T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

YENİ GELİŞTİRİLEN BİR VAGON İÇİN KOMPOZİT AKÜ KUTUSU TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Mohamed Yassin MOHAMED

DANIŞMAN
Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Eylül, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Mohamed Yassin MOHAMED tarafından, **Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU** danışmanlığında hazırlanan **"YENİ GELİŞTİRİLEN BİR VAGON İÇİN KOMPOZİT AKÜ KUTUSU TASARIMI VE OPTİMİZASYONU"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **22/08/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. M.Hüsnü DİRİKOLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
YEDEK ÜYE	Doç. Dr. Yener TAŞKIN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mekatronik Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Biyomedikal Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret

Hocama, Eşime ve Aileme ithaf ediyorum…

TEŞEKKÜR

Rahman ve Rahim olan Allah'ın adıyla. Bu tezi tamamlamam için verdiği sabır ve azim için Allah'a hamd ve senalar olsun. Lisansüstü çalışmamı başarıyla tamamlamama yardım ettiği için Allah'a şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı mümkün kılan danışmanım Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU'ya minnettarım ve ona içtenlikle teşekkür ederim. Sürekli teşviki, rehberliği ve tavsiyeleri araştırmam boyunca bana yardımcı oldu. Bu araştırma başlığı üzerinde çalışmam için bana ilham veren ve beni cesaretlendiren kişi oydu.

Zor zamanlarımda bana gösterdikleri sevgi ve destek için eşim Hayat Şukure ve oğlum Harun Muhammed'e içtenlikle minnettarım.

Son olarak, bu araştırma çalışmasının başarısına, “Türkiye Bursları” programı kapsamında sağladığı burs imkanıyla katkıda bulunan Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı’na (YTB) sonsuza dek minnettarım.

Eylül , 2025 Mohamed Yassin MOHAMED

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
ABSTRACT ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **8**
3. YÖNTEM **37**
4. BULGULAR **46**
5. TARTIŞMA **66**
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **71**
KAYNAKLAR **73**
EKLER **79**
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI **95**
ETİK KURUL İZİN YAZISI **96**
KURUM İZNİ YAZILARI **97**
ÖZGEÇMİŞ **98**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Raylı araç akü kutusu örneği 2

Şekil 2.1: Raylı araç yapısının şematik gösterimi 8

Şekil 2.2:Yük trenlerine örnek 9

Şekil 2.3: Yolcu treninin iç ve dış görünümleri 10

Şekil 2.4: Farklı hız aralıklarına sahip yüksek hızlı trenler 10

Şekil 2.5: Yolcu trenleri, yüksek hızlı trenler (YHT) ve yük trenlerinin malzeme kullanımları. 11

Şekil 2.6: Çeşitli batariya hücresi şekilleri; a) silindirik hücre, b) dikdörtgen prizmatik hücre, c) kese hücre. 13

Şekil 2.7: Ni-Cd pil hücresinin ve şarj sürecindeki kimyasal reaksiyonun grafiksel gösterimi 15

Şekil 2.8: Ni-Cd pil hücresinin bileşenleri 15

Şekil 2.9: Ni-Cd batarya hücrelerinin standart genel boyutları ve düzenlemesi. 16

Şekil 2.10: Fiber ile güçlendirilmiş bir kompozit malzeme matrisinin şematik yapısal gösterimi 17

Şekil 2.11: Karbon fiber takviyeli kompozit. 18

Şekil 2.12: El yatırması üretim teknikleri. 20

Şekil 2.13: Pultrüzyon prosesinin üretim aşaması. 22

Şekil 2.14: Lifli yapılarda karbon. 25

Şekil 2.15: PAN bazlı karbon elyaflar için üretim yöntemi. 26

Şekil 2.16: Karbon fiber kompozit malzemelerin ileri teknolojideki kapsamlı uygulamaları. 27

Şekil 2.17: Malzeme özellikleri ve elyaf yönelimi arasındaki ilişki 29

Şekil 2.18: Laminat kompozitlerin genel gösterimi 31

Şekil 2.19: Karbon fiber kompozit yapı için örnek tasarım değişkenleri: (a) Laminat konfigürasyonu, (b) Basitleştirilmiş düzlem formu 31

Şekil 3.1: Metodoloji özeti. 37

Şekil 3.2: Karbon fiber malzeme: (a) karbon fiber takviyeli kompozit; (b) karbon fiber 39

Şekil 3.3: Bazı metalik alaşımlı çelik malzeme ürünleri 40

Şekil 3.4: Epoksi reçine (A) ve sertleştirici (B) örneği. 41

Şekil 4.1: Ana işlev akü kutusu: iç bileşeni dış etkilerden koruma 47

Şekil 4.2: Wagon Akü Kutusunun genel 3D modeli ve İç Görünümü: (a) paslanmaz çelik akü kutusu, (b) karbon fiber akü kutusu. 48

Şekil 4.3: Optimize edilmiş vagon akü kutusunun temel bileşenleri, (a) karbon fiber, (b) 304 paslanmaz çelik 49

Şekil 4.4: Batarya muhafazası 50

Şekil 4.5: Batarya modülü set kasası (tutucu). 51

Şekil 4.6: Standart Ni-Cd batarya modülü; (a) Tek Ni-Cd paketi, (b) Toplam Ni-Cd modül güç bataryası. 51

Şekil 4.7: Vagon akü saklama kutusu FEA modeli. 53

Şekil 4.8: Akü kutusu FEA modeli sınır koşulları. 53

Şekil 4.9: Akü Kutusu FEA Ağı 54

Şekil 4.10: Akü Kutusu FEA Ağ Kalitesi Bilgileri 54

Şekil 4.11: 4 integral noktalı 10 düğümlü tetrahedral sonlu eleman geometrisi. 55

Şekil 4.12: 5G kuvvet ve G ağırlığına maruz kalan akü kutusundaki von Mises gerilimi. 55

Şekil 4.13: 5G kuvvet ve 5G ağırlığa maruz kalan batarya kutusundaki eşdeğer yer değiştirme. 56

Şekil 4.14: 5G kuvvet ve G ağırlığa maruz kalan akü kutusundaki eşdeğer gerilme. 56

Şekil 4.15: 5G kuvveti ve G ağırlığı ile gösterilen akü kutusundaki güvenlik faktöründeki değişiklik. 57

Şekil 4.16: Von Mises tabanlı Güvenlik Faktörünün minimum olduğu konum. 57

Şekil 4.17: Vagon Akü Saklama Kutusu FEA Modeli. 58

Şekil 4.18: Akü Kutusu FEA Modeli Sınır Koşulları. 59

Şekil 4.19: Gövde kuvveti yükü detayı. 60

Şekil 4.20: Akü Kutusu FEA Ağı 60

Şekil 4.21: Akü Kutusu FEA Ağ Kalitesi Bilgileri. 60

Şekil 4.22 : 5G kuvveti ve G ağırlığına maruz kalan kat-1 için karbon fiber akü kutusunun statik analizi. 61

Şekil 4.23: 5G kuvvet ve G ağırlığına maruz kalan ply-5 için karbon fiber pil kutusunun statik analizi. 62

Şekil 4.24: 5G kuvveti ve G ağırlığına maruz kalan katman-10 için karbon fiber pil kutusunun statik analizi. 63

Şekil 4.25: 5G kuvvet ve G ağırlığına maruz kalan katman 15 için karbon fiber akü kutusunun statik analizi. 63

Şekil 4.26: 5G kuvveti ve G ağırlığına maruz kalan karbon fiber akü kutusunun yer değiştirme dağılımı. 64

Şekil 4.27:5G kuvveti ve G ağırlığına maruz kalan akü kutusundaki eşdeğer maksimum gerilme. 64

Şekil 4.28: 5G kuvvet ve G ağırlığında gösterilen akü kutusundaki güvenlik faktöründeki en kötü durum değişikliği. 65

Şekil 4.29: 5G kuvvet ve G ağırlığına maruz kalan akü kutusundaki maksimum von Mises gerilimi. 65

Şekil 5.1: Akü kutusunun 304 paslanmaz çelik tasarımı ile karbon fiber tasarımı arasındaki ağırlık karşılaştırması. 66

Şekil 5.2: Kat sayısı ile ilgili gerilme ve deformasyon. 68

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: İkincil batariya sistemlerine genel bakış. 12

Tablo 2.2: Bazı yaygın batariya depolama teknolojileri. 13

Tablo 2.3: Sentetik elyafın en yaygın mekanik özellikleri 19

Tablo 2.4: Farklı CFRP üretim yöntemlerinin özeti. 23

Tablo 2.5: Çeşitli üretim yöntemlerine sahip karbon elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri 26

Tablo 2.6: Karbo fiber takviyeli epoksi reçine kompozit (T300) özellikleri 27

Tablo 2.7: Literatür taramasının özeti. 31

Tablo 3.1: 304 paslanmaz çelik **(**X5CrNi18-10 Stainless Steel**)** özellikler 40

Tablo 3.2: Örnek epoksi reçinesi (A) ve sertleştiricinin (B) özellikleri. 41

Tablo 3.3: X Y ve Z yönündeki kütle kuvvetinin büyüklüğü 43

Tablo 4.1: Pil kutusunun kompozit kabuk özellikleri 59

Tablo 5.1: Ağırlık minimizasyonunun değerlendirilmesi. 67

Tablo 5.2: Analiz sonuçu özeti. 69

Tablo A. 1: Karbon fiber/epoksi malzemenin özellikleri 83

Tablo A.2: 15 katmanlı karbon fiber pil kutusu için arıza indeksi (FI) özeti 94

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
M	: Toplam ağırlık
m	: Tek sac levha kütlesi
$\mathbf{m_{air}}$	: Numunenin havadaki kütlesi
$\mathbf{m_{water}}$	: Numunenin sudaki kütlesi
ρ	: Yoğunluk
$\boldsymbol{\rho_{liq}}$	: Suyun yoğunluğu
$\boldsymbol{\rho_c}$	: Kompozitin yoğunluğu
$\boldsymbol{\rho_M}$	: Matrisin yoğunluğu
$\boldsymbol{\rho_R}$	: Donatı elyafının yoğunluğu
A	: Alan
FI	: Hasar İndeksi
σ	: Gerilme
L	: Sac levhanın uzunluğu
B	: Sac levhanın genişliği
t	: Sac levhanın kalınlığı
$\mathbf{C_f}$	: Karbon fiber
St	: Çelik
$\mathbf{V_M}$	: Matrisin hacmi
$\mathbf{V_R}$	: Donatı elyafının hacmi

Kısaltmalar	Açıklama
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Plastikler/Polimer
FEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
LRV	: Hafif Raylı Taşıtlar
SMC	: Sac Kalıplama Bileşiği
ERS	: Elektrikli Demiryolu Sistemi
EU	: Avrupa Birliği
CO_2	: Karbondioksit
HSR	: Yüksek Hızlı Tren
SFs	: Sentetik Fiberlar
PAN	: Poliakrilonitril
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
FDM	: Erimiş Biriktirme Modelleme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
SLA	: Stereolitografi
LOM	: Lamine Nesne Üretimi
FVF	: Fiber Hacim Oranı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİ GELİŞTİRİLEN BİR VAGON İÇİN KOMPOZİT AKÜ KUTUSU TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Mohamed Yassin MOHAMED

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman : Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Son zamanlarda, ulaşım sektörü, gelişmiş malzemelerin ve yenilikçi tasarım çözümlerinin entegrasyonuna büyük önem vermektedir. Bu çalışma, yeni geliştirilen bir vagon için 304 paslanmaz çelik ve karbon fiber kompozit güç akü kutularının tasarımını ve analizini sunmaktadır. Araştırma, 304 paslanmaz çelik ve karbon fiber kompozit akü kutusunun karşılaştırmalı analizini içermektedir. Her bir tasarımın mekanik performansı ve malzeme davranışını değerlendirmek için sonlu elemanlar analizi ve hesaplamalı simülasyonlar kullanılmıştır. Modelleme ve yapısal analiz için SolidWorks yazılımı kullanılmıştır. Aşağı doğru yerçekimi ivmesi, akü saklama kutusuna etki eden G ağırlık kuvvetini oluşturur. Soldan sağa yönde 49,05 m/s²'lik tasarım ivmesi, yapının dayanması gereken 5G kuvvetini oluşturur. Çalışma, iki alternatif akü kutusunun ağırlık değerlendirmesi ve mukavemet analizine odaklanmaktadır. 304 paslanmaz çeliğe kıyasla, karbon fiber kompozit batarya kutuları, yapısal bütünlüğü bozmadan ağırlık azaltımı sağlamıştır. Karbon fiber kompozit batarya kutusu, 304 paslanmaz çelik tasarıma kıyasla yaklaşık %9 ağırlık azaltımı sağlamıştır. Statik analizde, 304

paslanmaz çelik 227,6 MPa maksimum gerilime ve 0,532 mm deformasyona maruz kalmıştır. Buna karşılık, karbon fiber kompozit 6,788 MPa'lık daha düşük bir maksimum gerilime ve 1,336 mm'lik nispeten kabul edilebilir bir deformasyona maruz kaldı. Genel olarak, karbon fiber kompozit batarya kutusu, modern vagon uygulamalarının zorlu gereksinimlerini karşılayan üstün mekanik mukavemet, dayanıklılık ve hafiflik performansı sergilemektedir ancak elde edilen ağırlık azaltımının vagon ağırlığına oranının düşük olması ve maliyetinin oldukça yüksek olması kullanımını kısıtladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Eylül , 2025 , 115 sayfa.

Anahtar kelimeler: Karbon Fiber, Güç Akü Kutusu, Hafiflik, Mukavemet, Vagon

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A COMPOSITE BATTERY BOX FOR A NEWLY DEVELOPED RAILCAR

Mohamed Yassin MOHAMED

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Programme

Supervisor : Prof. Dr. M.Hüsnü DİRİKOLU

Recently, the transportation sector has placed significant emphasis on the integration of advanced materials and innovative design solutions. This study presents the design and analysis of 304 stainless steel and carbon fiber composite power battery boxes for a newly developed railcar. The research involves a comparative analysis of 304 stainless steel and a carbon fiber composite battery box. Finite element analysis and computational simulations were employed to evaluate the mechanical performance and material behavior of each design. SolidWorks software was used for modeling and structural analysis. The downward gravitational acceleration creates the G weight force acting on the battery storage box. The design acceleration of 49.05 m/s² in the left-to-right direction creates the 5G force that the construction is required to withstand. The study focuses on weight assessment and strength analysis of the two alternative battery boxes. Compared to the 304 stainless steel, the carbon fiber composite battery boxes achieved a weight reduction without compromising structural integrity. The carbon fiber composite battery box achieved approximately 9% weight reduction compared to

the 304 stainless steel design. Under static analysis, the 304 stainless steel experienced a maximum stress of 227.6 MPa and a deformation of 0.532 mm. In contrast, the carbon fiber composite experienced a lower maximum stress of 6.788 MPa and relatively acceptable deformation of 1.336 mm. In general, the carbon fiber composite battery box demonstrates superior mechanical strength, durability, and lightweight performance that meets the demanding requirements of modern wagon applications. However, it has been concluded that its use is limited due to the relatively low ratio of weight reduction compared to the overall wagon weight and its significantly high cost."

September 2025, 115. pages.

Keywords: Carbon Fiber, Power Battery Box, Lightweight, Strength, Railcar

1. GİRİŞ

1.1. ÇALIŞMANIN ARKA PLANI

Modern çağın en önemli ulaşım araçlarından biri, metro sistemleri, trenler ve tramvayları kapsayan demiryolu sistemidir. Hem yolcu hem de yük taşımacılığı taleplerini karşılayabilen gelişmiş demiryolu taşımacılığı, sürdürülebilir ekonomik büyüme için çok önemlidir. Son on yıllarda tren kullanımı neredeyse iki katına çıkmış ve hala artmaya devam etmektedir (Keenor, 2021). Genellikle demiryolu araçları endüstrisi olarak bilinen demiryolu vagonu endüstrisi, küresel ulaşım ağlarının işleyişi ve insan ve ürün akışı için çok önemlidir. Bu endüstri, yük vagonları, yolcu vagonları, lokomotifler, yüksek hızlı tren vagonları (HSRc) ve özel demiryolu ekipmanları dahil olmak üzere çeşitli demiryolu araçlarının tasarımı, yapımı, bakımı ve işletilmesinin tüm yönlerini kapsar (Kaewunruen ve diğ., 2019).

Son yıllarda, kompozitlerin olağanüstü özgül mukavemet ve sertlik özellikleri nedeniyle ulaşımda kullanımı hızla artmıştır. Kompozitler, iki veya daha fazla bileşenin birleşiminden oluşur ve ortaya çıkan yapı, parçaların tek başına sahip olduğu özelliklerden daha üstün niteliklere sahiptir (Hsissou ve diğ., 2021). Bu üstün özellikler, statik ve dinamik yük direnci, kimyasal ortamlarda esneklik, artırılmış titreşim emilimi ve gürültü azaltmadır. Bu nedenle, ön tekerlekler, kemerler, arka uç alt elemanları ve pil muhafazaları dahil olmak üzere çeşitli araç bileşenlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Azaltılmış ağırlık ve en aza indirilmiş güç tüketiminin toplamı, yakıt giderlerinde önemli bir azalmaya neden olur (Ning ve diğ., 2007).

Otomotiv, vagon ve uçaklarda kullanılan ağır metal bileşenleri, karbon fiber takviyeli kompozitler, çok yüksek mukavemetli çelik veya alüminyum veya magnezyum alaşımları gibi daha hafif malzemelerle değiştirmek için çok sayıda girişimde bulunulmuştur (Liu ve diğ., 2019; Beardmore ve Johnson, 1986). Bunlar arasında, karbon fiber takviyeli kompozit (CFRP) malzeme, geleneksel metalik malzemelere kıyasla üstün sönümleme kapasitesi, yüksek özgül sertliği ve yüksek özgül mukavemeti ve elastikiyet modülü nedeniyle ulaşım sektöründe uygulanması için büyük ilgi görmüştür (Kim ve diğ., 2014; Liu ve diğ., 2019). Bu sayısız avantajları nedeniyle CFRP, mekanik performanstan ödün vermeden yapısal parça ağırlıklarının azaltılmasını sağlamıştır. Benzersiz özellikleri nedeniyle karbon fiber

kompozitler, vagon akü muhafazası gibi hafif yapılar geliştirmek için ideal malzemelerdir. Vagon yapılarının ve bileşenlerinin hafif tasarımı, geleneksel vagonların yakıt tüketimini azalttığı ve sonuç olarak yakıt verimliliğini artırdığı için büyük ilgi görmüştür. Yeni hafif malzemelerin kullanımı ve buna bağlı yapısal tasarım optimizasyonu, modern hafif demiryolu vagonları elde etmenin başlıca yollarıdır (Liu ve diğ. 2018).

Genel olarak, akü kutusunun ağırlığı diğer demiryolu vagonu bileşenlerine kıyasla oldukça fazladır, bu nedenle karbon fiber kompozit malzeme kullanılarak optimize edilmiş ağırlık ve sertliğe sahip akü kutusu tasarlamak, demiryolu vagonunun performansını artıracaktır. Yaygın olarak kullanılan metal malzemeler çoğunlukla alüminyum alaşımı, çelik metal, magnezyum alaşımı, titanyum alaşımı vb. olup, bunlar demiryolu ulaşım alanının gereksinimlerini tam olarak karşılayamamaktadır. Sıkı ağırlık azaltma gereksinimleri nedeniyle, metal olmayan malzemeler önemli bir atılım haline gelmiştir; bunlar, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli, iyi hava koşullarına dayanıklı vb. özelliklere sahip aramid fiber kompozit (AFRP), cam fiber takviyeli kompozit (GFRP) ve karbon fiber kompozit (CFRP) malzemelerdir. Bu nedenle, şu anda bu malzemeler havacılık, silah, demiryolu taşımacılığı, rüzgar enerjisi, spor ekipmanları vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu ve diğ., 2019).



Şekil 1.1: Raylı araç akü kutusu örneği (Ecobat Akü Üreticisi).

Akü Kutusunun İşlevi

Batarya muhafazası, çevreyle ilişkili olarak hem dahili hem de harici işlevleriyle bütünsel değerlendirilir. Batarya modüllerini iç ve dış darbelere karşı koruyan sağlam bir kabuk görevi görür. Ayrıca Akünün içinde oluşan ısının korunmasına da yardımcı olur. Güvenlik açısından, muhafaza su geçirmezlik, yanmazlık ve elektrik kaçağı, ısı kaçağı ve elektromanyetik akımlara

karşı yalıtım sağlar. Bakımı kolaylaştırmak için, kolay erişim için tasarlanmıştır ve bir çekme mekanizmasına sahiptir. Ayrıca, muhafaza (kutu), çevresel etkiyi en aza indirmek için sürdürülebilirlik göz önünde bulundurularak üretilmiştir. Kullanıcı güvenliği açısından, kazalarda kullanıcıları korur ve kullanım kolaylığı için ergonomik olarak tasarlanmıştır. Son olarak, tasarım, sorunsuz bir üretim ve montaj sürecine öncelik verir.

1.2. PROBLEM TANIMI

Hafif raylı araçlar, dünya çapındaki büyük metropollerdeki toplu taşıma ağları için giderek daha yaygın bir seçim haline gelmektedir. Bu raylı araçların çoğu çelik ve alüminyum gibi geleneksel malzemelerden yapılmıştır. Bu geleneksel malzemeler maliyet açısından verimli ve çok yönlü olsalar da, karbon fiber kompozitler ulaşım endüstrisinde aşağıdaki çekici özelliklere sahiptir: yüksek mukavemet-ağırlık oranı, hafiflik, korozyon direnci, daha iyi sertlik ve yüksek yorulma direnci. Raylı araçlarda, trende bulunan vagon sayısı arttıkça, pil modüllerinin sayısı da artar. Bu nedenle, pil takımının kütlesi artar ve pil muhafazası üzerinde daha fazla baskı oluşur, bu da sürüş güvenliğini ve güvenilirliğini etkiler. Bu sorunu aşmak için, optimize edilmiş hafif bir tasarım çözümdür.

Yeni tasarlanmış bir vagonun ortaya çıkması, geleneksel pil kutusu tasarımlarıyla ilgili kritik zorlukları çözmek için yenilikçi çözümler gerektirir. Vagonun genel verimliliğini artırmak, yakıt tüketimini azaltmak ve üstün mukavemet, yorulma direnci ve uzun ömürlü hafif malzemelere odaklanmak zorunludur. Ağırlıklı olarak geleneksel malzemelerden oluşan mevcut pil kutusu konfigürasyonları, sadece ağırlığın artmasına katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda yorulmaya eğilimli vagon ortamlarının zorlu taleplerini karşılamada da yetersiz kalır. Temel zorluk, yakıt verimliliğini artırmak için hafif tasarım gerekliliği ile vagon operasyonlarının zorlu koşullarına dayanacak sağlam yapısal bütünlük talebi arasındaki çelişkiyi uzlaştırmaktır.

Bu nedenle, ağırlık, mukavemet ve sertlik gibi faktörleri dikkate alarak kompozit malzemelerin kapsamlı bir şekilde araştırılması gerekmektedir. Genel amaç, akü kutusunun yapısal stabilitesini ve dayanıklılığını sağlayacak ve aynı zamanda yakıt ekonomisini iyileştirmek için vagonun ağırlığını azaltacak yenilikçi bir tasarım ve optimizasyon yaklaşımı geliştirmektir.

1.3. ARAŞTIRMA SORULARI

- ✓ Karbon fiberin özellikleri, üretim teknikleri ve kimyasal içeriği nelerdir?
- ✓ 304 paslanmaz çelik malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri nelerdir?
- ✓ Karbon fiber ile güçlendirilmiş sentetik kompozitlerin mekanik özellikleri nelerdir?
- ✓ Farklı yönlerde düzenlenmiş karbon fiberlerden kompozit bir pil kutusu geliştirmek mümkün müdür?
- ✓ 304 paslanmaz çelik kıyasla, karbon fiber kompozit malzeme daha fazla mekanik mukavemet ve daha hafif bir sonuç mu sağlar?

1.4. AMAÇ

1.4.1 Genel Amaç:

Çalışmanın ana amacı, yeni geliştirilen bir vagonun içine entegre edilmeye uygun, genel verimliliğini ve performansını artıran, 304 paslanmaz çelik metal akü kutusuna göre hafif ve güçlü bir karbon fiber kompozit batarya muhafazası tasarlamaktır.

1.4.2 Özel Amaçlar:

Araştırmanın aşağıdaki özel hedefleri bulunmaktadır:

- ✓ Vagon için sert ve hafif akü kutuları geliştirmek üzere 304 paslanmaz çelik ve karbon fiber kompozitin uygunluğunu değerlendirmek ve karşılaştırmak.
- ✓ Vagonun teknik özellikleriyle uyumluluğu sağlarken güvenlik, sertlik ve yasal gereklilikleri karşılayan kompozit bir akü kutusu tasarlamak.
- ✓ Çalışma koşulları altında 304 paslanmaz çelik ve karbon fiber kompozit akü kutusunun yapısal mukavemeti, yorulma direnci, dayanıklılığı ve modal direncinin simülasyon analizini değerlendirmek.
- ✓ Ağırlığın en aza indirilmesi, performansın iyileştirilmesi ve yapısal bütünlüğü dikkate alarak tasarım parametrelerini değerlendirmek, böylece demiryolu vagonunun yakıt verimliliğini artırmak ve ömrünü uzatmak.

1.5. KAPSAM

Bu çalışma, yakın zamanda geliştirilen bir vagon için tasarlanan hafif ve güvenilir kompozit akü muhafazasının tasarımını ve analizini vurgulamaktadır. Bu çalışmada, karbon fiber takviyeli kompozit akü kutusu ile karşılaştırmak için 304 paslanmaz çelik referans olarak kullanılmıştır.

Vagon, aküyle çalışan elektrik devrelerini beslemek için bir akü grubuna ihtiyaç duymaktadır. 20 akü hücresi tarafından akülerden sağlanacak 24V DC nominal gerilimin sağlanması hedeflenmekte ve akülerin, her biri 5'li 4 hücreden oluşan bir depolama kutusuna (akü kutusu) yerleştirilmesi planlanmaktadır. Akü tipinin Ni-Cd olduğu düşünülmektedir. Akü kutusunda, tüm akülerin çıkarılmasına olanak tanıyan sürgülü bir çekmece mekanizması bulunmaktadır. Bu akü kutusu, vagonun uzunluğu boyunca 5g'lik çarpışma kuvvetini ve 20 akü hücresinin toplam ağırlığını karşılayacak akma dayanımına ve dirence sahip olmalıdır.

Ayrıca, akü depolama kutuları, deformasyon ve ağırlık kriterleri açısından topoloji optimizasyon teknikleriyle geliştirilmiştir. Bu çalışmanın tamamlanmasıyla geliştirilen batarya sandığının bir vagon için standart gereklilikleri karşılaması amaçlanmıştır.

1.6. ÖNEM

Ulaşım sektörünün çoğu, özellikle son zamanlarda yüksek yakıt tüketimi ve maliyetiyle karşı karşıya kalan demiryolu vagonu sektörü, bu çalışmadan faydalanacaktır. Önemli noktalar şunlardır:

- ✓ Karbon fiber kompozit bir akü kutusu geliştirmek, vagonun ağırlığını önemli ölçüde azaltarak yakıt verimliliğinin artırılmasını sağlayabilir.
- ✓ Akü kutusunun optimize edilmiş tasarımı, ağırlık azaltma, sertlik ve güvenlik standartlarını karşılamayı amaçlamaktadır.
- ✓ Akü kutusu gibi kritik bileşenlerde kompozit malzemelerin kullanılması, ulaşım sektöründeki teknolojinin ilerlemesine katkıda bulunur.
- ✓ Sürdürülebilir bir kompozit akü kutusu geliştirmek, vagonun kullanım ömrünü uzatır.

- ✓ Bilim dünyasına, gelecek vaat eden bir aday olarak kompozit akü kutusu hakkında yeni bilgiler sunar.

- ✓ Yakıt verimliliğinin artması ve ömrün uzaması, demiryolu vagonlarının işletilmesinin ekonomik olarak uygulanabilirliğini doğrudan etkiler.

1.7. SINIRLAMALAR

Bu araştırma, esas olarak kompozit ve 304 paslanmaz çeliğin mukavemet analizi ve ağırlık değerlendirmesi ile sınırlıdır. Yorulma analizi, titreşim analizi, termal analiz, darbe analizi ve elektriksel entegrasyon hariç tutulmuştur. Araştırma sonuçları, esas olarak analiz ve simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir. Örnek prototip ve testler yoluyla deneysel doğrulama dahil edilmemiştir. Akü kutusunun gerçek dünyadaki verimliliği, çalışma koşulları ve üretim sapmaları tarafından da etkilenebilir. Simülasyon ve optimizasyon için yüksek performanslı bilgisayarlar bulunmamaktadır. Bu nedenle, simülasyon ve analizler sadece basitleştirilmiş bir tasarım geliştirilerek yapılmıştır.

Diğer bir sınırlama ise, bu konunun yeni olmasıdır; kompozit vagon akü kutuları ile ilgili yeterli ve ilgili referans literatür bulmak zorlaşmıştır. Anizotropik özellikler, doğrusal olmayan gerilme-gerinim ilişkileri ve dış değişkenlere (nem ve sıcaklık gibi) bağımlılık nedeniyle, kompozit malzemeler karmaşık davranışlar sergileyebilir. Bu karmaşıklıklar, pratik uygulamalarda beklenen ve gerçek performans arasında sapmalara yol açabilir.

1.8. ÇALIŞMANIN ORGANİZASYONU

Bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır:

1. Giriş - Bu bölümde, çalışmanın arka planı, problem tanımı, amaçları, önemi, kapsamı, araştırma sorusu ve sınırlamaları belirtilmiştir.

2. Kavramsal Çerçeve- Mevcut batarya teknolojisi, vagon endüstrisi, kompozit malzemeler ve gelişmiş ulaşım sistemleri ile ilgili dergiler, makaleler, tezler ve yayınlar gibi tüm ilgili araştırma makaleleri incelenmiştir. Son olarak, araştırma boşluğu belirtilmiştir.

3. Yöntemler - Malzeme seçimi, kavramsal bilgiler, analiz ve simülasyon stratejisinin kurulumu dahil olmak üzere bu çalışmada uygulanan sistematik yaklaşım gösterilmiştir.

4. Bulgular - SolidWorks'te FEA kullanılarak 3D modelleme ve mukavemet analizi.

5. Tartışma - Akü kutusunun gerilme dağılımı, deformasyonu ve ağırlık değerlendirmesi gibi sonuçların yorumlanması tartışılmıştır.

6. **Araştırmanın sonucu önerileri ve gelecekteki** çalışmalar belirtilmiştir.

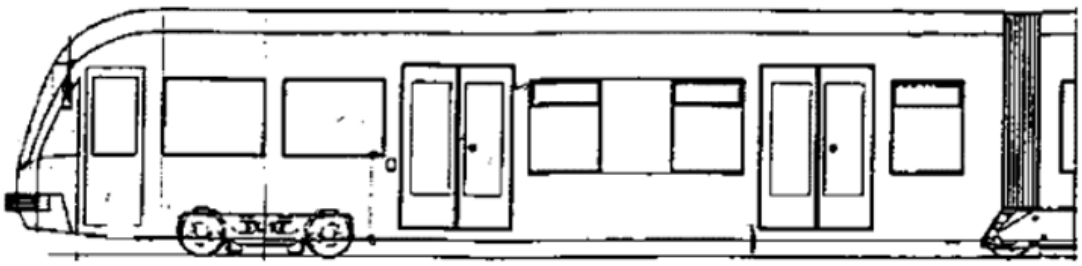
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. GİRİŞ

Bazı ilgili araştırma alanlarında, bugüne kadar vagon, vagon bataryaları, kompozit malzeme ve metal batarya kapağı ile ilgili çeşitli literatür incelemeleri yapılmıştır. Genel olarak, bu bölüm vagon, akü kutuları, kompozit akü kutuları ve kompozit malzemeler hakkında genel bilgilerle ilgili çok sayıda önceki çalışmayı sağlamakta ve bunlara atıfta bulunmaktadır. Modern gelişmiş ulaşım teknolojisi büyük ölçüde kompozit malzemelere dayanmaktadır. Bazen ileri kompozitler, uygulamalarına göre gerekli optimum özelliklere sahip olan "tasarım malzemeleri" olarak adlandırılır. Gelişmiş kompozit malzemeler, özellikle taşımacılık ve havacılık endüstrisi gibi yüksek talep gören endüstrilerde optimum performans ve hafif tasarım sunan günümüzün gelişmiş malzeme teknolojisindeki en iyi malzemelerden biridir.

2.1.1. Vagon

Günümüzde, vagon yaygın bir ulaşım şekli haline gelmektedir (Mohajer ve Mousavi, 2023). Büyük nüfus merkezlerindeki toplu taşıma sistemleri için popüler seçeneklerde yükselen bir trend, hafif raylı araçların (LRV) benimsenmesidir. Bu araçların büyük çoğunluğu şu anda çelik ve alüminyum gibi geleneksel malzemelerden üretilmektedir. Bununla birlikte, genişleyen pazar büyüklüğü, yüksek performanslı kompozit malzemelerin bu araç bileşenlerinin üretimi için cazip bir alternatif olarak ortaya çıkma potansiyeli olduğunu göstermektedir (Harte ve diğ. 2004).



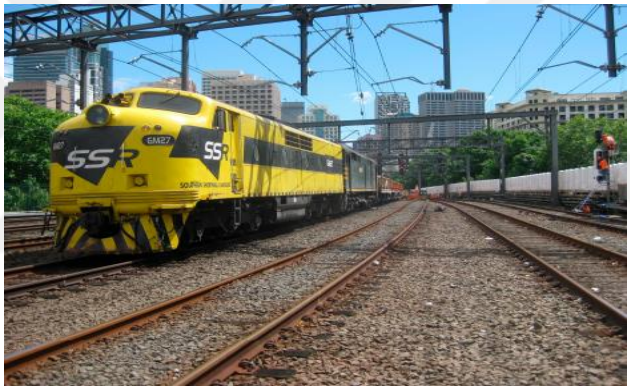
Şekil 2.1: Raylı araç yapısının şematik gösterimi (Harte ve diğ. 2004).

Vagon Türleri

Bunlar, dünyanın dört bir yanındaki demiryolu sistemlerinde bulunan en yaygın vagon türlerinden birkaçıdır; her birinin malların ve yolcuların güvenli ve etkili bir şekilde akışını sağlamaya yardımcı olmak için farklı bir amacı vardır.

2.1.1.1. Yük Trenleri

Uzun mesafelerde toplu taşımacılık söz konusu olduğunda, yük trenleri genellikle karayolunda yük taşımaktan çok daha ekonomik bir seçenektir. Yük trenleri, uzun mesafelerde maksimum miktarda mal taşıyabildikleri için diğer taşımacılık türlerine göre daha rekabetçidir (Favoretto ve diğ. 2017). Demiryolu ağının genişlemesi, yük taşımacılığının pazar payının %5'ten %9'a yükselmesinden de anlaşılacağı üzere, yük taşımacılığının önemini artırmıştır. Ayrıca, kütlenin %80'i çelik ve dökme demirden oluşmaktadır (Woodburn, 2017).



Şekil 2.2:Yük trenlerine örnek (Favoretto ve diğ, 2017)

2.1.1.2. Yolcu Trenleri

Yolcu Yolcu treni, yolcu taşımak için tasarlanmış bir araçtır. Genellikle uzun vagonlara sahiptir ve daha yüksek hızda çalışır. Bu tür vagonlar metro, tramvay, hafif raylı sistem veya kentsel raylı sistem araçlarını içerir. Yolcu vagonlarının geri dönüşüm süreci, yük vagonlarına göre daha karmaşıktır (Favoretto ve diğ. 2017). Ayrıca, bu vagonların bileşenleri çoğunlukla yük trenlerinden farklıdır, özellikle kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır (Lee ve diğ. 2010).



Şekil 2.3: Yolcu treninin iç ve dış görünümleri (Favoretto ve diğ, 2017).

2.1.1.3. Yüksek Hızlı Tren (YHT)

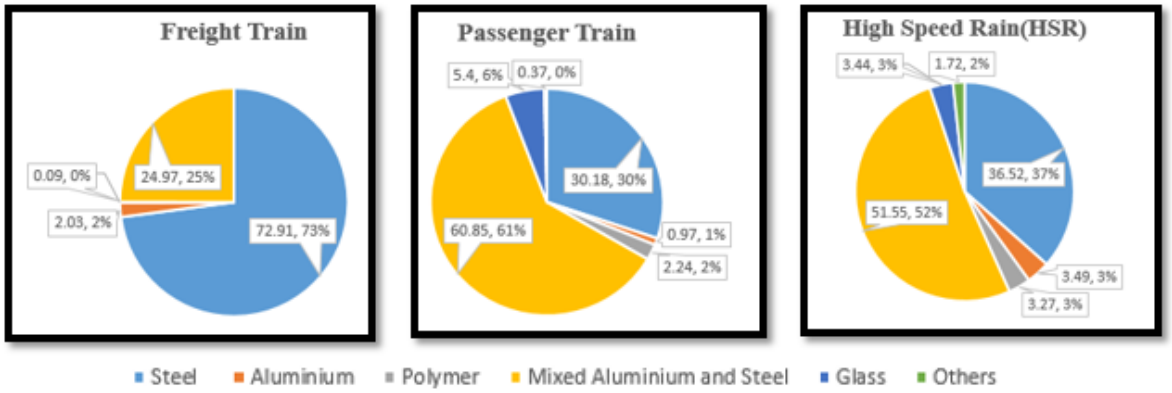
Yüksek Yüksek hızlı demiryolu (YHT), 250 km/saati aşan hızları sürdürecek şekilde tasarlanmış olup yalnızca belirlenmiş hatlar üzerinde çalışmaktadır (Favoretto ve diğ. 2017). Genel olarak YHT, seyahat mesafesi 300 ila 1000 km arasında değiştiğinde, gelişmiş konfor, zaman tasarrufu sağlayan seyahat ve yeni bölgelere erişilebilirlik ile ilgili müşteri ihtiyaçlarını karşılamak için en etkili demiryolu aracı türü olarak öne çıkmaktadır. YHT parçalarının çoğu, yüksek hız kabiliyetleri nedeniyle sürükleme kuvvetlerini azaltmak için silikon karbür ve polipropilen gibi daha hafif malzemelerden yapılmıştır (Kojima ve diğ. 2017).



Şekil 2.4: Farklı hız aralıklarına sahip yüksek hızlı trenler (Favoretto ve diğ. 2017).

Genel olarak, yolcu trenleri, yüksek hızlı demiryolu ve yük trenlerinin kritik bileşenleri için yaygın olarak kullanılan bazı ortak malzemeler vardır; her tren türünün kullanım amacına, performans özelliklerine ve operasyonel taleplerine göre uyarlanmış özel malzeme gereksinimleri vardır; en yaygın malzemeler çelik, alüminyum, karbon fiber, alaşımlar, cam ve

diğdir.



Şekil 2.5: Yolcu trenleri, yüksek hızlı trenler (YHT) ve yük trenlerinin malzeme kullanımları (Kaewunruen ve diğ. 2019).

Maliyetleri ve enerji tüketimini azaltmak, daha hafif ağırlık elde etmek ve yüksek mukavemet ve modül sağlamak, alternatif malzemelerin benimsenmesi için çok önemli kavramlardı. Ulaşım endüstrisi, özellikle elektrikli araçlarda ve uçak bileşenlerinde karbon fiber takviyeli polimeri (CFRP) yaygın olarak kullanmaktadır. Yeni ürünlerin sertliğini artırmak için karbon fiber hammadde olarak kullanılabilir (Kaewunruen ve diğ. 2019).

2.2. AKÜ TEKNOLOJİSİ

Bir vagonun akü sistemi, çeşitli vagon bileşenlerine elektrik gücü sağlamak için kurulur. Örneğin, aydınlatma, iletişim sistemleri ve yardımcı ekipmanlar genellikle vagon aküsü olarak adlandırılır. Ancak son yıllarda "vagon aküsü" ifadesi, demiryolu taşımacılığında alternatif tahrik teknolojileri olarak, özellikle de akülü-elektrikli ve hibrit vagonlarda kullanılan aküleri ifade eder hale gelmiştir. Dolayısıyla, güç bataryası, özellikle motoru çalıştırmak, yardımcı sistemleri çalıştırmak ve yedek güç sağlamak için lokomotifin elektrik enerjisi sisteminin kalbi olarak hizmet vermektedir (Sihui ve diğ., 2022).

Geleneksel tahrik sistemlerine göre daha esnek, verimli ve temiz alternatifler olarak vagon aküleri, demiryolu taşımacılığının modernizasyonu için çok önemlidir. Önümüzdeki yıllarda, aküyle çalışan vagonların daha fazla benimsenmesinin, akü teknolojisinde devam eden yenilik ve yatırımlarla desteklenmesi beklenmektedir. Akü modülleri, akü sisteminin ana bileşenini oluşturan birkaç akü hücresinden oluşur. Akü kutuları, dahili akü hücrelerini harici darbelerden ve yüklerden koruyacak şekilde inşa edilmiştir. Bu çalışmada, batarya modülleri, 20 bataryadan sağlanacak 24 V DC nominal gerilimi sağlamak için seri olarak bağlanmıştır. Pilleri kategorize

etmenin, hücrelerin şekli, reaksiyonun tersine çevrilebilirliği, elektrolit tipi, çalışma prensibi ve uygulama dahil olmak üzere çeşitli yolları vardır.

Yeniden şarj edilebilirlik açısından iki tür batarya vardır. Bunlar birincil ve ikincil pillerdir. Birincil pil şarj edilemez ve tek kullanımlık olarak üretilir. Pilin içindeki kimyasal reaksiyonlar tükendiğinde, yeniden şarj edilemez veya yeniden kullanılamaz. Alkalin piller, lityum piller ve çinko-karbon piller birincil pillere örnek olarak verilebilir. İkincil piller, çok sayıda şarj ve deşarj döngüsüne sahip enerji depolama cihazlarıdır. İkincil piller, tek kullanımlık olan ve yeniden şarj edilemeyen birincil pillerin aksine, harici bir elektrik güç kaynağı kullanılarak kimyasal süreçler tersine çevrilerek yeniden kullanılabilir. İkincil pillere örnek olarak nikel-kadmiyum, kurşun-asit, lityum-iyon ve nikel-metal hidrit piller verilebilir. Elektrikli arabalar, yenilenebilir enerji depolama sistemleri ve taşınabilir cihazlar dahil olmak üzere farklı alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadırlar.

Tablo 2.1: İkincil batariya sistemlerine genel bakış (Petrovic, 2021).

Batariya sistemi	**Voltaj (V)**	**Anot**	**Katot**	**Elektrolit**
Lityum iyon	4.0	Li(C)	$LiCoO_2$	$LiPF_6$
Kurşun-asit	2.0	Kurşun	PBO_2	$Aq.H_2SO_4$
Nikel-Kadmiyum	1.2	Kadmiyum	NiOOH	Aq.KOH
Nikel-metal hidrit	1.2	MH	NiOOH	Aq.KOH

Yapısal şekline göre, en sık kullanılan çeşitli batarya hücresi tipleri vardır; bunlar arasında madeni para, kese, prizmatik ve silindirik hücreler bulunur. Hem yüksek hem de düşük kapasiteli hücreler silindirik hücre olarak sınıflandırılır. Yüksek kapasiteli silindirik hücreler yüksek empedansa sahip olduğundan, uygulamaların çoğunda düşük kapasiteli hücreler kullanılır. Prizmatik hücrelerin yüksek kapasiteleri nedeniyle, gerekli kapasiteye sahip bir batarya takımı oluşturmak için daha az sayıda hücrenin birbirine bağlanması gerekir; bu da sistemin genel kararlılığını artırır (Chen ve diğ. 2021).



a) b) c)

Şekil 2.6: Çeşitli batariya hücresi şekilleri; a) silindirik hücre, b) dikdörtgen prizmatik hücre, c) kese hücre (Gerlitz ve diğ. 2021).

Tablo 2.2: Bazı yaygın batariya depolama teknolojileri (Nima ve diğ. 2017).

Akü Çeşitleri	**Özellikleri**
Nikel Kadmiyum (Ni-Cd)	- Uzun kullanım ömrü - Yüksek güvenilirlik - Düşük kendi kendine deşarj - Üstün dayanıklılık - Çeşitli çalışma sıcaklıklarına dayanıklılık - Yüksek görev uygulamaları için yetkin - Bir dezavantajı ise, nihai bertarafın çevre için tehlikeli olması ve hafıza etkisine sahip olmasıdır.
Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH)	- Ni-Cd pil ile aynı elektrot konfigürasyonuna sahiptir; sadece negatif elektrot olarak kadmiyum yerine hidrojen kullanılmıştır. - Çevre kirliliği ve hafıza etkisi yoktur. - Daha iyi özgül enerji ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak **Aşırı şarj olduğunda** - Akü aşırı ısınır ve yangın tehlikesine neden olur. - Karmaşık şarj devreleri gerektirir. **Deşarj olduğunda** - Yüksek akım gerektirir, bu nedenle kullanım ömrü önemli ölçüde kısalır (200-300 döngü).

Tablo 2.2 (devam) :

Lityum İyon (Li-İyon)	- Özellikle basit taşınabilir cihazlarda ve elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan bataryadır. - Ni-Cd ve Ni-MH ile karşılaştırıldığında yüksek hücre voltajına, yüksek elektrik yoğunluğuna ve uzun ömre sahiptir. - Çevresel ve hafıza etkisi yoktur. - Bir dezavantaj olarak, Ni-Cd ve Ni-MH ile karşılaştırıldığında nispeten pahalıdır.

2.2.1. Nikel-kadmiyum Batarya

Bu araştırmada, nikel-kadmiyum piller pil kutusunun içinde saklanmıştır. Nikel-kadmiyum piller, birçok durumda gösterdikleri üstün performans nedeniyle çok çeşitli kullanımlar için oldukça caziptir (Petrovic, 2021). Oksidasyonun gerçekleştiği anot olarak kadmiyum (Cd) ve katot olarak nikel hidroksit (NiOOH) kullanan, şarj sırasında indirgemenin gerçekleştiği ve deşarj sırasında tam tersi olan şarj edilebilir bir pildir (Jeyaseelan ve diğ. 2020).

Genel olarak, nikel-kadmiyum piller ve hücreler, son derece güçlü mekanik tasarımları nedeniyle sert kullanım ve ciddi mekanik hasarı tolere edebilir. Hücre kaplarını üretmek için yüksek etkili plastik veya çelik kullanılır. Bu sayede hücrenin hiçbir bileşeni elektrolit tarafından saldırıya uğramadığından, pilin gücünün zaman içinde azalma ihtimali yoktur. Ayrıca nikel-kadmiyum piller mükemmel sıcaklık direncine sahiptir. Bu piller 70°C gibi yüksek sıcaklıklarda bile mekanik hasara karşı dayanıklıdır (Linden ve Reddy, 2002).

Şarj sırasında, pozitif elektrottaki Ni(OH)2, NiOOH'ye ve daha yüksek nikel değerlik sayısına oksitlenir. Potasyum hidroksit gibi, potasyum ve su da aşağıdaki denkleme göre aktif maddeye dahil edilir:

$$Ni(OH)_2 + xK^+ + (1 + x)OH^- = NiOOH \bullet xKOH \bullet (H_20) + e \quad (2.1).$$

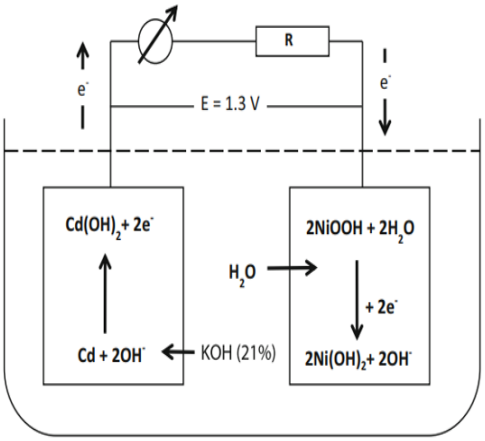
x, nikel oksihidroksit kafesine bağlanan potasyum kısmının bir temsilidir. Değer ihmal edilebilir (çok daha az) ve üretim tekniklerine bağlı olarak değişir.

Negatif elektrottaki $Cd(OH)_2$ şarj sırasında metalik kadmiyuma indirgenir:

$Cd(OH)_2 + 2e = Cd + 2OH^-$ .....(2.2).

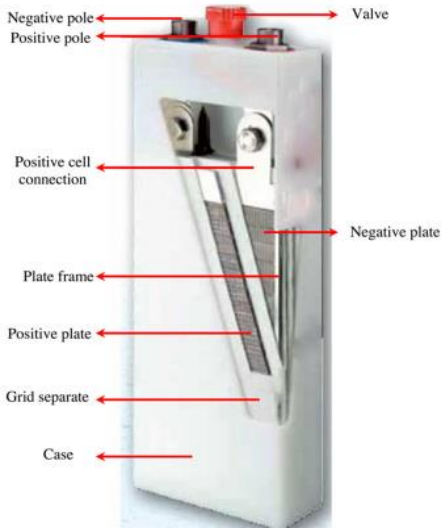
Bu nedenle genel şarj-deşarj reaksiyonu şöyledir:

$2Ni(OH)_2 + 2xKOH + Cd(OH)_2 \underset{Deşarj}{\overset{şarj}{\rightleftharpoons}} 2NiOOH \bullet xKOH \bullet (H_20) + Cd$ ……..... (2.3).



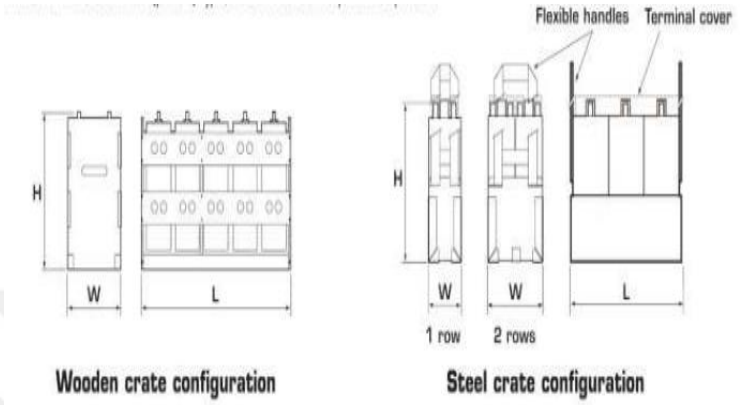
Şekil 2.7: Ni-Cd pil hücresinin ve şarj sürecindeki kimyasal reaksiyonun grafiksel gösterimi (Petrovic, 2021).

Ni-Cd bataryada deşarj reaksiyonu sırasında, kadmiyum negatif elektrotta $Cd(OH)_2$ ve elektronlar oluşturmak üzere oksitlenir.



Şekil 2.8: Ni-Cd pil hücresinin bileşenleri (Aktaş ve Kirçiçek , 2021).

Ni-Cd Bataryanın Genel Özellikleri Bunlar, her biri benzersiz özelliklere ve işlevlere sahip birkaç popüler batarya depolama yöntemidir. Batarya teknolojisinin seçimi, enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, maliyet, güvenlik, çevresel etki, hafıza etkisi ve uyggulamaya özel ihtiyaçlar dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere çeşitli hususlara bağlıdır.



Şekil 2.9: Ni-Cd batarya hücrelerinin standart genel boyutları ve düzenlemesi.

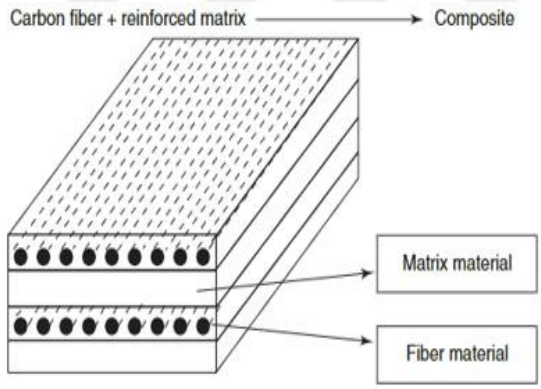
2.3. TAŞIMACILIKTA KOMPOZIT MALZEMELER

Kompozitler, mikroskobik düzeyde yakın etkileşim içinde olan iki veya daha fazla katı faz içeren heterojen malzemelerdir. Elyaf takviyeli kompozitlerde, takviye sentetik veya doğal olarak kategorize edilebilir (Gupta ve Srivastava, 2021). Kompozitin en yaygın kullanılan tanımı, Jartiz tarafından ifade edilen şu tanımdır: "Kompozitler, herhangi bir ayrı malzemeden elde edilemeyen özellikler sağlayan çok işlevli malzeme sistemleridir. Kompozitler, iki veya daha fazla uyumlu malzemenin fiziksel olarak bir araya getirilmesiyle oluşturulan, bileşimleri ve özellikleri ve bazen de biçimleri farklı olan uyumlu yapılardır."

Kompozit malzemeler ulaşımla ilgili birçok bileşenin tasarımında ve üretiminde kullanılmaktadır. Kompozit malzeme, otomotiv endüstrisinin çoğunluk bileşenni için en uygun malzemelerden biridir. Şu anda, ağırlığa özgü üstün mekanik performansı nedeniyle, kompozit malzemeye yönelik çok fazla ilgi vardır. Daha iyi korozyon direnci, ağırlık tasarrufu, daha iyi ısı yalıtımı ve geleneksel metal bazlı batarya depolamaya göre bir dizi başka avantaj için ideal bir adaydır (Höhne ve diğ. 2023). Çoğunlukla, elyaf takviyeli kompozit malzeme mekanik özellikleri şu şekilde tanımlanır

- ✓ Matris malzemesi
- ✓ Fiber oryantasyonu ve uzunluğu
- ✓ Fiber ve matrisin hacim yüzdesi
- ✓ Takviye edici fiber türü.

Ayrıca, üretim yöntemi ve proses parametreleri, elde edilen elyaf takviyeli kompozit malzemenin genel davranışı üzerinde etkilidir. Elyaf takviyeli kompozit malzemenin benzersiz özellikleri taşımacılıkta hızlı bir uygulama artışına yol açmaktadır (Ning ve diğ. 2007). Bazı yaygın örnekler arasında karbon fiber, seramik kumaşlar, polimerik fiberler, bazalt fiberler ve cam fiberler ön plana çıkmaktadır. Karbon fiber kompozitler ulaĢım ve diğer sektörlerde büyük ölçüde uygulanabilir. Çünkü düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet ve modül, korozyona karşı direnç ve kapsamlı tasarlanabilirlik gibi birçok avantajlı özelliğe sahiptirler. Düşük yoğunlukları ve yüksek yüzey-ağırlık oranları nedeniyle, karbon bazlı dolgu maddeleri özellikle hafif uygulamalar için çok uygundur. Üstün iletkenlikleri ekranlama etkinliğini artırır. Bununla birlikte, manyetik olmayan yapıları nedeniyle yetersiz manyetik ekranlama ortaya çıkabilir.

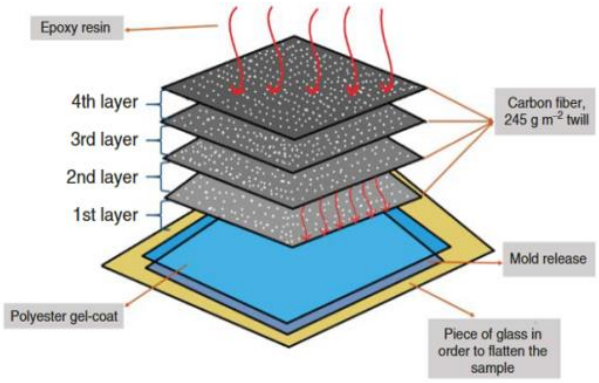


Şekil 2.10: Fiber ile güçlendirilmiş bir kompozit malzeme matrisinin şematik yapısal gösterimi (Ghosh ve diğ. 2022).

2.3.1. Kompozit Elyafların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Genel olarak, bir malzemenin özellikleri, mekanik yüke tepki, sıcaklık değişimine tepki, kimyasal reaksiyona tepki ve diğ gibi farklı koşullara yanıt vererek bir malzemeyi tanımlayan benzersiz davranışlardır. Bu çalışmada, malzemenin mekanik özellikleri ana odak noktasıdır. Bir malzemenin yüklere tepki olarak gösterdiği özelliklerdir. Elyaf içeriği, bir dizi değişken tarafından düzenlenen mekanik özelliklerden birincil olarak sorumludur. Ayrıca, en-boy oranı, elyaf-matris bağı, elyaf düzenlemesi, ara yüzeydeki yük transferi ve elyafların hacim oranı, kompozitlerin genel özelliklerini etkileyen kompozit malzemelerdeki kontrol

faktörleridir (Saheb ve Jog, 1999). Gelişmiş kompozit malzemeler belirli uygulamalar için özel niteliklerle oluşturulmuştur. Bu nedenle, kısıtlayıcı faktörlerin doğru bir şekilde incelenmesi ve anlaşılması çok önemdir.



Şekil 2.11: Karbon fiber takviyeli kompozit (Ghosh ve diğ. 2022).

2.3.1.1 Sentetik Kompozit Malzemeler

Sentetik elyaf, bir üretim süreciyle geliştirilen bir elyaf türüdür. Bu yüzden "insan yapımı elyaf" olarak adlandırılır. Önemli ölçüde farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla laboratuvarda geliştirilmiş kurucu malzemeden geliştirilen malzemelerle tasarlanmıştır. Sentetik elyaf, elyaf takviyeli kompozit sentezlemek için temel bir elyaf türü olduğundan, bu elyafa olan talep dünya çapında artmaktadır. Olağanüstü nitelikleri nedeniyle, hafif, ayırt edici kompozit malzemeler pazarı genişledikçe SF'ler giderek daha gerekli hale gelmektedir (Rajak ve diğ. 2022).

Sentetik elyaf, düşük kesitli ve yüksek uzunluk-kalınlık oranına (en-boy oranı) sahip elastik, mikroskobik olarak simetrik bir malzemedir. Bu bileşenler bir araya getirildiğinde, bileşenlerinden herhangi biriyle ayrı ayrı mümkün olmayan gelişmiş veya benzersiz özelliklere sahip yeni bir madde üretilir. Kompozit malzemede bileşenler, yani matris fazı ve takviye fazı, üretim sürecinde birleşir. Bazen bunları birbirine bağlamak ve aralarındaki etkileşim bağını artırmak için özel katkı maddeleri kullanılır.

Takviye, elyaf ya da parçacık formunda olabilir. Bu insan yapımı kompozit, mukavemet, sertlik, tokluk ve dayanıklılık gibi belirli performans gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmıştır. Hafif yapıları, yüksek mukavemet-ağırlık oranları, korozyon direnci ve diğer istenen özellikleri nedeniyle tekstil ve ayakkabı (Ahmad ve Zhou, 2022), havacılık, otomotiv,

inşaat, denizcilik, spor malzemeleri ve elektronik (Gupta ve diğ. 2021) dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sentetik kompozit malzemelere örnek olarak karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), fiberglas takviyeli plastikler ve aramid (ör. Kevlar) verilebilir.

Tablo 2.3: Sentetik elyafın en yaygın mekanik özellikleri (Ahmad ve Zhou, 2022).

Fiber türleri	Özgül ağırlık/yoğunluk	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastik modül (GPa)	Nihai uzama (%)
Akrilik	1.17	207-1000	14.6-19.6	7.5-50
Aramid I	1.44	3620	62	4.4
Aramid II (Yüksek modüllü)	1.44	3620	117	2.5
Naylon	1.16	965	5.17	20
Polyester	1.34-1.39	896-1100	17.5	20
Polietilen	0.96	200-300	5	3
Polipropilen	0.9-0.91	310-760	3.5-4.9	15
Royon	1.5	420-630	7	10-25
Taş Yünü	2.7	490-770	70-119	0.6
Çelik	7.8	280-2800	203	0.5-3.5
Karbon	1.9	1800-2600	230-380	0.5
Cam	2.5	1050-3850	70	1.5-3.5

2.4. KOMPOZIT ÜRETIM TEKNIKLERI

Kompozit malzemelerden biri olan karbon elyaf takviyeli kompozit, çeşitli üretim teknikleri ile üretilebilmektedir. Bu teknikler temel olarak iki ana kategoride sınıflandırılır: bunlar

Aşağıdakiler gibi kapalı kalıplama teknikleri

- Sıkıştırma kalıplama
- Reçine transfer kalıplama

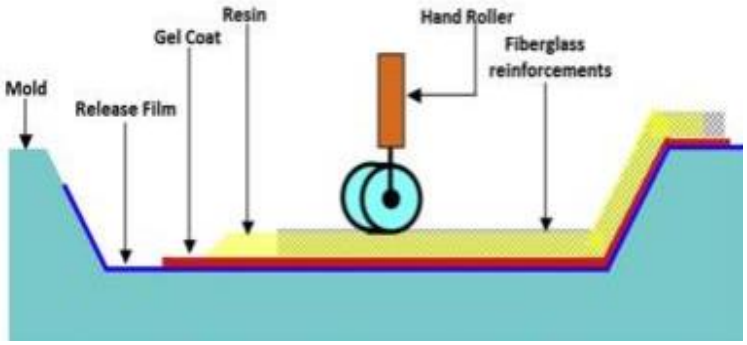
Açık kalıplama teknikleri şunları içerir

- Elle Yerleştirme Yöntemi
- Vakum torbalama yöntemi
- 3D eklemeli üretim yöntemi
- Otoklav kalıplama yöntemi
- Çıkıntı yöntemi.

Günümüzde, CFRP üretiminin çoğunluğu, birçok uygulaması nedeniyle yaygın olarak kullanılan ve popülerlik kazanan eklemeli üretim veya 3DP kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

2.4.1. Elle Yerleştirme Yöntemi

El yatırma işlemi, kompozit malzeme üretmek için kullanılan en basit ve geleneksel yöntemlerden biridir (Abdurohman ve diğ. 2018; Balasubramanian ve diğ. 2018). Basit ve doğrudan bir adıma sahiptir ve kompozit malzemeyi üretmek için bazı temel araçlara ihtiyaç duyar. Ancak, yalnızca termoset plastiklere uygulanabilir. Üretim süreci adımları aşağıdaki gibidir: İlk olarak, karbon fiber levhalar, gerekli kalınlığa ulaşılana kadar önceden belirlenmiş yönlerde katman katman manuel olarak yerleştirilir. Matris reçinesi, gerekli etkileşim bağını sağlamak için katmanlar arasına uygulanır. Üretim süreci parametrelerinin ürünlerin nihai kalitesi üzerinde etkisi vardır: matris hacim oranı, kürlenme süresi, işlem sıcaklığı ve katalizör. Bu teknik, hibrit ve hiyerarşik kompozit yapıları imal etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Sayam, ve diğ. 2022).



Şekil 2.12: El yatırması üretim teknikleri (Abdurohman ve diğ. 2018).

2.4.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTM)

Reçine Transfer Kalıplama (RTM), düşük viskoziteli termoset reçinenin bir kalıba doğrudan enjekte edildiği bir tür kapalı kalıplama işlemidir. Bu teknik, reçine dağılımının doğru bir şekilde kontrol edilmesini ve elyaf katmanlarının tam olarak emdirilmesini sağlar. Üretim

aşamaları başlar, ilk olarak takviye elyafları kalıpta gerekli geometriye göre bir "preform" olarak düzenlenir. Isıtılmış reçine daha sonra basınç altında kalıp boşluklarına enjekte edilir. Reçine kürlendikten sonra, nihai ürün kalıptan kolayca çıkarılabilir. Gelişmiş mukavemet ve dayanıklılığa sahip nihai parça, otomotiv ve havacılık gibi farklı endüstrilerdeki çeşitli uygulamalar için idealdir. Seri üretim ve mükemmel yüzey kalitesi için RTM ideal üretim yöntemi olarak düşünülebilir.

Geleneksel el yatırması ile karşılaştırıldığında RTM, el işçiliğini azaltır ve sıkıştırmalı kalıplamaya göre daha ekonomik bir kurulum sunar (Balasubramanian ve diğ. 2018). RTM gelişmiş kompozitler oluşturmak için etkili olsa da, Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM) genellikle basitliği nedeniyle tercih edilmektedir. VARTM, sert takımlara ve yüksek enjeksiyon basınçlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak reçine infiltrasyonunu iyileştirir ve boşlukları en aza indirir.

Temel işleme parametreleri arasında reçine akışı ve enjeksiyon özellikleri, enjeksiyon basıncı, kalıp ve kalıptan çıkarma verimliliği ve kürlenme süresi yer alır. RTM öncelikle karbon elyaf takviyeli polimerlerin (CFRP'ler) yanı sıra hiyerarşik kompozitlerin geliştirilmesi için kullanılmaktadır (Sayam ve diğ. 2022).

2.4.3. Sıkıştırmalı Kalıplama Yöntemi

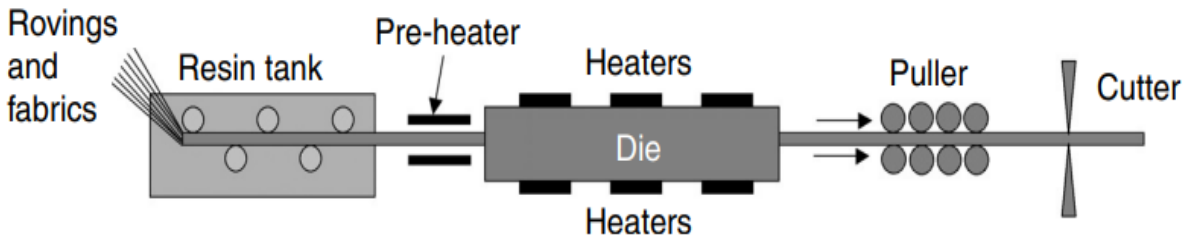
Bu yöntem, malzemenin iki kalıp arasında sıkıştırılmasını içeren en eski yöntemlerden biridir. Kompozit malzeme üretimi için uygundur (Balasubramanian ve diğ. 2018). Sıkıştırma kalıplama, kısa döngü süresi nedeniyle tercih edilir ve boyutsal doğruluğu korurken yapıda daha yüksek darbe dayanımı sağlar. Üretim. Teknik, aşağıdaki gibi üç temel adımdan oluşmaktadır:

- Hammaddenin kalıba yüklenmesi
- Sıkıştırma
- Üretilen parçaların sökülmesi

Sıkıştırma kalıplama, imalatın yüksek sıcaklıklarda veya oda sıcaklıklarında gerçekleştirilmesine bağlı olarak sıcak veya soğuk bir işlem olabilir. CFRP'de daha iyi mekanik performans elde etme arayışında, son zamanlarda, hem RTM hem de sıkıştırma kalıplama işlemlerinin en uygun kombinasyonunu sağlayan ve tamamen sıkıştırma-reçine transfer kalıplama olarak bilinen bir teknik geliştirilmiştir (Sayam ve diğ. 2022).

2.4.4. Pultrüzyon

Pultrüzyon, tutarlı boyutlara ve tek tip kesitlere sahip kompozitler üretmek için kullanılan sürekli bir üretim yaklaşımıdır. Sürekli, yüksek otomasyon seviyesi ve mükemmel üretim verimliliği nedeniyle kompozit endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Joshi, 2012). Pultrüzyon üretim tekniği Şekil 2.13'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13: Pultrüzyon prosesinin üretim aşaması (Joshi, 2012).

Şekil 2.13'te gösterildiği gibi, kalıbın sabit şekli nedeniyle, pultrüzyon parçaların geometrisi sınırlıdır ve bu da önemli bir dezavantaj olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu yöntem, maliyet etkinliği, yüksek düzeyde otomasyon, yüksek üretim hızı, enerji verimliliği ve yüksek elyaf hacim oranı (FVF) ve hassas boyut toleransları elde etme yeteneği gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Elde edilen CFRP bileşenlerinin kalitesi büyük ölçüde kalıp sıcaklığına ve elyafların içinden geçme hızına bağlıdır (Sayam ve diğ. 2022).

2.4.5. Eklemeli Üretim (3D baskı) Yöntemleri

Gerekli özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimi için ideal olan en son teknolojilerden biri 3D baskı yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Eklemeli üretim olarak da bilinen 3D baskı, gelişmiş üretim yöntemlerinden biridir (Sumithra ve diğ, 2023).

Bilgisayar tasarım araçları, istenen şekilleri elde etmek için esas olarak işleme veya kesmeye odaklanan geleneksel kompozit üretim tekniklerinin aksine, eklemeli üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji, kaynaşmış biriktirme modelleme (FDM), seçici lazer sinterleme (SLS), stereolitografi (SLA) ve lamine nesne üretimi (LOM) dahil olmak üzere çok çeşitli yöntemleri kapsamaktadır (Bikas ve diğ. 2015). 3D baskıdaki temel üretim parametreleri, nihai çıktı sonucunu etkileyen şekillendirme basıncı, fiber içeriği, nozul ve yatak sıcaklıkları, dolgu deseni, katman yüksekliği ve baskı hızını içerir (Sayam ve diğ. 2022).

Tablo 2.4: Farklı CFRP üretim yöntemlerinin özeti (Balasubramanian ve diğ. 2018: Abdurohman ve diğ. 2018: Almushaikeh ve diğ. 2023).

Üretim Teknikleri	Avantaj	Dizavantaj	Uygulama
El yatırması	En kolay ve en uygun fiyatlı	- İlave son işlem gerektirir - Büyük ölçekli üretim için ideal değildir - Emek yoğun	Tekne göve diğeleri, rüzgar türbini kanatları, otomobil göve diğe panelleri ve büyük ölçekli yapısal prototipleme.
Sıkıştırma	- Yüksek mukavemet sağlar - Karmaşık bileşenleri büyük hacimlerde üretebilir - Mükemmel boyutsal stabilite - Minimum fire	- Çukurlaşma ve dalgalanma gibi kötü yüzey kalitesi - Sadece termoset malzeme ile sınırlıdır - Boşluklar, kabarcıklar gibi potansiyel kusurlara maruz kalır, delaminasyon, lavabo işaretler, artık gerilme ve elyaf ayrıştırma	Spoylerler, kaputlar, çamurluklar, tampon kirişleri ve ön uç modülleri gibi otomotiv parçaları.
Pultrüzyon	- Gelişmiş otomasyon - Tutarlı kesit profilleri sağlar - Yüksek verimlilik ve kalite sunar - İşçilik maliyetlerini azaltır - Büyük ölçekli üretim için idealdir	- Daha yüksek başlangıç maliyeti - Sınırlı tasarım esnekliği - Sabit uzunlamasına kesit - Tek yönlü fiber ürünler için enine yönde zayıflık	- Araçların karmaşık bileşenleri, uçak bileşenleri, spor (kayaklar, hovel konstrüksiyonları, golf sahası bayrak çubukları), deniz inşaatı

Tablo 2.5 (devam):

Katmanlı üretim	- Ihmal edilebilir malzeme atığı - Yüksek dayanıklılık ve mekanik mukavemet - Yüksek otomasyon Süreç - Parça için kesme ve takımlama gibi ara süreçler yoktur.	- Düşük üretim hızı, yüksek hacimli üretim için uygun değil - Boşluk oluşumuna yatkın - Küçük olmaları nedeniyle ayrılan parçaların birleştirilmesinde zorluk temas alanı - Kalifiye işgücü gerektirir - Anizotropik yapı nedeniyle düşük mekanik performans	Bisiklet çerçeveleri, otomobiller, rüzgar, havacılık ve uzay enerjisi ve prototipler
Reçine transfer kalıplama	- Atıkları en aza indirir -Karmaşık ürünler üretir gerekli detaylara sahip küçük parçalar	- Yavaş kürlenme süreci - Reçine transferi sırasında olası elyaf yanlış hizalanması - Tutarsız tekrarlanabilirlik - Düşük viskoziteli reçinelerle sınır - Uzun üretim teslim süresi	Havacılık ve uzay türbini kanadı, kamyon panelleri, rüzgar teknesi ve göve diğeleri

Bu nedenle, uygulama alanına bağlı olarak, yukarıda bahsedilen yaygın olarak kullanılan CFRP üretim tekniklerinin her birinin kendi avantajı vardır. Örneğin, reçine transfer kalıplama (RTM) en fazla tasarım esnekliğini sağlar, sıkıştırma kalıplama en düşük takım maliyetlerini sunar, enjeksiyon kalıplama verimliliği ile dikkat çeker ve filament sarma en yüksek kalitede parçalar üretir.

2.5. KARBON FİBER

Karbon kompozit, karbon fiber ve takviye edici matris reçineden yapılan sentetik bir kompozittir. Karbon-karbon kompozitlerin üretimi ilk olarak 1950'lerin sonunda rapor edilmiş

ve o dönemde alternatif bir malzeme olarak kullanılmıştır. Uzay mekiği programıyla ilişkili bir NASA araştırma çabası olarak karbon elyaf ilk kez 1960'ların sonunda kullanılmıştır. Günümüzde, karbon elyaf takviyeli kompozitler, yüksek özgül sertlik ve mukavemetleri, düşük yoğunlukları, olağanüstü tasarım esneklikleri ve enerji emme kapasiteleri nedeniyle demiryolu aracı tasarımında kullanım için giderek daha popüler hale gelmiştir. Geleneksel metal malzemelerin aksine, CFRP kompozitler anizotropik özellikler, karmaşık arıza süreçleri ve karmaşık dış yüklemeler altında karmaşık hasar gelişimi sergiler (Liu ve diğ. 2018).

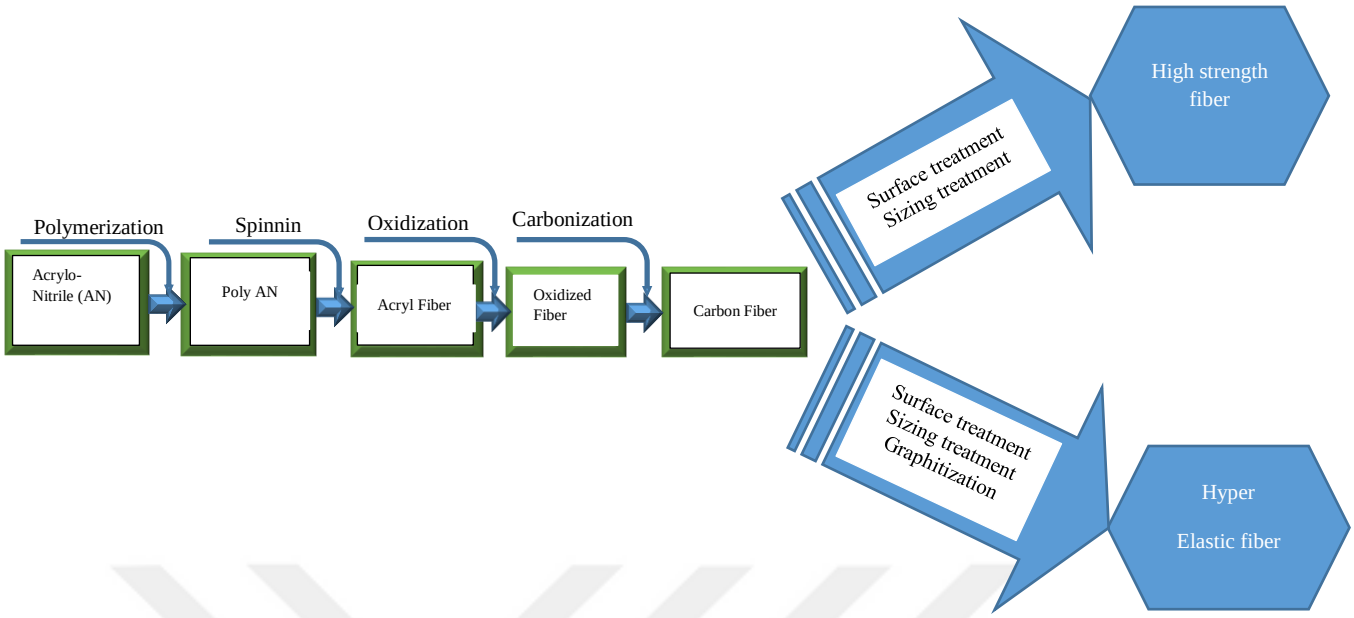
Modern gelişmiş kompozitler, geleneksel malzemelerden önemli ölçüde daha güçlü ve daha sert olan elyaflar kullanır. Termoset kompozit malzemeler oluşturmak için çok sayıda karbon elyaf kullanılmaktadır. Vinil ester, polyester, poliimid, fenolik, epoksi ve siyanat ester gibi termoset reçineler, karbon fiberlerle güçlendirilmiş polimerlerin kompozitleri için polimer matrisleri olarak kullanılabilir. Karbon fiber Şekil 2.14'te gösterildiği gibi çeşitli yapılarda geliştirilebilir.



Şekil 2.14: Lifli yapılarda karbon (Park, 2018).

2.5.1. Karbon Fiber Üretimi

Karbon elyafların çoğunluğu PAN süreci ile gelişir; geri kalanı ise petrol zifti veya rayondan elde edilir (Hsissou ve diğ. 2021). Bu nedenle, karbon elyaf PAN veya zift bazlı olabilir. PAN bazlı elyaf, hammadde olarak rayon, zift veya poliakrilonitril kullanılarak yapılabilir (Morgan, 2005; Park, 2018). Karbon elyaf yapımında en yaygın kullanılan öncü madde PAN'dır. Tipik olarak, akrilonitril ve metil metakrilat, metakrilik asit vb. gibi komonomerlerinden üretmek için polimerizasyon kullanılır. Öncül maddeyi 220-270°C gibi düşük bir sıcaklığa kadar ısıtmak için sıcak hava kullanılır. Sıcak havanın iki amacı vardır: egzoz bileşenlerini giderir ve yanma için oksijen sağlar (Ghosh ve diğ. 2022).



Şekil 2.15: PAN bazlı karbon elyaflar için üretim yöntemi (Park, 2018).

Tablo 2.6: Çeşitli üretim yöntemlerine sahip karbon elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri (Rajak ve diğ. 2022).

Fiber Türleri	Prekürsör malzeme	Yoğunluk (kg/m3)	Çekme mukavemeti (GPa)	Azim (GPa)	Young's Modül (GPa)	Maksimum Uzama (%)
HTS	PAN	1760	3-5	2.8-4	200-250	1.2-1.4
UHTS	PAN	1820	-	4.1-5.7	260-290	0.8-1.0
LM	Saha	1500	2-4	0.6-1.0	200-250	2.0-5.0
IM	Saha	1780	4-7	-	250-350	1-2
HM	PAN/Mezofaz Saha	1820	2-4.5	1.7-3.5	350-450	0.6-0.7
UHM	Mezofaz aralığı	2100	3	2.1-2.4	520-550	0.3-0.4

2.5.2. Karbon Fiber Uygulaması

Karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) malzemelerin kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir. CFRP'ler üstün özgül mukavemetleri, yüksek sertlik-ağırlık oranları ve korozyona karşı üstün dirençleri ile geleneksel malzemelerden ayrılırlar. Son yıllarda, CFRP'ye olan talep dünya çapında katlanarak artmıştır. Karadan havaya ve basit oyuncaklardan devasa uzay araçlarına

kadar çeşitli uygulama alanlarında hızla benimsenmeleri, artan önemlerini vurgulamaktadır. Özellikle havacılık, savunma ve otomotiv sektörlerinde bu malzemeler, hafif yapıları nedeniyle geleneksel metallerin yerini alarak endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, CFRP'lerin talebi ve üretimi önemli bir büyüme göstermiştir (Wang ve diğ. 2023).

Karbon elyaf kompozitler otomobil, uzay ve havacılık endüstrileri gibi bir dizi endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Karbon elyaf kompozitlerin bazı yaygın uygulamaları Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16: Karbon fiber kompozit malzemelerin ileri teknolojideki kapsamlı uygulamaları (Park, 2018).

En tipik karbon elyaf kompozitlerin temel fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.6'de listelenmiştir. Karbon elyafların bu mekanik ve fiziksel özellikleri, çeşitli kaynaklardan toplanan ortalama değerlerdir. Çoğunlukla karbon elyaf, matris olarak epoksi gibi ısıyla sertleşen bir matris kullanır.

Tablo 2.7: **Karbo fiber takviyeli epoksi reçine kompozit (T300 / 5208) özellikleri.**

Özellikler	Sembol	Değerler
X eksenindeki elastik modül	Ex	162 GPa
Y eksenindeki elastik modül	Ey	149 GPa
Z eksenindeki elastik modül	Ez	149 GPa
Poisson oranı in XY	ν_{12}	0.286

Tablo 2.6 (devam):

Poisson oranı YZ	ν_{23}	0.386
Poisson oranı XZ	ν_{13}	0.283
Kesme modülü XY	G_{12}	5.7 GPa
Kesme modülü YZ	G_{23}	5.4 GPa
Kesme modülü XZ	G_{13}	5.7GPa
Yoğunluk	ρ	1760 kg/m^3
X'te çekme mukavemeti	X_t	1.76 GPa
Y'de çekme mukavemeti	Y_t	80 MPa
X'te basınç dayanımı	X_c	1.57 GPa
X'te basınç dayanımı	Y_c	80 MPa
X'Yde kesme mukavemeti	S	98

Bu çalışmada, T300 karbon fiber ve 5208 epoksi reçinesinden oluşan bir kompozit malzeme kullanılmıştır. Epoksi reçine içeriğinin ağırlıkça yaklaşık %35-40, yani hacimce yaklaşık %38 olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, karbon fiber (T300) içeriği ağırlıkça yaklaşık %60-65 olarak hesaplanmıştır. Tablo 2.7'de özetlenen malzeme özellikleri, bu ağırlık oranına göre elde edilmiştir.

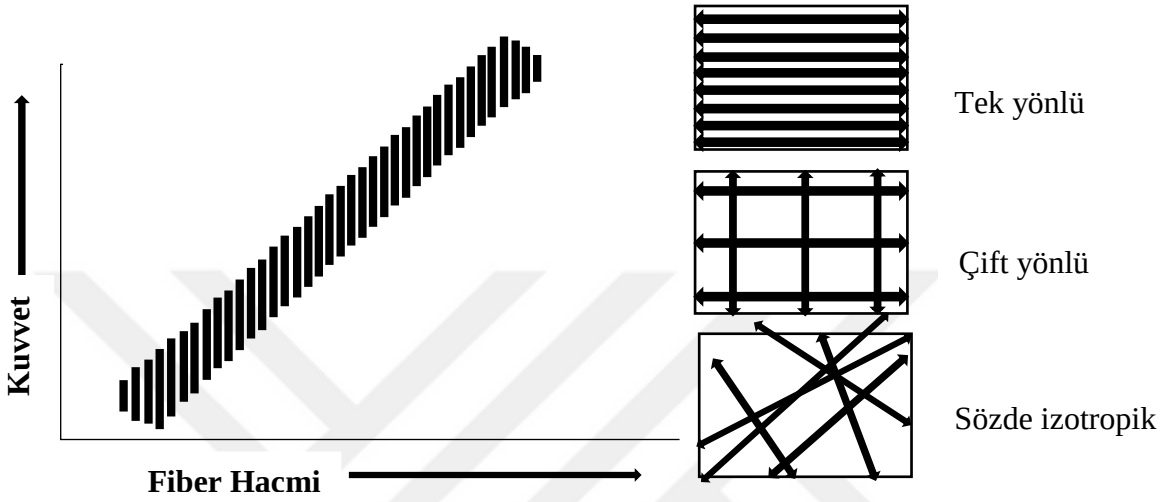
2.5.3. Karbon Fiber Kompozitin Anizotropik Özellikleri

İki tür elyaf takviyeli kompozit vardır; bunlar doğal ve sentetik elyaf kompozitlerdir. Bu kompozit malzemeler genellikle anizotropik özellikleriyle bilinirler. Anizotropik özellikler, malzemelerin farklı yönlerde değişen özellikleridir. Elyaf takviyeli malzemelerde, güçlü elyaflar genellikle daha zayıf bir matris içine gömülüdür. Elyafların yönü kompozitin nasıl davranacağını belirler.

Karbon fiber kompozit malzemeler, karbon fiberlerin matris malzeme (genellikle epoksi reçine) içindeki özel düzenlemesi nedeniyle anizotropik özellikler sergiler. Dolayısıyla, bir malzemenin bu anizotropik özellikleri, mukavemet, sertlik ve termal özellikler gibi daha iyi malzeme özellikleri avantajına sahiptir.

Fiber kompozitler hem elyaflara paralel yönde hem de elyaflara dik yönde önemli termal anizotropi sergilerler (Shim ve diğ. 2002). Elyaf kompozitin düzlem içi yönü sıklıkla elyaf yönüne karşılık gelirken, kalınlık boyunca yön sıklıkla elyaf yönüne dik olarak ilerler.

Birçok uygulamada verimli ısı dağıtımı için, hem kalınlık boyunca ısı giderimi hem de düzlem içi ısı yayılımı çok önemlidir. Silindirik ortotropik fiberlerle güçlendirilmiş izotropik bir matrisin düzlem içi ve kalınlık boyunca termal iletkenlik değerleri, ısı iletim davranışını tamamen tanımlar (Tian ve Kevin, 2012). Kompozitlerin mekanik özelliklerindeki kilit faktörlerden biri elyafın yapısıdır (Gupta ve Srivastava, 2021).



Şekil 2.17: Malzeme özellikleri ve elyaf yönelimi arasındaki ilişki (Park., 2018).

Malzeme biliminde, özellikle kompozit malzemeler söz konusu olduğunda mukavemet, elyaf içeriği ve elyaf yönelimi yakından ilişkilidir. Kompozit malzemeler tipik olarak anizotropiktir, yani özellikleri yöne bağlı olarak değişir. Bu yön bağımlılığı büyük ölçüde elyaf yöneliminden kaynaklanmaktadır. Elyaf içeriği, malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerden biridir. Elyaf içeriği arttığında, elyaflar ana takviye kaynağı olarak hizmet ettiğinden malzeme özellikleri iyileşecektir.

Elyaf içeriği ve elyaf oryantasyonu, kompozit malzemenin genel mukavemetini birlikte etkiler. Dolayısıyla, elyaflar düzgün bir şekilde hizalandığında, belirli yönlerde daha yüksek yükleri taşıyabilirken, yanlış hizalanmış elyaflar genel mukavemeti azaltır. Bu, elyaf içeriği yüksek olduğunda ve elyaflar en iyi şekilde yönlendirildiğinde, malzemenin optimum mukavemete ulaştığını gösterir.

2.5.4. Kompozit Laminat

Kompozit laminat, elyaf takviyeli kompozit imalatında farklı şekillerde uygulanan ince bir tabakadır. Elyaf tabakasının zayıf matris reçinesi ile etkileşime girmesiyle ortaya çıkan malzemeye yüksek mukavemet kazandırır. Bu tür kompozit malzemeleri geliştirmek için birkaç

takviye edici elyaf tabakası bir araya getirilir ve matris reçinesi ile birleştirilir (Rana ve Fangueiro, 2016). Kompozit laminatta, gerekli laminat kalınlığına kadar bir matris kullanılarak bağlanan birkaç elyaf takviyeli malzeme katmanı (plies) vardır. Mukavemet, sertlik ve dayanıklılık gibi mekanik nitelikleri iyileştirmek için elyaf katmanları çeşitli şekillerde yönlendirilir.

Mükemmel mukavemet-ağırlık oranı ve tasarımda çok yönlülük gibi bu olağanüstü özellikler nedeniyle, lamine kompozit malzeme en yaygın olarak inşaat, otomotiv, denizcilik ve havacılık gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır.

2.5.4.1. Kompozit Laminatların Sınıflandırılması

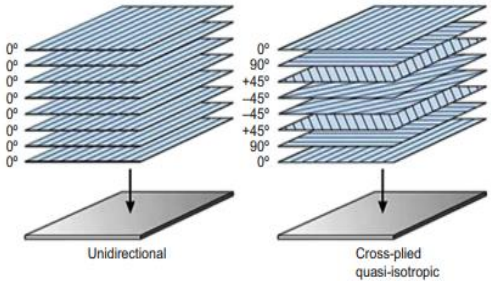
Kompozit laminatlar istifleme sırasına, elyaf yönelimine ve genel yapısal düzenlemeye göre sınıflandırılabilir. Bu laminat kompozit sınıflarından bazı örnekler aşağıda verilmiştir:

Simetrik Laminatlar: Bu laminatlar, orta düzleme göre yansıtılmış elyaf katmanlarına sahiptir - merkez hattın üzerindeki her katın altında eşleşen bir kat (hem malzeme hem de yönelim olarak) vardır. Bu tür laminatlar eğrilmeyi en aza indirmeye yardımcı olur ve artık gerilmeleri azaltır.

Dengeli Laminatlar: Adından da anlaşılacağı gibi, +θ açısında yönlendirilmiş her kat, dengelemek için laminatın içinde bir yerde -θ açısında yönlendirilmiş başka bir kat ile eşleştirilir. Bu konfigürasyon kompozitin yapısal stabilitesini sağlar.

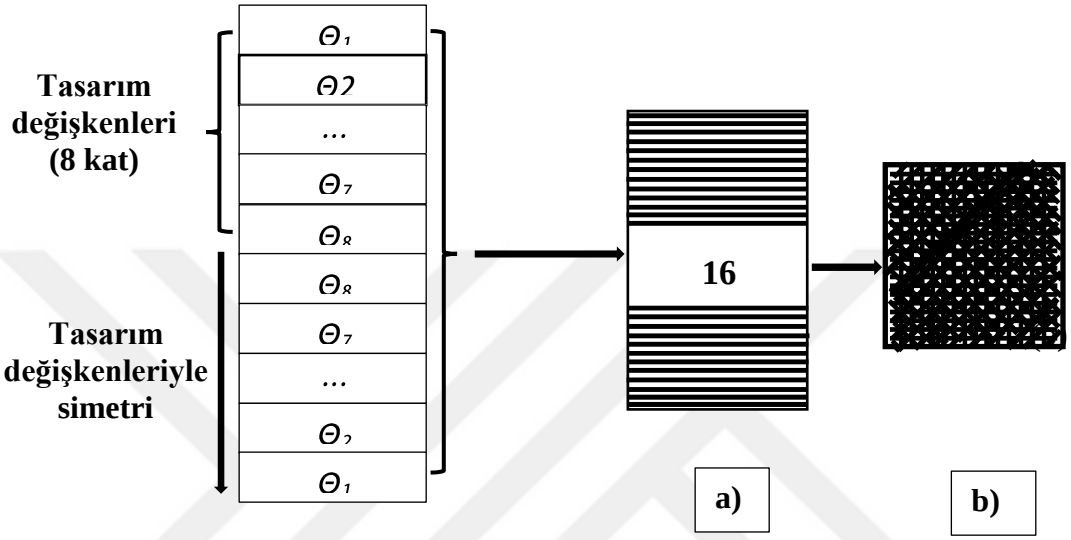
Çapraz Katlı Laminatlar: Bu laminat, her iki dikey yön boyunca mukavemeti ve sertliği artırmaya yardımcı olmak için yalnızca 0 ° ve 90 ° fiber yönelimleri içerir.

Quasi-Isotropic Laminatlar: En az üç farklı en yaygın elyaf oryantasyonu, yani 0°, ±45° ve 90°, açı olarak eşit şekilde ayrılarak kullanılarak geliştirilmiştir. Bu laminat oryantasyonu, çeşitli oryantasyonlarda tek tip mukavemet ve sertlik sağlar.



Şekil 2.18: Laminat kompozitlerin genel gösterimi (Rana ve Fangueiro, 2016).

Daha önce de belirtildiği gibi, laminat kompozit birbirine bağlanmış çok sayıda ayrı katmandan oluşur. Bu nedenle, bu laminat kompozit, Şekil 2.18'de gösterildiği gibi, her bir elyaf takviyeli polimer reçine katmanını temsil etmek üzere bir laminat kodu ile tasarlanmıştır. Bu katman, bir referans ekseni için oryantasyon açısı, laminat içindeki konumu ve içerdiği malzeme ile tanımlanabilir.



Şekil 2.19: Karbon fiber kompozit yapı için örnek tasarım değişkenleri: (a) Laminat konfigürasyonu, (b) Basitleştirilmiş düzlem formu (Kim ve diğ.2014).

2.6. ARAÇ AKÜ KUTUSU TASARIMI ILE İLGILI ÖNCEKI ÇALIŞMALARIN ÖZETI

Tablo 2.8: Literatür taramasının özeti.

Yazarlar	Güçlendirme (Malzeme)	Uygulamalar	Analiz	Açıklama
Hartmann ve diğ. (2013)	Metal	- Elektrikli araç için akü kutusu kutusu	- Titreşim analizi - Hafif tasarım	- Bu çalışma, akü kutusunun mukavemet optimizasyonunu ve geliştirilmiş doğal frekansını göstermektedir. - 20%. Ağırlık azaltımı sağlanır.

Tablo 2.9 (devam):

Wenwei ve diğ. (2016)	Metal	Metal akü kutusu	- Sonlu elemanlar analizi (Titreşim ve dinamik analiz).	- Akü kutusunun yapısal tasarımı, yorulma analizi ve titreşim analizi sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
Park (2018)	Karbon fiber	- Rüzgar enerjisi, spor, uçak, otomotiv, askeri ve yarı iletkenler	- Hafif tasarım.	- Avantajlı özellikleri nedeniyle bir dizi uygulama için kompozit malzemenin geliştirilmesini açıklar.
Xiaoyu ve diğ. (2017)	Karbon fiber	Temizlik için elektrikli araç	- Güç analizi - Hafif tasarım	- Bu çalışma, bir batarya kutusu için uzun karbon fiber takviyeli termoplastiğin tasarım sürecini ve mukavemet analizini araştırmaktadır. - Elektrikli bir araç için batarya kutusunun hafif tasarımı çalışmanın nihai amacıdır.
Junqiu ve diğ. (2014)	Q235 çelik	Elektrikli araç için akü kutusu kutusu	Rastgele Titreşim	- Bu makalede, yapıyı ve rastgele titreşimi analiz etmek için Hypermesh ve ANSYS kombine simülasyon yaklaşımı kullanılmıştır.
Chen ve diğ. (2017)	Hafif Alüminyum alaşımlı çelik sac yerine çelik sac	- Otomotiv için akü kutusu	Akü kutusunun mekanik analizi ve simülasyonu.	- Bu çalışmada, malzeme indeksi, gerilme dağılımı ve yer değiştirmeye dayalı olarak hafif ve sert malzemeyi değiştirmek için simülasyon analizi kullanılmıştır.

Tablo 2.7 (devam):

Lingli ve Zhao (2019)	Kompozit malzeme	Elektrikli araç	- Statik mukavemet ve hafif tasarım analizi.	- Sonlu elemanlar analizi mukavemet, hata faktörü ve optimizasyonu analiz etmek için kullanılmıştır. - Kompozit, metale kıyasla %79,59 oranında daha yüksek bir ağırlık azalması kaydetmiştir. - Alt plakada kaydedilen maksimum gerilme 49,49 MPa'dır.
Liu ve diğ. (2019)	Karbon fiber	Raylı transit araçların uç kutusu	- Ağırlık azaltma, statik dayanım ve yorulma analizi	- Bu çalışmada, tasarım ve performans örnek test doğrulaması ve hesaplama yöntemi ile değerlendirilmiştir. - Karbon fiber uç kutuları, karbon çeliği ve paslanmaz çelik kutuların %45'i ve alüminyum alaşımlı kutuların %72'si kadar bir ağırlık sergilemektedir. - Yorulma analizi ve statik mukavemet, karbon fiber vagon uç kutusunun tüm standart kriterleri karşıladığını göstermektedir.
Yuhang ve diğ. (2022)	SMC, CFRP, ve metal	- Elektrikli araç	- Mukavemet analizi ve hafif tasarım	- Bu çalışmada, hafif güç bataryası uygulaması için üç farklı malzemeyi değerlendirmek üzere ekstrüzyon simülasyon analizi kullanılmıştır. - Üç farklı malzemenin simülasyon sonuçlarına göre mekanik dayanımları ve ağırlıkları karşılaştırılmıştır. - Karbon fiber, gereksinimler için en uygun seçim haline gelir.

Tablo 2.7 (devam):

Li ve diğ. 2020	Alüminyum alaşım	- Elektrikli Otobüsün Akü Kutusu Şasisi	- Statik analiz simülasyonu ve modal analiz	- Bu makale, elektrikli otobüsün akü kutusu şasisinin modal analizini ve statik analizini incelemektedir. - Sonuçlara göre, maksimum gerilme 50,7 MPa'dır ve bu değer izin verilen gerilme değerinden önemli ölçüde daha düşüktür. - İlk altı modal titreşim sonuçları 36.76-246.12 Hz arasındadır ve frekans dağılımları nispeten dağınıktır.
Ning ve diğ. (2007)	Cam elyaf	- Toplu Taşıma Aracının göve diğe paneli	- Statik ve mikro-yapısal analiz	- Bu araştırma, termoplastik yapısal sandviç göve diğe panelinin tasarımı, geliştirilmesi, analizi ve üretimini açıklamaktadır. - Panel, cam elyaf takviyeli polipropilen (PP) yüz tabakaları ve bir PP petek çekirdek kullanmaktadır. - Düz yüzeyleri oluşturmak için tek diyaframlı şekillendirme adı verilen özel bir teknik kullanılmıştır.
Yang ve diğ. (2019)	Çelik	- Elektrikli araç akü kutusu	- Statik analiz, dinamik ve modal analiz	-Bu makale, elektrikli bir araçtaki batarya muhafazasının hem dinamik hem de statik özelliklerini incelemektedir. - Simülasyon aşamasında, akü kutusunun gücü, titreşim frekansı ve genliği arasındaki korelasyon, yapıdaki herhangi birzayıflığı belirlemek ve daha sonra optimizasyon için rafine etmek için tasvir edilmiştir.

Tablo 2.7 (devam):

Sihui ve diğ. (2022)	Q235 karbon çeliğ	- Lokomotif güç akü kutusu	- Mod analizi ve yapısal tasarım	- Bu araştırma, lokomotif akü sistemlerinde hem mükemmel ısı dağılımına hem de yüksek derecede korumaya öncelik vermektedir. Bu, batarya yapısının, sıcaklık yönetim sisteminin ve yerleşim düzeninin tasarımını iyileştirerek yapılır.
Weigao ve diğ. (2021)	Q235 karbon çeliği	- Elektrikli araç akü kutusu	- Mekanik analiz (Çarpışma, gerilme ve deformasyon)	- Bu makale, yan darbeler sırasında akü kutularının güvenliğini artırmak için iki optimizasyon stratejisi önererek sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. - Gerilme, deformasyon ve yanal ivmeyi değerlendirmek için simülasyon hesaplamaları yapılmıştır. - Batarya kutularının deformasyonu ve enerji değişimleri ekstrüzyon simülasyonları ile analiz edilmiştir.
Zhang ve diğ. 2014	Karbon fiber	- Güç batarya kutusu için elektrikli araç	- Tasarım optimizasyonu	- Bu çalışma, güç bataryası depolama tasarımında karbon fiber kullanımını araştırmaya odaklanmıştır. - Karbon fiberin güç bataryası kutusuna uygulanması tartışılmış ve özel tasarım prosedürü üzerinde durulmuştur.

2.7. ARAŞTIRMA BOŞLUĞU

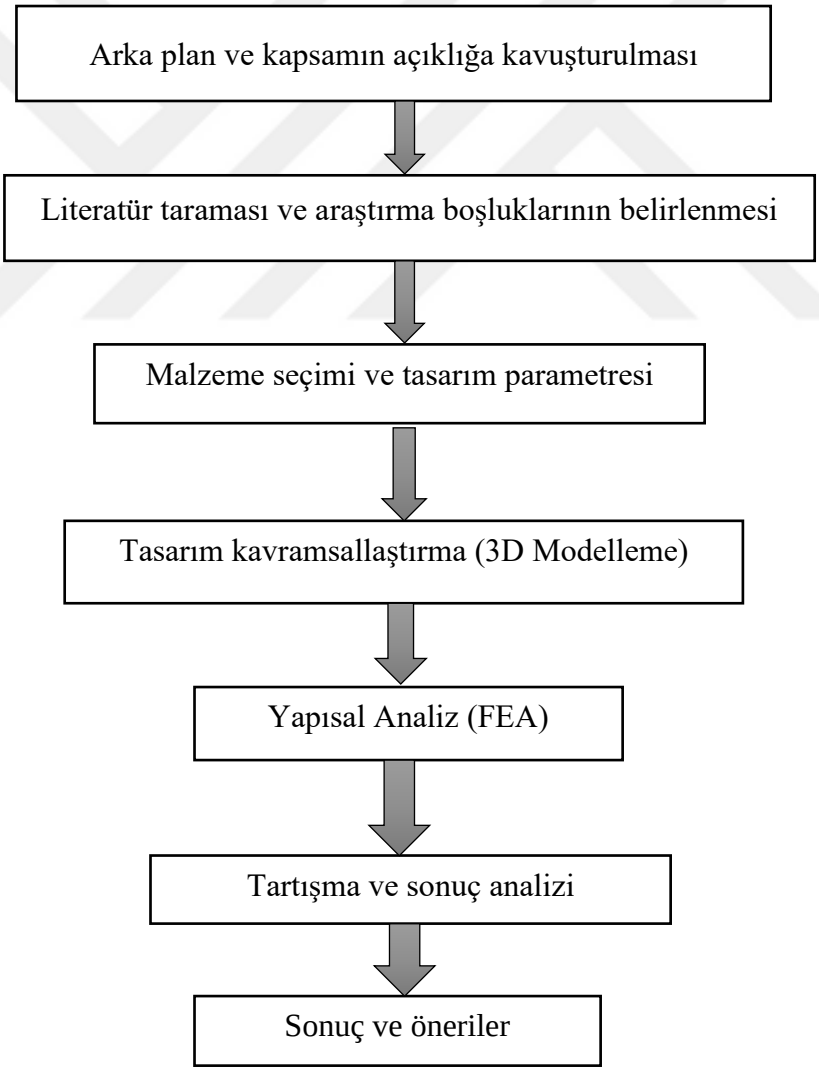
Bu çalışma, yeni geliştirilen bir elektrikli vagon için 304 paslanmaz çelik ve karbon fiber kompozit batarya kutusunun tasarımı ve gerekli uygulama için performansının karşılaştırılmasına odaklanmaktadır. Yukarıdaki literatür taraması, benzer çalışma ve araştırmaların dünya çapında yapıldığını ve bu alanda edinilen bilgilerin otomotiv teknolojisine uygulandığını ortaya koymuştur. Akademisyenler, güç bataryası muhafazasının en iyi malzemelerini ve yapısal tasarımını araştırmaktadır.

Literatürde bulunan boşluk, bir dizi metal ve metalik alaşım üzerinde çok sayıda araştırma yapılmış olması, ancak kompozit batarya kutusu, özellikle de vagon sektöründeki karbon fiber takviyeli kompozit hakkında çok az şey belgelenmiştir. Karbon fiber kompozit malzemenin metal ve alaşımına kıyasla üstün özellikleri, bu malzemenin idealliğini ortaya çıkarmış ve üzerinde daha fazla araştırma yapılmasını önermiştir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, literatür değerlendirmemizin ortaya çıkardığı boşluğu kapatmak ve vagon batarya kutusu için kullanılan edilmiş bir karbon fiber kompozit malzeme geliştirmektir.

3. YÖNTEM

Bu bölümde, paslanmaz çelik ve karbon fiberden yapılmış bir akü kutusu için malzeme, tasarım yöntemi, sistematik yaklaşım ve mukavemet analizinin temel çalışma parametreleri sunulmakta ve açıklanmaktadır. Genel olarak, bu çalışma yeni geliştirilen bir vagon için akü kutusunun tasarımı, malzeme seçimi, tasarım kısıtlamaları ve metodolojisi hakkında kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır.

Metodolojinin yapısı



Şekil 3.1: Metodoloji özeti.

3.1. MALZEME SEÇİMİ

Mekanik açıdan bakıldığında, ürün geliştirme süreci aşamasında uygun malzemenin seçilmesi çok önemlidir. Malzeme seçimi, nihai ürünün geliştirilmesindeki diğer tüm bileşenlerle derin bir şekilde bağlantılı olduğu için, genellikle sürecin sadece başında veya sonunda değil, her aşamasında gerçekleşir (Chen ve diğ. 2017: Harte ve diğ. 2004).

Hafif tasarımın adından da anlaşılacağı gibi, gerekli uygulamalar için kesin rijitlik ve mekanik dayanımı sağlarken mümkün olduğunca hafif olmalıdır. Malzeme seçiminde, bileşen yoğunluğu (ρ) önceliklendirilmelidir. Bileşen elastiklik modülü E'nin mukavemet analizi birincil öneme sahip olmalıdır; sonuçta, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet gibi her iki parametrenin de optimizasyonu bu çalışmanın temel amacıdır. Çelik ve alüminyum gibi geleneksel malzemeler, karbon fiber takviyeli polimerler gibi hafif kompozit malzemelerle değiştirilecektir (Chen ve diğ. 2017).

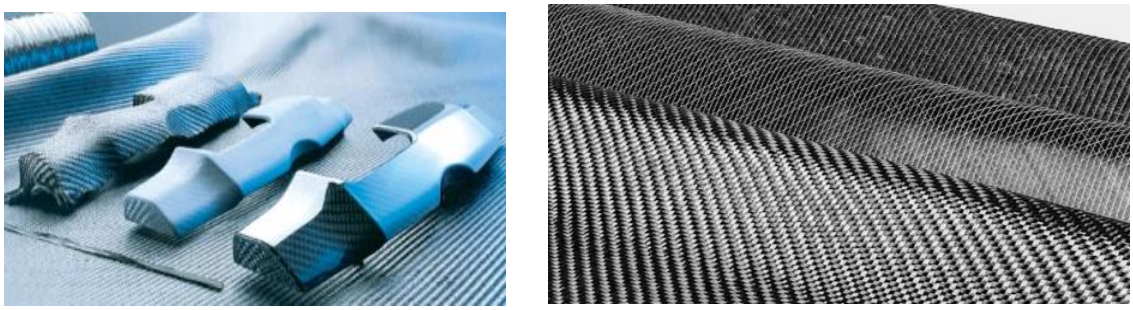
3.1.1 Karbon Fiber Kompozit ve Çelik Malzeme

3.1.1.1 Karbon Fiber Takviye Malzemesi

Karbon fiber, farklı uygulama alanlarında kullanılan en yaygın sentetik malzemelerden biridir. Kumaşa benzeyen bir malzemeye dokunmuş küçük karbon tellerinden oluşan bir malzemedir. Genellikle üstün elektriksel, fiziksel, mekanik ve termal özelliklere sahiptir (Almushaikeh ve diğ. 2023). Özelleştirilmiş nitelikler elde etmek için çeşitli lifler, reçineler ve dokumalarla oldukça özelleştirilebilir. Havacılık, otomotiv, spor ekipmanları ve endüstriyel uygulamalar dahil olmak üzere birçok endüstri, karbon fiberi yaygın olarak kullanmaktadır. Karbon fiberin endüstride bu kadar ilgi görmesinin bazı nedenleri, düşük yoğunluk, çeliğinkinden daha yüksek elastikiyet modülüne sahip olma, yüksek ısı iletkenliği, daha yüksek çekme mukavemeti, O_2 yokluğunda termal kararlılık, sürünmeye karşı direnç ve kimyasal eylemsizlik gibi kendine özgü özellikleridir.

Karbon fiberler, yüksek mukavemet ve elastik modülü de dahil olmak üzere son derece yüksek mekanik özelliklere sahip olmalarıyla özellikle iyi bilinmektedir (Tang ve diğ. 2019). İki tür karbon fiber takviyesi vardır: sürekli ve süreksiz fiberler. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP), üzerinde karbon fiber takviyeli bir polimer matrisidir. Bu çalışmada, metalik çelik ve karbon fiber kompozit malzeme arasında karşılaştırma yapılmıştır. Karbon fiber kompozit, özellikleri fiberin yönüne bağlı olan anizotropik bir malzemedir. Takviye fiberi, piyasada

bulunan en yaygın karbon fiber türü olan karbon fiber T300'dür. Matris ise epoksi reçinedir (5208).



(a) **(b)**

Şekil 3.2: Karbon fiber malzeme: (a) karbon fiber takviyeli kompozit; (b) karbon fiber (Schludi ve Joos, 2019).

3.1.1.2 304 paslanmaz çelik

Bu araştırmanın karbon fiberden sonra odaklandığı ikinci malzeme 304 paslanmaz çeliktir. En yaygın kullanılan östenitik paslanmaz çeliktir. Paslanmaya karşı direnci, mukavemeti ve esnekliği artırmak için krom, manganez, nikel ve molibden gibi farklı elementler eklenebilir. 304 paslanmaz çelik temel olarak %18-20 Cr, %8-10,5 Ni ve ≤ %0,08 C içeren östenitik paslanmaz çeliktir ve olağanüstü süneklik, korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik avantajlarına sahiptir. Bu nedenle, imalat, ulaşım ve yapısal inşaatta en sık kullanılan malzemelerden biri olarak bilinir.

Demiryolu vagonlarında X5CrNi18-1 paslanmaz çelik malzemenin kullanılmasının birçok nedeni vardır: çok yönlülük, iyi ağırlık-mukavemet oranı, mukavemet ve dayanıklılık, maliyet etkinliği ve geri dönüştürülebilirlik. Ayrıca, yüksek geri dönüştürülebilir içeriği nedeniyle birçok uygulama için çevre dostu bir malzeme seçeneğidir. 304 paslanmaz çelik, birçok üstün özelliğe sahip baskın bir malzeme olmasına rağmen, mevcut teknoloji her zaman daha verimli kullanılan malzemeler aramaktadır. Mukavemetten ödün vermeden ağırlığı azaltmak ve belirli kullanımlar için geliştirilmiş özelliklere sahip çelik alaşımları oluşturmak zordur (Lingli ve Zhao, 2019).

Genel olarak, 304 paslanmaz çelik, mukavemet, dayanıklılık ve diğer istenen özelliklerin benzersiz bir karışımı nedeniyle, bina, inşaat, mutfak ekipmanları, kimyasal kaplar, tıbbi cihazlar, ulaşım ve gıda ve içecek işleme ekipmanları gibi çeşitli uygulama alanlarında hayati

bir malzemedir (Callister ve Rethwisch, 2014). 304 paslanmaz çelik malzemenin özellikleri de Tablo 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Bazı metalik alaşımlı çelik malzeme ürünleri (Zhou ve Li, 2022).

Tablo 3.1: 304 paslanmaz çelik **(**X5CrNi18-10 Stainless Steel**)** özellikler

Özellikler	**Değerler**	**Birim**
Malzeme	Paslanmaz çelik X5CrNi18-10	-
Elastik Modül	200000	N/mm^2
Poissin Oranı	0.28	N/A
Kayma modülü	79000	N/mm^2
Kütle Yoğunluğu	7900	Kg/m^3
Çekme Dayanımı	600	N/mm^2
Akma Dayanımı	400	N/mm^2
Isıl Genleşme Katsayısı	1.1 e-05	/K
Isıl İletkenlik	14	W/(kg.K)
Özgül Isı	440	J/(kg.K)

3.1.2 Epoksi Reçine Malzemesi

Kompozit malzemenin ana bileşeni matris reçinesidir. Bu reçineler hacimce daha yüksek bir yüzdeye sahip olsa da mukavemetleri zayıftır. Bu çalışmada, gelişmiş özellikleri ve kolay bulunabilirliği nedeniyle matris reçinesi olarak epoksi reçinesi seçilmiştir. Olağanüstü mekanik özellikleri, çok yönlülüğü ve kimyasallara karşı direnci nedeniyle genellikle çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan yüksek performanslı bir epoksi reçinesidir. Polyester ile

karşılaştırıldığında, epoksi matrisler daha iyi termal ve mekanik performansa sahiptir. Hidrofobik özellikleri ve kimyasal maddelere karşı direnci nedeniyle metal ve elyaf takviyeli kompozitler için şiddetle tavsiye (Hsissou ve diğ. 2021). Bu nedenle, epoksi ve karbon fiber kombinasyonu, olağanüstü bir mukavemet-ağırlık oranına sahip bir kompozit üretir. Bu nedenle, otomotiv, yüksek performanslı endüstriler ve havacılık uygulamaları için ideal hale gelir.



Şekil 3.4: Epoksi reçine (A) ve sertleştirici (B) örneği.

Tablo 3.2: Örnek epoksi reçinesi (A) ve sertleştiricinin (B) özellikleri.

Epoksi reçine (5208)			Sertleştirici (W 152)		
Açıklama	Birim	Değerler	Açıklama	Birim	Değerler
Yoğunluk	Kg/cm^3	1.1	Yoğunluk	Kg/cm^3	1
Renk	Renksiz	1	Renk	Renksiz	1
Epoksi değeri	Eq/kg	5.35	Viskozite 25ºC	MPa	10
Viskozite 25ºC	MPa.s	11850	80°C'de kap ömrü	S	4140
105 OC/h'de uçucu içerik	%	0.4			
Hidrolize edilebilir klor	wt. %	0.08	80ºC'de jel süresi	S	7080
Marten'in değeri	^OC	150			

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Yoğunluk Ölçümü

Karbon fiber takviye, geleneksel malzemelere kıyasla kompozit malzemelerde daha düşük yoğunluk ve ağırlık avantajına sahiptir. Karbon fiber kompozitler, önceki bölümde bahsedildiği

gibi çeşitli üretim yöntemleriyle üretilebilir. Karbon fiber kompozitlerin geliştirilmesinde, kompozitlerin kalitesini etkileyebilecek üretim parametreleri vardır. Boşluk (hapsolmuş hava), nihai ürünü etkileyen kritik parametrelerden biridir. Bu nedenle, yoğunluk ölçümü kullanılarak ortalama boşluk içeriği hesaplanabilir. Üretimden sonra, karbon fiber kompozit boşluk içeriği, karbon fiber kompozitin teorik ve deneysel yoğunlukları karşılaştırılarak ve ardından denklem (3.1)'de gösterildiği gibi ikisi arasındaki fark belirlenerek hesaplanır. Deneysel yoğunluğu hesaplamak için Arşimet prensibi kullanılırken, teorik yoğunluğu belirlemek için karışım kuralı kullanılır.

$\rho_C = \rho_M x\ V_M + \rho_R\ x V_R$ ..... (3.1).

ρ_C = Kompozit yoğunluğu

ρ_M = Matris yoğunluğu

V_M = Matris hacmi

ρ_R = Takviye fiberin yoğunluğu

V_R = Takviye fiberin hacmi

Arşimet prensibi, bir numunenin yoğunluğunu deneysel olarak ölçmek için havadaki ve sıvıya batırılmış ağırlıkları kullanır. Denklem (3.2) uygulanarak, malzemenin yoğunluğu hesaplanabilir.

$\rho_C = \rho_{liq}\ x\ \frac{m_{air}}{m_{air} - m_{water}}$ …….....(3.2).

ρ_{liq} = Suyun yoğunluğu

m_{air} = Numunenin havadaki kütlesi

m_{water} = Numunenin suda kütlesi

Bir numunedeki boşluk içeriği miktarı şu şekilde hesaplanır.

$$\text{Boş içerik } (\phi_V) = \frac{\text{Teorik yoğunluk} - \text{Deneysel yoğunluk})}{\text{Teorik yoğunluk}} \quad \text{…….....} \ (3.3).$$

3.2.2. Mukavemet Analizi

Mukavemet analizi, bir malzeme veya yapının uygulanan kuvvetlere hasar görmeden ne kadar dayanabileceğini belirleme sürecidir. Bu, çeşitli yükleme koşulları altında çeşitli özelliklerin ve davranışların değerlendirilmesini içerir.

3.2.2.1 Statik Analiz

Optimize edilmiş bir akü kutusu tasarlanırken, temel analizlerden biri statik analiz mukavemetidir. Bu analiz, diğer ileri analizlere geçilmesine yardımcı olan en temel analizdir. Mühendislik ve malzeme bilimi terminolojisinde, basit statik analiz, sabit veya statik koşullar altında bir nesnenin mukavemetini ve stabilitesini değerlendirmek için kullanılan bir tür yapısal analiz olarak tanımlanır. Tasarım modelleme ve simülasyon analizi SolidWorks tasarım yazılımı ile yapılır. Bu yazılım, kutunun şekli, sınır koşulları ve malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde modellenmesini sağlar. Bu inceleme, vagon akü kutusunun gerekli güvenlik ve yapısal bütünlüğünü doğrulamak için yapılır. Bildiğimiz gibi, akü kutusu çalışma koşulları altında üç tür kuvvetle karşılaşabilir (Sihui ve diğ, 2022). Bunlar şunlardır

Uygulanan yük koşulu

Gerekli standarda göre, pil kutusunun uzunlamasına yönde 5g ve dikey yönde g vücut kuvveti altında maksimum ivmesi, burada g = 9,8 m/s². Standarda göre, enine yönde uygulanan vücut kuvveti yoktur. Dolayısıyla, Y yönünde g = 0'dır. Bu çalışma, esas olarak tablo 3.3'teki yükleme koşulu altında pil kutusunun mukavemetini analiz etmektedir.

Tablo 3.3: X Y ve Z yönündeki kütle kuvvetinin büyüklüğü

Yük koşulları	X	Y	Z
Kombinasyon koşulları	5g	-g	0

3.2.3. Kompozit Malzemeler İçin Arıza Kriterleri

Statik mukavemet esas olarak yapının yük koşulları altında hasar görmemesini sağlamak veya yapının yük taşıma kapasitesini azaltmak için kullanılır. Kompozit malzemelerin çoğu anizotropik malzemelere aittir ve düzlem gerilme durumu altında tek katmanlı levhaların beş

temel mukavemet indeksi vardır. Bu nedenle, kompozit elemanların arızasını değerlendirirken, ilgili arıza sınır yükünü hesaplamak ve kontrol için uygun mukavemet kriterini seçmek gerekir.

3.2.5.1 Arıza Kriterlerinin Seçimi

Tsai-Wu tensör kriteri, çeşitli mukavemet kriterlerinin özelliklerini sentezlemekte ve tensör formunda yeni bir mukavemet kriteri ortaya koymaktadır. Düzlem gerilme durumunda, halka kırılma gerilmesinin aşağıdaki formlara sahip olduğu varsayılır:

$$F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{16}\,\sigma_1\,\sigma_6 + 2F_{26}\,\sigma_2\,\sigma_6 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 + F_6\,\sigma_6 < 1 \quad \text{..... (3.4).}$$

Tek katmanlı plakanın pozitif eksen yönündeki malzemenin kayma mukavemeti kayma gerilmesi yönünden etkilenmediğinden ve kayma gerilmesi yönündeki değişim malzemenin mekanik durumunu etkilemeyeceğinden, denklemdeki birinci kuvvete σ_6 (σ_6-τ_{12}) dahil üç terim çıkarılmalıdır, bu da şu şekilde basitleştirilebilir:

$$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1 \quad \text{..... (3.5).}$$

Burada, FI başarısızlık faktörüdür; σ_1 σ_2 ve τ_{12} sırasıyla boyuna normal gerilme bileşeni, enine normal gerilme bileşeni ve kayma normal gerilme bileşenidir; F_i, F_{ij} pozitif eksenel tek eksenli testten elde edilen gerilme uzayının mukavemet parametresidir.

$$\left\{F1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c},\ F11 = \frac{1}{X_t X_c},\ F2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c},\ F22 = \frac{1}{Y_t Y_c},\ F66 = \frac{1}{S^2}\right. \quad \text{..... (3.6).}$$

Burada, X_t, Xc, Y_t, Y_c, S sırasıyla boyuna çekme dayanımı, boyuna basınç dayanımı, enine çekme dayanımı, enine basınç dayanımı ve düzlem içi kesme dayanımıdır.

Bildiğimiz gibi, Tsai-Wu başarısızlık indeksini hesaplamadan önce yerel gerilme (σ1, σ2 ve τ12) bulunmalıdır. SolidWorks simülasyon sonucu bize sadece σx, σy ve τxy cinsinden ifade edilen ana gerilmeleri verir. Bu nedenle, gerilme dönüşümünü hesaplamak için aşağıdaki denklem uygulanabilir.

Dönüşüm Hesaplaması

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad \text{..... (3.7)}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \quad \text{..... (3.8)}$$

$\tau_{12} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$ ..... (3.9).

Tek plakanın izin verilen dayanımı

Kompozit yapının tasarımında ve mukavemet hesaplamasında, kompozit yapının servis yükü altındaki gerilmesi, malzemenin izin verilen değerinden daha az olmalıdır (Lingli ve diğ. 2019). Genel olarak kompozit malzemelerin izin verilebilir gerilme değeri aşağıdaki gibidir:

$\boldsymbol{Stres_c = Mukavemet / n}$.....……...(3.10).

Burada, n güvenlik faktörüdür.

4. BULGULAR

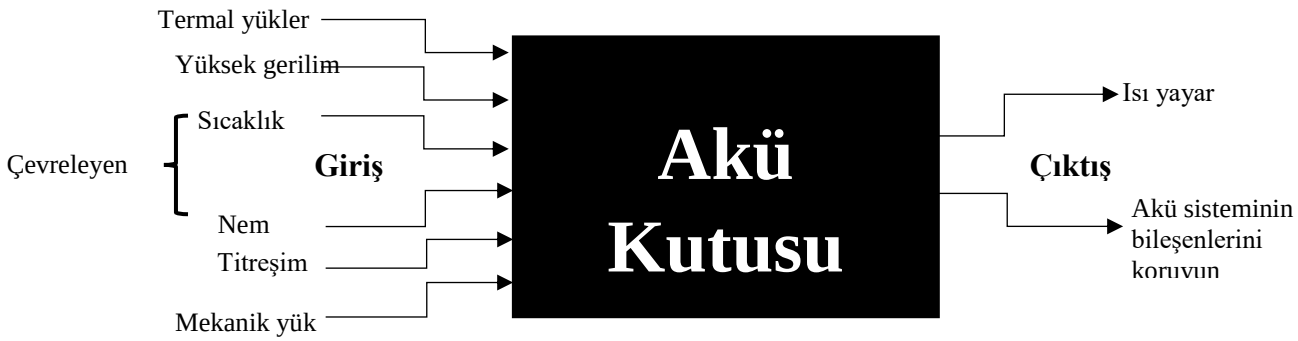
Bu bölüm, tasarım modelini, ana bileşenlerini ve 304 paslanmaz çelik ve kompozit akü kutusunun simülasyon analizini gösteren çalışmanın önemli bir parçasıdır. Analiz bölümünde, akü kutusu mukavemet analizinin grafiksel gösterimleri ele alınmaktadır. Geometrik modelde standart pil boyutu modülü, soğutma alanı, hücre paketinin kolayca çıkarılması, su ve toz koruması ve vagon yapısı ile entegrasyon dikkate alınmaya çalışılmıştır. Simülasyonların tasarımı ve analizi için SolidWorks tasarım yazılımı kullanılmıştır. Analiz aşaması, çeşitli koşullar altında pil kutusunun tepkisini göstermektedir.

Raylı araç çalışması sırasındaki mukavemet analizleri, sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Termal analiz, yorulma direnci ve titreşimler pil kutusu tasarımında kritik parametreler olmasına rağmen, çalışma, yetersiz kısıtlamalar ve bilgiler nedeniyle bunları içermemiştir. Bu nedenle, mukavemet analizi değerlendirmesi esas olarak pil kutusunun bütünlüğünü ve işlevselliğini doğrulamak için dikkate alınır. Simülasyon aşamasında fiziksel prototiplere gerek kalmadan farklı malzemeler, konfigürasyonlar ve takviyeler test edilebilir, bu da tasarımın ağırlığını ve maliyetini düşürür.

4.1. BATARYA KUTUSU TASARIMI VE MODELLEMESI

Her şeyden önce, pil kutusu tasarımı, boyut, sabit konum, ısı yayma tekniği, sızdırmazlık koruma seviyesi ve üretim süreci açısından aracın teknik özelliklerine uymalıdır. Günümüzde, pil koruma kutularının yaygın üretim teknikleri arasında alüminyum alaşım döküm, alüminyum alaşım ekstrüzyon profillerinin kaynağı, torba presleme işlemi ve soğuk haddelenmiş çelik levhaların damgalaması bulunmaktadır (Lu ve diğ 2022).

Akü muhafazası, sistemin işlevsel ayrıştırılması için kullanılan bir referans noktasıdır. Bu nedenle, sisteme giren ve çıkan giriş ve çıkışlar sistemin bir parçası olarak kabul edilir. Akü muhafazasına giren girdiler arasında termal, yapısal ve elektriksel yükler bulunur. Akü muhafazasının ana amacı, akü sisteminin bileşenlerini elektromanyetik parazitlerden, güvenliği etkileyebilecek iç arızalardan ve dış çarpışmalardan korumaktır. Bu nedenle, pil paketi içinde ideal çalışma sıcaklığını korumak için, pil muhafazası çevre ile etkileşime girmeli ve içindeki tüm bileşenleri uygun şekilde korumalıdır (Karl T. Ulrich, 2003). Genel giriş-çıkış modeli Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

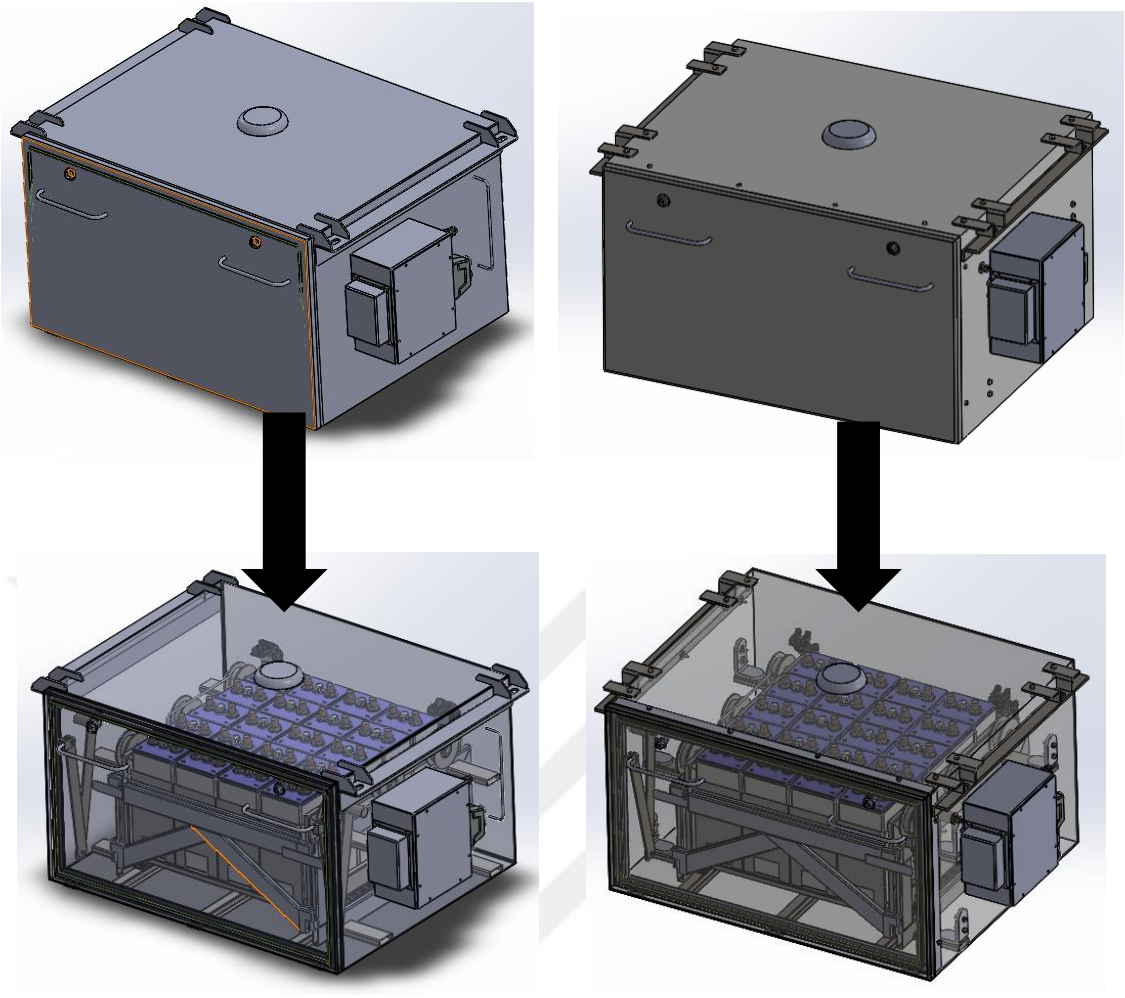


Şekil 4.1: Ana işlev akü kutusu: iç bileşeni dış etkilerden koruma (Karl, 2003).

4.1.1 Akü Kutusunun Modellenmesi

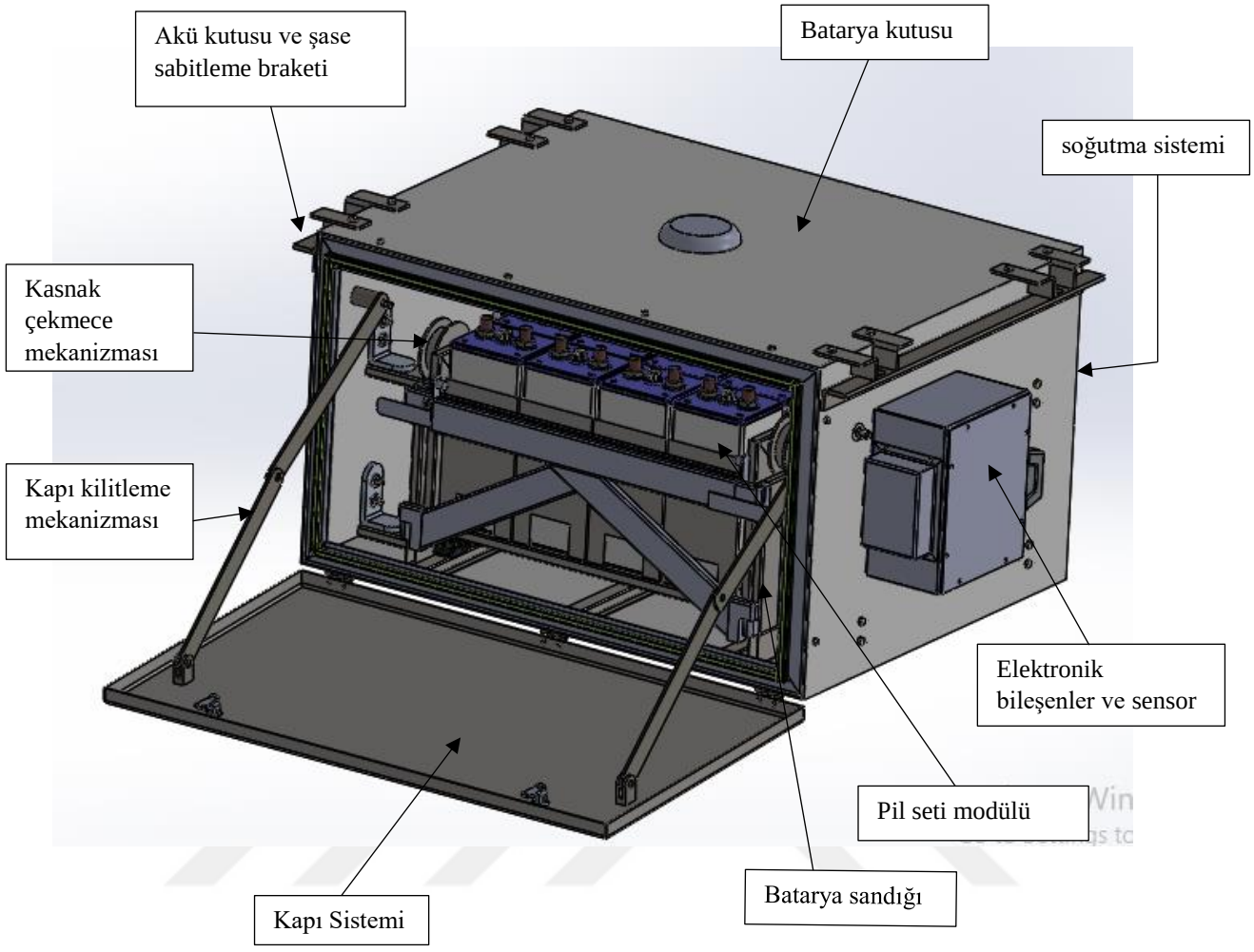
3D modelleme, hem akü hem de akü koruması için standart boyutlara göre geliştirilmiştir. Akü kutusunun boyutları, akünün soğutma sistemini de dikkate alır. Tasarım, Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd) hücre modülleri için akü kutusunun standart boyutlarına göre yapılmıştır. 5'li 4 hücre seti olarak 20 akü hücresinin bir saklama kutusuna (Akü Kutusu) yerleştirilmesi planlanmaktadır. Akü kutusunda, tüm akü hücresi modüllerinin çıkarılmasını sağlayan bir sürgülü çekmece mekanizması bulunmaktadır.

Bu akü kutusu kompozit ve 304 paslanmaz çelik malzemeden yapılmıştır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, bir vagon pil sistemi, trenin belirlenen bölümüne istikrarlı ve güvenilir enerji sağlamak için birlikte çalışan çok sayıda bileşenden oluşur. Ana bileşenler, Şekil 4.3'te gösterilen akü kutusu, pil modülü, soğutma sistemi ve akü çekme mekanizmasıdır.



(a) (b)

Şekil 4.2: Wagon Akü Kutusunun genel 3D modeli ve İç Görünümü: (a) paslanmaz çelik akü kutusu, (b) karbon fiber akü kutusu.



Şekil 4.3: Optimize edilmiş vagon akü kutusunun temel bileşenleri, (a) karbon fiber, (b) 304 paslanmaz çelik.

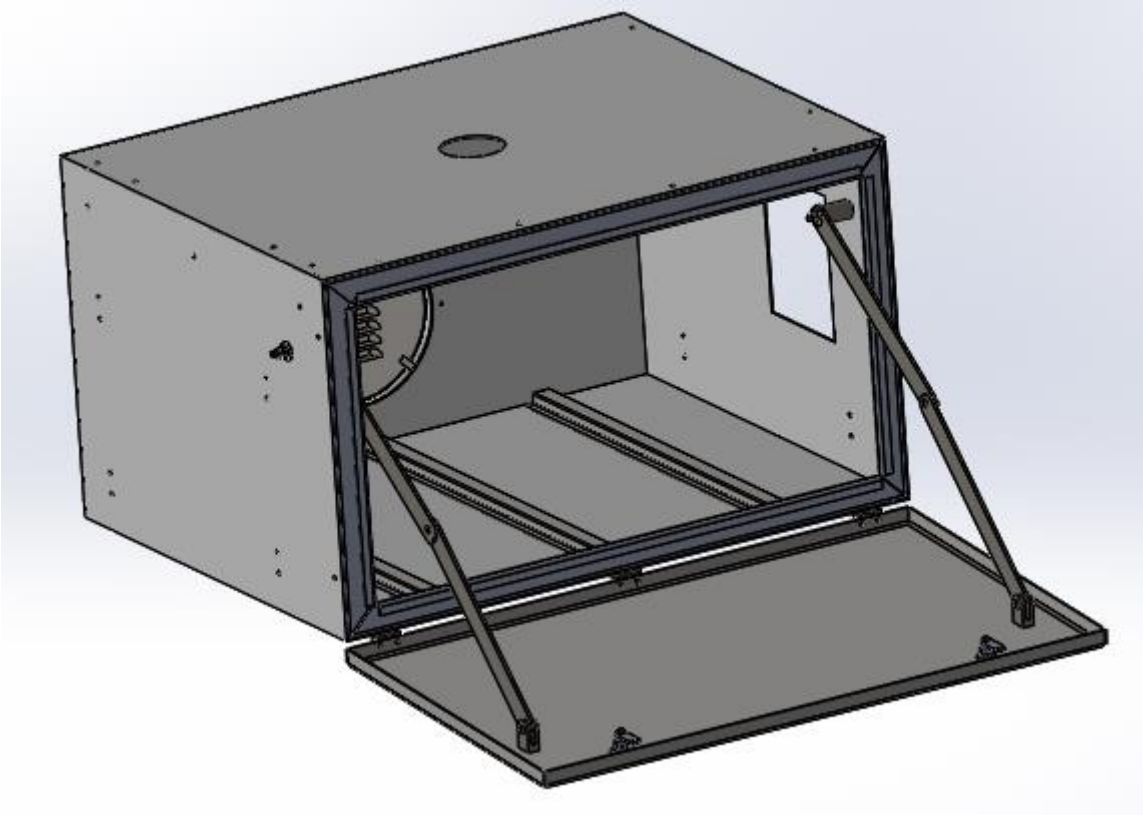
4.2. GÜÇ MUHAFAZASININ ANA BILEŞENI

4.2.1 Akü Kutusu

Akü kutusu gövdesi, vagonlara güç sağlamak için gerekli ekipmanı koruyan güç akü kutusunun ana bileşenidir. Bazı durumlarda koruyucu kutu olarak da adlandırılır. İçinde bulunan ana bileşenler çekme mekanizması, akü modülü seti, güç elektroniği ve soğutma sistemleridir.

Bu akü muhafazasının temel işlevi, mekanik ve elektrik sistemlerini dış ortamdan korumak ve izole etmektir. Şekil 4.4, bu çalışmada yapılan pil muhafazası tasarımını göstermektedir. Bu nedenle, akü kutusunun güvenilirliği ve güvenliği için bir garanti sağlar. Seramik, metal, kompozit malzemeler ve plastik gibi farklı malzemelerden yapılabilir.

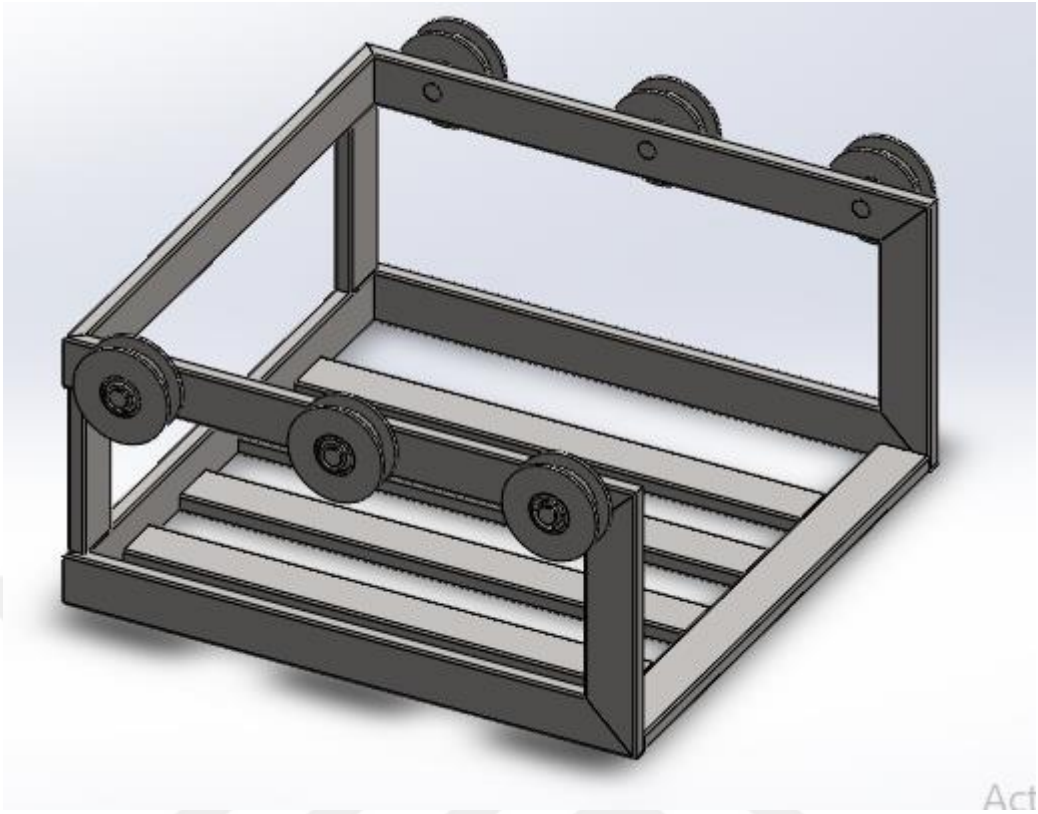
Ayrıca, vagonun çalışma koşullarında, güç bataryası kabuğu neme, titreşimlere ve sıcaklık değişikliklerine dayanmaya yardımcı olur. Akü muhafazası, gerekli yerde sabitlemek ve tutmak için yanlardan şasi ile sabitlenecektir



Şekil 4.4: Batarya muhafazası

4.2.2 Batarya Hücre Paketi Kasası

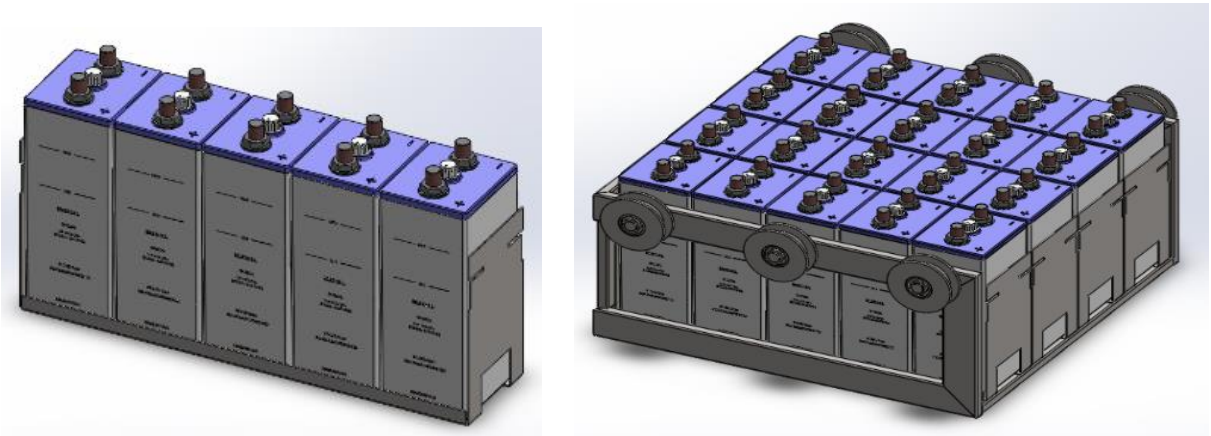
Batarya kasası, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, bir vagonunda kullanılan pil modülünü barındırmak ve desteklemek için tasarlanmış ek bir takviye kapağıdır. Bu kasalar, yardımcı sistemler, çekiş ve araç içi elektronik sistemler için sürekli güç sağlamak üzere pil sistemlerinin güvenli taşınmasını, daha iyi korunmasını, kolay bakımını, çekme mekanizmasını ve çalışmasını sağlar. Modern vagon sistemlerinde pil hücresi paketini pil kasasından izole etmek, pil gücünde kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 4.5: Batarya modülü set kasası (tutucu).

4.2.3 Pil Hücresi Modülü ve Paketi

Bir modül oluşturmak için bir araya getirilen hücrelerin toplamıdır. Seri (yüksek voltaj için) ve/veya paralel (yüksek kapasite için) bağlanmış iki veya daha fazla tek pil hücresinin birleşimidir ve termal yönetim, güvenlik ve izleme sistemleri ile bir pil depolama birimine entegre edilmiştir.



a) b)

Şekil 4.6: Standart Ni-Cd batarya modülü; (a) Tek Ni-Cd paketi, (b) Toplam Ni-Cd modül güç bataryası.

4.3. MUKAVEMET ANALİZİ VE SIMÜLASYON

Model tasarımından sonraki adım, ağırlık ve mukavemet açısından gerekli standardı karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek için bir simülasyon analizi yapmaktır. Bu çalışmada, tasarımın belirtilen standarda uygun olarak güvenli olacağını anlamak ve doğrulamak için statik mukavemet analizi kullanılmıştır. Analize başlamadan önce, analizi basitleştirmek için bazı varsayımlarda bulunulmuştur. Bunlar

- Kapı dahil olmak üzere genel akü kutusu modeli basitleştirilmiştir.
- Sabitleme cıvataları çıkarılmıştır.
- Güç analizi üzerinde çok az etkisi olan ancak analiz çözümünü karmaşıklaştıran kasnaklar, plastik kablo kanalları, akü terminalleri vb. parçalar pasifleştirilmiştir.
- Küçük delik, pah ve yatak olmayan parçalar gibi önemsiz geometrik parçalar basitleştirilmiştir. (b)

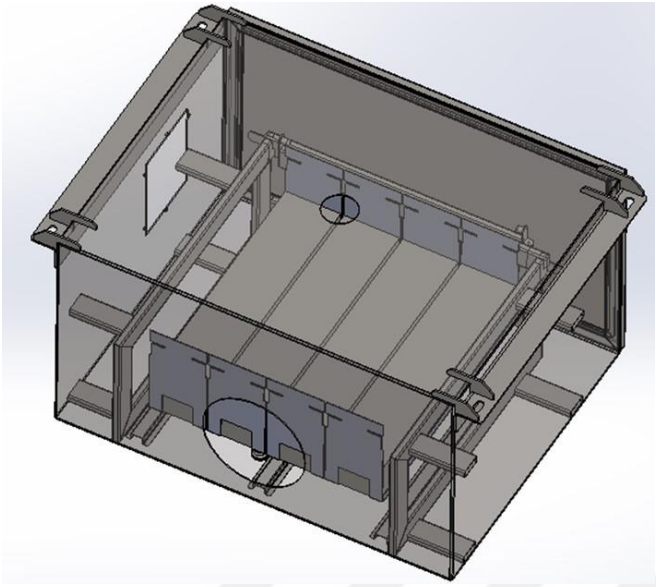
4.3.1 Yapı Tasarımının Statik Analizi

4.3.1.1 304 Paslanmaz Çelik Tasarım Akü Kutusu

Bu tasarımda, karbon fiber pil kutusu ile karşılaştırmak için çelik pil kutusu kullanılmıştır. Bu nedenle, ilk tasarım ve analiz çelik pil kutusu olacaktır. Yukarıda bahsedilen pil saklama kutusu için benzersiz bir 304 paslanmaz çelik tasarım geliştirilmiştir. Kablo kanalı ve kayar çekmece yapısı ile pil hücresi düzenleri, Şekil 4.2 ve 4.3'te katı modeller olarak gösterilmektedir. Yapım malzemesi olarak 304 östenitik paslanmaz çelik seçilmiştir. Bu malzeme, yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu ile işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik açısından olumlu özellikler sergilemektedir. Bileşenleri ile birlikte 304 paslanmaz çelik pil kutusunun toplam kütlesi 443 kg'dır. 304 paslanmaz çelik pil kutusunun tek başına kütlesi 105,38 kg'dır.

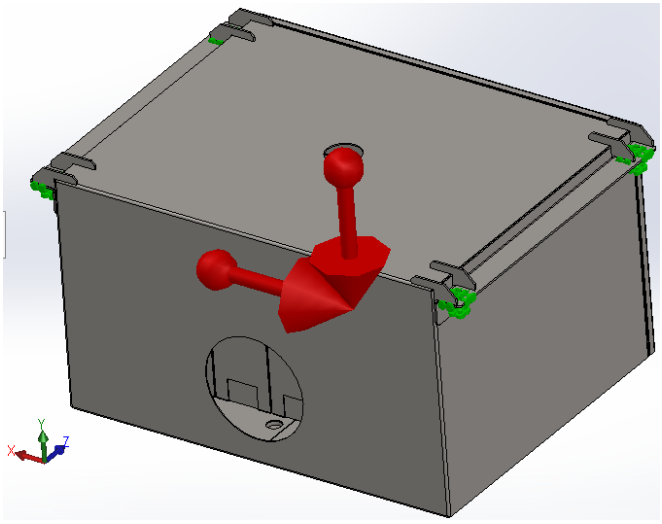
Sonlu Elemanlar Analizi Hazırlığı

Vagon Akü Saklama Kutusu için oluşturulan Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) modeli Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Mukavemet analizine çok az etkisi olan ancak analiz çözümünü karmaşıklaştıran kasnaklar, plastik kablo kanalları, akü terminalleri vb. parçalar pasifleştirilmiştir. Ek olarak, akü hücrelerinin yaklaşık geometrilerini ve ağırlıklarını temsil etmek için eşdeğer ağırlıktaki dört adet 304 paslanmaz çelik blok kullanılmıştır.

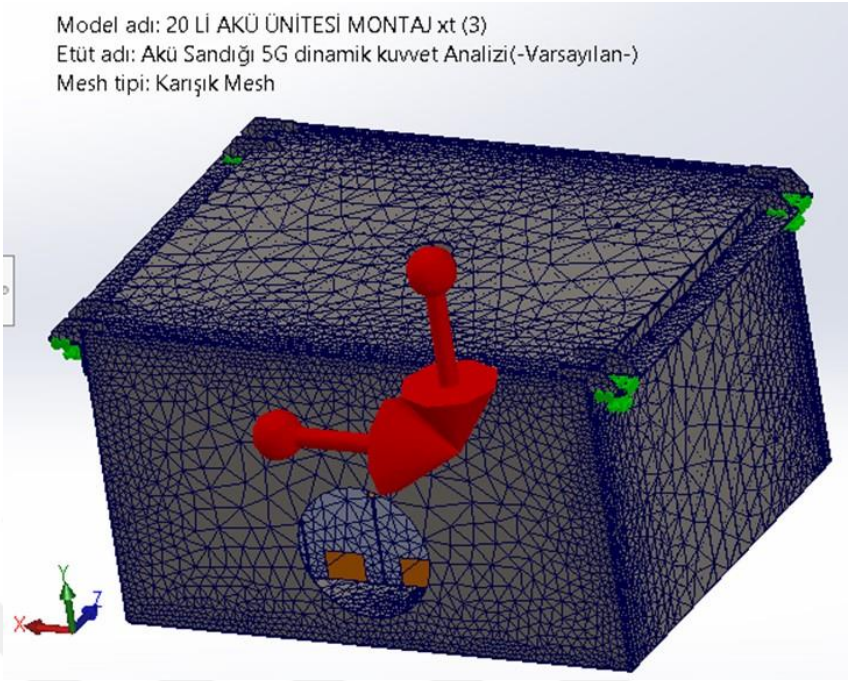


Şekil 4.7: Vagon akü saklama kutusu FEA modeli.

Akü saklama kutusunun FEA modelinin sınır koşulları Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Kutunun üst dört bağlantı köşesinde bulunan braketin doğrusal ve dönme hareketleri kısıtlanmıştır (yeşil sabitleme sembolleriyle gösterildiği gibi). Aşağı doğru yerçekimi ivmesi (= 9,81 m/s²; -y; ters kırmızı ok) Akü Saklama Kutusuna etkiyen G ağırlık kuvvetini oluşturur. Soldan sağa yönündeki (-x; 5x9,81 m/s²=) 49,05 m/s² tasarım ivmesi, yapının dayanması gereken 5G kuvvetini oluşturur. Her iki yüklemenin de yapısal gövde kuvvetleri olduğu unutulmamalıdır. Kutunun sonlu elemanlar ağı Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8: Akü kutusu FEA modeli sınır koşulları.



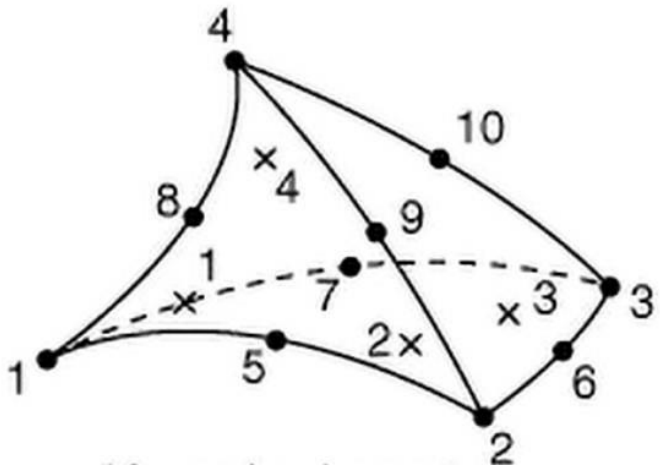
Şekil 4.9: Akü Kutusu FEA Ağı

Mesh Detaylar

Etüt adı	Akü Sandığı 5G dinamik kuvvet Analizi (-Varsayılan-)
Mesh tipi	Karışık Mesh
Kullanılan Meshleyici	Eğrilik tabanlı mesh
Yüksek kaliteli mesh için jakoben noktalar	16 nokta
Kabuk için Jakoben denetimi	Açık
Maksimum Eleman Boyutu	361,128 mm
Minimum Eleman Boyutu	12 mm
Mesh kalitesi	Yüksek
Toplam düğüm	398104
Toplam eleman	197740
Uyumsuz meshli başarısız parçaları yeniden mesh edin	Kapalı
Mesh tamamlama süresi (sa:dk:sn)	00:01:11
Bilgisayar adı	

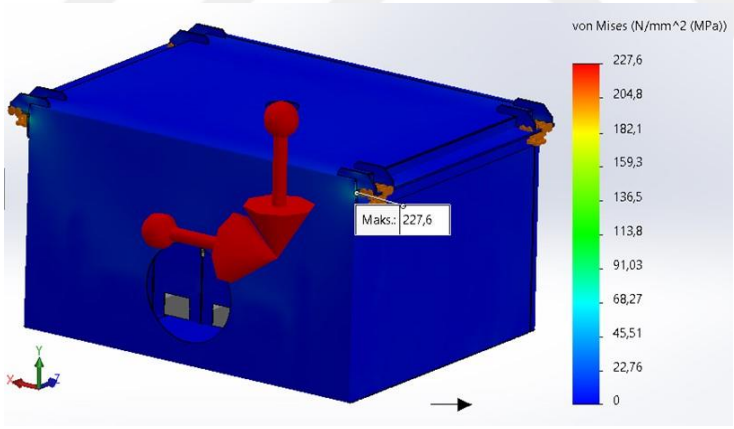
Şekil 4.10: Akü Kutusu FEA Ağ Kalitesi Bilgileri

Ağ kalitesi ile ilgili bilgiler Şekil 4.10'da sunulmuştur. Karışık Eğri Ağ algoritmasının, yüksek kaliteli bir ağ oluşturmak için 16 Jacobian noktası, 398.104 düğüm ve 4 integral nokta ve 10 düğüm içeren 197.740 tetrahedral eleman kullandığı görülebilir (bkz. Şekil 4.11). Bu verilerden elde edilen yüksek ağ kalitesi , programda bulunan ağ kalitesi ölçüm algoritmalarıyla doğrulanmaktadır.



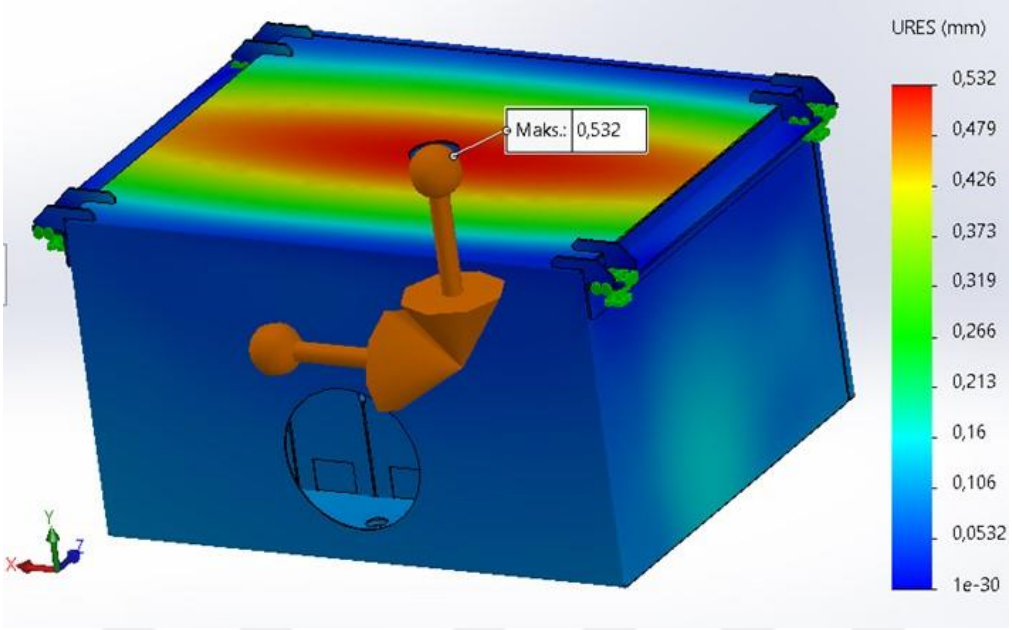
Şekil 4.11: 4 integral noktalı 10 düğümlü tetrahedral sonlu eleman geometrisi**.**

FEA çalışmasının sonucunda, Şekil 4.12'den, sandığın yüklenmesi sonucu yapıda depolanan deformasyon enerjisine dayalı maksimum von Mises geriliminin 227,6 MPa olduğu ve bağlantı braketinde meydana geldiği görülebilir. Bu gerilim değeri, 400 MPa olan 304 paslanmaz çeliğin akma mukavemetinden daha düşüktür.



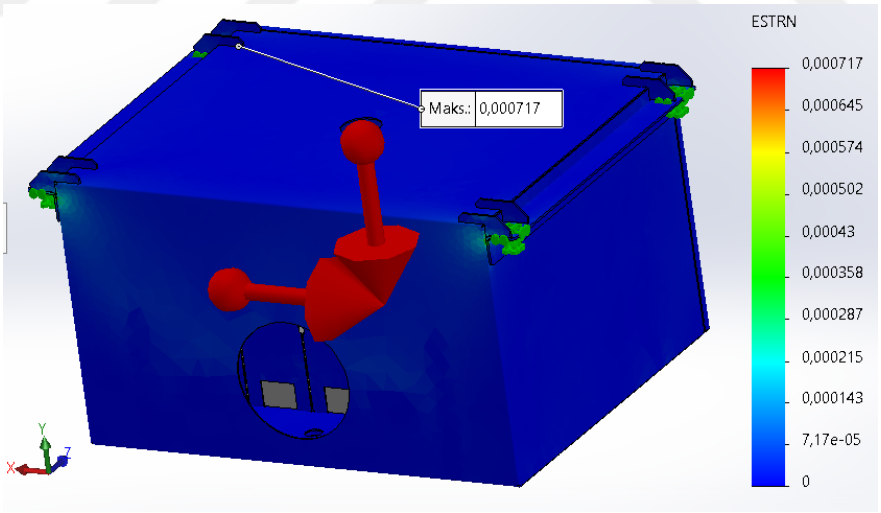
Şekil 4.12: 5G kuvvet ve G ağırlığına maruz kalan akü kutusundaki von Mises gerilimi.

Şekil 4.13, akü muhafazasındaki maksimum yer değiştirmenin (deformasyonun) 0,532 mm olduğunu ve üst plakadaki deliğin kenarında meydana geldiğini göstermektedir.



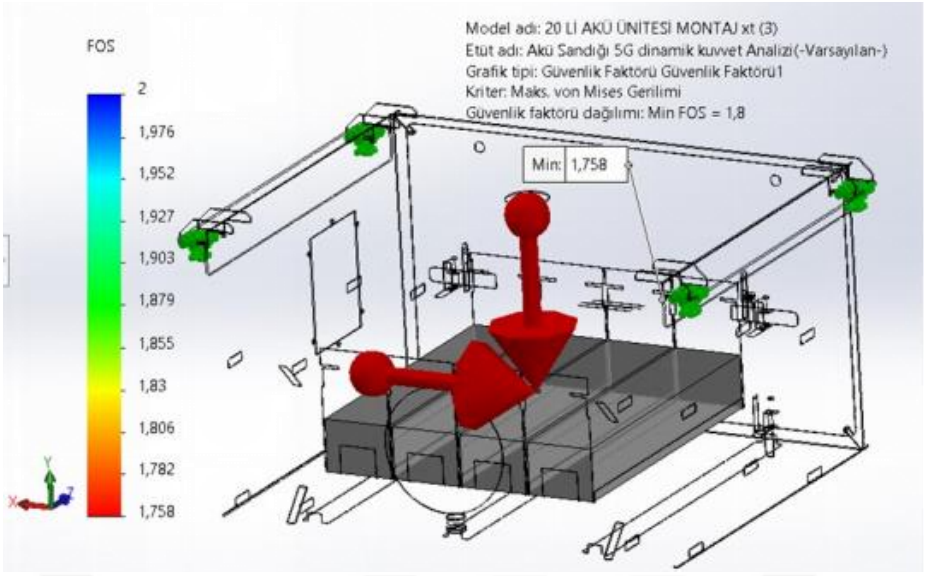
Şekil 4.13: 5G kuvvet ve 5G ağırlığa maruz kalan batarya kutusundaki eşdeğer yer değiştirme.

Şekil 4.14'te gösterilen deformasyon (gerilme), bağlantı braketinde meydana geldiği hesaplanmış ve maksimum değeri %0,017/mm'dir.

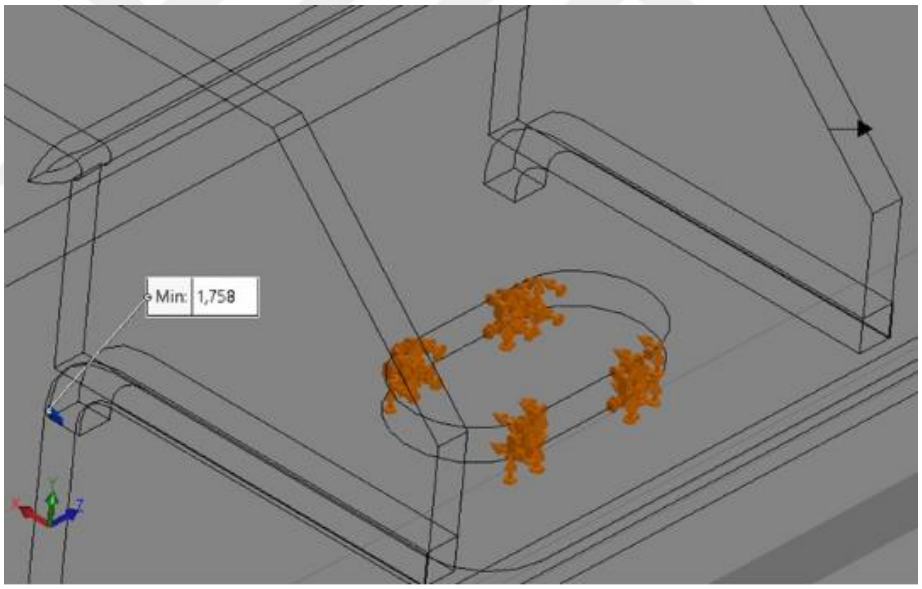


Şekil 4.14: 5G kuvvet ve G ağırlığa maruz kalan akü kutusundaki eşdeğer gerilme.

Von Mises gerilimine göre pil kutusundaki minimum güvenlik faktöründeki değişiklik ve bunun meydana geldiği konum sırasıyla Şekil 4.15 ve 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.15: 5G kuvveti ve G ağırlığı ile gösterilen akü kutusundaki güvenlik faktöründeki değişiklik**.**



Şekil 4.16: Von Mises tabanlı Güvenlik Faktörünün minimum olduğu konum.

4.3.1.1. Karbon Fiber Tasarımlı Akü Kutusu

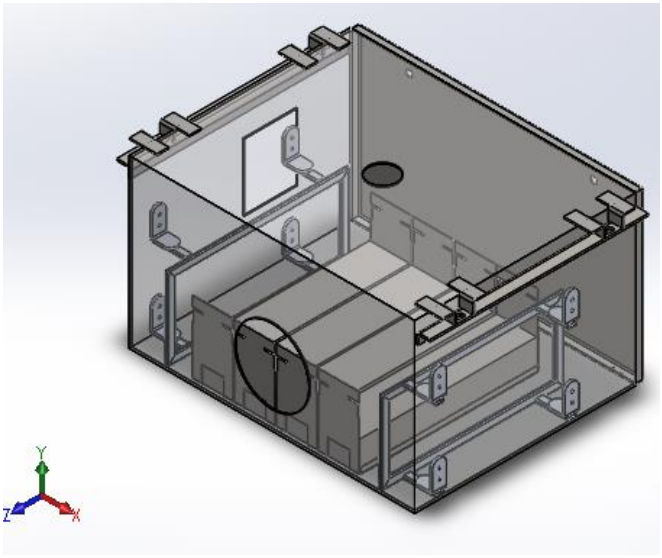
Karbon fiber kompozit pil kutusu için tasarım, 304 paslanmaz çelik akünün temelinden optimize edilmiştir. Optimize edilmiş mukavemet-ağırlık oranı elde etmek için, fiber yöneliminin deneme-yanılma yöntemi kullanılmıştır. 304 paslanmaz çeliğe kıyasla, pak kutusunun karbon fiberle optimize edilmiş tasarımı, mukavemet yapısından ödün vermeden

hafiflik ve daha iyi görünüm hedeflemektedir. Karbon fiber akü kutusunun bileşenlerle birlikte toplam kütlesi 403 kg, pil kutusunun tek başına kütlesi ise 68,27 kg'dır. Bu, 304 paslanmaz çelikten daha hafiftir, bu nedenle karbon fiber kompozit hafif bir malzeme olarak kabul edilebilir. Bu karbon fiber malzeme, demiryolu taşımacılığı uygulamalarında enerji verimliliği ve uzun vadeli güvenilirlik sağlayan ağırlık azaltımına katkıda bulunabilir.

Karbon fiber laminat kompozit malzemenin analizi, paslanmaz çeliğin analizinden farklıdır, çünkü paslanmaz çelik, özellikleri yöne bağlı olmayan izotropik bir malzemedir. Karbon fiber laminat kompozit ise ortotropik bir malzemedir ve özellikleri yöne bağlıdır. Bu nedenle, tasarımda optimize edilmiş mukavemet elde etmek için referans yönelim kullanılmıştır. Karbon fiber pil kutusunun kalınlığı 3 mm'dir ve 15 katlı bir tabakaya sahiptir. Bu katmanlar $(90)_3/(\pm45)_4/(0)_4$ yönelimlidir;her katmanın kalınlığı 0,2 mm'dir. Ayrıntılı kabuk özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

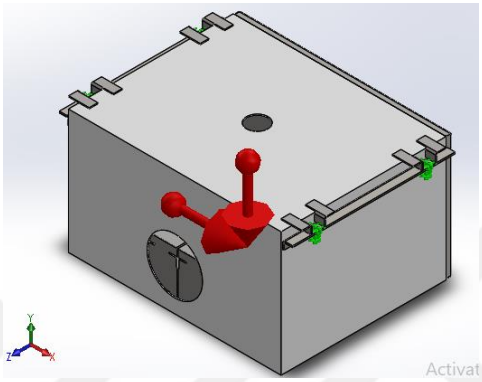
Sonlu Elemanlar Analizi Hazırlığı

Karbon fiber vagon pil saklama kutusu için oluşturulan Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) modeli Şekil 4.17'de gösterilmektedir. 304 paslanmaz çelik ile aynı şekilde, mukavemet analizine çok az etkisi olan ancak analiz çözümünü karmaşıklaştıran kasnaklar, plastik kablo kanalları, pil terminalleri vb. parçalar pasifleştirilmiştir. Ek olarak, pil hücrelerinin yaklaşık geometrilerini ve ağırlıklarını temsil etmek için eşdeğer ağırlıkta dört adet 304 paslanmaz çelik blok kullanılmıştır.



Şekil 4.17: Vagon Akü Saklama Kutusu FEA Modeli.

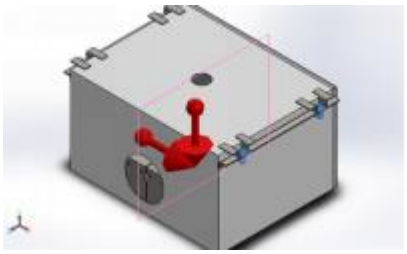
Karbon fiber akü saklama kutusunun FEA modelinin sınır koşulları Şekil 4.18'de gösterilmektedir. Kutunun üst dört bağlantı köşesinde bulunan braketin doğrusal ve dönme hareketleri kısıtlanmıştır (yeşil sabitleme sembolleriyle gösterildiği gibi). Aşağı doğru yerçekimi ivmesi (= 9,81 m/s²; -y; ters kırmızı ok) akü saklama kutusuna etki eden G ağırlık kuvvetini oluşturur. Soldan sağa yönde (x; 5x9,81 m/s²=) 49,05 m/s²'lik tasarım ivmesi, yapının dayanması gereken 5G kuvvetini oluşturur. Her iki yüklemenin de yapısal gövde kuvvetleri olduğu unutulmamalıdır. Kutunun sonlu elemanlar ağı Şekil 4.20'de gösterilmektedir.



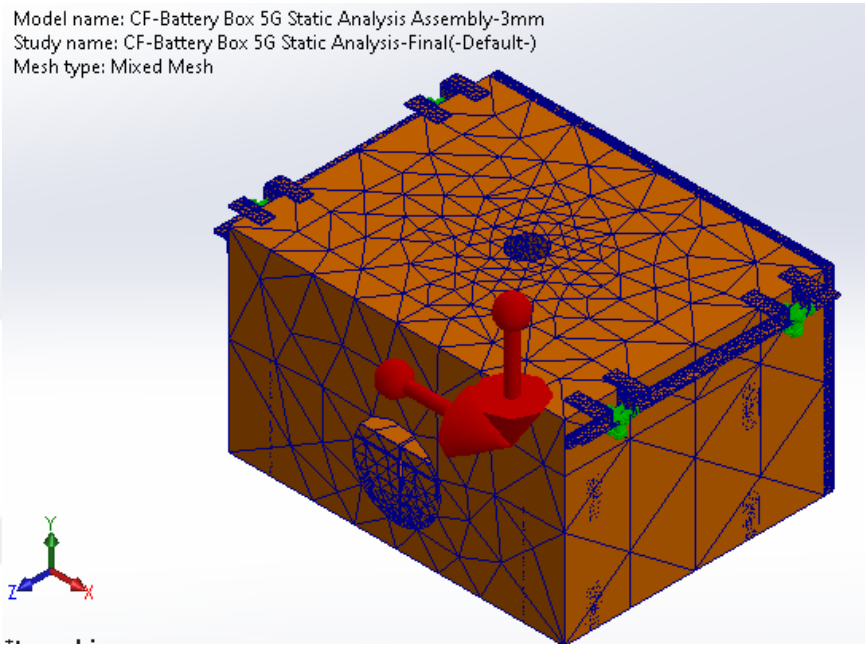
Şekil 4.18: Akü Kutusu FEA Modeli Sınır Koşulları.

Tablo 4.1: **Pil kutusunun kompozit kabuk özellikleri.**

Kat man	Kalınlık (mm)	Açı(deg)	Alan(m^2)	Hacim(m^3)	Yoğunluk (kg/m^3)	Kütle (kg)	Ağırlıkt (N)
1	0.2	90	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
2	0.2	90	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
3	0.2	90	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
4	0.2	45	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
5	0.2	-45	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
6	0.2	45	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
7	0.2	-45	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
8	0.2	45	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
9	0.2	-45	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
10	0.2	45	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
11	0.2	-45	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
12	0.2	0	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
13	0.2	0	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
14	0.2	0	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74
15	0.2	0	3.114	0.00062	1,760	1.096	10.74

Load name	Load Image	Load Details
Gravity-1		Reference: Right Plane Values: **0 -9.81 49.05** Units: **m/s^2**

Şekil 4.19: Gövde kuvveti yükü detayı.



Şekil 4.20: Akü Kutusu FEA Ağı

Mesh Details

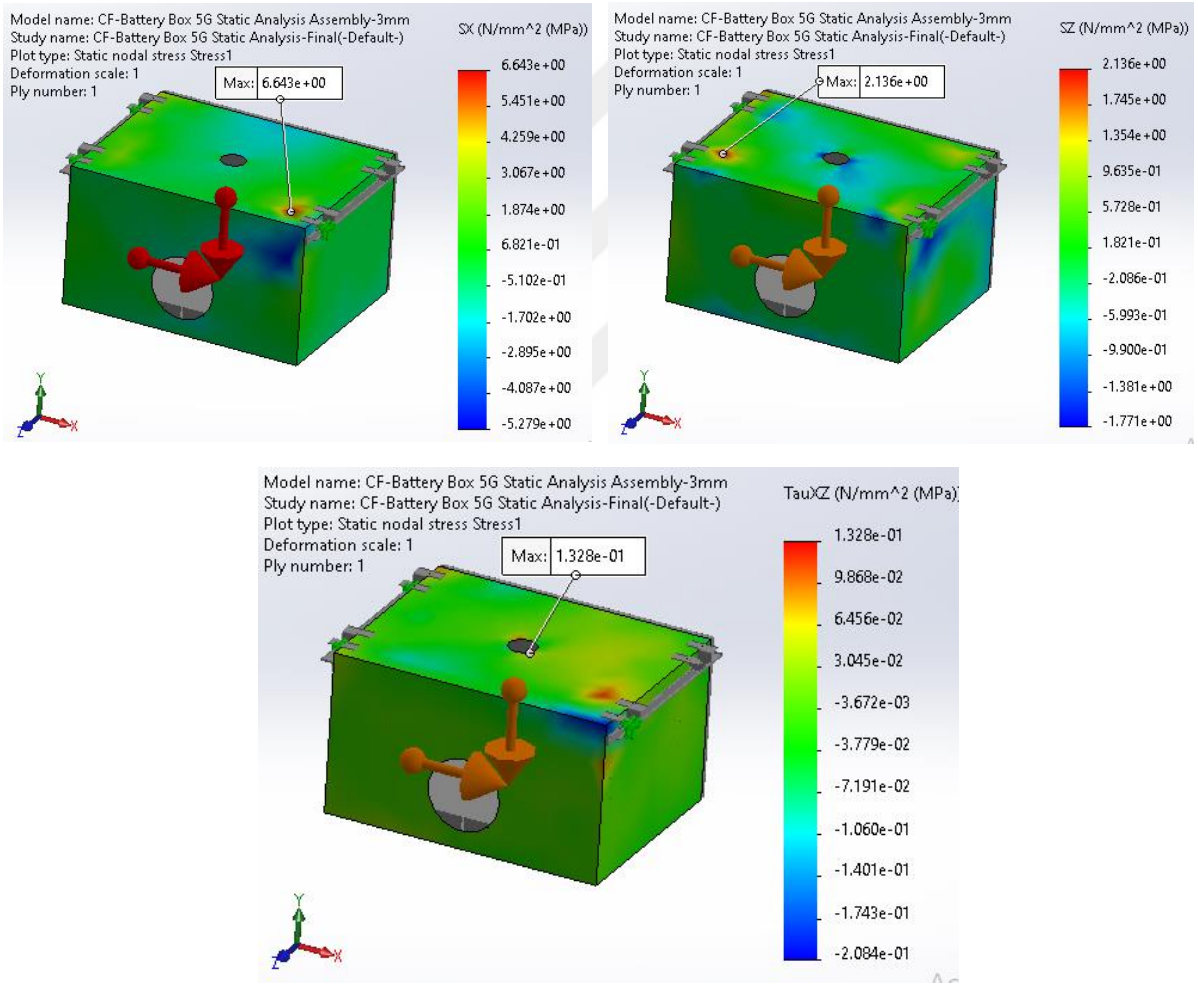
Study name	CF-Battery Box 5G Static Analysis-Final (-Default-)
Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Jacobian check for shell	On
Max Element Size	361 mm
Min Element Size	12 mm
Mesh quality	High
Total nodes	118273
Total elements	59133
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:34
Computer name	AYUNI

Şekil 4.21: Akü Kutusu FEA Ağ Kalitesi Bilgileri.

Ağ kalitesi ile ilgili bilgiler Şekil 4.21'de sunulmuştur. Karışık Eğri Ağ algoritmasının 16 Jacobian noktası, 118.273 düğüm ve 59.133 tetrahedral eleman kullandığı görülmektedir. Bu verilerden elde edilen yüksek ağ kalitesi, programda bulunan ağ kalitesi ölçüm algoritmaları ile doğrulanmaktadır.

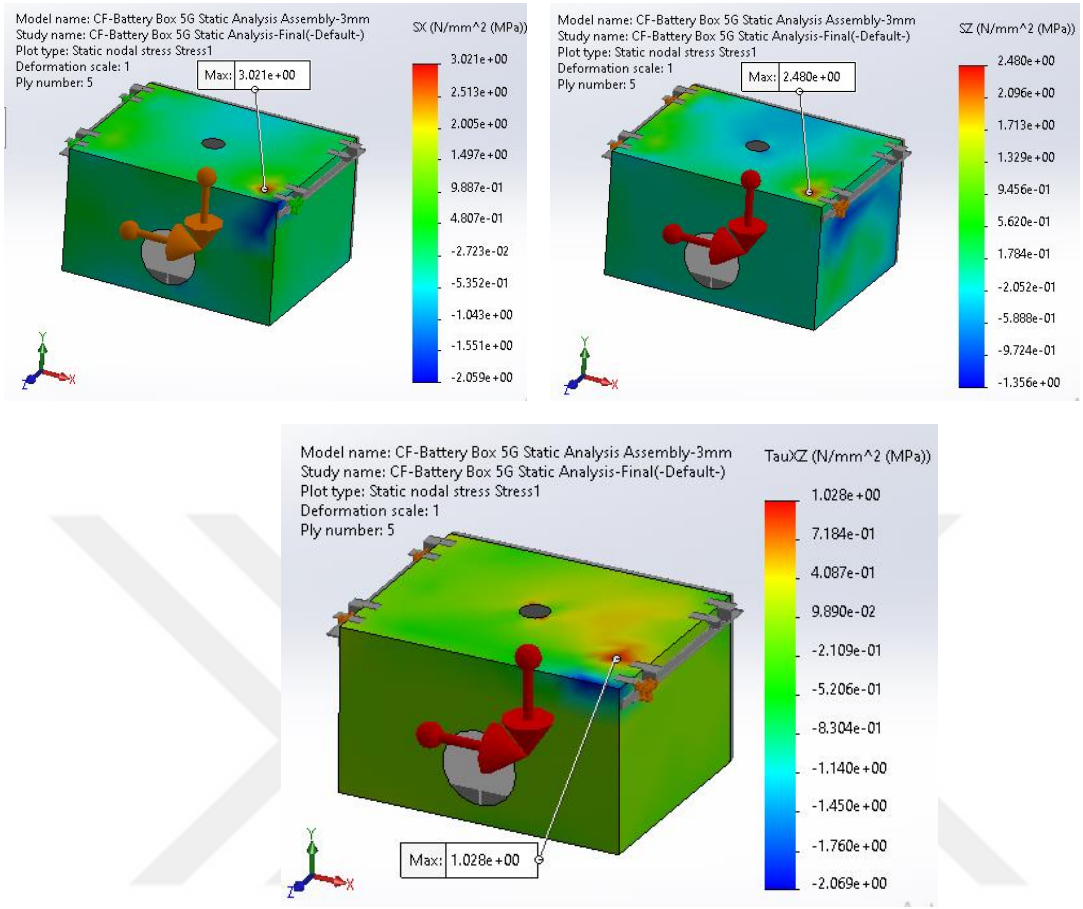
Laminat karbon fiber pil kutusunda, analiz her bir katman için ayrı ayrı yapılır, ancak burada sadece dördü örnek olarak gösterilmiştir; bunlar katman-1, katman-5, katman-10 ve katman-25'tir. Örnekten, σx, σz ve τxz yönlerindeki gerilme dağılımı ve yer değiştirme Şekil 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25'te gösterilmektedir.

Katman-1



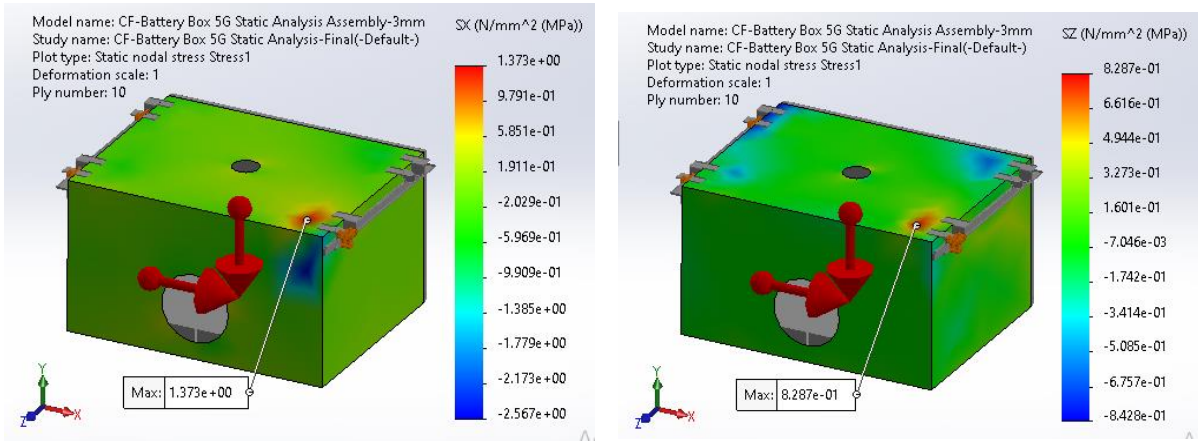
Şekil 4.22 : 5G kuvveti ve G ağırlığına maruz kalan kat-1 için karbon fiber akü kutusunun statik analizi.

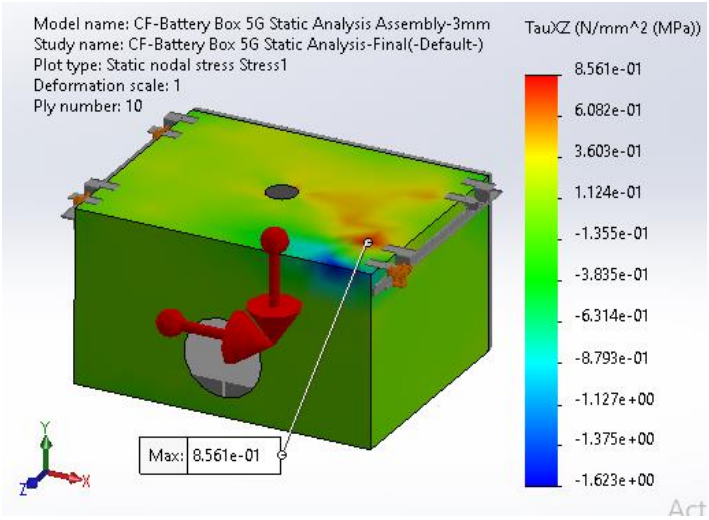
Katman-5



Şekil 4.23: 5G kuvvet ve G ağırlığına maruz kalan ply-5 için karbon fiber pil kutusunun statik analizi.

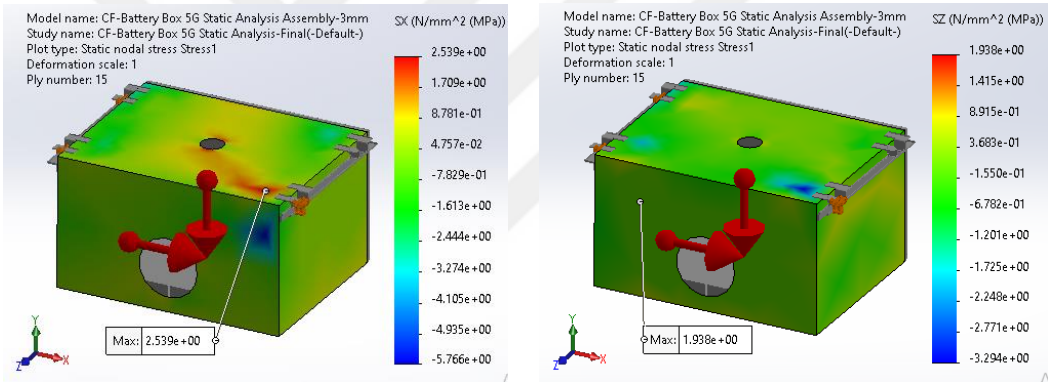
Katman-10

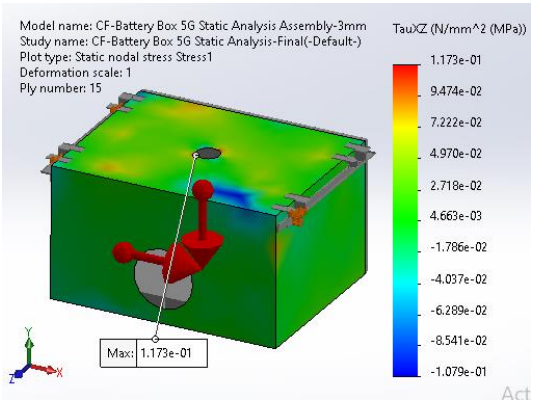




Şekil 4.24: 5G kuvveti ve G ağırlığına maruz kalan katman-10 için karbon fiber pil kutusunun statik analizi.

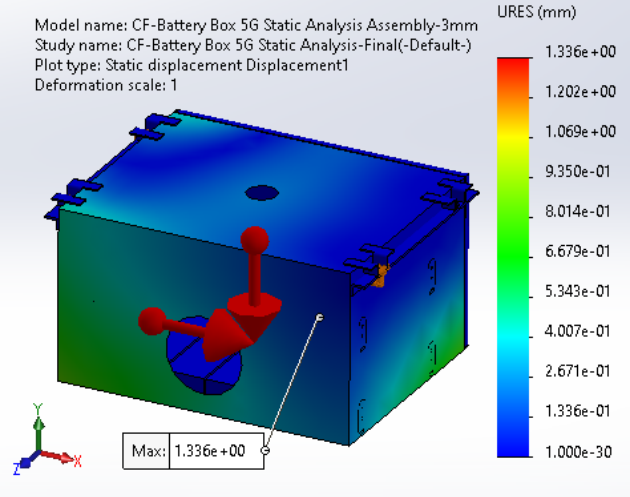
Katman-15





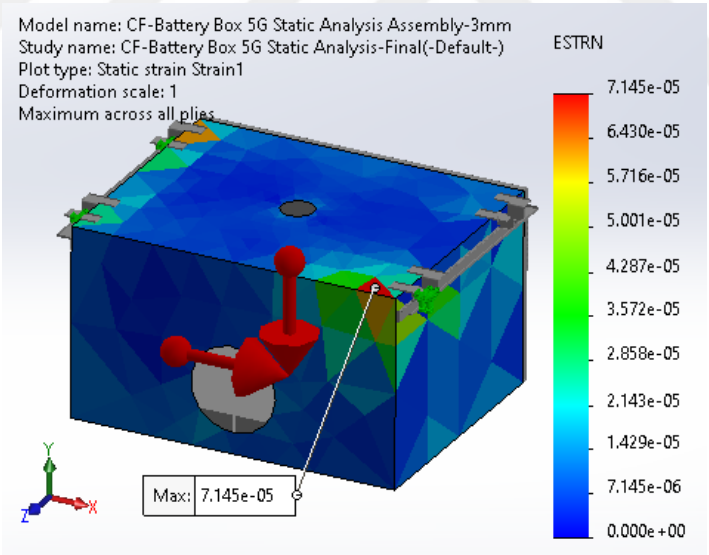
Şekil 4.25: 5G kuvvet ve G ağırlığına maruz kalan katman 15 için karbon fiber akü kutusunun statik analizi.

Şekil 4.26, akü muhafazasındaki maksimum yer değiştirmenin (deformasyonun) 1,336 mm olduğunu ve kapıya yakın pil kutusunun orta kenarında meydana geldiğini göstermektedir.



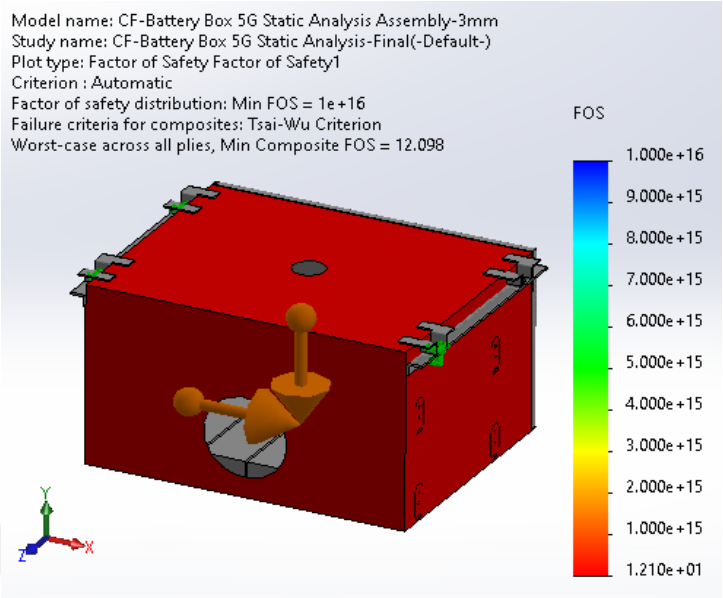
Şekil 4.26: 5G kuvveti ve G ağırlığına maruz kalan karbon fiber akü kutusunun yer değiştirme dağılımı.

Şekil 4.27'de gösterilen tüm katmanlar boyunca maksimum deformasyon (gerilme), akü kutusunun arka sağ kenarında meydana geldiği hesaplanmıştır ve tüm katmanlar boyunca maksimum değeri %0,00715/mm'dir.

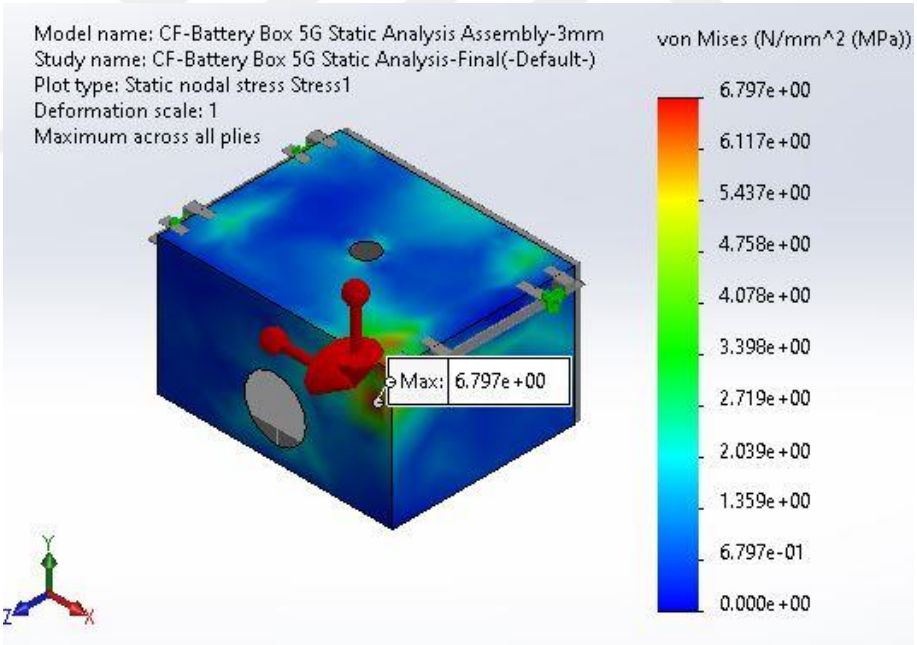


Şekil 4.27:5G kuvveti ve G ağırlığına maruz kalan akü kutusundaki eşdeğer maksimum gerilme.

Tsai-Wu kriterlerine göre akü kutusundaki tüm katmanlarda minimum güvenlik faktöründeki en kötü durumdaki değişiklik Şekil 4.28 te gösterilmektedir.



Şekil 4.28: 5G kuvvet ve G ağırlığında gösterilen akü kutusundaki güvenlik faktöründeki en kötü durum değişikliği.



Şekil 4.29: 5G kuvvet ve G ağırlığına maruz kalan akü kutusundaki maksimum von Mises gerilimi.

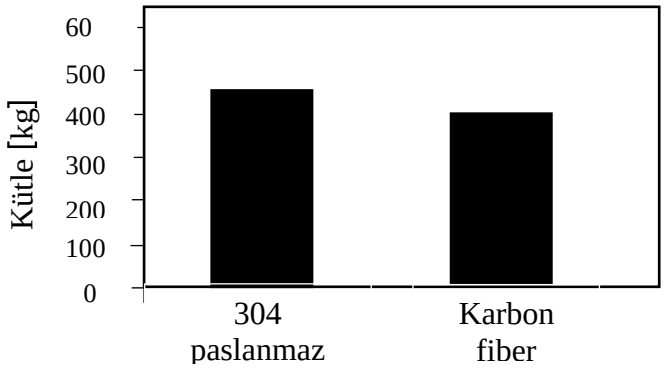
5. TARTIŞMA

Bu bölümde, karbon fiber laminat kompozit ve 304 paslanmaz çelik için yapılan çalışma simülasyonu analizinin sonuçları tartışılmakta ve yorumlanmaktadır. Dolayısıyla, ana amaç, mukavemet analizi kapsamında iki pil kutusunun mekanik performansını değerlendirmek, karşılaştırmak, yorumlamak ve özetlemektir. Malzemelerin yapısal verimliliğini gösteren gerilme dağılımı, deformasyon, güvenlik faktörü ve arıza indekslerinin değerlendirilmesine önem verilmiştir.

Nihai amaç, özellikle mekanik verimlilik, azaltılmış ağırlık ve gerçek dünya yükleme koşulları altında dayanıklılık açısından, gelişmiş kompozit malzemelerin geleneksel paslanmaz çeliğe göre üstünlüğünü vurgulamaktır.

5.1. AĞIRLIK DEĞERLENDIRMESI VE KARŞILAŞTIRMA

Bir malzemenin mekanik özelliklerini incelerken, yoğunluk, malzemenin ağırlığını ve mekanik performansını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Daha önce de belirtildiği gibi, tüm bileşenleri ile birlikte 304 paslanmaz çelik akü kutusunun ağırlığı 443 kg, karbon fiber akü kutusunun ağırlığı ise 403 kg olup, yaklaşık %9 ağırlık azalması söz konusudur. Ancak, sadece akü kutusunun ağırlığı karşılaştırıldığında, paslanmaz çelik akü kutusu 105,38 kg iken, karbon fiber pil kutusu 68,27 kg ağırlığındadır, bu da yaklaşık %35,22 ağırlık azalması anlamına gelir. Dolayısıyla, karbon fiber optimize edilmiş hafif bir malzeme olarak kabul edilebilir. Şekil 5.1, ağırlıklarının grafiksel temsilini göstermektedir.



Şekil 5.1: Akü kutusunun 304 paslanmaz çelik tasarımı ile karbon fiber tasarımı arasındaki ağırlık karşılaştırması.

Genel olarak, ağırlık farkı esas olarak 304 paslanmaz çelik ile karbon fiber arasındaki yoğunluk farkından kaynaklanmaktadır. Aşağıdaki tablo, her iki pil kutusu için pil kutusu ve kapak dışındaki diğer bileşenleri çıkararak ayrıntılı bir ağırlık değerlendirmesi ve kalınlık bilgisini göstermektedir.

Tablo 5.1: Ağırlık minimizasyonunun değerlendirilmesi.

Akü kutusu		
Katmanlar	15	-
Malzeme	Carbon fiber composite	304 stainless steel
Et kalınlık (mm)	3	3
Hacim (m^3)	19.613	15.38
Yoğunluk (kg/m^3)	1760	8000
Akü kutusu ağırlığı (kg)	68.27	105.38
Toplam Akü kutusu Kütle (kg)	403	443

Paslanmaz çeliğin et kalınlığı karbon fiber malzemeyle aynı olsa da, yoğunluğu daha yüksektir. Bunun nedeni, 304 paslanmaz çeliğin yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır.

5.2. STATIK GÜÇ ANALIZI

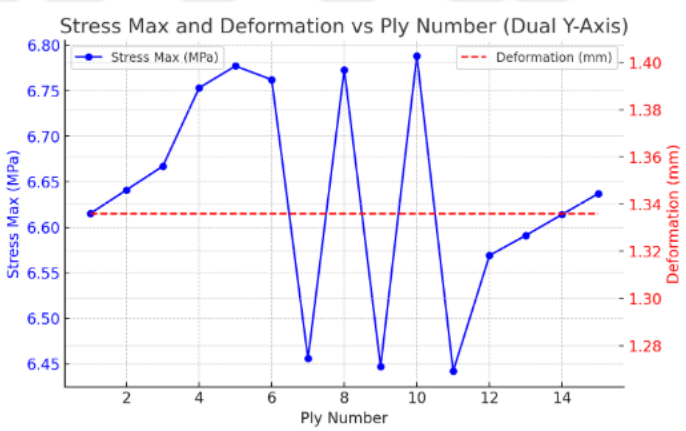
Akü kutusu için gerekli G ve 5G yapısal kuvvetler, kutunun FEA modelinde yerçekimi ivmesi bileşenleri olarak uygulanmıştır. Bu ayrıntılara dayanarak, FEA analizi, akü kutusundaki maksimum von Mises geriliminin önceki bölümde Şekil 4.12 ve Şekil 4.29 gösterildiğini ortaya koymuştur. 304 paslanmaz çelik, uygulanan gövde kuvveti altında 227,6 MPa'lık maksimum von Mises gerilimi sergilerken, karbon fiber laminat 45° yönelimli 10. katmanda 6,788 MPa'lık lokalize maksimum gerilime sahipti.

Maksimum gerilim, daha yüksek katman alanında mevcut olan daha yüksek gerilim nedeniyle bu katmanda meydana gelir. Bu durum, esas olarak ortotropik laminatın yönsel sertliğine, özellikle eksenel ve kesme deformasyonuna daha etkili bir şekilde direnç gösteren 0° ve ±45° katmanlara atfedilebilir. Paslanmaz çelik akü kutusundaki maksimum deformasyon 0,532'dir ve karşılık gelen karbon fiber akü kutusundaki maksimum yer değiştirme 1,336 mm'dir.

Deformasyon sonucu, her iki akü kutusunun da elastik aralık içinde kabul edilebilir bir deformasyona sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Maksimum gerinim deformasyonu, 304 paslanmaz çelik pil kutusu için %0,017/mm olarak belirlenirken, karbon fiber pil kutusu %0,00715/mm ve %0,1/mm'lik plastik geçiş değerinden daha az bir değer göstermiştir. Bu değer, her iki pil muhafazasının da bu yapısal kuvvetlerin etkisi altında elastik kalacağını daha da açıkça göstermektedir.

304 paslanmaz çelik pil kutusunun akma mukavemetine göre hesaplanan güvenlik faktörü 1,758'dir. Bu yükler altında 304 paslanmaz çelik pil kutusu elastik kalmasına rağmen, karbon fiber pil kutusu tüm katmanlarda minimum 12,1 güvenlik faktörü sergilemektedir. Bu nedenle, karbon fiber pil kutusu, güvenlik ve emniyet açısından 304 paslanmaz çeliği geride bırakmıştır. Sabit deformasyona göre 15 katmanlı karbon fiber laminat üzerindeki gerilme Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2: Kat sayısı ile ilgili gerilme ve deformasyon.

Şekil 5.2, gerilimin kalınlık boyunca çok fazla değişiklik göstermediğini göstermektedir. Başlangıçta, gerilim ilk beş katman için artmaya başlamış, ardından 6. ve 12. katmanlar arasında küçük bir genlikle salınmaya başlamıştır. 10. katmanda daha yüksek gerilim değerleri gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, 12. katmandan 15. katmana kadar gerilim tekrar istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Dolayısıyla, grafik laminat tasarımlarının dengeli modelini açıkça göstermektedir. Ek olarak, Şekil 5.2'de sabit deformasyon düz kırmızı bir çizgi ile gösterilmektedir. Statik simülasyon sonuçları, karbon fiber laminat kompozitin özgül mukavemet ve performans açısından 304 paslanmaz çeliği geride bıraktığını göstermiştir.

Arıza indeksi analizi, Ek B'de gösterilen Tsai-Wu kriteri kullanılarak yapılmıştır. Karbon fiber laminat akü kutusu, tüm katlarda güvenli sınırlar içindedir; Tsai-Wu kriterine göre maksimum arıza indeksi, kat 1'de (FI ≈ 0,00665) ortaya çıkmaktadır ve bu, güvenli bölgede, yani FI < 1'dir.

5.3. LAMİNAT OPTİMİZASYONU

Karbon fiber laminat istifleme sırasının optimizasyonu, yapının mekanik performansını önemli ölçüde etkilemiştir. Önceki deneyimler, üst kasanın sertliğinin yan duvarların sertliği ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Karbon fiber bazlı kompozitlerin performansı, matris içindeki fiberin yönelimi tarafından belirlenir. Başlangıçta, yükleme ve enine yönde sertliği en üst düzeye çıkarmak için yüksek 90° ve 00 içeriğine sahip katman dizileri kullanılmıştır. Ancak, orta ve alt yüzeylerin yakınına ±45° katmanların eklenmesi, kesme direncini artırmak ve yorulma performansını iyileştirmek içindir. Karbon fiber pilin konfigürasyonu $(90)_3/(\pm45)_4/(0)_4$ şeklindedir. Laminat, katmanlar arası kesme gerilmesini en aza indirmiş ve arızanın başlangıcını geciktirmiştir.

Optimize edilmiş konfigürasyon ayrıca daha iyi enerji emilimi sağlar ve cıvata delikleri gibi gerilme yoğunlaşma alanlarının yakınında lokalize deformasyonu en aza indirir. Optimize edilmiş yönlendirilmiş tasarım, mukavemet, dayanıklılık ve üretilebilirliği koruyabilir. Bu nedenle, pratik uygulama için optimize edilmiş kat yönelimi, özellikle yüksek döngü yorgunluğu ve darbe durumunda kompozit özelliklerini ve performansını belirleyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, 304 paslanmaz çeliğe kıyasla, karbon fiber laminatlar mekanik performansın iyileştiğini ve ağırlığın azaldığını kanıtlamaktadır. Bu avantajlar, önemli ağırlık azalmasıyla birleştiğinde, kompozit malzemeleri gelecekteki vagon akü kutusu tasarımları için umut verici bir seçim haline getirmektedir.

5.4. SIMÜLASYON SONUÇ ÖZETI

Tablo 5.2: Analiz sonuçu özeti.

Akü kutusu	304 paslanmaz akü kutusu	Karbon fiber kompozit akü kutusu
Akü kutusu maksimum gerilimi	227.6 MPa	6.79 MPa
Akü kutusu maksimum deformasyonu	0.532 mm	1.336 mm

Tablo 5.2 (devam):

Akü kutusu maksimum gerilimi	0.017%/mm	0.00715%/mm
Akü kutusu maksimum güvenlik faktörü	1.758	12.1
Akü kutusunun kütlesi	105.38 kg	68.27 kg
Toplam Akü kutusunun kütlesi	443kg	403kg

Yukarıdaki tablodaki verilere göre, karbon fiber kompozit, 304 paslanmaz çeliğe kıyasla üstün mekanik özelliklere sahiptir. Akü kutusunun tüm yönlerinde karbon fiberin maksimum yük gerilimi, yüksek bir güvenlik faktörü ile izin verilen gerilimin güvenli bölgesi içindedir ve zararlı bir deformasyon yoktur. Bu nedenle, özetlenen simülasyon sonuçları, karbon fiber güç akü kutusunun üstün özelliklere sahip olduğunu ve çalışma koşulları altında uygulanan tüm kuvvetleri taşıyabileceğini göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. SONUÇ

Bu araştırma, 304 paslanmaz çelik ve karbon fiber takviyeli kompoziti karşılaştırarak, yeni geliştirilen bir vagon için kompozit pil kutusunun tasarımını ve yapısal analizini araştırmayı amaçlamıştır. CFRP, göreceli bir ağırlık azalması sergilemektedir. FEA, karbon fiber takviyeli kompozit tasarımın hem mekanik mukavemet hem de hafiflik gereksinimlerini başarıyla karşıladığını göstermektedir.

Verilen gövde kuvveti altında, CFRP tasarımları kabul edilebilir deformasyon ve gerilme yoğunlaşmaları ile daha yüksek sertlik-ağırlık ve mukavemet-ağırlık oranları sergilemektedir. Analizden, 304 paslanmaz çeliğin maksimum 227,6 MPa gerilme ve 0,532 mm deformasyon yaşadığı görülmüştür. Buna karşılık, karbon fiber kompozit, 6,79 MPa'lık önemli ölçüde düşük bir maksimum gerilme ve 1,134 mm'lik maksimum deformasyon yaşamıştır.

Ağırlık değerlendirme sonuçlarına göre, karbon fiber kompozit malzeme, 304 paslanmaz çelik malzemeye kıyasla hafif bir malzeme olarak değerlendirilebilir. Karbon fiber tasarımı, daha yüksek sertlik, daha iyi sertlik, kimyasallara karşı direnç ve estetik malzemeler sergiler. Bu sonuç, yakıt tüketiminin azaltılması, maliyetlerin en aza indirilmesi, yakıt verimliliğinin artırılması ve emisyonların azaltılması gibi avantajlar sağlar.

Son olarak, çalışma sonuçlarından CFRP'nin, ağırlık tasarrufu, mekanik performans ve dayanıklılık açısından önemli iyileştirmeler sağlayan, vagon akü kutuları için olağanüstü bir malzeme olduğu sonucuna varılabilir. Bu çalışma, yeni nesil hafif ve enerji verimli araç tasarımları için demiryolu endüstrisinde gelişmiş kompozit malzemelerin daha yaygın kullanımını desteklemektedir.

CFRP, ağırlık tasarrufu, mekanik performans ve dayanıklılıkta önemli gelişmeler sağlayan vagon akü kutuları için olağanüstü bir malzemedir. Son olarak, karbon fiber akü kutusu, paslanmaz çelik akü kutusuna kıyasla ağırlıkta azalma sağlasa da, akü kutusunun toplam kütlesi, vagonun toplam ağırlığına kıyasla nispeten küçüktür. Bu nedenle, pratikte bu ağırlık azalmasının tüm vagon sisteminin performansı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Ayrıca, maliyet açısından paslanmaz çelik akü kutusu, karbon fiber akü kutusundan daha uygun maliyetlidir.

6.2. ÖNERI

Bu çalışma, 304 paslanmaz çelik ve karbon fiberle güçlendirilmiş kompozit malzemelerin simülasyon analizini göstermektedir. Simülasyon analizi ve karşılaştırmalı çalışmaya göre, vagon akü kutusunun tasarımı ve geliştirilmesind in ana malzemesi olarak karbon fiber takviyeli polimer kullanılması önerilmektedir. Önemli ölçüde ağırlık azaltımı, yeterli mekanik performans ve dayanıklılık ile birleştiğinde, CFRP'yi 304 paslanmaz çelik malzemeye çok uygun bir alternatif haline getirmektedir. Bu çalışma, malzeme değişikliklerinin ağırlık ve mekanik özellikleri nasıl etkilediğini belirlemek için yapılmıştır. Malzeme daha iyi performans ve ağırlığa sahipse, sadece demiryolu vagonu akü kutularında değil, robotik, otomobil, havacılık, savunma, rüzgar türbinleri ve havacılık gibi bir dizi endüstriyel alanda da kullanılabilir.

Kompozit sonucun yoğunluğundan, karbon fiber akü kutusu, 304 paslanmaz çelik malzemeye kıyasla hafif bir tasarım olarak değerlendirilebilir. Geleneksel çelik malzemeyi daha hafif, daha sert ve estetik malzemelerle değiştirmek isteyen her sektör, bu tür malzemeleri dikkate almalıdır. Tüm karşılaştırma ve sonuçlardan, üretilen kompozit malzemenin hafif uygulamalarda geleneksel çelik malzemenin potansiyel bir alternatifi olabileceği sonucuna varabiliriz.

6.3. GELECEK ÇALIŞMALAR

Termal analiz, yorulma analizi, modal analiz, darbe analizi ve diğer kritik özelliklerin ayrıntılı bir çalışması üzerine ileri düzeyde araştırma yapmak ve uygulanabilir, pratik bir tasarım geliştirmek için tam bir içgörü elde etmek. Bu çalışma, maliyet ve performansı daha da optimize etmek için hibrit kompozit konfigürasyonlarını araştırmak üzere genişletilebilir. Ayrıca, karbon fiber kompozit sentetik bir malzemedir; çevreye etki edecek geri dönüştürülebilir bir malzeme değildir.

Bu nedenle, kompozitin çevresel dayanıklılığındaki uzun vadeli performansı değerlendirmek çok önemlidir. Gerçek dünya yükleme koşulları altında prototip testleri yoluyla simülasyon sonuçlarının deneysel doğrulamasını araştırmak. Bu tezin bir başka ufku, demiryolu endüstrisinde büyük ölçekli üretimin fizibilitesini sağlamak için üretilebilirlik ve maliyet analizini dikkate almaktır.

KAYNAKLAR

Abdurohman, K. *ve diğ..*, (2018) 'A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward E-glass EW 185/lycal composites', *Journal of Physics: Conference Series*, 1130, p. 012018.

Ahmad, J. ve Zhou, Z. (2022) 'Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: A Review', *Construction and Building Materials*, 333, p. 127353.

Aktaş, A. ve Kirçiçek, Y. (2021) 'Solar Hybrid Systems and Energy Storage Systems', *Solar Hybrid Systems*, pp. 87–125.

Almushaikeh, A.M. *ve diğ* (2023) 'Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of Carbon Fiber: A Review', *Polymer Testing*, 122, p. 108029.

Balasubramanian, K., Sultan, M.T.H. ve Rajeswari, N. (2018) 'Manufacturing techniques of composites for aerospace applications', *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, pp.55–67.

Beardmore P. ve Johnson CF. (1986) 'The potential for composites in structural automotive applications', Composite Science Technolgy, 26 pp. 25–281.

Bikas, H., Stavropoulos, P. ve Chryssolouris, G. (2015) 'Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1–4), pp. 389–405.

Chen Q-S, Zhao H, Kong L-X, ve Chen K-W. (2017) 'Research on Battery Box Lightweight Based on Material Replacement', Advances in Engineering Research, 141 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering, pp. 346-358.

Chen, Y. *ve diğ* (2021) 'A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards', *Journal of Energy Chemistry*, 59, pp. 83–99.

Daniel, I. M., ve Ishai, O. (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University

Press.

Daniel, I.M., Ishai, O., Daniel, I.M., ve Daniel, I. (1994). Engineering Mechanics of Composite Materials. New York: Oxford University Press.

Favoretto Silva, R ve Kaewunruen, S. (2017). 'Recycling of Rolling Stocks', Environments, 4(2),

Fayomi, O., Okwilagwe, O., Agboola, O. *ve diğ* (2020). Assessment of composite materials in advance application: a mini overview. Materials Today: Proceedings38: 2402–2405.

Gerlitz, E.*ve diğ.* (2021) 'Analysis of the variety of lithium-ion battery modules and the challenges for an agile automated disassembly system', *Procedia CIRP*, 96, pp. 175–180.

Ghosh, R., Das, S., P. Mallick, S. ve R, R. (2022) 'Fundamentals of Carbon-Fiber-Reinforced Composite and Structures', in *Natural and Synthetic Fiber Reinforced Composites: Synthesis, Properties and Applications*. 1st edn. Haryana, India: WILEY-VCH GmbH, pp. 37–65.

Gupta, M., ve Srivastava, R. (2015). Mechanical Properties of Hybrid Fibers-Reinforced Polymer Composite: A Review. Polymer-Plastics Technology and Engineering. 21(44), pp. 1-66.

Gupta, M.K., Ramesh, M. ve Thomas, S. (2021) 'Effect of hybridization on properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites (2001–2020): A Review', *Polymer Composites*, 42(10), pp. 4981–5010.

G. Keenor, Overhead Line Electrification for Railways, 6th ed. 2021.

Harte, A.M., Mc Namara, J.F. ve Roddy, I.D. (2004) 'A multilevel approach to the optimisation of a composite light rail vehicle bodyshell', *Composite Structures*, 63(3–4), pp. 447–453.

Hodkinson, R. ve Fenton, J. (2000) 'Battery/fuel-cell EV design packages', *Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design*, pp. 105–140.

Höhne, C.-C. *ve diğ* (2023) 'New approach for electric vehicle composite battery housings: Electromagnetic shielding and flame retardancy of Pur/up-based sheet moulding compound', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 167, p. 107404.

Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M. ve Elharfi, A., 2021. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, p.113640.

H.B. Shim, M.K. Seo, ve S.J. Park., (2002). Thermal conductivity and mechanical properties of various cross-section types carbon fiber-reinforced composites, Journal of Material Science, 37, pp. 1881– 1885.

Jeyaseelan, C. *ve diğ.* (2020) 'Ni-CD batteries', *Rechargeable Batteries*, pp. 177–194.

Joshi, S.C. (2012) 'The pultrusion process for polymer matrix composites', *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, pp. 381–413.

Kaewunruen, S., Rungskunroch, P. ve Jennings, D. (2019) 'A through-life evaluation of end-of-life rolling stocks considering asset recycling, energy recovering, and financial benefit', *Journal of Cleaner Production*, 212, pp. 1008–1024.

Karl T Ulrich., 2003 "Product design and development", Tata McGraw-Hill Education.

Kojima, Y., Matsunaga, T., ve Yamaguchi, S., 2017. The impact of new shinkansen lines (tohoku shinkansen (hachinohe - shin-aomori) and kyusyu shinkansen (hakata - shin-yatsushiro)). In: Transportation Research Procedia, pp. 344e357.

Kreibick, James A., *ve diğ* 2015 "Thermal analysis of an energy storage system for a battery electric switcher locomotive." *2015 Joint Rail Conference*,

Kulkarni, P. V., Sawant, P. J., ve Kulkarni, V. N. (2018). *Fatigue life prediction and modal analysis of carbon fiber reinforced composites*.

Lee, C.K., Kim, Y.K., Prutichaiwiboon, P., Kim, J.S., Lee, K.M., ve Ju, C.S., 2010. Assessing environmentally friendly recycling methods for composite bodies of railway rolling stock using life- cycle analysis. Transport. Res. Transport Environ. 15 (4), 197e203.

Li, Jicheng, Cao Xianhong ve Guo Lin., 2020 "Finite Element Analysis of Power Battery Box chassis of Electric Bus." *Journal of Physics: Conference Series*, 1578(1) p. 012235,

Linden, D., ve Reddy, T. B. (Eds.). (2002). Handbook of batteries (3rd ed.). McGraw-Hill.

Lingli, C., ve Zhao, X. (2019). "Lightweight design and static strength analysis of Battery Box for Electric Vehicle." *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent*

Control and Artificial Intelligence.

Liu, Z. *ve diğ*. (2018) 'Reliability-based design optimization of composite battery box based on modified particle swarm optimization algorithm', *Composite Structures*, 204, pp. 239–255.

Liu, Yingying, *ve diğ*. 2019, "Design and application of carbon fiber composite material in end box of Rail Transit Vehicles." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 612 (3), p. 032200.

Lu, W. *ve diğ*. (2022) 'Design and research on Battery Box of four seat Pure Electric Vehicle', *2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)* [Preprint].

Miclosina, C.O, *ve diğ*., (2011). Fatigue Analysis of an Outer Bearing Bush of a Kaplan Turbine, pp. 155-161.

Mohajer k., B. ve Mousavi G., S.M. (2023) 'Energy management optimization in smart railway stations with the ability to charge plug-in Hybrid Electric Vehicles', *Journal of Energy Storage*, 70, p. 107867.

Nima G, Javier C, Markus B, ve Erik D., 2017. Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016, 105, p. 4561–4568.

Ning, H. *ve diğ*. (2007) 'Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel f Mass Transit Vehicle', *Composite Structures*, 80(1), pp. 82–91.

Park, S-J. (2018). Carbon fibers. *Springer Series in Materials Science.*

Peter W Christensen ve Anders Klarbring., (2008). "An introduction to structural optimization, Springer Science & Business Media, 153.

Petrovic, S. (2021) *Battery technology crash course: A concise introduction*. Cham, Switzerland: Springer.

Pickering, K.L., Efendy, M.A., ve Le, T.M. (2016). A review of recent develop-ments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 83: 98–112.

Rajak, D. K., Wagh, P. H., ve Linul, E. (2022). A review on synthetic fibers for polymer matrix

composites: Performance, failure modes and applications. *Materials*, *15*(14), 4790.

Rana, S. ve Fangueiro, R. (2016) 'Advanced composites in aerospace engineering', *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, pp. 1–15.

Rassiah, K., Ali, A. ve Ahmad, M.M. (2023) 'A comparison analysis on mechanical properties between laminated woven bamboo and epoxy composite versus laminated strip bamboo and polyester composite', *Advanced Structured Materials*, pp. 9–18.

Saheb, D. ve Jog, J., 1999. Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology*, 18(4), pp.351-363.

Sayam, A. *ve diğ.* (2022) 'A review on carbon fiber-reinforced hierarchical composites: Mechanical performance, manufacturing process, structural applications and Allied challenges', *Carbon Letters*, 32(5), pp. 1173–1205.

Schludi, C., ve Joos, J. (2019). Lightweight and safe composite battery housings. *Lightweight Design Worldwide, 12*(6), 44–47.

Sihui Dong, *ve diğ.* (2022), Design and Optimization for a New Locomotive Power Battery Box, Sustainability, 14, 12810.

Sumithra, G. *ve diğ* (2023)'Review on composite classification, manufacturing, and applications', *Materials Today: Proceedings* [Preprint].

Tang, J., Swolfs, Y., Longana, M.L. *ve diğ*. (2019). Hybrid composites of aligned discontinuous carbon fibers and self-reinforced polypropylene under tensile loading. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing123: 97–107.

Tian, T. ve Kevin, D. C. (2012). Anisotropic thermal conductivity measurement of carbon-fiber/epoxy composite materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.55(23-24), pp. 6530-6537.

TGVweb—TGV Dimensions. Available online: http://www.railfaneurope.net/ tgv/dimensions.html.

Wang, W. *ve diğ*. (2016). The electric car battery box structure random vibration fatigue analysis. Journal of automobile engineering, 1, pp. 10-14.

Wang, Y. *ve diğ.* (2023) 'A review on new methods of recycling waste carbon fiber and its application in construction and industry', *Construction and Building Materials*, 367, p. 130301.

Weigao Qiao *ve diğ.* (2021), Study on Side Collision of Battery Boxes Based on HyperWorks, Journal of Physics: Conf. Ser. 2137 012012.

White, C., Smith, S., ve Swan, S. (2016). "Battery Technologies for Locomotive Energy Storage." , IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC).

Woodburn, A., 2017. The impacts on freight train operational performance of new rail infrastructure to segregate passenger and freight traffic. J. Transport Geogr. 58, 176e185.

Xiaoyu, Z., Boming, Z. ve Shuren, Z. (2017), "Lightweight design of battery box for electric vehicle", *21st International Conference on Composite Materials.*

Yang, Na, *ve diğ.* (2019) "Dynamic and static analysis of the battery box structure of an electric vehicle." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 688 (3), 1-6,

Yuhang An *ve diğ.*, (2022), Strength analysis of the lightweight-designed power battery boxes in electric vehicle, E3S Web of Conferences 341, 01025.

Zhang, X.; Zhou, F.; Feng, Q. ve He, J., 2014. Design of Carbon Fiber Box. Shanghai Automob., 9, 6062.

Zhou, Y., ve Li, X. (2022). *Quality control of large-sized alloy steel parts fabricated by multi-pass welding*. Materials & Design, 221, 110831.

EKLER

Ek-A: Gerilme dönüşümü

- **Dönüşüm Hesaplaması**

$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$

$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta$

$\tau_{12} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$

with avg $= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$, diff $= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$

Ayrıca, açılar için:

- $\theta = 0^\circ$: $\cos 2\theta = 1$, $\sin 2\theta = 0$
- $\theta = 90^\circ$: $\cos 2\theta = -1$, $\sin 2\theta = 0$
- $\theta = 45^\circ$: $\cos 2\theta = 0$, $\sin 2\theta = 1$
- $\theta = -45^\circ$: $\cos 2\theta = 0$, $\sin 2\theta = -1$
- $\cos 2\theta = -1$, $\sin 2\theta = 0$

Katman katman hesaplamalar

Katman-1

$\theta = 90^\circ$, $\sigma_x = 6.643$, $\sigma_z = 2.136$, $\tau_{xz} = 0.133$

- $\sigma_1 = 6.643*0 + 2.136*1 + 2*0.133*0 = 2.136$
- $\sigma_2 = 6.643*1 + 2.136*0 - 2*0.133*0 = 6.643$
- $\tau_{12} = (2.136 - 6.643)*0 + 0.133*(-1) = -0.133$

Katman-2

$\theta = 90°$, $\sigma_x = 6.329$, $\sigma_z = 1.838$, $\tau_{xz} = 0.120$

- $\sigma_1 = 6.329*0 + 1.838*1 + 2*0.120*0 = 1.838$
- $\sigma_2 = 6.329*1 + 1.838*0 - 0 = 6.329$
- $\tau_{12} = (1.838 - 6.329)*0 + 0.120*(-1) = -0.120$

Katman-3

$\theta = 90°$, $\sigma_x = 6.014$, $\sigma_z = 1.540$, $\tau_{xz} = 0.110$

- $\sigma_1 = 6.014*0 + 1.540*1 + 2*0.110*0 = 1.54$
- $\sigma_2 = 6.014*1 + 1.540*0 - 0 = 6.014$
- $\tau_{12} = (1.540 - 6.014)*0 + 0.110*(-1) = -0.110$

Katman-4

$\theta = 45°$, $\sigma_z = 3.342$, $\sigma_z = 2.802$, $\tau_{xz} = 1.186$

- $\sigma_1 = 1.671 + 1.401 + 1.186 = 4.258$
- $\sigma_2 = 1.671 + 1.401 - 1.186 = 1.886$
- $\tau_{12} = (-0.540000)*0.5 + 0 = -0.270$

Katman-5

$\theta = -45°$, $\sigma_x = 3.021$, $\sigma_z = 2.480$, $\tau_{xz} = 1.028$

- $\sigma_1 = 1.506 + 1.240 - 1.028 = 1.718$
- $\sigma_2 = 1.506 + 1.240 + 1.028 = 3.774$
- $\tau_{12} = (-0.532000)*(-0.5) + 0 = 0.266$

Katman-6

$\theta = 45°$, $\sigma_x = 2.686$, $\sigma_z = 2.145$, $\tau_{xz} = 1.076$

- $\sigma_1 = 1.343000 + 1.072500 + 1.076000 = 3.492$

- $\sigma_2 = 1.343000 + 1.072500 - 1.076000 = 1.340$
- $\tau_{12} = (-0.541000)*0.5 = -0.271$

Katman-7

$\theta = -45°$, $\sigma_x = 2.361$, $\sigma_z = 1.819$, $\tau_{xz} = 0.943$

- $\sigma_1 = 1.181 + 0.910 - 0.943 = 1.147$
- $\sigma_2 = 1.181 + 0.910 + 0.943 = 3.033$
- $\tau_{12} = (-0.542)*(-0.5) = 0.271$

Katman-8

$\theta = 45$, $\sigma_x = 2.029$, $\sigma_y = 1.487$, $\tau_{xy} = 0.966$

- $\sigma_1 = 1.015 + 0.744+ 0.966 = 2.724$
- $\sigma_2 = 1.015 + 0.744 - 0.966 = 0.792$
- $\tau 12 = (-0.542)*0.5 = -0.271$

Katman-9

$\theta = -45°$, $\sigma_x = 1.701$, $\sigma_z = 1.158$, $\tau_{xz} = 0.857$

- $\sigma_1 = 0.851 + 0.579 - 0.857= 0.573$
- $\sigma_2 = 0.851 + 0.579 + 0.857 = 2.287$
- $\tau_{12} = (-0.543)*(-0.5) = 0.272$

Katman-10

$\theta = 45°$, $\sigma_x = 1.373$, $\sigma_z = 0.829$, $\tau_{xz} = 0.856$

- $\sigma_1 = 0.687 + 0.415 + 0.856 = 1.957$
- $\sigma_2 = 0.687 + 0.415 - 0.856 = 0.245$
- $\tau_{12} = (-0.544)*0.5 = -0.272$

Katman-11

$\theta = -45^{\circ}$, $\sigma_x = 1.042$, $\sigma_z = 1.082$, $\tau_{xz} = 0.772$

- $\sigma_1 = 0.521 + 0.541 - 0.772 = 0.290$
- $\sigma_2 = 0.521 + 0.541 + 0.772 = 1.834$
- $\tau_{12} = (0.040)*(-0.5) = -0.020$

Katman-12

$\theta = 0^{\circ}$, $\sigma_x = 3.547$, $\sigma_z = 1.156$, $\tau_{xz} = 0.084$

- $\sigma_1 = 3.547*1 + 1.156*0 + 2*0.084*0 = 3.547$
- $\sigma_2 = 3.547*0 + 1.156*1 - 0 = 1.156$
- $\tau_{12} = (1.156 - 3.547)*0 + 0.084*1 = 0.084$

Katman-13

$\theta = 0^{\circ}$, $\sigma_x = 3.211$, $\sigma_y = 1.417$, $\tau_{xz} = 0.088$

- $\sigma_1 = 3.211$
- $\sigma_2 = 1.417$
- $\tau_{12} = 0.088$

Katman-14

$\theta = 0^{\circ}$, $\sigma_x = 2.875$, $\sigma_z = 1.677$, $\tau_{xz} = 0.103$

- $\sigma 1 = 2.875$
- $\sigma 2 = 1.677$
- $\tau 12 = 0.103$

Katman-15

$\theta = 0^{\circ}$, $\sigma_x = 2.539$, $\sigma_y = 1.938$, $\tau_{xy} = 0.117$

- $\sigma_1 = 2.539$

- $\sigma_2 = 1.938$
- $\tau_{12} = 0.117$

Ek-B: Başarısızlık İndeksi Hesaplaması ve Sonuç Verileri.

Çelik akü kutusunda güvenlik, solidwork simülasyonu ile kolayca hesaplanan güvenlik faktörü (n) ile kontrol edilirken, karbon fiber için güvenlik veya başarısızlık, bileşenin gerekli standardı karşıladığını anlamak için tsai-wu başarısızlık indeksi (FI) ile kontrol edilir. Öncelikle, karbon fiber/epoksi malzemenin ortotropik özellikleri Tablo A.1'de gösterilmektedir.

Tablo A. 1: **Karbon fiber/epoksi malzemenin özellikleri.**

Özellikleri	**Sembol**	**Değer ((MPa)**
Boyuna çekme dayanımı	Xt	1760
Boyuna basınç dayanımı	Yc	1570
Enine çekme dayanımı	Xc	80
Enine basınç dayanımı	Yc	80
Düzlem içi kayma mukavemeti	S	98

➢ **Kat-1**

Kat-1 için verilen veriler

Kat 1:

Yönlendirme = 90°

σ1 = 2.136000, σ2 = 6.643000, τ12 = -0.133000

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F_1 * \sigma_1 = (-6.876e^{-05}) * 2.136000 = -0.000147$

$F_2 * \sigma_2 = (0+0) * 6.643 = 0$

$F_{11} * \sigma 1^2 = (3.619e^{-07}) * (2.136^2)$

$\rightarrow \sigma_1^2 = 4.563$, $F_{11}*\sigma_1^2 = 1.65e^{-06}$

$F_{22} * \sigma_2^2 = (1.563e^{-04}) * (6.643^2)$

$\rightarrow \sigma_2^2 = 44.119$, $F_{22}*\sigma_2^2 = 0.00689$

$2*F_{12}*\sigma_1*\sigma_2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 2.136 * 6.643$

$\rightarrow 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = -0.000107$

$F_{66}\tau_{12}^2 = (1.0412e^{-04}) * (-0.133000\text{^}2)$

$\rightarrow \tau12\text{^}2 = 0.017689$, $F66*\tau12\text{^}2 = 1.840e^{-06}$

Böyleceaşarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000147 + 0 + 0.00000165 + 0.00689 - 0.000107 + 0.00000184 = 0.00665

Yani, FI < 1 the ply-1 is güvenlidir.

- **Kat-2**

Kat-2 için verilen veriler

Yönlendirme = 90°

$\sigma_1 = 1.838$, $\sigma_2 = 6.329$, $\tau_{12} = -0.120$

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F_1*\sigma_1 = (-6.876e^{-05})*1.838 = -0.000126$

$F_2*\sigma_2 = 0$

$F_{11}*\sigma_1^2 = 3.619e^{-07} * (1.838^2) \rightarrow 1.220e^{-06}$

$F_{22}*\sigma_2^2 = 1.563e^{-04} * (6.329^2) \rightarrow 0.00626$

$2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 1.838 * 6.329 \rightarrow -0.0000869$

$F_{66}\tau_{12}^2 = 1.041232819658E\text{-}04 * (0.120000\text{^}2) \rightarrow 1.500e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.0001263 + 0 + 0.00000122+ 0.00626 - 0.0000869 + 0.00000150 = 0.00605

Yani, FI < 1 the ply-2 is güvenlidir.

- **Kat-3**

Kat-3 için verilen veriler

Yönlendirme = 90°

σ1 = 1.540, σ2 = 6.014, τ12 = -0.110

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{05})*1.540 = -0.000106$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (1.540^2) \rightarrow 8.600e^{-07}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (6.014^2) \rightarrow 0.00565$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759\text{-}06) * 1.540 * 6.014 \rightarrow -0.0000700$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} *(0.110^2) \rightarrow 1.260e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000106+ 0 + 0.000000860 + 0.00565 - 0.0000700 + 0.00000126 = 0.00548

Yani, FI < 1 the ply-3 is güvenlidir.

- **Kat-4**

Kat-4 için verilen veriler

Yönlendirme = 45°

σ1 = 4.258, σ2 = 1.886, τ12 = -0.270

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*4.258 = -0.000293$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (4.258^2) \rightarrow 6.560e^{-06}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (1.886^2) \rightarrow 0.000556$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.7598e^{-06}) * 4.258 * 1.886 \rightarrow -0.0000600$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.270^2) \rightarrow 7.590e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000293+0+0.00000656 + 0.0005560 - 0.0000600 + 0.00000759 = 0.000217

Yani, FI < 1 the ply-4 is güvenlidir.

- **Kat-5**

Kat-5 için verilen veriler

Yönlendirme = - 45°

$\sigma1 = 1.718$, $\sigma2 = 3.774$, $\tau12 = 0.266$

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*1.718000 = -0.000118$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (1.718^2) \rightarrow 1.0700e^{-06}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (3.774^2) \rightarrow 0.00223$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.7598e^{-06}) * 1.718 * 3.774 \rightarrow -0.0000490$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.266^2) \rightarrow 7.370e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI =-0.000118+ 0 + 0.00000107 + 0.00223 - 0.0000490 + 0.00000737 = 0.00207

Yani, FI < 1 the ply-5 is güvenlidir.

- **Kat-6**

Kat-6 için verilen veriler

Yönlendirme = 45°

σ1 = 3.492, σ2 = 1.339, τ12 = -0.271

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*3.492 = -0.000240$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (3.492^2) \rightarrow 4.410e^{-06}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (1.339^2) \rightarrow 0.000280$

$2F12\sigma1\sigma^2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 3.492 * 1.339 \rightarrow -0.0000350$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.271^2) \rightarrow 7.620e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000240 + 0 + 0.00000441 + 0.000280 - 0.0000350 + 0.00000762 = 0.000017

Yani, FI < 1 the ply-6 is güvenlidir.

- **Kat-7**

Kat-7 için verilen veriler

Yönlendirme = - 45°

σ1 = 1.147, σ2 = 3.033, τ12 = 0.271

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*1.147 = -0.0000788$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (1.147^2) \rightarrow 4.800e^{-07}$

$F22*\sigma2^2 = 1.5625E\text{-}04 * (3.033000\text{^}2) \rightarrow 0.001437000$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 1.147 * 3.033 \rightarrow -0.0000260$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.271^2) \rightarrow 7.650e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.0000788 + 0 + 0.000000480 + 0.00144 - 0.0000260 + 0.00000765 = 0.00134

Yani, FI < 1 the ply-7 is güvenlidir.

- **Kat-8**

Kat-8 için verilen veriler

Yönlendirme = 45°

σ1 = 2.724, σ2 = 0.792, τ12 = -0.271

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*2.724 = -0.000187$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (2.724^2) \rightarrow 2.690e^{-06}$

$F22*\sigma2^2 = 1.562e^{-04} * (0.792000\text{^}2) \rightarrow 0.0000980$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 2.724 * 0.792 \rightarrow -0.0000160$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.271^2) \rightarrow 7.650e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000187 + 0 + 0.00000269 + 0.0000980 - 0.0000160 + 0.00000765 = -0.000095

Yani, FI < 1 the ply-8 is güvenlidir.

- **Kat-9**

Kat-9 için verilen veriler

Yönlendirme = - 45°

$\sigma1 = 0.573$, $\sigma2 = 2.287$, $\tau12 = 0.272$

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*0.572 = -0.0000394$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (0.575^2) \rightarrow 1.200e^{-07}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (2.287^2) \rightarrow 0.000817$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 0.573 * 2.287 \rightarrow -0.0000100$

$F66\ \tau12\text{^}2 = 1.0412e^{-04} * (0.272^2) \rightarrow 7.680e^{-06}$.

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.0000394 + 0 + 0.000000120 + 0.000817 - 0.0000100 + 0.00000768 = 0.000775

Yani, FI < 1 the ply-9 is güvenlidir.

- **Kat-10**

Kat-10 için verilen veriler

Yönlendirme = 45°

σ1 = 1.957, σ2 = 0.245, τ12 = -0.272

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*1.957 = -0.000135$

F2*σ2 = 0

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (1.957^2) \rightarrow 1.390e^{-06}$

$^{F}22*\sigma2^2 = 1.563^{-04} * (0.245^2) \rightarrow 8.90e^{-06}$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 1.957 * 0.245 \rightarrow -0.00000400$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.272^2) \rightarrow 7.700e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000135 + 0 + 0.00000139 + 0.00000890 - 0.00000400 + 0.00000770 = -0.000120

Yani, FI < 1 the ply-10 is güvenlidir.

- **Kat-11**

Kat-11 için verilen veriler

Yönlendirme = - 45°

σ1 = 0.290, σ2 = 1.834, τ12 = -0.0200

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*0.290 = -0.0000199$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (0.290^2) \rightarrow 3.00e^{-08}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (1.834^2) \rightarrow 0.000526$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 0.290 * 1.834 \rightarrow -0.00000400$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.0200^2) \rightarrow 4.000e^{-08}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.0000199 + 0 + 0.000000030 + 0.000526 - 0.00000400 + 0.000000040 = 0.000502

Yani, FI < 1 the ply-11 is güvenlidir.

- **Kat-12**

Kat-12 için verilen veriler

Yönlendirme = 0°

σ1 = 3.547, σ2 = 1.156, τ12 = 0.0840

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*3.547 = -0.000244$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (3.547^2) \rightarrow 4.550e^{-06}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (1.156^2) \rightarrow 0.000209$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 3.547 * 1.156 \rightarrow -0.000031$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.0840^2) \rightarrow 7.300e^{-07}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000244 + 0 + 0.00000455 + 0.000209 - 0.000031 + 0.00000073 = -0.000061

Yani, FI < 1 the ply-12 is güvenlidir.

- **Kat-13**

Kat-13 için verilen veriler

Yönlendirme = 0°

σ1 = 3.211, σ2 = 1.417, τ12 = 0.088

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\ \sigma_1\ \sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\ \sigma_1 + F_2\ \sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*3.211 = -0.000221$

$F2*\sigma2 = 0$

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (3.211^2) \rightarrow 3.730e^{-06}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (1.417^2) \rightarrow 0.000314$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 3.211 * 1.417 \rightarrow -0.000034$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.088^2) \rightarrow 8.100e^{-07}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000221 + 0 + 0.00000373 + 0.000314 - 0.0000340 + 0.000000810 = 0.000063

Yani, FI < 1 the ply-13 is güvenlidir.

- **Kat-14**

Kat-14 için verilen veriler

Yönlendirme = 0°

σ1 = 2.875, σ2 = 1.677, τ12 = 0.103

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*2.875 = -0.000198$

F2*σ2 = 0

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (2.875^2) \rightarrow 2.99e^{-06}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (1.677^2) \rightarrow 0.000439$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 2.875 * 1.677 \rightarrow -0.0000360$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.103^2) \rightarrow 1.100e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000198 + 0 + 0.00000299 + 0.000439 - 0.0000360 + 0.00000110 = 0.000210

Yani, FI < 1 the ply-14 is güvenlidir.

- **Kat-15**

Kat-15 için verilen veriler

Yönlendirme = 0°

σ1 = 2.539, σ2 = 1.938, τ12 = 0.1170

Dolayısıyla, tsai-wu hasar kriteri denklemine göre FI şu şekilde verilir.

$FI = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\,\sigma_1\,\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\,\sigma_1 + F_2\,\sigma_2 < 1$

Katsayı şu şekilde hesaplanabilir

$F1*\sigma1 = (-6.876e^{-05})*2.539 = -0.000175$

F2*σ2 = 0

$F11*\sigma1^2 = 3.619e^{-07} * (2.539^2) \rightarrow 2.330e^{-06}$

$F22*\sigma2^2 = 1.563e^{-04} * (1.938^2) \rightarrow 0.000587$

$2F12\sigma1\sigma2 = 2 * (-3.759e^{-06}) * 2.539 * 1.938 \rightarrow -0.0000370$

$F66\ \tau12^2 = 1.0412e^{-04} * (0.117^2) \rightarrow 1.430e^{-06}$

Böylece başarısızlık endeksi ortaya çıktı,

FI = -0.000175 + 0 + 0.00000233 + 0.000587 - 0.0000370 + 0.00000143 = 0.000379

Yani, FI < 1 the ply-15 is güvenlidir.

Bu nedenle, hesaplanan tüm sonuçlar Tablo A'da özetlenmiştir.

Tablo A.2: 15. Katmanlı karbon fiber pil kutusu için arıza indeksi (FI) özeti.

Katman	**θ**	**FI**	Maks. gerilimi **(MPa)**	**Deformasyonu (mm)**
1	90	0.00665	6.615	1.336
2	90	0.00605	6.641	
3	90	0.00548	6.667	
4	45	0.000217	6.753	
5	-45	0.00207	6.777	
6	45	$1.7e^{-05}$	6.762	
7	-45	0.00134	6.456	
8	45	$-9.52e^{-05}$	6.773	
9	-45	0.000775	6.447	
10	45	-0.000120	6.788	
11	-45	0.000502	6.442	
12	0	$-6.1e^{-05}$	6.569	
13	0	$6.3e^{-05}$	6.591	
14	0	0.000210	6.614	
15	0	0.000379	6.637	

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

DESIGN AND OPTIMIZING A COMPOSITE BATTERY BOX FOR A NEWLY DEVELOPED RAILCAR

ORİJİNALLİK RAPORU

%16	%10	%12	%4
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	www.mdpi.com İnternet Kaynağı	%2
2	Lingli Chen, Xiaoyu Zhao. "Lightweight design and static strength analysis of battery box for electric vehicle", Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence - RICAI 2019, 2019 Yayın	%1
3	pmc.ncbi.nlm.nih.gov İnternet Kaynağı	%1
4	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
5	Jawad Ahmad, Zhiguang Zhou. "Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review", Construction and Building Materials, 2022 Yayın	<%1

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Mohamed Yassin Mohamed
(İmza)