ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KOMPOZİT ESASLI BATARYA ALT MUHAFAZA SACI MALZEME ANALİZLERİ VE SİMÜLASYONU

Özgür ERDOĞAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KOMPOZİT ESASLI BATARYA ALT MUHAFAZA SACI MALZEME ANALİZLERİ VE SİMÜLASYONU

Özgür ERDOĞAN
0000-0001-6936-9808

Prof.Dr.Rukiye ERTAN
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Özgür ERDOĞAN tarafından hazırlanan "ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KOMPOZİT ESASLI BATARYA ALT MUHAFAZA SACI MALZEME ANALİZLERİ VE SİMÜLASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

Başkan	**:**	Prof. Dr. Rukiye ERTAN 0000-0002-9631-4607 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN 0000-0002-7746-2014 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Prof. Dr. Hakan AYDIN 0000-0001-7364-6281 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Doç. Dr. Halil BAYRAM 0000-0002-4664-3883 Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur GENÇ 0000-0003-0332-1785 Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
../../….

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

…/…/……

Özgür ERDOĞAN

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı Tarih	Öğrencinin Adı-Soyadı Tarih
İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.	İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ TEZ TANITIMI
ÖĞRENCİ VE DANIŞMAN FORMU

FR 3.4.6_27

ÖĞRENCİ
Adı SOYADI :Özgür ERDOĞAN
ÜNVANI : -
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : 511825001@ogr.uludag.edu.tr
PROGRAMI: DOKTORA
ORCID : 0000-0001-6936-9808
TÜBİTAK ID : TBTK-0039-4207
WOS RESEARCHER ID :KVZ-2726-2024
SCOPUS AUTHOR ID :59204696700
Google Scholar ID : 7YPuGuMAAAAJ

DANIŞMAN
Adı SOYADI : Rukiye ERTAN
ÜNVANI : Prof. Dr.
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : rukiye@uludag.edu.tr
YÖKSİS ARAŞTIRMACI ID :191606
ORCID : 0000-0002-9631-4607
TÜBİTAK ID : TBTK-0020-7241
WOS RESEARCHER ID : KIH-2391-2024
SCOPUS AUTHOR ID : 35772500300
Google Scholar ID : gdRMCSkAAAAJ

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA EĞİTİMİ BOYUNCA

BİLİMSEL ÇALIŞMALARI VE FAALİYETLERİ*

1. **Erdogan, O., Sevinc, S., & Ertan, R. 2024.** Formability Capabilities And Mechanical Properties Of Titanium Tailor-Welded Blanks. *Materials and Technology*, 58(3), 421-427.
2. 22AG001 – Elektrikli Taşıtlar için Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu – TUBİTAK 1004 Projesi Bursiyeri.

***Makaleler, Bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler, patentler, projeler, eğitimler vb. faaliyetler sıralanmalıdır.

BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

4.18.788 Electric vehicles
8.124.552 Air Pollution

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

Anahtar kelimeler aşağıdaki bağlantı üzerinden seçilecektir.
https://incites.help.clarivate.com/Content/Resources/Docs/SDG2023.xlsx

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KOMPOZİT ESASLI BATARYA ALT MUHAFAZA SACI MALZEME ANALİZLERİ VE SİMÜLASYONU

Özgür ERDOĞAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

İlerleyen malzeme ve imalat teknolojisi sayesinde mukavemet değerlerinden ödün vermeden daha hafif malzemeler üretilebilmektedir. Sandviç kompozit malzemeler ağırlıklarına oranla yüksek eğilme ve kayma dayanımına sahiptirler. Bu nedenler başta otomotiv ve havacılık olmak üzere gıda, elektronik, inşaat, denizcilik ve uzay sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında elektrikli araçlarda kullanılmak üzere kompozit esaslı batarya alt muhafaza sacı malzeme analizleri ve simülasyonu üzerine çalışılmış, 1mm kalınlığa sahip alüminyum ve titanyum yüzey malzemeler ile alüminyum ve polipropilen malzemeden yapılmış 5 mm, 10 mm ve 20 mm kalınlığa sahip bal peteği geometrisine sahip çekirdek malzemeler kullanılarak sandviç malzeme üretimi yapılmıştır. ASTM standartlarına göre numunelere basma testi, üç nokta eğilme testi ve ağırlık düşürme testleri yapılmıştır. Testler sonucu elde edilen mekanik özellikler grafikler ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Bu testler ile yüzey malzemesinin, çekirdek malzemesinin ve çekirdek malzeme kalınlığının sandviç yapı mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. En iyi mekanik performans gösteren numunenin doğal frekans testi yapılmıştır. Ardından piyasada üretilmiş olan bir batarya taşıyıcının katı modeli oluşturulmuş ve sandviç yapı entegrasyonu yapılarak modal analiz ve uluslararası standartlarca belirlenmiş direğe yandan çarpma ile penetrasyon simülasyonları yapılıp sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya muhafaza, elektrikli araç, sandviç kompozit, mekanik dayanım, simülasyon
2025, xvi + 121 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

MATERIAL ANALYSIS AND SIMULATIONS OF COMPOSITE BASED BATTERY LOWER CASING SHEET IN ELECTRIC VEHICLES

Özgür ERDOĞAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

Advancements in material and manufacturing technologies have enabled the production of lighter materials without compromising their strength properties. Sandwich composite materials exhibit high bending and shear strength relative to their weight. For these reasons, they are widely utilized in industries such as automotive, aerospace, food, electronics, construction, marine, and space. In this thesis study, material analyses and simulations were conducted for a composite-based battery undertray intended for use in electric vehicles. Sandwich materials were produced using aluminum and titanium face sheets with a thickness of 1 mm, as well as core materials made of aluminum and polypropylene in honeycomb geometries with thicknesses of 5 mm, 10 mm, and 20 mm. According to ASTM standards, compression tests, three-point bending tests, and drop weight impact tests were performed on the samples. The mechanical properties obtained from these tests were presented comparatively using graphs. These tests investigated the effects of face sheet material, core material, and core thickness on the mechanical properties of the sandwich structure. The natural frequency test was conducted on the sample that exhibited the best mechanical performance. Subsequently, a solid model of a commercially produced battery tray was created, and the sandwich structure was integrated into it. Modal analysis and pole side impact simulations, as defined by international standards, were carried out to evaluate the results.

Key words: Electric vehicle, battery case, sandwich composite, mechanic strength, simulation
2025, xvi + 121 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora tezim süresince bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, bilimsel konulara yaklaşımımı geliştirmemde büyük emeği olan danışman hocam Prof. Dr. Rukiye ERTAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca emekli olan danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Erol SOLMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK – 1004 programı çerçevesinde 22AG001 numaralı "Elektrikli Taşıtlar için Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu (BATEG)" tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK – ARDEB'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, doktora eğitimim süresince çalışanı olarak beni destekleyen Bosch San. ve Tic. A.Ş ile Valeo Otomotiv San. ve Tic. A.Ş firmalarına teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini hissettiğim ve her zaman yanımda olan, annem Zaide, babam Ömer ERDOĞAN ve ablam Öznur DEMİRELÇE'ye, desteği ve anlayışı ile çalışmalarımda bana güç veren eşim Pelin ERDOĞAN'a, kızım Bade ve oğlum Efe ERDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Özgür ERDOĞAN
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ…… 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Kuramsal Temeller 4
2.1.1. Kompozit Malzemeler 4
2.1.2. Sandviç Kompozit Malzemeler ve Sınıflandırılması 7
2.1.3. Bal Peteği Çekirdek Malzeme Üretim Yöntemleri 10
2.1.4. Sandviç Kompozit Kullanım Alanları 12
2.1.5. Sandviç Kompozit Malzeme Testleri 14
2.2. Kaynak Araştırması 23
3. MATERYAL ve YÖNTEM 41
3.1. Testlerde Kullanılan Malzemeler 41
3.1.1. Alüminyum Çekirdek Malzeme 42
3.1.2. Polipropilen Çekirdek Malzeme 43
3.1.3. Alüminyum Yüzey Malzeme 44
3.1.4. Titanyum Yüzey Malzeme 45
3.2. Test Numunelerinin Üretimi 46
3.3. Basma Testi 52
3.4. Üç Nokta Eğilme Testi 54
3.5. Ağırlık Düşürme Testi 57
3.6. Titreşim Testi 58
3.7. Sonlu Elemanlar Analizi 60
3.7.1. Direğe Yandan Çarpma Analizleri 67
3.7.2. Penetrasyon Analizleri 68
3.7.3. Doğal Frekans Analizi 70
4. BULGULAR 71
4.1. Alüminyum Çekirdek Malzemeli Numunelerin Basma Test Sonuçları 71
4.2. Polipropilen Çekirdek Malzemeli Numunelerin Basma Test Sonuçları 78
4.3. Alüminyum Çekirdek Malzemeli Numunelerin Üç Nokta Eğilme Test Sonuçları 86
4.4. Polipropilen Çekirdek Malzemeli Numunelerin Üç Nokta Eğilme Test Sonuçları 90
4.5. Alüminyum Çekirdek Malzemeli Numunelerin Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları 94
4.6. Polipropilen Çekirdek Malzemeli Numunelerin Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları 98
4.7. Titreşim Testi Sonuçları 103
4.8. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları 103
4.8.1. Direğe Yandan Çarpma Analiz Sonuçları 104
4.8.2. Penetrasyon Analiz Sonuçları 105
4.8.3. Modal Analiz Sonuçları 107
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 111
KAYNAKLAR 117
ÖZGEÇMİŞ 121

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
a	Sandviç malzeme boyu
b	Sandviç malzeme genişliği
E	Elastik modül
E_b	Eğilme modülü
F	Kuvvet
f	Frekans
G	Kayma modülü
h	Yüzey kalınlığı
L	Bal peteği et kalınlığı
l	Destekler arası mesafe
T	Periyot
t	Kalınlık
ΔP	Yük değişimi
Δf	Sehim değişimi
ε	Birim deformasyon
σ	Gerilme
σ_b	Basma gerilmesi
ρ	Yoğunluk
γ	Poisson oranı

Kısaltmalar	**Açıklama**
Al	Alüminyum
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic (Karbon Elyaf Takviyeli Plastik)
DIN	Deutsche Institut für Normung (Alman Standartları Enstitüsü)
EN	European Norm (Avrupa Standardı)
FCF	Frekans Cevap Fonksiyonu
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic (Cam Elyaf Takviyeli Plastik)
UNS	Unified Numbering System (Birleşik Numaralandırma Sistemi)
PP	Polipropilen
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SMP	Silyl Modified Polymer (Silil Modifiyeli Polimer)
Ti	Titanyum
3D	Three Dimension (Üç Boyutlu)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1.	Batarya taşıyıcı bileşenleri (Anonim, 2025).....	2
Şekil 2.1.	Sandviç kompozit malzeme.....	7
Şekil 2.2.	Çekirdek yapıların sınıflandırılması (Özer,2021).....	9
Şekil 2.3.	Sandviç çekirdek malzemelerin görece maliyet – performans karşılaştırılması(Gül, 2018).....	10
Şekil 2.4.	Uzatarak şekil verme yöntemi (Gül, 2018).....	11
Şekil 2.5.	Kıvırarak şekil verme yöntemi (Anonim, 2024).....	12
Şekil 2.6.	Havacılık sektöründe kullanılan sandviç malzemelere örnekler (Castanie ve ark. 2020).....	13
Şekil 2.7.	Otomobil potansiyel sandviç kompozit uygulama bölgeleri (Pflung ve ark. 2002).....	14
Şekil 2.8.	Üç nokta eğilme testinde sandviç yapıya etkiyen kuvvetler (Singh, Sheikh ve Behera, 2023).....	15
Şekil 2.9.	Ağırlık düşürme testi düzeneği şematik gösterimi (Bozkurt, 2022).....	17
Şekil 2.10.	Darbe testinde karşılaşılan eğri türleri çeşitleri a) kapalı eğri b) açık eğri.....	18
Şekil 2.11.	Ağırlık düşürme testindeki geri sekme, kısmi geri sekme, nüfuz etme, delip geçme durumları için örnek kuvvet-deplasman grafikleri.....	19
Şekil 2.12.	Deneysel modal analiz basitleştirilmiş akış şeması (Şekerci, 2013).....	21
Şekil 2.13.	Çekirdek yüksekliğine bağlı yük – sehim değerleri.....	24
Şekil 2.14.	Farklı kalınlık ve geometrilere sahip bal peteği yapılar (Duan, 2018).....	29
Şekil 2.15.	Tailor-folding yöntemi üretim şeması (Wei, 2019).....	30
Şekil 3.1.	Yaygın kullanılan çekirdek malzeme örnekleri.....	42
Şekil 3.2.	Polyester tül uygulanmış PP bal peteği çekirdek malzeme.....	43
Şekil 3.3.	Alüminyum ve Titanyum yüzey plakalarının numune boyutunda kesilmesi.....	46
Şekil 3.4.	Basma ve üç nokta eğilme testleri PP çekirdek malzemeleri.....	47
Şekil 3.5.	Kullanılan yapıştırıcı ve örnek bir silikon tabancası görseli…	49
Şekil 3.6.	Sac yüzeylere uygulanan yapıştırıcı malzeme.....	49
Şekil 3.7.	Yapıştırılan sandviç numunelerin oda sıcaklığında ağırlık altında kürlenmesi.....	50
Şekil 3.8.	Basma testi için hazırlanan test numuneleri.....	51
Şekil 3.9.	Üç nokta eğilme testi için hazırlanan numuneler.....	51
Şekil 3.10.	Ağırlık düşürme testi için hazırlanan numuneler.....	52
Şekil 3.11.	Basma testinde kullanılan düzenek.....	53
Şekil 3.12.	a) Al çekirdek malzemeli basma testi b) PP çekirdek malzemeli basma testi.....	54
Şekil 3.13.	Üç nokta eğilme testinde kullanılan düzenek.....	55
Şekil 3.14.	Farkı kalınlıklardaki Al sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme testi.....	56

Şekil 3.15. Farklı kalınlıklardaki PP sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme testleri……... 56
Şekil 3.16. Ağırlık düşürme test düzeneği bileşenleri…… 58
Şekil 3.17. Titreşim testi düzeneği……. 59
Şekil 3.18. Sonlu eleman örnekleri (Karaca, 2023)……... 61
Şekil 3.19. Ağ yapısının geometri temsiliyet uygunluğu (Karaca, 2023).. 61
Şekil 3.20. BMW i3 referans katı modeli……... 62
Şekil 3.21. a) Referans katı model ve b) sandviç yapılı model…….. 64
Şekil 3.22. Farklı çözüm ağı boyutlarına sahip modeller……... 65
Şekil 3.23. Direğe yandan çarpma simülasyon modeli…….. 68
Şekil 3.24. Çivi katı modeli…….. 69
Şekil 3.25 Penetrasyon simülasyon modeli……... 69
Şekil 3.26 Modal analiz simülasyon modeli……. 70
Şekil 4.1. Alüminyum çekirdek (5 mm) basma testi sonuçları…… 71
Şekil 4.2. Alüminyum çekirdek (10mm) basma testi sonuçları……... 72
Şekil 4.3. Alüminyum çekirdek (20 mm) basma testi sonuçları…….. 72
Şekil 4.4. Alüminyum çekirdek basma testi. a) Başlama anı b) Bitiş anı 73
Şekil 4.5. Alüminyum çekirdek basma test sonrası fotoğrafları. ……. 73
Şekil 4.6. Alüminyum çekirdek basma testi kombine sonuçları…….. 74
Şekil 4.7. Al - Al (5 mm) basma testi sonuçları……... 75
Şekil 4.8. Al - Al (10 mm) basma testi sonuçları……. 75
Şekil 4.9. Al - Al (20 mm) basma testi sonuçları……. 76
Şekil 4.10. Al - Al kombine basma testi sonuçları……. 76
Şekil 4.11. Ti - Al (5 mm) basma testi sonuçları……... 77
Şekil 4.12. Ti - Al (10 mm) basma testi sonuçları……. 77
Şekil 4.13. Ti - Al (20 mm) basma testi sonuçları……. 78
Şekil 4.14. Ti - Al kombine basma testi sonuçları……. 78
Şekil 4.15. Polipropilen çekirdek (5 mm) basma testi sonuçları…… 79
Şekil 4.16. Polipropilen çekirdek (10 mm) basma testi sonuçları……. 79
Şekil 4.17. Polipropilen çekirdek (20 mm) basma testi sonuçları……. 80
Şekil 4.18. Polipropilen çekirdek kombine basma testi sonuçları……. 80
Şekil 4.19. Polipropilen çekirdek malzeme basma testi. a) Başlama anı b) Bitiş anı…… 81
Şekil 4.20. Polipropilen çekirdek malzeme basma testindeki zamana bağlı deformasyon…… 81
Şekil 4.21. Al - PP (5 mm) basma testi sonuçları…….. 82
Şekil 4.22. Al - PP (10 mm) basma testi sonuçları…… 82
Şekil 4.23. Al - PP (20 mm) basma testi sonuçları…… 83
Şekil 4.24. Al - PP kombine basma testi sonuçları…… 83
Şekil 4.25. Ti - PP (5 mm) basma testi sonuçları…….. 84
Şekil 4.26. Ti - PP (10 mm) basma testi sonuçları……. 84
Şekil 4.27. Ti - PP (20 mm) basma testi sonuçları…… 84
Şekil 4.28. Ti - PP kombine basma testi sonuçları…… 85
Şekil 4.29. Basma testi maksimum kuvvet ortalamaları…… 85
Şekil 4.30. Al - Al (5 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları…… 86
Şekil 4.31. Al - Al (10 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları……. 86
Şekil 4.32. Al - Al (20 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları……. 87
Şekil 4.33. Al - Al kombine üç nokta eğilme testi sonuçları…… 87

Şekil 4.34.	Üç nokta eğilme testi sonrasında alüminyum çekirdek malzemede meydana gelen hasar……	88
Şekil 4.35.	Ti - Al (5 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları……	88
Şekil 4.36.	Ti - Al (10 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları……..	89
Şekil 4.37.	Ti - Al (20 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları……..	89
Şekil 4.38.	Ti - Al kombine üç nokta eğilme testi sonuçları……	90
Şekil 4.39.	Al - PP (5 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları……...	90
Şekil 4.40.	Al - PP (10 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları…….	91
Şekil 4.41.	Al - PP (20 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları…….	91
Şekil 4.42.	Al - PP kombine üç nokta eğilme testi sonuçları……	92
Şekil 4.43.	Ti - PP (5 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları……	92
Şekil 4.44.	Ti - PP (10 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları……..	93
Şekil 4.45.	Ti - PP (20 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları…….	93
Şekil 4.46	Ti - PP kombine üç nokta eğilme testi sonuçları……	94
Şekil 4.47	Darbe testi sonrası Al – Al (10 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri…….	95
Şekil 4.48	Darbe testi sonrası Al – Al (20 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri…….	96
Şekil 4.49	Darbe testi sonrası Ti – Al (10 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri……..	97
Şekil 4.50	Darbe testi sonrası Ti – Al (20 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri……	98
Şekil 4.51	Darbe testi sonrası Al – PP (10 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri……	99
Şekil 4.52	Darbe testi sonrası Al – PP (20 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri……	100
Şekil 4.53	Darbe testi sonrası Ti – PP (10 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri……	101
Şekil 4.54	Darbe testi sonrası Ti – PP (20 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri……	102
Şekil 4.55	Titreşim testi sonucu bulunan mod değerleri……...	103
Şekil 4.56	Çözüm ağı yakınsaması……...	104
Şekil 4.57	Referans model direğe yandan çarpma analiz sonucu……	104
Şekil 4.58	Sandviç yapılı model direğe yandan çarpma analiz sonucu…	105
Şekil 4.59	Direğe yandan çarpma analizi deformasyon bölgeleri……	105
Şekil 4.60	Referans model penetrasyon analizi hasar görüntüsü…….	106
Şekil 4.61	Sandviç yapılı model penetrasyon analizi hasar görüntüsü….	106
Şekil 4.62	Birinci mod izotropik görünüş…….	107
Şekil 4.63	İkinci mod izotropik görünüş……...	108
Şekil 4.64	Üçüncü mod izotropik görünüş……	108
Şekil 4.65	Dördüncü mod izotropik görünüş……	108
Şekil 4.66	Beşinci mod izotropik görünüş……	109
Şekil 4.67	Altıncı mod izotropik görünüş…….	109
Şekil 4.68	Referans model doğal frekans analizi……..	110
Şekil 4.69	Sandviç yapılı model doğal frekans analizi…….	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	2.1.	Kalınlığa bağlı sandviç yapıların mekanik özellikleri…….	8
Çizelge	3.1.	Testlerde kullanılan Al çekirdek özellikleri……	43
Çizelge	3.2.	Testlerde kullanılan PP çekirdek özellikleri……	44
Çizelge	3.3.	Alüminyum serilerinin mekanik özellikleri…….	45
Çizelge	3.4.	Titanyum Grade-2 mekanik özellikleri……	46
Çizelge	3.5.	Numune hazırlamada kullanılan yapıştırıcıya ait teknik veriler..	48
Çizelge	3.6	Titreşim testi ivmeölçer ve çekiç özellikleri……	60
Çizelge	3.7	2013 BMW i3 batarya muhafaza boyut ve özellikleri (Anonim, 2022)……	63
Çizelge	3.8	Sandviç malzemeleri performans karşılaştırması……	63
Çizelge	3.9	Direk ve pahlı çivi malzeme özellikleri……...	65
Çizelge	3.10	Johnson-Cook malzeme katsayıları (Acar vd., 2023)……..	66
Çizelge	4.1	Birim ağırlık başına sönümlenen enerji oranı……..	102
Çizelge	4.2	Titreşim testi ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması…….	109
Çizelge	4.3	Karşılaştırmalı modal analiz sonuçları……	110

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar, hareket etmek için ihtiyaç duyduğu enerjiyi elektrikten sağlayan araçlar için kullanılan genel bir ifadedir. Hızla artan insan nüfusuna paralel olarak artan araç sayısı, çevre kirliliği ve atmosfere salınan zararlı gazlardaki artışın bir nedenidir. Bu durumun önüne geçmek için yetkili kuruluşlar, araç üreticilerinin emisyon seviyelerini düşürmeleri yönünde yeni ve zorlayıcı standartlar belirlemektedirler. Bu doğrultuda CO_2 emisyonlarının azaltılması ve dünyamızda sınırlı miktarda bulunan fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması için elektrikli araçlar alternatif bir çözüm haline gelmiştir. Araç üreticileri de son yıllardaki elektrikli araç geliştirme ve üretme faaliyetlerini hızlandırmışlardır.

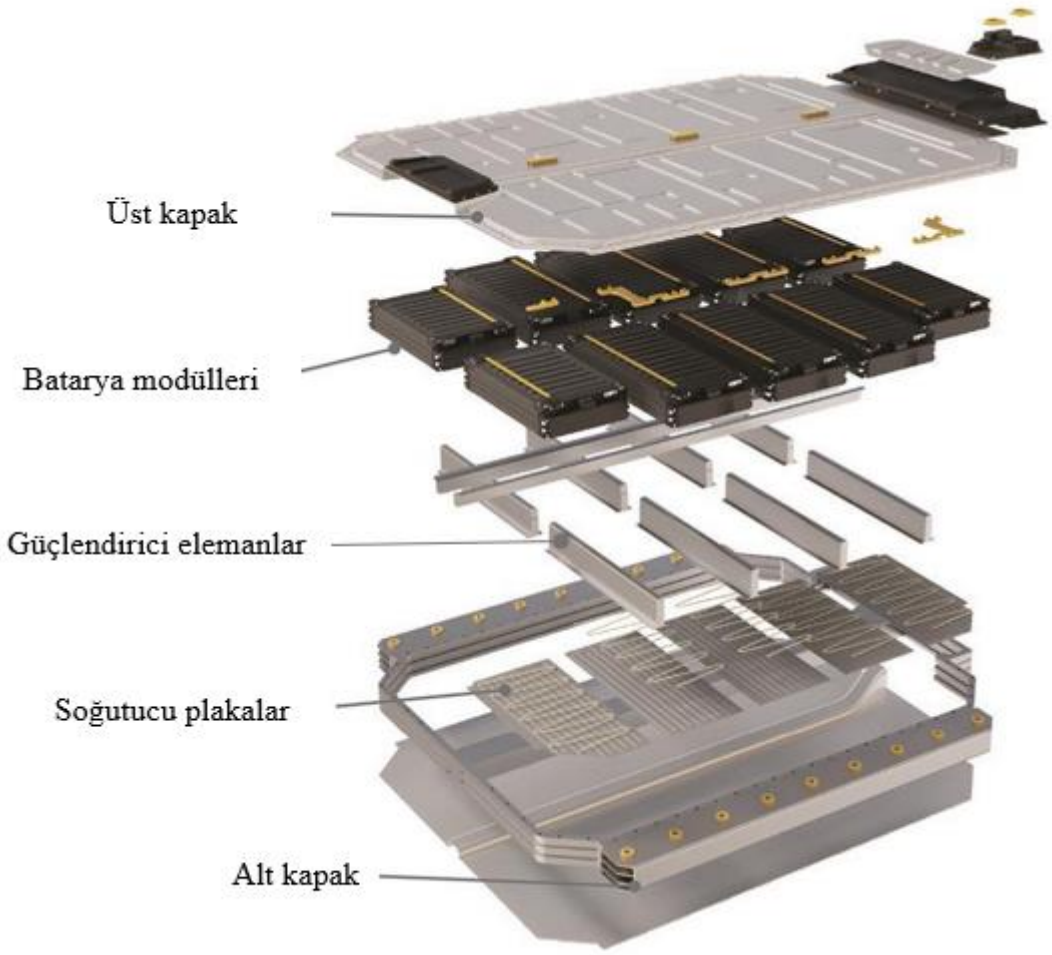
Elektrikli araç geliştirme çalışmaları artarak devam etmesine rağmen, araç üretim maliyetlerinin ve dolaylı olarak araç satış fiyatının yüksek olması, batarya dolum noktalarının yeteri kadar yaygınlaşmamış olması, batarya dolum sürelerinin uzun olması ve tek bir şarj ile gidilebilecek mesafenin (menzil) düşük olması elektrikli araçların daha da yaygın hale gelmemesinin önündeki başlıca nedenlerdir (Güven ve Rende 2017).

Elektrikli araçlarda güç kaynağı olarak kullanılan bataryalar aynı zamanda önemli bir maliyet kalemidir. Araç üreticilerinin maliyet düşürmek için batarya kapasitelerini düşürme yoluna gitmesi, beraberinde menzil sorununun daha ciddi boyutlara ulaşmasına sebep olmaktadır. Araç menzil artışı için üzerinde çalışılan yöntemlerden bazıları batarya değişim istasyonları kurularak boşalan bataryanın dolu batarya ile değiştirilmesi ya da araç hareket halindeyken bataryanın şarj edilebileceği karayollarının geliştirilmesidir. Bu çözüm yöntemleri büyük ekonomik yatırımlar ve altyapı çalışmaları gerektirmektedir. Menzil sorununa çözüm bulunabilecek bir diğer çalışma alanı ise araç ağırlığının azaltılmasıdır. Daha düşük yoğunluğa sahip, diğer bir deyişle daha hafif, malzemeler kullanılarak, mukavemet değerlerinden ödün vermeden araç parçalarının üretilmesi ile ağırlığın azaltılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Hafifletme potansiyelinin yüksek olduğu ve çalışmaların yoğunlaştığı kısımlardan bir tanesi de batarya taşıyıcılardır. Günümüzde kullanımda olan bir elektrikli araçta 2.28 m

x 1.63 m x 0.34m ölçülerinde bir batarya modülü yaklaşık 700 kg gelmektedir ve bu ağırlık toplam araç ağırlığının %28'ine karşılık gelmektedir (Anonim, 2023).

Batarya modül tasarımları araç üreticilerine bağlı olarak değişkenlik göstermekte olup, farklı alt bileşenlerden oluşmaktadır. Örnek bir batarya modülü Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Batarya taşıyıcı bileşenleri (Anonim, 2025)

Bu tez çalışmasında elektrikli araçlarda kullanılmak üzere kompozit esaslı batarya alt muhafaza sacı malzeme analizleri ve simülasyonu üzerine çalışılmış, 1mm kalınlığa sahip alüminyum ve titanyum yüzey malzemeler ile alüminyum ve polipropilen malzemeden yapılmış 5 mm, 10 mm ve 20 mm kalınlığa sahip bal peteği geometrisine sahip çekirdek malzemeler kullanılarak sandviç malzeme üretimi yapılmıştır. ASTM

standartlarına göre numunelere basma testi, üç nokta eğilme testi ve ağırlık düşürme testleri yapılmıştır. Testler sonucu elde edilen mekanik özellikler grafikler ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Bu testler ile yüzey malzemesinin, çekirdek malzemesinin ve çekirdek malzeme kalınlığının sandviç yapı mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Ardından batarya taşıyıcının en iyi mekanik performans gösteren sandviç yapı ile katı modeli oluşturulmuş ve uluslararası standartlarca belirlenmiş direğe yandan çarpma ve penetrasyon simülasyonları yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kuramsal Temeller

2.1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan ve sonuç olarak birleşen malzemelerden daha üstün özelliklere sahip olan malzemelerdir (Gibson, 2016).

Mühendislik alanında karşılaşılan birçok uygulamada, geleneksel malzemeler tek başına yeterli olmamaktadır. Gerekli özellikleri sağlamak amacıyla, farklı malzemelerin avantajlarını birleştirerek yeni malzemeler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, kompozit malzemeler önemli bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu malzemeler, bileşenlerinin her birinin güçlü yönlerini bir araya getirerek daha üstün performans sunar. Ayrıca, kompozit malzemeler hafiflik, dayanıklılık ve korozyon direnci gibi özellikleriyle de tercih edilmektedir.

Kompozit malzemelerin kullanımı, insanlık tarihi kadar eskilere dayanmaktadır. İlk örnekler arasında, antik Mısır'da tuğla yapımında kullanılan saman ve çamur karışımı bulunur. Modern anlamda kompozit malzemelerin gelişimi ise 20. yüzyılda başlamıştır. Özellikle II. Dünya Savaşı sırasında, hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç, kompozit malzemelerin gelişimini hızlandırmıştır. 1940'lı yıllarda cam elyafı takviyeli polimerlerin keşfi, bu alandaki önemli bir dönüm noktası olmuştur. 1970'li yıllarda karbon elyafı ve aramid elyafı gibi ileri teknolojili takviye malzemelerinin keşfi, kompozit malzemelerin performansını önemli ölçüde artırmıştır. 21. yüzyılda, nanoteknoloji ve ileri üretim tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri daha da iyileştirilmiş ve bu malzemeler sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler göz önünde bulundurularak tasarlanmaya başlanmıştır. Günümüzde, ileri teknolojiye sahip kompozit malzemeler, havacılık, otomotiv, inşaat ve spor ekipmanları gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Havacılık sektöründe kompozit malzemelerin kullanımına bir örnek Airbus A350 XWB uçağıdır. Bu uçak, geniş kanatları ve gövdesinde kullanılan karbon fiber takviyeli polimer kompozitler sayesinde daha hafif ve daha dayanıklı bir yapıya sahiptir. Karbon fiber kompozitlerin kullanımı, uçağın yakıt verimliliğini artırırken, aynı zamanda mükemmel performans ve uzun ömürlü bir tasarım sunar (Pritchard, 2016). Diğer bir örnek ise Boeing 787 Dreamliner modelidir. Bu uçak, yapısal ağırlığının yaklaşık %50'sini kompozit malzemelerden oluşturarak, geleneksel alüminyum malzemelere göre daha hafif, daha dayanıklı ve yakıt verimliliği yüksek bir tasarım sunar. Bu yenilikçi yaklaşım, uçuş menzilini artırırken işletme maliyetlerini ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Boeing, 2021).

Otomotiv sektöründe kompozit malzemelerin kullanımı, araçların hafifletilmesi ve performanslarının artırılması amacıyla giderek artmaktadır. Örneğin, BMW i3 elektrikli araç, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerden oluşan hafif bir şasiye sahiptir, bu da aracın menzilini ve performansını iyileştirir. Chevrolet Corvette C8'de ise alüminyum şasi ve karbon fiber panellerin kullanımıyla hafif bir yapı elde edilmiş, bu da aracın hızını ve yakıt verimliliğini artırmıştır. McLaren P1 gibi süper otomobillerde ise karbon fiber monokok şasi kullanılarak ağırlık minimize edilmiş ve aerodinamik performans artırılmıştır.

Kompozit malzemeler, birçok endüstride avantajlı özellikler sunmaktadır. Öncelikle, kompozitlerin hafif olmaları, uygulamalarında kullanıldığı sistemlerin ağırlığını azaltır, bu da ulaşım araçlarında yakıt verimliliğini artırır ve performansı yükseltir. Ayrıca, kompozitlerin yüksek mukavemet-gövde oranı, geleneksel malzemelere kıyasla daha güçlü ve dayanıklı yapılar sağlar. Tasarım esnekliği ve şekillendirilebilme özellikleri, karmaşık geometrilerin üretiminde ve özelleştirilmiş parçaların yapımında büyük avantajlar sunar. Bununla birlikte, kompozit malzemelerin üretim süreci genellikle yüksek maliyetlidir ve karmaşık kalıpların yapılması gerektiğinden zaman alıcı olabilir. Ayrıca, malzeme birleşimlerindeki potansiyel hatalar, yapısal bütünlüğü ve güvenilirliği etkileyebilir. Geri dönüşüm süreçleri karmaşık olabilir ve bazı kompozit malzemelerin geri dönüşümü zor olabilir. Son olarak, bazı kompozit malzemeler yüksek sıcaklık veya kimyasal etkilere karşı dirençsiz olabilir, bu da belirli uygulamalarda kullanımlarını

sınırlayabilir. Bu nedenlerle, kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları, uygulama alanına ve kullanım koşullarına göre dikkatlice değerlendirilmelidir.

Kompozit malzemeler genellikle takviye malzemesi ve matris malzemesi olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Takviye malzemesi, fiberler, partiküller veya levhalar şeklinde olabilir ve malzemenin mekanik özelliklerini artırır. Matris malzemesi ise takviye malzemesini çevreleyen bir bağlayıcıdır ve genellikle polimer matris, seramik matris veya metal matris şeklinde bulunur. Bu temel bileşenlere göre, kompozit malzemeler farklı türlerde sınıflandırılabilir. Örneğin, fiber takviyeli kompozitler, takviye malzemesi olarak fiberlerin kullanıldığı ve genellikle polimer matrisli veya metal matrisli kompozitlerdir. Bu sınıflandırmalar, kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemekte ve belirli uygulamalara uygun seçimler yapılmasına yardımcı olmaktadır (Mallick 2007).

Kompozit malzemelerin bir alt grubu olan yapısal kompozitler, yapısal uygulamalarda kullanılan ve mekanik dayanıklılık gerektiren çeşitli malzeme türlerini ifade eder. Bu tür kompozitler, genellikle iki ana bileşen olan takviye malzemesi ve matris malzemesinden oluşur. Yapısal kompozit çeşitleri arasında öne çıkanlar şunlardır:

- **Fiber Takviyeli Kompozitler:** Fiber takviyeli kompozitler, genellikle polimer matrisle birlikte kullanılan fiber takviye malzemelerinden oluşur. Bu tür kompozitler, cam fiber, karbon fiber veya aramid fiber gibi yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılmasıyla üretilir.

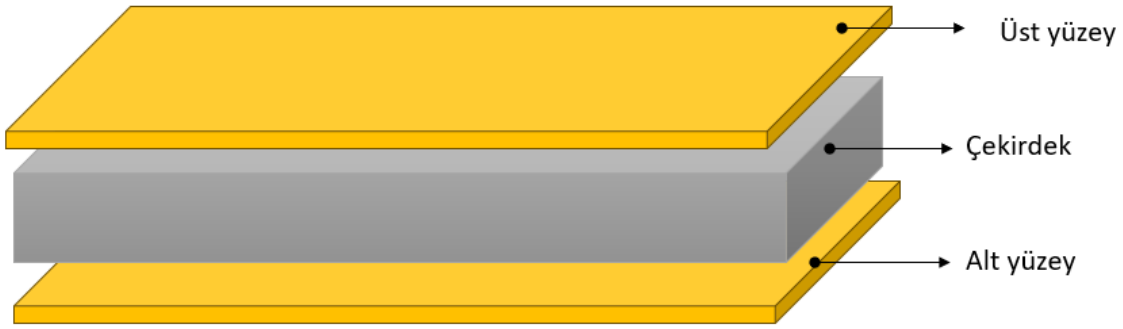
- **Levha Takviyeli Kompozitler:** Levha takviyeli kompozitler, genellikle iki veya daha fazla katman halindeki levhaların matris malzemesiyle birleştirilmesiyle oluşur. Bu tür kompozitler, laminat yapıları oluşturmak için kullanılır ve özellikle yapısal mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

- **Sandviç Yapılı Kompozitler:** Sandviç yapılı kompozitler, genellikle iki sert yüzey arasına yerleştirilmiş hafif bir dolgu malzemesi ile karakterizedir. Bu tür kompozitler, hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle havacılık ve denizcilik gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

- **Hibrit Kompozitler:** Hibrit kompozitler, farklı türdeki takviye malzemelerinin veya matris malzemelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Bu tür kompozitler, farklı özellikleri bir araya getirerek belirli uygulamalara yönelik özel çözümler sağlar.

2.1.2. Sandviç Kompozit Malzemeler ve Sınıflandırılması

Sandviç levhalar; iki ince plaka ve nispeten daha kalın bir çekirdek yapının bir ara yüzey yapıştırıcısı ile birleştirilmesiyle elde edilen ve yüksek mukavemet/yoğunluk oranına sahip olan tabakalı bir kompozit malzeme olarak tanımlanabilir (Kıyak ve Kaman 2019). Sandviç yapılı kompozit malzemeler, genellikle fiber takviyeli kompozitler veya levha takviyeli kompozitler gibi temel kompozit malzeme türlerinin özel bir türüdür. Bu malzemeler, çoğunlukla bir takviye malzemesi (genellikle fiberler) ve bir matris malzemesi (genellikle bir polimer matris) kombinasyonunu içerir. Ancak, sandviç yapılı kompozitler, bu temel bileşenlere ek olarak, aralarında yer alan hafif dolgu malzemesini içerir. Dolgu malzemesi, yapıya ekstra mukavemet ve sertlik kazandırmak için tasarlanmıştır ve genellikle köpük, balsa ahşap veya hafif kompozit malzemelerden oluşur. Bu şekilde, sandviç yapılı kompozit malzemeler, diğer kompozit malzeme türlerine kıyasla daha düşük yoğunluk ve daha yüksek mukavemet ve rijitlik sağlayabilirler.



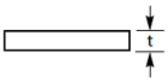
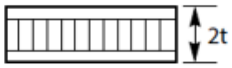
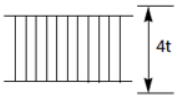
Şekil 2.1. Sandviç kompozit malzeme

Sandviç paneller Şekil 2.1'de gösterildiği gibi 2 adet ince ve yüksek mukavemetli yüzey tabakası ve hafif bir çekirdek malzeme olmak üzere en az 3 ayrı tabakanın

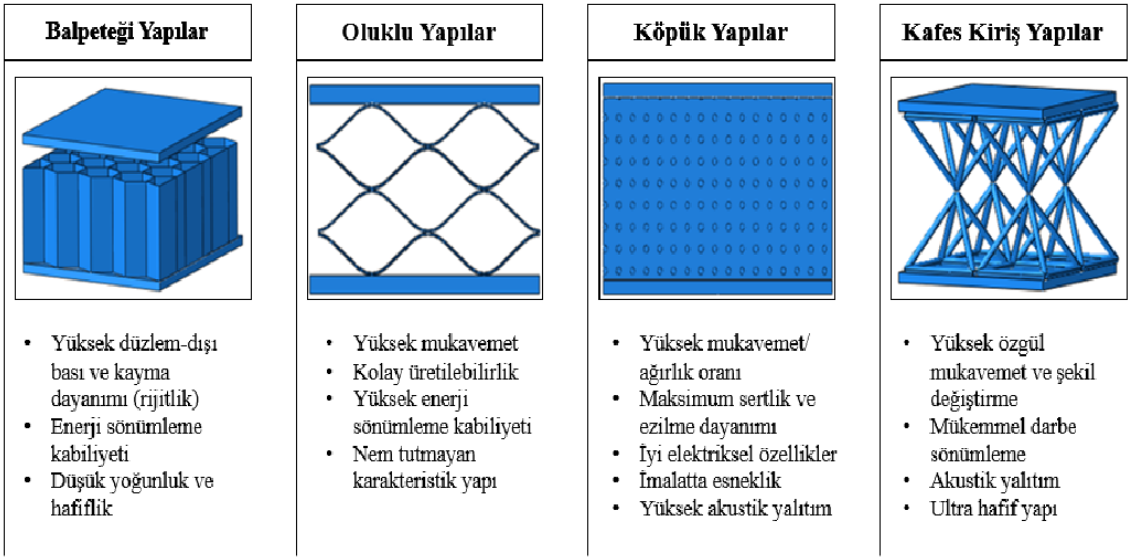
birleşiminden oluşmaktadır (Deng 2007). Mukavemet değeri yüksek olan yüzey tabakaları ile malzemeye dayanım özelliği kazandırılırken, yoğunluğu düşük çekirdek malzeme kullanılarak da malzemeye hafiflik özelliği verilmektedir. Çekirdek malzemenin temel görevi dış yüzeyler arasındaki mesafeyi muhafaza etmektir çünkü bu mesafe sandviç malzemenin kesit alanına ait atalet momentinin ve de bükülme rijitliğinin yüksek olmasını sağlamaktadır (Tortoç 2009).

Sandviç yapılarda kullanılan çekirdek malzeme tek başlarına değerlendirildiğinde düşük dayanıma sahip olduğu söylenebilir. Fakat kalınlık artışı ve kullanılan yüzey malzemelerin de yapıya kattığı mukavemet özelliğiyle genel yapının özgül ağırlık başına düşen eğilme dayanım oranı oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Çekirdek yapı kalınlık artışının ağırlık, rijitlik ve dayanıma etkisinin göreceli olarak karşılaştırılması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Kalınlığa bağlı sandviç yapıların mekanik özellikleri (Yardımcı, 2019)

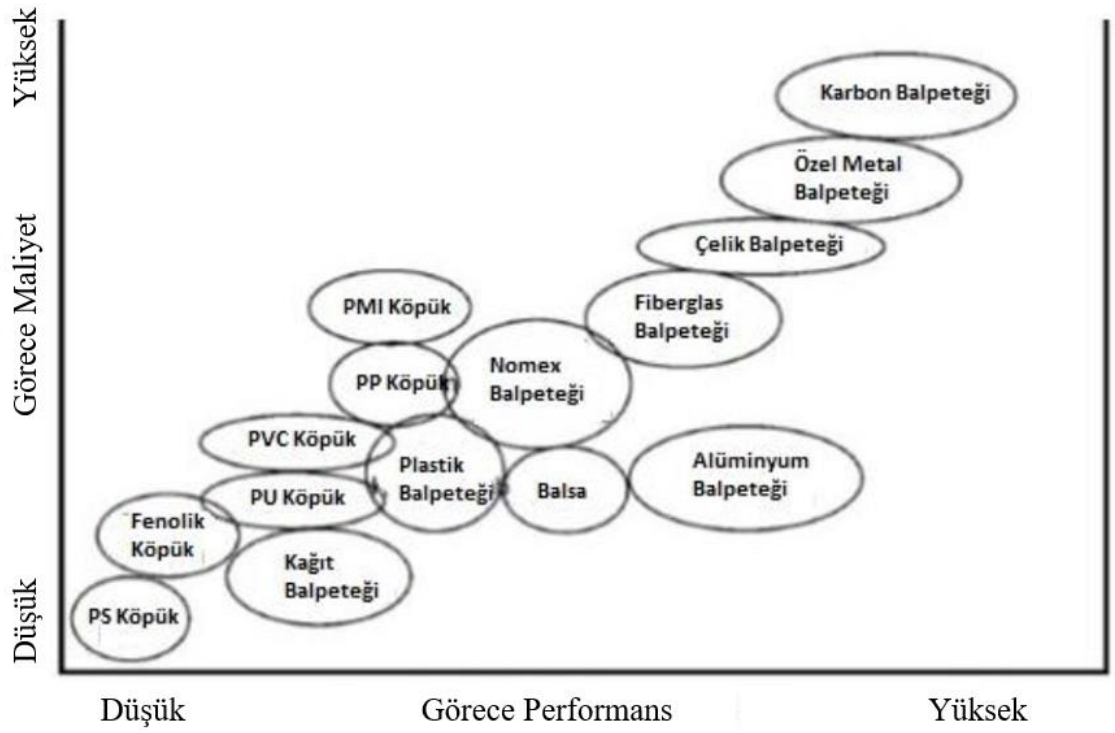
	Katı parça *Kalınlık = t* 	*Sandviç malzeme* *Kalınlık = 2t* 	*Sandviç malzeme* *Kalınlık = 4t* 
Görece rijitlik	100	700	3700
Görece dayanım	100	350	925
Görece ağırlık	100	103	106

Gelişen teknoloji ve ilerleyen modern imalat yöntemleri neticesinde farklı malzeme ve geometrilere sahip sandviç yapılar üretilip testleri yapılmaktadır. Sandviç yapılı malzemeler temel olarak içerdiği çekirdek malzemesine ve çekirdek malzeme geometrisine göre 4 farklı yapısal sınıfa ayrılmaktadır. Şekil 2.2'de sınıflandırma ve sınıflara ait özellikler gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Çekirdek yapıların sınıflandırılması (Özer, 2021)

Geliştirilen sandviç malzemelerin kullanım alanına göre bu malzemelerden beklenen özellikler farklılık göstermektedir. Hedeflenen mekanik, termal ve elektriksel özelliklerin elde edilebilmesi için sandviç yapının yüzey ve çekirdek malzeme seçimi kritik öneme sahiptir. Günümüzde kullanılmakta olan farklı çekirdek malzemeleri için yapılmış olan karşılaştırmalı maliyet – performans değerlendirmesi Şekil 2.3'te verilmiştir.



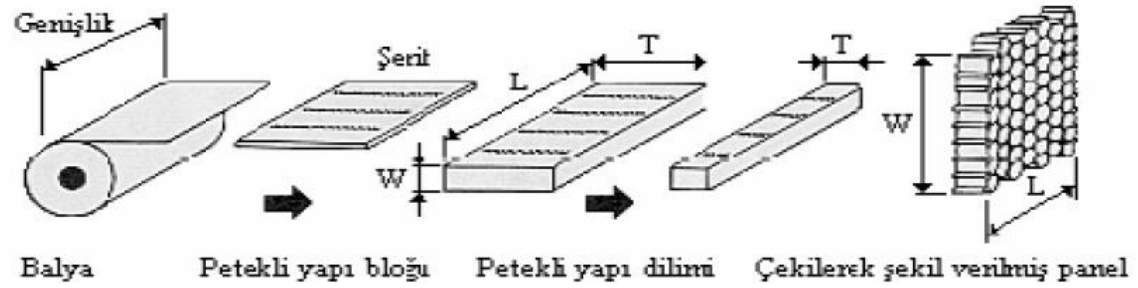
Şekil 2.3. Sandviç çekirdek malzemelerin görece maliyet – performans karşılaştırması (Gül, 2018)

2.1.3. Bal Peteği Çekirdek Malzeme Üretim Yöntemleri

Petek malzeme üretim sürecinde en yaygın kullanılan üretim yöntemleri uzatarak şekil verme ve kıvırarak şekil verme yöntemleridir.

Uzatarak şekil verme yönteminin temel adımları; rulo formunda bulunan çekirdek malzemesine yapıştırıcı sürülmesi, çekirdek malzemesinin üst üste dizilmesi ve istenilen kalınlıklarda kesilip çekilmesi şeklinde tanımlanır. Bu yöntem özellikle alüminyum ve aramid fiberler gibi malzemelerden yapılan bal peteği çekirdeklerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Uzatarak şekil vermede malzeme levhaları yapışkan çizgilerle birbirine yapıştırılır ve daha sonra genişletilerek bal peteği yapısı oluşturulur. İstenen malzemenin ince levhaları, belirli bir desenle yapışkan çizgilerle kaplanır ve bu yapışkan çizgiler bal peteği hücrelerinin kenarlarını oluşturacak şekilde düzenlenir. Yapışkanla kaplanmış levhalar üst üste istiflenir ve sıcaklık ve/veya basınç uygulanarak yapışkanın kürlenmesi (sertleşmesi) sağlanır. Bu aşamada levhalar birbirine sağlam bir şekilde yapışır. İstiflenmiş ve yapıştırılmış levha bloğu, genişletilmeden önce istenen

genişlikte dilimlenir. Kesilmiş levha bloğu, uçlarından çekilerek genişletilir. Bu çekme işlemi sırasında levhalar birbirinden ayrılarak aralarında boşluklar oluşur ve bal peteği hücreleri meydana gelir. Genişletilen yapı, üç boyutlu bir bal peteği şekline dönüşür. Genişletilen bal peteği yapısı, istenen boyut ve şekle getirilir. Gerekirse, ek işlemlerle kenarları düzeltilir veya yüzeyler işlenir. Uzatarak şekil verme yönteme ait üretim akış şeması Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

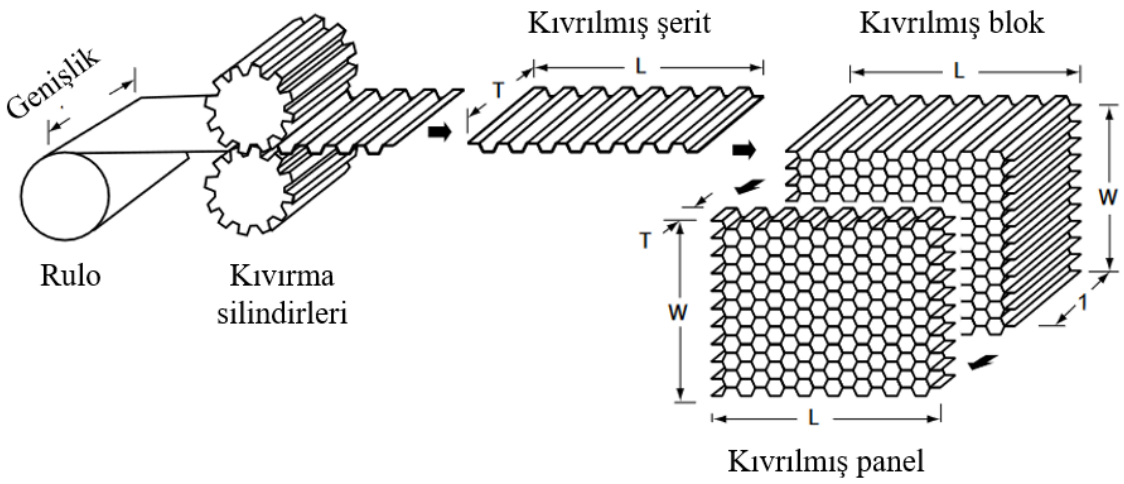


Şekil 2.4. Uzatarak şekil verme yöntemi (Gül, 2018)

Kıvırarak şekil verme yöntemi ise kağıt, termoplastikler ve metaller gibi malzemelerden yapılan bal peteği yapılar için kullanılan bir üretim tekniğidir. Bu yöntem, malzeme levhalarının dalgalandırılması ve ardından birbirine yapıştırılması yoluyla bal peteği yapısının oluşturulmasını içerir.

Bu yöntemde ilk olarak malzeme levhaları dalgalı bir desen oluşturmak için dalgalandırma silindirlerinden geçirilir. Dalgalandırılmış levhalar, bal peteği hücrelerinin oluşmasını sağlayacak şekilde birbirine yapıştırılır. Her bir katman, önceki katmandan belirli bir mesafe ile kaydırılarak istiflenir ve böylece hücreler arasında boşluklar meydana gelir. Daha sonra bu yapıştırılmış yığın sertleştirilir ve istenen şekil ve boyutta kesilir.

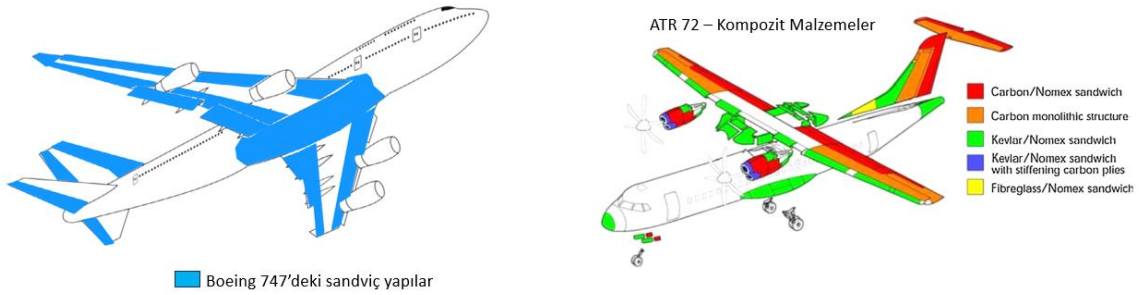
Bu yöntem, genellikle ambalaj malzemeleri, inşaat için hafif paneller ve otomotiv parçaları gibi uygulamalarda kullanılır. Bal peteği yapılar, düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemetleri ile bilinirler. Ayrıca darbe enerjisini emme kapasitesi yüksektir, bu da çarpışma koruması sağlar. Çekirdek yapısının boşluklu doğası, ısı ve ses yalıtımı sağlar. Kıvırarak şekil verme yöntemine ait üretim akış şeması Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2. 5. Kıvırarak şekil verme yöntemi (Anonim, 2024)

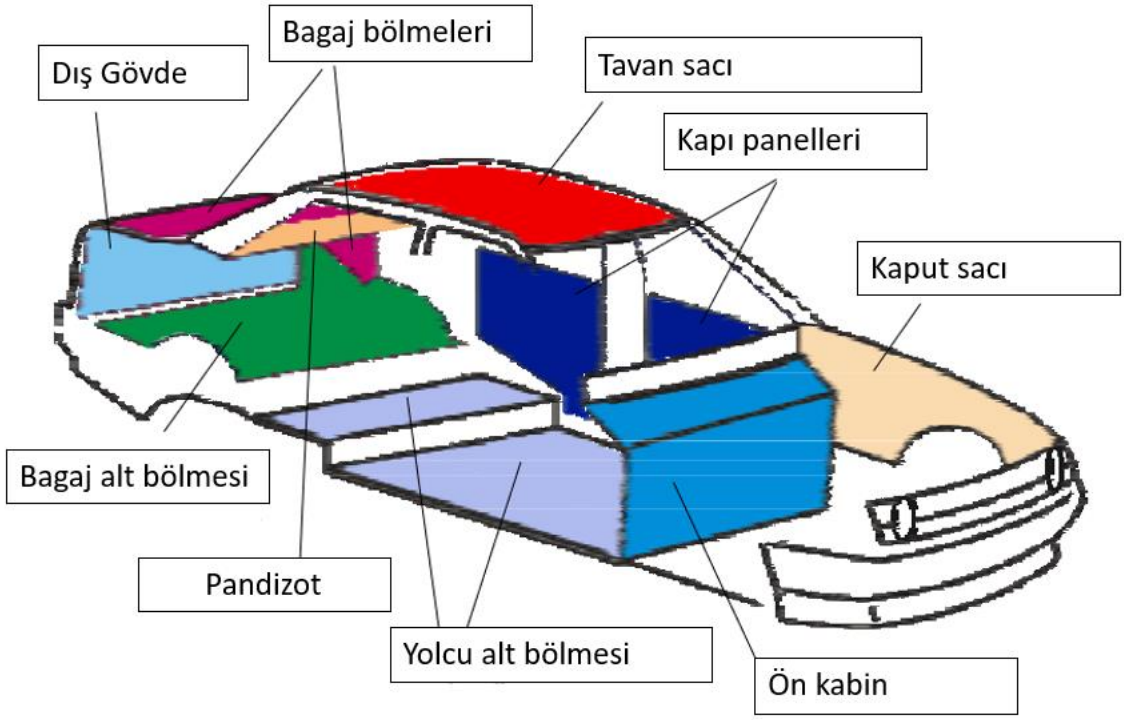
2.1.4. Sandviç Kompozit Kullanım Alanları

Sandviç kompozitler, hafiflikleri, yüksek mukavemetleri ve rijitlikleri nedeniyle geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Özellikle havacılık, denizcilik, otomotiv, inşaat ve rüzgar enerjisi gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Havacılık endüstrisinde, uçak gövdeleri, kanatlar ve pervaneler gibi yapısal bileşenlerde yaygın olarak kullanılan sandviç kompozitler, uçağın ağırlığını azaltırken dayanıklılığını artırır (Şekil 2.6). Denizcilik endüstrisinde, tekne gövdeleri, pervane kanatları ve rüzgar sörfü panoları gibi suya dayanıklı yapılar için tercih edilirler. Otomotiv endüstrisinde ise, araçların gövde panelleri, iç döşemeler ve şasi parçaları gibi birçok uygulamada hafiflik ve mukavemet gereksinimlerini karşılarlar. İnşaat sektöründe, yalıtım panelleri, cephe kaplamaları ve döşeme malzemeleri gibi birçok yapısal ve dekoratif uygulamada kullanılırlar. Ayrıca, rüzgar enerjisi sektöründe, rüzgar türbin kanatları gibi yüksek performanslı yapısal bileşenlerde de yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu alanlarda, sandviç kompozitlerin hafiflikleri, dayanıklılıkları ve tasarım esneklikleri, geniş bir kullanım potansiyeline sahip olmalarını sağlayan en temel unsurlar arasında sayılabilmektedir.



Şekil 2.6. Havacılık sektöründe kullanılan sandviç malzemelere örnekler (Castanie ve ark. 2020)

Otomotiv sektöründe, sandviç panellerin geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Bu paneller, araçların gövde panellerinde sıkça kullanılmaktadır. Özellikle kapı panelleri, bagaj kapakları ve tavan panelleri gibi büyük yüzeylerde, sandviç panellerin hafiflik ve yüksek mukavemet avantajlarından yararlanılır. İç döşemelerde de sandviç paneller sıklıkla tercih edilir. Koltuk sırtlıkları, konsol panelleri ve bagaj bölmeleri gibi iç bileşenlerde kullanılan sandviç paneller, estetik görünümünü iyileştirirken, dayanıklılık ve uzun ömür sağlarlar. Ayrıca, bazı yüksek performanslı ve spor otomobillerde, sandviç paneller şasi parçalarında da kullanılabilir. Özellikle şasi gövdesinin hafifletilmesi ve sertliğin artırılması için tercih edilen sandviç paneller, ön ve arka tamponlar, süspansiyon kuleleri ve motor karteri gibi bileşenlerde kullanılabilirler. Bu örnekler, sandviç panellerin otomotiv sektöründeki çeşitli uygulamalarını ve bu panellerin kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca taşıtlarda sandviç malzemelerin kullanım potansiyelinin olduğu kısımlar Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



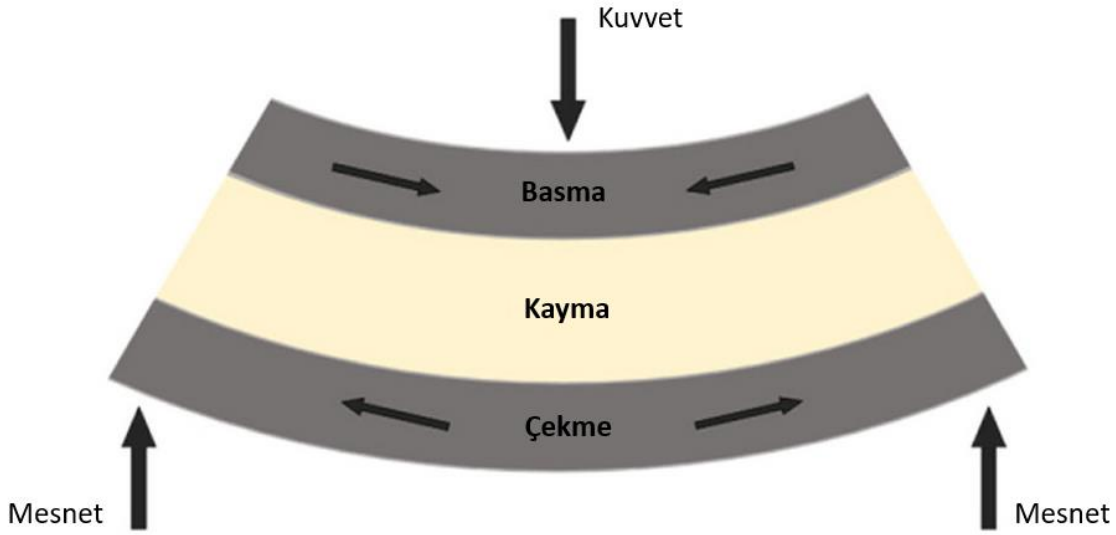
Şekil 2.7. Otomobil potansiyel sandviç kompozit uygulama bölgeleri (Pflung ve ark. 2002)

2.1.5. Sandviç Kompozit Malzeme Testleri

Sandviç kompozit malzemelerin mekanik ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan bazı testler aşağıda listelenmiştir:

- Eğilme testi
- Basma testi
- Düşük ve yüksek hızda darbe testi
- Titreşim testleri

Eğilme testleri, sandviç kompozitlerin performansını ve dayanıklılığını değerlendirmek için önemli bilgiler sağlar. Bu testler, malzemenin maksimum yük taşıma kapasitesini, elastik deformasyon yeteneğini, kırılma davranışını ve çekirdek ve yüzey malzemelerinin birlikte nasıl çalıştığı hakkında bilgi edinilmesi için yapılmaktadır. Üç nokta eğilme testinde numune iki destek noktası arasında yerleştirilir ve ortasından bir kuvvet uygulanır. Üç nokta eğilme testinde malzemeye etki eden kuvvetler Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Üç nokta eğilme testinde sandviç yapıya etkiyen kuvvetler (Singh, Sheikh ve Behera, 2023)

Üç nokta eğilme testi, numunenin eğilme mukavemetini ve elastik modülünü belirlemek için kullanılır. Dört nokta eğilme testinde ise numune iki destek noktası arasında yerleştirilir ve iki üst noktadan simetrik olarak kuvvet uygulanır. Dört nokta eğilme testi, daha homojen bir gerilme dağılımı sağlar ve özellikle yüzey katmanların ve çekirdeğin birlikte davranışını anlamak için kullanılır. Üç nokta eğilme testi sonucu eğilme modülü hesabı denklem 2.1'de verilmiştir.

$$E_b = \frac{L^3.\Delta P}{4b.\Delta f.h^3} \tag{2.1}$$

E_b: Eğilme modülü (MPa)
L: Destek noktaları arasındaki mesafe (mm)
ΔP: Yük değişimi (N)
b: Sandviç genişliği (mm)
Δf: Sehim değişimi (mm)
h: Yüzey kalınlığı (mm)

Basma testi ise sandviç malzemelerin basma kuvvetlerine karşı gösterdiği tepkiyi ölçmek için kullanılan test yöntemidir. Sandviç kompozitlerde basma testi, yüzey katmanları ve çekirdek malzemenin birlikte nasıl çalıştığını anlamak ve bu

malzemelerin basma kuvvetleri altında davranışlarını incelemek için oldukça önemlidir. Sandviç malzemelere yapılacak basma testi için ASTM C365 standardı kullanılmaktadır. Basma testi sonucunda elde edilen verilerden malzemeye ait elastik modül (E) hesaplanması denklem 2.3'de verilmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2.2}$$

E: Elastik modülü

σ: Gerilme

ε: Birim deformasyon

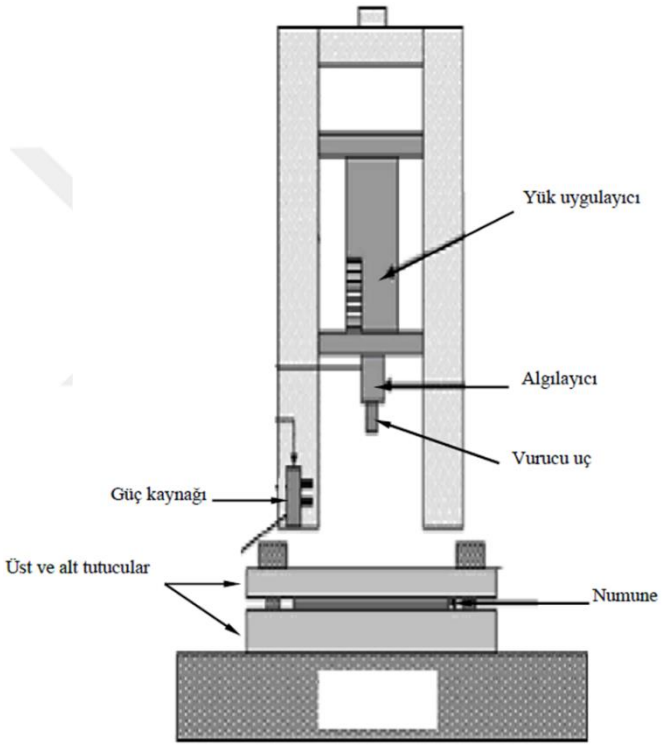
Basma testi sonucunda hesaplanabilecek diğer parametreler ise malzemenin dayanabildiği maksimum bası kuvveti, malzemenin plastik deformasyona başladığı nokta (akma noktası) ve deformasyon miktarıdır. Çekirdek malzemede meydana gelen gerilme denklem 2.3'te verilmiştir. Burada σ_b basma gerilmesi, F basma kuvveti, a ve b ise numuneye ait en ve boy ölçüleridir.

$$\sigma_b = \frac{F}{a.b} \tag{2.3}$$

Malzemelere yapılan darbe testlerini, vurucu parçanın hızına bağlı olarak dört gruba ayırmak mümkündür. Eğer vurucunun hızı 1-10 m/s arasında ise bu testler düşük hızlı, 10-50 m/s arasında ise orta hızlı, 50-1000 m/s arasında ise yüksek hızlı ya da diğer bir ifade ile balistik ve 2-5 km/s arasında ise hiper hızlı darbe testi olarak adlandırılır. Darbe sonucu parçada meydana gelen hasara bağlı olarak kullanım süresi ve servis ömründe önemli seviyede düşüşler yaşanabilmektedir. Bu nedenle darbeye maruz kalan malzemelerde oluşan hasarların belirlenmesi mühendislik uygulamaları ve yaklaşımları açısından oldukça önem taşımaktadır. Oluşabilecek hasarları önceden belirlemek için bazı test yöntemleri geliştirilmiştir. Darbe yüklemesi altındaki kompozit sandviç malzemelerin davranışını ve oluşabilecek hasar mekanizmalarını tespit etmek amacıyla uygulanan test yöntemlerinden birisi de düşük hızda ağırlık düşürme darbe testidir (Bozkurt, 2022).

Düşük hızlı darbeler genellikle çarpışma anında malzemenin iç yapısında deformasyona yol açan darbe türleridir. Düşük hızlı darbeler bazen düşük enerjili darbeler olarak da ifade edilir. Düşük hızlı darbelerde, malzeme iç yapısının darbeye tepki verebilmesi için yeterli temas süresi bulunur ve bu sayede daha fazla enerji elastik olarak soğurulur. Bu durum, malzemenin dinamik yapısal tepkisini oldukça önemli hale getirir. Buna karşın, yüksek hızlı darbelerde tepki, malzeme içinde yayılan gerilme dalgası tarafından belirlenir. Bu durumda malzemenin darbeye yanıt vermesi için yeterli zamanı olmaz ve hasar yalnızca çok küçük bir alanda meydana gelir.

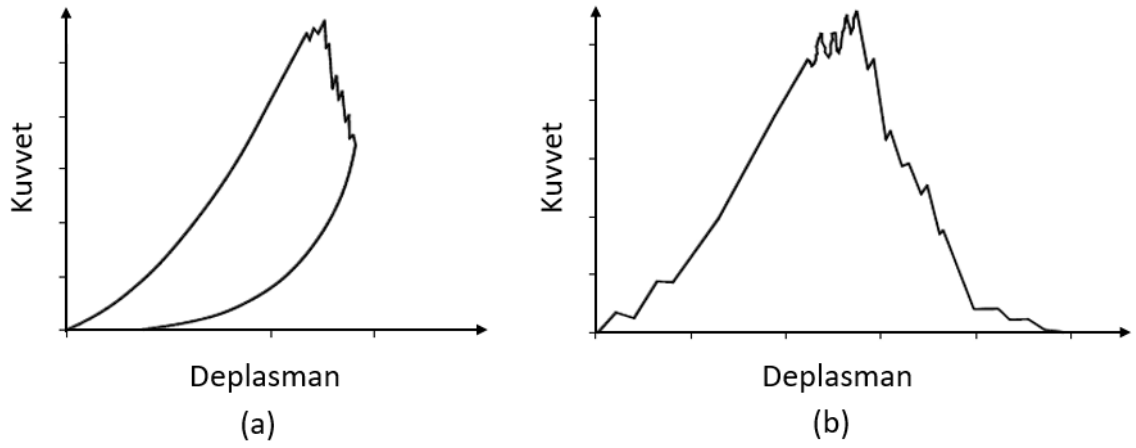
Düşük hızlı ağırlık düşürme testi, vurucu ucun belirli bir yükseklikten serbest bırakılması sonucu malzemeye çarpması şeklinde uygulanan test yöntemidir. Bu yöntem ile malzemede oluşan hasarlar ve test parçasının absorbe ettiği enerji miktarı belirlenebilir. Ağırlık düşürme darbe testine ait şematik gösterim Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Ağırlık düşürme test düzeneği şematik gösterimi(Bozkurt, 2022)

Darbe testinde, çarpma ucuna bağlı olan kuvvet sensörü aracılığıyla kuvvet-zaman eğrisi oluşturulur. Test cihazından alınan veriler, yardımcı bir yazılım vasıtasıyla

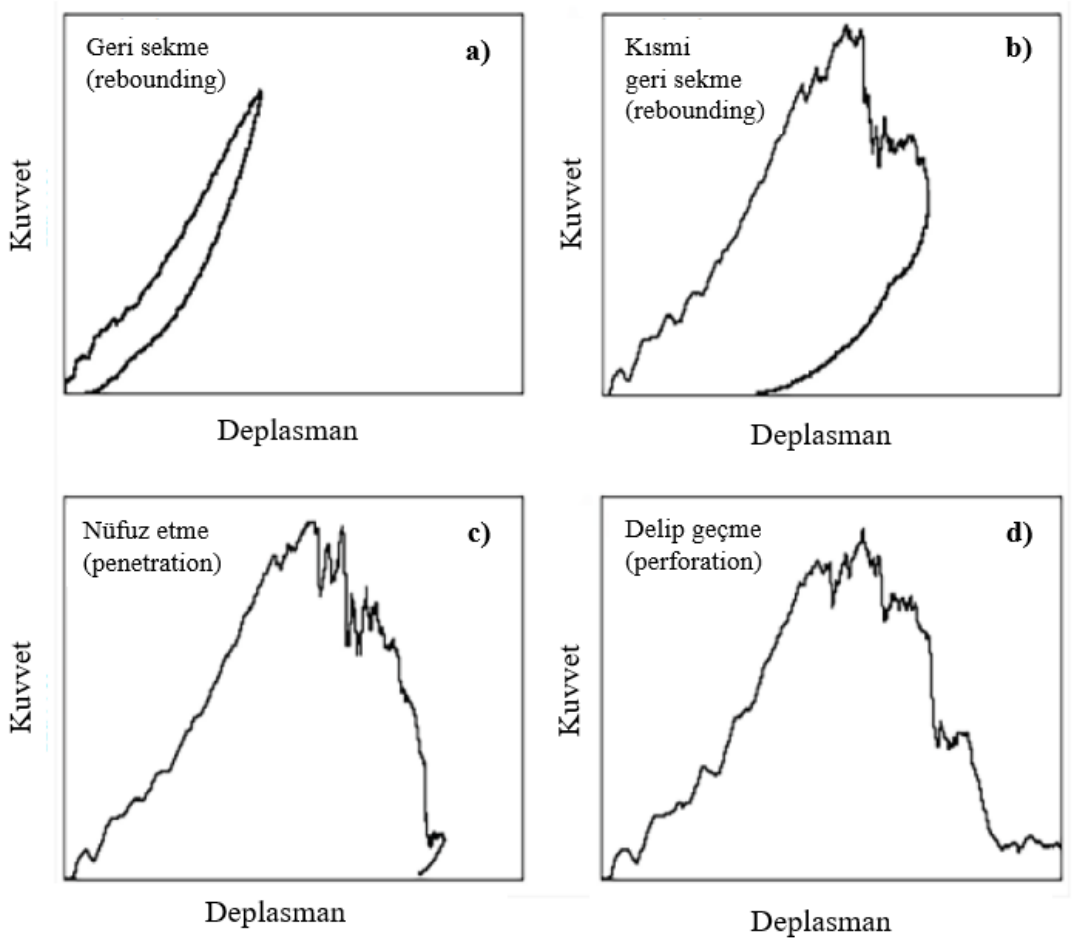
kinematik denklemlerle birleştirilerek çeşitli grafikler (örneğin kuvvet-deplasman, absorbe edilen enerji-zaman, hız-zaman gibi) ve veriler elde edilir. Bu veriler, darbe testlerini yorumlamak için kullanılır. Özellikle kuvvet-deplasman eğrileri, darbe sırasında malzemenin tepkisinde meydana gelen değişimleri ve oluşan hasarları analiz etmek için değerli bilgiler sunar. Uygulanan enerji seviyesine bağlı olmakla birlikte, elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri genellikle kapalı veya açık eğri olarak oluşur. Şekil 2.10(a)'da gösterildiği gibi kapalı eğriler delinmemiş numuneden elde edilirken, Şekil 2.10(b)'deki gibi açık eğriler delinme eşiğindeki ya da delinmiş malzemelerin hasar mekanizmalarını göstermektedir. Eğrilerin altında kalan alan ise darbe süresince test edilen malzeme tarafından absorbe edilen enerji değişimini vermektedir (Engin, 2011).



Şekil 2.10. Darbe testinde karşılaşılan eğri çeşitleri (a) kapalı eğri, (b) açık eğri

Darbe deneylerinde elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerini vurucu uç-test parçası ilişkisi olarak daha detaylı incelemek için grafikler üç temel davranış şeklinde gruplandırılabilir. Bunlar; geri sekme (rebounding), nüfuz etme/saplanma (penetration) ve delip geçme (perforation). Geri sekme durumunda vurucu, numuneye çarptıktan sonra geri döner ve kuvvet-zaman eğrisi bir dağı andırır; olay sonunda temas kuvveti sıfıra iner. Bu durumda, darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden büyük olduğu için numune, vurucunun enerjisinin tamamını soğuramaz. Nüfuz etme durumunda ise vurucu, numuneye saplanır ve sonunda hızı sıfırlanır. Bu süreçte vurucunun hızı zamanla azalır ve nüfuziyetin gerçekleştiği anda numunedeki çökme maksimum seviyeye ulaşır. Eğer darbe enerjisi yeterince büyükse, delip geçme gerçekleşir; vurucu,

numuneyi delerek hareketine devam eder. Bu durumda temas kuvvetinin sıfıra inmesi beklenirken, numune ile vurucu arasındaki sürtünme kuvveti nedeniyle bu tam olarak gerçekleşmez. Delip geçme sırasında maksimum çökme, numunenin orta noktasında meydana gelir ve vurucunun sahip olduğu darbe enerjisi arttıkça çökme miktarı da artar. Bu davranışlar, temas kuvveti-deplasman eğrisi altındaki alan yardımıyla absorbe edilen enerji üzerinden analiz edilebilir (Engin, 2011). Açıklanan bu davranışlara ait örnek kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Ağırlık düşürme testindeki (a) geri sekme, (b) kısmi geri sekme, (c) nüfuz etme, (d) delip geçme durumları için örnek kuvvet - deplasman grafikleri

Titreşim, bir cismin referans bir pozisyon etrafında yapmış olduğu salınım hareketi olarak tanımlanmaktadır. Titreşim genellikle arzu edilmeyen bir durumdur. Çünkü titreşim, makinenin çalışmasını zorlaştırabilir ve hatta bazı durumlarda rezonans meydana getirerek makinenin zarar görmesine yol açabilir. Makineler tasarlanırken,

titreşime neden olabilecek iç ve dış kuvvetlerin mümkün olduğunca azaltılması hedeflenir. Bu kuvvetler, metal yorgunluğuna, çalışan parçalar arasındaki boşlukların büyümesine, aşınmalara, çatlak oluşumuna, dönen parçalarda dengesizliklere, yatak arızalarına, gereksiz enerji tüketimine ve rahatsız edici ses ile gürültüye neden olabilir. Öte yandan, tüm bu hasarlar da titreşim oluşumunu tetikleyen veya şiddetini artıran faktörlerdir. Bunun yanında titreşimin tamamen engellenmesi mümkün değildir. Bu nedenle parça ya da sistemde oluşan titreşimleri azaltmak için sürekli çalışmalar yapılmaktadır.

Belirli bir sürede aynen veya kısmen tekrar etme özelliğine sahip titreşim hareketi periyodik titreşim hareketi olarak adlandırılır. Titreşim hareketinin tekrar etme süresine periyot (T) ve saniyede meydana gelen hareket sayısına da frekans (f) adı verilir. İki tanım arasındaki matematiksel ilişki "frekans periyodun tersidir" şeklinde ifade edilebilir ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Meirovitch, 2001):

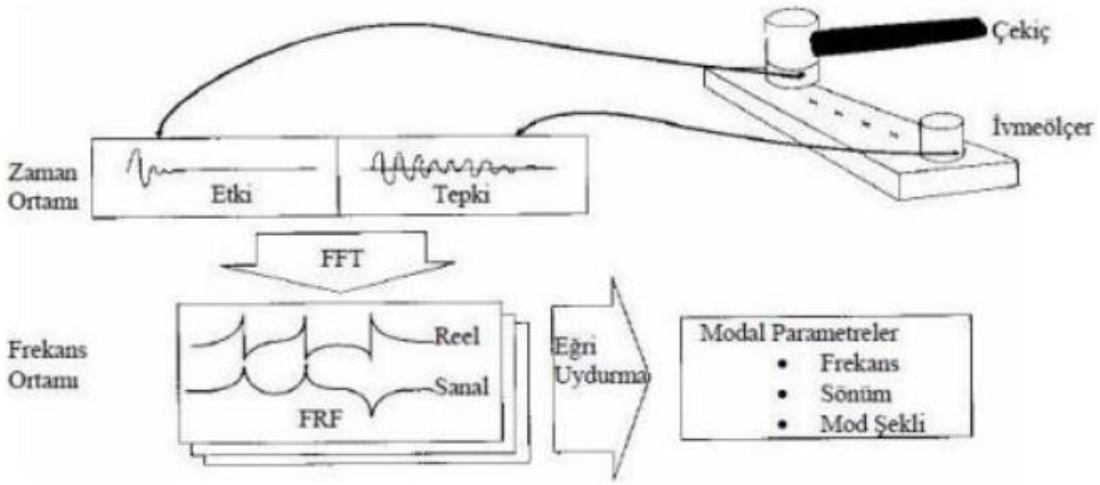
$$f = T^{-1} = \frac{1}{T} \tag{2.4}$$

Modal analiz, yapıların dinamik davranışlarını ve titreşim karakteristiklerini anlamak, aynı zamanda dış etkenlere karşı dayanıklılıklarını değerlendirmek için kullanılan vazgeçilmez bir analiz yöntemidir. Bu yöntem sayesinde, yapılar optimize edilebilir ve yapısal güvenlikleri doğrulanabilir. Modal analiz, özellikle havacılık, inşaat mühendisliği ve otomotiv gibi birçok sektörde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Analiz sonucunda yapılarla ilgili doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekli gibi modal parametreler elde edilir.

Bu parametreler "modal model" olarak adlandırılan bir grubu oluşturur ve her yapının modal modeli kendine özgüdür. Günümüzdeki modal analiz uygulamaları, sonuçların görselleştirilmesine ve yapının geometrisiyle birlikte yorumlanmasına olanak tanımaktadır. Doğru bir modal model elde etmek, yalnızca doğru test ve analiz yöntemleriyle mümkündür. Modal model verileri incelenerek yapı hakkında genel bilgiler edinilebilir ve bu bilgiler doğrultusunda mühendisler, yapıların tasarımını ve

çalışma noktalarını optimize ederek daha güvenli hale getirebilir. Sönüm oranının düşük olduğu kritik rezonans frekanslarında, yapı çok küçük bir kuvvetle uyarıldığında bile büyük titreşim tepkileri verebilir. Bu durum özellikle uçak kanatları, türbin kanatları ve otomobil şasi sistemleri gibi alanlarda modal analizin yoğun bir şekilde kullanılmasını gerekli kılmaktadır (Gjelstrup, 2021).

Deneysel modal analizde, yapıya belirli ve ölçülebilir bir kuvvet uygulanarak, yapının bu kuvvete verdiği tepki kaydedilir. Bu işlem sırasında, kuvvet uygulamak için uygun özelliklerde çekiç, yapının oluşturduğu tepkiyi ölçmek için de ivmeölçer kullanılmaktadır. Bunun yanında elde edilen verileri analiz etmek için de bir veri toplama sistemi ile sinyal analiz yazılımı kullanılır. Deneysel model analiz basitleştirilmiş olarak Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Deneysel modal analiz basitleştirilmiş akış şeması (Şekerci, 2013)

Deneysel modal testlerin uygulanması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. En yaygın kullanılanlardan iki tanesi: tek noktaya ivmeölçer yerleştirilerek çekiç gezdirme yöntemi ve tek noktadan çekiç ile vurarak ivmeölçer gezdirme yöntemidir. Çekiç gezdirme yönteminin ivmeölçer gezdirme yöntemine göre bazı avantajlı olduğu bazı durumlar vardır. İvmeölçeri ölçüm noktaları üzerinde gezdirerek yapılan testlerde her ölçüm noktasında ivmeölçeri söküp takmak gerekmektedir. Bu yöntem, çekiç gezdirme yöntemine göre daha uzun sürmektedir. Ayrıca ivmeölçer konumu değiştiği için test parçasının ağırlık merkezi sürekli değişeceğinden yapını doğal frekansları da

etkilenecektir (Anonim, 2016). Yapılan bu tez çalışmasında, tek referanslı ivmeölçer ile çekiç gezdirme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde, ivmeölçer test parçası üzerindeki belirli bir düğüm noktasına sabitlenir ve ardından diğer düğüm noktalarından çekiç ile vuruşlar yapılarak test gerçekleştirilir. Modal testlerin temel amacı, frekans cevap fonksiyonu (FCF) elde etmektir. Bu fonksiyon, çıkıştaki ivme genliği değerinin, girişte uygulanan kuvvet genliğine oranı alınarak hesaplanmaktadır.

Modal testlerin doğruluğunu artırmak için test sırasında alınan ölçüm sayısının artırılması faydalı bir yaklaşımdır. Bunun nedeni, ölçümlerin sistemle ilgisi olmayan gürültüler içermesidir. Bu gürültüler genellikle kullanılan sensörlerden, sensör kablolarından veya harici etkilerden kaynaklanır. Gürültüler minimize edildiğinde, elde edilen test sonuçlarının doğruluğu artar. Tek referanslı ivmeölçer ile çekiç gezdirme yönteminde, her bir düğüm noktası için 5 ila 10 ölçüm almak genellikle yeterli olup, testin doğruluğunu ve kalitesini artırır.

Darbe çekiç yöntemiyle yapılan testlerde, kullanılan çekiç tipi ve çekiç ucunun seçimi de büyük önem taşımaktadır. Eğer test parçası, ölçüm sırasında daha büyük bir kuvvetle tahrik edilmesi gereken bir yapıya sahipse, daha büyük modal çekiçler tercih edilmelidir. Ancak çekiç boyutu arttıkça ölçüm aralığının genişleyip hassasiyetin azalacağı unutulmamalıdır. Bu nedenle çekiç gezdirme yöntemi, özellikle küçük boyutlu parçalar üzerinde daha doğru sonuçlar verebilmektedir.

Çekicin ucunun sertlik derecesi de ölçüm frekans aralığını etkilemektedir. Sert çekiç ucu, yüksek frekans aralıklarında ölçüm imkanı sağlarken; yumuşak çekiç ucu, daha düşük frekans ölçümleri için uygundur. Test sırasında dikkat edilmesi gereken önemli bir diğer husus, önceki vuruşun kaydı tamamlanmadan ikinci bir vuruşun yapılmasıdır. Bu durum, çift vuruş olarak adlandırılmaktadır ve test sırasında hatalara yol açmaktadır. Bu nedenle, çekiçle vurma işlemi dikkatle ve hassasiyetle yapılmalıdır.

Frekans Cevap Fonksiyonu, bir yapının dinamik davranışını değerlendirmek için kullanılan temel bir matematiksel ifadedir. FCF, yapıya uygulanan birim kuvvet (giriş) ile bu kuvvete karşı oluşan hareket (çıkış) arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu fonksiyon,

genellikle frekans ekseninde ifade edilir ve yapıdaki doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri gibi bilgileri ortaya çıkarır. FCF, giriş ve çıkış arasındaki genlik oranını ve faz farkını içerdiğinden, yapının titreşim karakteristiklerini detaylı bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. Modal analizlerde, FCF verileri doğrultusunda yapıların rezonans noktaları tespit edilir ve dinamik performansları değerlendirilir. Bu nedenle, FCF modal analizlerin en kritik çıktılarından biridir.

2.2. Kaynak Araştırması

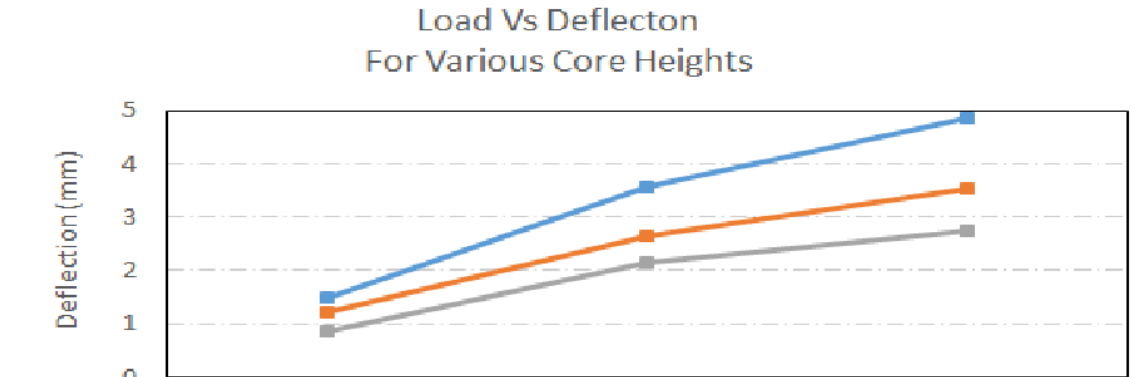
Literatürde sandviç kompozit malzemeler ile ilgili yapılmış farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı çekirdek malzeme geometrisi üzerine odaklanırken, bir kısmı çekirdek malzeme olarak farklı alternatifler denemişlerdir. Üretilen numuneler çeşitli testler uygulanılarak mekanik dayanımları incelenmiştir. Bazı çalışmalarda ise elde edilen mekanik test sonuçları kullanılarak sonlu elemanlar analiz yazılımları ile simülasyonlar yapılmış ve sonuçların korelasyonu değerlendirilmiştir.

Solmaz, Kaman, Turan ve Turgut (2010) gerçekleştirdikleri çalışmada, altıgen petek hücre çekirdekli kompozitlerin eğilme davranışları araştırılmıştır. Sandviç kompozitlerde yüzey malzemesi olarak polyester/cam fiber kullanılmış, çekirdek malzemesi olarak ise kağıt ve alüminyum tercih edilmiştir. Kağıt hücreli plakaların, alüminyum hücrelilere kıyasla daha yüksek eğilme direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Alüminyum çekirdekli numunelerde, yük uygulanan alanlarda yerel çekirdek ezilmesi ve kayma hasarları oluşurken, kağıt çekirdekli numunelerde bu hasarlara ek olarak yüzey/çekirdek ayrılması ve bölgesel çatlaklar da gözlemlenmiştir. Hücre yoğunluğunun artmasıyla birlikte hücre kayma rijitliği ve panellerin eğilme dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Paik, Thayamballi ve Kim (1999) alüminyum bal peteği çekirdekli sandviç malzemelerin dayanımını hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir. Yapılan üç nokta eğme testleri sonucunda, çekirdek yüksekliğinin artması ve hücre genişliğinin azalması ile mukavemetin arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, bal peteği hücrelerinin et

kalınlığının artmasıyla birlikte plastik deformasyonun daha geç başladığını gözlemlemişlerdir.

Gpoichand, Mohanrao, Sankar, Balaji, ve Kumar (2013) Yaptıkları çalışmada, sandviç kompozit malzeme üretiminde yüzey malzemesi olarak paslanmaz çelik ve çekirdek malzeme olarak bakır kullanmışlardır. Yük ve sehim miktarını araştırmak için statik üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Bakır bal peteği sandviç panelinde teorik yük ve sehim miktarı, deneysel ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sehim miktarını tahmin etmek için simülasyon kullanılmıştır. Tahmin edilen değerler ile deneysel değerler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, düşük çekirdek yüksekliği için sehim eğrisinin eğiminin yüksek olduğu ve çekirdek yüksekliğinin yüksek değeri için stresin düşük olduğu bulunmuştur. Çekirdek yüksekliğine bağlı olarak elde edilen yük – sehim değerleri Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



	2 kN	5 kN	7 kN
5 mm	1.484	3.573	4.853
10 mm	1.205	2.631	3.547
15 mm	0.8705	2.13	2.733

Şekil 2.13. Çekirdek yüksekliğine bağlı yük – sehim değerleri

Wang, Qin, Chen, Yu, Li ve Wang (2017) yaptıkları çalışmada yeni alüminyum altıgen peteklerin hücre duvarındaki deliklerin yarı-statik basma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelenmişlerdir. Farklı hücre sayılarına sahip delikli petekler üzerinde yapılan basma deneyleri, numune boyutlarının etkisini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçülen çökme gerilmesinin numune boyutlarına neredeyse duyarsız olduğu, ezilme gerilmesinin ise hücre sayısıyla arttığı ve 15x15 hücre sayısının üzerindeki numunelerde sabit bir platoya ulaştığı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonları, delik boyutu,

aralığı ve şeklinin peteklerin mekanik özelliklerine etkilerini incelemek için yapılmıştır. Sonuçlar, delik boyutunun peteklerin basma mekanik özellikleri ve deformasyon desenleri üzerinde önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Hücre yüksekliği boyunca delik sayısının çökme gerilmesine neredeyse hiç etkisi yoktur ve sadece delik boyutu büyük olduğunda ezilme gerilmesini etkiler. Delik şekli peteklerin çökmesini etkilerken, sonraki ezilme aşaması üzerinde küçük bir etkisi vardır.

Ren, Iwakawa ve He (2013) araştırma çalışmalarında mil düşürme deneyleri ile çeşitli alüminyum alaşımlı bal peteği çekirdekleri ve CFRP kompozit lamine yüzeylerden oluşan bal peteği sandviç panellerin düşme ağırlıklı darbe özelliklerini tanımlamaktadır. Deneylerin geçerliliğini ikna edici bir şekilde doğrulamak amacıyla, üç boyutlu modelleme ve ANSYS LS-DYNA yazılımına dayanan analitik yaklaşımlar da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırmaları rapor edilmiştir. Farklı CFRP lamine malzemelerin darbe özellikleri, CFRP uygulanan bal peteği sandviç paneller ile karşılaştırılarak mil düşürme testleri aracılığıyla değerlendirildi ve sonuçlar şunları gösterdi: Tüm CFRP lamine ve bal peteği sandviç panellerin maksimum darbe kuvveti, absorbe edilen enerji ile yakından ilişkilidir. CFRP lamine malzemelerle CFRP uygulanan bal peteği sandviç panellerin sonuçları karşılaştırıldığında, bal peteği sandviç panellerin absorbe edilen enerjileri yaklaşık üç kat daha fazla iyileşme gösterirken, maksimum darbe kuvvetlerinin çoğunlukla CFRP lamine yüzeylere bağlı olduğu görülmüştür. Daha kalın çekirdekli bal peteği sandviç paneller, daha yüksek darbe performansı sergilemektedir. Bal peteği sandviç panellerin absorbe edilen enerjileri, bal peteği çekirdek hücre boyutu ile yaklaşık olarak orantılıdır.

Toradmal, Waghmare ve Sollapur (2017) çalışmalarında hasar yüklerini araştırmak amacıyla statik üç nokta eğilme testleri yapmışlardır. Yapılan testlerde ASTM C 393 standartları takip edilmiştir. Çalışmada belirlenen hedef, yüzey malzemesi ve çekirdek malzeme arasındaki maksimum eğilme dayanımı ve ağırlık oranını bulmaktır. Yüzey malzemesi olarak bir taraf için cam elyaf takviyeli polimer malzeme (GFRP), diğer yüzey içinse paslanmaz çelik (SS-304) ya da alüminyum alaşım (A 3003 H19) kullanılmıştır. Çekirdek malzeme olarak polipropilen (PP) kullanılmıştır. Test sonuçları, üç numune arasında en düşük nihai yük değerinin paslanmaz çelik - polipropilen

panelde olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, GFRP - PP ve alüminyum - PP bal peteği panellerin nihai yük değerleri karşılaştırılabilir düzeydedir. Alüminyum - PP panel ile GFRP - PP panelin ağırlıkları karşılaştırıldığında, ağırlık azaltma oranı %14,28 olarak belirlenmiştir.

Wang, Li ve Xiong (2019), yaptıkları çalışmada, seramik karo içeren yenilikçi bir bal peteği sandviç yapının (seramik sandviç) eğilme davranışını, Abaqus / Explicit sonlu eleman modeli kullanılarak incelemişlerdir. Araştırmalarında, seramik sandviç ve geleneksel alüminyum bal peteği sandviç için üç nokta eğme testlerinin sayısal simülasyonları gerçekleştirilmişlerdir. Sayısal modeller, deneylerle doğrulanmıştır. Seramik karonun, yapının rijitliğini büyük ölçüde artırdığı ve bu durumun eğilme direnci kapasitesinin iyileştirilmesine önemli katkı sağladığı doğrulanmıştır. Parametrik çalışmalar, seramik karonun ve bal peteği çekirdeğin etkilerini, seramik karonun kalınlığını, bal peteği duvarının kalınlığını ve bal peteği hücrelerinin uzunluğunu değiştirerek daha ayrıntılı incelemek amacıyla yapılmıştır. Eğilme performansının, mevcut sandviç panelin geometrik konfigürasyonuna büyük ölçüde bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, güçlendirilmiş bal peteği çekirdekli seramik sandviçin de simülasyonda daha iyi mekanik davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, yüksek performanslı kompozit sandviç yapılar tasarlama olasılığını artırmaktadır.

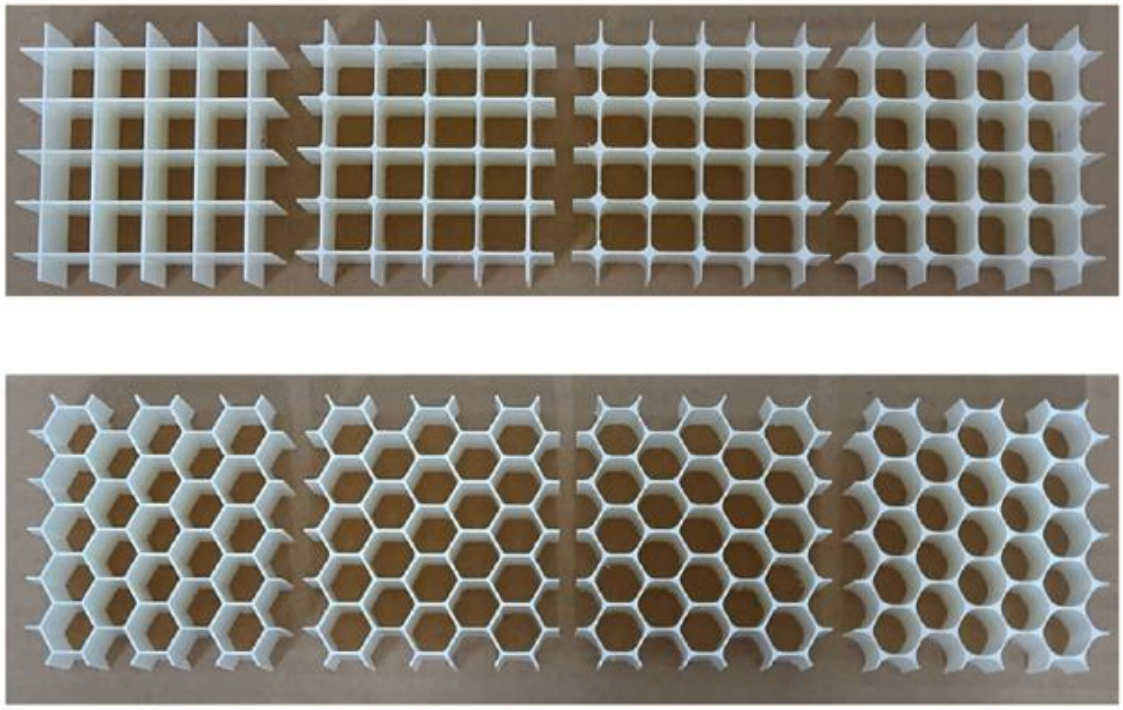
Xia, Durandet, Tan ve Ruan (2022) ortaya koydukları çalışmada oluklu üçgen, bal peteği, alüminyum köpük, piramidal kafes, çift sinüzoidal oluklu ve 3D yeniden girişimli ökzetik çekirdekli sandviç panellerin eğilme performansları hem deneysel hem de sayısal olarak değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Oluklu, bal peteği, alüminyum köpük ve kafes çekirdekli sandviç paneller üzerinde, yüzey levhaları ve çekirdek yüksekliği aynı olacak şekilde üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Oluklu, bal peteği ve kafes çekirdekli paneller için deneysel ve sayısal sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Sonrasında, ABAQUS sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmış ve üç farklı deformasyon modu belirlenmiştir. Panellerin özgül enerji emiliminin, çekirdek göreli yoğunluğu ile arttığı bulunmuştur; aynı çekirdek göreli yoğunluk için, bal peteği çekirdeğe sahip panelin en yüksek özgül enerji emilimi değerine sahip olduğu gösterilmiştir.

Kayran ve Aydıncak (2009), çalışmalarında düzenli altıgen alüminyum bal peteği çekirdeklerinin süreklilik modelleri, sonlu eleman analizi ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, gerçek bal peteği çekirdek geometrisine sahip sandviç paneller ile mevcut eşdeğer çekirdek modellerinin sonlu eleman analizleri sonucunda belirlenen toplam düzlem içi ve düzlem dışı tepki kuvvetlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Güvenilir bir değerlendirme için, gerçek çekirdek geometrisine sahip referans modelin ve eşdeğer çekirdek sonlu eleman modellerinin yüzey levhalarının katı elemanlarla örgülenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Referans ve eşdeğer çekirdek modelleri tarafından hesaplanan tepki kuvvetlerindeki farkların karşılaştırılması, bal peteği çekirdeklerinin elastik sabitlerinin güvenilirliğini değerlendirmede yeterlidir. Araştırılan modeller arasında, M5 modelinin en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Gelecekte, bu çalışmanın genişletilmesi ve diğer eşdeğer süreklilik çekirdek modellerinin karşılaştırmalı bir çalışmaya dahil edilmesi önerilmektedir.

Zhang, Liu, He, Zong ve Fang (2019) bu çalışmada, genişletilmiş polipropilen köpük ile doldurulmuş alüminyum bal peteği yapıların dinamik darbe tepkisi ve özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Alüminyum bal peteği ve köpük arasındaki etkileşim etkisine bağlı olarak, doldurulmuş bal peteğinin başlangıç tepe mukavemeti ve ortalama mukavemetinin önemli ölçüde arttığı, ancak özgül enerji absorpsiyonunun azaldığı bulunmuştur. Aynı köpük yoğunluğuna sahip doldurulmuş numunelerde, darbe hızı arttıkça başlangıç tepe mukavemeti, ortalama mukavemet ve özgül enerji absorpsiyonunun da arttığı gözlemlenmiştir. Statik basma testi ile karşılaştırıldığında, dinamik darbe testinde başlangıç tepe mukavemeti artarken, ortalama mukavemet ve özgül enerji absorpsiyonu azalmıştır. Çalışma, genişletilmiş polipropilen köpük dolgulu bal peteğinin çıplak alüminyum bal peteğinin darbe özelliklerini iyileştirmede etkili olduğunu göstermiştir. Doldurulmuş bal peteğinin dinamik darbesine yönelik sayısal simülasyon da araştırılmış ve deformasyon sürecini doğru bir şekilde yeniden üretmiş, duvar ve genişletilmiş polipropilen köpük arasındaki etkileşimi ele almıştır. Farklı dolgu türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması sonucunda, tek hücre dolgusunun, en az dolgu malzemesi kullanarak yük direncini artırmak için iyi bir seçenek olduğu ortaya konulmuştur.

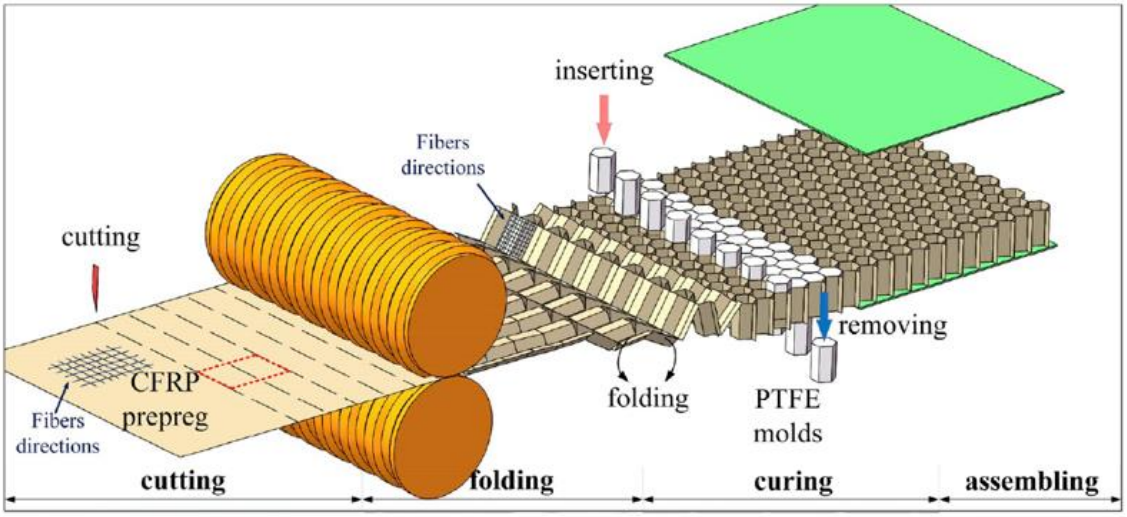
Heimbs, Middendorf, Kilchert, Johnson ve Maier (2007) yaptıkları çalışmada ileri sandviç kompozitler için katlanmış çekirdek yapılarının düzlemsel basma yükü altındaki mekanik davranışının karakterizasyonu, sanal test yaklaşımı kullanılarak sunulmuştur. Bu bağlamda, aramid, kağıt ve karbon fiber takviyeli plastikten yapılmış iki farklı katlanmış çekirdek yapının deneysel verileri ile PAM-CRASH ve LS-DYNA'nın açık çözücüleri kullanılarak yapılan dinamik basma testi simülasyonları karşılaştırılmıştır. Araştırmaların odak noktası, hücre duvarı malzemesinin yapısal modellemesi, kusurların dikkate alınması ve hücre duvarı burkulması, katlanması veya ezilmesi fenomenlerinin temsil edilmesidir. Sayısal sonuçların tutarlılığı, katlanmış çekirdek yapılarının etkili mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve hücre geometrisi optimizasyonu için bu yaklaşımın umut verici ve verimli olabileceğini göstermektedir.

Duan, Tao, Lei, Wen, Liang ve Fang (2018) çalışmalarında değişken kalınlıkta hücre kenarlarına sahip bal peteği yapıların düzlem dışı basma özellikleri deneysel analizle incelenmiştir. Şekil 2.14'de gösterildiği gibi, değişken kalınlıkta hücrelere sahip kare ve altıgen bal peteği yapılar, tek bir geometrik parametre ile tanımlanmıştır. Bu bal peteği yapıların deneysel numuneleri 3D baskı teknolojisi kullanılarak üretilmiş ve bu yapılar üzerinde yarı-statik basma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, değişken kalınlıkta hücre kenarlarına sahip bal peteği yapıların, geleneksel bal peteği yapılara kıyasla daha yüksek basma mekanik özellikleri sergilediğini göstermektedir. Sunulan kare ve altıgen bal peteği yapıların basma mukavemetindeki en yüksek artış oranları sırasıyla %57 ve %19 civarındadır. Ayrıca, bu kare bal peteği yapıların özgül enerji absorpsiyonundaki en yüksek artış oranı %172'ye ulaşmaktadır. Farklı geometrik parametre değerlerine sahip kare ve altıgen bal peteği yapıların deformasyon ve hasar modları da tartışılmış ve karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, uygun geometrik parametrelere sahip kare bal peteği yapıların daha üstün performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 2.14. Farklı kalınlık ve geometrilere sahip bal peteği yapılar (Duan, 2018)

Wei, Li ve Xiong (2019) yaptıkları çalışmada önceden tasarlanmış yarıklar boyunca bir prepregi keserek ve düzlemsel lamelaları üç boyutlu bir bal peteği yapısına katlayarak, CFRP altıgen bal peteği çekirdekli tamamen kompozit bir sandviç panel üretmek amacıyla önerilen "tailor-folding" yöntemi sunulmaktadır (Şekil 2.15). Bu yöntemle, bitişik hücre duvarları arasındaki kısıtlamaları güçlendirmek için sürekli liflerden oluşan bir CFRP bal peteği çekirdek, sürekli düz dokuma prepregden üretilmektedir. Bu yöntemin önemli bir avantajı, sürekli liflerin gerilim yoğunluğunu azaltması ve bitişik hücre duvarları arasındaki kısıtlamaları güçlendirmesidir. "Tailor-folding" yöntemi, tamamı CFRP'den oluşan bal peteği sandviç panellerinin üretimi için sunulmuştur. Bu yöntemin avantajı, sürekli liflerin stres konsantrasyonunu azaltması ve bitişik hücre duvarları arasındaki kısıtlamaları güçlendirmesidir. Düzlemsel dış basınç ve kesme deneyleri, bu panellerin mekanik özelliklerini araştırmış ve analitik tahminlerle karşılaştırmıştır. Sonuçlar, tailor-folding yönteminin hafif ve çok işlevli uygulamalar için potansiyel bir çözüm olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.15. Tailor-folding yöntemi üretim şeması (Wei, 2019)

Li, Atsushi, Oh, Jirathearanat, Wu ve Chua (2022) yaptıkları çalışmada alüminyum bal peteği tabanlı sandviç yapıların ezilme deformasyonu, hata davranışı, mod ve mekanizmasının deri kalınlığı, çekirdek topolojisi, çekirdek derinliği ve çekirdek yönü gibi faktörlerin etkilerini sistemli bir şekilde araştırmak için çeşitli bal peteği çekirdek yapıları ve deri kalınlıklarına sahip sandviç paneller hazırlanmış ve düzlemsel dış basınç altında üç noktalı bükülme deformasyonlarına uğratılmıştır. Özellikle, ultra ince hücre duvar kalınlığına sahip ökzetik ve ökzetik olmayan bal peteği yapıları incelenmiştir. Tüm bükülme deformasyonlarına yönelik sonlu eleman simülasyonları, plastik deformasyonu doğru bir şekilde tanımlayan karışık Swift-Voce tekrarlı modeli ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal model, deneysel yük-deformasyon yanıtlarının ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasıyla iyi bir şekilde doğrulanmıştır. Tip I, II ve III'de sünek başarısızlık modları tanımlanmış ve davranışları ve mekanizmaları sayısal olarak çoğaltılmıştır. Çekirdek topolojisinin başarısızlık modu üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olmasına rağmen, et kalınlığı, çekirdek derinliği ve çekirdek yönü etkilidir. Ek olarak, girintili yapıda ökzetik bal peteği çekirdeği kullanmak, bal peteği tabanlı sandviç yapıların tepe yük, enerji emilimi ve ilgili özgül değerlerini iyileştirir. Öte yandan, çekirdek derinliğinin ve deri kalınlığının artırılması, tutarlı bir tepe yük artışına neden olmaz. Daha hafif ve daha güçlü bir Al bal peteği tabanlı sandviç yapının elde edilmesi için, çekirdek derinliğinin ve deri kalınlığının artırılması yerine geleneksel auxetic olmayan bir çekirdek yerine girintili bal peteği çekirdeği kullanmak daha etkilidir.

Sahu, Badgayan ve Sreekanth (2020) yaptıkları çalışmada birim hücre duvar kalınlığını değiştirerek ve 10 mm sabit hücre boyutunda tutarak bal peteği yapısının yarı-statik ezilme özelliklerini incelemiştir. ANSYS 14 simülasyonu kullanılarak 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 ve 1.5 mm duvar kalınlığına sahip naylon bal peteği çekirdeğinin düzlemsel yarı-statik basınç testi gerçekleştirilmiştir. Testten elde edilen sonuçlar, başarısızlık modunu öngörmek için birim hücre burkulma analizi ile yakından uyumludur. 1.5 mm hücrenin nihai basınç dayanımının, 1 mm hücreye kıyasla 1.4 kat daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ezilme sırasında yük-deplasman grafiğinden elde edilen enerji emilimi, duvar kalınlığı ile enerji emilimi arasında orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. 1.5 mm duvar kalınlığı çekirdeğin üstün enerji emilme yeteneği, hafiflik ve dayanıklılığın öncelikli olduğu enerji emici cihazlarda kullanılma potansiyelini işaret etmektedir.

Geramizadeh, Dariushi ve Salami (2022) yaptıkları çalışmada hata mekanizmalarının pratik yönünü kullanarak optimize edilmiş 3D baskılı polimerik sandviç kirişlerin tasarlanmasına ışık tutmaktadır. Statik hata mod haritasına dayalı olarak optimal bir yüzey levhası kalınlığının elde edilmesi, bu çalışmanın ana amacıdır. Bu amaca ulaşmak için, birleştirilmiş çözünme modelleme tekniği ile üretilen dört farklı yüzey levhası kalınlığı altında üç noktalı bükme testine tabi tutulan 3D baskılı altıgen bal peteği ve girintili bal peteği sandviç kirişlerinin performansı değerlendirilmiştir. Mekanik davranışlar, ABAQUS yazılımındaki genişletilmiş sonlu eleman yöntemi kullanılarak değerlendirilirken, dijital görüntü korelasyonu analizleri insan gözüyle görülemeyen çatlakları görüntülemek için kullanılmıştır. %6.6'dan az hata ile elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Yapılan incelemede, çok sıralı hücresel örgü çekirdeği bulunan 3D baskılı polimerik sandviç kirişin statik deformasyon haritasının yüzey kırılması ve çekirdek kayma modlarına ayrıldığını ortaya koymaktadır, ki bu daha önce rapor edilmemiş bir çalışmadır. Çalışma, optimal bir yüzey levhası kalınlığının belirlenmesi ve enerji emilim kapasitesinin büyüme hızı ile ilişkisinin yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Deneysel araştırma, H 2'den H 3'e ve R 2'den R 3'e bir milimetrelik yüzey levhası kalınlığının artırılmasının sırasıyla enerji emilim kapasitesini yaklaşık %11 ve %19.8 artırdığını ortaya koymaktadır.

Li, He, Jing, Jiang, ve Yan, (2023) bu çalışmada, bal peteği sandviç kirişlerinin darbe direnci, iç bükey altıgen bal peteği çekirdeğine bir römbik yapı dahil edilerek, böylece yeni bir ökzetik bal peteği çekirdekli sandviç kirişi elde edilerek daha da artırılmıştır. Çekirdekli sandviç kirişin bükülme direnci, sayısal simülasyonlar yoluyla incelenmiştir. Analiz, çekirdekli sandviç kirişin içbükey altıgen bal peteği sandviç kirişine göre daha iyi bükülme direncine ve enerji emme özelliklerine sahip olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, stabil plastik deformasyonun ve yüksek enerji emiliminin taşıma pozisyonu ve yapısal parametrelerle yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Yumruk doğrudan yeni bal peteği hücresinin üstünde olduğunda (T-pozisyonu), çekirdekli sandviç kiriş daha iyi taşıma kapasitesi göstermektedir. Bükülme direncinin yapısal parametreler üzerindeki etkilerini belirlemek için Bileşik Oransal Değerlendirme Yöntemi kullanılmıştır. Yeni bal peteği hücrelerini kalınlaştırarak çekirdekli sandviç kirişi bükülme direncinin hızla artırılabileceği kanıtlanmıştır. Bu araştırma, yeni bal peteği çekirdekli sandviç panellerde darbe direnci üzerine gelecek araştırmalar için bazı bakış açıları ve metodolojiler sunmaktadır.

Son yıllardaki elektrikli araçlarda yaşanan hızlı gelişmeler doğrultusunda, batarya muhafazası üzerine de yoğun çalışmalar yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalara geniş açıdan bakıldığında batarya muhafazası malzeme alternatifleri, ağırlık azaltma çalışmaları, tasarım iyileştirmeleri gibi temel konularda araştırmaların yapıldığı görülmektedir.

Belingardi ve Scattina (2023) Yaptıkları çalışmada batarya paketine uygun bir yer sağlamak amacıyla araç gövdesinde yapılması gereken mimari değişikliklere odaklanılmıştır. Çalışmanın içeriğinde, mühendislik analizleri geliştirilmekte ve kabul edilebilecek bazı olası çözümlerin taslakları gösterilmektedir. Araç ağırlık merkezinin konumunun, dolayısıyla aracın sürüş kabiliyetini etkileyebilecek olan sonuçları, batarya muhafazasının yolcu bölmesi tabanının altına yerleştirilmesini gerektirdiği ortaya konmuştur. Bu çözüm, batarya paketi koruması açısından yanal darbe durumunda ve kolay servis ve bakım açısından en ilginç çözümlerden birisidir. Batarya paketinin muhafaza yapısı ile araç tabanının entegrasyonu, gövdenin rijitliğine (hem burulma hem de bükülme açısından) olumlu etkiler yapabilecek bir tür sandviç yapısı

oluşturmaktadır. Ayrıca bu makalede, batarya paketinin darbe koruması ile ilgili bazı değerlendirmeler sunmakta olup, özellikle sabit bir engel, örneğin bir direğe karşı yapılan yanal darbelerin en kritik olduğu kanıtlanmıştır. Sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarıyla, aracın yan yapısı ve batarya kutusu yapısının farklı parçaları arasındaki etkileşimin önemi vurgulanmakmıştır.

Acar, Bayrak, Türkmen, Şahin, Güleçyüz, Safa ve Koç (2023) Ortaya koydukları çalışmada, elektrikli araçlar için kütlesi optimize edilmiş olmakla birlikte gerekli yapısal desteği sağlayan, kompozit malzemeden imal edilecek bir batarya paketi muhafazası tasarlamıştır. Bu amaçla, farklı tasarım alternatifleri oluşturulmuş ve bu tasarımlar üzerinde analizler yapılmıştır. Tasarımlar için SOLIDWORKS ve CATIA V5, analizler için ise ANSYS, HyperMesh ve LS-DYNA kullanılmıştır. Temel batarya paketinin tasarımının boyutları, piyasada mevcut alüminyumdan üretilen bir batarya paketi muhafazasından alınmıştır. Alüminyum malzeme yerine kompozit malzeme kullanımının ve güçlendirici kullanmak gibi birkaç tasarım değişikliğinin batarya paketi muhafazasının performansı üzerine etkileri araştırılmıştır.

Shui, Chen, Garg, Peng, Bao ve Zhang (2018) Bu çalışmada, batarya paket muhafazasının mekanik tasarım özelliklerini (örneğin, kütlenin en aza indirilmesi, minimum doğal frekansın maksimize edilmesi ve maksimum deformasyonun en aza indirilmesi) optimize etmek için bir tasarım optimizasyon metodolojisi önerilmiştir. Önerilen metodoloji dört aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, dört yöntemin merkezi kompozit tasarım ve yanıt yüzeyi metodolojisi, merkezi kompozit tasarım ve yapay sinir ağı, Latin hiperküp örnekleme ve yanıt yüzeyi metodolojisi, Latin hiperküp örnekleme ve yapay sinir ağı) kombinasyonu kullanılarak maksimum deformasyon (statik analize dayalı), minimum doğal frekans (modal analize dayalı) ve kütle için sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. İkinci aşamada, deney tasarımı için en iyi metodoloji kombinasyonu seçilmiş ve üç mekanik tasarım özelliği için ampirik modeller oluşturulmuştur. Üçüncü aşamada, maksimum deformasyon, minimum doğal frekans ve kütle için merkezi kompozit tasarım ve yapay sinir ağına dayalı modeller, baskın olmayan sıralı genetik algoritma kullanılarak daha da optimize edilmiştir. Dördüncü aşamada, baskın olmayan sıralı genetik algoritma kullanılarak elde edilen optimum giriş

kombinasyonu batarya paketi muhafazasının üretiminde kullanılmış ve elde edilen sonuçlarla gelecekteki çalışmalar için araştırma önerileri sunulmuştur.

Güven ve Rende (2017). Bu çalışma kapsamında, elektrikli araçların hafifletilmesi amacı ile kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar irdelenmiş ve sonuçlar ortaya konmuştur. Elektrikli araç menzilinin kısa olması, batarya dolum süresinin uzunluğu ve satış fiyatının yüksek olması elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki engeller olduğu belirlenmiştir. Maliyeti büyük ölçüde bataryalardan kaynaklanan elektrikli araçların menzilini artırmak için daha fazla kapasiteye sahip batarya kullanmak gerektiği belirtilmiştir. Menzili artırmak için daha düşük yoğunluğa sahip alternatif malzemeler kullanarak araçların hafifletilebileceği açıklanmıştır. Böylece aynı batarya kapasitesi ile daha uzun yol kat edilebileceği ve araçların imalatında kullanılan bu malzemelerin seçiminde bulunabilirlik, çevresel etki, dayanım ve maliyet gibi unsurların dikkate alınması gerektiği açıklanmıştır.

Yu, Nie, Peng, Miao, Zhai, Zhang, Han, Zhao ve Pecht (2023) Hazırladıkları derleme makalesinde, Çin güvenlik standartlarını batarya malzemeleri, hücreleri, modülleri, batarya sistemleri, batarya yönetim sistemleri ve araçlar perspektifinden analiz etmişlerdir. Çin standartlarının analizi sonucunda elde edilen bulgular, daha iyi uluslararası batarya güvenlik standartlarının oluşturulması için, farklı batarya seviyeleri, batarya yaşam döngüsü tasarımı ve yeni batarya teknolojileri için öneriler sunmak amacıyla kullanılmıştır.

Li, Zhao, Bao, Pan, Wang, Liu, Liao ve Li (2024) Yaptıkları çalışmada elektrikli araçların batarya paketi sisteminin çarpışma performansını iyileştirmek amacıyla farklı biyomimetik bal peteği yapıları tasarlamışlardır. Farklı biyomimetik bal peteği yapıların, batarya paketi sisteminin önden çarpışma sırasındaki çarpışma dayanıklılığı üzerindeki etkileri, doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli kullanılarak analiz edilmiştir. İlk olarak, yedi farklı biyomimetik bal peteği birim yapısının geometrik parametreleri tanımlanmıştır. Bal peteği yapısının genel yapısı batarya paket sistemine uygulanmış ve ardından batarya paket sistemi ve bal peteği yapılarının doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli oluşturulup doğrulanmıştır. Daha sonra, çarpışma

simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Batarya paketinin alt kabuğunun deformasyonu ve maksimum gerilmesi hesaplanmıştır. Önden çarpma sırasında bal peteği yapıların emdiği enerji incelenmiştir. Sonuçlar, çimen saplarını taklit eden biyomimetik bal peteği yapısının, batarya paketi sistemlerinin güvenlik performansını en çok iyileştirdiğini göstermiştir. Son olarak, biyomimetik bal peteği yapısının parametrik tasarımı yapılmış, duvar kalınlıklarının ve yer değiştiren altıgen sayısının çarpışma dayanıklılığı performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bal peteği yapısı, 1 mm kalınlık ve 2 ile 4 yer değiştiren altıgen sayısında en iyi performansı sergilemiştir. Optimize edilmiş biyomimetik bal peteği yapısı, batarya paketinin alt kabuğunun deformasyonunu %30, maksimum gerilmesini ise %10 azalttığı ortaya konmuştur.

Choi, Cho, Kil ve Yoon (2023) Yaptıkları çalışmada bir elektrikli aracın batarya paketi taşıyıcısını, lifli termoplastik kompozit malzeme kullanılarak geliştirmiştir. Maliyet etkinliği nedeniyle, doğrudan işlemle üretilen uzun lif takviyeli termoplastikler tercih edilmiştir. Poliamid 6 bazlı kompozitler, 250 °C ile 290 °C sıcaklık aralığında doğrudan işleme pilot makinesi kullanılarak işlenmiştir. Matrise, ağırlık oranı %40 olarak sabit tutularak, cam ve karbon lifleri farklı karışım oranlarında eklenmiştir. Karbon liflerinin karışımdaki artışı, çekme modülü ve mukavemetini artırmış ancak Izod darbe dayanımını azaltmıştır. Geliştirilen kompozitlerin yorulma ömrü, çekme yorulma testleri ile değerlendirilmiş ve maksimum yorulma yüklemesi, kompozit mukavemetinin %60'ından az olduğunda, bir milyon döngüyü aştığı belirlenmiştir. Lif yönelimi ile ilişkili olarak, anizotropik mekanik davranış, bükülme özellikleri ve kalıp büzülmesi açısından incelenmiştir. Düzlem içi mekanik özellikler ve kalıp büzülmesi için anizotropik davranışı en aza indiren bir lif yerleştirme şekli önerilmiştir. Kompozit malzeme ile batarya paketi kasasının alt kısmı için bir tasarım geliştirilmiştir. Yapısal performansı darbe performansı ve yapısal dayanıklılık açısından optimize etmek için simülasyonlar yapılmıştır. X-ışını kullanılarak yapılan tahribatsız değerlendirme prototipte kusur olmadığını göstermiştir. Prototip, kızak ve titreşim testleri gereksinimlerini karşılamış ve %31'lik bir ağırlık azaltımı sağlanmıştır.

Mudassir, Tarlochan ve Mansour (2020) Bu çalışmada elektrikli araçlar için çarpışma dayanıklılığı uygulamalarında enerji emiciler olarak kullanılabilecek hafif, doğadan

esinlenilmiş hücresel yapılı tasarımların potansiyeli incelenmiştir. Elektrikli araçların artan batarya kapasiteleri ile popüler hale gelmesiyle birlikte, bu hafif hücresel yapılar, aracın kütlesini azaltarak menzili artırmanın yanı sıra çarpışmalar sırasında bataryayı koruma potansiyelleri nedeniyle araştırma ilgisini yeniden arttırmıştır. Çalışmada elektrikli araç batarya koruması ve çarpışma dayanıklılığı için yenilikçi bir hafif hücresel yapı tasarlanmış ve simülasyonu yapılmıştır. Hücresel yapının tasarımında, çökme davranışını ve çarpışma dayanıklılığını etkileyen dört farklı kabuk kalınlığı uygulama yöntemi dikkate alınmıştır. Uzunluk, kabuk kalınlıkları ve kalınlık uygulama yöntemleri değişkenlik gösteren 45 örnek üzerinde sayısal bir çalışma yapılmıştır. Araştırılan dört kabuk kalınlığı uygulama yöntemi şunlardır: Üniform kalınlık, dikme-duvar kalınlığı, gradyan kalınlık ve alternatif kalınlık. Yapıların çarpışma dayanıklılığını değerlendirmek için kuvvet-deplasman eğrileri, enerji emilimi, spesifik enerji emilimi ve çökme davranışları gibi metrikler kullanılmıştır. Kabuk kalınlığının hem çökme davranışını hem de enerji emilimi kabiliyetlerini etkilediği belirlenmiştir. Enerji emilim sonuçları, tasarlanmış hücresel yapılar üzerindeki diğer çalışmalarla benzerdir. En yüksek performans gösteren hücresel yapının spesifik enerji emilimi 35 kJ/kg olarak bildirilmiş olup, bu değer literatürde bildirilen hücresel yapılarla karşılaştırılabilir düzeydedir.

Höhne, Blaess, Ilinzeer ve Griesbaum (2023) Bu çalışmada, cam veya karbon fiber takviyeli, karbon siyahı, karbon nanotüpler, karbon nano yapılar veya genleşebilir grafit dolgulu, doymamış polyester poliüretan hibrid reçine bazlı yapıştırıcıların elektromanyetik koruma ve alev geciktiricilik özellikleri incelenmiştir. Elektromanyetik koruma, test plakaları ve test muhafazaları kullanılarak test edilmiştir. Alev geciktiricilik, sınırlayıcı oksijen indeksi testleri, UL94 testleri, koni kalorimetre testleri ve benç ölçekli yakıt yangın testleri araştırılmıştır. Elektromanyetik koruma ve alev geciktiricilik açısından en iyi sonuçlar, %50 ağırlık oranında karbon fiber ve %11.5 ağırlık oranında genleşebilir grafit içeren doymamış polyester poliüretan hibrid kompozitler kullanılarak elde edilmiştir.

Xiong, Pan, Wu ve Liu (2021) Bu çalışmada, batarya paket sisteminin önemli ölçüde ağırlık azaltımını sağlayan yeni bir prosedür önerilmiştir. Bu yaklaşım, ortogonal deney

tasarımı, yanıt yüzeyi metodolojisi ve çok adalı genetik algoritmaya dayanmaktadır. İlk olarak, yapının karmaşıklığını dikkate alan bir batarya paket sisteminin (batarya modülleri dahil) doğrusal olmayan sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Sonlu eleman modeli, kısıtlı modal analiz sonuçlarının benç test sonuçlarıyla karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. İkinci olarak, rastgele titreşim analizinin bir parçası olarak, ortogonal deney tasarımı yöntemi kullanılarak bir ikinci dereceden yanıt yüzeyi modeli oluşturulmuştur. Bu model, batarya paket sisteminin etkili ağırlık azaltımını gerçekleştirmek için çok adalı genetik algoritma ile birlikte kullanılmıştır. Son olarak, optimize edilmiş yapının çarpışma dayanıklılığı, çarpışma ve ezilme simülasyonları ile sayısal olarak doğrulanmıştır. Batarya modülleri üzerindeki çarpışma ve ezilme etkileri incelenmiş ve optimize edilmiş batarya paket sisteminin prototipleri, fiziksel testlerle gelecekteki doğrulama için üretilmiştir. Sonuçlar, optimize edilmiş batarya paket sisteminin optimize edilmemiş batarya paket sistemine göre %11.73 daha hafif olduğunu ve geliştirilmiş çarpışma dayanıklılığı sağladığını göstermiştir.

Schmerler, Gebken, Kalka ve Reincke (2017) Mevcut araştırma projesinde, elektrikli araçlar için entegre fonksiyonlara sahip hafif bir parça geliştirilmiştir. Fiber takviyeli plastikler, alüminyum köpük ve katı alüminyumdan oluşan çoklu malzeme karışımı yaklaşımı ile bir çelik referans batarya muhafazası yerine geçebilirliği çalışılmıştır. Bu çalışmada, mekanik fonksiyonların entegrasyonu, termal yönetim ve çarpışma ve izinsiz giriş korumasına odaklanılmıştır.

Agarwal, Batista ve Tashi (2024) Yaptıkları çalışmada ANSYS explicit dinamik analizi kullanarak batarya muhafazasının yapısal özelliklerini değerlendirmişlerdir. Doğal frekans, mod şekli ve yer değiştirme değerlerini belirlemek için modal analiz gerçekleştirilmiştir. Batarya paketinin katı modeli, Creo parametrik tasarım yazılımında geliştirilmiştir. Bal peteği yapısının kullanımı, batarya birimlerine çarpışmanın etkisini azaltmıştır. Çarpışma anında, bal peteği yapısı maksimum çarpışma etkisini emecek ve batarya birim hücrelerini büyük hasardan kurtaracağı belirtilmiştir. Bal peteği yapısına sahip bir batarya paketinin doğal frekansı daha yüksek birinci, ikinci ve üçüncü doğal frekansa sahiptir. Çarpışma anında ve herhangi bir bal peteği yapısı olmadan, batarya biriminin iç enerjisi 1021.8 mJ iken, bal peteği ızgara yapısıyla bu değer 0.80376 mJ

olmuştur. Sonuçlar, bal peteği yapısının entegrasyonu ile hücre iç enerjisinde önemli bir azalma olduğunu göstermiştir.

Coren, Huemer-Kals, Stelzer ve Fischer (2020) Bu çalışmada, Karbon Fiber Tabaka Kalıp Bileşiklerinden oluşan malzemenin yapısal, çarpışma ve termal fonksiyonları tek bir parçada entegre edilmiş batarya koruma sistemi olarak kullanılma olasılığı araştırılmıştır. Mekanik simülasyon prosedürü, normal ve çarpışma durumlarında mekanik davranışı modellemek için kullanılmıştır. Malzeme testleri, malzemenin dinamik tepkisini ölçmek için gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilere dayanan gelişmiş doğrusal olmayan malzeme modelleri ve hasar gelişim yöntemleri kullanılmıştır. Simülasyonların olumlu sonucu, bu malzemelerin elektrikli araçlarda yapısal parçalar için bir seçenek olarak değerlendirilebileceği potansiyelini ortaya koymuş ayrıca hafif ve mekanik olarak sağlam bir batarya taşıyıcı geliştirilmiştir.

Baumeister, Weise, Hirtz, Höhne ve Hohe (2014) Bu çalışmada yapılan faaliyetlerin amacı, mevcut durumla karşılaştırıldığında %10-15 oranında bir ağırlık azaltması sergileyen 20 kWh'lik bir batarya paketi oluşturulması olarak belirlenmiştir. Bu hedefe, batarya muhafazası için alüminyum yüz levhaları ve alüminyum hibrit köpük bir çekirdek içeren yenilikçi sandviç malzemelerin kullanılmasıyla ulaşılmıştır. Alüminyum-epoksi hibrit köpükler, öncelikle küçük alüminyum köpük granülleri üreterek elde edilmiştir. Daha sonra köpük granülleri köpüklenme ajanı içeren bir epoksi yapıştırıcı ile kaplanmıştır. Kaplanmış alüminyum köpük kürelerinin bir boş yapı ile doldurulmasının ardından, kaplama epoksi köpüğünün köpürülmesi ve sertleşmesi 100 ila 200 °C arasındaki hafif ısı uygulanmıştır. Sonuç olarak, alüminyum köpük kürelerinin epoksi köpük (hibrit köpük) bir matris içine gömülü olduğu bir kompozit malzeme oluşturulmuştur. Kaplanmış granüllerin iki yüz levha arasına yerleştirilmesi ve sertleştirilmesiyle alüminyum hibrit köpük sandviçleri üretilmiştir. Çekirdek tabakası malzemesinin mekanik karakteristikleri, yarı-statik ve yüksek gerilme hızlı basınç testleri kullanılarak belirlenmiştir.

Yang, Fang, Li ve Xie (2019) Bu çalışmada öncelikle üç boyutlu varlık modeli ve sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve dik dönüşlerde ve düzensiz yol yüzeyinde frenleme gibi

aşırı koşullarda batarya kutusunun stres durumu hesaplanmıştır. Ardından batarya kutusu üzerinde statik dayanıklılık analizi gerçekleştirilmiştir. Batarya kutusunun modal özelliklerini ve titreşim özelliklerine uyumlu yanıtı analiz ederek, batarya kutusunun dinamik performansı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Son olarak, batarya kutusunun statik ve dinamik analiz sonuçlarına dayanarak, zayıf noktalar iyileştirilmiştir. Sonuçlar, değiştirilmiş modelin yüksek bir iyileştirme etkisine sahip olduğunu ve temel olarak belirlenen tasarım gereksinimlerine ulaşıldığını göstermiş olup, bu da yapısal iyileştirme planının uygunluğunu doğrulamıştır.

Zhao, Zhang ve Zhang (2017) Yaptıkları çalışmada elektrikli araç için batarya kutusunun hafif tasarımını amaçlayarak, bir hijyen aracının batarya kutusu için uzun karbon fiber takviyeli termoplastik tasarım süreci ve mukavemet analizi yöntemi araştırılmıştır. İlk olarak, kutunun temel gövde yapısı, statik yük durumuna dayalı olarak elde edilmiş ve en düşük ağırlığı ve en yüksek performansı sağlamak için güvenlik marjı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak, araç sürerken beklenmeyen durumlar meydana gelebileceğinden, dinamik yüklere dayanma yeteneğini artırmak için güçlendirme yapıları oluşturulmuş; bunlar arasında ön çarpışma, yan çarpışma, düşme çarpışması gibi durumlar incelenmiştir. Batarya kutusunun statik veya dinamik yük altındaki güvenlik performansını kontrol etmek için ABAQUS sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Üçüncü olarak, şasi parçaları ile rezonansı önlemek için topografi optimizasyon yöntemi kullanılmış, optimizasyon sonuçları, geliştirilmiş yapının dinamik ve statik yük taşıma ve içsel frekans gereksinimlerini karşıladığını göstermiştir. Analiz sonuçları, batarya kutusunun alüminyum alaşımı ile karşılaştırıldığında yaklaşık %42 ağırlık azaltımı sağladığını göstermiştir.

Scurtu, Szabo, Mariasiu, Moldovanu, Mihali ve Jurco (2019) Bu çalışmada elektrikli araç trafik kazalarında yer aldığında batarya paketinin rijitliğini artırmak amacıyla bir çarpışma simülasyon analizi sunulmuştur. İlk olarak elektrikli araçların kullanım avantajlarını vurgulayarak, mevcut durum özetlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise batarya paketinin çarpışma analizini oluşturmak için gereken adımlar açıklanmıştır. Montaj modelinin katı model tasarımı, iki farklı batarya paketi modeli için ileri modelleme teknikleri kullanılarak oluşturulmuştur. Birinci model temel şekil

geometrisine sahiptir ve ikinci model çarpışma etkisini azaltmak için dış yüzeylere monte edilmiş bir şok emiciye sahiptir. Batarya paketinin çarpışma analizi, üç farklı hız durumu için yapılmıştır: 7 m/s, 14 m/s ve 21 m/s. Simülasyon sonuçları paylaşılmış ve şok emicili batarya paketi geometrisinin farklı avantajları ortaya konmuştur.

Carlstedt ve Asp (2020) Bu çalışmada yapısal batarya kompozit malzemesini kullanan elektrikli araçların sistem düzeyinde performansını tahmin etmek için yeni bir modelleme çerçevesi sunulmuştur. Elektriksel ve mekanik özellikler, bileşenlerin malzeme verilerinden, cihaz tasarımından ve bağlantı/döşeme düzenlerinden türetilmiştir. Yapısal batarya kompozitin çok fonksiyonlu, yani elektriksel ve mekanik performansı hakkında bilgi sahibi olmak, herhangi bir bilinen sürüş döngüsü için elektrikli araç sürüş menzilinin tahmin edilmesine olanak tanımıştır. Çerçeve, yapısal pillerin mevcut elektrikli araçlara entegrasyonunun sürüş menzili üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Tesla Model S ve BMW i3 için yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, korunan sürüş menzili performansıyla birlikte etkileyici bir araç ağırlığı tasarrufu potansiyeli göstermiştir. Alternatif olarak, yapısal pillerin tanıtılmasıyla araç ağırlığının korunması durumunda, hafif elektrikli araçlar için elde edilen sürüş menzili %70 artabileceği ortaya konmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında farklı yüzey malzemesi ile farklı kalınlıklara sahip çekirdek malzemeler kullanılarak sandviç kompozit malzemelerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yüzey malzemesi olarak Alüminyum-5754 ve Titanyum grade-2, çekirdek malzemesi olarak da alüminyum ve polipropilen bal petekleri kullanılmıştır. Kullanılan bal petekleri 5 mm, 10 mm ve 20 mm olmak üzere üç farklı kalınlığa sahiptir. Yüzey malzemeleri ile bal peteği yapılarının birleştirilmesi için tek bileşenli hibrid polimer yapıya sahip yapıştırıcı kullanılmıştır. Üretilen sandviç malzemelerden ASTM standartlarında basma, üç nokta eğilme ve ağırlık düşürme testleri için numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.1. Testlerde Kullanılan Malzemeler

Sandviç kompozit malzeme üretimi için kullanılabilecek çekirdek malzemeler çok çeşitli geometrilerde olup, farklı malzemelerden üretilebilmektedir. Kompozit malzeme tasarımı yapılırken kullanılacak çekirdek malzeme seçiminde oluşturulacak sandviç yapının kullanım yeri, kullanım amacı ve malzemeden beklenen özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu doğrultuda karar vermek için belirlenen ilk iki kriter yüksek dayanım ve hafifliktir. Bu iki kriteri de sağlaması için bal peteği yapılar düşük yoğunluklu malzemelerden üretilmektedirler. Literatür araştırmasına göre metal malzeme gurubundan ağırlıklı olarak alüminyum malzemeden üretilen bal peteği çekirdek malzeme olarak tercih edilmektedir. Metal olmayan malzemelerden üretilen bal peteği yapılar incelendiğinde ise çoğunlukla polipropilen ve Nomex – diğer bir ifadeyle karton – malzemeler karşımıza çıkmaktadır. Bu çekirdek malzemelere ait örnekler Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yaygın kullanılan çekirdek malzeme örnekleri.

Polipropilen çekirdek malzeme, diğer iki malzemeye göre göreceli olarak daha düşük dayanıma sahip olduğu ve daha düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu için denizcilik uygulamalarında daha çok kullanılmaktadır. Karton esaslı olan Nomex ve Al malzemeler ise yüksek mukavemet, korozyon direnci, tokluk ve yorulma direnci performansları nedeniyle havacılık ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada iki farklı çekirdek malzeme (Al ve PP), 5 mm, 10 mm ve 20 mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta kullanılmıştır.

3.1.1. Alüminyum Çekirdek Malzeme

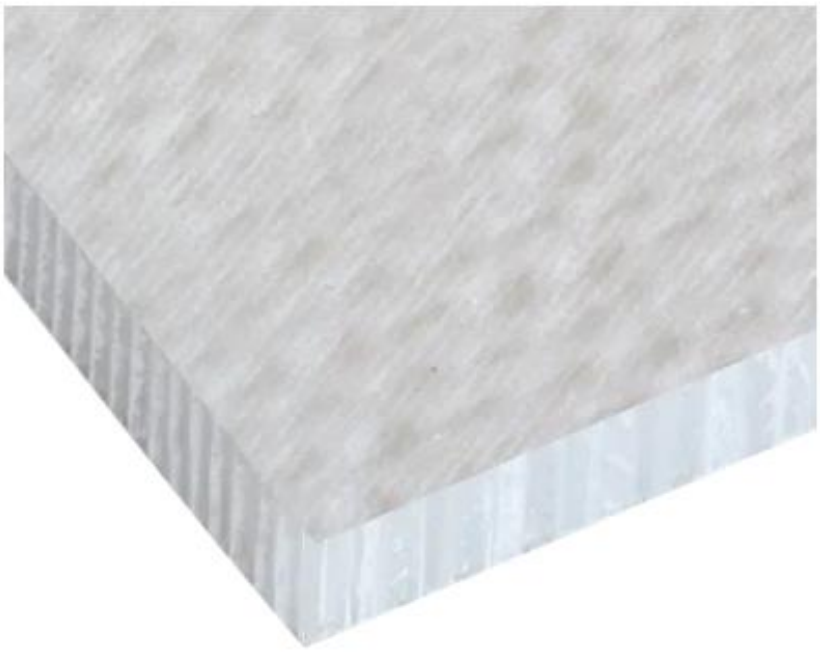
Alüminyum bal peteği çekirdek malzeme, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi özellikleri nedeniyle sandviç kompozit yapılarında yaygın olarak kullanılır. Alüminyum, darbelere karşı yüksek direnç, ısı ve yangın dayanımı, kimyasal dayanıklılık ve kolay işlenebilirlik sunar. Bu çekirdek malzemeler, havacılık, otomotiv, denizcilik, inşaat ve spor ekipmanları gibi çeşitli alanlarda tercih edilir. Yüksek darbe enerjisi emme kapasitesi sayesinde mekanik performansı artırır ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli avantajlar sağlar. Testlerde kullanılan Al bal peteği çekirdek malzemesine ait özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Testlerde kullanılan Al çekirdek özellikleri

Malzeme	Hücre Çapı (mm)	Yoğunluk (kg/m^3)	Basma Mukavemeti (MPa)	Kayma Mukavemeti (MPa)	
				L- ekseni	W- ekseni
Al	9,52	40	1,2	1,1	0,65

3.1.2. Polipropilen Çekirdek Malzeme

Polipropilen bal peteği çekirdek malzeme, hafif ve dayanıklı bir yapıya sahiptir. Altıgen hücre yapısı, yüksek mukavemet ve rijitlik sağlar. Polipropilenin darbe dayanımı ve enerji emme kapasitesi yüksektir. Ayrıca, kimyasal maddelere karşı dirençli ve suya dayanıklıdır, bu da uzun ömürlü olmasını sağlar. PP çekirdek malzemeler, metal malzemeleri bal peteklerinin aksine yüksek mekanik hafıza sahip olmadıklarından deformasyona uğradıklarında aldıkları şekli muhafaza ederler. Bu nedenle, sandviç yapı uygulamalarında daha etkili bir biçimde kullanılabilmeleri için her iki yüzeyine de 30 g/m^2 polyester tül uygulanmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Polyester tül uygulanmış PP bal peteği çekirdek malzeme.

Testlerde kullanılan PP bal peteği çekirdek malzemesine ait özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Testlerde kullanılan PP çekirdek özellikleri

Malzeme	Hücre Çapı (mm)	Yoğunluk (kg/m^3)	Basma Mukavemeti (MPa)	Kayma Mukavemeti (MPa)
PP	8	80-90	2	0,55

3.1.3. Alüminyum Yüzey Malzeme

Alüminyum, yoğunluğunun çelik veya bakırın yaklaşık üçte biri kadar olması, kolaylıkla dövülebilir, işlenebilir, dökülebilir ve %100 geri dönüştürülebilir olmasının yanında, üstün korozyon dayanımı ile endüstrinin pek çok alanında milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmasına sebep olmuştur. 5000 serisi alüminyumlarda birincil alaşım elementi magnezyumdur. Yüksek mukavemet, kaynaklanabilir olması ve yüksek korozyon direnci (deniz suyu ve kimyasallara karşı) ile özellikle gemi sanayisinde birçok kullanım alanına sahiptir. Üretilen sandviç yapıların bir kısmında yüzey malzemesi olarak 1mm kalınlığında Alüminyum-5754 sac kullanılmıştır. 5000 serisi alüminyumun diğer alüminyum serileriyle mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Alüminyum serilerinin mekanik özellikleri

Alaşım	Alaşım DIN	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukave-meti (%)	Uzama (min-%)	Sertlik (HB)	Yoğunluk (g/cm^3)
1050	Al99,5	105-145	85	4	34	2,71
3003	AlMnCu	145-185	115	5	45	-
3105	AlMn0,5Mg0,5	150-200	120	5	47	-
5005	AlMg1	125-165	80	5	47	-
5052	AlMg2,5	210-260	130	7	61	-
5754	AlMg3	210	80	17	52	2,72
5083	AlMg4,5Mn	275	125	15	75	2,73
6061	AlMgSiCu	343	318	11	95	2,70
6082	AlMgSi1	358	310	10	95	2,70
7075	AlZnMgCu1,5	533	462	8,5	150	2,80
8011	AlFeSl	105-145	90	6	35	2,71
8006	AlFe1,5Mn	90-125	60	4	-	2,71

3.1.4. Titanyum Yüzey Malzeme

Titanyum Grade 2 veya Ti Gr 2 malzeme, titanyum malzemeler arasında ticari saf titanyum olarak adlandırılan bir kaç farklı kaliteden birisidir. Titanyum Grade 2 malzemeler minimum %99 titanyum elementi içermektedir. Bu kalite EN normuna göre 3.7035 olarak, UNS normuna göre ise R50400 olarak adlandırılmaktadır. Titanyum Grade 2 malzeme, diğer saf titanyum malzemeler gibi oldukça iyi bir mekanik dayanım değerlerine sahiptir. Aynı zamanda bu malzeme oldukça düşük ağırlıktadır. Bu malzemeler sünek bir yapıya sahiptir ve bu nedenle oldukça iyi şekillendirilebilmektedir. Ticari olarak saf olan titanyum alaşımlarının korozyon direnci birbirine oldukça benzer değerlerdedir. Kimyasal bileşimlerindeki oksijen ve demir oranlarındaki farklılıklar mekanik özelliklerinde küçük farklılıklar yaratır. Tüm bu özellikleri sayesinde Titanyum Grade 2 malzemeler kimya sektöründe, denizcilik uygulamalarında, havacılık araçlarında ve medikal parçalarda sıklıkla kullanılmaktadır ve plaka, sac, şerit, çubuk, boru ve dövme şeklinde temin edilebilmektedir. Üretilen sandviç yapıların bir kısmında yüzey malzemesi olarak Titanyum Grade-2

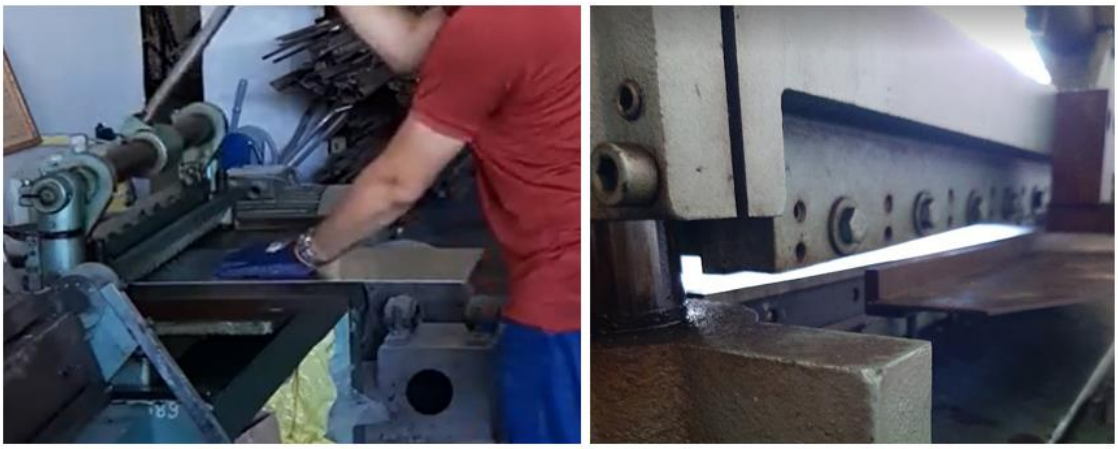
kullanılmıştır. Kullanılan sacın kalınlığı 1mm'dir. Titanyum Grade-2 için mekanik özellikler Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Titanyum Grade-2 mekanik özellikleri

Malzeme	**Akma Mukavemeti (MPa)**	**Kopma Mukavemeti (MPa)**	**Öz kütle (g/cm^3)**	**Uzama (%)**
Titanyum Grade - 2	280	345	4,51	18

3.2. Test Numunelerinin Üretimi

Deneylerde kullanılacak sandviç yapıların yüzey malzemesi olarak 1mm kalınlıkta Alüminyum ve Titanyum sac plakalar kullanılmıştır. Bu sac plakalar yapılacak teste ait olan ASTM standardına uygun olacak geometrilerde Şekil 3.3'te gösterilen sac kesim makinesinde boyutlandırılmıştır.



Şekil 3.3. Alüminyum ve Titanyum yüzey plakalarının numune boyutunda kesilmesi.

Yüzey malzemelerinin hazırlanmasından sonra, kullanılacak çekirdek malzemelerin boyutlandırma işlemine geçilmiştir. Uygulanacak deneye ait ASTM standardında belirlenen ölçülere uygun olacak şekilde çekirdek malzemeler maket bıçağı kullanılarak hassas bir şekilde kesilmiştir. Testler için hazırlanan örnek numuneler Şekil 3.4'te

gösterilmiştir. Kesilen numunelerin geometrik doğruluğu metre kullanılarak teyit edilmiş ve kesim işlemleri tamamlanmıştır.



Basma testi – çekirdek numunesi



Üç nokta eğilme testi – çekirdek numunesi

Şekil 3.4. Basma ve üç nokta eğilme testleri PP çekirdek malzemeleri.

ASTM test standartlarına göre hazırlanan yüzey malzemeler ile çekirdek malzemelerin birleştirme işleminde Soudal marka SMX – polimer® esaslı yapıştırma malzemesi kullanılmıştır. Soudal SMX polimer, Soudal tarafından üretilen ve yüksek performanslı yapıştırıcı ve sızdırmazlık malzemelerinde kullanılan bir polimer türüdür. Bu polimer, Silyl Modified Polymer (SMP) bazlıdır ve geleneksel poliüretan ve silikon bazlı ürünlere kıyasla çeşitli avantajlar sunar. Yüksek esneklik ve dayanıklılık sağlayan SMX polimerleri, hareketli yüzeylerde ve genişleme derzlerinde kullanıldığında önemli bir avantaj sunar. Ayrıca, UV ışınlarına karşı yüksek dirence sahiptir. Bu özelliği sayesinde dış mekan uygulamalarında uzun ömürlü performans sağlar. Hem iç hem de dış mekan uygulamalarında kullanılabilen bir malzemedir ve zorlu hava koşullarına karşı dayanıklıdır. Kimyasal madde direnci sayesinde endüstriyel uygulamalarda da tercih edilebilmektedir. Çevre dostu olan bu polimerler, genellikle solvent ve izosiyanat içermez, düşük emisyon değerlerine sahiptir. Soudal SMX polimer bazlı ürünler, inşaat ve yapı sektöründe derz dolgu ve sızdırmazlık işlemlerinde, farklı malzemelerin yapıştırılmasında (metal, cam, ahşap, plastik vb.), ıslak alanlarda su geçirmezlik sağlamak amacıyla ve endüstriyel montaj ve yapıştırma işlemlerinde yaygın olarak kullanılır. Çok yönlü kullanımları ve gelişmiş performans özellikleri ile bilinen bu polimerler, hem profesyonel uygulamalarda hem de amatör projelerde tercih edilebilir. Yapıştırma için kullanılan malzemeye ait teknik veriler Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Numune hazırlamada kullanılan yapıştırıcıya ait teknik veriler

Özellik	**Değer**
Baz malzeme	SMX-Hibrid Polimer
Kabuk oluşumu	~ 5 dk (20°C/ %65 Nem)
Kürlenme hızı	3mm / 24 saat (20°C/ %65 Nem)
Shore A sertlik	65 ± 5
Yoğunluk	1,47 g/ml
Isı dayanıklılığı (tam kürlenmede)	-40°C / +90°C
Elastikiyet modülü (%100)	2,30 N/mm^2 (DIN 53504)
Gerilme mukavemeti	3,20 N/mm^2 (DIN 53504)
Kopma uzaması (%)	%400 (DIN 53504)
Yüzey uygulama sıcaklığı	5 °C / 35 °C

Tüp şeklinde tedarik edilen yapıştırıcı malzemenin yüzey malzemesi ile çekirdek malzeme arasına uygulama işlemi için yapıştırıcı malzemenin içerisinde bulunduğu tüp boyutlarına uygun şekilde silikon tabancası kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcı ve örnek bir silikon tabancası Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 5. Kullanılan yapıştırıcı ve örnek bir silikon tabancası görseli.

Yapıştırma işlemi oda sıcaklığında ve Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği atölye binasında yapılmıştır. Sac malzemelerin çekirdek malzeme ile temas edecek yüzeylerine tüm alanda eşit olacak şekilde ve yaklaşık 2 mm kalınlıkta yapıştırıcı malzeme sürülmüştür (Şekil 3.6).



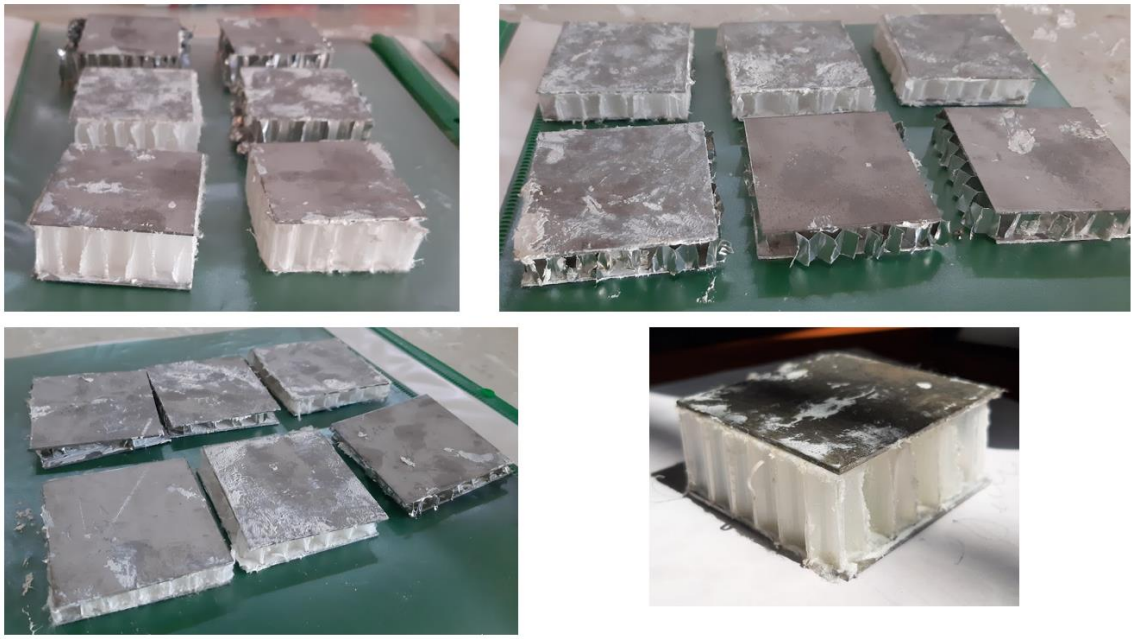
Şekil 3.6. Sac yüzeylere uygulanan yapıştırıcı malzeme.

Yapıştırma işlemi elle yapıldıktan sonra sandviç malzemeler ağırlık altında ve oda sıcaklığında 24 saat kürlenmeye bırakılmıştır (Şekil 3.7).

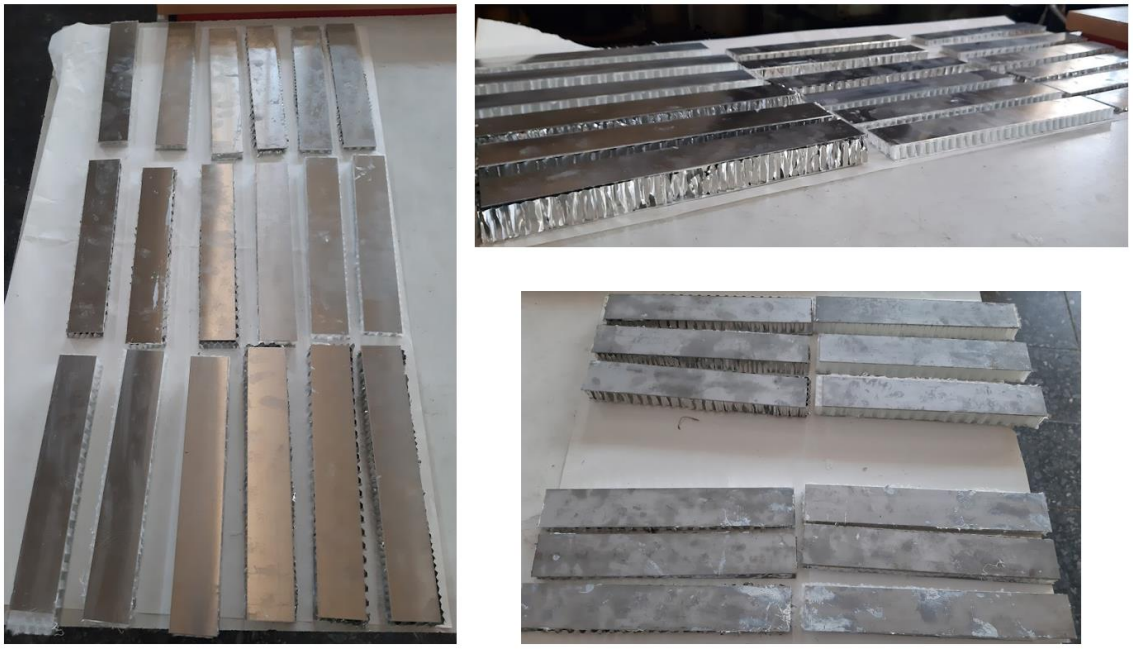


Şekil 3.7. Yapıştırılan sandviç numunelerin oda sıcaklığında ağırlık altında kürlenmesi.

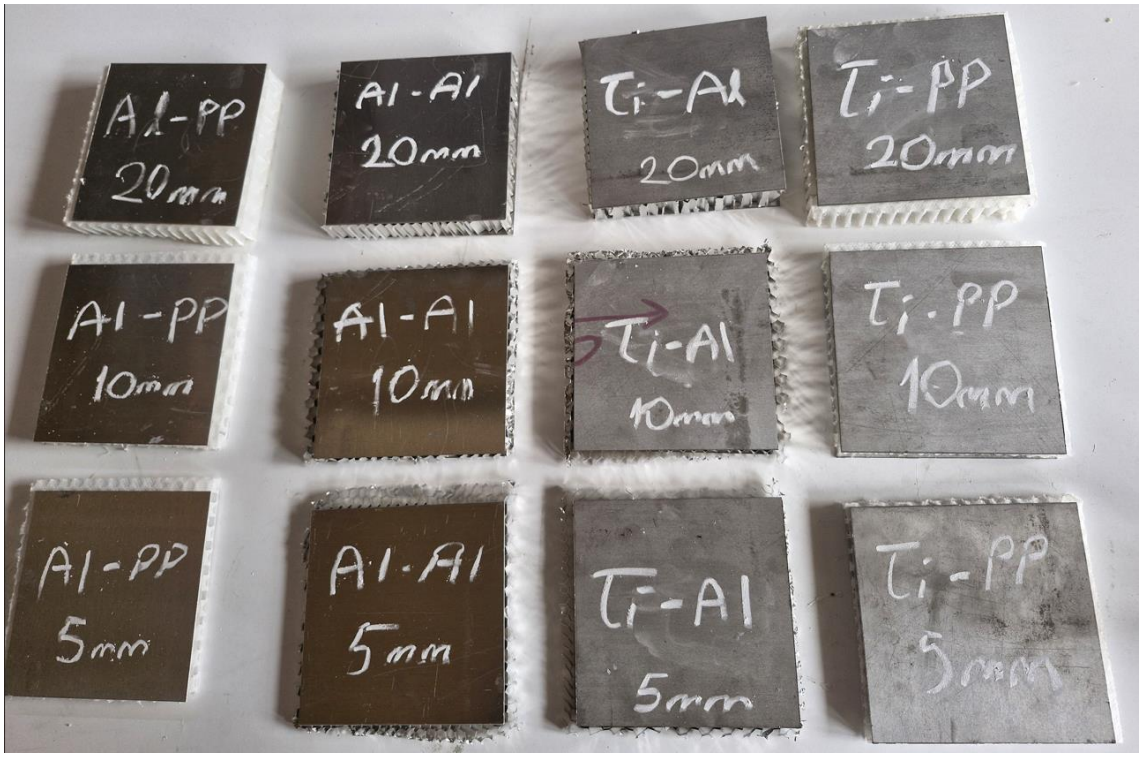
Yapıştırma işlemi sonrası basma testi için hazırlanan test numuneleri Şekil 3.8'de, üç nokta eğilme testi için hazırlanan test numuneleri de Şekil 3.9'da ve ağırlık düşürme testi için hazırlanan numuneler Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Basma testi için hazırlanan test numuneleri.



Şekil 3.9. Üç nokta eğilme testi için hazırlanan numuneler.

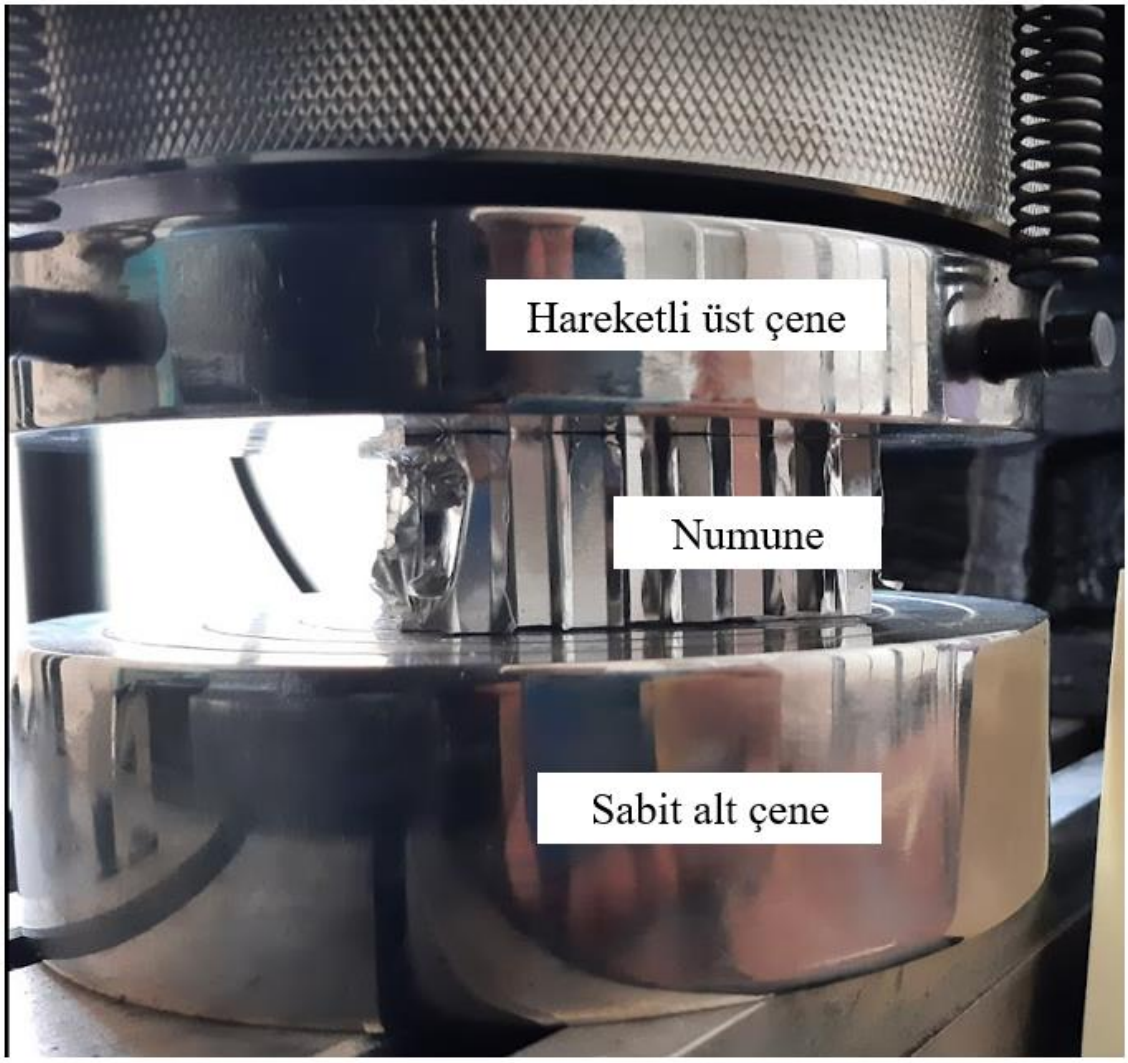


Şekil 3.10. Ağırlık düşürme testi için hazırlanan numuneler.

3.3. Basma Testi

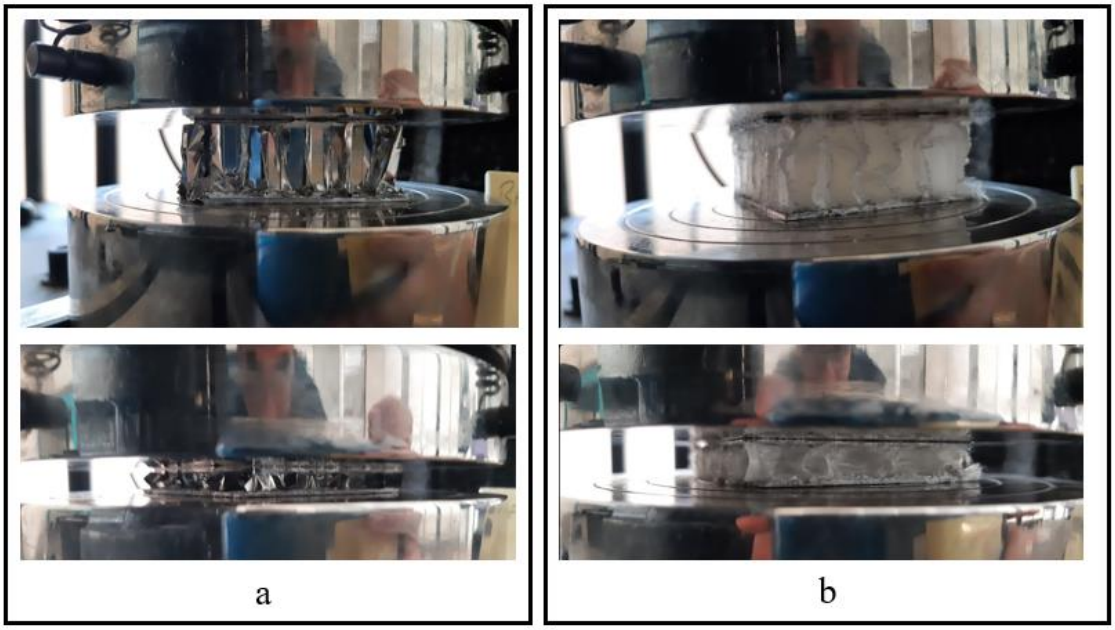
Üretimi tamamlanan sandviç kompozitlerin basma altındaki davranış özelliklerini belirlemek için kalınlık boyunca basma testi uygulanmıştır. Basma testi için ASTM C365 referans alınmıştır. Bu test yöntemi sandviç çekirdeklerin basma mukavemeti ve modülünün belirlenmesini kapsamaktadır. Test prosedürü özellikle kalınlık yönündeki basma işlemlerine ilişkindir, ancak küçük değişikliklerle diğer yönlerdeki basma özelliklerinin belirlenmesinde de uygulanabilir. Uygun çekirdek malzeme formları, sürekli yapışma yüzeylerine sahip olanlar (örneğin, balsa ağacı ve köpükler) ile kesintili yapışma yüzeylerine sahip olanlar (örneğin, petek yapısı) dahil olmak üzere çeşitli formları içerir. Kullanılan yüzey malzemenin basma testine etkisini görmek için sadece çekirdek malzemeye de basma testi uygulanmıştır. Testlerde kullanılan numune boyutları aynı standarda uygun olacak şekilde 50 mm x 50 mm olarak belirlenmiştir ve her numuneden 3 adet olacak şekilde testler yapılmıştır. Test cihazının hızı 0,5 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.11'deki basma aparatı kullanılarak, sabit alt çene üzerine ortalanacak şekilde konulan numuneye hareketli üst çene vasıtasıyla tanımlanan test

hızıyla yük uygulanarak basma testi yapılmıştır. Test esnasında uygulanan yük değeri ve buna karşılık gelen deplasman değerleri anlık olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.11. Basma testinde kullanılan düzenek.

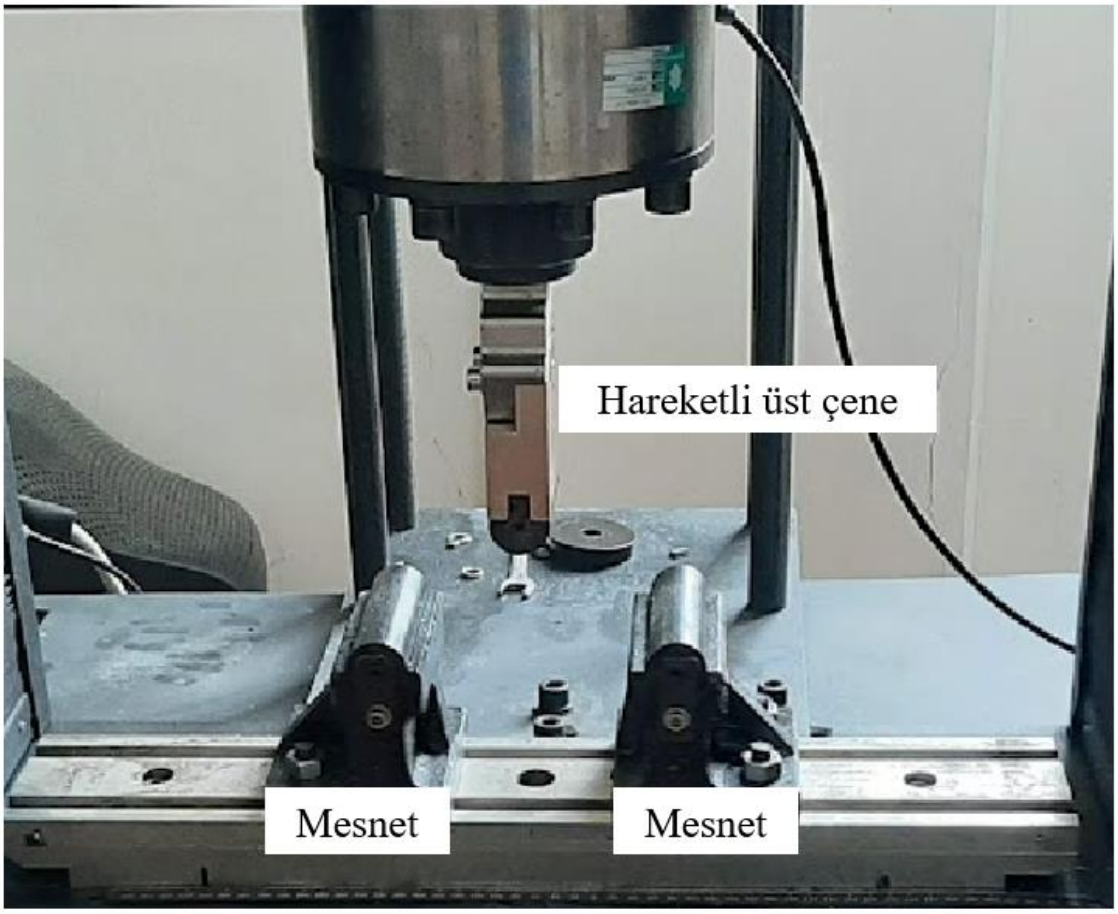
Farklı kalınlıklarda ve farklı çekirdek malzemeye sahip numunelere ait basma testi görselleri Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. a) Al çekirdek malzemeli basma testi b) PP çekirdek malzemeli basma testi.

3.4. Üç Nokta Eğilme Testi

Hazırlanan test numunelerine uygulanan diğer test ise üç nokta eğilme testidir. Yapılan üç nokta eğilme testinde ASTM C393 standardı uygulanmıştır. Üç nokta eğilme testi, düz sandviç yapının eğilme rijitliğini, çekirdek kesme mukavemetini ve kesme modülünü veya yüzeylerin basma ve çekme mukavemetlerini belirlemek amacıyla yapılabilir. Sandviç malzeme numune boyutları 150 mm x 50 mm olacak şekilde her bir çekirdek kalınlığında üçer adet numune test edilmiştir. Testler Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında bulunan Utest marka 250kN kapasiteli çok amaçlı çekme-basma test makinesinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Mesnetler arası mesafe 100 mm olarak, çene ilerleme hızı da 2 mm/dk olacak şekilde ayarlanmıştır. Kullanılan test düzeneği Şekil 3.13'de gösterilmiştir.

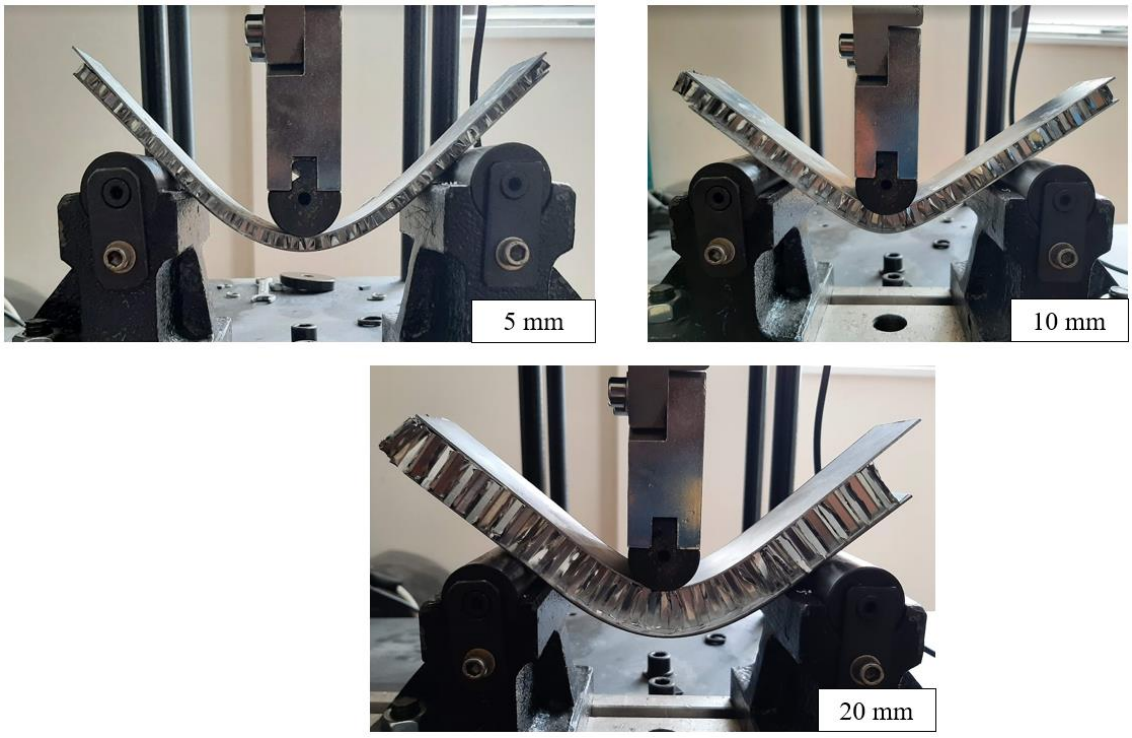


Şekil 3.13. Üç nokta eğilme testinde kullanılan düzenek.

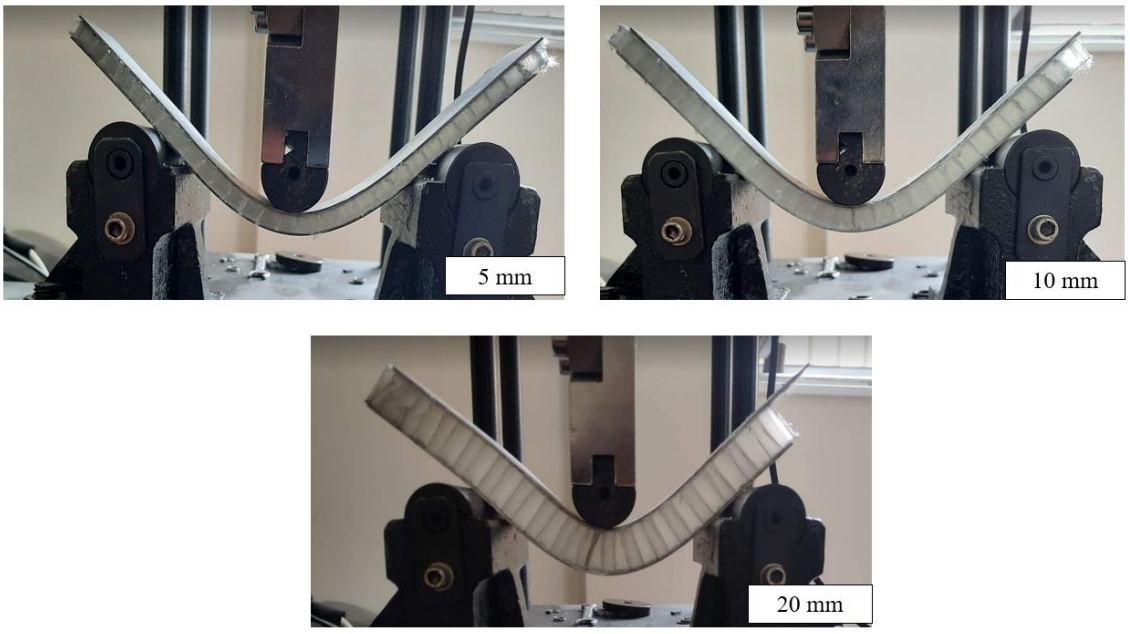
Her bir numune konfigürasyonu için 3'er adet parça test edilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre yapılan üç deneyin yük-deplasman eğrileri içerisinden tüm numuneleri ortalama olarak temsil edebilecek eğri seçilip grafikler bu eğriler ile oluşturulmuştur.

ASTM C393'e göre gerçekleştirilen üç nokta eğme test sonuçlarından çekirdek kayma stresi, eğilme modülü, yüzey eğilme direnci değerleri, deney sonuçlarından elde edilen grafikler yardımıyla hesaplanmıştır.

Farklı kalınlıklarda Al çekirdek malzemeye sahip numunelere ait üç nokta eğilme testi görselleri Şekil 3.14'de, PP çekirdek malzemeye sahip numunelere ait üç nokta eğilme testi görselleri Şekil 3.15'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Farkı kalınlıklardaki Al sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme testi.

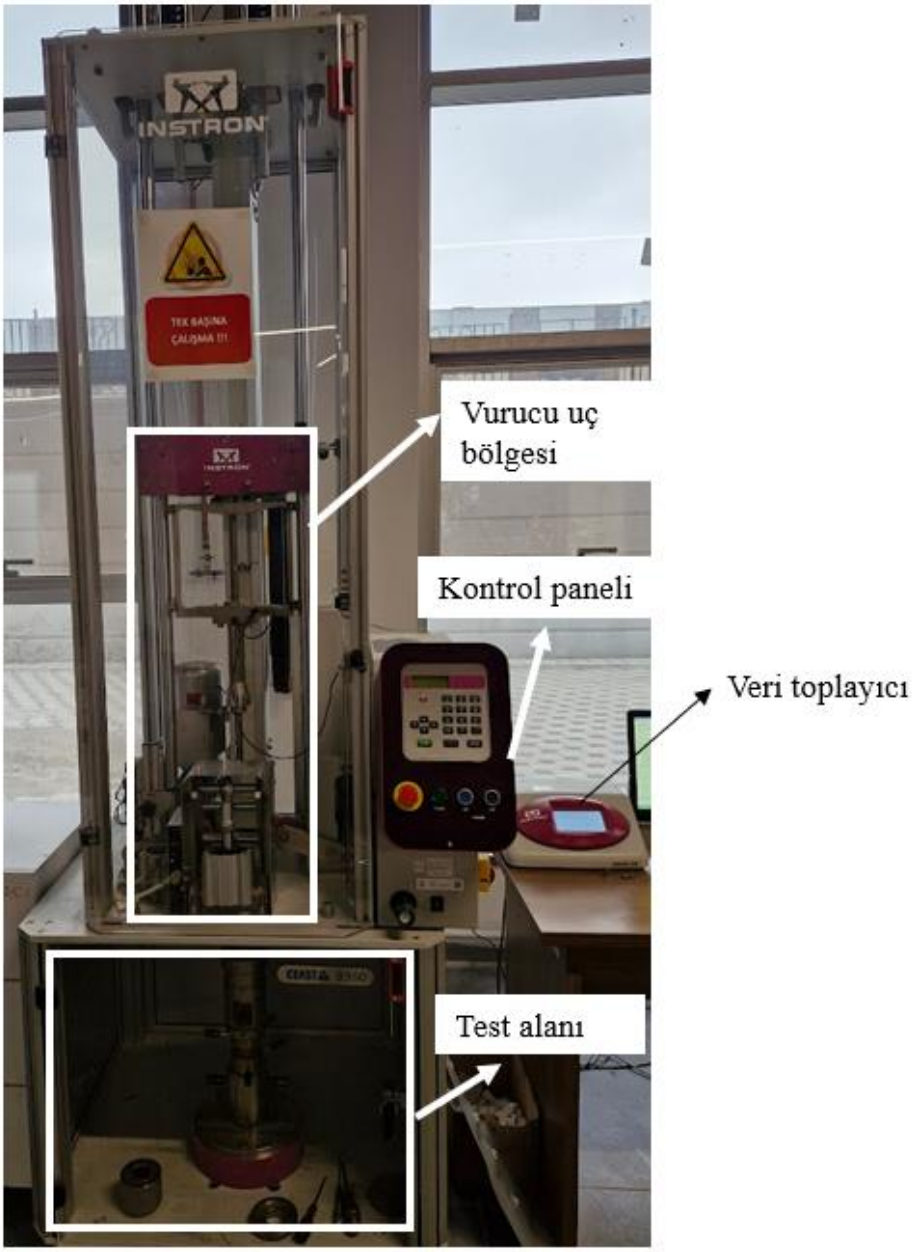


Şekil 3.15. Farkı kalınlıklardaki PP sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme testi.

3.5. Ağırlık Düşürme Testi

Farklı yüzey ve çekirdek konfigürasyonuna sahip sandviç panellerin dinamik yük etkisi altındaki mekanik davranışlarını incelemek amacıyla düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sandviç panel numunelerinin düşük hızlı darbe testleri, düşen ağırlık test yöntemi kullanılarak Bursa Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan INSTRON CEAST 9350 marka test cihazında, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan vurucu, yarı küresel geometriye sahip olup 20 mm çapında ve 2.8 kg ağırlığındadır. Test makinesi, belirlenen darbe enerji seviyesini elde etmek amacıyla hesaplanan bir yükseklikten belirli bir kütlenin düşürülmesini sağlayan bir düşme kulesinden oluşur. Düşük hızlı darbe test düzeneği ve test ekipmanlarına ait bilgiler Şekil 3.16'da verilmiştir.

Test sistemindeki parçaların kendi ağırlıkları olduğundan, başlangıç durumunda sistemde olan ağırlık yaklaşık 8.9 kg'dır. Belirlenen enerji seviyesine ulaşmak için vurucu kafanın üzerine 55 kg daha ağırlık eklenerek toplam ağırlık yaklaşık 64 kg ayarlanmıştır. Vurucu kafa hızı 2.8 m/s olarak belirlendiğinde program kendi hesaplama algoritmasına göre vurucu kafa yüksekliğini 0.4 m olarak ayarlamıştır.

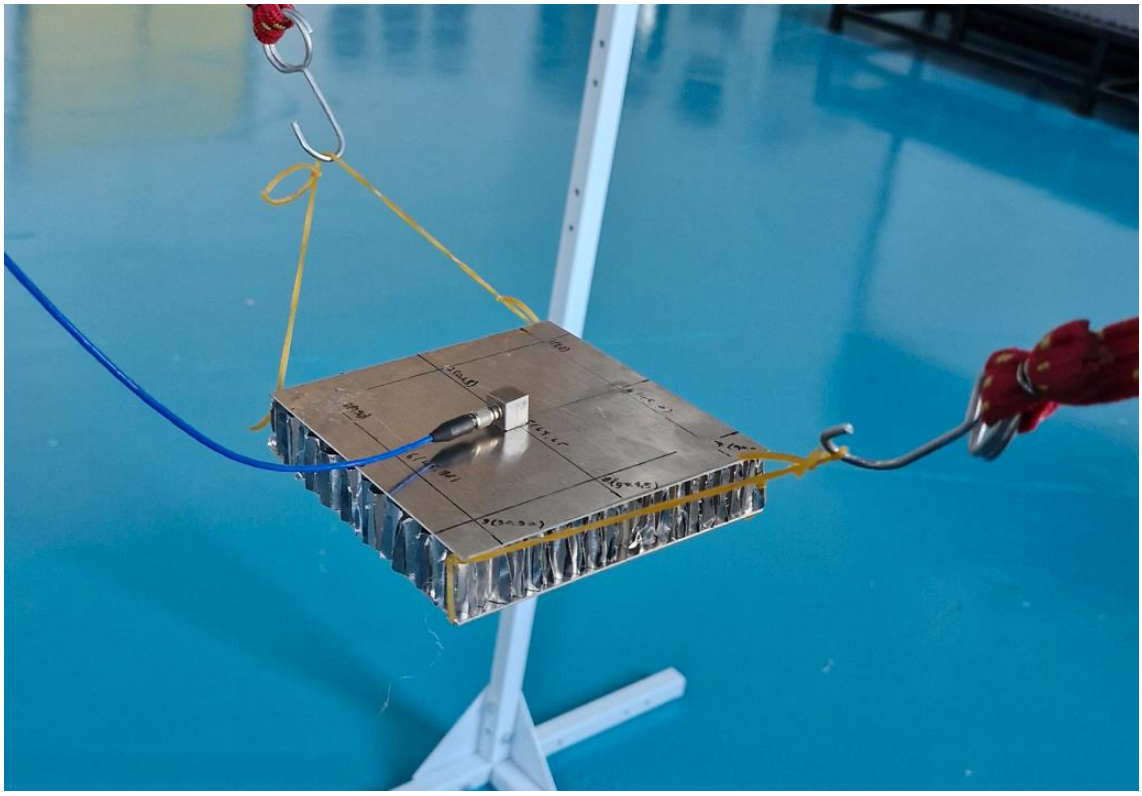


Şekil 3.16. Ağırlık düşürme test düzeneği bileşenleri.

3.6. Titreşim Testi

Bursa Uludağ Üniversitesi Arif Ağaoğlu ileri teknoloji ve mühendislik laboratuvarı BATEG araştırma alanında gerçekleştirilen titreşim testinde 120 mm x 120 mm boyutlarında alüminyum alt ve üst sacı ile 20 mm yüksekliğe sahip alüminyum bal peteği çekirdek yapısından oluşan sandviç malzeme kullanılmıştır. Hazırlanan sandviç

yapı dört köşesinden tüm eksenlerde hareketi serbest bırakacak şekilde paket lastikleri ile bağlanarak Şekil 3.17'de gösterildiği gibi titreşim testi platformuna bağlanmıştır.



Şekil 3.17. Titreşim testi düzeneği.

Parça üzerinde 9 adet düğüm noktası oluşturacak şekilde eşit bölmelere ayrılmış ve bu bölgelerin koordinatları test için kullanılan SIEMENS Simcenter paket programına tanımlanmıştır. Parça üzerinde belirlenen 9 ayrı noktaya sırasıyla ivmeölçer yerleştirilmiş ve yine 9 noktadan üçer vuruş yapılarak parçanın doğal frekans ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler sırasında kullanılan ivmeölçer ve çekice ait bilgiler Çizelge 3.6'da tanımlanmıştır. Test sırasında veri toplayıcı olarak yine SIEMENS marka Scadas RS U12 cihazı kullanılmıştır. Titreşim testlerinde genelde yaşanan zorluklardan bir tanesi ivmeölçer kablosunun test parçasına temas ederek sonuçları etkilemesidir. Bu durumu engellemek için ivmeölçer kablosu test platformunun üstünden getirilerek test parçasına jel kıvamında olan özel bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Bu sayede ivmeölçer kablosunun test parçasına teması engellenmiştir.

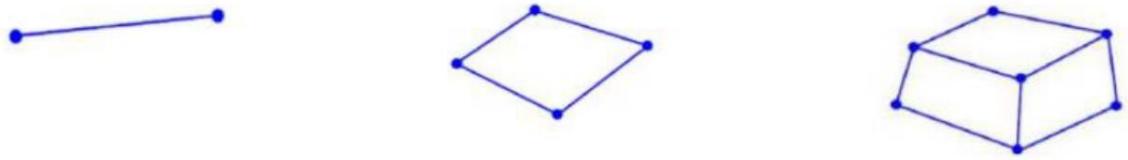
Çizelge 3.6. Titreşim testi ivmeölçer ve çekiç özellikleri.

Özellik	Değer
İvmeölçer markası	PCB piezotronics
İvmeölçer modeli	333B30
İvmeölçer hassasiyeti	97 mV/g
Çekiç markası	PCB piezotronics
Çekiç modeli	086C04
Çekiç hassasiyeti	1.219 mV/N

3.7. Sonlu Elemanlar Analizi

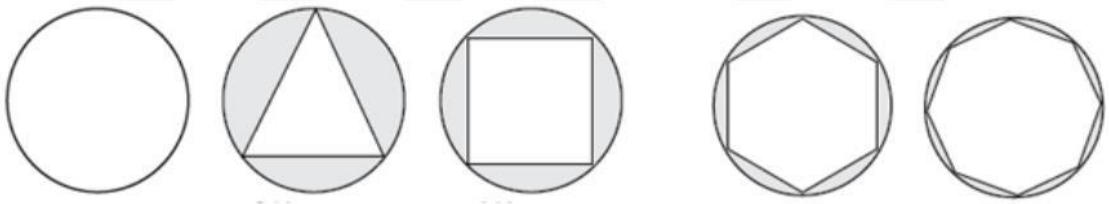
Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), karmaşık mühendislik ve fiziksel sistemlerin davranışlarını modellemek ve analiz etmek için kullanılan bir nümerik yöntemdir. Bu yöntem, bir yapı veya sistemin geometrisini küçük, sonlu elemanlara bölerek her bir elemanın fiziksel özelliklerini çözümlemeyi mümkün kılar. SEA, özellikle karmaşık şekilli veya heterojen malzemelerden oluşan yapılar için analitik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda büyük önem taşır. Statik, dinamik, termal ve akışkan analizlerinde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, mühendislerin güvenilir tasarımlar geliştirmesine, maliyetleri düşürmesine ve olası hataları öngörmesine olanak tanır. Bilgisayar destekli mühendislik araçları ile entegrasyonu, yüksek doğrulukla simülasyon yapmayı kolaylaştırır. Bu nedenle, SEA modern mühendislik ve bilim alanlarında vazgeçilmez bir çözümleme tekniği haline gelmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde problemin çözümü genellikle düğüm noktalarında gerçekleştirilir ve elemanlar üzerindeki sonuçlar, interpolasyon teknikleri yardımıyla belirlenir. Analizlerde kullanılan elemanlar, modelin gereksinimlerine göre farklı türlerde tanımlanabilir. Bu elemanlar; bir boyutlu çizgisel elemanlar, iki boyutlu kabuk elemanlar ve üç boyutlu katı elemanlar olarak sınıflandırılmaktadır ve Şekil 3.18'de verilmiştir. Her bir eleman türü, yapının geometrisine ve analiz türüne uygun bir şekilde seçilerek, çözümün doğruluğunu ve etkinliğini artırır. Bu yapı sayesinde SEA, geniş bir uygulama yelpazesine hitap eder.



Şekil 3.18. Sonlu eleman örnekleri (Karaca, 2023).

Sonlu elemanlar analizinde oluşturulan ağ yapısı, analiz sonuçlarının doğruluğu üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Analizlerdeki temel hedef, modelin geometrisini mümkün olan en doğru şekilde temsil edebilecek bir ağ yapısı oluşturmaktır. Örneğin, Şekil 3.19'da bir dairenin, farklı sayılardaki çizgilerle temsil edildiği bir örnek verilmiştir. Bu çizgiler, sonlu elemanlar olarak kabul edilebilir. Görsellerden anlaşılacağı üzere, çizgi sayısı arttıkça dairenin modeli gerçeğe daha yakın bir hale gelir ve buna bağlı olarak hata oranı azalır. Bu durum, ağ yoğunluğunun ve eleman boyutunun çözüm kalitesi üzerindeki önemini açıkça göstermektedir.



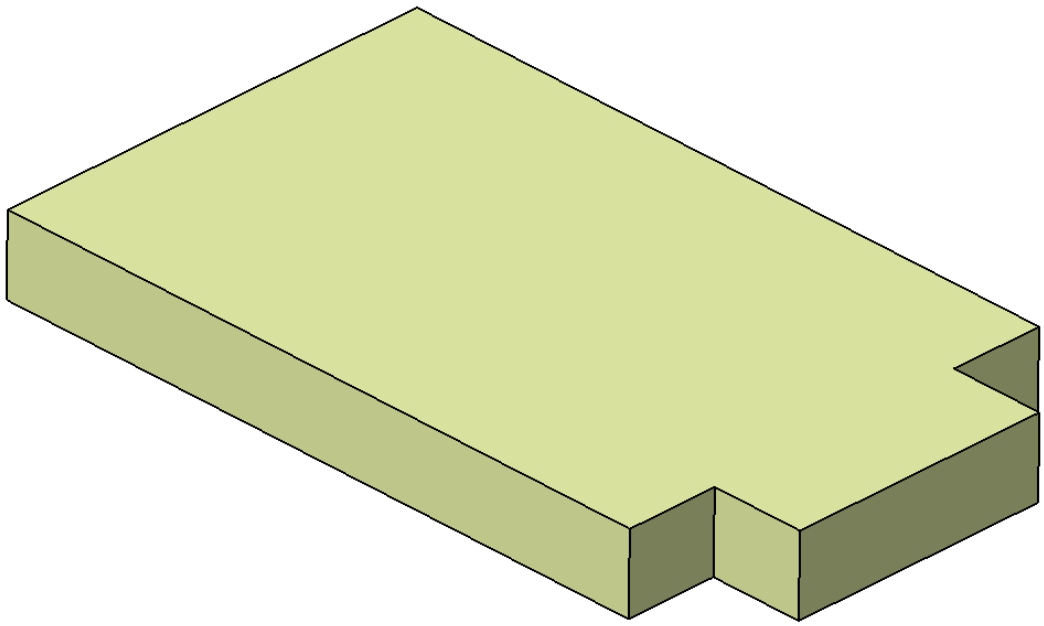
Şekil 3.19. Ağ yapısının geometri temsiliyet uygunluğu (Karaca, 2023).

Şekil 3.18'de verilen örnekte daire alanının 10 birim olduğu kabul edilirse, üçgen geometri ile daire alanı yaklaşık 4 birim, kare geometri kullanıldığında ise 6 birim olarak hesaplanacaktır. Kullanılan geometrinin kenar sayısı arttıkça gerçek değere yaklaşılmaktadır. Bu yaklaşıma göre doğru sonuca ulaşmak için mümkün olan en fazla kenar sayısına sahip geometri kullanılmalıdır. Fakat diğer taraftan unutulmamalıdır ki artan geometri kenar sayısı çözüm sürecini uzatacak ve çözüm maliyetini arttıracaktır. Bu durumda yapılması gereken, yapılan analizin hassasiyet derecesi ile çözüm maliyetleri arasında optimum değer bulunmalı ve bu yapı ile sonlu elemanlar analizleri yapılmalıdır. Diğer bir ifade ile eleman sayısı ile kabul edilebilecek doğruluk arasında denge kurulmalı, buna uygun olarak optimum ağ yapısı seçilmelidir (Karaca, 2023).

Kompozit malzemeler, anizotropik yapıları nedeniyle mekanik hesaplamaları oldukça zor ve karmaşık hale getirir. Bu tür malzemelerde hasar hem mikro hem de makro

düzeylerde meydana gelebilir. Hasarların oluşumunu, ilerlemesini ve bu durumun yapının genel davranışına olan etkilerini incelemek için sonlu elemanlar analizi vazgeçilmez bir araçtır. SEA, kompozit malzemelerin karmaşık yapısını detaylı bir şekilde modelleyerek, bu tür sorunların çözümlenmesini ve yapısal bütünlüğün daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu nedenle, kompozit yapıların tasarımı ve analizi sürecinde SEA kritik bir rol oynamaktadır.

Sonlu elemanlar çalışması için referans geometri olarak BMW i3 modelinde kullanılan batarya muhafaza kullanılmıştır. Oluşturulan katı model Şekil 3.20'de verilmiştir. Muhafazaya ait boyut bilgileri ise Çizelge 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.20. BMW i3 referans katı modeli.

Çizelge 3.7. 2013 BMW i3 batarya muhafaza boyut ve özellikleri (Anonim, 2022).

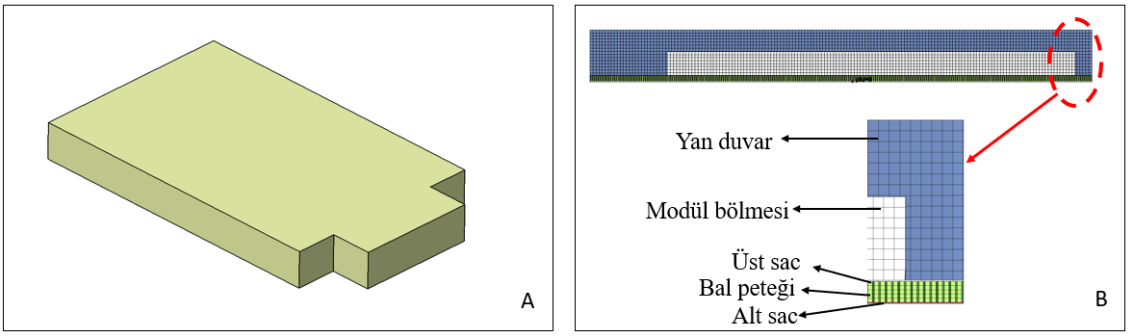
Özellik	Değer
Boy	1660 mm
En	964 mm
Yükseklik	174 mm
Hacim	278.4 litre
Toplam Ağırlık	235 kg

Tez çalışması kapsamında yapılan mekanik ve dinamik test sonuçlarının yanı sıra, sandviç malzemenin kullanım yeri ve beklenen temel özellikler göz önünde bulundurularak simülasyonlarda kullanılacak sandviç malzeme yapısı belirlenmiştir. Elektrikli araç batarya muhafazasında malzeme seçimi yapılırken mukavemet değerlerinin yanında değerlendirilmesi gereken farklı kriterler de bulunmaktadır. Hafiflik, yangına karşı dayanım, elektrik iletkenliği, kullanım ömrü, geri dönüştürülebilirlik gibi parametreler de değerlendirildiğinde, optimum sonucu veren malzeme konfigürasyonu olan 1 mm kalınlıkta alüminyum alt/üst sac ve 20 mm kalınlıkta alüminyum bal peteği çekirdek malzemesinden oluşan sandviç yapı, batarya muhafazanın alt sacı yerine alternatif olarak incelenmiştir. İki çekirdek malzemenin malzeme belirleme parametreleri açısından değerlendirmesi Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Sandviç malzemeleri performans karşılaştırması.

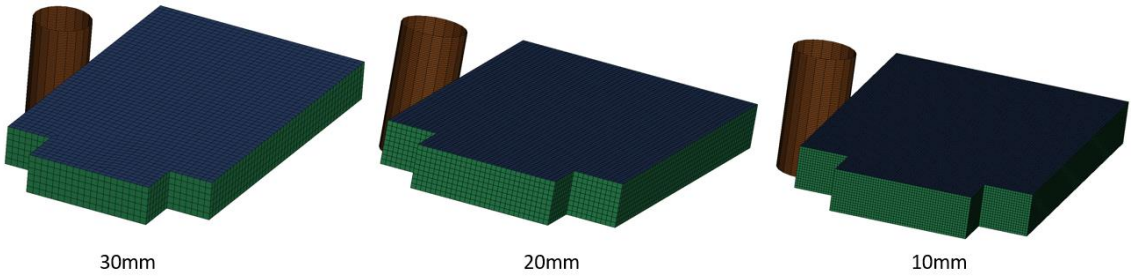
Özellik	Al 5754	Ti Grade-2	Al Bal peteği	PP Bal peteği
Mukavemet	☺☺	☺☺☺	☺☺☺	☺☺
Hafiflik	☺☺☺	☺	☺☺	☺☺☺
Sıcaklık dayanımı	☺☺	☺☺☺	☺☺☺	☺
Elektrik yalıtımı	☺	☺☺☺	☺	☺☺☺
Uzun ömürlülük	☺☺	☺☺☺	☺☺☺	☺☺
Geri dönüştürülebilirlik	☺☺☺	☺	☺☺☺	☺
Maliyet	☺☺☺	☺	☺☺	☺☺☺

Bu doğrultuda ilk oluşturulan katı modeldeki alt sac iptal edilerek sandviç yapı montajı yapılmıştır. Modele yerleştirilen sandviç yapıdaki bal peteği geometrisinin detaylı olması ve muhafaza geometrisinin simetrik olması nedeniyle çözüm süresi optimizasyonu için yarım model kullanılmıştır. Referans model ile analizleri yapılan ikinci batarya muhafazasına ait katı model görselleri Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. a) Referans katı model ve b) sandviç yapılı model.

Simülasyonlardaki çözüm ağı yakınsaması, bir modelin sayısal çözümünün doğruluğunun ve kararlılığının analizinde kritik bir rol oynar. Çözüm ağı, kullanılan ağ elemanlarının (örneğin, hücre boyutları veya zaman adımları) incelik seviyesini ifade eder ve yakınsama, ağ inceldikçe sayısal çözümün gerçek çözüme yaklaşma eğilimini tanımlar. Genellikle, ağ yoğunluğu artırıldığında çözüm doğruluğu artar, ancak bu işlem hesaplama maliyetlerini de önemli ölçüde yükseltir. Bu nedenle, yakınsama analizi, optimal bir ağ yoğunluğu belirlemek için kullanılır. Bu tez çalışmasında hazırlanan katı modellerin ağ yapıları Hypermesh paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Çözüm ağı yakınsamasını belirlemek için referans modele 30 mm, 25 mm, 20 mm, 15 mm ve 10 mm'lik ağ boyutları uygulanmıştır. Aynı sınırlayıcı koşullar altında farklı çözüm ağı boyutlarında oluşturulan modeller üzerinde direğe yandan çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çözüm ağı boyutları arasında 30 mm, 20 mm ve 10 mm olanları Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Farklı çözüm ağı boyutlarına sahip modeller.

Sonlu elemanlar analizlerinden direğe yandan çarpma testinde kullanılan direk ve penetrasyon testinde kullanılan pahlı çivi modelleri için tanımlanan malzeme bilgisi Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9. Direk ve pahlı çivi malzeme özellikleri.

Özellik	**Değer**
Yoğunluk	7900 kg/m^3
Elastisite modülü	200 GPa
Poisson oranı	0.3
Malzeme modeli	Shell

Referans model olarak kullanılan BMW i3 batarya muhafazasında alüminyum alaşım malzeme kullanılmıştır. Alüminyum 6061-T6 alaşımı yüksek işlenebilirlik özelliği, korozyona karşı dirençli olması ve mukavemet-ağırlık oranının oldukça yüksek olması gibi nedenlerden dolayı süspansiyon sistem parçaları, gövde panelleri ve tekerlekler gibi birçok otomobil parçasında kullanılmaktadır. Alüminyum 6061-T6 alaşım malzemesi için Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak tanımlama yapılmıştır. Bu malzeme modeli, özellikle metallerin yüksek şekil değiştirme hızları, yüksek sıcaklıklar ve büyük plastik deformasyonlar altında davranışını tanımlamak için geliştirilmiş bir ampirik modeldir. Bu model hem malzemenin akma gerilmesini hem de hasar mekanizmalarını dikkate alarak dinamik analizlerde sıkça kullanılmaktadır. Özellikle çarpışma, balistik darbeler, metal şekillendirme ve patlama simülasyonlarında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Johnson-Cook modeline ait malzemenin alma gerilmesi formülü aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\dot{\varepsilon}^*)\left[1 - \left(\frac{T-T_R}{T_m-T_R}\right)^m\right] \quad (3.1)$$

Johnson-Cook malzeme modelinin gösterildiği denklem 3.1'de σ_y akma gerilmesi, $\dot{\varepsilon}^*$ normalize gerinme hızı oranı, T_m erime sıcaklığı, ε gerinme ve T_R referans oda sıcaklığını temsil etmektedir. Dayanım hesaplamasında kullanılan girdiler A akma dayanımı, n gerinme sertleşme katsayısını, m termal yumuşama katsayısını, B gerinme sertleşme sabitini ve C gerinme hızı güçlendirme katsayısını temsil etmektedir. LS-DYNA SEA programında malzeme tanımında kullanılan parametreler ve sayısal değerleri Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Johnson-Cook malzeme katsayıları (Acar vd., 2023).

Parametre	**Sembol – (birimi)**	**Değer**
Yoğunluk	Ro (kg/m^3)	2700
Elastisite modülü	E (GPa)	70
Kayma modülü	G (GPa)	26
Poisson oranı	PR	0.33
Akma gerilmesi	A (MPa)	324
Sertleşme katsayısı	B (MPa)	114
Gerinme hızı	C	0.002
Termal yumuşama katsayısı	M	1.34
Sertleşme üssü	N	0.42
Erime sıcaklığı	Tm (K)	925
Oda sıcaklığı	TR (K)	293
Referans gerinim oranı	EPSO (s-1)	0.001
Spesifik sıcaklık	CP (Jkg-1K-1)	1256
Kırılma katsayısı 1	D1	-0.77
Kırılma katsayısı 2	D2	1.45
Kırılma katsayısı 3	D3	-0.47
Kırılma katsayısı 4	D4	0
Kırılma katsayısı 5	D5	1.6

Literatürdeki alüminyum bal peteği ile yapılan analiz çalışmaları incelendiğinde hem sonuçların doğruluğu hem de çözüm süresinin verimliliği açısından AA3003-H18 çekirdek malzemesi için elastik-mükemmel plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeline göre malzeme elastik deformasyon sınırına ulaştıktan sonra herhangi bir sertleşme davranışı göstermeden plastik olarak şekil değiştirdiği kabul edilmektedir. Bu çerçevede çekirdek malzeme tanımı için elastisite modülü 67.6 GPa ve akma dayanımı 215 MPa değerleri kullanılmıştır (Sun vd., 2021).

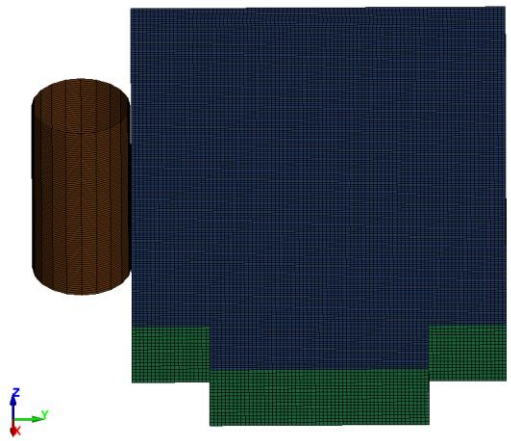
3.7.1. Direğe Yandan Çarpma Analizleri

Direğe yandan çarpma testi, araç güvenliğini değerlendirmek için yapılan önemli bir çarpışma testidir. Bu testte, bir araç belirli bir hızda dar bir direğe yandan çarptırılır ve çarpışmanın araç üzerindeki yapısal ve yolcu koruma etkileri incelenir. Özellikle yan hava yastıkları, kapı panelleri ve araç gövdesinin enerji emme kapasitesi bu testte kritik rol oynar. Direk gibi dar engellerle oluşan çarpışmalar, enerjinin küçük bir alana yoğunlaşması nedeniyle aracın dayanıklılığı açısından zorlu bir senaryo oluşturur. Test, sürücü ve yolcuların maruz kaldığı kuvvetleri ve ivmeleri, aracın içine girme ve deformasyonunu ölçer. Testin sonuçları, araç tasarımında güvenlik iyileştirmeleri yapmak ve yolcuların çarpışma anındaki korunma seviyesini artırmak için kullanılır.

Bu tez çalışmasında, iki farklı batarya muhafazasının direğe yandan çarpma durumunda çarpışma dayanıklılığı analiz edilmiştir. Analizlerde Avrupa'daki yandan çarpma testleri için tanımlanan düzenlemeler, EURO NCAP'in direğe yandan darbe testi kılavuzu ve ABD'deki FMVSS 214 standardı temel referans olarak kullanılmıştır (Dağdeviren, Yavuz, Kocabaş, Ünsal ve Esat, 2016) .

Analizde darbe unsuru olarak kullanılan direk, uluslararası standartlarca tanımlanmıştır. Bu standartlara göre direğin çapı 254 mm olarak belirlenmiştir. Direk malzeme özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir. Direk geometrisi Belytschko-Tsay-4 düğüm ince kabuk elemanları ile modellenmiştir.

EURO NCAP standardında direğe yandan çarpma testi, bir aracın 8 m/s hızla ilerlerken yandan boyutları belli olan katı bir direğe çarpması olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada da test şartlarını sağlayacak şekilde katı direğin üç ekseninde hareketi ve üç ekseninde dönüşü sınırlandırılmıştır. Komple araç modeli yerine, araştırma konusu olan batarya muhafazasının katı modeli sabit direğe doğru hareketlendirilmiştir. Oluşturulan simülasyon modeline ait görsel Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Direğe yandan çarpma simülasyon modeli.

3.7.2. Penetrasyon Analizleri

Elektrikli araçların batarya muhafazası için yapılan penetrasyon testi, bataryanın güvenliğini değerlendirmek amacıyla uygulanan bir dayanıklılık testidir. Bu test, batarya muhafazasının dışarıdan gelen kesici, delici veya darbe kuvvetlerine karşı direncini ölçmeyi amaçlar. Özellikle, trafik kazaları sırasında batarya hücrelerinin delinmesini, kısa devre oluşumunu ve yangın riskini önlemek için muhafazanın sağlamlığı test edilir. Genellikle bir çubuk veya sivri bir nesne belirli bir hız ve kuvvetle muhafazaya uygulanarak yapısal bütünlük ve enerji dağıtma kabiliyeti incelenir. Testin sonuçları, batarya tasarımında kullanılan malzemelerin, duvar kalınlığının ve yapılandırmanın güvenlik standartlarına uygunluğunu belirlemek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, bu testler uluslararası düzenlemelere ve standartlara uygun olarak gerçekleştirilir.

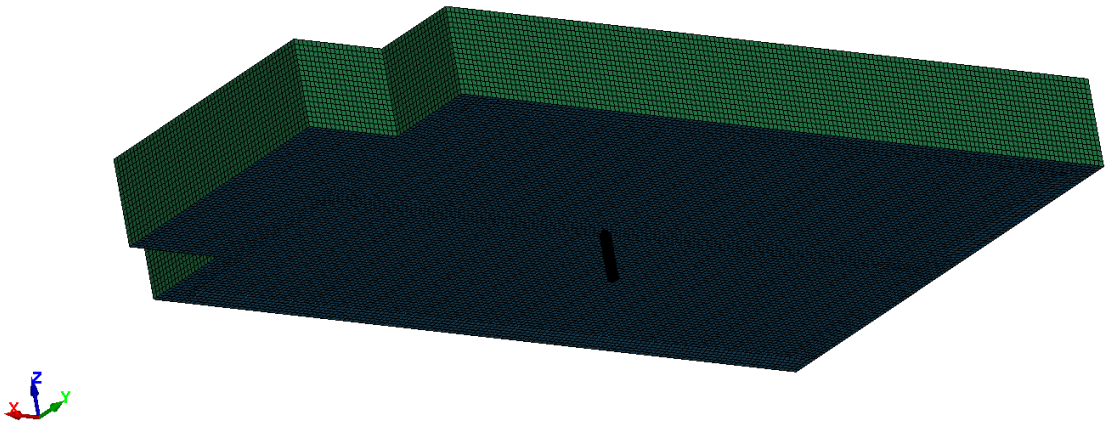
Çivi penetrasyon testinde bataryada hem mekanik hem de elektriksel hasar meydana gelebilir. Hücre boyutlarındaki yapılar için 3 mm çapında, modüler yapılar için ise 20 mm çapında keskin uçlu bir çivi, bataryanın içinden sabit bir hızla itilir. Bu test genellikle bir elektrik testi yerine mekanik bir test olarak sınıflandırılmaktadır.

Analiz batarya muhafaza boyutunda yapılacağı için 20 mm çapında bir çivi, standartlarda belirtilen koşullara uygun olarak modellenmiştir (SAE, 2009). Çivi modeli 100 mm uzunluğundadır ve ucu 45° pah açısıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan çiviye ait malzeme özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir. Çiviye ait katı model Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Çivi katı modeli.

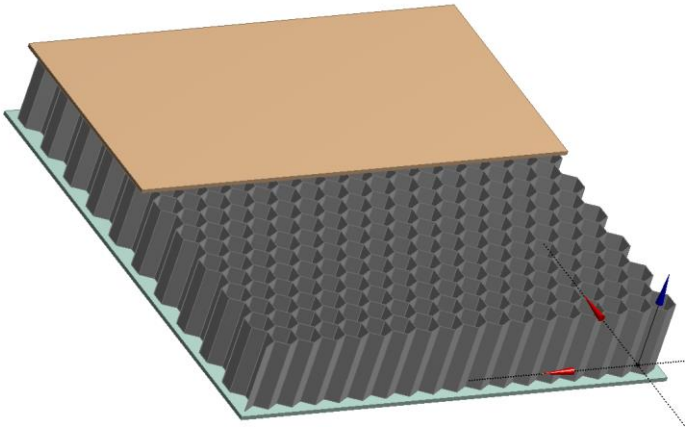
Penetrasyon analizine ait oluşturulan simülasyon modeli Şekil 3.25'teki gibidir.



Şekil 3.25. Penetrasyon simülasyon modeli.

3.7.3. Doğal Frekans Analizi

Sandviç yapıya ait doğal frekans analizi için yapılan çekiç testi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çekiç testinde olduğu gibi 120 mm x 120 mm boyutlarında ve 1 mm kalınlıkta alüminyum alt-üst sac ile 20 mm kalınlıkta alüminyum çekirdek malzeme katı modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.26). Bu modele Alüminyuma ait malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra Ansys sonlu elemanlar analiz programının modal analiz alt paketinde geometriye ait doğal frekans analizi yapılmıştır.



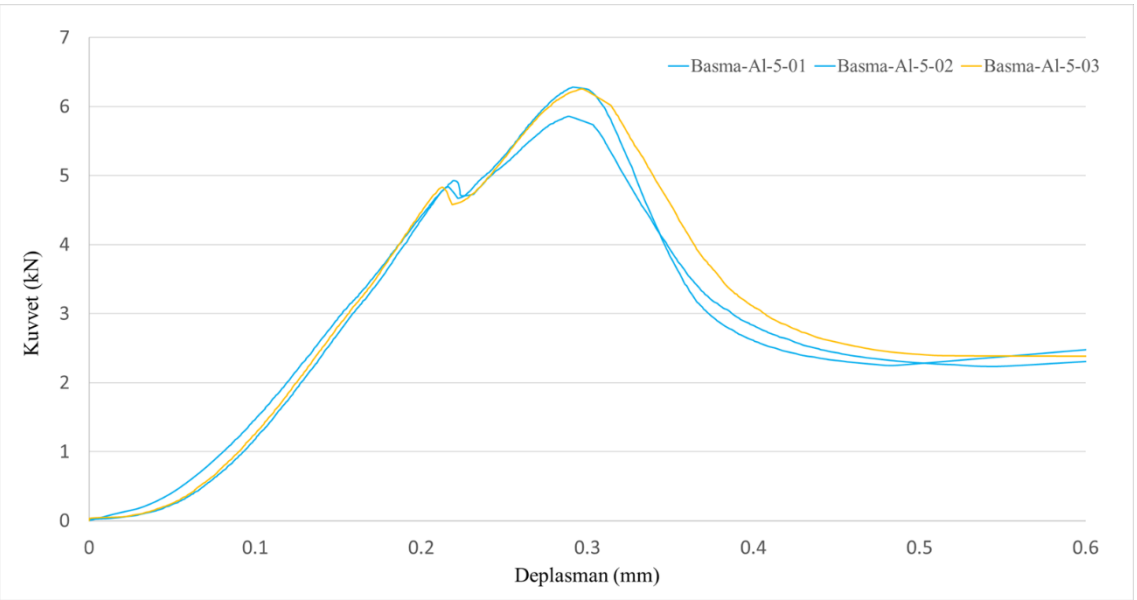
Şekil 3.26. Modal analiz simülasyon modeli.

4. BULGULAR

Alüminyum ve titanyum yüzey malzemesi ile polipropilen ve alüminyum çekirdek malzemeden üretilen sandviç kompozitlerin basma ve üç nokta eğilme testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrasında malzemelerin deformasyon bölgeleri ve şekilleri incelenmiştir. Test esnasında yük ve deplasman değerleri anlık olarak ölçülmüş ve sonrasında grafiklere oluşturulmuştur. En uygun sonuçları temsil eden numuneye ait eğriler, karşılaştırmalı grafiklerde kullanılmak üzere seçilmiştir.

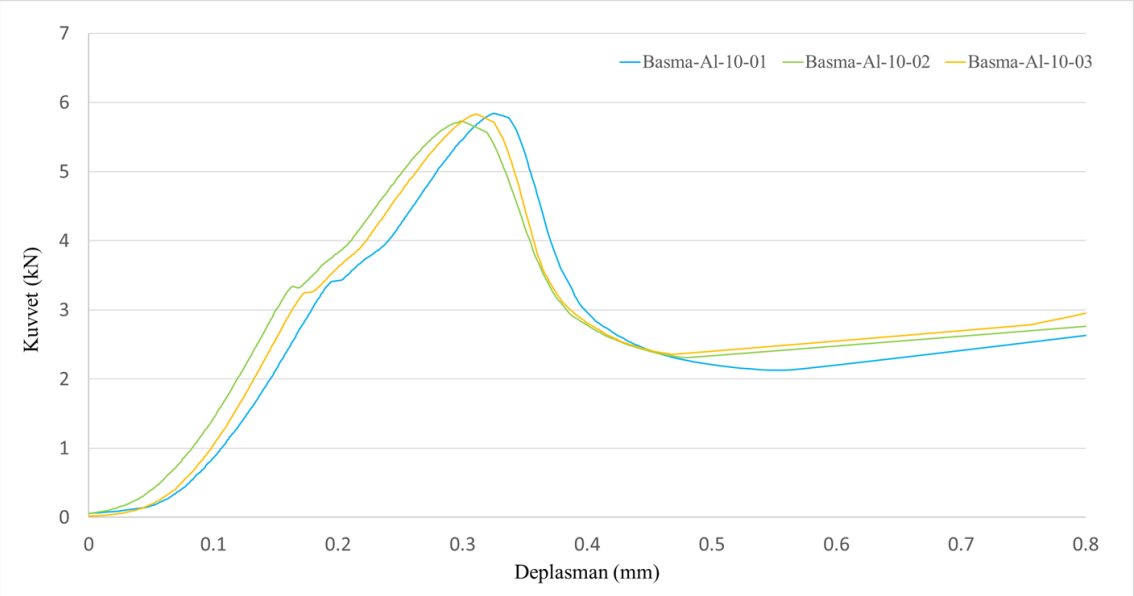
4.1. Alüminyum Çekirdek Malzemeli Numunelerin Basma Test Sonuçları

Sadece 5 mm çekirdek kalınlığına sahip alüminyum çekirdek malzemeye yapılan basma testi sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir.



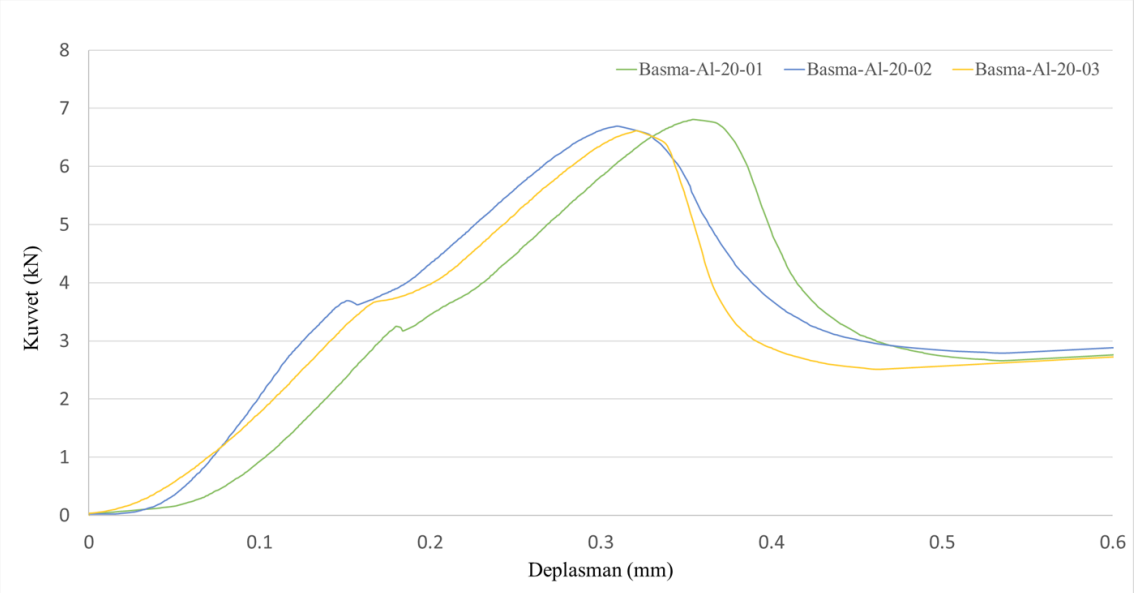
Şekil 4.1. Alüminyum çekirdek (5 mm) basma testi sonuçları.

Sadece 10 mm çekirdek kalınlığına sahip alüminyum çekirdek malzemeye yapılan basma testi sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir.



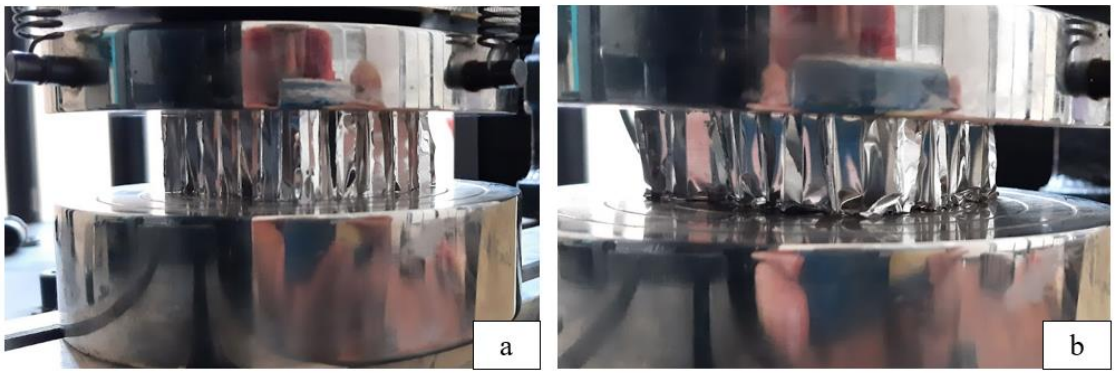
Şekil 4.2. Alüminyum çekirdek (10mm) basma testi sonuçları.

Sadece 20 mm çekirdek kalınlığına sahip alüminyum çekirdek malzemeye yapılan basma testi sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Alüminyum çekirdek (20 mm) basma testi sonuçları.

20 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemesinin tekil basma testi başlama anı ve bitişindeki görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir.



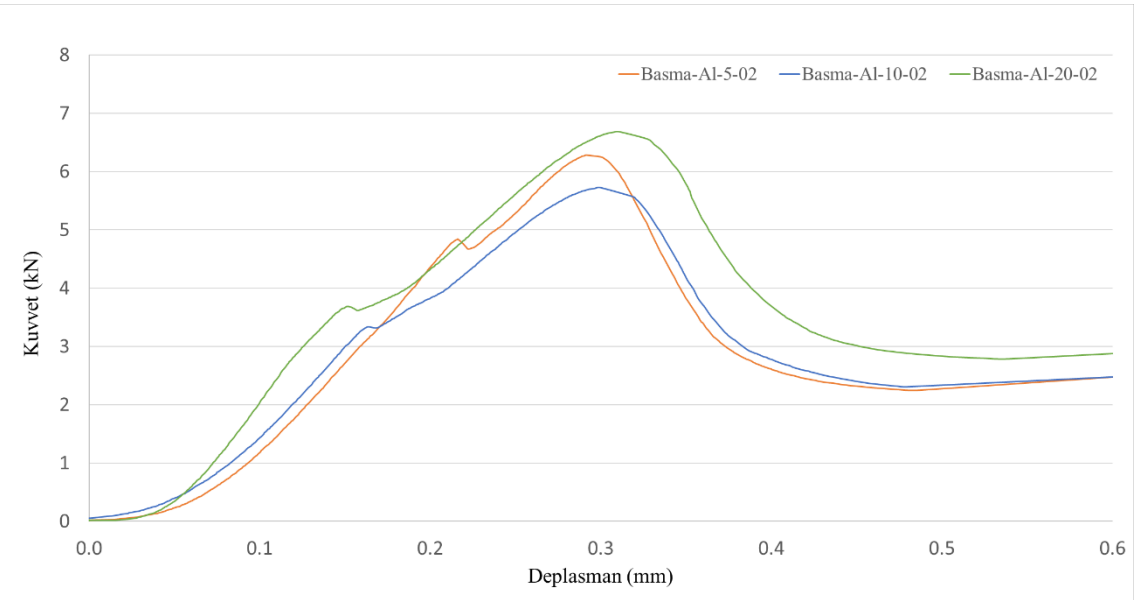
Şekil 4.4. Alüminyum çekirdek basma testi. a) Başlama anı b) Bitiş anı

Test sonrası parçaya ait fotoğraflar Şekil 4.5'teki gibidir. Bal peteği geometrisindeki şekil bozulmalarının basma testinin hareketli çene tarafındaki kısmında (üst yüzeyinde) oluştuğu görülmektedir. Söz konusu deformasyon bölgesi kırmızı ile işaretlenmiştir.



Şekil 4.5. Alüminyum çekirdek basma test sonrası fotoğrafları.

Üç farklı kalınlığı temsil eden en uygun üç parçaya ait basma testi sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir.

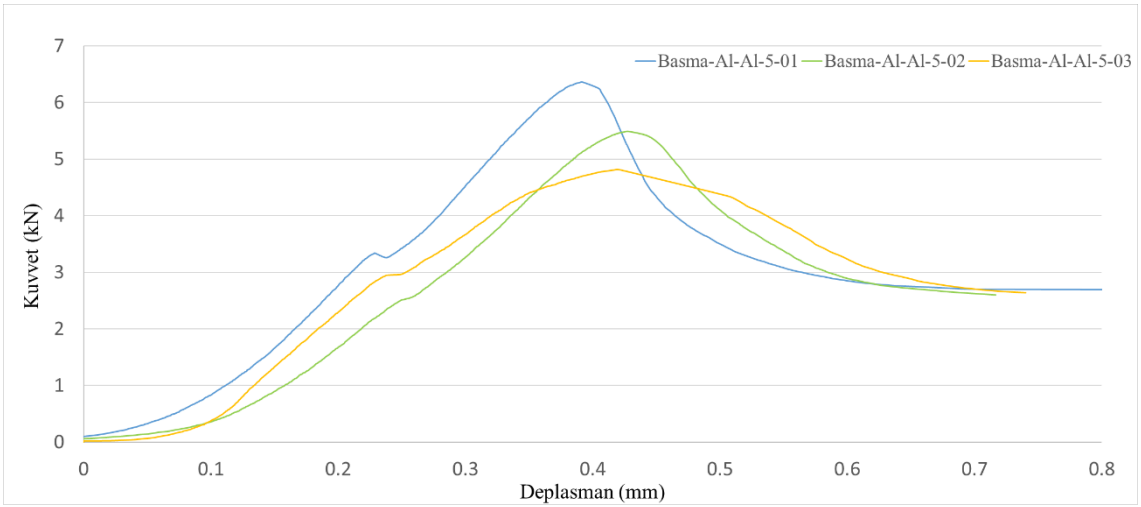


Şekil 4.6. Alüminyum çekirdek basma testi kombine sonuçları.

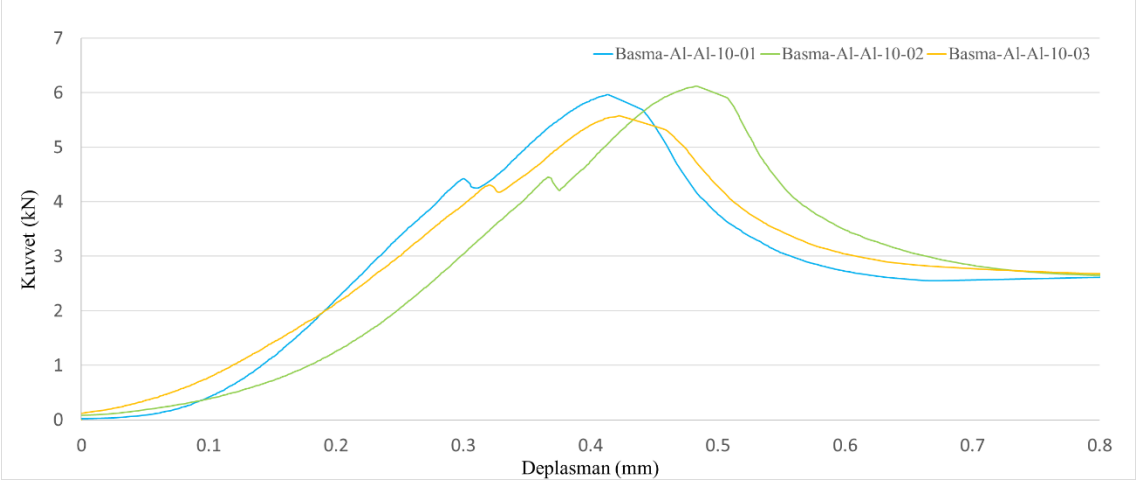
Alüminyum yüzey malzeme ile 5 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir.

Alüminyum yüzey malzeme ile 10 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.8'de verilmiştir.

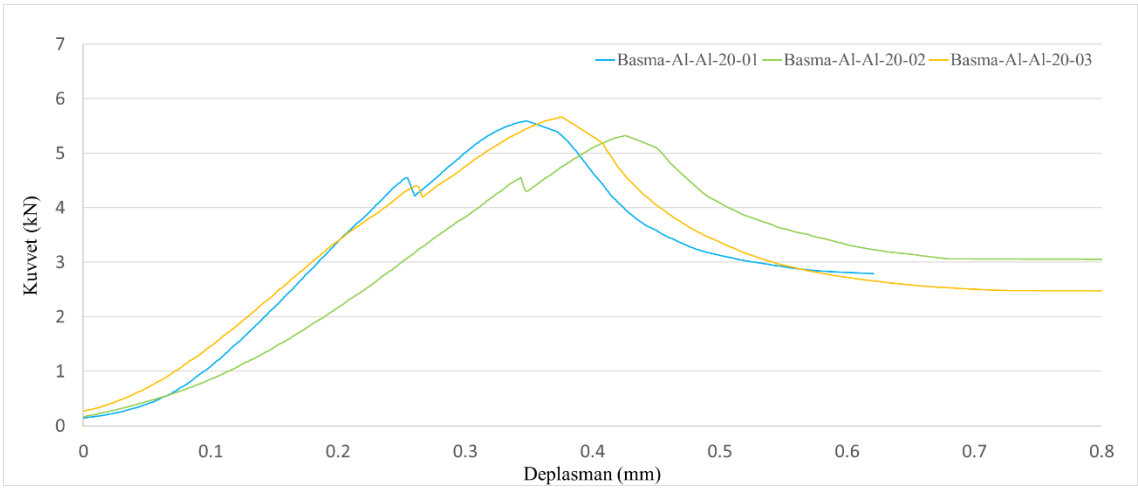
Alüminyum yüzey malzeme ile 20 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.7. Al - Al (5 mm) basma testi sonuçları.

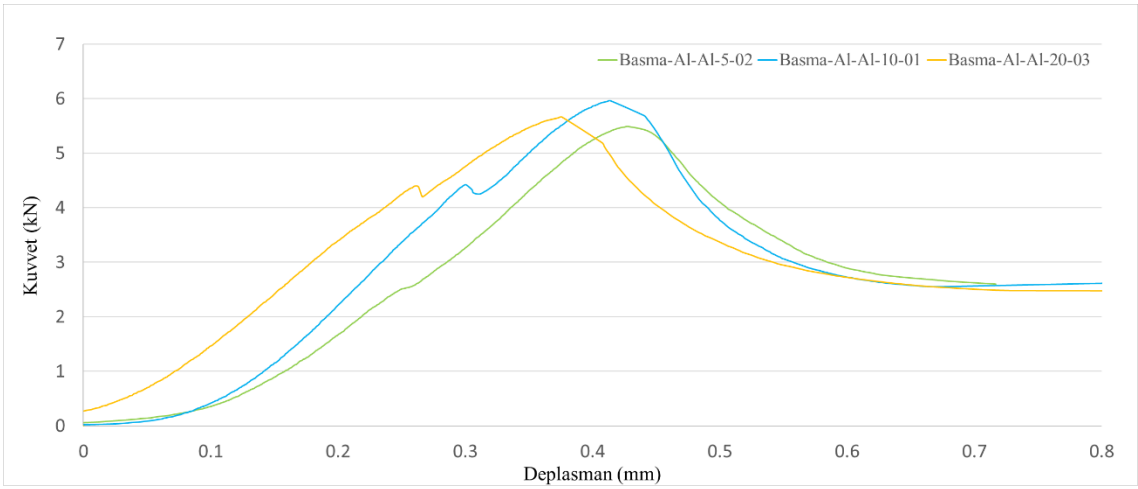


Şekil 4.8. Al - Al (10 mm) basma testi sonuçları.



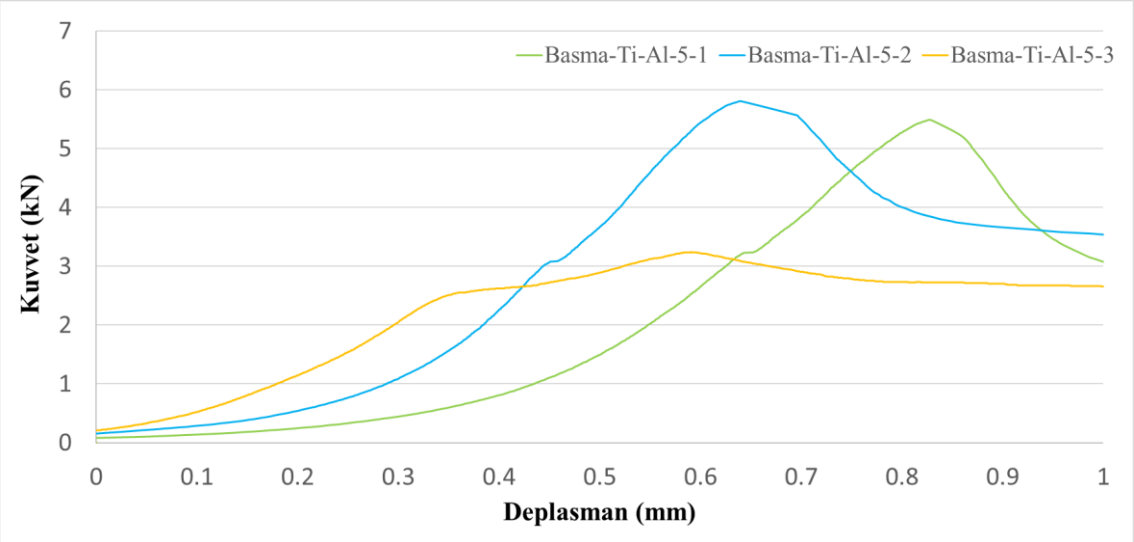
Şekil 4.9. Al - Al (20 mm) basma testi sonuçları.

Üç farklı kalınlığı en iyi temsil eden üç test numunesine ait basma testi sonuçları karşılaştırma amaçlı Şekil 4.10'da verilmiştir.



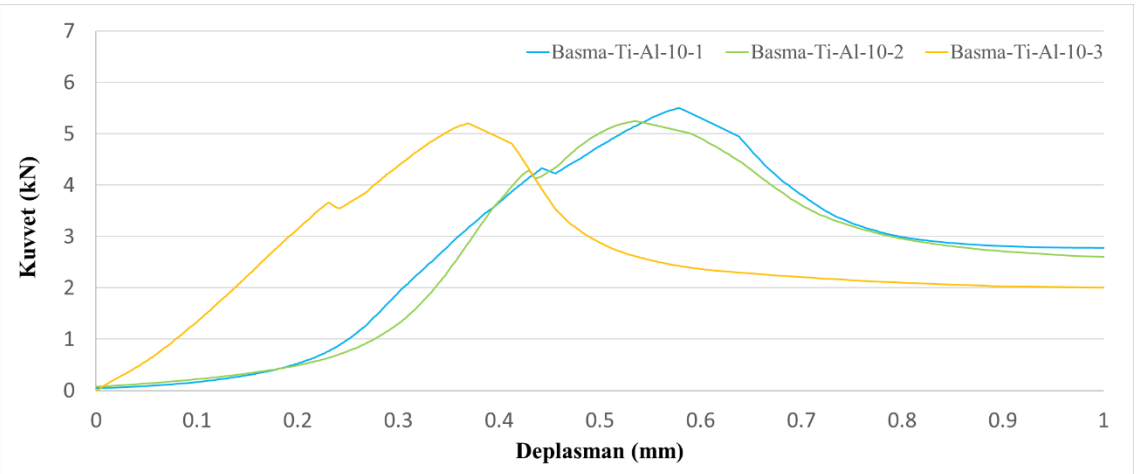
Şekil 4.10. Al - Al kombine basma testi sonuçları.

Titanyum yüzey malzeme ile 5 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir.



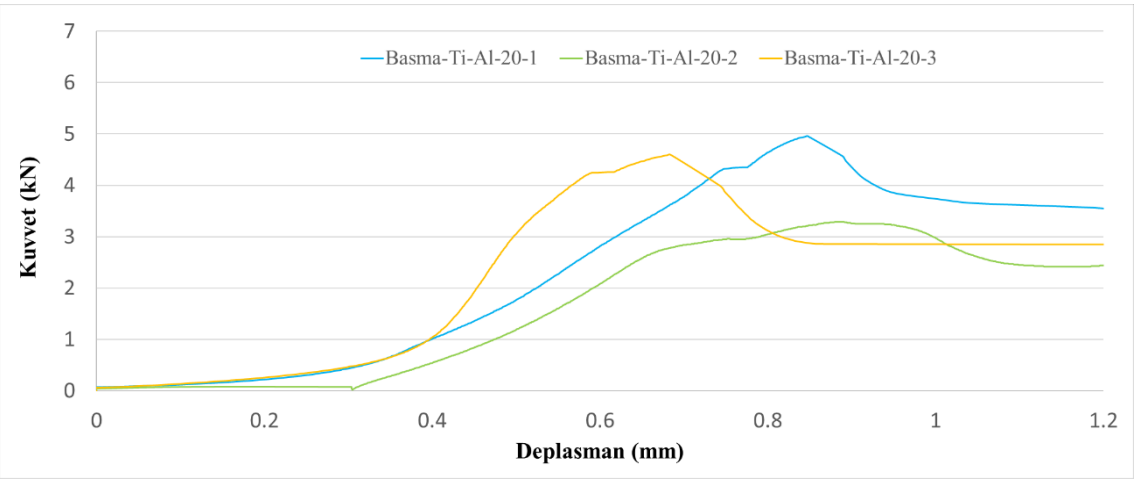
Şekil 4.11. Ti - Al (5 mm) basma testi sonuçları.

Titanyum yüzey malzeme ile 10 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir.



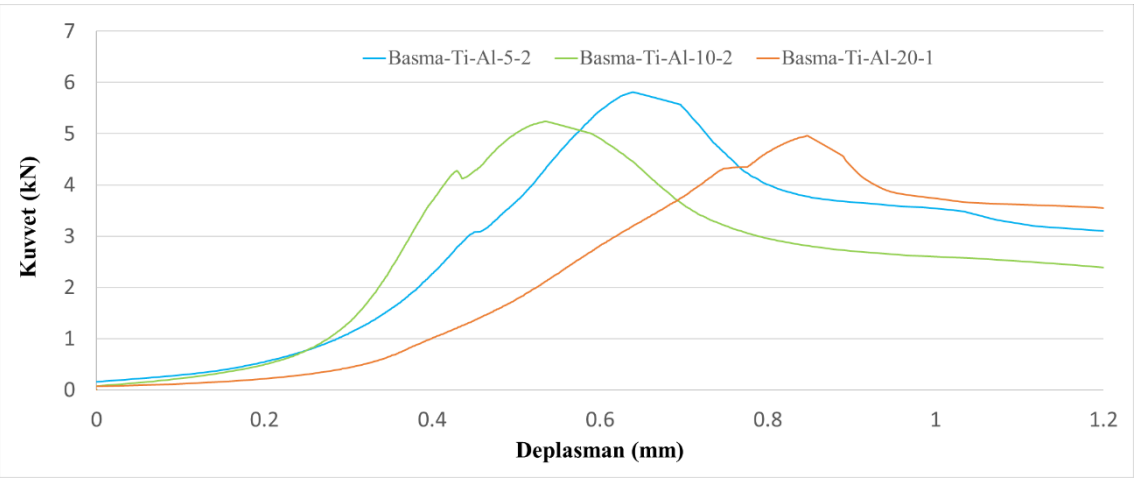
Şekil 4.12. Ti - Al (10 mm) basma testi sonuçları.

Titanyum yüzey malzeme ile 20 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Ti - Al (20 mm) basma testi sonuçları.

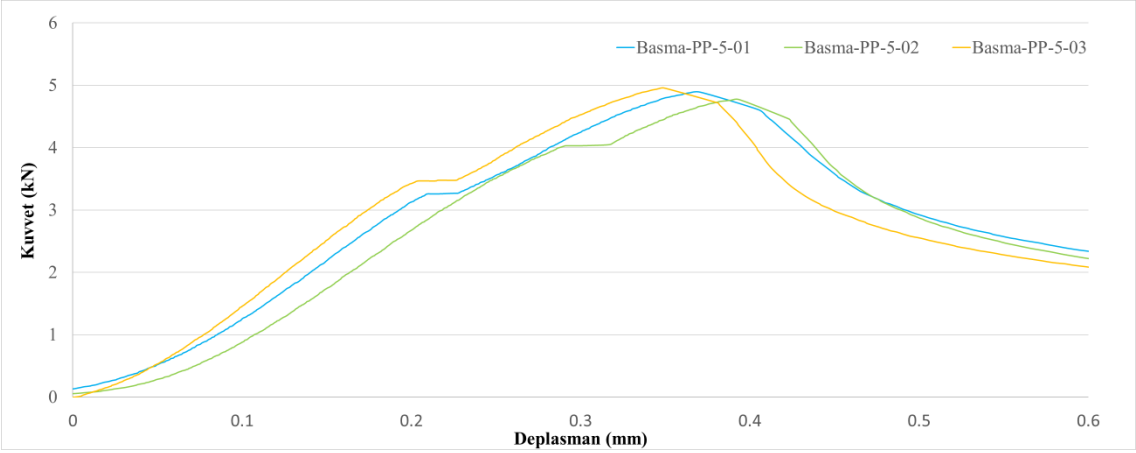
Üç farklı kalınlığı en iyi temsil eden, titanyum yüzey ve alüminyum çekirdek malzemeli üç test numunesine ait basma testi sonuçları karşılaştırma amaçlı Şekil 4.14'te verilmiştir.



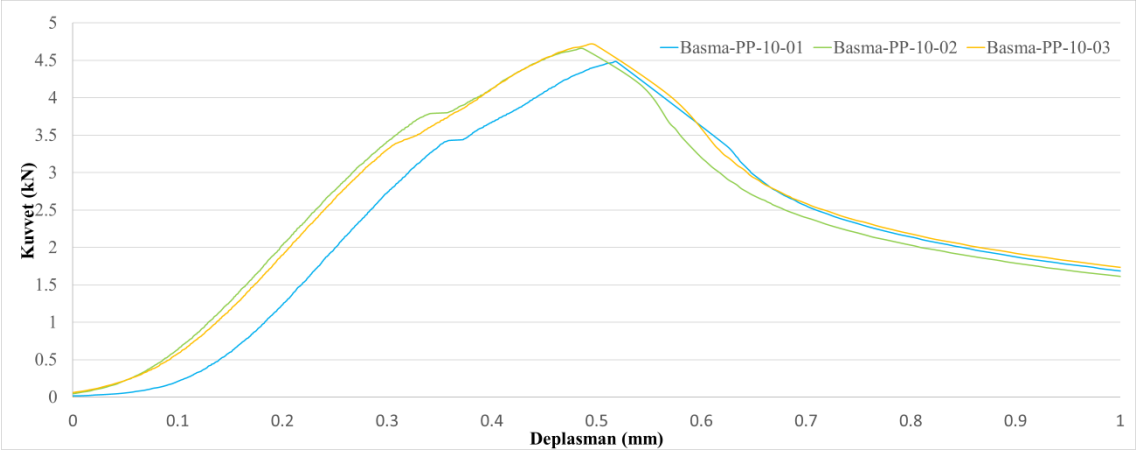
Şekil 4.14. Ti - Al kombine basma testi sonuçları.

4.2. Polipropilen Çekirdek Malzemeli Numunelerin Basma Test Sonuçları

5 mm kalınlığındaki polipropilen çekirdek malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.15'te, 10 mm kalınlıktaki PP çekirdek malzeme için basma test sonucu da Şekil 4.16'da verilmiştir.

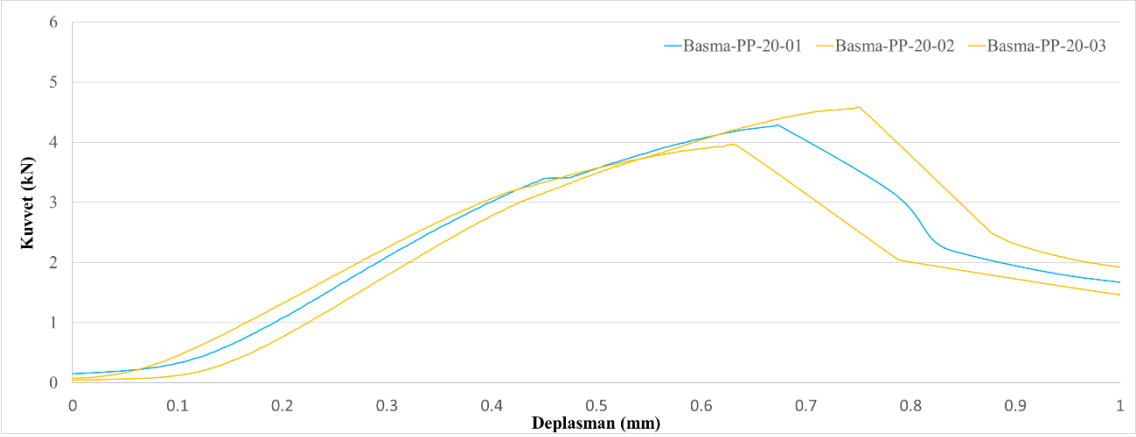


Şekil 4.15. Polipropilen çekirdek (5 mm) basma testi sonuçları.



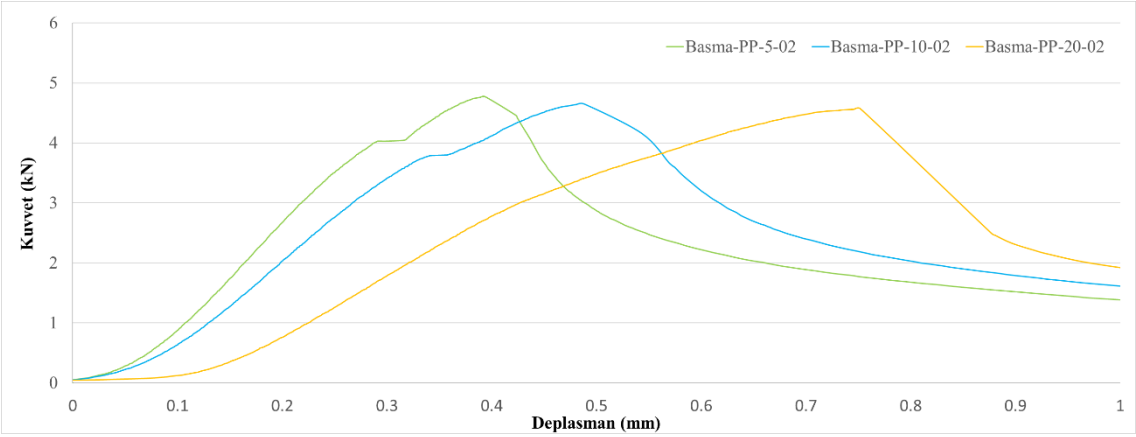
Şekil 4.16. Polipropilen çekirdek (10 mm) basma testi sonuçları.

20 mm kalınlıktaki PP çekirdek malzeme için basma test sonucu Şekil 4.17'de verilmiştir.



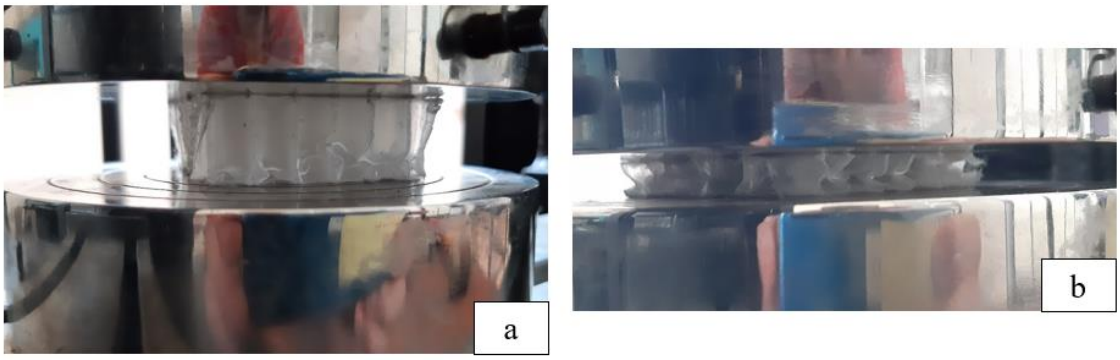
Şekil 4.17. Polipropilen çekirdek (20 mm) basma testi sonuçları.

Üç farklı kalınlığı en iyi temsil eden, polipropilen çekirdek malzemeli üç test numunesine ait basma testi sonuçları karşılaştırma amaçlı Şekil 4.18'de verilmiştir.



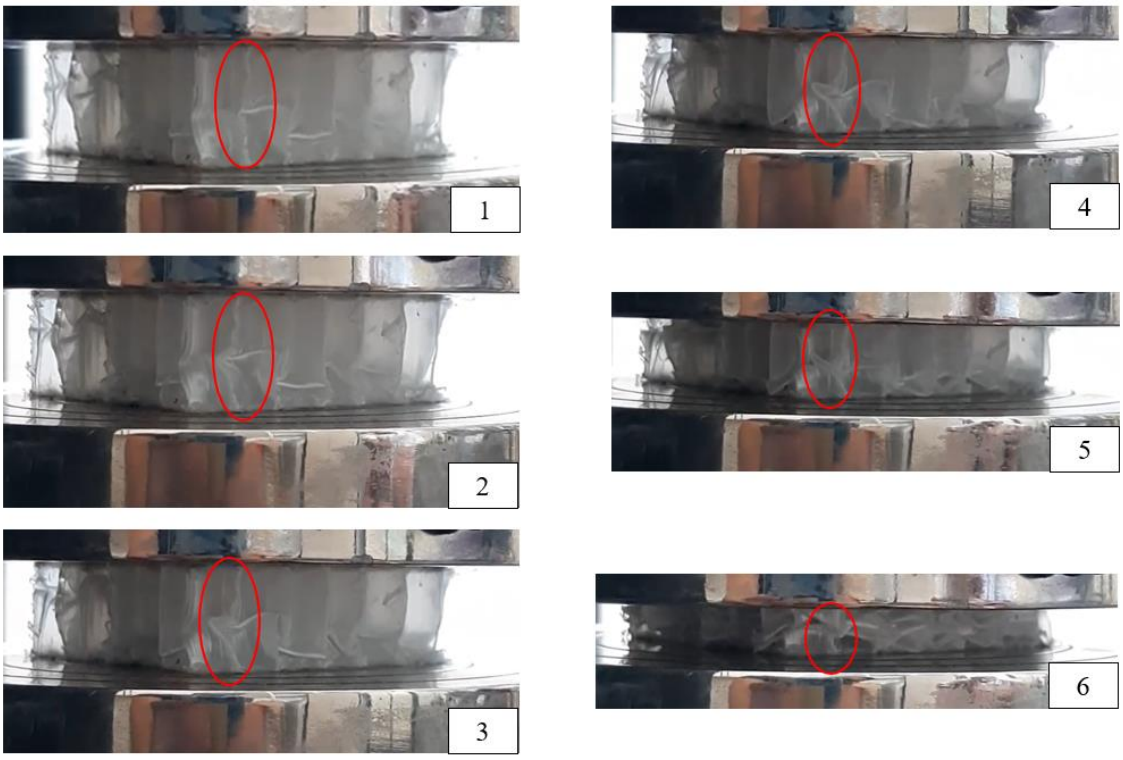
Şekil 4.18. Polipropilen çekirdek kombine basma testi sonuçları.

Polipropilen çekirdek malzemenin tekil basma testine başlama anındaki görüntüsü ve bitiş anındaki görüntüsü Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



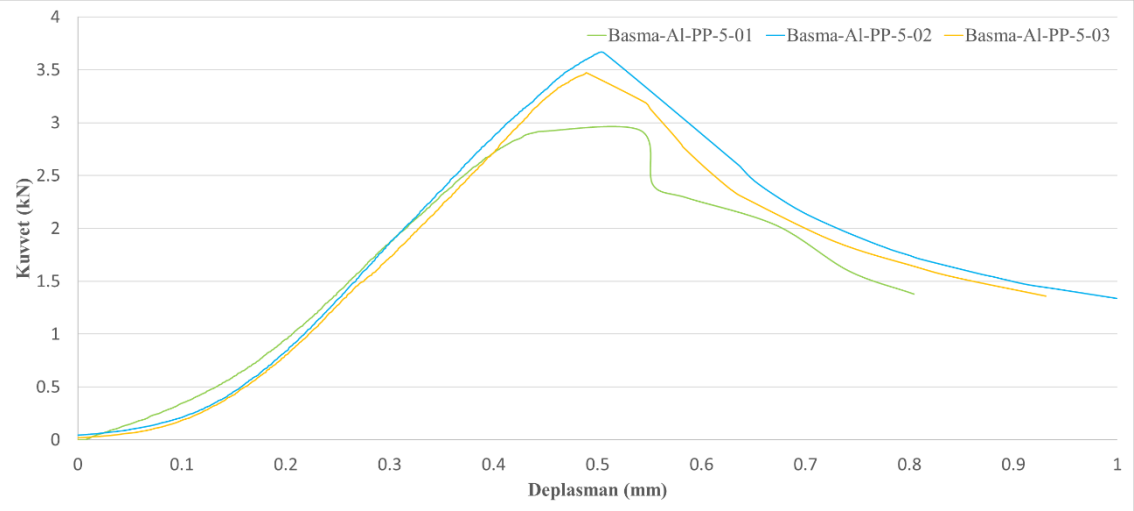
Şekil 4.19. Polipropilen çekirdek malzeme basma testi. **a)** Başlama anı **b)** Bitiş anı

Basma testi boyunca 20 mm'lik PP malzemede meydana gelen deformasyonun zamana bağlı görüntüsü Şekil 4.20'de kırmızı ile işaretlenerek gösterilmiştir.

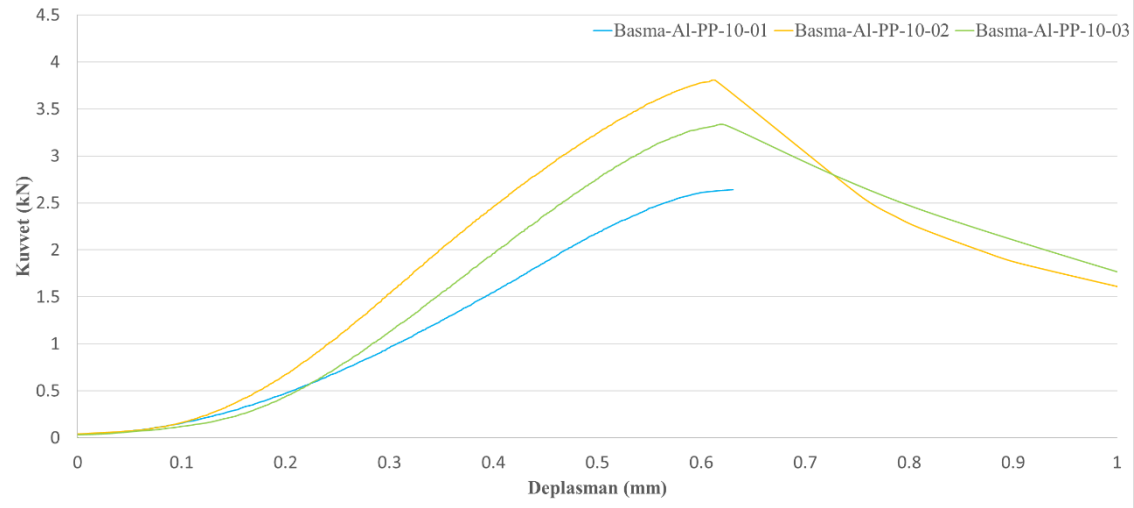


Şekil 4.20. Polipropilen çekirdek malzeme basma testindeki zamana bağlı deformasyon.

Alüminyum yüzey malzeme ile 5 mm kalınlığındaki polipropilen çekirdek malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.21'de verilmiştir. 10 mm'lik çekirdek malzeme sonucu ise Şekil 4.22'dedir.

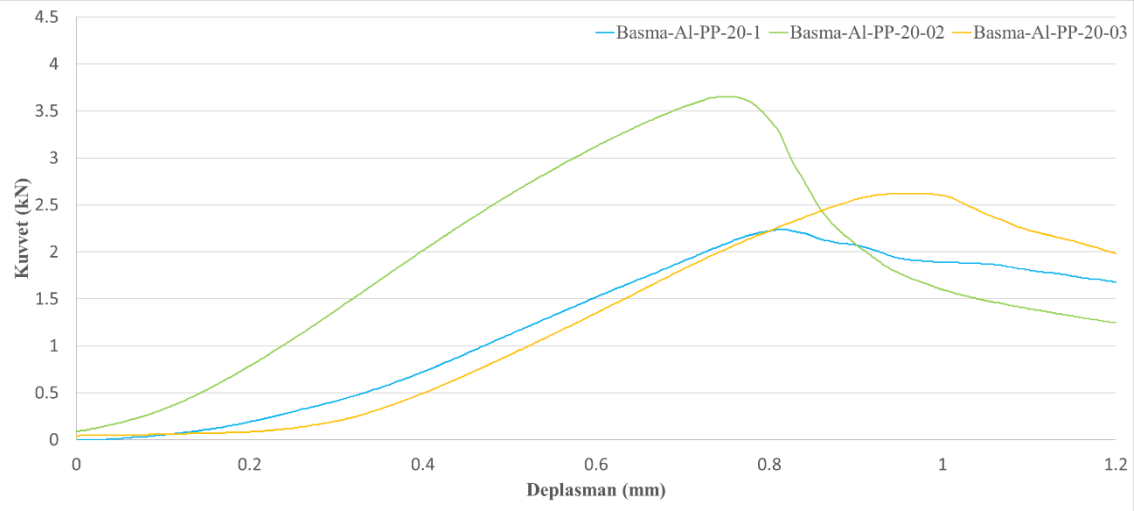


Şekil 4.21. Al - PP (5 mm) basma testi sonuçları.

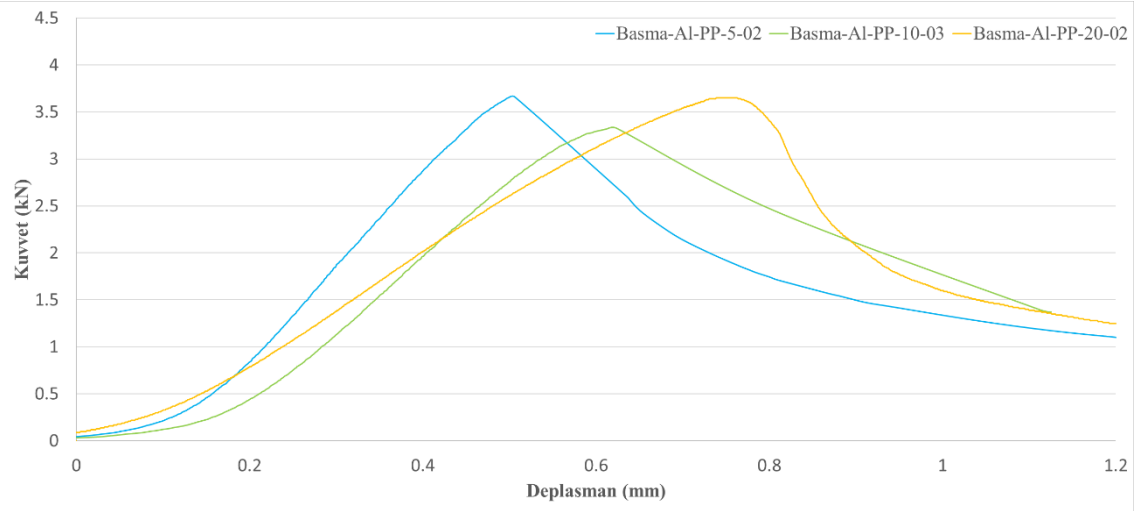


Şekil 4.22. Al - PP (10 mm) basma testi sonuçları.

20 mm kalınlığındaki PP çekirdek malzeme ile hazırlanan sandviç kompozit malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.23'te verilmiştir. PP çekirdek malzemeli farklı kalınlıklardaki üç test numunesine ait basma testi sonuçları Şekil 4.24'te verilmiştir.

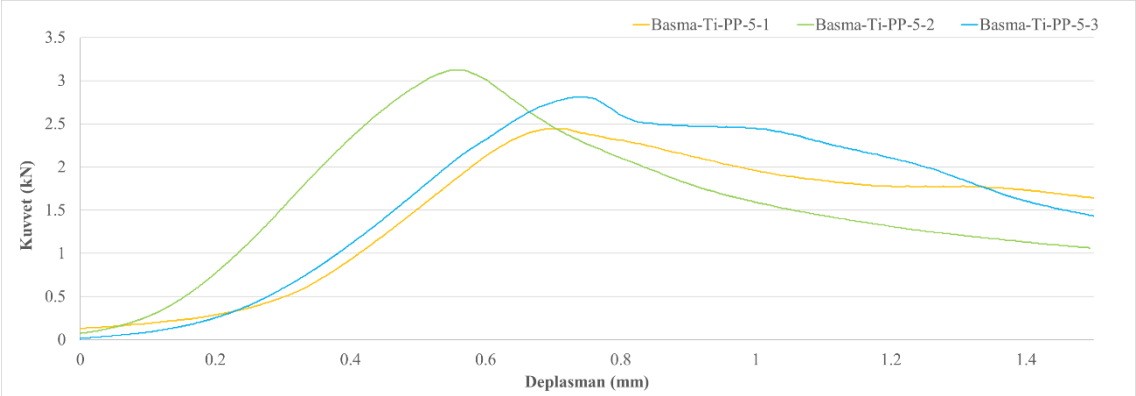


Şekil 4.23. Al - PP (20 mm) basma testi sonuçları.

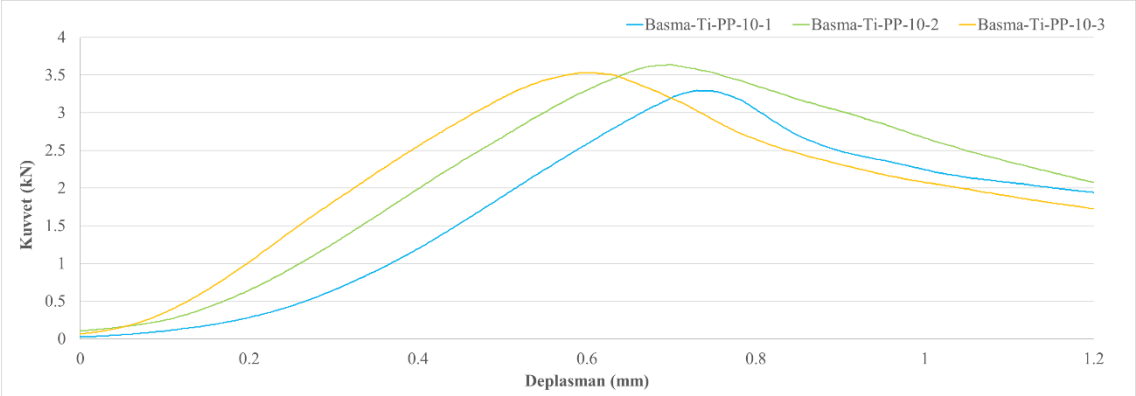


Şekil 4. 24. Al - PP kombine basma testi sonuçları.

Titanyum yüzey malzeme ile 5 mm kalınlığındaki polipropilen çekirdek malzemeyle oluşturulan sandviç malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.25'te verilmiştir. Yine titanyum yüzey malzemeli ve 10 mm'lik PP çekirdek malzeme sonucu ise Şekil 4.26'dadır.

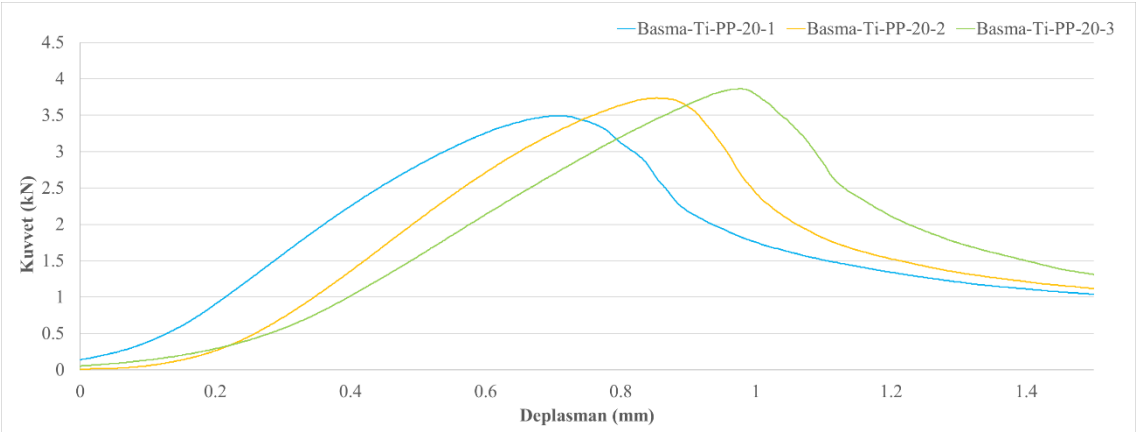


Şekil 4. 25. Ti - PP (5 mm) basma testi sonuçları.



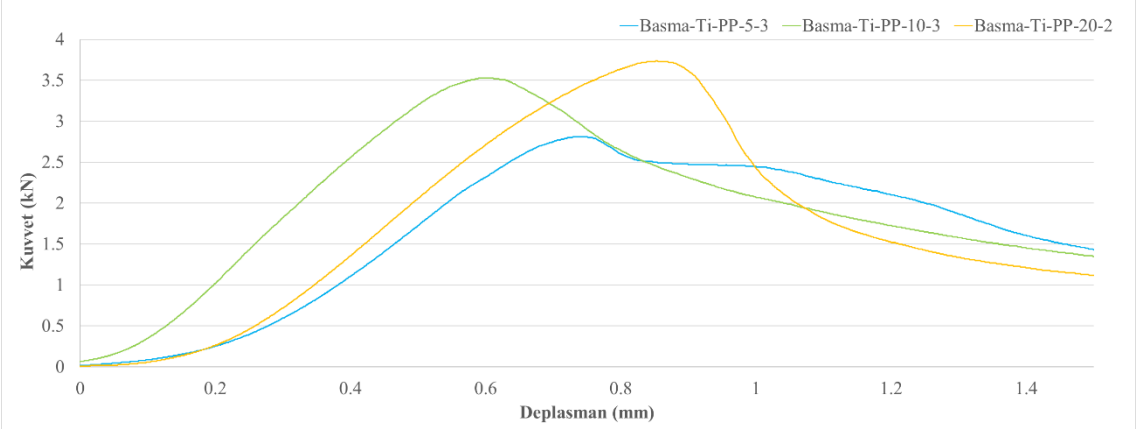
Şekil 4. 26. Ti - PP (10 mm) basma testi sonuçları.

Titanyum yüzey malzeme ile 20 mm kalınlığındaki polipropilen çekirdek malzemeyle oluşturulan sandviç malzemeye ait basma testi sonuçları Şekil 4.27'de verilmiştir.



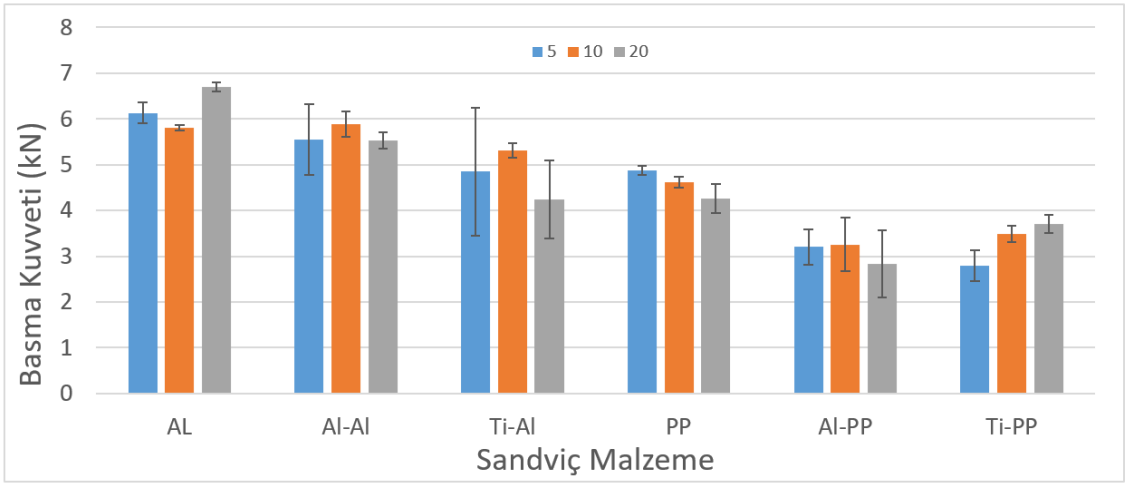
Şekil 4. 27. Ti - PP (20 mm) basma testi sonuçları.

PP çekirdek malzemeli ve titanyum yüzey malzemeli farklı kalınlıklardaki üç test numunesine ait basma testi sonuçları Şekil 4.28'te verilmiştir.



Şekil 4. 28. Ti - PP kombine basma testi sonuçları.

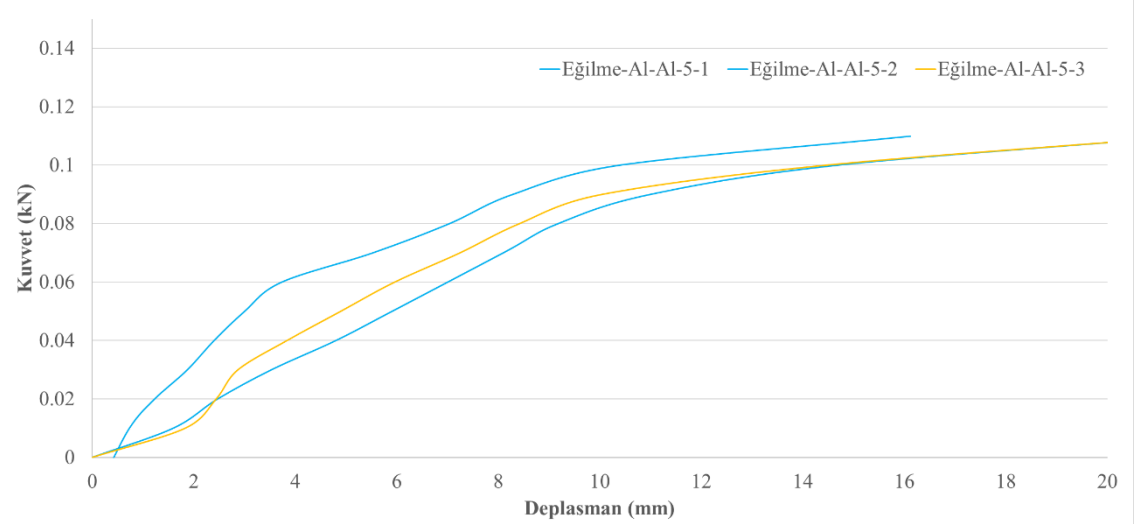
Yapılan tüm basma testlerinde ölçülen maksimum kuvvet değeri ve sandviç malzeme gruplarına göre değişimi Şekil 4.29'da toplu olarak verilmiştir.



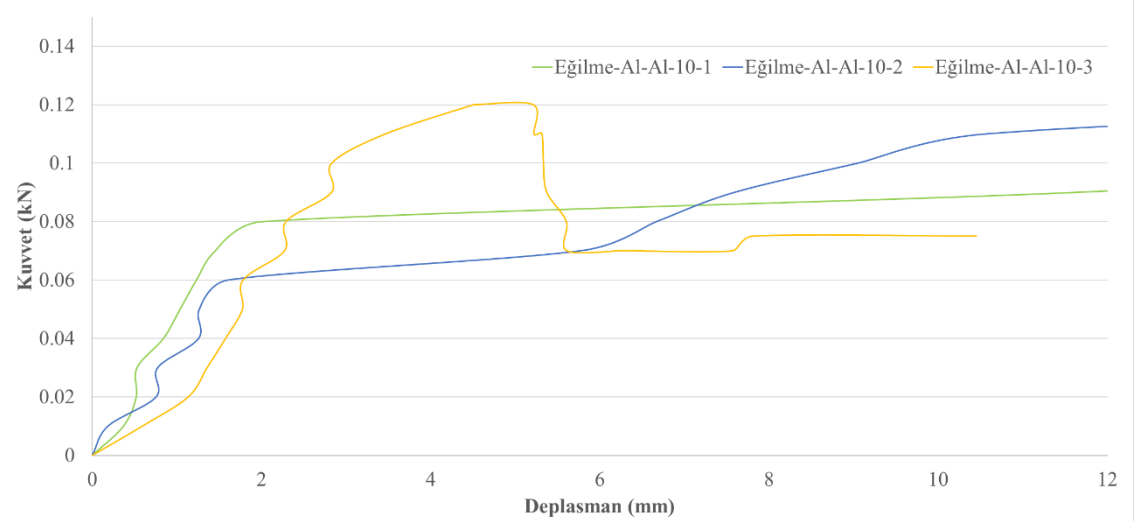
Şekil 4.29. Basma testi maksimum kuvvet ortalamaları.

4.3. Alüminyum Çekirdek Malzemeli Numunelerin Üç Nokta Eğilme Test Sonuçları

Alüminyum yüzey malzemesi ve 5 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemeyle oluşturulan sandviç malzemenin üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.30'da verilmiştir. 10 mm'lik alüminyum çekirdek malzemeli sonucu ise Şekil 4.31'dadır.



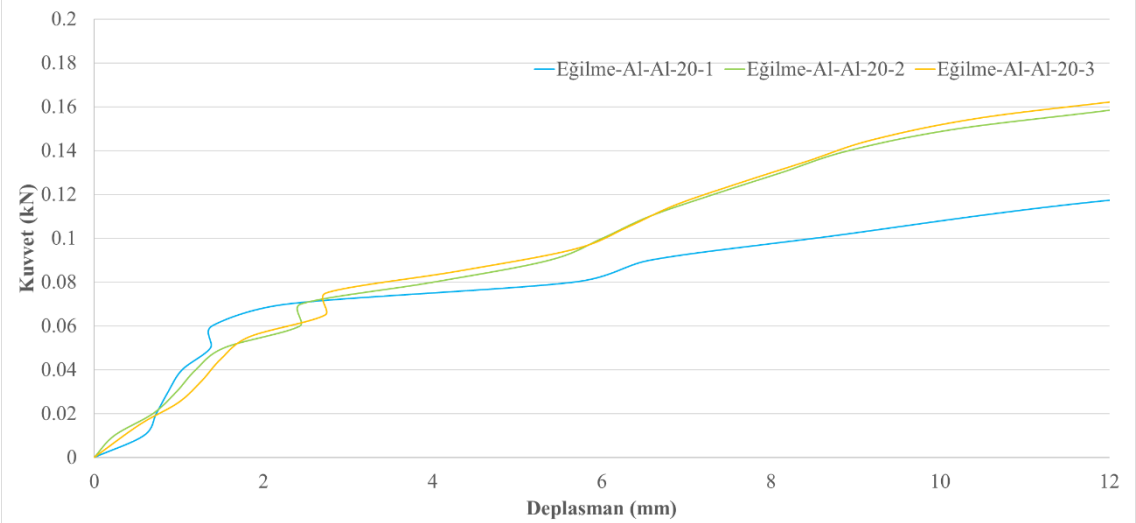
Şekil 4.30. Al - Al (5 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.



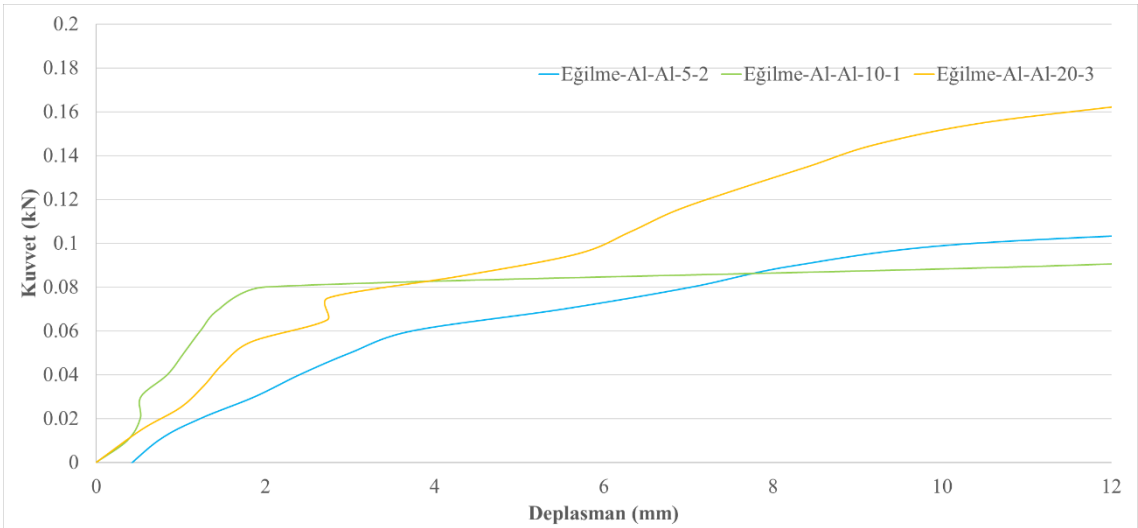
Şekil 4.31. Al - Al (10 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.

20 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzeme ile hazırlanan sandviç kompozit malzemeye ait üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.32'de verilmiştir. Alüminyum

çekirdek malzemeli farklı kalınlıklardaki üç test numunesine ait üç nokta eğilme testi sonuçları ise Şekil 4.33'de verilmiştir.

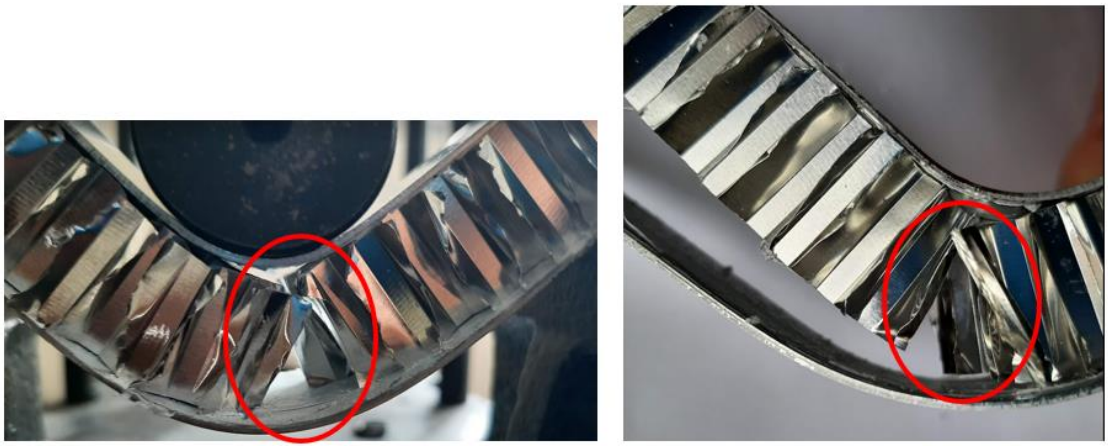


Şekil 4.32. Al - Al (20 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.



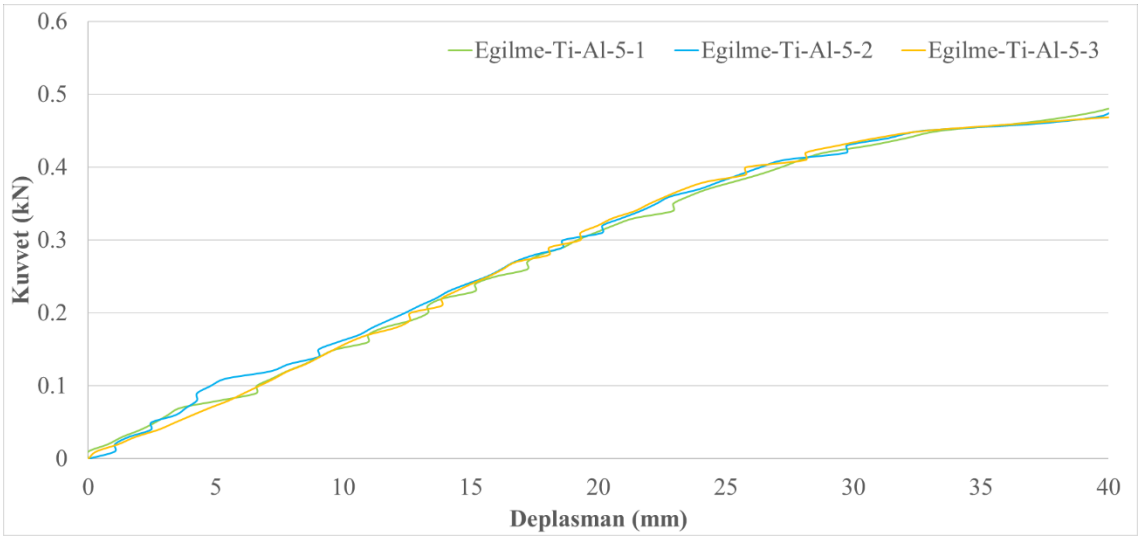
Şekil 4.33. Al - Al kombine üç nokta eğilme testi sonuçları.

Al yüzey malzemeli ve 20 mm kalınlıktaki Al çekirdek malzemeli sandviç malzemeye uygulanan üç nokta eğilme testi sonrasında çekirdekte hasar tespit edilmiştir. Tespit edilen hasarlardan çekirdek yırtılmasıdır (şekil 4.34).

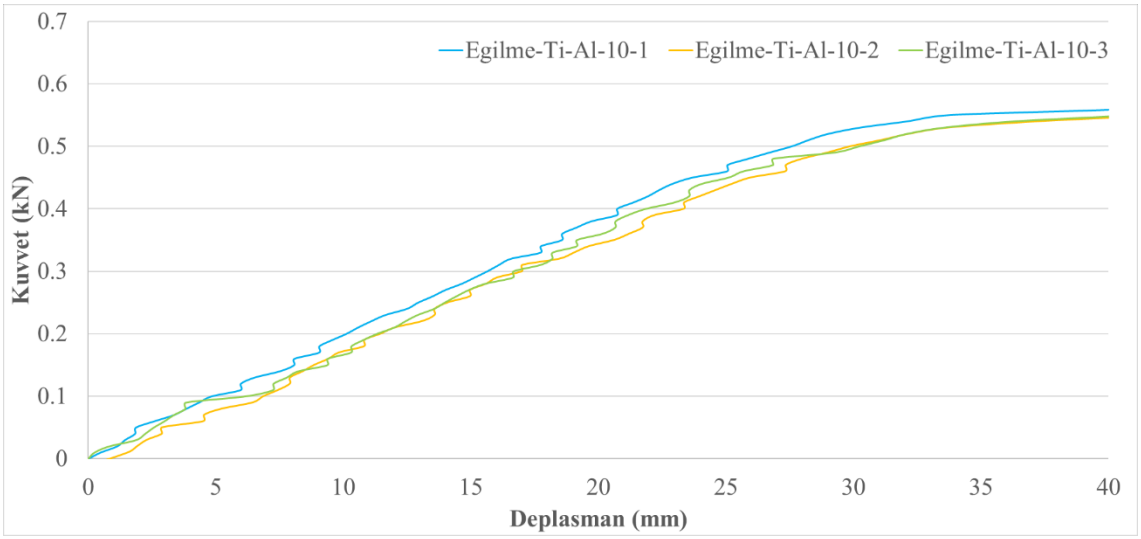


Şekil 4.34. Üç nokta eğilme testi sonrasında alüminyum çekirdek malzemede meydana gelen hasar.

Titanyum yüzey malzemesi ve 5 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzemeyle oluşturulan sandviç malzemenin üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.35'te verilmiştir. 10 mm'lik alüminyum çekirdek malzemeli sonucu ise Şekil 4.36'tedir.

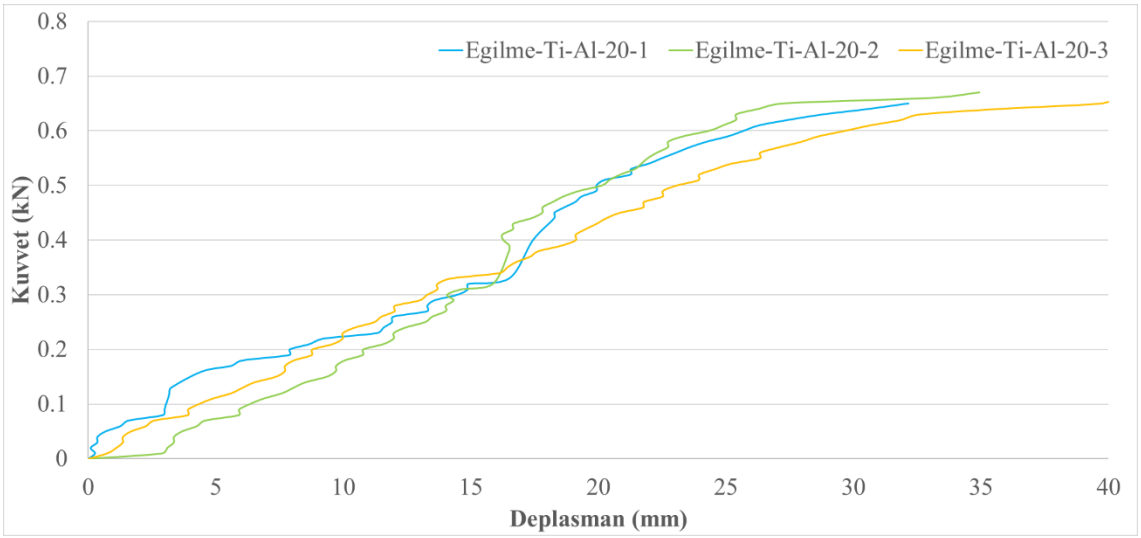


Şekil 4.35. Ti - Al (5 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.

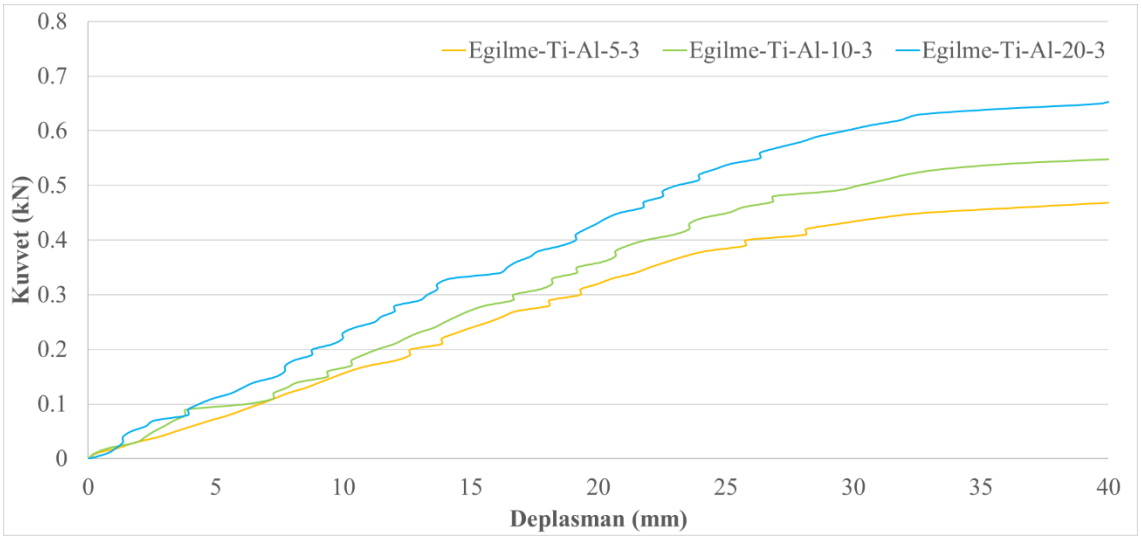


Şekil 4.36. Ti - Al (10 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.

20 mm kalınlığındaki alüminyum çekirdek malzeme ile hazırlanan sandviç kompozit malzemeye ait üç nokta eğilme testi sonuçları şekil 4.37'da verilmiştir. Alüminyum çekirdek malzemeli farklı kalınlıklardaki üç test numunesine ait üç nokta eğilme testi sonuçları ise şekil 4.38'de verilmiştir.



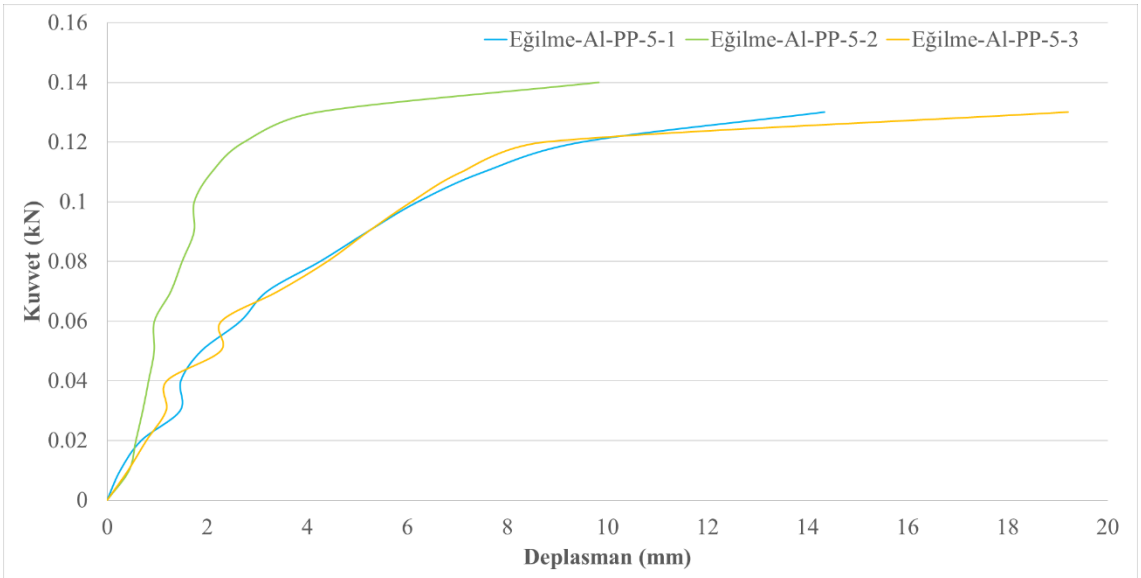
Şekil 4.37. Ti - Al (20 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.



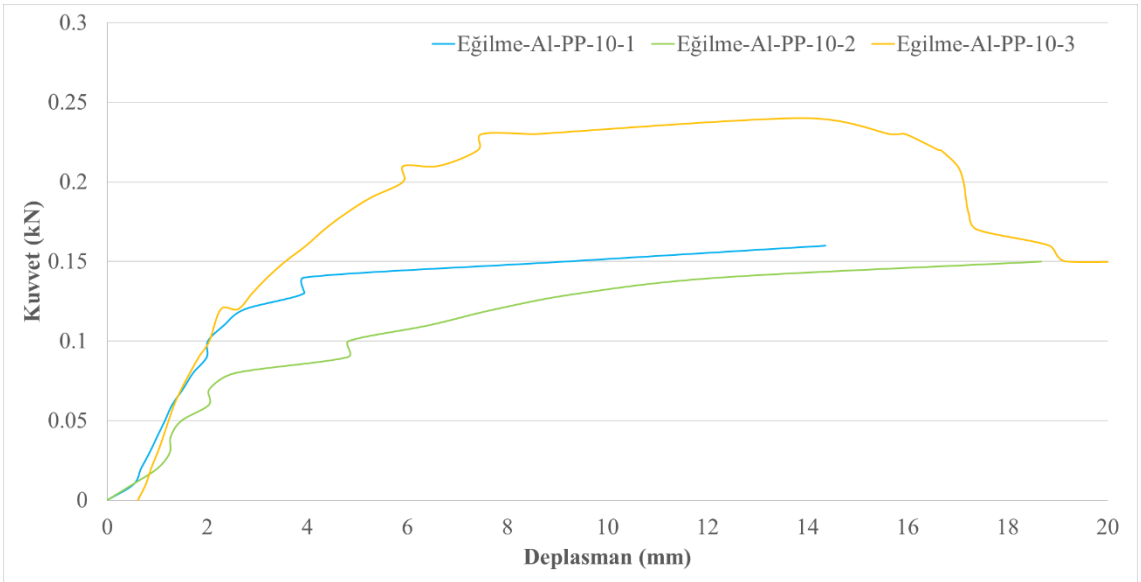
Şekil 4.38. Ti - Al kombine üç nokta eğilme testi sonuçları.

4.4. Polipropilen Çekirdek Malzemeli Numunelerin Üç Nokta Eğilme Test Sonuçları

5 mm kalınlığındaki PP çekirdek malzemeli sandviç yapının üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.39'te, 10 mm'lik çekirdekli test sonuçları ise Şekil 4.40'te verilmiştir.

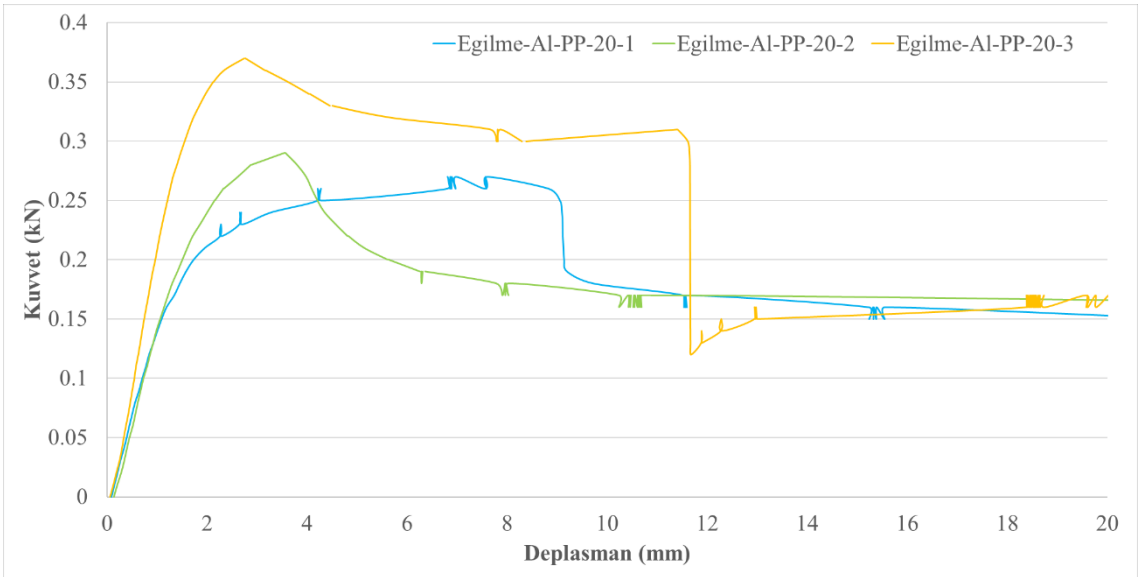


Şekil 4.39. Al - PP (5 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.

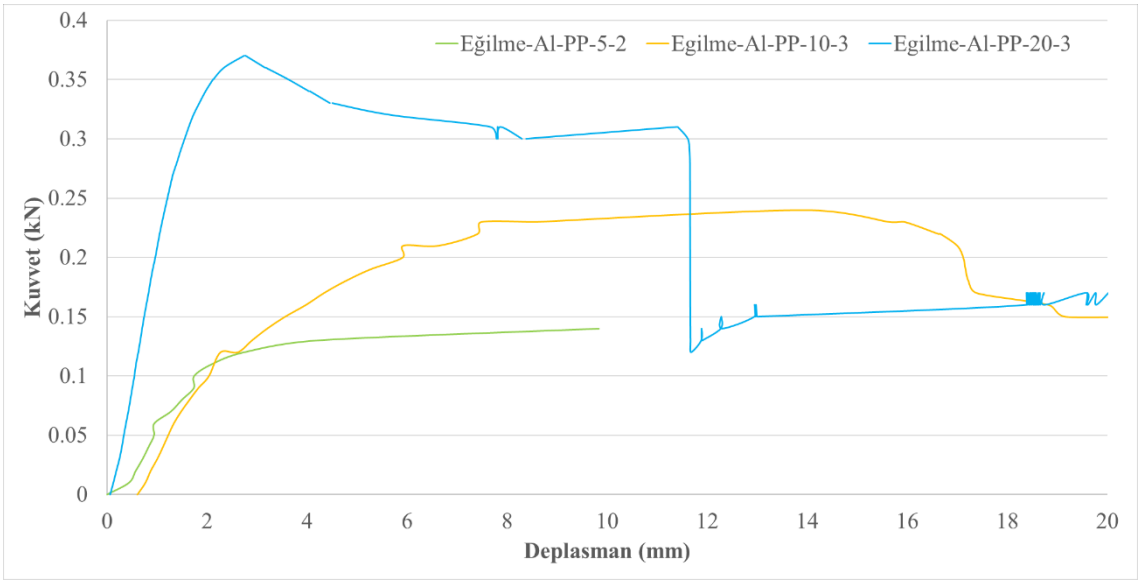


Şekil 4.40. Al - PP (10 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.

20 mm'lik PP çekirdek malzeme ile hazırlanan sandviç kompozite ait üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.41'ta verilmiştir. PP çekirdek malzemeli farklı kalınlıklardaki üç test numunesine ait üç nokta eğilme testi sonuçları ise Şekil 4.42'de verilmiştir.

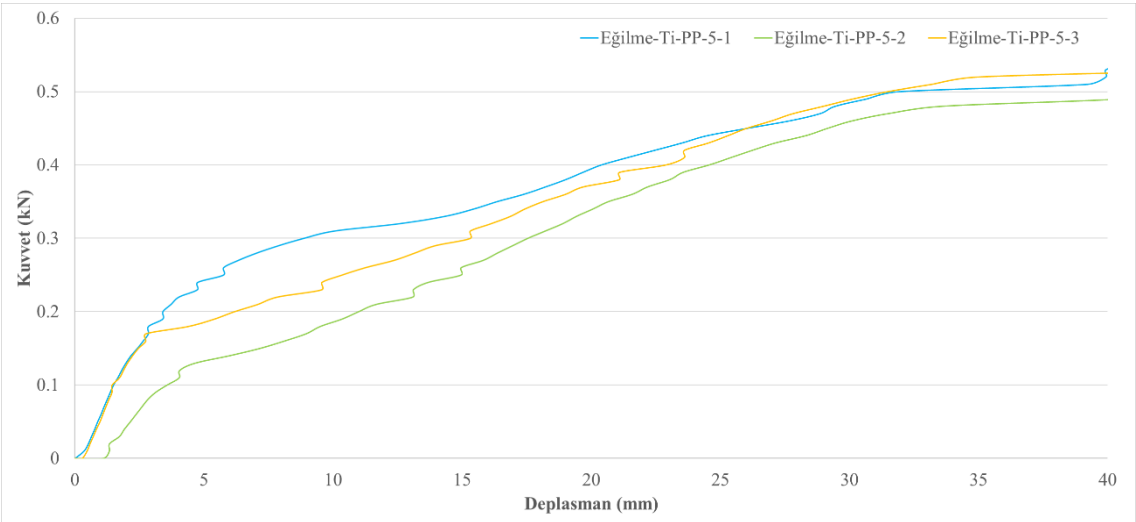


Şekil 4.41. Al - PP (20 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.



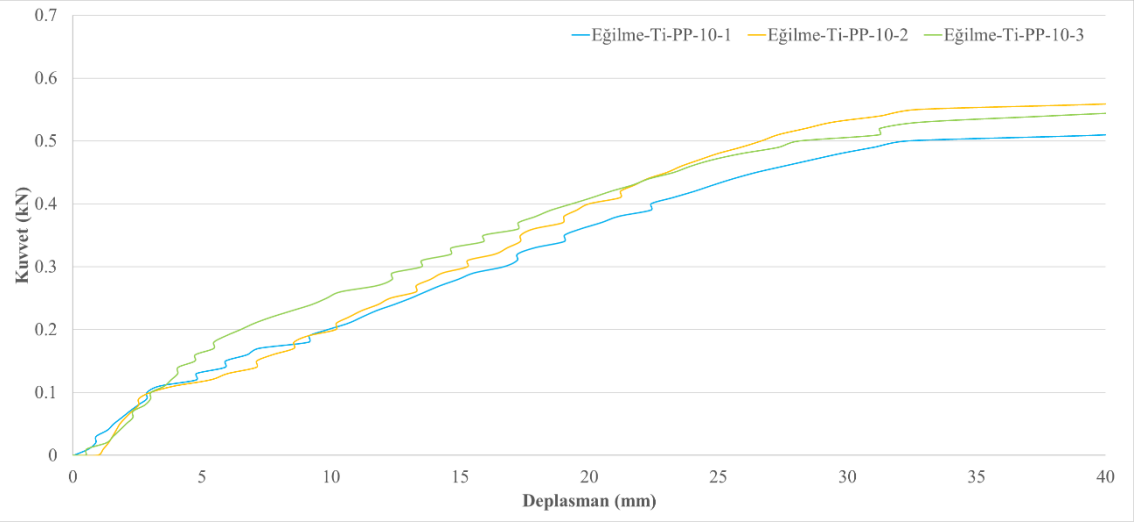
Şekil 4.42. Al - PP kombine üç nokta eğilme testi sonuçları.

Titanyum yüzey malzemesi ve 5 mm kalınlığındaki polipropilen çekirdek malzemeyle oluşturulan sandviç malzemenin üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.43'de verilmiştir.



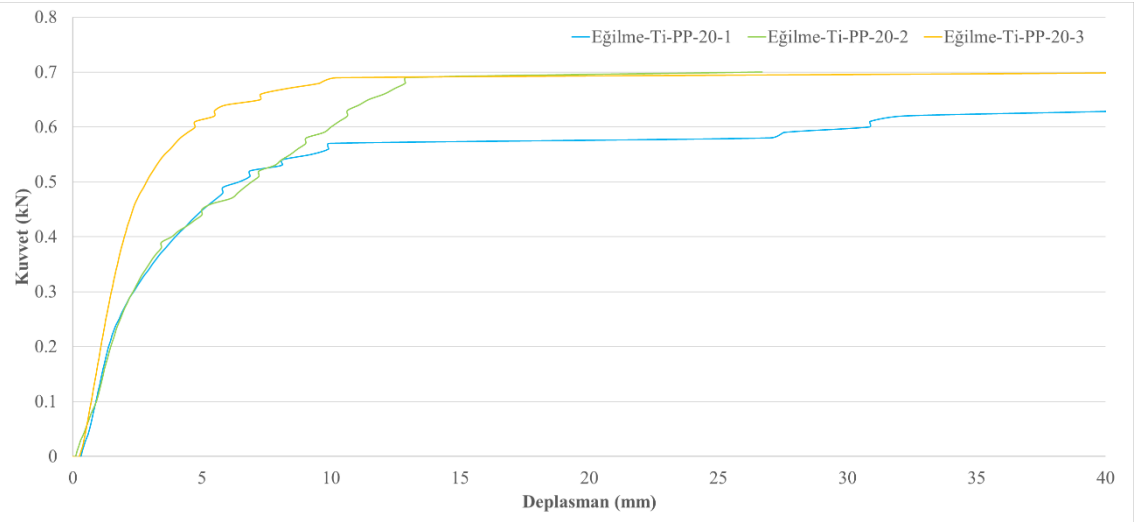
Şekil 4.43. Ti - PP (5 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.

Titanyum yüzey ve 10 mm'lik polipropilen çekirdek malzemeli sandviçe ait üç nokta eğilme test sonuçları ise Şekil 4.44'tedir.



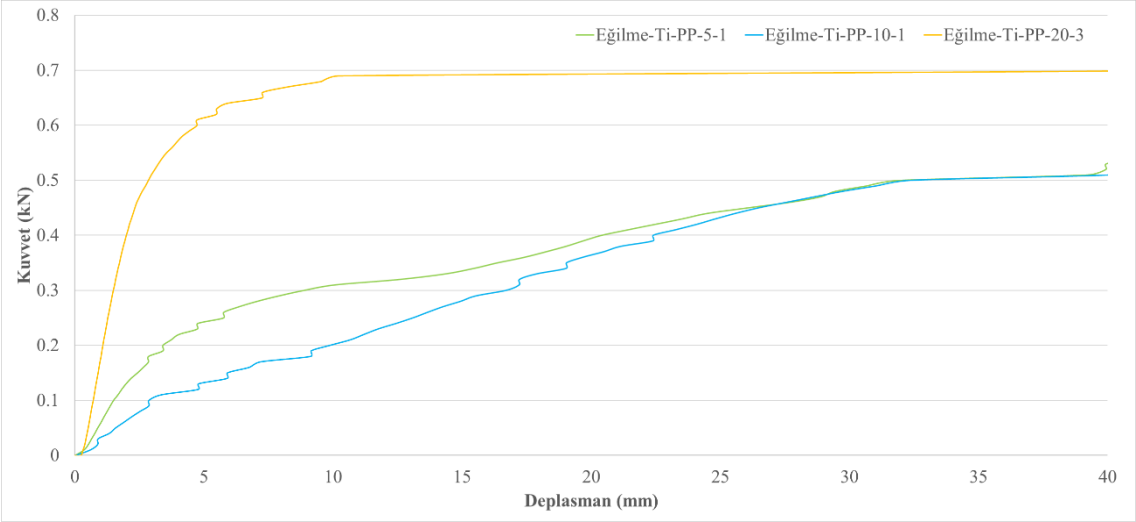
Şekil 4.44. Ti - PP (10 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.

20 mm'lik PP çekirdek malzeme ile hazırlanan sandviç kompozite ait üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 4.45'te verilmiştir.



Şekil 4.45. Ti - PP (20 mm) üç nokta eğilme testi sonuçları.

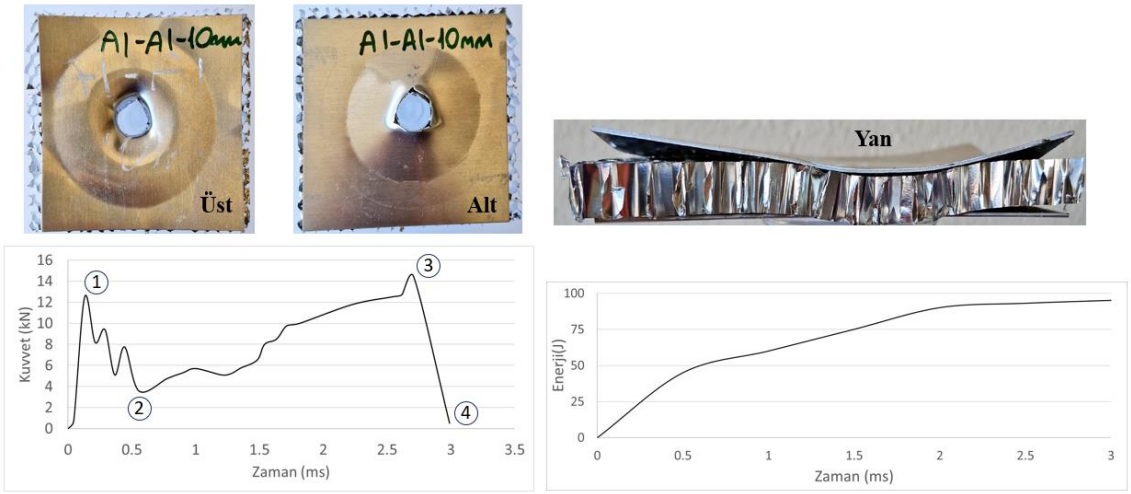
PP çekirdek malzemeli farklı kalınlıklardaki üç test numunesine ait üç nokta eğilme testi sonuçları ise Şekil 4.46'te verilmiştir.



Şekil 4.46. Ti - PP kombine üç nokta eğilme testi sonuçları.

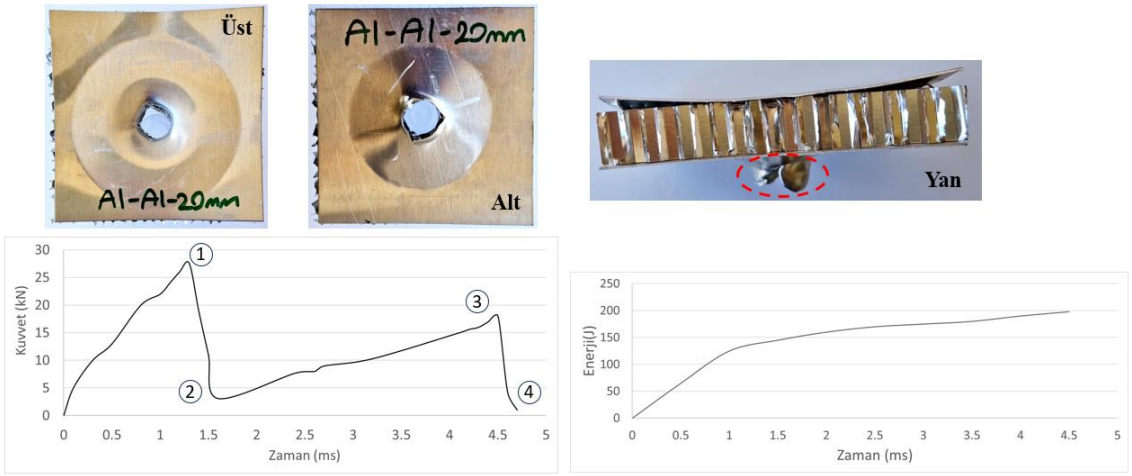
4.5. Alüminyum Çekirdek Malzemeli Numunelerin Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları

Şekil 4.47'da alüminyum yüzey ve 10 mm kalınlıktaki alüminyum çekirdek malzeme ile yapılmış sandviç yapının ağırlık düşürme testi sonucu üstten, alttan ve yandan görüntüsü, kuvvet - zaman grafiği ile enerji – zaman grafiği verilmiştir. Vurucu uç ile sandviç yapı ilişkisi incelendiğinde delip geçme durumunun gerçekleştiği görülmektedir. Uygulanan 250J enerjinin bir kısmı sandviç malzeme tarafından absorbe edilmiştir. Kuvvet – deplasman eğrisinde 1 konumunda üst plakanın delinmesi gerçekleşmiştir. Üst plaka delindikten sonra 2 konumuna doğru kuvvet değerinde düşüş yaşanmıştır. Ardından kuvvet değerinde çekirdek malzemenin ezilmeye başlamasıyla birlikte tekrar artış olmuştur. 3 konumuna gelene kadar çekirdek malzeme ezilmesi ve alt plakaya ulaşma evresi yaşanmış ve 3 konumunda alt plaka delinmiştir. Bu noktada ulaşılan maksimum kuvvet değeri 14.45 kN olarak ölçülmüştür. Alt plaka delindikten sonra yük değeri 4 konumuna kadar ani bir düşüş yaşamasına rağmen sıfırlanmamıştır. Kuvvet değerinin sıfıra düşmemesinin sebebi vurucu uç ile sandviç malzeme arasında yaşanan sürtünmenin devam etmesidir. Test sonunda yapılan görsel incelemede sandviç yapının kenar bölgelerinde yüzey-çekirdek ayrışmalarının olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak sandviç yapının altında kalan vurucu ucun çıkış bölgesinde literatürde "çanak yaprak formu" olarak nitelendirilen şekil oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 4.47. Darbe testi sonrası Al – Al (10 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri.

Şekil 4.48'de alüminyum yüzey ve 20 mm kalınlıktaki alüminyum çekirdek malzeme ile yapılmış sandviç yapının ağırlık düşürme testi sonucu üstten, alttan ve yandan görüntüsü, kuvvet - zaman grafiği ile enerji – zaman grafiği verilmiştir. Vurucu uç ile sandviç yapı ilişkisi incelendiğinde delip geçme durumunun gerçekleştiği görülmektedir. Kuvvet – zaman eğrisi incelendiğinde 1 konumuna kadar kuvvette artış olmuş ve 1 konumunda üst plakanın delinmesi gerçekleşmiştir. Bu noktada ölçülen maksimum kuvvet değeri 27.6 kN olarak kaydedilmiştir. Üst plaka delindikten sonra 2 konumuna doğru kuvvet değerinde düşüş yaşanmıştır. Ardından kuvvet değerinde çekirdek malzemenin ezilmeye başlamasıyla birlikte tekrar artış olmuştur. 3 konumuna gelene kadar çekirdek malzeme ezilmesi ve alt plakaya ulaşma evresi yaşanmış ve 3 konumunda alt plaka delinmiştir. Alt plaka delindiği anda ölçülen maksimum kuvvet değeri 18 kN'dur. Alt plaka delindikten sonra kuvvet değerinde 4 konumuna kadar ani bir düşüş yaşamasına rağmen sıfırlanmamıştır. Delinme durumlarında görülen kuvvetin sıfır olmama nedeni uç ile sandviç malzeme arasında yaşanan sürtünmedir. Çekirdek kalınlığı arttığı için maruz kalınan sürtünme kuvveti daha fazla olup, kuvvet değeri 10 mm kalınlıktaki numuneye göre daha yukarıdadır. Test sonrasında sandviç yapı görsel olarak incelendiğinde kenar bölgelerinde yüzey-çekirdek ayrışmalarının olduğu ve sandviç yapının altında kalan vurucu ucun çıkış bölgesinde literatürde "çanak yaprak formu" olarak nitelendirilen şekil oluştuğu belirlenmiştir. Bu form yandan görünüşte kırmızı ile işaretlenmiştir.



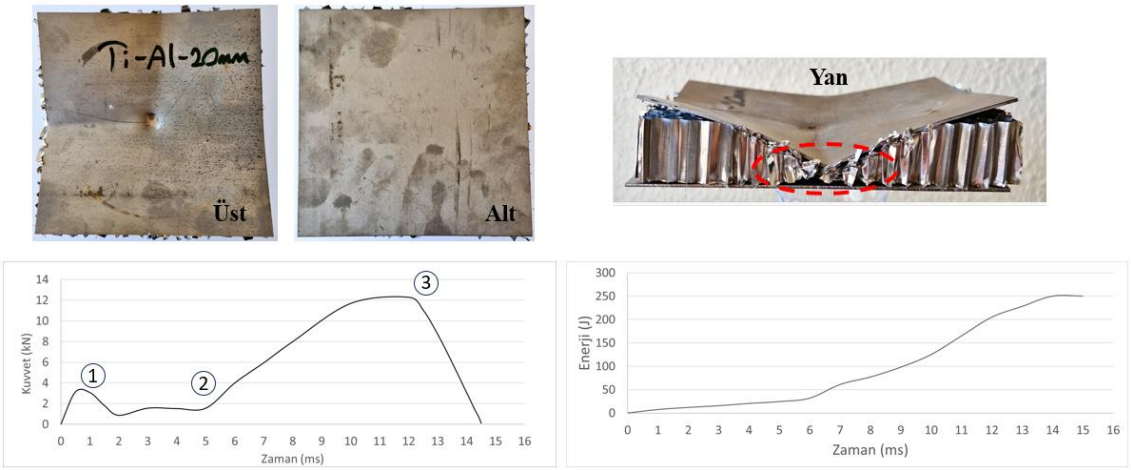
Şekil 4.48. Darbe testi sonrası Al – Al (20 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri.

Şekil 4.49'de titanyum yüzey ve 10 mm kalınlıktaki alüminyum çekirdek malzeme ile yapılmış sandviç yapının ağırlık düşürme testi sonucu üstten, alttan ve yandan görüntüsü, kuvvet - zaman grafiği ile enerji – zaman grafiği verilmiştir. Test numunesi incelendiğinde üst ve alt yüzeyinde kırılmanın meydana geldiği, vurucu temas bölgesindeki çekirdek malzemenin ise ezildiği görülmüştür. Bu durum vurucu uç test parçası arasındaki ilişki olarak değerlendirildiğinde nüfuz etme olarak belirlenmiştir. Kuvvet - zaman grafiği incelendiğinde kuvvet değerinin 1 konumuna doğru artış gösterdiği ve yaklaşık 3 kN değerine geldiğinde bir miktar düşüş göstererek 2 konumuna geldiği görülmektedir. 1 konumunda vurucu uç üst yüzey üzerinde çukur oluşturmaya başlamış ve çukur oluşumu 2 noktasında sona ermiştir. Ardından kuvvet değerinde tekrar yükseliş başlamış ve 3 konumunda yaklaşık 26.4 kN değerine geldiğinde üst ve alt yüzeyde hasar oluşmuştur. Titanyum malzeme özelliği gereği alüminyuma göre gevrek kırılma davranışı gösterdiği için yüzeylerde meydana gelen hasar bir anda oluşmaktadır. Bunun sonucunda kuvvet-zaman grafiğinde literatürde yapılan testlerde de tespit edildiği gibi tek tepe görülmektedir. Çekirdek malzeme görsel olarak incelendiğinde ve yandan görünüşünde de belli olduğu üzere üst yüzeyde eğilme meydana gelmiştir. Üst yüzeyde meydana gelen eğilme neticesinde çekirdek malzemede yüzey katlanması ve kesme yüklenmesi nedeniyle duvarlar arası ayrılmalar tespit edilmiştir. Hasar bölgesi yandan görünüşte kırmızı ile işaretlenmiştir.



Şekil 4.49. Darbe testi sonrası Ti – Al (10 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri.

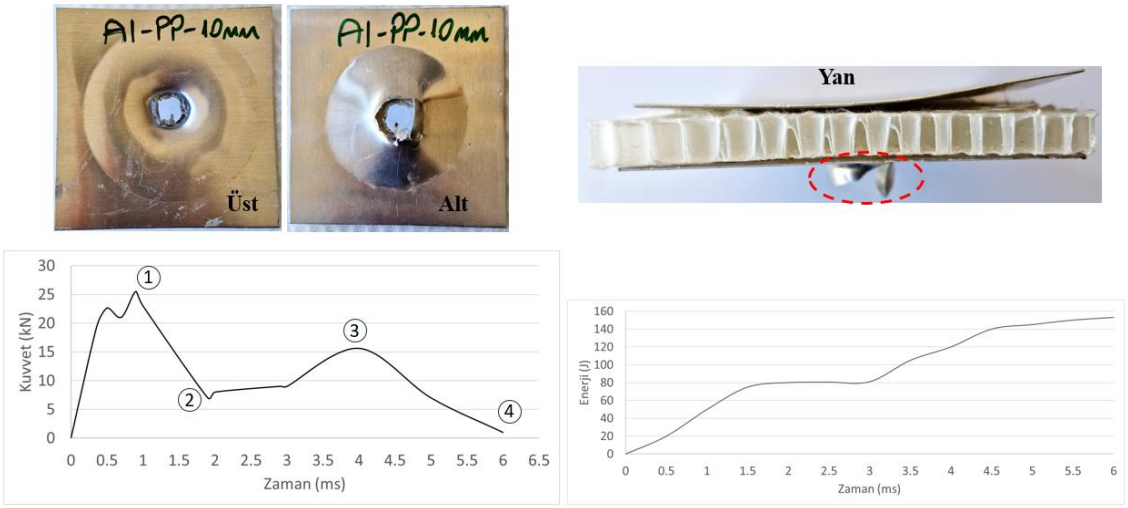
Şekil 4.50'de titanyum yüzey ve 20 mm kalınlıktaki alüminyum çekirdek malzemeden oluşan sandviç yapının ağırlık düşürme testi sonucu üstten, alttan ve yandan görüntüsü, kuvvet - zaman grafiği ile enerji – zaman grafiği verilmiştir. Test parçasının üst yüzeyinde, vurucu ucun parçaya temas ettiği noktada çökme meydana gelmiş ve üst yüzey plastik deformasyona uğrayarak yamulmuştur. Parçanın alt yüzeyinde ise herhangi bir iz ya da deformasyon oluşmamıştır. Üst yüzeyde meydana gelen yamulma neticesinde vurucu uç ekseninde yani parçanın yandan görünüşündeki tam orta noktada çekirdek malzemede tamamen ezilme durumu gerçekleşmiştir. Bu durum kenarlara doğru gidildikçe üst yüzey yamulma etkisi oluşturmadığı için görülmemektedir. Tam ezilme bölgesi ve üst yüzeyde oluşan yamulma, Şekil 4.49'daki yandan görünüşte görülebilmektedir. Kuvvet – zaman eğrisi incelendiğinde 1 noktasında kuvvet 3 kN değerine ulaşmış ve bu anda vurucu uç parça üst yüzeyinde çukur oluşturmuştur. Ardından 2 noktasına kadar çekirdek malzeme deformasyonu devam etmekte olup, 2 ile 3 noktaları arasında üst sac plastik deformasyonu ve çekirdek malzeme ezilmesi birlikte meydana gelmiştir. 3 noktasında kaydedilen maksimum kuvvet değeri 12.3 KN olmuştur. Bu noktadan sonra vurucu uç malzemeden geri sektiği için kuvvet değeri sıfıra düşmüştür.



Şekil 4.50. Darbe testi sonrası Ti – Al (20 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri.

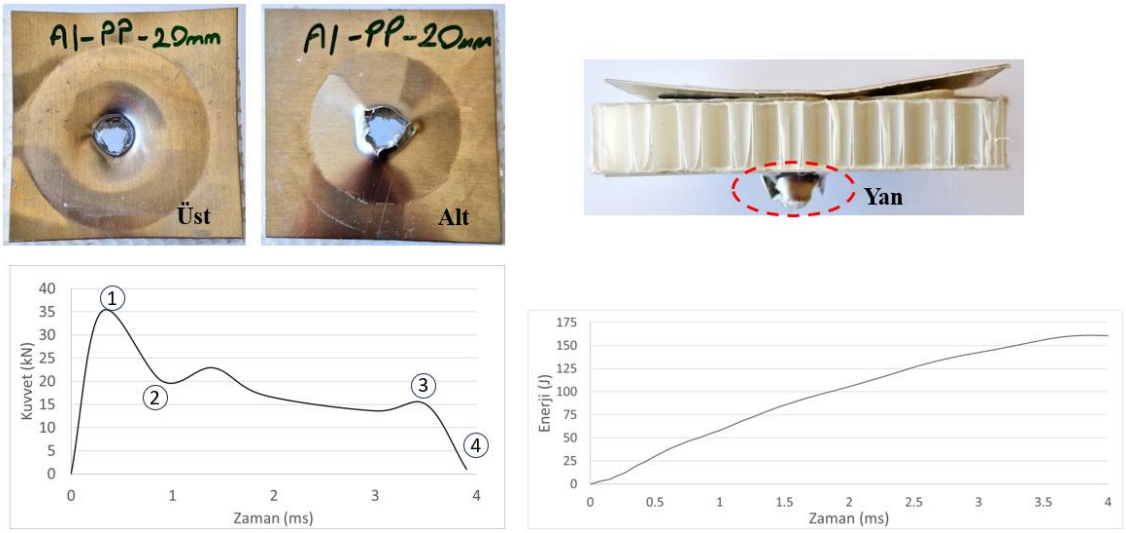
4.6. Polipropilen Çekirdek Malzemeli Numunelerin Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları

Şekil 4.51'de alüminyum yüzey ve 10 mm kalınlıktaki polipropilen çekirdek malzeme ile yapılmış sandviç yapının ağırlık düşürme testi sonucu üstten, alttan ve yandan görüntüsü, kuvvet - zaman grafiği ile enerji – zaman grafiği verilmiştir. Vurucu uç ile sandviç yapı ilişkisi incelendiğinde delip geçme durumunun gerçekleştiği görülmektedir. Uygulanan 250J enerjinin bir kısmı sandviç malzeme tarafından absorbe edilmiştir fakat tüm enerjiyi absorbe edilememiştir. Kuvvet – zaman eğrisinde 1 konumunda yani maksimum kuvvet değeri 25.5 kN değerine ulaştığında üst plakanın delinmesi gerçekleşmiştir. Üst plaka delindikten sonra 2 konumuna doğru kuvvet değerinde düşüş yaşanmıştır. 2 konumu ile 3 konumu arasında PP malzemeli çekirdek ezilmesi meydana gelmiştir. 3 konumunda çekirdek malzeme ezilmesi tamamlanmış, kuvvet değeri 15.6 kN değerine ulaşmış ve alt plaka delinmiştir. Bu noktadan sonra kuvvet değerinde 4 konumuna doğru düşüş yaşanmıştır. Bu noktadan sonra kuvvet değeri sıfırlanmamıştır. Bunun sebebi vurucu uç ile sandviç malzeme arasındaki sürtünmedir. Test sonrasında sandviç yapı görsel olarak incelendiğinde kenar bölgelerinde yüzey-çekirdek ayrışmalarının olduğu ve sandviç yapının altında kalan vurucu ucun çıkış bölgesinde "çanak yaprak formu" oluştuğu belirlenmiştir. Bu form yandan görünüşte kırmızı ile işaretlenmiştir.



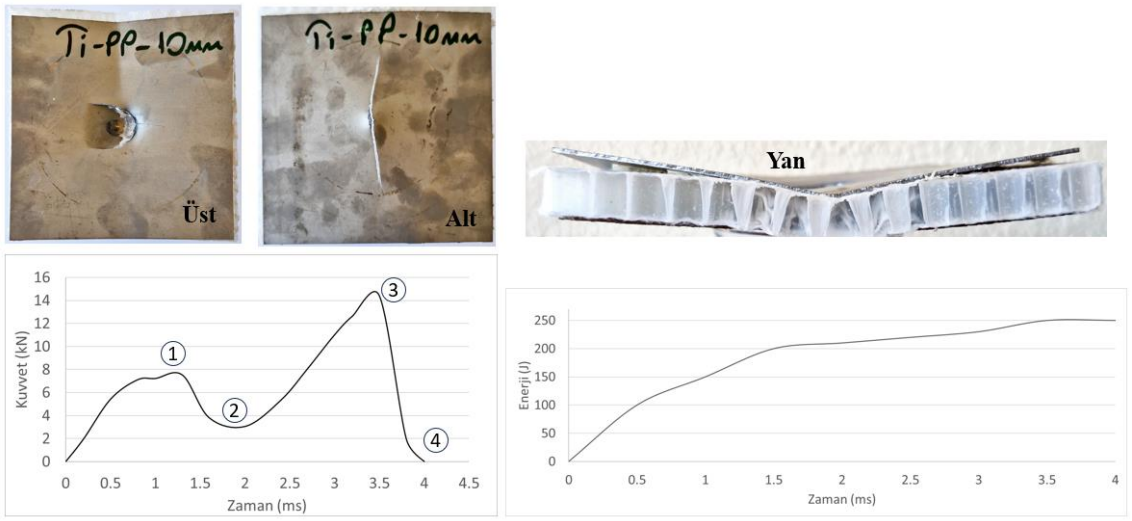
Şekil 4.51. Darbe testi sonrası Al – PP (10 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri.

Şekil 4.52'de alüminyum yüzey ve 20 mm kalınlıktaki polipropilen çekirdek malzeme ile yapılmış sandviç yapının ağırlık düşürme testi sonucu üstten, alttan ve yandan görüntüsü, kuvvet - zaman grafiği ile enerji – zaman grafiği verilmiştir. Vurucu uç ile sandviç yapı ilişkisi incelendiğinde delip geçme durumunun gerçekleştiği görülmektedir. Uygulanan 250J enerjinin bir kısmı sandviç malzeme tarafından absorbe edilmiştir fakat tüm enerji absorbe edilememiştir. Kuvvet – zaman eğrisi incelendiğinde 1 noktasında kuvvet değeri 35 kN değerine ulaşmış ve üst yüzey delinmiştir. Üst yüzey delinmesini takiben PP malzemeli çekirdek yapıda ezilme süreci başlamıştır. Bu süreç çekirdek malzeme kalınlığı arttığı için 10 mm kalınlıktaki çekirdek malzemeli sandviç yapıya göre daha uzun sürmüştür. Kuvvet değeri 15 kN değerine geldiğinde alt yüzeyde delinme gerçekleşmiştir. Bu noktadan sonra kuvvet değeri sıfırlanmamıştır. Bunun sebebi vurucu uç ile sandviç malzeme arasında yaşanan sürtünmedir. Test sonrasında sandviç yapı görsel olarak incelendiğinde kenar bölgelerinde yüzey-çekirdek ayrışmalarının olduğu ve sandviç yapının altında kalan vurucu ucun çıkış bölgesinde "çanak yaprak formu" oluştuğu belirlenmiştir. Bu form yandan görünüşte kırmızı ile işaretlenmiştir.



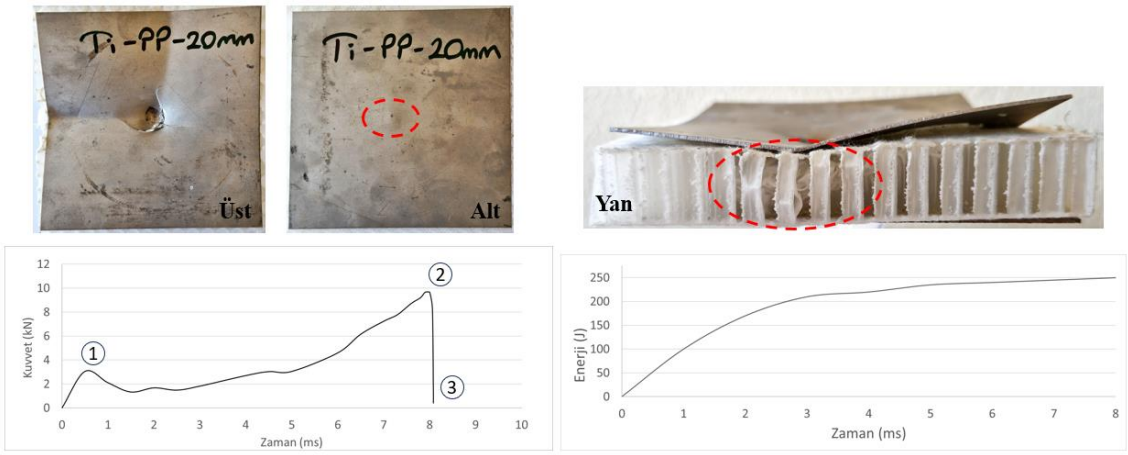
Şekil 4.52. Darbe testi sonrası Al – PP (20 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri.

Şekil 4.53'de titanyum yüzey ve 10 mm kalınlıktaki polipropilen çekirdek malzeme ile yapılmış sandviç yapının ağırlık düşürme testi sonucu üstten, alttan ve yandan görüntüsü, kuvvet - zaman grafiği ile enerji – zaman grafiği verilmiştir. Vurucu uç ile sandviç yapı ilişkisi incelendiğinde nüfuz etme durumunun gerçekleştiği görülmektedir. Sandviç yapının üst yüzeyinde yırtılma şeklinde deformasyon oluşurken alt yüzeyinde çizgisel yırtılma hasarı oluşmuştur. Kuvvet zaman grafiği incelendiğinde kuvvet değerinin 1 konumuna doğru artış gösterdiği ve yaklaşık 8 kN değerine geldiğinde bir miktar düşüş göstererek 2 konumuna geldiği görülmektedir. 1 konumunda vurucu uç üst yüzey üzerinde çukur oluşturmaya başlamış ve çukur oluşumu 2 noktasında sona ermiştir. Ardından kuvvet değerinde tekrar yükseliş başlamış ve 3 konumunda yaklaşık 14.4 kN değerine geldiğinde üst ve alt yüzeyde yırtılma oluşmuştur. Titanyum malzemenin gevrek olmasından dolayı yırtılma ani gerçekleşmiş ve kuvvet değerinde ani bir düşüş ile sıfır olmuştur. Sandviç malzeme üst yüzeyinin vurucu uç eksenine dik olacak şekilde yamulma oluştuğu görüşmüştür. Bu yamulma hizasında çekirdek malzemede ezilme meydana gelmişken, kenarlara doğru gidildikçe ezilme oluşmadığı görülmüştür. Bu durum yan görünüşte görülmektedir. Test sonrası sandviç yapı incelendiğinde parçanın sadece iki köşesinde çekirdek yapı ile yüzey malzemesinin ayrıldığı tespit edilmiştir. Bu da yapıştırma işleminin bu parçada daha iyi olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.53. Darbe testi sonrası Ti – PP (10 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri.

Şekil 4.54'de titanyum yüzey ve 20 mm kalınlıktaki polipropilen çekirdek malzeme ile yapılmış sandviç yapının ağırlık düşürme testi sonucu üstten, alttan ve yandan görüntüsü, kuvvet - zaman grafiği ile enerji – zaman grafiği verilmiştir. Vurucu uç ile sandviç yapı ilişkisi incelendiğinde nüfuz etme durumunun gerçekleştiği görülmektedir. Sandviç yapının üst yüzeyinde yırtılma şeklinde deformasyon oluşurken alt yüzeyinde sadece hafif tümsek bir yapı oluşmuştur. Kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde 1 konumunda vurucu ucun üst yüzeyde çukur oluşturarak yaklaşık 3 kN kuvvet değerine ulaştığı görülmektedir. 1 ile 2 konumu arasında geçen sürede sandviç yapının üst yüzeyinde yamulma ve çekirdek malzemede ezilme olayları gerçekleşmiştir. Bu deformasyon ve ezilme olayları sonucunda kuvvet değeri 9.7 kN değerine yükselmiştir. Bu kuvvet değerine ulaştıktan sonra ise üst yüzeyde yırtılma meydana gelmiştir. Vurucu uç üst yüzeye hasar verdikten sonra sandviç yapıya saplanıp kalmıştır. Bu durum sonucunda kuvvet değeri sıfıra düşmüş ve test sonuçlanmıştır. Test sonrası sandviç malzeme incelendiğinde üst yüzeye ait dört köşede çekirdek malzeme ile üst yüzey arasında ayrılma meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca üst yüzeyde meydana gelen yamulma neticesinde vurucu uca dik eksende çekirdek malzemenin hasara uğradığı, orta noktadan dışarıya doğru gidildikçe yüzey yamulma etkisinin ortadan kalktığı ve çekirdek malzemede deformasyon oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 4.54. Darbe testi sonrası Ti – PP (20 mm) üst, alt ve yandan görüntüsü, kuvvet-zaman ile enerji-zaman grafikleri.

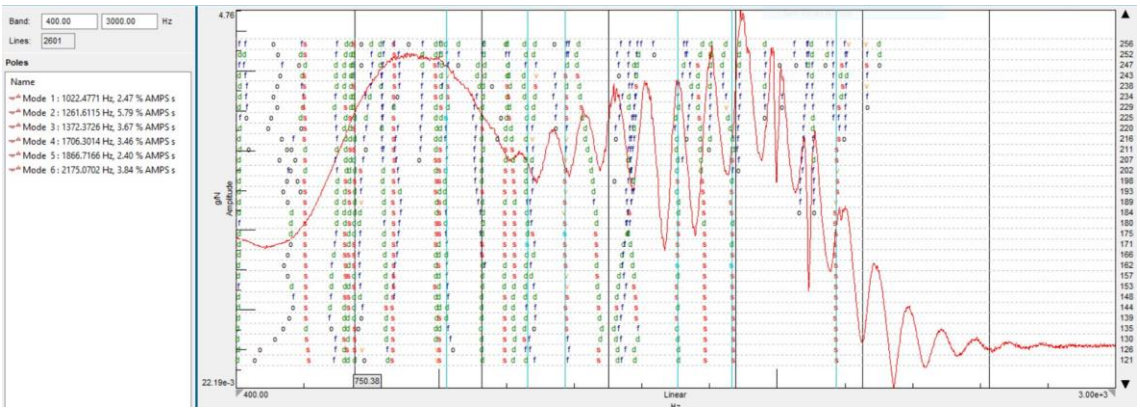
Ağırlık düşürme testleri sonucunda elde edilen verilerle sandviç yapılar tarafından sönümlenen enerji miktarları ve sandviç yapıların ağırlıkları kullanılarak birim ağırlık başına sönümlenen enerji miktarı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre birim ağırlık başına en fazla enerji sönümleme oranına sahip sandviç malzeme alüminyum yüzey ve 20 mm kalınlıktaki alüminyum çekirdek malzemeye sahip olandır. Birim ağırlık başına sönümlenen ağırlık oranı en düşük olan ise alüminyum yüzey ve 10 mm kalınlıktaki alüminyum çekirdek malzemeye sahip olan sandviç malzeme olmuştur.

Çizelge 4.1. Birim ağırlık başına sönümlenen enerji oranı.

Sandviç Malzeme	Toplam Ağırlık (gr)	Sönümlenen Enerji (J)	Sönümlenen Enerji / Ağırlık Oranı
Al_Al_10mm	94	95	1.01
Al_Al_20mm	101	198	1.96
Al_PP_10mm	98	153	1.56
Al_PP_20mm	110	160	1.45
Ti_Al_10mm	148	250	1.69
Ti_Al_20mm	157	250	1.59
Ti_PP_10mm	152	250	1.64
Ti_PP_20mm	164	250	1.52

4.7. Titreşim Testi Sonuçları

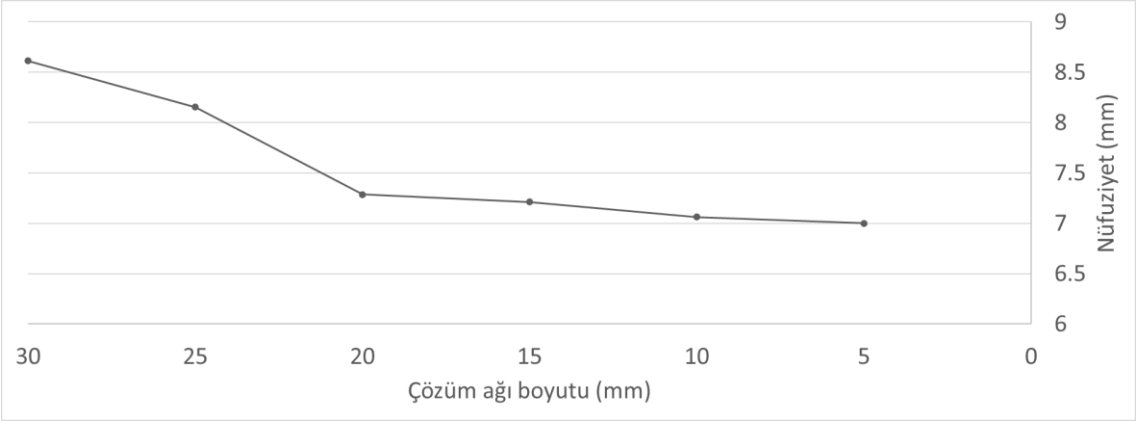
Çekiç gezdirme yöntemi ile yapılan modal analiz ölçümleri sonucu elde edilen veriler, SIEMENS Simcenter programı ile işlenerek elde edilen titreşim grafikleri yorumlanmıştır. 9 farklı noktadan alınan titreşim verileri sonucunda birinci mod değeri 1022 Hz. olarak belirlenmiştir. İkinci mod değeri 1261 Hz. olarak ölçülmüş olup, üçüncü mod değeri 1372 Hz. Olmuştur. Alüminyum yüzey malzeme ve alüminyum çekirdek malzemeden oluşan sandviç numunesine ait dördüncü mod değeri 1706 Hz., beşinci mod değeri 1866 Hz. ve altıncı mod değeri ise 2175 Hz. olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.55'te verilmiştir.



Şekil 4.55. Titreşim testi sonucu bulunan mod değerleri.

4.8. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

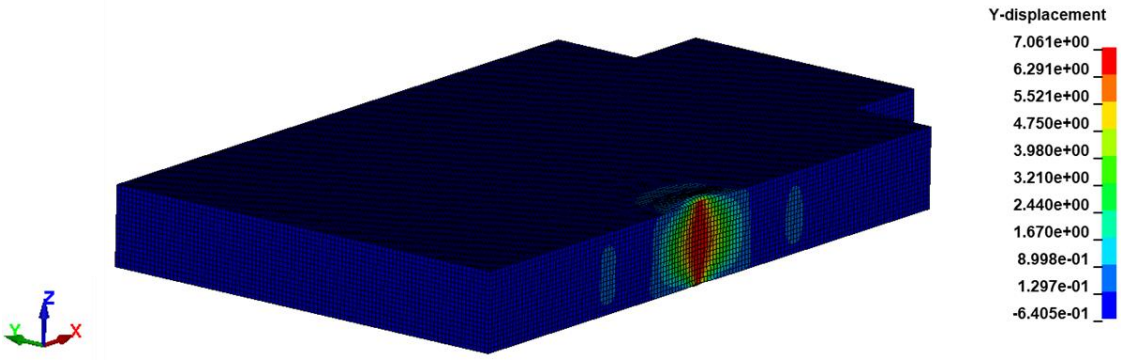
Analiz çalışmalarında kullanılan çözüm ağı yapısının yakınsaması, sayısal simülasyon sonuçlarında elde edilen verilerin, çözüm ağı boyutundan bağımsız bir noktada olduğunu, yani çözüm ağı boyutundan etkilenmediğini ortaya koymayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, sonuçların daha fazla iyileştirme gerektirmeksizin sabit bir duruma ulaştığı noktaya kadar çözüm ağı yoğunluğunun artırılmasını içerir. Bu sayede, simülasyon sonuçlarının doğruluğu, güvenilirliği ve tutarlılığı garanti altına alınır. Değişik boyutlarda eleman yapıları kullanılarak yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlar Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, hesaplama süresi, maliyeti ve doğruluğu bakımlarından 10 mm eleman boyutunun en uygun değer olduğu belirlenmiş ve tüm analizlerde aynı çözüm ağı boyutu kullanılmıştır.



Şekil 4.56. Çözüm ağı yakınsaması.

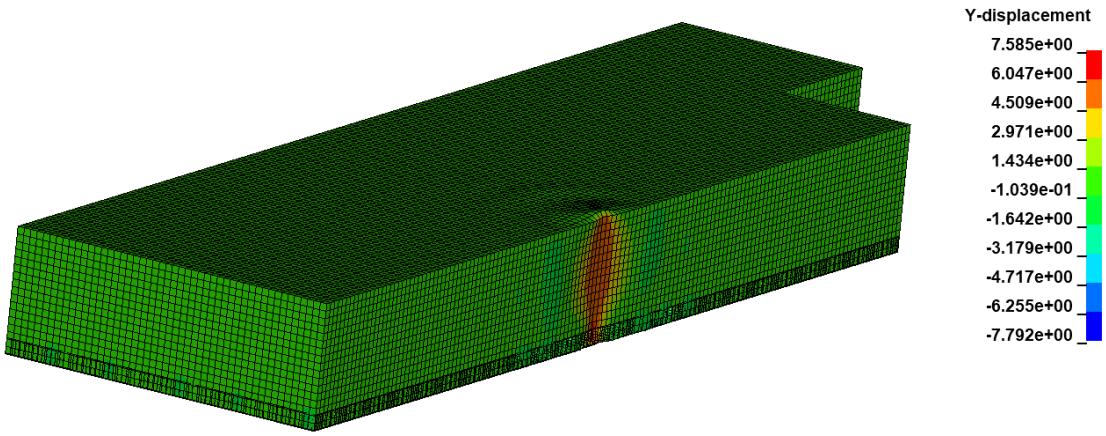
4.8.1. Direğe Yandan Çarpma Analiz Sonuçları

BMW i3 elektrikli aracında kullanılan batarya muhafazası geometrisi referans model olarak kullanılmıştır. Bu model ile yapılan simülasyonlarda Alüminyum 6061-T6 malzeme kullanılmış olup, direğe yandan çarpma analizi sonucunda batarya muhafazasının yan yüzeyinde 7 mm şekil değişimi olduğu belirlenmiştir. Bu değer benzer muhafaza modelini referans alarak aynı testi simüle eden literatürdeki çalışmalar ile %85 benzerlik göstermektedir (Acar vd. 2023). Katı modelde oluşan deformasyona ait görüntü Şekil 4.57'te gösterilmiştir.



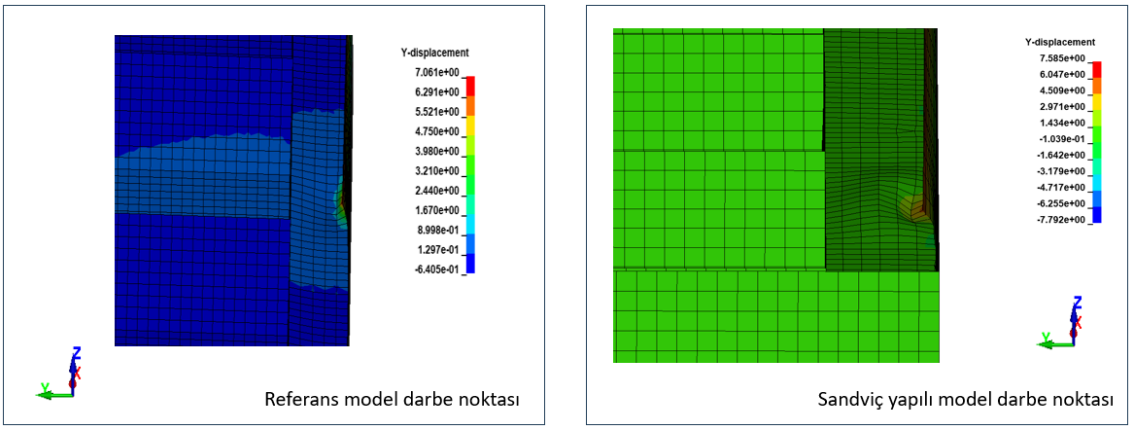
Şekil 4.57. Referans model direğe yandan çarpma analiz sonucu.

Aynı şartlar altında sandviç yapılı geometriye uygulanan direğe yandan çarpma testinde darbe ekseninde meydana gelen maksimum deformasyon miktarı 7.5 mm olarak belirlenmiştir. Analiz sonucu Şekil 4.58'de gösterilmiştir.



Şekil 4.58. Sandviç yapılı model direğe yandan çarpma analiz sonucu.

İki model sonucu karşılaştırıldığında, sandviç yapılı modelde oluşan deformasyon miktarı referans modele oldukça yakındır. Bu durumda bataryanın yandan darbe dayanımında ciddi bir düşüş meydana gelmemiştir. Oluşan deformasyon karşılaştırması Şekil 4.59'da verilmiştir.

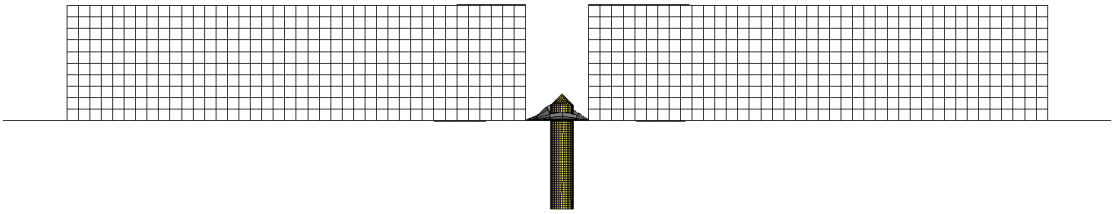


Şekil 4.59. Direğe yandan çarpma analizi deformasyon bölgeleri.

4.8.2. Penetrasyon Analiz Sonuçları

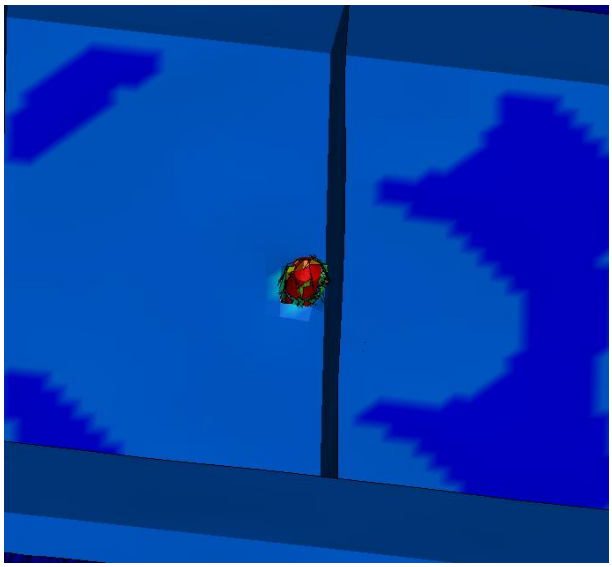
Alüminyum malzemeden oluşan referans model ve karşılaştırması yapılan sandviç yapılı batarya muhafazası katı modeliyle çivi penetrasyon analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre referans modelde 75 m/s hızında 4.8 mm deformasyon meydana gelmiştir. 100 m/s hızında deformasyon miktarı 6.5 mm olup, 125 m/s penetrasyon

hızında 9.3 mm deformasyon meydana gelmiştir. 148 m/s hızında ise muhafazada delinme meydana gelmiştir. Delinme anına ait görüntü Şekil 4.60'da verilmiştir.



Şekil 4.60. Referans model penetrasyon analizi hasar görüntüsü.

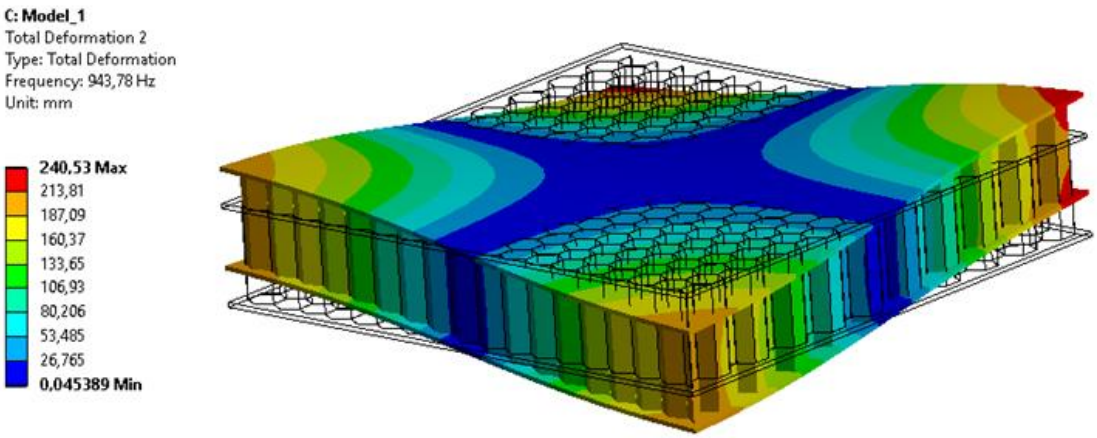
Sandviç malzeme entegrasyonu yapılmış batarya muhafazası ile yapılan penetrasyon analiz sonuçlarına göre 75 m/s hızda 10 mm deformasyon meydana gelmiştir. 100 m/s hızda 16 mm deformasyon oluştuğu tespit edilmiştir. Penetrasyon çivi hızı 125 m/s değerine çıkartıldığında 21 mm deformasyon meydana gelmiştir. 150 m/s hızda batarya muhafazası sandviç malzemesinde delinme meydana gelmiş ve tasarım hasara uğramıştır. Meydana gelen hasar görüntüsü Şekil 4.61'te verilmiştir.



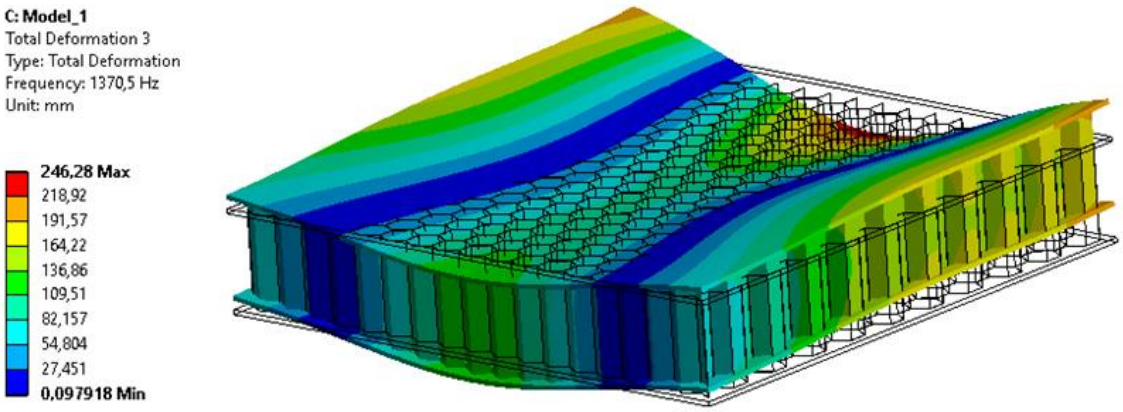
Şekil 4.61. Sandviç yapılı model penetrasyon analizi hasar görüntüsü.

4.8.3. Modal Analiz Sonuçları

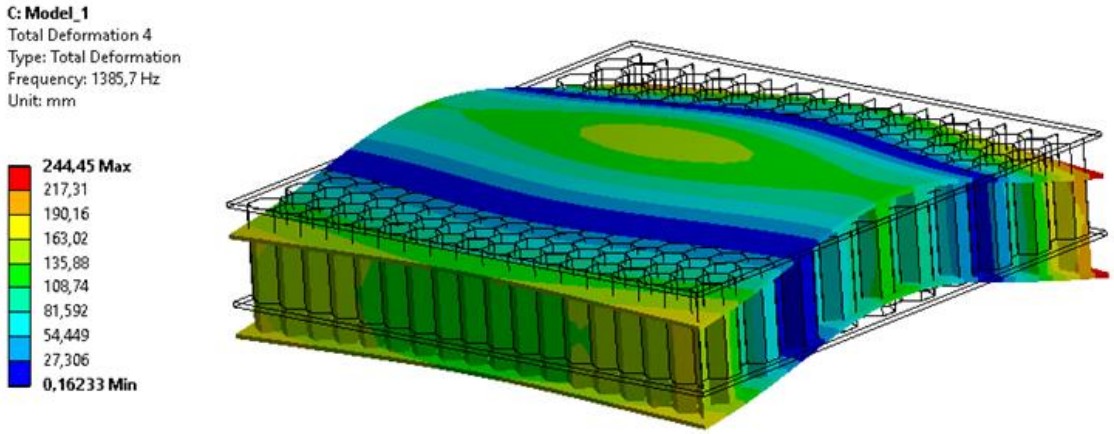
Tez kapsamında, test numunelerinin doğal frekanslarının ve mod şekillerinin tespit edilebilmesi amacıyla bölüm çekiç testi yapılarak doğal frekans ve modal analiz testi yapılan parça ile aynı ölçülerde hazırlanan katı model ile sonlu elemanlar modal analizi gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, numunenin katı modeli sonlu elemanlar yazılımına aktarılmış ve orta düğümler serbest bırakılarak tetrahedron ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra, malzeme özellikleri olarak yüzey elemanlar ve çekirdek malzemeye ayrı ayrı elastisite modülü ve yoğunluk tanımlanmış, sönümsüz serbest-serbest modal analiz çözümü uygulanmıştır. Parçanın tüm eksenlerde hareketi ve dönmesi serbest bırakıldığı için ilk altı mod değeri sıfır ya da sıfıra yakın değerlerde çıkmıştır. Bu modlar rijit gövde hareketlerini temsil etmektedir, beklenen bir durumdur ve sıralamada dikkate alınmamıştır. Analiz sonucunda elde edilen frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 4.62 – Şekil 4.67 arasında verilmiştir.



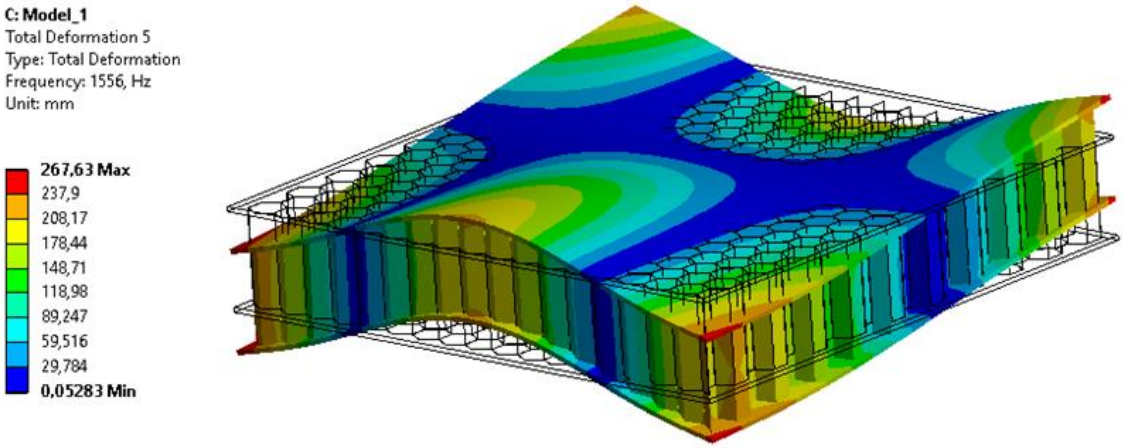
Şekil 4.62. Birinci mod izotropik görünüş.



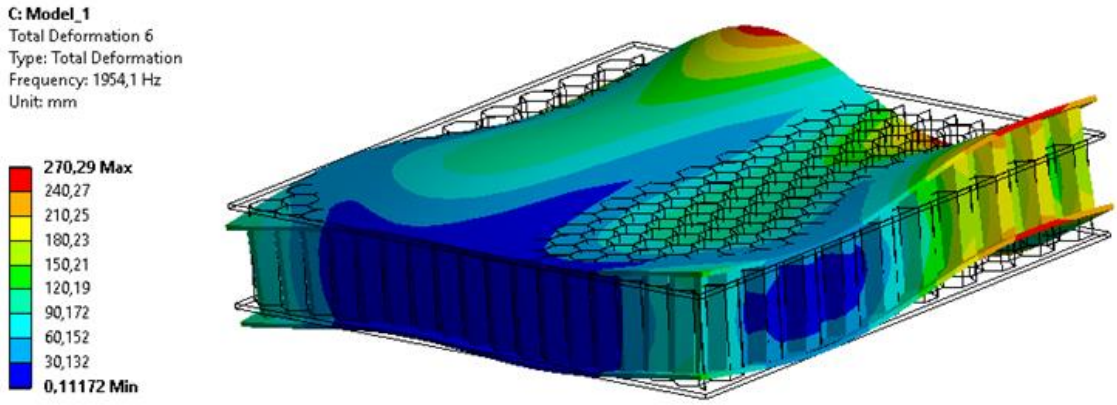
Şekil 4.63. İkinci mod izotropik görünüş.



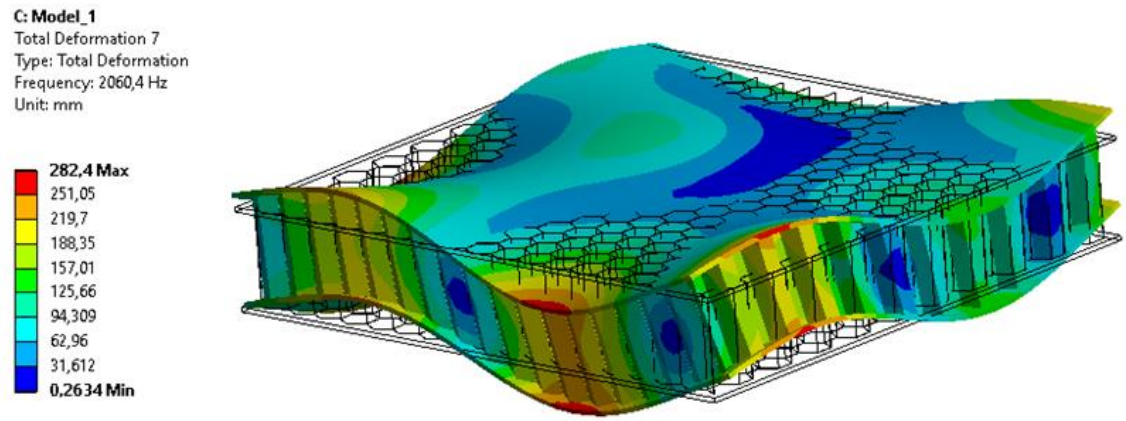
Şekil 4.64. Üçüncü mod izotropik görünüş.



Şekil 4.65. Dördüncü mod izotropik görünüş.



Şekil 4.66. Beşinci mod izotropik görünüş.



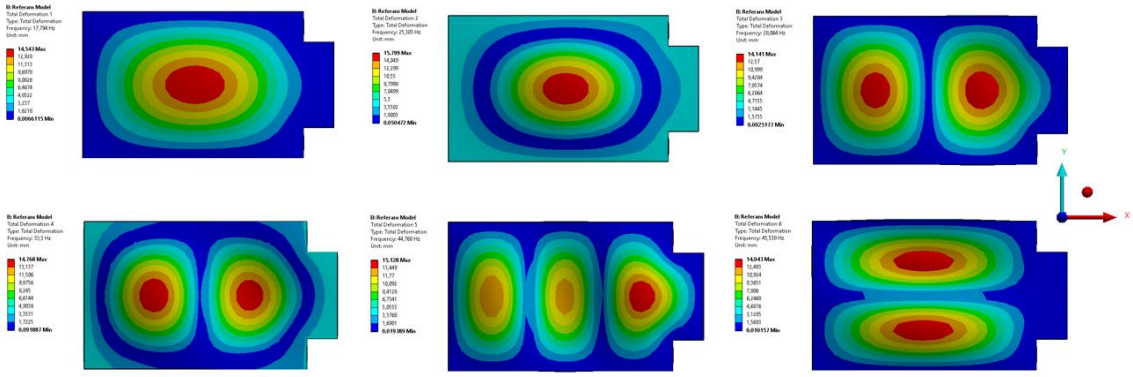
Şekil 4.67. Altıncı mod izotropik görünüş.

Titreşim testi sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırması Çizelge 4.2'de verilmiştir.

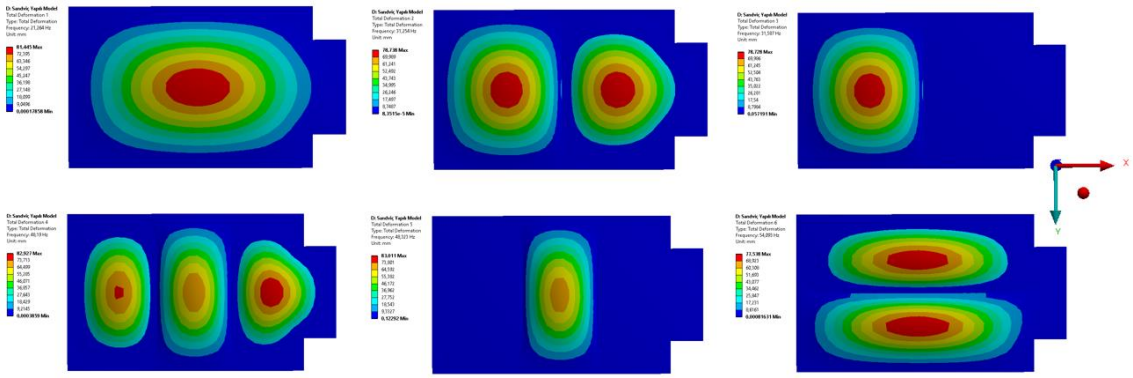
Çizelge 4.2. Titreşim testi ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Sırası	Çekiç Testi Doğal Frekanslar (Hz)	Sonlu Elemanlar Analizi Doğal Frekanslar (Hz)	Fark (%)
Mod 1	1022	943	7.73
Mod 2	1261	1370	-8.64
Mod 3	1372	1385	-0.95
Mod 4	1706	1556	8.79
Mod 5	1866	1954	4.72
Mod 6	2175	2060	5.29

Çekiç testi ve numune bazlı modal analiz doğrulamasından sonra, referans model ve sandviç yapı entegrasyonu yapılmış batarya muhafazası modal analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan referans modele ait olan Şekil 4.68'de sandviç yapılı modele ait olan ise Şekil 4.69'da gösterilmiştir. Modal analiz sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.68. Referans model doğal frekans analizi.



Şekil 4.69. Sandviç yapılı model doğal frekans analizi.

Çizelge 4.3. Karşılaştırmalı modal analiz sonuçları.

Mod	Referans Model Doğal Frekans (Hz)	Sandviç Yapılı Model Doğal Frekans (Hz)
Mod 1	17.794	21.264
Mod 2	25.303	31.254
Mod 3	28.064	31.587
Mod 4	33.500	48.190
Mod 5	44.768	48.323
Mod 6	45.538	54.093

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Sandviç yapılar, hafiflikleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve enerji emme yetenekleri sayesinde mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yapıların üstün mekanik özellikleri, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde, darbe dayanımı ve yapısal bütünlük gerektiren uygulamalarda dikkat çekmektedir. Son yıllarda elektrikli araçlar, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği konusundaki avantajlarıyla ulaşım sektöründe önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli araçlarda batarya muhafazalarının tasarımı hem batarya güvenliğini sağlama hem de aracın toplam ağırlığını düşürme açısından oldukça öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında 1 mm kalınlığa sahip alüminyum ve titanyum yüzey malzemesi ile üç farklı kalınlığa (5 – 10 – 20 mm) sahip alüminyum ve polipropilen çekirdek malzemeler kullanılarak sandviç kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Üretimi yapılan sandviç malzemelerden uluslararası standartlara uygun şekilde test numuneleri hazırlanıp, basma testi, üç nokta eğilme testi ve düşük hızda ağırlık düşürme testleri uygulanmış ve test sonuçları yorumlanmıştır. Ardından, sandviç yapılardan birim ağırlık başına enerji sönümleme oranı en yüksek olan konfigürasyonu için çekiç gezdirme yöntemi ile titreşim testi yapılmıştır. Bir elektrikli araçta kullanılan batarya muhafazasının katı modeli oluşturulmuş, yapılan malzeme karakterizasyon testleri sonucu elde edilen veriler çerçevesinde bu batarya muhafazasının alt sacı için alternatif bir sandviç yapı oluşturularak sonlu elemanlar analizleri ile mekanik dayanımları ve doğal frekansları karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Alüminyum yüzey malzemeye sahip ve Al çekirdek malzemeye sahip numuneler ile yapılan basma testi sonuçlarına göre malzeme kalınlık artışının (5 mm, 10 mm ve 20 mm) sandviç malzemenin taşıyabildiği maksimum yük miktarına etkisi olmadığı görülmüştür. Aynı şekilde alüminyum yüzey malzeme ve polipropilen çekirdek malzemeye sahip numunelere ait test sonuçları da çekirdek malzeme kalınlık artışı ile maksimum kuvvet değeri arasında paralellik olmadığını göstermektedir.

- Yüzey malzemesi olarak titanyum, çekirdek malzeme olarak da alüminyum kullanılan numuneler ile yapılan basma testi sonuçları çekirdek malzeme kalınlık artışının sandviç malzemenin taşıyabildiği maksimum yük miktarına etkisi olmadığını ortaya koymuştur. Yine titanyum yüzey malzeme ve farklı kalınlıklardaki polipropilen çekirdek malzemeler ile üretilen sandviç kompozitlere yapılan basma testi sonuçları çekirdek kalınlık artışının maksimum yük miktarına etkisi olmadığını göstermektedir.

- Basma testlerinden elde edilen veriler, alüminyum çekirdek malzemesinin polipropilen çekirdek malzemesine kıyasla kalınlıktan bağımsız olarak daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, alüminyumun daha yüksek mekanik dayanım özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Alüminyum çekirdekli sandviç yapıların bu üstün performansı, mekanik dayanımın kritik önem taşıdığı uygulamalarda tercih edilmesini desteklemektedir. Bu bulgular, elektrikli araç batarya muhafazası gibi yüksek yük taşıma gereksinimi olan yapılar için alüminyum çekirdek malzemesinin uygunluğunu doğrulamaktadır.

- Alüminyum çekirdek malzemesinin basma testinde maksimum yüke ulaştığı nokta tüm kalınlık değerleri için yaklaşık 0,3 mm deplasmana karşılık gelmektedir. Polipropilen çekirdek malzeme sonuçları incelendiğinde ise maksimum yüke ulaşma noktasının kalınlıktan etkilendiği görülmüştür. Çekirdek malzeme kalınlığı arttıkça maksimum yüke ulaşılan deplasman değeri artmıştır.

- Yapılan üç nokta eğilme test sonuçları, çekirdek malzeme kalınlık artışının eğilme dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu eğilme dayanımı artışının hem alüminyum çekirdek malzeme hem de polipropilen çekirdek malzeme için geçerli olduğu belirlenmiştir. Testler sırasında, çekirdek kalınlığının artmasıyla birlikte, yük taşıma kapasitesinin ve deformasyona karşı direncin anlamlı ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir. Polipropilen çekirdekli numuneler, daha yüksek eğilme dayanımı sergilerken, alüminyum çekirdekli numuneler de artan kalınlık ile dayanım performansında tutarlı bir artış göstermiştir.

- Titanyum yüzey malzeme kullanılarak üretilen sandviç kompozitler, üç nokta eğilme testlerinde alüminyum yüzey malzeme kullanılanlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı sergilemiştir. Bu durum, titanyumun alüminyuma göre daha yüksek elastiklik modülü ve mukavemet değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Testler sırasında, titanyum yüzey malzeme kullanılan numunelerin daha yüksek yükler altında bile yapısal bütünlüğünü koruduğu ve eğilme deformasyonuna karşı daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, alüminyum yüzey malzeme kullanılan numunelerin kritik yük seviyelerine daha erken ulaştığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, titanyumun, yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için yüzey malzemesi olarak daha uygun bir seçenek olabileceğini göstermektedir.

- Üç nokta eğilme testlerinde test edilen sandviç panel çekirdeklerinde, hücre duvarı burkulması ve yüzey ayrılması olmak üzere iki farklı hata modu oluşmuştur. Hücre duvarı burkulması, genellikle çekirdek malzemenin yerel deformasyona karşı direncinin yetersiz olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Yüzey ayrılması ise, yüzey ve çekirdek arasındaki bağlanma kuvvetlerinin, diğer bir ifade ile yapışma kuvvetinin, zayıf olduğu bölgelerde meydana gelmiştir. Bu hata modları, sandviç yapıların mekanik performansını etkileyen faktörler olarak değerlendirilmiştir.

- Yapılan ağırlık düşürme testi sonuçlarına göre, çekirdek malzeme kalınlığındaki artış yapının enerji sönümleme kapasitesini artırmaktadır. Testlerde, daha kalın çekirdek malzeme kullanılan sandviç panellerin, darbe sırasında daha fazla enerjiyi absorbe ettiği belirlenmiştir. Çekirdek kalınlığındaki artış, darbe enerjisinin daha geniş bir alana yayılmasını ve böylece alt yüzeyde oluşan hasarın en aza indirilmesini sağlamıştır. Özellikle yüksek yükleme senaryolarında, kalın çekirdekli yapıların daha dayanıklı olduğu ve darbe sonrası yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde koruduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, enerji sönümleme kapasitesinin artırılması gereken uygulamalarda çekirdek kalınlığının kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

- Literatürde(Sun, Hou, Wang, Hazell, Li, 2021) yapılan benzer çalışmalar da göstermiştir ki bir sandviç panel ince yüzey malzemesi (düşük eğilme rijitliği) ve

nispeten sert bir çekirdek malzemeden oluşuyorsa sadece vurucu ucun çarptığı bölgede hasar oluşup diğer bölgelerde hasar gözükmezken, buna karşın kalın yüzey malzemesi(yüksek eğilme rijitliği) ve nispeten yumuşak bir çekirdeğe sahip malzemeden oluşuyorsa tüm yüzeyde hasar ve şekil değişikliği oluşma olasılığı daha yüksektir. Bu tez çalışmasında elde edilen darbe testi sonuçları da bu sonuca uygundur. Alüminyum yüzey malzemesine sahip numunelerde sadece vurucu bölgede hasar ve şekil değişimi oluşmuş, Titanyum yüzey malzemesinden oluşan sandviç malzemelerde ise vurucu uç bölgesine ek olarak malzeme üst yüzeyinde elastik deformasyon oluşmuştur.

- Alüminyum ve polipropilen malzemelerin enerji sönümleme davranışları, malzeme özellikleri ve uygulama koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Alüminyum, yüksek elastisite modülü ve akma dayanımı sayesinde yüksek yükler altında daha fazla enerji absorbe edebilir, ancak sınırlı deformasyon kapasitesi nedeniyle daha erken hasara uğrayabilmektedir. Buna karşın, polipropilen düşük elastisite modülü ve yoğunluğu ile daha fazla deformasyona olanak tanır, bu da düşük hızdaki darbelerde enerjiyi daha etkin bir şekilde sönümlemesini sağlamıştır. Alüminyum genellikle yüksek dayanım ve sertlik gerektiren uygulamalarda tercih edilebilirken, polipropilen esneklik ve hafiflik avantajı ile darbe dayanımı veya deformasyon kabiliyeti önemli olduğunda tercih edilebilir.

- SEA ile yapılan direğe yandan çarpma simülasyon sonuçları incelendiğinde, 1mm kalınlığa sahip alüminyum yüzey ve 20 mm kalınlığa sahip alüminyum çekirdek malzemeden üretilmiş sandviç yapının batarya muhafazasının altına yerleştirilmesi, 3 mm kalınlıkta alüminyum 6061-T6 malzemesinden oluşan referans batarya taşıyıcı modele kıyasla aynı sınır ve yükleme şartlarında meydana gelen deformasyonu 0.5 mm arttırmıştır.

- SEA ile yapılan penetrasyon analiz sonuçlarına göre referans modelde muhafaza delinmesi 148 m/s hızda gerçekleşmiştir. Buna karşın tabanına sandviç yapı yerleştirilmiş muhafaza modelinde delinme 150 m/s hızda meydana gelmiştir. Bu sonuç, sandviç yapının, batarya muhafazasının delinme direncini çok küçük bir oranda

artırdığını göstermektedir. Sandviç yapı, enerjiyi daha verimli bir şekilde dağıtarak, darbe anında meydana gelen yerel deformasyonu sınırlamış ve delinme hızını hafifçe yükseltmiştir. Ancak, artışın çok küçük olması, kullanılan sandviç yapının tasarımının, özellikle batarya muhafazalarının delinme direncini belirgin şekilde iyileştirmediğini, ancak mevcut yapı üzerinde bir miktar güçlendirme sağladığını göstermiştir.

- Elektrikli araç batarya muhafazası tasarımında doğal frekans değerleri hem yapısal bütünlüğün hem de titreşim dayanımının sağlanabilmesi için kritik öneme sahiptir. SEA yöntemi ile yapılan modal analiz sonuçlarına göre referans model ve sandviç yapılı modele ait doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Referans model için birinci doğal frekans değeri 17.794 Hz, sandviç yapılı modele ait birinci doğal frekans değeri ise 21.264 Hz. bulunmuştur. Sandviç yapılı modelin hem kütlesi azaldığı için hem de sandviç yapı etkisiyle rijitliği arttığı için modal analiz değerlerinin referans modele göre yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur. Batarya muhafazasının doğal frekansının araçtaki titreşim kaynaklarından (elektrik motoru, yol titreşimleri vb.) uzak olması gerekir. Bulunan doğal frekans değerleri değerlendirilirken gerçek çalışma koşullarında yapılan ölçüm sonuçlarına göre doğal frekans değeri yükseltilebilir ya da düşürülebilir.

- Referans tasarımda 3 mm kalınlığa sahip alüminyum alt sac ve yan duvarların toplam ağırlığı 19.5 kg gelmekteyken, önerilen 1 mm kalınlıklı alüminyum alt ve üst sac ile 20 mm kalınlığa sahip Al çekirdek malzemeden oluşan sandviç yapının kullanılmasıyla aynı yapının ağırlığı 17.9 kg'a düşmektedir. Böylelikle batarya muhafazasında yaklaşık 1.6 kg hafifletme potansiyeli oluşmaktadır. Yol ve sürüş şartları gibi birçok parametreye bağlı olmakla birlikte literatürde (Güven ve Rende, 2017) yer alan bir çalışmaya göre elektrikli araçtan sağlanan her bir kg ağırlık azaltımı, tek şarjda 3 km daha fazla yol alınabilmesine imkan sağlamaktadır. Bu çalışma sonucunda mekanik dayanımından ödün vermeden elde edilen 1.6 kg'lık hafifletme ile tek şarjda yaklaşık 5 km'lik menzil artış potansiyeli ortaya konmuştur.

- Bu tez çalışması, elektrikli araç batarya muhafazası malzeme seçimi sürecinde mekanik dayanım testleri ve sonlu elemanlar analiz yöntemlerini bir araya getirerek kapsamlı bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır. Çalışma, batarya muhafazalarının

güvenli, dayanıklı ve hafif bir şekilde tasarlanmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Gelecek çalışmalarda, farklı yüzey ve çekirdek malzemelerden oluşan yenilikçi sandviç yapıların kullanılmasıyla hafifletme potansiyelinin artırılması hedeflenebilir. Ayrıca, bu sandviç yapıların yalnızca mekanik dayanımları değil, aynı zamanda yangına dayanım, termal performans ve elektriksel yalıtım özellikleri de çeşitli standartlara uygun testlerle incelenerek kapsamlı bir değerlendirme yapılabilir. Bu tür çok yönlü analizler, batarya muhafazalarının hem güvenlik hem de performans açısından daha ileri seviyelere taşınmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Anonim, 2016. Modal tips: roving hammer versus roving accelerometer. *https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Modal-Tips-Roving-Hammer-versus-Roving-Accelerometer/ta-p/378619* Erişim tarihi:01.12.2024

Anonim, 2022. Batarya muhafaza inceleme sitesi. Erişim Adresi: *https://www.batterydesign.net/bmw-i3-2/* Erişim tarihi: 30.12.2024.

Anonim, 2023. Audi teknoloji portalı. Erişim adresi: *https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/battery-and-charging/audi-e-tron-battery-and-safety*. Erişim tarihi: 01.12.2024.

Anonim, 2024. Hexcel teknik broşür. Erişim adresi: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWebHoneycombAttributesandProperties.pdf

Anonim, 2025. Not just batteries: The chemistry of electric cars. Erişim adresi: *https://www.chemistryworld.com/features/not-just-batteries-the-chemistry-of-electric-cars/4015513.article?utm_campaign=cw_shared&utm_medium=email&utm_source=website*. Erişim tarihi: 20.01.2025.

Acar, E., Bayrak, G., Türkmen, A. M., Şahin, A. E., Güleçyüz, E. N., Safa, E., & Koç, Ö. K. (2023). Bir Elektrikli Aracın Kompozit Batarya Paketi Muhafazasının Tasarım İyileştirmesi. *International Symposium On Automotive Science And Technology*.

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.*

Baumeister, J., Weise, J., Hirtz, E., Höhne, K., & Hohe, J. 2014. Applications of aluminum hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles. *Procedia Materials Science, 4, 317-321*.

Belingardi, G., & Scattina, A. 2023. Battery pack and underbody: integration in the structure design for battery electric vehicles—Challenges and solutions. *Vehicles, 5(2), 498-514.*

Bozkurt, İ., (2022). Değişken geometriye sahip kompozit çekirdekli sandviç plakların darbe davranışlarının incelenmesi. (Doktora tezi, Fırat Üniversitesi).

Carlstedt, D., & Asp, L. E. 2020. Performance analysis framework for structural battery composites in electric vehicles. *Composites Part B: Engineering, 186, 107822*.

Castanie, B., Bouvet, C., & Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access, 1, 100004.*

Choi, C. H., Cho, J. M., Kil, Y., & Yoon, Y. 2013. Development of polymer composite battery pack case for an electric vehicle (No. 2013-01-1177). *SAE Technical Paper.*

Coren, F., Huemer-Kals, S., Stelzer, P. S., & Fischer, P. 2020. Crashworthiness of C-SMC: A structural battery case for automotive application. *In FISITA Web Congress 2020.*

Dagdeviren, S., Yavuz, M., Kocabas, M. O., Unsal, E., & Esat, V. (2016). Structural crashworthiness analysis of a ladder frame chassis subjected to full frontal and pole side impacts. *International journal of crashworthiness*, 21(5), 477-493.

Deng F. 2007. Acoustic emission applications to composite sandwich structures at room and low temperatures. (Doktora tezi, Wayne State Universitesi, ABD).

Duan, S., Tao, Y., Lei, H., Wen, W., Liang, J., & Fang, D. (2018). Enhanced out-of-plane compressive strength and energy absorption of 3D printed square and hexagonal honeycombs with variable-thickness cell edges. *Extreme Mechanics Letters, 18, 9-18.*

Engin, Z. B. (2011). Balpeteği sandviç kompozitlerin darbe davranışının incelenmesi. (Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi).

Geramizadeh, H., Dariushi, S., & Salami, S. J. (2022). Optimal face sheet thickness of 3D printed polymeric hexagonal and re-entrant honeycomb sandwich beams subjected to three-point bending. *Composite Structures, 291, 115618.*

Gibson LJ, Ashby MF., (1997). Cellular Solids: Structure and Properties. New York: Cambridge University Press, 93-174.

Gibson, R. F. (2016). Principles of Composite Material Mechanics. CRC Press.

Gjelstrup, S. L., (2021). What is Modal Analysis: The Ultimate Guide. https://dewesoft.com/blog/what-is-modal-analysis (Erişim tarihi:01.12.2024)

Gül, B. (2018). *Karbon elyaf takviyeli petek yapılı sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerine çekirdek malzemenin türü ve kalınlığının etkisi* (Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi).

Güven, F., & Rende, H. 2017. Elektrikli araçların tasarımında malzeme seçiminin önemi. *Mühendis ve Makina, 58(689), 81-95*.

Gpoichand, A., Mohanrao, R., Sankar, N. V. S., Balaji, G. R., & Kumar, P. S. (2013). Design and analysis of copper honeycomb sandwich structure. *International Journal of Engineering and Advanced Technology ISSN, 2249-8958.*

Heimbs, S., Middendorf, P., Kilchert, S., Johnson, A. F., & Maier, M. (2007). Experimental and numerical analysis of composite folded sandwich core structures under compression. *Applied Composite Materials, 14, 363-377.*

Höhne, C. C., Blaess, P., Ilinzeer, S., & Griesbaum, P. 2023. New approach for electric vehicle composite battery housings: Electromagnetic shielding and flame retardancy of PUR/UP-based sheet moulding compound. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 167, 107404*.

Karaca, A., (2023). Batarya taşıyıcı yan duvarının alüminyum ve kompozitten oluşan hibrit malzeme ile üretimi çarpışma performansı açısından optimizasyonu (Doktora tezi, Bursa Teknik Üniversitesi).

Kayran, A., & Aydincak, I. (2009). Assessment of effective elastic properties of honeycomb cores by finite element analysis of sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures and materials.*

Kıyak, B., & Kaman, M. O. (2019). Hücre boşlukları köpük ile doldurulmuş kompozit sandviç levhaların basma ve eğilme dayanımlarının incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31(1), 47-52.*

Li, R., Zhao, Z., Bao, H., Pan, Y., Wang, G., Liu, B., Liao, T., Li, J. 2024. Bio-inspired honeycomb structures to improve the crashworthiness of a battery-pack system. *Engineering Failure Analysis, 158, 108041*.

Li, L., He, Q., Jing, X., Jiang, Y., & Yan, D. (2023). Study on three-point bending behavior of sandwich beams with novel auxetic honeycomb core. *Materials Today Communications, 35, 106259.*

Li, W., Atsushi, D., Oh, Y. H., Jirathearanat, S., Wu, Z. A., & Chua, B. W. (2022). Influences of skin thickness, core topology, depth and direction on flexural

deformation and ductile failure of Al honeycomb-based sandwich structures. *Composites Part B: Engineering, 239, 109957.*

Meirovitch, L. 2001. Fundementals of vibrations. Virginia Polytechnic Insitute and State University, USA, 826 pp.

Mallick, P. K. (2007). Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. CRC Press.

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*.

Özer, H. (2021). Kendi kendine iyileşebilen sandviç yapıların balistik hasar davranışı ve iyileşme performansı (Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi).

Paik, J.K., Thayamballi, A.K., Kim, G.S. 1999. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures, 35(3):205-231.*

Pflug, J., Xinyu, F., Lavalaye, J., Verpoest, I., Bratfisch, P., & Vandepitte, D. (2002). Continuously produced honeycomb sandwich materials for automotive applications. *SAE Technical Paper (No. 2002-01-1272).*

Pritchard, J. (2016). The Use of Composite Materials in Aviation. *Journal of Aerospace Technology and Management, 8(2), 141-148.*

Ren, J., Iwakawa, Y., & He, J. M. (2013). An Evaluation on Impact Performance of Light-Weight Composite Honeycomb Sandwich Panels. *Applied Mechanics and Materials, 423, 78-83.*

SAE, S. (2009). J2464: Electric and hybrid electric vehicle rechargeable energy storage system safety and abuse testing.

Sahu, S. K., Badgayan, N. D., & Sreekanth, P. R. (2020). Numerical investigation on the effect of wall thickness on quasistatic crushing properties of nylon honeycomb structure. *Materials Today: Proceedings, 27, 798-804.*

Schmerler, R., Gebken, T., Kalka, S., & Reincke, T. (2017). Multi-functional battery housing for electric vehicles. *Lightweight Design Worldwide, 10, 26-31*.

Scurtu, L., Szabo, I., Mariasiu, F., Moldovanu, D., Mihali, L., & Jurco, A. 2019. Numerical analysis of the influence of mechanical stress on the battery pack's housing of an electric vehicle. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 568, No. 1, p. 012054). IOP Publishing*.

Shui, L., Chen, F., Garg, A., Peng, X., Bao, N., & Zhang, J. 2018. Design optimization of battery pack enclosure for electric vehicle. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 58, 331-347*.

Singh, P., Sheikh, J., & Behera, B. K. (2023). Metal-faced Sandwich composite panels: A Review. *Thin-Walled Structures, 111376.*

Sun, G., Huo, X., Wang, H., Hazell, P. J., & Li, Q. (2021). On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact. *Composites Part B: Engineering, 216,* 108881.

Solmaz, M.Y., Kaman, M.O., Turan, K., Turgut, A. (2010). Petek yapılı kompozit levhaların eğilme davranışlarının incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(1):1-11*.

Toradmal, K. P., Waghmare, P. M., & Sollapur, S. B. (2017). Three-point bending analysis of honeycomb sandwich panels: experimental approach. *International Journal of Engineering and Techniques, 3(5).*

Tortoç, A. (2009). Balsa/PVC sandviç yapılarda kırılma tokluğu etkisinin nümerik çalışması. [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi].

Trelease, E. T. (2018). Poliüretan köpük ile doldurulmuş bal peteği sandviç plakların titreşim analizi (Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi).

Wang, Z., Qin, Q., Chen, S., Yu, X., Li, H., & Wang, T. J. (2017). Compressive crushing of novel aluminum hexagonal honeycombs with perforations: experimental and numerical investigations. *International Journal of Solids and Structures, 126, 187-195.*

Wang, Z., Li, Z., & Xiong, W. (2019). Numerical study on three-point bending behavior of honeycomb sandwich with ceramic tile. *Composites Part B: Engineering, 167, 63-70.*

Wei, X., Li, D., & Xiong, J. (2019). Fabrication and mechanical behaviors of an all-composite sandwich structure with a hexagon honeycomb core based on the tailor-folding approach. *Composites Science and Technology, 184, 107878.*

Xia, F., Durandet, Y., Tan, P. J., & Ruan, D. (2022). Three-point bending performance of sandwich panels with various types of cores. *Thin-Walled Structures, 179, 109723.*

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.*

Yang, N., Fang, R., Li, H., & Xie, H. 2019. Dynamic and static analysis of the battery box structure of an electric vehicle. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 688, No. 3, p. 033082). IOP Publishing.*

Yardımcı, O. (2019). Development of an equivalent model of aluminum honeycomb sandwich structures subjected to transverse loads. [Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi].

Yu, Q., Nie, Y., Peng, S., Miao, Y., Zhai, C., Zhang, R., Han, J., Zhao, S., Pecht, M. 2023. Evaluation of the safety standards system of power batteries for electric vehicles in China. *Applied Energy, 349, 121674.*

Zhang, Y., Liu, Q., He, Z., Zong, Z., & Fang, J. (2019). Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with Expanded Polypropylene foam. *Composites Part B: Engineering, 156, 17-27.*

Zhao, X., Zhang, B., & Zhang, S. (2017). Lightweight design of battery box for electric vehicle. *In Proceedings of the 21st International Conference on Composite Materials, Aug (Vol. 20).*

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Özgür ERDOĞAN
Doğum Yeri ve Tarihi	: İstanbul – 30.11.1990
Yabancı Dil	: İngilizce

Eğitim Durumu

Lise	: Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi, 2009
Lisans	: Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 2013
Yüksek Lisans	: Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 2017

Çalıştığı Kurum/Kurumlar	: Valeo Otomotiv San. ve Tic. A.Ş (2014 – 2021) Bosch San. ve Tic. A.Ş (2021 – Günümüz)
İletişim (e-posta)	: ozgur341@gmail.com
Yayınları	:

Erdogan, O., Sevinc, S., & Ertan, R. 2024. Formability Capabilities And Mechanical Properties Of Titanium Tailor-Welded Blanks. *Materials and Technology*, 58(3), 421-427.

Erdoğan, Ö. 2021. Topology optimization of clutch drive plate for commercial vehicles. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, *10*(1), 20-25.

Patentler :

Başvuru No	**Buluş Başlığı**
TPE 2022/007660	Bir debriyaj muhafazası
TPE 2021/011247	Sürtünmeli kavramalar için kapak tertibatı
TPE 2021/016839	Aşınmaya dayanıklı kavrama kapağı
TPE 2021/017217	Sönümleme elemanına sahip bir kavrama kapağı
TPE 2021/020733	Kavramalar için bir sökülebilir sabitleme parçası
TPE 2017/09572	Levye yapılanmasına sahip traktör debriyajı