ALÜMİNYUM KÖPÜK İLAVESİNİN ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA TAŞIYICISINDA ÇARPIŞMA PERFORMANSINA ETKİSİ

Abdullah BOZKURT

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM KÖPÜK İLAVESİNİN ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA TAŞIYICISINDA ÇARPIŞMA PERFORMANSINA ETKİSİ

Abdullah BOZKURT
0009-0008-6313-1944

Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN
(Danışman)
0000-0003-1739-1143

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM KÖPÜK İLAVESİNİN ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA TAŞIYICISINDA ÇARPIŞMA PERFORMANSINA ETKİSİ

Abdullah BOZKURT

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

Günümüzde elektrikli araçlar, emisyon, yakıt verimliliği ve performans açısından oldukça ön plandadır. Ancak, bu araçlar kompleks bir yapıya sahiptir. Batarya bütününün aracın yapısında büyük bir pakete sahip olması, güvenlik önlemlerini de ön plana çıkarmaktadır. Batarya, dış etkenlere karşı koruma altında olması için bir iskelet yapının içerisinde paketlenmektedir. Araçların tip onayı alabilmesi için çarpışma performansı gereksinimlerini karşılayabilmesi için bu iskelet yapının belirli çarpışma dayanımlarına sahip olması gerekmektedir. Özellikle yandan çarpışma ve yol koşullarında alttan gelen darbelere karşı bu yapının yeteri kadar enerjiyi sönümleyebilmesi ve deformasyonu hücrelere iletmemesi oldukça önemlidir. Aksi halde, bataryada oluşacak yüksek enerjiler ve deformasyonlar çarpışma sonrası patlamalara sebep olabilir.

Çarpışma performansının yönetilmesi için çarpışma bölgesinde kesit optimizasyonu oldukça önemlidir. Ayrıca, araçlarda yakıt ve performans verimliliğini artırmak amacıyla ağırlığı azaltmak için düşük yoğunluklu malzemelerin çarpışma performansında sönümlemesinden yararlanılmaktadır. Alüminyum köpük, hafifliği ve enerji emme kapasitesi nedeniyle otomotiv endüstrisinde giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu çalışmada, alüminyum köpüğün farklı yoğunluk ve kombinasyonlarında çarpışma sırasında enerji sönüm performansının sayısal analizlerle karşılaştırılması incelenmektedir. Sayısal analizler, alüminyum köpük yoğunluğu ve hibrit kombinasyonlarının çarpışma performansını nasıl etkilediğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, alüminyum köpük ilavesi, araçların çarpışma performansını önemli ölçüde iyileştirmekte ve yolcu güvenliğini artırmaktadır. Bu tez, otomotiv mühendisliği alanında alüminyum köpük malzemesinin potansiyel kullanım alanlarını genişletmekte ve gelecekteki araç tasarımlarına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araç, Alüminyum Köpük, Simülasyon, Batarya Taşıyıcı, Çarpışma, Sonlu Eleman Analizi, Sönümleme Enerjisi
2025, xv + 52 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE EFFECT OF ALUMINUM FOAM ADDITION ON CRASH PERFORMANCE OF ELECTRIC VEHICLE BATTERY CARRIERS

Abdullah BOZKURT

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

Supervisor: Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

Electric vehicles are at the forefront today in terms of emissions, fuel efficiency, and performance. However, they also have a highly complex structure. The large battery pack within the vehicle structure brings safety measures to the forefront. The battery pack is enclosed within a skeletal structure to protect it from external impacts. For vehicles to obtain type approval, this skeletal structure must have specific crash resistances to meet crash performance requirements. It is particularly important that this structure can absorb sufficient energy and prevent deformation from being transmitted to the cells in the event of a side impact or an underbody impact during road conditions. Otherwise, high energies and deformations in the battery could lead to explosions post-crash.

Managing crash performance requires significant section optimization in the crash zone. Additionally, to improve fuel and performance efficiency, low-density materials are utilized for their energy absorption capabilities in crash performance. Aluminum foam is increasingly gaining attention in the automotive industry due to its light weight and energy absorption capacity. This study examines the crash energy absorption performance of aluminum foam in different densities and combinations through numerical analyses. Numerical analyses have revealed how aluminum foam density and hybrid combinations affect crash performance. Optimization studies focus on determining the most suitable section design and adjusting this design to maximize crash performance.

In conclusion, the addition of aluminum foam significantly improves the crash performance of vehicles and enhances passenger safety. This thesis expands the potential applications of aluminum foam material in automotive engineering and contributes to future vehicle designs.

Key words: Electric Vehicle, Aluminum Foam, Simulation, Battery Carrier, Crash, Finite Element Analysis, Energy Absorption
2025, xv + 52 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana destek olan, yol gösteren ve katkı sağlayan herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, tez danışmanım Doç. Dr. Betül Gülçimen Çakan'a, çalışmam boyunca bana gösterdiği sabır, rehberlik ve değerli katkıları için sonsuz teşekkür ederim. Akademik bilgi birikimi ve yönlendirmeleri, bu tezin tamamlanmasında büyük rol oynamıştır.

Hayatımın her anında yanımda olan ve bu süreçte bana her türlü desteği sağlayan sevgili eşim Buse Şimay Bozkurt'a minnettarım. Onun sevgisi, anlayışı ve sabrı, bu zorlu süreçte en büyük motivasyon kaynağım oldu.

Ayrıca, tüm hayatım boyunca beni destekleyen, bana inanan ve her zaman yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların sevgisi ve desteği, bugünlere gelmemde en önemli etken olmuştur.

Bu süreçte içinde bulunmaktan büyük onur duyduğum TÜBİTAK 1004 22AG001 projesine, projeyi mümkün kılan TÜBİTAK'a ve proje sürecinde bana desteklerini esirgemeyen değerli BATEG ekibine teşekkür ederim. Bu proje kapsamında elde ettiğim deneyimler ve kazanımlar, çalışmamın başarıyla tamamlanmasında önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmayı gerçekleştirmemi mümkün kılan herkese tekrar teşekkür ederim.

Abdullah BOZKURT
17/02/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....viii
ABSTRACT....ix
TEŞEKKÜR....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....xii
ŞEKİLLER DİZİNİ....xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ....xv
1. GİRİŞ....1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI....3
2.1. Elektrikli Araçlarda Batarya ve Batarya Taşıyıcı Yapılar....3
2.1.1. Batarya Taşıyıcı Tasarım Parametreleri....5
2.2. Batarya Taşıyıcı Sistemlerde Dayanım Performans İsterleri....7
2.3. Otomotiv Sektöründe Batarya Çarpışma Dayanımına Yönelik Çalışmalar....11
2.3.1. FMVSS 305 Standardı....12
2.3.2. UNECE Homologasyon Standartları....13
2.3.3. EU NCAP / ANCAP & US NCAP Standartları....14
2.4. Otomotiv Sektöründe Alüminyum Köpük Kullanımı....16
2.4.1. Alüminyum Köpük Malzeme Modeli....21
3. MATERYAL ve YÖNTEM....23
3.1. Sonlu Elemanlarda Çarpışma Senaryosu Yaklaşımları....23
3.2. Batarya ve Batarya Taşıyıcı Sistemlerde İndirgenmiş Modelleme....25
3.2.1. İndirgenmiş Model için Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması....29
3.2.2. İndirgenmiş Modellemede Yan Direk Çarpma Sınır Koşullarının Belirlenmesi....31
3.3. Yan Direk Çarpışma Analizi Batarya Yapısal Performans Hedefleri....33
3.4. Alüminyum Köpük Modelleme Yöntemi....34
3.5. Yan Direk Çarpışma Analizlerinde Farklı Kesitlerin Köpüklü ve Köpüksüz Kombinasyonları....36
4. BULGULAR....37
4.1. Yan Direk Çarpışma Analizlerinde Farklı Kesitlerin Çarpışma Performansı Sonuçları....37
4.2. GBT31467.3 Çin Standardına Göre Kesit Yapılarının Karşılaştırılması....41
5. TARTIŞMA ve SONUÇ....46
KAYNAKLAR....51
ÖZGEÇMİŞ....52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
M	Kütle Matrisi
C	Sönümleme Matrisi
K	Katılık Matrisi
G	Kayma Gerilmesi
E	Elastisite Modülü
L	Eleman Karakteristik Uzunluğu
c	Dalga Yayılma Hızı
{ü}	İvmelenme Vektörü
{u̇}	Hız Vektörü
{u}	Yer Değiştirme Vektörü
P_t	Uygulanan Kuvvet
F	Uygulanan Kuvvet
a_n	İvmelenme
v	Hız
d	Yer değiştirme
t	Zaman
Δt	Zaman Artışı
f_e	Dış Kuvvetler
f_d	Sönüm Kuvveti
f_c	Temas Kuvveti
f_h	Hourglass Kuvveti
f_i	Eleman İç Kuvveti
ν	Poisson Oranı
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar	**Açıklama**
FEA	Finite element analysis
MPA	Megapascal
Kg	Kilogram
HIC	Head Injury Criteria
HV	High Voltage
DC	Direct Current
kN	Kilo Newton
CAE	Computer Added Engineering
FEM	Finite element modeling
Km/sa	Kilometre/saat
mm	Milimetre
s	Saniye

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Batarya Bütünü ve Bileşenleri (SanLab Learning Technologies,2022)	4
Şekil 2.2.	Batarya Taşıyıcı Örnekleri (Gehm,2021) ….....	5
Şekil 2.3.	Batarya taşıyıcı tasarımı (Belingardi vd., 2023)	7
Şekil 2.4.	Batarya paketinde metal braketin dinamik yorulma hasarı (Ye vd., 2012)	9
Şekil 2.5.	Elektrikli araç önemli kaldıraç destek noktaları (Teslaowners, 2021)	9
Şekil 2.6.	FMVSS 305 çarpışma senaryoları (Safety Companion, 2025)	12
Şekil 2.7.	UNECE Homologasyon çarpışma senaryoları (Safety Companion, 2025)	14
Şekil 2.8.	EU NCAP &US NCAP çarpışma senaryoları (Safety Companion, 2025)	15
Şekil 2.9.	Batarya taşıyıcı yandan çarpma senaryosu (SSAB, 2025)	16
Şekil 2.10.	Batarya taşıyıcı alüminyum köpük örneği (Gülçimen Çakan vd., 2018)	17
Şekil 2.11.	Basma testine ait deneysel a) kuvvet-uzama ve b) gerilme-gerinme eğrileri (Gülçimen Çakan vd., 2018)	20
Şekil 2.12.	Alüminyum köpüğün basma etkisi altında gösterdiği farklı deformasyon bölgeleri (Gülçimen Çakan vd., 2018)	20
Şekil 3.1.	Sistem seviyesi yan direk test kurulumu (Krüger vd., 2022) ..	26
Şekil 3.2.	Batarya paketi yan direk kızak testi (Chen vd., 2022)	27
Şekil 3.3.	Yan direk testinde araç ve batarya üzerinde kuvvet dağılım grafiği (Krüger vd., 2022)	28
Şekil 3.4.	Yan direk ve batarya bütünü CAE modeli	29
Şekil 3.5.	Abaqus CAE modeli alüminyum 6061 malzeme tanımı	30
Şekil 3.6.	Batarya modülü modeli ve ağ yapısı	31
Şekil 3.7.	Krüger çalışmalarına göre yan direk çarpışma modeli	32
Şekil 3.8.	Krüger çalışmalarına göre yan direk çarpışma sonucu	32
Şekil 3.9.	Batarya yan direk çarpışma modeli sınır koşulları	33
Şekil 3.10.	Batarya modülü ve taşıyıcı paket kesiti arasındaki mesafe	34
Şekil 3.11.	Batarya taşıyıcı kesitinde alüminyum köpük modeli	35
Şekil 3.12.	Batarya taşıyıcı yan kesit modeli	36
Şekil 3.13.	Köpüklü ve köpüksüz kesit tasarımları	36
Şekil 4.1.	Alüminyum köpüksüz boş kesit çarpışma deformasyon şekli.	37
Şekil 4.2.	Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için maksimum yan direk girişimi (mm)	38
Şekil 4.3.	Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için zamana bağlı maksimum yan direk girişimi	38
Şekil 4.4.	Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için batarya hücre duvarına girişim mesafesi (mm)	39
Şekil 4.5.	Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için zamana bağlı batarya hücre duvarına girişim mesafesi grafiği	40
Şekil 4.6.	Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için zamana bağlı temas kuvveti grafiği	41
Şekil 4.7.	GBT31467.3 ezilme testi senaryosu (Favero, 2019)	41

Şekil 4.8. GBT31467.3 referans alınarak oluşturulmuş yarı-statik sınır koşulları..... 42
Şekil 4.9. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için yarı-statik koşullarda zamana bağlı temas kuvveti grafiği 43
Şekil 4.10. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için yarı-statik koşullarda 400 kN kuvvet seviyesinde batarya hücre duvarına girişim mesafesi(mm) 44
Şekil 4.11. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için yarı-statik koşullarda zamana bağlı y ekseni girişim grafiği 45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge	3.1.	Alüminyum 6061 malzeme parametreleri. (Dassault Systèmes, 2012)	30
Çizelge	3.2.	Köpük Malzemenin Mekanik Özellikleri. (Gülçimen Çakan vd., 2018)	35
Çizelge	4.1.	Senaryo 1 Deformasyon Tablosu	47
Çizelge	4.2.	Senaryo 2 Deformasyon Tablosu	48

1. GİRİŞ

Günümüzde, çevresel sorunların artması ve fosil yakıtların tükenme tehlikesi, sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmış, bu bağlamda elektrikli araçların (EV) geliştirilmesi ve benimsenmesi önemli bir hal almıştır. Elektrikli araçlar, sıfır emisyon salınımı ile çevre dostu bir ulaşım çözümü sunarken, batarya teknolojileri bu araçların verimliliği ve performansı açısından kritik bir rol oynamaktadır. Elektrikli araçların enerji depolama kapasiteleri, batarya sistemlerinin yapısı ve güvenliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, batarya taşıyıcılarının tasarımı ve malzeme seçimleri hem araç güvenliği hem de performansı açısından büyük önem taşımaktadır.

Elektrikli araçların temel enerji kaynağı bataryalardır. Bu bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür sunma yetenekleri ile tasarlanmış çeşitli kimyasal bileşenler içermektedir. Ancak, bu batarya sistemlerinin güvenli bir şekilde taşınabilmesi için uygun taşıyıcı yapılar gereklidir. Batarya taşıyıcıları, yalnızca bataryaların yerinde kalmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çarpışma anında bataryaların fiziksel bütünlüğünü koruyarak olası yangın ve patlama risklerini de azaltmalıdır. Bu noktada, malzeme seçimleri, yapı tasarımı ve mühendislik uygulamaları, batarya taşıyıcılarının güvenlik performansını doğrudan etkilemektedir.

Alüminyum, hafifliği, yüksek dayanıklılığı, korozyona karşı direnci ve şekil verilebilirliği nedeniyle otomotiv sektöründe yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir. Özellikle, alüminyumdan üretilen yapılar, ağırlık tasarrufu sağlarken dayanıklılık sunar. Alüminyum köpük, alüminyumun özel bir işlenmesi ile elde edilen, iç yapısında boşluklar barındıran hafif bir kompozit malzemedir. Bu yapısal özellikler, alüminyum köpüğün enerji emme kapasitesini artırarak çarpışma anında etkili bir darbe dağılımı sağlamasına olanak tanır. Alüminyum köpük, yalnızca hafifliği ile değil, aynı zamanda mekanik özellikleri ile de dikkat çekmektedir. Yüksek spesifik dayanım ve iyi enerji emme özellikleri, alüminyum köpüğü otomotiv uygulamaları için ideal hale getirir.

Araç güvenliğinde çarpışma performansı hem yolcuların korunması hem de aracın yapısal bütünlüğü açısından kritik öneme sahiptir. Elektrikli araçların çarpışma performansı, batarya taşıyıcılarının tasarımına ve kullanılan malzemelere bağlıdır. Çarpışma anında, batarya taşıyıcısının yapısal bütünlüğü, bataryaların zarar görmesini önlerken, aynı zamanda yolcu kabinini de koruyabilir. Alüminyum köpük ilavesinin bu çarpışma performansı üzerindeki etkisi, bu tez çalışmasının temel araştırma alanını oluşturmaktadır.

Bu tez, alüminyum köpük ilavesinin elektrikli araç batarya taşıyıcısının çarpışma performansına etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırma, alüminyum köpüğün mekanik özelliklerini, enerji emme kapasitelerini ve bu özelliklerin çarpışma senaryolarındaki performansını değerlendirecektir. Deneysel çalışmalar ve simülasyonlar aracılığıyla, alüminyum köpük ilavesinin batarya taşıyıcılarının çarpışma güvenliği üzerindeki etkileri analiz edilecektir. Ayrıca, alüminyum köpüğün maliyet etkinliği ve tasarım sürecine entegrasyonunun, gelecekteki elektrikli araç tasarımlarında nasıl bir rol oynayabileceği de tartışılacaktır.

Bu çalışma, elektrikli araçların güvenlik standartlarının yükseltilmesine ve malzeme biliminin otomotiv endüstrisine katkısına önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir. Alüminyum köpüğün batarya taşıyıcıları üzerindeki potansiyel faydalarının anlaşılması, gelecekteki elektrikli araçların daha güvenli ve verimli hale gelmesine olanak tanıyacaktır. Araştırma sonuçlarının, sektördeki yenilikçi malzeme uygulamalarına yön vermesi ve elektrikli araçların güvenliğini artırması beklenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, elektrikli araçların yapısal bileşenleri olan batarya ve batarya taşıyıcıları hakkında mevcut literatürdeki genel bilgiler derlenmiştir. Özellikle, batarya taşıyıcılarının sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemi kullanılarak incelenmesine yönelik yapılan çalışmalar detaylandırılmıştır. Ayrıca, otomotiv sektöründe çarpışma performansını artırmaya yönelik çalışmalara ve bu bağlamda gerçekleştirilen tasarım iyileştirmelerine değinilmiştir. Literatür taraması, batarya taşıyıcılarının güvenliğini ve dayanıklılığını artırmaya yönelik mevcut yaklaşımlar ile gelecekteki araştırmalar için potansiyel yönelimler hakkında bilgi sağlamayı hedeflemektedir.

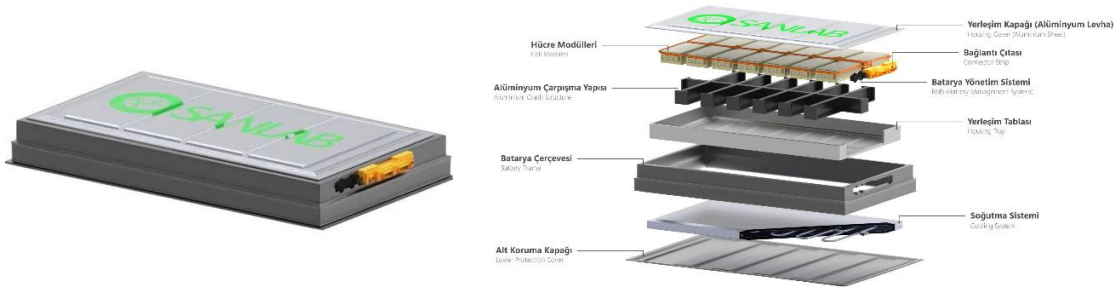
2.1. Elektrikli Araçlarda Batarya ve Batarya Taşıyıcı Yapılar

Elektrikli araçlarda batarya sistemi, aracın elektrikli motorunu besleyen ve çeşitli elektrikli bileşenlere enerji sağlayan temel bir enerji depolama yapılandırmasıdır. Bu sistem, yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum iyon batarya hücreleriyle başlar; her hücre, bir pozitif elektrot (katot), bir negatif elektrot (anot) ve bu iki elektrot arasında bulunan elektrolitten oluşmaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bir araya getirilen batarya hücreleri, modülleri oluşturur ve bu modüller daha sonra elektrikli aracın batarya paketini meydana getirir. Batarya paketi, güvenli bir montajın yanı sıra, aracın ağırlık merkezi ve aerodinamik yapısının optimize edilmesi açısından da önem taşır.

Batarya yönetim sistemi (BMS), bu yapının kalbini oluşturur; BMS, her bir hücrenin voltajını, sıcaklığını ve şarj durumunu sürekli olarak izleyerek bataryanın genel performansını optimize eder. Bu sistem, hücreler arasında denge sağlayarak aşırı şarj ve deşarj durumlarını engeller, böylece bataryanın ömrünü uzatır. Ayrıca, batarya sisteminin verimli çalışmasını sağlamak için soğutma sistemleri kritik bir rol oynamaktadır; bu sistemler, bataryaların optimum sıcaklık aralığında kalmasını sağlayarak aşırı ısınmanın önüne geçer ve performans kayıplarını minimize eder.

Bataryanın depoladığı enerjinin elektrikli motor ve diğer bileşenler için kullanılabilir hale getirilmesi, bir inverter yardımıyla gerçekleştirilir. İnverter, depolanan doğru akım (DC)

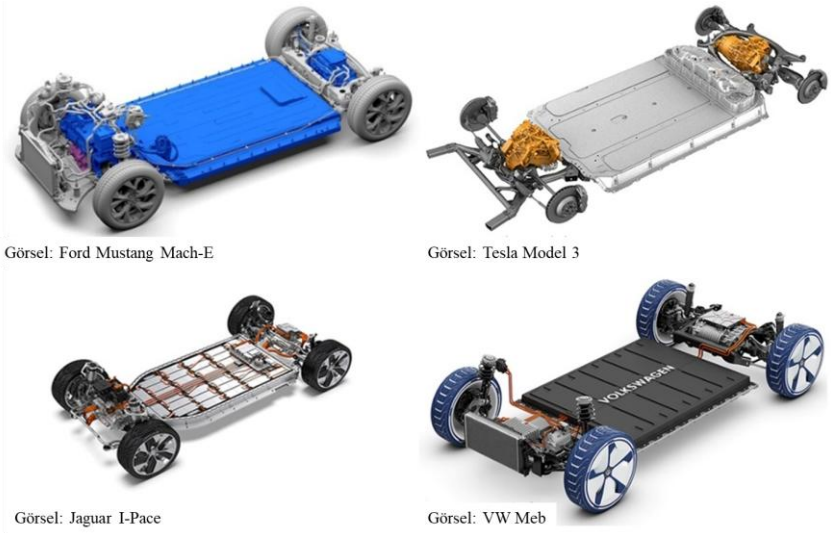
enerjisini alternatif akım (AC) enerjisine dönüştürerek elektrikli motorun çalışmasını sağlar. Batarya sistemi, aracın şasi ve diğer elektrikli bileşenlerle entegrasyonu sayesinde toplam enerji ihtiyacını karşılayarak aracın işlevselliğini artırır.



Şekil 2.1. Batarya Bütünü ve Bileşenleri (SanLab Learning Technologies,2022)

Batarya taşıyıcı yapılar ise, batarya hücrelerinin güvenli bir şekilde yerleştirilmesi, korunması ve enerji yönetiminin sağlanması için kritik öneme sahiptir. Bu yapılar, bataryaların mekanik stres, titreşim ve darbelere karşı korunmasını sağlayarak hem batarya ömrünü uzatmakta hem de araç güvenliğini artırmaktadır.

Şekil 2.2'de görüldüğü üzere araç tasarımına bağlı olarak farklı batarya bütünü tasarımları bulunmaktadır. Genellikle alüminyum, karbon fiber ve kompozit malzemelerden üretilen batarya taşıyıcıları, hafiflikleri ve yüksek dayanıklılıkları ile ön plana çıkmaktadır. Batarya taşıyıcı yapıları, elektrikli araçlarda yalnızca bataryaların montajını değil, aynı zamanda bataryaların soğutma sistemleri ile entegrasyonunu da içermektedir. Bu yapıların tasarımında, hücrelerin termal yönetimi için gerekli havalandırma ve soğutma yolları da göz önünde bulundurulmaktadır. Ayrıca, batarya taşıyıcıları aracın şasi ve süspansiyon sistemleri ile doğrudan bağlantılıdır; bu sayede, taşıyıcının yapısal bütünlüğü aracın genel dayanıklılığına katkıda bulunur. Böylece, batarya taşıyıcı yapıları, elektrikli araçların genel güvenliği, performansı ve verimliliği açısından hayati bir rol oynamaktadır.



Şekil 2.2. Batarya Taşıyıcı Örnekleri (Gehm, 2021)

2.1.1. Batarya Taşıyıcı Tasarım Parametreleri

Elektrikli araçlarda batarya taşıyıcı sistemlerde genel boyutlar, aracın platformu olarak adlandırdığımız platform yapısında paketleme alanı ve batarya enerji kapasitesine göre batarya büyüklüğüne bağlı olarak belirlenir. Burada paket alanını araçtan beklenen performans ve araç boyutu şekillendirir. Elektrikli araçlarda enerji verimliliği ve menzil en önemli gereksinimlerdir. Bu gereksinimleri sağlayabilmek amacıyla araçta en çok dikkat etmemiz gereken nokta ağırlık dengesidir. Halihazırda batarya bütünlüğü ve gelişen teknolojilerle araçlarda ağırlıklar ciddi ölçüde arttığından, malzeme seçimleri ve geometrik optimizasyonlarla araç ağırlığını minimize etmek oldukça önemlidir.

Bu noktada, özellikle batarya gibi ağır ve kompleks bir yapıyı taşıyacak olan batarya taşıyıcı sistemlerin özgül mukavemeti yüksek malzemelerden üretilmesi oldukça önemlidir. Bu bağlamda karşımıza alüminyum, kompozit gibi özgül mukavemeti yüksek malzemeler ön plana çıkmaktadır. Tabii ki taşıyıcı üretiminde maliyet, üretim kolaylığı, montaj kolaylığı ve sürdürülebilirlik gibi unsurlar da öncelikli olarak ele alınmalıdır.

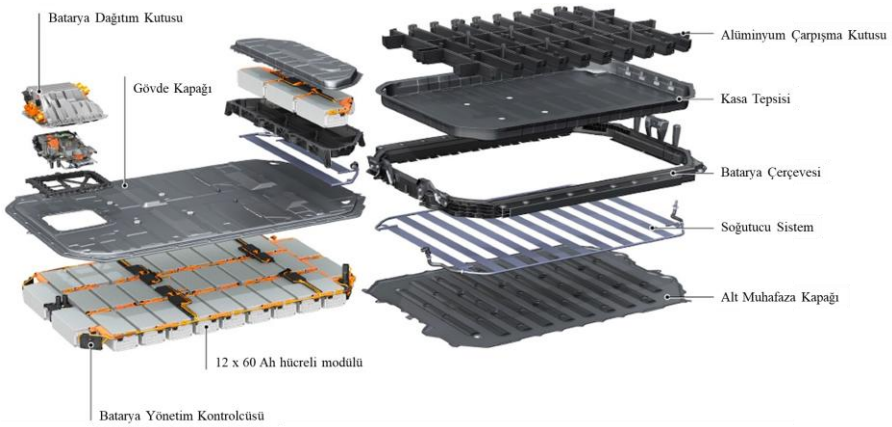
Araç platformuna mekanik bağlantılarla yerleştirilen batarya taşıyıcı sistemlerin temel amacı, batarya performansını maksimum verimlilikte tutmak ve tüm dış yüklemelere karşı koruma sağlamak olduğundan, genel boyutların ardından termal ve mekanik

parametreler de devreye girmektedir. Şekil 2.3 ‘te bir batarya yapısında bulunan yapısal ve termal sistemler görselleştirilmiştir.

Batarya hücreleri, şarj ve deşarj işlemleri sırasında ısınma eğilimindedir. Bu nedenle, batarya taşıyıcılarının tasarımında etkili bir soğutma sistemi entegrasyonu önemlidir. Termal yönetim, bataryaların optimum sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamak için gereklidir. Aktif soğutma sistemleri (sıvı soğutma) veya pasif soğutma yöntemleri (ısı boruları veya ısı yalıtım malzemeleri) kullanılarak, batarya hücrelerinin aşırı ısınması önlenebilir. Tasarım, soğutma kanallarının ve yapıların yerleşimi ile bu süreçleri optimize edecek şekilde düzenlenmelidir.

Araçların sürüş esnasında tüm dış etkilerden kaynaklanan yükleme koşullarında, batarya taşıyıcılar temel etkilenen yapılardan biridir. Özellikle yol yükleri altında, batarya taşıyıcının dinamik mukavemetinin yüksek olması beklenir. Bu bağlamda, yol yükleri altında bağlantı bölgelerinde ve geometrik geçiş bölgelerinde ağırlıklı olarak oluşabilecek stres yoğunluklarına dayanabilmeli ve istenilen kullanım ömrü boyunca herhangi bir yorulma hasarına maruz kalmamalıdır. Yapının dinamik olarak rijitliğinin yeterince yüksek olması, oluşabilecek yol gürültüsünü ve araç içerisindeki tıkırtı, gıcırtı gibi istenmeyen sesleri minimum seviyede tutacaktır. Ayrıca, aracın platformuna bağlı olması, aracın torsiyonel ve eğilme momentlerini destekleyerek araç dinamiğine olumlu katkı sağlayacaktır.

Araçlarda kaza anında, kimyasal yapısı gereği patlama riski oldukça yüksek olan batarya sisteminin çok iyi korunması gerekmektedir. Bu durumda, batarya hücreleri üzerinde oluşabilecek deformasyonlar sonucunda sıkışma nedeniyle patlamalar meydana gelebilir. Bu nedenle, batarya taşıyıcılar çarpışma sırasında yeterince enerji sönümleyerek deformasyonu hücrelere kadar iletmemeli ve ani ivmelerle araç içerisindeki sürücülerde hayati risk oluşturabilecek yüklemelere neden olmamalıdır. Bu noktada, kuvvet deformasyon dengesi yani enerji sönümleme kapasitesi, batarya taşıyıcılarda en kritik parametrelerden biridir.



Şekil 2.3. Batarya taşıyıcı tasarımı (Belingardi vd., 2023)

2.2. Batarya Taşıyıcı Sistemlerde Dayanım Performans İsterleri

Batarya taşıyıcılar, aracın platformuna bağlı olarak batarya gibi ağır bir sistemi taşıdığı için statik ve dinamik olarak çok fazla yükleme maruz kalmaktadır. Bu sebeple batarya ve batarya taşıyıcı bütününün belirli yükleme koşullarını karşılaması gerekmektedir. Yapısal performans geliştirme surecinde öncelikle sistemin temel fonksiyonları belirlenir.

Bir yapının dinamik karakteristiğini belirlemek, yani dinamik yükleme koşulları altında nasıl bir davranış eğilimde olacağını belirlemek için sistem üzerinde öncelikle modal performansın incelenmesi gerekmektedir. Modal analizler sistemin kütle ve sertliğine bağlı olarak yapının dinamik karakteristiğini ortaya koyar. Bu karakteristiği yapının doğal frekansları ile tanımlayabiliriz. Doğal frekanslar sistemin dinamik tepkilerini belirler. Sistemi sistemin doğal frekanslarında tahrik ettiğimiz durumda sistem cevabi sonsuza gitme eğilimde bulunarak göreceli olarak yüksek deformasyonlara ve ivmelere sebep olmaktadır. Sistem ve tahrik frekanslarının çakışma durumu ise rezonanstır.

Hareketin genelleştirilmiş denklemine bakarsak;

$$[M]\left[\ddot{U}\right] + [C]\left[\dot{U}\right] + [k][U] = [F] \tag{2.1}$$

Yapılar için, genellikle sönüm miktarı %10'un altında olduğu için ihmal edilir ve dış yükleme olmadığı kabul edilirse;

$$[M]\left[\ddot{U}\right] + [k][U] = [0] \tag{2.1a}$$

Sistemin doğal frekanslarının, kütle ve rijitlik matrislerine bağlı olduğu gözlemlenmektedir.

Modal analiz sonucunda dikkat edilmesi gereken iki önemli sonuç vardır; özdeğerler ve gerilme enerji yoğunluğu değerleri. Bu değerlerin maksimum olduğu noktalarda optimizasyon yapılması gerekmektedir. Özdeğerin maksimum olduğu noktalarda, kütleyi azaltmak ve rijitliği artırmak gerekir. Böylece;

Doğal frekans değeri artırılır ve sistem daha yüksek frekansta rezonansın etkisinden kaçınır.
Bir diğer sonuç ise gerilme enerji yoğunluğudur. Gerilme enerji yoğunluğunun maksimum olduğu noktalarda, rijitliği artırmak ve bölgeyi güçlendirmek gerekir. Bu şekilde, dinamik analiz öncesinde sistemin karakteristik olan doğal frekans değerlerini artırarak çalışma koşullarını iyileştirebiliriz.

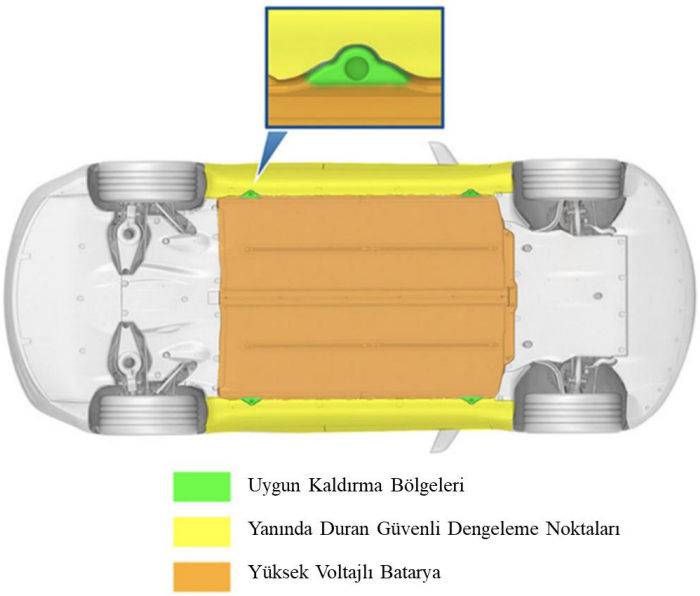
Batarya taşıyıcı sistemin en düşük doğal frekansının, yani ilk doğal modunun, 30 Hz altında olmamasını sağlamamız gerekmektedir. Ek olarak, yapının eğilme ve burulma olarak iki temel modunun da geliştirme aşamasında referans alınması gerekmektedir.

Modal performans bazında yapılacak olan yol yükü performansları ve dinamik yorulma performansları, batarya taşıyıcı yapısında detaylı bir şekilde incelenmelidir. Araç sürüşü sırasında yoldan gelen rastgele yüklerin titreşim streslerinin hesaplanması ve bu yüklemeler altında batarya taşıyıcı paketteki metal parçaların yorulma dayanımının belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.4'te batarya taşıyıcı sistem braketinde dinamik yüklemeler sebebiyle meydana gelmiş hasar görselleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Batarya paketinde metal braketin dinamik yorulma hasarı (Ye vd., 2012)

Aracın yalnızca sürüş sırasında değil, herhangi bir işlem veya montaj sürecinde maruz kalabileceği yüklemeler de detaylı bir şekilde incelenmelidir. Örneğin, araca batarya paketinin montajı sırasında vida bağlantılarının oluşturduğu gerilmeler ile herhangi bir taşıma sırasında kaldırma ekipmanlarından kaynaklanabilecek yükleme koşulları gibi durumlarda oluşabilecek gerilmeler ve deformasyonlar değerlendirilmelidir. Şekil 2.5'te bir elektrikli aracın kaldıraç dayanak noktaları örnek olarak gösterilmiştir. Bu süreçlerde kalıcı deformasyonların meydana gelmemesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2.5. Elektrikli araç önemli kaldıraç destek noktaları (Teslaowners, 2021)

Batarya taşıyıcı paketlerinin çarpışma performansı, özellikle elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri gibi uygulamalarda büyük önem taşır. Bu performans, bataryaların güvenliğini sağlamanın yanı sıra çevre ve kullanıcı güvenliği açısından kritik bir rol oynar. Çarpışma performansı hem homologasyon süreçlerinde hem de Euro NCAP (Avrupa Yeni Araç Değerlendirme Programı) gibi güvenlik değerlendirme programlarında belirli standartlara göre test edilir.

ECE R100, Avrupa'da elektrikli araçlarda kullanılan batarya sistemleri için temel güvenlik yönetmeliğidir. Bu düzenleme, batarya taşıyıcı paketlerinin tasarımında güvenlik, dayanıklılık, yangın güvenliği ve çarpışma performansını belirleyen kuralları içerir. ECE R100, batarya hücrelerinin çarpışmalarda güvenli bir şekilde sabitlenmesini, patlamaların ve yangınların önlenmesini zorunlu kılar. Bu düzenleme, bataryaların taşıyıcıları üzerindeki yerleşimini, dayanıklılığını ve güvenliğini test eden kriterler belirler.

Batarya taşıyıcıları, çarpışmalarda yangın riski oluşturmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Batarya hücrelerinin sıvı sızması veya yüksek sıcaklıkta patlama yapmasının engellenmesi gerekir. Batarya hücreleri, taşıyıcılarından ayrılmamalı ve herhangi bir sızıntı yapmamalıdır. Bu testler, batarya hücrelerinin düzgün bir şekilde sabitlendiğini ve çarpışma sonrasında yerinden oynamadığını doğrular.

UN 38.3 (Birleşmiş Milletler Batarya Test Standartları), bataryaların taşınması ve kullanımı sırasında güvenliklerini sağlamak için kabul edilen testleri içermektedir. Bu testler, batarya taşıyıcılarının çarpışma ve darbe testleri de dahil olmak üzere, bataryaların dayanıklılığına yönelik çok sayıda testten oluşur.

Darbe ve çarpışma testlerinde, batarya hücrelerinin çarpışmalara karşı dayanıklı olması, taşıyıcı sistemin bataryayı düzgün bir şekilde yerinde tutması gereklidir. Bu regülasyon, batarya taşıyıcılarının yüksek hızda yapılan çarpışmalara karşı dayanıklı olup olmadığını değerlendirir. Sıcaklık testleri ve ısı yönetimi, batarya taşıyıcıları, çarpışma sonrası bataryaların aşırı ısınmasını engelleyen termal yönetim sistemlerine sahip olmalıdır.

ISO 12405 (Elektrikli Araç Bataryaları İçin Performans ve Güvenlik Testleri), batarya taşıyıcılarının güvenliğini ve performansını değerlendirmek için kullanılan test standardıdır. Bu testlerde, bataryaların çarpışma ve darbe anında mekanik bütünlüğü, hücrelerin stabilitesi, bataryaların güvenliğini sağlamaya yönelik çeşitli kriterler kontrol edilir.

Çarpışma dayanıklılığında, batarya taşıyıcıları, yüksek hızda yapılan çarpışmalara karşı dayanıklı olmalı, bataryaların yerinden çıkmasını veya hasar görmesini engellemelidir. Bu riskler değerlendirildikten sonra yapısal olarak batarya paketindeki deformasyon, bağlantı noktalarındaki deformasyonlar ve sıkışmalar incelenir.

2.3. Otomotiv Sektöründe Batarya Çarpışma Dayanımına Yönelik Çalışmalar

Batarya sistemlerinde, çarpışma sonrası bataryaların aşırı ısınmasını engelleyecek bir termal yönetim sistemi ek olarak çarpışma sırasında oluşabilecek yangınları engelleyecek dış yüzeyine yangına dayanıklı malzemeler eklemek veya yangın söndürme sistemleri entegre etmek çarpışmalarda kritik hasarların önüne geçecektir.

Fakat çarpışma senaryoları geliştirme sırasında asil amaç batarya kimyasal hücrelerine hiçbir şekilde hasar gelmemesi ve düşük deformasyonların olması gerektiği için özellikle batarya taşıyıcı üzerinde yapısal güçlendirme çalışmaları yapılır.

Batarya taşıyıcıları, yüksek hızda yapılan çarpışmalarda bataryayı koruyacak şekilde güçlendirilmelidir. Bu noktada bataryayı taşıyan paket ve bu paketin braketleri büyük rol oynar. Özellikle taşıyıcı braketleri çarpışma sonrasında yapısal ayrılmalara maruz kalmaması, bağlantı elemanlarında kritik kaymalar, tork kayıpları ve kopmalar olmaması çok önemlidir. Bu noktada braketler üzerinde doğru malzeme secimi yapılması ve mekanik dayanımlar doğrultusunda optimum tasarımın yapılması amaçlanır.

Özellikle elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte çarpışma senaryolarında birçok elektronik devrelerin artması ve batarya gibi kritik yüksek enerjili sistemlerin eklenmesi

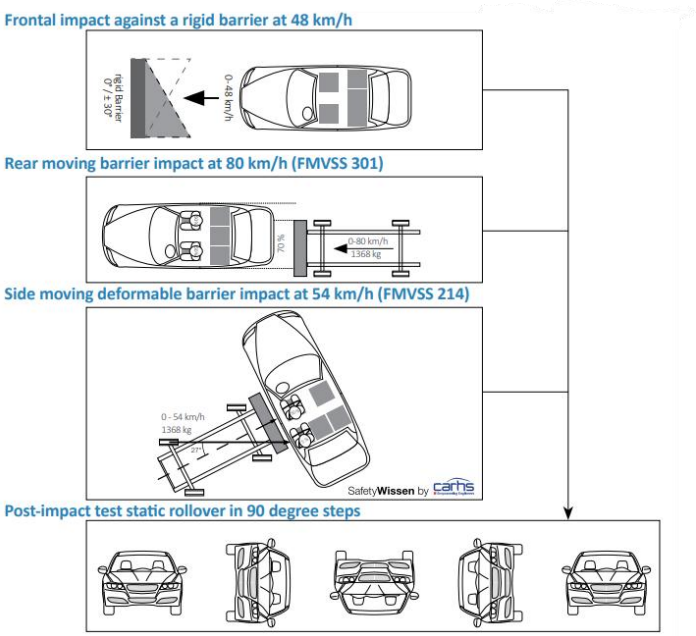
güvenlik önlemlerini de sıkılaştırmıştır. Bu çarpışma senaryolarının batarya açısından önemli olanlarına bakacak olursak:

2.3.1. FMVSS 305 Standardı

4536 kg veya daha düşük GVWR ağırlığa sahip araçlar (otomobil, otobüs, kamyon) ve çalışma voltajı 60 V DC (doğru akım) veya 30 V AC (alternatif akım) üzerinde olan, hızı 40 km/sa'yı aşan araçlar için geçerlidir. Şekil 2.6 'da görüldüğü gibi FMVSS 305 standardında önden, arkadan, yandan ve devrilme senaryosu olarak farklı çarpışma senaryoları görselleştirilmiştir.

Kaza Sonrası Gereklilikler:

- Pillerden maksimum 5 litre elektrolit sızıntısına izin verilir.
- Elektrolitlerin yolcu bölmesine sızması kanıtlanmamalıdır.
- Elektrik enerji depolama/dönüşüm sisteminin tüm bileşenleri araca sabitlenmiş olmalıdır.
- Yolcu bölmesi dışında bulunan hiçbir batarya sistemi bileşeni, yolcu bölmesine girmemelidir.

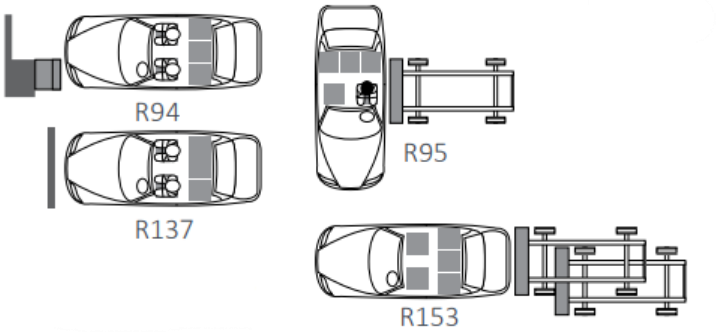


Şekil 2.6. FMVSS 305 çarpışma senaryoları (Safety Companion, 2025)

2.3.2. UNECE Homologasyon Standartları

Elektrikli araçlar için UNR94, UNR95, UNR137 ve UNR153 test yönetmelikleri, özellikle yüksek voltajlı bileşenlerin güvenliğini ve yolcu korumasını sağlamak amacıyla çeşitli değerlendirme kriterleri içermektedir. Çarpışma testlerinde, yüksek voltaj (HV) sistemlerinin güvenliği ön plandadır. Elektriksel izolasyon değerlerinin belirli sınırlar içinde kalması, çarpışma sonrası HV bileşenlerinin voltaj seviyelerinin insan teması açısından güvenli olması ve fiziksel bariyerlerin sağlamlığını koruması gerekmektedir. Örneğin, DC sistemlerinde minimum 100 ohm/V elektriksel izolasyon sağlanmalı, AC sistemlerinde ise voltaj seviyeleri 30 VAC'yi aşmamalıdır. Ayrıca, batarya sistemleri üzerinde yapılan değerlendirmelerde, çarpışma sonrası maksimum 5 litre elektrolit sızıntısına izin verilirken, bu sızıntının yolcu bölmesine ulaşmaması gerekmektedir. Bataryanın termal kaçak riski taşımaması, yangına veya patlamaya yol açmaması kritik öneme sahiptir. Çarpışma sırasında batarya bağlantılarının ve yapısal bileşenlerin deformasyon göstermemesi beklenmektedir.

Yolcu koruma açısından yapılan değerlendirmelerde, mankenler üzerinde kafa yaralanma kriteri (HIC), göğüs sıkışması ve boyun kuvvetleri gibi metrikler ölçülmektedir. Bu ölçümler, yolcu üzerindeki ivme ve kuvvetlerin tolere edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamaya yöneliktir. Kabin yapısal bütünlüğü, çarpışma sonrası yolcu alanında deformasyonu minimum seviyede tutarak güvenli bir alan sağlamalıdır. Özellikle yandan çarpışma testlerinde, batarya sistemlerinin darbeye dayanıklılığı ve aşırı sıcaklık oluşturmaması öncelikli değerlendirme unsurlarıdır. Çarpışma sonrası bataryanın delinmesi veya deforme olması engellenmeli, araç bataryası otomatik olarak devre dışı bırakılarak elektriksel güvenlik sağlanmalıdır. Aynı zamanda araç çekme ve kurtarma operasyonlarında, yüksek voltajlı sistemlerin elektrik kaçağı oluşturmaması ve güvenli bir şekilde izole edilmesi gerekmektedir. Bu kriterler, elektrikli araçların güvenliğini artırarak kazalar sırasında ve sonrasında yolcu ve çevre güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir. Şekil 2.7’de standarda ait önemli senaryolar gösterilmektedir.



Şekil 2.7. UNECE Homologasyon çarpışma senaryoları (Safety Companion, 2025)

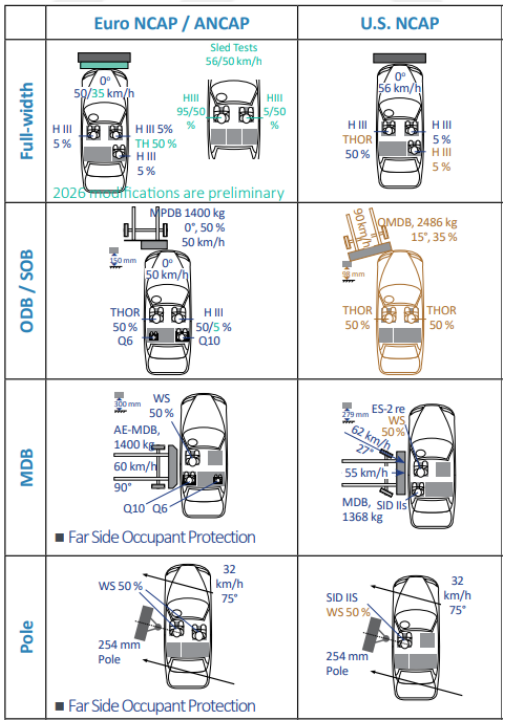
2.3.3. EU NCAP / ANCAP & US NCAP Standartları

Elektrikli araçlar için Avrupa Yeni Araç Değerlendirme Programı (EU NCAP) kapsamında gerçekleştirilen çarpışma testleri hem yolcu güvenliği hem de batarya ve yüksek voltaj sistemlerinin güvenliğini değerlendirmek amacıyla çeşitli kriterler içermektedir. Rijit Duvar Çarpışma Testi, aracın tüm yüzeyiyle sert bir bariyere 50 km/sa hızla çarpmasını içerir ve çarpışma sırasında tüm yolcuların eşit şekilde korunup korunmadığını değerlendirir. Elektrikli araçlarda bu test sırasında bataryanın yapısal bütünlüğünü koruması, elektriksel izolasyonun sağlanması ve herhangi bir elektrolit sızıntısının engellenmesi gereklidir. Ofset Deforme Olabilir Bariyer Testi ise aracın ön kısmının yalnızca bir bölümünün 64 km/sa hızla deforme olabilen bir bariyere çarpmasını içerir. Bu test, aracın yapısal dayanıklılığını ve ön yolcuların korumasını ölçerken, batarya sisteminin çarpışma sonrası yolcu bölmesine girmemesi, elektrik kaçağı oluşmaması ve yüksek voltaj sisteminin otomatik olarak devre dışı kalması gibi gereklilikler içerir.

Hareketli Deforme Olabilir Bariyer Testi, aracın yan tarafına 60 km/sa hızla hareket eden 1.4 ton ağırlığındaki bir bariyerin çarpmasını kapsar. Yan darbe senaryolarını simüle eden bu testte, elektrikli araçlarda bataryanın darbelere dayanıklı olması, termal kaçak riskinin önlenmesi ve yan hava yastıklarının etkili şekilde çalışması beklenir. Yan Direk Çarpışma Testi ise aracın yan kapı kısmının bir direğe 32 km/sa hızla çarptırıldığı ekstrem bir durumu değerlendirir. Bu testte, sınırlı bir alan üzerinde yoğunlaşan darbe enerjisinin batarya sisteminde hasara yol açmaması, bataryanın delinmemesi ve yangın riskinin

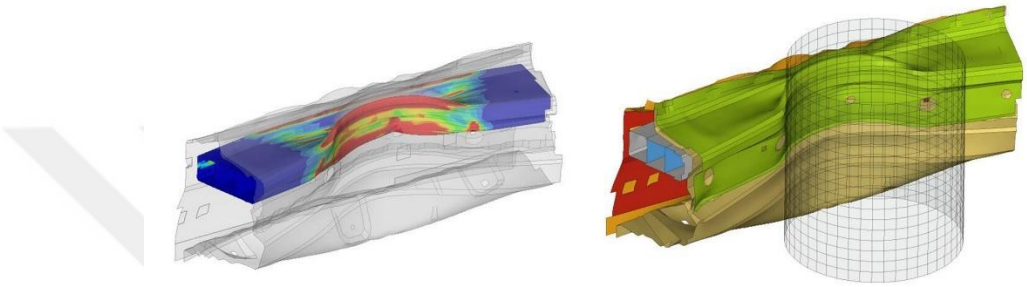
oluşmaması gereklidir. Ayrıca, sürücünün baş ve göğüs bölgesini korumak amacıyla perde hava yastıklarının tam performans göstermesi beklenir. Şekil 2.8'de standarda ait temel senaryolar gösterilmektedir.

Tüm bu testler sırasında elektrikli araçların yüksek voltaj güvenliğinin sağlanması büyük önem taşır. Çarpışma sonrası yüksek voltaj sistemlerinin otomatik olarak devre dışı kalması, elektrik kaçağının önlenmesi ve voltaj seviyelerinin insan teması açısından güvenli sınırlarda tutulması gereklidir. Aynı zamanda, batarya sisteminin deformasyona dayanıklı olması, elektrolit sızıntısı veya termal kaçak gibi risklerin ortaya çıkmaması ve araç yangınına yol açacak herhangi bir durumun engellenmesi önemlidir. Yolcu güvenliği açısından ise emniyet kemerleri, hava yastıkları ve yapısal güçlendirmelerin etkin çalışması ve manken üzerindeki yaralanma kriterlerinin belirlenen sınırlar içinde kalması sağlanmalıdır. Bu gereklilikler, elektrikli araçların çarpışma testlerinde hem yolcu güvenliğini hem de batarya ve yüksek voltaj sistemlerinin güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir.



Şekil 2.8. EU NCAP &US NCAP çarpışma senaryoları (Safety Companion, 2025)

Özellikle yandan çarpışma senaryolarında, önden çarpışma senaryolarına göre batarya çarpışma alanına çok daha yakın olduğu için, yandan çarpma senaryolarında taşıyıcı paketin davranışı çok önemlidir. Bu noktada batarya taşıyıcı paketin kesit deformasyonunun geliştirilmesi olası batarya hasarlarını engelleyecektir. Şekil 2.9'da örnek bir direğe çarpma senaryosunun metal kesit üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 2.9. Batarya taşıyıcı yandan çarpma senaryosu (SSAB, 2025)

2.4. Otomotiv Sektöründe Alüminyum Köpük Kullanımı

Alüminyum köpük malzemeleri, yüksek enerji emme kapasiteleri ve mekanik özellikleri nedeniyle otomotiv sektöründe özellikle darbe sönümleme uygulamalarında büyük avantajlar sunmaktadır. Alüminyum köpükler, şekil 2.10'da görüldüğü gibi alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta gaz ile şişirilmesi yoluyla üretilen, mikro-poroz yapıya sahip hafif malzemelerdir. Bu yapısı sayesinde, alüminyum köpükler %80-90 arasında gözenek içeriğine sahip olabilir, bu da onları oldukça düşük yoğunluklu hale getirir (0.3-0.9 g/cm³ arası). Bu özellik, araçların genel ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini iyileştirirken, performans ve taşıma kapasitesinde de artış sağlar.



Şekil 2.10. Batarya taşıyıcı alüminyum köpük örneği (Gülçimen Çakan vd., 2018)

Alüminyum köpüklerin darbe sönümleme yeteneği, malzemenin iç yapısındaki mikro yapısal özelliklerden kaynaklanır. Alüminyum köpük malzemeler, iç yapısına göre açık hücreli ve kapalı hücreli olarak ikiye ayrılmaktadır. Açık hücreli köpükler, hücre duvarlarının birbirine bağlı olduğu ve boşlukların geçişkenlik sağladığı yapılardır. Bu nedenle, açık hücreli köpükler genellikle hava, sıvı veya ses iletiminin önemli olduğu filtrasyon, ses yalıtımı ve ısı transferi gibi uygulamalarda tercih edilmektedir. Kapalı hücreli köpükler ise, her bir hücrenin tamamen kapalı olduğu ve çevresinin katı duvarlarla çevrelendiği yapılardır. Kapalı hücreli köpükler, düşük yoğunlukları, yüksek enerji emme kapasiteleri ve üstün termal yalıtım özellikleri sayesinde darbe emici sistemler, ambalaj malzemeleri ve hafif yapı elemanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Köpük yapısının içindeki kapalı hücreler, çarpışma anında enerjiyi emerek, aracın yapısal bütünlüğünü korur ve yolcuların güvenliğini artırır. Alüminyum köpük, darbe anında deformasyona uğrayarak enerjiyi absorbe eder. Bu deformasyon, düşük hızda bile önemli enerji emme kapasitesine olanak tanırken, yüksek hızlardaki çarpışmalarda da büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilme yeteneği sağlar. Bu, özellikle çarpma bölmelerinde ve koruyucu yapısal bileşenlerde kullanıldığında, aracın içindeki yolculara etkiyi azaltan kritik bir faktördür.

Köpüklerin darbe sönümleme performansı, genellikle enerji sönümleme kapasitesi ve şok emme değerleriyle değerlendirilir. Alüminyum köpükler, darbe enerjisinin %90'ını emme

kapasitesine sahip olabilir. Özellikle alüminyum köpüğün mikro yapısının, çarpma sırasında oluşan kuvvetleri homojen bir şekilde dağıtarak şok dalgalarının yayılmasını engellemesi, malzemenin etkinliğini artırır. Bu enerji emme mekanizması, özellikle plastik deformasyon ve balistik deformasyon yoluyla gerçekleşir. Alüminyum köpüğün genellikle iskeletsiz yapısı, onun çarpma sırasında daha kontrollü bir şekilde deformasyon yapmasına olanak tanır. Bu da çarpışma anında araçta daha az hasar meydana gelmesine ve yolcuların güvenliğinin daha iyi korunmasına olanak verir.

Alüminyum köpüğün yüksek kompresyon dayanımı, çarpışmalarda sadece enerjiyi emmekle kalmaz, aynı zamanda yüksek düzeyde güvenlik sağlar. Köpükler genellikle 2-20 MPa arasında kompresyon dayanımına sahiptir, bu da onları araç şasileri, çarpışma bölgeleri ve koruyucu paneller için uygun hale getirir. Bununla birlikte, alüminyum köpüklerin elastik modülü (yaklaşık 1000-5000 MPa arası), darbe esnasında malzemenin şekil değiştirme kapasitesini optimize eder ve yolcu kabininde oluşabilecek deformasyonları sınırlandırır.

Alüminyum köpüklerin kullanıldığı diğer teknik alanlardan biri de termal yalıtım özellikleridir. Alüminyum köpükler, düşük termal iletkenlikleri sayesinde, özellikle ısıya duyarlı alanlarda (örneğin motor bölmesi) koruma sağlayabilir. Bu, araçtaki sıcaklık dengelemesini optimize ederken aynı zamanda yangın güvenliği açısından da fayda sağlar.

Araçlarda alüminyum köpüklerin kullanıldığı başlıca yapısal bileşenler arasında çarpışma bölgeleri, koruyucu kalkanlar, kapı panelleri, çerçeveler ve tavan yapıları yer alır. Bu alanlarda alüminyum köpükler, darbe enerjisinin etkisini en aza indirerek, araçların çarpışma performansını önemli ölçüde iyileştirir. Ayrıca, alüminyum köpüğün hafifliği, aracın toplam ağırlığının düşmesine, böylece yakıt tüketiminin ve emisyonların azaltılmasına katkı sağlar. Bu malzeme aynı zamanda, araçların aerodinamik verimliliğini artırırken, yapısal dayanıklılığını da pekiştirir.

Sonuç olarak, alüminyum köpük malzemelerinin araçlardaki kullanımı, güvenlik, performans ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Yüksek enerji emme kapasitesi, düşük ağırlık, termal yalıtım ve mekanik dayanım özellikleri sayesinde, alüminyum köpükler, çarpışma güvenliğini artırmada etkili bir çözüm sunmakta ve otomotiv mühendisliğinde önemli bir malzeme seçeneği haline gelmektedir.

Gülçimen Çakan vd. (2018), yaptıkları çalışmada ISO 13314 Gözenekli ve Hücre Yapılı Metaller için Basma Testi Standardına uygun şekilde alüminyum köpüğün basma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada köpürtme ve çarpışma yönü ayni olacak şekilde 5 adet 30*30*30 mm3 boyutlarında numune ve bu numuneler 20 mm/dk. hızda (yaklaşık olarak 0,011 s-1 deformasyon hızında) basılmıştır.

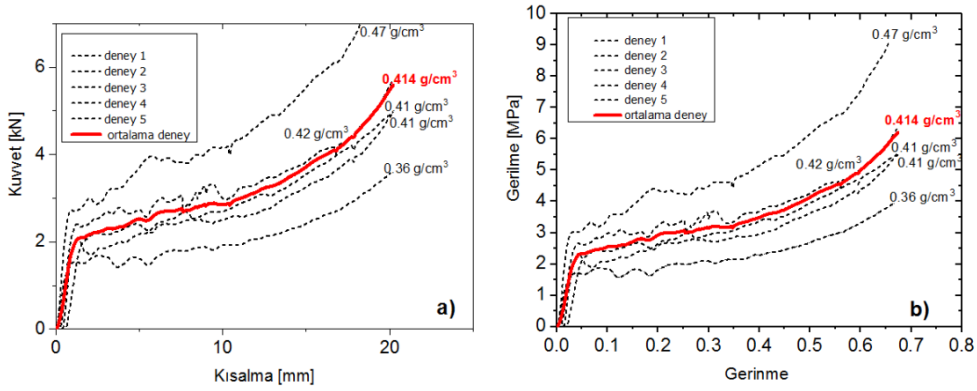
Alüminyum kopuk malzeme modellemesinde Abaqus yazılımı içerisinde bulunan Deshpande-Fleck izotropik plastisite modeli kullanılmıştır. Bu modele akma gerilmesi aşağıdaki analitik formülle ifade edilmektedir:

$$\sigma_y = \sigma_p + y\frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} + a_2 \cdot ln\left(\frac{1}{1-\left(\frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D}\right)^{\beta}}\right) \tag{2.2}$$

Burada; $\hat{\varepsilon}$ esdeger gerilme, $\sigma_p, y, a_2\ ve\ \beta$ malzeme sabitleridir. Yogunlasma noktasi (ε_D) ise, kopuk malzemenin yogunlugunun (ρ_f) aluminyumun yogunluguna (ρ_{f_0}) oranidir.

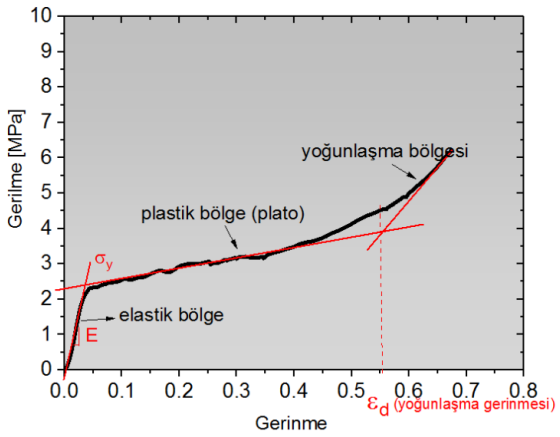
$$\varepsilon_D = -\ ln\frac{\rho_f}{\rho_{f_0}} \tag{2.3}$$

Basma testleri sonucunda, alüminyum köpüğün kuvvet-uzama eğrileri elde edilmiş ve bu değerler gerilme-gerinme değerlerine dönüştürülmüştür. Köpük malzemenin homojen olmayan gözenek yapısından dolayı, numunelerin yoğunlukları değişebilmektedir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi mekanik özellikler yoğunluğa bağlı olarak değişmekte yani yoğunluk arttıkça kuvvet/gerilme değerleri yükselmektedir.



Şekil 2.11. Basma testine ait deneysel a) kuvvet-uzama ve b) gerilme-gerinme eğrileri (Gülçimen Çakan vd., 2018)

Şekil 2.12'de görüldüğü gibi alüminyum köpüğün basma testi sonucunda elde edilen gerilme-gerinme eğrisinde, bu malzemenin tipik üç karakteristik bölgesi belirginleşmiştir. Köpük malzemeler, kullanılan malzeme türü, yoğunluk ve gözenek yapısına (açık veya kapalı hücre yapısı) bağlı olarak farklılık gösterse de bu üç ana bölge genellikle her örnekte benzer bir şekilde gözlemlenmektedir. İlk bölge, köpüğün elastik davranış sergilediği ve hücre duvarlarının elastik olarak uzayıp kısaldığı bölümdür. Elastik bölgenin sona ermesiyle birlikte, plastik deformasyon süreci başlar ve gerilme değeri belirli bir seviyede sabit kalarak uzun bir plato bölgesinde devam eder. Bu aşamadan sonra, köpüğün daha fazla sıkıştırılamadığı bir gerinme noktası (yoğunlaşma gerinmesi) görülür ve bu noktada köpük, hücre duvarlarının malzemesi gibi davranarak, gerilme değeri hızla artmaya başlar.



Şekil 2.12. Alüminyum köpüğün basma etkisi altında gösterdiği farklı deformasyon bölgeleri (Gülçimen Çakan vd., 2018)

2.4.1 Alüminyum Köpük Malzeme Modeli

Alüminyum köpüklerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi, hücresel yapılarından kaynaklanan karmaşıklıklar nedeniyle özel test ve analiz yöntemlerini gerektirir. Bu köpüklerin hücresel yapısı, açık ya da kapalı hücreli olabilmekte ve bu özellikler, köpüğün performansına doğrudan etki etmektedir.

Hücre yapılarının analizi, optik mikroskopi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını tomografisi gibi yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Özellikle optik mikroskopi kullanılarak köpük örnekleri epoksi ile doldurulur ve cilalanarak detaylı hücre görüntüleri elde edilir. Köpüğün mekanik özelliklerini değerlendirmek için tek eksenli basma ve çekme testleri yapılmakta ve bu testlerde elastik modül, mukavemet ile deformasyon davranışları ölçülmektedir. Bu testlerin doğru sonuçlar vermesi için, numune boyutunun hücre boyutuna oranının en az 7 olması gerekmektedir. Bunun yanı sıra, köpüğün uzun vadeli performansını anlamak amacıyla kesme, çok eksenli yükleme, yorulma ve sürünme testleri uygulanmaktadır. İndentasyon ve sertlik testleri ise köpüğün lokal deformasyon ve sertlik özelliklerini incelemeye olanak sağlar. Tüm bu analizler, alüminyum köpüklerin mekanik, termal, elektriksel ve akustik gibi çeşitli özelliklerinin detaylı bir şekilde anlaşılmasını ve mühendislik uygulamaları için gerekli tasarım parametrelerinin belirlenmesini sağlamaktadır.

Alüminyum köpüklerin mekanik özellikleri, yoğunluklarıyla ilişkili olarak değişiklik gösterir. Elastik modül (E), kayma modülü (G) ve poisson oranı (ν), yoğunluğun görece oranı (ρ/ρs) ile ölçeklenir. Elastik modül, yoğunlukla birlikte;

$$E = a_2 E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n \tag{3.9}$$

Burada n, genellikle 2 değerini alır. Kayma modülü ise;

$$G = \frac{3}{8} a_2 G_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^n \tag{3.10}$$

Poisson oranı, yaklaşık olarak sabit bir değer olan ν ≈ 0.3 alır.

Metal köpüklerin çekme modülü, basma modülünden farklıdır ve basma modülü genellikle çekme modülüne göre %10 daha yüksektir. Hücre şeklinin anizotropisi, farklı yönlerdeki modüller arasında %30'a varan farklılıklara yol açabilir.

Açık hücreli köpükler, uzun ve iyi tanımlanmış bir plato gerilmesi sergiler. Bu sırada hücre kenarları eğilme yoluyla deformasyona uğrar. Kapalı hücreli köpüklerde ise davranış daha karmaşık olabilir, çünkü hücre yüzeyleri çekme gerilmelerine maruz kalır. Plato gerilmesi, yapı yoğunlaşma deformasyonu noktasına kadar devam eder. Bu noktadan sonra yapı sıkışır ve gerilme hızlı bir şekilde artar. Plato gerilmesi ve yoğunlaşma deformasyonu şu şekilde ölçeklenir:

$$\sigma_{pl} \approx (0.25 - 0.35)\sigma_{ys}\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right) \tag{3.11}$$

$$\varepsilon_D \approx \left(1 - a_1\frac{\rho}{\rho_s}\right) \tag{3.12}$$

Mevcut metal köpükler için yoğunluk parametresi genellikle 1.5 ile 2.0 arasında, n ≈ 1.6 ve α_1 ≈ 1.5 olarak kabul edilir. Bu özellikler, özellikle enerji soğurma uygulamalarında metal köpüklerin önemli avantajlar sağlamasına olanak tanır. (Ashby Metal Forms Book)

Gülçimen Çakan vd. (2018), yaptıkları çalışmada ISO 13314 Gözenekli ve Hücre Yapılı Metaller için Basma Testi Standardına uygun şekilde alüminyum köpüğün basma testlerinde tüm bu özellikler ele alınarak kapalı hücre alüminyum köpük için malzeme modelini oluşturmuşlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, tez kapsamında kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, açık kod çözücüsü ve çarpışma yüklerinde topoloji optimizasyonu için kullanılan algoritmalar hakkında genel bir bilgi verilmiş ve batarya taşıyıcı darbe sönümleyici kesitin optimizasyonunda kullanılan yöntemden bahsedilmiştir.

3.1. Sonlu Elemanlarda Çarpışma Senaryosu Yaklaşımları

Yüksek deformasyon hızına sahip çarpışma analizleri, araç güvenliği, havacılık ve enerji emme sistemleri gibi kritik mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynar. Bu tür analizler, doğrusal olmayan dinamik davranışların çözümünü gerektirir ve genellikle yüksek hızda gerçekleşen karmaşık fiziksel süreçleri simüle etmek için özel yöntemler ve denklemler kullanılır.

Yüksek deformasyon hızlarında malzeme davranışı ve geometri genellikle doğrusal olmayan özellikler gösterir. Plastik deformasyon, kırılma ve akma gibi malzeme özellikleri, büyük deformasyonlar ve döndürmeler doğrusal olmayan modellerle temsil edilir.
Çarpışma gibi hızlı yükleme durumlarında, yükler zamana bağlı olarak değişir ve bu da ivme ve hız gibi dinamik etkilerin dikkate alınmasını gerektirir. Çarpışma sırasında sistemdeki kinetik enerji, deformasyon enerjisi, ısı enerjisi ve kırılma enerjisine dönüşür. Çarpışma analizlerinde bu enerji dengesinin korunması sağlanır.

Explicit açık zaman ilerleme yöntemi çözücüler, kısa sürede gerçekleşen çarpışma olaylarını analiz etmek için en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde, sistemin ivmesi, hız ve yer değiştirme adım adım güncellenir. Merkezi fark yöntemi kullanılarak denklemler çözülür.

Yapısal analiz problemlerinde matematiksel modelin bilinmeyen değişkenleri düğüm noktalarında ki yer değiştirmelerdir. Sonlu elemanlar yöntemi, bir yapının üzerinde etki

eden kuvvetlerin denge durumunu tanımlayan aşağıdaki matris denge denklemine dayanarak bu düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri hesaplar.

$$[\mathrm{M}]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = P(t) \tag{3.1}$$

Burada:

$[M]$ Kütle Matrisi
$[C]$ Sönümleme Matrisi
$[K]$ Katılık Matrisi
$\{\ddot{u}\}$ İvmelenme Vektörü
$\{\dot{u}\}$ Hız Vektörü
$\{u\}$ Yer değiştirme Vektörü
$P(t)$ Uygulanan Kuvvet

Implicit, kapalı zaman ilerleme yöntemleri, statik ve yarı statik yükleme durumlarında tercih edilir. Bu yöntem, denge durumunu çözmek için Newton-Raphson iterasyonları gibi yaklaşımlar kullanır. Ancak çarpışma gibi yüksek hızlı olaylarda explicit yöntem kadar etkili değildir.

Çarpışma analizlerinde malzeme davranışlarını doğru bir şekilde modellemek için gelişmiş malzeme modelleri ve kırılma kriterleri kullanılır. Elastik-Plastik Modeller, malzemelerin elastik limit sonrası plastik deformasyona geçişini tanımlar. Johnson-Cook Modeli ise yüksek hızlarda deformasyona uğrayan malzemelerin plastik akma davranışını tanımlar. Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modeli ise gözenekli malzemelerde plastik deformasyon ve kırılma davranışını modellemek için kullanılır.

Explicit analizlerde stabilite, zaman adımının doğru seçimiyle sağlanır. Bu, Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşuluna bağlıdır.

$$\Delta t = \frac{L}{c}$$

(3.2)

Burada L, elemanın karakteristik uzunluğu; c, dalga yayılma hızıdır.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(3.3)

E: Elastik modül

ρ: Yoğunluk

Zaman adımı, çarpışma olaylarının hassas bir şekilde modellenmesi için yeterince küçük seçilmelidir.

Explicit çözücüler, yüksek hızda meydana gelen olayları, küçük zaman adımları kullanarak hassas bir şekilde modelleyebilir. Bu yöntem, çarpışma sırasında malzemelerin karmaşık davranışlarını çözümlemek için geliştirilmiş malzeme modelleri ve kırılma kriterlerinin etkili bir şekilde uygulanmasını sağlar.

3.2. Batarya ve Batarya Taşıyıcı Sistemlerde İndirgenmiş Modelleme

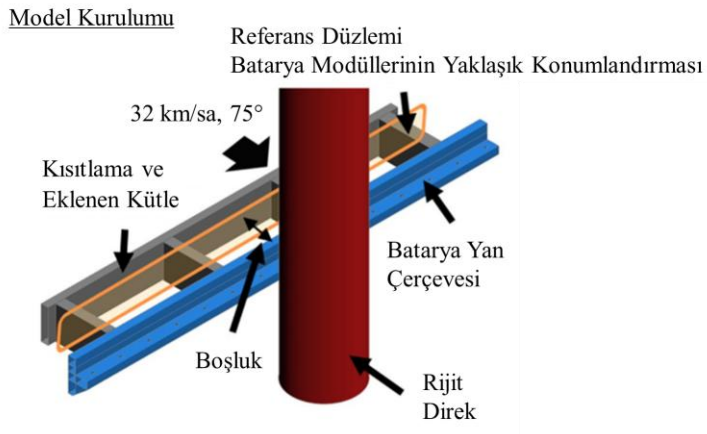
Batarya ve batarya taşıyıcı sistemler, elektrikli araçlarda güvenlik, performans ve dayanıklılık açısından kritik bileşenlerdir. Bu sistemlerin bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımlarıyla modellenmesi, ürün geliştirme sürecinde maliyeti düşürmek ve test süreçlerini hızlandırmak için yaygın bir yöntemdir. Ancak, bataryaların karmaşık yapısı ve taşıyıcı sistemlerle olan etkileşimleri nedeniyle tam ayrıntılı modellerin oluşturulması genellikle yüksek hesaplama kaynaklarına ihtiyaç duyar. Bu sorunu çözmek için indirgenmiş CAE modelleme teknikleri kullanılmaktadır.

İndirgenmiş CAE modelleme, sistemin tüm ayrıntılarını modele dahil etmek yerine, yalnızca kritik bileşenler ve davranışlar üzerine odaklanarak hesaplama yükünü azaltmayı amaçlar. Batarya paketleri için bu yaklaşım, hücresel yapının ayrıntılı bir şekilde modellenmesi yerine, hücrelerin grup seviyesinde veya makro ölçekte temsil edilmesiyle gerçekleştirilir. Örneğin, batarya modülleri veya paketleri, mekanik dayanım ve termal

davranış açısından bir bütün olarak ele alınır. Bu, hücreler arası etkileşimleri ve termal yayılımı simüle etmek için yeterli doğruluğu sağlarken, modelin hesaplama gereksinimlerini önemli ölçüde azaltır.

Batarya taşıyıcı sistemlerde indirgenmiş modelleme, taşıyıcı yapının statik ve dinamik yükler altındaki davranışını analiz etmek için kullanılır. Taşıyıcı sistemin, çarpışma anındaki enerji emilimi ve bataryayı koruma kapasitesi gibi özellikleri, malzeme ve yapısal özellikler üzerine odaklanılarak analiz edilir. Bu amaçla, detaylı bağlantı noktaları veya kaynak yerleri yerine, taşıyıcı sistemin genel sertliği ve dayanıklılığı temsil edilir. Özellikle çarpışma testlerinde, taşıyıcı sistemin deformasyon ve batarya muhafazasını koruma performansı, indirgenmiş modeller aracılığıyla simüle edilir.

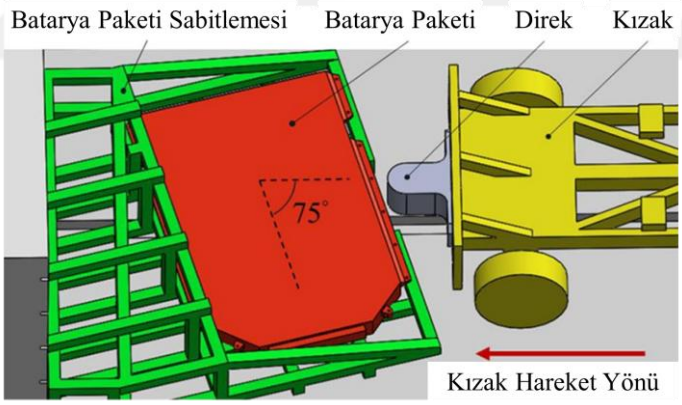
Şekil 3.1'de görüldüğü gibi Krüger vd. (2022), Fonksiyonel Entegrasyon Yaklaşımı Temelinde Araç Gövdesi ile Batarya Muhafazası Arasındaki Yapısal Tekrarları Önleme Çalışmasında 1589 kg bir elektrikli aracın 32 km/sa hızla gerçekleştirilen yan direk çarpma analizini sistem seviyesine indirgeyebilmek için testte, batarya yan çerçevesi, merkezi bir uzunlamasına kiriş ve birkaç çapraz kirişten oluşan bir sabitleme sistemi içine yerleştirmiştir. Bu sabitleme sistemi, bataryanın çarpışma sırasında doğru şekilde desteklenmesini sağlamaktadır. Test sırasında, sabitleme sistemine 200 kg ek kütle eşit olarak dağıtılmıştır. Bu ek kütle, tam araç modeli üzerindeki toplam yapısal deformasyonu simüle etmek için kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Sistem seviyesi yan direk test kurulumu (Krüger vd., 2022)

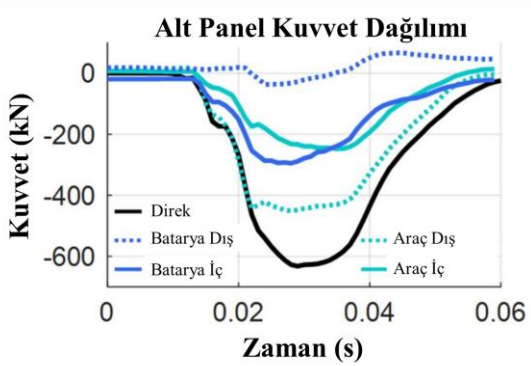
Şekil 3.2'de görüldüğü Chen vd. (2022), Yan Direk Çarpışmasında Elektrikli Araç Bataryasının Geometrik Konfigürasyonlarının Güvenlik Karşılaştırması çalışmasında, elektrikli araç bataryalarının yan direk çarpışması senaryosunu simüle etmek için Cin standardı GB/T 37337-2019 referans alarak bir kızak çarpışma testi düzenlenmiştir. Testte kullanılan kızak sistemi, 1140 kg ağırlığa sahip olup, başlangıç hızı 32 km/sa olarak ayarlanmıştır. Batarya paketi, sabit bir duvara monte edilmiş olup, çarpma sırasında direğin batarya paketi üzerinde maksimum deformasyon oluşturması hedeflenmiştir. Toplam batarya paketi, yaklaşık 400 kg ağırlığındadır. Ancak, aracın toplam kütlesini simüle etmek için modele ek olarak 1200 kg konsantre bir kütle yerleştirilmiştir.

Bu deneysel düzenek hem darbe bölgesindeki deformasyonu hem de darbe sonrası bataryanın genel performansını değerlendirmek için tasarlanmıştır. Ayrıca, Sonlu Elemanlar Modeli kullanılarak yapılan simülasyonlar, deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar vermiştir.



Şekil 3.2. Batarya paketi yan direk kızak testi (Chen vd., 2022)

Bu tez çalışmasında Krüger vd. (2022) referans alınmıştır. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere Krüger çalışmasında bütün araç modeline ait test sonuçlarına bakıldığında 1589 kg ağırlığı temsil eden bir araç ile direk üzerindeki reaksiyon kuvvetinin 600-650 kN arasında olduğu görünmüştür. Bu çalışmada batarya ağırlığı ise 200-300 kg arasında olduğu belirtilmiştir. Tüm araç üzerinde bataryaya gelen reaksiyon kuvveti ise 300-350 kN aralığındadır. Bu sonuçlar bize tüm araç ile batarya seviyesinde yapılan testlerin kuvvet değerlerinin yarı yarıya fark ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.3. Yan direk testinde araç ve batarya üzerinde kuvvet dağılım grafiği (Krüger vd., 2022)

Bu tez çalışmasında, 1950-2000 kg ağırlığındaki bir elektrikli araç ve bu araca ait 480 kg ağırlığındaki batarya sistemi referans alınmıştır. Krüger'in çalışması referans alınarak, batarya seviyesinde uygun çarpışma hızı enerji denklemi ile yeniden belirlenmiştir.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \tag{3.4}$$

Krüger'in çalışmasında tüm araç modeli ve batarya seviyesi modelde elde edilen kuvvetler yarı yarıya düştüğü için elde edilen enerji seviyesinin de yarısı olacak şekilde hesaplama yapılmıştır. Çarpışma standartlarına göre araç seviyesinde 32 km/sa hızla gerçekleştirilen teste karşılık olarak, bataryaya indirgenmiş ayni ağırlıktaki modelde olması gereken hız 22.6 km/sa hesaplanarak güvenlik faktörü ile birlikte 24 km/sa olarak ele alınmıştır:

$$E = \frac{1}{2}(2000\ kg)(32\ km/sa)^2 \tag{3.5}$$

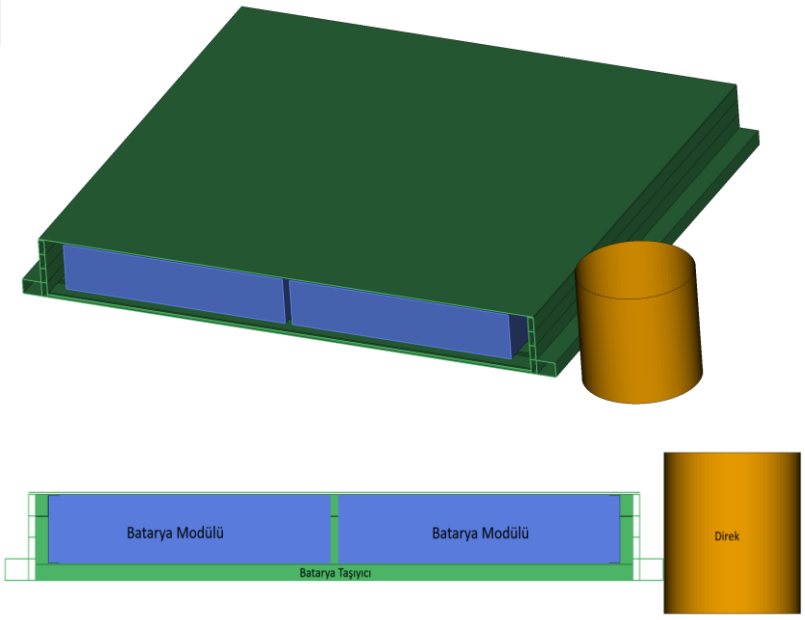
$$\frac{E}{2} = \frac{1}{2}(2000)(x)^2 \tag{3.6}$$

$$\sqrt{\frac{(32km/sa)^2}{2}} = 22.6\ km/sa \tag{3.7}$$

3.2.1. İndirgenmiş Model için Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

İndirgenmiş modelleme sürecinde batarya taşıyıcı ve batarya modülü olarak Abaqus yazılımı Explicit çözücü kullanılarak modellenmiştir. Explicit, zaman integrasyonunu çözmek için merkezi fark yöntemini kullanır. Bu yöntem, her zaman adımında hız ve yer değiştirme gibi miktarları güncelleyerek sistemin dinamik davranışını simüle eder. Merkezi fark yöntemi, küçük zaman adımları gerektirir, bu da yüksek hızla değişen olayları daha doğru bir şekilde modellemeye olanak tanır.

Batarya taşıyıcı yapısı ortalama 5 mm kabuk eleman ile modellenirken, içerisindeki batarya modülü ise dış kabuğu yine 5 mm kabuk eleman ile içerisindeki pil yapısını temsil eden yapı ise bir bütün olarak 10 mm katı elemanlar ile modellenmiştir. Batarya yapısının çarptığı direk modeli ise 10 mm kabuk eleman ile rijit malzeme tanımı ile modellenmiştir. Şekil 3.4'te model detayları görülmektedir.



Şekil 3.4. Yan direk ve batarya bütünü CAE modeli

Batarya taşıyıcı modeli için Alüminyum 6061 malzemesi kullanılmıştır. Malzeme değerleri çizelge 3.1'de görüldüğü gibi Dassault Systèmes, (2012), Abaqus/Explicit ile alüminyum plakaların balistik delme simülasyonu çalışmasından referans alınmıştır.

Çizelge 3.1. Alüminyum 6061 malzeme parametreleri. (Dassault Systèmes, 2012)

Malzeme	A [MPa]	B [MPa]	n	Q_{melt} [K]	$Q_{transition}$ [K]	m	C	$\dot{\varepsilon}_0$ [1/s]
Alüminyum 6061 – T6	324,1	113,8	0,42	925	293,2	1,34	0,002	1,0

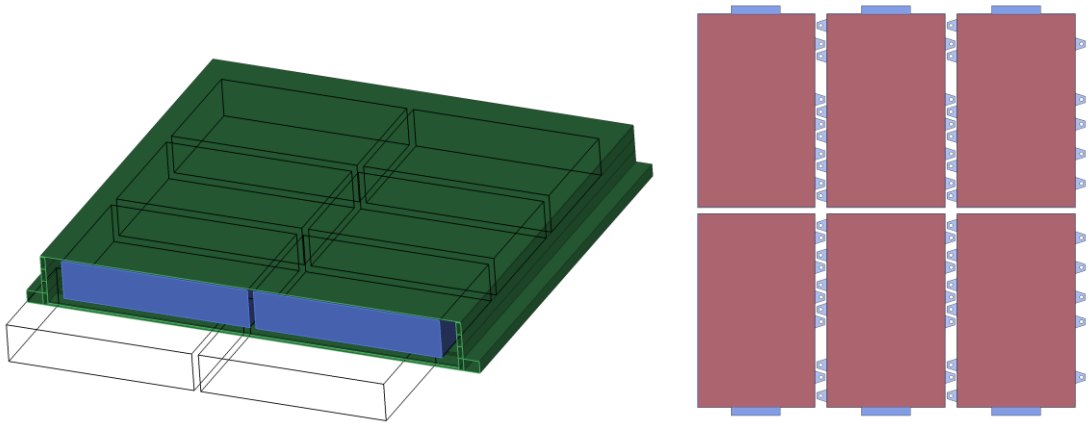
Abaqus/Explicit modelleme sürecinde Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak şekil 3.5'te görüldüğü gibi malzemenin elastik ve plastik değerleri modele tanımlanmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli, genellikle metalik malzemelerin yüksek gerilmelerdeki davranışlarını tanımlamak için kullanılan bir matematiksel modelidir. Bu model, gerilme hızı, sıcaklık ve plastik deformasyonu gibi faktörleri göz önünde bulundurarak malzemenin davranışını açıklar.

Johnson-Cook modeli, malzemenin plastik gerilmesini, gerilme hızını ve sıcaklık değişimlerinin etkilerini içerir. Bu model, metalik malzemelerin yüksek gerilmelerdeki davranışlarını simüle etmek için sıklıkla kullanılır ve ABAQUS gibi sonlu eleman analiz (FEA) yazılımlarında yaygın olarak tercih edilir.

```
*MATERIAL, NAME=Al
*DENSITY
2.7300E-09,0.0
*ELASTIC, TYPE = ISOTROPIC
70000.0   ,0.35      ,0.0
*PLASTIC, HARDENING=JOHNSON COOK
324.1     ,113.8     ,0.42      ,1.34      ,925.0     ,293.2
*RATE DEPENDENT, TYPE=JOHNSON COOK
0.002     , 1.0      , 0.0
```

Şekil 3.5. Abaqus CAE modeli alüminyum 6061 malzeme tanımı

Batarya Modülü, pil seti ve bu seti kaplayan alüminyum kasası ile modellenmiştir. Alüminyum kasası taşıyıcı yapı ile aynı şekilde alüminyum 6061 malzeme modeli ile tanımlanırken içerisindeki katı pil yapısı ile yaklaşık 50 kg pil seti ağırlıklarını temsil edecek şekilde yoğunluk tanımı yapılmış ve yüksek rijitlik değeri ile sistemin genel davranışını destekleyecek şekilde modellenmiştir. Şekil 3.6'da modül yerleşimi ve pil seti ile ilgili detayları görülmektedir.



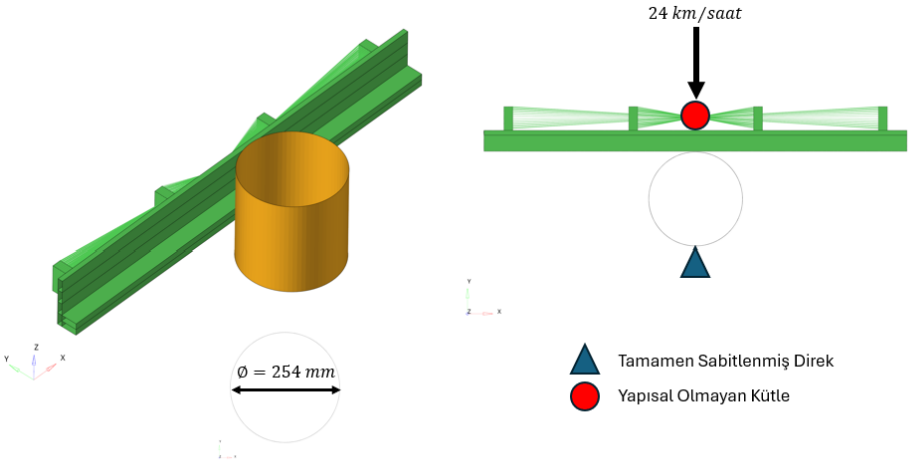
Şekil 3.6. Batarya modülü modeli ve ağ yapısı

Explicit çözüm sırasında kritik zaman adımını 6.0E-7 olarak belirlenmiştir. Bu şekilde çok hızlı deformasyona maruz kalan çarpışma gibi senaryoları daha doğru şekilde simüle etmek amaçlanmıştır.

3.2.2. İndirgenmiş Modellemede Yan Direk Çarpma Sınır Koşullarının Belirlenmesi

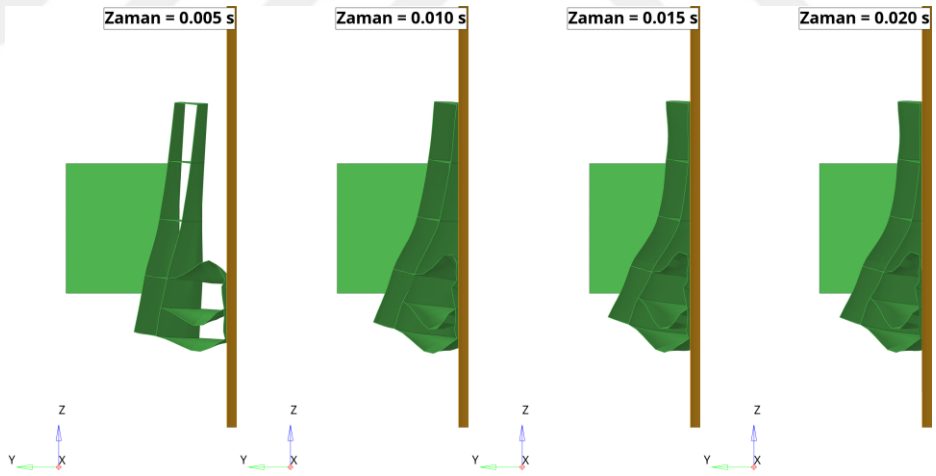
Krüger vd. (2022), Fonksiyonel Entegrasyon Yaklaşımı Temelinde Araç Gövdesi ile Batarya Muhafazası Arasındaki Yapısal Tekrarları Önleme çalışmasından referans alınarak sadeleştirilmiş model üzerinde çalışmalara başlanarak bir baz model oluşturuldu.

Krüger vd. (2022), indirgenmiş modellemede batarya taşıyıcı kesitine odaklanarak kalan tüm kaplama ve hücrelerin asılı kütle olarak modele eklenmiştir. Bu senaryoda asılı kütle eklenmiş batarya kesiti 254 mm çapındaki rijit direğe 24 km/sa hızla çarpılmaktadır. Şekil 3.7'de ilgili model ve sınır şartları belirtilmiştir.



Şekil 3.7. Krüger çalışmalarına göre yan direk çarpışma modeli.

Başlangıç analizlerinin sonuçlarına göre; batarya kesitinin deformasyonunda normal şartlarda batarya bütününde görülemeyecek, kaplama tarafından engellenecek dönme hareketinin gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 3.8'de analiz sırasında farklı zamanlarda dönme hareketi gösterilmiştir.

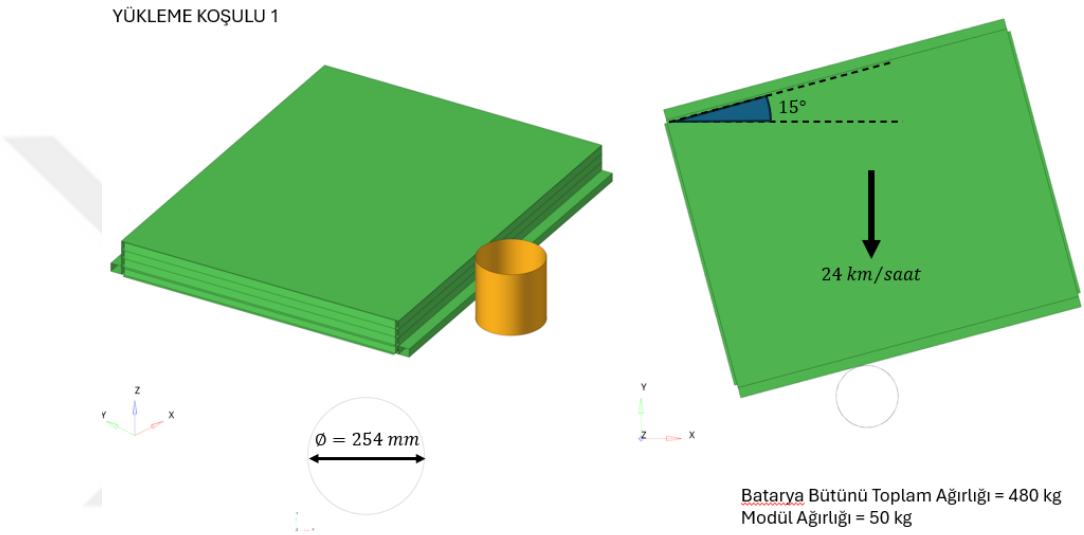


Şekil 3.8. Krüger çalışmalarına göre yan direk çarpışma sonucu

Batarya taşıyıcı kesitine dik şekilde yükleme koşulunda dönme hareketinin olması, normal şartlarda tüm deformasyonun kesit üzerinde Y ekseninde gerçekleşmesi gerekirken, enerjinin bir kısmının dönmeye harcanması anlamına gelmektedir. Tüm araç modelinde yan direk çarpışma senaryosunda, bu şekilde bir dönme hareketi batarya bütününden dolayı çok mümkün olmayacağı için bu senaryonun yapılan çalışmaya

verimli bir çıktı sağlayamayacağı saptanmıştır. Bu sebeple normal şartlara daha da yakın bir senaryo oluşturulmuştur.

Bu tez çalışmasında 254 mm çapındaki rijit direk modeli sabit tutularak, yaklaşık 480 kg ağırlığındaki bataryanın kızak desteğiyle direğe 15 derece açı ile 24 km/sa hızla çarptırılma senaryosu analiz edilmiştir. Şekil 3.9'da ilgili model, sınır şartları ve başlangıç şartları belirtilmiştir.



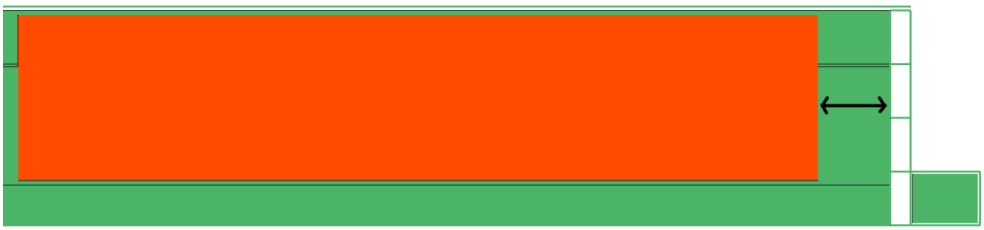
Şekil 3.9. Batarya yan direk çarpışma modeli sınır koşulları

3.3. Yan Direk Çarpışma Analizi Batarya Yapısal Performans Hedefleri

Elektrikli araçlarda çarpışma sonrasında batarya üzerinde kritik deformasyonlarla birlikte batarya hücrelerinde sıkışmalar, yüksek voltaj ile birlikte bataryanın yüksek sıcaklıklara ulaşması ile patlama riski çok yüksektir. Araç bütününde yandan çarpışmalarda ilk temas aracın rocker ve yan direk bölgesi tarafından karşılanırken enerjinin bir kısmı araç gövdesinde sönümlenmektedir.

Kalan enerjinin sönümlenmesi sırasında batarya hücrelerini herhangi bir büyük deformasyondan, sıkışmadan önlemek amacıyla batarya taşıyıcı sistemler karşılar. Bu sebeple batarya taşıyıcıların yan kesitlerinin enerji sönümleme performansı batarya çarpışma güvenliği için son derece önemlidir.

Çarpışma sırasında tüm araç ve batarya taşıyıcı deformasyonu ile birlikte sıkışan yapının batarya hücrelerine hiçbir şekilde temas etmemesi hedeflenir. Her ne kadar test sonrası bu kontroller sıcaklık ve voltaj kontrolleri ile yapılıyor olsa da yapısal olarak hiçbir temasın olmaması patlama riski açısından oldukça önemlidir. Şekil 3.10'da pil seti ve batarya bütünü arasındaki mesafe gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Batarya modülü ve taşıyıcı paket kesiti arasındaki mesafe

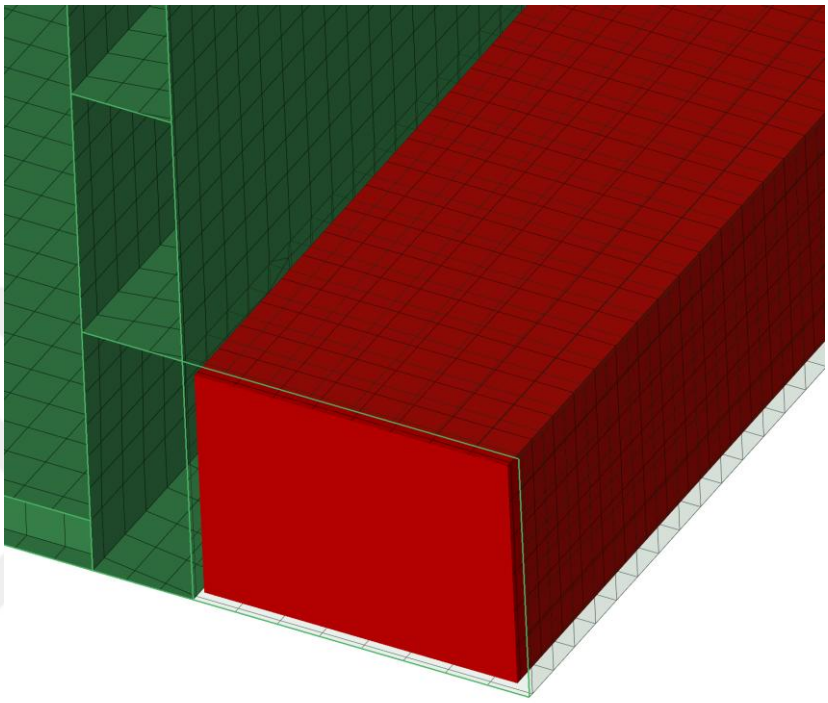
Genellikle fiziksel testler ve simülasyonlar arasında her zaman bir fark olabileceği için güvenlik faktörü gereği olarak yapılan simülasyon sonuçlarında en kötü şartları değerlendirerek, sıkışan yapı ile batarya hücreleri arasındaki mesafenin minimum olması amaçlanır.

3.4. Alüminyum Köpük Modelleme Yöntemi

Alüminyum köpük malzemesi, çarpışma sırasında enerji emilimi ve deformasyon davranışları açısından önemli katkılar sağlar. Bu malzeme, düşük yoğunluk ve yüksek dayanıklılık özellikleri ile öne çıkar. Alüminyum köpük, çarpışma anında darbe enerjisini emerek, aracın yapısal bütünlüğünü korur ve yolcu güvenliğini artırır. Ayrıca, malzemenin hücresel yapısı, çarpışma kuvvetlerinin dağıtılmasını sağlar, böylece çarpışma sırasında oluşabilecek hasarı minimize eder. Çarpışma alanında kullanılan alüminyum köpük, daha hafif ve dayanıklı araç tasarımları için ideal bir çözümdür. Enerji emilimi kapasitesi sayesinde, çarpışma testlerinde yüksek performans gösterir ve güvenlik standartlarını iyileştirir.

Tez çalışmasında alüminyum köpük yapısı şekil 3.11'de görüldüğü gibi taşıyıcı kesit içerisinde katı olarak 5 mm ortalama boyutta modellenmiştir. Özellikle düşük yoğunluklu

malzemelerde deformasyon hızının ve boyutunun yüksek olması sebebiyle ağ yapısının eleman boyutu seçimi oldukça önemlidir. Deformasyonu doğru bir şekilde karşılayabilmesi için yeterince küçük analiz süresini çok arttırmamak verimlilik açısından da optimum boyutta olması önemlidir.



Şekil 3.11. Batarya taşıyıcı kesitinde alüminyum köpük modeli

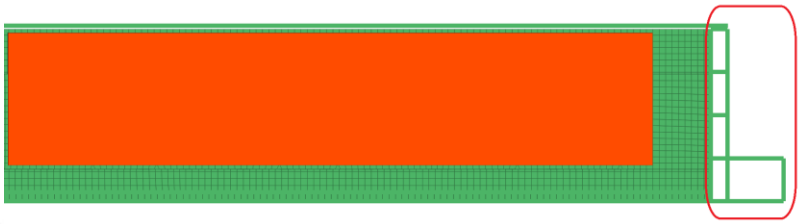
Çizelge 3.2'de görülen bu tez kapsamında da elde edilen alüminyum köpük malzeme modeli kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Köpük Malzemenin Mekanik Özellikleri. (Gülçimen Çakan vd., 2018)

Yoğunluk [g/cm3]	0,414
Elastisite modülü [MPa]	67
Elastik Poisson oranı (v_e)	0.3
Plastik Poisson oranı (v_p)	0
Akma gerilmesi (σ_y) [MPa]	2
Basma akma gerilmesi oranı (k)	1

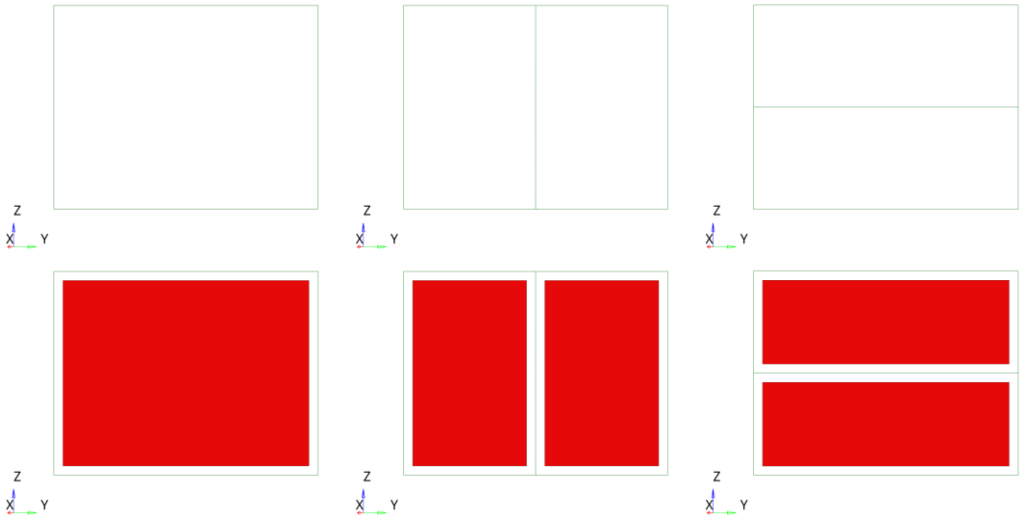
3.5. Yan Direk Çarpışma Analizlerinde Batarya Taşıyıcı Kesit Optimizasyonu için Farklı Yoğunlukta Alüminyum Köpük Kombinasyonları

Yan direk çarpışma senaryolarında tüm araç bazında araç gövdesinde sönümlenen enerjinin yanı sıra, özellikle batarya üzerinde girişimi doğrudan engelleyen en önemli bölgelerden biri şekil 3.12'de işaretlenen bölge olarak batarya taşıyıcı yan kesitidir.



Şekil 3.12. Batarya taşıyıcı yan kesit modeli

Bu kesit üzerindeki enerji sönüm performansı ve total deformasyonla birlikte batarya hücrelerine olan girişim miktarının iyileştirilmesi oldukça önemlidir. Bu bölgede sönümün arttırılması amacı ile farklı optimizasyon yöntemleri geliştirilmektedir. Bunlardan biri de darbe emiciliği anlamında özgül sönüm performansı yüksek olan alüminyum köpük malzemelerdir. Bu tez içerisinde de batarya taşıyıcı kesiti üzerinde farklı oryantasyonlarda alüminyum köpük kullanımı ile yan direk çarpışma performansı incelenmiştir. Tez kapsamında incelenen köpüklü ve köpüksüz kesit yapıları ise şekil 3.13'de görselleştirilmiştir:



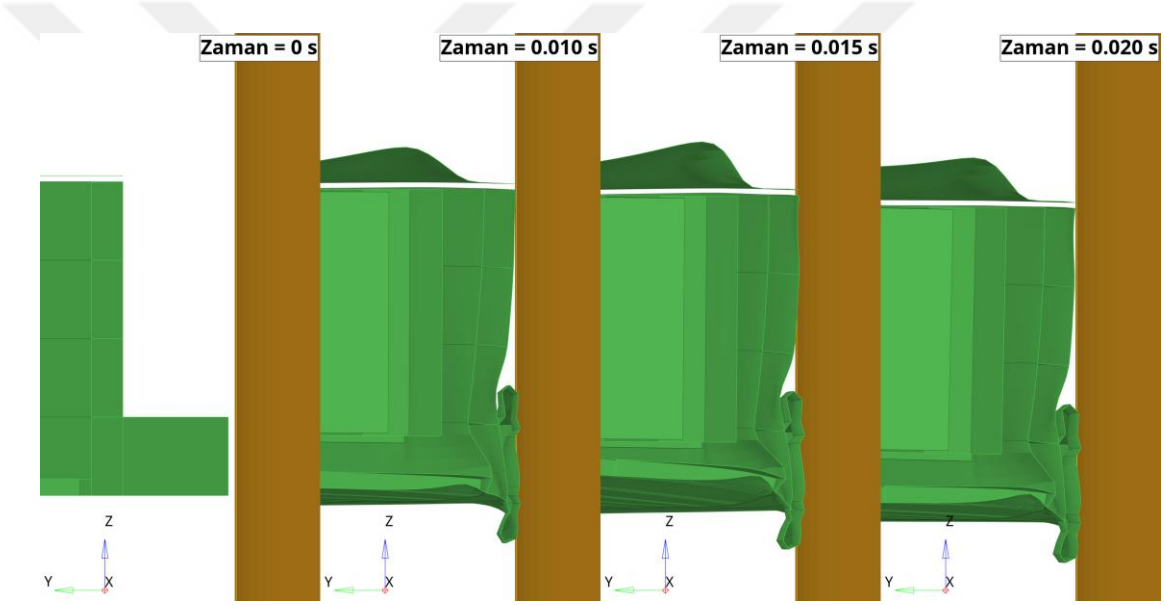
Şekil 3.13. Köpüklü ve köpüksüz kesit tasarımları

4. BULGULAR

Tez çalışmasında yan direk çarpışma analizleri farklı yöntemlerde analiz edilerek, elde edilen sonuçlar farklı bakış açılarına göre değerlendirilmiştir.

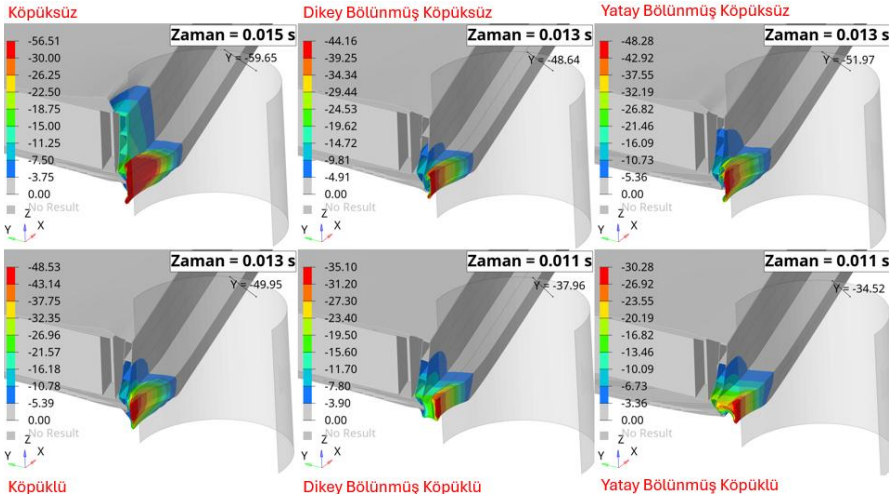
4.1. Yan Direk Çarpışma Analizlerinde Farklı Kesitlerin Çarpışma Performansı Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında baz model olarak alüminyum köpüksüz boş kesit çarpışma deformasyon şekli zamana bağlı olarak aşağıda şekil 4.1'de göründüğü gibidir;



Şekil 4.1. Alüminyum köpüksüz boş kesit çarpışma deformasyon şekli

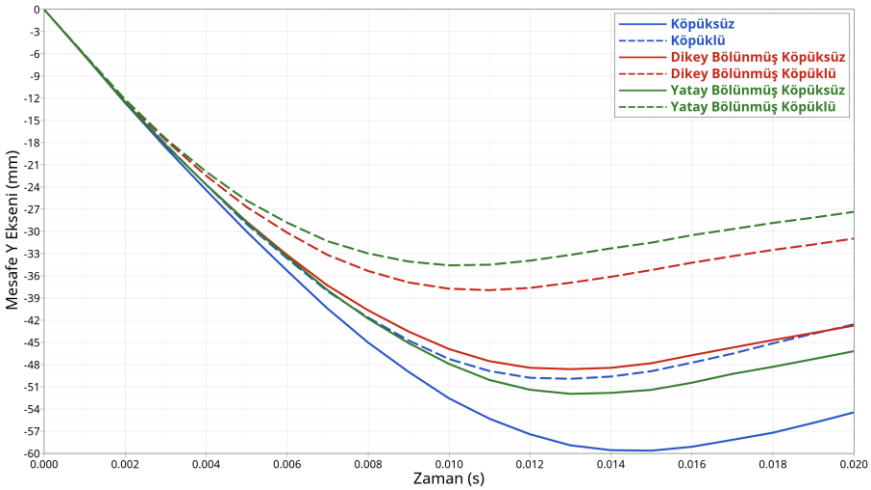
Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kombinasyonlar için batarya üzerinde yan direk maksimum batarya girişimi şekil 4.2'de görselleştirilmiştir;



Şekil 4.2. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için maksimum yan direk girişimi (mm)

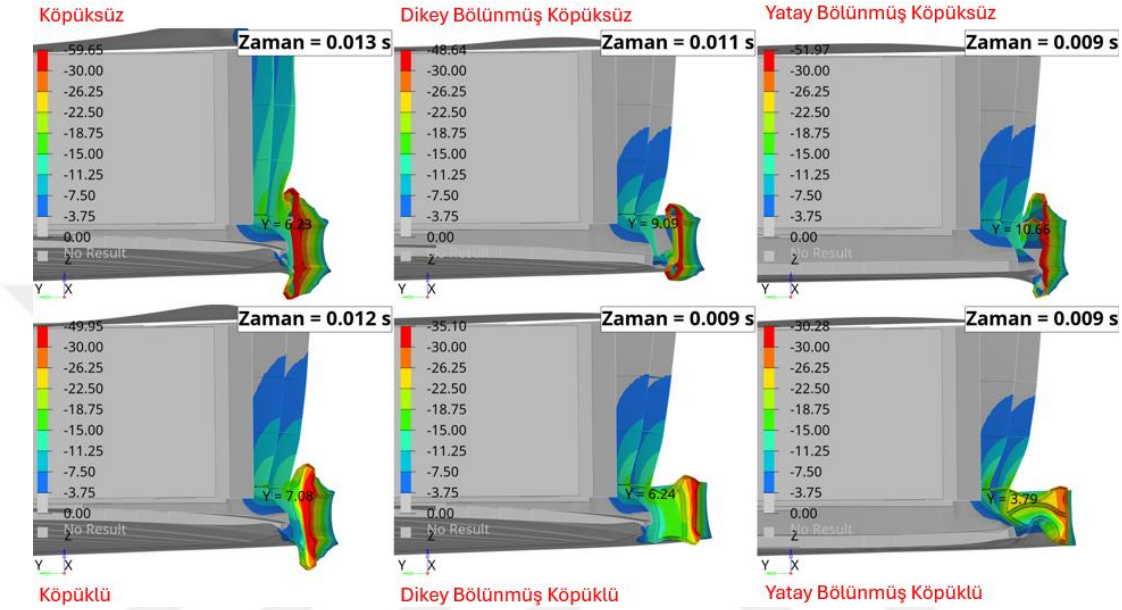
Alüminyum köpük kullanılmayan iterasyonlara göre boş kesitlerde batarya dış girişiminin en az olduğu senaryonun dikey bölünmüş kesit olduğu görülüyor. Boş kesite oranlar %18.5 daha az girişimin olduğu görülmektedir.

Alüminyum köpüğün genel batarya girişimine etkisine bakılacak olursa, şekil 4.3'te görüldüğü gibi en az girişimin dikey bölünmüş köpüklü yapıda olduğu görülmektedir. Boş kesite oranla dikey bölünmüş alüminyum köpüklü yapının girişiminin %36 daha az olduğu görülmektedir.



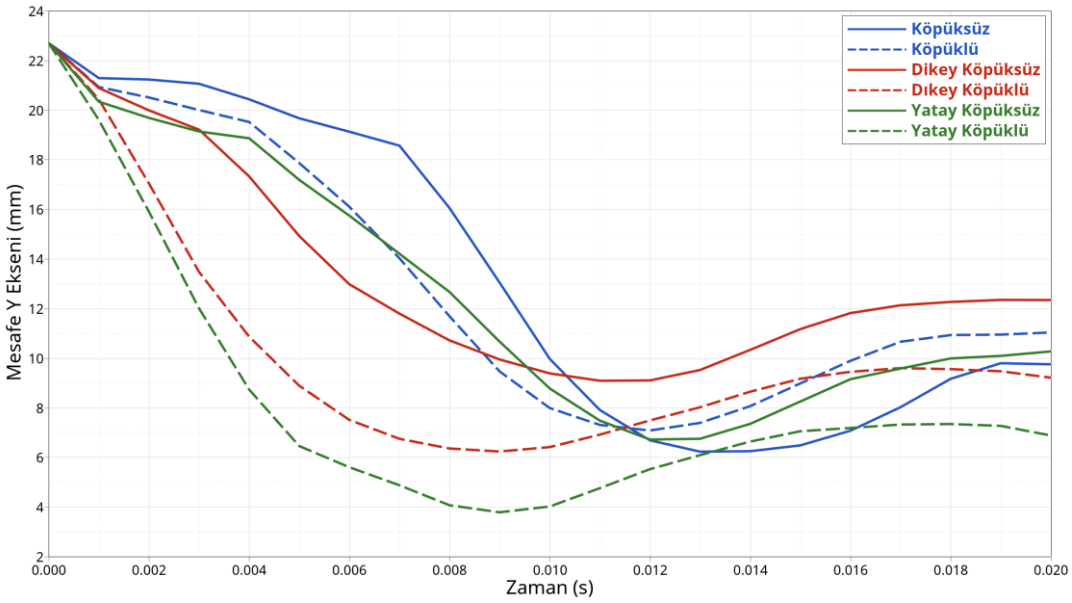
Şekil 4.3. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için zamana bağlı maksimum yan direk girişimi

Batarya girişimine bağlı olarak yan direk çarpışmalarında en önemli olan faktör, batarya deformasyonunda total yığının hücrelere olan mesafesidir. Bu mesafenin maksimum olması amaçlanır. Yukarıda kombinasyonların hücrelere olan mesafesine şekil 4.4'te bakacak olursak;



Şekil 4.4. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için batarya hücre duvarına girişim mesafesi (mm)

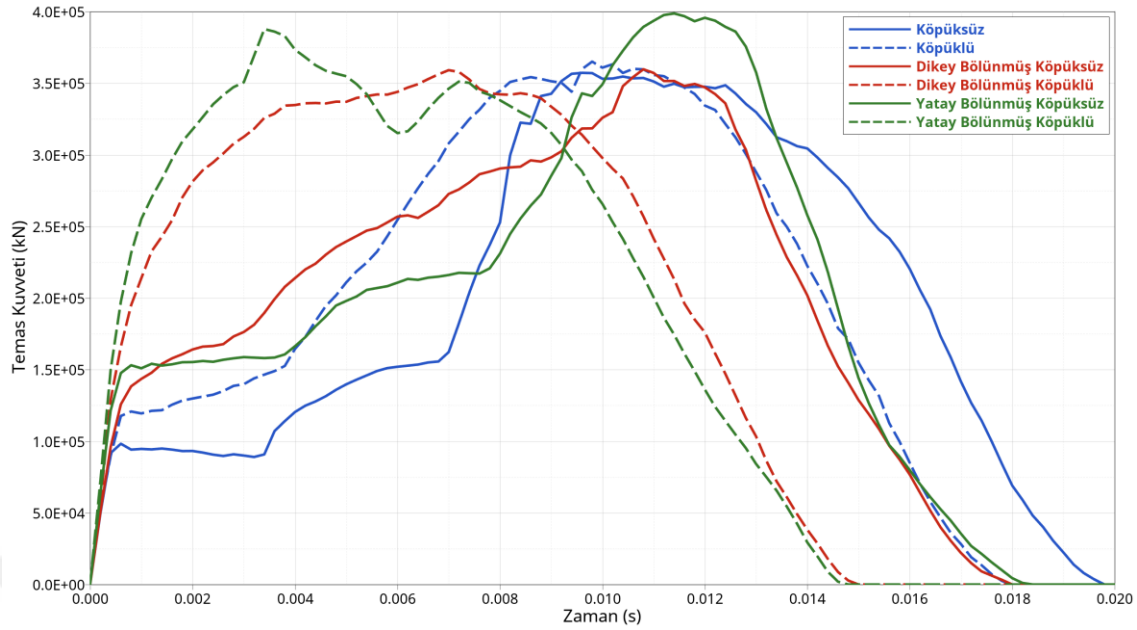
Batarya deformasyon yığınının hücrelere olan mesafesi karşılaştırılacak olursa, en iyi senaryonun yatay bölünmüş köpüksüz kesit olduğu görülmüştür. Hücrelere en fazla yakınlaşan senaryo ise yatay bölünmüş köpüklü kesittir. Alüminyum köpüklü ve köpüksüz yatay bölünmüş kesitlerde %64.5 fark vardır. Şekil 4.5'te köpüklü ve köpüksüz kesit için zamana bağlı batarya hücre duvarına girişim mesafesi grafiği görselleştirilmiştir.



Şekil 4.5. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için zamana bağlı batarya hücre duvarına girişim mesafesi grafiği

Çarpışma analizlerinde verimliliği değerlendirmek için sönümlenen enerjinin oranı önemlidir. Sönümlenen enerjinin verimliliği için direk üzerinden temas kuvvetleri incelenmiştir.

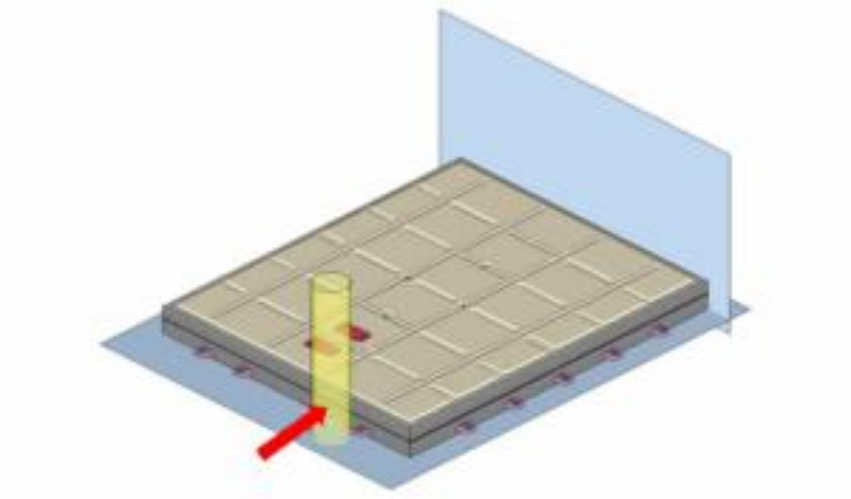
Şekil 4.6'da görüldüğü gibi görüldüğü gibi maksimum temas kuvveti yatay bölünmüş köpüksüz yapıda görülmektedir. Fakat yaklaşık olarak benzer temas kuvvetlerine sahip olan yatay bölünmüş köpüklü modelde ise maksimum temas kuvveti çok daha erken maksimuma ulaşmıştır.



Şekil 4.6. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için zamana bağlı temas kuvveti grafiği

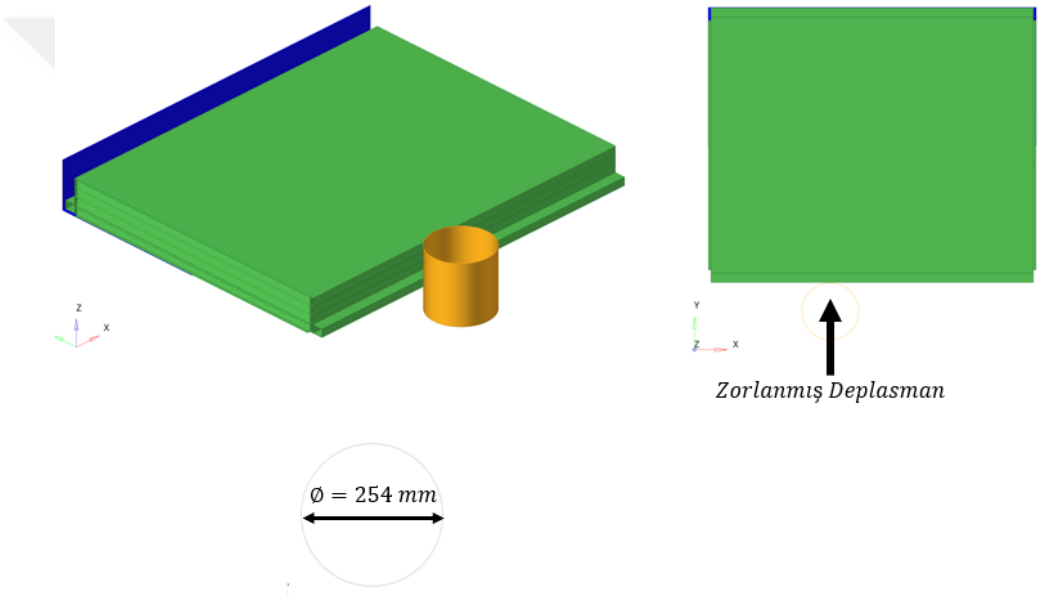
4.2. GBT31467.3 Çin Standardına Göre Kesit Yapılarının Karşılaştırılması

GBT31467.3 ezilme testi, çerçeve tasarımını belirleyen yük durumudur. Testin amacı, yapı ile batarya hücre modülleri arasında temas olmadan 100 kN basınca ulaşmaktır. Test sırasında batarya paketi şekil 4.7'de görüldüğü gibi düz bir zemine, bir duvara karşı yerleştirilir. 150 mm çapında sert bir çubuk kullanılarak en zayıf bölgeye yarı statik bir yük uygulanır.



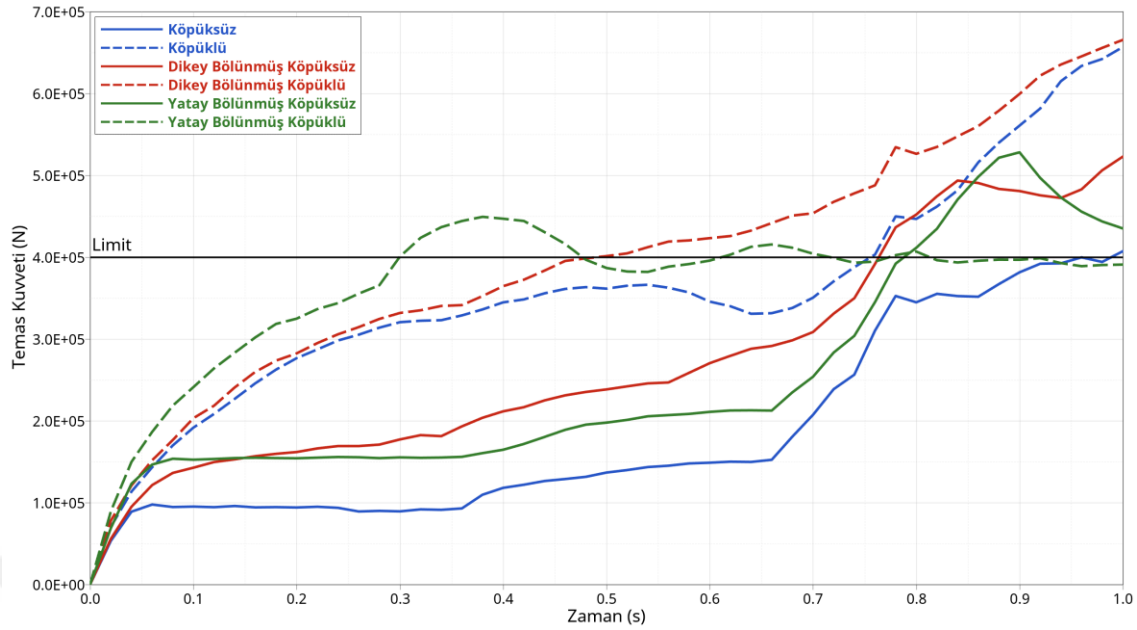
Şekil 4.7. GBT31467.3 ezilme testi senaryosu (Favero, 2019)

Tez çalışmasında GBT31467.3 standardına göre çalışmalar yapıldığında 100 kN kuvvet seviyesinde deformasyon seviyesinin oldukça düşük olduğu incelenmiştir. Bu sebeple daha önceki yapılan yan direk çarpışma senaryolarına göre kuvvetlerin 350-400 kN aralığında oldukları görülmüştür. Ezilme senaryosunda metot olarak GBT31467.3 standardı referans alınarak yan direk çarpışma senaryosunda kullanılan 254 mm çapındaki direk yapısı ile 400 kN'a ulaştığı senaryo yarı-statik koşullarda zorlanmış deplasman ile şekil 4.8'de görülen sınır koşullarında analiz edilmiştir.



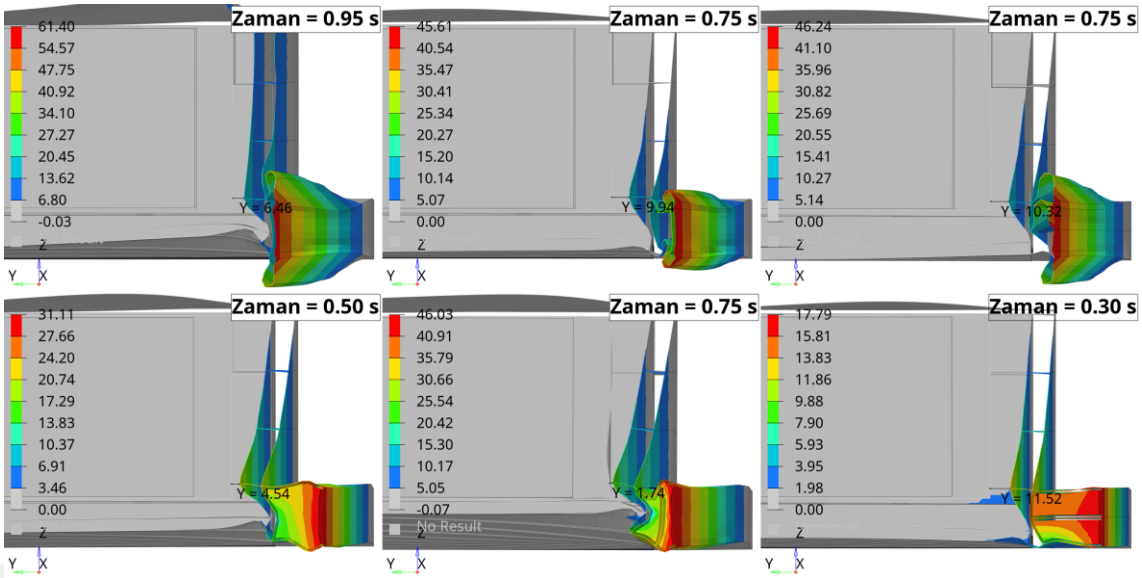
Şekil 4.8. GBT31467.3 referans alınarak oluşturulmuş yarı-statik sınır koşulları

Bu analizlerin sonucunda 400 kN referansında elde edilen temas kuvveti sonuçları şekil 4.9'de görüldüğü gibidir.



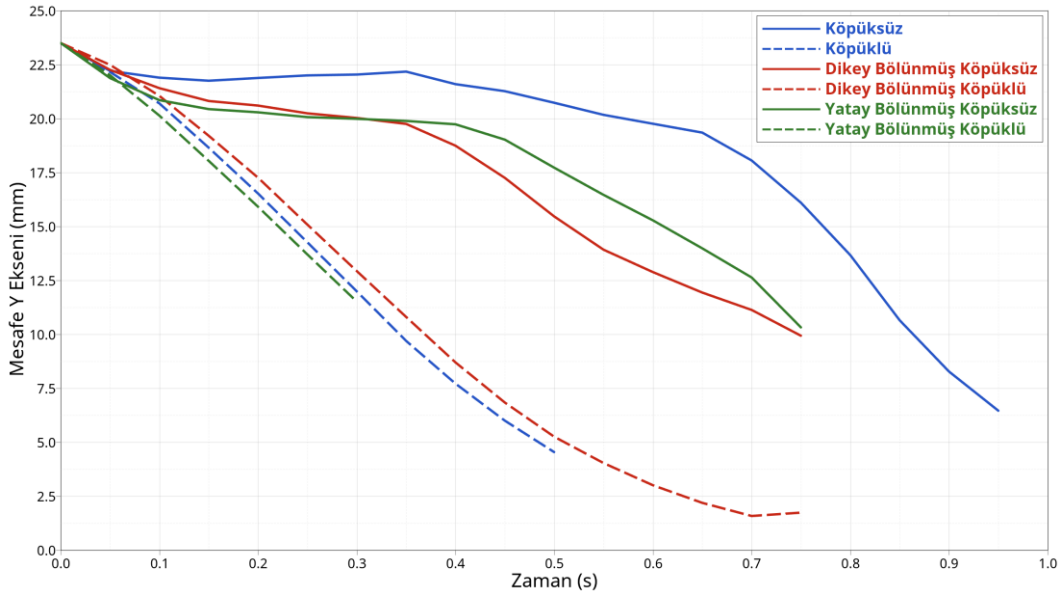
Şekil 4.9. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için yarı-statik koşullarda zamana bağlı temas kuvveti grafiği

GBT31467.3 standardına göre temas kuvveti 400 kN'a ulaştığında oluşan deformasyon sonuçlarını şekil 4.10'da görüldüğü gibidir. Deformasyon sonuçlarına bakıldığında köpüksüz iterasyonlarda boş ve ayrılmış kesit yapılarında deformasyonun büyük bir kısmı kesit üzerinde gerçekleştiği ve enerji sönümlendiği için bu batarya hücrelerine olan mesafeler de kabul edilebilir seviyelerdedir. Köpüklü ve köpüklü yatay kesit sonuçlarına bakıldığında ise köpük ve kesit yapısının deformasyon hızına bağlı olarak olarak, çok hızlı bir şekilde duvarlaşarak, bir yığın halinde batarya hücrelerine yaklaştığı görülmektedir. Kesit hacminde deformasyonun yeterince enerji sönümleyememesi sebebiyle kalan enerji batarya güçlerine kritik seviyede yaklaşmaya sebep olmaktadır.



Şekil 4.10. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için yarı-statik koşullarda 400 kN kuvvet seviyesinde batarya hücre duvarına girişim mesafesi (mm)

Dikey kesit köpüklü iterasyonda ise 400 kN temas kuvvetine ulaşıldığı anda deformasyonun çok küçük bir kısmının gerçekleştiğini ve batarya hücresine mesafenin en fazla olduğu senaryo olduğu görülmektedir. Fakat kesti oryantasyonunun direk yapısına dik bir şekilde ve alüminyum köpük ile rijitleştirilmiş olması sebebi ile oldukça rijit davranarak çok hızlı bir şekilde 400 kN'a ulaştığı görülmüştür. Bu da deformasyon her ne kadar 400 kN temas kuvvetinde küçük gibi görünse de ezilmenin tamamlandığı senaryoda deformasyon ve yığılma hızına bağlı olarak batarya hücrelerine yaklaşma riskinin çok yüksek olduğunu göstermektedir. Şekil 4.11'de dikey kesit köpüklü senaryonun deformasyon hızının diğer iterasyonlara oranla daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. Farklı alüminyum köpüklü ve köpüksüz kesit için yarı-statik koşullarda zamana bağlı y ekseni girişim grafiği

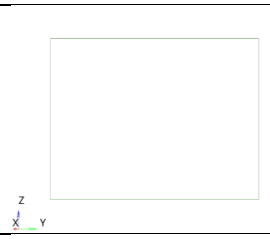
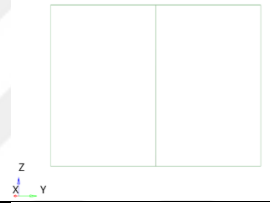
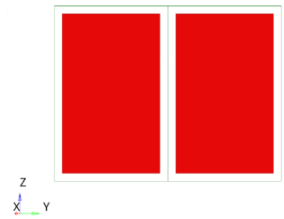
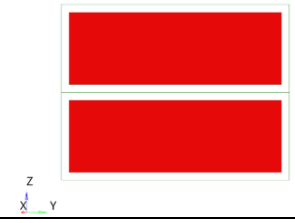
5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Batarya taşıyıcılar için en kritik yükleme durumu yandan çarpma senaryosudur. Bu tür durumlarda temel hedef, çarpışma nedeniyle oluşan deformasyonların bataryanın modüllerine temas etmesini önlemektir. Bu kapsamda, batarya taşıyıcıların yandan çarpma performansını değerlendirmek amacıyla alt sistem seviyesinde detaylı analiz ve raporlama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

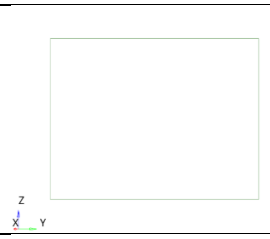
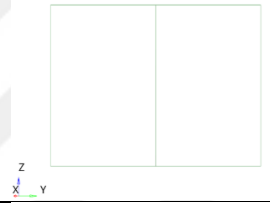
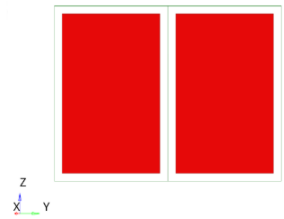
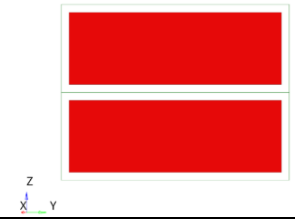
Çalışma, iki farklı yükleme senaryosu oluşturularak yürütülmüştür. Her bir senaryo, belirli tasarım kesitlerinin performansını maksimum yer değiştirme, sönümledikleri enerji miktarı ve modüle maksimum yaklaşım gibi kriterler açısından incelemeyi hedeflemiştir.

Amaç, mevcut tasarımın performansını alüminyum kopuk kullanımı ile iyileştirmektir; bu nedenle yapılan değerlendirmeler bir kutu kesit, dikey ve yatay bölünmüş kesitler üzerinden gerçekleştirilerek, bu çalışmalar. Elde edilen sonuçlar ve analiz detayları çizelgelerde sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Senaryo 1 Deformasyon Tablosu.

Tasarımlar	Kesit Görseli	Maksimum Deformasyon (mm)	Modül ile Batarya Arasında Maksimum Yaklaşım (mm)
1.Köpüksüz		59.65	6.23
2.Köpüklü		49.95	7.08
3.Dikey Bölünmüş Köpüksüz		48.64	9.09
4.Dikey Bölünmüş Köpüklü		37.96	6.24
5.Yatay Bölünmüş Köpüksüz		51.97	10.66
6.Yatay Bölünmüş Köpüklü		34.52	3.79

Çizelge 4.2. Senaryo 2 Deformasyon Tablosu.

Tasarımlar	Kesit Görseli	Maksimum Deformasyon (mm)	Modül ile Batarya Arasında Maksimum Yaklaşım (mm)
1.Köpüksüz		61.40	6.46
2.Köpüklü		31.11	4.54
3.Dikey Bölünmüş Köpüksüz		45.61	9.94
4.Dikey Bölünmüş Köpüklü		46.73	1.74
5.Yatay Bölünmüş Köpüksüz		46.24	10.32
6.Yatay Bölünmüş Köpüklü		17.79	11.52

Çizelge 4.1 incelendiğinde senaryo 1 kapsamında yapılan değerlendirmelerde, tasarımlar arasındaki en önemli kriter modül ile batarya arasındaki mesafenin korunması olmuştur. Yatay bölünmüş köpüksüz tasarım, 10.66 mm ile en yüksek güvenlik marjını sağlayarak bu açıdan en başarılı sonucu vermiştir. Bu tasarım, maksimum deformasyonun 51.97 mm olduğu göz önüne alındığında, deformasyon-mesafe dengesini koruyarak hem yapısal dayanım hem de modüle minimum girişim açısından optimal bir çözüm sunmaktadır. Diğer yandan, yatay bölünmüş köpüklü tasarım deformasyonu önemli ölçüde azaltmış (34.52 mm), ancak 3.79 mm'lik kritik mesafe ile modüle en fazla yaklaşımı sergileyerek güvenlik açısından risk yaratmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, senaryo 1 için en iyi performansın, modüle en az girişim sağlayan yatay bölünmüş köpüksüz tasarımla elde edildiği değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.2 incelendiğinde senaryo 2'de yapılan analizlerde, tasarımların modül ile batarya arasındaki mesafeye etkisi en kritik değerlendirme kriteri olmuştur. Yatay bölünmüş köpüklü tasarım, 11.52 mm ile en yüksek güvenlik mesafesini sağlayarak bu açıdan en başarılı sonucu vermiştir. Ayrıca, maksimum deformasyonun 17.79 mm ile en düşük seviyede olması, bu tasarımın hem yapısal dayanım hem de güvenlik açısından optimal bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Diğer yandan, dikey bölünmüş köpüklü tasarım 1.74 mm'lik mesafesi ile modüle çok yakın bir yaklaşım sergileyerek güvenlik riski yaratmıştır. Bu doğrultuda, senaryo 2 için modüle en az girişim sağlayan ve deformasyonu en aza indiren yatay bölünmüş köpüklü tasarımın en iyi seçenek olduğu belirlenmiştir.

Senaryo 1 ve Senaryo 2 analizlerinde farklı yükleme koşulları ve temas senaryoları değerlendirilmiştir. Senaryo 1'de, başlangıçta modele belirli bir hız verilmiş ve çarpışma sabit hız ile gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda direk, bataryaya 15 derece eğimli bir açıyla temas etmektedir. Senaryo 2'de ise direk dik bir temas ile modele zorlanmış deplasman uygulanmış, analiz batarya sabit tutulurken direğe gelen reaksiyon kuvveti 400 kN'a ulaşana kadar sürdürülmüştür. Bu farklılıklar doğrultusunda, deformasyon davranışları ve modül-batarya arasındaki mesafe gibi kriterler incelendiğinde, Senaryo 1'in daha gerçekçi çarpışma koşullarını temsil ettiği ve sonuçların bu senaryo üzerinden değerlendirilmesinin daha mantıklı olduğu görülmüştür. Tüm araç modeli ve analiz

sonuçları dikkate alındığında, Senaryo 1'de modüle en az girişim sağlayan yatay bölünmüş köpüksüz tasarımın, deformasyon-mesafe dengesi açısından en uygun çözüm olduğu tespit edilmiştir.

Senaryo 1 tablosu incelendiğinde, köpük kullanımı hem avantajlar hem de dezavantajlar sunmaktadır. Köpük eklenmesi, maksimum deformasyonun önemli ölçüde azalmasını sağlamış ve özellikle yatay bölünmüş köpüklü tasarımda deformasyon en düşük seviyeye (34.52 mm) inmiştir. Bu, yapısal dayanım ve enerji sönümleme kapasitesi açısından köpük kullanımının avantajını göstermektedir. Ancak, köpük kullanımı modül ile batarya arasındaki mesafeyi kritik seviyelere düşürebilmektedir. Özellikle yatay bölünmüş köpüklü tasarımda mesafenin 3.79 mm'ye kadar inmesi, batarya güvenliği açısından ciddi bir dezavantaj yaratmıştır. Bu durum, köpük kullanımının deformasyonu azaltmasına rağmen, tasarımda modül-batarya mesafesi gibi kritik parametrelerin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Belingardi, G., & Scattina, A. (2023). Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles-challenges and solutions. Verides, 5(2), 498-514. https://www.mdpi.com/2624-8921/5/2/28

Krüger, C., Spohr, S., Merdivan, D., & urban, P. (2022). Avoiding structural redundancies between the vehicle body and the battery housing based on a functional integration approach. Automotive and Engine Technology, 7:197-208, https://doi.org/10.1007/s41104-022-00106-8

Chen, P., Xia, Y., and Zhou, Q., (2022). Safety Comparison of Geometric Configurations of Electric Vehicle Battery under Side Pole Impact, SAE Technical Paper 2022-01-0265, doi:10.4271/2022-01-0265

Weider, K., Marschner, A., & Schumacher, A. (2017). A systematic study on topology optimization of crash loaded structures using LS-TaSC™. Presented at the 11th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria. University of Wuppertal, Faculty for Mechanical Engineering and Safety Engineering, Chair for Optimization of Mechanical Structures.

Setiawan, R., & Salim, M. R. (2017). Crashworthiness Design for an Electric City Car against Side Pole Impact. Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 49, No. 5, 2017, 587-603, DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.5.3

Gülçimen Çakan, B., Ensarioğlu, C., & Çakır, M. C. (2019). Farklı oranlarda alüminyum köpük takviyeli çarpışma-kutularının mekanik performanslarının karşılaştırılması. J. BAUN Inst. Sci. Technol., 21(1), 295-305, DOI: 10.25092/baunfbed.547179

EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (Euro NCAP). (2015). Oblique Pole Side Impact Testing Protocol (Version 7.0.2).

Tesla Owners UK. (2021 October 6). How to Properly Jack Up a Tesla Model S or X to Avoid Damaging the £30,000 Battery. https://teslaowners.org.uk/guides/properly-jack-tesla-model-s-x-dont-damage-30000-battery

Sanlab Learning. (n.d.). EV Batarya Teknolojisi. https://ev.sanlablearning.com/ev-batarya-teknolojisi/

Favero, J. (2019 November 21). Why E-Mobility Needs Smart Steels. https://www.e-motec.net/why-e-mobility-needs-smart-steels/

Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). Metal Foams: A Design Guide. Butterworth-Heinemann

SIMULIA. (2012). Simulation of the Ballistic Perforation of Aluminum Plates with Abaqus/Explicit: Abaqus Technology Brief. https://mecademy.org/wp-content/uploads/2021/09/Simulation-of-the-ballistic-perforation-of-aluminum-plates.pdf

Shafaqat, H., Krüger, C., & Urban, P. (2023). Parametric analysis of a divided rocker for battery electric vehicles. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 20(1), 10274-10284. https://doi.org/10.15282/ijame.20.1.2023.09.0794

Carhs. (2025). SafetyCompanion 2025. carhs.training GmbH.

SSAB. (n.d.). Recommended AHSS steels for car applications: EV design concept. Retrieved January 22, 2025, from https://www.ssab.com/en/brands-and-products/docol/recommended-ahss-steels-for-car-applications/ev-design-concept