SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT MALZEME ESASLI ÇOK HAFİF SANDVİÇ PLAKLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNTEMİ VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Aslıhan HAYIRKUŞ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT MALZEME ESASLI ÇOK HAFİF SANDVİÇ PLAKLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNTEMİ VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Aslıhan HAYIRKUŞ
0000-0003-2818-3198

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT MALZEME ESASLI ÇOK HAFİF SANDVİÇ PLAKLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNTEMİ VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Aslıhan HAYIRKUŞ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Otomotiv endüstrisi ve havacılık sanayisinde ağırlık azaltma çalışmalarının hız kazanması ile üretimde hafif sandviç yapıların kullanımı artmaktadır. Bu gibi yapıların kullanılabilmesi için ağırlık azaltılırken mukavemet değerlerinin düşmemesi ve işlenebilirlik, geri dönüşüm, maliyet gibi parametrelerin de istenilen özelliklerde olması gerekmektedir. Sürekli elyaf takviyeli termoplastik malzemeler ise özgül mukavemet özelliklerinin yüksek olması ve geri dönüştürülebilir özellikleri sebebiyle hafif malzemeler arasında en çok tercih edilen polimer malzemelerdendir. Bu çalışmada sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzeme kullanılarak sandviç üretimi yapılmıştır. Farklı çekirdek geometrilerine sahip kompozit sandviç yapıların üç nokta eğilme ve bası testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda sandviç yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonlu elemanlar analiz yönteminde kullanılması amacıyla sandviç üretiminde kullanılan yapıştırıcı malzemenin mekanik özellikleri bulunmuştur. Son olarak sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak farklı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların dayanım karşılaştırılması yapılarak uygulanan testler doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok hafif sandviç plak, çekirdek geometri, termoplastik kompozit plaka, yapıştırıcı test karakterizasyonu, sonlu elemanlar analizi

2021, xiii + 69 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

FINITE ELEMENT ANALYSIS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CONTINUOUS FILAMENT THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIAL BASED ULTRA- LIGHTWEIGHT SANDWICH PLATES

Aslıhan HAYIRKUŞ

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

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

With the acceleration of weight reduction efforts in the automotive industry and aviation industry, the use of lightweight sandwich structures in production is increasing day by day. In order for such structures to be used, the strength values should not decrease while the weight is reduced, and the parameters such as workability, recycling and cost should be in the desired properties.Continuous fiber reinforced thermoplastic materials are among the most preferred polymer materials among lightweight materials due to their high specific strength properties and their recyclable properties. In this study, sandwich production was made using continuous fiber reinforced thermoplastic composite material. Three-point bending and compression tests of composite sandwich structures with different core geometries were performed. As a result of the tests, the mechanical properties of the sandwich structures were examined. In order to be used in the finite element analysis method, the mechanical properties of the adhesive material used in the sandwich production were found. Finally, the tests applied were verified by comparing the strength of sandwich structures with different core geometries using the finite element analysis method.

Key words: Ultra- lightweight sandwich plate, core geometry, thermoplastic composite plate, adhesive test characterization, finite elements analysis

2021, xiii + 69 pages.

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca benden desteğini esirgemeyen ve her türlü zorluğu paylaşarak aştığımız aileme, tez çalışmam kapsamında üretim ve testleri birlikte yaptığımız proje ekip arkadaşlarım Oğuzhan TAŞ ve Serhan OSMANOĞLU' na, gereksinim duyduğumuz zamanlarda yardımlarını esirgemeyen Uygulamalı Mekanik ve İleri Malzemeler Araştırma Grubu üyesi hocalarım ve arkadaşlarıma, lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince bilgi, birikim ve tecrübelerini bizlere aktararak her alanda gelişmemizi sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Murat YAZICI' ya teşekkürlerimi sunarım.
TÜBİTAK-ARDEB 1001 programı destekli 218M468 numaralı ve " Kendi Kendine Makro Seviyede İyileşebilir Özellikli Yeni Hibrit Sandviç Panel Geliştirilmesi ve Statik, Anlık Dinamik ve Şok Yükleri Altında İyileşme Performansının İncelenmesi" başlıklı proje kapsamında tez konumu oluşturan kompozit sandviç yapı üretimi ve testleri için sağlanan desteklerden dolayı TÜBİTAK-ARDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

Aslıhan HAYIRKUŞ

06/08/20211

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v
ABSTRACT vi
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR vii
İÇİNDEKİLER viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 2
2.1. Sandviç Panel 2
2.1.1. Sandviç malzeme mekaniği 3
2.1.2. Sandviç yapılara uygulanan test yöntemleri ve standartları 12
2.1.3. Testler sonucunda sandviç panellerde karşılaşılabilen hasarlar 17
2.2. Kompozit Malzemeler 18
2.2.1. Kompozit malzemelerin temel bileşenleri 18
2.2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması 20
2.2.3. Termoplastik kompozit malzemeler 24
2.2.4. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler 27
2.3. Yapıştırıcı Karakterizasyonu 28
2.3.1. Yapıştırıcı malzeme mekanik testi (bulk testi) 29
2.3.2. Tek nokta bindirme testi (SLJ testi) 29
2.3.3. Çift taraflı ayırma testi (DCB testi) 31
2.3.4. Uç çentikli bükülme testi (ENF testi) 32
3. MATERYAL VE YÖNTEM 35
3.1. Yapıştırıcı Karakteristik Özelliklerinin (Cohesive Zone Parametrelerinin) Bulunması 35
3.1.1. Kalıp hazırlama ve üretimi 35
3.1.2. Katmanlı malzeme oluşturma 36
3.1.3. Deney numunelerinin hazırlanması 39
3.1.4. Cohesive zone testleri 40
3.2. Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kullanılarak Sandviç Malzeme Üretilmesi Ve Deneysel Olarak İncelenmesi 44
3. 3. Belirlenen Çekirdek Geometrilerinin Sonlu Elemanlar Analizleri 48
4. BULGULAR 52
4.1. Cohesive Zone Testleri Sonuçları 52
4.1.1. SLJ testi sonuçları 52
4.1.2. DCB testi sonuçları 54
4.1.3. ENF testi sonuçları 56
4.2. Üç Nokta Eğilme Testi Ve Sonuçları 58
4.3. Bası Testi Ve Sonuçları 61
4.4. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları 63
4.4.1. Üç nokta eğilme analizi sonuçları 63
4.4.2. Bası analizi sonuçları 65

5. TARTIŞMA VE SONUÇ 67
KAYNAKLAR 68
ÖZGEÇMİŞ 70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
A	Kesit Alan
d	Çap
E	Elastisite Modülü
F	Kuvvet
G	Kayma Modülü
I	Atalet Momenti
P	Basınç
t	Kalınlık
V	Hacim
δ	Şekil Değiştirme
ε	Birim Şekil Değiştirme
ρ	Yoğunluk
σ	Normal Gerilme
τ	Kayma Gerilmesi
υ	Poisson Oranı

Kısaltmalar	**Açıklama**
SLJ	Single Lap Joint (Tek Nokta Bindirme)
DCB	Double Cantilever Beam (Çift Taraflı Ayırma)
ENF	End-Notched Flexure (Uç Çentikli Bükülme)
EN- ISO	Europeane Norm- International Organization for Standardization (Avrupa Standartları- Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Tipik bir sandviç yapı gösterimi 2
Şekil 2. 2. Çekirdek yapıların sınıflandırılması 3
Şekil 2. 3. Sandviç konfigürasyonu 3
Şekil 2. 4. Kat numaralandırma sistemi 4
Şekil 2. 5. Çekirdek kalınlığının bir fonksiyonu olarak sandviç bükülme sertliğinin değişimi 5
Şekil 2. 6. Kesme yükü altında sandviç panel 7
Şekil 2. 7. Bir sandviç yapının kesit görünümü 8
Şekil 2. 8. Yüzey plakalarındaki iç kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı 8
Şekil 2. 9. Değişken eğilme momenti altında bir sandviç kirişin elemanı 9
Şekil 2. 10. Çekirdek kayma gerilmesi hesaplarında dikkate alınan sandviç elemanlar 10
Şekil 2. 11. Sandviç yapı eğilme testi 12
Şekil 2. 12. Düz bası testi 13
Şekil 2. 13. Enlemesine bası testi 14
Şekil 2. 14. Çekme testi 15
Şekil 2. 15. Yapışma testi (soyma uygulaması) 16
Şekil 2. 16. Sandviç panellerde karşılaşılan hasar tipleri 17
Şekil 2. 17. Değişik skalalarda arayüzler 20
Şekil 2. 18. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması 21
Şekil 2. 19. EN ISO 527-2 standardına göre hazırlanan bulk testi numunesi 29
Şekil 2. 20. ASTM D1002 standardına göre hazırlanan SLJ numunesi boyutları 30
Şekil 2. 21. Yapıştırıcı hasar incelenmesi (Banea and Da Silva 2008) 30
Şekil 2. 22. ASTM D5528 standardına göre hazırlanan DCB numunesi boyutları 32
Şekil 2. 23. ASTM D7905 standardına göre hazırlanan ENF numunesi boyutları 33

Şekil 3. 1. Kalıp tasarımı 35
Şekil 3. 2. Üretilmiş kalıp parçaları 36
Şekil 3. 3. Kesilen kompozit malzemeler 36
Şekil 3. 4. Aseton ile yıkanarak kurumaya bırakılan malzemeler 37
Şekil 3. 5. Fırın içerisine yerleştirilmiş kalıp 37
Şekil 3. 6. Optimum değerlerde üretilen numune 38
Şekil 3. 7. Numunenin mikroskop görüntüsü 39
Şekil 3. 8. Hazırlanan SLJ numunesi 39
Şekil 3. 9. Hazırlanan DCB ve ENF numuneleri 39
Şekil 3. 10. Test için çenelere bağlanan numune 40
Şekil 3. 11. Test yapılan çekme cihazı 41
Şekil 3. 12. Teste hazır olan numuneler 41
Şekil 3. 13. DCB testi 42
Şekil 3. 14. DCB testi kamera çekimleri 42
Şekil 3. 15. ENF testi 43
Şekil 3. 16. ENF test cihazı ve ekipmanlar 43
Şekil 3. 17. Kullanılan malzemelerin özellikleri 44

Şekil 3. 18. Çekirdek yapı üretim metodu 45
Şekil 3. 19. Kompozit sandviç malzeme üretim metodu 45
Şekil 3. 20. Hazırlanan çekirdek yapı ve alt-üst yüzeyler 46
Şekil 3. 21. Üretilen sandviç numunesi 46
Şekil 3. 22. Üretilen üç nokta eğilme ve bası testi numuneleri 47
Şekil 3. 23. Testler için hazırlanan numunelerin çekirdek geometrileri 48
Şekil 3. 24. Üç nokta eğilme testi numunesi 49
Şekil 3. 25. Bası testi numunesi 49
Şekil 3. 26. Çekirdek geometrileri için ağ yapısı sonucu oluşan eleman sayıları 51

Şekil 4. 1. SLJ testi sonrası numuneler 52
Şekil 4. 2. SLJ testi sonucu oluşan kuvvet - deplasman grafiği 53
Şekil 4. 3. DCB testi sonrası numunede oluşan hasar 54
Şekil 4. 4. DCB testi sonrası oluşan kuvvet - deplasman grafiği 54
Şekil 4. 5. DCB testi sırasında video yardımıyla elde edilen hasar ilerleme görüntüleri 55
Şekil 4. 6. ENF testi sırasında video yardımıyla elde edilen hasar ilerleme görüntüleri 56
Şekil 4. 7. ENF testi sonrası oluşan kuvvet - deplasman grafiği 57
Şekil 4. 8. Üç nokta eğilme testi uygulaması 58
Şekil 4. 9. Numunede oluşan dalgalanma hasarı 58
Şekil 4. 10. Numunede oluşan kırılma hasarı 59
Şekil 4. 11. Çekirdek yapılarının üç nokta eğilme testi sonucu oluşan kuvvet - deplasman grafiği 59
Şekil 4. 12. Çekirdek yapılarının üç nokta eğilme testi sonucu karşılaştırılması 60
Şekil 4. 13. Üç çekirdek geometrisi için bası testi numuneleri 61
Şekil 4. 14. Çekirdek yapılarının bası testi sonucu oluşan kuvvet - deplasman grafiği . 62
Şekil 4. 15. Çekirdek yapılarının bası testi sonucu karşılaştırılması 62
Şekil 4. 16. Üçgen çekirdek geometrisine sahip numunenin üç nokta eğilme analizi sonucu 63
Şekil 4. 17. Kare çekirdek geometrisine sahip numunenin üç nokta eğilme analizi sonucu 63
Şekil 4. 18. Altıgen çekirdek geometrisine sahip numunenin üç nokta eğilme analizi sonucu 64
Şekil 4. 19. Üçgen çekirdek geometrisine sahip numunenin bası testi analiz sonucu 65
Şekil 4. 20. Kare çekirdek geometrisine sahip numunenin bası testi analiz sonucu 65
Şekil 4. 21. Altıgen çekirdek geometrisine sahip numunenin bası testi analiz sonucu... 66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. Termoset ve termoplastik malzemelerin genel özelliklerinin karşılaştırılması 22
Çizelge 2. 2. Bazı elyaf malzemelerin mekanik özellikleri 24
Çizelge 2. 3. Genel amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri 26
Çizelge 2. 4. Mühendislik amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri 26
Çizelge 2. 5. Elyaf yönelimlerinin gösterilmesi 27

Çizelge 3. 1. Katman oluşturma işlemi sırasında karşılaşılan problemler 38
Çizelge 3. 2. Çekirdek yapılarına göre numune ağırlık ortalama değerleri 47
Çizelge 3. 3. Kompozit malzeme özellikleri 50

Çizelge 4. 1. Test sonucu hesaplanan kayma gerilmeleri 53
Çizelge 4. 2. Test sonucu hesaplanan mod I kırılma enerjileri 55
Çizelge 4. 3. Test sonucunda hesaplanan mod II kırılma enerjileri 57
Çizelge 4. 4. Üç nokta eğilme testi analiz sonuçlarının çekirdek geometrileri için karşılaştırılması 64
Çizelge 4. 5. Bası testi analiz sonuçlarının çekirdek geometrileri için karşılaştırılması 66

Çizelge 5. 1. Çekirdek yapılarının karşılaştırılması 67

1. GİRİŞ

Günümüzde birçok alanda hafif yapılara yönelik çalışmalar artmaktadır. Yeni yapılan bu çalışmalarda düşük ağırlığın yanında düşük maliyet ve yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olan malzemeler kullanılmaktadır. Termoplastik matrisli kompozit malzemeler bu talepleri karşılayabilecek formdadır. Ayrıca termoset kompozitlerle karşılaştırıldıklarında benzer mekanik özellikler gösterseler de geri dönüşüme elverişli olmalarıyla endüstriyel kullanımlarda daha cazip hale gelmektedirler.

Sürekli elyaflar, kompozit malzeme içerisinde yükün birçoğunu taşıyan, mukavemet ve sertlik özellikleri yüksek uzun liflerdir. Matris içerisinde kopma olmaksızın yerleştirilmesinden dolayı sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin elyaf yönüne dik olarak gelen kuvvetlere karşı dayanımları oldukça yüksektir.

Tüm bu özellikler göz önüne alındığında termoplastik matrisli sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler, sahip oldukları yüksek spesifik rijitlik ve düşük ağırlık avantajlarından dolayı havacılık, makine ve otomotiv endüstrisinde sıklıkla tercih edilen malzemeler arasına girmeyi başarmıştır.

Sandviç yapılar ise günümüzde çok farklı uygulamalarda karşımıza çıkan malzeme türüdür. Bunun sebebi özgül bükülme sertliği, enerji emme kapasitesi ve ısı yalıtımı gibi özelliklerinin yüksek olmasıdır. Ancak tüm alanlarda olduğu gibi sandviç malzemelerde de hafif yapılara doğru eğilim gittikçe artmaktadır.

Bu tez çalışmasında sürekli elyaf takviyeli termoplastik matrisli kompozit malzemeler kullanılarak hafif sandviç yapı üretimine çalışılmıştır. Çalışmanın amacı, kompozit ve sandviç entegrasyonunu sağlayarak hafiflik parametresiyle birlikte rijitliği ve yük taşıma kapasitesi yüksek ve enerji sönümleme kabiliyetine de sahip bir malzeme üretimi yapmaktır.

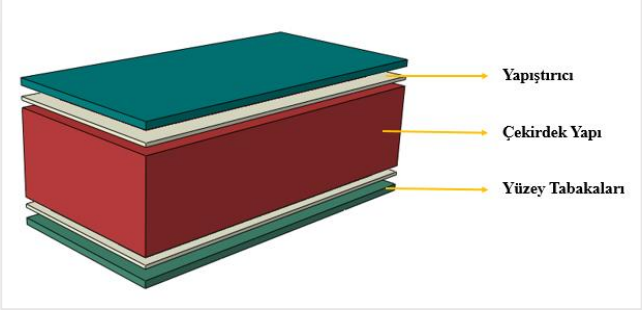
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Sandviç Panel

Sandviç yapılar, yüksek mukavemete sahip yüzey tabakaları (kaplamalar) ile hafif çekirdek yapısının birleştirme elemanı (yapıştırıcı) kullanılarak oluşturulduğu kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemeler sınıfında yer alıyor olmasının asıl nedeni farklı tür malzemelerin bir araya getirilerek istenilen özelliklerde yeni bir malzeme üretiliyor olmasıdır.

Tipik bir sandviç yapı üç elemandan oluşmaktadır (Şekil 2.1):

- Yüzey tabakaları,
- Çekirdek,
- Çekirdek ile yüzey tabakası arasındaki bağ (yapıştırıcı).

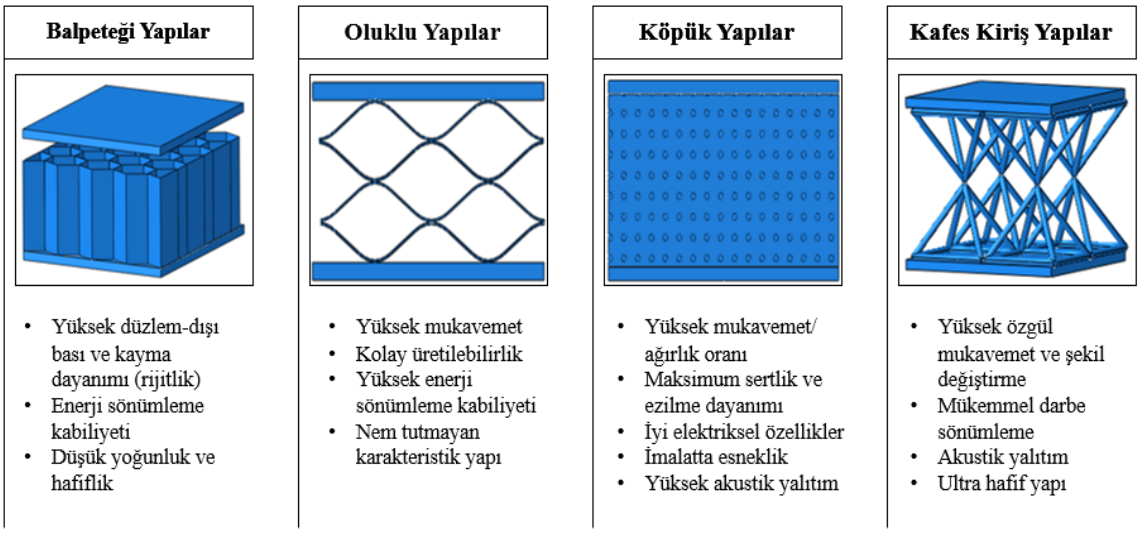


Şekil 2. 1. Tipik bir sandviç yapı gösterimi

Genel olarak üç katmandan oluşan sandviç yapıların çekirdek kısımları, sandviç malzemenin rijitliğini, yalıtım özelliğini, panel kalınlığını ve diğer mekanik özelliklerini sağlaması amacıyla tasarlanırken, dış yüzeyler farklı geometrik özellikler, renk ve dokularda üretilebilmektedir.

Çekirdek yapının temel amacı, tüm sandviç yapının bükülme sertliğini çok az ağırlık kazancıyla arttırmaktır.

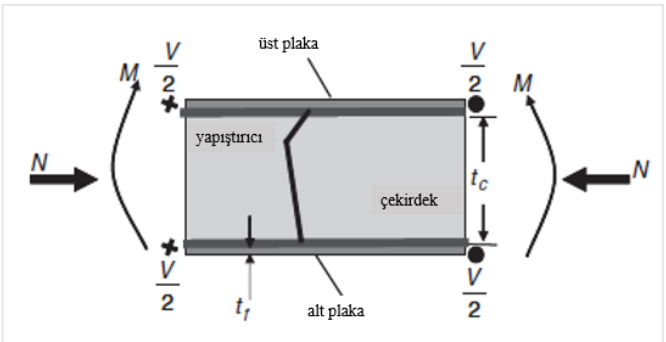
Sandviç yapılar çekirdek malzeme ve geometrisine göre 4 temel sınıfa ayrılabilir. Şekil 2.2'de bu çekirdek yapıların özellikleri verilmiştir.



Şekil 2. 2. Çekirdek yapıların sınıflandırılması

2.1.1. Sandviç malzeme mekaniği

Sandviç malzemelerde üç temel yapısından biri olan çekirdek malzemesinin çoğu, anizotropiktir. Farklı yönlerde farklı sertlik ve mukavemetleri vardır. Çekirdeğin amacı, malzemeyi kesitin nötr ekseninden uzaklaştırarak sandviçin bükülme sertliğini arttırmaktır. Çekirdeğin sertliği (ve mukavemeti), genelde yüzey tabakalarınınkinden çok daha düşüktür.



Şekil 2. 3. Sandviç konfigürasyonu (Kassapoglou 2013)

Burada eksenel yük N ve kesme yükü V, iki yüzey tabakası arasında eşit olarak bölünür. Sonuç olarak, Şekil 2.3'de gösterildiği gibi genel yükleme durumları için, birim genişlik başına uygulanan eğilme momenti M için eksenel kuvvet şu şekilde hesaplanır:

$$N_m = \frac{M}{t_c + t_f} \tag{2.1}$$

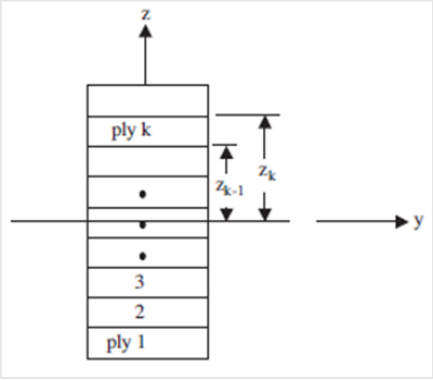
Sandviç Eğilme Sertlikleri

Bir sandviç, çekirdeğin ihmal edilebilir sertlik ve mukavemet özelliklerine ve çekirdek kalınlığına eşit kalınlığa sahip başka bir kat olduğu bir laminat olarak kabul edilebilir. A_{ij} uzama-kesme, B_{ij} uzama-bükülme ve D_{ij} eğilme-burulma olmak üzere rijitlikleri temsil eden matrisleri belirlemek için standart klasik katmanlı levha teorisi kullanılabilir. Bu teoriye göre A,B ve D rijitlikleri şu şekilde yazılmaktadır:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} Q_{ij} \left(z_k - z_{k-1}\right) \tag{2.2}$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^{n} \frac{Q_{ij}}{2} \left(z_k{}^2 - z_{k-1}{}^2\right) \tag{2.3}$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^{n} \frac{Q_{ij}}{3} \left(z_k{}^3 - z_{k-1}{}^3\right) \tag{2.4}$$



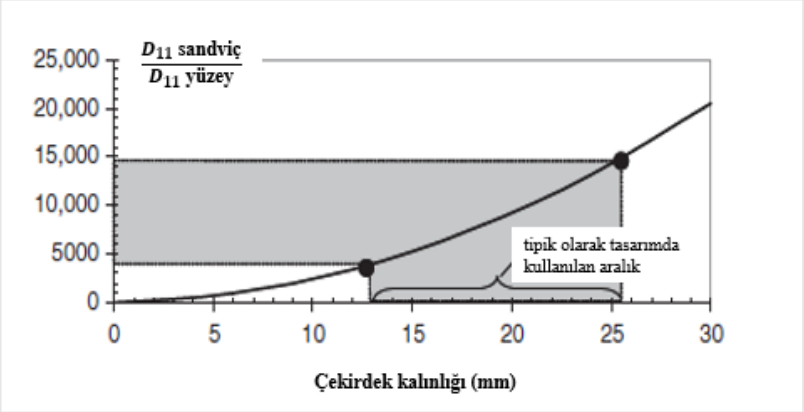
Şekil 2. 4. Kat numaralandırma sistemi (Kassapoglou 2013)

Burada i,j = 1,2,6, toplam laminatın tüm n katlarıdır. z_k ve z_{k-1} ise Şekil 2.4'de gösterildiği gibi katın üst ve alt z koordinatlarıdır.

Katmanlı levha teorisi için yazılan bu denklemlerde çekirdeğin varlığı A matrisini değiştirmez. Ancak B (toplam yerleşim asimetrik ise) ve laminat bükülme sertliğini ifade eden D matrislerini önemli ölçüde etkiler. Aynı yüzey plakalarına sahip bir sandviç malzeme için D matrisi Denklem 2.5' deki gibi yazılmaktadır:

$$D_{ij} = 2(D_{ij})_f + 2\left(A_{ij}\right)_f \left(\frac{t_c+t_f}{2}\right)^2 \tag{2.5}$$

Denklem 2.5 kullanılarak, tüm sandviç için D11'in her bir yüzey tabakası için D11'e bölümü, değişen çekirdek kalınlığının bir fonksiyonu olarak belirlenebilir. Sandviç bükülme sertliğinin çekirdek kalınlığının bir fonksiyonu olarak değişimini gösteren grafik Şekil 2.5' te verilmektedir.



Şekil 2. 5. Çekirdek kalınlığının bir fonksiyonu olarak sandviç bükülme sertliğinin değişimi (Kassapoglou 2013)

Şekil 2.5'ten çok küçük çekirdek kalınlıklarının (5 mm) bile bükülme sertliğinde 1000 kat artışa neden olduğu görülebilir. Çekirdek ve yapıştırıcının varlığı nedeniyle ağırlıkta nispeten küçük bir artışta bu tür bir iyileştirme olması sandviç yapıyı yüksek burkulma yüklerinin önemli olduğu birçok uygulama için ideal hale getirmektedir (Kassapoglou 2013).

Sandviç Yapının Burkulması

Burkulma, özellikle büyük sandviç paneller için kritik arıza modlarından biridir. Ancak buradaki önemli nokta sandviç yapının burkulma yükünü belirleme prosedürüdür.

Çekirdeğin varlığı, enine kesmenin etkilerini çok önemli kılmaktadır. Bunlar uygun şekilde hesaba katılmazlarsa, tahmin edilen burkulma yükü çok korunumsuz olacaktır (enine kesme etkilerinin hesaba katıldığı durumdan daha yüksektir).

Sıkıştırma altındaki sandviç yapılar, geniş bir kiriş olarak kabul edilir ve burkulma yükü şu şekilde verilir:

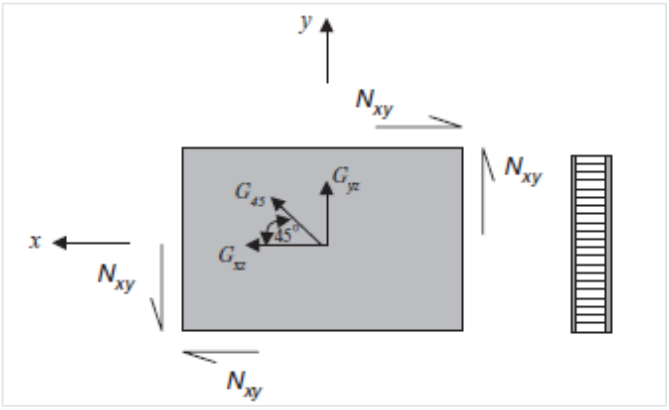
$$N_{xcrit} = \frac{N_{Ecrit}}{1+\frac{kN_{Ecrit}}{t_c G_c}} \tag{2.6}$$

Burada, t_c çekirdek kalınlığı ve G_c enine kayma rijitliğidir. N_{Ecrit} ise enine kesme etkileri ihmal edilirse sandviçin burkulma yükü N_0'dır. Basit mesnetli kenarlar için Denklem (2.7) ile verilmiştir:

$$N_{Ecrit} = \frac{\pi^2}{a^2}\left[D_{11}m^2 + 2(D_{12}+2D_{66})(AR)^2 + D_{22}\frac{(AR)^4}{m^2}\right] \tag{2.7}$$

Sandviç yapılar sıkıştırma altında olduğu gibi kesme altında da burkulmaya maruz kalabilmektedir. Basit mesnetli bir sandviçin kesme altında burkulmasını öngören denklemin formu, Denklem (2.6) ile aynıdır:

$$N_{ycrit} = \frac{N_{xyc}}{1+\frac{N_{xyc}}{t_c G_{45}}} \tag{2.8}$$



Şekil 2. 6. Kesme yükü altında sandviç panel (Kassapoglou 2013)

Burada N_{xyc}, enine kesme etkileri olmayan kesme burkulma yüküdür. G_{45} ise Şekil 2.6'da gösterildiği gibi 45° yönündeki çekirdek kesme modülüdür.

Birincil yük yönü ile hizalı olduğu için kesme modülü G_{45} kullanılır. Saf kesme yüklemesi, bir yönde çekme ve diğer yönde sıkıştırma ile çift eksenli yüklemeye eşdeğer olduğundan bükülmüş yarım dalgaların oluşma eğilimi Şekil 2.6'daki 45° çizgisi (maksimum sıkıştırma yönü) boyuncadır. Bu yöndeki çekirdek kesme sertliği olan G_{45}, bu eğilime karşıdır.

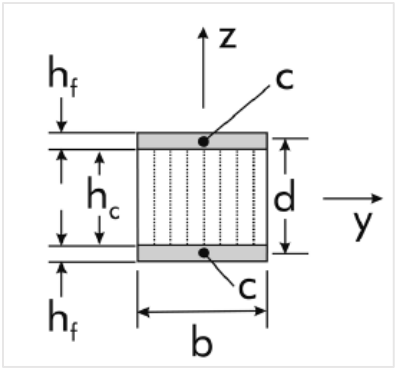
G_{45} standart tensör dönüşüm denklemlerini belirlemek için Denklem 2.9'deki gibi kullanılır:

$$G_{45} = sin^2 45 G_{yz} + cos^2 45 G_{xz} = \frac{G_{yz}+G_{xz}}{2} \tag{2.9}$$

Bunun sonucunda Denklem 2.8, Denklem 2.10'deki gibi yeniden yazılır (Kassapoglou 2013):

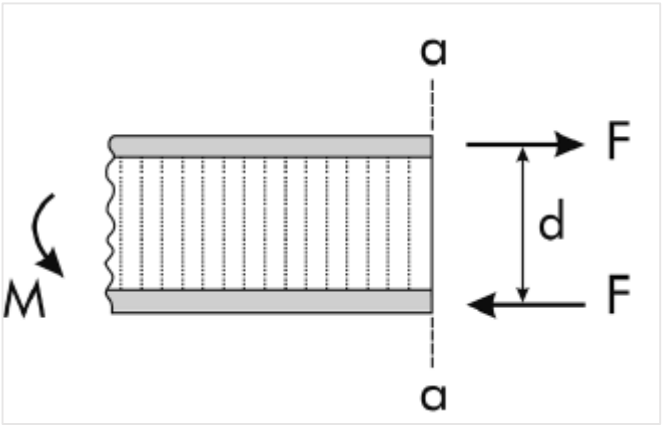
$$N_{xycrit} = \frac{(G_{xz}+G_{yz})t_c}{\frac{(G_{xz}+G_{yz})t_c}{N_{xyc}}+2} \tag{2.10}$$

Yüzey Plakaları ve Çekirdekteki Gerilmeler



Şekil 2. 7. Bir sandviç yapının kesit görünümü (Carlsson and Kardomateas 2011)

Saf bükülme yükleri altında bir sandviç malzeme ele alındığında çoğu çekirdek malzeme bükülme sertliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaz. Böyle bir durumda Şekil 2.8'deki serbest cisim diyagramında gösterildiği gibi yüzey plakaları çekirdeğe göre ince ise, eğilme momenti M'nin, yüz tabakalarının merkezlerine etki eden eşit büyüklükteki iç gerilim ve sıkıştırma kuvvetleri tarafından dengelendiği kabul edilir.



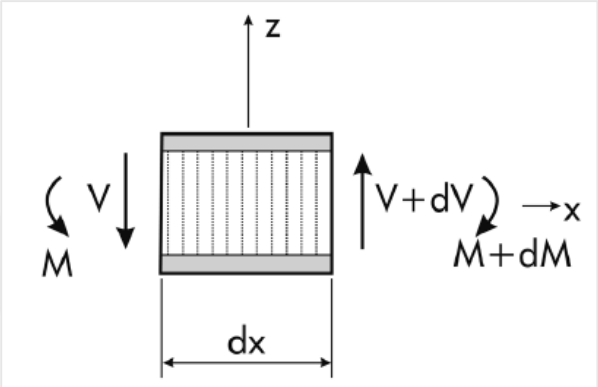
Şekil 2. 8. Yüzey plakalarındaki iç kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı (Carlsson and Kardomateas 2011)

Çekirdekteki eğilme gerilmeleri ihmal edilirse, Şekil 2.8'deki elemanın dengesi, yüzey plakalarındaki ortalama bir eğilme gerilmesini verir.

$$\sigma = \frac{M}{bdh_f} \tag{2.11}$$

$$d = h_c + h_f \tag{2.12}$$

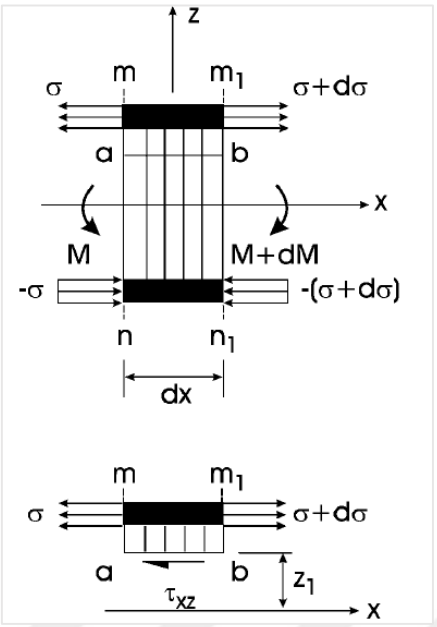
burada d yüzey plakalarının ağırlık merkezleri arasındaki mesafe, h_c ve h_f sırasıyla çekirdek ve yüzey plaka kalınlıklarıdır ve b ise elemanın genişliğidir (Şekil 2.7).



Şekil 2. 9. Değişken eğilme momenti altında bir sandviç kirişin elemanı (Carlsson and Kardomateas 2011)

Bir sandviç kiriş, kirişin uzunluğu boyunca değişen bir eğilme momenti ile yüklenirse (Şekil 2.9), denge analizi, kiriş eksenine çapraz olarak etki eden bir kesme kuvvetinin olacağını gösterir. Bu kesme kuvveti V, Denklem 2.13'de verilmiştir.

$$V = \frac{dM}{dx} \tag{2.13}$$



Şekil 2. 10. Çekirdek kayma gerilmesi hesaplarında dikkate alınan sandviç elemanlar (Carlsson and Kardomateas 2011)

Çekirdeğe etki eden kesme gerilimi, τ_{xz}, Şekil 2.10' un alt kısmında gösterilen mm_1ab elemanının denge hesabından elde edilir. Elemanın sol tarafına etki eden σ gerilmesinden kaynaklanan yatay (x ekseni) kuvvet Denklem 2.14'te verilmiştir.

$$F_1 = \sigma b h_f = \frac{M}{d} \tag{2.14}$$

Elemanın sağ tarafına etkiyen yatay kuvvet ve ab kesitinde çekirdek yüzeyine etki eden kesme gerilmesinden kaynaklanan yatay kuvvet sırasıyla Denklem 2.15 ve Denklem 2.16'da verilmiştir.

$$F_2 = \frac{M+dM}{d} \tag{2.15}$$

$$F_3 = \tau_{xz} b dx \tag{2.16}$$

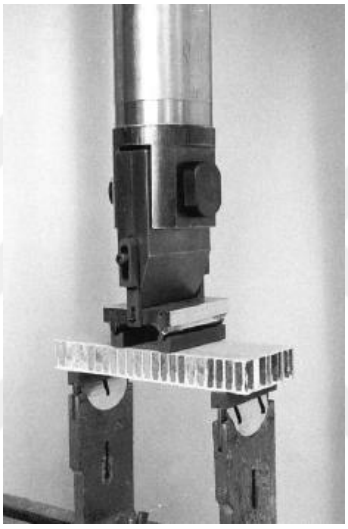
$$\tau_{xz} = \frac{dM}{dx}\frac{1}{bd} = \frac{V}{bd} \tag{2.17}$$

Denklem 2.17, ince yüz/uyumlu çekirdek varsayımlarına dayalı olarak hesaplanan çekirdekteki kayma gerilmesinin üniform (z koordinatından bağımsız) olduğunu gösterir. Kesin analiz, kesme gerilmesinin, yüz/çekirdek arayüzlerinde V/(bd) değerinden dış yüz yüzeylerinde sıfıra neredeyse lineer olarak azaldığını ortaya koymaktadır. Denklem 2.15, kesmede güçlü olan bir çekirdek malzeme seçme ihtiyacını vurgulamaktadır. Ayrıca, düşük modüllü çekirdek malzemesi için çekirdekteki kayma deformasyonu aşırı olabilir ve sandviçin genel deformasyonunu yönetebilir. Bu nedenle, sandviç yapılarda aşırı kayma deformasyonunu önlemek için, yeterince yüksek kesme modülüne sahip bir çekirdek malzeme kullanılmalıdır (Carlsson and Kardomateas 2011).

2.1.2. Sandviç yapılara uygulanan test yöntemleri ve standartları

Eğilme Testi

Bükülmeye maruz kalan düz sandviç yapıların çekirdek kesme özelliklerinin belirlenmesini sağlayan test yöntemidir. ASTM C393 standardı bu test yöntemi için geliştirilmiştir. Şekil 2.11'de eğilme testine maruz kalan bir sandviç malzeme gösterilmektedir.



Şekil 2. 11. Sandviç yapı eğilme testi (ASTM-C393 2006)

Test sonrası sandviç malzemeye uygulanan maksimum kuvvet değeri alınarak nihai çekirdek kayma gerilmesi Denklem 2.18'deki gibi hesaplanır:

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d+c)b} \tag{2.18}$$

F_s^{ult}: nihai çekirdek kayma gerilmesi, MPa [psi]

P_{max}: hasar öncesi max kuvvet, N [lb]

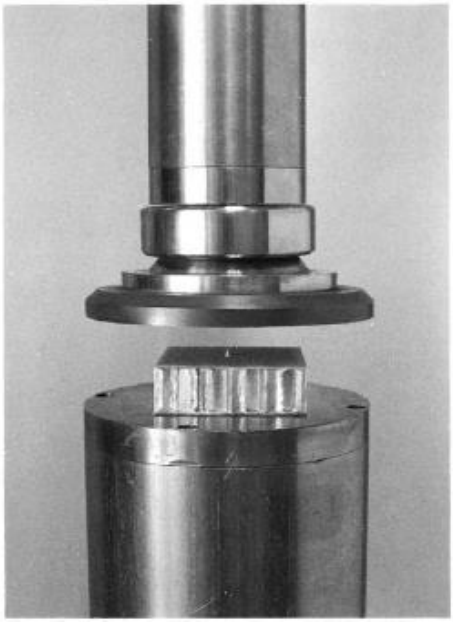
d: sandviç malzeme kalınlığı

c: çekirdek kalınlığı

b: sandviç malzeme genişliği (ASTM-C393 2006)

Bası (Düz Sıkıştırma) Testi

Bu test yöntemi, sandviç malzemelerin basınç dayanımının ve modülünün belirlenmesini sağlamaktadır. ASTM C365 standardı bu test yöntemi için geliştirilmiştir. Bası testi uygulamasına ait bir görsel Şekil 2.12' de verilmiştir.



Şekil 2. 12. Düz bası testi (ASTM-C365 2003)

Düz bası testi sonucunda nihai basınç dayanımı hesaplanması Denklem 2.19' daki gibidir:

$$F_z^{fcu} = \frac{P_{max}}{A} \tag{2.19}$$

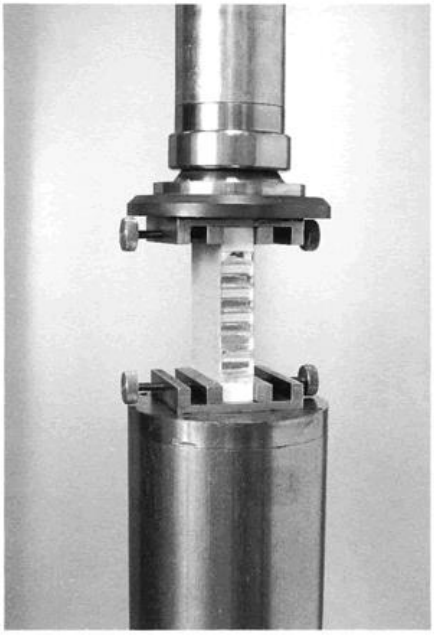
F_z^{fcu}: Nihai düz basınç dayanımı, MPa [psi]

P_{max}: Hasar öncesi nihai kuvvet, N [lbf]

A: Kesit alanı, mm^2 $[in.^2]$ (ASTM-C365 2003)

Enlemesine Sıkıştırma Testi

Bu test yöntemi, sandviç kaplama düzlemine paralel bir doğrultuda yapısal sandviç konstrüksiyonun sıkıştırma özelliklerini kapsamaktadır. ASTM C364 standardı ile test sonrasında sandviç malzemenin enlemesine basınç dayanımı bulunmaktadır. Şekil 2.13'de enlemesine bası testine ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 2. 13. Enlemesine bası testi (ASTM-C364 2007)

Nihai enlemesine basınç dayanımı Denklem 2.20'deki gibi hesaplanır:

$$\sigma = \frac{P_{max}}{w(2t_s)} \tag{2.20}$$

σ: Nihai enlemesin basınç dayanımı, MPa [psi]

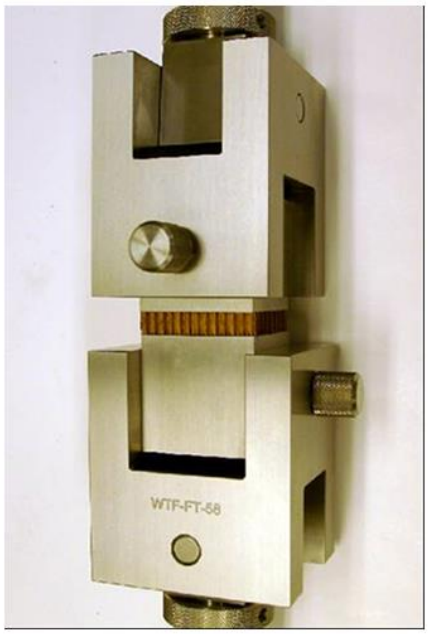
P_{max}: Hasar öncesi nihai kuvvet, N [lbf]

w: Numune genişliği, mm [in.]

t_s: Tek bir facesheat kalınlığı, mm [in.](ASTM-C364 2007)

Çekme Testi

Bu test yöntemi, çekirdeğin, çekirdek ile yüzey arasındaki bağın veya monte edilmiş bir sandviç panelin yüzeyinin düz gerilme mukavemetini belirlemektedir. ASTM C297 standardı bu test yöntemi için geliştirilmiştir. Düz çekme testine Şekil 2.14'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 14. Çekme testi (ASTM-C297 2020)

Nihai düz çekme mukavemeti hesaplanması Denklem 2.21'de verilmiştir:

$$F_z^{ftu} = \frac{P_{max}}{A} \tag{2.21}$$

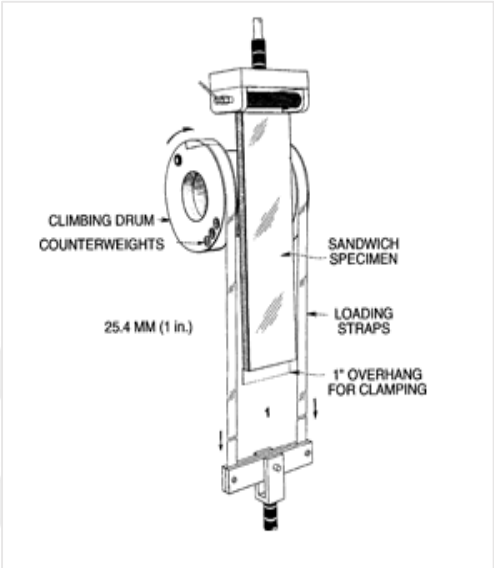
F_z^{ftu}: Nihai düz çekme dayanımı, MPa [psi]

P_{max}: Hasar öncesi nihai kuvvet, N [lbf]

A: Kesit alanı, mm^2 $[in.^2]$ (ASTM-C297 2020)

Yapışma Testi

Bu test yöntemi, sandviç malzemedeki yapışkan bağların sıyrılma direncinin belirlenmesini kapsamaktadır. Test için ASTM D1781 standardı kullanılmaktadır. Şekil 2.15'de sandviç malzeme yapışma testi uygulamsı gösterilmektedir.



Şekil 2. 15. Yapışma testi (soyma uygulaması) (ASTM-D1781 2008)

Ortalama soyma torku hesaplanması Denklem 2.22' deki gibidir:

$$\bar{F} = \frac{(r_0 - r_t)(F_p - F_0)}{W} \tag{2.22}$$

$\bar{F}$: Ortalama soyma torku, mm*kg/mm [in.*lb/in.]

r_0: Flanş yarıçapı (yükleme kayışlarının kalınlığının yarısı dahil), mm [in.]

r_t: Tambur yarıçapı + soyulmuş yapıştırıcının kalınlığının yarısı, mm [in.]

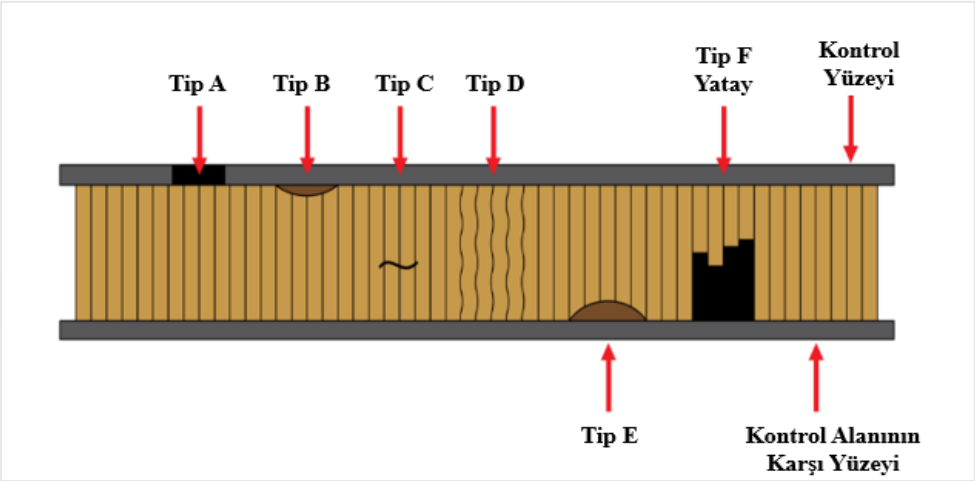
F_p: Yapıştırmayı bükmek ve soymak için gereken ortalama yük + direnç torkunun üstesinden gelmek için gerekli yük, kg [lb]

F_0: Direnç torkunun üstesinden gelmek için gereken yük, kg [lb]

W: Numune genişliği, mm [in.] (ASTM-D1781 2008)

2.1.3. Testler sonucunda sandviç panellerde karşılaşılabilen hasarlar

Sandviç malzemeler, testler sırasında veya herhangi bir zamanda bir darbeye maruz kaldıklarında hasara uğrarlar. Bu hasarlar yüzeylerde, çekirdekte veya yüzey-çekirdek arası bağlantılarda oluşabilir. Şekil 2.16'da bir sandviç malzemede oluşabilecek hasar tipleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 16. Sandviç panellerde karşılaşılan hasar tipleri (Anon 2018)

Tip A - Yüzeye paralel çekirdek katları arasındaki delaminasyon

Tip B - Dış yüzey ile çekirdek arasında kopma

Tip C - Kontrol yüzeyine paralel olarak çekirdek çatlaması

Tip D - Paralel alanda çekirdek ezilmesi

Tip E - İç yüzey ve çekirdek arasında kopma

Tip F - Petek çekirdeğinde sıvı girişi (Anon 2018)

2. 2. Kompozit Malzemeler

Kompozit kelime olarak, iki veya daha fazla parçadan oluşan bir malzeme anlamına gelmektedir. Kompozit malzemeler 'makro ölçüde, birbirinden farklı iki veya daha fazla bileşenin bir ara yüzey boyunca bir araya gelmesiyle oluşan malzemeler' şeklinde tanımlanabilir. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler çoğunlukla özelliklerini korumaktadırlar.

Karışmaz olmaları nedeniyle malzeme içerisinde fazlar arası büyük miktarda ara yüzey oluşur. Kompozitlerde sürekli faza matris adı verilir. Kesintili (parçalı) veya elyaf (fiber) şeklindeki fazlar ise matrislerden ayrı bölgeler olarak malzeme içerisinde yer alır. Kompozitler, orijinal malzemelerle elde edilemeyen özelliklere ulaşabilmek için iki malzemenin birleştirilmesiyle üretilir. Kompozit malzemeler ile elde edilmek istenen özellikler genellikle bükülmezlik, mukavemet, ağırlık, yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci, sertlik ve iletkenliktir.

2. 2. 1. Kompozit malzemelerin temel bileşenleri

Matris Malzemeleri

Kompozit yapılarda matrisin genel olarak görevi; takviye elamanlarını bir arada tutmak, yükü takviye elamanına dağıtmak ve takviye elemanını çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra takviye elemanlarını sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir (Asi 2008).

Kompozit malzeme içerisinde matrislerin görevleri aşağıda verilmiştir (Özer 2015).

- Matris malzeme takviye elemanlarını bir arada tutarak hareket etmelerini engeller.
- Kompozit malzemeye etkiyen dinamik ve statik yüklerin takviye elemanlarına eşit şekilde dağıtılmasını sağlar.

- Matris malzeme, kompozit malzemenin şeklini verir ve malzemenin katı formda kalmasını sağlar.
- Çevresel faktörlerden kaynaklanan fiziksel ve kimyasal zararlara karşı kompozit malzemeyi korur.

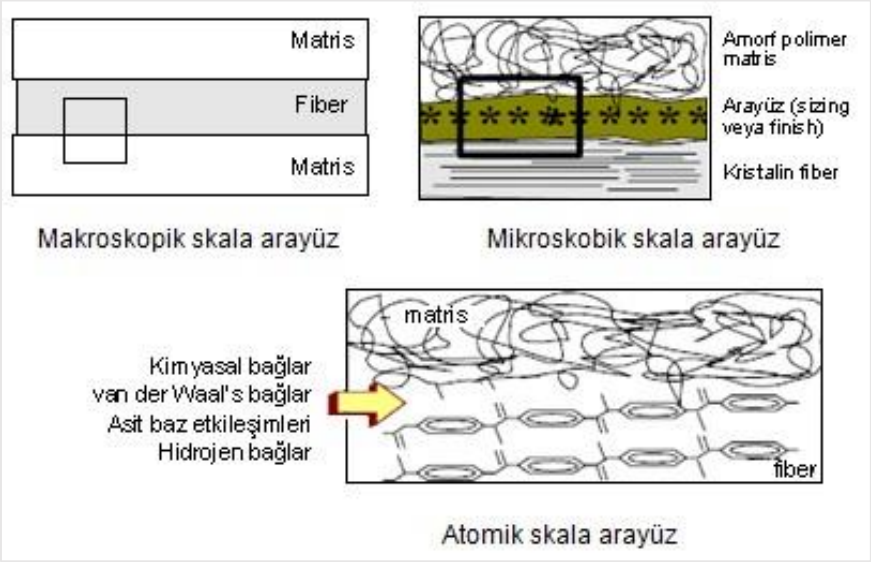
Takviye Malzemeleri

Takviye elemanının görevi, matris malzemesini takviyelendirerek, güçlendirerek, oluşan kompozit yapıya dayanım özellikleri kazandırmaktır. Takviye elemanı, kompozit üzerine etkiyen yükün büyük çoğunluğunu taşımaktadır. Yükün takviye elemanına iletilebilmesi için bileşenler arasında fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olmasının yanında ara yüzey bağının da güçlü olması gerekir. Kompozit malzemede kalıcı yapısal gerilmelerin oluşmaması için, takviye elemanı ile matris elemanının ısıl genleşme katsayıları arasında da uyum olmalıdır.

Kompozit malzeme üretimde kullanılacak takviye elamanından, yüksek elastik modül, yüksek dayanım, düşük yoğunluk, kimyasal uyum, üretim kolaylığı ve ısıl direnç gibi özellikler istenmektedir (İşlek 2020).

Arayüz

Kompozit bir malzemede, matris ve takviye elemanlarının fiziksel, kimyasal veya mekanik olarak etkileştiği, gerilimi matristen takviye elemana transfer eden arafaz da denilen bir arayüz bulunmaktadır (Şekil 2.17). Bir kompozitte arayüz bölge, kompozitin son özelliklerini belirleyen elamanı olduğundan son derece önemlidir. Kompozitin verimli olabilmesi için fazların bir araya gelip yüzey arasında bağlanmaları gerekir.



Şekil 2. 17. Değişik skalalarda arayüzler (Beşergil 2016)

Matris ve fiber arasındaki yükün aktarımında arayüz kuvvetli olmalı, aşındırıcı veya paslandırıcı girişini azaltmalı ve bağlanmanın kopmasını kontrol edebilmelidir. Kompozitin kesilmesi, bükülgenliği, darbe direnci, kırılmanın ilerlemesi ve fiberlerin dizilişleri gibi özellikler üzerinde de arayüzün önemli katkıları bulunur (Beşergil 2016).

Kompozit malzeme kuvvete maruz kaldığında, yük matris fazından yükü esas taşıyacak olan takviye fazına sağlam bağlanmış bir arayüz vasıtasıyla aktarılır. Malzeme bu bölgede ne matris fazı gibi ne de takviye fazı gibi davranır. Bu bölge her iki elemandan da farklı davranış sergiler. Yapıda kullanılan elyafların çapının küçülmesiyle arayüz bölgesi daha fazla önem kazanır (Türkoğlu 2020).

2.2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması takviye ve matris elemanının özelliğine göre olmaktadır. Bu sınıflandırma temel hatlarıyla aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2. 18. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler kullanım yerlerine ve üretim yöntemine göre metal, seramik ve polimer matrisler olarak sınıflandırılmaktadır.

Metal matrisli kompozit malzemeler; ana malzemeleri metal ve/veya metal alaşımına sahip kompozitlerdir. Bu kompozitlerde metal matris içerisine gömülen takviye elemanı, değişik geometrik yapıda olabilir. Metal matrisli kompozit malzemeler takviye edildikleri malzemelere bağlı olarak üstün özellikler gösterebilmektedir.

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafif olduklarından dolayı seramik matrisli kompozit malzemeler genellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalar için tercih edilir. Ancak sert ve kırılgan oldukları için çok düşük süneklik ve tokluk özellikleri gösterirler ve ayrıca termal şoklara karşı da dayanıksızdırlar. Bu nedenle çoğunlukla liflerle takviye edilirler. Çok yüksek elastisite modülü ve çalışma sıcaklıkları, metallerin plastik şekil değiştirme özellikleriyle birleştirilerek aşınmaya dayanıklı ve gerilme mukavemeti yüksek kompozit malzemeler üretilebilir (Kaya 2016).

Polimer matrisli kompozitler ise rijitlik, dayanım, darbe özellikleri, aşınma dayanımı vb. faktörlerden dolayı uçak sanayii, inşaat mühendisliği, gemi ve otomobil endüstrisi gibi birçok mühendislik uygulamalarında tercih edilen malzeme türlerinden birisidir (Asi 2008).

Kompozitlerde kullanılan polimer matrisler, termoset ve termoplastik olmak üzere ikiye ayrılır. Termoset ve termoplastik malzemeler arasındaki temel farklar Çizelge 2.1'de gösterilmiştir:

Çizelge 2. 1. Termoset ve termoplastik malzemelerin genel özelliklerinin karşılaştırılması (Şahin 2015)

TERMOSETLER	**TERMOPLASTİKLER**
Düşük gerinmelerde kopar.	Yüksek gerinmelerde kopar.
Raf ömrü sınırlıdır.	Raf ömrü uzundur.
Yapışkandır.	Yapışkan değildir, kullanımı kolaydır.
Kürleşme süresi uzundur.	Proses zamanı kısadır.
Üretim sıcaklığı düşüktür.	Üretim sıcaklığı ve viskozitesi yüksektir.
Çözücü direnci çok kötüdür.	Çözücü direnci mükemmeldir.
Isı altında bozulur, geri dönüşüm yoktur.	Isıtma ve basınçta yumuşar, geri dönüşüme uygundur.
Örnek: Epoksi, Melamin, Bakalit, Silikon, Poliüretan (PUR)	Örnek: Poliamid (PA), Polikarbonat (PC), Polipropilen (PP), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Polivinil Klorür (PVC)

Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Takviye elemanının özelliğine göre kompozit malzemeler üç ana başlık altında aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler
    - Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler
    - Süreksiz (kesikli) elyaf takviyeli kompozit malzemeler
        - Rastgele süreksiz elyaf takviyeli kompozit malzemeler
        - Yönlendirilmiş süreksiz elyaf takviyeli kompozit malzemeler
2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler
    - Büyük parçacık takviyeli kompozit malzemeler
    - Küçük parçacık takviyeli kompozit malzemeler
3. Yapısal kompozit malzemeler
    - Tabakalı kompozitler
    - Sandviç kompozitler

Kompozitlerde parçacık takviyesi, elyaf takviyesinden daha az etkili bir güçlendirme aracıdır. Partikül takviyeli kompozitler, esas olarak sertlik değerinde artış elde eder. Aynı zamanda mukavemet ve tokluk değerlerinde artışlar da elde edebilir. Ancak her durumda, fiber takviyeli bir kompozitten elde edilebilecek kazanımlardan daha düşük özellikler sağlanmaktadır (Türkoğlu 2020).

Bu sebeple günümüzde çok fazla çeşit elyaf malzemesi bulunmaktır. Yüksek mukavemet değerleri ve düşük ısıl dirençleri sebebiyle en çok bilinen ve tercih edilen elyaf malzemesinden biri cam elyaflardır. Bor elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflar vb. diğer sık kullanılan elyaf malzemeleridir (Özer 2015).

Aşağıdaki Çizelge 2.2'de sık kullanılan elyaf malzemelerinin mekanik özellikleri verilmiştir:

Çizelge 2. 2. Bazı elyaf malzemelerin mekanik özellikleri (Aksoylu 2007)

ELYAF	Yoğunluk ($Mg.m^{-3}$)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Çekme Gerilmesi (GPa)
SiC	3	400	0,2	2,4
Bor	2,6	400	0,2	4
HM karbon	1,95	eksenel 380 - radyal 12	0,2	2,4
HS korbon	1,75	eksenel 230 - radyal 20	0,2	3,4
E-cam	2,56	76	0,22	2
Nicalon	2,6	76	0,2	2
Saffil	3,4	300	0,26	2
Selüloz	1	80	0,3	3

İnce ve tek yönlü elyaf takviyeli polimer matrisli yapıya genellikle katman denilmektedir. Tabakalı kompozit malzemeler ise bu katman veya laminaların istetilen açılarda ve düzlemlerde üst üste yerleştirilerek laminat oluşturulmuş şeklidir. Kompozit yapının elastik özelliklerinin belirlenebilmesi için, her bir katmanın/tabakanın elyaf yönlenmesinin ve hacim oranın üniform olduğu ve bu sayede de yapının homojen olduğu varsayılmaktadır (Türkoğlu 2020).

2.2.3. Termoplastik kompozit malzemeler

Termoplastikler ısıtılarak yumuşatılıp şekil verilebilir hale geçen, soğutulduklarında katılaşsalar dahi tekrar ısıtıldıklarında yine kullanılabilen plastik malzemelerdir. Termosetlerin aksine, ısıtma ve soğutulma işlemleri yapılarında sadece fiziksel değişim meydana getirir. Bu özellikleri sayesinde geri dönüştürülebilir üretim özelliği gösterirler (Paksoy 2008).

Günümüzde hafif konstrüksiyonlara yönelik uygulamalar arttırılmak istenmektedir. Yüksek yük taşıma kapasitesiyle birlikte, hafif ve düşük maliyetli malzemelere olan ilgi

giderek artmaktadır. Bu noktada termoplastik kompozitler, metallerin çoğundan ve termosetlerden daha hafif bir yapıya sahip oldukları için otomotiv endüstrisi ve havacılık sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Termoplastik matrisli kompozitler, termoset kompozitlerle benzer mekanik özellikler göstermelerinin yanında üstün kimyasal dirence sahiptirler ve maliyetleri de daha uygundur. PP, PBT, PPS, PA, POM, TPU, vb. birçok uygulamada tercih edilen başlıca termoplastik matris malzemeleridir. Bu matris malzemeleri cam ve karbon gibi çeşitli fiberlerle ve tercihen özel uyumlaştırıcı ilaveleriyle takviyelendirilebilmektedir.

Bu termoplastik matris malzemeleri arasından PP (polipropilen); düşük fiyatı, iyi yorulma ve darbe mukavemeti ve iyi kimyasal direnci ile özellikle tercih edilmektedir. Günümüzde homopolimer, blok-kopolimer ve rasgele-kopolimer olmak üzere PP' nin üç temel çeşidi kullanılmaktadır (Baydar et al. 2012).

Tüm bu avantajlarının yanında termoplastiklerin iki temel dezavantajı vardır. Bu dezavantajlar üretiminde ısı ve basınç uygulamalarının yapılabilmesi için kaliteli donanım gerektirmesi ve elyafın termoset kompozit malzemelere oranla daha zor ıslanmasıdır.

Termoplastik kompozit malzemelerin üretimi sürekli fiber takviyeli kompozitler ve süreksiz fiber takviyeli kompozitler olarak ikiye ayrılır. Sürekli fiber takviyeli kompozit üretim teknikleri termo şekillendirme, şerit sarma, basınçlı döküm, otoklav ve diyafram şekillendirmedir. Süreksiz fiber takviyeli termoplastik kompozitler ise enjeksiyonla döküm ve üflemeli döküm teknikleriyle üretilir (Özer 2015).

Termoplastik Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Termoplastik malzemeler, mühendislik amaçlı termoplastikler ve genel amaçlı termoplastikler olarak ikiye ayrılırlar. Çizelge 2.3 ve 2.4'te bu termoplastiklerden bazılarının mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 3. Genel amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri (Smith, Hashemi, and Presuel-Moreno 2019)

Malzeme	Yoğunluk	Çekme Dayanımı	Darbe Dayanımı (Izod)	Dielektrik Gücü	Maksimum Kullanım Sıcaklığı (Yüksüz)
	(g/cm^3)	(MPa)	(J/m)	(V/mm)	(°C)
Polietilen (düşük yoğunluk)	0,92-0,93	6,2-17,2		18912	82-100
Polietilen (yüksek yoğunluk)	0,95-0,96	20-37,2	21,35-747,3	18912	80-120
Bükülmez PVC	1,49-1,58	51,7-62,1	53,38-298,9		110
Genel maksatlı PP	0,90-0,91	33-38	21,35-117,4	25610	107-150
Stiren akrilonitril (SAN)	1,08	69-82,8	21,35-26,69	69935	60-104
Genel maksatlı (ABS)	1,05-1,07	40,7	320,28	15169	71-93
Genel maksatlı akrilik	1,11-1,19	75,9	122,7	17730-19700	54-110
Selüloz, asetat	1,2-1,3	20,7-55,2	133,45-213,52	9850-23640	60-104
Plitetrafloretilen	2,1-2,3	6,9-27,6	64,05-362,98	15760-19700	288

Çizelge 2. 4. Mühendislik amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri (Smith ve ark. 2019)

Malzeme	Yoğunluk	Çekme Dayanımı	Darbe Dayanımı	Dielektrik Gücü	Maksimum Kullanım Sıcaklığı (Yüksüz)
	(g/cm^3)	(MPa)	(J/m)	(V/mm)	(°C)
Naylon 6.6	1,13-1,15	62,1.-82,8	106,76	15169	82-150
Poliasetat	1,42	69	74,73	12608	90
Polikarbonat	1,2	62,1	640,56-854,08	14972	120
Polyester (PET)	1,37	71,7	42,7		80
Polyester (PBT)	1,31	55,2-56,5	64,05-69,39	23246-27580	120
Polifenilen oksit	1,06-1,10	53,8-66,2	266,9	15760-19700	80-105
Polisülfon	1,24	70,3	64,05	16745	150
Poliefenilen sülfür	1,34	69	16,01	23443	260

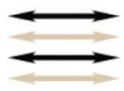
2.2.4. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Sürekli lifler, kontrollü anizotropileri ve düşük yüzey boyutu ve kusurları nedeniyle mukavemet ve sertlik gibi özelliklerde genellikle maksimum değerlere ulaşan uzun liflerdir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde yükün, çoğunlukla yükün yönü boyunca yönlendirilmiş elyaf tarafından taşındığı varsayılır. Sürekli elyaf takviyeler yapı içinde genellikle lif demeti, tek yönlü kumaş, farklı desenlerde dokunmuş kumaşlar veya örülmüş kumaş olarak kullanılmaktadır.

Elyafların matris içindeki yönelimleri kompozit malzemenin dayanımını belirleyen ana faktördür. Boylamasına yapılan dizilimde kompozite etki eden yük elyaflar ile aynı yönde olduğunda en yüksek dayanım değeri elde edilirken etki eden yükün elyaflar ile aynı doğrultuda olmaması, bir miktar farklı açıda olması bile, yapının dayanımında büyük düşüşlere neden olur (Türkoğlu, 2020).

Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf takviyesi temel olarak 3 farklı şekilde bulunur. Sürekli elyaf kullanılarak geliştirilen karma yapılar içerisindeki elyaf yönelimleri, kompozit malzemelerin farklı yönlerdeki maruz kalacakları gerilimlere farklı tepkiler vermesine neden olmaktadır. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerde genel olarak kullanılan elyaf yönelimleri Çizelge 2.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 2. 5. Elyaf yönelimlerinin gösterilmesi (Yerleşen 2015)

Tek Yönlü Elyaf Oryantasyonu	**Hacimsel Elyaf Oranı Oryantasyon Yönünde Arttıkça Mukavemet Artar.**		**Takviye Türü:** Sürekli Elyaf Sarma. **Üretim Şekli:** Pultrizyon, Sıkıştırmalı Kalıplama.
Çift Yönlü Elyaf Oryantasyonu			**Takviye Türü:** Dokuma Cam Elyafı, Katmanlı Üretim. **Üretim Şekli:** Filaman Sarma, Film İstifleme, Sıkıştırmalı Kalıplama
Çok Yönlü Elyaf Oryantasyonu			**Takviye Türü:** Çok yönlü örme, Katmanlı Üretim. **Üretim Şekli:** Sıkıştırmalı kalıplama, Film İstifleme.

Tüm bu özellikler göz önüne alındığında sürekli elyaf takviyeli termoplastik esaslı kompozit malzemeler ise günümüz endüstrisinde sıklıkla tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır.

Termoplastik matrisli sürekli elyaf takviyeli malzemeler sahip oldukları yüksek spesifik rijitlik ve düşük ağırlık avantajlarıyla birlikte, havacılık, makine ve otomotiv endüstrisindeki kullanım alanını gittikçe genişletmektedir. Özellikle otomotiv endüstrisinin hedeflediği düşük yakıt tüketimine sahip araçların üretimi konusunda ihtiyaç duyduğu hafifletme çalışmaları kapsamında büyük bir kullanım potansiyeline sahiptir (Yerleşen 2015).

2.3. Yapıştırıcı Karakterizasyonu

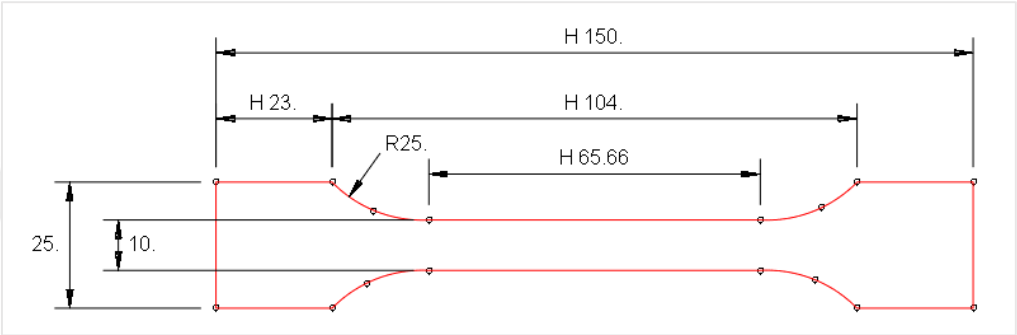
Uzun yıllardır iki malzemeyi birleştirmek için birçok yöntem (kaynak, vidalama, perçinleme, yapıştırma vb.) kullanılmaktadır. Ancak diğer birleştirme yöntemlerine göre daha kolay uygulanabilir ve hafif olduğundan özellikle kompozit malzemeler için günümüzde en çok tercih edilen birleştirme yöntemi yapıştırma ile birleştirmedir. Diğer birleştirme yöntemleri kompozit malzemelerde kolaylıkla delaminasyon olmasına sebep olabildiği için tercih edilmemektedir.

Yapıştırıcı ile birleştirme yönteminde yapıştırıcının mekanik dayanımları yapıştırılacak olan yüzeylere/malzemelere göre farklılık göstermektedir. Bu sebeple kullanılacak malzemeye göre kullanılacak yapıştırıcının karakterize edilmesi gerekmektedir. Bu yapıştırıcı karakteristik özellikleri ise özel geliştirilmiş standartlar ve bu standartlar doğrultusunda yapılan testler ile bulunmaktadır. Genel bağlamda yapıştırıcı karakterizasyonu için aşağıdaki test yöntemleri kullanılmaktadır:

- Yapıştırıcı malzeme mekanik testi (bulk testi)
- Tek nokta bindirme testi (single lap joint - SLJ)
- Çift taraflı ayırma testi (double cantilever beam - DCB)
- Uç çentikli bükülme testi (end notched flexure-ENF)

2.3.1. Yapıştırıcı malzeme mekanik testi (bulk testi)

Yapıştırıcı malzeme mekanik testi, diğer adıyla bulk testi, yapıştırılacak malzemenin etkisi olmadan yapıştırıcının mekanik dayanımını bulmak için yapılan testtir. EN ISO 527-2 standardı kullanılarak hazırlanan numuneler doğrusal bir yük altında çekme testine tabii tutulur ve sonucunda yapıştırıcının elastisite modülü, poisson oranı gibi mekanik özellikleri elde edilir.

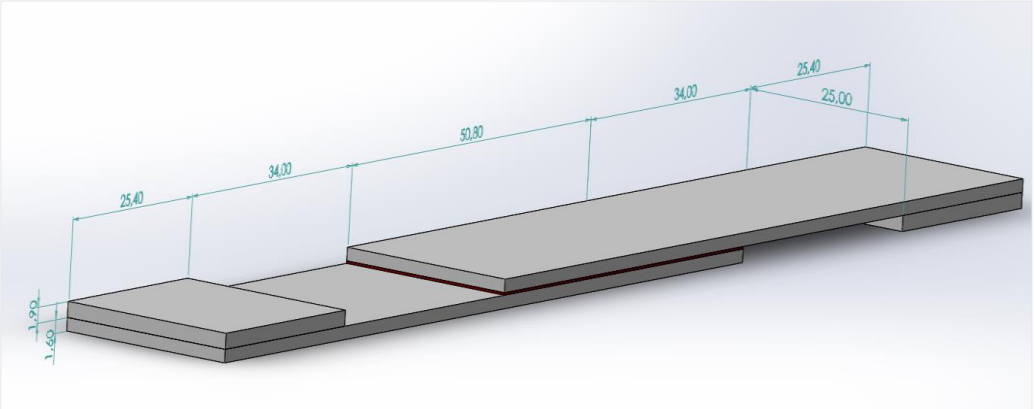


Şekil 2. 19. EN ISO 527-2 standardına göre hazırlanan bulk testi numunesi

2.3.2. Tek nokta bindirme testi (SLJ testi)

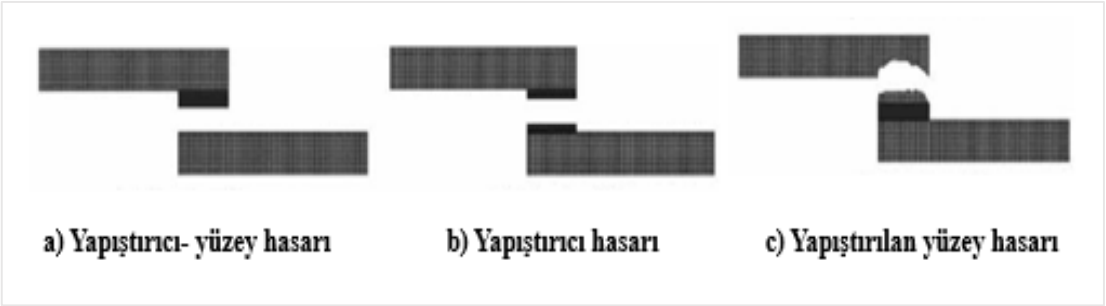
Tek nokta bindirme testi yapıştırıcının kayma dayanımını ölçmek için yapılan testtir. Sonuçlar bindirme uzunluğu, malzeme mekanik özellikleri ve malzeme kalınlığı parametrelerine bağlıdır.

ASTM D1002 standardı kullanılarak hazırlanan numunelere çekme testi yapılır. Test sonucunda kuvvet- deplasman grafikleri elde edilir.



Şekil 2. 20. ASTM D1002 standardına göre hazırlanan SLJ numunesi boyutları

Tek nokta bindirme testi sonrasında karşılaşılabilecek hasar tiplerinden bazıları Şekil 2.21'de verilmiştir. Test sonucunda hasarlar incelendiğinde ayrılma yapıştırıcı ve malzeme arasından gerçekleşmiş ise yapışmanın iyi olmadığı sonucu çıkarılır (Şekil 2.21.a). Ayrılma yapıştırıcıdan olmuşsa malzeme-yapıştırıcı arasındaki yapışma mukavemetinin yapıştırıcının mukavemetinden daha yüksek olduğu şeklinde bir yorum yapılabilir (Şekil 2.21.b). Veya yapıştırıcıda hiçbir ayrılma olmadan malzeme hasara uğramışsa bu yapışmanın mükemmel olduğu anlamına gelir (Şekil2.21.c).



Şekil 2. 21. Yapıştırıcı hasar incelenmesi (Banea and Da Silva 2008)

Test sonrası kayma gerilmesi Denklem 2.23'deki gibi hesaplanır:

$$\tau_{av} = \frac{P_{max}}{l.b} \tag{2.23}$$

τ_{av}: Ortalama Kayma Gerilmesi

P_{max}: Numuneye Uygulanan Maksimum Yük

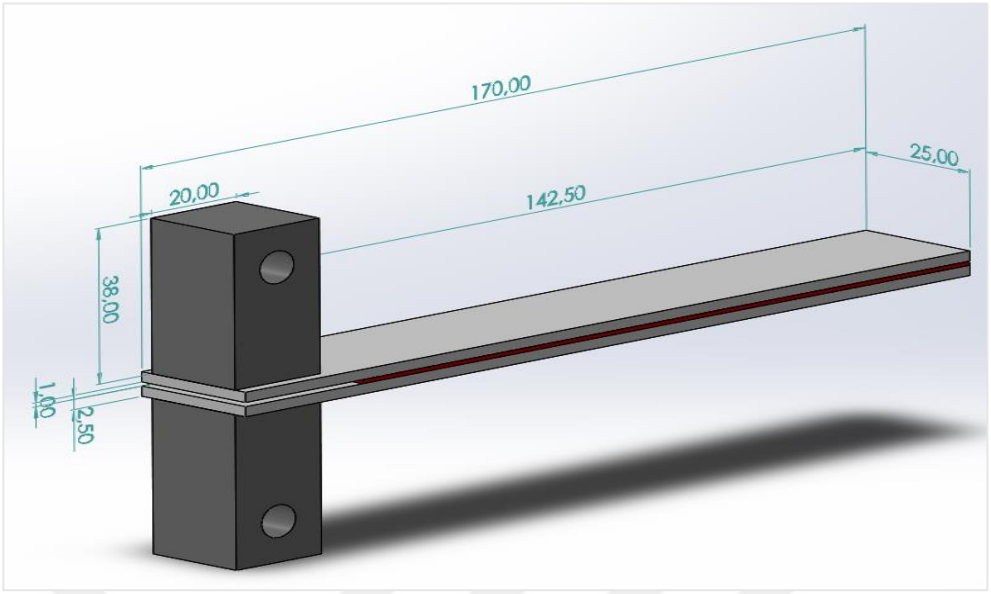
l: Yapıştırıcı Boyu

b: Yapıştırıcı Genişliği (Silva et al. 2012)

2.3.3. Çift taraflı ayırma testi (DCB testi)

Çift taraflı ayırma testi çekme yükleri altındaki yapıştırıcının kırılma enerjisini (mod1) incelemek için yapılır. Yapıştırılacak malzemeye göre standartlar ve kuvvet bölgesi değişmektedir. Örneğin çelik bir malzeme için DCB numune kalınlığı yaklaşık 10 mm seçilirken kompozit bir malzeme için bu kalınlık 2 mm'ye düşmektedir. Dolayısıyla çelik malzemede çenelere bağlamak için gerekli çapta delikler açılabilmektir. Kompozit malzemede ise Şekil 2.22' de görüldüğü gibi ayrı bir metal malzeme ile bağlantı elemanı tasarlanıp üretilmeli ve çenelere bağlanabilmesi için kompozit malzemeyle birleştirilmelidir. Burada bağlantı elemanını kompozit malzemeyle birleştirirken kullanılacak yapıştırıcının mekanik özelliklerinin karakterizasyonu yapılan yapıştırıcının mekanik özelliklerinden yüksek değerlerde olmasına dikkat etmek gerekir.

Kompozit malzemeler incelendiği için ASTM D5528 standardı referans olarak alınmıştır. Şekil 2.22' de gösterilen boyutlarda üretilen numuneler çeşitli aparatlarla çekme cihazına bağlanarak test gerçekleştirilir. Test sonucunda kuvvet- deplasman grafikleri alınarak maksimum kuvvet elde edilir.



Şekil 2. 22. ASTM D5528 standardına göre hazırlanan DCB numunesi boyutları

Test sonucu elde edilen maksimum kuvvet ile Mod I kırılma enerjisi Denklem 2.24 ile bulunur:

$$G_{IC} = \frac{[4.P_{max}{}^2][3.a^2+h^2]}{E.B^2.h^3} \quad (2.24)$$

$\boldsymbol{P_{max}}$: çatlağın büyümeye başladığı yük (N)

a: çatlak uzunluğu (yük hattından sabit çatlak ucuna kadar olan mesafe) (mm)

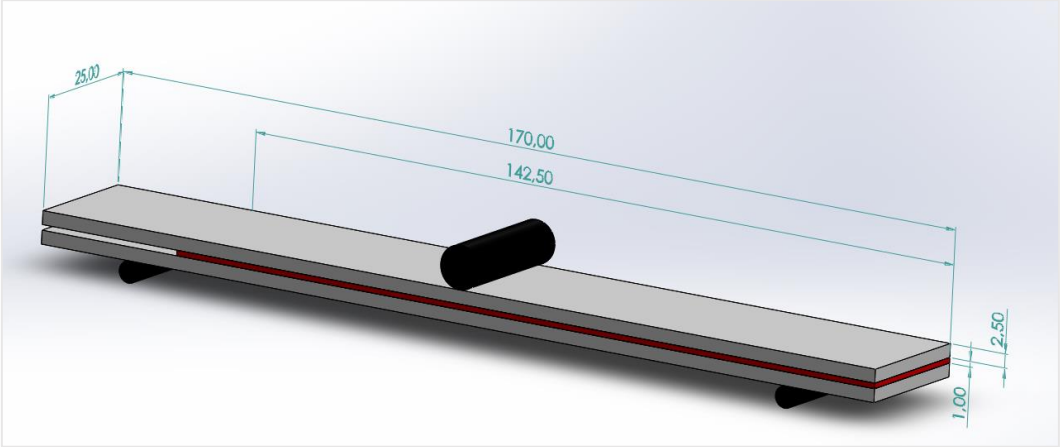
E: elastisite modülü (N/mm2)

B: yapıştırıcının genişliği (mm)

h: yapıştırıcı yüksekliği (mm) (Silva et al. 2012)

2.3.4. Uç çentikli bükülme testi (ENF testi)

Uç çentikli bükülme testi yapıştırıcının kırılma tokluğunu (mod2) bulmak için yapılan üç nokta eğilme testleridir. Kompozit malzemeler için ASTM D7905 standardı kullanılarak elde edilen numuneler üç nokta eğilme testine tabii tutulur ve sonucunda kuvvet-deplasman grafikleri elde edilerek maksimum kuvvet değeri ile hesaplamalar yapılır.



Şekil 2. 23. ASTM D7905 standardına göre hazırlanan ENF numunesi boyutları

Test sonucunda kırılma enerjisinin bulunması ile ilgili iki önemli yöntem vardır:

1. Test sonucunda elde edilebilecek olan kuvvet- deplasman grafiği ile kamera aracılığıyla kaydedilen çatlak uzunluğunun çakıştırılarak R eğrisi elde edilir. Bu eğri kırılma enerjisi ile çatlak uzunluğu grafiğinin eğrisidir ve bu grafikten kırılma enerjisi bulunabilir. Çatlak izlemesine müsaade edecek kadar yavaş hızdaki deney gerçekleşirken kamera yardımıyla çatlak uzunluğu kaydedilir. Kameranın kayıt süresiyle kuvvet-deplasman grafiğinin süresinin eşit olması önemlidir.

2. Eşdeğer kırılma uzunluğuna göre kırılma enerjisi Denklem 2.25'deki gibi hesaplanır:

$$G_{IIc} = \frac{9.P^2a^2}{16.b^2Eh^3} \tag{2.25}$$

Denklemi, test sırasında çatlak uzunluğu ölçüsüne dayanır, bu da sürtünme ile kayma tarafından meydana gelen yayılma nedeniyle çok zor olabilir. Ayrıca bu yöntemler, hasarın mevcut enerjinin bir kısmını emen plastikleştirme ve mikro zorlama ile meydana geldiği çatlak ucundaki FPZ'yi (Fracture Process Zone) hesaba katmamaktadır. FPZ etkisini dahil etmek için, yayılma sırasında gerçek çatlak uzunluğunda bir düzeltme düşünülmüştür (Denklem 2.26):

$$G_{uc} = \frac{9.P^2a^2}{16.b^2Eh^3} a_e{}^3 = \frac{9.P^2a^2}{16.b^2Eh^3} \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0{}^3 + \frac{2}{3}\left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1\right)L^3\right]^{1/3} \quad (2.26)$$

$$C_{corr} = C - \frac{3\,L}{10Gbh} \quad (2.27)$$

$\boldsymbol{P_{max}}$: çatlağın büyümeye başladığı yük (N)

a: çatlak uzunluğu (yük hattından sabit çatlak ucuna kadar olan mesafe) (mm)

E: elastisite modülü (N/mm2)

b: numune genişliği (mm)

h: yapıştırılan malzeme yüksekliği (mm)

$\boldsymbol{a_e}$: eşdeğer kırılma uzunluğu (mm)

C: esneklik (mm/N)

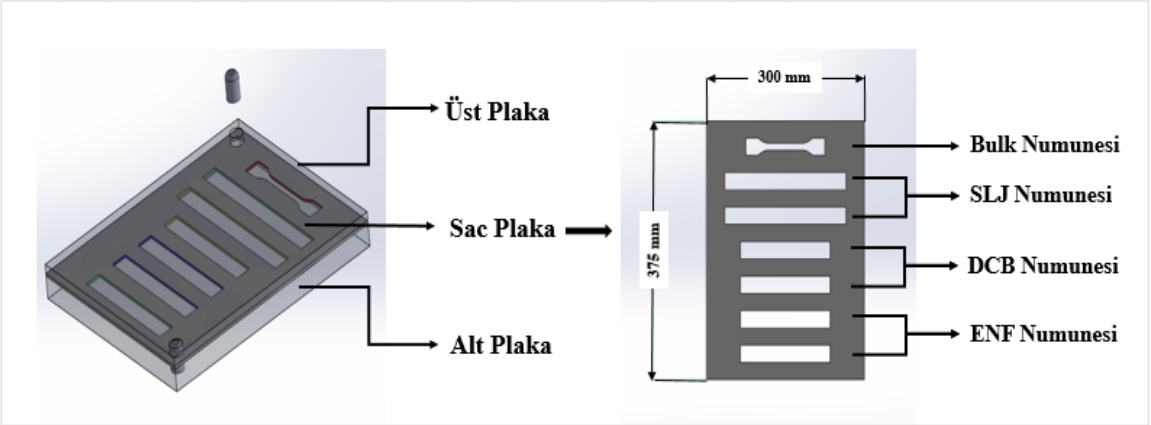
L: iki mesnet arası uzaklığın yarısı (mm) (Silva et al. 2012)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Yapıştırıcı Karakteristik Özelliklerinin (Cohesive Zone Parametrelerinin) Bulunması

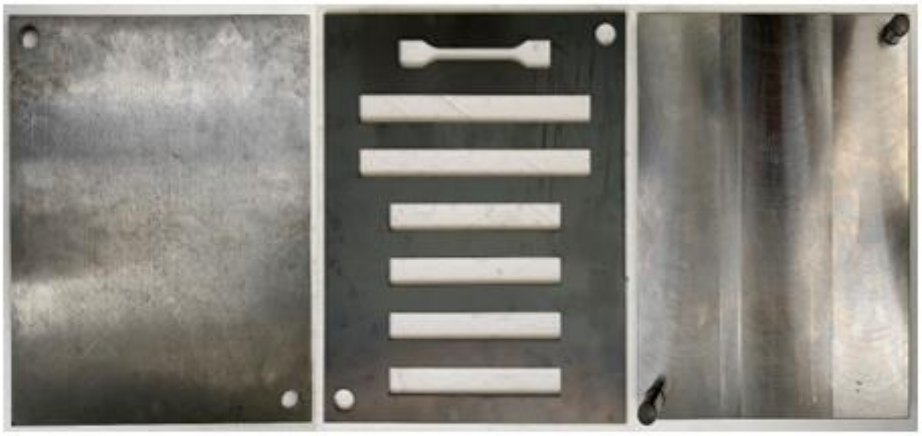
3.1.1. Kalıp hazırlama ve üretimi

Kullandığımız kompozit malzeme çok ince bir kalınlığa (0.24 mm) sahip olduğu için parçaların üst üste birleştirerek kalınlaştırılması gerekmektedir. Bunun için Şekil 3.1'deki gibi bir kalıp hazırlanmış ve tek seferde bir set numune oluşturmak için tasarım yapılmıştır.



Şekil 3. 1. Kalıp tasarımı

Ara kısımdaki sac parçalar 1,2 ve 3 mm kalınlığında olmak üzere üç ayrı boyutta üretilmiştir. Alt ve üst kalıplar ise yine istenilen boyutlarda kesilerek alt kalıba merkezlemeyi sağlaması amacıyla sıkı geçme olacak şekilde mil eklenmiştir.

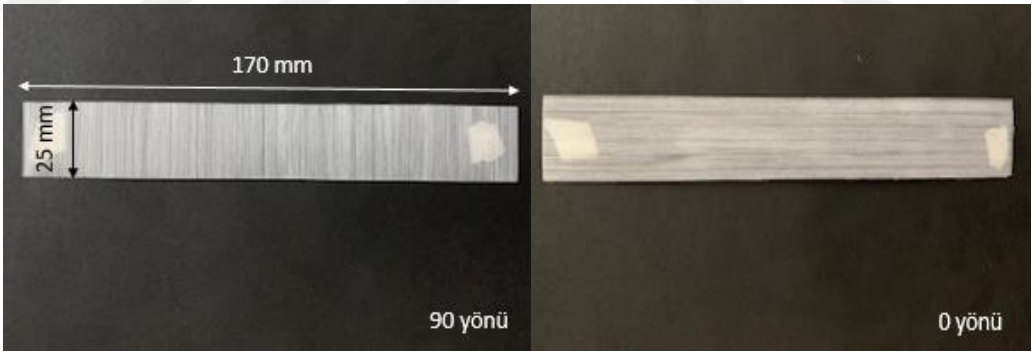


Şekil 3. 2. Üretilmiş kalıp parçaları

3.1.2. Katmanlı malzeme oluşturma

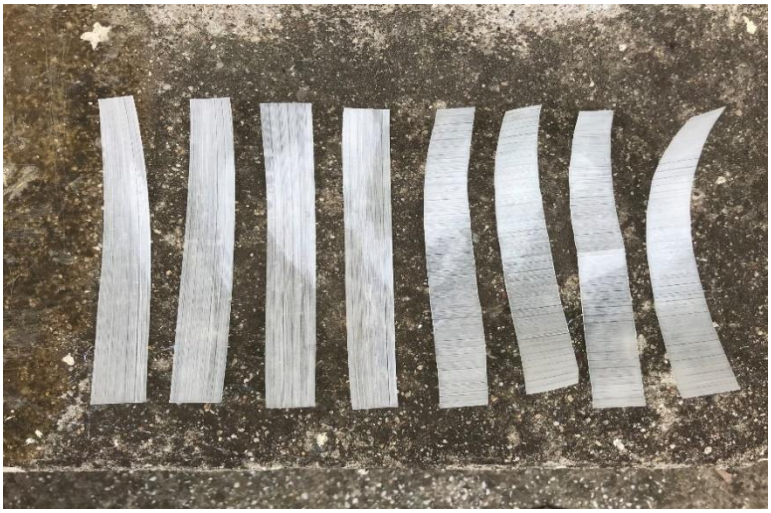
Katmanlı malzeme oluşturma işlemi aşağıdaki işlem adımları izlenerek oluşturulmuştur:

- Malzemenin istenilen boyutlarda 0 ve 90 derece elyaf doğrultusunda kesilmesi



Şekil 3. 3. Kesilen kompozit malzemeler

- Malzemenin üzerindeki yapışmayı engelleyici yağ vb. maddeleri gidermek için kesilen parçalar aseton ile yıkanır ve kurutulur.



Şekil 3. 4. Aseton ile yıkanarak kurumaya bırakılan malzemeler

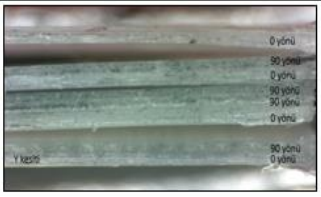
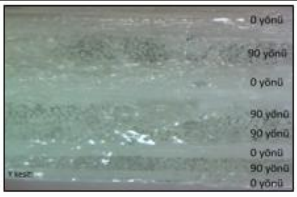
- Malzemenin eridiğinde kalıba yapışmaması için alt üst kalıplar ile sac levha arasına 0.25 mm kalınlığındaki yüksek ısı dayanımı olan teflon kumaş konulur. Aseton ile yıkama işleminden sonra kuruyan malzemeler $[0/90]_{2s}$ simetrik dizilim ile kalıp içerisine yerleştirilir. Uygun ve düzgün yerleşimden sonra üst kalıp kapatılarak fırınlamaya uygun hale getirilir.



Şekil 3. 5. Fırın içerisine yerleştirilmiş kalıp

- Sıcaklık ve basınç optimum değerlerinin bulunana kadar denemeler yapılmıştır. Birkaç deneme sonrasında karşılaşılan problemler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

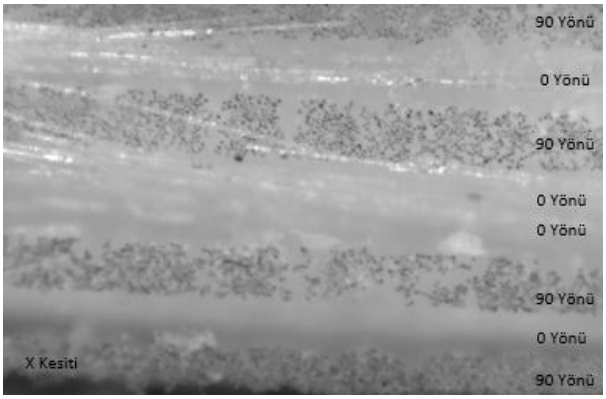
Çizelge 3. 1. Katman oluşturma işlemi sırasında karşılaşılan problemler

	DENEME 1	DENEME 2	DENEME 3
ÜRETİLEN NUMUNE			
MİKROSKOP ALTINDAKİ GÖRÜNTÜSÜ			
AÇIKLAMA	200 °C sıcaklıkta fırınlama işlemi sonrası oluşan numune kalınlığı 2.20 mm elde edilmiştir. Mikroskop ile bakıldığında katmanlar arasında, sıcaklık ve basınç eksikliğinden dolayı delaminasyon meydana geldiği gözlemlenmiştir.	220 °C sıcaklıkta fırınlama işlemi sonucunda numune mikroskop yardımıyla incelendiğinde katmanlar arasında herhangi bir delaminasyon ile karşılaşılmamıştır. Ancak üretilen numunede değişken kalınlık gözlemlenmiştir.	220 °C sıcaklıkta ve basınç arttırılarak yapılan fırınlama işlemi sonucunda numune de herhangi bir delaminasyon görülmemiştir. Ancak oluşan numune kalınlığının 2.3-2.5 arasında değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Yani üretilen numune de kalınlık belirli bölgelerde artıp azalmaktadır. Bunun sebebi uygulanan basıncın numune üzerine eşit olarak dağıtılamamasıdır.

- 224 °C sıcaklıkta ve optimum basınç ile fırınlama işlemi sonucunda istenilen özelliklerde katmanlı numuneler oluşturulmuştur. Üretilen numunelerin görüntüsü Şekil 3.6' deki gibidir. Numune mikroskop altında incelendiğinde herhangi bir delaminasyon ile karşılaşılmamıştır (Şekil 3.7). Numune kalınlığı her bölgede eşittir ve standartlarda belirtilen değerlerdedir.



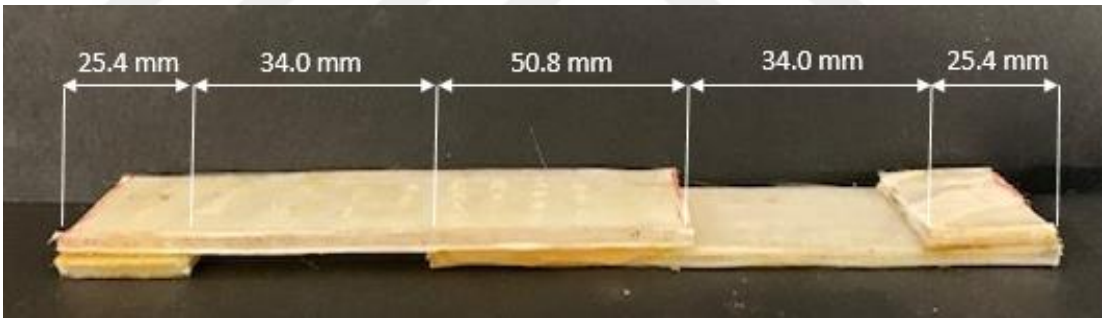
Şekil 3. 6. Optimum değerlerde üretilen numune



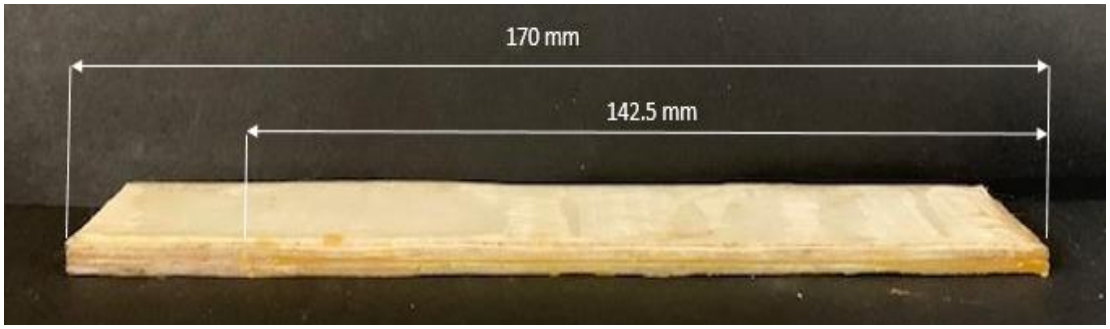
Şekil 3. 7. Numunenin mikroskop görüntüsü

3.1.3. Deney numunelerinin hazırlanması

Üretilen katman oluşturulmuş numuneler ile yapılması amaçlanan yapıştırıcı karakterizasyon deney numuneleri hazırlanmıştır. Yukarıda anlatılan standartlara bağlı kalarak SLJ, DCB ve ENF için üç ayrı numune oluşturulmuştur (Şekil 3.8-3.9).



Şekil 3. 8. Hazırlanan SLJ numunesi

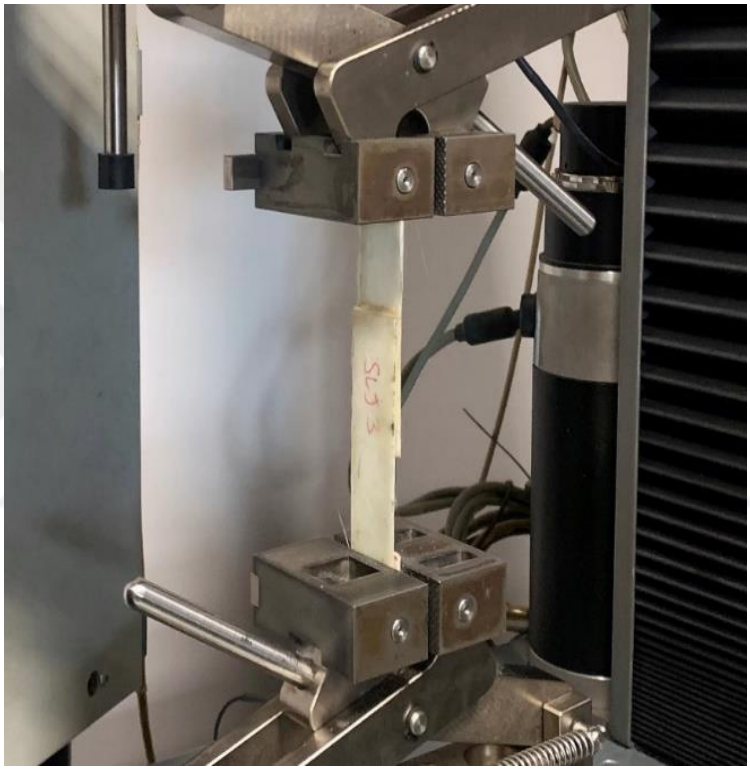


Şekil 3. 9. Hazırlanan DCB ve ENF numuneleri

3.1.4. Cohesive zone testleri

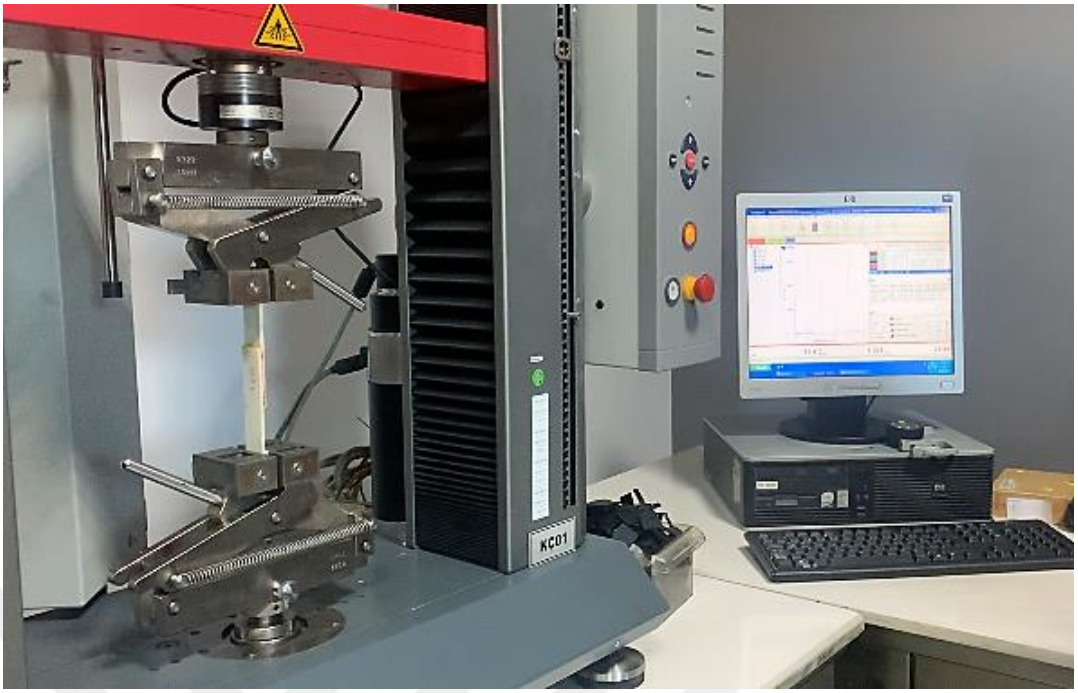
Single Lap Joint (SLJ) Testi

Standartlara uygun şekilde üretilen numuneler çekme cihazına iki tab kısımından bağlanarak dakikada 2 mm hız ile çekilerek yapıştırıcı kayma gerilmesine maruz bırakılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3. 10. Test için çenelere bağlanan numune

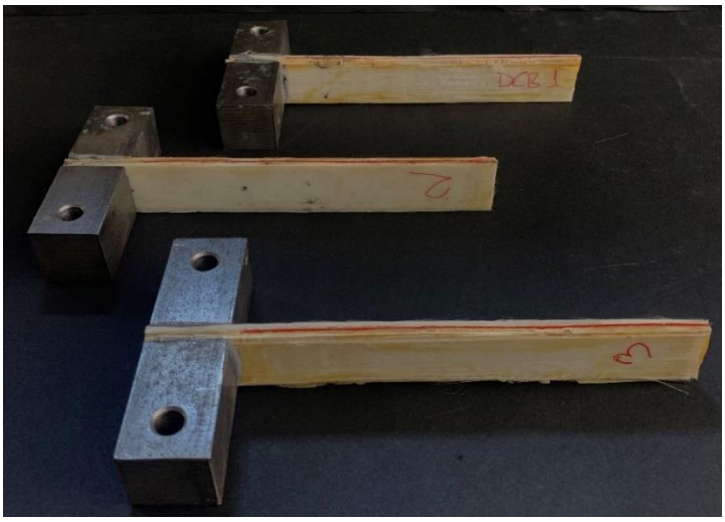
Şekil 3.11'de görüldüğü gibi çekme cihazına bağlı bir bilgisayar ekranından kuvvet-deplasman grafiği okunmuştur.



Şekil 3. 11. Test yapılan çekme cihazı

Double Cantilever Beam (DCB) Testi

DCB testinde numunelerin üst yüzeylerine çekme cihazına bağlanabilmesi için Şekil 3.12'de görüldüğü gibi çelik plakalar yapıştırılmıştır.

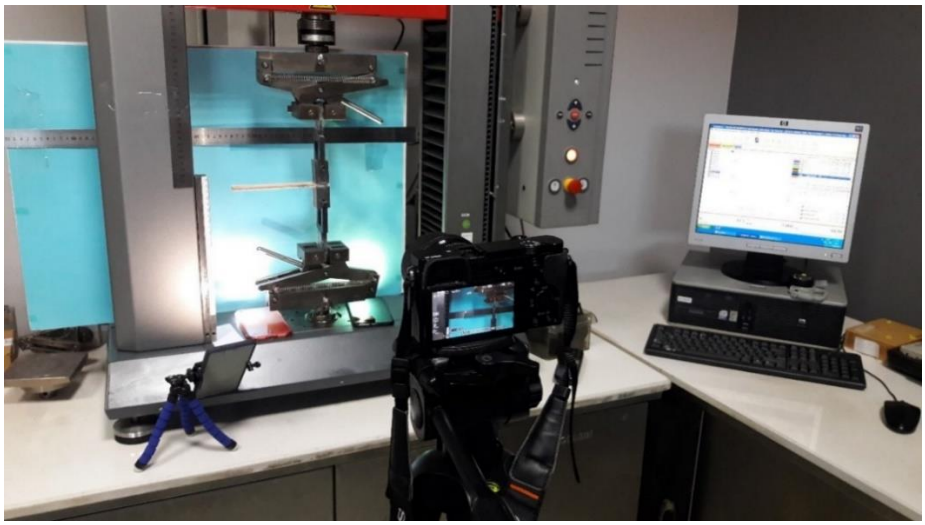


Şekil 3. 12. Teste hazır olan numuneler

Hazırlanan numuneler daha sonra uygun aparatlar kullanılarak çekme cihazına bağlanmıştır. Deney sonucunda elde edilecek kuvvet—deplasman grafiğine ek olarak yapıştırıcıda meydana gelecek çatlak uzunluğu da büyük öneme sahip olduğu için kamera yardımıyla yapılan tüm testler kaydedilmiştir (Şekil 3.14). Video üzerinden daha sağlıklı veriler alabilmek adına cihaz üzerine Şekil 3.13'deki gibi yatay ve dikey cetveller yapıştırılmıştır.



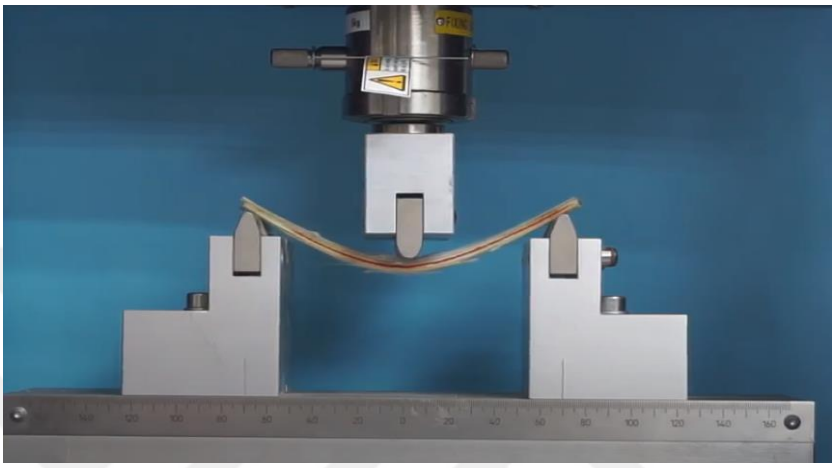
Şekil 3. 13. DCB testi



Şekil 3. 14. DCB testi kamera çekimleri

End-Notched Flexure (ENF) Testi

Mekanik test cihazına standartlardaki değerlere uygun olarak üç nokta eğilme aparatları bağlanarak dakikada 2 mm hız ile test gerçekleştirilmiştir. DCB testinde olduğu gibi ENF testinde de çatlak ilerlemesini gözlemlemek için kamera kullanılmıştır.



Şekil 3. 15. ENF testi



Şekil 3. 16. ENF test cihazı ve ekipmanlar

3.2. Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kullanılarak Sandviç Malzeme Üretilmesi Ve Deneysel Olarak İncelenmesi

Bu çalışmada sürekli elyaf takviyeli termoplastik malzeme olarak cam fiber takviyeli polipropilen (GFRPP) malzeme kullanılmıştır. Çekirdek yapı ve yüzeylerin arasına G-Flex Epoksi yapıştırıcı sürülerek bağlantı sağlanmıştır. Çekirdek yapıda oluşan olası boşluk kısımlar ise EVA sıcak eriyik yapıştırıcı yardımı ile kapatılmıştır. Şekil 3. 17'de kullanılan malzemelerin temel özellikleri verilmiştir.

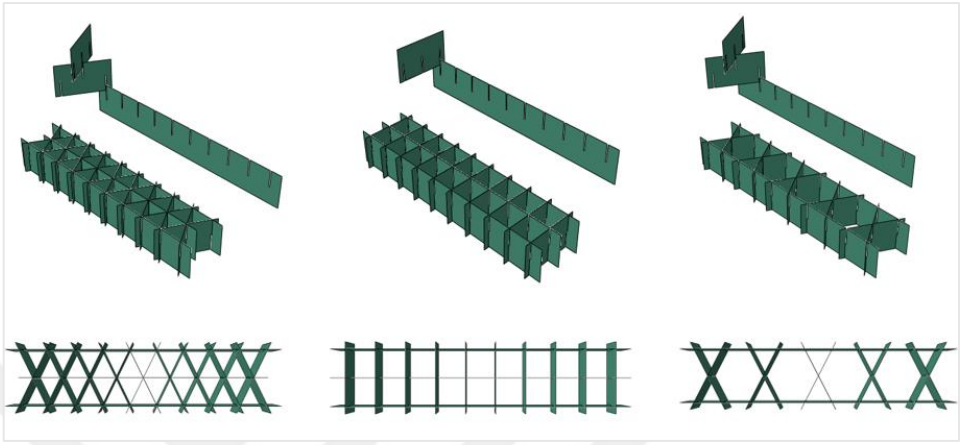


Şekil 3. 17. Kullanılan malzemelerin özellikleri

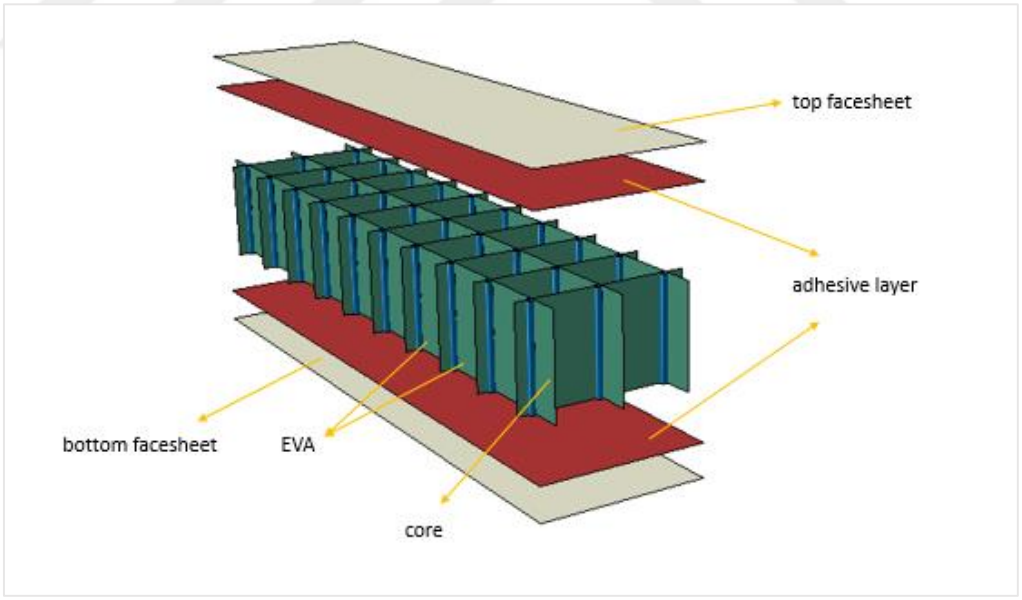
Numunelerin üretimi

Üretim için referans alınan makale, birlikte karıştırılmış keten lifi takviyeli polipropilen (PP) ve polilaktid (PLA) polimerlerine dayanan kare ve üçgen petek çekirdekli malzemelerin sıkıştırma özelliklerini araştırmaktadır. İlk testler, kompozitlerin çekme özelliklerinin işleme koşullarındaki değişikliklere duyarlılığını araştırmaya odaklanmıştır. Bunu takiben, basit bir kanal açma tekniği kullanılarak bir dizi üçgen ve kare petek yapısı üretilmektedir. Bu yapılar, yarı statik gerinim oranlarında sıkıştırma altında test edilmektedir. Mukavemetleri ve spesifik enerji sönümleme özellikleri belirlenmektedir. Son olarak, bu doğal elyaf esaslı çekirdek malzemelerin mukavemetini, enerji soğurma özelliklerini, burkulma davranışını ve arıza modlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için bir sonlu eleman analizi yapılmıştır (Zuhri, Guan, and Cantwell 2014).

Bu makaledeki üretim yönteminden ilham alınarak çekirdek yapılar, Şekil 3.18'deki gibi istenilen ölçülerde kesilerek üzerlerine kanal açılan parçalar manuel olarak birleştirilerek oluşturulmuştur. Üç farklı geometride oluşturulan çekirdek yapılar yüzey plakaları ile birleştirilerek sandviç yapı elde edilmiştir (Şekil 3.19).

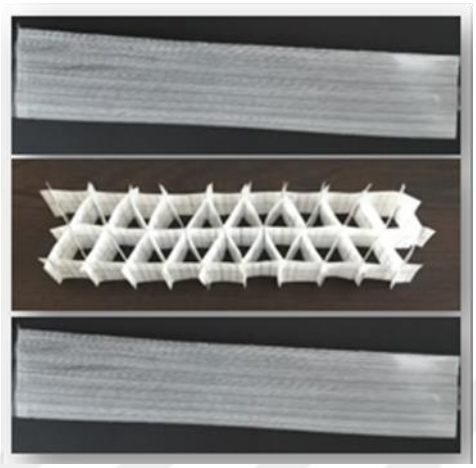


Şekil 3. 18. Çekirdek yapı üretim metodu

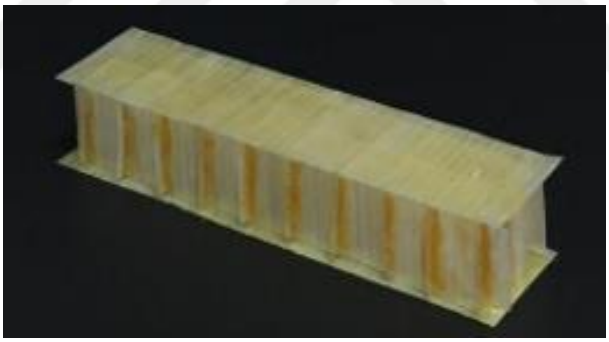


Şekil 3. 19. Kompozit sandviç malzeme üretim metodu

Şekil 3.20'de üretilmiş eşkenar üçgen geometrisine sahip çekirdek yapı gösterilmiştir. Alt ve üst yüzeylerin çekirdek yapıya epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesiyle hazırlanan sandviç yapı ise Şekil 3.21'deki gibidir.

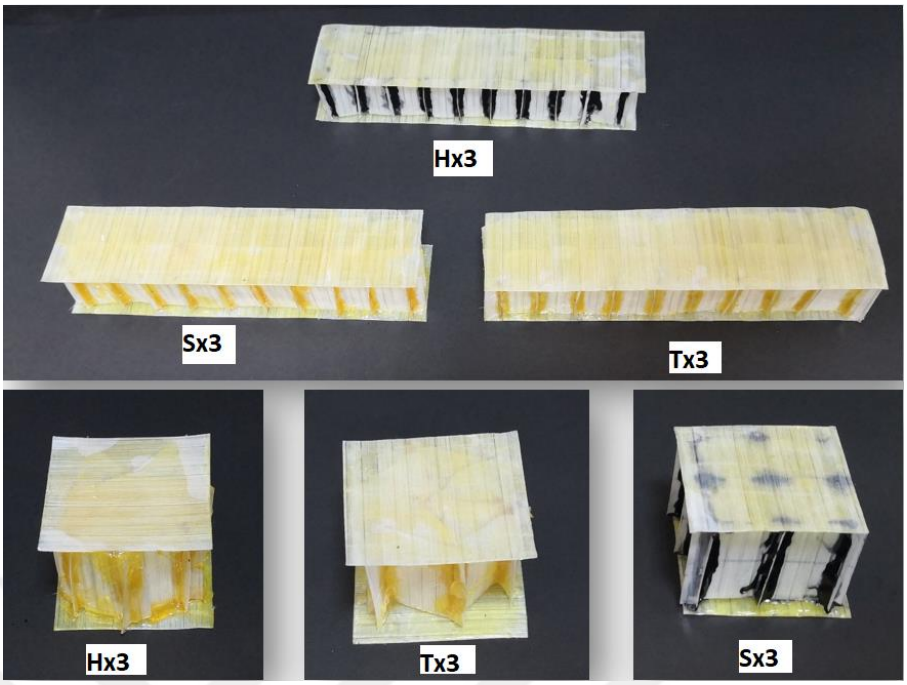


Şekil 3. 20. Hazırlanan çekirdek yapı ve alt-üst yüzeyler



Şekil 3. 21. Üretilen sandviç numunesi

Kompozit sandviç yapılara bası ve üç nokta eğilme testleri uygulanacağı için üç ayrı çekirdek geometrisine sahip numunelerden her test için üçer tane hazırlanmıştır (Şekil 3. 22). Testler sonucunda elde edilen veriler birim ağırlık başına hesaplanacağı için test öncesinde üretilen tüm numunelerin ağırlıkları ölçülerek Tablo 3.1'deki gibi ortalama değerleri not edilmiştir. Tüm üç nokta eğilme ve bası testleri 5 mm/dk hızla gerçekleştirilerek kuvvet-deplasman grafikleri alınmıştır.



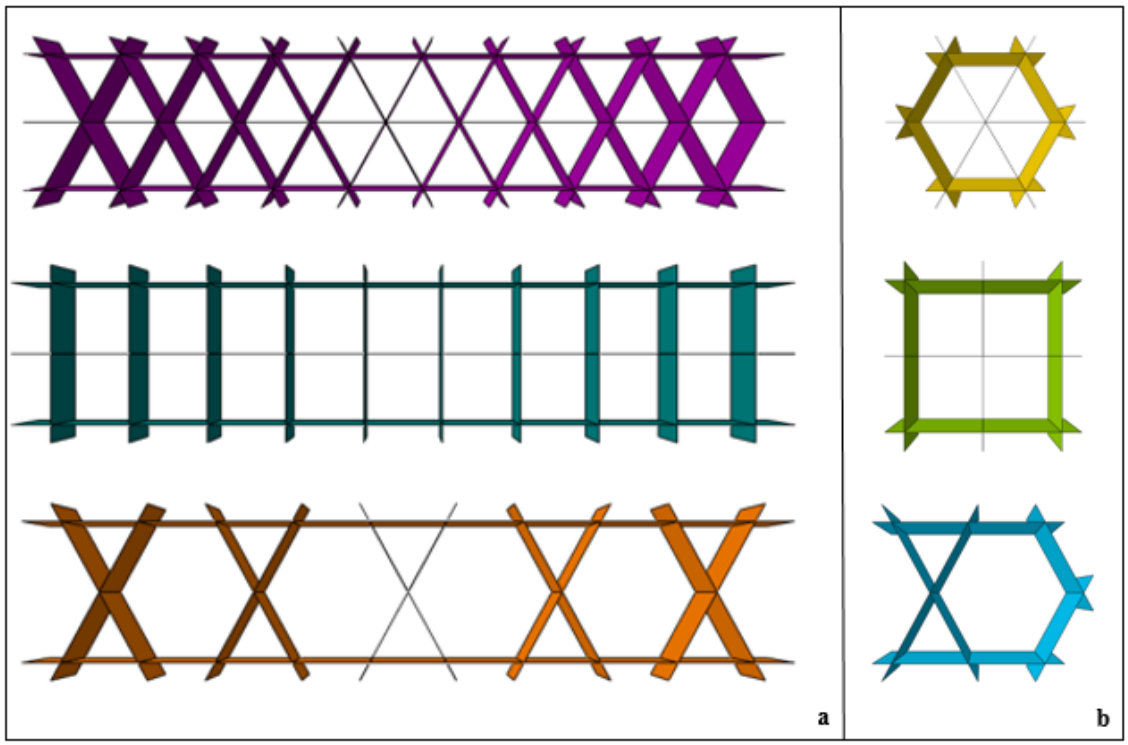
Şekil 3. 22. Üretilen üç nokta eğilme ve bası testi numuneleri

Çizelge 3. 2. Çekirdek yapılarına göre numune ağırlık ortalama değerleri

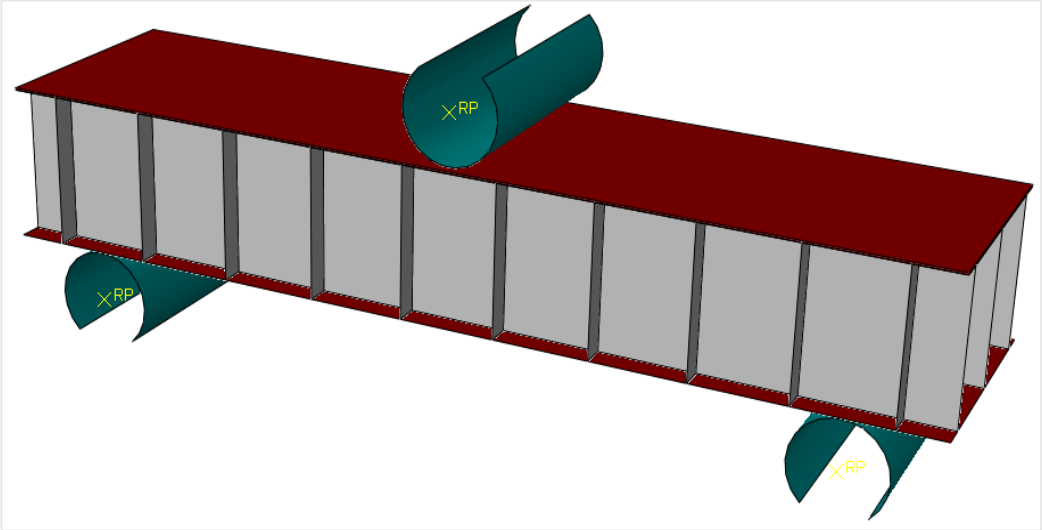
	Numune Boyutları (mm x mm x mm)	**Altıgen Çekirdek Yapı Ağırlık Ortalaması (g)**	**Kare Çekirdek Yapı Ağırlık Ortalaması (g)**	**Üçgen Çekirdek Yapı Ağırlık Ortalaması (g)**
Üç Nokta Eğilme Testi Numunesi	200 x 50 x 30	37,3	42,1	49,7
Bası Testi Numunesi	50 x 50 x 30	11,1	11,5	12,0

3. 3. Belirlenen Çekirdek Geometrilerinin Sonlu Elemanlar Analizleri

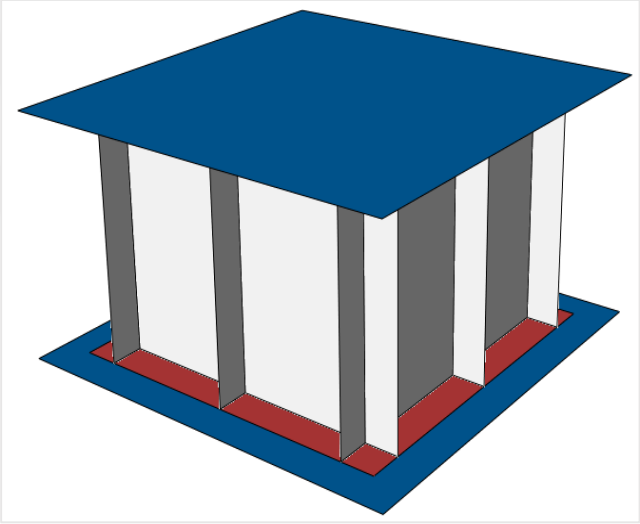
Belirlenen çekirdek geometrilerinin dayanım karşılaştırmalarını yapmak için sonlu elemanlar programı ABAQUS kullanılmıştır. Dinamik olarak gerçekleştirilen analizlerde ilk olarak çekirdek geometrileri oluşturulmuştur (Şekil 3.23). Üç nokta eğilme analizi için rijit silindirik yapılar oluşturularak çekirdek ve alt-üst plakalarla Şekil 3.24'deki gibi birleştirilmiştir. Bası testi numuneleri ise alt-üst plakalarla birlikte Şekil 3.25'deki gibi rijit plakalar birleştirilmiştir.



Şekil 3. 23. Testler için hazırlanan numunelerin çekirdek geometrileri
a) üç nokta eğilme testi numuneleri, b) bası testi numuneleri



Şekil 3. 24. Üç nokta eğilme testi numunesi



Şekil 3. 25. Bası testi numunesi

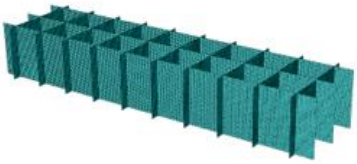
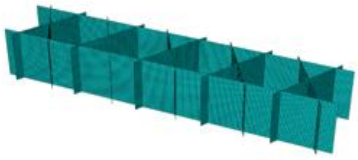
Çizelge 3. 3'deki malzeme özellikleri kullanılarak parçalara 'continuum shell' kompozit lamina tanımı yapılmıştır. Malzeme tanımı yapılan parçalara arasına genel kontak tanımı yapılarak etkileşimleri sağlanmıştır. Yapıştırıcı test karakterizasyonu sonucu elde edilen yapıştırıcı kırılma enerjileri çekirdek geometri ve alt-üst plakalar arasına girilerek yapıştırıcı özellikleri tanımlanmıştır.

Çizelge 3. 3. Kompozit malzeme özellikleri

ÖZELLİK	DEĞER	BİRİM
Cam içeriği	70	wt%
Cam içeriği	45	vol%
Yoğunluk	1,67	g/cm^3
Kalınlık	0,24	mm
Bölgesel Ağırlık	400,73	g/cm^2
Çekme Modülü 0º	37	GPa
Spesifik Modül 0º	22,16	GPa
Çekme Mukavemeti 0º	948	MPa
Spesifik Mukavemet 0º	567,76	MPa
Akma Uzaması 0º	2,56	%
Kopma Uzaması 0º	3,40	%
Çekme Modülü 90º	4,50	GPa
Çekme Mukavemeti 90º	23,70	MPa
Kopma Uzaması 0º	0,79	%
Basma Mukavemeti 0º	456	MPa
Basma Mukavemeti 90º	64	MPa
Kayma Modülü	1610	MPa
Kayma Mukavemeti	44.90	MPa
Lineer Kayma Mukavemeti	36,50	MPa

Testler için alt rijit destek ve plakalara ankastre tanımı yapılarak hareket her yönde engellenmiştir. Üst rijit plakalara ise saniyede 1000 mm olacak şekilde bir hız değeri girilerek hareketin sadece düşey yönde olması sağlanmıştır.

Ağ yapısı ‘quadratic mesh’ seçilmiştir ve eleman boyutu 1 mm olacak şekilde her bir parçanın ağ yapısı oluşturulmuştur. Çekirdek geometrileri için ağ yapısı sonucu oluşan eleman sayıları Şekil 3.26’de gösterilmiştir.

ÜÇ NOKTA EĞİLME TESTİ	ELEMAN SAYISI	BASI TESTİ	ELEMAN SAYISI
	Alt- Üst Plakalar: **10000 eleman** Rijit Destekler: **600 eleman** Çekirdek Geometrisi: **46500 eleman**		Alt- Üst Plakalar: **2500 eleman** Rijit Plakalar: **900 eleman** Çekirdek Geometrisi: **9900 eleman**
	Alt- Üst Plakalar: **10000 eleman** Rijit Destekler: **600 eleman** Çekirdek Geometrisi: **33000 eleman**		Alt- Üst Plakalar: **2500 eleman** Rijit Plakalar: **900 eleman** Çekirdek Geometrisi: **9000 eleman**
	Alt- Üst Plakalar: **10000 eleman** Rijit Destekler: **600 eleman** Çekirdek Geometrisi: **27000 eleman**		Alt- Üst Plakalar: **2500 eleman** Rijit Plakalar: **900 eleman** Çekirdek Geometrisi: **7800 eleman**

Şekil 3. 26. Çekirdek geometrileri için ağ yapısı sonucu oluşan eleman sayıları

4. BULGULAR

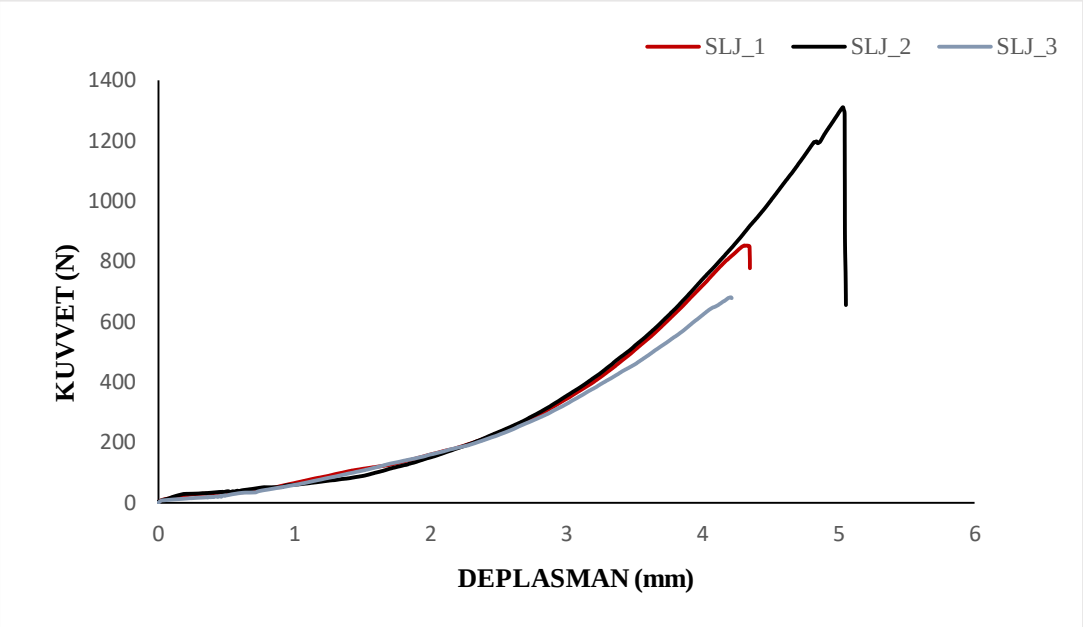
4.1. Cohesive Zone Testleri Sonuçları

4.1.1. SLJ testi sonuçları



Şekil 4. 1. SLJ testi sonrası numuneler

İlk numunenin testi sırasında çekme cihazı maxsimum kuvvetin %50 sine geldiğinde testi durdurması yönünde ayarlanmıştır ve bu sebeple tam bir kopma sağlanamamıştır. İkinci numune ise yapıştırıcıdan değil de cam elyaftan ayrılmıştır. Bunun sonucu olarak yapışmanın mükemmel olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Üçüncü numune ise tam olarak çekilen parçanın yüzeyinden ayrılmıştır (Şekil 4.1). Test sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 4.2'deki gibidir.



Şekil 4. 2. SLJ testi sonucu oluşan kuvvet - deplasman grafiği

Kuvvet – Deplasman grafiği kullanılarak maksimum kuvvet değerleri bulunmuştur. Üçüncü numune için test yüzde elli de durdurulduğu için maksimum alınan değer iki ile çarpılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama kısmında belirtilen formüller kullanılarak numunelerde oluşan kayma gerilmeleri Çizelge 4.1'deki gibi hesaplanmıştır:

Çizelge 4. 1. Test sonucu hesaplanan kayma gerilmeleri

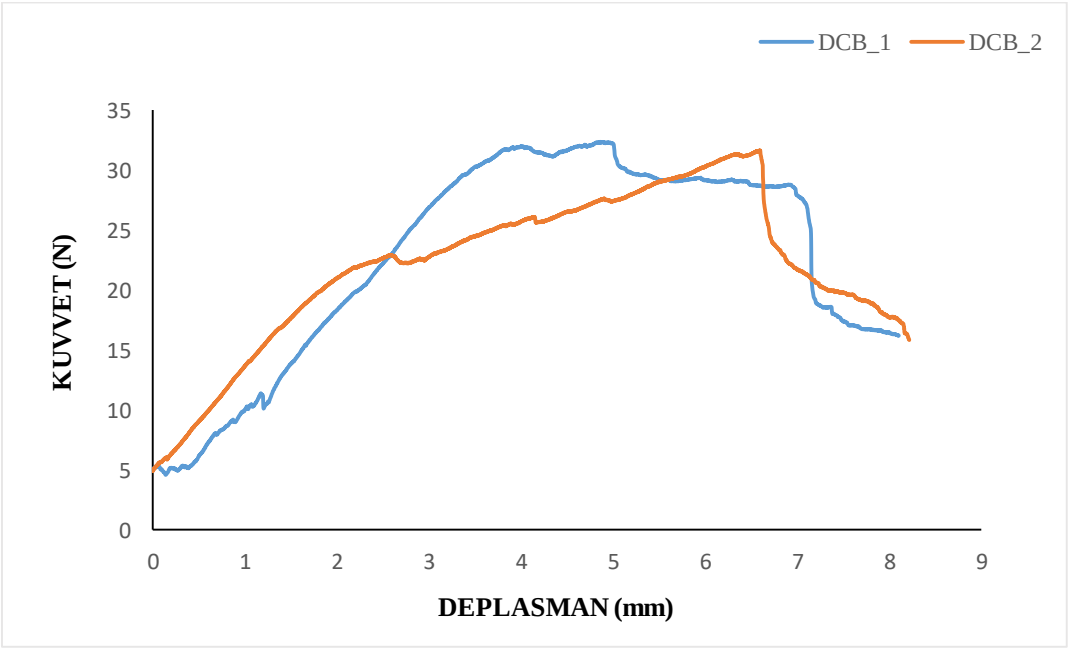
	Maksimum Kuvvet (N)	**Oluşan Kayma Gerilmesi (MPa)**
SLJ_1	850,289	0.680
SLJ_2	1308,676	1.047
SLJ_3	1359,44	1.087

4.1.2. DCB testi sonuçları

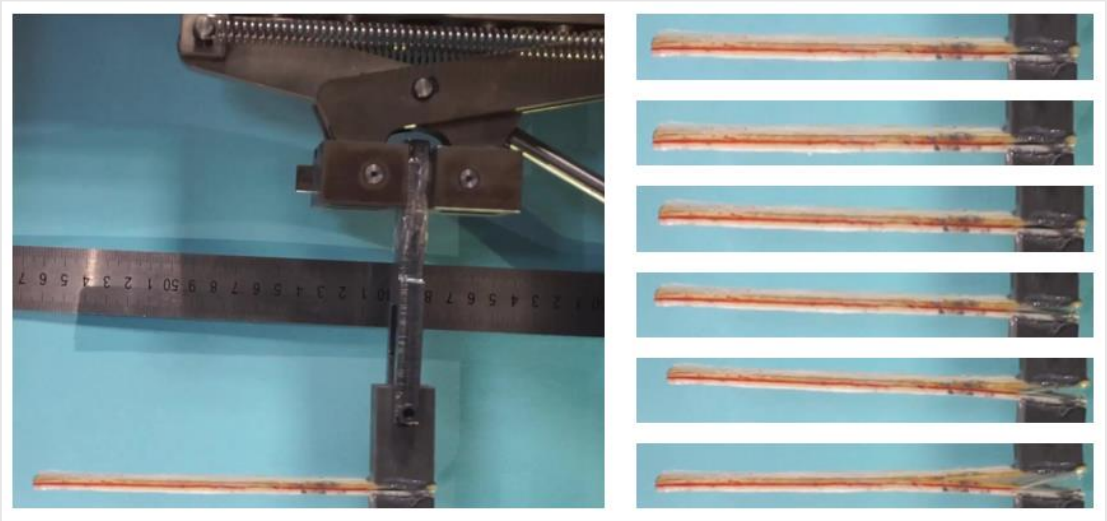
Test sonucunda numuneler incelendiğinde oluşan ayrılmanın SLJ testinde olduğu gibi yapıştırılan malzemeden olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.3). Üç adet üretilen DCB numunelerinden bir tanesi öncesinde hasara uğradığı için teste tabi tutulmamıştır.



Şekil 4. 3. DCB testi sonrası numunede oluşan hasar



Şekil 4. 4. DCB testi sonrası oluşan kuvvet - deplasman grafiği



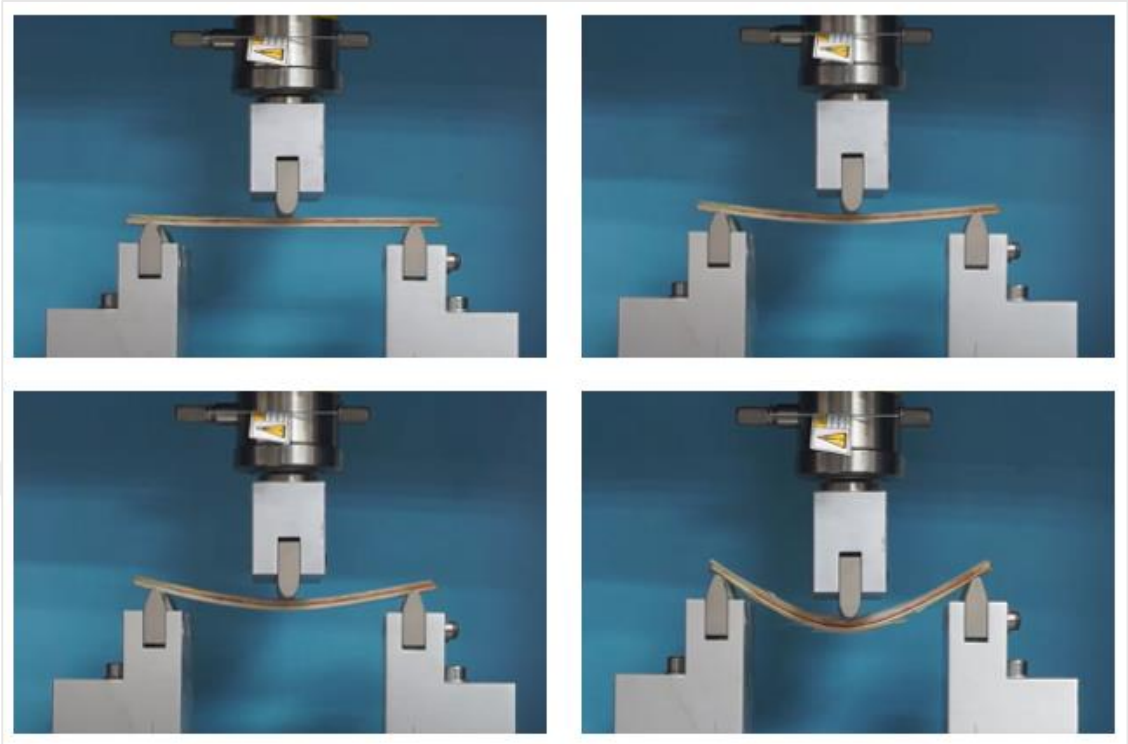
Şekil 4. 5. DCB testi sırasında video yardımıyla elde edilen hasar ilerleme görüntüleri

Test sırasında alınan videolar uygun propgram ile saniyede bir fotoğraf olacak şekilde framelere ayrılmıştır. Video kaydı sonucunda gözlemlenen hasar ilerlemesi Şekil 4.5'de verilmiştir. Bu sayede çatlak uzunlukları ve Şekil 4.4'deki kuvvet-deplasman grafiğinden bulunan maksimum kuvvet değerleri ile mod I kırılma enerjileri Çizelge 4.2'deki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 2. Test sonucu hesaplanan mod I kırılma enerjileri

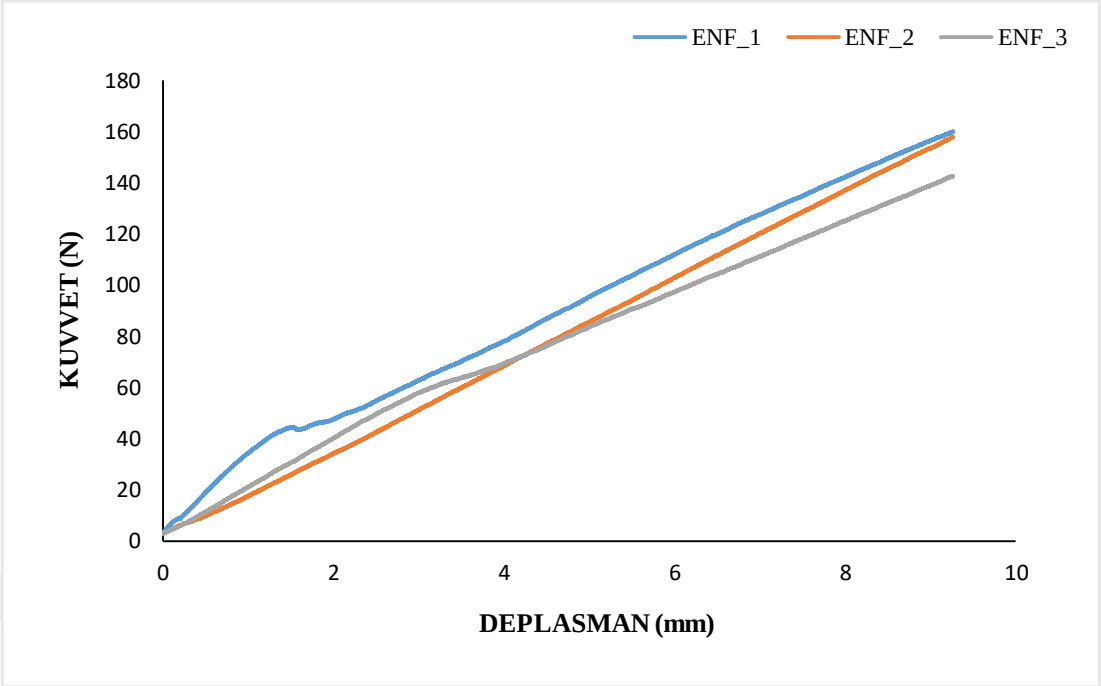
	Çatlak Uzunluğu (mm)	**Maksimum Kuvvet (N)**	**Mod I Kırılma Enerjisi (N/mm)**
DCB_1	70	32,345	0,181
DCB_2	68	31,696	0,192

4.1.3. ENF testi sonuçları



Şekil 4. 6. ENF testi sırasında video yardımıyla elde edilen hasar ilerleme görüntüleri

ENF testi sonucunda Şekil 4.6'da görüldüğü gibi video görüntüleri sayesinde belirgin olmasa dahi yapıştırıcı kısımdan bir çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. Çatlak boyu ölçümleri yapılarak Şekil 4.7'den alının kuvvet değerlerine göre mod II kırılma enerjileri Çizelge 4.3'deki gibi hesaplanmıştır.



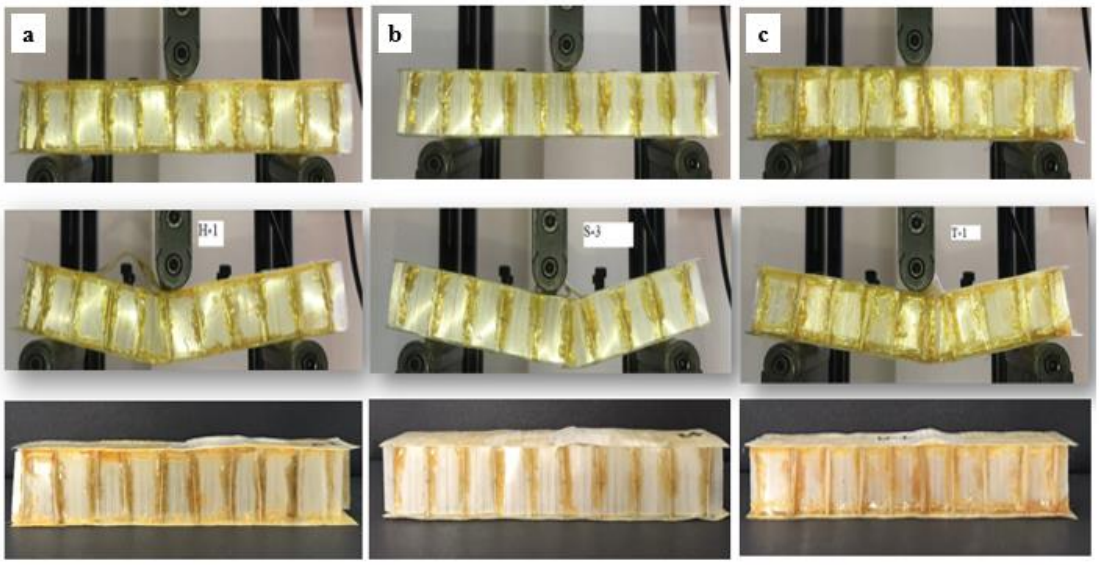
Şekil 4. 7. ENF testi sonrası oluşan kuvvet - deplasman grafiği

Çizelge 4. 3. Test sonucunda hesaplanan mod II kırılma enerjileri

	Çatlak Uzunluğu (mm)	**Maksimum Kuvvet (N)**	**Mod II Kırılma Enerjisi (N/mm)**
ENF_1	100	160,0424	0,77
ENF_2	70	157,9682	0,37
ENF_3	50	142,7174	0,15

4.2. Üç Nokta Eğilme Testi Ve Sonuçları

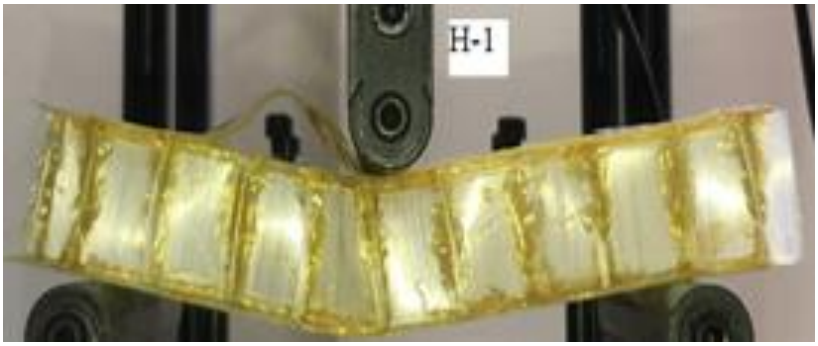
5 mm/dk hızla gerçekleştirilen üç nokta eğilme testi uygulama ve sonuçları Şekil 4.8'deki gibidir.



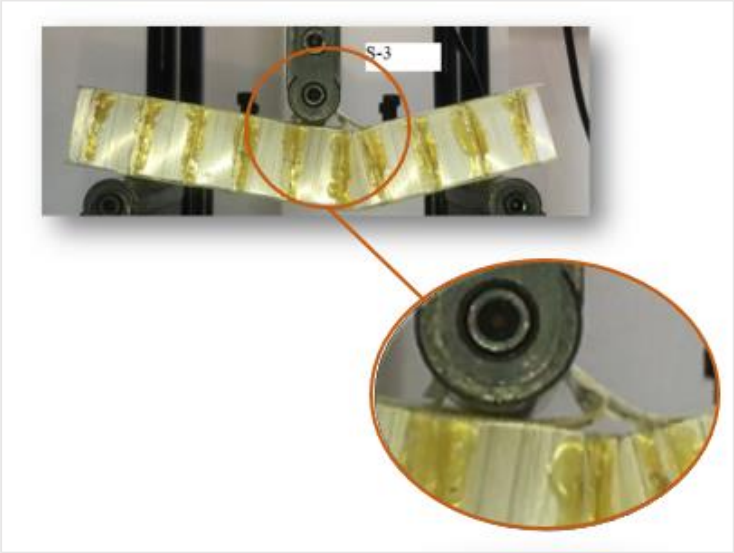
Şekil 4. 8. Üç nokta eğilme testi uygulaması

a) altıgen çekirdek yapı, b) kare çekirdek yapı, c) üçgen çekirdek yapı

Malzeme üretimi sırasında yapılan elyaf yönü hatasından dolayı malzemede Şekil 4.9 ve 4.10'da görüldüğü gibi dalgalanma ve kuvvet doğrultusunda kırılma gözlemlenmiştir. Ancak yine de yapılan test çekirdek yapılarının dayanımı hakkında bize bilgi verebilmektedir.

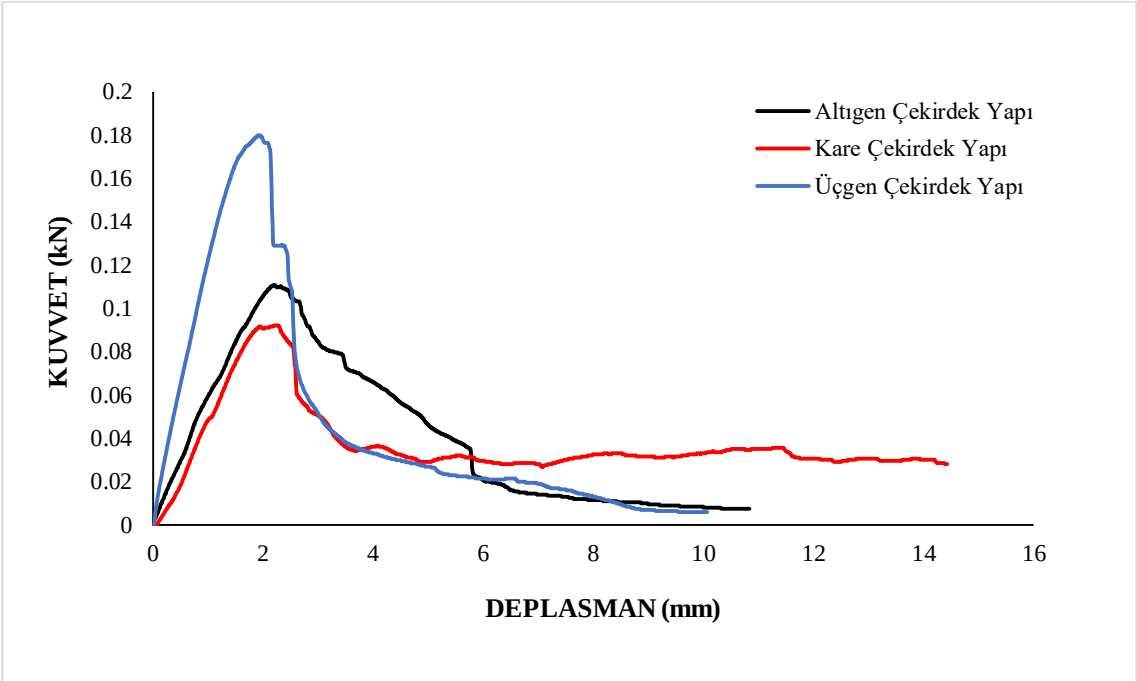


Şekil 4. 9. Numunede oluşan dalgalanma hasarı

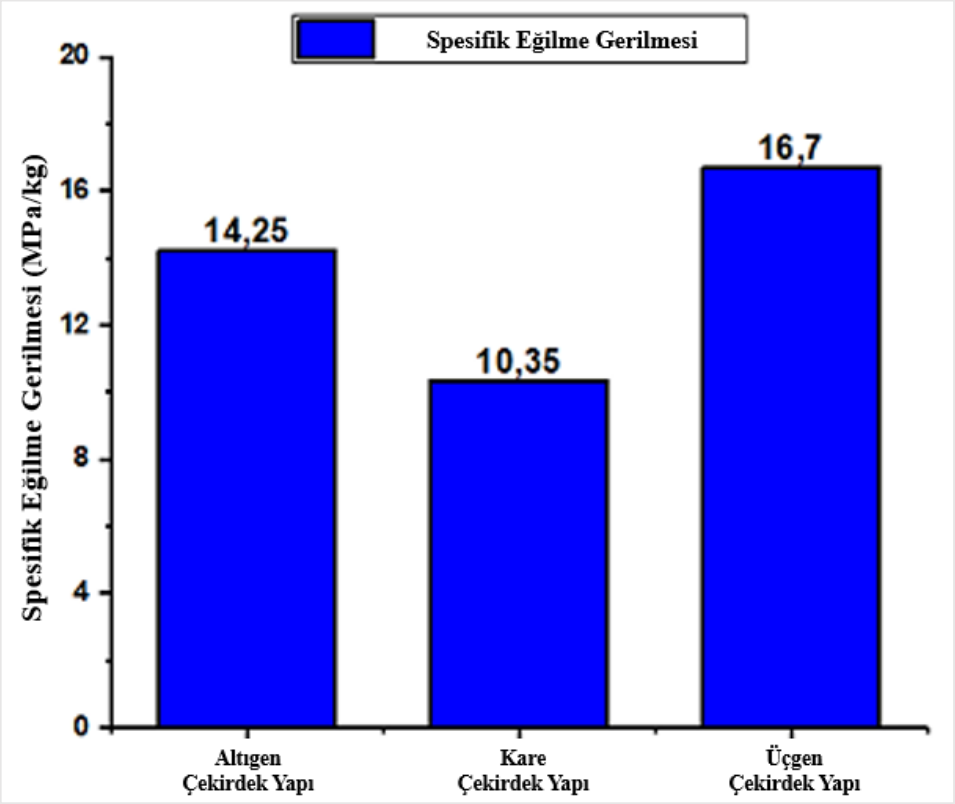


Şekil 4. 10. Numunede oluşan kırılma hasarı

Çekirdek geometrileri için yapılan testler sonucunda oluşan kuvvet- deplasman grafikleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.12'de ise hesaplanan spesifik eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 4. 11. Çekirdek yapılarının üç nokta eğilme testi sonucu oluşan kuvvet - deplasman grafiği



Şekil 4. 12. Çekirdek yapılarının üç nokta eğilme testi sonucu karşılaştırılması

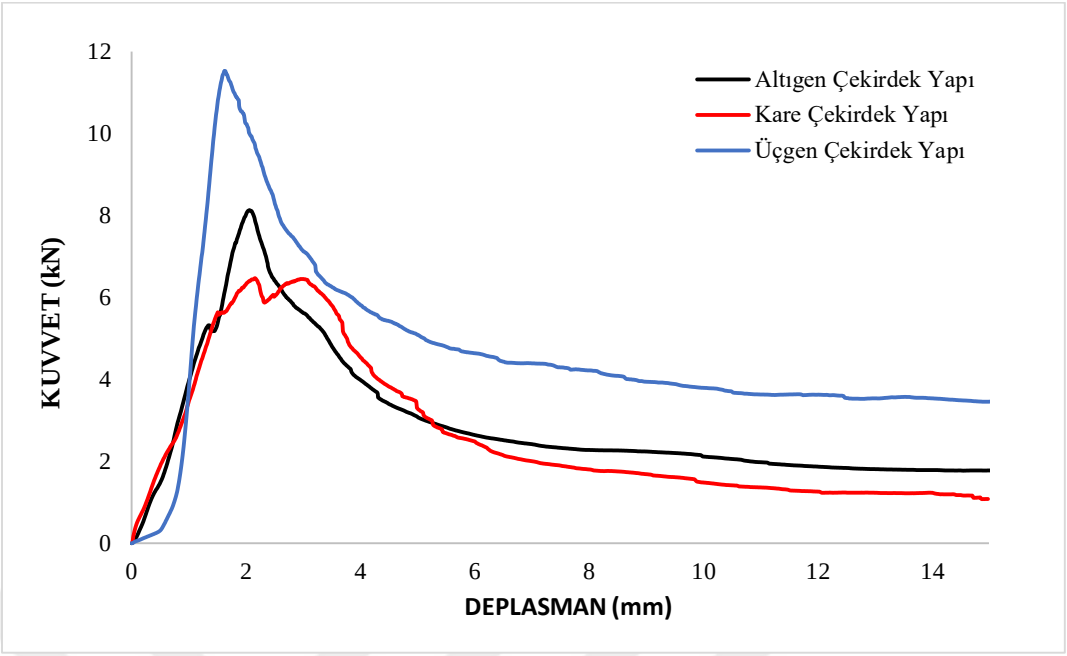
4.3. Bası Testi Ve Sonuçları

Gerçekleştirilen bası testlerinin çekirdek geometrilerine göre önce ve sonrasına ait görseller Şekil 4.13'de verilmiştir.

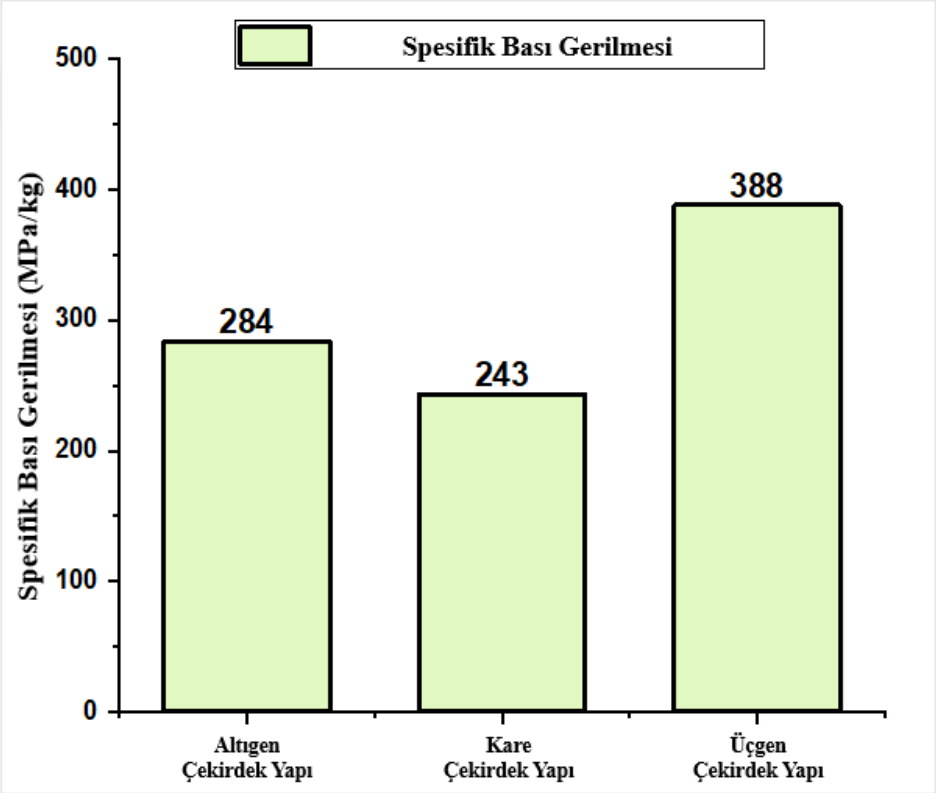
	Bası Testi Öncesi	Bası Testi Sırasında	Bası Testi Sonrası
Altıgen Çekirdek Geometrisi			
Kare Çekirdek Geometrisi			
Üçgen Çekirdek Geometrisi			

Şekil 4. 13. Üç çekirdek geometrisi için bası testi numuneleri

Üç nokta eğilme testlerinde olduğu gibi bası testlerinin sonuçlarında da kuvvet-deplasman grafikleri alınmıştır. Üç çekirdek geometrisi için kuvvet- deplasman grafiği Şekil 4.14'de verilmiştir. Spesifik bası gerilmeler ise hesaplanarak Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 14. Çekirdek yapılarının bası testi sonucu oluşan kuvvet - deplasman grafiği

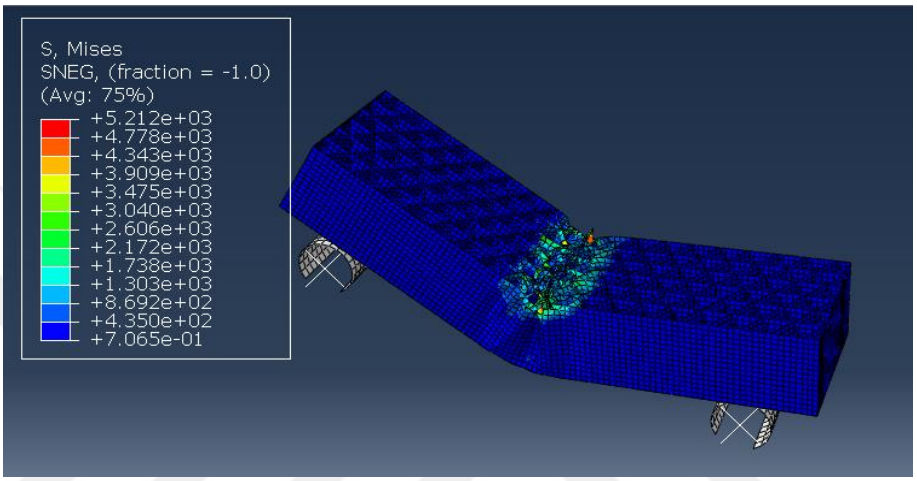


Şekil 4. 15. Çekirdek yapılarının bası testi sonucu karşılaştırılması

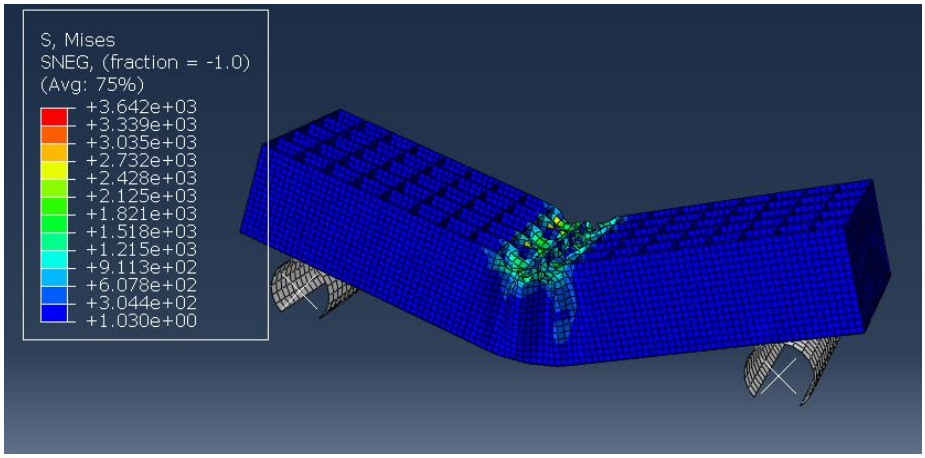
4.4. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

4.4.1. Üç nokta eğilme analizi sonuçları

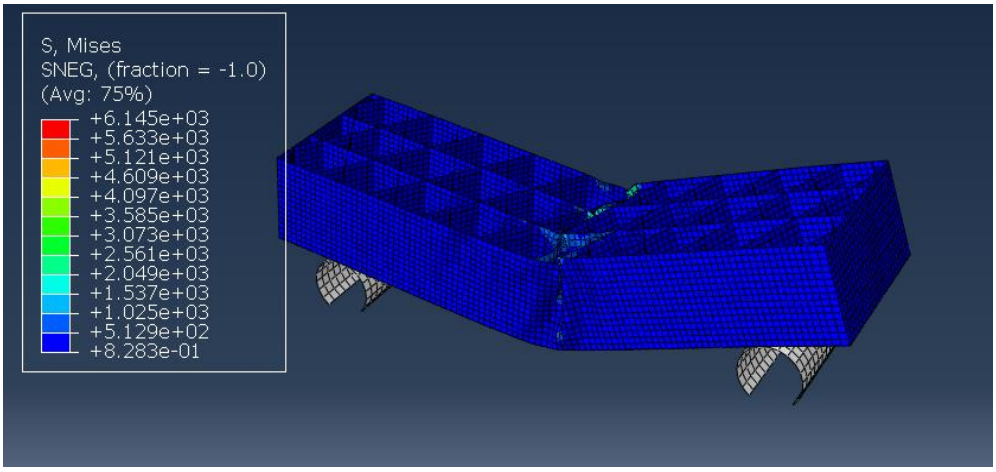
Saniyede 1000 mm hızla yapılan üç nokta eğilme dinamik analiz sonuçları her çekirdek geometrisi için Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 16. Üçgen çekirdek geometrisine sahip numunenin üç nokta eğilme analizi sonucu



Şekil 4. 17. Kare çekirdek geometrisine sahip numunenin üç nokta eğilme analizi sonucu



Şekil 4. 18. Altıgen çekirdek geometrisine sahip numunenin üç nokta eğilme analizi sonucu

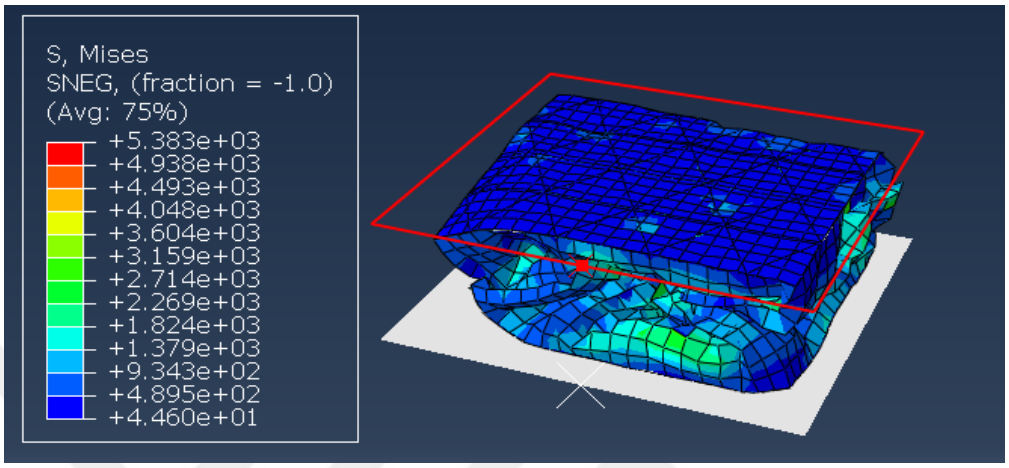
Çekirdek geometrileri için oluşan maksimum gerilme değeri toplam kütle değerlerine bölünerek birim kütle gerilmeleri elde edilmiştir. Geometrilere ait birim kütle gerilmesi Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4. 4. Üç nokta eğilme testi analiz sonuçlarının çekirdek geometrileri için karşılaştırılması

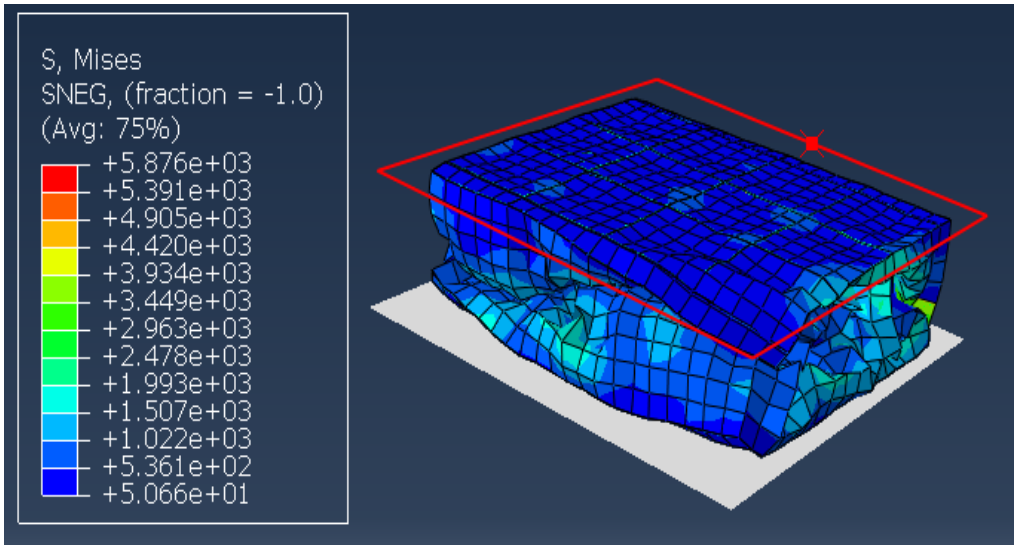
Çekirdek Geometrisi	Maksimum Gerilme (MPa)	Toplam Kütle (Kg)	Birim Kütle Gerilmesi
Üçgen	$5{,}212.10^{3}$	$5{,}522.10^{-2}$	$0{,}944.10^{5}$
Kare	$3{,}642.10^{3}$	$3{,}500.10^{-2}$	$1{,}041.10^{5}$
Altıgen	$6{,}145.10^{3}$	$3{,}364.10^{-2}$	$1{,}827.10^{5}$

4.4.2. Bası analizi sonuçları

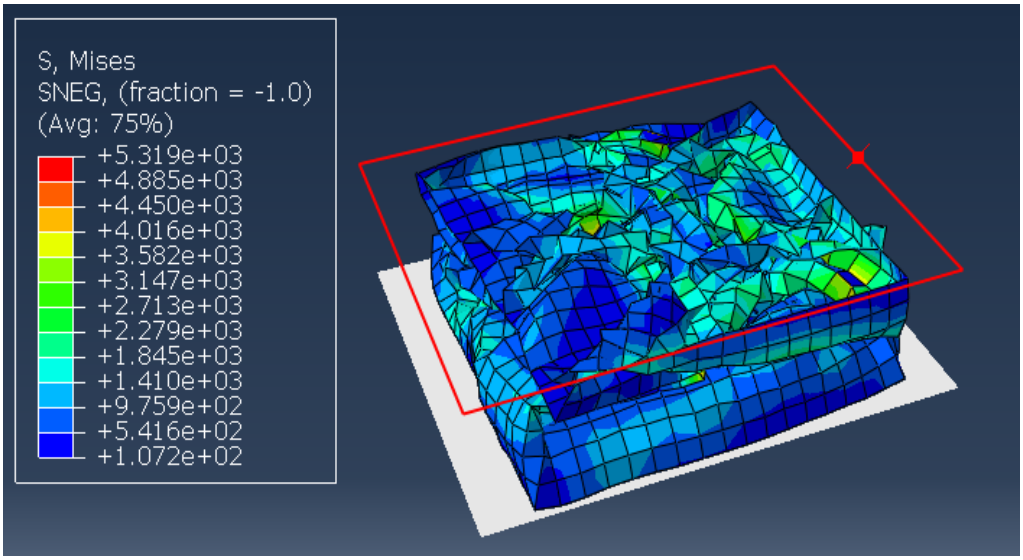
Saniyede 1000 mm hızla yapılan bası testi dinamik analiz sonuçları her çekirdek geometrisi için Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4. 19. Üçgen çekirdek geometrisine sahip numunenin bası testi analiz sonucu



Şekil 4. 20. Kare çekirdek geometrisine sahip numunenin bası testi analiz sonucu



Şekil 4. 21. Altıgen çekirdek geometrisine sahip numunenin bası testi analiz sonucu

Bası testi analizlerinin sonuçlarından okunan maksimum gerilme değerleri toplam kütleye bölünerek birim kütle gerilmeleri elde edilmiştir. Çekirdek geometrileri için hesaplanan birim kütle gerilmeleri Çizelge 4.5'da verilmiştir.

Çizelge 4. 5. Bası testi analiz sonuçlarının çekirdek geometrileri için karşılaştırılması

Çekirdek Geometrisi	Maksimum Gerilme (MPa)	Toplam Kütle (Kg)	Birim Kütle Gerilmesi
Üçgen	$5{,}383.10^{3}$	$10{,}538.10^{-3}$	$0{,}511.10^{6}$
Kare	$5{,}876.10^{3}$	$7{,}718.10^{-3}$	$0{,}761.10^{6}$
Altıgen	$5{,}319.10^{3}$	$6{,}698.10^{-3}$	$0{,}794.10^{6}$

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen termoplastik kompozit malzemeden üç farklı çekirdek geometrisine sahip sandviç malzemeler üretilmiştir. Bu kompozit sandviç malzemelere üç nokta eğilme ve bası testleri yapılmıştır. Testler sonucunda farklı çekirdek geometrilerine için sandviç yapının dayanımları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Üretim yapılırken sandviç yapılar arasındaki tek farkın çekirdek geometrileri olması sağlanarak diğer özellikler (alt-üst plaka boyutları, kullanılan yapıştırıcılar ve miktarları vb.) kıstas olmaktan çıkarılmıştır. Böylece çekirdek geometrilerinden kaynaklanan farklılıkların daha rahat kıyaslanması sağlanmıştır.

Üç nokta eğilme ve bası testleri sonucunda oluşan nihai gerilmeler uygun standartlar kullanılarak hesaplanmıştır. Çekirdek yapılara ait nihai gerilmeler Çizelge 5.1'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en fazla eğilme ve bası dayanımı gösteren çekirdek geometrisinin üçgen olduğu belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçları da incelendiğinde dayanım özelliğinin en fazla üçgen çekirdek geometrisinde çıktığı doğrulanmıştır.

Çizelge 5. 1. Çekirdek yapılarının karşılaştırılması

	ASTM D790	**ASTM C365**	**ASTM C393**	**ASTM C393**
Çekirdek Geometrisi	**Nihai (Spesifik) Eğilme Gerilmesi**	**Nihai (Spesifik) Bası Gerilmesi**	**Nihai (Spesifik) Çekirdek Kayma Gerilmesi**	**Yüzey Gerilmesi**
	(MPa/kg)	**(MPa/kg)**	**(MPa)**	**(MPa)**
Altıgen	14,65	284,06	3,21	11,31
Kare	10,77	243,42	2,81	9,42
Üçgen	17,22	387,39	5,90	18,43

KAYNAKLAR

(Anonim, 2018). Nondestructive Bond Testing for Aircraft Composites. Erişim adresi: https://www.qualitymag.com/articles/94999-nondestructive-bond-testing-for-aircraft-composites.

Aksoylu, B. (2007). Kompozit Malzemelerde Elyaf Burkulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr

Asi, D. (2008). Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr

ASTM-C297. (2020). Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions 1. doi: 10.1520/C0297.

ASTM-C364. (2007). Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich. doi: 10.1520/C0364.

ASTM-C365. (2003). Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores 1. doi: 10.1520/C0365.

ASTM-C393. (2006). Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. doi: 10.1520/C0393.

ASTM-D1781. (2008). Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives. doi: 10.1520/D1781-98R12.2.

Banea, M. D. ve Da Silva L. F. M. (2008). Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: An Overview. doi: 10.1243/14644207JMDA219.

Baydar, D. G., Bekem A., Doğu M., Gemici Z. ve Ünal A. (2012). Production And Characterization Of Continuous E-Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites. Journal of Engineering and Natural Sciences. Erişim adresi: https://eds.yildiz.edu.tr/ArticleContent/Journal/sigma/Volumes/2012/Issues/2/YTUJENS-2012-30-2.385.pdf

Beşergil, B. (2016). Kompozitler. Erişim adresi: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/kompozitler_18.html

Carlsson, L. A., ve Kardomateas G. A. (2011). Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites. doi: 10.1007/978-1-4020-3225-7

İşlek, H. İ. (2020). Takviye Nedir?. Erişim adresi: http://kompozithayalleri.com/takviye-nedir/

Kassapoglou, C. (2013). Design And Analysis Of Composite Structures (2. bs.). [Adobe Acrobat Reader sürümü]. doi:10.1002/9780470972700

Kaya, A. İ. (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. Erişim adresi: https://abs.mehmetakif.edu.tr/upload/0186_1847_dosya.pdf

Özer, H. (2015). Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr

Paksoy, Ö. (2008). Plastik Enjeksiyon Prosesinde Elyaf Yönlenmesinin İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr

Şahin, S. (2015). Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Levhaların Şekillendirilmesi ve Karakterizasyonu (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr

Lucas, F. M., da Silva, Dillard, D. A., Blackman, B. ve Adams, R. D. (2012). Testing Adhesive Joints. Erişim adresi: <http://dnb.d-nb.de>.

Smith, W. F., Hashemi, J. ve Presuel-Moreno, F. (2019). Foundations of Materials Science and Engineering (6. bs.). [Adobe Acrobat Reader sürümü]. Erişim adresi: https://lccn.loc.gov/2017048596

Türkoğlu, İ. K. (2020). 3boyutlu Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Termoplastik Esaslı Ökzetik Çekirdek Geometrili Sandviç Yapıların Statik Ve Dinamik Yükler Altında Davranışının İncelenmesi (Doktora tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr

Yerleşen, U. (2015). Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Poliamid 6 Levhaların Şekillendirilmesi Ve Karakterizasyonu (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr

Zuhri, M. Y. M., Guan, Z. W. ve Cantwell, W. J. (2014). The Mechanical Properties Of Natural Fibre Based Honeycomb Core Materials. Erişim adresi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.016