YENİ BİR HİBRİT YAPI KULLANILARAK HAFİFLİK VE ÇARPIŞMAYA DAYANIKLILIK AÇISINDAN ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA KUTUSU YAN PROFİLİNİN KAPSAMLI OPTİMİZASYONU VE TASARIMI

Muhammet ARSLAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ BİR HİBRİT YAPI KULLANILARAK HAFİFLİK VE ÇARPIŞMAYA DAYANIKLILIK AÇISINDAN ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA KUTUSU YAN PROFİLİNİN KAPSAMLI OPTİMİZASYONU VE TASARIMI

Muhammet ARSLAN
0009-0009-8048-4685

Prof. Dr. Mehmet İhsan KARAMANGİL
0000-0001-5965-0313
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

YENİ BİR HİBRİT YAPI KULLANILARAK HAFİFLİK VE ÇARPIŞMAYA DAYANIKLILIK AÇISINDAN ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA KUTUSU YAN PROFİLİNİN KAPSAMLI OPTİMİZASYONU VE TASARIMI

Muhammet ARSLAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr.Mehmet İhsan KARAMANGİL

Hafifletme, ulaşımda verimliliği artırır ve maliyetleri düşürür. Elektrikli araç(EA)' larda bataryayı çevreleyen gövde, çarpışma anında darbeyi iyi şekilde sönümlemelidir. Bu çalışma, M1 sınıfı bir aracın batarya kutusundaki yan profillerin, çarpışma performansını geliştirmeyi hedeflemiştir. Bataryanın hücre modüllerinin deforme olmayacağı güvenli yer değiştirme, 20 mm olarak belirlenmiş ve bu yer değiştirmedeki maksimum kuvvet ve enerji emilimi karşılaştırılmıştır. Toplam 33 farklı elektrikli ve hibrit araç modeli kıyaslanmıştır. Batarya yan profillerinde malzeme olarak genellikle alüminyum tercih edilse de, bu çalışma bataryaları daha dayanıklı ve daha hafif hale getirmek için pultrüzyon ile üretilen cam elyaf takviyeli polimer (CETP) profillerin kullanılmasına odaklanmıştır. Bal peteği ve negatif poisson oranlı geometrilerin birleştirildiği yeni bir kesit tasarımı geliştirilmiş ve bu tasarım, bal peteği yapılarına kıyasla yaklaşık %360 ve negatif poisson oranlı yapılara kıyasla %88'lik bir çarpışma performansı iyileştirmesi göstermiştir. Yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak çok amaçlı optimizasyon yoluyla, 27 model analiz edilerek, optimum kesite ulaşılmıştır. Optimum kesit, %23,9 daha hafif, %38,6 daha ucuz ve %3 daha yüksek bir performans sergilemiştir. Deneysel kısımda ise mevcut ve optimum kesite ait kompozit numuneler elle serme yöntemiyle üretilmiş ve 3 nokta eğme testleri aynı parametrelerde gerçekleştirilmiştir. Fiziksel testler sonucunda, optimum kesitin, mevcut kesite kıyasla %6 daha iyi durumda olduğu ispatlanmıştır ve test sonuçları FEA sonuçları ile kıyaslandığında ise model, %4 sapma ile doğrulanmıştır. Bu çalışma, EA güvenliği ve maliyet verimliliğinde önemli ilerlemeler olduğunu göstererek, yenilikçi malzeme ve tasarım yaklaşımlarının pratik faydalarını vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit yapı, çok amaçlı optimizasyon, cam elyaf takviyeli polimer (CETP), batarya kutusu, çarpışmaya dayanıklılık, pultrüzyon
2025, vii + 103 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

COMPREHENSIVE OPTIMIZATION AND DESIGN OF AN ELECTRIC VEHICLE BATTERY BOX SIDE PROFILE FOR LIGHTWEIGHT AND CRASHWORTHINESS USING A NOVEL HYBRID STRUCTURE

Muhammet ARSLAN

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

Supervisor: Prof.Dr.Mehmet İhsan KARAMANGİL

Lightweighting improves efficiency and reduces costs in transportation. In electric vehicles (EVs), the body surrounding the battery must effectively absorb impact in the event of a collision. This study aimed to improve the collision performance of the side profiles in the battery box of an M1 class vehicle. Safe displacement, where the battery's cell modules do not deform, was set at 20 mm, and the maximum force and energy absorption during this displacement were compared. A total of 33 different electric and hybrid vehicle models were compared. Although aluminium is typically preferred as the material for battery side profiles, this study focused on the use of pultruded glass fibre-reinforced polymer (CETP) profiles to make batteries more durable and lighter. A new cross-section design combining honeycomb and negative Poisson's ratio geometries was developed, and this design demonstrated approximately 360% improvement in crash performance compared to honeycomb structures and 88% improvement compared to negative Poisson's ratio structures. Using artificial neural networks (ANN) and multi-objective optimisation, 27 models were analysed to arrive at the optimal cross-section. The optimal cross-section was 23.9% lighter, 38.6% cheaper, and 3% more efficient. In the experimental section, composite samples of the existing and optimal cross-sections were produced using the hand-layup method, and three-point bending tests were performed under the same parameters. As a result of the physical tests, it was proven that the optimal cross-section is 6% better than the existing cross-section, and when the test results were compared with the FEA results, the model was validated with a 4% deviation. This study demonstrates significant progress in EA safety and cost efficiency, highlighting the practical benefits of innovative material and design approaches.

Key words: hybrid structure, multi-objective optimization, glass-fiber-reinforced polymer (GFRP), battery box, crashworthiness, pultrusion
2025, vii + 103 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda tecrübesiyle bana yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet İhsan Karamangil'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca manevi desteklerini hissettiğim anneme, babama, kardeşlerime, bu süreçte yanımda olan, anlayışı ve sabrı ile bana güç veren sevgili eşim Semiha Arslan'a ve biricik kızlarım Zeynep Alya Arslan ve İlay Arslan'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte desteklerini esirgemeyen; Hüseyin Beytüt, Ali Can Cengiz, Hakan Çavuş, Sebahattin Şen, Ahmet Abdullah Karaca ve Kıvanç Turan`a teşekkürlerimi borç bilirim.

İsmini yazamadığım fakat bu çalışmanın ortaya çıkmasında emeği geçen, katkıda bulunan herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Muhammet ARSLAN
18/08/2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ xvi
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 6
2.1. EA batarya kutusu 6
2.2. Cam elyaf takviyeli polimer (CETP) 7
2.3. Pultrüzyon yöntemi 8
2.4. Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan çalışmalar 10
3. MATERYAL ve YÖNTEM 30
3.1. Malzeme seçimi 30
3.2. Batarya pazar araştırması ve karşılaştırmalı değerlendirme 33
3.3. Test Gereklilikleri ve Isı Dağıtımı 35
3.4. Kesit Tasarımı 37
3.5. Batarya Kutusu için Sonlu Elemanlar Analiz (FEA) Modeli 42
3.6. Optimizasyon 43
3.6.1. Veri Toplama ve Ön İşleme 46
3.6.2. Amaç Fonksiyonu 46
3.6.3. YSA ile Modelleme 47
3.6.4. NSGA-II 47
3.6.5. TOPSIS 48
3.7. Optimum Parametrelerle Modelin Nihai Tasarımı ve Doğrulanması 49
3.8. Matris-Elyaf Oranının Şematik Gösterimi 51
3.9. Optimum kesitin prototip olarak üretilmesi 52
3.10. Deneysel çalışmalar 53
3.10.1. Sac metal kalıplarının tasarımı ve üretilmesi 53
3.10.2. Maçaların üretilmesi 56
3.10.3. Cam elyaf kumaşların hazırlanması 59
3.10.4. Epoksinin hazırlanması 61
3.10.5. Elle serme işlemi 62
3.10.6. Üç nokta eğme deneysel testler 68
3.10.7. Üç nokta eğme FEA` leri 73
4. BULGULAR 76
4.1. Mevcut Durum Analizi 76
4.2. Batarya Kutusu için FEA Sonuçları 76
4.3. Duyarlılık Matrisinin Sonuçları 80
4.4. Optimizasyon Sonuçları 81
4.5. Üç nokta eğme deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması 86
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 87
KAYNAKLAR 90
EKLER 96

EK 1 Eğitici kod,YSA 97
EK 2 Optimizasyon kodu 100
EK 3 Optimizasyon fonksiyon kodu 101
EK 4 Pareto-optimal çözümler 102
ÖZGEÇMİŞ 103

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E_1	Boylamsal modül
E_2	Enine modül
G_{12}	Kesme modülü
ν_{12}	Poisson oranı
R^2	Belirleme Katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
EA	Elektrikli araç
CETP	Cam elyaf takviyeli polimer
YSA	Yapay sinir ağı
FEA	Sonlu elemanlar analizi
NPR-CTP	Negatif poisson oranına sahip modülsüz batarya paketi
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
DOF	Serbestlik derecesi
TOPSIS	İdeal çözüme benzerliğe göre tercih sırası tekniği
NSGA-II	Baskın olmayan sıralama genetik algoritması
TK	Tepe kuvveti
EE	Emilen enerji
MOGA	Çok amaçlı genetik algoritma
MSE	Ortalama karesel hata
SEA	Özgül enerji emilimi
Std.	Standart
Yön.	Yönetmelik
ODT	Ortogonal deneysel tasarım
YYM	Yanıt yüzeyi metodolojisi
XPS	Ekstrüde edilmiş polistiren köpük

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Audi e-tron lityum-iyon bataryasının detaylandırılmış montaj görünüşü	6
Şekil 2.2.	Pultrüzyon süreci	9
Şekil 3.1.	Test numunesi ve konumlandırmalar	32
Şekil 3.2.	Kıyaslama çalışmalarında gözlemlenen L şeklindeki kesit	33
Şekil 3.3.	Kıyaslama çalışmalarına istinaden oluşturulmuş mevcut kesit	35
Şekil 3.4.	Maksimum güvenli yer değiştirmenin batarya datası üzerinden kesit gösterimi	36
Şekil 3.5.	Tasarım değişkenleri ile birlikte hibrit modelin teknik çizimi	38
Şekil 3.6.	2D kafes yapıların sıkıştırma altında deformasyonu: (a) bal peteği, (b) negatif poisson oranlı yapı ve (c) hibrit yapı	39
Şekil 3.7.	Üç farklı durum için model oluşturma yöntemi	41
Şekil 3.8.	Parametrelerle oluşturulan toplam 27 kesit	41
Şekil 3.9.	Batarya kutusu görünüşleri ve FEA senaryosu	43
Şekil 3.10.	Optimizasyon akış şeması	44
Şekil 3.11.	Deney tasarımı	45
Şekil 3.12.	YSA modeli	47
Şekil 3.13.	32. iterasyona göre tasarlanan optimum kesit	50
Şekil 3.14.	Optimum kesitin FEA'i	51
Şekil 3.15.	Matris-Elyaf Oranının Şematik Gösterimi	52
Şekil 3.16.	Optimum kesitin FFF prosesi ile baskısı	52
Şekil 3.17.	Elle serme yöntemi için tasarlanan kalıpların kaynak resmi	54
Şekil 3.18.	Lazer kesim ve büküm sac parçaların imalat teknik resimleri	54
Şekil 3.19.	Optimum kesite ait kalıbın montaj teknik resmi	55
Şekil 3.20.	Kaynak prosesi işlem aşamaları	56
Şekil 3.21.	Maçaların teknik resimleri	57
Şekil 3.22.	XPS plaka üzerine dış kontür hatlarının çizilmesi	58
Şekil 3.23.	Maçaların üretimi	59
Şekil 3.24.	Mevcut kesite ait layout resmi	60
Şekil 3.25.	Optimum kesite ait layout resmi	60
Şekil 3.26.	Elyaf kumaşın kesim aşamaları	61
Şekil 3.27.	Mevcut kesite ait elle serme proses adımları	63
Şekil 3.28.	Optimum kesite ait elle serme proses adımları	63
Şekil 3.29.	Kalıp ayırıcı vaks uygulaması	64
Şekil 3.30.	Epoksinin oluşturulması	65
Şekil 3.31.	Reçine emdirme işlemi	66
Şekil 3.32.	Elle serme süreci	66
Şekil 3.33.	Kalıpların kapatılması ve kürlenmeye bırakılması	67
Şekil 3.34.	Numunelerin kalıptan çıkarılması	68
Şekil 3.35.	Mevcut ve optimum kesitlere ait CAD ve numune görüntülerinin karşılaştırılması	68
Şekil 3.36.	Fiziksel testte alt dayama plakalarının aralığı için belirlenen mesafe	69
Şekil 3.37.	Test düzeneğinin sanal ortamda tasarlanması	70
Şekil 3.38.	Fiziksel test kurulumu	70

Şekil 3.39.	Mevcut kesit numunelerinin testlerinden görüntüler	71
Şekil 3.40.	Optimum kesit numunelerinin testlerinden görüntüler	72
Şekil 3.41.	Mevcut kesit üç nokta eğme FEA çıktıları	74
Şekil 3.42.	Optimum kesit üç nokta eğme FEA çıktıları	75
Şekil 4.1.	Mevcut modelin ve optimum modelin kuvvet-deplasman eğrileri	76
Şekil 4.2.	Kesit 4'ün FEA sonucu	77
Şekil 4.3.	Kesit 1-9 ve optimum modelin kuvvet-deplasman eğrileri	79
Şekil 4.4.	Kesit 10-18 ve optimum modelin kuvvet-deplasman eğrileri	79
Şekil 4.5.	Kesit 19-27 ve optimum modelin kuvvet-deplasman eğrileri	80
Şekil 4.6.	Duyarlılık Matrisi	80
Şekil 4.7.	Regresyon eğrileri (a) kütle (kg), (b) kuvvet (kN) ve (c) emilen enerji (kJ)	82
Şekil 4.8.	Pareto optimal çözümlerin 3D gösterimi	83
Şekil 4.9.	YSA'dan elde edilen çoklu regresyon grafikleri: (a) eğitim, (b) test ve (c) tümü.	84
Şekil 4.10.	Model doğrulaması: (a) Mevcut kesit deneyseli, (b) Mevcut kesit FEA, (c) Optimum kesit deneyseli, (d) Optimum kesit FEA ve (e)Kuvvet-deplasman karşılaştırması	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	2.1.	Farklı standartlara ve yönetmeliklere göre test durdurma kriterleri	16
Çizelge	2.2.	Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan çalışmalara ait bulgular	25
Çizelge	3.1.	GF800 malzemesinin mekanik özellikleri	30
Çizelge	3.2.	Sanal çekme testinin R^2 değerleri	32
Çizelge	3.3.	Kıyaslanan modellerden temel bulguların karşılaştırılması	34
Çizelge	3.4.	Bal peteği, negatif poisson oranlı yapı ve hibrit yapının performans karşılaştırması	40
Çizelge	3.5.	XPS malzemesinin mekanik özellikleri	57
Çizelge	3.6.	Epoksi karışımının mekanik özellikleri	62
Çizelge	3.7.	Numune profillerin üç nokta eğilme testinde elde edilen maksimum kuvvetler	72
Çizelge	4.1.	27 kesitin FEA sonuçları	78
Çizelge	4.2.	Optimum Parametreler	83
Çizelge	4.3.	Mevcut tasarım ile optimize edilmiş tasarımın karşılaştırılması	85

1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründeki şirketler yakıt tüketimini azaltmak ve araçların enerji verimliliğini artırmak için yeni çalışmalara odaklanıyor. Araçların yakıt tüketimini ve emisyon oranlarını azaltmak için en etkili yöntemlerden biri ağırlık azaltımıdır (Romero ve ark., 2024). Bu hafifletme çabaları uluslararası güvenlik standartlarına uygun olmalı ve seyahat konforunu göz önünde bulundurmalıdır.

Tüm taşımacılık sektöründe ağırlığın azaltılması için çeşitli çalışmalar yapılmış ve farklı malzemeler, optimizasyon teknikleri, parça miktarının azaltılması gibi yöntemler kullanılarak daha fazla hafifletme hedeflenmiştir. Bu nedenle literatürde hafifletme üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Czerwinski, 2021; Grubisic, 1986; Ozel ve ark., 2020; Dindar ve ark., 2019). Hafifletme konusu, özellikle kara taşımacılığındaki yoğun kullanım nedeniyle daha önemli hale gelmektedir. Enerji verimliliği günümüzde ön plana çıkan bir kavram olduğu için elektrikli araç çalışmalarına yoğun bir şekilde odaklanılmaktadır (Alanazi, 2023; AFDC, 2022). Bu yoğunluk petrol rezervlerinin azalması, egzoz gazı emisyonlarının artması ve bunun sonucunda küresel ısınmanın artması gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır.

Sürdürülebilirlik, elektrikli mobilitenin giderek daha önemli bir yönü haline geliyor. Elektro-mobilitenin ilerlemesi, Avrupa'nın karbon emisyonlarını azaltma ve kentsel yaşam kalitesini artırma çabalarının merkezinde yer almaktadır. Bu çalışmada, döngüsel ekonomi çerçevesinde sosyal, ekonomik ve çevresel yönler incelenerek Avrupa'daki elektro-mobilitenin mevcut durumu araştırılmıştır ve bu çalışma, döngüsel ekonomi ilkelerinin entegre edilmesinin ulaşım, bina ve enerji sektörlerinde sürdürülebilir karbonsuzlaştırmanın sağlanması için gerekli olduğunu savunmaktadır (Leal Filho ve ark., 2021).

Otomotiv sektörü ekonomi ve toplum için hayati önem taşımakla birlikte küresel emisyonları ve çevreyi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışma, benzinli içten yanmalı motorlar ile bataryalı elektrikli araçların yaşam döngüsü değerlendirmesini karşılaştırmakta ve iklim değişikliği, insan sağlığı, kaynakların tükenmesi ve

ekosistemlerle ilgili 17 etki kategorisini analiz etmektedir. Kuyudan tekerleğe yaklaşımı, kentsel alanlarda araç kullanım aşamasındaki emisyonları vurgulamakta, sürdürülebilirlik endişelerini ele almakta ve kullanım hipotezlerini ve model farklılıklarını azaltmaktadır (Cucinotta ve ark., 2021).

Elektrikli araçlar, sera gazı emisyonlarının ve hava kirliliğinin azaltılması ve küresel yaşam kalitesinin artırılması için çok önemlidir. Bu çalışma, elektrikli araçlar ile fosil yakıtlı araçların yaşam döngüsü değerlendirmelerini ve yaşam döngüsü maliyeti analizlerini karşılaştırmaktadır. Bulgular, elektrikli araçların sera gazı emisyonlarını azalttığını, ancak üretimde kullanılan metaller, kimyasallar ve enerji nedeniyle insan toksisitesini artırdığını göstermektedir. Maliyet analizi, batarya fiyatları ve benzin ve elektrik maliyetlerindeki gelecekteki belirsizlikler nedeniyle daha yüksek başlangıç maliyetleri ile esnek fiyatlandırma göstermektedir (Verma ve ark., 2022).

Elektrikli araç çalışmalarında güç kaynağı olarak bataryalar kullanılmakta ve mesafe, ağırlık gibi faktörlerin yanı sıra güvenlik önlemleri ile ilgili birçok faktör de önem arz etmektedir. Özellikle çarpışma durumlarında, bataryayı çevreleyen gövde darbeyi mümkün olan en iyi şekilde absorbe etmelidir (Belingardi ve Scattina, 2023). Bu nedenle, elektrikli araçların tasarım sürecinde güvenlik unsurları son derece önemlidir. Batarya bölmelerinin sağlam bir şekilde korunması, darbeleri emen malzemelerin kullanılması ve çarpışma riskinin en aza indirilmesi gibi önlemler alınmaktadır. Bu sayede elektrikli araçlar hem enerji verimliliği hem de güvenlik açısından gerekli standartlara göre tasarlanmaktadır (Zhang ve ark., 2021). Çoklu yük topolojisi optimizasyonu kullanılarak, elektrikli araçlarda kullanılan bataryanın çarpışmaya dayanıklılığının artırılması ve ağırlığının azaltılması amaçlanmıştır. Birçok çalışma elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların çarpışmaya elverişliliği ve hafifliği üzerine odaklanmıştır (Hao ve ark., 2017; McCafferty, 1980; Mudassir ve ark., 2020; Mushtaq ve Satish, 2020; Wang ve ark., 2021; Xiong ve ark., 2021).

Elektrikli araçlar, dayanıklılık menzili ve toplam ağırlık dikkate alınarak genellikle yüksek çekişli batarya sistemleri ile donatılmaktadır (Zhao ve ark., 2013). Ağırlıktaki artış, aracın gücünü ve ekonomik performansını etkilemenin yanı sıra, çarpışma

sırasında kinetik enerjide de artışa neden olur (Obradovic ve ark., 2012; Witteman, 1999; Ozel ve ark., 2019). Bu nedenle, elektrikli araçların çarpışmaya dayanıklılığı ve hafif tasarımı daha ciddi zorluklarla karşı karşıyadır. İlgili çalışmalarda, hafif araç gövde yapıları için çok amaçlı bir optimizasyon tasarımını ele almışlar ve çoklu yük durumları altında yapısal performansını iyileştirmek için çok amaçlı optimizasyon yöntemlerini kullanmışlardır (Gao ve ark., 2022). Genetik algoritmaları ve mevcut tasarım araçlarını kullanarak, araç gövde yapısının ağırlığını azaltırken çeşitli yük durumları altında dayanıklılığını optimize etmişlerdir (Wang ve ark., 2020). Bir elektrikli aracın hafiflik ve çarpışmaya dayanıklılık tasarımı, altı sigma sağlam tasarım optimizasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçları, hafifletme ve çarpışmaya elverişlilik için en iyi tasarımın altı sigma sağlam tasarım optimizasyon yöntemiyle başarılı bir şekilde elde edilebileceğini göstermektedir. Bu yöntem, tasarımın farklı varyasyonlara karşı hassasiyetini artırırken ağırlık azaltma ve çarpışmaya dayanıklılık arasında bir denge sağlar (Li ve ark., 2019). Cam elyaf malzemelerin avantajlar; yüksek mukavemetleri, düşük yoğunlukları ve esneklikleridir. Bu özellikleri onları, bataryaları yan darbelere karşı korumak için ideal bir seçenek haline getirmektedir (Maiti ve ark., 2022; Rajak ve Wagh, 2021). Cam elyaf destek profilinin kullanımı, bataryanın dayanıklılığını artırırken aynı zamanda ağırlığını azaltmayı amaçlamaktadır. Bu da elektrikli araçların performansını ve enerji verimliliğini olumlu yönde etkilemektedir.

Bu çalışmada, CETP' den yapılmış bir yan profilin tasarımı, analizi ve optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve destek profilinin çarpışma durumlarındaki davranışı sayısal simülasyonlar aracılığıyla değerlendirilmiştir. CETP, cam elyafları ile termoset reçineyi birleştiren kompozit bir malzemedir. Cam elyaf üretimi için farklı teknikler kullanılmaktadır. Pultrüzyon, uzun ve sürekli elyaf takviyeli polimer kompozit profiller üretmek için kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, elyaf takviyeli polimer malzemenin bir matris reçinesi içine düzgün bir şekilde yerleştirilmesini ve ardından bir kalıptan geçirilerek şekillendirilmesini sağlar. Literatürde kullanılan bir yöntemdir (Baran ve ark., 2014; Bechtold ve ark., 2002; Britnell ve ark., 2003; Kennedy ve Kusy, 1995; Novo ve ark., 2016). Pultrüzyon, uzun, dayanıklı ve hafif kompozit profillerin seri üretimi için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, otomotiv, havacılık ve inşaat

endüstrileri ve rüzgar enerjisi gibi birçok sektörde kullanılan yüksek mukavemetli ve hafif yapılar için idealdir (Volk ve ark., 2022; Talabi ve ark., 2024). Ayrıca, pultrüzyon ile üretilen malzemeler genellikle korozyona dayanıklıdır ve iyi mekanik performansa sahiptir. Bu nedenle pultrüzyon yöntemi, geleneksel malzemelere göre daha sağlam ve verimli ürünlerin üretilmesini sağlar.

İlgili bir çalışmada, kafes dolgulu kare tüplerin yarı-statik basınç yükü altında ezilme tepkisi incelenmiştir. Negatif poisson oranlı kafes dolgulu tüpler bal peteği dolgulu tüplerle karşılaştırılmıştır. Alternatif bir tüp ve boş bir tüp, tüm yapısal kafesler eşit kütleye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır ve deneysel sonuçlar hesaplamalı olarak doğrulanmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar, kafes yapıların eklenmesinin çarpışmaya dayanıklılığı büyük ölçüde artırdığını vurgulamıştır. Boş tüp ile karşılaştırıldığında, çarpışma tüpünün performansı deneysel değerlerin %62,6'sı, %64,0'ı ve %79,1'i oranında iyileştirilmiş ve dolgu kafes ilavesiyle enerji emilimi artırılmıştır (Simpson ve Kazancı, 2020).

Yenilikçi malzemelerin ve yapısal sistemlerin geliştirilmesi ve karakterizasyonunda, ters analizde ileri tekniklerin benimsenmesi pahalı deneysel testlerin gerekliliğini azaltabilir. Küçük zımba testleri uygulaması, bir model azaltma prosedürü kullanılarak hızlandırılan ve daha ekonomik hale getirilen ters analiz yoluyla malzeme parametrelerinin değerlendirilmesini içerir. Bu metodoloji, malzeme parametrelerini çeşitli yapısal modeller içinde değerlendirmek için tasarlanmıştır, böylece çok çeşitli malzeme davranışlarını ele alabilen daha uyarlanabilir bir tanımlama yapısı sağlar (Buljak ve ark., 2018).

Bir başka çalışmada yazarlar, çarpışmaya dayanıklı bileşenlerin tasarımına ve etkin büzülme sağlayan belirli bir yapısal konfigürasyona odaklanmıştır. Çarpışma enerjisindeki son gelişmelerde, çarpışmaya dayanıklı bileşenler ince duvar yapılarını, bal peteği yapılarını ve metalik köpük sandviç yapılarını içermektedir. Petek ve metalik köpük yapıların yüksek özgül enerji emme kabiliyetine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, her iki yapısal konfigürasyonun da eksiklikleri vardır: yani, bal peteği yapılar sadece bir yönde yetenekliyken, metalik köpük yapılar oldukça düzensiz üç

boyutlu hücre konfigürasyonlarıdır. Sekizli kafes yapıları söz konusu olduğunda, %20 bağıl yoğunluğa sahip bükülmüş kafes yapısı en yüksek özgül enerji emilimini üretebilmiştir (Nasrullah ve ark., 2020).

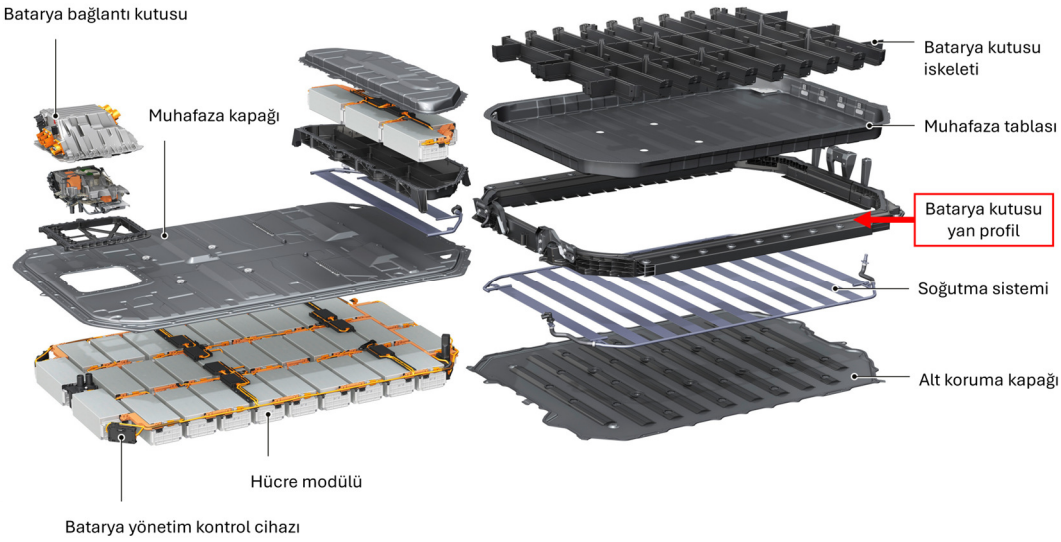
Başka bir çalışmada, ayrık optimizasyon-algoritma tabanlı hibrit bir yapı, çarpışmaya dayanıklılığını daha da artırmak için ardışık ortogonal diziler üzerinde çalışılmıştır. Farklı kalınlıklardaki ince duvarlı yapıların, aynı kalınlıktaki duvarlara sahip yapılara kıyasla daha fazla enerji emme kapasitesine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Çarpışma direncinin topoloji optimizasyonu için etkili bir yöntem oluşturulmuştur (Li ve ark., 2022).

Bu tez çalışmasında bal peteği ve negatif poisson oranlı geometri birleştirilerek özgün bir hibrit yapı oluşturulmuştur. Hibrit yapılar açısından benzer çalışmalar olsa da doğrudan batarya kutularına odaklanan bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın kritik kısmı, bu hibrit yapının bir çarpışma durumunda nasıl deforme olduğudur. Batarya yan profillerini çarpışmaya elverişlilik ve hafiflik açısından optimize etmek için üç tasarım değişkeni kullanılarak bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla YSA yöntemi kullanılmış ve elde edilen en iyi ağlar daha sonra çok amaçlı optimizasyon yöntemi ile optimize edilmiştir. Sonuçlar doğrulanmış ve optimum tasarım, en iyi sonucun parametreleri ile yeniden modelleme ve analiz yoluyla belirlenmiştir. Bu yaklaşım sadece batarya kutusu yan profilini optimize etmek için değil, benzer çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için de uygulanabilir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. EA batarya kutusu

EA batarya kutusu, batarya paketini güvenli bir şekilde muhafaza etmek ve korumak için tasarlanmış yapısal bir bileşendir. Araç verimliliğini artırmak için ağırlığı en aza indirirken bataryanın dengesini, güvenliğini ve termal yönetimini sağlar. Çerçeve tipik olarak alüminyum veya kompozitler gibi hafif, dayanıklı malzemelerden yapılır ve darbelere ve titreşimlere dayanacak şekilde tasarlanırlar. Tasarımı, EA'ın genel performansı, uzun ömürlülüğü ve güvenliği için çok önemlidir. Şekil 2.1' de Audi e-tron lityum-iyon bataryasının detaylandırılmış montaj görünüşü verilmiş ve tez çalışmasının konusu olan batarya kutusu yan profili kırmızı ok ile gösterilmiştir. Batarya kutusunun yan destek profili çarpışma esnasında yandan gelen darbeyi karşılayan ve sönümlemesi gereken yapıdır.



Şekil 2.1. Audi e-tron lityum-iyon bataryasının detaylandırılmış montaj görünüşü (Padgett, 2018)

2.2. Cam elyaf takviyeli polimer (CETP)

Bu tezin amacı, bataryaların çarpışma durumlarında daha dayanıklı ve hafif olmasını sağlamak için CETP' den üretilen bir yan destek profilinin kullanılması üzerine odaklanmaktadır. Elektrikli araçlarda bulunan bataryalar, yandan gelen darbelere karşı korunması gereken kritik bir bileşendir. Bu nedenle, bataryaların güvenliği ve performansı açısından önemli olan çarpışma dayanıklılığı ve hafiflik gereksinimlerini karşılayacak bir destek profili tasarımı büyük önem taşımaktadır.

CETP'nin avantajları; yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu ve esneklik yetenekleriyle bilinmektedir. Bu özellikler, bataryanın yandan gelen darbelere karşı korunmasını sağlamak için ideal bir seçenek sunmaktadır. CETP yan destek profilinin kullanılmasıyla, bataryanın dayanıklılığı artırılırken aynı zamanda ağırlığının azaltılması hedeflenmektedir. Bu da elektrikli araçların performansını ve enerji verimliliğini olumlu yönde etkileyecektir.

CETP, cam elyafının termoset bir reçine ile birleştirilmesiyle oluşturulan bir kompozit malzemedir. CETP üretimi için yaygın olarak kullanılan bazı teknikler:

1. Elle Yerleştirme (Hand Lay-Up): Bu yöntemde, cam elyafı materyali, bir kalıp üzerine elle yerleştirilir. Ardından, reçine el ile uygulanır ve malzeme tamamen emdirilir. Bu yöntem basit ve maliyeti düşüktür, ancak üretim süresi daha uzundur.
2. Sprey Uygulama (Spray-Up): Bu yöntemde, cam elyafı materyali bir tabanca veya sprey sistemi ile bir kalıp üzerine püskürtülür. Aynı anda reçine de püskürtülerek malzemenin nüfuz etmesi sağlanır. Spray-Up yöntemi hızlıdır, ancak malzeme kalıp yüzeyine düzgün bir şekilde yerleştirilmediği için yüzey kalitesi düşebilir.
3. Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding): Bu yöntemde, cam elyafı önceden belirlenmiş bir kalıp içine yerleştirilir. Ardından, reçine bu materyal üzerine bir vakum veya basınç sistemi kullanılarak enjekte edilir. Bu yöntemle daha karmaşık ve yüksek hassasiyetli parçalar üretilebilir.

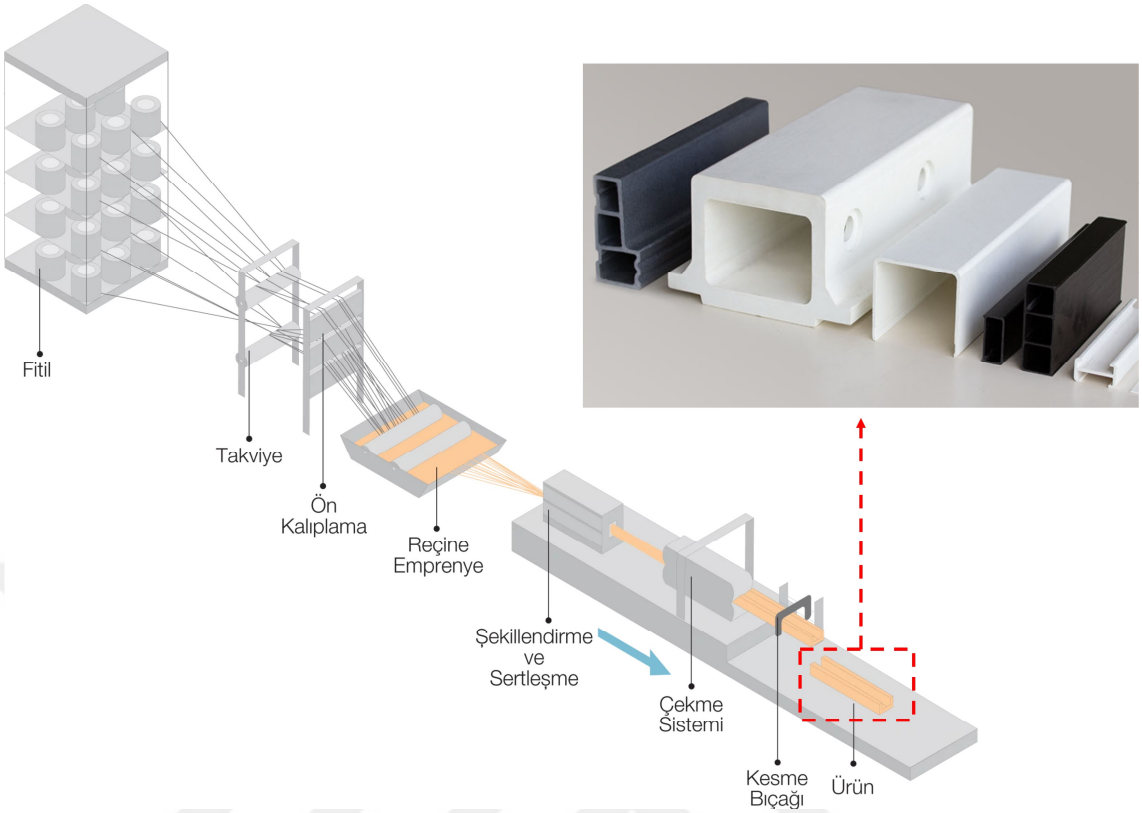
4. Sıkıştırma Kalıplama (Compression Molding): Bu yöntemde, cam elyafı ve reçine bir kalıp içine yerleştirilir ve ardından ısı ve basınç kullanılarak malzeme sıkıştırılır. Bu yöntemle daha yüksek mukavemetli ve yoğunluklu parçalar üretmek mümkündür.
5. Pultrüzyon : Uzun, dayanıklı ve hafif kompozit profillerin seri üretimi için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, otomotiv, havacılık, yapı endüstrisi ve rüzgar enerjisi gibi birçok sektörde kullanılan yüksek mukavemetli ve hafif yapılar için idealdir.

Bu tez çalışmasında CETP malzemeli yan destek profillerinin üretilmesinde pultrüzyon yöntemi kullanılacaktır.

2.3. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon makineleri farklı kapasite ve tasarımlarda üretilebilmektedir ancak temel proses aynıdır. Pultrüzyon, uzun ve sürekli elyaf takviyeli polimer kompozit profillerin üretiminde kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, elyaf takviyeli polimer malzemenin bir matris reçine içerisinde düzgün bir şekilde yerleştirilmesini ve ardından bir kalıp içerisinden geçirilerek şekillendirilmesini sağlar.

Özetle; dolgu, iç kalıp ayırıcı, peroksit ve reçineden oluşan karışım hazırlanır. Cam elyaf fitil, reçine karışımı banyosundan geçirilerek elyaf emprenye edilir. Emprenye edilmiş elyaf ısıtılmış kalıptan çekilerek geçirilir. Kalıp sıcaklığı giriş (40-70°C), iç (80-110°C) ve çıkış (140-170°C) olacak şekilde ayarlanmalıdır. Son olarak kürlenmiş ve kalıplanmış profil istenilen ölçüde kesilir. Şekil 2.2' de pultrüzyon süreci görsellenmiştir (Poliya, 2023).



Şekil 2.2. Pultrüzyon süreci

Pultrüzyon süreci, tipik olarak şu adımlardan oluşur:

Elyaf yerleştirme: Pultrüzyon süreci, genellikle cam elyafı, karbon elyafı veya bazalt elyafı gibi sürekli elyaf takviyeli malzemelerin kullanılmasıyla başlar. Bu elyaflar, genellikle bir bobinden çekilerek ve bir reçine banyosundan geçirilerek düzgün bir şekilde yerleştirilir.

Reçine emme: Elyaflar, bir reçine banyosundan geçerken üzerlerine polimerik bir reçine emerler. Bu reçine, liflerin arasında yerleşerek elyaflarin takviye görevini yerine getirmesini sağlar.

Pultrüzyon kalıbı: Elyaflarin reçine emmesinden sonra, elde edilen lifler ve reçine karışımı bir pultrüzyon kalıbından geçirilir. Kalıp, genellikle profilin istenen şekline sahip olan bir çıkış şeklini sağlar.

Sertleşme: Pultrüzyon sürecinde kullanılan reçine, kalıptan geçerken veya sonraki bir sertleştirme aşamasında sertleştirilir. Bu, kompozitin istenilen sertlik ve dayanıklılığa sahip olmasını sağlar.

Pultrüzyon yöntemi, uzun, dayanıklı ve hafif kompozit profillerin seri üretimi için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, otomotiv, havacılık, yapı endüstrisi ve rüzgar enerjisi gibi birçok sektörde kullanılan yüksek mukavemetli ve hafif yapılar için idealdir. Ayrıca, pultrüzyonla üretilen malzemeler genellikle korozyona dayanıklıdır ve iyi bir mekanik performans sergilerler. Bu nedenle, pultrüzyon yöntemi, geleneksel malzemelere göre daha sağlam ve verimli ürünlerin üretilmesini sağlar.

2.4. Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan çalışmalar

Hafiflik, taşımacılık sektöründe özellikle dikkat edilen ve verimliliği doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu nedenle maliyetler üzerinde önemli bir etkisi vardır. Elektrikli araç çalışmalarında bataryayı çevreleyen gövdenin özellikle çarpışma sırasında darbeyi en iyi şekilde absorbe etmesi gerekiyor. Batarya bölmelerinin sağlam bir şekilde korunması ve çarpışma durumlarında risklerin en aza indirilmesi gibi karşı önlemler alınmaktadır. Otomotiv sektöründeki firmalar, taşıtların yakıt tüketimini azaltma ve enerji verimliliğini artırma amacıyla yeni çalışmalara odaklanmış durumdadır. Araçların yakıt tüketimini ve emisyon oranlarını azaltmada en etkili yöntemlerden biri, taşıt ağırlığını hafifletmektir. Bu hafifletme çalışmaları, uluslararası güvenlik standartlarıyla uyumlu olmalı ve aynı zamanda seyahat konforunu da göz önünde bulundurmalıdır. Sayısal simülasyonlar aracılığıyla tüketici ürünlerinin optimizasyonu, otomotiv, havacılık, bina, ambalaj ve elektronik endüstrileri gibi birçok üretim alanında büyük önem taşımaktadır. Bu optimizasyon çalışmaları, kalite iyileştirmesi, malzeme tasarrufu, zaman ve maliyet verimliliği gibi konularda fayda sağlamaktadır.

Elektrikli araç (EA) tasarımı için tasarım optimizasyonu çok önemlidir, ancak şekillendirme işlemi sırasında değişkenlerdeki dalgalanmalar ve gürültü, stabiliteyi

etkileyebilir. Bu çalışma, EA hafif tasarımını ve belirsizlik altında çarpışma dayanıklılığını geliştirmek için altı sigma sağlam tasarım optimizasyonunu kullanıyor. Çok amaçlı optimizasyon için optimal latin hiperküp örneklemesini, radyal temel fonksiyonlarını ve baskın olmayan sıralama genetik algoritmasını (NSGA-II) birleştiren tam ölçekli bir sonlu eleman modelini kullanmaktadır. Yöntem, Monte Carlo örneklemesinden daha fazla verimlilik göstererek güvenilirliği ve sigma düzeyini artırır. Sonuç olarak, B direği tepe ivmelenmesi 18.9% azaltılmış ve batarya kutusunun X yönündeki deformasyonu da azaltılarak, EA güvenliğini ve hafiflik performansı artırılmıştır (Li ve ark., 2019).

Enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirliğe artan ilgi, elektrikli araçlar gibi çevre dostu ürünlerin geliştirilmesini teşvik etti. Her ne kadar içten yanmalı motorlu araçlar kadar yaygın olmasa da, EA'lar batarya güvenliği ve yapısal değişiklikler nedeniyle benzersiz çarpışmaya dayanıklılık zorluklarıyla karşı karşıyadır. Bu çalışma, ENCAP standartlarına göre direğe yandan çarpma testine odaklanarak EA'ın çarpışmaya dayanıklılığını değerlendirmek için geleneksel içten yanmalı motorlu araçların çarpışma senaryolarını kullanıyor. Gövde eşiğine yeni bir enerji emicinin eklenmesiyle batarya koruması artırıldı. ANSA, ABAQUS ve PAM-CRASH yazılımları kullanan simülasyonlar, direk girişi, iç enerji, dönüşüm öncesi ve sonrası kesit yükleri gibi kriterleri analiz ederek aracın çarpışma dayanıklılığında önemli gelişmeler gösteriyor (Mortazavi ve ark., 2023).

EA'lar ile ilgili artan yangın vakaları nedeniyle, bu çalışma nümerik ve deneysel metodolojilere odaklanarak elektrikli araç batarya güvenliği hakkındaki mevcut bilgileri gözden geçirmektedir. Termal kaçak ve tasarım hatalarından kaynaklanan yangınlar, aşırı akımlar, mekanik hasar, yanlış şarj, aşırı sıcaklıklar ve bilinmeyen nedenler gibi riskler nedeniyle batarya güvenliğinin kritik önemini vurgulamaktadır. İnceleme, yüksek voltajlı batarya sistemlerini, güvenlik hususlarını, geometri ve malzeme modellemesini, simülasyon sınır koşullarını, hücre düzeyinde deneyleri ve makine öğrenimi uygulamalarını kapsamaktadır. Gelecekteki ilerlemeler için sağlam sürtünme ve yorulma modellerine ve makine öğreniminin entegrasyonuna duyulan ihtiyaç vurgulanmaktadır (Teng ve ark., 2024).

Batarya sistemi elektrikli araçlar için çok önemlidir ve menzil ile güvenliği etkiler. Hafif bir batarya kutusu, çarpışmaya dayanıklılık sağlarken menzil ve güvenliği korumak için arzu edilir. Bu çalışma, ortogonal deneysel tasarım (ODT), yanıt yüzeyi metodolojisi (YYM) ve çok adalı bir genetik algoritma kullanarak yeni bir ağırlık azaltma prosedürü önermektedir. Doğrulanmış bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş, ardından ODT ve YYM kullanılarak rastgele titreşim analizi yapılmıştır. Optimize edilen batarya kutusu %11,73 daha hafif ve çarpışmaya karşı daha dayanıklı hale gelmiştir. Bu prosedür, batarya kutusu bileşenlerinin malzeme ve kalınlıklarının verimli bir şekilde belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Xiong ve ark., 2023).

Elektrikli araçlar, enerji verimliliği, çevresel faydaları, güçlü ivmelenme ve düşük gürültü özellikleri nedeniyle otomotiv endüstrisinin geleceğidir. Bu çalışmada prototip olarak P5 yakıtlı binek araç kullanılmıştır. Bataryalı elektirikli araç EP5 için, statik sertlik ve çarpışmaya dayanıklılık dikkate alınarak, şasi üzerinde çoklu yük topolojisi optimizasyonu için eşdeğer statik yük yöntemi uygulanmıştır. Daha sonra EP5'in yük yolları önerilmiştir. Aracın ön uç yapıları, çarpışmaya dayanıklılığı artırmak ve EP5'in hafiflik potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için topoloji ve boyut optimizasyonu kullanılarak yeniden tasarlanmıştır (Zhang ve ark., 2021).

Yüksek hızlı çarpışmalar batarya sistemlerinin kısa devre yapmasına veya alev almasına neden olarak önemli güvenlik riskleri oluşturabilir. Bu çalışmada, bir batarya kutusunun çarpışmaya dayanıklılığını ekonomik olarak değerlendirmek için bilgisayar destekli simülasyonlar kullanılmaktadır. LS-DYNA ile ezilme ve çarpışma simülasyonları için doğrulanmış bir doğrusal olmayan dinamik sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Üç yüksek mukavemetli çelik malzeme sağlamlık ve hafif tasarım açısından test edilmiştir. Sonuçlar, malzemelerin ve kalınlığın çarpışmaya elverişlilik üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçta, batarya paketi muhafazasının ağırlığı azaltılırken çarpışmaya dayanıklılığı da artırılmıştır (Pan ve ark., 2022).

2017'den bu yana son patentlerin ve yayınların analizi, içten yanmalı motorlara benzer şekilde elektrikli araçlarda hafifletmenin süregelen önemini vurgulamaktadır. Bu çalışma parçalar, malzemeler ve tasarımlar arasındaki potansiyel ilişkileri

incelemektedir. Odak noktası öncelikle bataryayı koruyan batarya kutusu ve çevresindeki bileşenlerdir. Gelecekteki araştırmalar, elektrikli araç menzilini artırmak için batarya kutusuna yönelik malzeme ve tasarım takviyelerini keşfedebilir. Ayrıca, batarya paketinin form faktörünü hafifletmek için optimize etme çabaları da devam etmektedir. Çalışma, belirli anahtar kelimeler kullanılarak açık kaynaklı patentlere ve yayınlara dayanmaktadır, ancak kapsamlı olmayabilir. Bu nedenle, çıkarılan sonuçlar mevcut verilerle sınırlıdır (Anton ve ark., 2021).

Elektrikli araçların benzinli ve dizel yakıtlı araçlara kıyasla yan direk çarpma özellikleri bu çalışmada incelenmektedir. Elektrikli araçlar, yüksek basınçlı parçaları korumak için çarpışma girişini yönetmeli ve gövde hızlanmasını optimize etmelidir. Ön zeminin altındaki batarya modülleri nedeniyle, koltuk traversinin deformasyonunu da kontrol etmeleri gerekir. Bir elektrikli aracı vaka çalışması olarak kullanan çalışma, yan direk çarpışmalarında kilit enerji emici parçaları araştırmakta ve yapılarını topoloji optimizasyonu ve alt model yöntemleriyle optimize ederek 7,2 kg ağırlık azaltımı sağlamaktadır. Tam araç FEA'i ve test sonuçları, elektrikli araçlar için önerilen yapısal optimizasyon yöntemini doğrulayan önemli çarpışma dayanıklılığı iyileştirmesi göstermektedir (Ding ve ark., 2020).

İlgili başka bir çalışmada, binek araçlara yönelik alüminyum köpük dolgulu bir batarya kutusunun çarpışmaya dayanıklılığını değerlendirmek için çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Eksenel ezilmeye odaklanan çoğu araştırmanın aksine, elektrikli araç batarya kutularında yandan direğe çarpma senaryosu incelenmiştir. Sonlu eleman simülasyonları, tepe ezilme kuvvetini azaltmayı ve spesifik enerji emilimini (SEA) artırmayı amaçlamaktadır. Temel tasarım değişkenleri arasında köpük yoğunlukları, duvar kalınlığı ve kesit boyutları yer almaktadır. Optimizasyon için baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA-II) kullanılmıştır. Optimize edilen tasarım, spesifik enerji emiliminde %50,71'lik bir artış ve tepe ezilme kuvvetinde %11,56'lık bir azalma sağlayarak çarpışma senaryolarında köpük yoğunluğunun önemini vurgulayarak çarpışmaya dayanıklılığı artırmaktadır (Demirci ve ark., 2025).

Çalışmada, elektrikli araçların çarpışma dayanıklılığı için enerji emici olarak hafif, doğadan ilham alan hücresel yapıların kullanımını araştırılmaktadır. Elektrikli araçların

ve daha büyük bataryalarının yükselişiyle birlikte, bu yapılar araç kütlesini azaltma ve çarpışmalar sırasında bataryaları koruma potansiyelleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Batarya koruması için yeni bir hücresel yapı; tek tip, dikme-duvar, gradyan ve alternatif uygulama yöntemleri dikkate alınarak tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Farklı uzunluklara ve kabuk kalınlıklarına sahip 45 örnek üzerinde yapılan sayısal bir çalışmada kuvvet-yer değiştirme eğrileri, enerji emilimi, özgül enerji emilimi ve çökme davranışları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kabuk kalınlığının çökme davranışını ve enerji emilimini önemli ölçüde etkilediğini ve en iyi performans gösteren yapının mevcut çalışmalarla karşılaştırılabilir bir spesifik enerji emilimine ulaştığını göstermektedir (Mudassir ve ark., 2020).

Elektrikli araç tasarımında gövde bataryayı çevreleyen yüzeyler, özellikle çarpışma sırasında darbeyi etkili bir şekilde absorbe etmelidir. İlgili bir çalışmada, ECE R100 yönetmeliğinin Ek 8D'sindeki çarpışma testi baz alınmaktadır. Çalışmada bataryanın deforme olmayacağı güvenli deplasman 20 mm olarak belirlenmiştir, ve bu yer değiştirmedeki maksimum kuvvet ve enerji emilimi karşılaştırılmıştır. Çalışma batarya kutularını daha verimli hale getirmek için cam elyaf takviyeli polimer ve pultrüzyon ile üretilen profillerin kullanılması üzerine odaklanıyor. Yeni bir hibrit kesit tasarımı, bal peteği ve negatif poisson oranlı geometri birleştirilerek geliştirilmiştir. Bu yeni kesit tasarımı, bal peteği yapılara göre ~%360 ve negatif poisson oranlı yapılara göre ~%88 performans artışı sağlamıştır. YSA kullanan çok amaçlı optimizasyon sayesinde, farklı tasarım değişkenlerine sahip 27 model analiz edilerek optimize edilmiştir. Nihai tasarım sonucu, batarya kutusu yan profili %23,9 daha hafif, %38,6 daha ucuz ve %3 daha yüksek performanslı hale gelmiştir (Arslan ve Karamangil, 2025).

Batarya modülleri ve hücrelerinden oluşan elektrikli araç batarya paketi, güç aktarımı için çok önemlidir. Zayıf batarya muhafazasının tasarımı; çatlama, gürültü ve hasar gibi sorunlara yol açabilir. Muhafazanın ağırlığı göz önüne alındığında, hafif tasarım elektrikli araç menzilini ve performansını artırmak için hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, çeşitli üretim teknikleri kullanılarak kompakt ve hafif batarya muhafazaları için çok malzemeli tasarım optimizasyonu, gelişmiş teknolojiler ve verimli bir Batarya Yönetim Sistemi incelenmektedir. Yazarlar verimli batarya paketi tasarımı

teknolojisinin giderek daha rafine hale geleceğini ve böylece batarya paketlerinin yaşam döngüsünü iyileştireceğini ummaktadır (Dhoke ve Dalavi, 2021).

İlgili bir çalışmada, Abaqus/Explicit kullanarak bir çarpışma sırasında Tesla Model-S şasisinin ve batarya modülünün mekanik davranışını araştırmakta ve tahmin etmektedir. Çalışmada, çarpışma hızları (27,7, 55,5 ve 100 m/s) ve batarya kabuğu kalınlıkları (1 mm ila 3 mm) arasında uygulamaktadır. Hem şasi hem de batarya paketi, Alüminyum 6061 ve ASI430 SS malzemeleriyle asimetrik olarak modellenmiştir. Johnson-Cook plastik ve hasar arıza modeli gerçekçi çarpışma davranışını simüle etmektedir. Yer değiştirme, enerji ve kuvvet sonuçları kaydedilmiştir. Çalışmada her bir hücre modülü incelenerek hücrelerin çarpma ve deformasyona nasıl tepki verdiği gösterilmiştir. 3 mm'lik et kalınlıklı batarya kabuğu, 55,5 m/s'de 1 mm'lik et kalınlıklı kabuktan daha yüksek direnç kuvveti göstermiştir. Sonlu eleman modeli, çarpışmaya dayanıklılığı etkin bir şekilde simüle eden önceki çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu araştırma, yapısal tasarım ve optimizasyon yoluyla batarya ile çalışan araçların güvenliğini ve verimliliğini artırmak için değerli bilgiler sunmaktadır (Rahman ve ark., 2024).

Bataryalarındaki yüksek enerjili malzemeler ve yanıcı elektrolitler nedeniyle batarya güvenliği elektrikli araçlar için çok önemlidir. Termal kaçak, bir kazadan hemen sonra ya da bir süre sonra elektrikli araç bataryalarının alev almasına neden olabilir. Bataryanın kötüye kullanım testleri için çok sayıda küresel standart ve düzenleme mevcut olup, bu durum üreticiler için en güvenli olanı seçme konusunda bir ikilem yaratmaktadır. Bu araştırma, elliden fazla ülke tarafından kullanılan altı standardı (SAE J2464:2009, GB/T 31485-2015, FreedomCAR:2006, ISO 12405-3:2014, IEC 62660-2:2010 ve SAND2017-6295:2017) ve iki yönetmeliği (UN/ECE-R100.02:2013 ve GTR 20:2018) incelemektedir. Bu standartların gerçek hayattaki çarpışma senaryolarını yansıtacak şekilde iyileştirilmesi ve uyumlaştırılmış küresel bir çerçeve geliştirilmesi ihtiyacını vurgulamaktadır. Bu, üreticilerin ikilemlerini çözecek ve tüketiciler için elektrikli araç güvenliğini artıracaktır (Kotak ve ark., 2021). Standartlara ve yönetmeliklere göre test durdurma kriterleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Farklı standartlara ve yönetmeliklere göre test durdurma kriterleri

Standartlar(Std.) Yönetmelikler (Yön.)	Prosedür: Durdurma, Kriterleri (H = Hücre; M = Modül; P = Paket)
SAE J2464:2009 (Std.)	Kuvvet = 1000 x Test Cihazı (TC) ağırlığı (H/M/P)
ISO 12405-3:2014 (Std.)	100 kN < kuvvet < 105 kN (P)
IEC 62660-2:2010 (Std.)	Gerilim = üçte bir oranında ani gerilim düşümü orijinal hücre voltajı veya deformasyonu ≥ %15 veya kuvvet = 1000 x TC ağırlık (H)
FreedomCAR:2006 (Std.)	Deformasyon = %50 veya kuvvet = 1000xTC ağırlık (H/M/P)
SAND2017-6925:2017 (Std.)	Kuvvet = 25 kN veya HSL ≥ 5 veya çarpma tertibatına ulaşıldığında %100 pratik yer değiştirme (H) HSL ≥ 5 veya impaktör %100 pratikliğe ulaşıldığında yer değiştirme (M/P)
GB/T 31485-2015:2015 (Std.)	Gerilim = 0 V veya deformasyon = %30 veya kuvvet =200 kN (H) deformasyon = %30 veya kuvvet = 1000 x TC
UN/ECE-R100.02:2013 (Yön.)	100 kN < kuvvet < 105 kN (M/P)
GTR 20:2018 (Yön.)	100 kN < kuvvet < 105 kN (M/P)

Hafif yapı için taşıt yapılarını optimize etmek, özellikle elektrikli araçlarda güç tüketimi verimliliğini artırmak için çok önemlidir. Bununla birlikte, hafif araçlar genellikle çarpışmaya elverişlilik endişeleriyle karşı karşıyadır. Bu durum, batarya sistemindeki potansiyel yüksek voltaj kesintileri ve termal sorunlar nedeniyle elektrikli araçlar için özellikle kritiktir. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranlarıyla hafif yapılar için bir çözüm sunmaktadır. Bu araştırma, çift ince duvarlı karbon elyaf takviyeli polimerden yapılmış kompozit tabanlı çarpışma kutusu yapılarının deneysel ve sayısal analizine odaklanmaktadır. Hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar, kalınlıkları ve katman sayıları değişen numunelerle eksenel ezilme yükleri altında gerçekleştirilmiştir. Kompozit çarpışma kutusu yapısının çarpışmaya dayanıklılık simülasyonu, DFAIL ve SOFT gibi kritik parametreleri ayarlayarak hasar kinematiğini çoğaltmak için LS-Dyna kodunu kullanarak deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir. Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar ile, ortalama ezilme kuvveti hatasının %3,3 içinde olduğu iyi bir korelasyon elde edilmiştir. (Fauzi ve ark., 2018).

Bal peteği yapıların dahil edilmesi batarya paketlerinin çarpışmaya dayanıklılığını artırabilir. Bu çalışma, ANSYS açık dinamik analizini kullanarak batarya muhafazasının

yapısal özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Modal analiz doğal frekansı, mod şeklini ve tepe yer değiştirme değerlerini belirler. Batarya paketinin CAD modeli Creo parametrik tasarım yazılımında geliştirilmiştir. Bal peteği yapısı, batarya üniteleri üzerindeki darbe etkisini azaltarak maksimum çarpışma etkisini emer ve hücreleri büyük hasardan korur. Petek yapılı bir batarya paketinin doğal frekansı birinci, ikinci ve üçüncü modlar için daha yüksektir. Çarpma sırasında, batarya ünitesinin iç enerjisi petek yapı olmadan 1021,8 mJ ve petek yapıyla birlikte 0,80376 mJ'dür. Sonuçlar, petek yapı ile iç enerjide önemli bir azalma olduğunu göstermektedir (Agarwal ve ark., 2024).

Batarya donanımlı araçlar kazalarda daha yüksek patlama ve yangın riski oluşturmakta ve yeni koruyucu sistemler gerektirmektedir. Negatif possion oranlı yapılar, benzersiz tasarımları sayesinde darbe enerjisini verimli bir şekilde dağıtarak batarya hasarını azaltır ve yolcu güvenliğini artırır. Bu çalışma, yeniden girintili bir negatif possion oranlı modele dayanan bir enerji emici ile bir batarya kutusunun çarpışmaya dayanıklılığını incelemektedir. Yaygın düşük hızlı kazaları yansıtan rijit bir darbe direği ile 10 m/s'de yapılan simülasyonlar, batarya kutusunun etrafındaki yardımcı yapıların hasarlı hücreleri %35,2'ye kadar azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca, geliştirilmiş enerji emiciler temel yapıdan daha hafiftir (Scurtu ve ark., 2023).

Elektrikli araçlar daha popüler hale geldikçe, bataryalı elektrikli araçların güvenliğine ilişkin endişeler, özellikle medyada yer alan batarya yangınları nedeniyle artmıştır. Kimyasal ve elektriksel güvenlik yönleri iyi çalışılmış olsa da, bataryalı elektrikli araçların batarya paketlerinin mekanik güvenlik değerlendirmesinde önemli bir boşluk vardır. Bu çalışma, batarya paketi muhafazalarının tasarımına ve mekanik güvenlik değerlendirmesine odaklanarak bu boşluğu ele almaktadır. Adım adım bir tasarım yaklaşımı kullanılmış, ardından yönetmelik ve standartlara göre değerlendirme yapılmıştır. Sonuçlar, tasarım değerlendirmelerinin doğru bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Bu çalışma, daha derin bir anlayışa katkıda bulunarak ve tasarımın değerlendirilmesi için bir çerçeve sağlayarak, batarya paketi muhafazalarının mekanik güvenliği konusunda gelecekteki araştırmalar ve iyileştirmeler için bir rehber görevi görmektedir (Gören, 2024).

Bu çalışmada, verimli ve hafif bir elektrikli araç bataryası geliştirmek için modifiye edilmiş bir genetik algoritma (NSGA-II), katkı analizi ve TOPSIS yöntemlerini birleştirmektedir. Başlangıçta, batarya kutusunun sonlu eleman ve çarpışmaya dayanıklılık modelleri, modal analiz ve çarpışma testleri ile doğrulanmıştır. Optimize edilmiş bileşenler, tasarım değişkeni olarak kalınlık ile katkı analizi kullanılarak belirlenmiştir. Latin hiperküp örneklemesi yapısal değerler sağlamış ve bir yanıt yüzeyi modeli optimizasyon göstergelerini tasarım değişkenlerine bağlamıştır. NSGA-II ve TOPSIS ile çok amaçlı optimizasyon en iyi uzlaşma çözümünü vermiştir. Sayısal simülasyonlar, optimize edilen batarya kutusu bileşenlerinin toplam ağırlığı %4,31 ve ezilme deformasyonunu %5,97 oranında azaltarak hafif ve çarpmaya dayanıklı batarya kutusu tasarımını geliştirdiğini doğrulamıştır (Wang ve ark., 2024).

Araştırma, elektrikli araçlarda çarpışmaya dayanıklılık ve hafif tasarım için batarya paketi sistemlerini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel yöntemler maliyetlidir ve batarya hücresi arıza kriterlerini göz ardı etmektedir. Bu çalışma, tek bir hücrenin sonlu elemanlar modeliyle başlayıp daha sonra kilit alan alt modelleriyle bir batarya paketi sistem modeli oluşturarak çok amaçlı tasarım için bir alt model ve hibrit ağırlıklandırma kullanmaktadır. Optimum latin hiperküp örneklemesi, kriging vekil modeli ve çok amaçlı parçacık sürüsü algoritması kullanılarak Pareto çözümü bulunmuştur. Hücrenin maksimum asal gerilmesini dikkate alan uzlaşma çözümü, analitik hiyerarşi süreci-Entropi-VIKOR yöntemi ile seçilmiştir. Bu yaklaşım, hesaplama süresini %56,2 oranında azaltmakta ve batarya paketi sisteminin yük taşıma kabiliyetinden yararlanarak, batarya paketi sistem tasarımı için pratik bir çözüm sunmaktadır (Lian ve ark., 2024).

Çalışmada batarya kutusu, çevre muhafaza için yüksek mukavemetli çelikten, alt muhafaza için alüminyumdan ve üst muhafaza için karbon elyaf takviyeli polimerden inşa edilmiştir. Doğrulanmış bir sayısal model ve analitik yaklaşım kullanılarak, batarya kutusu malzemelerinin yapısal modeli malzeme testi yoluyla belirlenmiştir. Yapısal ekstrüzyon analizi, yayınlanmış deneysel verilerle doğrulanmıştır. Tasarım parametrelerini taramak için batarya kutusu kütlesini ve maksimum ekstrüzyon deformasyonunu en aza indirmeye odaklanan modifiye bir TOPSIS yöntemi

kullanılmıştır. Geliştirilmiş çok amaçlı parçacık sürüsü optimizasyonu uygulanarak gelişmiş optimizasyon ve uyum yeteneği gösterilmiştir. Batarya kutusunun kütlesi, batarya paketinin maksimum deformasyonu ve batarya modülünün maksimum deformasyonu sırasıyla %16,12, %27,98 ve %14,31 oranında iyileştirilmiştir. Optimize edilen model, hafiflik performansını korurken çarpışma dayanıklılığını önemli ölçüde geliştirmiştir (Wang ve ark., 2024).

Çevresel kaygılar, içten yanmalı motorlu araçlardan öncelikle lityum iyon bataryalar kullanan elektrikli araçlara geçişi tetikliyor. Ancak batarya sızıntısı ciddi yaralanmalara neden olabilir. Yaralanmalı kazaların %15 ila %40'ını oluşturan yandan çarpışmalarda ciddi ve ölümcül yaralanmalarda %50 artış görülmektedir. Bu çalışma, sağlamlık ve çarpışmaya elverişlilik için bir şasi yan kirişi tasarlamaya ve analiz etmeye odaklanmaktadır. Uygun bir alüminyum alaşımı seçilmiş ve çarpışma performansını test etmek ve kirişin mukavemetini sağlamak için iki sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu modeller, çarpışma performansı ve ağırlık arasında en iyi dengeyi bulmak için genetik algoritmaya dayalı çok amaçlı bir optimizasyon programında kullanılmıştır. Dörtgen ve hizasız kesit şekline sahip çok kalınlıklı bir kiriş olan nihai tasarım, proje gereksinimlerini karşılamış ve performansı optimize etmiştir (Pereira, 2018).

Karayolu taşıtlarının güç aktarma organlarının elektrifikasyonu, daha katı CO2 emisyon düzenlemelerini karşılamak için bir çözüm olarak küresel çapta ilgi görmektedir. Hibrit elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlar, elektrik motorları ve batarya sistemleri gibi birden fazla güç bileşenini bir araya getirerek güç aktarma organlarını ve araç kütlesini artırmaktadır. Bu ilave kütle, yapısal çerçeve tasarımını etkileyerek performansı optimize etmek ve güvenlik gereksinimlerini karşılamak için erken tasarım aşamalarında bir seçim yapılmasını gerektirir. Güç bileşenlerinin doğru boyutlandırılması ve doğru yapısal tasarım, yakıt ekonomisi ve çarpışmaya dayanıklılık için çok önemlidir. Çarpışmaya dayanıklılık gerekliliklerini entegre eden güç bölmeli bir hibrit elektrikli araç güç aktarma organının ön tasarımı için çok disiplinli bir tasarım optimizasyonu çerçevesi önerilmektedir. Bu çerçeve, optimizasyon için sıralı bir değerlendirme şeması ve doğrudan arama yöntemi kullanmaktadır. Sonuçlar, çok

disiplinli bir tasarım optimizasyonu sürecine çarpışmaya elverişlilik analizinin dahil edilmesinin, yalnızca güç aktarma organı optimizasyonuna kıyasla daha uygulanabilir ve uygun maliyetli bir tasarıma yol açtığını göstermektedir. Bu metodoloji, erken tasarım için güç aktarma organları ve çarpışmaya dayanıklılık analizlerini verimli bir şekilde entegre etmektedir (Anselma ve ark., 2020).

İlgili çalışmada, tipik olarak alüminyum alaşımlardan yapılan karbon fiber kat tabanlı elektrikli araç batarya muhafazalarının çarpışmaya dayanıklılığını incelemektedir. Araştırma, bir sonlu elemanlar analizi çerçevesi kullanarak, karbon fiber katların mukavemetini değerlendirmek için termoform simülasyonlarını ve müteakip yapısal analizi içermektedir. Süreç, batarya muhafazasını şekillendirmek için bir kalıp üzerinde karbon fiber katmanların oluşturulmasını ve ardından çeşitli hızlarda çarpışmaya elverişliliği değerlendirmek için bir yan kutup darbe testini içerir. Pik yük, ortalama yük, ezilme yükü verimliliği, emilen enerji, malzeme hasarı ve deformasyon gibi temel parametreler analiz edilmiştir. Karbon fiber kompozit kullanılarak yapılan batarya muhafazasının toplam ağırlığı Al7075-T4 alüminyum alaşımı kullanılarak yapılandan %35,7 daha hafif ve buna rağmen her iki muhafazanın çarpışmaya dayanıklılık derecelerinin birbirleriyle karşılaştırılabilir olduğu tespit edilmiştir. Alüminyum alaşımlı malzeme için izotropik elasto-plastik malzeme modeli ve şekillendirme limit diyagramı hasar modeli kullanılmıştır (Kulkarni ve ark., 2023).

Karbon fiber kompozitler, üstün güç/ağırlık oranı ve korozyon direnci nedeniyle elektrikli araçlarda metal bazlı batarya muhafazalarının yerini alabilir. Bu yapıların mukavemeti çeşitli parametrelere bağlıdır. Bu çalışmada, farklı tasarım ve parametrelere sahip batarya kutularını sanal olarak üretmek için yüksek verimli sonlu eleman analizi ve ısıyla şekillendirme simülasyonları kullanılmıştır. Daha sonra çarpışmaya dayanıklılığı değerlendirmek için sanal çarpışma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, çarpışmaya dayanıklılık ölçütlerini doğru bir şekilde tahmin eden makine öğrenimi modellerinin oluşturulmasına yardımcı oldu ($R^2 > 0,97$). Çalışmada sunulan birleşik sonlu eleman analizi-makine öğrenimi döngüsü, metalik alaşımlar ve polimerlerle ilgili diğer üretim platformlarına da eşit derecede uygulanabilir (Shaikh ve ark., 2024).

Alüminyum gövde yapıları ve topoloji optimizasyonu üzerine yapılan araştırmalar, çeşitli boyut ve aralıklardaki elektrikli araçlar için yenilikçi bir platformun ortaya çıkmasını sağlamıştır. Topoloji optimizasyonuna kapsamlı çalışma koşulları dahil edilerek optimum kuvvet aktarım yolu türetilmiştir. Boylamasına kiriş ve alt şasi bindirmesi, önden çarpışma için optimize edilerek enerjiyi etkin bir şekilde emer ve deformasyonu kontrol eder. Bu sayede B direğinin sol tarafındaki ivmelenmede 4,4 g azalma, sağ taraftadakinde 3,12 g iyileşme ve ön duvar panelinin içeri girmesinde ise 38 mm azalma sağlanarak yolcu güvenliği artırılmıştır. Elektrikli bir sedan temel alınarak hafif bir alüminyum gövde platformu geliştirilmiş, farklı boyut ve aralıklardaki modeller, 2 yolcu ve 4 yolcu koltuğu altında %67,3 çok yönlülük oranı ile sonuçlanmıştır. Bu araştırma, taşıtlarda hafif bileşenlerin entegre tasarımına ve uygulamasına rehberlik etmektedir (Liu ve ark., 2024).

Bataryalar, elektrikli araçlar için hayati önem taşımakta, yolculuklarını ve güvenliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, batarya kutusu tasarımının optimize edilmesi, daha iyi mekanik ve çarpışmaya elverişlilik performansı için gereklidir. Bu çalışma, gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler ve boyut optimizasyonu kullanarak hafif bir batarya kutusu tasarımı sunmaktadır. Doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli modal testlerle doğrulanmıştır. Rastgele titreşim simülasyonları ve hassasiyet analizi, özelliklerini ve kalınlığı belirlemiştir. Sabit frekanslı titreşim analizi malzeme ve kalınlığı kesinleştirmiştir. Mekanik şok ve yorulma ömrü sayısal olarak analiz edilmiştir. Çarpışma simülasyonları ile çarpışmaya dayanıklılık doğrulanmıştır. Optimize edilmiş batarya kutusu, geliştirilmiş dinamik performans ile %10,41 ağırlık azaltımı sağlayarak fiziksel testleri, geliştirme maliyetlerini ve zamanı azaltmıştır (Pan ve ark., 2021).

Elektrikli bir aracın şasi çerçevesi, güç ünitesini yerleştirmek ve aracın gövdesini desteklemek için çok önemli olan ince duvarlı boru yapılarını içerir. Bu şasinin tasarlanması çok amaçlı optimizasyon ve çok parametreli problemleri içerir. İlk olarak, optimum değişkenleri bulmak için tasarım değişkenlerinin performans göstergelerine katkıları incelenmiştir. Bir polinom yanıt yüzey modeli, tasarım parametrelerinin etkilerini analiz etmiştir. Hafiflik ve çarpışmaya dayanıklılığa dayalı entegre bir

yaklaşım, gri ilişkisel analiz ve oyun teorisi kullanılarak belirlenen optimum çözüm ile Pareto cephelerini belirlemiştir. Deneyler, doğrusal ve çarpışmaya elverişlilik performansını korurken hafiflik performansında önemli gelişmeler gösteren optimize edilmiş stratejinin uygulanabilirliğini doğrulamaktadır (Wang ve ark., 2021).

Çarpışma koşullarında elektrikli araçların güvenliği üzerine sınırlı sayıda inceleme çalışması bulunmaktadır ve bu durum, uzun süredir pek çok kişinin yaralanma tehlikeleri ve önleme tedbirlerine aşina olmamasına neden olmaktadır. Bu çalışma, çarpışmalarda elektrikli araçların çeşitli güvenlik yönlerini gözden geçirerek bu boşluğu ele almaktadır. Yolcuların maruz kalabileceği yaralanma türleri ve nedenleri tanıtılmakta, yaralanmaların önlenmesine ilişkin uluslararası ve ulusal düzenlemeler tartışılmakta ve bu yaralanmaları önlemek için kullanılan en son teknolojiler gösterilmektedir. Bu derleme, akademisyenlere ve endüstri araştırmacılarına çarpışma koşullarında mevcut ve gelecekteki elektrikli araç güvenliği gelişmeleri hakkında kapsamlı bir anlayış sunarken, son kullanıcılara ve potansiyel son kullanıcılara bu alanda erişilebilir bilgiler sunmayı amaçlamaktadır (Gong ve ark., 2021).

Lityum-iyon batarya paketi muhafazası, bataryalı elektrikli araçlar için ana enerji kaynağıdır. Çalışma sırasında muhafaza, yol yüzeyindeki değişikliklerden kaynaklanan titreşim ve darbelere maruz kalarak yapısal gerilimlere ve deformasyonlara neden olur. Bir elektrikli aracın güvenliği, statik, titreşim ve şok yüklemesi altında deformasyona karşı direnç gibi batarya paketinin mekanik özelliklerine bağlıdır. Araç menzilini ve batarya ömrünü iyileştirmek için muhafazanın hafif olması gerekir. Bu çalışma, kütle, doğal frekans ve yerçekimi yüklemesi altındaki deformasyona göre değerlendirilen bir bal peteği batarya paketi muhafaza tasarımı önermektedir. Temel tasarım literatür verileriyle doğrulanmış ve kütle, titreşim performansı ve statik deformasyon üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır (Dhoke ve ark., 2024).

Elektrikli araçlar sürdürülebilirlikleri sayesinde pazar payı kazanıyor. Elektrikli araç tasarımı için çok önemli olan batarya muhafazaları, batarya hücrelerini korur. Bu muhafazalardaki klipsler bileşenleri sabitler ve titreşimleri azaltarak güvenliği sağlar. Bu klipsleri optimize etmek, darbeler sırasında mekanik bütünlüğü korumak için hayati

önem taşır. Çoğu araştırma genel batarya muhafazası yapılarına odaklanırken, bu çalışma topoloji optimizasyonu ve dayanıklılık analizi yoluyla klips tasarımını optimize ederek bu eksikliği gidermektedir. Optimize edilmiş klipsler, optimize edilmemiş klipslere kıyasla aynı yük koşulları altında dayanıklılıkta %36,96'lık bir iyileşme göstermiştir (Oral ve ark., 2025).

Bu çalışma, minimum hesaplama çabasıyla sonlu elemanlar modeli simülasyonları kullanarak bir elektrikli araç batarya kutusunun çarpışmaya dayanıklılığını değerlendirmek ve geliştirmek için optimize edilmiş bir yöntem sunmaktadır. Çalışmada Toyota Camry'nin basitleştirilmiş LS-DYNA modeli kullanılmakta ve yan direk çarpışma senaryosuyla ilgili yapılara odaklanılmaktadır. Simülasyonlar FMVSS214 ve UNR135 standartlarını takip etmekte ve 45 km/s'lik daha yüksek hızlara kadar uzanmaktadır. Sanal kütleli bir test mankeni, aracın ağırlık merkezine yaklaşmaktadır. Çarpışma sonuçlarından elde edilen kritik parametreler, elektrikli araç bataryası için yük durumu gelişimini bilgilendirir. Alüminyum batarya kutusu homojenleştirilmiş batarya hücrelerini barındırır. Çarpışmaya dayanıklılık, genel ve spesifik girişim ölçülerek değerlendirilir. Bu yöntem, geleneksel platformların elektrikli araçlar için uyarlanmasındaki zorlukları ele almakta ve bağımsız batarya çerçevesi geliştirme için bir çerçeve sunarak mevcut araç platformlarında elektrikli araç batarya sistemlerinin verimli ve uyarlanabilir optimizasyonunu sağlamaktadır (Muresanu ve ark., 2024).

Elektrikli araçlar yüksek enerji verimliliği ve düşük emisyonları nedeniyle popülerlik kazanmaktadır. Ancak, geleneksel araçların yerini tam olarak alabilmeleri için güvenliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, elektrikli araçların, özellikle de Li-ion bataryalı olanların güvenlik gereksinimlerini çeşitli standartlar ve yönetmelikler temelinde incelemektedir. Ayrıca, mevcut güvenlik gereksinimleri ile gerçek olaylar arasındaki boşlukları belirlemek için karayolu kazalarından kaynaklanan gerçek yangın olaylarını da incelemektedir. İnceleme, yüksek çarpma hızları, olay başına birden fazla çarpışma ve yolcular ve kurtarma ekipleri için çarpışma sonrası güvenlik gibi zorlukları vurgulamaktadır. Bu sorunların ele alınması, araştırmacıların ve üreticilerin batarya malzemeleri, yangın söndürme yöntemleri ve araç gövde yapısına

odaklanarak elektrikli araç güvenliğini geliştirmelerine yardımcı olacaktır. (Victor Chombo ve ark., 2021).

Son on yılda, elektrikli araç batarya kutularının hafifletilmesi ve çarpışmaya dayanıklılığı konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Araştırmacılar, güvenliği ve verimliliği artırmak için malzemeleri ve tasarımları optimize etmeye odaklandılar. Çalışmalar, alüminyum, cam elyaf takviyeli polimerler, karbon fiber takviyeli polimerler gibi malzemelerin kullanılmasının yapısal bütünlüğü korurken ağırlığı önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir. Bal peteği ve negatif poisson oranlı geometrileri birleştiren hibrit yapılar gibi yenilikçi tasarımlar çarpışma performansında önemli gelişmeler göstermiştir. Ayrıca, çarpışmalar sırasında enerji emilimini artırmak için esnek batarya modülü yapıları araştırılmıştır. Bu gelişmeler yalnızca elektrikli araçların güvenliğini artırmakla kalmıyor, aynı zamanda maliyet verimliliğine ve araç menzilinin uzatılmasına da katkıda bulunuyor. Genel olarak, gelişmiş malzemelerin ve optimize edilmiş tasarımların entegrasyonu daha güvenli, daha hafif ve daha verimli elektrikli batarya kutularının yolunu açmıştır. Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan toplamda 33 adet çalışma incelenmiş olup araştırma kapsamı ve çalışmalara ait bulgular Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan çalışmalara ait bulgular

Kaynak	Araştırma kapsamı	Bulgular
Li ve ark., 2019	Altı sigma tasarım optimizasyonu kullananılarak elektrikli bir aracın hafif ve çarpışmaya dayanıklı tasarımı	B direği tepe ivmelenmesi 18.9% azaltılmış ve batarya kutusunun X yönündeki deformasyonu da azaltılmıştır.
Mortazavi ve ark., 2023	Bataryaya entegre bir enerji emici modul eklenerek direğe yandan çarpma durumunda bataryanın korunması	ANSA, ABAQUS ve PAM-CRASH yazılımları ile direk girişi, iç enerji, dönüşüm öncesi ve sonrası kesit yükleri gibi kriterler analiz edilerek aracın çarpışma dayanıklılığında önemli gelişmeler elde edilmiştir.
Teng ve ark., 2024	Elektrikli araç bataryalarının deneysel ve nümerik yaklaşımlarının teknik olarak incelenmesi	Bu incelemenin batarya güvenliğinde deneysel ve nümerik alanda yol gösterici olması bekleniyor.
Xiong ve ark., 2023	Ortogonal deneysel tasarım ve yanıt yüzey metodolojisi ile batarya kutusunun ağırlık azaltma ve çarpışma dayanıklılığı analizi	Optimize edilen batarya kutusu %11,73 daha hafif ve çarpışmaya karşı daha dayanıklı hale gelmiştir.
Zhang ve ark., 2021	Topoloji optimizasyonu ile elektrikli araç batarya kutusu tasarımı	Önden çarpma güvenliği performansı ve direğe yandan çarpma durumu incelendiğinde, EP5 de P5'e göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
Pan ve ark., 2022	Batarya kutusunun hafif tasarımı için çarpışma analizi	Batarya kutusunun toplam ağırlığı %6,6 oranında azaltlırken, çarpışmaya dayanıklılık performansı arttırılmıştır.
Anton ve ark., 2021	Elektirkli araçlarda hafifletme konusunun patentler ve yayınlar üzerinden tasarım stratejilerinin incelenmesi	Çalışma, belirli anahtar kelimeler kullanılarak açık kaynaklı patentlere ve yayınlara dayanmaktadır, ancak kapsamlı olmayabilir. Bu nedenle, çıkarılan sonuçlar mevcut verilerle sınırlıdır.
Ding ve ark., 2020	Elektirkli araçların direğe yandan çarpma durumunun çarpışmaya dayanıklılık özelliği ve yapısal optimisazyonu	Optimizasyon sonucu 7,2 kg ağırlık azaltımı sağlanmıştır.
Demirci ve ark., 2025	Elektrikli araç güvenliği için alüminyum köpük dolgulu batarya kutularının çok amaçlı optimizasyonu	Optimize edilen tasarım, spesifik enerji emiliminde %50,71'lik bir artış ve tepe ezilme kuvvetinde %11,56'lık bir azalma sağlamıştır.

Çizelge 2.2. Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan çalışmalara ait bulgular (devam)

Mudassir ve ark., 2020	Elektirkli araç bataryasının doğadan ilham alan hücresel yapı tasarımı	En yüksek performanslı hücresel yapının 35kJ/kg spesifik enerji emilimine sahip olduğu raporlanmıştır.
Arslan ve Karamangil, 2025	Yeni bir hibrit yapı kullanılarak hafiflik ve çarpışmaya dayanıklılık açısından elektrikli araç batarya kutusu yan profilinin kapsamlı optimizasyonu ve tasarımı	Nihai tasarım sonucu, batarya kutusu yan profili %23,9 daha hafif, %38,6 daha ucuz ve %3 daha yüksek performanslı hale gelmiştir.
Dhoke ve Dalavi, 2021	Elektrikli araçların batarya paketi muhafazasının hafif tasarımı üzerine eleştirel bir inceleme	Yazarlar verimli batarya paketi tasarımı teknolojisinin giderek daha rafine hale geleceğini ve böylece batarya paketlerinin yaşam döngüsünü iyileştireceğini ummaktadır.
Rahman ve ark., 2024	Abaqus ile elektrikli araç batarya kutusu ve şasisinin entegre olarak çarpışmaya dayanıklılık analizi	3 mm'lik et kalınlıklı batarya kabuğu, 55,5 m/s'de 1 mm'lik et kalınlıklı kabuktan daha yüksek direnç kuvveti göstermiştir.
Kotak ve ark., 2021	Standartlar ve yönetmeliklerde batarya çarpışma testinin prosedürlerinin incelenmesi	Standartların gerçek hayattaki çarpışma senaryolarını yansıtacak şekilde iyileştirilmesi ihtiyacı vurgulanmaktadır, bu durum, üreticilerin ikilemlerini çözecek ve tüketiciler için elektrikli araç güvenliğini artıracaktır.
Fauzi ve ark., 2018	Taşıtlarda çarpışma ve güvenlik uygulaması için kompozit esaslı hafif yapı tasarımı	LS-Dyna simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar ile, ortalama ezilme kuvveti hatasının %3,3 içinde olduğu iyi bir korelasyon elde edilmiştir.
Agarwal ve ark., 2024	Elektrikli araç batarya paketlerinin çarpışmaya dayanıklılığının petek yapılar ve açık dinamik analiz kullanılarak değerlendirilmesi	Çarpma sırasında, batarya ünitesinin iç enerjisi petek yapı olmadan 1021,8 mJ ve petek yapıyla birlikte 0,80376 mJ'dür. Sonuçlar, petek yapı ile iç enerjide önemli bir azalma olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2.2. Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan çalışmalara ait bulgular (devam)

Scurtu ve ark., 2023	Negatif possion oranı yapılı batarya kutusunun çarpışma dayanıklılığının sayısal analizi	Batarya kutusunun etrafındaki yardımcı yapıların hasarlı hücreleri %35,2'ye kadar azaltabileceği ve geliştirilmiş enerji emicilerin temel yapıdan daha hafif olduğu elde edilmiştir.
Gören, 2024	Batarya kutusu için konsept tasarımları	Analizler, sağlam bir batarya kutusunu tasarlamak veya mevcut bir tasarımı iyileştirmek için gereken tasarımı belirleme ve sonuçlara göre tasarımı değiştirme yöntemlerini doğrulamıştır.
Wang ve ark., 2024	Çarpışmaya dayanıklılık açısından batarya kutusunun çok amaçlı hafif tasarımı	Optimize edilen batarya kutusu bileşenlerinin toplam ağırlığı %4,31 ve ezilme deformasyonunu %5,97 oranında azaltılmıştır.
Lian ve ark., 2024	Çarpışmaya dayanıklılık ve hafiflik açısından alt model ve hibrit ağırlıklandırma yöntemi odaklı bir batarya paketi sisteminin çok amaçlı optimizasyon tasarımı	Yaklaşım, hesaplama süresini %56,2 oranında azaltmakta ve batarya paketi sisteminin yük taşıma kabiliyetinden yararlanarak, batarya paketi sistem tasarımı için pratik bir çözüm sunmaktadır
Wang ve ark., 2024	Çarpışmaya elverişli hibrit metal-kompozit batarya kutusu tasarımı	Batarya kutusunun kütlesi, batarya paketinin maksimum deformasyonu ve batarya modülünün maksimum deformasyonu sırasıyla %16,12, %27,98 ve %14,31 oranında iyileştirilmiştir.
Pereira, 2018	Elektrikli bir aracın sağlamlığı ve çarpışmaya dayanıklılığı için bir şasi yan kirişinin ön tasarımı ve analizi	Dörtgen ve hizasız kesit şekline sahip çok kalınlıklı bir kiriş olan nihai tasarım, proje gereksinimlerini karşılamış ve performansı optimize etmiştir.
Anselma ve ark., 2020	Bileşen boyutlandırması ve çoklu doğruluk önden çarpışmaya dayanıklılığı açısından hibrit elektrikli araçlar için çok disiplinli tasarım optimizasyonu	Sonuçlar, çok disiplinli bir tasarım optimizasyonu sürecine çarpışmaya elverişlilik analizinin dahil edilmesinin, yalnızca güç aktarma organı optimizasyonuna kıyasla daha uygulanabilir ve uygun maliyetli bir tasarıma yol açtığını göstermektedir.

Çizelge 2.2. Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan çalışmalara ait bulgular (devam)

Kulkarni ve ark., 2023	Karbon fiber bazlı elektrikli araç batarya muhafazasının çarpışmaya dayanıklılığının sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi	Karbon fiber kompozit kullanılarak yapılan batarya muhafazasının toplam ağırlığı Al7075-T4 alüminyum alaşımı kullanılarak yapılandan %35,7 daha hafif ve buna rağmen her iki muhafazanın çarpışmaya dayanıklılık derecelerinin birbirleriyle karşılaştırılabilir olduğu tespit edilmiştir.
Shaikh ve ark., 2024	Çarpışmaya dayanıklılık için karbon fiber esaslı batarya kutularının sonlu elemanlar analizi ve makine öğrenimi yoluyla tasarımı	Tüm hedef parametreler için $R^2 > 0,97$ olarak elde edilmiş ve sunulan birleşik sonlu eleman analizi-makine öğrenimi döngüsü, metalik alaşımlar ve polimerlerle ilgili diğer üretim platformlarına da eşit derecede uygulanabilecektir.
Liu ve ark., 2024	Çarpışma performansı dikkate alınarak elektrikli araç şasisinin topoloji optimizasyonu ve hafif platform geliştirilmesi	Elektrikli bir sedan temel alınarak hafif bir alüminyum gövde platformu geliştirilmiş, farklı boyut ve aralıklardaki modeller, 2 yolcu ve 4 yolcu koltuğu altında %67,3 çok yönlülük oranı ile sonuçlanmıştır.
Pan ve ark., 2021	Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler ve boyut optimizasyonu ile elektirikli araç batarya kutusu için hafif tasarım	Optimize edilmiş batarya kutusu, geliştirilmiş dinamik performans ile %10,41 ağırlık azaltımı sağlayarak fiziksel testleri, geliştirme maliyetlerini ve zamanı azaltmıştır.
Wang ve ark., 2021	Elektrikli araç şasi iskeletinin çarpışmaya dayanıklılık odaklı çok amaçlı entegre optimizasyonu	Çok amaçlı entegre optimizasyon tasarım stratejisi, özellikle meta-model oluşturma, optimizasyon süreci ve optimum çözüm seçimi alanlarında etkili ve makuldür.
Gong ve ark., 2021	Çarpışma koşullarında elektrikli araçların güvenliğinde yolculara yönelik tehlikeler, düzenleyici faaliyetler ve teknik destek üzerine bir inceleme	Bu derleme, akademisyenlere ve endüstri araştırmacılarına çarpışma koşullarında mevcut ve gelecekteki elektrikli araç güvenliği gelişmeleri hakkında kapsamlı bir anlayış sunarken, son kullanıcılara ve potansiyel son kullanıcılara bu alanda erişilebilir bilgiler sunmayı amaçlamaktadır.

Çizelge 2.2. Elektrikli araç batarya kutularının hafifliği ve çarpmaya dayanıklılığı üzerine son on yılda yapılan çalışmalara ait bulgular (devam)

Dhoke ve ark., 2024	Elektrikli bir araç için bal peteği batarya kutusunun optimum tasarımı	Yeni bal peteği batarya paketi muhafaza tasarımı ile net ağırlıkta yaklaşık 5,2 kg azalma sağlanmıştır.
Oral ve ark., 2025	Elektrikli araç batarya kutularında kullanılan kliplerin topoloji optimizasyonu ve dayanıklılık analizi	Optimize edilmiş klipsler, optimize edilmemiş klipslere kıyasla aynı yük koşulları altında dayanıklılıkta %36,96'lık bir iyileşme göstermiştir.
Muresanu ve ark., 2024	Elektrikli bir araç için batarya kutusu tasarımının çarpışmaya dayanıklılığının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmesi	Bu metodoloji, temel çarpışma parametrelerini tam bir araç modelinden izole ederek ve bunları yalnızca bataryaya odaklanmış bir dinamik yük durumuna uygulayarak önemli hesaplama avantajları sunmaktadır.
Victor Chombo ve ark., 2021	Batarya yangınına yol açan elektrikli araç çarpışma dayanıklılığından çıkarılacak dersler	İnceleme, yüksek çarpma hızları, olay başına birden fazla çarpışma ve yolcular ve kurtarma ekipleri için çarpışma sonrası güvenlik gibi zorlukları vurgulamaktadır ve elektrikli araçların ve yolcuların güvenliği ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulan potansiyel alanlar hakkında net bir resim sunmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Malzeme seçimi

CETP izotropik olmadığından, tüm eksenlerde farklı mekanik özelliklere sahiptir. Malzemenin mekanik özellikleri elyaf yoğunluğu ve oryantasyonuna göre değişir. Akış analizinde olduğu gibi, lifler yapı içinde dağıtılır ve mukavemet bölgesel olarak farklılık gösterir. Bu çalışmada, pultrüzyon mantığı sayesinde, malzeme tüm bileşen üzerinde eşit yoğunlukta dağılacak ve ortotropik bir malzeme gibi davranacaktır. İlgili bir çalışmada, üç farklı tipte pultrüzyon ile CETP laminat üretilmiş ve malzeme özellikleri sayısal ve teorik modelleri doğrulamak için test edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi (FEA) sonuçları test sonuçlarıyla uyumludur ve CETP yapıların tasarımı ve inşası için bir referans sağlayabilir. CETP 'nin mekanik özelliklerine ilişkin kapsamlı bir araştırma ve literatür taraması sonucunda, GF800' ün alüminyuma en yakın mekanik özelliklere sahip olduğu ve elyaf yüzdesinin mukavemetle doğru orantılı olduğu yorumlanmıştır ve bu nedenle GF800 malzemesi seçilmiştir (Xin ve ark., 2017). GF800 %60,5 elyaf ve %39,5 matristen oluşmaktadır. GF800'ün mekanik özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir. Bu çalışmadaki GF800 malzemesi için olan çıktılar, sayısal ve deneysel olarak doğrulandıkları için tez çalışmamızın girdileri ve temel mekanik özellikleri olarak kullanılmıştır.

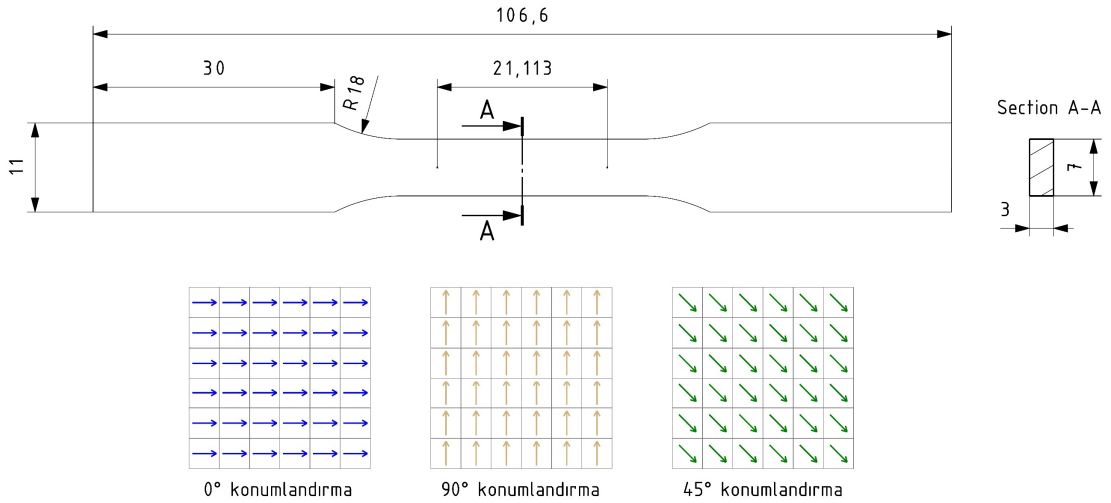
Çizelge 3.1. GF800 malzemesinin mekanik özellikleri (Xin ve ark., 2017)

Lamina		**Epoksi reçine**		**E-Cam elyaf**	
Tanım	**Değer**	**Tanım**	**Değer**	**Tanım**	**Değer**
E_1	45.95 GPa	Modül	3.35 GPa	Boyuna modül	74.0 GPa
E_2	14.56 GPa	Kesme modülü	1.24 GPa	Enine modül	74.0 GPa
E_3	14.56 GPa	Poisson oranı	0.35	Poisson oranı	0.2
G_{12}	4.5 GPa	Kesme dayanımı	75 MPa	Kesme modülü	30.80 GPa
G_{13}	4.5 GPa	Çekme dayanımı	80 MPa	Çekme dayanımı	2150 MPa
G_{23}	5.51 GPa	Bası dayanımı	120 MPa	Bası dayanımı	1450 MPa
ν_{12}	0.25	Yoğunluk	1160 kg/m^3	Yoğunluk	2560 kg/m^3
ν_{13}	0.25				
ν_{23}	0.3				

E-cam elyaflar, yüksek mukavemet/ağırlık oranları, korozyona dayanma kabiliyetleri ve esneklikleri nedeniyle tercih edilmektedir. E-cam'ın spesifik özellikleri önemli bir takviye elyafı olarak araştırılmış ve yapısal analiz için etkileri yorumlanmıştır (Pranathi ve ark., 2024). Yaygın olarak kullanılan bir sentetik elyaf olan E-Cam, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli etkilere sahiptir ve üretim, kullanım ve imha süreçlerinin değerlendirilmesi son derece önemlidir (Rana ve ark., 2017).

Termoset bir polimer olan epoksi reçine, kompozit malzeme mühendisliğinin temel taşıdır. Çok yönlüdür ve özel gereksinimleri karşılamak için uyarlanabilir (John ve Naidu, 2004). Çeşitli elyaflarla takviye edilebilme özelliği sayesinde çok çeşitli mekanik özelliklere sahip kompozitler oluşturulabilir. Epoksi reçine çok dayanıklıdır ve çevresel faktörlere karşı dirençlidir. Epoksi reçineler havacılık, otomotiv ve inşaat dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde kullanılabilir. Epoksi reçinenin çok yönlülüğü, onu yüksek mukavemet-ağırlık oranları, korozyon direnci ve boyutsal kararlılık gerektiren bileşenlerin üretimi için ideal bir seçim haline getirir (Sakib ve Iqba, 2021). Epoksi reçine ve E-cam elyaf takviyeli CETP için uygun bir uygulama, yüksek mukavemet, sertlik ve hafiflik özelliklerinin bir kombinasyonunu sunarak bunları otomotiv uygulamaları için ideal hale getirir.

Şekil 3.1' de gösterildiği gibi bir test kuponu ile sanal bir çekme testi modeli kurulmuş ve 0°, 90° ve 45° konumlandırmaları dikkate alınmıştır. Gerinim hesaplaması için kullanılan malzemenin ilk boyu 21,113 mm'dir ve bu uzunluk tanımlanan düğümler arasında hesaplanır. Test numunesi kesit genişliği 7 mm ve kalınlığı 3 mm'dir. Eleman boyutu 0,5 mm olan dörtlü tip bir ağ uygulanmıştır.



Şekil 3.1. Test numunesi ve konumlandırmalar

Gerilme-şekil değiştirme hesaplamasında eğrinin doğrusal kısmı elastik bölgeyi, bu bölgenin eğimi ise elastisite modülünü oluşturmaktadır. Bu analizlerde doğrusal kısmın eğimi dikkate alınmış ve tanımlanan malzeme 0°, 90° ve 45° yönlerinde 0,99 ile 1 arasında R^2 değerleri elde edilerek sanal olarak doğrulanmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Sanal çekme testinin R^2 değerleri

Konumlandırma	**Doğrusal Kısmın Eğimi**	**R^2**
0°	y = 45005x + 7,1842	0,9999
90°	y = 14674x + 0,8617	0,9908
45°	y = 12805x + 1,7288	0,9955

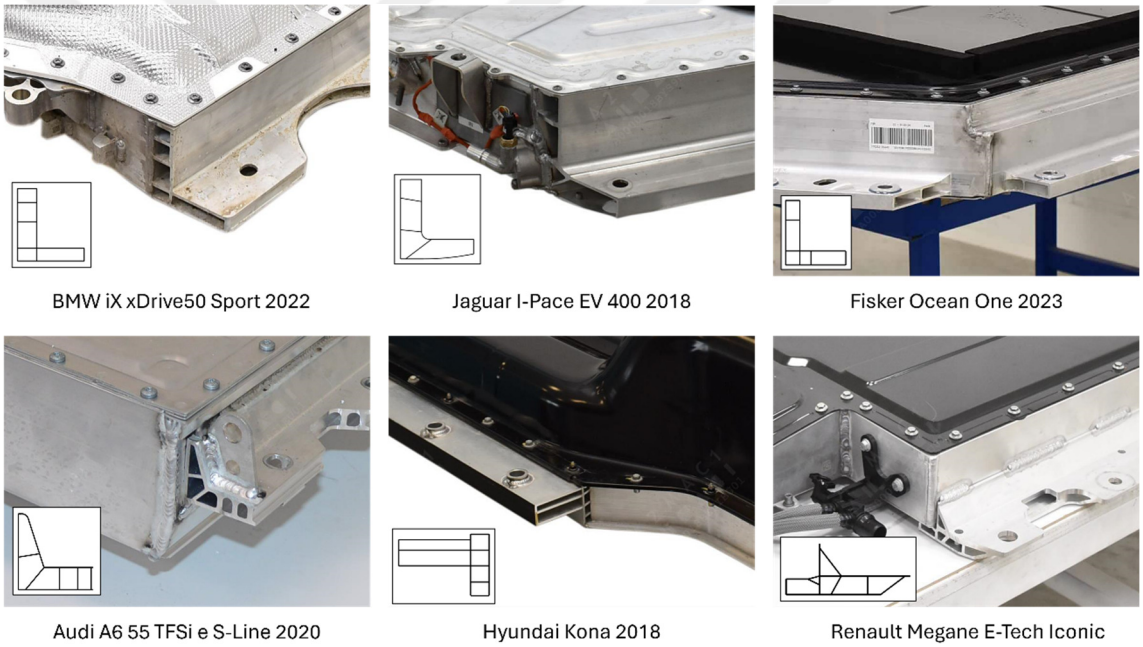
R^2 değerlerinin 1'e yakın olması, FEA'ler için kullanılacak malzeme kartına ek olarak sanal çekme modelinin de doğru olduğunu göstermektedir.

FEA için malzeme kartı hazırlanırken, elyaf pultrüzyon yönü kompozit E1 yönü (0° konumlandırması) olarak seçilmiştir. Yapı, gerilme sonuçları için beş katman olarak temsil edilmiş ve tüm katmanlar 0° konumlandırmasıyla tanımlanmıştır. Geometrik verilerdeki kalınlık değerleri kullanılmıştır. LAW25, Radioss Explicit çözümde kompozit model olarak birçok çalışmada başarıyla kullanıldığı için tercih edilmiştir

(Bilmez ve Taşdemirci, 2024; Garg ve ark., 2020). LAW25, Radioss'ta en yaygın kullanılan kompozit malzemedir. Kabuk ve katı elemanlar ile kullanılabilmektedir. LAW25'te mevcut olan iki formülasyon Tsai-Wu ve CRASURV formülasyonlarıdır. Bu model için CHANG arıza modu tercih edilmiştir.

3.2. Batarya pazar araştırması ve karşılaştırmalı değerlendirme

A2MAC1 tersine mühendislik uygulaması üzerinden bataryalar için toplamda 33 farklı elektrikli ve hibrit araç modeli taranmış ve Şekil 3.2' de gösterildiği gibi genellikle L kesit yapısının tercih edildiği bilgisine ulaşılmıştır.



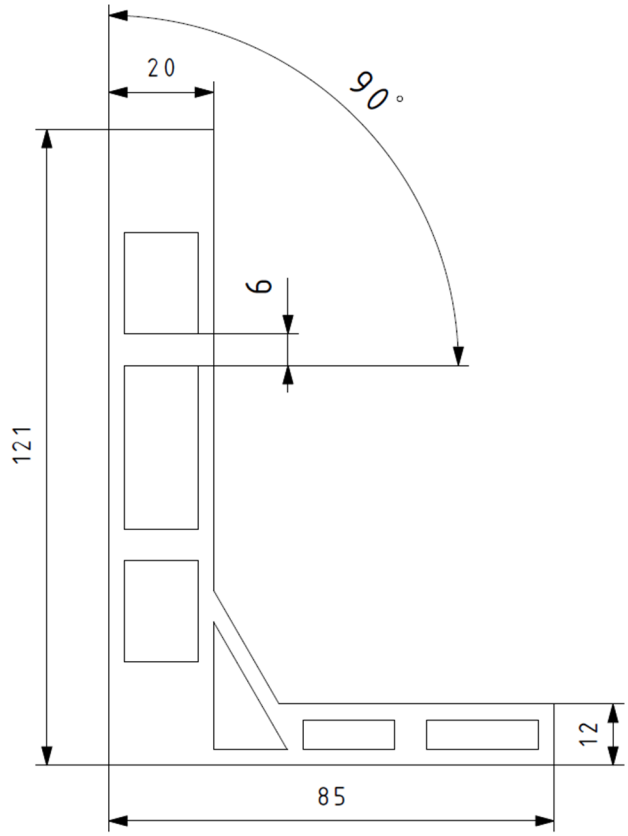
Şekil 3.2. Kıyaslama çalışmalarında gözlemlenen L şeklindeki kesit (Arslan ve Karamangil, 2025)

Karşılaştırmalı modellerden elde edilen, özelliklede malzeme türü, yan profil boyutları ve kalınlık aralığı ile ilgili temel bulgular Çizelge 3.3' de sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Kıyaslanan modellerden temel bulguların karşılaştırılması

Araç modeli	A2Mac1 Referansı	Kütle (kg)	Malzeme kodları	Batarya Ölçüleri Genişlik*Yüksek lik*Derinlik (mm)	Yaklaşık. Yan profil boyutları Yükseklik*Geniş lik (mm)	Et kalınlığı (mm)
BMW iX xDrive50 Sport 2022	2149-387	648.5	AlMg0,7Si AlSiMg AlMg3 PP-GF25	1730x320x2410	106x132	3.5-4.5
Jaguar I-Pace EV 400 2018	1079-610	603.0	Çelik Alaşım Plastik Diğer	1455x285x2310	135x115	3.9-4.8
Fisker Ocean One 2023	2382-679	590.4	Alüminyum Plastik	1535x165x2210	82x83	4-5
Audi A6 55 TFSi e S-Line 2020	1896-2303	132.8	EN-AW-6005 AlMgS1 AlSi1.2Mg0.4	1000x135x690	67x65	3-4.5
Hyundai Kona 2018	1114-927	450.4	Diğer	1440x310x1970	64x95	3-3.7
Renault Megane E-Tech Iconic	2227-497	389.0	Alüminyum Çelik	1460x335x1990	50x108	4.9-6.2

Ürünün mevcut teknik bilgi birikiminin korunması amacıyla mevcut L yapısı Şekil 3.3' te gösterildiği gibi %90 benzerlikle yeniden tasarlanmış ve genel olarak alüminyum 6000 serisi malzeme kullanıldıgı bilgisine ulaşılmıştır. Bu çalışmada mevcut durumdaki enerji emilimi ve deplasman analiz edilmiş, aşırı mühendislik durumu yorumlanmıştır.

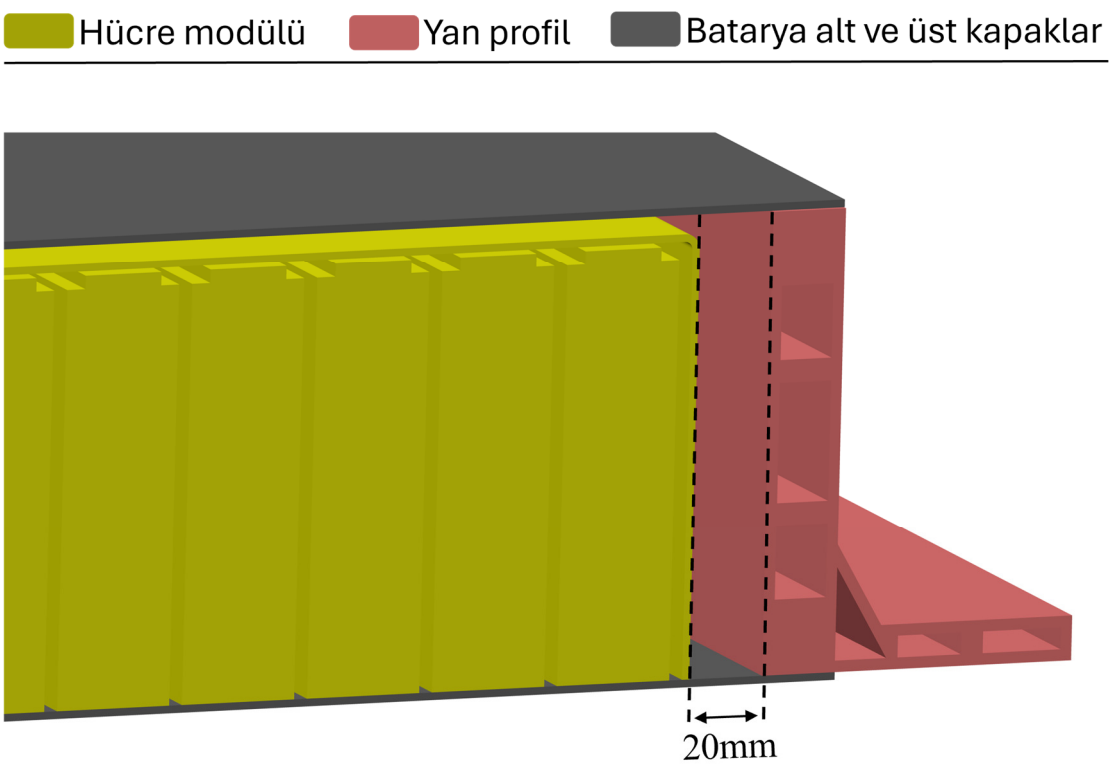


Şekil 3.3. Kıyaslama çalışmalarına istinaden oluşturulmuş mevcut kesit

3.3. Test Gereklilikleri ve Isı Dağıtımı

Pultrüzyon üretim yönteminde malzemenin ana mukavemet bileşeni olan fiberler, eksenel boylam boyunca tek yünlü uzandığı için pultrüzyon ile üretilen profiller yandan yüklemelere kıyasla eksenel yüklemelerde daha dayanımlıdır, bu yüzden bu çalışmada kötü senaryo durumu olan yandan çarpışma durumu incelenmiştir. Çarpışmalarda, batarya için en korunmasız durumlar yandan çarpışmalardır. Yan direk çarpışmaları, batarya deformasyonu ve yangın riski açısından eksenel (ön/arka) çarpışmalardan daha tehlikeli olarak kabul edilir. Yan direk çarpışmaları batarya paketini ciddi oranda deforme edebilir veya kısa devre, termal kaçak ve potansiyel yangınlara yol açabilirken, eksenel çarpışmalar potansiyel olarak hasara yol açsa da enerji emilimi için daha fazla fırsat sunar ve bataryanın deforme olma, delinme riski daha azdır.

Bu tez çalışmasında, M1 kategorisindeki bir aracın batarya kutusundaki yan profillerin çarpışma performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. ECE R100 yönetmeliği 8D ekine göre batarya için çarpışma testi senaryosu uygulanmıştır. Üst kapak ve alt taban dahil olmak üzere komple bir batarya paketi, 75 mm yarıçaplı bir ezilme plakası ile 100 kN yüke maruz bırakılır. İç kirişler ve batarya kapağı gibi diğer destek parçalarının sisteme kattığı ekstra güç göz önünde bulundurulduğunda, yan profillerin hareket edebileceği ve bataryanın hücre modüllerinin deforme olmayacağı maksimum güvenli yer değiştirme 20 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.4'te batarya datasından alınan kesitte hücre modülü ve yan profil arasındaki boşluk mesafesi gösterilmiştir. Yapının aşırı mühendisliğini önlemek için bu yer değiştirmedeki tepe kuvveti ve enerji emilimi karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.4. Maksimum güvenli yer değiştirmenin batarya datası üzerinden kesit gösterimi

Batarya paketi araştırmalarında, çarpışmaya dayanıklılık ve ısı dağılımı önemli noktalardır ve yan batarya kutusu profillerini tasarlamak için yeni malzemeler veya yeni yapı entegrasyonları kullanıldığında ilk olarak dikkate alınmalıdır.

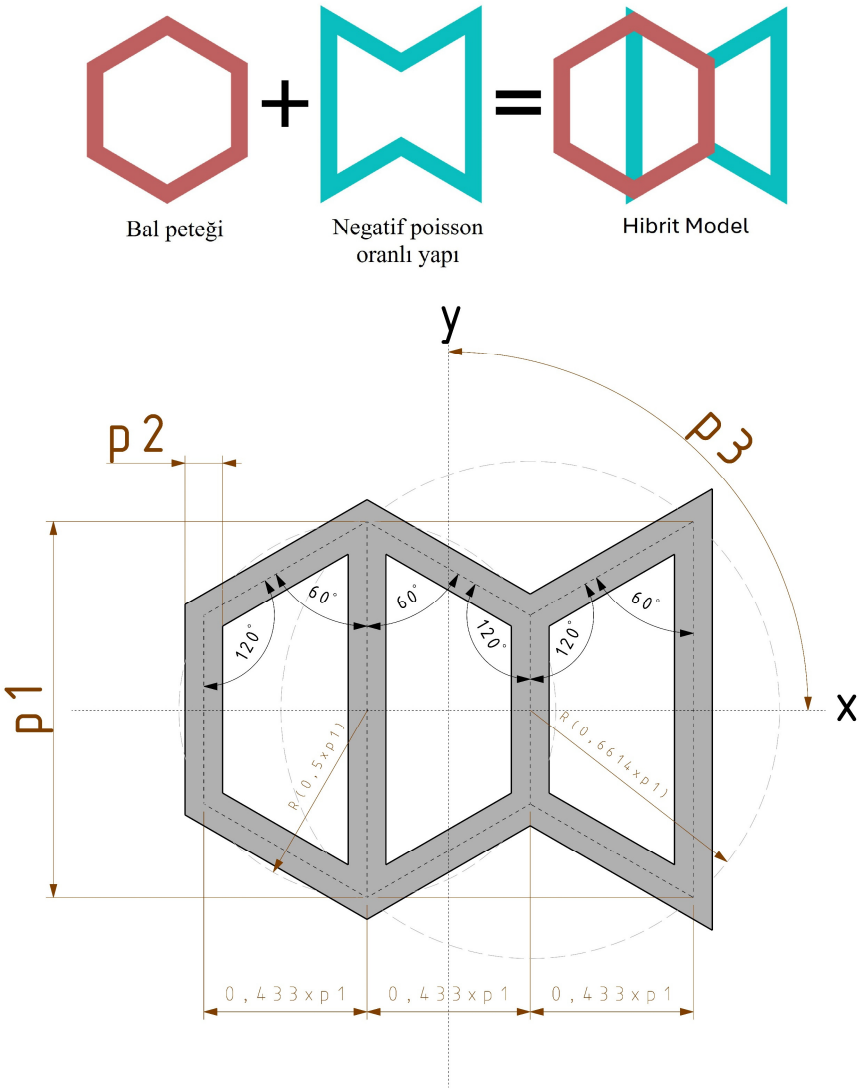
İlgili bir çalışmada, yan çarpışma durumlarında negatif poisson oranlı geometri içeren bir tasarımın çarpışmaya dayanıklılığı ve ısı dağılımı araştırılmıştır (Wang ve ark., 2021). NPR-CTP (negatif poisson oranına sahip modülsüz batarya paketi) sistemi, diğer geleneksel paket sistemlerine göre daha iyi çarpışmaya dayanıklılık ve ısı dağılımına sahiptir ve optimize edilmiş NPR-CTP sisteminin kapsamlı performansı etkili bir şekilde güçlendirilmiştir. Bir başka çalışmada, termal döngülerin farklı geometrilere sahip ve pultrüzyon ile üretilmiş CETP profiller üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Eğme numuneleri, hem temel zayıf hem de güçlü eksenler boyunca üç nokta eğme yoluyla test edilen I-şekilli ve U-kanal profillerden oluşurken, kutu profiller ve laminatlar sırasıyla basma ve çekme testlerinde kullanılmıştır. Sonuçlar, termal döngü sayısının reçinenin mukavemeti üzerinde büyük bir etkisi olduğunu ve elyafların mukavemeti üzerinde küçük bir etkisi olduğunu göstermiştir (Jafari ve ark., 2019).

3.4. Kesit Tasarımı

İlgili bir çalışmada, düzenli bal peteği ve negatif poisson oranlı yapıyı birleştiren hibrit bir yapı 3D baskılı numuneler üzerinde çalışılmıştır. Farklı hücrelerin deformasyon ve arıza modları ile performansları incelenmiştir. Bal peteği ve negatif poisson oranlı yapılarla karşılaştırıldığında, yeni hibrit yapı daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Hibrit yapının basınç dayanımı, petek yapınınkinden ~%300 ve negatif poisson oranlı yapınınkinden ~%65 daha fazladır. Diğer yapılarla karşılaştırıldığında, yeni tasarım daha fazla enerji emilimi sağlamaktadır (Ingrole ve ark., 2017).

Bir başka çalışmada da, negatif poisson oranlı yapı ve bal peteği kullanılarak yeni bir 3D hibrit kafes yapısı geliştirilmiş ve enerji emme özelliklerini araştırmak ve karşılaştırmak için bu yapılar üzerinde simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar önemli gelişmeler olduğunu göstermektedir. Çekme yüklemesi altındaki en küçük enerji emilim değeri, basınç yüklemesi altındaki en büyük değerden %86 daha büyüktür. Araştırmalar, geleneksel 3D negatif poisson oranlı yapıların rijitliğinin ve enerji emiliminin negatif poisson oranlı ve bal peteği yapılarının birleştirilmesiyle geliştirilebileceğini göstermiştir (Hu ve ark., 2024).

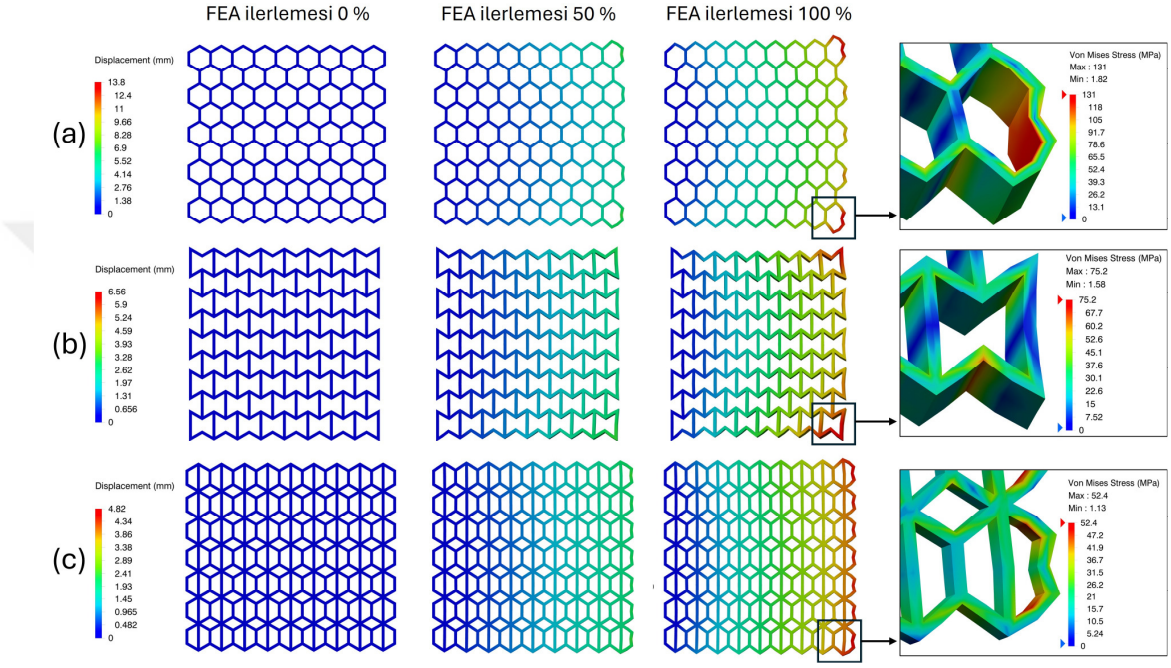
Bu tez çalışmasında, literatürdekinden farklı yeni bir tasarım yaklaşımı sunulmuştur. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, bal peteği ve negatif poisson oranlı yapıyı birleştiren yeni hibrit bir model oluşturulmuştur. Bu çalışma, geliştirdiği kesit tasarımı açısından özgündür. Tasarım değişkenleri maksimum kenar uzunluğu (p1), kesit et kalınlığı (p2) ve düzlem açısı (p3) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.5. Tasarım değişkenleri ile birlikte hibrit modelin teknik çizimi

Hibrit modelin iyileştirme durumunu anlamak ve doğrulamak için her üç durum için de FEA gerçekleştirilmiştir. Sabit panellere sıkıştırma yönünde 100 kN kuvvet uygulanmış ve performansı karşılaştırmak için yer değiştirmeler dikkate alınmıştır. Panel boyutları 500 × 500 × 50 mm ve malzeme cam elyaf olarak belirlenmiştir. FEA sonuçları Şekil

3.6'da verilmiştir. 100 kN'daki yer değiştirme bal peteği paneli için 13,8 mm, negatif poisson oranlı yapı için 6,56 mm ve hibrit yapı için 4,82 mm'dir. Petek yapıdaki maksimum von Mises gerilmesi 131 MPa, negatif poisson oranlı yapıdaki 75,2 MPa ve hibrit yapıdaki 52,4 MPa'dır. Yer değiştirme ve gerilme dağılımı açısından hibrit yapı, bal peteği ve negatif poisson oranlı yapılara kıyasla en iyi seçimdir.



Şekil 3.6. 2D kafes yapıların sıkıştırma altında deformasyonu: (a) bal peteği, (b) negatif poisson oranlı yapı ve (c) hibrit yapı

Çarpışma performansı, yer değiştirmenin ağırlığa bölünmesiyle hesaplanmıştır. Bu birimler ağırlık başına yer değiştirmeyi ifade eder, yani en düşük değer en iyi performansı sağlar. Çizelge 3.4' te verilen hesaplamalar doğrultusunda, bal peteği için performans değeri 0,002233 mm/g, negatif poisson oranlı yapı için 0,000911 mm/g ve hibrit yapı için 0,000485 mm/g'dır. Hibrit yapının daha iyi bir çarpışma performansına sahip olduğu belirlenmiştir. Yeni hibrit tasarımın performansı bal peteği yapınınkinden ~%360 ve negatif poisson oranlı yapınınkinden ~%88 daha yüksektir.

Çizelge 3.4. Bal peteği, negatif poisson oranlı yapı ve hibrit yapının performans karşılaştırması

Kafes yapı tipi	Kütle (g)	Deplasman (mm)	Performans (mm/g)
Bal peteği	6181	13.8	0.002233
Negatif poisson oranlı yapı	7198	6.56	0.000911
Hibrit yapı	9936	4.82	0.000485

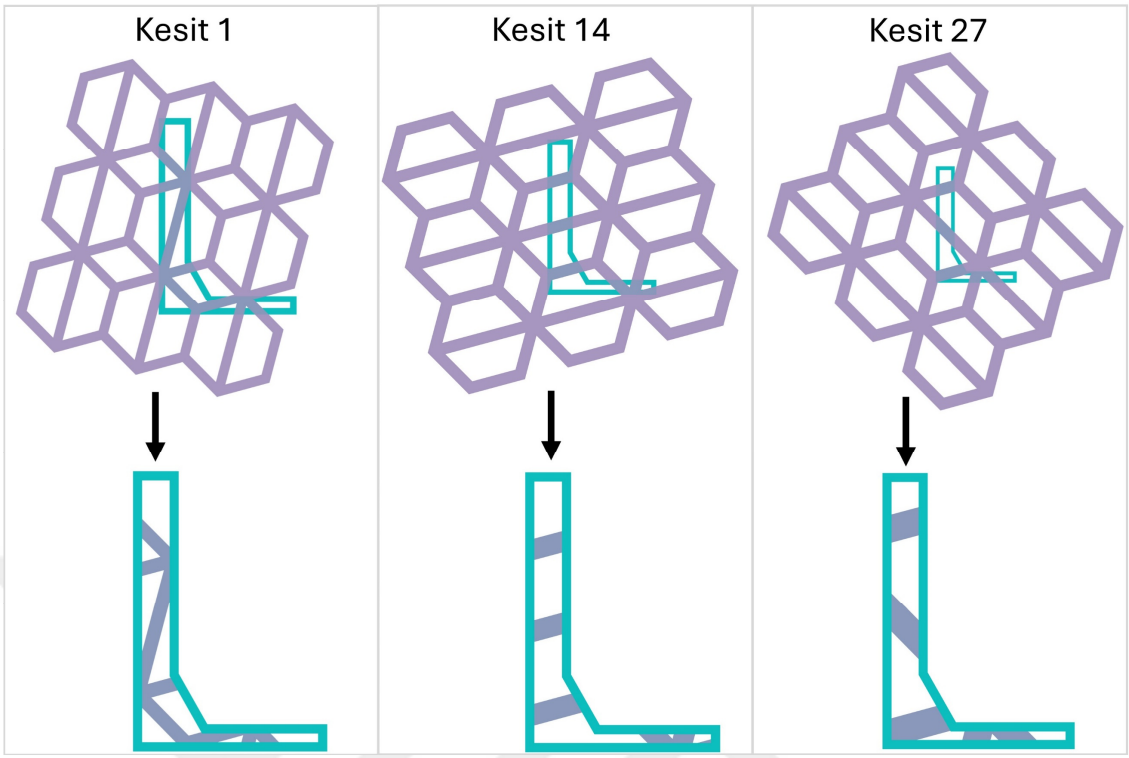
Yeni hibrit yapının batarya kutusu yan profili üzerindeki etkisini araştırmak için, aşağıdaki alt ve üst sınırlara tabi olan tasarım değişkenleri ile kafes yapılar oluşturulmuştur:

$$60 \text{ mm} \leq p1 \leq 100 \text{ mm}$$

$$6 \text{ mm} \leq p2 \leq 12 \text{ mm}$$

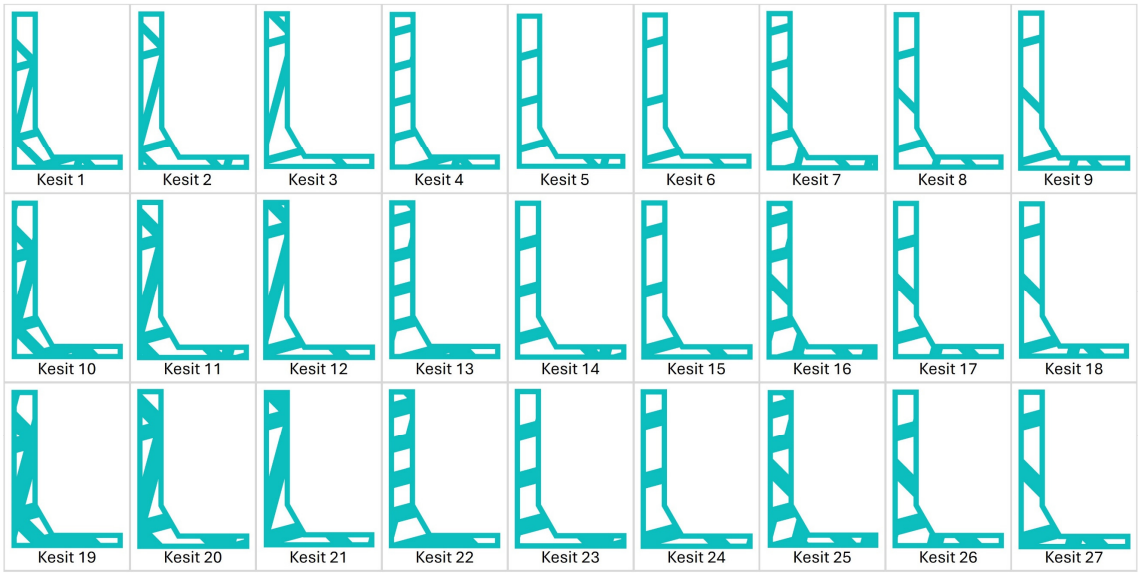
$$15° \leq p3 \leq 135°$$

Daha sonra, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, tasarım değişkenleri ile oluşturulan hibrit kafes yapılar ile mevcut modelin dış konturları birbirinden kırpılarak batarya kutusu yan profil kesitleri oluşturulmuştur. Mevcut modelin dış konturunun et kalınlığı korunmuştur. Taslak üzerinden kalınlık sağlanarak oluşturulan yapı parametre yönetiminde fayda sağlamakta ve ağ yapısı oluşturulurken orta yüzeylerin otomatik olarak belirlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.7. Üç farklı durum için model oluşturma yöntemi

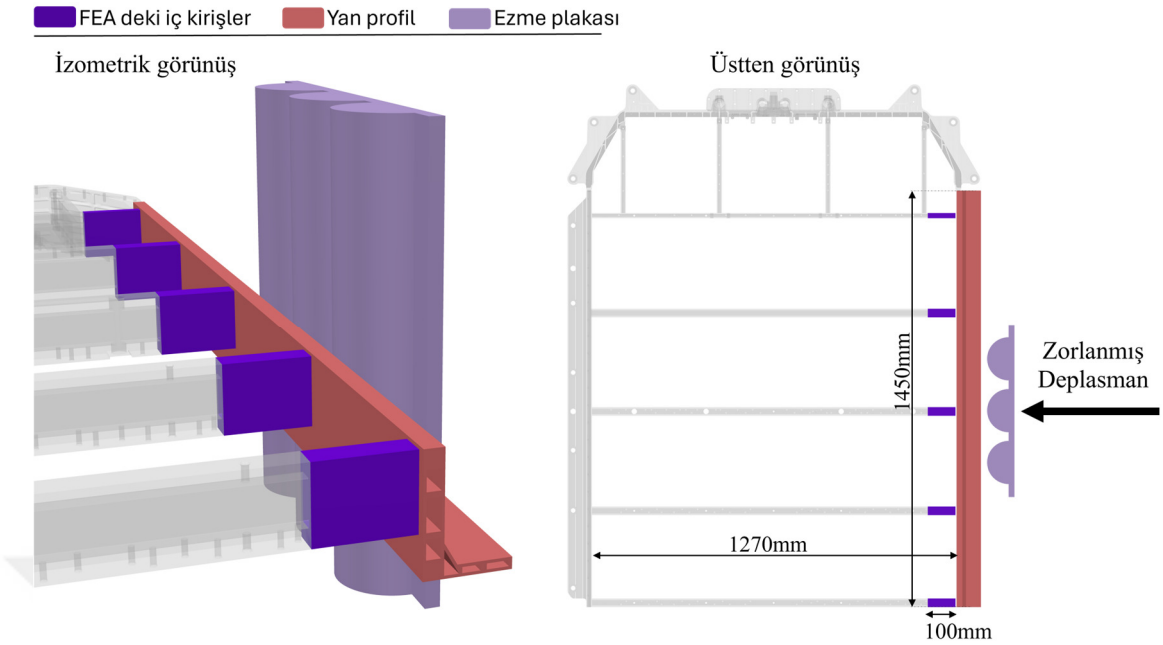
Parametrik tasarım aracı kullanılarak 3dx Catia programında toplam 27 (3^3) farklı kesit oluşturulmuş ve tüm kesitler Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Tasarım değişkenlerinin etkisini incelemek için bu 27 kesitin FEA'leri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Parametrelerle oluşturulan toplam 27 kesit

3.5. Batarya Kutusu için Sonlu Elemanlar Analiz (FEA) Modeli

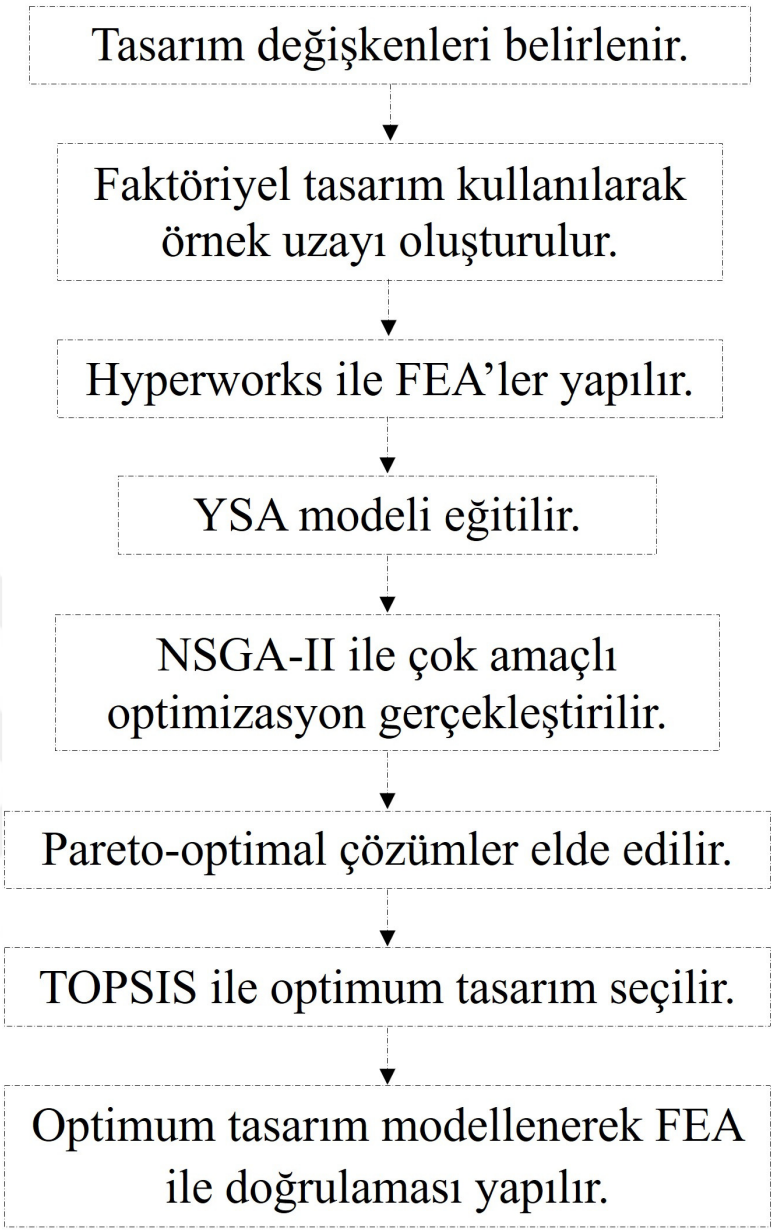
FEA'lerini gerçekleştirmek için HyperMesh-Radioss arayüzü kullanılmıştır. Amaç, batarya kutusu yan profilinin yapısal performansını araştırmaktır. Batarya kutusu görünüşleri ve FEA senaryosu Şekil 3.9'de gösterilmektedir. Yan profilleri destekleyen batarya paketinin içindeki iç kirişler 100 mm olarak modellenmiş ve 6 serbestlik derecesinde(DOF) kısıtlanarak ankastre mesnet koşulu tanımlanmıştır. İç kirişler için malzeme Al 6082-T6 olarak tanımlanmıştır. Yan profil ile iç kirişler arasındaki bağlantı Type2(spring) olarak tanımlanmıştır. Yan profil için malzeme GF800 olarak tanımlanmıştır. Kullanılan çözücü için uygun kriterde olacak şekilde ağ yapısı kontrol edilmiştir ve yan profil bölümleri 3 mm'lik iki boyutlu dörtgen(quad) elemanlarla ağ haline getirilmiştir. Hesaplama verimliliği korunurken gerilme ve şekil değiştirme hesaplamaları için optimum doğruluk sağlanmıştır. Ezilme plakası ile yan profil arasındaki bağlantı Type7 olarak tanımlanmıştır. Ezilme plakası rijit olarak modellenmiştir. FEA modeli için yük, zorlanmış deplasman olarak tanımlanmış ve yan profile sabit bir hızda uygulanmıştır. Yan profillerin maksimum hareket edebileceği, yani bataryanın deforme olmayacağı güvenlik sınırı 20 mm olarak belirlenmiş ve bu yer değiştirmedeki tepe kuvvet ve enerji emilimi karşılaştırılmıştır. Bu FEA modeli 27 kesitin tamamına uygulanmıştır.



Şekil 3.9. Batarya kutusu görünüşleri ve FEA senaryosu

3.6. Optimizasyon

Tasarım optimizasyon çalışması kapsamında, üç tasarım değişkeninin etkilerini incelemek için 27 farklı kesitin FEA'leri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen FEA sonuçları MATLAB R2022b programı aracılığıyla işlenmiş ve optimize edilmiştir. Optimizasyon akış şeması Şekil 3.10'da gösterilmiş olup aşağıdaki optimizasyon adımları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Optimizasyon akış şeması

İlk olarak, tasarım değişkenleri (p1, p2 ve p3) ve her bir parametre için alt ve üst limit değerleri tanımlanarak, tam faktöriyel deney tasarımı oluşturulmuştur. Şekil 3.11'de deney tasarımı görsellenmiştir. Deney tasarımı ile, üç tasarım değişkeninin üç seviyesinin tüm olası kombinasyonları değerlendirilmiştir. Her bir değişken için üç farklı seviye belirlenmiştir; (p1): 60mm,80mm ve 100mm, (p2): 6mm,9mm ve 12mm, (p3): 15°,75° ve 135°.

Kesit No.	Değişkenler			Kesit No.	Değişkenler			Kesit No.	Değişkenler		
	p1	p2	p3		p1	p2	p3		p1	p2	p3
Kesit 1	60	6	15	Kesit 10	60	9	15	Kesit 19	60	12	15
Kesit 2	80	6	15	Kesit 11	80	9	15	Kesit 20	80	12	15
Kesit 3	100	6	15	Kesit 12	100	9	15	Kesit 21	100	12	15
Kesit 4	60	6	75	Kesit 13	60	9	75	Kesit 22	60	12	75
Kesit 5	80	6	75	Kesit 14	80	9	75	Kesit 23	80	12	75
Kesit 6	100	6	75	Kesit 15	100	9	75	Kesit 24	100	12	75
Kesit 7	60	6	135	Kesit 16	60	9	135	Kesit 25	60	12	135
Kesit 8	80	6	135	Kesit 17	80	9	135	Kesit 26	80	12	135
Kesit 9	100	6	135	Kesit 18	100	9	135	Kesit 27	100	12	135

Şekil 3.11. Deney tasarımı

Parametrik tasarım ile 27 farklı konfigürasyon belirlenmiştir. Her bir tasarım için tepe kuvvet ve enerji emilim değerleri elde edilmiştir.

Daha sonra, yapay sinir ağları (YSA) kullanan bir modelleme yaklaşımı seçilmiştir. YSA'lar, tasarım değişkenleri ile FEA sonuçları arasındaki ilişkileri öğrenmek için eğitilmiştir. Bu şekilde, tasarım değişkenlerinin etkisi ve FEA sonuçlarının tahmini için sağlam modeller oluşturulmuştur. Giriş verileri, batarya kutusu yan profillerinin performansını tahmin etmek için kullanılmıştır. YSA, eğitim verileriyle eğitilmiş ve ardından test verileriyle doğrulanmıştır (verilerin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test için kullanılmış ve bunlar rastgele gerçekleştirilmiştir).

Eğitilen YSA modeli daha sonra çok amaçlı bir optimizasyon yöntemi ile birleştirilmiştir. Bu çalışmada, tasarım değişkenlerinin optimum kombinasyonunu bulmak için çok amaçlı bir optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon, birden fazla amaç fonksiyonunu aynı anda optimize etmeyi amaçlar. Optimal sonuç, belirtilen amaç fonksiyonlarını en iyi şekilde karşılayan tasarım değişkeni değerlerini içerir. Optimizasyonun amaç fonksiyonu, kütle kazanımını maksimize etmek ve aşırı mühendislik yapmadan mukavemeti yeterli ve güvenli bir seviyede tutmaktır. Optimizasyon, hızlı ve spesifik yaklaşımıyla bilinen popüler bir çok amaçlı optimizasyon algoritması olan baskın olmayan sıralama genetik algoritması

(NSGA-II) ile gerçekleştirilmiştir (Carakapurwa ve Santosa, 2022; Beytut ve ark., 2025). NSGA-II, çatışan hedefler arasındaki en iyi dengeyi temsil eden bir dizi Pareto-optimal çözüm bulma yeteneğine sahiptir.

Son olarak, çok amaçlı optimizasyon sonucunda ortaya çıkan Pareto ön eğrisi üzerinde en iyi sonucun belirlenmesi, tercih edilen bir karar mekanizması veya yöntemi gerektirir. Bu karar mekanizması genellikle 'çözüm seçimi' olarak adlandırılır ve tasarım probleminin gereksinimlerine, hedeflerine ve tercihlerine bağlı olarak belirlenir. Bu nedenle bu çalışmada çok yönlü karar verme problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan ideal çözüme benzerliğe göre tercih sırası tekniği (TOPSIS) yöntemi kullanılmıştır (Biharta ve ark., 2023). Bu yöntem alternatif çözümleri farklı kriterler bazında değerlendirerek en iyi çözümün belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

3.6.1. Veri Toplama ve Ön İşleme

Çalışmanın ilk aşamasında, batarya yan destek profilinin performansını değerlendirmek üzere kapsamlı bir analiz seti oluşturulmuştur. Toplamda 27 farklı tasarım konfigürasyonu analiz edilmiş ve her bir analizin sonuçları kaydedilmiştir. Bu analizler, üç tasarım değişkeninin (p1, p2 ve p3) farklı kombinasyonları için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, "Unnormalized_Data" adlı bir dosyada toplanmıştır.

3.6.2. Amaç Fonksiyonu

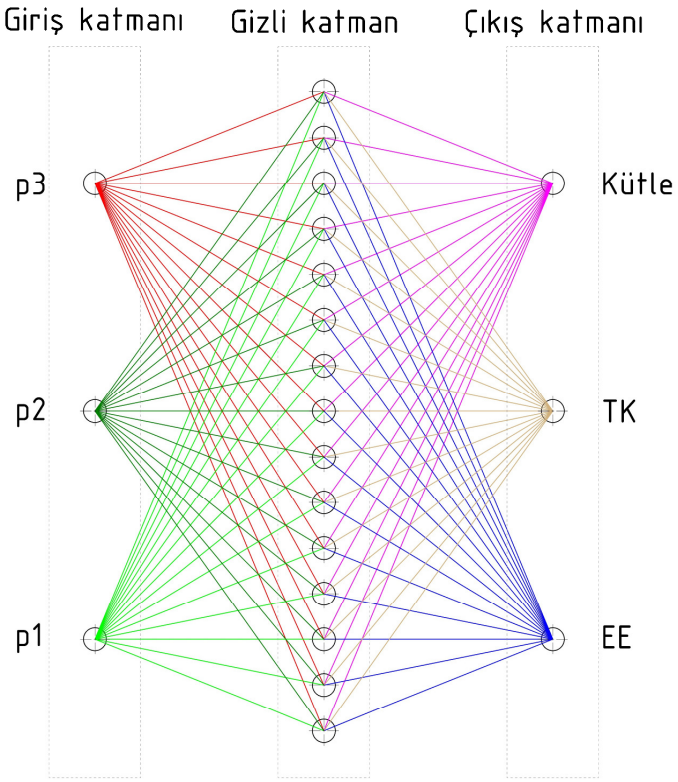
Bu çalışmada dikkate alınan optimizasyon amaçları; tepe yük minimizasyonu (amaç 1), kütle minimizasyonu (amaç 2) ve emilen enerjinin maksimizasyonu (amaç 3) olmuştur. Amaçların eşit derecede etkili olduğu düşünülmüştür; bu nedenle bu çalışmada amaçlar birleştirilmiştir ve amaç fonksiyonu optimum geometriyi elde etmek için kullanılmıştır.

$$\textit{Amaç fonksiyonu} = 0.33(\textit{amaç 1}) + 0.33(\textit{amaç 2}) + 0.33(\textit{amaç 3}) \qquad (1)$$

3.6.3. YSA ile Modelleme

YSA'lar, giriş parametreleri (p1, p2, p3) ve çıkış parametreleri (kütle, tepe kuvveti (TK) ve emilen enerji (EE)) arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenmek için tasarlanmıştır.

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi, YSA modelinin mimarisi giriş katmanında 3 nöron, gizli katmanda 15 nöron ve çıkış katmanında 3 nörondan oluşmaktadır. Ağın eğitimi için Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılmıştır (More, 1978).



Şekil 3.12. YSA modeli

3.6.4. NSGA-II

YSA modelleri eğitildikten sonra, optimizasyon süreci çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. MOGA, birden fazla hedefi aynı anda optimize etmek için kullanılan evrimsel bir algoritmadır (Deb ve ark., 2002). Bu

çalışmada NSGA-II, YSA modellerinin tahminlerini kullanarak optimum tasarım değişkenlerini belirlemeyi amaçlamıştır ve NSGA-II'nin uygulanmasında popülasyon büyüklüğü 100'dür. Algoritma üç hedefi aynı anda optimize etmeyi amaçlamaktadır. NSGA-II'nin uygunluk fonksiyonu 50 adet YSA modelinin tahminlerinin ortalaması üzerinden hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, tek bir YSA modeline güvenmek yerine birçok modelin toplu tahminini kullanarak daha güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır. Optimizasyon sürecinin sonunda bir dizi Pareto-optimal çözüm elde edilmiştir. Bu çözümler birbirleriyle ödünleşme ilişkisi içinde olup optimum tasarım uzayının kavranmasını sağlamakta ve istenen performans kriterleri temelinde en uygun girdi parametreleri kombinasyonunun seçilmesine destek olmaktadır.

NSGA-II 'nın uygulanmasında aşağıdaki parametreler kullanılmıştır, değerler deneme yanılma yöntemiyle, belirlenmiştir.

- Popülasyon boyutu: 100
- Maksimum nesil sayısı: 200
- Maksimum durağan nesil sayısı: 250
- Çaprazlama oranı: 0.8
- Mutasyon oranı: 0.01

3.6.5. TOPSIS

NSGA-II tarafından üretilen Pareto-optimal çözümler arasından en dengeli çözümü seçmek için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS, çok kriterli karar verme problemlerinde kullanılan ve alternatifleri ideal çözüme benzerliklerine göre sıralayan bir tekniktir (Wang ve Yoon, 1981). Bu sürecin sonunda Pareto-optimal çözümler arasında en iyi dengeyi sağlayan çözüm belirlenir.

TOPSIS uygulaması şu adımları içermiştir:

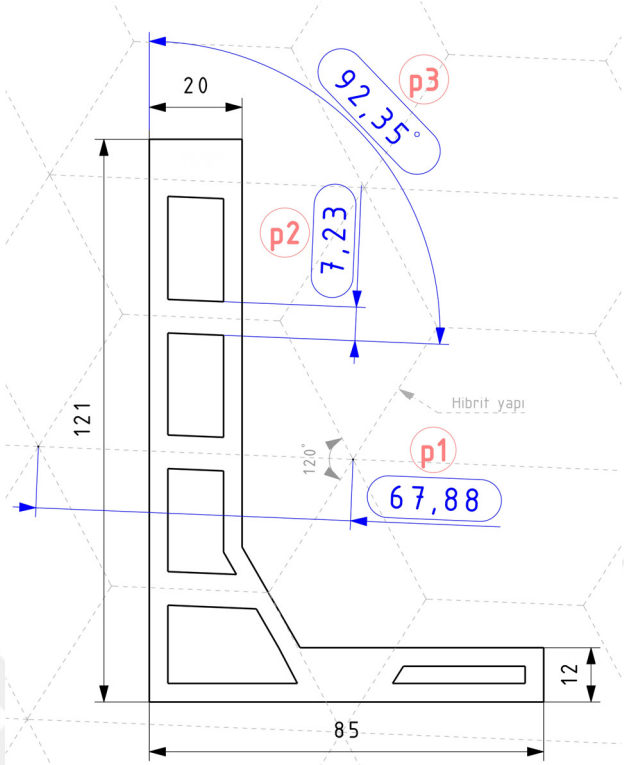
1. Karar matrisinin oluşturulması: Her bir Pareto-optimal çözümün üç hedef fonksiyonu için aldığı değerler bir matrise yerleştirilmiştir.

2. Normalizasyon: Karar matrisi, vektör normalizasyonu yöntemiyle normalize edilmiştir.
3. Ağırlıklandırma: Normalize edilmiş matris, belirlenen kriter ağırlıklarıyla çarpılmıştır. Bu çalışmada, tüm kriterlere eşit ağırlık verilmiştir.
4. İdeal ve negatif-ideal çözümlerin belirlenmesi: Her bir kriter için en iyi ve en kötü değerler belirlenmiştir.
5. Alternatiflerin ideal çözümlere olan uzaklıklarının hesaplanması: Öklid uzaklığı kullanılarak her alternatifin ideal ve negatif-ideal çözümlere olan uzaklıkları hesaplanmıştır.
6. Göreceli yakınlık katsayılarının hesaplanması: Her alternatif için bir göreceli yakınlık katsayısı hesaplanmıştır.
7. Alternatiflerin sıralanması: Alternatifler, göreceli yakınlık katsayılarına göre sıralanmıştır.

Bu süreç sonunda, Pareto-optimal çözümler arasından en iyi dengeyi sağlayan çözüm belirlenmiştir.

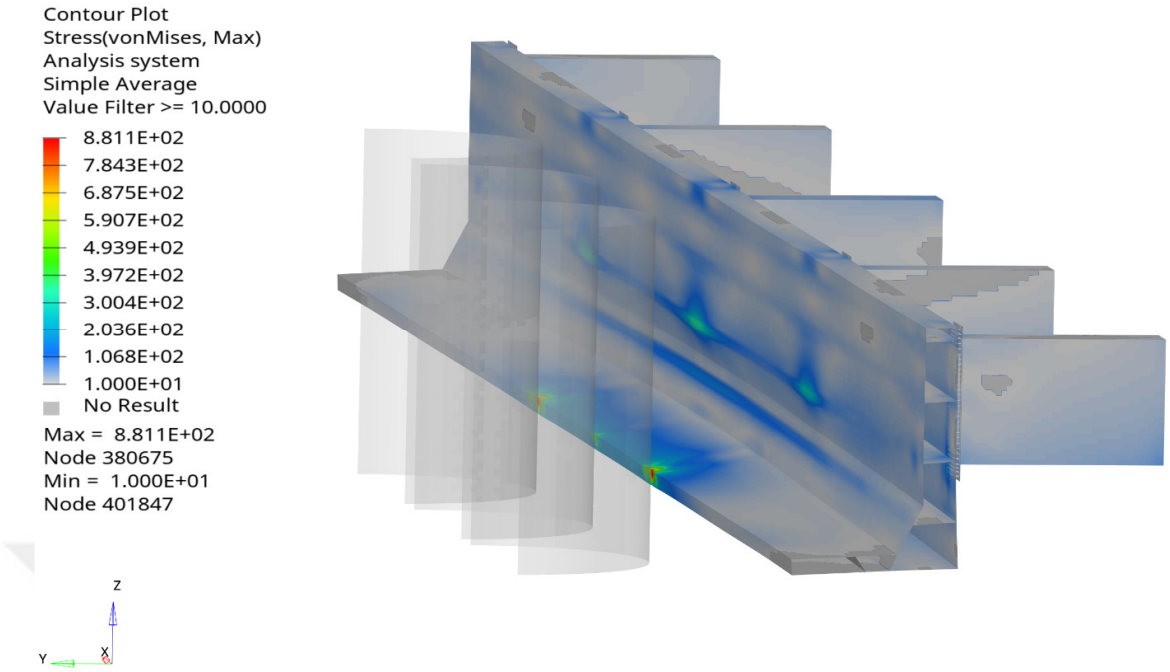
3.7. Optimum Parametrelerle Modelin Nihai Tasarımı ve Doğrulanması

Optimize edilmiş kesit Şekil 3.13'te gösterilmektedir ve tüm boyutlar mm cinsindendir. 3dx Catia programında 32. numaralı iterasyondaki parametreler ile tasarlanmıştır.



Şekil 3.13. 32. iterasyona göre tasarlanan optimum kesit

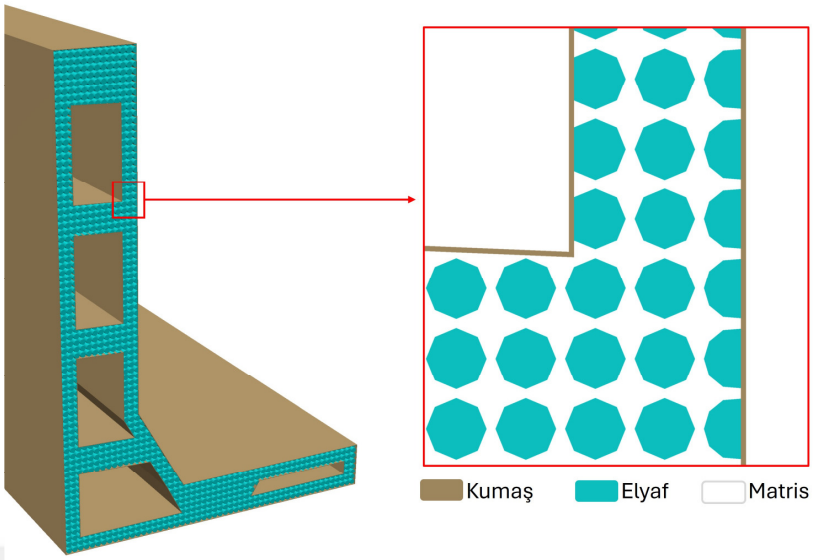
Optimize edilen kesit, Şekil 3.14'de gösterildiği gibi doğrulama için yeniden analiz edilmiştir. Ayrıntılı bir karşılaştırma, bulgular bölümünde sunulmuştur.



Şekil 3.14. Optimum kesitin FEA'i

3.8. Matris-Elyaf Oranının Şematik Gösterimi

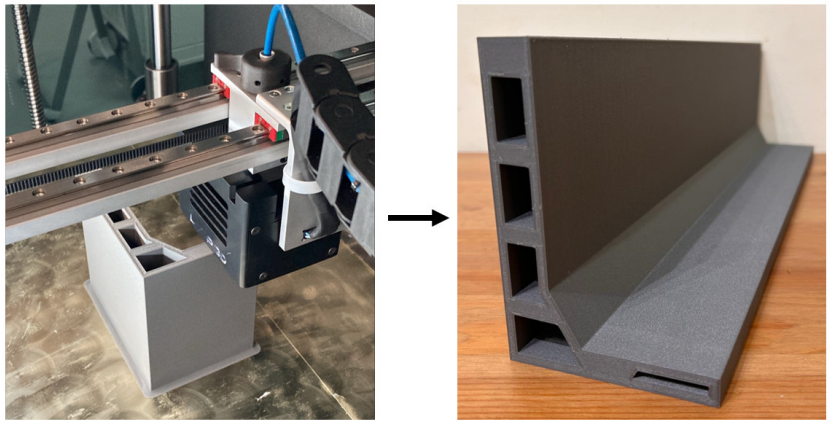
Optimize edilmiş kesit, 1,368 mm kalınlığında E-cam elyaf (9600Tex), 1160 kg/m3 yoğunluğunda epoksi reçine ve matris ile elyaf yapısını çevreleyen 0,117 mm kalınlığında kumaş olmak üzere üç farklı malzemenin birleşiminden oluşmaktadır. Matris-elyaf oranının şematik gösterimi Şekil 3.15'te verilmiş olup tamamen şematik gösterim içindir, pultürizyon prosesinde cam elyaf tamamen emprenye olduğu için fiziksel parçalardan kesit alındığında bu gösterimi görmek söz konusu değildir. Modeldeki elyaf oranı %60,5 ve matris oranı ise %39,5'tir.



Şekil 3.15. Matris-Elyaf Oranının Şematik Gösterimi

3.9. Optimum kesitin prototip olarak üretilmesi

Doğrulaması yapılan tasarım hızlı prototipleme yöntemlerinin en yeni teknolojilerinden olan ve aynı zamanda cam elyaf malzeme baskısı da yapabilen FFF prosesi ile 450mm uzunluğunda bastırılmıştır. Şekil 3.16'da baskı prosesi ve optimum kesite ait numune gösterilmiştir. Prototip koşullarındaki baskı malzemesinin dayanım özellikleri GF800'e kıyasla 10 kat daha zayıftır ve üretim prosesi de pultrüzyonu temsil etmemektedir. Bu yüzden baskı sadece optimum kesit geometrisini fiziksel olarak incelemek içindir.



Şekil 3.16. Optimum kesitin FFF prosesi ile baskısı

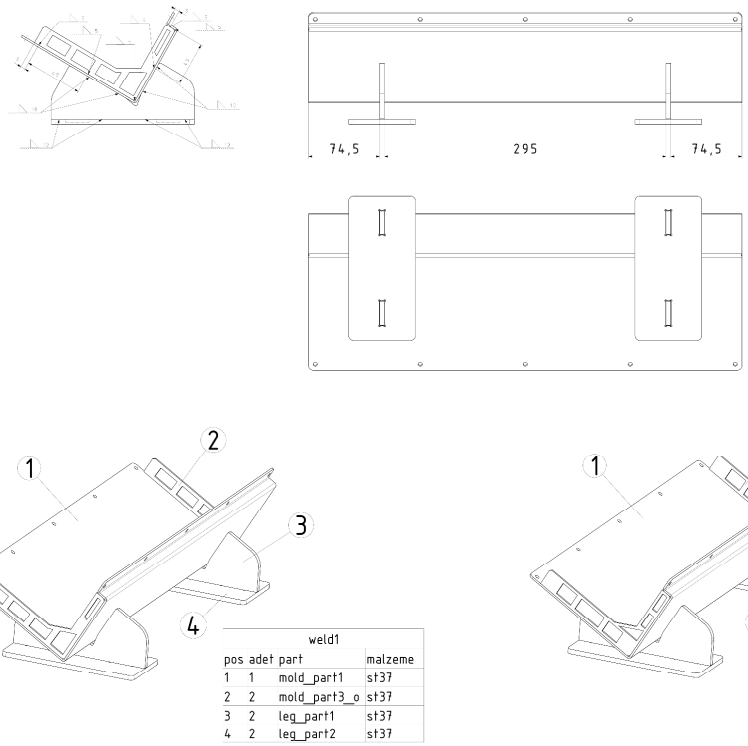
3.10. Deneysel çalışmalar

Optimizasyon sonucu elde edilen optimum kesitin, mevcut kesit ile karşılaştırıldığında nümerik olarak elde edilen performansdaki iyileştirmeleri, deneyselde de doğrulamak adına her iki kesite de ait numune parçaları pultrüzyon kalıbı yatırımı yapmadan üretmek için derinlemesine araştırmalar ve fizibilite çalışmaları yapılmıştır.

Bu araştırmalar sonucunda; proses olarak, maliyetli ekipman gerektirmeyen ve düşük adetli üretime imkan sağlayan elle serme yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

3.10.1. Sac metal kalıplarının tasarımı ve üretilmesi

3dx Catia tasarım programı kullanılarak optimum kesit ve mevcut kesitin sac metal üretim prosesine uygun kalıp tasarımları gerçekleştirilmiştir. Sac metal üretim prosesini seçmemizin nedeni, yaptığımız fiyat/performans araştırmasına istinaden dolu malzemeden CNC işleme, tel erezyon kesim yada 3D yazıcıdan parça bastırarak kalıp oluşturma gibi yöntemlere nazaran en uygun maliyetli ve termin olarak da en kısa parça temin edebildiğimiz üretim prosesi olmasındandır. Şekil 3.17'de kalıpların kaynak teknik resimleri, Şekil 3.18'de ise lazer kesim ve büküm sac parçaların imalat teknik resimleri verilmiştir.



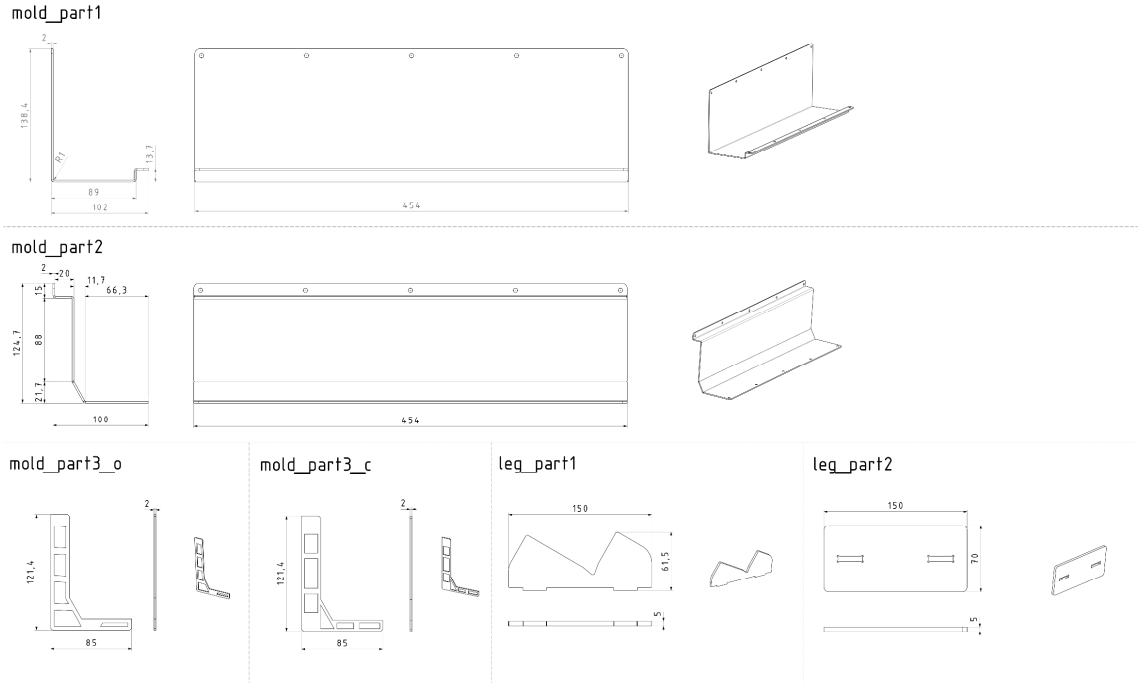
weld1

pos	adet	part	malzeme
1	1	mold_part1	st37
2	2	mold_part3_o	st37
3	2	leg_part1	st37
4	2	leg_part2	st37

weld2

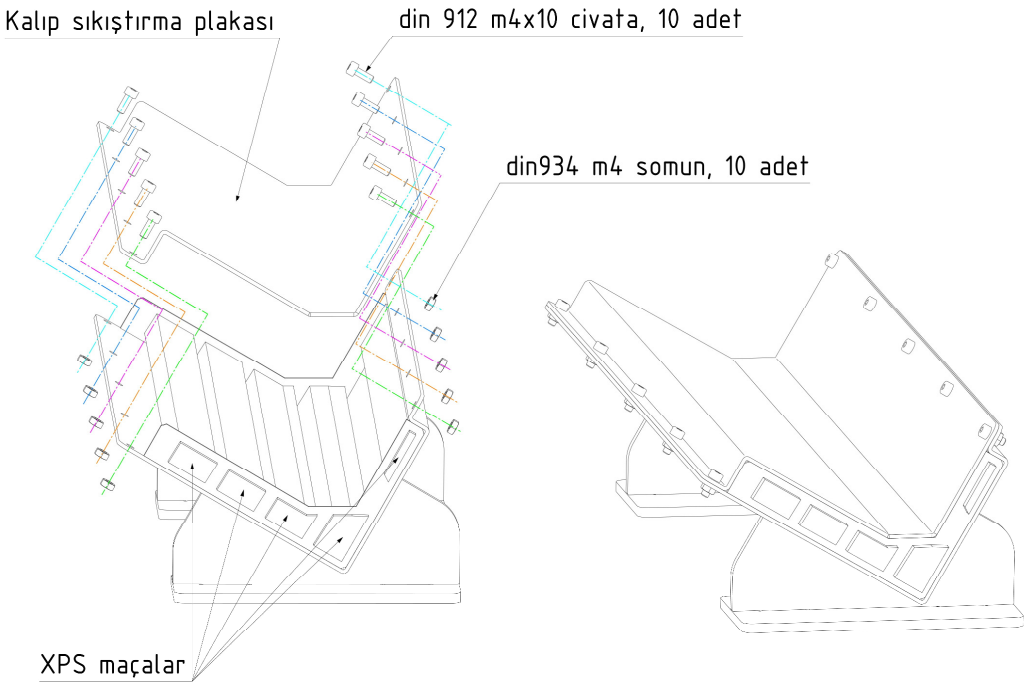
pos	adet	part	malzeme
1	1	mold_part1	st37
5	2	mold_part3_c	st37
3	2	leg_part1	st37
4	2	leg_part2	st37

Şekil 3.17. Elle serme yöntemi için tasarlanan kalıpların kaynak resmi



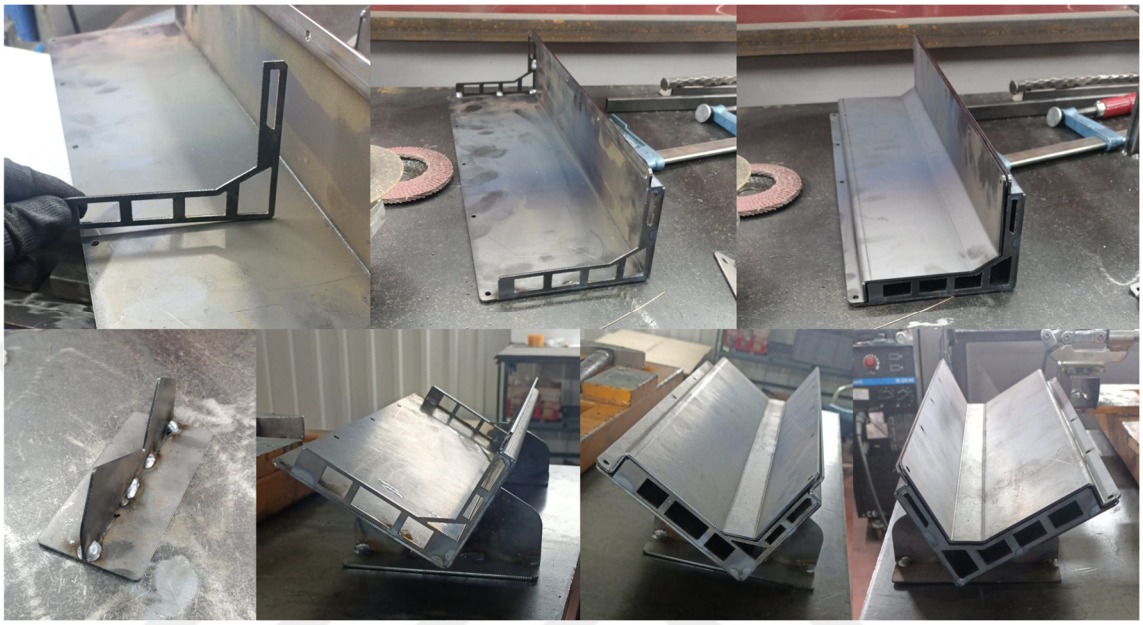
Şekil 3.18. Lazer kesim ve büküm sac parçaların imalat teknik resimleri

Kalıp tasarımı yapılırken kesitlerdeki boşaltmalar için maça olarak ekstrüde edilmiş polistiren köpük(XPS) malzemesi seçilmiştir. İlk başta maçalar, metal CNC işlemli yada 3D yazıcıdan PLA malzeme ile üretilecek şekilde düşünülmüştür fakat kompozit üreticileri ile görüşüldükten sonra bu malzemelerin elle serme yöntemi için uygulanabilir olmadığı bilgisine ulaşılmıştır. Kalıp iki ana yapıdan oluşmaktadır. Birincisi kaynaklı iskelet yapı, bu yapı elle serimin gerçekleştiği kısımdır. Diğeri ise serim gerçekleştikten sonra kalıpı kapatmak ve fazla reçinenin dışarıya akması ve serimi sıkıştırmak için kullanılan kalıp üst sıkıştırma plakasıdır. Plaka kapatıldıktan sonra M4 civata ve somun ile sıkılarak serilen malzeme kürlenmeye bırakılmaktadır. Şekil 3.19'da optimum kesite ait kalıbın montaj teknik resmi verilmiştir. Optimum kesit ve mevcut kesitin kalıpları arasındaki fark, kaynaklı yapılarda bulunan yan saclar ve maçaların tasarımıdır, bunların haricindeki tüm parçalar her iki kalıpta da ortaktır.



Şekil 3.19. Optimum kesite ait kalıbın montaj teknik resmi

İlk olarak lazer kesim ve büküm parçalar st37 malzemeden üretilip teknik resme uygun şekilde kaynakları yapılarak mevcut ve optimum kesit için elle serim kalıpları hazırlanmıştır. Şekil 3.20'de kaynak prosesinden görsellere yer verilmiştir.



Şekil 3.20. Kaynak prosesi işlem aşamaları

3.10.2. Maçaların üretilmesi

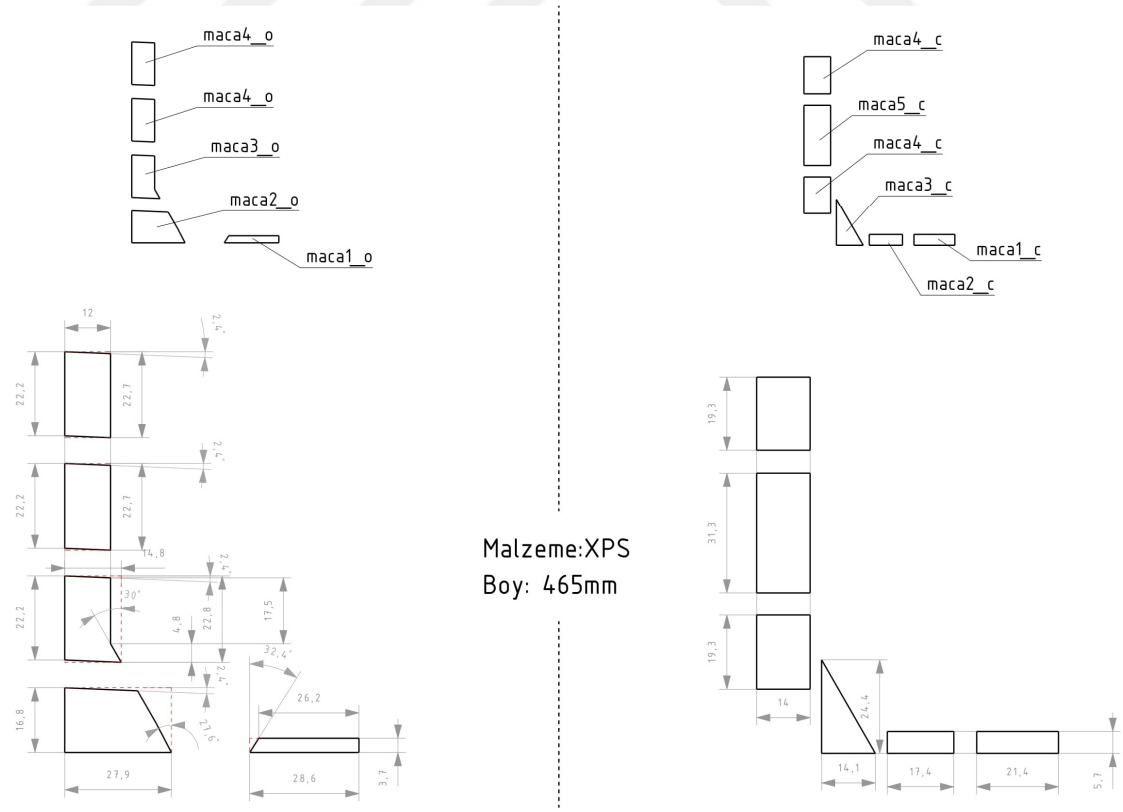
Kesitlerdeki boşaltmalar için maça olarak XPS malzemesi seçilmiştir. XPS, 0,033 g/cm³ gibi çok düşük bir yoğunluğa sahip, düşük maliyetli bir sert köpüktür. Genel model yapımı ve el sanatları uygulamalarının yanı sıra hafif yapılar için yapısal çekirdek ve çözünebilir kalıp veya maça olarak kullanılabilmektedir.

XPS, sıcak tel kesime uygun tek köpük türlerinden biridir ve ayrıca, elle veya CNC ile hızlı ve hassas bir şekilde kesilebilir. Aseton ve stiren gibi çözücülerle çözülebilir, bu da polistiren köpüğün tek kullanımlık maça olarak kullanılmasına veya laminasyonlu hale getirilip çözülerek çıkarılmasına ve içi boş bir yapı oluşturulmasına olanak tanır. XPS' e ait mekanik özellikler Çizelge 3.5' te verilmiştir.

Çizelge 3.5. XPS malzemesinin mekanik özellikleri (Plastock, t.y.)

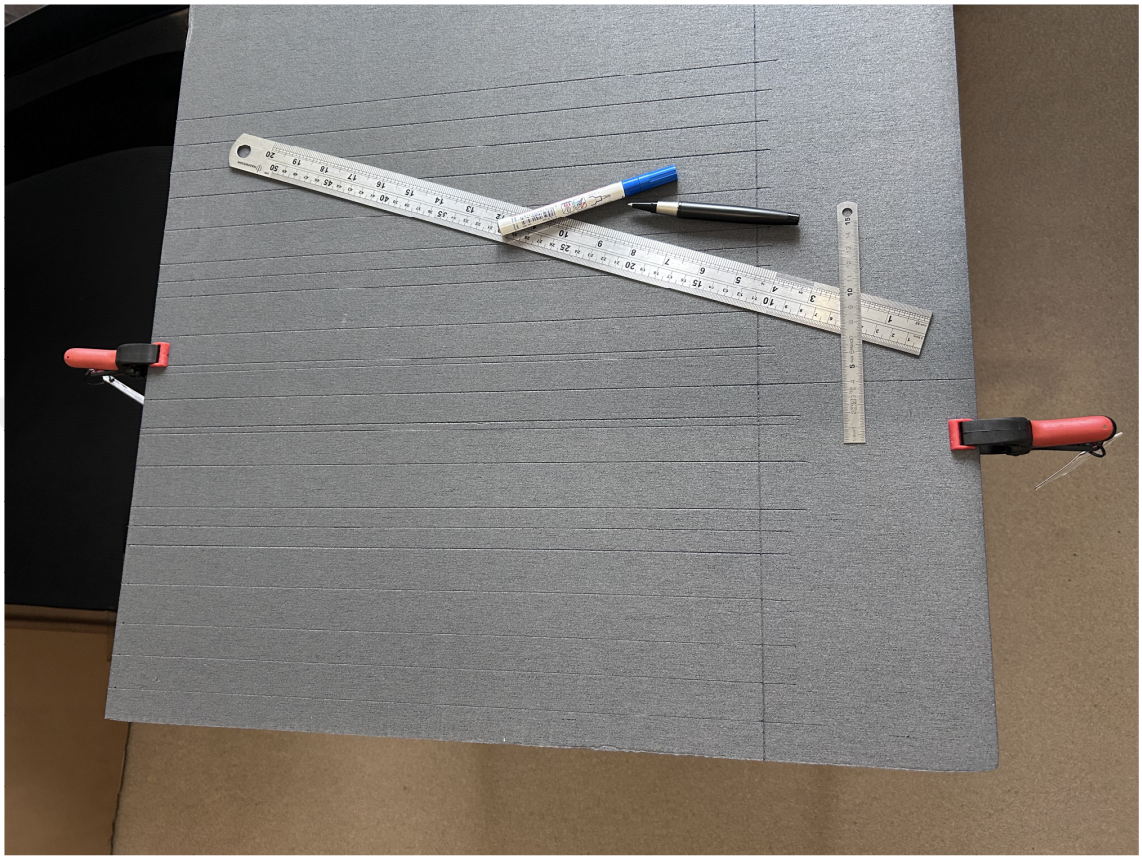
Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	0,033	g/cm³
Su Emme Oranı	1,5	%
Çekme Mukavemeti	0,6	MPa
Basınç Mukavemeti	0,3	MPa
Kesme Mukavemeti	250	kPa
Elastik Modül	20	MPa
Çekme Modülü	22	MPa
Kesme Modülü	8	MPa
Isıl İletkenlik	0,033	W/(m·K)
Lineer Genleşme Katsayısı	0,07	10^{-6}/K
Uzun Süreli Servis Sıcaklığı (Maks.)	75	°C
Uzun Süreli Servis Sıcaklığı (Min.)	-50	°C

XPS malzemeden maçalar, optimum ve mevcut kesit için sıcak tel kesim yöntemiyle üretilmiştir. İlk olarak Şekil 3.21'deki maça ölçüleri belirlenmiştir ve kalıp payları da dahil edilerek teknik çizimleri oluşturulmuştur.



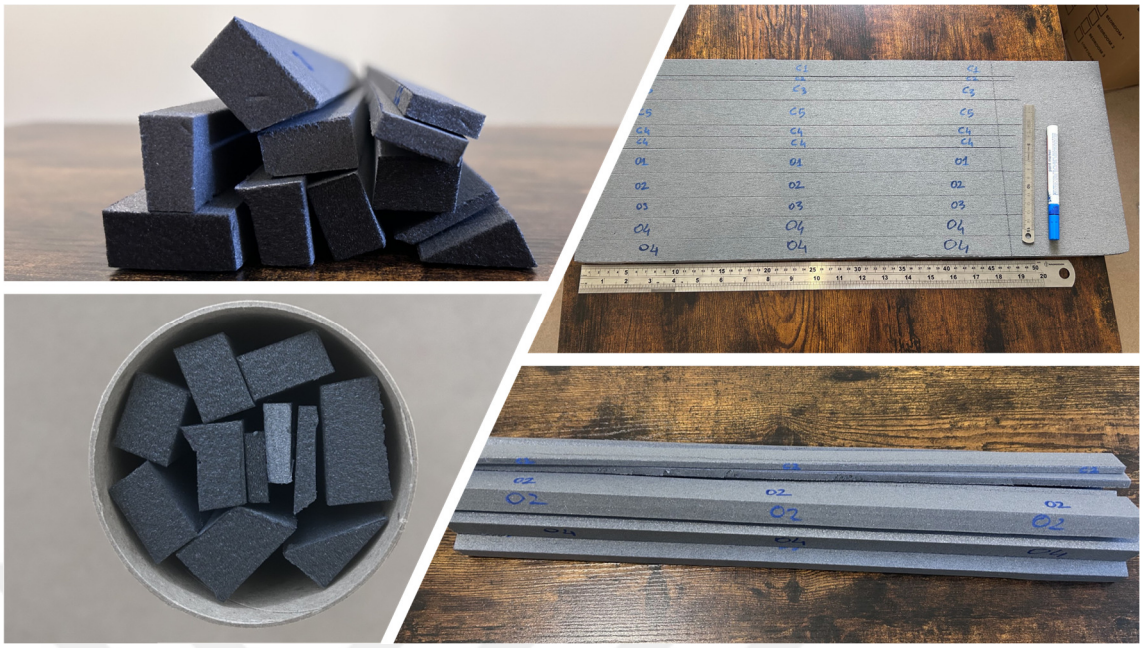
Şekil 3.21. Maçaların teknik resimleri

Daha sonra 20 mm sabit kalınlıklı XPS tabaka üzerine dış kontür kesim hatları Şekil 3.22'deki gibi çizilmiştir.



Şekil 3.22. XPS plaka üzerine dış kontür hatlarının çizilmesi

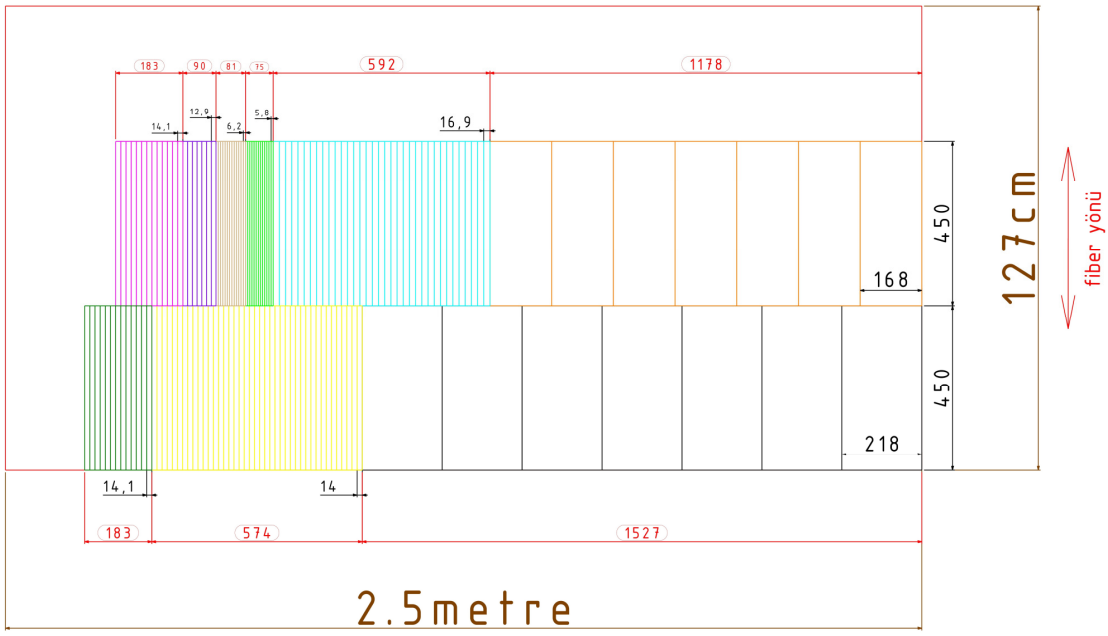
Kesim hatları belirlendikten sonra teknik resimdeki ölçülere istinaden sıcak tel kesme makinesi ile toplamda her bir set için 11 adet maça, 5 tanesi optimum kesite diğer 6 tanesi de mevcut kesite ait olmak üzere Şekil 3.23'teki gibi üretilmiştir. Tüm testlerdeki numuneler için min. 3 set maça gerekmektedir.



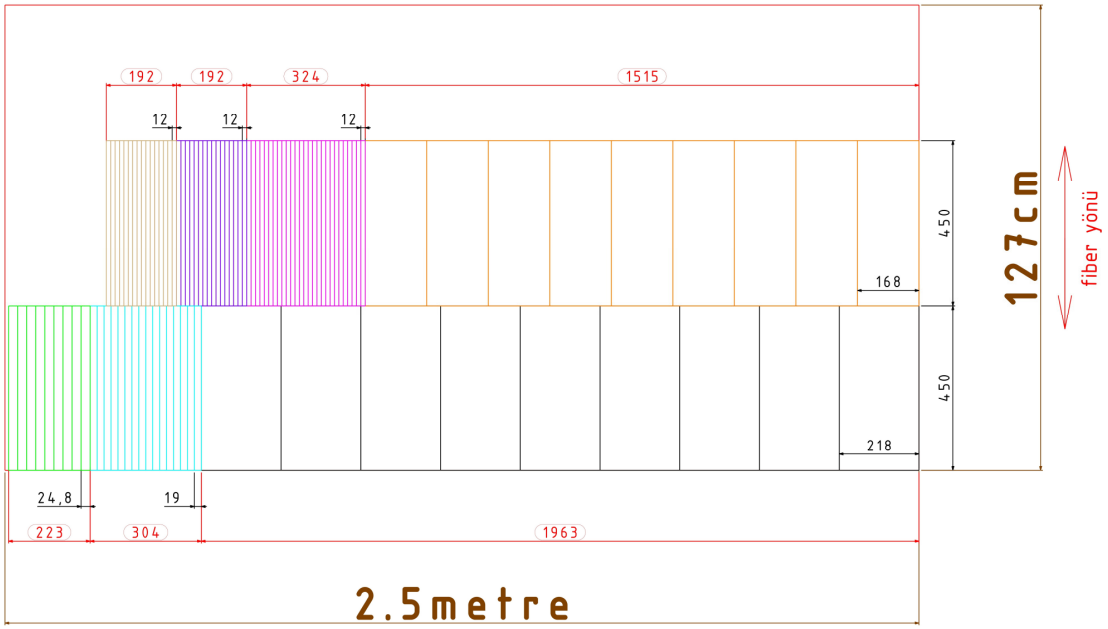
Şekil 3.23. Maçaların üretimi

3.10.3. Cam elyaf kumaşların hazırlanması

Kumaş seçiminde, elle serim ve epoksi reçine uygulamalarına uygun 9600Tex E-camı elyaftan üretilen tek yönlü(UD) 300 g/m² alan ağırlığına sahip ve ortalama 0,5mm kalınlıklı 2.5 g/cm³ yoğunluklu cam elyaf kumaş seçilmiştir. CAD ortamında serim seviyelerinin açınımları hesaplanarak, ilgili serime ait kesitlerdeki et kalınlığının kumaş kalınlığına bölünmesiyle beraber serime uygulanacak adetlerde belirlenerek Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'teki layout çizimleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.24. Mevcut kesite ait layout resmi



Şekil 3.25. Optimum kesite ait layout resmi

Serime karşılık gelen adetler, layout çizimlerine istinaden maskeleme bandı uygulanarak kumaş yüzeyine işaretlenmiş ve daha sonra özel elyaf makası kullanılarak

UD cam elyaf kumaşdan fiber yönü dikkate alınarak kesilmiş ve serime hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.26'da elyaf kumaşın kesim aşamaları görsellenmiştir.



Şekil 3.26. Elyaf kumaşın kesim aşamaları

3.10.4. Epoksinin hazırlanması

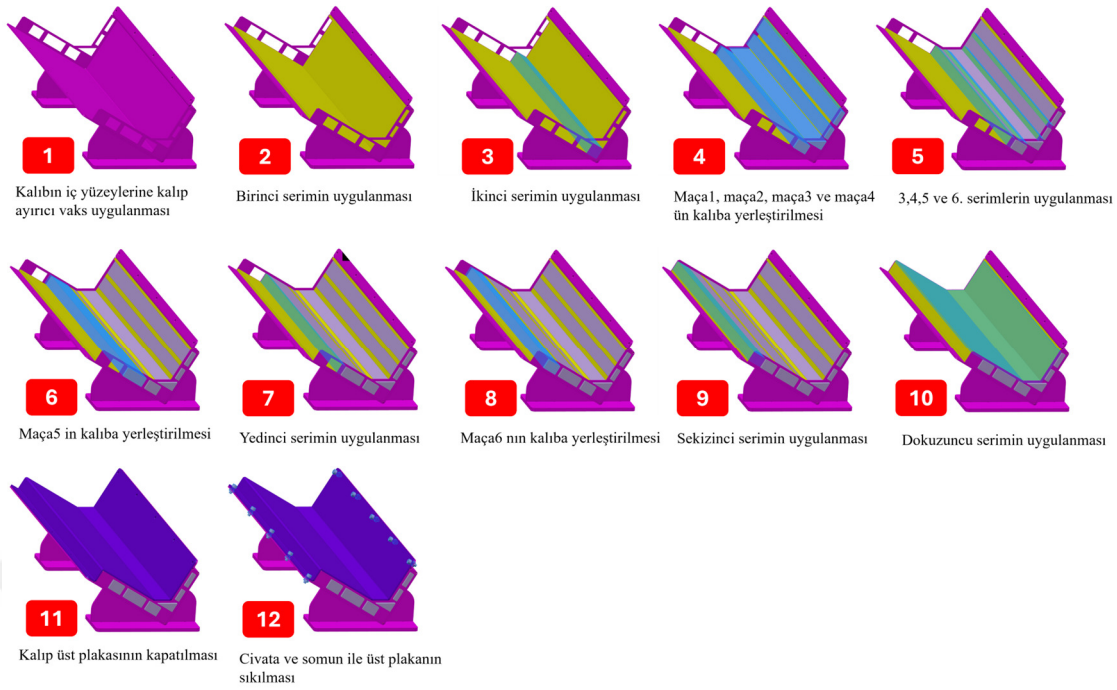
Elle serme uygulamamız için LR635 / LH637 epoksi seti seçilmiştir. Reçine setinin teknik data dökümanına istinaden LR635 laminasyonun ve LH637 sertleştiricinin 100/28 ağırlık oranında birleştirilerek 1,16 g/cm³ yoğunluklu epoksi reçinesinin elde edilmesi sağlanmıştır. Oda sıcaklığında yaklaşık olarak 24°C de çalışılmıştır. 650cc lik karıştırma kaplarına 200g laminasyon ve 56g sertleştirici alınarak tahta karıştırma çubuklarıyla 2 dk boyunca homojen olacak şekilde karıştırılarak kullanım sağlanmıştır. Kullanılan epoksi setinin ilk kürlenme süresi 36 saattir, yaklaşık olarak da 5 saat kadar jelleşme yani çalışma süresinin olması rahat çalışma zamanı sağlamaktadır. Çizelge 3.6' da epoksi karışımına ait mekanik özellikler listelenmiştir.

Çizelge 3.6. Epoksi karışımının mekanik özellikleri (Hexion Inc.,2020)

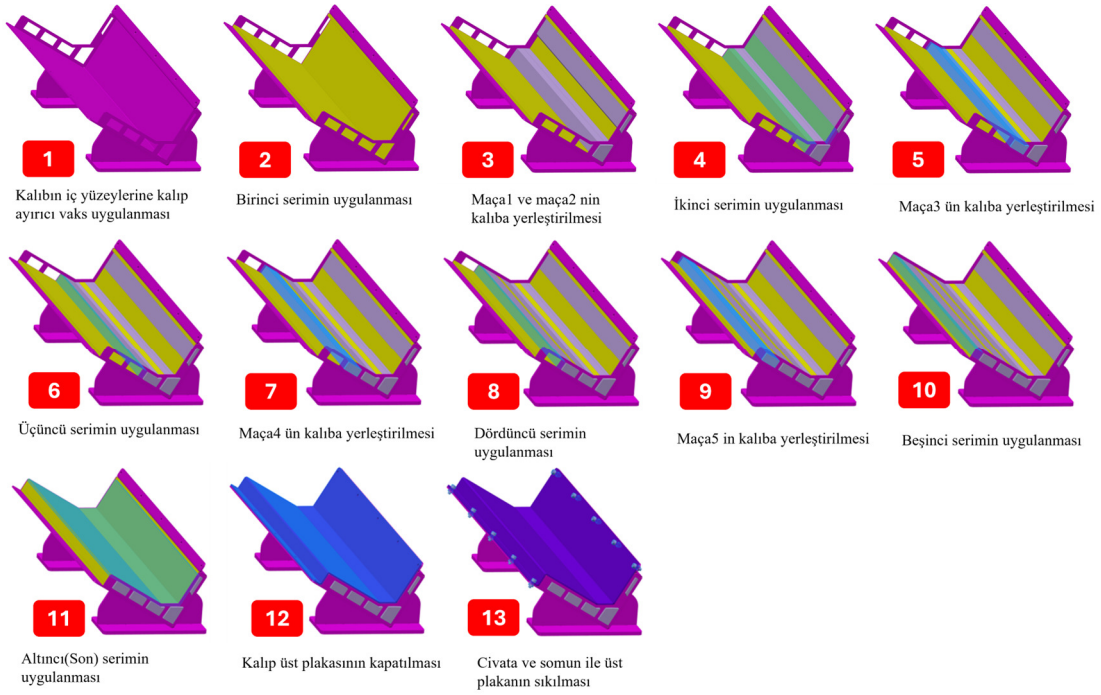
Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	1,16	g/cm³
Kopma uzaması DIN EN ISO 527-2	8	%
Çekme Modülü DIN EN ISO 527-2	3,3	GPa
Çekme Mukavemeti DIN EN ISO 527-2	80	MPa
Eğilme Modülü DIN EN ISO 178	3,3	GPa
Eğilme Mukavemeti DIN EN ISO 178	115	MPa

3.10.5. Elle serme işlemi

Elle serme için gerekli olan kalıplar, maçalar, elyaf ve reçine hazırlığı yapıldıktan sonra işlem için gerekli olan karıştırma kapı, karıştırma çubuğu, fırça, fazla reçineyi elyaftan alabilmek için baskı rulosu, kalıp ayırıcı vaks ve kalıbı kapattıktan sonra gerekli olacak olan sızdırmazlığı önleyici model macun gibi ekipmanlarda hazır tutulmuştur. Ayrıca işlemde pratiklik sağlamak ve elyaflara yeterince reçine emdirildiğinden emin olmak adına en büyük elyaf serim parçamızın da rahat daldırılabileceği şekilde alüminyum levhadan 58,5cm x 34,5cm ölçülerinde bir daldırma tepsisi üretilmiştir. Elle serme işlemi meşakatli ve reçine kimyasalının sıcaklığına da bağlı olarak yanlış tepkimeye girmesi olasılığı yada kimyasalın içindeki sertleştiricinin belirlenen jelleşme süresinden önce donması gibi problemler oluşabileceği için zamanı verimli kullanmak, hızlı ve emin adımlarla ilerleyebilmek adına, elle serme proses adımları hem mevcut hemde optimum kesit için sanal ortamda hazırlanmıştır. Şekil 3.27'de mevcut kesite ait, Şekil 3.28'de ise optimum kesite ait proses adımları görsellenmiştir.



Şekil 3.27. Mevcut kesite ait elle serme proses adımları



Şekil 3.28. Optimum kesite ait elle serme proses adımları

Her iki kesitinde 450mm lik numunelerde ortalama hacimleri, aradaki fark %5`i geçmeyecek şekilde yaklaşık olarak 900 cm³ gelmektedir. Numunelerde elyaf/reçine oranları 60/40 `a denk gelecek şekilde ayarlanmıştır. Bu hesaplamaya göre her bir

numunede yaklaşık olarak 540 cm³ hacmine denk gelen 1400g ağırlığında cam elyaf kumaş ve 360 cm³ hacmine denk 400g ağırlığında epoksi reçine kullanılmıştır ve toplamda üretilen 6 adet numunede de bu oranlar sağlanmıştır.

Epoksi karışımını hazırlamadan önce serimin gerçekleşeceği yani kompozitin temas edeceği kalıbın tüm iç yüzeylerine ve kalıp sıkıştırma plakasının iç yüzeylerine kalıp ayırıcı vaks uygulanmıştır. Şekil 3.29'da kalıp ayırıcı vaks uygulamasına ait adım görsellenmiştir.



Şekil 3.29. Kalıp ayırıcı vaks uygulaması

Kalıp ayırıcı vaks uygulamasında sonra laminasyon ve sertleştirici 100/28 ağırlık oranında ölçüm ve karıştırma kabına alınarak iyice homojen hale getirildikten sonra daldırma tepsisine dökülmüştür. Şekil 3.30'da epoksi karışımının hazırlanışı görsellenmiştir.



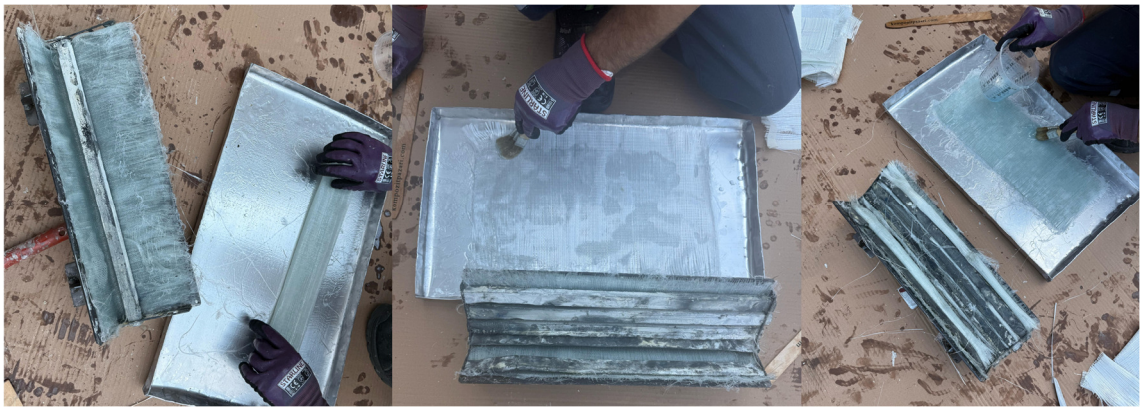
Şekil 3.30. Epoksinin oluşturulması

Tepsiye alınan layout elyaf parçalarının fırça yardımıyla reçine emdirme işlemleri gerçekleştirilmiştir ve bu adımlar ilgili serim sayısına geldikçe de tekrarlanmıştır. Şekil 3.31'de reçine emdirme işlemi görsellenmiştir.



Şekil 3.31. Reçine emdirme işlemi

Kalıbın tabanından başlanarak bir kat elyaf ve bir kat reçine karışımı sürülerek ilgili maça kısmına gelindiğinde maçalar kalıba yerleştirilmiştir. Bu adımlar son serim gerçekleşene kadar tüm numunelerde aynı şekilde uygulanmıştır. Şekil 3.32'de elle serme sürecine ait işlemler görsellenmiştir.



Şekil 3.32. Elle serme süreci

Serim işlemi tamamlandığında kalıbın üst sıkıştırma plakası M4 civata ve somun ile kapatılarak bir süre bu sıkıştırma ile beraber fazla reçinenin dışarıya akması gözlemlenmiştir. Reçine akması durduğunda veya akma hızı aşırı yavaşladığında

kalıbın ilgili yan yüzeylerine ve maçaların dış kenarlarına modelleme macunu uygulanarak sızdırmazlık sağlanmıştır ve bu şekilde 36 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Şekil 3.33'te bu sürece ait işlemler görsellenmiştir.



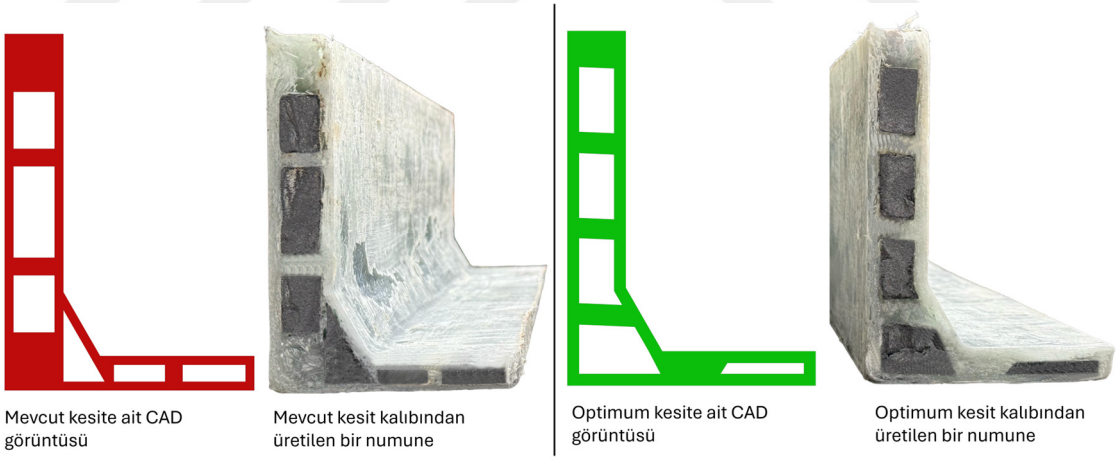
Şekil 3.33. Kalıpların kapatılması ve kürlenmeye bırakılması

Numune üretimlerini yaparken mevcut kesit ve optimum kesitlere ait birer kalıp olduğu için 36 saatlik kürlenme süresinden dolayı 2 gün ara ile numune üretimleri yapılmış ve 3 adet mevcut kesit ve 3 adet de optimum kesit olmak üzere toplamda 6 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

Kürlenme süresi bitiminde kalıplar demonte edilerek kompozit profiller kalıptan çıkarılmış ve zımparalanarak çapakları alınmıştır. Şekil 3.34'te numunelerin kalıptan çıkarılma işlemleri görsellenmiştir. Şekil 3.35'te ise her iki kesite ait CAD ve birer fiziksel numune karşılaştırma görüntülerine yer verilmiştir. Her bir numunenin ölçüm kontrolleri yapılarak teste uygunlukları doğrulanmıştır.



Şekil 3.34. Numunelerin kalıptan çıkarılması

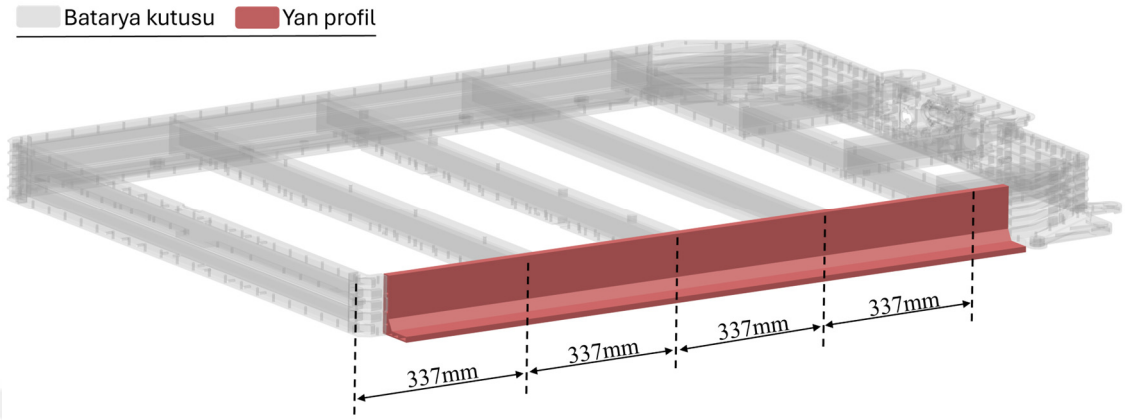


Şekil 3.35. Mevcut ve optimum kesitlere ait CAD ve numune görüntülerinin karşılaştırılması

3.10.6. Üç nokta eğme deneysel testler

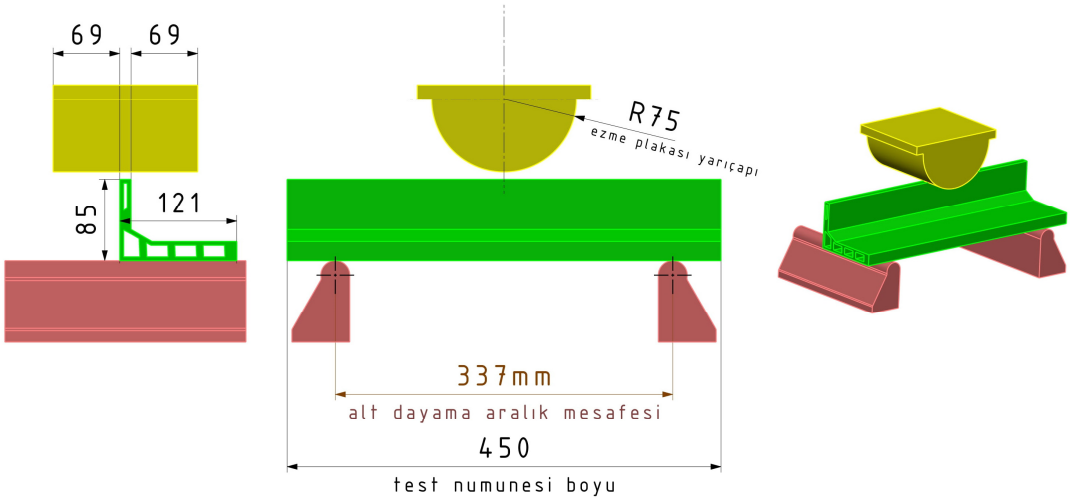
Batarya taşıyıcısının tüm bileşenleriyle test edilmesi oldukça maliyetlidir. Batarya kutusunun en zayıf kısmı, iç kirişlerin aralık boyutuna karşılık gelen Şekil 3.36'daki 337

mm ölçüsüdür. Üç noktalı eğilme testi için bu mesafe, alt destekler arasındaki aralık olarak kabul edilir ve testlerde 450 mm uzunluğunda üretilen numuneler kullanılmıştır.

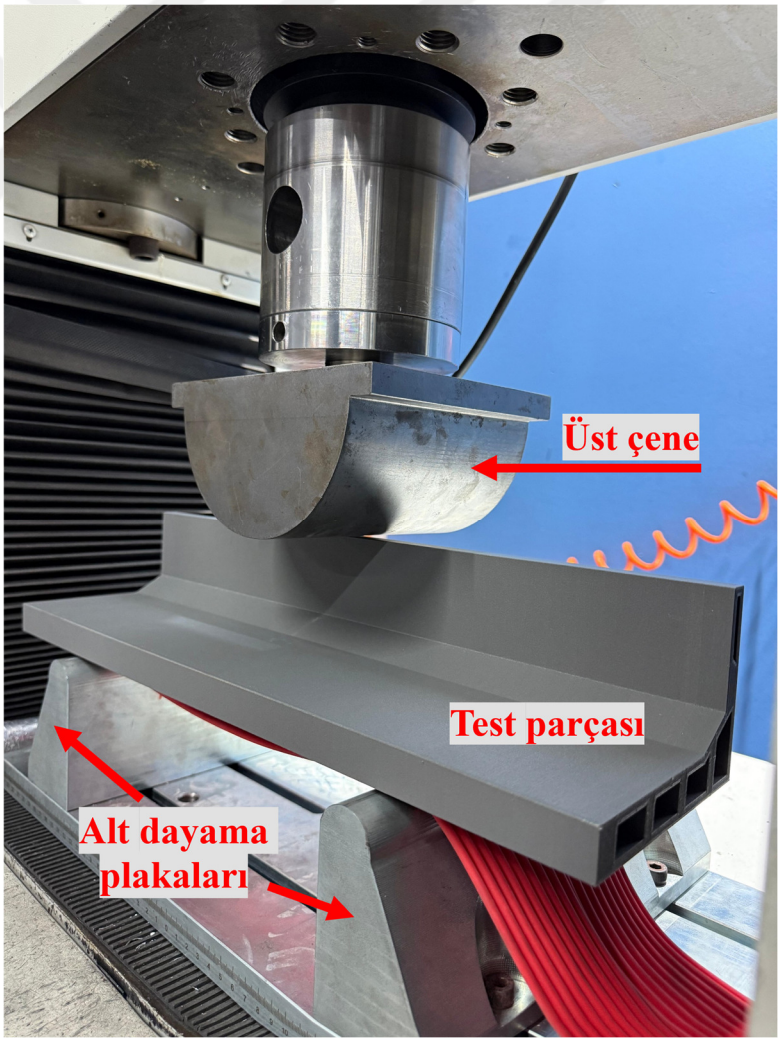


Şekil 3.36. Fiziksel testte alt dayama plakalarının aralığı için belirlenen mesafe

Tüm testler 250 kN kapasiteli çekme test cihazında yapılmıştır, aparatlar, standarta ve sınır şartlarına uygun olacak şekilde kurulmuştur. Test düzeneği ve ayarlar bir kez kurulduktan sonra tüm numunelere ait testler aynı parametreler ile ardı ardına gerçekleştirilmiştir. Üst ezme plakası için birebir FEA lerde tanımlanan 75 mm'lik yarıçapa sahip yarım küre kullanılmıştır. Test edilecek profilin, üç nokta eğme testi yapılırken ISO 6469_1 standardındaki test sınır şartları temsil edilmiştir. Test hızı için, yandan çarpma FEA sonuçlarındaki kuvvet-deplasman grafikleri incelenerek 5mm/dk sabit hızın yeteli olduğu belirlenmiş ve o şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bazı ön test denemelerinde, test hızının artırılması ve azaltılması durumlarının sonuçlarda hatrı sayılır bir değişim gerçekleştirmediği gözlemlenmiştir. Üst çene basma kuvvetini, test parçasına dengeli bir şekilde iletebilmek için, fiziksel test kurulumu yapılmadan önce, proses sanal ortamda Şekil 3.37'deki gibi tasarlanmıştır ve belirlenen ölçülerde fiziksel test kurulumu Şekil 3.38'deki gibi gerçekleştirilmiştir.

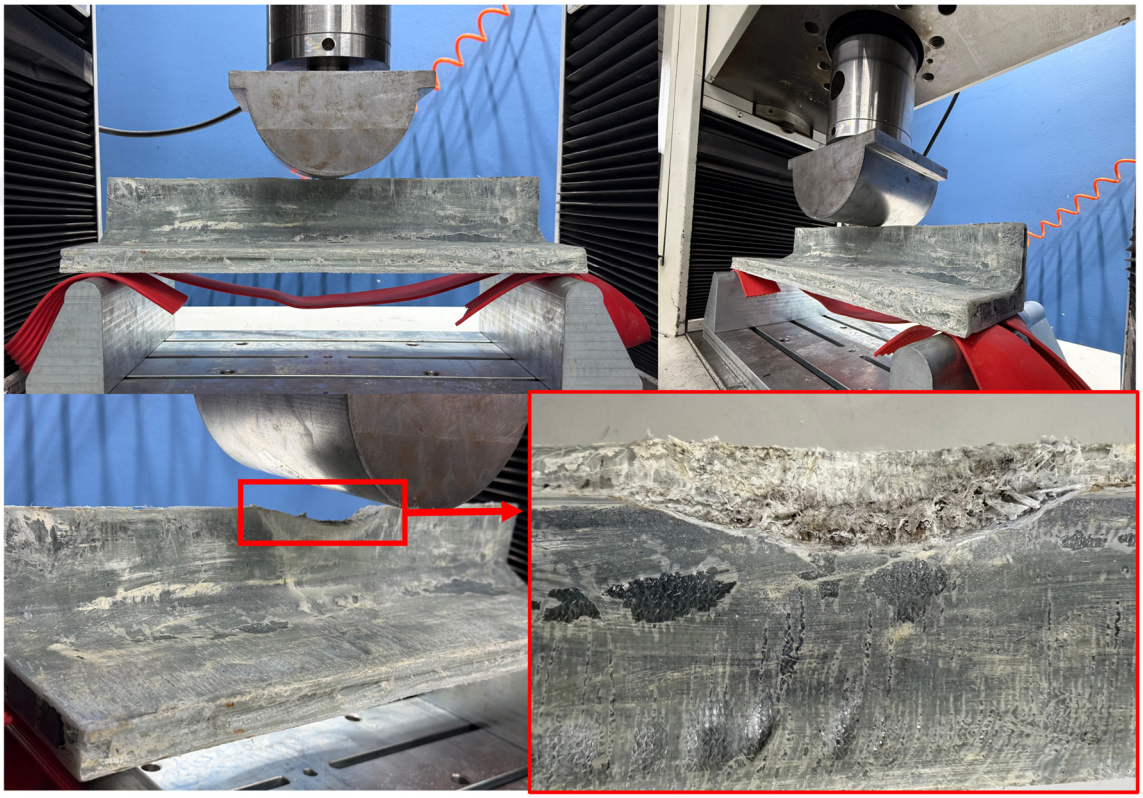


Şekil 3.37. Test düzeneğinin sanal ortamda tasarlanması

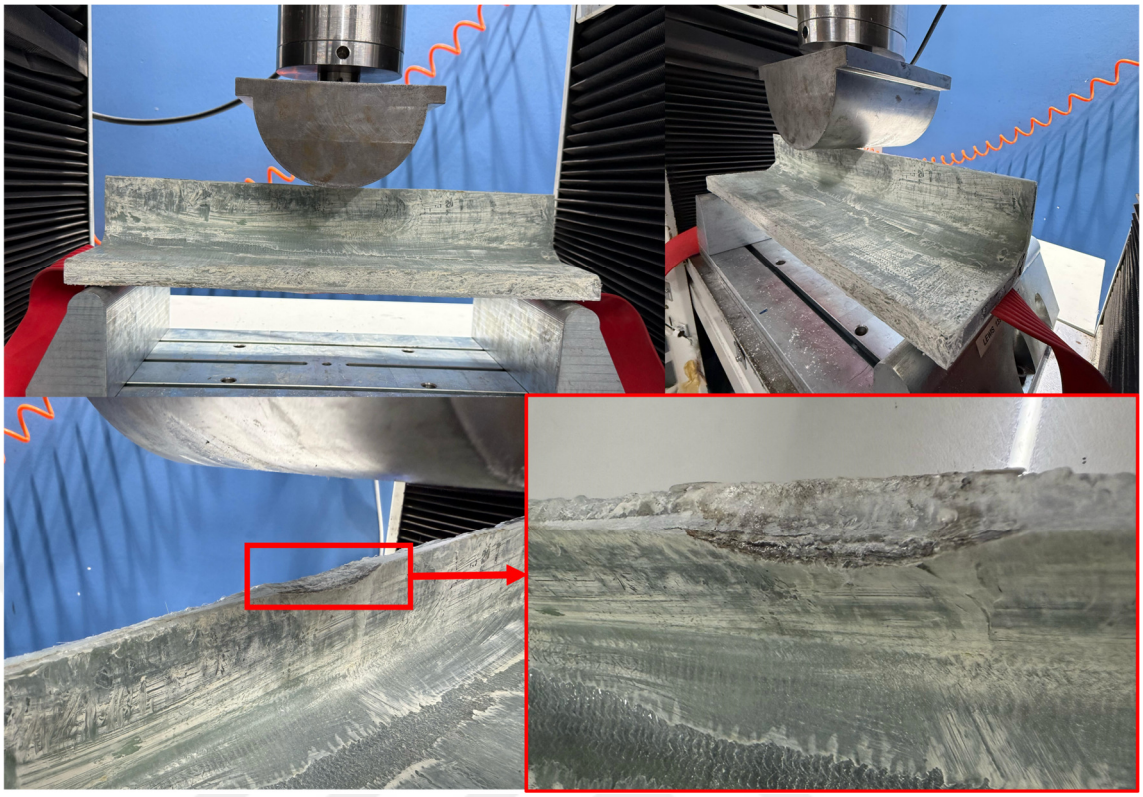


Şekil 3.38. Fiziksel test kurulumu

Üretilen 3 adet mevcut ve 3 adet optimum kesite ait numune profilin 3 nokta eğme testleri gerçekleştirilerek ve kuvvet-deplasman eğrilerinin de elde edilerek ortalama değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.39'da mevcut kesit numunelerinin testlerinden görüntülere, Şekil 3.40'da ise optimum kesit numunelerinin testlerinden görüntülere yer verilmiştir.



Şekil 3.39. Mevcut kesit numunelerinin testlerinden görüntüler



Şekil 3.40. Optimum kesit numunelerinin testlerinden görüntüler

Testler canlı olarak takip edilmiş, plastik deformasyon meydana geldikten ve veriler anlamsız hale geldikten sonra durdurulmuştur. Çizelge 3.7'de sunulan karşılaştırma verilerine göre mevcut kesit numunelerinin maks. kuvvet ortalama değeri 22497 N ve optimum kesit numunelerin maks. kuvvet ortalama değeri ise 24046 N olarak bulunmuştur. Maks. kuvvet değeri olarak optimum kesitin, mevcut kesite kıyasla %6 daha iyi durumda olduğu ispatlanmıştır. Ulaşılan maks. deplasman değerlerinde ise mevcut kesit numunelerinin maks. ortalama değeri 30,9 mm, optimum kesit numunelerinin maks. ortalama değeri ise 31,8 mm olarak bulunmuştur.

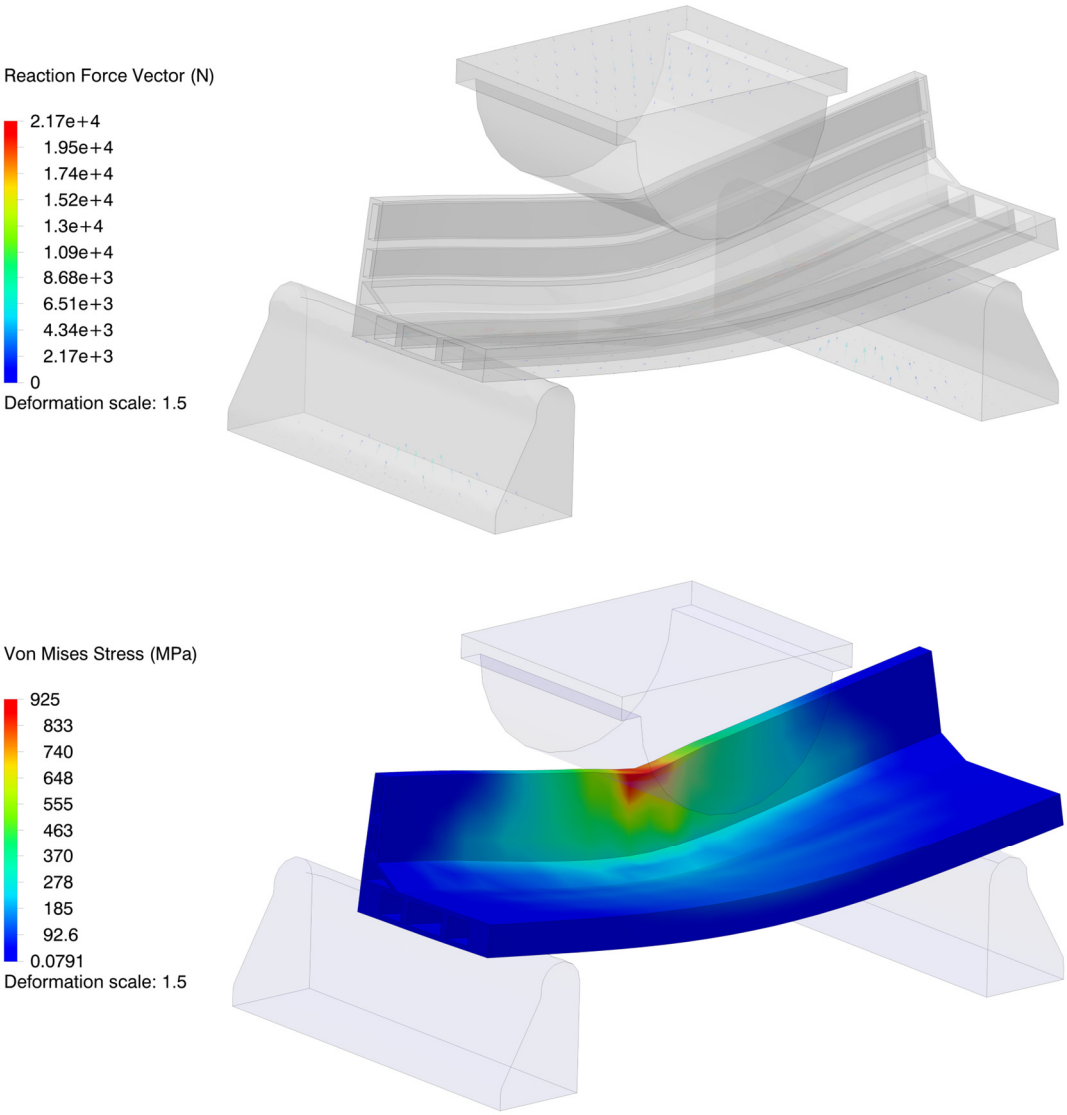
Çizelge 3.7. Numune profillerin üç nokta eğilme testinde elde edilen maksimum kuvvetler

	Maks. Kuvvet(N)	**Maks. Deplasman(mm)**	**Ağırlık(g)**
Mevcut Kesit 1 nolu test	21429	34,3	1831
Mevcut Kesit 2 nolu test	23548	29,2	1915
Mevcut Kesit 3 nolu test	22514	29,2	1887

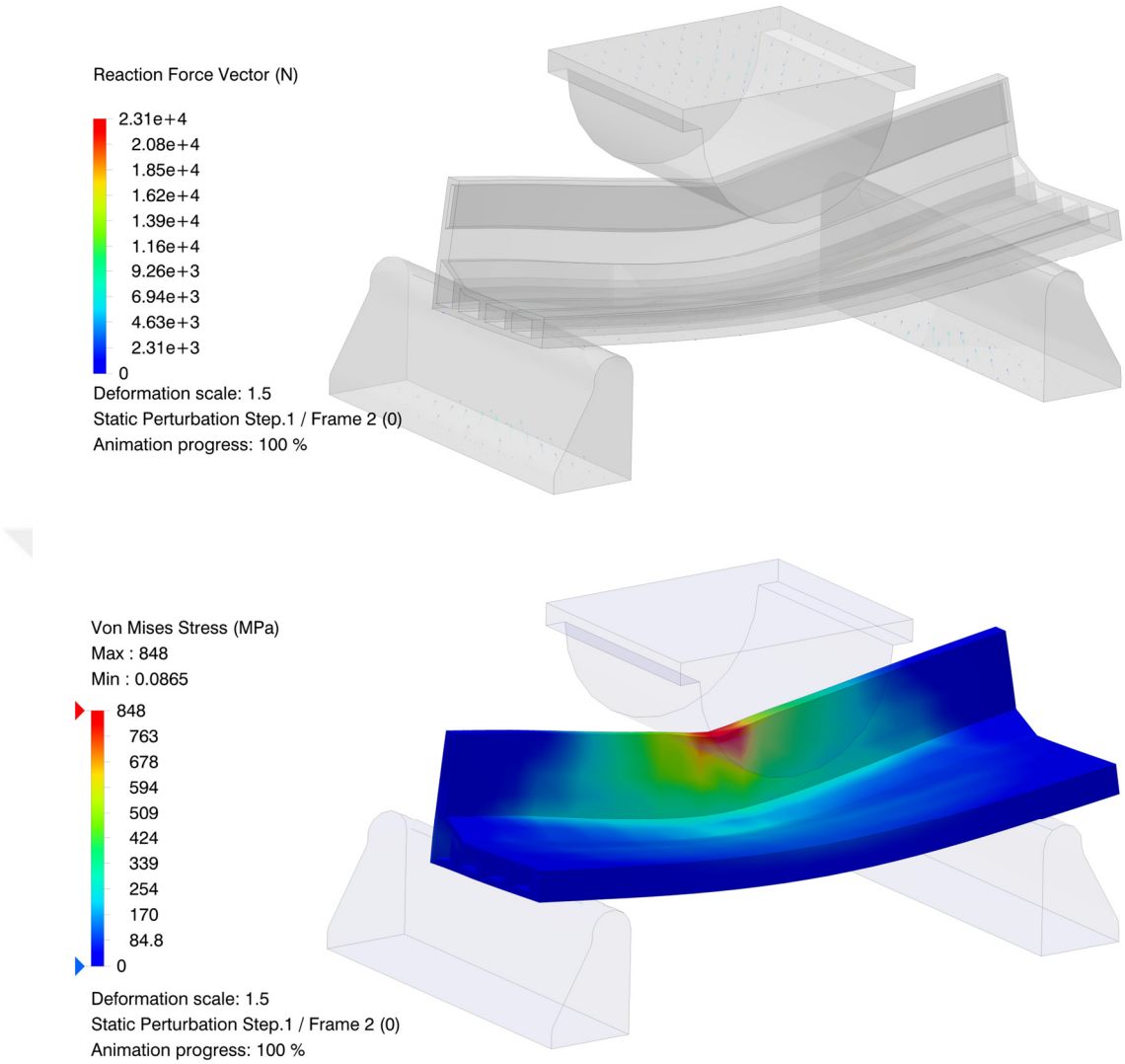
Mevcut Kesitlerin test ortalamaları	22497	30,9	1878
Optimum Kesit 1 nolu test	22865	31,3	1804
Optimum Kesit 2 nolu test	25122	29,7	1875
Optimum Kesit 3 nolu test	24152	34,4	1843
Optimum Kesitlerin test ortalamaları	24046	31,8	1841

3.10.7. Üç nokta eğme FEA` leri

Üç nokta eğme testlerinden elde edilen deneysel sonuçları, nümerik çıktılar ile karşılaştırma yapabilmek adına mevcut kesit ve optimum kesitin FEA leri gerçekleştirilmiştir. Deneysel testlerde numunelerin ortalama olarak 30mm deplasmana ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple FEA de 30mm sabit zorlanmış deplasman uygulanarak maks. kuvvet ve maks. von Mises gerilme degerleri elde edilmiştir. Şekil 3.41'de mevcut kesit üç nokta eğme FEA çıktıları, Şekil 3.42'de ise optimum kesit üç nokta eğme FEA çıktıları görsellenmiştir.



Şekil 3.41. Mevcut kesit üç nokta eğme FEA çıktıları



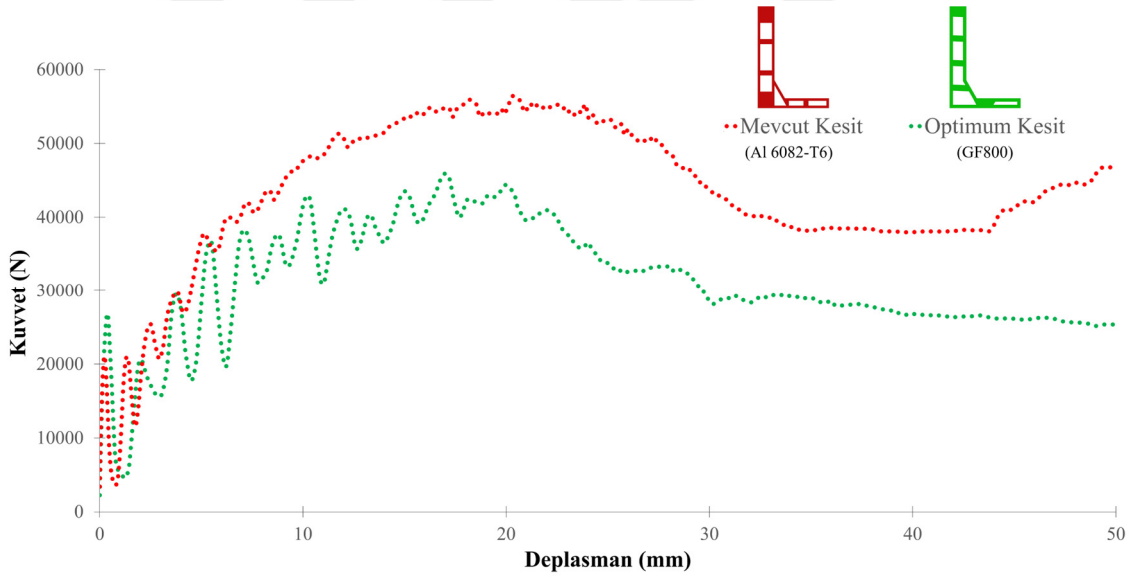
Şekil 3.42. Optimum kesit üç nokta eğme FEA çıktıları

Maks. kuvvet değerleri; mevcut kesit üç nokta eğme FEA sonucuna göre 21704 N, optimum kesit üç nokta eğme FEA sonucuna göre ise 23155 N olarak bulunmuştur. Deneysel test sonucundaki ortalama maks. kuvvet değerleri mevcut kesit için 22497 N, optimum kesit için ise 24046 N olarak elde edilmişti, buda test sonucunda elde edilen değerlere göre ortalama %4 sapma ile modelin doğru çalıştığını ispatlamaktadır.

4. BULGULAR

4.1. Mevcut Durum Analizi

Mevcut model FEA sonucunda, tepe kuvvet 56427 N ve emilen enerji 840 J olarak bulunmuştur. Mevcut modelin ve optimize edilmiş modelin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Al 6082-T6 profilinin mekanik davranışına ilişkin literatür incelemelerine dayanarak (Zhao ve Zhai, 2020; Zhao ve ark., 2016), mevcut modelin, üst kapak ve alt taban dahil olmak üzere eksiksiz bir batarya takımı düşünüldüğünde ECE R100 yönetmeliğinin 8D ekinin test gereksinimlerini karşılayabileceği varsayılmıştır. Bu çalışmadaki yaklaşım, değer sağlamayan aşırı mühendislikten kaçınmak ve aşırı maliyet yapısını basitleştirmektir. Başka bir deyişle, değer mühendisliği açısından malzeme, zaman ve para gibi kaynakların boşa harcanmasını engellemektir.

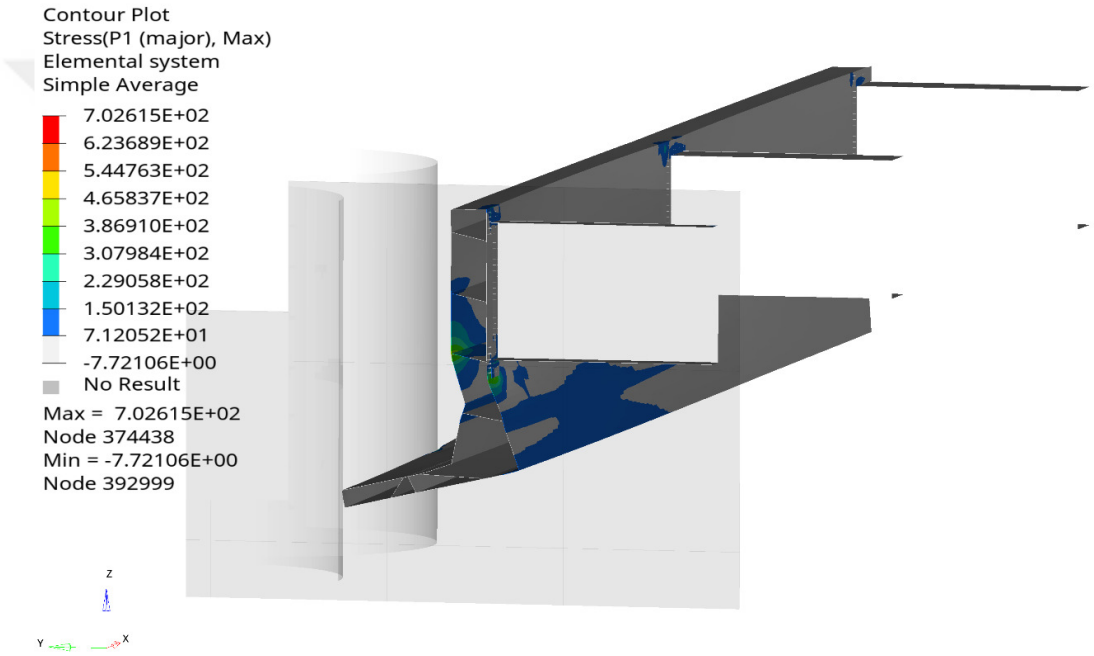


Şekil 4.1. Mevcut modelin ve optimum modelin kuvvet-deplasman eğrileri

4.2. Batarya Kutusu için FEA Sonuçları

Toplamda 27 kesitin FEA'leri tamamlanarak, optimizasyon için gerekli olan ve optimizasyona girdi olarak kullanılacak, 20 mm yer değiştirmeye kadar tepe kuvveti ve

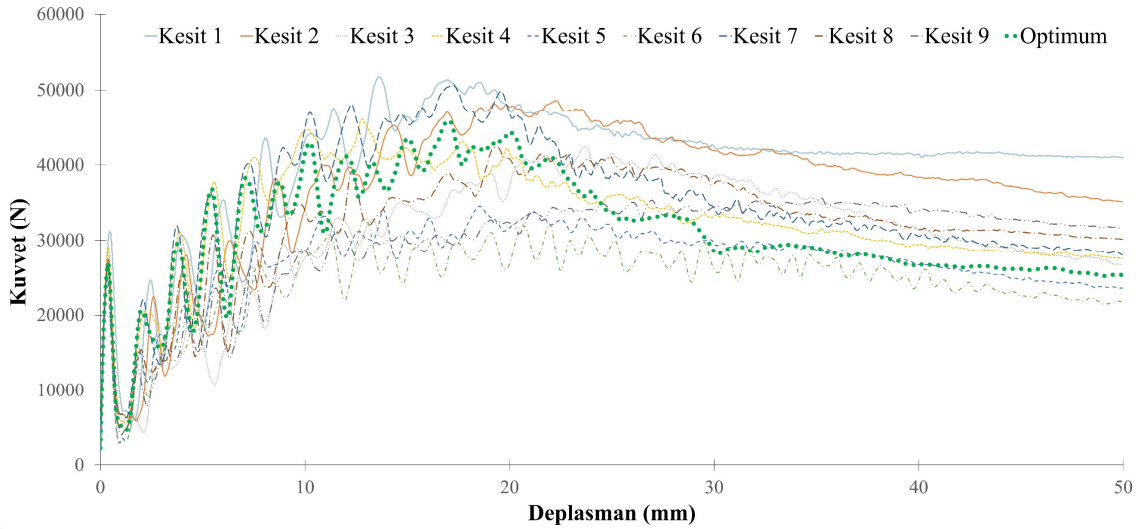
emilen enerji değerleri elde edilmiştir. FEA ekranı ve deformasyonun da anlaşılması için Şekil 4.2'de örnek olarak kesit 4'e ait analiz görseli verilmiştir. FEA sonuçları Çizelge 4.1'de listelenmiş ve kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 4.3-4.5'te gösterilmiştir. FEA sonuçlarına göre en yüksek mukavemete sahip durum kesit 19 da gerçekleşmiştir, en düşük mukavemete sahip durum ise kesit 15 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon için öncelikli olan parametreler katsayı ile belirlenir ve formüle göre en iyi sonuç elde edilir. Bu çalışmadaki esas konu hafifletme olduğu için kütle minimize edilmiş, emilen enerji ise maksimize edilmiştir.



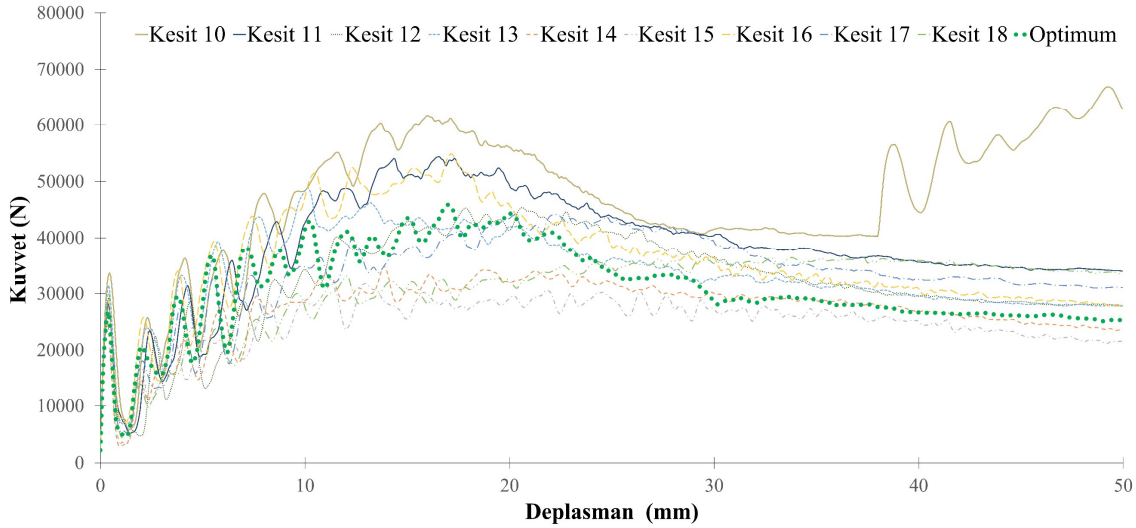
Şekil 4.2. Kesit 4'ün FEA sonucu

Çizelge 4.1. 27 kesitin FEA sonuçları

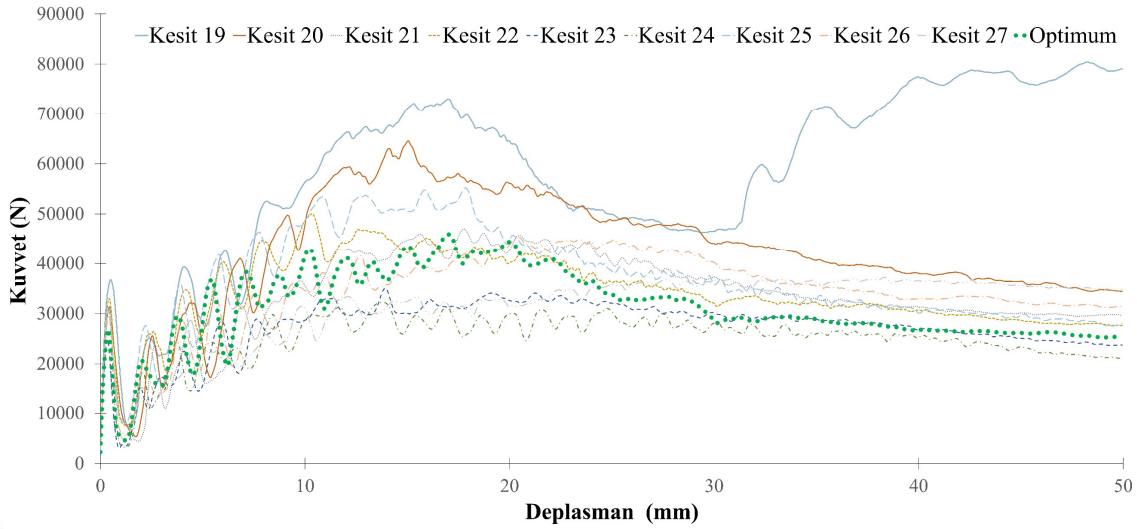
Kesit No.	Tasarım Değişkenleri			Amaçlar		
	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (°)	Kütle Kazancı (g)	Tepe Kuvvet (N)	Emilen Enerji (J)
Kesit 1	60	6	15	871	51772	730,6
Kesit 2	80	6	15	1164	48611	643,6
Kesit 3	100	6	15	1392	42438	509,2
Kesit 4	60	6	75	1829	46099	688
Kesit 5	80	6	75	2209	34529	505,9
Kesit 6	100	6	75	2195	32985	462,5
Kesit 7	60	6	135	1785	50652	727,4
Kesit 8	80	6	135	2129	42363	569,1
Kesit 9	100	6	135	2048	35636	478,8
Kesit 10	60	9	15	43	66924	870,7
Kesit 11	80	9	15	269	54424	754,8
Kesit 12	100	9	15	549	45387	604,7
Kesit 13	60	9	75	1184	48855	719,6
Kesit 14	80	9	75	1738	34801	511,1
Kesit 15	100	9	75	1736	31783	474,5
Kesit 16	60	9	135	1063	54937	789,3
Kesit 17	80	9	135	1624	44212	599,8
Kesit 18	100	9	135	1517	36577	497,2
Kesit 19	60	12	15	−619	80400	1014
Kesit 20	80	12	15	−465	64581	859,2
Kesit 21	100	12	15	−206	47021	643,6
Kesit 22	60	12	75	521	50080	741,1
Kesit 23	80	12	75	1277	35033	513,2
Kesit 24	100	12	75	1300	32178	482,1
Kesit 25	60	12	135	287	55177	818,5
Kesit 26	80	12	135	1107	45232	615,3
Kesit 27	100	12	135	1014	37242	508,9
Mevcut modelin kütlesi 7639,65 g, tepe kuvveti 56427 N, emilen enerjisi 840 J'dür.						



Şekil 4.3. Kesit 1-9 ve optimum modelin kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 4.4. Kesit 10-18 ve optimum modelin kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 4.5. Kesit 19-27 ve optimum modelin kuvvet-deplasman eğrileri

4.3. Duyarlılık Matrisinin Sonuçları

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi sıfıra yakın değerleri veya negatif etkiye sahip parametreleri belirlemek için bir duyarlılık matrisi kullanılmıştır.

	Kütle kazancı(g)	Tepe Kuvvet(kN)	Emilen enerji(kJ)
p1(kenar uzunluğu)	26.1%	-64.9%	-76.3%
p2(et kalınlığı)	-65.0%	24.5%	27.6%
p3(düzlem açısı)	54.6%	-39.5%	-32.1%

Negatif korelasyon

Pozitif korelasyon

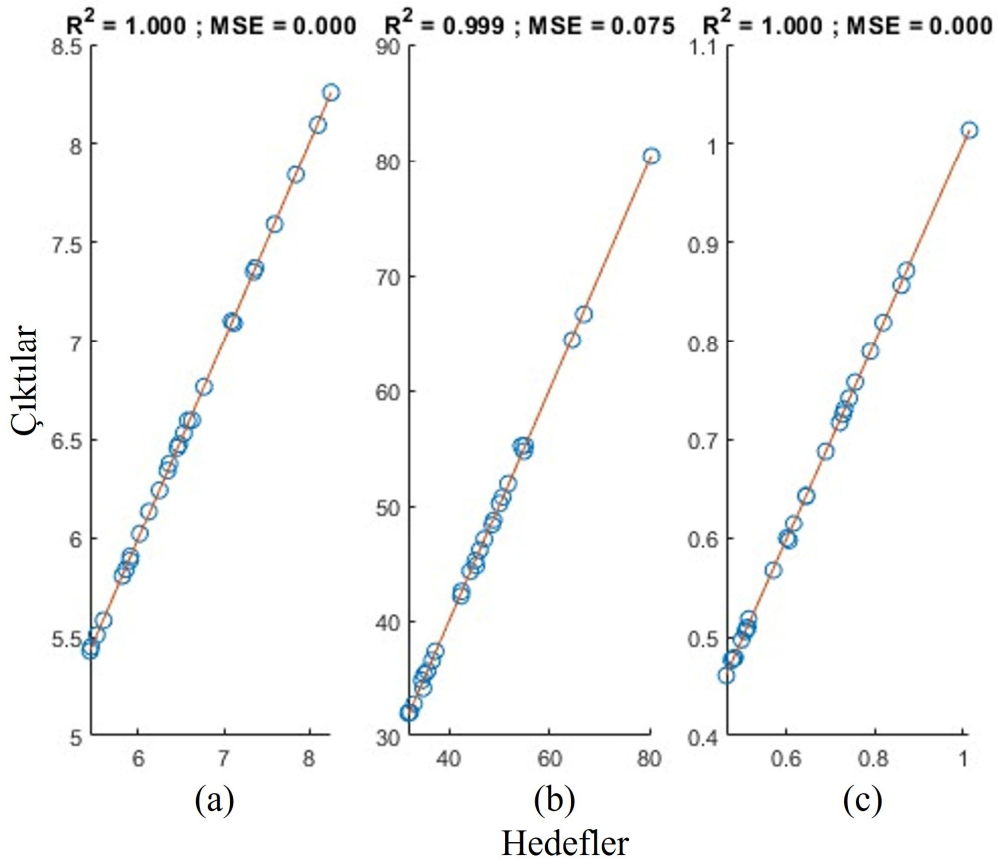
Şekil 4.6. Duyarlılık Matrisi

Bu optimizasyon çalışması, batarya kutusu yan profilinin tasarımında kritik öneme sahip üç performans parametresini eş zamanlı olarak optimize etmeyi amaçlamıştır.

Bunlar tepe kuvveti (minimize), kütle (minimize) ve emilen enerjidir (maksimize). Optimizasyon süreci üç tasarım değişkeni (p1, p2 ve p3) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, birbiriyle çelişen bu hedefleri dengeleyen optimum tasarım çözümleri elde etmektir.

4.4. Optimizasyon Sonuçları

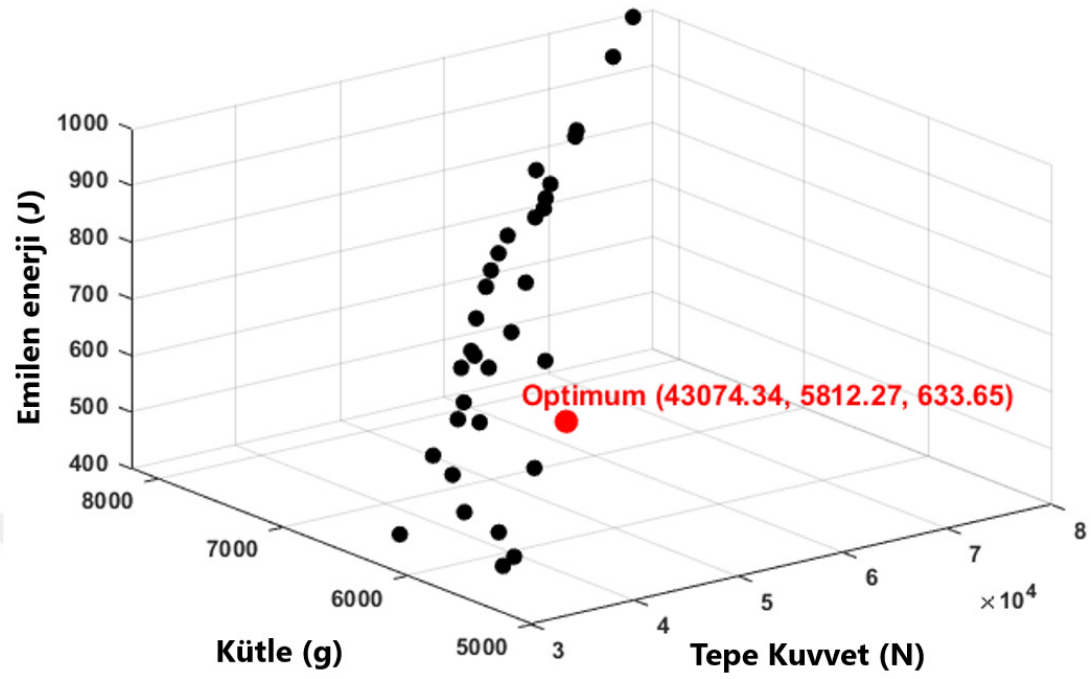
İlk olarak, en iyi performans gösteren sinir ağı modelleri belirlenmiş ve bunların çıktıları bir sonraki optimizasyon aşamasında girdi olarak kullanılmıştır. Şekil 4.7'de gösterilen regresyon eğrileri, bağımlı bir değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkileri modellemek ve tahmin etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemi temsil etmektedir. Uyum eğrisi, veri noktalarına en iyi uyan matematiksel modeli bulmak için regresyon analizi yöntemlerini kullanır. Bu analiz, bir veri kümesinin dağılımını ve eğilimini anlamak, gelecekteki değerleri tahmin etmek veya değişkenler arasındaki ilişkileri incelemek için yaygın olarak kullanılan bir araçtır.



Şekil 4.7. Regresyon eğrileri (a) kütle (kg), (b) kuvvet (kN) ve (c) emilen enerji (kJ)

Daha sonra, elde edilen en iyi sinir ağı modelleri kullanılarak çok amaçlı bir optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. Bu optimizasyon yöntemi, çarpışmaya elverişlilik ve hafiflik açısından en iyi tasarım değişkenleri kombinasyonunu bulmayı amaçlamaktadır. Bu adım MATLAB R2022b yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve optimize edilen tasarım değişkenleri tanımlanmıştır.

Optimizasyon süreci, Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde optimum çözümlerin belirlenmesi, analiz edilmesi ve seçilmesi için önemli bir kavram olan 35 Pareto-optimal çözümle sonuçlanmıştır. Bundan sonra, TOPSIS yöntemi uygulanmış ve bu Pareto-optimal sonuçlar arasından en dengeli çözüme ulaşmak için fonksiyon her bir amaca eşitlenmiştir.



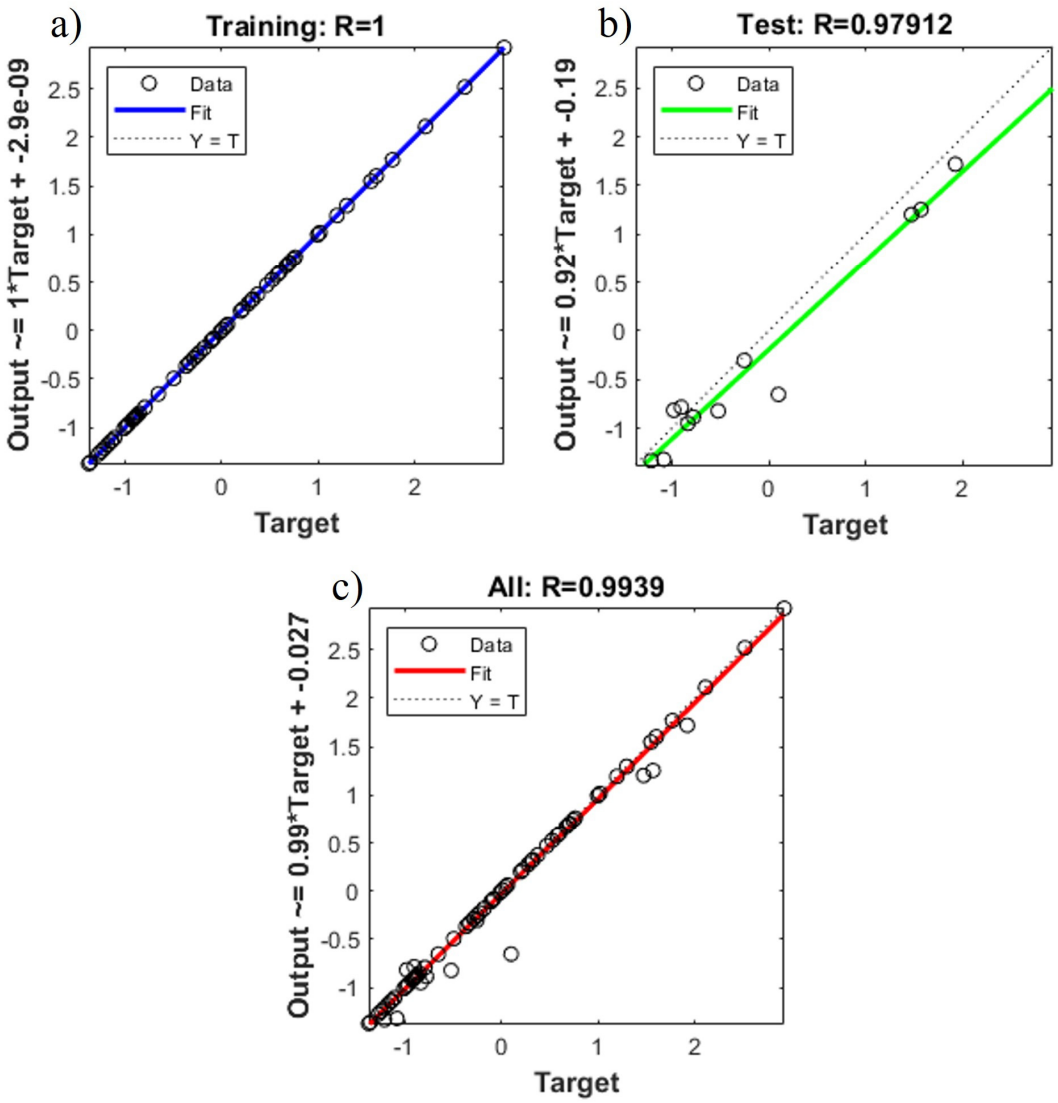
Şekil 4.8. Pareto optimal çözümlerin 3D gösterimi

Optimizasyon sonucunda en uygun çözüm kırmızı nokta ile işaretlenen 32 numaralı iterasyonda gözlenmiştir. Optimum parametreler Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Optimum Parametreler

İterasyon No.	**p1 (mm)**	**p2 (mm)**	**p3 (°)**	**Tepe kuvvet (N)**	**Kütle (g)**	**Emilen enerji (J)**
32	67,88	7,23	92,35	43074,34	5812,27	633,65

Eğitim süreci ortalama karesel hatayı (MSE) en aza indirmek için gerçekleştirilmiştir. Modelin performansını artırmak ve sonuçların güvenilirliğini sağlamak için 50 adet YSA farklı başlangıç ağırlıkları ile eğitilmiştir. Bu yaklaşım yerel minimumlara takılma riskini azaltmış ve daha doğru bir model elde edilmesini sağlamıştır. Şekil 4.9' da gösterildiği gibi, test performansını ölçmek için R^2 ve MSE değerleri sürekli olarak izlenmiştir.



Şekil 4.9. YSA'dan elde edilen çoklu regresyon grafikleri: (a) eğitim, (b) test ve (c) tümü.

Bu çalışmada uygulanan entegre yaklaşım, birbiriyle çelişen hedefleri dengeleyen optimum çözümlerle sonuçlanmıştır. YSA modelleri, tasarım parametreleri ve performans çıktıları arasındaki karmaşık ilişkileri başarıyla modellemiştir. Bu modeller R^2 değerleri ve MSE metrikleri ile değerlendirilmiş ve yüksek doğruluk seviyelerine ulaşılmıştır.

NSGA-II optimizasyonu geniş bir tasarım uzayını etkin bir şekilde araştırır ve birkaç Pareto-optimal çözüm üretir. Bu çözümler farklı tasarım tercihlerini yansıtan

alternatifler sunar. Örneğin, bazı çözümler emilen enerjiden ödün verirken tepe yükü ve kütleyi en aza indirirken, diğerleri diğer parametreleri artırırken emilen enerjiyi en üst düzeye çıkarır.

TOPSIS uygulaması, Pareto-optimal çözümler arasından en dengeli çözümün seçilmesini mümkün kılmıştır. Seçilen optimal çözüm, üç performans parametresi arasında makul bir denge sağlamıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te özetlenmiştir. Sonuçlar, önerilen metodolojinin karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için güçlü bir araç olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım sadece batarya yan profilini optimize etmek için değil, aynı zamanda benzer çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için de uygulanabilir.

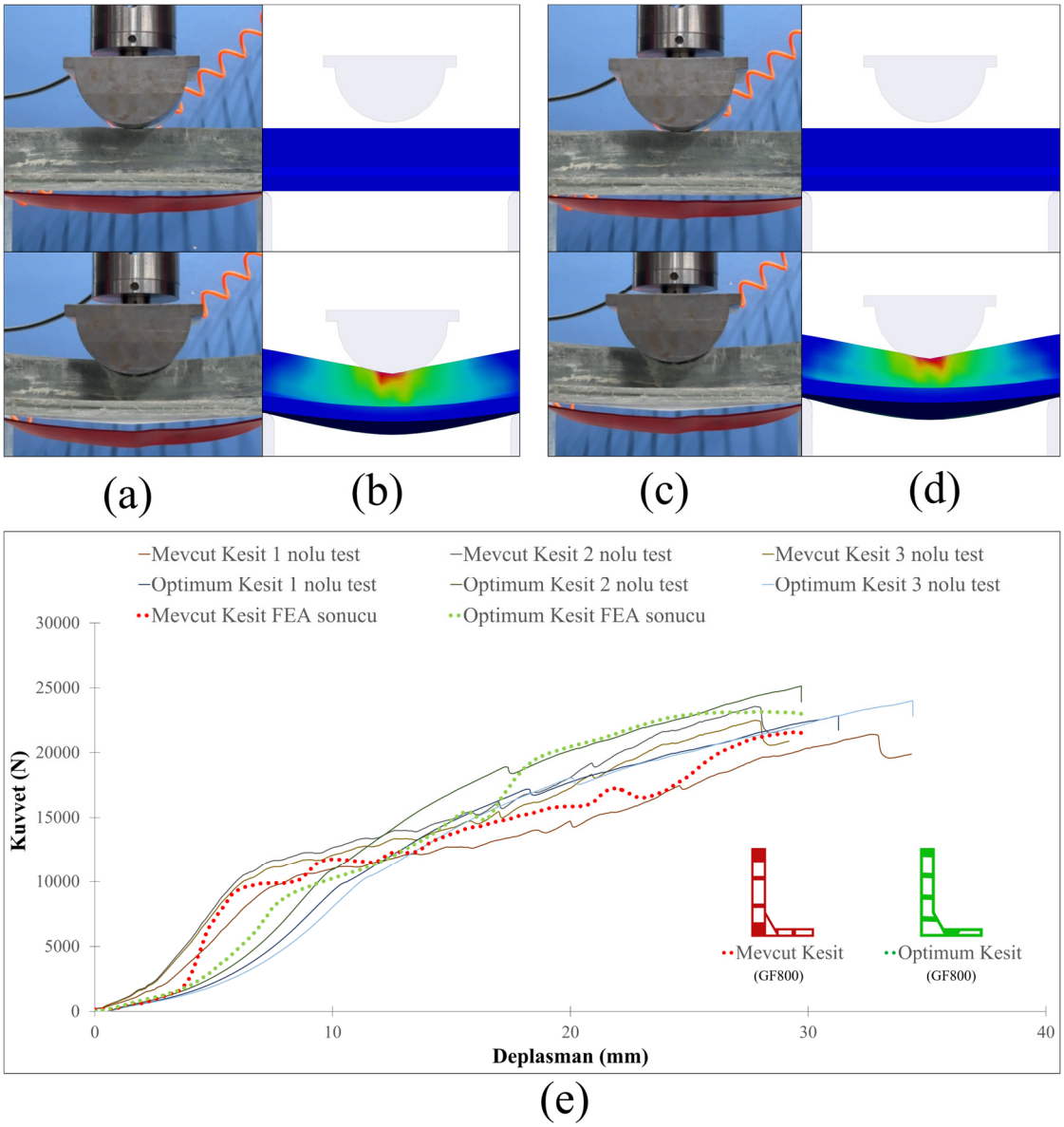
Çizelge 4.3. Mevcut tasarım ile optimize edilmiş tasarımın karşılaştırılması

	Mevcut tasarım	**Optimum Tasarım**
Malzeme	Al 6082-T6	CETP-GF800
Teknoloji	Ekstrüzyon	Pultrüzyon
Yoğunluk (g/cm^3)	2,7	2
Kütle (g)	7639,65	5812,27
Tepe kuvvet (N)	56427	45909
Enerji emilimi (J)	840	658
Özgül enerji emilimi (SEA) (J/g)	0,10995	0,11321
Parça maliyet katsayısı	1,628	1
Performans-maliyet oranı (SEA/parça maliyet)	0,06754	0,11321

Analiz sonuçlarına göre optimum tasarımın tepe kuvveti 45909 N, emilen enerji değeri ise 658 J olarak bulunmuştur. Sonuçları MATLAB optimizasyon sonuçları ile karşılaştırdığımızda %97 doğrulama elde edilmiştir. Yeni tasarım %23,9 daha hafif ve %38,6 daha ucuz hale gelmiştir. Toplamda, mevcut malzeme ve kesit geometrisine kıyasla 1827 g ağırlık azalması sağlanmıştır. Ayrıca, 20 mm yer değiştirmeye kadar enerji emilimi mevcut modelde daha iyi bir seviyede olmasına rağmen, optimum tasarım daha az kütleye sahip olduğu için optimum tasarımın mevcut modele kıyasla %3 daha yüksek performansa sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.5. Üç nokta eğme deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması

Test sonucunda elde edilen ortalama değerler ile karşılaştırıldığında, nümerik modelin ortalama %4 sapma ile doğru çalıştığı ispatlanmıştır. Üretim geçmişinin etkisi dikkate alındığında nümerik ile deneysel arasındaki bu sapma değeri normaldir. Şekil 4.10' da modelin deneysel, nümerik ve kuvvet-deplasman karşılaştırmaları görsellenmiştir.



Şekil 4.10. Model doğrulaması: (a) Mevcut kesit deneyseli, (b) Mevcut kesit FEA, (c) Optimum kesit deneyseli, (d) Optimum kesit FEA ve (e)Kuvvet-deplasman karşılaştırması

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma, elektrikli araçlar için batarya yan profillerinin yapısal tasarımını optimize etmek üzere YSA, NSGA-II ve TOPSIS yöntemlerini entegre biçimde kullanan yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım, ağırlığı en aza indirme, çarpışma performansını en üst düzeye çıkarma ve güvenliği sağlama gibi birbiriyle çelişen hedefleri etkili bir şekilde dengelemektedir. Bu çalışma, bal peteği ve negatif poisson oranlı yapıları birleştiren hibrit bir modelin üstün çarpışma dayanıklılığı ve hafiflik performansı sağladığını göstermiştir. Deneysel aşamada, mevcut ve optimize edilmiş kesitlere ait kompozit numuneler elle serme yöntemiyle üretilmiş ve üç nokta eğme testleri aynı parametreler altında gerçekleştirilmiştir. Fiziksel test sonuçları, optimize edilmiş kesitin mevcut kesite göre %6 oranında daha üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, test verileri ile FEA sonuçları karşılaştırıldığında, modelin %4'lük bir sapma ile doğruluğu teyit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın metodolojisi sadece elektrikli araç batarya taşıyıcılarının optimizasyonu için değil, aynı zamanda mühendislik tasarımındaki benzer çok amaçlı optimizasyon zorluklarını ele almak için de kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. YSA ve NSGA-II' nin TOPSIS gibi karar verme araçlarıyla birlikte kullanılması, otomotiv sektöründe güvenlik, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik için gelişen ihtiyaçlarla uyumlu dengeli, yüksek performanslı tasarım çözümlerinin türetilmesinde etkili olduğunu kanıtlamıştır.

Önerilen yaklaşım, karmaşık tasarım zorluklarını etkili bir şekilde ele almaktadır. Bu çalışmanın sonuçları birkaç önemli bulguyu vurgulamaktadır.

Yenilikçi yaklaşım: Hibrit optimizasyon metodolojisi, YSA, NSGA-II ve TOPSIS'i başarılı bir şekilde birleştirerek ağırlık azaltma, çarpışmaya elverişlilik ve genel güvenlik gibi çelişen hedefleri dengelemek için etkili bir strateji sağlamıştır.

Çelişen amaçların optimizasyonu: Optimizasyon, birbiriyle çelişen birden fazla amacı etkin bir şekilde ele almıştır. Bu çalışmanın birincil amacı, otomotiv sektöründe önemli bir husus olan çarpışma performansını en üst düzeye çıkarırken ağırlığı en aza indirmeye odaklanmıştır.

Üstün hibrit model: Bal peteği ve negatif poisson oranlı yapı elemanları entegre eden optimize edilmiş hibrit yapı, çarpışmaya dayanıklılık ve ağırlık azaltmada önemli gelişmeler sağlayarak gelişmiş performans için farklı konfigürasyonları birleştirmenin etkinliğini göstermiştir.

Ağırlık azaltma başarıları: Mevcut tasarımla karşılaştırıldığında optimizasyon, profil başına 1,8 kg ağırlık azaltımı sağlamıştır; bu da orijinal tasarıma kıyasla ağırlıkta %23,9 ve maliyette %38,6'lık bir azalmaya karşılık gelmektedir. Bu gelişmeler, %3 daha yüksek performansla birlikte yaklaşımın verimliliğini ve maliyet etkinliğini vurgulamaktadır.

Performans doğrulaması: Optimize edilmiş tasarım, 45909 N'luk bir tepe kuvveti ve 658 J'lük bir emilen enerji ile sonuçlanmış ve %97'lik bir doğrulama ile önerilen metodolojinin güvenilirliğini ve sağlamlığını göstermiştir.

Malzeme verimliliği: Bu çalışma, özellikle elektrikli araç uygulamaları için kritik faktörler olan ağırlık azaltma ve enerji verimliliği açısından geleneksel alüminyuma kıyasla CETP-GF800 malzemesinin kullanılmasının faydalarını vurgulamıştır.

Metodolojinin çok yönlülüğü: Sunulan metodoloji sadece elektrikli araç batarya taşıyıcılarının optimizasyonu için değil, aynı zamanda mühendislik tasarımındaki benzer çok amaçlı optimizasyon problemlerini ele almak için de çok yönlü bir çözüm sunmaktadır.

Otomotiv sektörü için çıkarımlar: Bu araştırma, otomotiv endüstrisinin gelişmiş güvenlik, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik için gelişen ihtiyaçları ile uyumludur ve

elektrikli araçlarda ve diğer uygulamalarda gelecekteki yapısal optimizasyonlar için değerli bilgiler sağlar.

Bu çalışma sonucunda elde edilen tüm bu kazanımlar, geliştirilen yaklaşımın endüstriyel uygulamalar için uygun olduğunu göstermekte ve gelecekteki çalışmalar için bir rehber niteliği taşımaktadır. Özellikle elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte bu tür optimize edilmiş hafif yapıların önemi daha da artacaktır.

Sonuçlar ayrıca, gelişmiş malzemelerin ve yenilikçi geometrilerin entegrasyonu konusunda yeni perspektifler sunarak daha geniş yapısal optimizasyon alanına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu metodolojinin başarılı bir şekilde uygulanması, özellikle elektrikli araç güvenliği ve verimlilik iyileştirmeleri bağlamında, otomotiv tasarımında gelecekteki gelişmelerin önünü açmaktadır.

Ayrıca, bu çalışmanın birden fazla metodolojiyi birleştiren ve çeşitli performans ölçütlerini dikkate alan kapsamlı optimizasyon yaklaşımı, otomotiv sektörünün ötesinde diğer mühendislik sorunlarına da uyarlanabilecek sağlam bir çerçeve sunmaktadır. Bu çok yönlülük ve uyarlanabilirlik, bulguları benzer karmaşık mühendislik problemleri üzerinde çalışan araştırmacılar ve uygulayıcılar için özellikle değerli kılmaktadır.

Bu çalışmanın sınırlamalarına ilişkin eleştirel düşünce öncelikle pultrüzyon ile ilişkilidir. Sabit bir kesite sahip parçalar üretmek için en uygun yöntemdir, bu karmaşık veya değişken şekiller oluşturma kabiliyetini kısıtlar, bu da bazı uygulamalar için önemli bir dezavantajdır. Yüksek kaliteli pultrüzyon profillerin elde edilmesi, elyaf emdirme, reçine viskozitesi, çekme hızı ve kürleme sıcaklığı dahil olmak üzere çeşitli proses değişkenlerinin titizlikle kontrol edilmesini gerektirir. Herhangi bir sapma nihai ürünün kalitesini etkileyebilir. Termoplastik pultrüzyon geri dönüştürülebilirlik ve tokluk gibi avantajlar sunarken, işleme zorlukları ve daha fazla araştırma ve geliştirme ihtiyacı nedeniyle termoset pultrüzyona kıyasla daha az gelişmiştir. Pultrüzyon pazarı, birçok küçük oyuncuyla oldukça parçalı bir yapıya sahiptir. Bu parçalanma, sınırlı kaynaklar nedeniyle inovasyonu ve yeni uygulamaların geliştirilmesini engelleyebilir.

KAYNAKLAR

Romero, C.A.; Correa, P.; Ariza Echeverri, E.A.; Vergara, D. Strategies for reducing automobile fuel consumption. Appl. Sci. 2024,14, 910.

Czerwinski, F. Current trends in automotive lightweighting strategies and materials. Materials 2021, 14, 6631.

Grubisic, V. Criteria and Methodology for Lightweight Design of Vehicle Components; Fraunhofer LBF: Darmstadt, Germany, 1986.

Ozel, S.; Karagoz, S.; Beytut, H. Crashworthiness investigation of vehicle front bumper beam with different cross-sections under axial dynamic load. Eur. J. Tech. 2020, 10, 97 – 105.

Dindar, C.; Beytut, H.; Karagoz, S. Effect of heat treatment and cross section on the crashworthiness of 51CrV4 spring steel.Uludag Universitesi Muhendislik Fakultesi Derg. 2019, 24, 477 – 488.

Alanazi, F. Electric vehicles: Benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation. Appl. Sci. 2023, 13, 6016.

Alternative Fuels Data Center. Electric Vehicle Benefits and Considerations; US Department of Energy: Washington, DC, USA, 2022.

Leal Filho,W.; Abubakar, I.R.; Kotter, R.; Grindsted, T.S.; Balogun, A.-L.; Salvia, A.L.; Aina, Y.A.;Wolf, F. Framing electric mobility for urban sustainability in a circular economy context: An overview of the literature. Sustainability 2021, 13, 7786.

Cucinotta, F.; Raffaele, M.; Salmeri, F. A Well-to-Wheel Comparative Life Cycle Assessment Between Full Electric and Traditional Petrol Engines in the European Context. In Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III: Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2020, 2 – 4 June 2020; Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021; pp. 188 – 193.

Verma, S.; Dwivedi, G.; Verma, P. Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. Mater. Today Proc. 2022, 49, 217 – 222.

Belingardi, G.; Scattina, A. Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles—Challenges and solutions. Vehicles 2023, 5, 498 – 514.

Zhang, J.; Ning, L.; Hao, Y.; Sang, T. Topology optimization for crashworthiness and structural design of a battery electric vehicle. Int. J. Crashworthiness 2021, 26, 651 – 660.

Hao, F.; Lu, X.; Qiao, Y.; Chen, X. Crashworthiness analysis of electric vehicle with energy-absorbing battery modules. J. Eng. Mater. Technol. 2017, 139, 021022.

McCafferty, G. Electric vehicle battery crashworthiness considerations. In Proceedings of the 30th IEEE Vehicular Technology Conference, Dearborn, MI, USA, 15 – 17 September 1980; pp. 255 – 260.

Mudassir, M.; Tarlochan, F.; Mansour, M.A. Nature-Inspired cellular structure design for electric vehicle battery compartment: Application to crashworthiness. Appl. Sci. 2020, 10, 4532.

Mushtaq, M.; Satish, S. A Review on Crashworthiness and Cooling Models for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. In Advances in Lightweight Materials and Structures: Select Proceedings of ICALMS 2020; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; pp. 75 – 84.

Wang,W.; Dai, S.; Zhao,W.;Wang, C.; Ma, T. Design optimization of a novel negative Poisson’s ratio non-module battery pack system considering crashworthiness and heat dissipation. Compos. Struct. 2021, 275, 114458.

Xiong, Y.; Pan, Y.; Wu, L.; Liu, B. Effective weight-reduction-and crashworthiness-analysis of a vehicle’s battery-pack system via orthogonal experimental design and response surface methodology. Eng. Fail. Anal. 2021, 128, 105635.

Zhao, G.F.; Liu, M.M.; Li, Y. Safety research and lightweight design of electric vehicle battery protection device. Adv. Mater. Res. 2013, 724, 1366 – 1373.

Obradovic, J.; Boria, S.; Belingardi, G. Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures. Compos. Struct. 2012, 94, 423 – 430.

Witteman,W.J. Improved vehicle crashworthiness design by control of the energy absorption for different collision situations. Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 1999.

Ozel, S.; Beytut, H.; Karagoz, S. Effect of forming history on crashworthiness of a spot-welded and double-hat elliptical thin-walled tube. Eur. J. Tech. 2019, 9, 275 – 285.

Gao, D.; Yao, B.; Chang, G.; Li, Q. Multi-Objective Optimization Design of Vehicle Side Crashworthiness Based on Machine Learning Point-Adding Method. Appl. Sci. 2022, 12, 10320.

Wang, D.; Xie, C.; Liu, Y.; Xu, W.; Chen, Q. Multi-objective collaborative optimization for the lightweight design of an electric bus body frame. Automot. Innov. 2020, 3, 250 – 259.

Li, Z.; Duan, L.; Cheng, A.; Yao, Z.; Chen, T.; Yao, W. Lightweight and crashworthiness design of an electric vehicle using a six-sigma robust design optimization method. Eng. Optim. 2019, 51, 1393 – 1411.

Maiti, S.; Islam, M.R.; Uddin, M.A.; Afroj, S.; Eichhorn, S.J.; Karim, N. Sustainable fiber-reinforced composites: A Review. Adv. Sustain. Syst. 2022, 6, 2200258.

Rajak, D.K.;Wagh, P.H.; Linul, E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. Polymers 2021, 13, 3721.

Baran, I.; Akkerman, R.; Hattel, J.H. Material characterization of a polyester resin system for the pultrusion process. Compos. Part B Eng. 2014, 64, 194 – 201.

Bechtold, G.;Wiedmer, S.; Friedrich, K. Pultrusion of thermoplastic composites-New developments and modelling studies. J. Thermoplast. Compos. Mater. 2002, 15, 443 – 465.

Britnell, D.J.; Tucker, N.; Smith, G.; Wong, S. Bent pultrusion—A method for the manufacture of pultrudate with controlled variation in curvature. J. Mater. Process. Technol. 2003, 138, 311 – 315.

Kennedy, K.C.; Kusy, R.P. UV-cured pultrusion processing of glass-reinforced polymer composites. J. Vinyl Addit. Technol. 1995, 1, 182 – 186.

Novo, P.; Silva, J.F.; Nunes, J.; Marques, A. Pultrusion of fibre reinforced thermoplastic pre-impregnated materials. Compos. Part B Eng. 2016, 89, 328 – 339.
Volk, M.; Yuksel, O.; Baran, I.; Hattel, J.H.; Spangenberg, J.; Sandberg, M. Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: A review of the state of the art, innovations, and future of pultrusion technologies. Compos. Part B Eng. 2022, 246, 110135.
Talabi, S.I.; Tobin, J.; Strom, B.; Brownstein, I.; Kunc, V.; Hassen, A.A. Recent and future developments in pultrusion technology with consideration for curved geometries: A review. Compos. Part B Eng. 2024, 283, 111678.
Simpson, J.; Kazancı, Z. Crushing investigation of crash boxes filled with honeycomb and re-entrant (auxetic) lattices. Thin-Walled Struct. 2020, 150, 106676.
Buljak, V.; Cocchetti, G.; Cornaggia, A.; Maier, G. Parameter identification in elastoplastic material models by Small Punch Tests and inverse analysis with model reduction. Meccanica 2018, 53, 3815 – 3829.
Nasrullah, A.I.H.; Santosa, S.P.; Dirgantara, T. Design and optimization of crashworthy components based on lattice structure configuration. Structures 2020, 26, 969 – 981.
Li, D.; Qin, R.; Xu, J.; Zhou, J.; Chen, B. Topology optimization of thin-walled tubes filled with lattice structures. Int. J. Mech. Sci. 2022, 227, 107457.
Padgett, M. (2018, April 20). Audi details battery for 2019 e-tron electric SUV. Green Car Reports. https://www.greencarreports.com/news/1116347_audi-details-battery-for-2019-e-tron-electric-suv
Poliya. (2023, October 19). Pultrüzyon - Poliya. Retrieved from https://poliya.com/tr/pultruzyon/
Li, Z., Duan, L. B., Cheng, A. G., Yao, Z. P., Chen, T., & Yao, W. (2019). Lightweight and crashworthiness design of an electric vehicle using a six-sigma robust design optimization method. *Engineering Optimization*, *51*(8), 1393-1411.
Mortazavi Moghaddam, A., Kheradpisheh, A., & Asgari, M. (2023). An integrated energy absorbing module for battery protection of electric vehicle under lateral pole impact. International journal of crashworthiness, 28(3), 321-333.
Long, T., Wang, L., & Kan, C. D. (2024). Experimental and modeling approaches for electric vehicle battery safety: a technical review. Engineering Research Express.
Xiong, Y., Pan, Y., Wu, L., & Liu, B. (2021). Effective weight-reduction-and crashworthiness-analysis of a vehicle's battery-pack system via orthogonal experimental design and response surface methodology. Engineering Failure Analysis, 128, 105635.
Zhang, J., Ning, L., Hao, Y., & Sang, T. (2021). Topology optimization for crashworthiness and structural design of a battery electric vehicle. International journal of crashworthiness, 26(6), 651-660.
Pan, Y., Xiong, Y., Dai, W., Diao, K., Wu, L., & Wang, J. (2022). Crush and crash analysis of an automotive battery-pack enclosure for lightweight design. International journal of crashworthiness, 27(2), 500-509.
Chakrabarti, A., Bokil, P., & Amaresh/Poovaiah Chakrabarti (Rav). (2021). Design for Tomorrow--Volume 2. Springer Singapore.
China Society of Automotive Engineers (Ed.). (2023). Proceedings of China SAE Congress 2022: Selected Papers (Vol. 1025). Springer Nature.

Yay, İ., Özcan, A. R., & Demirci, E. (2025). Multi-objective optimization of aluminum foam-filled battery boxes for electric vehicle safety. Latin American Journal of Solids and Structures.

Mudassir, M., Tarlochan, F., & Mansour, M. A. (2020). Nature-inspired cellular structure design for electric vehicle battery compartment: application to crashworthiness. Applied Sciences, 10(13), 4532.

Arslan, M., & Karamangil, M. İ. (2025). Comprehensive Optimization and Design of an Electric Vehicle Battery Box Side Profile for Lightweight and Crashworthiness Using a Novel Hybrid Structure. Applied Sciences, 15(4), 2037.

Dhoke, A., & Dalavi, A. (2021). A critical review on lightweight design of battery pack enclosure for electric vehicles. International Journal of Sustainable Transportation Technology, 4(2), 53-62.

Rahman, M., Marri, M., & Varghese, A. (2024). Integrated Crashworthiness Analysis of Electric Vehicle Battery Shells and Chassis: A Finite Element Study with Abaqus. Indian Journal of Design Engineering (IJDE) Volume-4 Issue-1.

Kotak, B., Kotak, Y., Brade, K., Kubjatko, T., & Schweiger, H. G. (2021). Battery crush test procedures in standards and regulation: Need for augmentation and harmonisation. Batteries, 7(3), 63.

Fauzi, F. R., Hadi, B. K., Santosa, S. P., & Jusuf, A. (2018, October). Composite based lightweight structure design for crash and safety application. In 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT) (pp. 161-166). IEEE.

Agarwal, A., Batista, R. C., & Tashi, T. (2024). Crashworthiness evaluation of electric vehicle battery packs using honeycomb structures and explicit dynamic analysis. In E3S Web of Conferences (Vol. 519, p. 04010). EDP Sciences.

Scurtu, L. I., Szabo, I., & Gheres, M. (2023). Numerical analysis of crashworthiness on electric vehicle's battery case with auxetic structure. Energies, 16(15), 5849.

Gören, T. (2024). Concepts for battery enclosure (Doctoral dissertation, Technische Hochschule Ingolstadt).

Wang, H., Wang, Z., Fan, Y., Gao, Q., & Wang, H. (2024). Multi-objective lightweight design of automotive battery pack box for crashworthiness. International Journal of Crashworthiness, 29(2), 292-307.

Lian, F., Wang, D., Xu, W., Zhang, X., Kong, D., & Huang, L. (2024). Multi-objective optimization design of a battery pack system for crashworthiness and lightweight based on a submodel and hybrid weighting method. Engineering Optimization, 1-19.

Wang, S., Guo, S., Li, R., Hu, Z., & Leng, Q. (2024). On crashworthiness design of hybrid metal–composite battery-pack enclosure structure. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 1-12.

Pereira, J. (2018). Preliminary design and analysis of a chassis side beam for stiffness and crashworthiness of an electric vehicle.

Anselma, P. G., Niutta, C. B., Mainini, L., & Belingardi, G. (2020). Multidisciplinary design optimization for hybrid electric vehicles: component sizing and multi-fidelity frontal crashworthiness. Structural and Multidisciplinary Optimization, 62(4), 2149-2166.

Kulkarni, S. S., Hale, F., Taufique, M. F. N., Soulami, A., & Devanathan, R. (2023). Investigation of crashworthiness of carbon fiber-based electric vehicle battery

enclosure using finite element analysis. Applied Composite Materials, 30(6), 1689-1715.

Shaikh, S. A., Taufique, M. F. N., Balusu, K., Kulkarni, S. S., Hale, F., Oleson, J., ... & Soulami, A. (2024). Finite element analysis and machine learning guided design of carbon fiber organosheet-based battery enclosures for crashworthiness. Applied Composite Materials, 31(5), 1475-1493.

Liu, B., Yang, J., Zhang, X., & Li, X. (2024). Topology optimization and lightweight platform development of pure electric vehicle frame-type aluminum body considering crash performance. Journal of Materials Engineering and Performance, 1-11.

Pan, Y., Xiong, Y., Wu, L., Diao, K., & Guo, W. (2021). Lightweight design of an automotive battery-pack enclosure via advanced high-strength steels and size optimization. International Journal of Automotive Technology, 22, 1279-1290.

Wang, S., & Wang, D. (2021). Crashworthiness-based multi-objective integrated optimization of electric vehicle chassis frame. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 21(3), 103.

Gong, C., Liu, J., Han, Y., Hu, Y., Yu, H., & Zeng, R. (2021). Safety of electric vehicles in crash conditions: A review of hazards to occupants, regulatory activities, and technical support. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8(3), 3870-3883.

Dhoke, A., & Dalavi, A. (2024). Optimal design of honeycomb battery pack enclosure for electric vehicle. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, 15, 23.

Oral, N., Otuz, O., RENÇBEROĞLU, İ., ÖNCEL, F., & SÖZEN, H. İ. Topology Optimization and Durability Analysis of Clips Used in Electric Vehicle Battery Pack Enclosure. Available at SSRN 5096823.

Muresanu, A. D., Dudescu, M. C., & Tica, D. (2024). Study on the Crashworthiness of a Battery Frame Design for an Electric Vehicle Using FEM. World Electric Vehicle Journal, 15(11), 534.

Victor Chombo, P., Laoonual, Y., & Wongwises, S. (2021). Lessons from the electric vehicle crashworthiness leading to battery fire. Energies, 14(16), 4802.

Xin, H.; Liu, Y.; Mosallam, A.S.; He, J.; Du, A. Evaluation on material behaviors of pultruded glass fiber reinforced polymer (GFRP) laminates. Compos. Struct. 2017, 182, 283 – 300.

Pranathi, K.; Ayub, S.M.A.; Paul, C. Composite Laminates with Epoxy Resin and E-Glass Fibers: Analysis of Mechanical Properties. J. Phys. Conf. Ser. 2024, 2837, 012008.

Rana, R.; Rana, S.; Purohit, R. Characterization of properties of epoxy sisal/glass fiber reinforced hybrid composite. Mater. Today Proc. 2017, 4, 5445 – 5451.

John, K.; Naidu, S.V. Tensile properties of unsaturated polyester-based sisal fiber – glass fiber hybrid composites. J. Reinf. Plast. Compos. 2004, 23, 1815 – 1819.

Sakib, M.N.; Iqba, A.A. Epoxy based nanocomposite material for automotive application-a short review. Int. J. Automot. Mech. Eng. 2021, 18, 9127 – 9140.

Bilmez, S.; Ta · sdemirci, A. Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption Characteristics of a E-Glass/Epoxy Crash Box. J. Phys. Conf. Ser. 2024, 2725, 012004.

Garg, R.; Babaei, I.; Paolino, D.S.; Vigna, L.; Cascone, L.; Calzolari, A.; Galizia, G.; Belingardi, G. Predicting composite component behavior using element level crashworthiness tests, finite element analysis and automated parametric identification. Materials 2020, 13, 4501.

Hu, Q.; Lu, G.; Tse, K.M. Compressive and tensile behaviours of 3D hybrid auxetic-honeycomb lattice structures. Int. J. Mech. Sci. 2024, 263, 108767.

Jafari, A.; Ashrafi, H.; Bazli, M.; Ozbakkaloglu, T. Effect of thermal cycles on mechanical response of pultruded glass fiber reinforced polymer profiles of different geometries. Compos. Struct. 2019, 223, 110959.

Ingrole, A.; Hao, A.; Liang, R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. Mater. Des. 2017, 117, 72 – 83.

Carakapurwa, F.E.; Santosa, S.P. Design optimization of auxetic structure for crashworthy pouch battery protection using machine learning method. Energies 2022, 15, 8404.

Beytut, H.; Ozbeyaz, K.; Temiz, · S. A Novel Hybrid Die Design for Enhanced Grain Refinement: Vortex Extrusion – Equal-Channel Angular Pressing (Vo-CAP). Appl. Sci. 2025, 15, 359.

Biharta, M.A.S.; Santosa, S.P.; Widagdo, D. Design and optimization of lithium-ion battery protector with auxetic honeycomb for in-plane impact using machine learning method. Front. Energy Res. 2023, 11, 1114263.

More, J.J. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In Numerical Analysis: Proceedings of the Biennial Conference Held at Dundee, 28 June – 1 July 1977; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1978; pp. 105 – 116.

Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Trans. Evol. Comput. 2002, 6, 182 – 197.

Wang, C.; Yoon, K. Multiple attribute decision making. Lect. Notes Econ. Math. Syst. 1981, 404, 287 – 288.

Plastock. (n.d.). Extruded polystyrene foam grey sheet. Plastock. Retrieved June 1, 2025, from https://www.plastock.co.uk/products/extruded-polystyrene-foam-grey-sheet

Hexion Inc. (2020). *Technical data sheet: EPIKOTE™ Resin MGS® LR 635 & EPIKURE™ Curing Agents MGS® LH633 to LH637* (Rev. March 2020). Hexion Inc.

Zhao, Y.; Zhai, X. Bending strength and design methods of the 6082-T6 aluminum alloy beams with circular hollow sections. Structures 2020, 26, 870 – 887.

Zhao, Y.; Zhai, X.; Sun, L. Test and design method for the buckling behaviors of 6082-T6 aluminum alloy columns with box-type and L-type sections under eccentric compression. Thin-Walled Struct. 2016, 100, 62 – 80.

EKLER

EK 1 Eğitici kod,YSA

EK 2 Optimizasyon kodu

EK 3 Optimizasyon fonksiyon kodu

EK 4 Pareto-optimal çözümler

EK 1 Eğitici kod,YSA

```
clc
clear
tic
load('Unnormalized_Data')  % NORMALİZE EDİLMEMİŞ DATALARI YÜKLE


%Input-Output Normalize edilmesi, Bu döngü, giriş (INP) ve çıkış (OUT) verilerini normalize eder. Her sütun için Ortalamayı çıkarır ve standart sapmaya böler.


for i=1:3

   INPN(:,i)=(INP(:,i)-mean(INP(:,i)))./std(INP(:,i));
   OUTN(:,i)=(OUT(:,i)-mean(OUT(:,i)))./std(OUT(:,i));

end

% x =input t=output (Normalize edilmiş giriş ve çıkış verilerini transpoze eder)
x = INPN';
t = OUTN';

%MS ve P değişkenlerini ayarlar. döngü sayılarını belirler.  MS=50 ve P=25 için toplam 50*25  adet döngü yapıp en iyi eğitilmiş 50 AĞI  BN (BEST NETWORKS) Değişkenine atayacak.

MS=50;
P=25;

for N=1:MS
BP=10;


   for s=1:P

      %ML optimizasyon yöntemi
trainFcn = 'trainbr';  % Levenberg-Marquardt backpropagation.

%15 nöron seçildi
hiddenLayerSize = 15;
% Yapay Sinir Ağı oluşturma
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);
%Inputlarda tekrara düşmemek için
net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};

%Train-Validation-Test kümelerinin oluşturulması

net.divideFcn = 'dividerand';  % train-validation ve test dataların randamly seçildi.
net.divideMode = 'sample';  % tüm dataları kullan

%Oranlar %70 train %15 validation %15 test
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;
```

```
%Hata metriği mean square error
net.performFcn = 'mse';  % Mean Squared Error (en iyi ağı seçmek için)

net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','ploterrhist', ...
    'plotregression', 'plotfit'};

% Train the Network
[net,tr] = train(net,x,t);

% Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);


%Modelin Performansının Ölçülmesi
performance = perform(net,t,y);
% tekrar Training, Validation and Test Performansını hesaplar
trainTargets = t .* tr.trainMask{1};
valTargets = t .* tr.valMask{1};
testTargets = t .* tr.testMask{1};

%Train, Validation ve Test kümeleri üzerinde performans ölçümü yapar
trainPerformance = perform(net,trainTargets,y);
valPerformance = perform(net,valTargets,y);
testPerformance = perform(net,testTargets,y);


TP(N,s)=testPerformance;
% Test performansını kaydeder.
%  Eğer mevcut test performansı daha iyiyse, en iyi performansı ve ağı günceller.
if testPerformance<BP
    BESTP(N)=testPerformance;
    BP=testPerformance;
    BN{N}=net;
end

    end
end
% En iyi ağları kaydetmek için bir dosya adı oluşturur ve kaydeder.  Örneğin MS=5 ve P=3  için
Best_Nets_5_3.mat  dosyası oluşturur.
name=sprintf('Best_Nets_%0d_%0d',MS,P);
save(name,"BN")

& Tüm en iyi ağların çıktılarının ortalamasını alır.
y=zeros(27,3);

for i=1:MS
net=BN{i};
    y=y+net(x)';

end

y=y./MS;

% Her çıktı için gerçek değerler ile tahminleri karşılaştırır.
%  R-kare ve MSE değerlerini hesaplar.
y1=OUT(:,1);
```

```
yp1=y(:,1).*std(OUT(:,1))+mean(OUT(:,1));
[r2_1,mseval_1]=rsquare_mse(y1,yp1);

y2=OUT(:,2);
yp2=y(:,2).*std(OUT(:,2))+mean(OUT(:,2));
[r2_2,mseval_2]=rsquare_mse(y2,yp2);

y3=OUT(:,3);
yp3=y(:,3).*std(OUT(:,3))+mean(OUT(:,3));
[r2_3,mseval_3]=rsquare_mse(y3,yp3);


% figure (3)
% semilogy(1:MS,BESTP)
T=toc;   %Zamanlayıcıyı durdurur ve geçen süreyi kaydeder.
figure (1)
subplot(1,3,1)
scatter(OUTN(:,1),y(:,1))
hold on
plot(OUTN(:,1),OUTN(:,1))

subplot(1,3,2)
scatter(OUTN(:,2),y(:,2))
hold on
plot(OUTN(:,2),OUTN(:,2))

subplot(1,3,3)
scatter(OUTN(:,3),y(:,3))
hold on
plot(OUTN(:,3),OUTN(:,3))

figure (2)
subplot(1,3,1)
scatter(OUT(:,1),y(:,1).*std(OUT(:,1))+mean(OUT(:,1)))
hold on
plot(OUT(:,1),OUT(:,1))
tit1=sprintf('R^2 = %0.3f ; MSE = %0.3f',r2_1,mseval_1);
title(tit1)

subplot(1,3,2)
scatter(OUT(:,2),y(:,2).*std(OUT(:,2))+mean(OUT(:,2)))
hold on
plot(OUT(:,2),OUT(:,2))
tit2=sprintf('R^2 = %0.3f ; MSE = %0.3f',r2_2,mseval_2);
title(tit2)

subplot(1,3,3)
scatter(OUT(:,3),y(:,3).*std(OUT(:,3))+mean(OUT(:,3)))
hold on
plot(OUT(:,3),OUT(:,3))
tit3=sprintf('R^2 = %0.3f ; MSE = %0.3f',r2_3,mseval_3);
title(tit3)
```

EK 2 Optimizasyon kodu

```
clc
clear
MS=50;
load('Best_Nets_50_25.mat')
load('Unnormalized_Data')

for i=1:3

   INPN(:,i)=(INP(:,i)-mean(INP(:,i)))./std(INP(:,i));
   OUTN(:,i)=(OUT(:,i)-mean(OUT(:,i)))./std(OUT(:,i));

end

minx1=min(INPN(:,1));
maxx1=max(INPN(:,1));
minx2=min(INPN(:,2));
maxx2=max(INPN(:,2));
minx3=min(INPN(:,3));
maxx3=max(INPN(:,3));
opt=optimoptions('gamultiobj','UseParallel',true,'PopulationSize',100,'MaxGenerations',200,'MaxStallGen
erations', 250,'Display','iter','PlotFcn',@gaplotpareto);



lb=[minx1,minx2,minx3];ub=[maxx1,maxx2,maxx3];

x = gamultiobj(@(x) opt_fun(x,BN),3,[],[],[],[],lb,ub,opt);

Y=zeros(size(x,1),3);
for i=1:MS
Y=Y+BN{i}(x')';
end
Y=Y/MS;

X=[x(:,1).*std(INP(:,1))+mean(INP(:,1)),x(:,2).*std(INP(:,2))+mean(INP(:,2)),x(:,3).*std(INP(:,3))+mean
(INP(:,3))];

Y=[Y(:,1).*std(OUT(:,1))+mean(OUT(:,1)),Y(:,2).*std(OUT(:,2))+mean(OUT(:,2)),Y(:,3).*std(OUT(:,3)
)+mean(OUT(:,3))];

%Max Normalization
for i=1:3

   YN(:,i)=(Y(:,i)-mean(Y(:,i)))./std(Y(:,i));

end
```

EK 3 Optimizasyon fonksiyon kodu

```
function [fobj] = opt_fun(x,BN)

y=zeros(1,3);
for k=1:50
y=y+BN{k}(x')';
end
y=y/50;

fobj(1:2)=y(1:2);
fobj(3)=-y(3);
end
```

EK 4 Pareto-optimal çözümler

İterasyon No.	Tasarım Değişkenleri			Amaçlar		
	p1 (mm)	p2 (mm)	p3 (°)	Tepe kuvvet (N)	Kütle (g)	Emilen enerji (J)
1	87,82	6,00	80,60	33078,56	5395,26	472,80
2	62,76	11,65	121,57	51004,65	7081,04	758,13
3	63,71	12,00	16,05	49570,60	7000,78	742,04
4	63,23	10,54	122,18	51476,10	6840,42	755,29
5	63,88	11,60	23,19	58256,25	7331,91	799,55
6	84,64	8,82	52,57	36639,17	6187,33	534,57
7	64,20	11,19	43,60	59517,55	7367,37	807,08
8	66,74	11,10	38,28	60551,15	7439,85	814,56
9	65,65	11,83	26,85	46362,26	6255,78	688,71
10	92,62	6,04	71,87	32330,54	5421,89	457,47
11	64,22	11,62	41,52	61730,40	7501,14	829,30
12	62,59	11,46	113,72	49573,45	7000,98	742,09
13	62,84	11,63	19,66	45356,16	6765,62	666,89
14	66,29	11,39	89,73	43410,04	6683,91	652,33
15	65,88	11,22	33,71	41561,74	6508,74	614,07
16	63,84	11,63	31,91	74259,22	8046,30	954,28
17	71,47	10,35	96,22	40603,10	6301,11	600,67
18	63,71	12,00	16,05	78131,99	8209,80	994,19
19	61,05	11,54	129,98	53938,68	7192,49	797,64
20	94,98	11,07	85,52	30692,62	6112,76	460,95
21	61,05	11,54	129,98	53937,07	7192,59	797,63
22	72,68	11,39	28,48	62564,98	7684,70	834,63
23	64,65	11,65	32,46	67062,43	7736,10	881,48
24	73,40	7,66	89,99	39158,55	5741,14	574,02
25	67,01	11,10	69,92	45217,65	6727,32	662,39
26	75,55	10,25	60,07	40536,88	6469,96	591,97
27	62,06	11,63	126,02	52440,73	7140,11	777,12
28	89,60	6,34	49,15	35163,30	5693,01	481,69
29	73,51	9,42	48,06	45364,62	6627,19	649,03
30	66,08	11,07	28,83	66507,26	7701,84	875,73
31	63,59	11,39	104,16	47066,91	6870,05	708,09
32	67,88	7,23	92,35	43074,34	5812,27	633,65
33	64,95	9,93	61,00	48202,59	6682,37	694,92
34	81,45	9,48	89,42	34250,08	5891,85	504,04
35	83,40	10,08	55,89	37317,25	6399,77	547,60