinin doğrusal olmamasıdır. Elastoplastik malzemelerde akma noktasına kadar gerilme gerinme grafiği doğrusal iken akma noktasından sonra doğrusal ilerlememektedir. Yapılacak olan analiz, malzemenin doğrusal olmayan gerilme gerinme bölgesinin kullanılmasını gerektiriyorsa doğrusal yaklaşımlar kullanılamamaktadır (Malzeme doğrusal olmayan problemler).

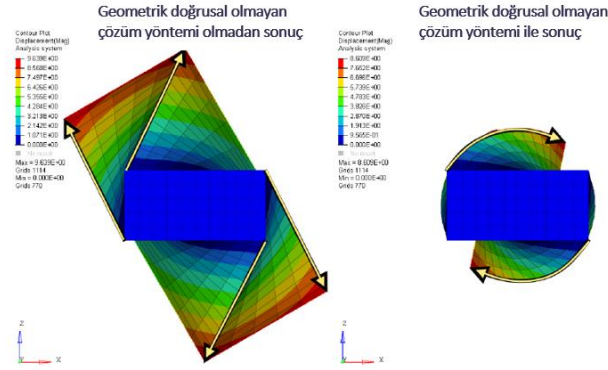


Şekil 3.30. Elastoplastik malzeme gerilme gerinme grafiği (Keles, 2010)

Komponentler birbirlerine temas ediyor ve bu temas ayrılamaz yapışık bir durumu temsil ediyorsa kuvvetler doğrusal bir tepki üretmektedir ve doğrusal yaklaşımlar kullanılmaktayken ayrılabilen veya sürtünmeli bir temas durumunda doğrusal yaklaşım kullanılamamaktadır (Temas durumu doğrusal olmayan problemler).

Yüksek deplasman içeren problemlerde kuvvet yönü veya artan yüklemeler ile yer değiştirme vektörünün veya kuvvet vektörünün yönü değişebilmektedir. Bu durumun dikkate alınması gerektiği problemler geometrik doğrusal olmayan mühendislik problemi

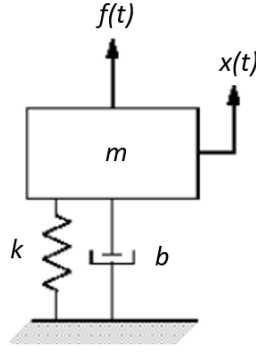
olarak sınıflandırılır. Bir kuralı olmamakla birlikte %5 gerininin aşılması veya modelin en büyük boyutunun 1/20 si üzerinde bir deplasman var ise geometrik doğrusal olmayan problem varlığı değerlendirilir (Hurlston, 2021). Geometrik doğrusal olmayan bir problemin çözümündeki farklılığa ait örnek görsel Şekil 3.31’de verilmiştir.



Şekil 3.31. Geometrik doğrusal olmayan çözümün kullanılmasının farkı (Altair, 2018)

Dinamik problemler zamanın bir parametre olarak dahil olduğu problem çeşitleridir. Yapının atalet, sönüm veya rezonans etkilerinin de değerlendirilmesini gerektirmektedir. Atalet kuvvetleri, sönüm kuvvetleri (viskoz) ve rezonans zaman parametresine bağlıdır. Tek serbestlik dereceli kütle yay damper sisteminde (Şekil 3.32) zamana bağlı kuvvet değişiminde hareket denkleminin çıkarılması için kütle, yay katsayısı ve sönüm değerlerinin bilinmesi gerekir ve cevap zamana bağlıdır. Atalet salınımı (Inertia relief) analizleri dışındaki dinamik analizler zamana bağlı analizler olarak düşünülebilir. Atalet salınımı mesnetlenme ihtiyacı olmaksızın atalet yükleri ile dengelenen durumu temsil etmektedir. Atalet salınımı analizlerinde ivme zamana bağlı sabit değerde hesaplanmaktadır. İncelenecek duruma bağlı olarak dinamik analizler zaman alanında veya frekans alanında inceleme yapılabilir. Bir sistemin çalışma koşulunun analiz edilmesinde frekans alanında inceleme tercih edilmektedir.

Zamana bağlı dinamik analizlerde titreşim tahriki sistemin doğal periyodu ve doğal periyodunun iki katı arasında ise şok analizi olarak değerlendirilmektedir (Ediz, 2018).



Şekil 3.32.Tek serbestlik dereceli kütle yay damper sistemi

Statik analizlerin çözümünde Denklem 3.1 kullanılmaktadır. “K”, yapının rijitlik matrisini, “x” yer değiştirme vektörünü temsil eder ve “f” ise yapıya uygulanan kuvvet vektörüdür.

$$[K]x = f(t) \quad (3.1)$$

Zamana bağlı dinamik analizlerde ise Denklem 3.2 kullanılmaktadır. “M” kütle atalet matrisi, “C” sönüm matrisi “K” rijitlik matrisini temsil ederken “f” zamana bağlı kuvveti temsil etmektedir. Deplasman “x” ile ifade edilirken “ \dot{x} ” ve “ \ddot{x} ” sırasıyla hız ve ivmeyi ifade etmektedir.

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = f(t) \quad (3.2)$$

Frekans, titreşim sayısı bir olayın birim zamanda (1 saniye) kaç defa tekrarlandığının ölçümüdür. Frekansa bağlı (harmonik) dinamik analizlerin çözümünde Denklem 3.3 kullanılmaktadır. “M” kütle atalet matrisi, “C” sönüm matrisi “K” rijitlik matrisini temsil ederken “f” kuvvet vektörünü “x” deplasman vektörünü belirtir. “ Ω ” Kuvvetin uyguladığı açısal frekanstır. Uygulanan harmonik uyarının, harmonik bir tepki ürettiği varsayılabilir ve yer değiştirme vektörü direkt tabanlı çözüm için Denklem 3.4, modal tabanlı çözüm için Denklem 3.5 ifadesindedir. “A” hareket denklemini genel koordinatlardan modal koordinat sisteminde, problemi modal davranışlara dönüştürmek için her bir özdeğerlerine “d” karşılık gelen özvektörleri temsil eder. Denklem 3.3 düzenlenerek Denklem 3.6 yazılabilir ve direkt tabanlı harmonik analizlerde kullanılır. Sonlu elemanlar analizlerinde sönümleme tanımlamanın birkaç yolu olarak “G” sabit bir yapısal sönüm

için “ C_{GE} ” malzemeye veya elemanlara ait sönümlenmeler için ve “ C_1 ” viskoz sönümleme tanımları için kullanılmaktadır (Altair, 2021a).

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = fe^{i\Omega t} \quad (3.3)$$

$$x = de^{i\Omega t} \quad (3.4)$$

$$x = Ade^{i\Omega t} \quad (3.5)$$

$$[K - \Omega^2 M + iGK + iC_{GE} + i\Omega C_1] de^{i\Omega t} = fe^{i\Omega t} \quad (3.6)$$

Modal analizler ile yapının özdeğer ve özvektörleri yani sönümsüz doğal frekansları ve doğal frekans mod şekilleri hesaplanmakta ve şiddetli titreşimlerin olası yerleri belirlenmektedir. Bir sistemin modal kütlesi, mod şekline ne kadar kütle dahil olduğunun ve dolayısıyla sistemde ne kadar kinetik enerji olduğunun bir ölçüsüdür. Sürekli bir sistemin her modu için bir modal kütle belirlenir. Kütle, dinamik analizlerde atalet etkileri sebebiyle önemli bir parametredir. Modal tabanlı dinamik analizlerde yapının hareketlerinin doğru temsil edilebilmesi için hesaplanan frekans değerine kadar toplam efektif kütle katılım değerinin yüksek olması istenir ve böylece daha doğru bir analiz yapılması sağlanır.

Modal analiz, modal tabanlı dinamik analizlerde bir sistemin doğal frekansları, sönümleme faktörleri ve mod şekilleri cinsinden doğal dinamik özelliklerini belirlemek, bunları dinamik davranışını matematiksel bir model ile ifade etmek için de kullanılmaktadır. Formüle edilmiş matematiksel model, sistemin modal modeli olarak adlandırılır. Bu model, yapının karakteristiğini ve modal verileri hakkındaki bilgileri içerir (Fu & He, 2001).

Doğal frekans analizlerinde (modal analiz) Denklem 3.7’de olduğu gibi sönüm ve zorlanmış kuvvet olmadan hesaplamalar yapılmaktadır.

$$[M]\ddot{x} + [K]x = 0 \quad (3.7)$$

Serbest titreşim hareketinin formu Denklem 3.8 gibidir. Faz farkı “ φ ” ile gösterilmektedir. Denklem 3.7 düzenlenerek matris özdeğer problemi görünümünde

Denklem 3.9'a ulaşılır. Çözüm için katsayı matrisinin determinantı sıfır olmalıdır (Denklem 3.10).

$$\{x\} = \{X\} \sin \omega t + \varphi = 0 \quad (3.8)$$

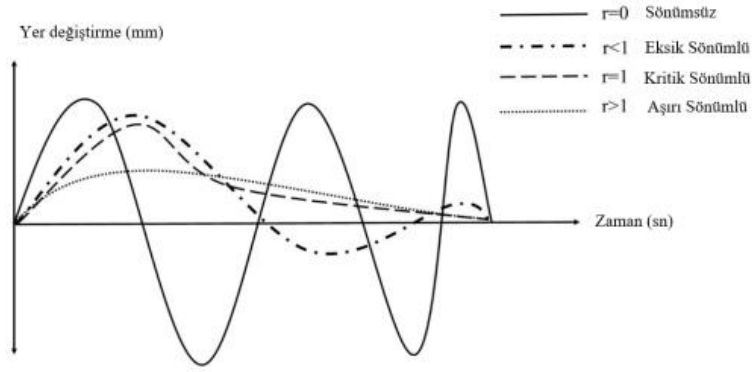
$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = \{0\} \quad (3.9)$$

$$([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad (3.10)$$

“ ω ” açısal hızı ve özdeğer probleminde bulunan özdeğerler doğal frekansları, bulunan özvektörler $\{X\}$ titreşim mod şekillerini gösterir. Çok serbestlik derecesine sahip sistemde cevap fonksiyonu doğal frekanslarındaki harmoniklerin lineer kombinasyonudur.

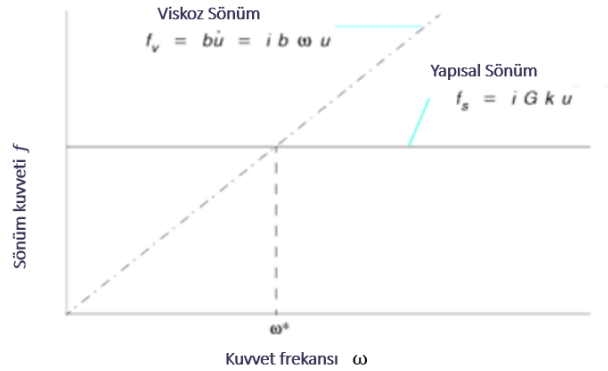
Çevrimsel yüklere maruz kalan bir yapının doğal frekanslarını bilmek önemlidir. Yapıda doğal frekanslarla çakışan yüklemelerde rezonans olayı gerçekleşir ve yapı hasara uğrayabilir (Tacoma Narrows Bridge, 2021). Rezonans durumu bir analogi ile salıncakta sallanma durumuna benzetilebilir. Salıncakta sallanan bir kişi sadece belli düzendeki itmelerle salınımını arttırabilir veya koruyabilir. İtme frekansının sallanma frekansından farklı olan itme davranışında kişi salınımını sürdüremeyecek ve hatta yavaşlayacaktır. Doğal frekans ile çakışan nitelikteki yükleme durumlarında genlik artar.

Titreşim, periyodik veya belirli bir zaman sonra kendini tekrarlayan harekettir. Sönümlü sistemlerde hızla veya deplasman ile orantılı olarak hareketi durduran yönde kuvvet oluşmaktadır. Sönüm titreşen bir sistemde titreşim genliklerinin azalmasına ve faz farkı oluşmasına sebep olur ve sönüm değerine göre titreşim profilleri değişir. Sönüm değeri kritik sönüm değerinin altındaysa eksik sönümlü üzerindeyse aşırı sönümlü sistem olur. Sönüm değerine göre örnek titreşim profilleri Şekil 3.33'te verilmiştir. Sönüm oranı sönüm değerinin kritik sönüme oranıdır.



Şekil 3.33. Serbest sönümlü titreşim türleri (Anonim, 2019b)

Modal analiz uygulamalarında ve dinamik analizlerde genelde viskoz ve yapısal sönüm dikkate alınır. Viskoz sönüm kuvveti hızla orantılıdır. Yapısal sönüm kuvveti ise şekil değiştiren cisimde malzeme içindeki tanelerin birbirini üzerinden sürtünerek kayması ile ortaya çıkar. Sabit genlikli sinüzoidal yer değiştirme tepkisi için, yapısal sönümlenme kuvveti sabittir ve viskoz sönümlenme kuvveti zorlama frekansıyla orantılıdır. Viskoz ve yapısal sönüm grafiği Şekil 3.34'te verilmiştir.



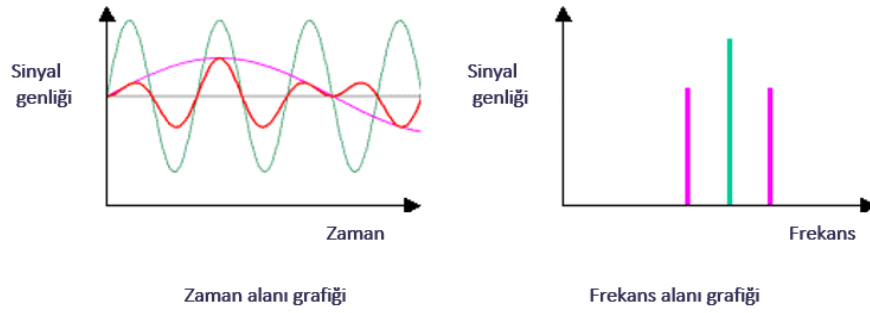
Şekil 3.34. Viskoz sönüm ve yapısal sönüm grafiği (Nastran, 2004)

Viskoz sönüm ve yapısal sönüm kuvveti, yapının doğal frekansında eşitlenirse, viskoz sönüm oranı yapısal sönüm oranının yarısına eşit olmaktadır (Altair, 2021a).

Titreşimler, yapılar üzerindeki sönüm etkilerine göre sönümlü veya sönümsüz titreşim problemleri olarak, dışarıdan gelen etkiye göre zorlanmış veya serbest titreşim olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca titreşim profiline göre de herhangi bir anda titreşim değeri

belli ise deterministik, herhangi bir anda titreşim değeri bilinmiyor fakat titreşimin istatistikleri (standart sapma, ortalama değer) biliniyorsa bu titreşim rastgele (random) titreşim olarak adlandırılmaktadır.

Periyodik tekrarlayan zamana bağlı titreşim verileri hızlı fourier dönüşümü (FFT) olarak bilinen matematiksel bir teknik kullanılarak frekans alanı verilerine dönüştürülebilir. Zaman alanında görülen genlikler, frekans alanında frekans değerinde genliğin şiddetine bağlı bir sütun olarak görülür (Şekil 3.35).



Şekil 3.35. Zaman ve frekans alanında gösterim (Anonim, 2019a)

Fourier serisi açılım ifadesi Denklem 3.11 şeklindedir. “y(t) zaman serisini “ T_P ” periyodu, “ A_0 ” zaman serisinin ortalama değeri, “ A_n ” sinüs dalga genlik değerini, “ B_n ” kosinüs dalga genlik değerini ifade etmektedir.

$$y(t) = A_0 + \sum_{1}^{\infty} \left\{ A_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T_P} t\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T_P} t\right) \right\} \quad (3.11)$$

$$A_0 = \frac{1}{T_P} \int_{-T_P/2}^{T_P/2} y(t) dt \quad (3.12)$$

$$A_n = \frac{2}{T_P} \int_{-T_P/2}^{T_P/2} y(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T_P} t\right) dt \quad (3.13)$$

$$B_n = \frac{2}{T_P} \int_{-T_P/2}^{T_P/2} y(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T_P} t\right) dt \quad (3.14)$$

Zaman serisinin frekans düzlemindeki ifadesi “y(f)” ile gösterilmektedir. Sinüs ve kosinüs değerleri karmaşık fonksiyonlar olarak yazılırsa Fourier dönüşüm çiftleri Denklem 3.15 ve 3.16 ile ifade edilmektedir.

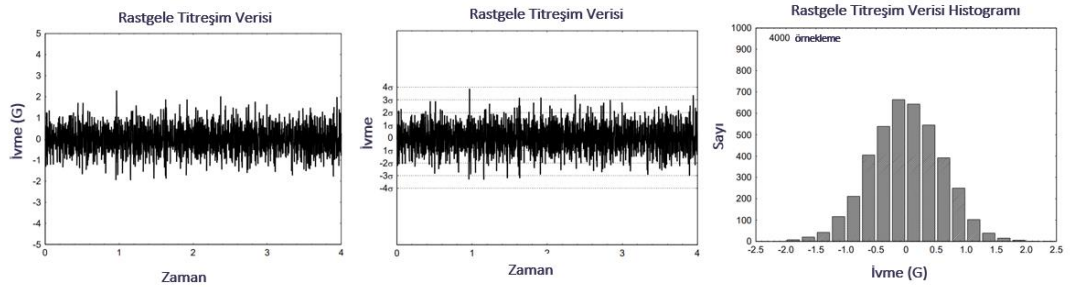
$$y(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-i(2\pi f)t} dt \quad (3.15)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(f) e^{-i(2\pi f)t} dt \quad (3.16)$$

Rastgele titreşim problemlerinde, ilgilenilen yükler istatistikeldir. Çizelge 3.9 da örnek bir rastgele titreşim verisinin tanımlayıcı istatistik değerleri verilmiştir. İstatistiki verilere ait ivme zaman grafiği, standart sapma indisine göre ivme grafiği ve histogram grafiği Şekil 3.36 da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Rastgele titreşim verisi istatistikleri (Irvine, 2018)

Rastgele Titreşim Tanımlayıcı İstatistikler	
Parametreler	Değerler
Süre	4 saniye
Örnekleme	4000
Ortalama	0
Standart Sapma	0.59 G
RMS	0.59 GRMS
Kurtosis	3.04
Maksimum	2.30 G
Minimum	-1.96 G



Şekil 3.36. Rastgele titreşim verisi grafikleri (Irvine, 2018)

Rastgele titreşimin verilen istatistiki bilgileri ile ilgilenilen gerilme değer aralığının, standart sapma referansında olasılık dağılımı Çizelge 3.10’da verilmektedir.

Çizelge 3.10. Standart sapmaya göre olasılık dağılımı

Durum	Olasılık oranı
$-\sigma < x < +\sigma$	0.6827
$-2\sigma < x < +2\sigma$	0.9545
$-3\sigma < x < +3\sigma$	0.9973
$ x > \sigma$	0.3173
$ x > 2\sigma$	0.0455
$ x > 3\sigma$	0.0027

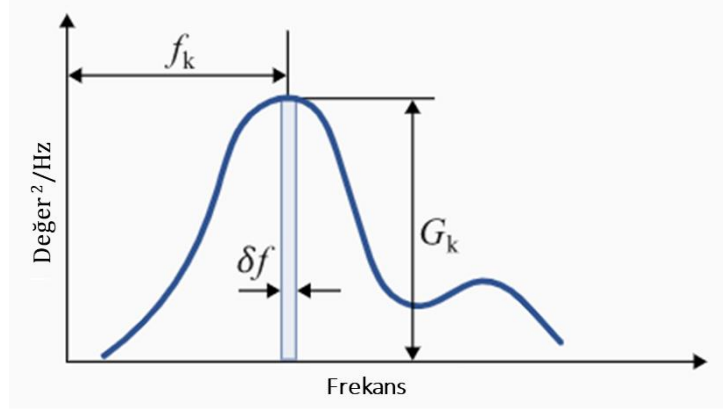
Rastgele titreşim analizlerinde güç spektrum yoğunluğu verileri (PSD) kullanılarak analizler gerçekleştirilmektedir. Güç spektrum yoğunluğu zaman sinyalinin fourier dönüşümü ile elde edilen frekans serisinin mutlak değer karesinin iki periyoda bölünmesi ile bulunur (Denklem 3.17) (Akarsu, 2012).

$$PSD = \frac{1}{2T_p} |y(f)|^2 \quad (3.17)$$

PSD’nin karakteristik özelliği PSD fonksiyonun belirli sayısındaki moment bilgisi ile elde edilir (Bishop & Sherratt, 1998; Özcan, 2021). Denklem 3.18 ile spektral momentler hesaplanır. “ m_n ” n. dereceden spektral momenti, “ f_k ” frekans değeri ve “ G_k ” frekans değerindeki PSD yanıt değeridir (Şekil 3.37). PSD eğrisinin ortalama karekökü (RMS) değeri ise m_0 momentinin kareköküne eşittir (Denklem 3.19). Bir sinyalin RMS değeri, ortalamayı sıfır varsayarak standart sapmaya eşittir (Irvine, 2007).

$$m_n = \int_0^\infty f_k^n G_k \delta f \quad (3.18)$$

$$RMS = \sqrt{m_0} \quad (3.19)$$



Şekil 3.37. PSD momentlerinin hesaplanması (Altair, 2022)

Rastgele titreşim problemlerinde, ilgilenilen yükler doğası gereği istatistikselemdir, bu nedenle hasarı değerlendirmek için (RMS) Von Mises gerilimi gibi bir metrik kullanılır. (RMS) Von Mises gerilimi, olasılıksal yüklere maruz kalan yapıların hasarını tahmin etmek için kullanılır ve yapının tam frekans tepkisini açıklar. (Day ve ark., 2020; Segalman ve ark., 2000). Rastgele titreşim analizinde gerilmelerin ortalama karekökü (RMS gerilmesi) standart sapmaya eşittir. İstatistiklerde normal dağılım yaklaşımında, bir standart sapma (1σ) sonuçların hesaplanan değerden küçük veya ona eşit olma ihtimalinin %68,27 olduğunu gösterir. (2σ), sonuçların hesaplanan değerden küçük veya ona eşit olma olasılığının %95,45, (3σ), sonuçların hesaplanan değerden küçük veya ona eşit olma olasılığının %99,73 olduğunu gösterir. 3σ sonuç değerleri hesaplanan sonucun 3 katına eşittir (Çizelge 3.10) (Autodesk, 2019; Irvine, 2003; Kumar, 2008).

Beklentileri yerine getiren ucuz ve tercih edilebilen optimum tasarımlar yapmak için tasarım değişkenlerinin sonuçlara olan etkilerinin doğru şekilde bilinmesi gerekir. Ancak bir tasarım birçok değişkene bağlıdır ve tüm değişkenler için hesaplamalar yapmak zaman alan bir durum teşkil eder. Bu sebeple belirlenen kısmi değişkenler ile çıktılar arasındaki ilişki anlamak için deney tasarımı olarak adlandırılan istatistiksel yöntemler kullanılır. Temel bileşenler analizi (PCA) çok değişkenli nümerik bir veri setini anlamlandırmak, girdi çıktı ilişkilerini görmek için kullanılabilen matematiksel bir yöntemdir. PCA, veri setlerinin kovaryans ve korelasyon matrislerinin özdeğer ve özvektörlerini bulma işlemidir ve kaynak verilerini temel koordinatlar olarak bilinen koordinat sistemlerine dönüştürür. PCA grafiğinde her bir değişken bir çizgi ile temsil

edilir. PCA analizi, veri bulutunu alıp maksimum değişkenliğin görünür olacağı şekilde döndürülmesidir. Çizgiler arasındaki aç ı veriler arasındaki ilişkinin gücünü belirlerken, aynı yönü gösteren çizgiler pozitif, zıt yönlerdeki çizgiler negatif ilişkiyi gösterir. Çizgilerin uzunluğu güçlü korelasyonu işaret eder.

3.8 Batarya Paketi Mekanik Testleri

Thomas Davenport tarafından 1835 yılında icat edilmesine rağmen kullanımı son dönemde artan elektrikli araçlar için oluşturulmuş standartlara, geleneksel içten yanmalı araçlara nazaran elektrikli araçların kullanımının da artmasıyla daha fazla ihtiyaç duyulmakta ve bu standartlar her geçen gün gelişmekte ve yenilenmektedir.

Standartlar araç sınıflarına göre özelleşmektedir. Kullanımlarına ve kütlelerine göre araçlar sınıflara ayrılmıştır. Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12’de araç sınıfları özetlenmiştir.

Çizelge 3.11. Araç sınıfları (Resmi Gazete, 2004; Vehicle category, 2016)

Sınıf	Açıklama
L	4’ten az tekerlekli motorlu araçlardır.
M	En az dört tekerlekli, motorlu yolcu taşıma amaçlı araçlardır.
N	En az dört tekerlekli, motorlu yük taşıma araçlardır.
O	Römorklar
G	Arazi tipi araçlar
R	Tarım ve ormancılıkta kullanılan römorklardır.
S	Tarım ve ormancılıkta kullanılan ve traktör tarafından çekilen tarım alet ve makineleridir
T	Tarım ve orman traktörleridir.

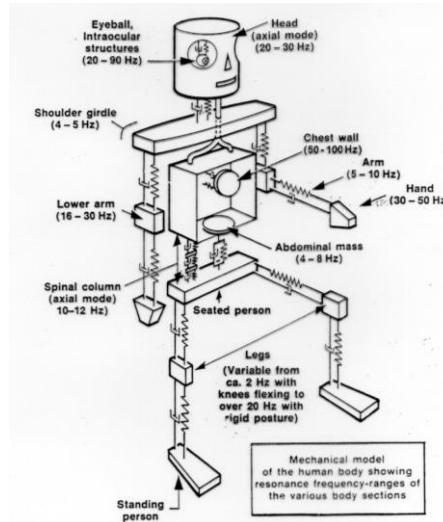
Araç sınıfları farklı yük kapasiteleri ve kullanım amaçlarına göre ayrılmaktadır. M ve N sınıfı araçlar en az 4 tekerlekli yolcu ve yük taşıma araçlarıdır. M ve N sınıfı araçlar en yaygın kullanılan araç sınıfını oluşturmaktadır. Bu çalışmada batarya paketi M1 ve N1 sınıfı bir araç için oluşturulmuş ve bu sınıftaki batarya paketi standartları ile ilgilenilecektir.

Çizelge 3.12. M ve N araç sınıfları

Sınıf	Açıklama
M	En az dört tekerlekli, motorlu yolcu taşıma amaçlı araçlardır.
M1	Sürücü dışında en fazla sekiz kişilik oturma yeri olan, yolcu taşımaya yönelik motorlu araçlardır.
M2	Sürücü dışında sekizden fazla oturma yeri olan, yolcu taşımaya yönelik ve azami kütlesi 5 tonu aşmayan, motorlu araçlardır.
M3	Sürücü dışında sekizden fazla oturma yeri olan, yolcu taşımaya yönelik ve azami kütlesi 5 tonu aşan, motorlu araçlardır.
N	En az dört tekerlekli, motorlu yük taşıma araçlardır.
N1	Azami kütlesi 3,5 tonu aşmayan, motorlu yük taşıma araçlardır.
N2	Azami kütlesi 3,5 tonu aşan, 12 tonu aşmayan, motorlu yük taşıma araçlarıdır.
N3	Azami kütlesi 12 tonu aşan, motorlu yük taşıma araçlarıdır.

3.8.1 Doğal Frekans

Elektrikli araç batarya paketleri için belirlenmiş bir doğal frekans gerekliliği olmamakla birlikte araç içerisindeki titreşimin sürücü veya yolcu konforunu bozmaması doğal bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 3.38’de insan vücudu için yapılan mekanik modele göre insan vücut bölümlerinin rezonans frekans aralıkları gösterilmiştir. Bu rezonans frekansları dışında da taşıt tutması (0,1-1 Hz), bulanık görme (2-20 Hz), konuşma bozukluğu (1-20 Hz) ve yorgunluk (0,2-15 Hz) frekans değerlerinde oluşmaktadır (Basilio ve ark., 2019; Rao, 2011).



Şekil 3.38. Çeşitli vücut bölümlerinin rezonans frekans aralıklarını gösteren insan vücudunun mekanik modeli (Basilio ve ark., 2019)

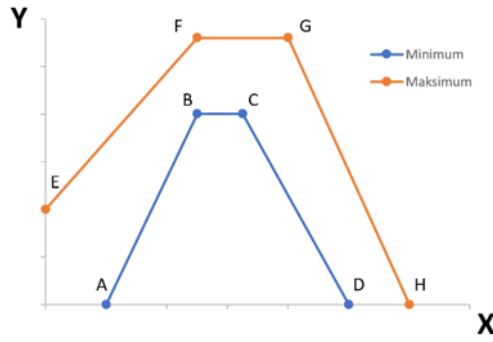
Araç içerisindeki sistemler, yol motor veya dış etkilerle doğal frekansları tetiklenmekte ve frekansların çakışması durumunda rezonans meydana gelerek gürültü ve konforsuzluk oluşmaktadır. Dört silindirli içten yanmalı bir motorda rölantide koltukta ve direksiyonda 20 ila 35 Hz, 6 silindirli bir araçta 30 ila 50 Hz frekansında titreşimler görülmektedir. Araç içi komponentler bu frekans değerlerine göre kontrol edilmekte ve doğal frekans değerlerinin titreşim frekans değerlerinin üzerinde olması beklenmektedir (Izumi, 1999). Yapıların titreşim modlarını ve şekillerini öğrenmek amacıyla modal analizler yapılmaktadır. Yapılan birçok çalışmada araç içindeki asılı sistemlerin 35 Hz ve üzerinde olması gerekliliği gözlemlenmiştir. Favero, (2019b) çalışmasında batarya paketinin doğal frekansının da 35 Hz üzerinde olmasını hedeflemiştir.

Bir sistemin serbestlik derecesi sayısı kadar mod şekli ve mod frekansı vardır. Doğal frekanslar lokal veya yapının bütününde olabilmektedir. Belirli bir mod için modelin yapısal kütlelerinin o mod şekline ne kadar katıldığına bilinmesi için o frekanstaki kütle katılım oranına bakılmaktadır.

3.8.2 Çarpışma

Çarpışma durumunda oluşan ivme ile bataryadaki kütleler eylemsizlikleri ve oluşturdukları atalet yükleri sebebiyle bağlantı bölgelerinde gerilmeler oluşturmaktadır. Belirlenen çarpışma durumunda batarya modüllerinin bağlı oldukları yerden ayrılması veya birbirlerine teması istenmez. Çarpışma durumunu temsil eden sınır şartları ECE-R100 ve ISO 6469-1 standartları için ortaktır.

Testin amacı, aracın çarpışma sırasında meydana gelebilecek atalet yükleri etkisindeki güvenlik performansını incelemektir. N1 araç sınıfı 3,5 ton ve altı araçlar için uygulanacak atalet yüklerinin sınırları ve uygulama süreleri Şekil 3.39'da verilmiştir. Maksimum ve minimum değerler arasında kalan bant aralığında yükleme yapılarak testin gerçekleştirilmesi istenmektedir.

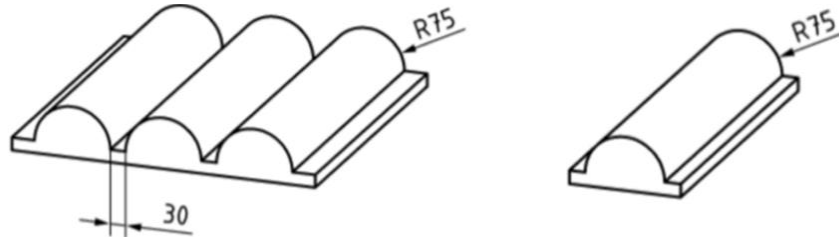


Nokta	Zaman (ms)	İvmelenme (g)	
		Boyuna	Enine
A	20	0	0
B	50	20	8
C	65	20	8
D	100	0	0
E	0	10	4.5
F	50	28	15
G	80	28	15
H	120	0	0

Şekil 3.39. Atalet yükü analizi için ivme zaman grafiği

3.8.3 Ezme

ECE-R100 ve ISO 6469-1 standartlarında ortak olarak yer alan ezme testinin amacı, kaza durumunda oluşabilecek temas yükleri altında batarya paketinin güvenlik performansını incelemektir. Şekil 3.40'da yer alan 75 mm yarı çapına sahip rijit bir ezme plakası ile 100 kN, süresi 3 dakikadan az ve tutma süresi 100 ms- 10 s aralığında olacak şekilde kuvvet tatbik edilmesi istenmektedir.



Şekil 3.40. Tam ve yarım ezme plakası

3.8.4 Mekanik Şok

Araç sürüş esnasında yol yapısından (kasis) veya sürücü kontrollerinden (ani fren) kaynaklı şok ivmelere maruz kalmaktadır. 6469-1 standardında her üç ekseninde pozitif ve negatif yönlerde dahil 6ms yarı sinüzoidal bir ivme şok dalgasının Çizelge 3.13'te verilen ivme değerlerinde uygulanması istenmektedir.

Çizelge 3.13. Mekanik şok test parametreleri

Şok dalgası şekli	Yarım sinüs
İvme	±Z: 70 m/s ² ±Y: 50 m/s ² ±X : 30 m/s ²
Süre	6 ms

3.8.5 Titreşim Yorulması

Araç sürüş esnasında yol şartları kaynaklı titreşimlere maruz kalmaktadır. Titreşim yükleri altında batarya paketinin yapısal sağlamlığını koruması beklenmektedir. ISO 6469-1 Standardında yer alan Çizelge 3.14’te verilen PSD değerleri ile dikey (Z), uzunlamasına (X) ve enine (Y) yönlerde rastgele profillerde titreşime tabii tutulması beklenmektedir. Z yönü ile başlanarak X ve Y sıralamasında yüklemenin gerçekleştirilmesi istenmiştir (International Organization for Standardization, 2019).

Çizelge 3.14. ISO 6469-1 PSD değerleri

Frekans (Hz)	ISO 6469-1		
	PSD (m ² s ⁻⁴ Hz ⁻¹)		
	X- Ekseni	Y- Ekseni	Z- Ekseni
5	0.0289	0.1925	0.0481
10	0.2887	0.2887	0.5774
15		0.0289	0.3849
200	0.0006	0.0004	0.0004
A _{RMS} (m/s ²)	2.34	2.51	2.64

Bir başka çalışmada (Maeda & Takahashi, 2015) ISO 12405 Standardını referans almışlardır ve gerçekleştirdikleri çalışmada topladıkları yol datalarının PSD verileriyle uyumlu olduğunu göstermişleridir. Çizelge 3.15’te ISO 12405 PSD değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.15. ISO 12405 PSD değerleri (Maeda & Takahashi, 2015)

Frekans (Hz)	ISO 12405		
	PSD ($m^2s^{-4}Hz^{-1}$)		
	X- Ekseni	Y- Ekseni	Z- Ekseni
5	1.20	3.85	4.81
10	2.89		5.77
20	2.89	3.85	5.77
200	0.02	0.08	0.08
A_{RMS} (ms^{-2})	9.42	12.07	14.13

ECE R100 Standardında ise vibrasyon testi aracın normal ve muhtemel çalışma ortamındaki titreşimlerinde aracın güvenlik performansını test etmeyi amaçlamıştır ve Çizelge 3.16’da verilen yükleme koşulunda 7 Hz ile 50 Hz arasında sinüzoidal dalga biçimine sahip profilde bir titreşime tabi tutulmalıdır. Titreşim 15 dakikada 50 Hz den 7 Hz'e geri dönüş şeklinde olmalıdır. Üretici tarafından belirtilen montaj yönünün dikey yönünde toplam 3 saat boyunca 12 kez yüklemenin tekrarlanması istenmektedir.

Çizelge 3.16. ECE R100 Vibrasyon testi için frekans ivme değeri tablosu

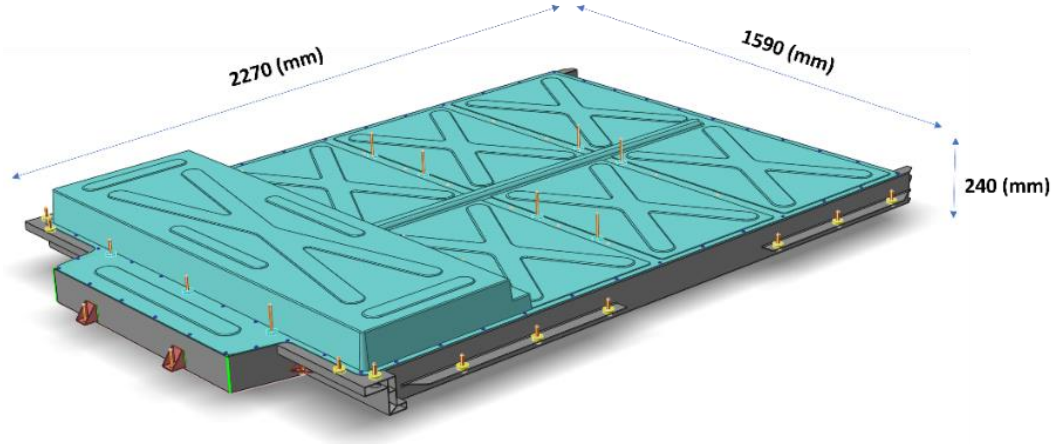
Frekans [Hz]	İvme (m/s^2)
7-18	10
18-30	10 da 2 ye
30-50	2

3.9 Batarya Paketi Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Modeli

Bu çalışma Avrupa Birliği Horizon 2020 projesi olan LEVIS projesi kapsamında tasarım geliştirilme fazlarındaki bir batarya kutusu tasarımı referansında gerçekleştirilmiştir (LEVIS, 2021). Batarya paketine ve tasarıma ait detaylar aşağıdaki başlıklarda özetlenmiştir.

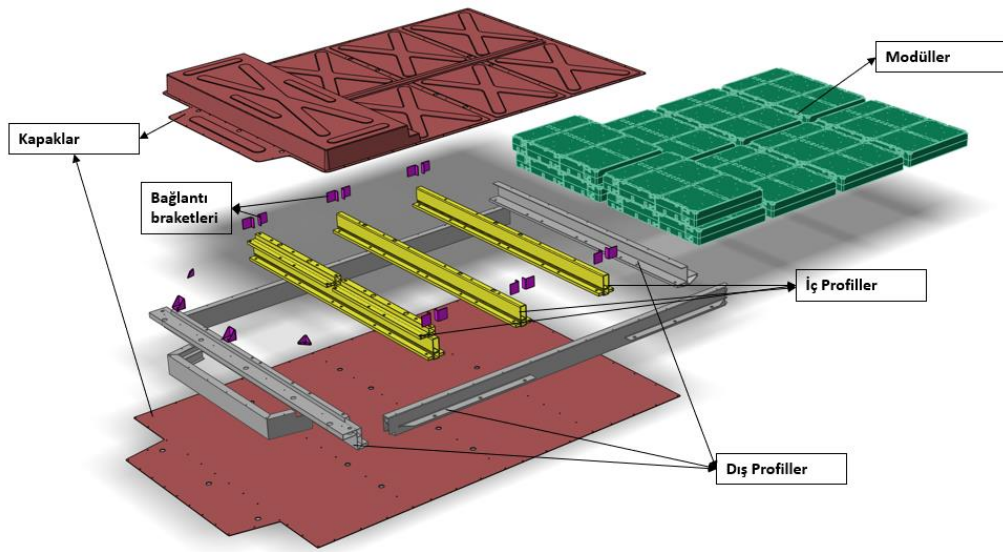
3.9.1 Batarya Paketi Tasarım ve Ölçüleri

Batarya paketi bir kısmında 2 kat olmak üzere toplam 10 modülden oluşmaktadır. Tasarımın, boyu 2270 mm, genişliği 1590 mm ve yüksekliği 240 mm boyutlarındadır (Şekil 3.41).



Şekil 3.41. Batarya paketi boyutları

Batarya paketi komponentlerini üst kapak, alt kapak, dış profiller, iç profiller, batarya modülleri, bağlantı braketleri ve bağlantı elemanları olarak sıralayabiliriz (Şekil 3.42). Batarya paketi 39 noktadan araç şasesine bağlanmaktadır.



Şekil 3.42. Batarya paketi komponentleri

Batarya ve dış yan profil arasındaki boşluk 22 mm'dir (Şekil 3.43). Bu mesafenin herhangi bir dış etki durumunda kapanarak batarya modülüne temas durumunun oluşmaması istenmektedir.



Şekil 3.43. Dış profil ve batarya modülü arası boşluk

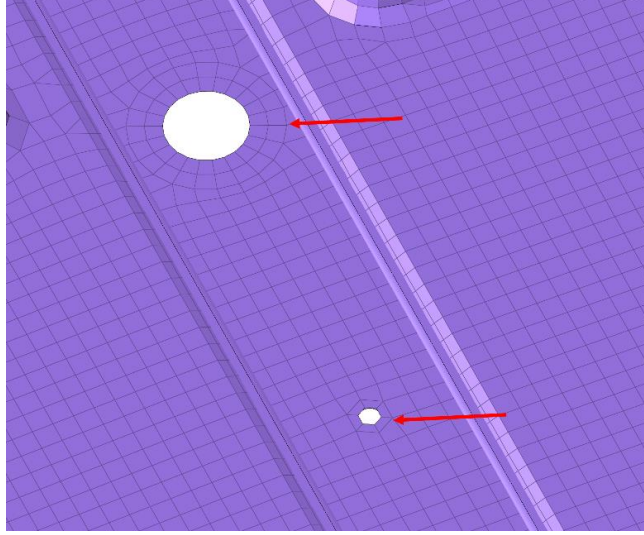
3.9.2 Batarya Paketi Sonlu Elemanlar Modeli

İç ve dış profiller, alt ve üst kapak ile braketler için 1.dereceden (first order) dörtgen ve üçgen 2d elemanlarla sonlu elemanlar modeli ağ örgüsü oluşturulmuştur. Ortalama eleman boyutu 5 mm'dir. Kaynaklar için RBE2, cıvata bağlantıları için 1d elemanlar kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde 520338 dörtgen, 2272 üçgen, 593 rijit eleman 437 1d eleman ve modüller için 10 adet boyutsuz kütle elemanı kullanılmıştır.

Çizelge 3.17. Sonlu elemalar modeli eleman kriterleri

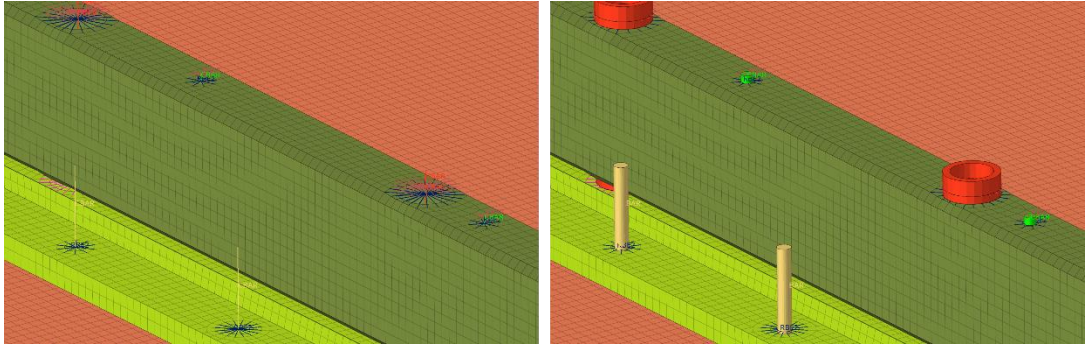
Eleman Kriteri	Değer
Minimum eleman kenar uzunluğu	1,8
Maksimum eleman kenar uzunluğu	10
Maksimum Aspect Oranı	5
Maksimum Warpage	15
Maksimum iç açısı (dörtgen eleman)	135
Minimum iç açısı (dörtgen eleman)	45
Maksimum iç açısı (üçgen eleman)	120
Minimum iç açısı (üçgen eleman)	20
Maksimum Skew	45

Elemanlara ait belirlenen kriter sınırları Çizelge 3.17’de verilmiştir. Delik çevrelerinde homojen boyutlara sahip dörtgen elemanlar kullanılmıştır (Şekil 3.44).



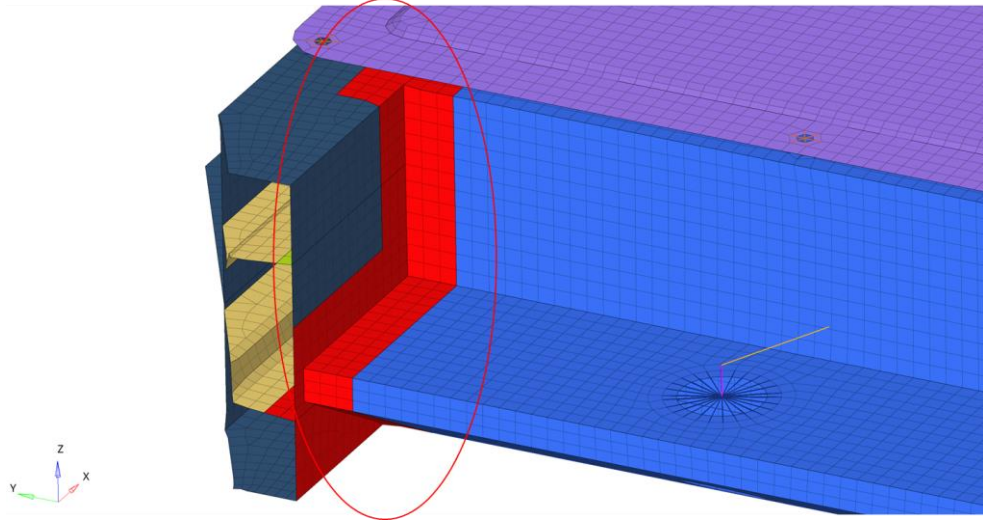
Şekil 3.44. Sonlu elemanlar modeli delik geometrileri etrafı ağ yapısı

Cıvata bağlantıları 1 boyutlu (1d) elemanlar ile modellenmiş ve kesitin boyutları 1 boyutlu malzeme tanımında kullanılan özellik kartlarına tanımlanmıştır (Şekil 3.45).



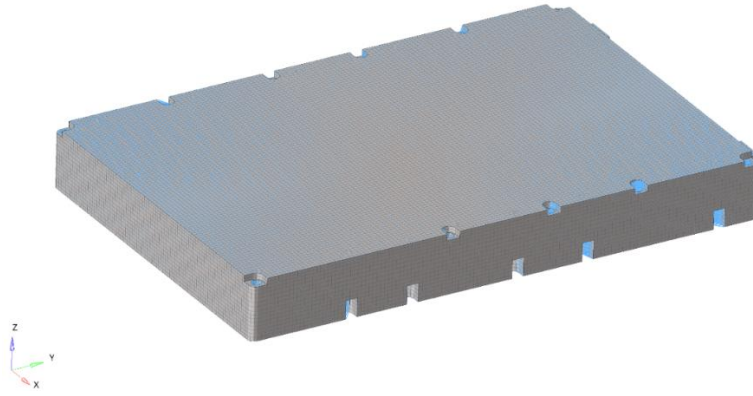
Şekil 3.45. Cıvata bağlantıları 1d eleman modellemesi ve 3d temsili modeli

Kaynak bağlantısı olan bölgelerde, bağlanan komponent kenarlarındaki elemanların düğüm noktaları ortaklaştırılmış, bu düğüm noktalarının bağlı olduğu 3 sıra eleman (15 mm) ayrı komponentlere ayrılarak malzeme gerilme-gerinme grafiğinde gerilme değerlerinin %65 i alınmıştır. Böylece HAZ bölgesi için %35 mukavemet düşüşü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.46).



Şekil 3.46. HAZ Bölgesi sonlu elemanlar ağ modeli

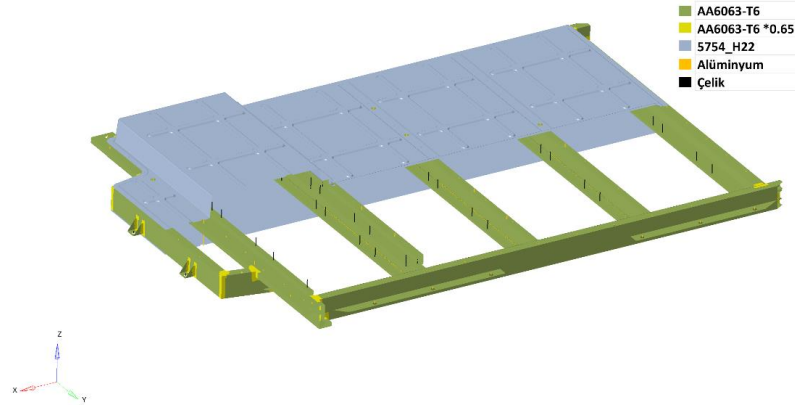
Batarya modülleri içerisinde barındırdıkları bataryalar ile farklı malzeme içeriğine ve komponentlere sahiptir. Batarya modülleri rijit kabul edilmiş olup sonlu elemanlar analizine kütle değeri dahil edilmiştir. Her bir batarya modülünün kütlesi 41,12 kg'dır. Analiz sonuçlarında batarya modüllerinin birbirine ve dış profillere yaklaşımlarını görebilmek için batarya modül dış yüzeyinde görsel amaçlı ve analize yapısal olarak dahil olmayan 2 boyutlu elemanlar (Plotel eleman tipi) kullanılmıştır (Şekil 3.47).



Şekil 3.47. Batarya modülü ağ modeli

Doğrusal dinamik analizler için malzemenin yalnızca elastik bölgesi kullanılırken doğrusal olmayan statik analizlerde malzeme plastik bölgesi de kullanılmaktadır. Ezme analizlerinde komponentler üzerinde plastik gerinme oluşabileceği değerlendirilmiş ve malzeme akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve uzama gerinim değerlerine göre Ramberg-

Osgood ampirik denklemi (Denklem 3.20) kullanılarak malzeme plastik bölgesi tanımlanmıştır. Üst ve alt kapak için 5754 H22, dış ve iç profiller için 6063 T6 alüminyum alaşımı, 1 boyutlu modellenmiş bağlantı elemanları için elastiklik modülü, yoğunluğu ve poisson oranı tanımlanmış alüminyum alaşım ve çelik malzemeler kullanılmıştır (Şekil 3.48).



Şekil 3.48. Batarya kutusu komponentleri ve malzemeler

Ramberg Osgood denkleminde “ ε ” gerinme, “ E ” elastiklik modülü σ gerinme “ S_{ty} ” malzemenin akma gerilmesini “ n ” malzemenin gerinim sertleşmesi katsayısını ifade eder (Mechanicalc, 2014).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{S_{ty}} \right)^{1/n} \quad (3.20)$$

Malzemenin gerinme sertleşmesi katsayısı “ n ” Denklem 3.21’den hesaplanmaktadır. Denklemde yer alan “ S_{tu} ” çekme gerilmesini “ ε_f ” kopma uzamasını temsil etmektedir.

$$n = \frac{\log (S_{tu}/S_{ty})}{\log (\varepsilon_f/0.002)} \quad (3.21)$$

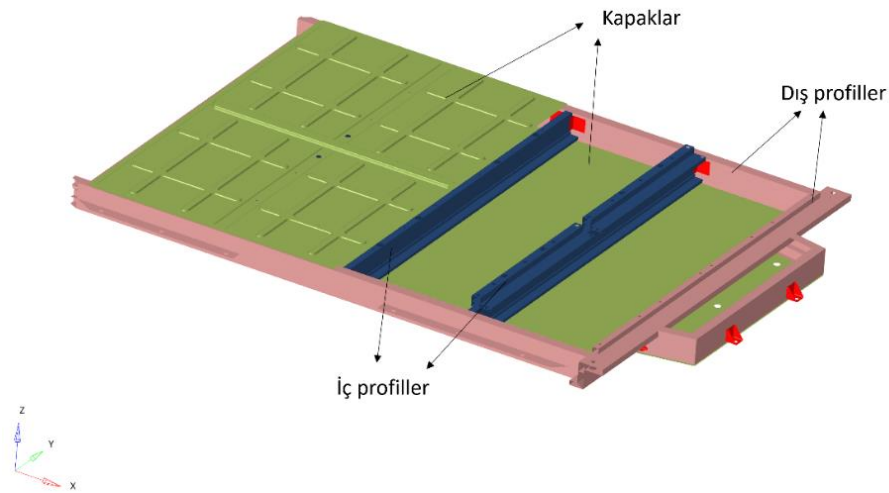
Alüminyum ekstrüzyon malzemesi için TS 755-2 6063 T6 ve alüminyum levha için BS EN 485-2 standartlarında ve (MakeItFrom, 2020) 5754 H22 malzeme özellikleri için yer alan minimum mukavemet değerleri kullanılmıştır. Kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 3.18’de verilmiştir.

Çizelge 3.18. Malzeme mekanik özellikleri

	Yoğunluk [kg/m ³]	Elastisite Modülü [MPa]	Akma Gerilmesi [MPa]	Çekme Gerilmesi [MPa]	Uzama [%]
AA6063-T6	2700	70000	170	215	8
AA6063-T6 *0.65	2700	70000	110.5	139.75	8
5754_H22	2700	70000	150	240	8.4
Alüminyum	2700	70000	-	-	-
Çelik	7800	210000	-	-	-

Batarya kutusunda temel yapısal bileşenlerden kapaklar, iç profiller ve dış profiller olmak üzere 3 farklı bölüme ayrılarak tasarım değişkeni olarak seçilmiştir (Şekil 3.49).

Audi e-Tron aracında batarya kutusunda 3,5 mm alüminyum levha kullanılmıştır. Pan ve ark, (2021) çalışmalarında batarya kutusu iç profillerinde 1,3 mm ila 1,8 mm kalınlıktaki akma gerilmesi 550 MPa olan 780 DP çeliği kullanmışlardır. Alüminyumun akma mukavemetinin 780 DP çeliğine göre düşük olması ve alüminyum levha ve alüminyum ekstrüzyonunda üretim fizibilitesi açısından uygun değerlendirilmesi sebebiyle referans kalınlık değeri 3,0 mm olarak kabul edilmiştir. Üretilirlikleri de dikkate alınarak belirlenen 3 farklı bölge 2,5 3,0 ve 3,5 mm kalınlık değerleri ile analizler yapılarak 3 bölgedeki kalınlık değerlerinin analiz sonuçlarına etkileri incelenecektir.



Şekil 3.49. Kalınlık değişimi için belirlenmiş bölgeler

Referans olarak belirlenen 3,0 mm dış profil, 3,0 mm kapak ve 3,0 mm iç profil kalınlıkları için batarya paketi kütle dağılımları Çizelge 3.19’da verilmiştir.

Çizelge 3.19. Batarya paketi kütle dağılımları

	Kütle [kg]
Batarya modülleri	411.20
Dış Profiller	26.01
İç profiller	18.49
Kapaklar	53.25
Bağlantı braketleri	0.47
Bağlantı Elemanları	2.03
Toplam	511.45

Batarya paketinin kütesinin %80’i batarya modüllerinin ağırlığıdır.

Sonlu elemanlar ağ örgüsü ve analiz modeli HyperMesh yazılımı ile oluşturulmuş, çözümler OptiStruct 2022 gerçekleştirilmiş, deney tasarım sonuçları ve raporlama için HyperStudy, HyperView ve HyperGraph yazılımları kullanılmıştır.

3.9.3 Batarya Paketi Analizleri Deney Tasarımı Modeli

Bir ürünü geliştirebilmek için deneysel çalışmalar yürüterek girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi belirlemek gerekir. Farklı deney parametreleri ve çözümleri ile girdiler ve çıktılar arasında ilişkiler belirlenir. Tam faktöriyel bir analizde gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı Denklem 3.22 ile hesaplanmaktadır. Denklemde yer alan “s” faktördeki seviye sayısını, “f” faktör sayısını ve “N” tam faktöriyel bir analizde gerçekleştirilmesi gereken deney sayısını temsil etmektedir.

$$N = s^f \quad (3.22)$$

Modal analiz yapının dinamikleri hakkında fikir vermektedir. Yapının serbest titreşim şekilleri ve frekansları bulunmakta ve düşük doğal frekans değerlerine sahip mod şekillerine bakılarak yapının rijitliği düşük olan doğal hareketleri ve gerilme oluşacak bölgeler değerlendirilebilmektedir. Modal analiz, sonlu elemanlar modelinde oluşturulan bağlantıların kontrolünde kullanılır ve doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlere göre

çözüm süresi kısa olan analizlerdir. Bu sebeple istatistiksel araştırmada veri sayısının arttırılması için 2 farklı kalınlık seviyesi yerine 3 farklı kalınlık seviyesi için deney tasarım modeli oluşturulmuştur. Tam faktöriyel kombinasyon sayısınca analizler gerçekleştirilmiştir.

Ekstrüzyon profillerinin üretimini en efektif olacağı değerlendirilen 2,5 ve 3,5 mm kalınlık değerleri tasarım kısıtları olarak belirlenmiştir. Tasarım değişkenlerinin batarya paketine olan etkilerini incelemek üzere 3 tasarım değişkeni için 3 seviyede tam faktöriyel olarak 27 ($=3^3$) adet analiz oluşturulmuştur. Modal analizler ile tasarım değişkenlerinin yapının dinamik davranışına olan etkileri incelenecektir. Doğal frekans değerlerinin 50 Hz değeri üzerinde olması ve doğal frekans değerlerinin maksimize edilmesi hedeflenmektedir. Belirlenen 50 Hz hedefi , bir standartta yer almayıp (Basilio ve ark., 2019; Favero, 2019b) çalışmaları referansında belirlenmiştir. Modal analizlerde frekans taraması 250 Hz değerine kadar gerçekleştirilmiştir.

Çarpma, şok ve titreşim analizleri, batarya bütününe uygulanması ve bataryanın dinamikleri ile doğrudan ilişkili olması sebebiyle her değişken 2 seviyede kontrol edilmiş ve referans modelle birlikte her bir analiz şartı için 4 adet analiz modeli oluşturulmuştur.

Ezme analizi, lokal ve batarya paketinin dinamik etkilerinden bağımsız olması sebebiyle 3 tasarım değişkeni için 2 seviyede tam faktöriyel olarak 8 ($=2^3$) adet model oluşturulmuştur.

Belirlenen tasarım değişkenleri doğrultusunda analizler gerçekleştirilerek tasarım değişkenlerinin etkileri incelenmiş, gerekli görüldüğü durumda sırasıyla ek analizler ezme, çarpma, mekanik şok ve titreşim yorulması özelinde eklenerek tasarım hafifletme çalışmaları desteklenmiştir.

4. BULGULAR

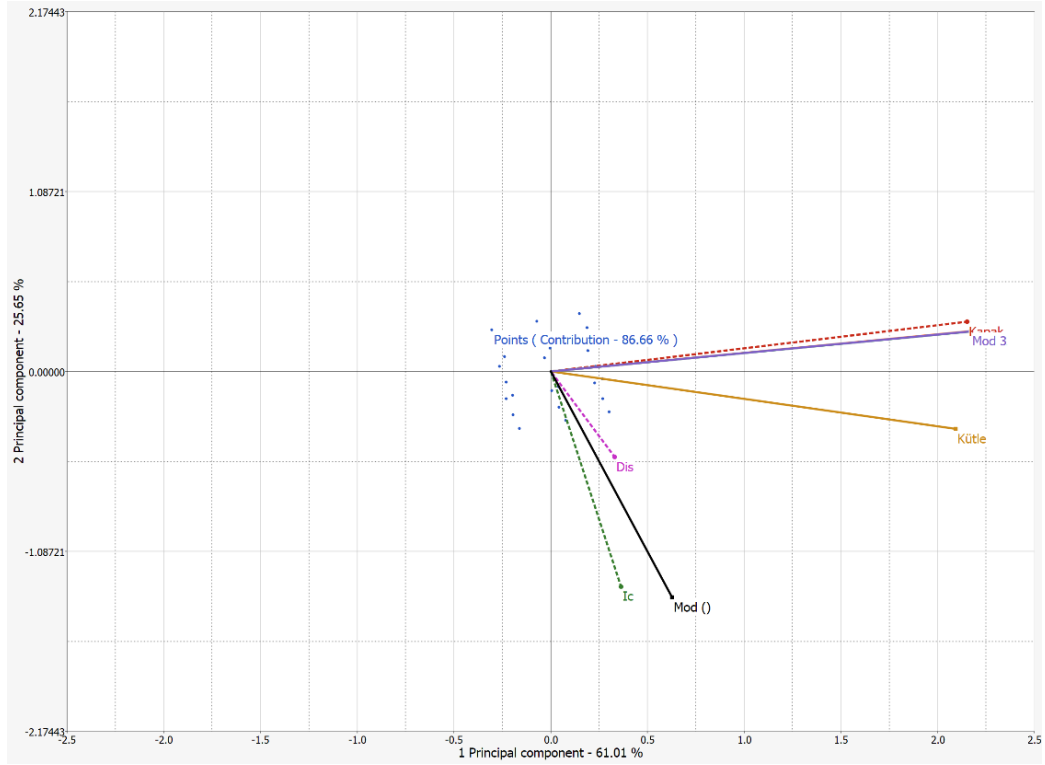
Belirlenen 5 farklı gereklilik için batarya paketinin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.1 Modal Analiz Sonuçları

Batarya paketi araç şasesine 39 bağlantı bölgesinden sabitlenmiş olarak modal analizler gerçekleştirilmiştir.

Batarya paketinde belirlenen 3 bölgenin 3 farklı seviyedeki kalınlıklarının mod frekanslarıyla olan ilişkileri belirlemek amacıyla tam faktöriyel kombinasyonda 27 adet analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Deney tasarım sonuçları temel bileşenler analiz tablosu yapılarak değişkenlerin birbirleri ile olan etkileri ve korelasyonları incelenmiştir. %50 kütle katılım değeri üzerindeki ilk mod frekans değeri “Mod ()” sonucu olarak gösterilmiştir.



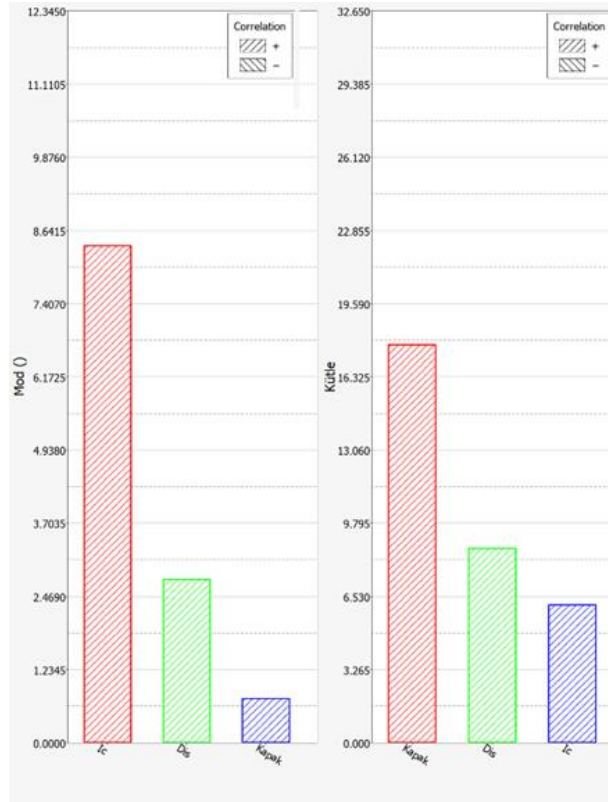
Şekil 4.1. Deney tasarımı temel bileşen analizleri grafiği (Modal analiz)

Tasarım parametreleri ile sonuçlar arasındaki korelasyon Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney tasarımı ve modal analiz sonuçları

Kapak kalınlığı [mm]	Dış Profil Kalınlığı [mm]	İç Profil Kalınlığı [mm]	Toplam Kütle [kg]	Mod 1 [Hz]	Kütle katılımı %50 üzerindeki ilk mod			Kütle Katılım oranı [%]
					Mod Sırası	Frekans [Hz]	Kütle Katılım oranı [%]	
2.5	2.5	2.5	495.2	49.8	23	98.22	67.6	0.6757
2.5	2.5	3.0	498.3	49.9	25	102.70	73.1	0.7313
2.5	2.5	3.5	501.3	50.0	25	106.10	75.8	0.7576
2.5	3.0	2.5	499.5	50.0	24	99.66	64.4	0.644
2.5	3.0	3.0	502.6	50.2	25	104.40	68.3	0.683
2.5	3.0	3.5	505.7	50.3	25	108.00	71.1	0.7105
2.5	3.5	2.5	503.8	50.2	25	100.60	61.1	0.6107
2.5	3.5	3.0	506.9	50.3	25	105.50	64.4	0.6442
2.5	3.5	3.5	510.0	50.4	25	109.20	67.1	0.6705
3.0	2.5	2.5	504.0	57.1	16	98.56	68.6	0.6855
3.0	2.5	3.0	507.1	57.3	17	103.00	61.1	0.6112
3.0	2.5	3.5	510.2	57.4	20	106.60	71.4	0.7139
3.0	3.0	2.5	508.4	57.6	16	100.00	63.6	0.6363
3.0	3.0	3.0	511.5	57.8	20	105.10	49.6	0.4964
3.0	3.0	3.5	514.5	57.9	21	108.60	54.2	0.5417
3.0	3.5	2.5	512.7	57.8	17	100.90	60.0	0.5999
3.0	3.5	3.0	515.8	58.0	20	106.00	58.9	0.5885
3.0	3.5	3.5	518.9	58.2	21	109.70	64.8	0.6476
3.5	2.5	2.5	512.9	63.8	13	98.89	67.6	0.6758
3.5	2.5	3.0	516.0	64.0	14	103.50	67.5	0.6754
3.5	2.5	3.5	519.1	64.2	15	106.90	72.1	0.7208
3.5	3.0	2.5	517.3	64.4	13	100.30	62.3	0.6232
3.5	3.0	3.0	520.3	64.6	15	105.30	44.4	0.4441
3.5	3.0	3.5	523.4	64.8	15	108.80	68.2	0.6824
3.5	3.5	2.5	521.6	64.7	13	101.20	52.4	0.5239
3.5	3.5	3.0	524.7	65.0	15	106.30	60.7	0.6066

Kapak kalınlığı, dış profil kalınlıkları ve iç profil kalınlıklarından sırasıyla 2,5-2,5-2,5 mm ve 2,5-2,5-3,0 mm kalınlık değerleri için gerçekleştirilen analiz sonuçlarında ilk doğal frekans değeri 50 Hz değerine yakın olmakla birlikte 50 Hz değerinin altında gözlemlenmiştir. Diğer 25 analiz modeli için ilk doğal frekans değerleri 50 Hz değerinin üzerinde gözlemlenmiştir.

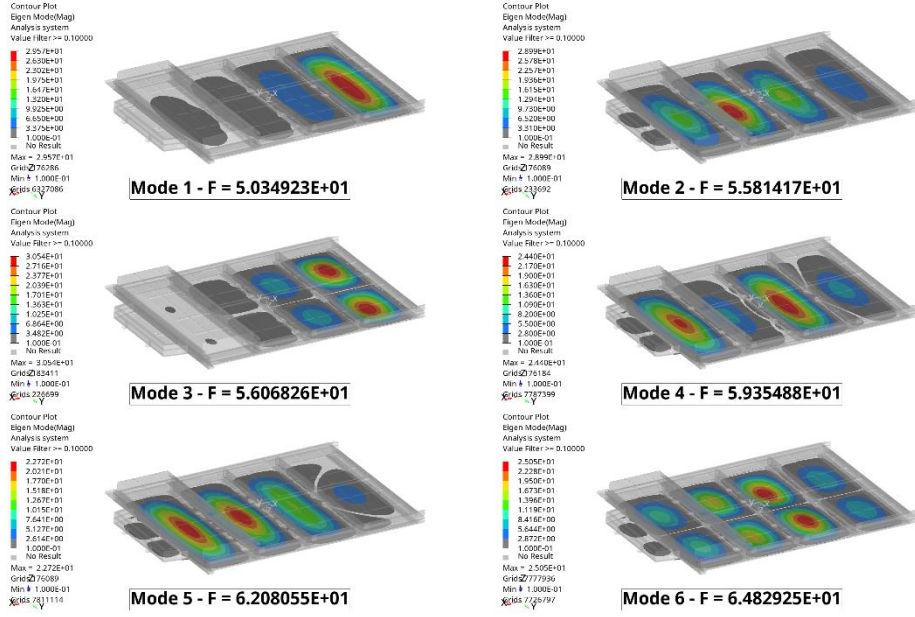


Şekil 4.2. Modal analiz deney tasarımı sonuçları

Şekil 4.1 temel bileşenler analizi ve Şekil 4.2 korelasyon sonuçları incelendiğinde tüm değişkenlerin kütle ve Mod () ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. İlk 3 modun sadece üst kapakta çıkmasından da öngörülebildiği gibi kapak kalınlığı ilk mod frekans değerlerinde en etkili parametredir.

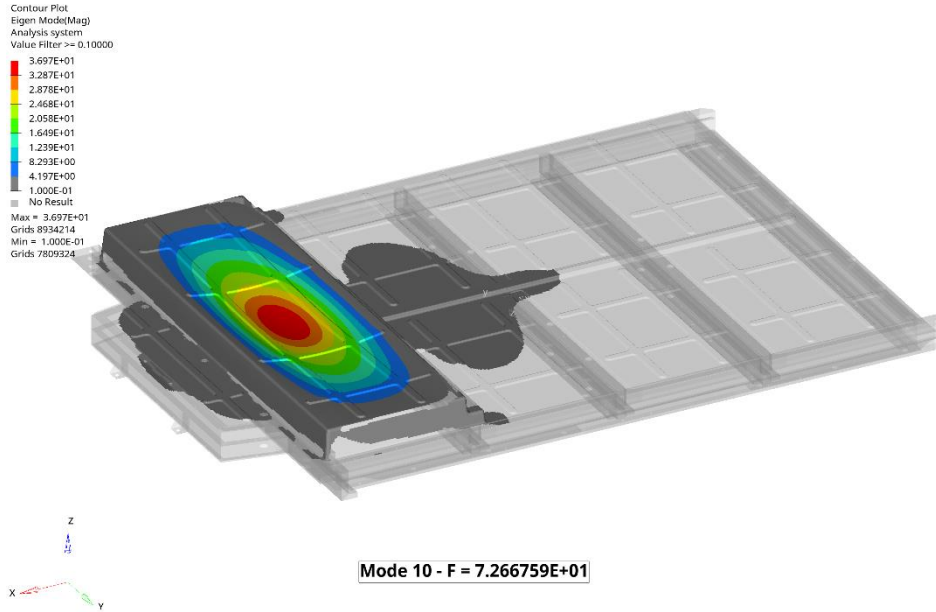
Toplam kütleyi en çok etkileyen parametre kapak kalınlığıdır. İç profiller toplam kütleyi en az etkileyen parametre olmakla birlikte, %50 kütle katılım değeri üzerindeki ilk doğal frekans değeri üzerinde en etkin parametredir.

3,5 mm dış profil, 2,5 mm kapak ve 3,0 mm iç profil kalınlıkları için yapılan analizlerde en düşük doğal frekans değeri 50 Hz ile alt kapakta gözlemlenmiştir. İlk 6 mod frekansı ve mod şekilleri Şekil 4.3'te verilmiştir.

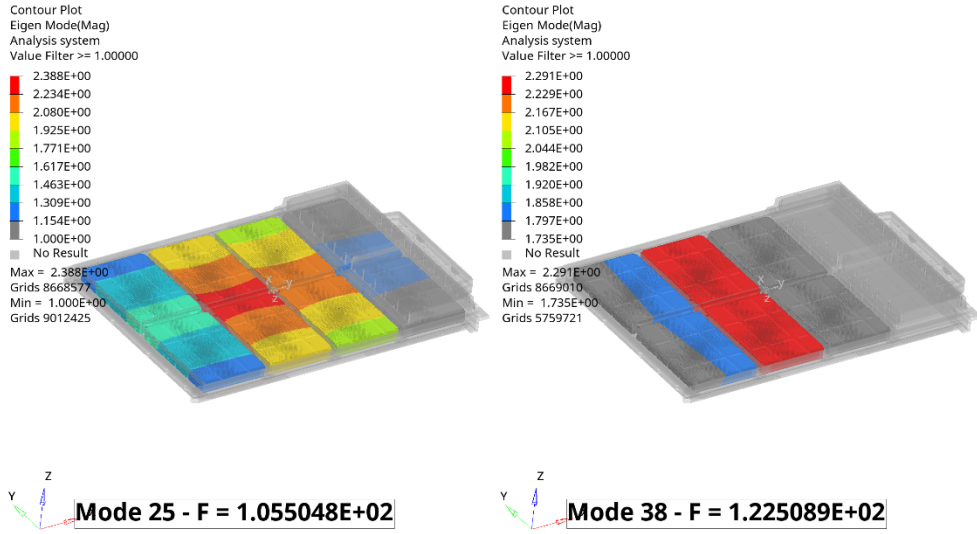


Şekil 4.3. Modal Analiz ilk 6 mod şekli

İlk 9 mod alt kapakta gözlemlenirken 10. mod üst kapakta ve 73 Hz değerinde gözlemlenmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Üst kapak ilk mod şekli



Şekil 4.5. Kütle katılım oranı %50 üzeri ilk 2 mod şekli

Modal efektif kütle katılım değerinin %50 üzerinde olduğu ve modüllerin titreşim hareketine katıldığı ilk doğal frekans değeri X yönünde %64 kütle katılım değerleriyle 105 Hz (mod 25) ve %57 kütle katılım değerleriyle 122 Hz (mod 38) değerleridir Modal efektif kütle katılım değerinin %50 üzerinde olduğu titreşimlere modüllerin modüllerinde katıldığı görülmüştür (Şekil 4.5).

4.2 Ezme Analizi Sonuçları

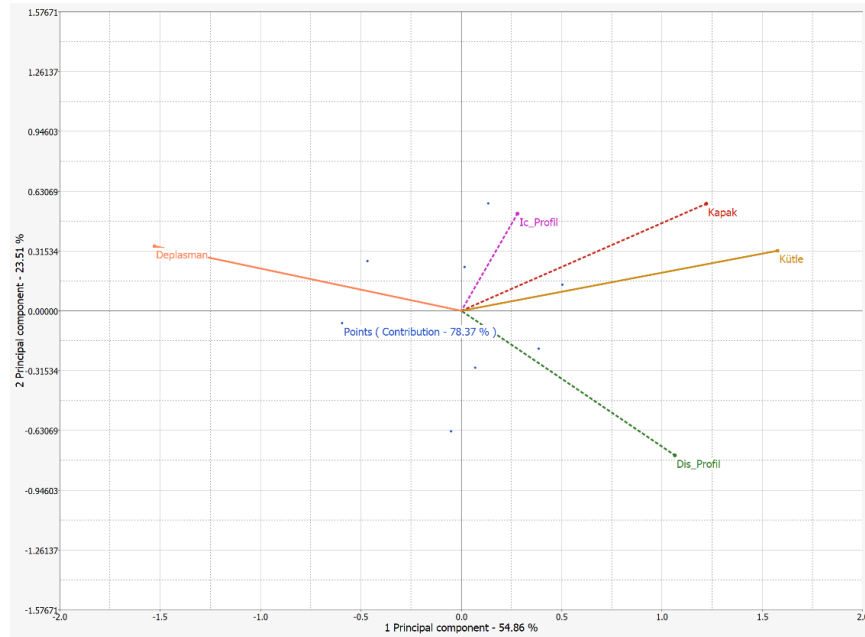
Ezme analizinde dış profilin iç yüzeyinin batarya modülü ile teması istenmemektedir. Bu sebeple ezme bölgesindeki dış profil iç yüzey deplasmanı sonuçları incelenmiştir. Öncelikle belirlenen 3 bölgenin 2 farklı seviyedeki kalınlık değerleri ile dış profil iç yüzey deplasmanı, malzemeler üzerinde oluşan maksimum gerilmeler ve toplam kütleyle olan etkilerini incelemek amacıyla 2 seviyede tam faktöriyel kombinasyonda 8 adet analiz modeli oluşturulmuş ve koşturulmuştur. Analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Batarya paketine zayıf olarak değerlendirilen iç profillerin orta noktasından 100 kN kuvvet tatbik edilmiştir. Batarya paketinin diğer tarafı her üç ekseninde sabitlenmiştir.

Çizelge 4.2. Deney tasarımı ve ezme analizi sonuçları

Kapak Kalınlık [mm]	Dış Profil Kalınlık [mm]	İç Profil Kalınlık [mm]	Toplam Kütle [kg]	Deplasman [mm]	Plastik Gerinme				
					Dış Profil		İç Profil		Kapak
					AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	5754 H22
3	3	3	511.462	6.28	0.239	0.041	0.001	0.017	0.103
3	3	3.5	514.544	6.14	0.236	0.044	0.001	0.014	0.102
3	3.5	3	515.797	2.26	0.091	0.009	0.000	0.007	0.058
3	3.5	3.5	518.879	2.24	0.090	0.010	0.000	0.005	0.057
3.5	3	3	520.337	3.21	0.171	0.015	0.000	0.006	0.064
3.5	3	3.5	523.420	3.20	0.171	0.017	0.000	0.004	0.064
3.5	3.5	3	524.673	1.75	0.085	0.006	0.000	0.004	0.049
3.5	3.5	3.5	527.755	1.74	0.085	0.006	0.000	0.003	0.049

Yapılan analizlerde dış profil üzerindeki plastik gerinme değerleri %8 üzerinde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. Deney tasarımı temel bileşenler analizi grafiği (Ezme analizi)

Deney tasarımı sonuçlarına göre oluşturulan PCA grafiğinde (Şekil 4.6), deplasman çizgisi ve dış profil çizgilerinin ters yönlere olması deplasman değeri ile dış profil kalınlık değerinin ters orantılı olduğu anlamına gelmektedir. Çizgilerin uzantıları arasındaki dar açının en düşük seviyede olması deplasmanı azaltma üzerinde en etkili değişkenin dış profil kalınlık değeri olduğunu göstermektedir.

Dış profil kalınlığının 3,5 mm olduğu analizlerde, gerinme değeri %8 değerinin üzerinde olsa da 1 adet sonlu eleman üzerinde lokal olarak gözlemlenmiş olması sebebiyle kabul edilebilir bulunmuştur. Batarya kutusunun dış profil kalınlık değerinin 3,5 mm olmasına karar verilmiştir.

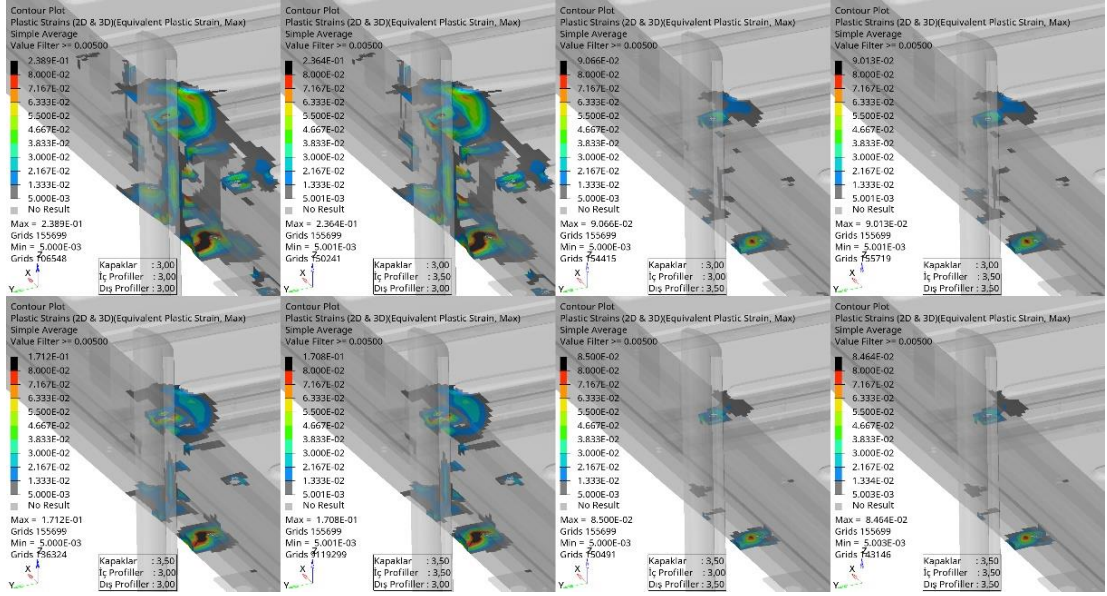
Ezme analizinde en etkin değişkenin dış profil kalınlığının olduğu gözlemlenmiştir. Dış profil kalınlığı 3,5 mm kalınlığında olacak şekilde batarya kutusunun hafifletilmesi amacıyla kapak kalınlık değeri 2,5 mm iken iç profil kalınlık değeri 2,5 mm ve 3,5 mm kalınlık değerleri için 2 adet ek analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Ezme analizi sonuçları 2

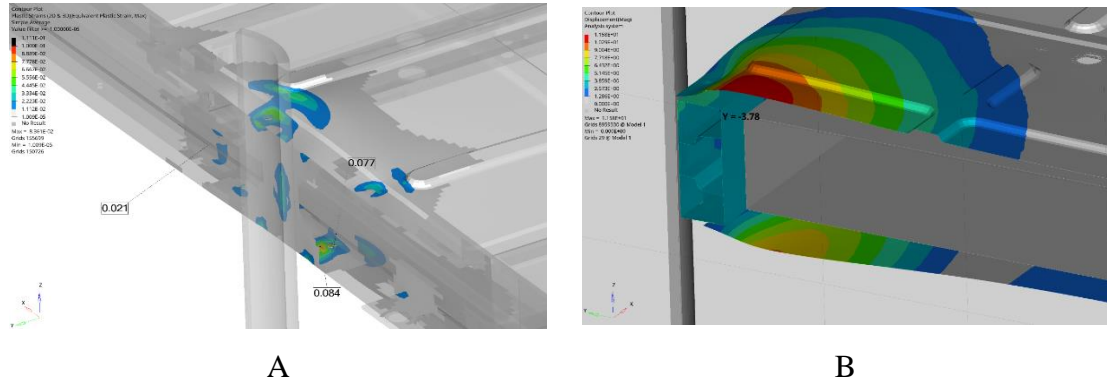
Kapak Kalınlık [mm]	Dış Profil Kalınlık [mm]	İç Profil Kalınlık [mm]	Toplam Kütle [kg]	Deplasman [mm]	Plastik Gerinme				
					Dış Profil		İç Profil		Kapak
					AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	5754 H22
2.5	3.5	2.5	503.839	3.87	0.085	0.021	0.003	0.026	0.078
2.5	3.5	3	506.922	3.78	0.084	0.022	0.001	0.022	0.077

Gerçekleştirilen 2 adet ek analiz çalışmasında batarya kutusu malzemeleri üzerinde gözlemlenen maksimum plastik gerinme değeri kabul edilebilir bulunmuştur. Batarya modülüne temas gözlemlenmemiştir. Ek olarak gerçekleştirilen her iki tasarımda ezme analizinden geçer nitelikte olsa da iç profil kalınlık değerinin 2,5 mm olan tasarım çarpma analizinde yeterli dayanımda görülmemiştir (Çizelge 4.5).

8 adet Ezme analize ait plastik gerinme sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir. Nihai olarak belirlenen 3,5 mm dış profil, 2,5 mm kapak ve 3,0 mm iç profil kalınlıkları için yapılan sonlu elemanlar analizinde ezme durumunda dış profilin iç yüzeyi batarya modülüne 3,78 mm yaklaşmıştır ve dış profil üzerinde %8,4 plastik gerinme değeri gözlemlenmiştir (Şekil 4.8). Batarya modülüne temas olması beklenmemektedir.



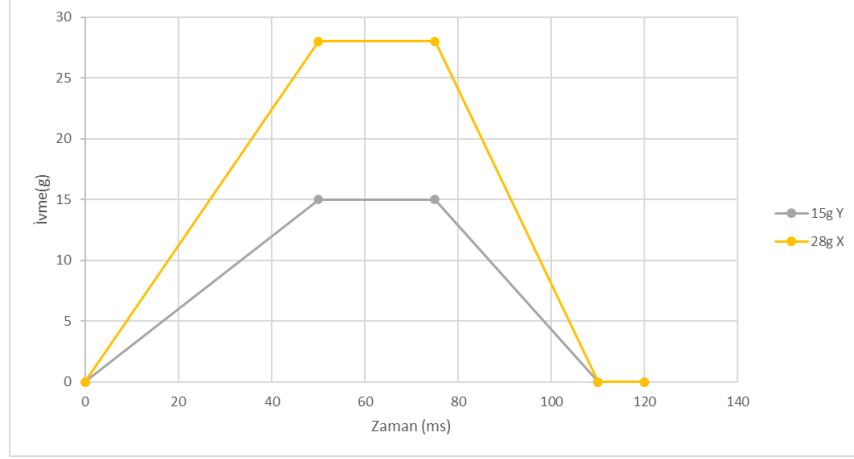
Şekil 4.7. Ezme analizleri plastik gerinme sonuçları



Şekil 4.8. Ezme analizi sonuçları A) Plastik gerinme B) Deplasman

4.3 Çarpışma Analizi Sonuçları

Şaseye bağlantı noktalarından sabitlenen batarya paketine Şekil 4.6’da gösterilen ivme zaman grafiği ile toplam süresi 120 ms olan yükleme şartında lineer dinamik zamana bağlı geçici cevap analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9. İvme zaman grafiği

Öncelikle 3 bölgenin 2 farklı seviyedeki kalınlıklarının (3-3,5 mm), malzemeler üzerinde oluşan maksimum gerilmeler ve toplam kütleyle olan etkilerini incelemek amacıyla 4 adet analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Batarya paketi üzerinde araç bağlantı ve modül bağlantı bölgelerinde gerilmeler gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4. Deney tasarımı çarpışma analizi sonuçları

	Kapak Kalınlık [mm]	Dış Profil Kalınlık [mm]	İç Profil Kalınlık [mm]	Toplam Kütle [kg]	Dış Profil		İç Profil		Kapak
					AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	
28g X	3	3	3	511.46	175	69	157	71	47
	3	3	3.5	514.54	162	68	115	52	45
	3	3.5	3	515.80	145	56	157	73	43
	3.5	3	3	520.34	175	67	156	70	43
15g Y	3	3	3	511.46	69	13	69	17	15
	3	3	3.5	514.54	68	14	115	14	14
	3	3.5	3	515.80	54	11	68	17	14
	3.5	3	3	520.34	69	12	59	17	14

Batarya paketinin dış profil ve iç profilin 3 mm kalınlıklı değerleri için yeterli dayanımda olmadığı dış profil üzerindeki gerilme değerlerinin malzeme akma gerilme değerini aştığı gözlemlenmiştir.

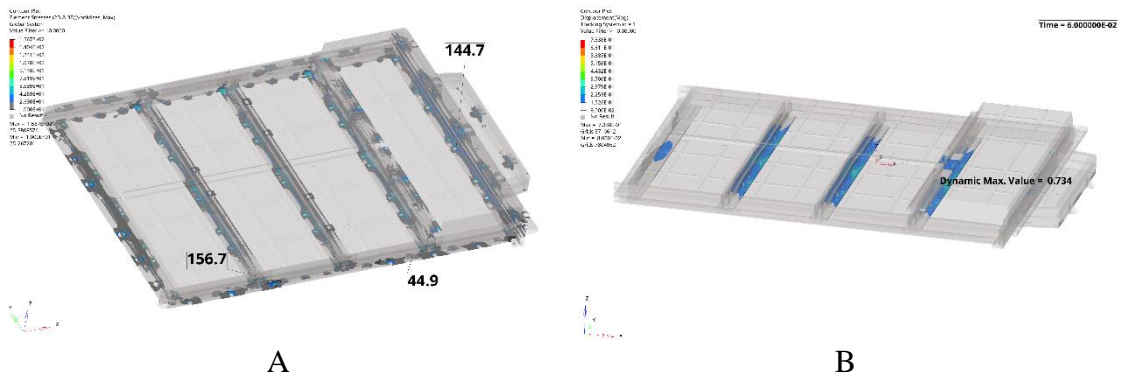
Dış profil kalınlığının 3,5 mm olmasıyla birlikte kapak kalınlığının 2,5 mm olduğu iç profil kalınlığının 3,0 ve 3,5 mm kalınlığa sahip olduğu ikişer adet analiz daha gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Çarpışma analizi sonuçları 2

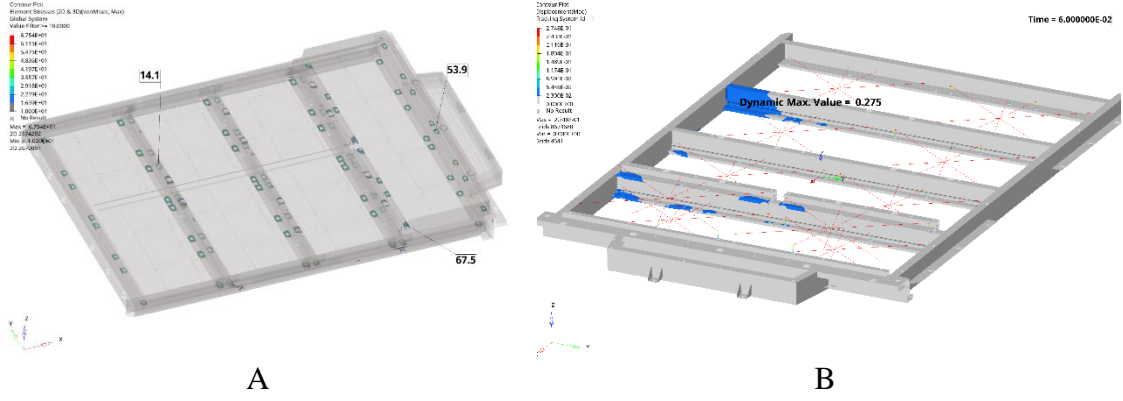
	Kapak Kalınlık [mm]	Dış Profil Kalınlık [mm]	İç Profil Kalınlık [mm]	Toplam Kütle [kg]	Dış Profil		İç Profil		Kapak
					AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	
28g X	2.5	3.5	2.5	503.84	160	61	226	100	47
	2.5	3.5	3	506.92	145	58	157	73	45
15g Y	2.5	3.5	2.5	503.84	55	12	75	20	17
	2.5	3.5	3	506.92	54	12	68	17	15

İç profil kalınlığının 2,5 mm olduğu durumda 28g ivme X yönündeki yükleme şartında iç profil üzerindeki gerilme değerin malzeme akma gerilmesi (170 MPa) üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Nihai olarak belirlenen dış profil 3,5 mm, iç profil 3,0 mm ve kapakların 2,5 mm kalınlığa sahip olduğu analizde 120 ms boyunca elemanlar üzerinde oluşan maksimum gerilme bölgeleri ve komponent ile hareket eden eksen takımına göre oluşan maksimum deplasman değeri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 de verilmiştir. Analiz sonucunda oluşan gerilme değeri malzeme akma gerilmesinin altında olduğu görülmüştür.



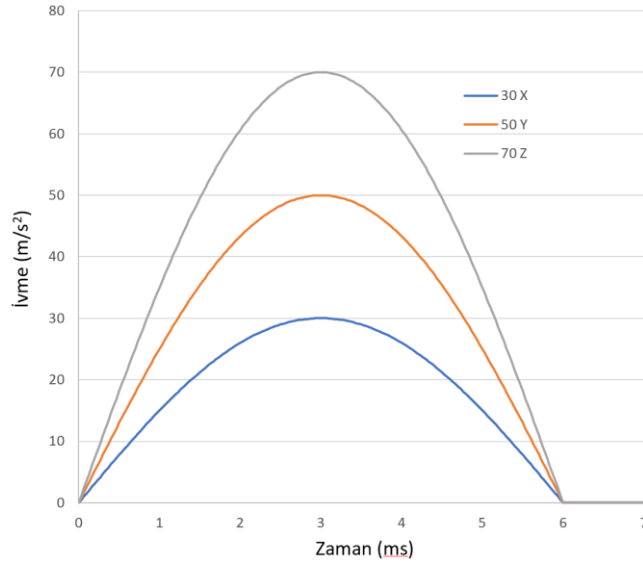
Şekil 4.10. Atalet 28g X analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman



Şekil 4.11. Atalet 15g Y analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman

4.4 Mekanik Şok Analiz Sonuçları

Batarya paketi araç şase bağlantı bölgelerinden sabitlenerek 6 ms yarım sinüs 30 m/s² X yönünde, 50 m/s² Y yönünde ve 70 m/s² Z yönünde ivme şartları ile zamana bağlı lineer dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12. Mekanik şok analizi ivme zaman yükleme grafiği

Öncelikle belirlenen 3 bölgenin 2 farklı seviyedeki (3-3,5 mm) kalınlıklarının malzemeler üzerinde oluşan maksimum gerilmeler ve toplam kütleyle olan etkilerini incelemek amacıyla 4 adet analiz yapılmıştır. Batarya kutusu üzerinde araç bağlantı ve modül bağlantı bölgelerinde gerilmeler gözlemlenmiştir. En yüksek gerilme değerlerinin Z

yönünde uygulanan yarım sinüs 70 m/s^2 ivme analizinde olduğu gözlemlenmiştir. Tüm analizlerde gerilme değerleri malzeme akma gerilmesinin altında olduğu bulunmuştur. Analiz sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Deney tasarımı mekanik şok analiz sonuçları

	Kapak Kalınlık [mm]	Dış Profil Kalınlık [mm]	İç Profil Kalınlık [mm]	Toplam Kütle [kg]	Dış Profil		İç Profil		Kapak
					AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	
30X	3	3	3	511.46	32	12	29	13	8
	3	3	3.5	514.54	31	12	22	10	8
	3	3.5	3	515.80	27	10	30	14	8
	3.5	3	3	520.34	33	11	29	13	8
50Y	3	3	3	511.46	39	7	39	10	8
	3	3	3.5	514.54	38	8	35	8	8
	3	3.5	3	515.80	31	6	39	10	8
	3.5	3	3	520.34	39	7	39	10	8
70Z	3	3	3	511.46	109	27	59	11	31
	3	3	3.5	514.54	110	27	40	9	30
	3	3.5	3	515.80	80	21	56	12	29
	3.5	3	3	520.34	109	27	59	11	26

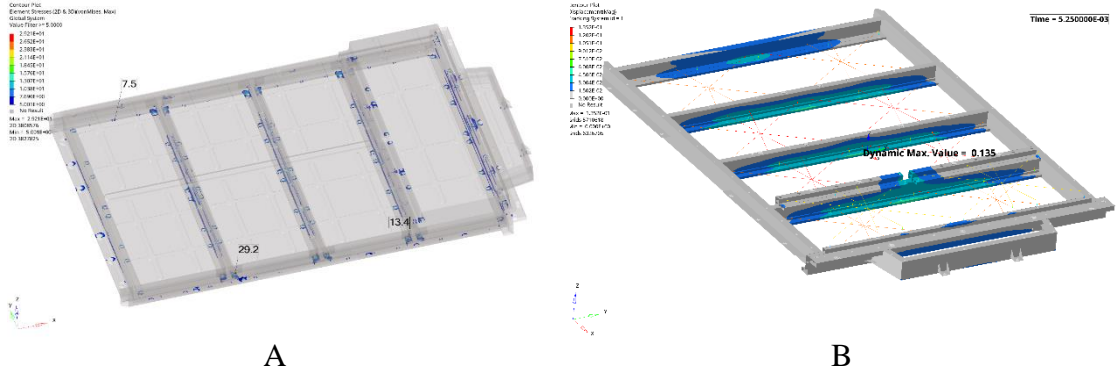
Ezme analizi sonrası karar verilen 3,5 mm dış profil ve kütle üzerinde en baskın değişken olan kapak kalınlığının, 2,5mm kalınlık değeriyle iç profil kalınlıklarının 2,5 mm ve 3,5 mm değerleri için ikişer adet ek analiz gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Mekanik şok analiz sonuçları 2

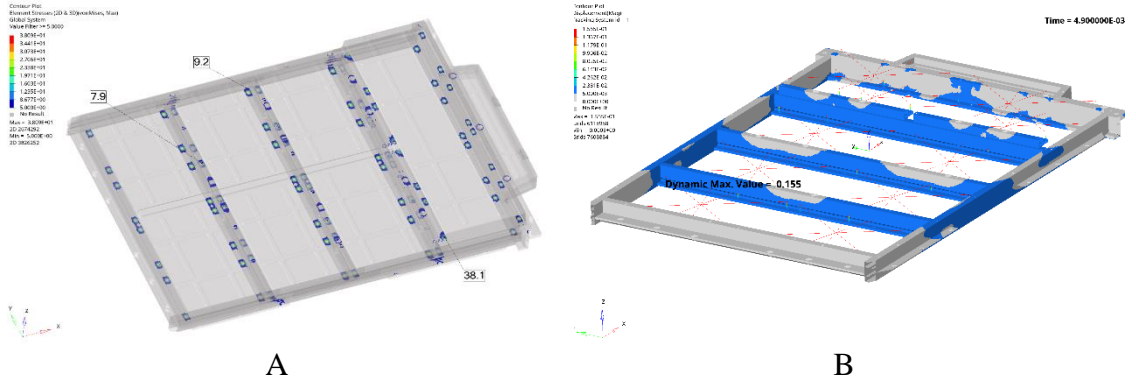
	Kapak Kalınlık [mm]	Dış Profil Kalınlık [mm]	İç Profil Kalınlık [mm]	Toplam Kütle [kg]	Dış Profil		İç Profil		Kapak
					AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	
30X	2.5	3.5	2.5	503.84	29	11	41	18	8
	2.5	3.5	3	506.92	30	10	30	14	8
50Y	2.5	3.5	2.5	503.84	31	7	42	12	9
	2.5	3.5	3	506.92	31	6	39	10	8
70Z	2.5	3.5	2.5	503.84	88	20	86	15	33
	2.5	3.5	3	506.92	80	21	57	12	32

Gerçekleştirilen ikişer adet ek analiz sonucunda da komponentler üzerinde oluşan gerilme değerlerinin malzeme akma gerilmelerinin altında olduğu görülmüştür.

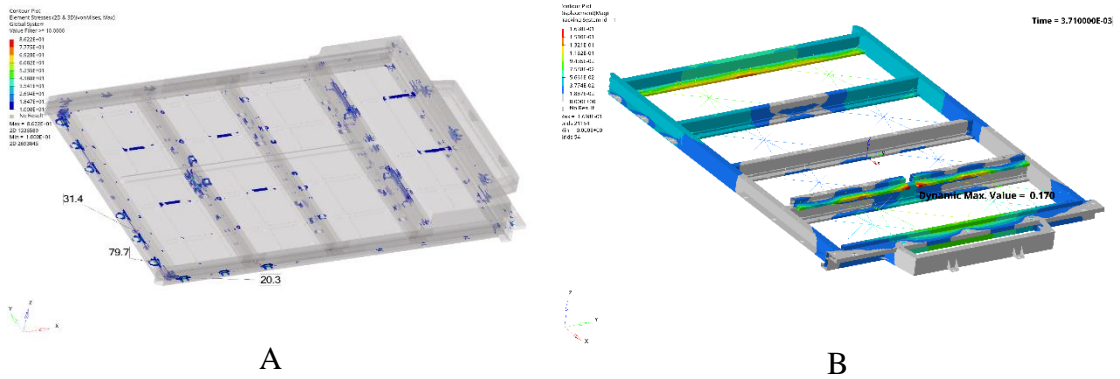
Nihai olarak belirlenen 3,5 mm dış profil, 2,5 mm kapak ve 3,0 mm iç profil kalınlıkları için yapılan analizlerde gözlemlenen gerilme ve komponent ile hareket eden eksen takımına göre oluşan maksimum deplasman değerleri ve bölgeleri X yönünde 30 m/s² ivme analizi için Şekil 4.13, Y yönünde 50 m/s² ivme analizi için Şekil 4.14 ve Z yönünde 70 m/s² ivme analizi için Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Şok (30 X) analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman



Şekil 4.14. Şok (50 Y) analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman



Şekil 4.15. Şok (70 Z) analizi sonuçları A) Gerilme B) Deplasman

4.5 Titreşim Yorulması Analiz Sonuçları

Batarya paketinin, 450 Hz değerine kadar olan doğal frekans ve mod şekilleri hesaplanmış ve batarya paketinin 450 Hz değerine kadar olan modal katılım değerleri toplamı %80 üzerinde bulunmuştur (X eksen %84, Y eksen %81, Z eksen %96). Rastgele titreşim analizi modal tabanlı doğrusal dinamik analizi temelinde gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle belirlenen 3 bölgenin 2 farklı seviyedeki kalınlıklarının malzemeler üzerinde oluşan Segalman Von Mises RMS 3σ gerilme sonuçlarını incelemek amacıyla tam faktöriyel kombinasyonda 8 adet analiz yapılmıştır. Segalman Von Mises RMS 3σ gerilme sonuçları malzeme yorulma dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Batarya kutusunda kullanılan 6063-T6 ve 5754-H22 malzemelerine ait yorulma dayanım değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Rastgele titreşim analizinde hesaplanan Segalman Von Mises RMS 3σ gerilme sonuçlarının malzeme yorulma dayanım değerinin altında olması beklenmektedir.

Çizelge 4.8. Yorulma dayanım tablosu (MakeItFrom, 2020)

	Yorulma dayanımı (MPa)
6063 T6	70
5754 H22	110

Rastgele titreşim analizine ait malzemeler üzerinde oluşan Segalman Von Mises RMS 3σ gerilme sonuçları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

PSD verileri ile gerçekleştirilen rastgele titreşim analizleri sonucunda Segalman Von Mises RMS 3σ değerleri ile istatistiksel olarak bu titreşim profilinde oluşan gerilmelerin %99,73 ünün hangi aralıkta olacağı bulunmuştur.

Sistem üzerinde oluşacak gerilmelerin yaklaşık tamamı (%99,73) malzemelerin yorulma dayanım değerinin altında olması beklenmiş ve böylelikle sistemin güvenli olacağı değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.9. Deney tasarımı ve titreşim yorulması analiz sonuçları

Kapak Kalınlık [mm]	Dış Profil Kalınlık [mm]	İç Profil Kalınlık [mm]	Toplam Kütle [kg]	Segalman Von Mises RMS 3σ gerilme sonuçları				
				Dış Profil		İç Profil		Kapak
				AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	5754 H22
3	3	3	511.462	66	19	53	23	31
3	3	3.5	514.544	65	19	39	17	31
3	3.5	3	515.797	50	17	54	24	31
3	3.5	3.5	518.879	48	15	41	18	31
3.5	3	3	520.337	64	19	53	23	28
3.5	3	3.5	523.420	64	20	39	17	28
3.5	3.5	3	524.673	50	17	54	24	26
3.5	3.5	3.5	527.755	48	15	41	18	26

Analiz sonuçlarında tüm tasarımlar için gerilme değerlerinin malzeme yorulma değerinin altında olduğu gözlemlenmiştir.

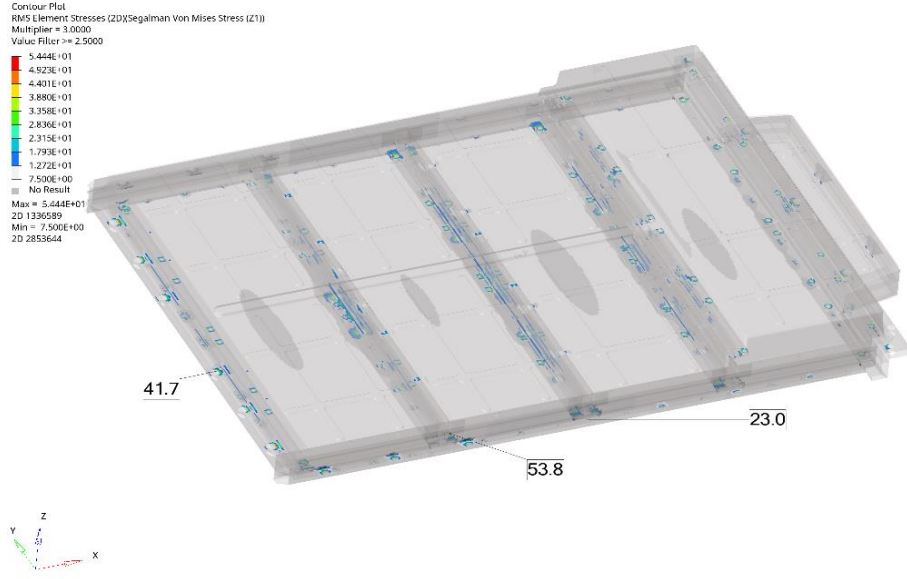
Hafifletme çalışmaları için gerçekleştirilen iki adet ek analiz çalışmasına ait sonuçlar Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Titreşim yorulması analizi sonuçları 2

Kapak Kalınlık [mm]	Dış Profil Kalınlık [mm]	İç Profil Kalınlık [mm]	Toplam Kütle [kg]	Segalman Von Mises RMS 3σ gerilme sonuçları				
				Dış Profil		İç Profil		Kapak
				AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	AA6063 T6	AA6063 T6 *0.65	5754 H22
2.5	3.5	2.5	503.839	54	20	77	32	42
2.5	3.5	3	506.922	51	17	54	24	42

Gerçekleştirilen ek iki adet titreşim yorulması analiz sonucunda iç profil kalınlık değerinin 2,5 mm olduğu tasarımda gözlemlenen Segalman Von Mises RMS 3σ gerilme değeri malzeme yorulma dayanım değerinin üzerinde bulunmuştur.

Nihai olarak belirlenen 3,5 mm dış profil, 2,5 mm kapak ve 3,0 mm iç profil kalınlıkları için gerçekleştirilen rastgele titreşim sonlu elemanlar analizinde oluşan gerilme değerleri ve bölgeleri Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16 Rastgele titreşim analizi gerilme sonuçları

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tasarımı ele alınan batarya kutusunda, kapaklar, dış profiller ve iç profillerdeki birim kalınlık artışları toplam kütleyi sırasıyla 17,8-8,7 ve 6,2 kg arttırmaktadır. Kapak kalınlığı toplam kütle üzerindeki en etkin değişkendir. Analiz çalışmalarıyla da tasarım değişkenlerinin belirlenen gereklilikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Belirlenen tüm gereklilikleri sağlayan batarya kutusu tasarımı, referans alınan 3,0 mm kalınlığındaki batarya kutusuna göre %4,5 daha hafiftir. Gereklilikleri sağlayan ve hafifletilmiş batarya kutusunun tasarımında en uygun kalınlıkların dış profil, kapak ve iç profil için sırasıyla 3,5 mm, 2,5 mm ve 3,0 mm olduğu görülmüştür.

Modal analizlerde iç profil kalınlıklarının, %50 üzerindeki kütle katılım değerine sahip ilk mod frekans değerini öteleyen baskın parametre olduğu tespit edilmiştir. Modal analizde 250 Hz değerine kadar olan toplam kütle katılım oranı X eksenini %83, Y eksenini %82, Z eksenini %65 iken 450 Hz değerine kadar yapılan taramada toplam efektif kütle katılım oranının X eksenini %85, Y eksenini %83, Z eksenini %96 olduğu gözlemlenmiştir.

Ezme analizlerinde modüle temas edebilecek dış profil iç yüzey deplasmanını azaltmada, dış profil kalınlığının en baskın parametre olduğu gözlemlenmiş ve mevcut tasarım için dış profil kalınlığının 3,5 mm üzerinde olması gerektiği belirlenmiştir. 3,5 mm dış profil, 2,5 mm kapak ve 3,0 mm iç profil kalınlıkları için yapılan ezme analizinde bataryaya temas gözlemlenmemiş ve komponentler üzerinde herhangi bir hasar beklentisi oluşmamıştır.

Bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar analizlerinde malzeme hasar modeli kullanılmamıştır. Ezme analizinde malzeme plastik gerinme değeri üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiş, plastik gerinme değerinin malzeme çekme uzaması gerinme değerinin altında kalması hedeflenmiştir. Nihai tasarımda 6063 T6 malzemesi üzerinde gözlemlenen plastik gerinme değeri malzeme uzama gerinmesinin üzerinde olsa da sonlu elemanlar analiz modelinde gerinmenin tek eleman üzerinde ve rijit elemanla temsil edilmiş civata bağlantı bölgesine yakın olması, sınır değerinin çok üzerinde olmaması, malzemede hasar modeli kullanılmamış olması sebebiyle kabul edilebilir bulunmuştur. Batarya modüllerine olabilecek temasları incelemek için gerçekleştirilen

ezme analizlerinde malzemelerin hasar modellerinin de kullanılması önerilir. Ayrıca ezme analizinde dış profil kalınlığının etkili olduğu, bu sebeple dış profil üzerinde zayıf bölgelerin kompozit yapılarla güçlendirilmesinin hafifletme çalışmalarına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Rastgele titreşim analizlerinde 3,5 mm dış profil ve 2,5 mm kapak kalınlıklarıyla birlikte iç profil kalınlığının 2,5 mm olmasının yeterli olmadığı iç profil kalınlığının 3,0 mm olması gerektiği görülmüştür.

İç profil kalınlığının belirlenmesinde, 28g araç ilerleme yönünde gerçekleştirilen çarpma analiz şartının baskın olmakla birlikte, titreşim yorulması ve mekanik şok gereklilikleri ile %50 üzerindeki kütle katılım değerine sahip ilk mod frekans değerinin etkin olduğu görülmüştür.

Kapak kalınlığının belirlenmesinde modal analiz ile ilk doğal frekans değerinin etkin olduğu tespit edilmiştir. Kapak kalınlığının çarpma, titreşim yorulması ve mekanik şok analizlerindeki sonuçlara etkisinin sınırlı olması sebebiyle batarya kutusunun kapak tasarımında kompozit veya plastik malzeme kullanımı alternatiflerinin hafifletme çalışmalarına katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Ürün tasarımlarını doğrulamak için isterlere bağlı birçok analiz çalışması gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışma ile dış profil tasarımlarının belirlenmesi için ezme isterinin, kapak tasarımlarını belirlemede doğal frekans isterinin, iç profil tasarımları belirlemede çarpma ve titreşim yorulması isterlerinin baskın olduğu, mevcut tasarım için şok analizinin tasarımı kısıtlayıcı bir etki oluşturmadığı gözlemlenmiştir.

Birçok dinamik analiz problemde yapısal sönüm değerlerinin %2 ile %5 arasında tanımlandığı ve yapının azalan sönüm değeri hasarlanma derecelerinin arttığı bilinmektedir (Akarsu, 2012; Altair, 2021b; Yang ve ark., 2019). Çalışmada sistemin dinamik davranışı için önemli bir parametre olan sönüm oranı %3 kabul edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda prototip üretim üzerinden yapılacak test ile frekans cevap fonksiyonu elde edilerek sönüm oranının korelasyonu sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Afseth, A. (2021). *Aluminum battery enclosure design*. <https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2021/02/Aluminum-Battery-Enclosures-Constellium-February-2021-FINAL.pdf>
- Akarsu, C. (2012). *Bir ticari kamyon şasisine bağlı parçaların titreşim kaynaklı yorulma analizi*. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Altair. (2015). *Practical aspects of finite element simulation*. Altair University.
- Altair. (2018). *Introduction to nonlinear finite element analysis using altair optistruct*. Altair. <https://altairuniversity.com/free-ebook-introduction-to-nonlinear-finite-element-analysis-using-optistruct/>
- Altair. (2021a). *Frequency Response Analysis*. Altair. https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/analysis_frequency_response_c.htm
- Altair. (2021b). *NAFEMS Dynamic Response Analysis*. https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/nafems_freq_response_analysis_r.htm
- Altair. (2022). *Random Response Fatigue Analysis*. Altair. https://2022.help.altair.com/2022/hwdesktop/hlife/topics/solvers/os/analysis_random_response_fatigue_c.htm
- Aluminum Association. (2021). *Aluminum Sustainability | The Aluminum Association*. <https://www.aluminum.org/sustainability>
- Alüminyum. (2020, Ağustos 18). . Wikipedia. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Alüminyum>
- Anonim. (2017). *BMW i3: Battery System*. Marklines. https://www.marklines.com/en/report_all/Munro002_201704
- Anonim. (2018). *Aluminum extrusion manual aluminum extrusion manual*. Aluminium-guide. <https://aluminium-guide.com/wp-content/uploads/2019/05/2013-AEC-Aluminum-Extrusion-Manual.pdf>
- Anonim. (2019a). *Frequency domain definition*. Deepai. <https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/frequency-domain>
- Anonim. (2019b). *Temel titreşim deneyi*. [https://autoeng.cu.edu.tr/storage/Lab/Föyler/Türkçe/B-Titreşim Deneyi \(2019-2020\).pdf](https://autoeng.cu.edu.tr/storage/Lab/Föyler/Türkçe/B-Titreşim Deneyi (2019-2020).pdf)
- Anonim. (2021a). *Audi e-tron battery*. <https://electrichasgoneaudi.net/models/e-tron/drivetrain/battery/>
- Anonim. (2021b, Şubat 2). *Alüminyum Temper Kodları*. <https://aluminyumburada.com/blog?p=alüminyum-temper-kodları>
- Anonim. (2022a, Ekim 14). *A new generation of battery packs with a recyclable epoxy SMC casing - JEC*. <https://www.jeccomposites.com/news/a-new-generation-of-battery-packs-with-a-recyclable-epoxy-smc-casing/>
- Anonim. (2022b, Ekim 14). *EV battery box design: How to make it a reality*. <https://autoprotoway.com/ev-battery-box-design/>
- Anonim. (2023, Mart 26). *Updated: Electric car battery replacement costs*. Recurrentauto. <https://www.recurrentauto.com/research/costs-ev-battery-replacement>
- Autodesk. (2019, Ekim 30). *Nastran ve Simulation Mechanical'dan rastgele titreşim analizi sonuçları nasıl yorumlanır?* <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdarticles/sfdarticles/How-to-interpret-random-vibration-analysis-results-from-Nastran-and-Simulation-Mechanical.html>
- Avcioğlu, E. (2019). *Tasarım- İmalat*. http://web.hitit.edu.tr/dersnotlari/emiravcioglu_25.03.2019_3S0D.pptx

- Bala, A., & Chaitanya Kamaraju, M. (2020). *Design and optimization of battery housing in electric cars*. [Yüksek lisans tezi , Chalmers University of Technology].
- Basilio, J., Ribeiro, J., & Soeiro, F. J. (2019, Aralık 4). *Modelling and optimizing a vehicle suspension considering user safety and comfort in an irregular road*. <https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2019.cob2019-0774>
- Bibra, E. M., Connelly, E., Dhir, S., Drtil, M., Henriot, P., Hwang, I., Le Marois, J.-B., McBain, S., Paoli, L., & Teter, J. (2022). Global EV Outlook 2022 Securing supplies for an electric future. IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>
- Bishop, N. W. M., & Sherratt, F. (1998). *Finite element based fatigue calculations*. Americas User Conference.
- Bouckaert, S., Pales, A. F., McGlade, C., Remme, U., Wanner, B., Varro, L., D'Ambrosio, D., & Spencer, T. (2021). *Net zero by 2050 - A roadmap for the global energy sector*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
- Carney, D. (2022, Ağustos 12). *VW ID.4 Adds to mid-size ev battery momentum*. Designnews. <https://www.designnews.com/automotive-engineering/vw-id4-adds-mid-size-ev-battery-momentum>
- Cobden, R. (1994). *TALAT Lecture 1501, Aluminium: Physical properties, characteristics and alloys*. European Aluminium Association.
- Day, D., Khan, M., Ross, M., & Stevens, B. (2020). Establishing an RMS von Mises stress error bound for random vibration analysis. *Model Validation and Uncertainty Quantification, Volume 3: Proceedings of the 37th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2019*.
- Djukanovic, G. (2019, Temmuz 2). *Aluminium extrusions are winning the race for battery enclosure in EVs*. <https://aluminiuminsider.com/aluminium-extrusions-are-winning-the-race-for-battery-enclosure-in-evs/>
- Ediz, B. (2018). *Bir Binek Araç Gündüz Farının Sonlu Eleman Modelinin Bilgisayarda Şok Testleri için Güncellenmesi ve Doğrulanması*. [Yüksek lisans tezi , Bursa Uludağ Üniversitesi].
- Elsa Liu. (2023, Kasım 5). *Concerned about the BMW battery pack for electric cars, i3 and its brothers | LiFePO4 Battery*. lifepo4. <https://www.lifepo4-battery.com/News/BMW-I3-BATTERY.html>
- Enderle, S., Hans, B., & Brüderle, M. (2019, Ekim). E-tron. *EuroCarBody 2019*.
- Erdin, E. (2017, Nisan 19). *Kütlesel şekillendirme işlemleri*. http://web.hitit.edu.tr/dersnotlari/eminerdin_19.04.2017_4X1I.pdf
- Erdoğan, M. E. (2021, Haziran 19). *Net sıfır hedefi nedir?* <https://www.plumemag.com/net-sifir-hedefi-nedir/>
- European Aluminum. (2019, Ekim 10). *Aluminum content in european passenger cars*. https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/10/aluminum-content-in-european-cars_european-aluminium_public-summary_101019-1.pdf
- European Commission. (2022, Kasım 10). *Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495
- Favero, J. (2019a). *Why e-mobility needs smart steels*. e-mobility technology international. <https://www.yumpu.com/en/document/download/62891428/b3ac9-92faf-64dbf-66bae-161b7-ae8b7-74399-c3629>

- Favero, J. (2019b, Kasım 21). *Why e-mobility needs smart steels*. E-Motec. <https://www.e-motec.net/why-e-mobility-needs-smart-steels>
- Fu, Z., & He, J. (2001). *Modal analysis*. Elsevier.
- Fuchss, S., Michaelides, A., Stocks, O., & Devenport, R. (2019). The propulsion system of the new jaguar i-pace. *MTZ worldwide*. <https://doi.org/10.1007/s38313-018-0123-4>
- Georgantzia, E., Gkantou, M., & Kamaris, G. S. (2021). Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>
- Henze, V. (2020, Aralık 16). *Battery pack prices cited below \$100/kwh for the first time in 2020, while market average sits at \$137/kwh*. Bloomberg. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- Hirsch, J. (2004, Ağustos). Automotive trends in aluminium - The European perspective. *Materials Forum*.
- HM Government. (2021). *Transitioning to zero emission cars and vans: 2035 delivery plan*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1005301/transitioning-to-zero-emission-cars-vans-2035-delivery-plan.pdf
- Höhne, K., & Hirtz, E. (2013). With system integration and lightweight design to highest energy densities. *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2013: Smart Systems for Safe and Green Vehicles*, 205–214.
- Hurlston, R. (2021, Nisan 1). *What is nonlinear geometry in fea? And when should you use it?* <https://www.fidelisfea.com/post/what-is-nonlinear-geometry-in-fea-and-when-should-you-use-it>
- İnanç, Z. (2021, Kasım 5). *COP26 Nedir?* Plumemag. <https://www.plumemag.com/cop26-nedir/>
- International Organization for Standardization. (2019). *Electrically propelled road vehicles safety specification. ISO 6469-1*.
- Irlle, R. (2023). *The electric vehicle world sales database*. EV-Volumes. <https://www.ev-volumes.com/>
- Irvine, T. (2003, Ağustos 29). *Random vibration fatigue revision b*. http://www.vibrationdata.com/tutorials_alt/Rfatigue.pdf
- Irvine, T. (2007, Mart 15). *Power spectral density units: [G² / Hz] Revision b*. <https://vibrationdata.com/tutorials2/psd.pdf>
- Irvine, T. (2018, Ekim 26). *An introduction to random vibration revision b*. <http://www.vibrationdata.com/tutorials2/random.pdf>
- Izumi, J. (1999). *Combined environmental testing for equipment used on automobiles (No. 6). ESPEC Technology Report*.
- John, H. (2021). *Electric 2021 VW ID.4 includes steel chassis, removable aluminum underbody panel*. <https://www.repairerdrivennews.com/2020/09/25/electric-2021-vw-id-4-includes-steel-chassis-removable-aluminum-underbody-panel-2/>
- Jones, P. (2022, Ağustos 25). *How much do electric car batteries cost?* <https://motorandwheels.com/how-much-do-electric-car-batteries-cost/>
- Keles, Ö. (2010, Haziran 10). *Mekanik özellikler ve davranışlar*. https://web.itu.edu.tr/ozgulkeles/dersler/MalzemeBilimi_06_2010.pdf

- Kotak, B., Kotak, Y., Brade, K., Kubjatko, T., & Schweiger, H. G. (2021). Battery crush test procedures in standards and regulation: Need for augmentation and harmonisation. *Batteries 2021*. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES7030063>
- Kumar, S. M. (2008). *Analyzing random vibration fatigue*. Ansys. <https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2021/01/Analyzing-Random-Vibration-Fatigue.pdf>
- LEVIS. (2021). *About Levis project*. <https://greenvehicles-levis.eu/>
- Lin, C., Gao, F., Wang, W., & Chen, X. (2016). Multi-objective optimization design for a battery pack of electric vehicle with surrogate models. *Journal of Vibroengineering*, 18(4), 2343–2358. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16837>
- Löbberding, H., Wessel, S., Offermanns, C., Kehrer, M., Rother, J., Heimes, H., & Kampker, A. (2020). From cell to battery system in BEVs: Analysis of system packing efficiency and cell types. *World Electric Vehicle Journal*, 11(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/wevj11040077>
- Maeda, K., & Takahashi, M. (2015). Validation of vibration test for lithium-ion battery pack in electric vehicles. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1195>
- MakeItFrom. (2020). *Material Properties Database*. <https://www.makeitfrom.com/>
- Mccall, T. (2021). *The Price of Batteries*. MIT Technology Review. http://files.technologyreview.com/p/pub/legacy/jan11_feature_electric_cars_p61.pdf
- Mechanicalc. (2014). *Mechanical properties of materials*. <https://mechanicalc.com/reference/mechanical-properties-of-materials#ramberg-osgood-constants>
- Nastran, M. (2004). Basic dynamic analysis user's guide. *MSC. Software Corporation. USA*.
- Oğuz, B. (1990). *Demir dışı metallerin kaynağı*. Magmaweld. https://www.magmaweld.com.tr/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/aluminyum_alasimlarinin_isil_islemi.pdf
- Özcan, İ. (2021). *PSD tekniği kullanılarak metalik yapılarda yorulma hasarının tahmini üzerine bir yöntem geliştirilmesi*. [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi].
- Pan, Y., Xiong, Y., Wu, L., Diao, K., & Guo, W. (2021). Lightweight design of an automotive battery-pack enclosure via advanced high-strength steels and size optimization. *International Journal of Automotive Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12239-021-0112-5>
- Pickett, A. (2007). *Tutorial 1 and 2, end loaded cantilever and shell element studies*. http://www2.ifb.uni-stuttgart.de/fem/PDF_FILES/Tutorial1-2_ElasticCantilever_V4.pdf
- Pinto, A. F. B. P. (2013). *Modeling of automotive structures using dynamic behaviour simulation software*. [Doktora tezi, Universidade do Porto].
- Ramberg, W. . & O. W. R. (1943). *Description of stress-strain curves by three parameters* (No. NACA-T).
- Rao, S. S. (2011). *Mechanical Vibrations*, prentice Hall. *Indianapolis, IN*.
- Reshetko, N., Vakulenko, S., Kakhrianova, D., Belozarov, V., & Gašparík, J. (2020). Analysis of the electric vehicle market and the company's competitive development strategy on it (on the example of "Faraday Future"). *MATEC Web of Conferences*, 329, 01016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032901016>
- Resmi Gazete. (2004). *Araç kategorileri*. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2004/10/EKLER_İÇİN_BAKINIZ.doc

- Rice, R. C., Jackson, J. L., Bakuckas, J., & Thompson, S. (2003). *Metallic Materials Properties Development And Standardization (MMPDS)*. U.S. Department of Transportation.
- Ruiz, V., Pfrang, A., Kriston, A., Omar, N., Van den Bossche, P., & Boon-Brett, L. (2018). A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.195>
- Saha, P. (Pradip). (2000). *Aluminum extrusion technology*. ASM International.
- Sarlioglu, B., Morris, C. T., Han, D., & Li, S. (2015). Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION)*, 519–526. <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2015.7426993>
- Scamans, G. (2018). *Electric vehicles spike demand for high strength aluminum extrusions*. Light Met Age. <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/automotive/article-electric-vehicles-spike-demand-for-high-strength-aluminum-extrusions/>
- Schoewel, F., & Hockgeiger, E. (2014). The high voltage batteries of the bmw i3 and bmw i8. *Advanced Automotive Battery Conference (AABC)*.
- Second Life. (2020). *Tesla Model 3 Pack*. <https://www.secondlife-ebatteries.com/products/tesla-model-3-75kwh-pack>
- Segalman, D. J., Fulcher, C. W. G., Reese, G. M., & Field, R. V. (2000). An efficient method for calculating RMS von Mises stress in a random vibration environment. *Journal of Sound and Vibration*, 230(2), 393–410. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2606>
- Sensharma, P., Collette, M., & Harrington, J. (2010). Effect of welded properties on aluminum structures. *Ship Structure Committee SSC-4*.
- Serdar, K. (2019, Mayıs 8). *Alüminyum alaşımları için temper göstergeleri*. <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/08/aluminyum-alasimlari-icin-temper-gostergeleri/>
- Shui, L., Chen, F., Garg, A., Peng, X., Bao, N., & Zhang, J. (2018). Design optimization of battery pack enclosure for electric vehicle. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-1901-y>
- Tacoma Narrows Bridge. (2021, Mayıs 21). . Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_\(1940\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_(1940))
- Turkonfed. (2021). *2053 Net sıfır Türkiye'nin geleceğe yolculuğu*. [https://turkonfed.org/tr/detay/3687/2053-net-sifir-turkiyenin-gelecege-yolculugu#:~:text=2015 Paris İklim Anlaşması ile,için elzem olduğunu ortaya koydu.](https://turkonfed.org/tr/detay/3687/2053-net-sifir-turkiyenin-gelecege-yolculugu#:~:text=2015%20Paris%20İklim%20Anlaşması%20ile,için%20elzem%20olduğunu%20ortaya%20koydu.)
- U.S Department of Energy. (2023, Ocak 9). *Electric vehicle battery pack costs in 2022*. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1272-january-9-2023-electric-vehicle-battery-pack-costs-2022-are-nearly>
- Vehicle category. (2016, Aralık 12). . Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle_category
- Vij, R. K. (2022, Haziran 12). *Top 5 reasons why electric vehicles are the future of driving in 2022*. <https://www.outlookindia.com/business/top-5-reasons-why-electric-vehicles-are-the-future-of-driving-in-2022-news-201722>

- Volkswagen. (2022, Mayıs 10). *Why battery power will drive the future of transportation*. <https://www.vw.com/en/newsroom/everything-electric/batteries.html>
- Wu, J., Mason, L., Skelskey, T., King, D., & Dowdall, D. (2021). *Advanced SMC resins for electric-vehicle battery-enclosure applications*. <https://speautomotive.com/wp-content/uploads/2021/04/Advanced-SMC-Resins-for-Electric-Vehicle-Battery-Enclosure-Applications-June-Wu.pdf>
- Yaldız, D. N. (2021, Ekim 1). *Türkiye Paris İklim Anlaşması'nı onaylıyor*. <https://www.plumemag.com/turkiye-paris-iklim-anlasmasini-onayliyor/>
- Yang, N., Fang, R., Li, H., & Xie, H. (2019, Aralık 6). Dynamic and static analysis of the battery box structure of an electric vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/688/3/033082>
- Zwicker, M. F. R., Moghadam, M., Zhang, W., & Nielsen, C. V. (2020). Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining. *Journal of Advanced Joining Processes, 1*. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100017>

EKLER

EK 1 TS EN 755-2 standardında yer alan EN AW 6063 malzemenin akma ve çekme ile çekme uzaması mukavemet minimum değerleri

ICS 77.150.10

TÜRK STANDARDI

TS EN 755-2/Mart 2010

Çizelge 42 – Alaşım EN AW-6063 [AlMg0,7Si]

Ekstrüzyonla imal edilmiş tellik çubuk/çubuk									
Temper	Boyutlar mm		R _m MPa		R _{90,2} MPa		A %	A _{50mm} %	HBW Tıpkı değer
	D ^a	S ^b	En az	En çok	En az	En çok	En az	En az	
O, H111	≤ 200	≤ 200	-	130	-	-	18	16	25
T4 ^c	≤ 150	≤ 150	130	-	65	-	14	12	50
	150 < D ≤ 200	150 < S ≤ 200	120	-	65	-	12	-	50
T5	≤ 200	≤ 200	175	-	130	-	8	6	65
T6 ^c	≤ 150	≤ 150	215	-	170	-	10	8	75
	150 < D ≤ 200	150 < S ≤ 200	195	-	160	-	10	-	75
T66 ^c	≤ 200	≤ 200	245	-	200	-	10	8	80
Ekstrüzyonla imal edilmiş boru									
Temper	Et kalınlığı t mm	R _m MPa		R _{90,2} MPa		A %	A _{50mm} %	HBW Tıpkı değer	
		En az	En çok	En az	En çok	En az	En az		
O, H111	≤ 25	-	130	-	-	18	16	25	
T4 ^c	≤ 10	130	-	65	-	14	12	50	
	10 < t ≤ 25	120	-	65	-	12	10	50	
T5	≤ 25	175	-	130	-	8	6	65	
T6 ^c	≤ 25	215	-	170	-	10	8	75	
T66 ^c	≤ 25	245	-	200	-	10	8	80	
Ekstrüzyonla imal edilmiş profil ^e									
Temper	Et kalınlığı t mm	R _m MPa		R _{90,2} MPa		A %	A _{50mm} %	HBW Tıpkı değer	
		En az	En çok	En az	En çok	En az	En az		
T4 ^c	≤ 25	130	-	65	-	14	12	50	
T5	≤ 3	175	-	130	-	8	6	65	
	3 < t ≤ 25	160	-	110	-	7	5	65	
T6 ^c	≤ 10	215	-	170	-	8	6	75	
	10 < t ≤ 25	195	-	160	-	8	6	75	
T64 ^{cd}	≤ 15	180	-	120	-	12	10	65	
T66 ^c	≤ 10	245	-	200	-	8	6	80	
	10 < t ≤ 25	225	-	180	-	8	6	80	

^a D : Yuvarlak çubuk için çap.
^b S : Kare ve altıgen çubuklar için paralel yüzler arasındaki mesafe, dikdörtgen çubuklar için kalınlık.
^c Özellikler, basınç altında soğutulmuş elde edilebilir.
^d Eğme kalitesi.
^e Bir profilin kesiti birden fazla sayıda belirtilmiş mekanik özellik gruplarına giriyorsa, belirtilmiş en küçük değer bütün profil kesitleri için geçerli kabul edilmelidir.

EK 2 BS EN 485-2 standardında yer alan EN AW 5754 malzemenin akma ve çekme ile çekme uzaması mukavemet minimum değerleri

Table 42 — Alloy EN AW-5754 [AlMg3]

Temper	Specified thickness		Tensile strength		Yield strength		Elongation min.		Bend radius ^a		Hardness [*]	
	mm		R_m MPa		$R_{p0,2}$ MPa		%		180°	90°	HBW	
	over	up to	min.	max.	min.	max.	A_{50} mm	A				
pa	≥ 2,5 100,0	100,0 150,0	190 180									
O	0,2 0,5 1,5 3,0 6,0 12,5	0,5 1,5 3,0 6,0 12,5 100,0	190 190 190 190 190 190	240 240 240 240 240 240	80 80 80 80 80 80		12 14 16 18 18		17	0,5 t 0,5 t 1,0 t 1,0 t 2,0 t	0 t 0,5 t 1,0 t 1,0 t 2,0 t	52 52 52 52 52 52
H111	0,2 0,5 1,5 3,0 6,0 12,5	0,5 1,5 3,0 6,0 12,5 100,0	190 190 190 190 190 190	240 240 240 240 240 240	80 80 80 80 80 80		12 14 16 18 18		17	0,5 t 0,5 t 1,0 t 1,0 t 2,0 t	0 t 0,5 t 1,0 t 1,0 t 2,0 t	52 52 52 52 52 52
H112	≥ 6,0 12,5 25,0 40,0	12,5 25,0 40,0 80,0	190 190 190 190		100 90 80 80		12 10 12 14					62 58 52 52
H12	0,2 0,5 1,5 3,0 6,0 12,5	0,5 1,5 3,0 6,0 12,5 40,0	220 220 220 220 220 220	270 270 270 270 270 270	170 170 170 170 170 170		4 5 6 7 9		9			66 66 66 66 66 66
H14	0,2 0,5 1,5 3,0 6,0 12,5	0,5 1,5 3,0 6,0 12,5 25,0	240 240 240 240 240 240	280 280 280 280 280 280	190 190 190 190 190 190		3 3 4 4 5		5			72 72 72 72 72 72
H16	0,2 0,5 1,5 3,0	0,5 1,5 3,0 6,0	265 265 265 265	305 305 305 305	220 220 220 220		2 3 3 3					80 80 80 80
H18	0,2 0,5 1,5	0,5 1,5 3,0	290 290 290		250 250 250		1 2 2					88 88 88
H22	0,2 0,5 1,5 3,0 6,0 12,5	0,5 1,5 3,0 6,0 12,5 40,0	220 220 220 220 220 220	270 270 270 270 270 270	130 130 130 130 130 130		7 8 10 11 10		9	1,5 t 1,5 t 2,0 t 1,5 t 2,5 t	0,5 t 1,0 t 1,5 t 1,5 t 2,5 t	63 63 63 63 63 63

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yalçın ŞENSOY
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 07.04.1992
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi 2006-2010
Lisans : Uludağ Üniversitesi 2010-2014
Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : DTA Mühendislik 2013-2015
: Rollmech Automotive 2016-2018
: Yeşilova Holding 2018-

İletişim (e-posta) : ylcn.sensoy@gmail.com

Yayımları :

Şensoy, Y. (2022, Ekim 24-26). *Investigation of the effect of battery box design variables in electric vehicles by representation of vehicle accident situation, crushing analysis using the finite element method* [Conference presentation abstract]. IMSEC22 7th International Mediterranean Science and Engineering Congress, Antalya.

Şensoy, Y., & Çetin, S. T. (2023, Nisan 29-30). *Elektrikli araç batarya kutusunda tasarım değişkenlerinin doğal frekanslara etkisinin sonlu eleman analizi ile incelenmesi* [Sözel bildiri özeti]. 4. Uluslararası Hasankeyf Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi, Batman.

https://www.isarconference.org/_files/ugd/6dc816_b772694d766142eb98a151804cb47f05.pdf

Şensoy, Y., & Tekin, G. (2020). Alüminyum ekstrüzyonunda enine ve boyuna kaynamanın sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi. E. Solmaz, N. Kaya, & F. Öztürk (Ed.), *OTEKON 2020 10. Uluslararası Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa https://www.otekon.org/dokuman/OTEKON2020_PROCEEDINGS_2020.pdf

Yıldız, S., & Şensoy, Y. (2022). Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş yüksek akma dayanımlı 6xxx serisi alüminyum profillerin farklı pekleşme eğrileri kullanılarak çekme testi analizlerinin test sonuçlarıyla karşılaştırılması. S. B. Ocak, C. R. Rios, & S. Yalçınkaya (Ed.), 8. *Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, İstanbul