

Bir Elektrikli Aracın Kompozit Batarya Paketi Muhafazasının Tasarım İyileştirilmesi

Erdem Acar^{1*}, Gamze Bayrak¹, Abdullah Mesud Türkmen¹, Ahmet Eren Şahin¹, Eda Naz Güleçyüz¹, Esat Safa Koç¹, Özge Köseali¹

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, 06560, Türkiye

Özet

Elektrikli araçlarda batarya paketi muhafazası kullanmanın amacı; pil hücrelerini sıcaklık, nem, çarpışma, titreşim gibi çevresel faktörlerden korumak ve batarya paketine yapısal destek sağlamaktır. Aynı zamanda elektrikli araçların menzilin artırılması için araç kütlelerinin azaltılması oldukça önemlidir. Bu çalışmanın amacı, elektrikli araçlar için kütlesi optimize edilmiş olmakla birlikte gerekli yapısal desteği sağlayan, kompozit malzemeden imal edilecek bir batarya paketi muhafazası tasarlamaktır. Bu amaçla, farklı tasarım alternatifleri oluşturulmuş ve bu tasarımlar üzerinde analizler yapılmıştır. Tasarımlar için SOLIDWORKS ve CATIA V5, analizler için ise ANSYS, HyperMesh ve LS-DYNA kullanılmıştır. Temel batarya paketinin tasarımının boyutları, piyasada mevcut alüminyumdan üretilen bir batarya paketi muhafazasından alınmıştır. Alüminyum malzeme yerine kompozit malzeme kullanımının ve güçlendirici kullanmak gibi birkaç tasarım değişikliğinin batarya paketi muhafazasının performansı üzerine etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Batarya paketi; Elektrikli araç; Kompozit; Mekanik tasarım; Sonlu elemanlar analizi; Tasarım optimizasyonu

Design Improvement of a Composite Battery Pack Enclosure of an Electric Vehicle

Abstract

The purpose of using a battery pack enclosure in electric vehicles is to protect the battery cells from environmental factors such as temperature, humidity, and vibration, while also providing structural support to the battery pack. Additionally, reducing the weight of electric vehicles is crucial to increase their range. In this regard, the aim of this study is to design a battery pack enclosure made of composite material for electric vehicles, which is mass optimized and provides the necessary structural support. For this purpose, different design alternatives were created and analyzes were made on these designs. SOLIDWORKS and CATIA V5 are used for designs and ANSYS, HyperMesh and LS-DYNA are used for analysis. The dimensions of the basic battery pack design are taken from a commercially available aluminum battery pack housing. The effects of the use of composite material instead of aluminum material and a few design changes (e.g. the use of reinforcement elements) on the performance of the battery pack enclosure are investigated.

Keywords: Battery pack; Composite; Design optimization; Electric vehicle; Finite element analysis; Mechanical design

* acar@etu.edu.tr

1. Giriş

CO₂ emisyonlarını azaltma ve fosil yakıt verimliliğini artırma çabaları ile, elektrikli araçlar otomobil üreticileri için umut vadeden bir çözüm haline gelmiştir. Bununla birlikte, batarya kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle, batarya gücüyle çalışan elektrikli araçlar içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla önemli ölçüde daha kısa bir sürüş menzili sunmaktadır [1].

Uzmanlar mekanik açıdan, pil kapsamını ve modüllerini içeren batarya paketlerinin tasarımına odaklanmaktadır. Çalışma sırasında, batarya paketi muhafazası dinamik yüklemelere ve rastgele titreşimlere maruz kalır. Batarya paketi muhafazasının deformasyonu kısa devre oluşturabilir ve batarya paketinin aniden yanmasına veya patlamasına neden olabilir. Rastgele titreşimler kapsamında, modal analizden elde edilen ilk doğal frekans son derece önemlidir ve maksimize edilmelidir. Bu nedenle, batarya paketi muhafazası daha yüksek dayanıklılığa ve titreşim direncine, aynı zamanda daha düşük bir ağırlığa sahip olmalıdır. Daha hafif bir muhafaza, aracın menzilini ve batarya paketinin ömrünü arttırabilir [2].

Metal muhafazalar kullanıldığında, muhafaza içerisine genellikle yapısal takviyelerin eklenmesi gerekmektedir. Bu, ek metal bileşenlerin plakaya cıvata veya kaynakla bağlanması veya döküm muhafazalar için tasarıma kaburga eklenmesi şeklinde olabilir. Nasıl ve ne kadar takviye eklenmesi gerektiğinin belirlenmesi için sonlu elemanlar analizi, şok ve titreşim analizi gibi yöntemler kullanılır [3].

Daha büyük otomotiv enerji depolama sistemlerinde, kompozit bir kapak metal bir tabanla birlikte kullanılabilir. Örneğin, General Motors Chevrolet Volt modelinde, haydite nanokil dolgu maddesi ve %40 cam lifleri içeren hafif vinil ester reçinesinden yapılmış levha şekilli bir kompozit kullanılır [3].

Ağırlığın azaltılması, elektrikli araçların sürüş menzilini arttırmak için etkili bir yöntem olarak kabul edilir. Bu, çelik ve alüminyum gibi standart malzemelerin kompozit malzemelerle değiştirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, bir elektrikli aracın batarya paketi muhafazasında kompozit malzeme kullanılarak ağırlığı azaltmak amaçlanmıştır. Bölüm 2'de batarya paketi muhafazasında kullanılan malzemelerin karşılaştırılması sunulacaktır. Bölüm 3'te batarya paketi muhafazasının performansının incelenmesi için uygulanan analizlerden bahsedilecektir. Bölüm 4'te çalışma kapsamında yapılan sonlu elemanlar modeli geliştirilmesi çalışmaları anlatılacaktır. Bölüm 5'te çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulacak, Bölüm 6'da ise sonuçların değerlendirmesi yapılacaktır.

2. Batarya Paketi Muhafazasında Kullanılan Malzemelerin Karşılaştırılması

Batarya paketi muhafazalarında yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında alüminyum, çelik ve kompozit malzemeler bulunur. Bu malzemelerin batarya paketi için kullanımıyla ilgili temel bir karşılaştırmalar aşağıda verilmiştir.

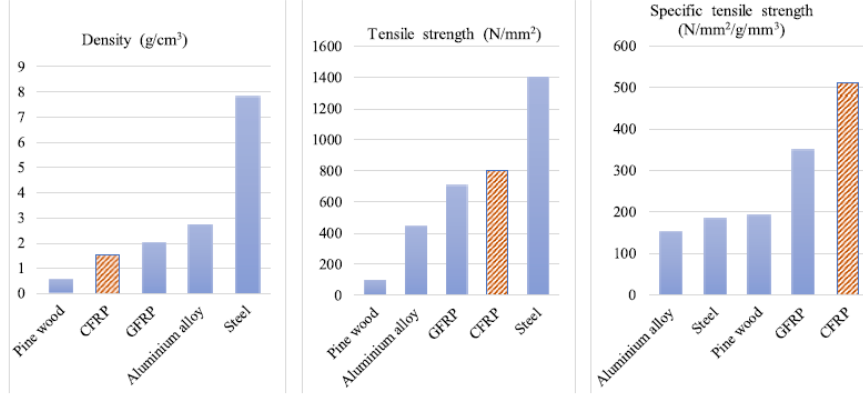
- **Alüminyum:** Alüminyum, batarya paketlerinde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Hafif ve dayanıklıdır, aynı zamanda ısıyı iyi ileten bir özelliğe sahiptir. Bununla birlikte, alüminyumun düşük korozyon direnci vardır, bu nedenle uygun bir kaplama olmadan kullanılırsa zamanla paslanabilir. Ayrıca, alüminyum maliyetli bir malzemedir.
- **Çelik:** Çelik de alüminyum gibi batarya paketlerinde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Alüminyuma göre daha ucuz olup daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Ancak, çelik daha ağırdır ve daha düşük ısı iletkenliğine sahiptir.
- **Kompozit Malzemeler:** Kompozit malzemeler, batarya paketlerinde kullanılmak üzere nispeten yeni bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Bu malzemeler genellikle karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ve cam fiber takviyeli polimerler (GFRP) gibi takviyeli plastiklerdir. Kompozit malzemeler hafif, dayanıklı ve yüksek mukavemete sahip olabilir. Aynı zamanda çelik ve alüminyuma göre daha yüksek ısı iletkenliği sağlayabilirler. Ancak, kompozit malzemelerin üretim maliyetleri daha yüksektir.

Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin birleştirilmesiyle oluşan ve üstün özellikler sağlayan malzemelerdir. Elektrikli araç bataryalarında kullanılan kompozit malzemeler, hafif, dayanıklı, enerji depolama kapasitesi yüksek ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları gibi özellikleriyle avantajlıdır [4]. Elektrikli araç bataryalarında kullanılan malzemeler arasında karbon fiber, grafit, lityum metal fosfat ve polimer matrisli kompozitler bulunmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı batarya performansını artırabilir, sürüş menzilini uzatabilir ve batarya ömrünü uzatabilir [5].

Birçok araştırma, kompozit malzemelerin elektrikli araç bataryalarındaki kullanımını arttırmaya yöneliktir. Kompozit malzemelerin kullanımı ile batarya ağırlığı azaltılabilir, enerji depolama kapasitesi artırılabilir, batarya ömrü uzatılabilir ve güvenliği artırılabilir. Örneğin, grafit katkılı polimer matrisli kompozit malzemeler, batarya ömrünü ve enerji depolama kapasitesini arttırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, lityum metal fosfat polimer matrisli kompozit malzemeler, batarya güvenliği için kullanılmaktadır.

Elektrikli araç batarya muhafazalarında kullanılan kompozit malzemeler, genellikle karbon fiber veya cam elyafından yapılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek mukavemet, hafiflik ve dayanıklılık gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, elektrik-

sel yalıtım özelliği de gösterirler, bu da bataryaların güvenli bir şekilde muhafaza edilmesine yardımcı olmaktadır. Özellikle, karbon fiber kompozit malzemeler (CFRP), diğer malzemelere göre daha hafif ve daha dayanıklıdır (bkz. Şekil 1). Bu malzemeler, ayrıca yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal dayanıklılık gibi özellikleri de gösterirler. Ancak, karbon fiber malzemeler diğer malzemelere göre daha maliyetli olabilmektedir.



Şekil 1. CFRP'nin bazı mekanik özelliklerinin alüminyum, çelik ve ahşap ile karşılaştırılması [6]

Cam elyaf kompozitleri de elektrikli araç batarya muhafazaları için kullanılabilir. Bu malzemeler, karbon fiber malzemeler kadar hafif olmasa da, daha uygun bir maliyet sunar. Cam elyaf kompozitleri, darbelere ve çarpışmalara karşı iyi bir koruma sağlarken, yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanıklılık özellikleri de gösterir. Elektrikli araç batarya muhafazaları için kullanılan kompozit malzemeler, bataryaların korunması ve aracın performansının artırılması için önemlidir. Karbon fiber ve cam elyaf gibi malzemeler, hafifliği, dayanıklılığı ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır [7].

3. Batarya Paketi Muhafazasının Performansının İncelenmesi için Uygulanan Testler

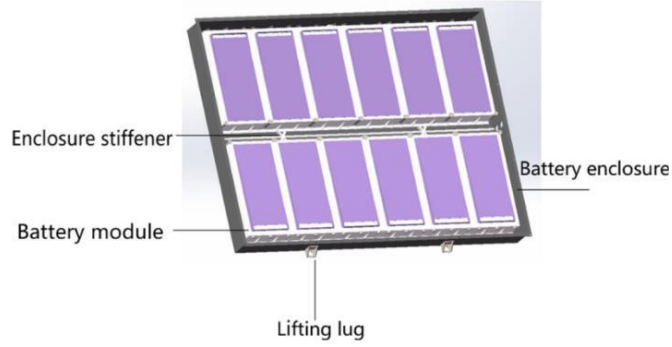
Batarya paketi muhafazalarının güvenliği ve performansının sağlanması için uygulanabilecek çeşitli testler bulunmaktadır. Bu testler, batarya paketi muhafazalarının elektrikli araçlar ve diğer uygulamalarda kullanımı için güvenli ve güvenilir olmasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bunlardan bazıları şunlardır [8]:

- Titreşim Testi: Bu test, batarya paketi muhafazasını taşıma veya normal kullanım sırasında meydana gelebilecek titreşimleri simüle etmek için çeşitli frekans ve genliklerde titreşimlere maruz bırakmayı içermektedir. Muhafaza bileşenleri, çatlamadan veya gevşemeden titreşimlere dayanabilmelidir.
- Penetrasyon Testi: Penetrasyon testi, bir batarya muhafazasının keskin nesnelere karşı direncini değerlendirir. Bu test, keskin bir nesneyle muhafazaya belirli bir kuvvet uygulayarak, muhafazanın hasar görüp görmediğini incelemektedir. Amaç, batarya ve muhafazasının güvenliği ve güvenilirliğini sağlamak ve sonuçlara göre gerekli tasarım değişikliklerini yapmaktır.
- Ezilme/Çarpışma Testi: Ezilme/çarpışma testi, bir batarya muhafazasının araç çarpışması veya yoğun darbe gibi dış etkilere dayanma yeteneğini değerlendirir. Test, çarpışma durumunda batarya sisteminin güvenliğini sağlamak ve olası tehlikeleri, örneğin yangın veya patlama riskini önlemeyi amaçlar. Muhafaza belirli bir yüke maruz kaldığında yırtılma veya tehlikeli maddelerin sızıntı yapmaması gerekmektedir.

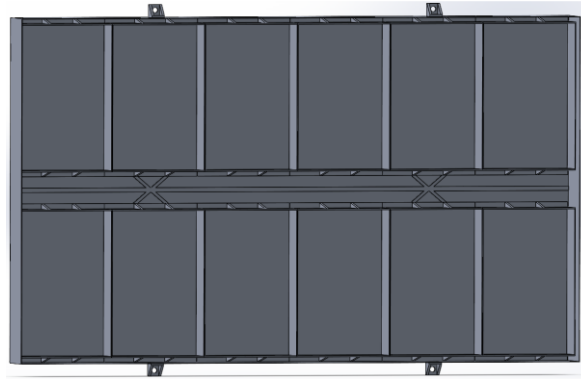
4. Sonlu Elemanlar Modeli Geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında elektrikli araçlar için batarya paketi muhafazasının tasarım optimizasyonu ile ilgili literatürdeki benzer çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalar içinden, batarya paketi geometrisi, malzemesi, yükleme koşulları ve sonlu elemanlar analizleri bakımından diğer çalışmalara kıyasla daha fazla veri sunan Shui vd.'nin [2] çalışması doğrulama için kullanılmıştır. Bahsi geçen çalışma, elektrikli araçlar için batarya paketi muhafazasının mekanik özelliklerine odaklanarak araç güvenliğini sağlamayı ve menzili ile batarya ömrünü maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Süreç, sonlu eleman analizi için ANSYS yazılımının kullanılmasını içermekte ve tasarımın kütlemini, maksimum deformasyonunu ve ilk doğal frekansını belirlemek için kullanılmaktadır.

Batarya paketi muhafaza bileşenleri ve muhafaza tasarımı Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Maksimum toplam deformasyon ve ilk doğal frekans sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında önce SOLIDWORKS yazılımı kullanılarak batarya paketinin tasarımı yapılmış, ardından ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçların, Shui vd.'nin çalışmasında [2] sunulan sonuçlarla kıyaslamaları Tablo 1'de ve Şekil 4'te verilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçların Shui vd.'nin çalışmasında [2] sunulan sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmüştür.



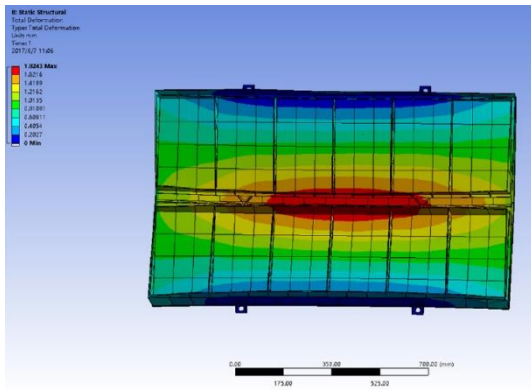
Şekil 2. Batarya Paketi Muhafazası Bileşenleri [2]



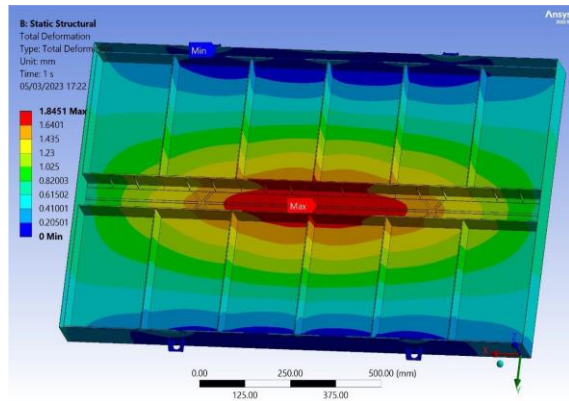
Şekil 3. Batarya Paketi Muhafazası CAD Tasarımı [2]

Tablo 1. Doğrulama çalışması sonuçları

	Shui vd. [2]	Bu çalışma	% Fark
Maksimum toplam deformasyon (mm)	1.8243	1.8451	1.1
İlk doğal frekans (Hz)	89.28	89.30	0.2



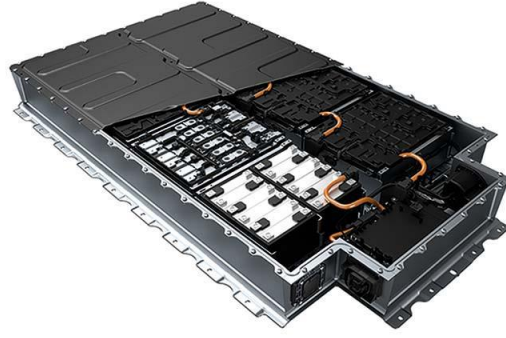
(a) Shui vd. [2]



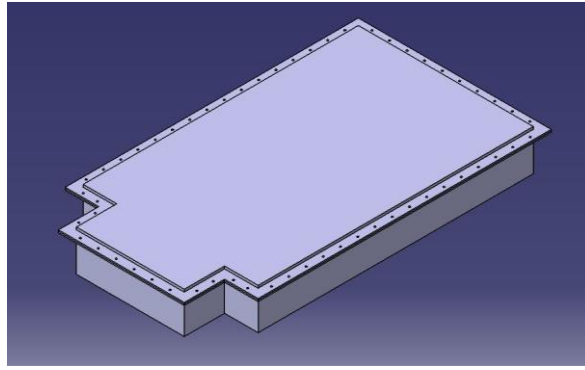
(b) Bu çalışma

Şekil 4. Toplam deformasyon

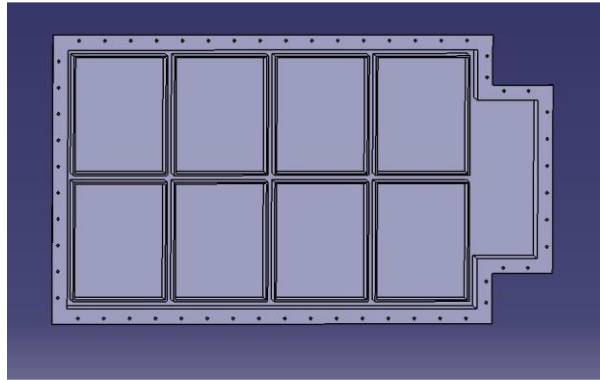
Literatürde bulunan verilerle doğrulama yapılmasının ardından, BMW i3 batarya muhafazası (bkz. Şekil 5) için sonlu elemanlar modeli oluşturulmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Burada amaç, daha gerçekçi bir sonlu elemanlar modeli üzerinden çalışmaların devamını sağlamaktır. BMW i3 batarya muhafazası için, Şekil 6'da verilen tasarım kullanılmıştır. Şekil 7 üst kapağı olmayan temel tasarımı göstermektedir. İkinci tasarım Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 9'daki tasarım ile Şekil 8'deki tasarımın boyutları aynıdır, ancak Şekil 9'da gösterilen yapısal iyileştirmeler yapılmıştır. Şekil 10 üçüncü ve son tasarımı göstermektedir ve Şekil 11'de görülen alt kapak altına eklenen takviyeleri içermektedir.



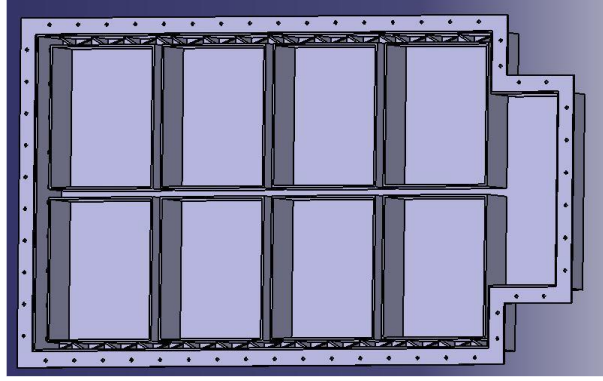
Şekil 5. BMW i3 Batarya Paketi Muhafazası



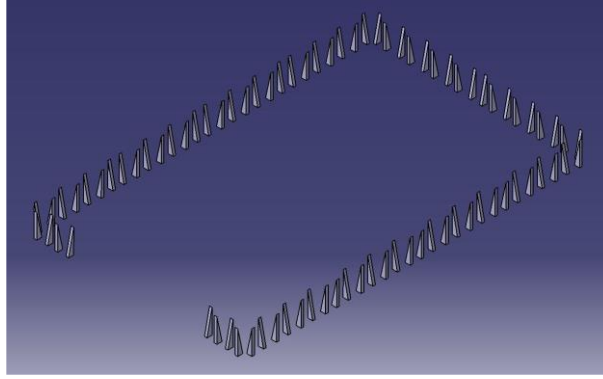
Şekil 6. Batarya Paketi Muhafazası İlk Tasarımı



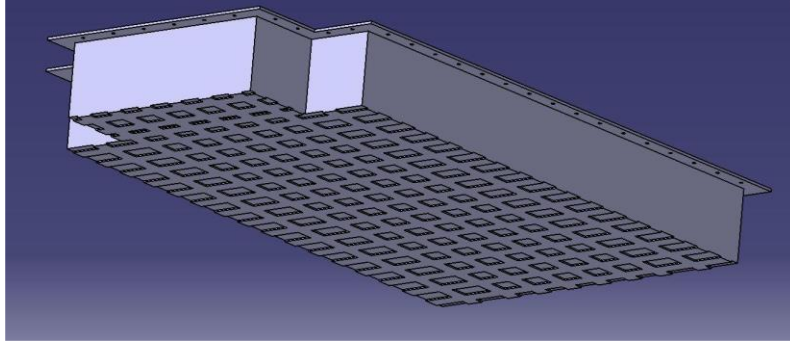
Şekil 7. Batarya Paketi Muhafazasının İlk Tasarımının Dış Görünümü (Üst Kapaksız)



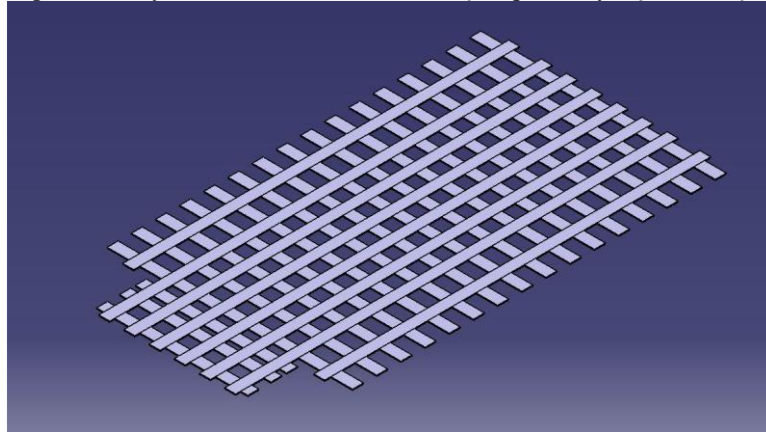
Şekil 8. Kompozit Batarya Paketi Muhafazasının İkinci Tasarımının Dış Görünümü (Üst Kapaksız)



Şekil 9. Kompozit Batarya Paketi Muhafazasının İkinci Tasarımı İçin Güçlendirici Yapı



Şekil 10. Kompozit Batarya Paketi Muhafazasının Kiriş Yapılarla İyileştirilen Üçüncü Tasarımı

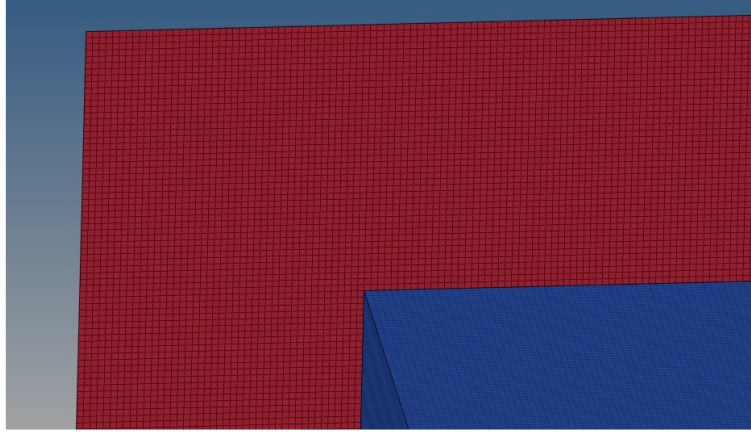


Şekil 11. Batarya Paketi Muhafazasının Üçüncü Tasarımının Kiriş Yapısı

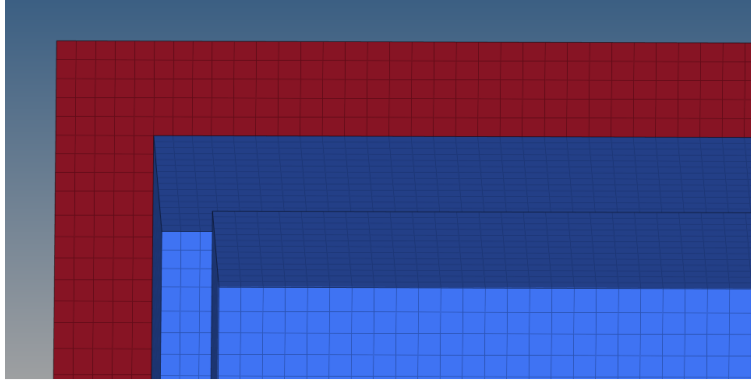
4.1 Çözüm Ağı Yakınsaması

Çözüm ağı yakınsama çalışmalarında, çözüm ağı eleman boyutu sistemli bir şekilde değiştirilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılır. Çözüm ağı yakınsamasının hedefi, hem yeterli doğruluk derecesine sahip hem de hesaplama maliyeti bakımından verimli bir model elde etmektir.

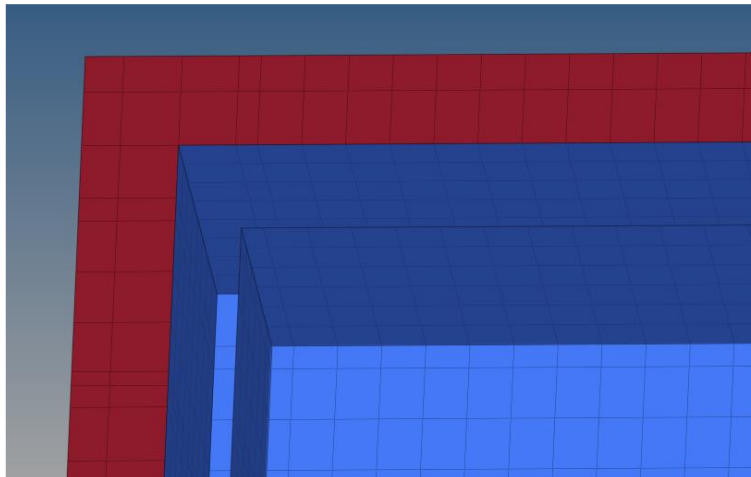
Bu çalışmadaki tüm çözüm ağı oluşturma işlemleri Hypermesh yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çözüm ağı yakınsamasını göstermek için temel batarya tasarımı, 20, 15, 10, 5 ve 1 mm'lik çözüm ağı boyutlarıyla Hypermesh yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Aynı sınırlayıcı koşullar altında farklı çözüm ağı boyutlarında oluşturulan modeller üzerinde direğe yandan çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çözüm ağı boyutları arasında 1 mm olan Şekil 12'de, 10 mm olan Şekil 13'te ve 20 mm olan Şekil 14'te gösterilmektedir. Ayrıca, 10 mm çözüm ağı boyutuna sahip kapaklı tasarımın genel görünümü Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmektedir. Çözüm ağı yakınsama çalışmasının sonuçları Bölüm 5'te verilmektedir.



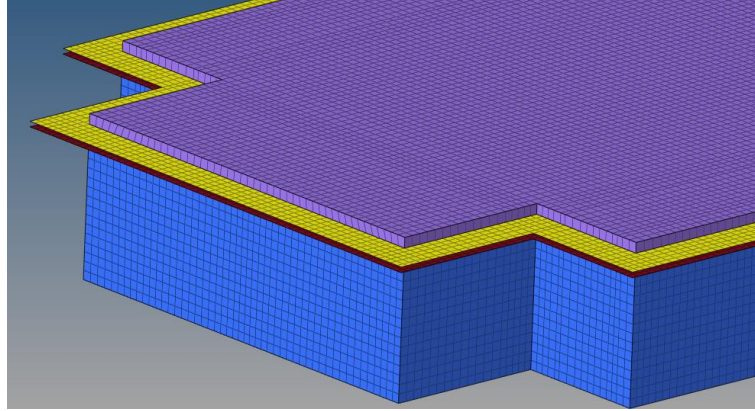
Şekil 12. 1 mm çözüm ağı boyutlu Alüminyum tasarım



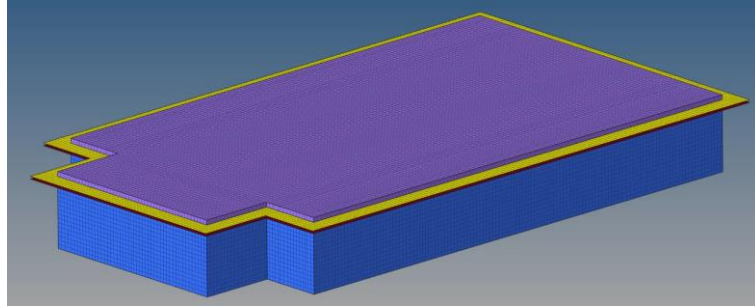
Şekil 13. 10 mm çözüm ağı boyutlu Alüminyum tasarım



Şekil 14. 20 mm çözüm ağı boyutlu Alüminyum tasarım



Şekil 15. 10 mm çözüm ağı boyutlu Alüminyum tasarımın parçaları



Şekil 16. 10 mm çözüm ağı boyutlu Alüminyum tasarımın tüm parçaları

4.2 Direğe Yandan Çarpma Testi Analizleri

Direğe yandan çarpma testi, araçların dar bir nesneyle (örneğin, direk veya ağaçla) yan çarpışma durumunda güvenliğini değerlendirmek için kullanılan standart bir çarpışma testidir. Direk yan darbe testi, hareketli deformasyona uğrayabilen bir engelin (*moving deformable barrier, MDB*) araca belirli bir hız ve açıyla çarpmasını simüle eder. Test, sürücü ve yolcuların maruz kaldığı kuvvetleri ve ivmeleri, aracın içine girme ve deformasyonunu ölçer.

Bu çalışmada, farklı batarya paketlerinin direk yan çarpışma durumunda çarpışma dayanıklılığı analiz edilmektedir. Analizleri gerçekleştirmek için, Avrupa düzenlemeleri tarafından belirlenen yan çarpışma testleri için test standartları ve protokolleri, EURO NCAP'in direk yan çarpışma testi protokolü ve ABD'deki FMVSS standardı 214 başlıca bilgi kaynakları olarak kullanılmıştır [9]. Bu test standartları, çalışmada yapılan tasarım analizleri için çerçeve olarak kullanılmıştır.

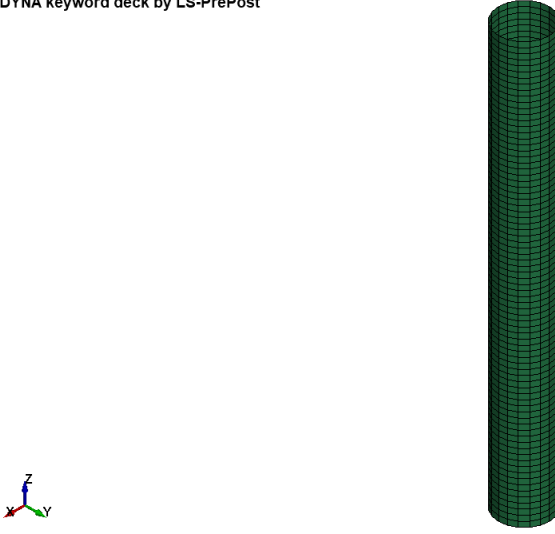
Aynı zamanda literatürde, direğe yandan çarpma testinin batarya paketinin çarpışma dayanıklılık değerini ölçmek için kullanıldığı görülmüştür. Uerlich vd. [10] çalışmalarında direk yan çarpışma testi analizlerini kullanarak farklı batarya paketlerinin dayanıklılığını gözlemlemişlerdir.

Analizde kullanılan direk, darbe için uluslararası standartlara dayanmaktadır. Bu standartlara göre direğin çapı 254 mm olarak belirlenmiş ve çevresinde 20, yüksekliği boyunca ise 80 eleman içermektedir. Katı direk malzemesi, MAT 20 malzeme kartı kullanılarak modellenmiştir. Malzeme özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir. Uerlich vd. [10] çalışmasında olduğu gibi, direk katı bir şekilde Belytschko-Tsay-4 düğüm ince kabuk elemanları ile modellenmiştir. Modellenen direk Şekil 17'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Direğin malzeme özellikleri

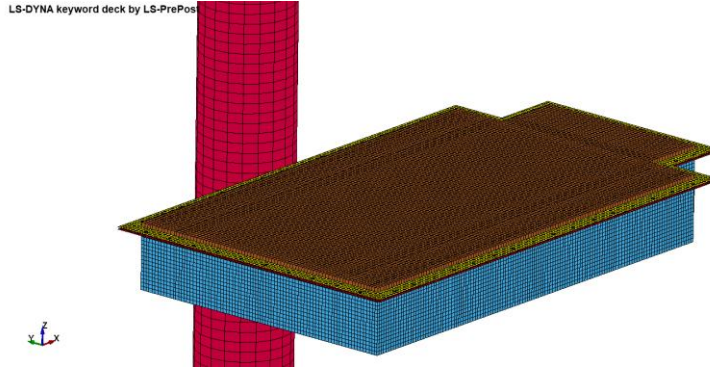
Yoğunluk (kg/m^3)	7900
Elstisite modülü (GPa)	200
Poisson oranı	0.3
Malzeme modeli	RIGID

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost



Şekil 17. LS DYNA’da katı direk modeli

EuroNCAP yan direk testinde, bir aracın 8 m/s hızla seyir halindeyken 254 mm çaplı bir katı direğe çarpması gerekmektedir. Bu çalışmada, analizde aynı parametreler kullanılmıştır. Standartta belirtilen koşulları sağlamak için katı direğin üç ekseninde hareketi ve üç ekseninde dönüşü sınırlanmıştır. Ancak, bu çalışma yalnızca batarya paketinin davranışını analiz etmeyi hedeflediği için, tüm aracın değil, yalnızca batarya paketi katı direğe doğru hareket edecek şekilde modellenmiştir. Belirtilen kriterlere göre oluşturulan direğe yandan çarpma testi için oluşturulan simülasyon modeli Şekil 18’de gösterilmektedir.



Şekil 18. Direğe Yandan Çarpma Testi Simülasyon Modeli

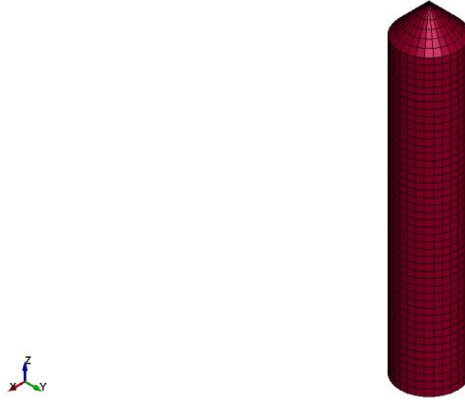
4.3 Penetrasyon Analizleri

Penetrasyon testi, batarya hücrelerinin ve paketlerinin keskin cisimler tarafından delinme veya nüfuz edilme direncini değerlendirmek için kullanılır. Test, bir çivi veya bıçak gibi keskin bir cisim kullanılarak kontrol edilen bir kuvvetin batarya hücrelerine veya paketine uygulanmasıyla gerçekleştirilir ve hücre veya paket delinene kadar devam eder. Penetrasyon testi, bir çarpışma veya diğer darbelerle karşı batarya sisteminin güvenliği hakkında önemli bilgiler sağlayabilir.

Çivi penetrasyon testinde, bataryada hem mekanik hem de elektriksel hasar meydana gelebilir. Keskin bir çelik çubuk (hücreler için 3 mm, modüller ve paketler için 20 mm çapında) bataryanın içinden 8 cm/s sabit bir hızıyla itilir. Sonuçta bir kısa devre oluşsa da, bunun mekanik olarak çivinin batarya içine nüfuz etmesi sonucu meydana geldiği kabul edilir. Bu nedenle, bu test genellikle bir elektrik testi yerine mekanik bir test olarak sınıflandırılır. Çivi hücrelerin içinden geçerken ayırıcı ve elektrotların bütünlüğünü bozar, kısa devreler oluşturur ve ısı açığa çıkarır [8,11-13].

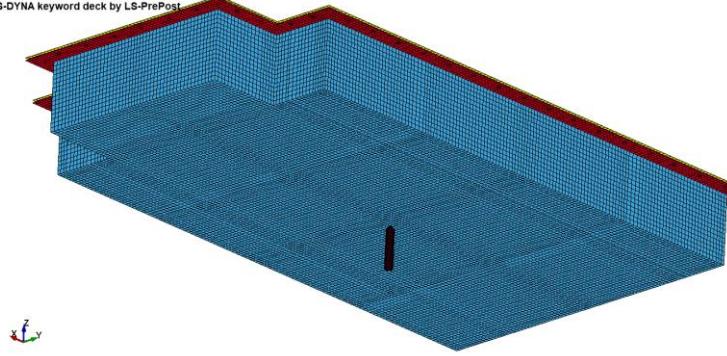
Modül düzeyinde analiz için 20 mm çapında bir çubuk, standartlarda belirtilen koşullara uygun olarak modellenmiştir [14]. Uzunluk ve eğim özellikleri, literatürde belirtilenlere göre 100 mm uzunluğunda ve 45° açıyla düzgünleştirilmiştir [15]. Çivi modeli Şekil 19’da gösterilmektedir. Rijit çivi malzemesi, MAT 20 malzeme kartı kullanılarak modellenmiştir. Belirtilen kriterlere göre oluşturulan penetrasyon testi için oluşturulan simülasyon modeli Şekil 20’de gösterilmiştir. Malzeme özellikleri Tablo 3’te gösterilmiştir.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost



Şekil 19. LS DYNA'da pahlı çivi modeli

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost



Şekil 20. Penetrasyon Testi Simülasyon Modeli

Tablo 3. Çivinin malzeme özellikleri

Yoğunluk (kg/m ³)	7900
Elstisite modülü (GPa)	200
Poisson oranı	0.3
Malzeme modeli	RIGID

4.4 Statik Direngelik Analizleri

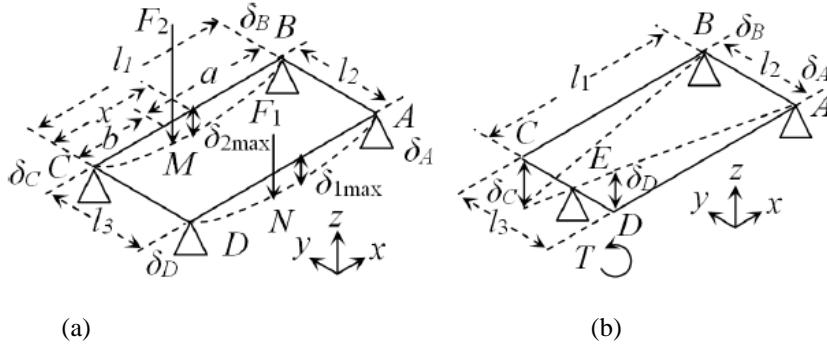
Eğilme direngeliği, bir malzemenin bir yüke maruz kaldığında eğilme deformasyonuna karşı direncini ölçen bir parametredir. Eğilme direngeliği ne kadar yüksekse, malzeme bir eğilme yüküne maruz kaldığında o kadar az deformasyon gösterecektir. Araç tasarımı bağlamında, yüksek eğilme direngeliği aracın sürüş özelliklerini ve stabilitesini arttırmak için istenir. Burulma direngeliği ise bir malzemenin bir torka maruz kaldığında oluşan tork deformasyonuna karşı direncini ölçen bir parametredir. Burulma direngeliği ne kadar yüksekse, malzeme bir tork uygulandığında o kadar az dönecektir. Araç tasarımı bağlamında, yüksek burulma direngeliği, özellikle viraj alma manevralarında aracın sürüş özelliklerini ve stabilitesini arttırmak için istenir. Bu bağlamda, batarya kabının eğilme ve burulma direngeliği değerinin yüksek olması istenir ve tasarımların eğilme ve burulma direngeliği değerlerini ölçmek için statik analizler yapılmıştır. Analiz koşulları ve hesaplamalar için Fang ve Kefei'nin çalışmasından [16] yararlanılmıştır.

Şekil 21(a), bir gövdenin eğilmeye maruz kaldığında nasıl deformasyon gösterdiğini göstermektedir. Fang ve Kefei'nin çalışmasında, arka yay koltukları A ve B olarak belirlenmiş, ön süspansiyon montaj deliği ise C ve D noktaları olarak belirlenmiştir. M ve N yüklemesi yapılan noktalar da gösterilmiştir. Bu temel alınarak, analizler batarya paketinin arka köşeleri A ve B olarak, batarya yönetim sistemi deliğinin ucundan ise C ve D noktaları olarak kabul edilerek yapılmıştır.

Kesikli çizgi, yük tarafından eğilmiş hale gelmiş gövde yapısının konumunu temsil etmektedir. Gövdenin eğilme direngenliği, uygulanan yük ile buna karşılık gelen deplasman arasındaki orandır. Eğilme direngenliğini hesaplamak için bir denklem sunulmuştur [16]:

$$K_b = \frac{\Sigma F}{\frac{1}{2} \left[\left(\delta_{1max} - \delta_D - \frac{x(\delta_D - \delta_A)}{l_1} \right) + \left(\delta_{2max} - \delta_C - \frac{x(\delta_C - \delta_B)}{l_1} \right) \right]} \quad (1)$$

Bu denklem, bir aracın gövdesinin eğilme direngenliği olan K_b 'yi tanımlar. Eğilme direngenliği, gövdeye uygulanan toplam yük ile buna karşılık gelen deformasyon arasındaki orandır. Sol ve sağ uzunlamasına kirişlerin Z yönündeki maksimum deformasyon yer değiştirmeleri sırasıyla δ_{1max} ve δ_{2max} olarak gösterilir. A, B, C ve D noktalarının uzunlamasına kirişler üzerindeki projeksiyon noktalarının Z yönündeki yer değiştirmeleri sırasıyla δ_A , δ_B , δ_C ve δ_D olarak gösterilir. Uzunlamasına kiriş deformasyonunun maksimum yer değiştirme konumu ile CD ucu arasındaki mesafe x olarak gösterilir ve batarya yönetim sisteminin sonu ile batarya paketinin arkası arasındaki mesafe l_1 olarak gösterilir.



Şekil 21. Batarya Paketi Muhafazasının (a) Eğilme ve (b) Burulma Çalışma Koşullarında Yapısal Deformasyonu

Araç yapısının burulma koşullarda deformasyonu Şekil 21(b)'de gösterilmiştir. Gövdenin burulma direngenliği, CD ucu üzerine uygulanan tork miktarı ve CD ucu ile AB ucu arasındaki görel burulma açısı tarafından belirlenir. Bu ilişki matematiksel olarak aşağıdaki denklemle ifade edilir [16]:

$$K_t = \frac{T}{\arctan \left(\frac{\delta_D - \delta_C}{l_3} - \frac{\delta_A - \delta_B}{l_2} \right)} \quad (2)$$

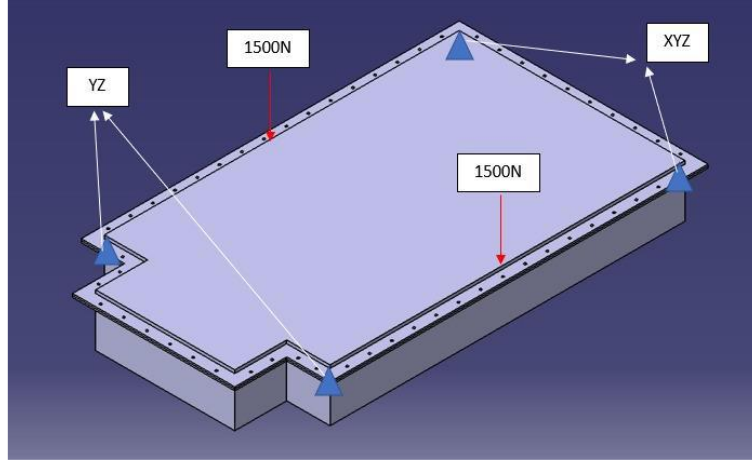
Burada K_t burulma direngenliği, T burulma yükü (tork), δ_A , δ_B , δ_C ve δ_D , A, B, C, D alt noktalarının Z yönündeki deformasyon deplasmanlarını temsil eder ve l_2 ve l_3 , batarya paketinin arka tarafından ön tarafındaki yönetim sisteminin uzaklığını temsil eder.

Eğilme direngenliği hesabı için sınır koşulları: Batarya paketinin arka köşeleri, dönüşümsel hareket olmaksızın dönebilmekte; paketin ön köşeleri ise X yönde dönebiliyor ve dönüşümsel hareket yapabilmektedir (bkz. Şekil 22).

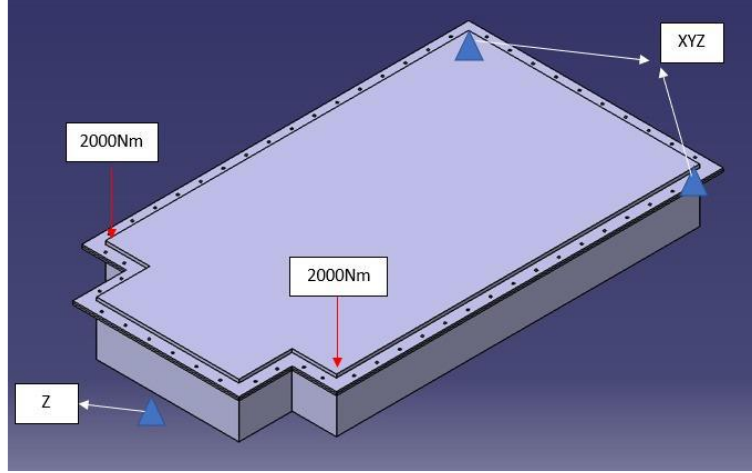
$$x^{\rightarrow} A = 0, y^{\rightarrow} A = 0, z^{\rightarrow} A = 0, x^{\rightarrow} B = 0, y^{\rightarrow} B = 0, z^{\rightarrow} B = 0, y^{\rightarrow} C = 0, z^{\rightarrow} C = 0, y^{\rightarrow} D = 0, z^{\rightarrow} D = 0.$$

Burulma direngenliği hesabı için sınır koşulları: Batarya paketinin arka köşeleri, dönüşümsel hareket olmaksızın dönebilmekte; batarya yönetim sistemi deliğinin ön orta noktası ise X ve Y yönde dönebiliyor ve dönüşümsel hareket yapabilmektedir (bkz. Şekil 23).

$$x^{\rightarrow} A = 0, y^{\rightarrow} A = 0, z^{\rightarrow} A = 0, x^{\rightarrow} B = 0, y^{\rightarrow} B = 0, z^{\rightarrow} B = 0, z^{\rightarrow} E = 0.$$



Şekil 22. Eğilme direngenliği hesabı için sınır koşulları



Şekil 23. Burulma direngenliği için sınır koşulları

4.5 Modal Analiz

Bir elektrikli aracın batarya paketi, yol koşullarından kaynaklanan titreşimlere maruz kalabilir ve bu titreşimlerin frekansı batarya paketinin doğal frekansı ile çakıştığında hasara neden olabilir. Titreşimler ile batarya paketinin doğal frekansı arasındaki rezonans, bataryaya önemli ölçüde zarar ve deformasyona yol açabilir [17]. Elektrikli araçların batarya paket kapsamı deformasyona uğrarsa, kısa devre oluşabilir ve ani yangın veya patlamalara yol açabilir. Bunun önlenmesi için modal analiz yapmak ve rastgele titreşimler sırasında rezonansın meydana gelmesini önlemek için ilk doğal frekansın belirlenmesi son derece önemlidir [2]. Bu doğrultuda, ilk doğal frekans değeri, modal analizler yaparak incelenmiştir.

4.6 Malzeme modeli

BMW i3 batarya paketi, orijinal tasarımın alüminyum şasi kullanılarak üretilmiş olup, Alüminyum 6061-T6 alaşımının malzeme özellikleri kullanılarak modellenmiştir. Alüminyum 6061-T6 alaşımı, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci ve mükemmel işlenebilirliği nedeniyle tekerlekler, süspansiyon parçaları ve gövde panelleri gibi otomotiv bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alüminyum 6061-T6 alaşımı için Johnson-Cook malzeme modeli seçilmiştir. Johnson-Cook malzeme modeli, yüksek gerinim hızları ve sıcaklıklar altında metal malzemelerin davranışını simüle etmek için hesaplamalı mekaniğin yaygın olarak kullanılan yapısal modelidir. Model, izotropik sertleşme, gerinim hızı duyarlılığı ve termal yumuşama etkilerini bir araya getirerek, aşırı yüklenme koşulları altında karmaşık malzeme davranışını yakalamaktadır.

Johnson Cook malzeme modeli dayanım ve hasar modellerinden oluşmaktadır. Dayanım modeli, akma dayanımından sonraki gerilmeyi tahmin ederken hasar modeli, hasarın meydana geldiği eşdeğer gerilmeyi tahmin etmektedir. Dayanım modelinin formülasyonu Denklem (3)'te, hasar modelinin formülasyonu Denklem (4)'te gösterilmiştir. Tablo 4, 5 ve 6'da formülasyonlardaki parametreler verilmiştir.

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \left[1 - \left(\frac{T - T_R}{T_m - T_R} \right)^m \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)](1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_R}{T_m - T_R} \right) \right] \quad (4)$$

Burada D_1 - D_5 hasar modeli sabitleri olup girdi parametreleri olup, denklemlerdeki diğer terimler aşağıda verilmiştir. Bu çalışmada JC model parametreleri literatürden elde edilmiştir [18,19]. Elde edilen değerler Tablo 7'de gösterilmiştir.

$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3 \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (5)$$

$$\varepsilon^f = \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad (6)$$

Tablo 4. JC dayanım parametreleri

Parametre	Açıklama
σ_y	Akış gerilmesi (<i>İng.</i> flow stress)
$\dot{\varepsilon}^*$	Normalize gerinme hızı oranı
T_m	Erime sıcaklığı
ε	Gerinme
T_R	Referans sıcaklığı (Oda sıcaklığı)

Tablo 5. JC dayanım girdi parametreleri

Parametre	Açıklama
A	Akma dayanımı (Pa)
n	Gerinme sertleşme katsayısı
m	Termal yumuşama katsayısı
B	Gerinme sertleşme sabiti (Pa)
C	Gerinme hızı güçlendirme katsayısı

Tablo 6. JC hasar parametreleri

Parametre	Açıklama
ε^f	Kırılmada eşdeğer gerinme (<i>İng.</i> equivalent strain at fracture)
σ_m	Ortalama gerilme
σ^*	Gerilim üç eksenliliği (<i>İng.</i> stress triaxiality) oranı
σ_{eq}	Eşdeğer gerilme (<i>İng.</i> equivalent stress)

Tablo 7. Johnson-Cook model parametreleri

Parameter	Symbol (unit)	Value Aluminum
Johnson–Cook model		
Density	Ro (kg/m ³)	2700
Shear modulus	G (GPa)	26
Elastic modulus	E (GPa)	70
Poisson's ratio	PR	0.33
Yield stress	A (MPa)	324
Hardening constant	B (MPa)	114
Strain rate constant	C	0.0020000
Thermal softening exponent	M	1.3400000
Hardening exponent	N	0.4200000
Melting temperature	TM (K)	925.00000
Room temperature	TR (K)	293.00000
Ref. strain rate	EPSO (s ⁻¹)	0.0010000
Specific heat	CP (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	1256.00000
Failure parameter	D1	- 0.7700000
Failure parameter	D2	1.4500000
Failure parameter	D3	- 0.4700000
Failure parameter	D4	0.0
Failure parameter	D5	1.6000000

Araç yapılarının ağırlığını azaltmak, özellikle elektrikli araçlarda enerji verimliliğini artırmak için önemli bir hedefdir. Bununla birlikte, bir aracın ağırlığını azaltmak, çarpışma dayanıklılığı konusunda güvenlik endişelerine yol açabilir. Çarpışma dayanıklılığını sağlamak, batarya sistemlerinin yüksek gerilim kirliliği ve termal sorunları riski olan elektrikli araçlar için giderek daha önemli hale gelmektedir.

Fauzi vd. [20], elektrikli araçlar için karbon fiber takviyeli polimer kompozit (CFRP) kullanılarak bir çarpışma kutusu geliştirmiş ve bu kutuyu ağırlık düşme testine tabi tutmuşlardır. Aynı deneysel koşullar altında LS-DYNA yazılımını kullanarak çarpışma simülasyonu gerçekleştirmiş, sayısal ve deneysel değerleri karşılaştırarak malzeme modellerini doğrulamışlardır. CFRP malzeme modellemesinde, MAT 54 malzeme kartı kullanılmıştır. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) malzemenin özellikleri Tablo 8'de verilmiştir. Elde edilen özelliklere göre doldurulan MAT 54 kartı, Şekil 24'te gösterilmiştir.

Tablo 8. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) malzemenin özellikleri [20]

Name	Definition	Value
RO (kg/mm ³)	Mass per unit value	1.60E-06
EA (GPa)	Axial Young's modulus	56
EB (GPa)	Transverse Young's modulus	56
v21	Minor Poisson's ratio	0.1
G12 (GPa)	Shear modulus	5
G23 (GPa)	Shear modulus	5
G31 (GPa)	Shear modulus	5
XT (GPa)	Axial tensile strength	0.59
XC (GPa)	Axial compressive strength	0.57
YT (GPa)	Transverse tensile strength	0.59
YC (GPa)	Transverse compressive strength	0.57
SC (GPa)	Shear strength	0.09

*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE_(TITLE) (054/055) (1)

TITLE
Carbon/Epoxy

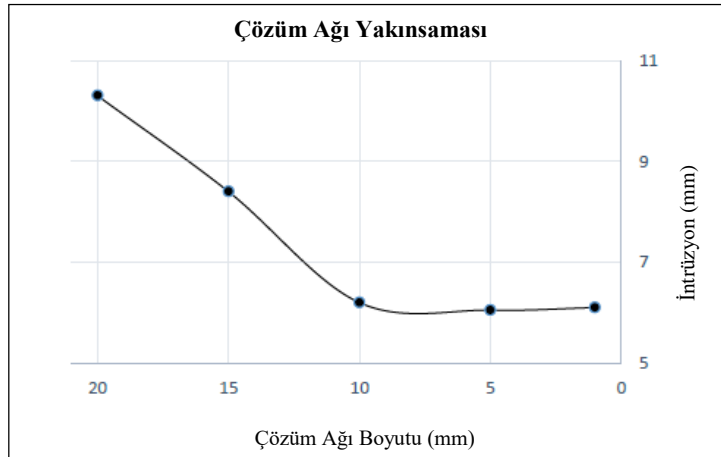
1	MID	RO	EA	EB	(EC)	PRBA	(PRCA)	(PRCB)
	4	0.0016000	5.600e+04	5.600e+04	5.600e+04	0.1000000	0.0	0.0
2	GAB	GBC	GCA	(KF)	AOPT	2WAY		
	5000.0000	5000.0000	5000.0000	0.0	0.0	0.0		
3	XP	YP	ZP	A1	A2	A3	MANGLE	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	V1	V2	V3	D1	D2	D3	DFAILM	DFAILS
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1000000	0.1000000
5	TFAIL	ALPH	SOFT	FBRT	YCFAC	DFAILT	DFAILC	EFS
	1.150e-11	0.1000000	0.7000000	0.9000000	1.2000000	0.1000000	-0.1000000	0.0
6	XC	XT	YC	YT	SC	CRIT	BETA	
	570.00000	590.00000	570.00000	590.00000	90.0000000	54.0	0.5000000	
7	PEL	EPSF	EPSR	TSMD	SOFT2			
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000			
8	SLIMT1	SLIMC1	SLIMT2	SLIMC2	SLIMS	NCYRED	SOFTG	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	
9	LCXC	LCXT	LCYC	LCYT	LCSC	DT		
	0	0	0	0	0	0.0		

Şekil 24. CFRP'nin MAT 54 malzeme kartı özellikleri

5. Sonuçlar

5.1 Çözüm Ağı Yakınsaması Sonuçları

Çözüm ağı yakınsaması, sayısal simülasyonlarda elde edilen sonuçların, simülasyonda kullanılan çözüm ağı boyutuna bağlı olmadığından emin olmak için kullanılan bir süreçtir. Bu süreç, sonuçların daha fazla iyileştirmeye bağlı olmaksızın bağımsız hale gelene kadar çözüm ağı yoğunluğunu artırmayı içerir, böylece simülasyon sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği sağlanır. Farklı eleman boyutlarında elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 25'te sunulmuştur. Hesaplama yükü ve doğruluğu temel alınarak, 10 mm eleman boyutunun en uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 25. Çözüm ağı yakınsama sonuçları

5.2 Direğe Yandan Çarpma Analizi Sonuçları

Alüminyum 6061-T6 malzemesi kullanılarak yapılan orijinal BMW i3 batarya tasarımı üzerinde gerçekleştirilen direk yan darbe analizi sonucunda, muhafaza kabının 6 mm derinliğine nüfuz ettiği görülmüştür. Aynı tasarımın, CFRP malzemesi kullanılarak modellenmesi yapıldığında, Kompozit Tasarım 1 olarak adlandırılan tasarımda direk yan darbe analizi sonucunda nüfuzun 11 mm'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.

Kompozit Tasarım 1'in yan darbe sırasında direncini artırmak için tasarıma takviyeler eklenmiş ve Kompozit Tasarım 2 elde edilmiştir, nüfuz 7 mm'ye indirgenmiştir. Tasarımı daha da güçlendirmek için Kompozit Tasarım 3'te bataryanın altına kiriş yapısı eklenmiş ve nüfuz 3 mm'ye düşürülmüştür. Farklı tasarımlar için direk yan darbe analizi sonucunda elde edilen nüfuz değerleri Tablo 9'da gösterilmektedir. Takviyeler ve kiriş yapıları kullanılarak elde edilen Kompozit Tasarım 3, alüminyum malzemeden yapılan orijinal tasarıma göre daha iyi performans sergilemektedir.

Tablo 9. Direğe yandan çarpma analizi sonuçları

Tasarım	İntrüzyon (mm)
Alüminyum Tasarım	6
Kompozit Tasarım 1	11
Kompozit Tasarım 2	7
Kompozit Tasarım 3	3

5.3 Penetrasyon Analizi Sonuçları

Çalışmada kullanılan 4 farklı tasarım penetrasyon analizlerine tabi tutulmuştur. Şekil 26 penetrasyon hızı deplasman grafiğini göstermektedir. Alüminyum tasarımın penetrasyon analizleri 25 m/s hızında başlamış ve bu hızda 3,11 mm şekil değişikliği görülmüştür. Ardından 50 m/s hızında 6,98 mm, 75 m/s hızında 10,79 mm, 100 m/s hızında 14,57 mm ve 112 m/s hızında 16,77 mm deformasyon görülmüştür. İlk alüminyum tasarımı 118 m/s hızında başarısız olmuştur.

Kompozit Tasarım 1 ile temel tasarım (Alüminyum tasarım) arasındaki tek fark kullanılan malzemedir. Şekil 27 Kompozit Tasarım 1 için penetrasyon hız-deplasman grafiğini göstermektedir. 25 m/s'den başlayarak, Kompozit 1 için penetrasyon analizleri yapılmış ve 5.98 mm şekil değişikliği görülmüştür. Ardından, 50 m/s hızında 10,17 mm, 75 m/s hızında 14,70 mm ve 100 m/s hızında 21,51 mm şeklinde deformasyon meydana gelmiştir. Kompozit 1 tasarımı 102,5 m/s hızında başarısız olmuştur.

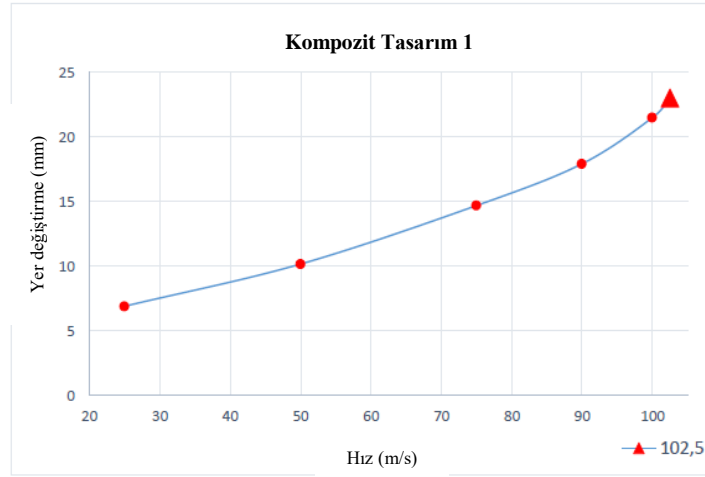
Kompozit Tasarım 1'i güçlendirmek için oluşturulan Kompozit Tasarım 2 için 25 m/s hızında penetrasyon analizleri yapılmış ve 5,66 mm şekil değiştirdiği görülmüştür. Ardından, 50 m/s hızında 14,1 mm, 75 m/s hızında 20,57 mm ve 100 m/s hızında 21,34 mm şeklinde deformasyon meydana gelmiştir. Kompozit Tasarım 2'nin 105 m/s hızında başarısız olduğu görülmüştür. Şekil 28 Kompozit Tasarım 2 için penetrasyon hız-deplasman grafiğini göstermektedir.

Kompozit Tasarım 3, Kompozit Tasarım 2'nin daha da güçlendirilmiş versiyonudur. Kompozit Tasarım 3 için penetrasyon hız-deplasman grafiği de Şekil 29'da görülmektedir. Kompozit Tasarım 3, Penetrasyon analizlerinde 25 m/s hızında 2,05 mm şekil değiştirmiş, ardından sırasıyla 50 m/s hızında 2,65 mm, 75 m/s hızında 4,57 mm, 100 m/s hızında 8,41 mm, 125 m/s hızında 11,17 mm, 150 m/s hızında 14,81 mm ve 175 m/s hızında 19,28 mm deformasyon meydana gelmiştir. 198 m/s hızında hasar ise meydana gelmiştir.

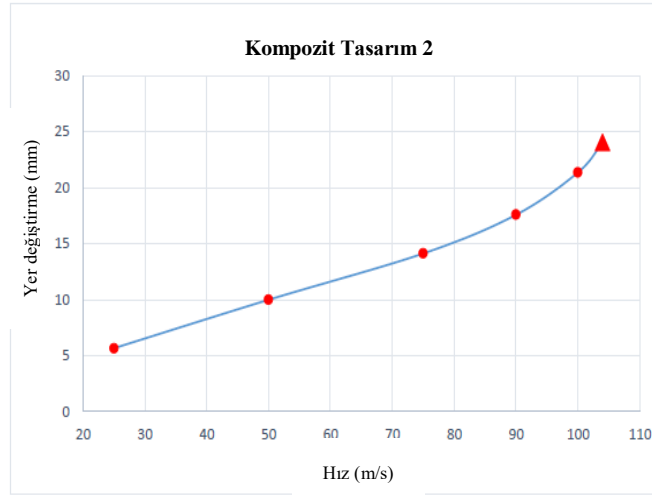
Penetrasyon dayanımı bakımından Kompozit Tasarım 1 ve Alüminyum Tasarım kıyaslandığında malzemenin etkisi görülebilmektedir. Kompozit Tasarım 1 geliştirilerek elde edilen Kompozit Tasarım 2 için analizler tekrarlandığında, yeni tasarımın penetrasyon açısından beklenen gelişimi gösterdiğini söylemek zordur. Bu sorunların üstesinden gelmek için Kompozit Tasarım 2'nin geliştirilmiş bir versiyonu olan Kompozit Tasarım 3 oluşturulmuştur. Son tasarımda hasar meydana gelme hızı, önceki üç prototipin ortalama başarısızlık hızı olan 110 m/s'den 198 m/s'ye yükselmiştir (bkz. Tablo 10). Bu, tasarımı geliştirerek penetrasyon hedefini sağladığını göstermektedir.



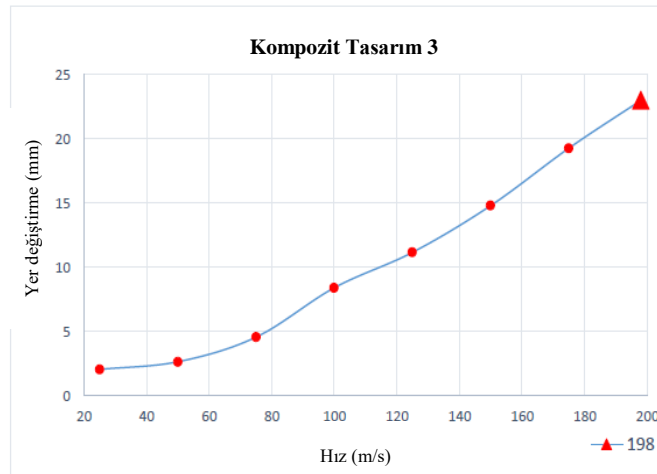
Şekil 26. Alüminyum tasarım için penetrasyon analizleri sonuçları



şekil 27. Kompozit tasarım 1 için penetrasyon analizleri sonuçları



şekil 28. Kompozit tasarım 2 için penetrasyon analizleri sonuçları



şekil 29. Kompozit tasarım 3 için penetrasyon analizleri sonuçları

Tablo 10. Penetrasyon analizleri sonuçları

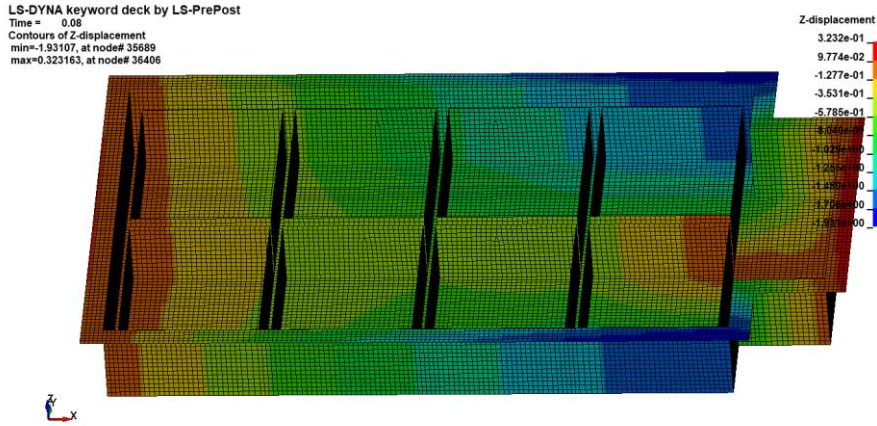
Tasarım	Penetrasyon Eşik Hızı (m/s)
Alüminyum Tasarım	118
Kompozit Tasarım 1	102
Kompozit Tasarım 2	105
Kompozit Tasarım 3	198

5.4 Statik Direngelik Sonuçları

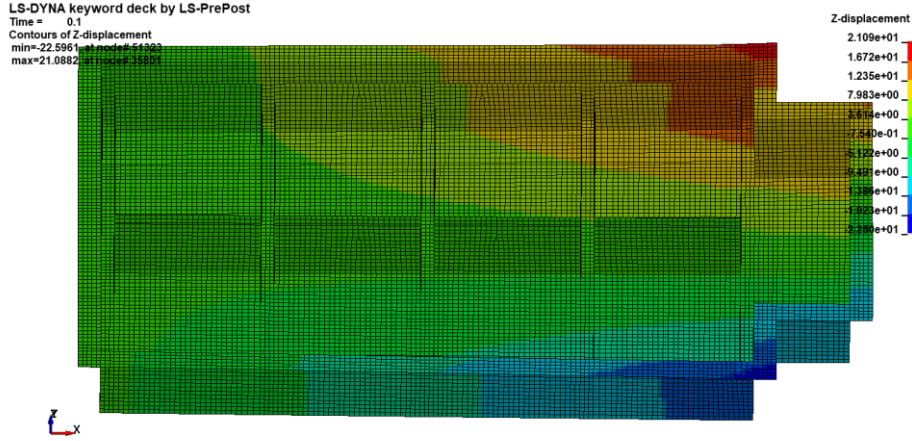
Farklı malzemelerden üretilen biri alüminyum ve üçü kompozit malzemeden oluşan farklı batarya paketi muhafaza tasarımlarının statik sertliği LS-DYNA kullanılarak analiz edilmiş ve doğrulanmıştır. İlk olarak, eğilme direngeliği analiz sonuçları değerlendirildiğinde; alüminyumdan yapılan temel tasarımın, aynı tasarımın kompozit versiyonunun eğilme sertliğinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmüştür (bkz. Tablo 11). Eğilme direngeliği değerleri arasındaki farkın sebebi, alüminyumun karbon/epoksi kompozitlere göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olması ve eğilme deformasyonuna karşı daha direngen olmasıdır. Öte yandan, karbon/epoksi kompozitlerin elastisite modülü daha düşük olup, aynı miktarda kuvvete maruz kaldıklarında eğilme deformasyonuna daha duyarlıdır.

Batarya paketi muhafaza tasarımının ikinci versiyonunda, modül duvarları ile dış duvarlar arasında sertleştiriciler eklenmiştir. Yapıya sertleştiriciler eklenerek sistemdeki moment direnci artırılmış ve eğilme deformasyonuna karşı direnç artmıştır. Bu nedenle, ikinci tasarımın eğilme direngeliği, birinci tasarımın eğilme direngeliğinden daha yüksek olarak elde edilmiştir. Üçüncü tasarımda, ikinci tasarıma ek olarak batarya paketi muhafazanın altına bir kiriş yapısı eklenmiştir. Kiriş, eğilmeye karşı direnç sağlamak için tasarlanmış bir yapısal elemandır. Bu nedenle, üçüncü tasarımın eğilme direngeliği, üç farklı kompozit batarya paketi muhafaza tasarımı arasında en yüksek olarak elde edilmiştir.

İkinci olarak, karbon/epoksi kompozitler genellikle alüminyuma göre daha az direngeliği olduğundan dolayı elastisite modülü ve kayma modülü daha düşüktür. Bu nedenle, burulma direngeliği analiz sonuçları değerlendirildiğinde; alüminyum temel muhafaza tasarımının burulma direngeliği değeri, kompozit muhafaza tasarımına göre daha yüksek olarak elde edilmiştir (bkz. Tablo 12). Eğilme direngeliği değerini elde etmek için yapılan analizde olduğu gibi, ikinci tasarıma eklenen güçlendiriciler nedeniyle ikinci tasarımın burulma direngeliği değeri birinci tasarımdan daha yüksek olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde, kompozit tasarımlar arasında, kiriş yapısı ve tabanına güçlendirici eklenen üçüncü tasarımın burulma direngeliği değeri, moment direncinin artması nedeniyle en yüksek olarak elde edilmiştir.



Şekil 30. Eğilme çalışma koşulları altında yapısal deformasyon



Şekil 31. Burulma çalışma koşulları altında yapısal deformasyon

Tablo 11. Eğilme dirençlik sonuçları

Tasarım	Eğilme Dirençliği (N/mm)
Alüminyum Tasarım	19.669,0
Kompozit Tasarım 1	9.364,6
Kompozit Tasarım 2	9.568,4
Kompozit Tasarım 3	9.984,6

Tablo 12. Burulma dirençlik sonuçları

Tasarım	Burulma Dirençliği (Nm/°)
Alüminyum Tasarım	13.432,6
Kompozit Tasarım 1	11.619,5
Kompozit Tasarım 2	12.371,3
Kompozit Tasarım 3	13.568,6

5.5 Modal Analiz Sonuçları

Elektrikli araçların modal analizinde, bataryanın ilk doğal frekansı dikkate alınır. Bataryadaki ilk doğal frekans değeri en az 32 Hz olmalıdır, bu değer ne kadar yüksekse batarya için o kadar iyidir. Alüminyum Tasarım için modal analiz değeri 45 Hz'dir ve bu değer Kompozit 1. tasarım için de aynıdır. Kompozit 2. tasarımda ilk doğal frekans 51 Hz'dir. 3. tasarımda ise bu değer çok az bir iyileşme göstererek 51,1 Hz'ye ulaşmıştır. Modal analiz, analiz edilen yapısal malzemenin özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, modal analiz yapılırken yapısal malzemenin özelliklerini dikkate almak önemlidir, çünkü bu özellikler sonuçlar üzerinde ve yapısal davranış üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Karbon/epoksi muhafaza için modal analiz sonucu, alüminyum muhafazaya göre daha yüksek olabilir çünkü bu iki malzemenin farklı malzeme özellikleri vardır. Karbon/epoksi kompozitlerin dirençlik/ağırlık oranı alüminyumdan daha yüksektir. Bu yüksek dirençlik/ağırlık oranı, titreşim veya salınım sırasında yapının doğal frekansının veya modal frekansının daha yüksek olmasına neden olabilir. Sonuç olarak, ilk doğal frekansı optimize edilmiş ve tasarımda iyileştirmeler gösterilmiştir (bkz. Tablo 13).

Tablo 13. Modal analiz sonuçları

Tasarım	İlk Doğal Frekans (Hz)
Alüminyum Tasarım	45,2
Kompozit Tasarım 1	45,4
Kompozit Tasarım 2	51,0
Kompozit Tasarım 3	51,1

6. Değerlendirme

Bu çalışmada bir elektrikli aracın kompozit batarya paketi muhafazasının tasarım iyileştirmesi üzerine araştırma yapılmıştır. İlk olarak, elektrikli araçlar için bir batarya paketi kabının tasarım optimizasyonu için literatürdeki benzer çalışmalar incelenmiştir. Literatürdeki bir makaleye göre bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Ardından, BMW i3'ün batarya paketi kabının boyutları ve malzemesine göre ilk alüminyum batarya paketi tasarımının modellemesi yapılmıştır. Alüminyum batarya paketi tasarımı için modal analiz, penetrasyon analizi, direğe yandan çarpma analizi ve statik direngenlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, BMW i3 batarya tasarımının kompozit malzemedeki modellemesi yapılmış ve aynı analizler uygulanmıştır. Karbon/epoksi kompozitin malzeme özelliklerinden dolayı, kompozit batarya paketi kabının statik direngenlik performansı, direğe yandan çarpma performansı ve penetrasyon performansı alüminyum tasarıma göre daha kötü çıkmıştır. Deformasyonu azaltmak anlamına gelen eğilme direngenliği ve burulma direngenliği değerlerini artırmak için kompozit batarya paketi kabı tasarımına, direngenliği artıran güçlendiriciler eklenmiştir.

Aynı analizler ikinci kompozit tasarıma uygulandığında, istenen şekilde statik direngenlik performansı ve direğe yandan çarpma performansı için daha olumlu değerler elde edilmiştir. Üçüncü kompozit tasarım için, penetrasyon kesme hızını artırmak için muhafazanın altına bir giriş yapısı eklenmiştir. Modal analiz sonuçları değerlendirildiğinde; karbon/epoksi kompozitlerin alüminyumdan daha yüksek direngenlik/ağırlık oranına sahip olmaları nedeniyle, titreşim veya salınım sırasında yapıdaki doğal frekansın veya modal frekansın daha yüksek olmasına neden olabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle, karbon/epoksi kompozitten yapılan batarya paketi kabı tasarımının modal analiz açısından daha olumlu bir değere sahip olabilir. Tüm bu gayretlerin sonucunda, performansı iyileştirilmiş bir kompozit batarya paketi muhafaza tasarımı elde edilmiştir. Farklı tasarımlar için elde edilen tüm sonuçlar Tablo 14'te verilmiştir. İyileştirme çalışmalarını sonunda kompozit batarya paketi muhafazasının ağırlığı %25,6 oranında azaltılmıştır. Ayrıca, iyileştirilen tasarımın (Kompozit Tasarım 3) başlangıç tasarımına (Alüminyum Tasarım) göre üstünlükleri; %13 daha yüksek ilk doğal frekans, %50 daha düşük intrüzyon, %68 daha yüksek penetrasyon eşik hızı, %46 daha yüksek burulma direngenliğine sahip olmasıdır. Öte yandan, iyileştirilen tasarımın başlangıç tasarımına kıyasla %49 daha düşük eğilme direngenliğine sahip olduğu görülmekte olup, ileriye yönelik yapılacak çalışmalarla bu dezavantajın ortadan kaldırılması hedeflenmektedir.

Tablo 14. Farklı tasarımlar için elde edilen sonuçlar

Tasarım	Kütle (Kg)	İlk doğal frekans (Hz)	Direğe çarpma intrüzyon (mm)	Penetrasyon eşik hızı (m/s)	Eğilme direngenliği (N/mm)	Burulma direngenliği (Nm/°)
Alüminyum Tasarım	58,62	45,2	6	118	19.669,0	9.237,8
Kompozit Tasarım 1	34,81	45,4	12	102	9.364,6	11.619,5
Kompozit Tasarım 2	35,86	51,0	7	105	9.568,4	12.371,3
Kompozit Tasarım 3	43,62	51,1	3	198	9.984,6	13.568,6

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 22AG001 nolu çatı proje kapsamında yer alan 22AG024 nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Choi, C. H., Cho, J. M., Kil, Y., & Yoon, Y. (2013). *Development of polymer composite battery pack case for an electric vehicle* (No. 2013-01-1177). SAE Technical Paper.
- [2] 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*, 58, 331-347.
- [3] Warner, J. T. (2015). *The handbook of lithium-ion battery pack design: chemistry, components, types and terminology*. Elsevier.
- [4] Arora, S., Shen, W. and Kapoor, A. (2016), "Review of Mechanical Design and Strategic Placement Technique of a Robust Battery Pack for Electric Vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1319-1331.

- [5] Wazeer, A., Das, A., Abeykoon, C., Sinha, A., & Karmakar, A. (2022). Composites for Electric Vehicles and Automotive Sector: A Review. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 100043.
- [6] Rana, S., Kumar, R., & Bharj, R. S. (2023). Current trends, challenges, and prospects in material advances for improving the overall safety of lithium-ion battery pack. *Chemical Engineering Journal*, 463, 142336.
- [7] Zhang, W., & Xu, J. (2022). Advanced lightweight materials for Automobiles: A review. *Materials & Design*, 110994.
- [8] 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*, 81, 1427-1452.
- [9] Dagdeviren, S., Yavuz, M., Kocabas, M. O., Unsal, E., & Esat, V. (2016). Structural crashworthiness analysis of a ladder frame chassis subjected to full frontal and pole side impacts. *International journal of crashworthiness*, 21(5), 477-493.
- [10] Uerlich, R., Ambikakumari Sanalkumar, K., Bokelmann, T., & Vietor, T. (2020). Finite element analysis considering packaging efficiency of innovative battery pack designs. *International Journal of Crashworthiness*, 25(6), 664-679.
- [11] Doughty, D. H., & Crafts, C. C. (2006). FreedomCAR: electrical energy storage system abuse test manual for electric and hybrid electric vehicle applications (No. SAND2005-3123). Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States).
- [12] AIS-048. Battery operated vehicles – safety requirements of traction batteries; 2009.
- [13] Castillo, E. C. (2015). Standards for electric vehicle batteries and associated testing procedures. In *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* (pp. 469-494). Woodhead Publishing.
- [14] SAE, S. (2009). J2464: Electric and hybrid electric vehicle rechargeable energy storage system safety and abuse testing.
- [15] Ma, T., Chen, L., Liu, S., Zhang, Z., Xiao, S., Fan, B., ... & Wang, F. (2019). Mechanics-morphologic coupling studies of commercialized lithium-ion batteries under nail penetration test. *Journal of Power Sources*, 437, 226928.
- [16] Fang, D., & Kefei, W. (2019). Simulation analysis and experimental verification on body-in-white static stiffness of a certain commercial vehicle. *Vibroengineering Procedia*, 29, 141-147.
- [17] Garafolo, N. G., Farhad, S., Koricherla, M. V., Wen, S., & Esmaeeli, R. (2022). Modal Analysis of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles. *Energies*, 15(13), 4841.
- [18] Pan, X., Wu, C. T., Hu, W., & Wu, Y. C. (2018). Smoothed particle Galerkin method with a momentum-consistent smoothing algorithm for coupled thermal-structural analysis. In *Proceedings of 15th International LS-DYNA Users Conference*. Detroit.
- [19] Boldyrev, I. S., Shchurov, I. A., & Nikonov, A. V. (2016). Numerical simulation of the aluminum 6061-T6 cutting and the effect of the constitutive material model and failure criteria on cutting forces' prediction. *Procedia Engineering*, 150, 866-870.
- [20] Fauzi, F. R., Hadi, B. K., Santosa, S. P., & Jusuf, A. (2018, October). Composite based lightweight structure design for crash and safety application. In *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)* (pp. 161-166). IEEE