



T.C.  
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM ELYAF İPLİKLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ  
KÖPÜK ÇEKİRDEKLİ KOMPOZİT SANDVIÇ  
YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**HACI ÖMER AKDERE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**KAHRAMANMARAŞ 2024**

T.C.  
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM ELYAF İPLİKLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ  
KÖPÜK ÇEKİRDEKLİ KOMPOZİT SANDVIÇ  
YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**HACI ÖMER AKDERE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**KAHRAMANMARAŞ 2024**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hacı Ömer AKDERE

Bu çalışma KSÜ Bilimsel Araştırma Birimi (BAP Proje No: 2023/6-2 YLS) tarafından desteklenmiştir.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**CAM ELYAF İPLİKLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KÖPÜK ÇEKİRDEKLİ  
KOMPOZİT SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI  
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**Hacı Ömer AKDERE**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında çekirdek tabakanın dikilmesi yöntemiyle sandviç yapıların güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla 60 ve 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk ile 10 ve 20 mm kalınlıklıdaki polivinil klorür (PVC) köpük çekirdekler 300-600-1200 tex yoğunluklarındaki E-cam elyaf iplikler ile dikilmesinin ardından düz dokuma E-cam elyaf kumaşlar ve polimer epoksi reçine ile vakum torbalama tekniği uygulanarak kompozit sandviçler üretilmiştir. Güçlendirme uygulamasının farklı çekirdek yoğunlukları ve kalınlıklarına sahip sandviç yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri basma ve eğme testleri ile araştırılmıştır. Çekirdek malzemelerin dikilerek güçlendirildiği sandviç yapılarda cam elyaf iplik takviyelerin reçine ile kürlenmesi sayesinde rijit çubuklar olarak görev yaptığı ve alt ve üst yüzey tabakaların çekirdek yapıya daha güçlü tutunma sağladığı tespit edilmiştir. Basma yükleri altında güçlendirilmemiş referans numunelere kıyasla plastik deformasyon bölgelerindeki kuvvetlerde birden fazla tepe noktalar elde edilmiş ve böylece basma mukavemet değerlerinde %18,48'ten %102,61'e kadar artış sağlanmıştır. Eğme yükleri altında referans sandviçlerde tipik olarak görülen tabakalar arası ayrılmanın önlenmiş ve yüzeyler arasında çekirdek yapının kayma gerilmelerine daha fazla direnç göstermesi sayesinde daha yüksek değerlerde kuvvet transferinin sağlandığı tespit edilmiştir. Dikişleme uygulaması sayesinde yapıların eğme yük taşıma kapasitelerinde %16,36'dan %53,90'a kadar artış sağlanmıştır. Deneysel parametrelerinin sandviç mekanik özellikleri üzerindeki bağımsız ve etkileşimli etkileri iki yönlü varyans analizleri (ANOVA) ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik testler sonrasında sandviç yapıların hasar durumları makro ve mikro görüntülemeler ile incelenerek hasar mekanizmaları ortaya çıkarılmıştır. Sonuç olarak ağırlık kriterinin etkili olduğu mühendislik uygulamalarında özellikle düşük yoğunluklu köpük çekirdeklerin güçlendirilmesiyle üstün mekanik avantajlar sunan sandviç yapılar uygun maliyet-etkin bir çözüm olarak önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sandviç yapılar, çekirdek dikişleme, güçlendirme, basma özellikleri, eğme özellikleri, hasar mekanizmaları

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Haziran / 2024

Danışman: Doç. Dr. Çağrı UZAY

Sayfa Sayısı: 86

**INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF FOAM CORE  
COMPOSITE SANDWICH STRUCTURES REINFORCED WITH GLASS FIBER  
YARNS**

**(MSc. THESIS)**

**Hacı Ömer AKDERE**

**ABSTRACT**

In this thesis, the strengthening of sandwich structures by stitching the core layer was aimed. For this purpose, composite sandwiches were produced by stitching polyvinyl chloride (PVC) foam cores with densities of 60 and 80 kg/m<sup>3</sup> and thicknesses of 10 and 20 mm using E-glass fiber yarns of 300-600-1200 tex densities, followed by the use of plain woven E-glass fiber fabrics and polymer epoxy resin by applying the vacuum bagging manufacturing technique. The effects of stitching on the mechanical properties of sandwich structures with different core densities and thicknesses were investigated through compression and flexural tests. In the sandwich structures strengthened by stitching the core, the glass fiber yarn reinforcements acted as rigid rods due to their curing with resin, and provided stronger bonding of the top and bottom face sheets to the core. Under compression loads, compared to the no stitched reference specimens, more than one peak points in the force were obtained in the plastic deformation regions, resulting in higher compression strength values between the increment rates of 18.48% and 102.61%. Under flexural forces, the delamination typically seen in the reference sandwiches was prevented, and higher load transfer between the face sheets was achieved due to increased resistance of stitched cores to shear stresses. The flexural load-bearing capacities of the stitching applied structures were increased between the rates of 16.36% and 53.90%. The individual and interactive effects of experimental parameters on the mechanical properties of the sandwiches were analyzed using two-way analysis of variance (ANOVA). After mechanical tests, the failure modes of the sandwich structures were examined through macro and micro monitoring to reveal the damage mechanisms. As a result, sandwich structures, especially with the strengthening of low-density foam cores, offering superior mechanical advantages were proposed as a cost-effective solution in engineering practices where weight criteria are critical.

**Keywords:** Sandwich structures, core stitching, strengthening, compression properties, flexural properties, failure mechanisms

Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering June / 2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Çağrı UZAY

Page number: 86

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında beni destekleyen, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyerek bana yol gösteren değerli hocam sayın Doç. Dr. Çağrı UZAY'a teőekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalıőmalarımda destek olan Arő. Gör. Yalın YAMAÇ hocam ile arkadaşlarım Yüksek Lisans öğrencisi Aziz Esad KABAĞÇI'ya ve Lisans öğrencisi Hakan BAYRAĞÇI'ya teşekkür ederim.

Tez çalıőmamı değerlendirerek katkıda bulunan ve tez savunmamda jüri üyesi olarak görev yapan Doç. Dr. Oęuz DOĞAN ve Dr. Öęr. Üyesi Mete Han BOZTEPE hocalarıma saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalıőmalarımda ihtiyaç duyduğum malzemeler ile test ve analizler için destek sağlayan KSÜ Rektörlüęü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Her fırsatta yanımda olan beni destekleyen eőim Ayőe Erdinç AKDERE' ye őükranlarımı sunarım.

Son olarak, bugünlere gelmemde her türlü maddi ve manevi desteklerini gördüğüm aileme teőekkürlerimi sunarım.

Hacı Ömer AKDERE

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Kompozit Malzemeler .....	3
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	4
1.2.1. Matris malzemesine göre kompozitlerin sınıflandırılması .....	4
1.2.2. Takviye türüne göre kompozitlerin sınıflandırılması .....	7
1.3. Sandviç Yapılar .....	8
1.4. Kompozit Malzemelerde Üretim Yöntemleri .....	12
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	18
2.1. Çeşitli Yüzey Tabaka ve Çekirdek Malzemelerden Meydana Gelen Sandviç Yapılar .....	18
2.2. Güçlendirilmiş Sandviç Yapılar .....	20
2.3. Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi .....	26
3. MATERYAL VE METOT .....	28
3.1. Materyal .....	28
3.2. Metot .....	29
3.2.1. Sandviç yapıların üretilmesi .....	29
3.2.2. Sandviç yapıların basma testleri .....	37
3.2.3. Sandviç yapıların eğme testleri .....	38
3.2.4. Mekanik test sonuçlarının değerlendirilmesi .....	39
3.2.5. Sandviç yapıların hasar analizi .....	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	41
4.1. Çekirdek Yapıları Güçlendirilmiş Sandviç Yapıların Basma Özellikleri .....	41
4.2. Çekirdek Yapıları Güçlendirilmiş Sandviç Yapıların Eğme Özellikleri .....	52
4.3. Mekanik Özelliklerden Elde Edilen Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi .....	60
4.4. Sandviç Yapıların Hasar İncelemesi .....	70

5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	76
KAYNAKÇA .....	79
ÖZ GEÇMİŞ.....	85



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin geleneksel monolitik malzemeler ile karşılaştırılması [8] .....	2
Şekil 1.2. Boeing 787 uçağında kullanılan kompozit malzemeler [9].....	2
Şekil 1.3. Kompozit malzeme yapısı .....	3
Şekil 1.4. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre kıyaslanması .....	5
Şekil 1.5. Kompozit malzemelerin takviye türüne göre sınıflandırılması [18] .....	7
Şekil 1.6. Sandviç yapı ve bileşenleri.....	9
Şekil 1.7. Sandviç çekirdek türleri, a) polimer köpük, b) kafes örgü, c) bal peteği, d) oluklu levha, d) alüminyum köpük, e) balsa ağacı .....	10
Şekil 1.8. Sandviç yapı ile I kiriş profilin kıyaslanması.....	10
Şekil 1.9. Havacılıkta sandviç kompozit uygulamaları [29] .....	11
Şekil 1.10. El yatırma yöntemi [14]. .....	13
Şekil 1.11. Püskürtmeli yerleştirme tekniğinin şematik gösterimi [31] .....	13
Şekil 1.12. Vakum torbalama yöntemi [32] .....	14
Şekil 1.13. Filament sarma işleminin şeması [34].....	15
Şekil 1.14. Vakum enjeksiyon yöntemi [32] .....	15
Şekil 1.15. Vakum infzyon şeması [32] .....	16
Şekil 1.16. Pultrüzyon yöntemi şeması [35].....	17
Şekil 1.17. Otoklav yöntemi [36] .....	17
Şekil 3.1. Çekirdek malzemesine 2,5 mm freze çakısı ile deliklerin açılması .....	30
Şekil 3.2. Çekirdek yapıya deliklerin açılması, a) 60 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu basma numunesi, b) 80 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu basma numunesi, c) 60 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu eğme numunesi, d) 80 kg/m <sup>3</sup> yoğunluklu eğme numunesi .....	31
Şekil 3.3. Çekirdek malzemelere dikişleme işleminin uygulanması, a) 60 kg/m <sup>3</sup> , b) 80 kg/m <sup>3</sup> , c) 60 kg/m <sup>3</sup> (gerçek plaka) .....	31
Şekil 3.4. Dikişleme uygulamasının süreç tasarımı, a) referans çekirdekli sandviç, b) Ø2,5 mm delikler açılmış çekirdek yapı, b) E-cam elyaflar ile dikişleme uygulanmış güçlendirilmiş çekirdek yapı .....	32

Şekil 3.5. Sandviç kompozit üretimi ve test numunelerinin elde edilmesi, a,b) Kalıp ayırıcı ile yüzey hazırlığı, c,d) laminasyon işlemi, e) rulo uygulaması, f) laminasyonun tamamlanması, g) delikli ayırıcı film yerleştirilmesi, h) vakum battaniyesi yerleştirilmesi, ı) vakum torbasının yerleştirilmesi, i) vakum altında kurlenme, j) eğme test numunesinin elde edilmesi, k) basma test numunesinin elde edilmesi	34
Şekil 3.6. Numunelerin kesitlerinden alınan stereomikroskop görüntüleri	37
Şekil 3.6. Sandviç numunelerin basma testleri	38
Şekil 3.7. Sandviç numunelerin eğme testi	38
Şekil 3.8. Sandviçlerin hasar analizinde kullanılan stereomikroskop	40
Şekil 4.1. K10.Y80 sandviç yapıların basma yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş	41
Şekil 4.2. K20.Y60 sandviç yapıların basma yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş	43
Şekil 4.3. K20.Y80 sandviç yapıların basma yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş	44
Şekil 4.4. K10.Y80 sandviç yapıların basma yükleri altında gerilme-birim şekil değişimi eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş	45
Şekil 4.5. K20.Y60 sandviç yapıların basma yükleri altında gerilme-birim şekil değişimi eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş	46
Şekil 4.6. K20.Y80 sandviç yapıların basma yükleri altında gerilme-birim şekil değişimi eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş	47
Şekil 4.7. Dikişleme parametrelerinin farklı yoğunluk ve kalınlıklardaki sandviç yapıların basma davranışlarına etkisinin karşılaştırılması, a) K10.Y80, b) K20.Y60, c) K20.Y80	48
Şekil 4.7. Güçlendirilmiş çekirdekli sandviç yapıların özgül basma mukavemet değerlerinin referans sandviçler ile kıyaslanması	51
Şekil 4.8. Dikiş iplik yoğunluğunun sandviç yapıların özgül basma yük taşıma kapasitesine etkisi	52
Şekil 4.9. K10.Y80 sandviç yapıların üç nokta eğme yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş	53

Şekil 4.10. K20.Y60 sandviç yapıların üç nokta eğme yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş.....	54
Şekil 4.11. K20.Y80 sandviç yapıların üç nokta eğme yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş.....	55
Şekil 4.12. Dikişleme parametrelerinin farklı yoğunluk ve kalınlıklardaki sandviç yapıların eğme davranışlarına etkisinin karşılaştırılması, a) K10.Y80, b) K20.Y60, c) K20.Y80 .....	56
Şekil 4.13. Güçlendirilmiş çekirdekli sandviç yapıların eğme yük taşıma kapasitelerinin referans sandviçler ile kıyaslanması .....	59
Şekil 4.15. Sandviç basma yük kapasitesinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre .....	67
Şekil 4.16. Sandviç eğme yük kapasitesinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre .....	68
Şekil 4.17. Sandviç basma mukavemetinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre .....	68
Şekil 4.18. Sandviç çekirdek kayma gerilmesinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre .....	68
Şekil 4.19. Sandviç yüzey tabaka gerilmesinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre .....	69
Şekil 4.20. Sandviç basma mekanik avantajının değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre .....	69
Şekil 4.21. Sandviç eğme mekanik avantajının değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre .....	69
Şekil 4.22. güçlendirilmiş sandviç yapılarda basma hasar tipleri.....	71
Şekil 4.23. Referans sandviçlerin eğme yükleri altında tipik hasar mekanizmaları.....	72
Şekil 4.24. Çekirdek malzeme içerisindeki cam elyaf iplik takviyelerinin yüzey tabakalara tutunması .....	72
Şekil 4.25. Cam/epoksi takviye çubukların sandviç yüzey tabalarına güçlü tutunmasına ait stereomikroskop görüntüleri.....	73
Şekil 4.26. Güçlendirilmiş sandviçlerde meydana gelen hasar tipleri.....	74
Şekil 4.27. 1200 tex cam elyaf iplik takviyesine sahip sandviçlerde sürtünme ve yetersiz matris fazı kaynaklı hasarlar .....	75

## ÇİZELGELER DİZİNİ

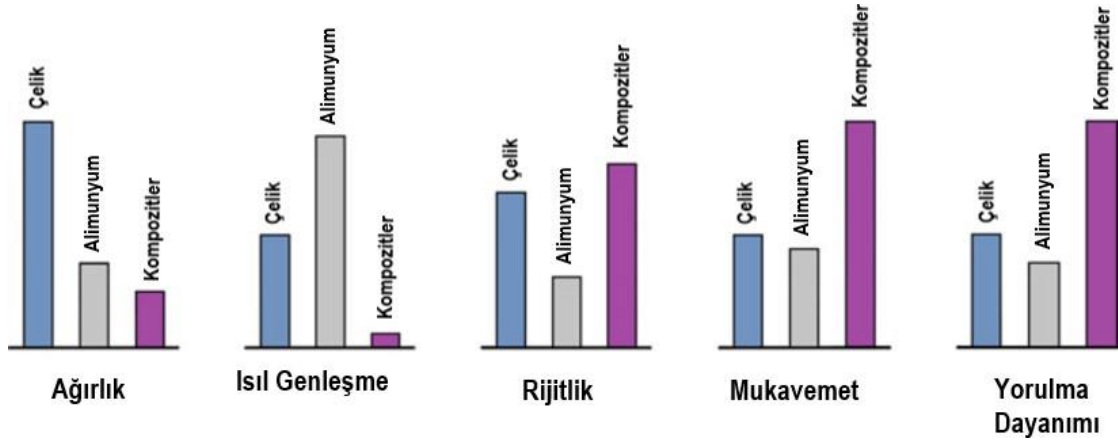
	Sayfa No
Çizelge 3.1. E-cam elyaf malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri [62] .....	28
Çizelge 3.2. Çekirdek malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri [63].....	29
Çizelge 3.3. Polimer matris malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri [64].....	29
Çizelge 3.4. Tez çalışmasında dikkate alınan sandviç yapı parametreleri ve seviyeleri .....	35
Çizelge 3.5. Üretimi gerçekleştirilen sandviç yapıların örneklem adları ve özellikleri .....	36
Çizelge 3.6. Basma ve eğme test numunelerinin ortalama kütle ve yoğunluk değerleri.....	37
Çizelge 4.1. K10.Y80 sandviç yapıların basma özellikleri .....	50
Çizelge 4.2. K20.Y60 sandviç yapıların basma özellikleri .....	50
Çizelge 4.3. K20.Y80 sandviç yapıların basma özellikleri .....	50
Çizelge 4.4. K10.Y80 sandviç yapıların eğme özellikleri.....	57
Çizelge 4.5. K20.Y60 sandviç yapıların eğme özellikleri.....	57
Çizelge 4.6. K20.Y80 sandviç yapıların eğme özellikleri.....	58
Çizelge 4.7. Sandviç yapıların yoğunluğu için ANOVA sonuçları.....	61
Çizelge 4.8. Sandviç yapıların basma yük taşıma kapasitesi için ANOVA sonuçları .....	62
Çizelge 4.9. Sandviç yapıların basma mukavemeti için ANOVA sonuçları.....	63
Çizelge 4.10. Sandviç yapıların basma mekanik avantajı için ANOVA sonuçları .....	63
Çizelge 4.11. Sandviç yapıların eğme yük taşıma kapasitesi için ANOVA sonuçları.....	64
Çizelge 4.12. Sandviç yapıların çekirdek kayma gerilmesi için ANOVA sonuçları .....	64
Çizelge 4.13. Sandviç yapıların yüzey tabaka gerilmesi için ANOVA sonuçları.....	65
Çizelge 4.14. Sandviç yapıların eğme mekanik avantajı için ANOVA sonuçları.....	65
Çizelge 4.15. Düzeltilmiş (Adj.) ve tahmin edilen (Pred.) korelasyon katsayıları.....	66

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

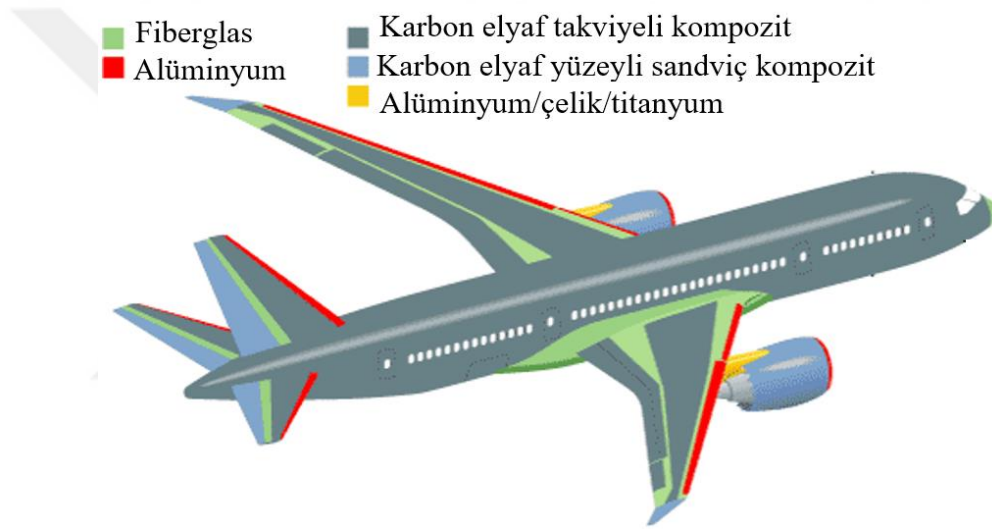
A	: Çekirdek kalınlığı
ASTM	: Amerikan test ve malzeme topluluğu
ANOVA	: Varyans analizi
Adj. $R^2$	: Düzeltilmiş kolerasyon katsayısı
b	: Sandviç genişliği
B	: Çekirdek yoğunluğu
c	: Çekirdek kalınlığı
C	: Takviye iplik yoğunluğu
d	: Sandviç kalınlığı
PVC	: Polivinil klorür
Pred. $R^2$	: Tahmin edilen kolerasyon katsayısı
RSM	: Yanıt yüzey metodu
$R^2$	: Kolerasyon katsayısı
S	: Mesnetler arası açıklık
t	: Yüzey tabaka kalınlığı
$\varepsilon_c$	: Basma birim şekil değişimi
$t_c$	: Yüzey tabaka kalınlığı
$F_{maks}$	: Maksimum eğme yükü taşıma kapasitesi
$F_{maks}/\rho$	: Özgül eğme yükü kapasitesi
$P_{maks}$	: Maksimum basma kuvveti
$P_{maks}^*$	: %0.2 Birim şekil değişiminde basma kuvveti
$\sigma_c$	: Düzlem dışı basma gerilmesi
$\sigma_c$	: Basma mukavemeti
$\sigma_c^*$	: %0.2 Birim şekil değişiminde basma mukavemeti
$\sigma_F^{ult}$	: Yüzey tabaka gerilmesi
$\sigma_S^{ult}$	: Maksimum çekirdek kayma gerilmesi
$\sigma_c/\rho$	: Özgül basma mukavemeti
$\sigma_c^*/\rho$	: %0.2 Birim şekil değişiminde özgül basma mukavemeti
$\Delta_t$	: Çökme miktarı
$\emptyset$	: Çap

## 1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında yaşanan teknolojik gelişmelerde de görüldüğü üzere geleneksel monolitik malzemeler yerini yenilikçi kompozitlere bırakmaktadır. Zira günümüzde artık neredeyse hiçbir malzeme saf ve alaşımsız bir şekilde kullanılmamaktadır [1]. Uzay-havacılık, otomotiv, savunma sanayii, denizcilik, enerji ve inşaat uygulamalarında ve hatta birçok spor ekipmanlarında başlıca yapısal malzeme olarak kullanılan kompozitler hafifliklerine karşın yüksek mukavemet, rijitlik, yorulma direnci ve düşük ısıl genişleme katsayısı gibi özellikleri ile ön plana çıkmıştır. İlaveten metal ve alaşım malzemelerin aksine, kompozit malzemeler genellikle korozyona karşı dirençli olması sebebiyle uzun ömürlüdür [2,3]. Ayrıca kompozit malzemelerin üretiminde farklı tekniklerin uygulanabiliyor olması, karmaşık ve özelleştirilmiş geometrilerin elde edilmesine olanak sağlar. Bu da tasarım esnekliğini artırarak çeşitli sektörlerde inovasyonu teşvik eder. Bu gibi avantajlar sebebiyle günümüzde endüstriyel tasarımcıların teknolojik ilerlemeler karşısında inovatif çözümler üretebilmesi zorunluluk haline gelmiştir. Çünkü nihai üründe mükemmel mühendislik, inovasyon, ileri teknoloji, sürdürülebilirlik, dayanıklılık, güvenlik ve maliyet-etkin çözümler sunmak tasarımcıların yoğun olarak ilgilendiği faktörlerdir [4, 5]. Diğer taraftan malzeme bilimi ile ilgilenen araştırmacılar da cazibeli özelliklerinden dolayı yoğun bir şekilde kompozit malzemeler üzerine çalışmalarını sürdürmektedir. Şekil 1.1'de mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan çelik ve alüminyum ile kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır [6]. Üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı tercih edilen kompozit yapılardan ortaya çıkan mühendislik uygulamaları katma değer bakımından da nihai ürünü geleneksel malzemelere kıyasla daha değerli hale getirmektedir. Örneğin, Boeing'in 787 Dreamliner uçağı (Şekil 1.2) hacimce %80 karbon fiber takviyeli plastik gövdeden imal edilmiş ve rakip uçaklara göre koltuk başına %30 daha hafif olduğu belirtilmektedir [7]. Bu da daha fazla yolcu taşıma kapasitesi, düşük yakıt tüketimi veya daha uzun menzil kapasitesi, düşük yakıt emisyonları gibi avantajları beraberinde getirmektedir.



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin geleneksel monolitik malzemeler ile karşılaştırılması [8]

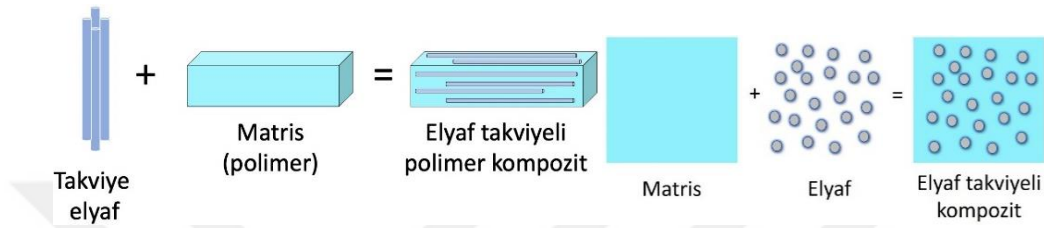


Şekil 1.2. Boeing 787 uçağında kullanılan kompozit malzemeler [9]

Yukarıda bahsedilen cazibeli özelliklerinin yanı sıra kompozit malzemeler alanında aşılması gereken birtakım problemler de yer almaktadır. Bazı üretim süreçlerindeki karmaşıklık, yüksek malzeme maliyeti, geri dönüşümde kısıtlılık, yapısal gevreklik, depolama koşulları nedeniyle sınırlı raf ömrü, tasarım ve analizlerde yaşanan zorluklar ve parçaların hasar gördükten sonra tamir/revizyon işlemlerinin zorluğu gibi hususlar tasarımcıların ve üreticilerin ele aldığı problemler olarak sayılabilir [10].

## 1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, en az iki veya daha fazla farklı malzemenin homojen olmayan fiziksel bir bağ ile birbirlerine entegre edilmesi yoluyla elde edilir. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi bileşenlerden biri matris fazı iken diğeri takviye fazı olarak adlandırılır. Bu farklı fazlar, birbirleriyle çözünmeyen ve kimyasal reaksiyon göstermeyen özelliklere sahiptir. Genellikle belirli bir matris fazın güçlendirici fazları kontrol ettiği yeni bir malzeme sınıfını ifade eder [11].



Şekil 1.3. Kompozit malzeme yapısı

Karbon veya cam vb. elyaflar ile takviye edilmiş epoksi ve çelik çubuklar ile takviye edilmiş beton kompozit malzemelere örnek olarak verilebilir.

Yapıdaki matris elemanın başlıca görevleri şunlardır:

- ✓ Kompozitlerden imal edilen ürünlere şekil verir.
- ✓ Yapı içindeki takviye malzemeleri olumsuz çevre koşullarına karşı korur.
- ✓ Takviye elemanları arasında yük transferi sağlar.
- ✓ Kompozit yapıya tokluk ve süneklik gibi özellikler katar.

Diğer taraftan takviye elemanın başlıca görevleri ise şunlardır:

- ✓ Yük taşır, kompozit parçaların rijitlik, mukavemet gibi mekanik özelliklerine katkı sağlar.
- ✓ İletkenlik, termal genişleme katsayısı, ve ısı taşınım gibi diğer fiziksel özellikleri belirlemede önemli etkisi bulunur.

Kompozitlerin üretilmesinde esas amaç ise tek bir malzeme (monolitik) ile elde edilemeyen mekanik (mukavemet, tokluk vb.) ve/veya fiziksel (elektrik iletkenliği, ısı iletkenlik vb.) özelliklerin en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesi ile geliştirilmesidir. Kompozit malzemelerin oluşturulması sırasında, bileşenler genellikle kendi özgün özelliklerini muhafaza eder ve bu malzemeler, genellikle bileşenlerinin toplamından daha üstün bir performans sergiler [12]. Kompozitlerde takviye fazı olarak,

sürekli ve süreksiz elyaflar, nano veya mikro boyutlarda partiküller, kırılmış veya keçe formunda lifler kullanılırken matris fazı olarak polimer esaslı polyesterler, vinil esterler ve epoksi reçineler yaygın kullanılan termoset polimerlerdir. İlâveten, metal ve seramik matrisli kompozitler de vardır [13].

## **1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, içerdikleri çeşitli bileşenlere göre iki temel yaklaşım üzerinden yapılabilir. Bunlar arasında, matris malzemesinin türüne dayalı olan sınıflandırma ile takviye elemanın türüne göre yapılan sınıflandırmalar bulunmaktadır [14].

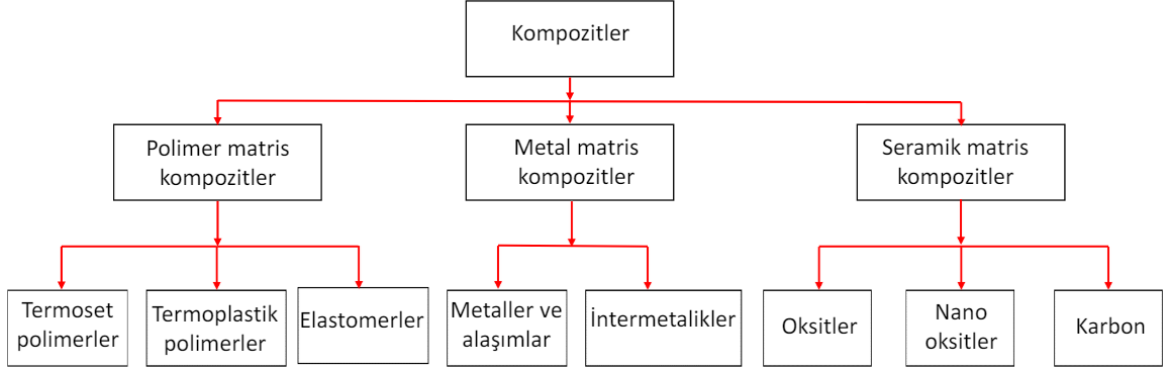
### **1.2.1. Matris malzemesine göre kompozitlerin sınıflandırılması**

Matris fazının temel işlevi, takviyenin korunması, parçacıkların düzenlenmesi ve desteklenmesi, yük transferinin gerçekleştirilmesidir. Genel olarak, takviyeler malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkiler. Matris, takviyenin istenen formunu almasını sağlarken, takviye de malzemenin tüm mekanik özelliklerini geliştirir. Matris, genellikle monolitik bir malzeme gibi davranarak içindeki takviyeleri eşit bir şekilde dağıtmalıdır. Takviye, matris malzemesine etkili bir şekilde entegre edilerek kompozit yapının bütünlüğünü korur.

Matris cinsine göre yapılan kompozit malzemelerin sınıflandırılması şu şekildedir:

- ✓ Polimer Matrisli Kompozitler
- ✓ Seramik Matrisli Kompozitler
- ✓ Metal Matrisli Kompozitler

Şekil 1.4'te matris malzemesine göre yapılan sınıflandırma detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 1.4. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre kıyaslanması

Polimer matris malzemeleri termosetler (üç boyutlu çapraz bağlı zincirler), termoplastikler (polimer molekülleri birleşmiş veya birleşmemiş birçok zincir) ve elastomerler olarak üç ana sınıfa ayrılır. Termosetler ısı sertleşir plastikler olarak da adlandırılırken termoplastikler ısı yumuşar plastiklerdir. Başlıca bilinen termoset reçineler polyester, epoksi, vinil ester, fenolik, silikon malzemelerdir. Örneğin polyester reçine metallerde korozyona karşı koruyucu olarak boyacılıkta, otomotivde ve ahşap malzemelerde nem gibi çevresel etkilere karşı koruyucu olarak kullanılırlar. Denizcilik (gemi uygulamaları) ve inşaat endüstrisinde (yapısal paneller vb.) kullanımları yaygındır. Ayrıca basınçlı kaplar, tanklar, borular ve otomotiv gövde parçaları gibi ürünlerin imalatında elyaf takviyeli polyester kompozitler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Termoplastik reçineler ise termosetlerin aksine ısıtıldıklarında yumuşar, soğutulduklarında tekrar sertleşirler ve çoğunlukla enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama yöntemleri ile üretilirler. Başlıca bilinen termoplastik malzemeler polietilen, poliamid/naylon, polipropilen, poli-tetra-flour-etilen, poli-eter-eter-eton, polivinil klorürdür. Kompozit malzemelerin neredeyse %90'ı polimer (plastik) esaslı matrisler kullanılarak üretildiği için, bunlara takviye edilmiş plastikler de denilmektedir. Günümüzde, Polimer matris kompozitler (PMK), kompozit malzemeler arasında sıkça tercih edilen bir türdür. PMK'lerin özellikleri, matris ve takviye elemanlarının özellikleri ile kullanılan üretim parametreleri, mikroyapı, kompozisyon ve ara faz gibi birçok faktöre bağlıdır. PMK'lerin cazip kılan özellikleri arasında uygun fiyatları ve kolay uygulanabilir üretim yöntemleri bulunmaktadır. PMK'lerin üretiminde en çok uygulanan yöntemler, el yatırma, reçine kalıplama işlemi, elyaf sarma, pultrüzyon metodu, reçine infüzyonu, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama ve ısı oluşum yöntemleridir. Polimerler, etkili bir şekilde işlenebilirlik özelliklerine sahip olduklarından, kaliteli bileşenlerin üretiminde başarılıdır. Hafiflik, polimerlerin belirgin bir özelliğidir. Polimer kompozitler, geniş bir yelpazede

özelliklere sahip olma avantajını sunar. Bunlar arasında yüksek mukavemet, olağanüstü darbe ve sıkıştırma dayanıklılığı, ekonomik üretim ve kalıplama süreçleri, kimyasallara ve korozyona karşı direnç gibi özellikler yer almaktadır. PMK'lerin başlıca kullanım alanlarına örnek olarak hafifliği sebebiyle otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrisi, spor malzemeleri, korozyon direnci sebebiyle gemi uygulamaları, yanmazlık özelliği istenen otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlar gösterilebilir [13, 15].

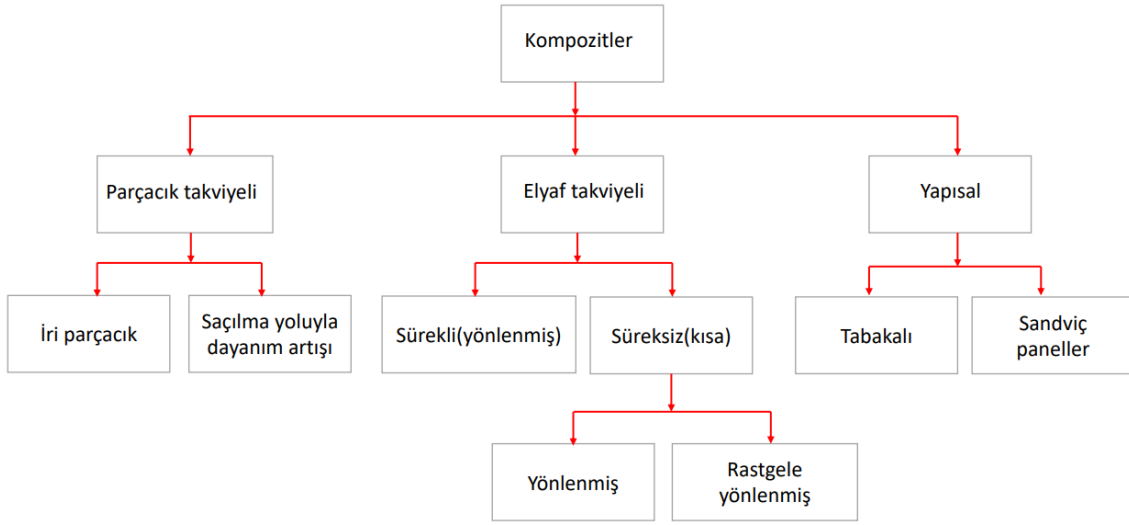
Seramik malzemeler hem metallerle hem de metaller dışındaki bileşenlerle oluşturulan kompleks karışımlardır. Ancak, sadece üstün mekanik özelliklere ve yüksek sıcaklık direncine sahip olan bileşikler seramik malzeme olarak nitelendirilir. Genellikle metallerin oksitleri, karbürleri ve nitratları gibi bileşimler seramikleri oluşturmaktadır ( $Al_2O_3$ ,  $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $AlN$ ,  $Si_3N_4$ ,  $c-BN$ ,  $TiB$ ,  $TiC$ ,  $TiN$ ). Farklı yapılardaki bu bileşikler uygulama amacına göre bir ya da birkaçı birlikte kullanılarak seramik matris kompozitler elde edilir. Seramik malzemelerin erime noktaları oldukça yüksektir ( $TiC$  için  $3100\text{ }^\circ C$ ,  $MgO$  için  $2800\text{ }^\circ C$ ,  $Al_2O_3$  için  $2000\text{ }^\circ C$ ) ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilirler. Ayrıca, bu malzemeler oksidasyon ve kimyasal etkilere karşı olağanüstü dirence sahiptir. Seramik malzemelerin elastikiyet modülleri ve mukavemet değerleri genellikle yüksektir, bu nedenle kompozit malzeme oluşturmanın temel amacı kırılma dayanıklılığını artırmaktır. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanan seramik matris malzemeleri, olağanüstü korozyon direnci, yüksek erime noktaları, üstün kompresif mukavemet ve yüksek sıcaklıklarda kararlılık gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenle, gaz türbini parçalarında pistonlar, kanatlar ve rotorlar gibi yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen malzemeler arasında yer alır [16, 17].

Metal matrisli kompozit malzemelerde matris metali ana yapıyı oluştururken takviye elemanı olarak genellikle seramikler kullanılmaktadır. Seramik malzemelerin yüksek elastik modülü ile metallerin plastik şekil değiştirme özelliklerinin bir araya getirildiği bu tür kompozit yapılar aşınmaya karşı dayanıklı olup yüksek basma gerilmesi ve kırılma tokluğuna sahiptir. Metal matris kompozitler geleneksel malzemelere en büyük alternatiftir. Alüminyum, Bakır, Demir, Magnezyum, Nikel ve Titanyum gibi matris metalleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları, mukavemetleri ve mükemmel korozyon dirençleri nedeniyle otomotiv ve havacılık sektörlerinde yapısal uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Örneğin;  $MgO$ ,  $SiC$ ,  $MnO$ ,  $Al_2O_3$  gibi metal oksit ve seramik parçacıklarla takviyelendirilerek elde edilen

alüminyum metal matris kompozitler yüksek dayanım, sertlik, iyi kırılma tokluğu ve hafiflik sunmaktadır [15].

### 1.2.2. Takviye türüne göre kompozitlerin sınıflandırılması

Takviye fazının morfolojisine bağlı olarak, kompozit malzemeler genellikle üç ana grupta (parçacık veya elyaf takviyeli ve yapısal kompozitler) sınıflandırılır. Bu sınıflandırma, malzemenin yapısal özelliklerini ve kullanım alanlarını belirlemede önemli bir rol oynar. Şekil 1.5'te takviye türüne göre kompozitlerin sınıflandırılması gösterilmektedir [18].



Şekil 1.5. Kompozit malzemelerin takviye türüne göre sınıflandırılması [18]

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde, matris fazının içinde parçacıklar yer alır ancak partikül ve matris birbiri içinde çözülmezler. Parçacıklar rastgele dağıldığı için genellikle izotropiktir ve tüm yönlerde aynı malzeme davranışını gösterirler. Parçacık takviyeli kompozitler yüksek mukavemet ve çalışma sıcaklığı ile korozyona karşı daha iyi bir direnç göstermektedir. Kauçuk içindeki alüminyum parçacıkları, polimer matris içerisindeki nano veya mikro metal alaşımlar, seramik parçacıklar, beton yapılarda kullanılan kum, çakıl ve çimento, alüminyum matris içindeki silisyum karbür parçacıkları örnek olarak verilebilir [19]. Metal parçacıklar yüksek elektriksel ve ısı iletkenliklerinden dolayı tercih edilirken metal matris içindeki seramik parçacıklar yüksek sertlik ve çalışma sıcaklığı sağlarlar. Uçak motorları gibi yüksek çalışma sıcaklıklarında yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren yerlerde bu tür kompozit malzemelerin kullanımı bulunmaktadır.

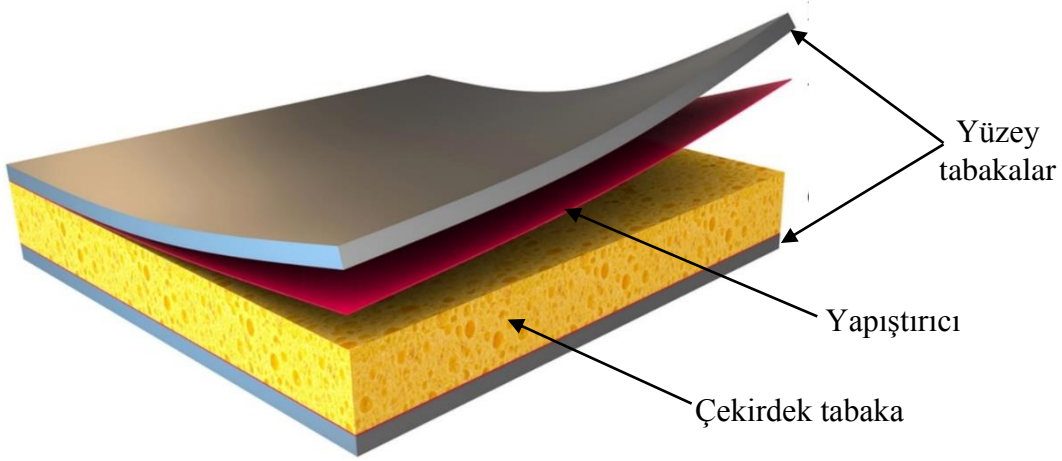
Parçacık takviyeli kompozitlerde partikül boyutunun nanometre düzeyinde ise bu tür kompozitler nanokompozit olarak adlandırılır [20].

Elyaf takviyeli kompozitler sürekli (uzun) veya süreksiz (kısa) elyaf takviyeli matrislerden meydana gelir. Elyaf lar genellikle anizotropik özellikler sergiler. Karbon, cam, bazalt ve aramid elyaflara örnek olarak verilebilir. Polimer epoksi, kalsiyum-alumina silikat gibi seramikler ve alüminyum gibi metaller örnek olarak verilebilir. Sürekli elyaf matris kompozitlerin temel birimi, tek yönlü ya da örgü elyaf laminalardır. Laminalar çok yönlü laminat kompozitler oluşturabilmek için farklı açılarda üst üste dizilir. Elyaf ların matris içindeki konumu, kompozit yapının dayanıklılığını etkileyen kritik bir unsurdur. Sürekli elyaf ların matris içinde paralel bir düzende yerleştirilmesi, elyaf ların doğrultusundaki mukavemeti artırırken, elyaflara dik düzende mukavemet düşüşü gözlenir [21].

Tabakalı kompozit malzemeler, kompozit malzeme kategorileri arasında en eski ve geniş kullanım alanına sahip olan bir yapı sınıfını temsil etmektedir. Bu malzemeler, temel malzeme eksenlerine farklı yön lere yerleştirilmiş tabakaların bir araya getirilmesiyle üretilir, bu da malzemenin yön lere göre özelliklerini optimize etmeyi sağlar. Özellikle elyaf takviyeli tabakalı kompozitler, yüksek mukavemetleri ve çeşitli mühendislik alanlarındaki uygulama avantajları nedeniyle literatürde en fazla incelenen kompozitlerdir. Isıya ve nem koşullarına karşı direnç göstermelerinin yanı sıra, kullanım sırasında dış etkenlere karşı darbe dayanımı konusunda dikkate değer bir hassasiyete sahiptirler. Metal ve alaşımlarına kıyasla hafif ve yüksek mukavemetli olmalarından dolayı tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler malzemeler uçakların gövde, kanat ve kuyruk kısımlarında yaygın bir kullanıma sahiptir [21].

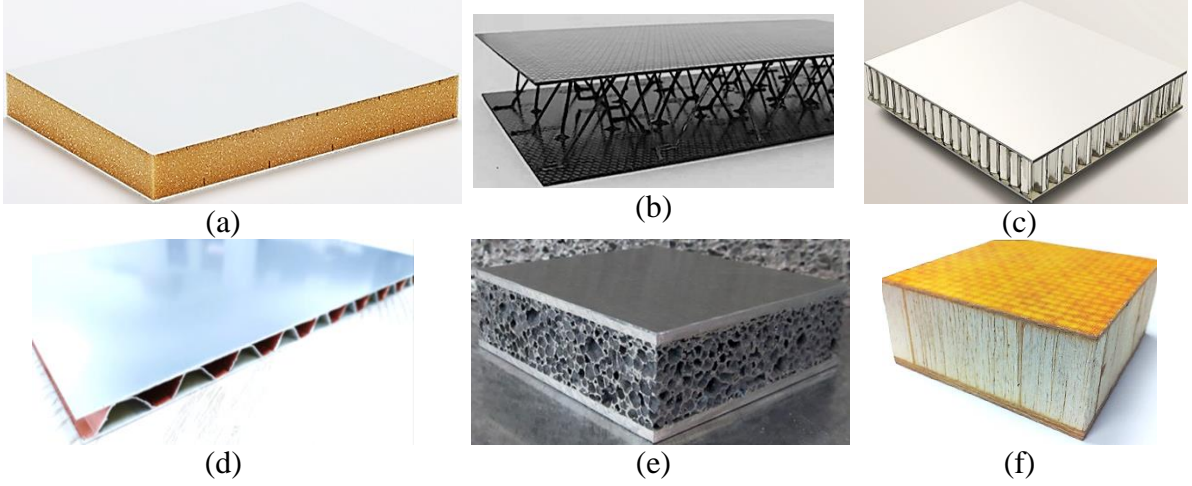
### **1.3. Sandviç Yapılar**

Oldukça ince ve yüksek mukavemetli iki tabakalı kompozit yapı arasına, farklı bir formda daha kalın ve görece çok daha düşük yoğunluklu çekirdek olarak adlandırılan bir malzemenin yer aldığı yapılara kompozit sandviçler adı verilir. Tabakaların her biri izotropik bir malzeme olabildiği gibi, elyaf takviyeli kompozitler de olabilirler [22]. Şekil 1.6'da sandviç kompozit yapısı şematik olarak gösterilmektedir.



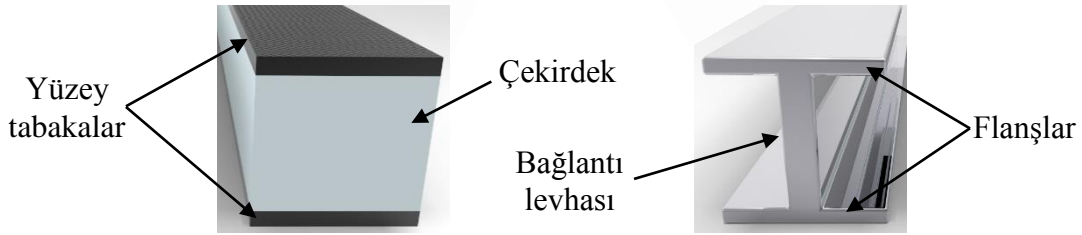
Şekil 1.6. Sandviç yapı ve bileşenleri

Sandviç yapılarda yüzey tabaka elemanlarının temel amacı, malzemenin eğilme ve diğer yüklere karşı sağlam bir destek sunmaktır. Yüzey tabakası için seçilen malzemeler, genellikle dayanıklılık, rijitlik ve ses, ısı ve titreşim yalıtımı gibi özel uygulama gereksinimlerini karşılayacak şekilde seçilir. Bu özellikler, sandviç yapıların çeşitli endüstrilerde tercih edilmesine ve kullanılmaya uygun olmalarını sağlar. Yüzey tabakalarında kullanılan malzemeler genellikle dayanıklı kompozit malzemeler, fiberglas, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler veya sac metal alaşımları gibi çeşitli plaka ve levha malzemelerden oluşabilir. Sandviç yapılarda başlıca çekirdek türleri ise; oluklu veya kafes yapılar, alüminyum veya polimer köpük, altıgen, dairesel veya kare hücrelere sahip bal peteği ve balsa ağacıdır (Şekil 1.7). Çekirdek malzemeler sandviç yapının eğilme rijitliğini artırırken düzlem dışı kayma ve basma yüklerine karşı da direnç göstermektedir [23, 24].



Şekil 1.7. Sandviç çekirdek türleri, a) polimer köpük, b) kafes örgü, c) bal peteği, d) oluklu levha, e) alüminyum köpük, f) balsa ağacı

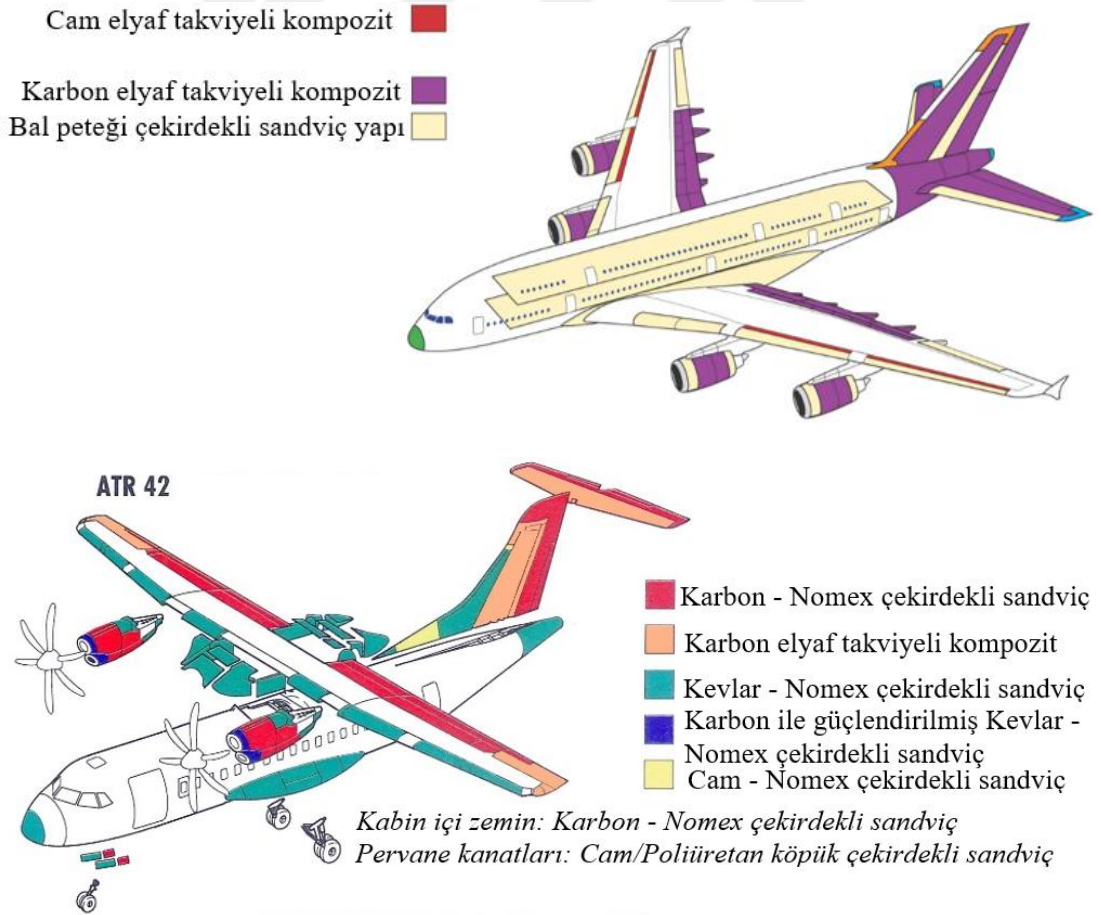
Sandviç konsepti, hafifliğini yüksek eğilme rijitliği ve mukavemet ile birleştiren temel bir yapı tekniğini ifade eder. Bu nedenle, sandviç yapılar, ağırlığın kritik faktör olduğu çok geniş bir uygulama yelpazesi için mükemmel bir seçenek olarak kabul edilir. Sandviçler fonksiyonel anlamda metal endüstrisinde sıkça kullanılan I kiriş profillerine benzetilebilir (Şekil 1.8). I kirişlerin alt ve üst flanşları çekme ve basma yüklerine direnç gösterirken sandviçlerde yüzey tabakalar bu görevi üstlenmektedir. Metalik I kirişlerin orta kısmındaki bağlantı levhası ise kayma gerilemelerine karşı mukavemet gösterirken sandviçlerde çekirdek malzeme aynı fonksiyona sahip olup alt ve üst yüzey tabakaları bir arada tutmaktadır [25].



Şekil 1.8. Sandviç yapı ile I kiriş profilin kıyaslanması

Havacılık, otomotiv, raylı taşımacılık ve gemi uygulamaları gibi ulaşım alanlarında sandviç yapıların kullanılmasıyla toplam araç ağırlığındaki azalma, daha yüksek hız, uzun menzil, daha fazla faydalı yük taşıma kapasitesi, daha az motor gücü, daha verimli işletme ve düşük emisyonlar gibi avantajlar sunar [26]. Sandviç kompozitler, özellikle 1950'lerin başından itibaren, havacılık ve denizcilik uygulamalarında giderek artan bir şekilde ağırlık

kazancı sağlamasına binaen büyük önem kazanmıştır. Yüksek mukavemet ve rijitlik gibi özellikler tasarımcıların yoğun ilgisini çekmektedir. Korozyon direnci, elektriksel izolasyon, ısı yalıtımı, akustik sönümlenme gibi avantajları da bulunmaktadır. Bu yapılar aynı zamanda ani çarpışma durumlarında önemli ölçüde enerji absorbe edebilme özelliklerine sahiptirler. Çarpma direncini artırmak amacıyla, araştırmacılar, çeşitli çekirdek ve yüzey tabaka malzeme kombinasyonlarını titizlikle değerlendirmektedir [27]. Havacılık ve denizcilik alanlarının yanı sıra, bu tür yapılar genellikle uzay endüstrisi, otomotiv, denizcilik, rüzgâr enerjisi ve inşaat gibi birçok sektörde kullanılır. Sandviç kompozitler, kara taşımacılığı uygulamalarında da başarıyla kullanılmaktadır; zira yüksek hızlı tren vagonları, otobüs gövdelerinde yapısal tavan panelleri, yüksek hızlı lokomotiflerin ön kabinleri ve yapısal olmayan iç paneller gibi alanları içermektedir. [28]. Şekil 1.9’da havacılık alanında Airbus A380 ve ATR72 model uçaklarında kullanılan kompozit parçaları görülmektedir.



Şekil 1.9. Havacılıkta sandviç kompozit uygulamaları [29]

#### 1.4. Kompozit Malzemelerde Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yönteminin seçiminde, hedeflenen fiziksel ve mekanik özellikler üzerinde etkili olan takviye ve matris malzemesi, parça veya ürün şekli ve maliyet faktörleri önemli rol oynamaktadır. Üretim yöntemleri uygulama sürecine bağlı olarak açık ve kapalı şekillendirme uygulamaları olarak sınıflandırılabilir.

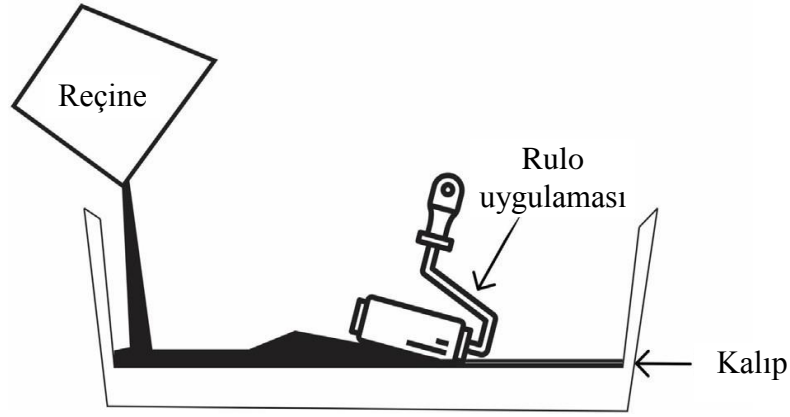
*Açık şekillendirme yöntemleri;*

- El Yatırma Yöntemi
- Püskürtme Yöntemi
- Vakum Torbalama Yöntemi
- Filament Sarma Yöntemi

*Kapalı şekillendirme yöntemleri;*

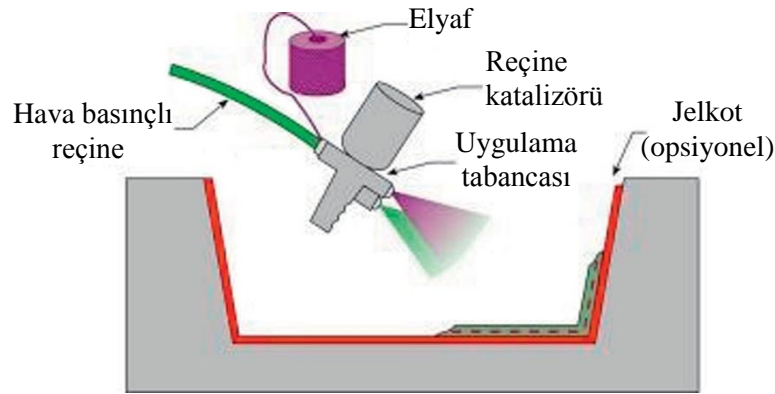
- Reçine Transfer Kalıplama (RTM/Reçine Enjeksiyonu) Yöntemi
- Vakum İnfzyon Yöntemi
- Profil Çekme/Pultrüzyon (Pultrusion) Yöntemi
- Otoklav Proses Yöntemi

*El yatırma yöntemi*, kompozit malzeme üretiminde tarihsel bir derinliğe sahip olan köklü bir açık kalıp işlemidir. Bu metot, endüstriyel üretim süreçlerinde önemli bir yer edinmiştir, zira basit yapısı, düşük üretim hacmi ve işçilik bakımından avantajları bulunmaktadır. Bu eski teknik, özellikle karmaşık yapıya sahip büyük parçaların, örneğin tekne gövdelerinin üretiminde etkili bir şekilde kullanılabilir. El ile açık kalıba yerleştirilen takviye elyaflar, dokuma kumaş, mat veya fitil, daha sonra reçine ile hazırlanmış matrisin dökülerek fırça veya püskürtülmesi ile kompozit parçalar şekillendirilmektedir. Şekil 1.10'da gösterildiği gibi, lamine yapının tamamlanması için manuel olarak hava kabarcıklarını gidermek amacıyla spatula veya rulo silindirler kullanılmaktadır. Kurlenme süresi, kullanılan polimer türüne bağlı olarak değişiklik gösterir; örneğin, epoksi bazlı sistemler için oda sıcaklığında normal kurlenme süresi genellikle 24-48 saat arasında bulunmaktadır. Kaliteli bir parça yüzeyi elde etmek amacıyla kalıp yüzeyine pigmentli jel tabakası uygulanarak estetik ve fonksiyonel açıdan özellikler eklenebilir [11].



Şekil 1.10. El yatırma yöntemi [14].

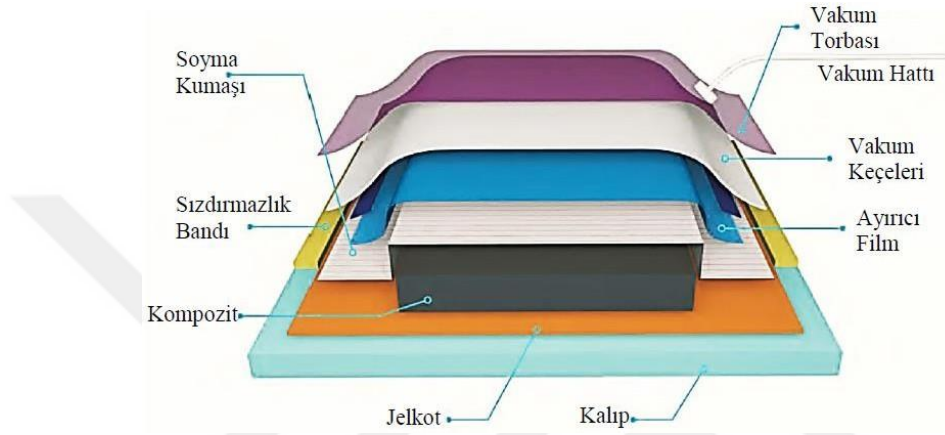
**Püskürtme yöntemi**, pnömatrik hava ve mekanik araçların kullanıldığı el yatırma yöntemine alternatif bir uygulamadır. Jelkot uygulanmış bir kalıp üzerine, elyaf malzemeler ve sertleştirici içeren bir reçine karışımı özel bir havalı tabanca kullanılarak kalıbın yüzeyine püskürtülmektedir. Elyaf kırma işlemi, tabanca üzerinde bulunan ve ayrı bir şekilde çalışan kırpıcı bıçaklar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Püskürtme sonrasında yüzeyde oluşabilecek düzensizlikleri gidermek amacıyla yüzey rulosu kullanılmaktadır. Şekil 1.11’de püskürtme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [30].



Şekil 1.11. Püskürtmeli yerleştirme tekniğinin şematik gösterimi [31]

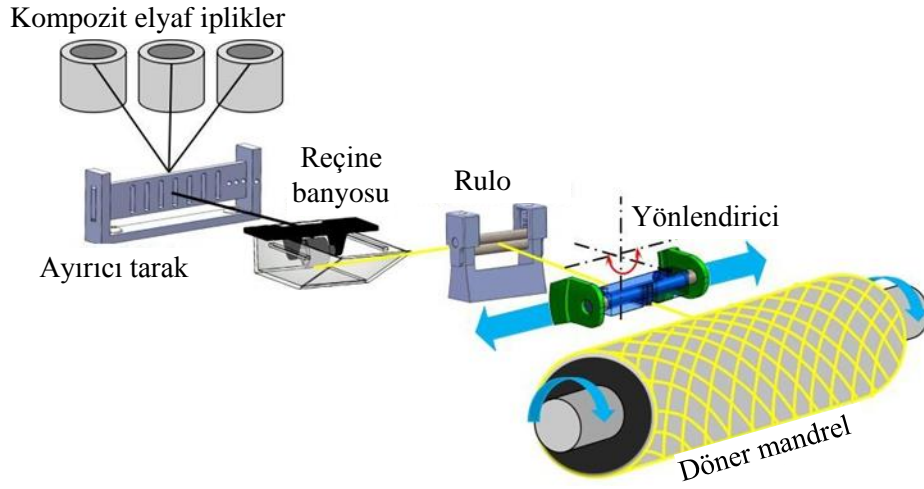
**Vakum torbalama işlemi**, içerisinde sıkışan hava ve gereğinden fazla reçinenin uzaklaştırılması amacıyla vakumun kullanıldığı bir üretim yöntemidir. Üretim aşamasının ardından, laminatın üzerine yerleştirilen delikli bir ayırma filmi veya soyma/sıyırma kumaşı, sonraki aşamalarda kullanılacak olan vakum torbasının laminattan daha kolay ayrılmasını sağlamak üzere konumlandırılır. Onun üzerine serilen vakum battaniyesi ise

fazla reçineyi absorbe ederek süreç boyunca laminasyonun üzerinde birikmesine engel olur. Son olarak vakum torbası, malzeme ve katmanlar üzerine yerleştirildikten sonra kalıp flanşı ile kapatılır. Ardından, torbanın altında vakum oluşturularak laminata vakum basıncı uygulanır. Bu işlem, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek takviye hacim oranı, gelişmiş yapışma ve kontrol sağlamaktadır. Özellikle kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bu teknik, daha güçlü ve hafif ürünler elde etme potansiyeli sunmaktadır [14].



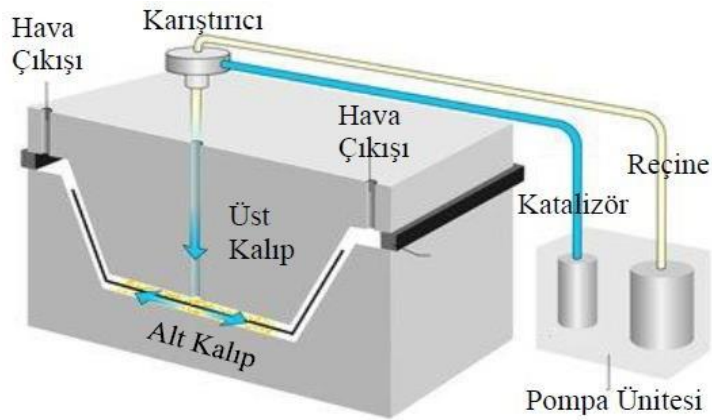
Şekil 1.12. Vakum torbalama yöntemi [32]

**Filament sarma yöntemi**, Silindirik ve konik parçaların (basıncılı kaplar, boru hatları, otomotiv tahrik milleri, oksijen tankları, roket gövdesi vb.) üretiminde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 1.13'te görüldüğü üzere kompozit elyaf iplikler bir mandrel üzerine sarılarak parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Elyaf ipliklerin reçine ile emdirilmesi filamentlerin sarılmasından önce veya işlem sırasında veya sarım sonrasında gerçekleşebilir. Elyafın düzgün bir şekilde hizalanması için mandrel üzerinde yeterli elyaf gerilimi sağlanmaktadır. Kurlenme sürecinde elyafın üzerine sarıldığı mandrel ısıtılmaktadır. Ürünün kalitesi, mukavemet ve rijitlik özelliği mandrel üzerine sarılan elyafın sıklığı, sarmal açısı, sarma gerilimi, şerit bant genişliği koşulları, reçine içeriği ve dağılımı, sarma hızı ve kurlenme döngüsü ile karakterize edilmektedir [33, 34].



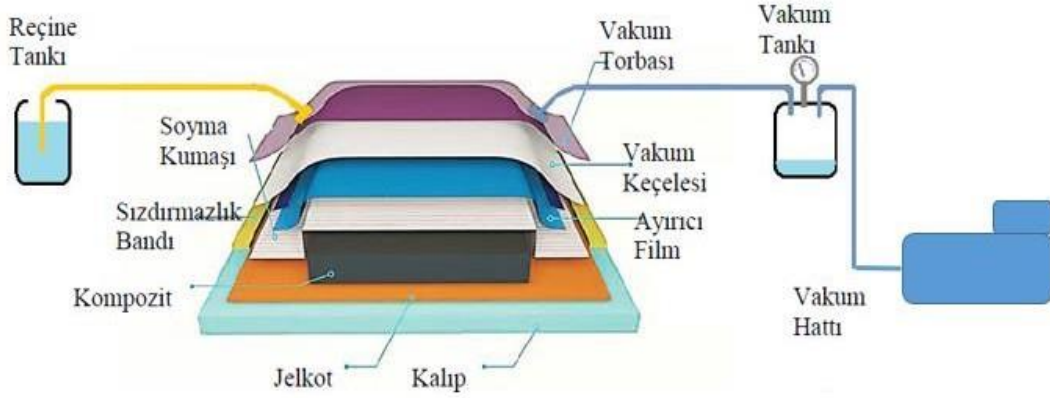
Şekil 1.13. Filament sarma işleminin şeması [34]

**Reçine transfer kalıplama (RTM/reçine enjeksiyonu) yöntemi**, yarı otomatik bir nitelik taşıyan bir uygulamadır ve el yatırma sürecinin bazı aksaklıklarını başarılı bir şekilde düzeltme potansiyeli vardır. Her iki kompozit yüzeyinin de yüksek yüzey ve tutarlı ürün kalitesine ulaşabileceği bu metot, elyaf takviyeli plastikler veya metallerle üretilen kalıpların kullanımını içermektedir. Şekil 1.14'te görüldüğü gibi takviye malzemesinin belirli bir miktarının düzenli bir şekilde kalıbın üstüne yerleştirilmesi ve ardından erkek kalıp ile kapatılması ve akabinde reçine ile hazırlanan polimer matris malzemesinin kalıp boşluğuna özel bir enjeksiyon tabancası kullanılarak enjekte edilmesi prensibine dayanmaktadır. Kalıbın uzak uçlarında bulunan havalandırma delikleri, reçinenin kalıp boşluğunu doldurmasına izin verir. Enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra, reçinenin kurlaşmasına müsaade edilir ve bu süreç tamamlandıktan sonra kalıp açılarak ürün çıkarılır. Bu metot, el yatırma işlemine göre daha hızlı bir üretim sürecine sahiptir [16].



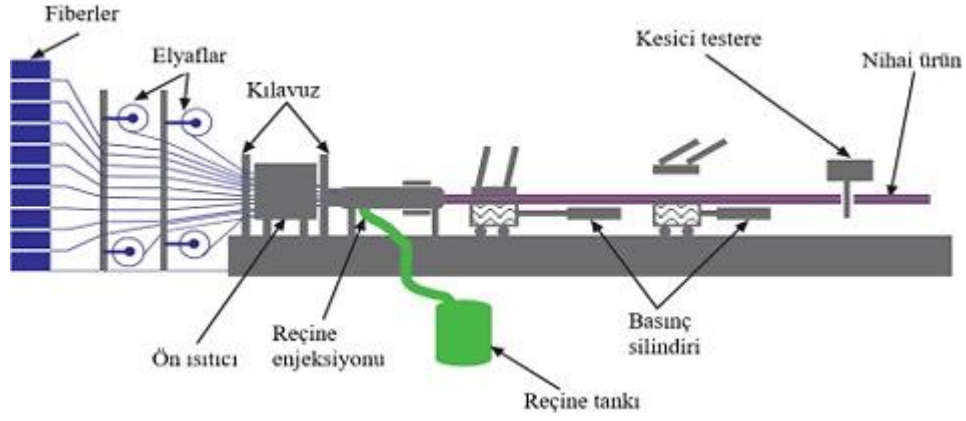
Şekil 1.14. Vakum enjeksiyon yöntemi [32]

**Vakum infüzyon yöntemi**, vakum torbalama yönteminin aksine, elyaf takviyelerin reçine ile laminasyonu yapılmadan önce vakum torbasının sızdırmaz bir şekilde kapatıldığı uygulama biçimidir. Bu yöntemde, dışarıda hazırlanan reçine bir kaptan vakum yardımıyla sistem içerisine çekilir. Reçine infüzyonu başlatılmadan önce, sistemin kaçakları kontrol edilmektedir. Vakum tankı aynı zamanda reçine kaçış kabı olarak isimlendirilmektedir ki işlem sırasında, sistemden gelen fazla reçine bu kabın içine emilerek vakum pompasına ulaşmadan proses tamamlanmalı ve vakum pompası korunmuş olmalıdır. Vakum infüzyon yöntemi, sistem hava sızdırmazlığı açısından etkili bir şekilde izole edilmişse, yüksek kaliteli bir yüzey elde etme potansiyeli taşıyan etkili bir tekniktir. Şekil 1.15'te vakum infüzyon uygulamasının şematik gösterimi verilmiştir [32].



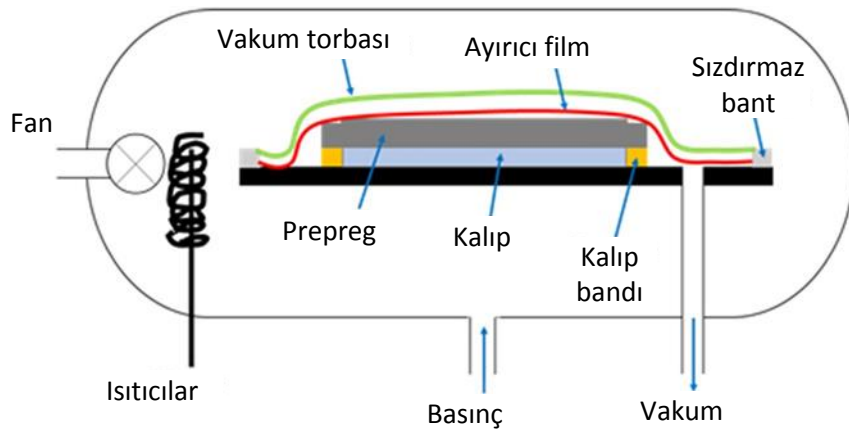
Şekil 1.15. Vakum infüzyon şeması [32]

**Profil çekme/Pultrüzyon yöntemi**, elyaf takviyelerin öncelikle bir bobin askısından çekildiği ve daha sonra bir reçine banyosuna daldırılarak takviyelerin ısıtılmış bir kalıptan geçirildiği bir uygulama tekniğidir (Şekil 1.16). Kalıp, reçine emdirilmiş elyafın homojen bir şekilde dağılmasını sağlar ve nihai ürünün kalınlığı ile boyutlarını belirlemektedir. Elyaf yönlendirmesi için kullanılan kılavuz, istenilen özelliklere uygunluğu sağlamak adına önemli bir rol oynar. Isıtma işlemi, reçinenin kürleşme sürecini başlatır ve sonunda ürün, istenilen form ve boyutta kesilerek elde edilir. Pultrüzyon yöntemi, özellikle hafif, dayanıklı ve özelleştirilebilir kompozit malzemelerin üretiminde kullanılır [35].



Şekil 1.16. Pultrüzyon yöntemi şeması [35]

**Otoklav yöntemi**, kapalı basınçlı kaplar olarak görev yapan otoklav fırınlarda, yüksek performanslı kompozit bileşenlerin üretimini gerçekleştirilmek üzere uygulanır. İnert gazlar, genellikle karbondioksit veya nitrojen gibi, ısıtılarak aktive edilen kürlenmemiş kompozit malzemelerin bir otoklav içinde şekillendirilmesine olanak sağlar. Bu işlem, kompozit bileşenin içine ısı ve basıncın transfer edilmesi yoluyla malzemenin sıkı ve homojen bir şekilde kürlenmesini sağlamaktadır. Otoklav içinde uygulanan basınç, kompozitlerin konsolidasyonunda gözenekliliği ve boşlukları azaltma amacına hizmet eder. Aynı zamanda, kalıbın orijinal şeklinin korunmasına ve kompozit bileşenlerde elyaf hacim oranının daha etkin bir şekilde kontrol edilmesine katkıda bulunur. Otoklav prosesi, sıcak presleme tekniğiyle benzerlik gösterir; ancak temel fark, ısı ve basıncın uygulanma şekliyle ilgilidir. Şekil 1.17’de otoklav yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [36].



Şekil 1.17. Otoklav yöntemi [36]

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

İki yüzey tabakanın bir çekirdek malzemeye yapıştırılarak elde edilmesiyle ortaya çıkan sandviç kompozitler, bileşenlerinde kullanılan malzemelerin özellikleri ile yapısal olarak karakterize edilmektedir. Farklı yüzey tabakalar ile çeşitli çekirdek malzemelerin kombinasyonunun uygun bir şekilde bir araya getirilmesi sayesinde istenilen elektriksel, ısı manyetik ve mekanik özelliklerin elde edilmesi mümkündür. Bu bölümde literatürde son yıllarda ortaya çıkmış farklı yüzey tabakalar ve çekirdek malzemeler ile tasarlanan sandviçlerin özellikleri ve daha sonra da çeşitli modifikasyonlar ile güçlendirilmiş sandviçlerin özelliklerinin araştırıldığı çalışmalara yer verilmiştir. Son olarak bu tez çalışmasının amacı ve önemi belirtilecektir.

### 2.1. Çeşitli Yüzey Tabaka ve Çekirdek Malzemelerden Meydana Gelen Sandviç Yapılar

Elyaf takviyeli kompozitlerden metal alaşım levhalara kadar çok fazla çeşitlilikte yüzey tabaka malzemesi ile balsa ağacı, bal peteği, oluklu levha kafes yapılar ve köpük malzemeler gibi çekirdek yapıların farklı kalınlık ve yoğunluklarda kullanılması sayesinde ortaya çıkan ileri kompozit tabakalar endüstrinin neredeyse her alanında sandviç yapılara duyulan ihtiyacı karşılayabilme potansiyeline sahiptir.

Kabir vd [37], sırasıyla 6 mm ve 12 mm Alüminyum (Al) köpük çekirdekler ve çok ince (0,32 mm) Alüminyum yüzey tabakaları ile meydana getirilen sandviç yapıların üç nokta eğme yükleri altındaki davranışını araştırmıştır. Farklı yüzey levhaları (düşük mukavemetli ve yüksek mukavemetli), çekirdek malzemeleri ve testlerde kullanılan mesnetler arası mesafe (50 mm ve 100 mm) gibi parametreleri dikkate alarak eğme test numuneleri üretilmiştir. Çok ince yüzey tabakalarına sahip sandviçlerde girintili batma şeklinde bir hasar gözlenmiştir. Düşük mukavemetli yüzeylerin kullanılması durumunda ise, yüzey tabaka hasarı meydana gelirken, yüksek mukavemetli yüzeylerde çekirdek hasarlarına neden olmuştur.

Doğan [38] karbon yüzey tabakalara sahip farklı çekirdekler ile çeşitli sandviçler üretmiştir.  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu PVC köpük,  $200 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu balsa ağacı ve  $400 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu ayous ağacı çekirdek malzeme olarak kullanılmıştır. Üretilen sandviçler basma, eğme ve düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuştur. Ayous ağacı çekirdekli sandviç numuneler diğerlerine göre üstün mekanik özellikler sergilemişlerdir. Ağırlığın

önemli olmadığı durumlarda çok yüksek yapısal performans sağlaması bakımından diğer geleneksel çekirdek malzemelere kıyasla tercih edilebilir olduğu rapor edilmiştir.

Garay vd. [39] polietilen tereftalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) köpük malzemeler ( $12 \text{ mm } 80 \text{ kg/m}^3$ ) olmak üzere iki farklı çekirdek malzeme ve cam elyafın hem kumaş hem de keçe formu olmak üzere iki farklı yüzey tabaka malzemesi kullanarak ürettiği sandviç yapıları eğme, basma ve Shore D sertlik ölçüm testlerine tabi tutmuştur. PVC çekirdekli sandviç yapılar genel olarak daha yüksek mekanik özelliklere sahip olurken cam elyaf kumaşlardan üretilen yüzey tabakalı sandviçler diğerlerine göre biraz daha iyi mekanik özellikler sunmuştur.

Aslan vd. [40] farklı yüzey tabaka ve çekirdek malzemeleri ile ürettikleri sandviç kompozitlerin yüksek mukavemet ve düşük ağırlık istenen otomotiv şasilerinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Alüminyum levha ile karbon ve cam elyaf takviyeler polyester reçine ile laminasyonu sağlanarak yüzey tabakaları oluşturmuş, alüminyum bal peteği, polipropilen (PP) bal peteği ve polietilen tereftalat (PET) sert köpük malzemeler çekirdek olarak kullanılmıştır. Eğilme mukavemeti bakımından yüzey tabakalardan bağımsız olarak PET köpük çekirdek ile üretilen sandviçler en iyi değerleri verirken, basma mukavemetinde alüminyum bal peteği çekirdek malzemesi ile üretilen sandviç yapı daha üstün değerlerde bulunmuştur. Sonuçlar çekirdek malzemenin yüzey tabaka malzemelerine kıyasla araştırma bulguları üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir.

Uzay vd. [41] tarafından yapılan bir çalışmada karbon elyaf ve cam elyaf kumaşlar (düz dokuma ve  $\pm 45^\circ$  dokuma) yüzey tabakalarda, PVC köpük çekirdek malzemeleri ise ( $40 \text{ kg/m}^3$  ve  $48 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklarda), çekirdek tabakalarda kullanılmıştır. Polimer epoksi matris malzemesi ile üretilen sandviç yapılardan standart ölçülerde hazırlanan numuneler üç nokta eğme testlerine tabi tutulmuştur. İlaveten testler sonrası hasar durumları da stereomikroskop altında incelenmiştir. Sonuçlar, elyaf dokuma türünün ve çekirdek yoğunluğunun eğme yükü taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Hafif ve yüksek rijitlik ile mukavemet özelliklerinin elde edildiği sandviç yapıların malzeme evrenindeki yeri de belirtilmiştir.

Jiga vd. [42] eriyik yığma ile modelleme yöntemini uygulamış ve bir 3D yazıcı kullanarak Polilaktik asit (PLA) filament malzeme ile pal peteği, ters pal peteği ve kagome kafes çekirdek yapıları üretmiş ve ardından iki farklı kalınlıkta (0,5 ve 1 mm) alüminyum yüzey tabakalar ile sandviç yapı haline getirmiştir. Tabakalar çift komponentli epoksi

reçine yapıştırıcısı ile birleştirilmiştir. Eğme yükleri altında en zayıf mukavemet özellikleri gösteren kagome kafes çekirdek yapıları sandviç olurken bal peteği en iyi sonucu vermiştir. Ters bal peteği çekirdekli sandviç yapı ise en fazla deformasyona uğramıştır.

Kaveloğlu ve Temiz [43] 3D yazıcı ile PLA filament kullanarak farklı hücre genişliği (6-9-12 mm) ve hücre duvar kalınlıklarında (0,8-1,2-1,6 mm) ürettiği 20 mm kalınlıklı bal peteği çekirdek malzemeleri karbon elyaf takviyeli polimer kompozit yüzey tabakalar ile yapıştirarak çeşitli sandviç yapıları meydana getirmişlerdir. Parametrelerin bu şekilde seçilmesi ile farklı çekirdek yapılarının yaklaşık olarak eşit yüzey alanlarına sahip olması amaçlanmıştır. Sandviç yapıları 30-100J arasında darbe enerjisi testleri yapılmıştır. 6 mm hücre genişliği ve 0,8 mm hücre duvar kalınlığına sahip bal peteği çekirdekli sandviçlerin daha fazla sayıda hücreye sahip olması yüzey tabakalar ile daha fazla tutunma yüzeyi anlamına geldiğinden darbe yükleri altında daha iyi performans sergilemiştir.

## 2.2. Güçlendirilmiş Sandviç Yapılar

Güçlendirilmiş sandviç yapıları mevcut sandviç kompozit kombinasyonlarının çeşitli yöntemler ile ilave takviye elemanları kullanmak suretiyle veya farklı modifikasyon uygulamaları ile ortaya çıkarılan ve yapısal ağırlığın fazla artmadan mekanik performansın anlamlı bir şekilde iyileştiği kompozitler olarak tanımlanabilir.

Hedayati ve Sadighi [44], havacılıkta sıkça rastlanılan hasarlardan olan bir kuş çarpmasını sayısal olarak simüle etmiş ve Al köpük çekirdek ve Al yüzeylere (0,8 mm) sahip sandviç yapıya darbe yüklemelerinde bulunmuştur. Bununla birlikte iki yüzey tabaka arasında çekirdek malzemeleri iki kısma ayırdığı bir ara yüzey tabaka kullanmış ve içerdeki ara yüzey tabakanın pozisyonuna göre altı farklı konfigürasyon elde etmiştir. Optimum sonuçların ara yüzey tabakasının sandviç yapının ortasında konumlandırılması ile elde edildiği buna ek olarak sandviç yapının alt tarafında yüksek yoğunluklu köpük çekirdek, üst tarafında ise düşük yoğunluklu köpük çekirdek kullanılmasının alt yüzey tabakada daha az deformasyon bıraktığı belirtilmiştir. Çünkü bir kuş çarpması gibi gelen darbe yükünde enerji plakanın arkasına doğru yayılacaktır.

Chen vd. [45] 5 mm kalınlığında ve 60 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğundaki PVC köpük çekirdek malzemeyi cam elyaf yüzey tabakalar ile vakum destekli reçine transfer kalıplama tekniği kullanarak sandviç yapıları üretmiştir. Çekirdek-yüzey tabaka ara yüzey dayanımını iyileştirilmek ve dolayısıyla mekanik özellikleri artırmak için çekirdek malzeme ile yüzey

tabaka arasına sırasıyla cam, karbon ve kevlar kırılmış elyaflardan üretilen bir tabaka yerleştirmiştir. Arayüzey takviyeleri sayesinde sandviçlerin enerji sönümlenme kapasiteleri cam takviyesinde %161, karbon takviyesinde %23 ve kevlar takviyesinde %24 oranında artış göstermiştir. Üç nokta eğme testi altında ise sandviç yapılar cam, karbon ve kevlar arayüzey takviyesi sayesinde sırasıyla %100, %91 ve %89 oranında eğme özelliklerinde artış sağlamıştır. Kırılmış elyaflar çekirdek-yüzey tabaka ara yüzeyinde iyi bir tutunma sağlamış ve mekanik yükler altında arayüzeyde köprüleme görevi görerek çatlak ve hasar ilerlemesini geciktirmiş yapıyı toklaştırarak güçlendirmiş ve bu sayede üstün mekanik özellikler elde edilmiştir.

Tao vd. [46] 40 mm ve 60 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu PVC köpük çekirdek ve cam elyaf yüzeyler kullanarak silindirik formda sandviç yapı üretmişlerdir. PVC köpük malzemenin her iki yüzeyinde de oluklu kanallar açarak oluklara iki farklı çapta (1,2-2,4 mm) cam elyaftan üretilmiş kompozit çubuklar yerleştirilmiştir. Burkulma yüklerine karşı test edilen sandviç yapılarda sade çekirdekli sandviçlerde tipik olarak görülen yüzey dalgalanmaları şeklindeki hasarların güçlendirilmiş sandviçlerde görülmediği bununla birlikte basma yük taşıma kapasitesini güçlendirici çubukların çapına bağlı olarak %48,3 ve %50,1 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Güçlendirici çubukların yüzey tabaka-çekirdek katmanlarının birbirinden ayrılmasını önlediği ve lokal hasarların önüne geçtiği belirtilmiştir.

Abdi vd. [47] 11 mm ve 139 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu poliüretan köpük çekirdek malzemesine ayrı ayrı 2 mm ve 3 mm delikler açarak sandviç üretimi sırasında polyester reçine ile dolması ve böylece reçine pimleri halini almasını amaçlamıştır. 2 mm ve 3 mm reçine pimlerinin varlığı sandviçlerde sırasıyla %44 ve %80 oranında ağırlık artışına sebep olmuştur. Buna karşın basma özelliklerinde 3,6 ve 5,53 kat artış elde etmişlerdir. İlâveten araştırmacılar tabakalar arası ayrılmanın sandviç yapılar için başlıca hasar tiplerinden biri olduğunu vurgulamış ve bunun önüne geçilebilecek yöntemlerden bahsetmiştir. Batma/girinti hasarlarını önlemek için sandviç yüzey tabaka kalınlığını artırmak yerine çekirdek malzeme içerisinde açılacak deliklerin reçine pimlerine dönüşmesini sağlayarak daha maliyet etkin ve yüksek performans sunan bir çözüm önerisinde bulunmuştur.

Uzay ve Geren [48] 48 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip 10-20-30 mm kalınlıklardaki PVC köpük çekirdek malzemeleri karbon/epoksi yüzey tabakalar ile sandviç haline getirmiştir. Yüzey tabaka ve çekirdek arayüzeyini güçlendirmek için katmanlar arasında 100-200 mesh boyutlarında paslanmaz çelik tel örgü levha kullanmışlardır. Birer adet tel örgü levha hem yüzey tabakada katmanlar arasına hem de yüzey tabaka ile çekirdek malzeme arasına

yerleştirilmiş ve eğme testleri altında sandviç yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca testlerde iki farklı mesnetler arası açıklık ölçüsü (150-200 mm) belirlenmiştir. Tel örgü levhaların tabakalar arasında köprüleme görevi sayesinde sandviçlerin yük taşıma kapasitelerinde artış olduğu özellikle hasara uğradıktan sonra taşıma kapasitesindeki düşüşün sade çekirdekli sandviç yapıya kıyasla çok daha az olduğu bildirilmiştir. İlâveten metalik tel örgü levhalar ile yapılan bu tip bir hibritlemenin sandviçlerin eğme yükü altında daha sünek bir davranış sergilediği, batma/girinti şeklindeki hasar tipini ortadan kaldırdığı vurgulanmıştır.

Balıkoğlu vd. [23] 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip PVC köpük çekirdek malzemesine farklı çaplarda (4-6-8 mm) ve sıklıklarda (12-14-16-18 mm) olacak şekilde toplam 12 farklı düzende dairesel delikler açmış ve sandviç üretimi sırasında deliklerin reçine ile dolmasını sağlamıştır. Böylece yapı içerisindeki reçine pimleri düzlem dışı bir takviye görevi görmüştür. Eğme ve basma testleri neticesinde reçine pimlerinin sandviç kompozitlerde ağırlık artışına neden olmasına rağmen (%3 ile %67 arasında) mukavemet değerlerini çok daha yüksek bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Çünkü pimler sandviçin düşük kesme kuvvetlerinde hasara uğramasına engel olarak yapıyı güçlendirmiş ve rijitlik kazandırmıştır. Araştırmacıların 2018'de yaptıkları bir çalışmada [49] ise söz konusu parametrelerin sandviç yapıların basma mukavemetlerinde de önemli ölçüde bir artış olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bu tür konfigürasyonlar ile üretilen sandviç yapıların deniz uygulamaları için elverişli kompozit malzemeler olduğu rapor edilmiştir.

Yalkın vd. [50] köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin mekanik performansını artırmak için çekirdek malzemeye delikler açma ve dikişleme yöntemi ile güçlendirme etkilerini inceledikleri çalışmada, delikli ve dikişli köpük çekirdek kullanılarak üretilen sandviç kompozit panellerin basma, eğme, çekirdek kayma ve darbe performansları araştırılmıştır. Delikli çekirdeklerin, ağırlıkta sadece %7'lik bir artışla mekanik dayanıklılığı yaklaşık 2,5 kat artırdığı, dikişli çekirdeklerin ise bükülme sertliği ve maksimum kuvvet değerlerini dikiş iplik yoğunluklarına bağlı olarak artırdığı gözlemlenmiş, sonuçlar, delikli ve dikişli çekirdeklerin düz çekirdeklere kıyasla üstün mekanik performans sergilediğini ve bu yöntemlerin sandviç kompozitlerin performansını artırmak için basit ve etkili yöntemler olduğunu rapor edilmiştir. Çalışma, kompozit üreticilerine ve çekirdek üreticilerine dikişli çekirdeklerin optimize edilmesi ve yeni bir ürün olarak sunulması gerektiği konusunda dikkat çekmiştir. Aynı araştırmacılar bir başka çalışmalarında ise [51] 60 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu PVC köpük çekirdek ile cam elyaf/epoksi

yüzey tabakalar kullanarak çeşitli türlerde sandviç kompozitler (dikişleme, reçine pimleri ve ara yüzey tabakalara sahip çift katman sandviçler) üretmişlerdir. Dikişleme için 2400 tex (gram/1000 metre) cam elyaf iplikler kullanılmıştır. Yapılan düzlem dışı çekme ve basma testlerinde çekirdek modifikasyonlarının yapının mekanik özelliklerini oldukça yüksek oranlarda artırdığı tespit edilmiştir. İlaveten dikişleme yöntemi reçine pimlerine kıyasla basma ve çekme mukavemetlerinde sırasıyla yaklaşık %28 ve %22 daha iyi sonuç vermiştir.

Al-Shamary vd. [52] 5 mm kalınlığında ve  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğunda PVC köpük çekirdek malzemesini üç farklı konfigürasyonda cam elyaf yüzey tabakalar ile sandviç yapı haline getirmiştir. Konfigürasyonlar tek çekirdekli, iki çekirdekli arada ilave bir yüzey tabaka ve üç çekirdekli arada ilave iki yüzey tabaka olduğu sandviç kompozitlerdir. Sandviç yapılar 10-50 J aralığında düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuş ve yapı içerisindeki çekirdek sayısına bağlı olarak enerji absorbe etme kabiliyetinde artış ve darbe temas kuvvetinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Darbe enerjisinin artışıyla birlikte yüzey tabaka hasarlarının şiddeti de artmaktadır ancak çekirdek sayısına bağlı olarak hasar bölgesi daha az etkilenmektedir.

Han vd. [53] dikişli köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbelere karşı performansını deneysel ve sayısal olarak incelediği çalışmada, dikiş yoğunluğunun ve darbe enerjisinin sandviç yapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hasar morfolojisi, darbe temas kuvveti, penetrasyon alanı ve maksimum darbe kuvveti gibi parametreler analiz edilmiştir. Sonuçlar, dikişlerin tabakalar arası ayrılmayı tetikleyen çatlakları köprüleyerek onların yayılmasına mâni olmuş ve bu sayede yapının darbe mukavemetini artırdığını göstermiştir.

Jia ve Yan [54]  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu Polietilen tereftalat (PET) köpük çekirdek ve karbon/epoksi yüzey tabakalarda dikişleme için delikler açmış ve karbon elyaf iplikler kullanarak piramidal kafes şeklinde tüm sandviç yapıyı dikiş işlemi uygulamıştır. İki farklı kafes kesiti ve 15-60 J arası dört farklı darbe yükü altında sandviç yapılar düşük hızlı darbe direncine tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonuçları 1 mm kesite sahip piramidal kafes şeklinde dikilen sandviçlerin darbe dirençlerinin düz PET köpük çekirdekli sandviçten %10 daha fazla enerji absorbe ettiği ve kesitin 1,4 mm'ye çıkmasıyla enerji kapasitesinin daha da arttığı gösterilmiştir. Sonuç olarak dikişleme uygulamasının sandviç kompozitleri darbe yükleri altında yapısını toklaştırdığı vurgulanmıştır.

Zhao vd. [55] 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip PET köpük çekirdek ve karbon/epoksi yüzey tabakalı sandviç yapıya iki farklı yoğunlukta karbon elyaf iplikler kullanarak piramidal kafes şeklinde dikişleme işlemi uygulamış ve mekanik özellikleri (basma, kayma ve eğme) araştırmışlardır. Dikişlemede kullanılan iplik yoğunluğuna göre iki ile üç kat daha fazla basma mukavemetini artırırken eğme yük taşıma kapasitesinde ise %43 oranında artış elde etmişlerdir.

Zangana vd. [56] elyaf kompozit sandviç yapılar için yeni bir hibritleştirilmiş çekirdek malzemesi geliştirilmiştir. Cam elyafından yapılan trapezoidal oluklu çekirdek sandviç yapılar, kevlar ve zylon elyafı kullanılarak hibrit hale getirilmiştir. Hibrit kompozit çekirdekler, dört kat cam elyafı ile üretilmiş ve bir katmanı kevlar veya zylon elyafı ile değiştirilerek (cam-kevlar veya cam-zylon oranı 75:25) oluşturulmuştur. Düşük hızlı darbe testi uygulanarak kompozit sandviçlerin darbe davranışı, hasar modları, spesifik emilen enerji ve darbe sonrası arta kalan dayanıklılığı incelenmiştir. Deney sonuçları, yüksek performanslı elyaf ile hibritlenmiş sandviçlerin, darbe enerjisi eşiğinin üzerinde performans gösterdiğini göstermiştir. İlaveten, cam-kevlar ve cam-zylon hibritleşmesinin stres konsantrasyonunu en aza indirerek ciddi çekirdek yırtılmasını ortadan kaldıracabileceğini ve yapısal ağırlığı artırmadan yüksek spesifik enerji sağlayabileceğini göstermiştir. Darbe hasarından sonra trapezoidal oluklu çekirdek sandviç yapıların dayanıklılık ve rijitlik kaybı, cam-zylon hibritleşme tekniği kullanılarak %56 ve %69'a kadar azaltılabilmektedir. Ayrıca, ampirik bir yaklaşım ile kompozit çekirdek sandviçin arta kalan dayanıklılığını tahmin etmek için bir yöntem sunulmuştur.

Jebadurai ve Rose [57] 40 mm kalınlığında ve 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda PVC köpük çekirdek kullanarak ürettiği karbon/epoksi yüzeyli sandviçlerin çekirdeklerine farklı modifikasyonlar (sade çekirdekli, delikli çekirdekli ve delikli çekirdekli sandviçlerin polimer matrisine ağırlıkça %1,5 çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) katkılanmış yapılar olmak üzere) uygulamıştır. Nanopartikül ile takviye edilen matris malzemesinin çekirdek malzemedeki açılan deliklerde yapmış olduğu takviyeler sandviç yapıda tabakalar arası bağı güçlendirmiş ve diğer konfigürasyonlara göre daha üstün eğme ve basma özellikleri sağlamıştır.

Yalkın vd. [58] çeşitli sandviç modifikasyonları uygulayarak ürettiği sandviç kompozitleri 60-75J arasında düşük hızlı darbe testlerine tabi tutmuştur. 20 mm kalınlık ve 60 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip PVC köpük çekirdekli sandviçler referans alınmış ve sırasıyla 10'ar mm çekirdek kalınlıklı sandviçlerin bir ara yüzey tabaka ile ayrıldığı yapı, 2,5 mm

delikler açılmış 10'ar mm çekirdek kalınlıklı sandviçlerin bir ara yüzey tabaka ile ayrıldığı yapı, 10'ar mmlik çekirdeklerin 2400 tex cam elyaf iplikler ile dikildiği sandviçler yapı ve son olarak yüzey tabakaları ile birlikte tüm sandviç yapının 2400 tex cam elyaf iplikler ile dikildiği yapı meydana getirilmiştir. Absorbe edilen enerji bakımından kıyaslandığında çekirdek malzemesi dikilenler reçine pimlerine kıyasla daha fazla enerji absorbe ettiği ortaya çıkmıştır. Hasar durumlarına bakıldığında ise tüm yapının dikildiği durumda çekirdek yüzey tabaka ayrılması minimum düzeydedir. Sadece çekirdek malzemesinin dikildiği yapıda da anlamlı bir iyileşme olduğundan ve yüzey tabakaların dikildiği sonuçlardan uzak olmaması nedeniyle araştırmacılar tarafından sadece çekirdek malzemesine dikişleme uygulamasının daha pratik olduğu önerilmiştir.

Drake vd. [59] dikiş yoğunluğu (birim alandaki dikiş sayısı: 0,16-0,58-1 dikiş/cm<sup>2</sup>), dikişlemede kullanılan iplik demetinin yoğunluğu (400-800-1200 denier) ve yüzey tabaka kalınlığını (1,78-2,67-3,56 mm) parametre olarak ele aldığı çalışmada karbon/epoksi yüzey tabakalar ve 110 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu polimer köpük ile ürettiği sandviçlerde dikişleme parametrelerinin artışıyla çatlak ilerlemesinin önüne geçildiği ve kırılma tokluğunun ciddi olarak artırdığı gösterilmiştir. Araştırmacılar bir başka çalışmalarında ise [60] diğer yaklaşımlara kıyasla dikişleme uygulamasının kompozit üretiminde tasarım esnekliği sağlayan maliyet-etkin bir yöntem olduğunu belirterek bu alanda yapmış oldukları derleme çalışmasında sandviç kompozitlerde dikişleme parametrelerinin kapsamlı bir şekilde incelendiği çalışmaların yetersiz olduğu ve daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Sun vd. [61] 80 kg/m<sup>3</sup> ve 30 mm kalınlığındaki PVC köpük çekirdek malzeme ile karbon elyaf yüzey tabakalı sandviç yapıyı iki farklı karbon elyaf iplik demetleri (12k ve 24k) ile dikerek yapıyı güçlendirmiş ve basma ve üç nokta eğme testlerine tabi tutmuştur. İplik demetinin yoğunluğuna göre mekanik özelliklerde artış görülmüştür. Basma testlerine sırası ile %20,9 ve %43,1 oranında artış gözlenmiştir. Eğme testlerinde ise %5.2 ve %10.4 artış bulunmaktadır. Dikişleme uygulaması sayesinde sandviç yapının tabakalar arası bağ mukavemeti iyileşmiş, yük altında tabakalar arasında kuvvet transferi daha iyi sonuçlanmıştır. Bu sayede çekirdek kayma gerilmelerinde artış sağlanmıştır. Uygulamanın laboratuvar şartlarında manuel olarak yapıldığına dikkat çeken araştırmacılar, bu tip bir güçlendirmenin yapısal bütünlüğü muhafaza ederek yüksek rijitlik ve mukavemet elde edilmesini sağlayan yöntemin otomasyona uygun hale getirilmesinin ve bununla birlikte ortaya çıkabilecek zorlukların çözüme kavuşturulması gerektiğini vurgulamıştır.

### 2.3. Tez Çalışmasının Amacı ve Önemi

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde sandviç kompozitlerde çeşitli yüzey tabaklar ve çekirdek malzemelerin birleştirilmesi ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmış ve bu hususta yukarıda da örnekleri verilen birtakım çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sandviç yapıların hafifliğine karşın sunmuş olduğu yüksek rijitlik, mukavemet, darbe direnci ve yalıtım özellikleri gibi avantajlar uzay havacılık, enerji, savunma, ulaştırma, spor ekipmanları gibi çok çeşitli endüstrilerde çözüm olabilmektedir ve bu durum araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir.

Bu tez çalışmasında çekirdek tabakanın dikilmesi yöntemiyle sandviç yapıların güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Literatürde mevcut bulunan çalışmalardan anlaşılacağı üzere dikişleme uygulamasının sandviç kompozitlerin yapısal performansına katkı sağladığı açıktır. Önceki çalışmaların çoğunlukla son yıllarda gerçekleştirilmiş olması konunun güncelliğine işaret etmektedir. İlaveten araştırmacıların yoğun olarak ilgisini çekmesinin bir nedeni de yöntemin sandviç ağırlığında fazla bir artışa neden olmadan yüksek mekanik özellikler sunmasıdır. Ancak dikişleme yönteminin uygulanmasında göz önünde bulundurulmuş parametrelerin dar kapsamda kaldığı ve daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir [60]. Bu sebeple çalışmada çekirdeklerin dikilmesinde üç farklı cam elyaf iplik yoğunluğu (300-600-1200 tex) kullanılmış ve dikişleme uygulamasının farklı çekirdek kalınlığına (10-20 mm) ve yoğunluğuna (60-80 kg/m<sup>3</sup>) sahip sandviçlerin basma ve eğme mekanik özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Hasara uğrayan sandviçler makro ve mikro düzeyde incelenerek hasar mekanizmaları ortaya çıkarılmış ve elde edilen araştırma bulguları hasar modları ile ilişkili olarak açıklanmıştır.

Güçlendirme uygulamaları sandviçlerin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlarken yapısal ağırlığında da bir miktar artışa sebep olmaktadır. Ancak literatürde yer alan çalışmaların neredeyse tamamı ağırlık artışını göz ardı etmekte ve sadece mekanik özelliklerdeki artışlardan bahsedilmektedir. Bu da farklı çalışmalarda elde edilen bulguların birbirleri ile kıyaslanmasına mâni olmakta ve her çalışmayı kendi içinde değerlendirmek zorunda bırakmaktadır. Oysaki sandviç yapılarda mukavemet ve ağırlık ön plana çıkan en önemli iki parametredir. Bu nedendir ki literatürde mukavemet/yoğunluk oranının dikkate alındığı ve mekanik avantaj olarak adlandırılan yapısal performans göstergesi tanımlanmıştır [21]. Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular sandviçin yoğunluğuna bölünmesi sayesinde mekanik performanslar sandviç

yapıyı meydana getiren bileşenlerden bağımsız hale getirilmiş ve sonuçların literatürde yer alan önceki çalışmalar ile kıyaslanması mümkün hale gelmiştir.



### 3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışması, cam/epoksi yüzey tabakalara sahip Polyvinylklorür (PVC) köpük çekirdek yapıları farklı yoğunlukta cam elyaf iplikler ile güçlendirilmiş sandviç kompozitlerin polimer matris malzemesi ile üretilmesi, basma ve eğme test yöntemleri ile mekanik özelliklerinin tespit edilmesi, hasar incelemesi ve sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesi konularını kapsamaktadır.

#### 3.1. Materyal

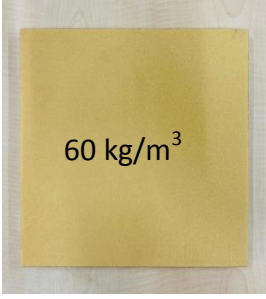
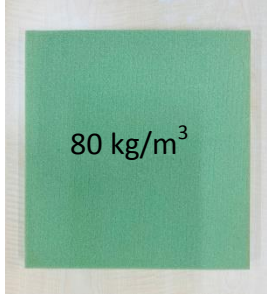
Sandviç kompozitlerin yüzey tabakalarında E-cam elyaf kumaşlar, çekirdek katmanında rijit, çapraz bağlı, kapalı hücre yapılı PVC köpükler kullanılmıştır. Sandviç kompozit tabakaların birleştirilmesinde ise epoksi reçine ile ona uygun bir sertleştirici tarafından hazırlanan polimer matris malzeme kullanılmıştır. Ayrıca sandviç yapıların çekirdek malzemesinin güçlendirilmesinde 300 – 600 – 1200 tex (1000 metredeki gram kütlesi) yoğunluğunda E-cam elyaf demetinden oluşan iplikler takviye malzeme olarak kullanılmıştır. Sandviç bileşenleri olarak belirtilen malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1-3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2'de görüldüğü üzere iki farklı yoğunluk ve kalınlıkta çekirdek malzeme kullanılmıştır. Çünkü deneysel çalışmalarda çekirdek yoğunluğu, dikişlemede kullanılan cam elyaf iplik yoğunluğu ve çekirdek kalınlığı gibi faktörlerin sandviç yapıların basma ve eğme test sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çizelge 3.3'te sandviç kompozitlerin üretiminde kullanılan polimer matris malzemesinin özellikleri verilmiştir. Matris malzemesi iki komponentten oluşmakta olup epoksi reçine ve ona uygun bir sertleştiricinin belirli bir karışım oranı ile hassas bir şekilde karıştırılması neticesinde elde edilmektedir.

**Çizelge 3.1.** E-cam elyaf malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri [62]

Türü	Düz dokuma (200g/m <sup>2</sup> alansal yoğunluk, 0,18 mm katman kalınlığı)
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2560
Çekme mukavemeti (MPa)	3445
Elastisite modülü (GPa)	76
Birim uzama (%)	2,75

**Çizelge 3.2.** Çekirdek malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri [63]

Türü	Airex C70	
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	 60 kg/m <sup>3</sup>	 80 kg/m <sup>3</sup>
Kalınlık (mm)	20	10 - 20
Basma mukavemeti (MPa)	0,90	1,45
Basma modülü (MPa)	69	104
Çekme mukavemeti (MPa)	1,30	2,00
Kesme mukavemeti (MPa)	0,85	1,20
Kesme modülü (MPa)	22	30

**Çizelge 3.3.** Polimer matris malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri [64]

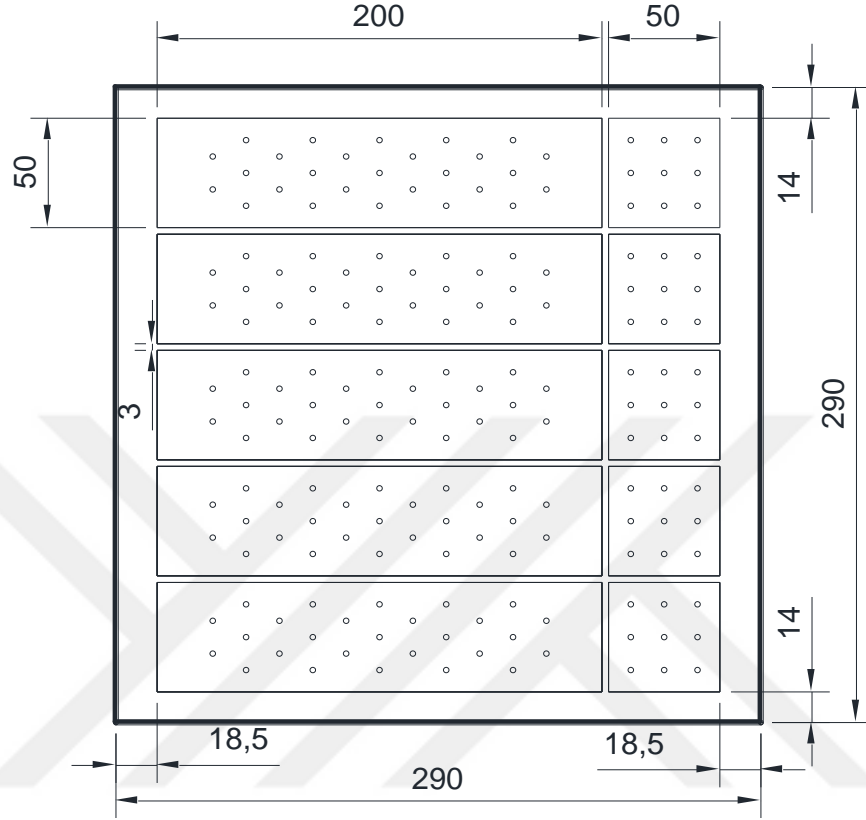
Türü	MGS L160/H160
Epoksi reçine/Sertleştirici Karışım oranı	100:25
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1190
Çekme mukavemeti (MPa)	75
Eğme mukavemeti (MPa)	125
Basma mukavemeti (MPa)	90

## 3.2. Metot

### 3.2.1. Sandviç yapıların üretilmesi

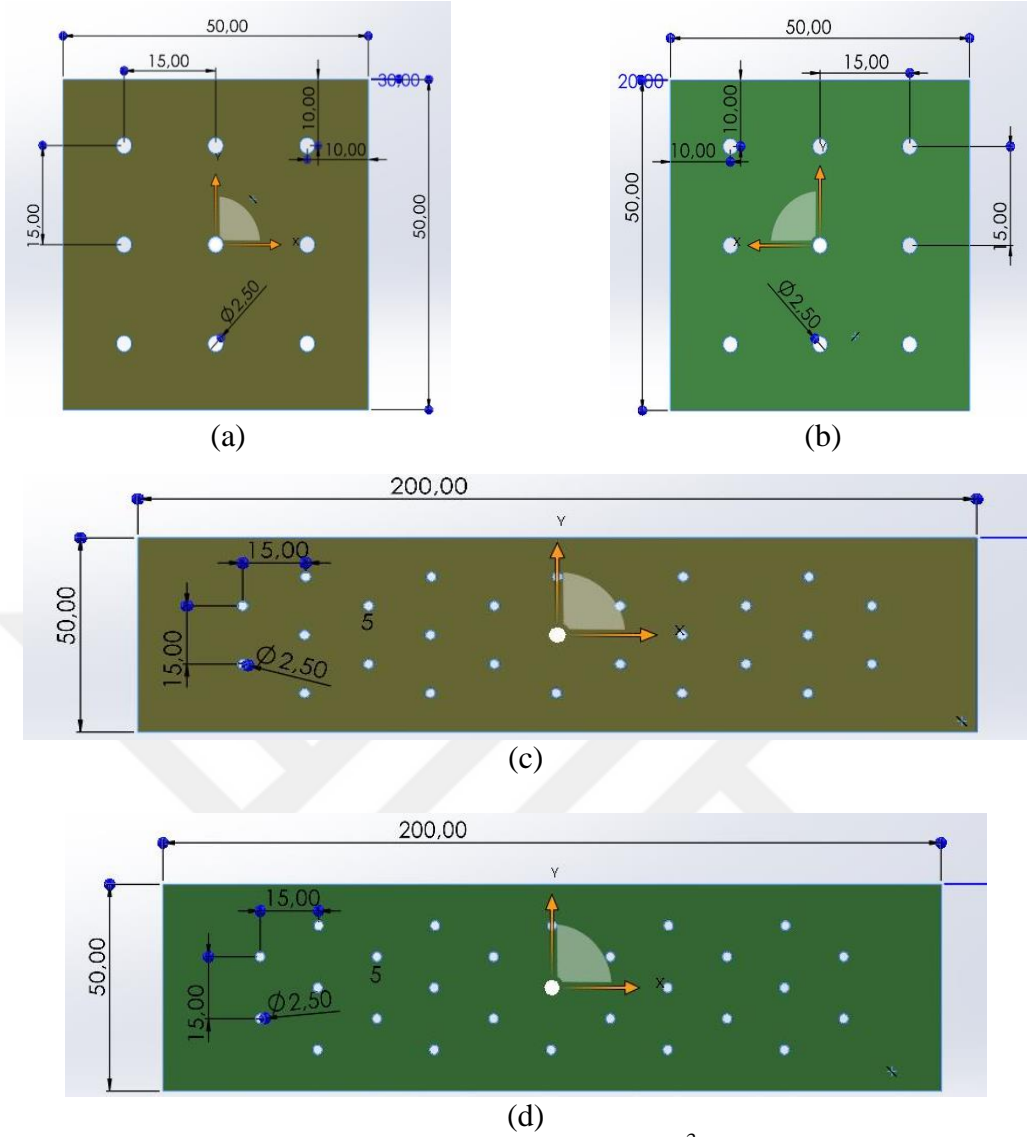
Sandviç yapılar, Çizelge 3.1-3.3'te verilen malzemeler kullanılarak el yatırma ve vakum torbalama yönteminin uygulanması ile üretilmiştir. Çekirdek yapısı E-cam elyaf iplikler ile güçlendirilen sandviçlerde ise çekirdek malzemesinin tavkiyelendirilmesi ayrı bir işlemde geçmektedir. Öncelikle PVC köpük çekirdek malzemelere 2,5 mm freze çakısı ile CNC freze tezgahında delikler açılmıştır. Daha sonra açılan deliklerin içi basınçlı hava yardımı ile temizlenmiştir. Şekil 3.1'de güçlendirilmek üzere hazırlanan çekirdek malzemenin teknik resmi şematik olarak verilmiştir. Resimde basma ve eğme numuneleri de boyutları ile birlikte belirtilmektedir. 200 mm x 50 mm ebatlarda eğme numuneleri, 50 mm x 50 mm ebatlarında basma numuneleri görülmektedir. Her birinden beşer numune test edilmek üzere planlandığından toplam çekirdek boyutları kesim tezgahında ihtiyaç duyulan fire payları ile birlikte 290 mm x 290 mm olarak belirlenmiştir. Bu aynı zamanda yüzey tabakalarda kullanılan cam elyaf kumaşların da ebatlarını dolayısıyla sandviç yapının yüzey alanını ifade etmektedir. Basma ve eğme test sonuçlarında tutarlılığı

sağlamak için numunelerinin üretim şartları özdeş tutularak test numunelerinin aynı plakadan çıkartılmasına dikkat edilmiştir.

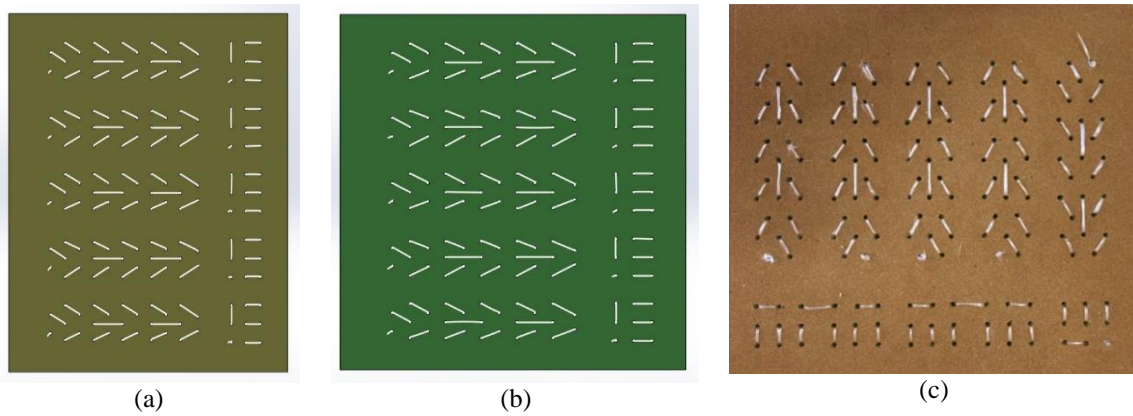


Şekil 3.1. Çekirdek malzemesine 2,5 mm freze çakısı ile deliklerin açılması

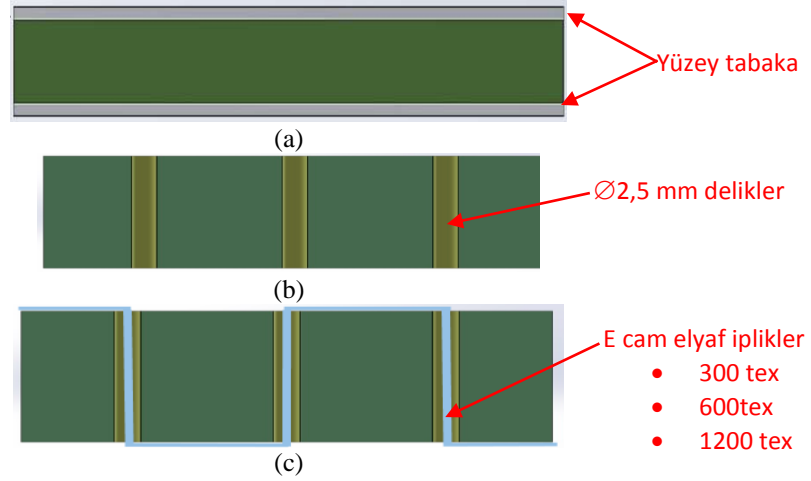
Deliklerin ve dikişleme işleminin tasarımı Solidworks programında gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Şekil 3.3’te de dikişleme işleminin tasarım programı ile ne şekilde gerçekleştirildiği gösterilmekte ve  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu bir çekirdek malzeme de örnek olarak verilmektedir. Çekirdek yapısının kesit görünümü ise Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.2. Çekirdek yapıya deliklerin açılması, a)  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu basma numunesi, b)  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu basma numunesi, c)  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu eğme numunesi, d)  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu eğme numunesi



Şekil 3.3. Çekirdek malzemelere dikişleme işleminin uygulanması, a)  $60 \text{ kg/m}^3$ , b)  $80 \text{ kg/m}^3$ , c)  $60 \text{ kg/m}^3$  (gerçek plaka)



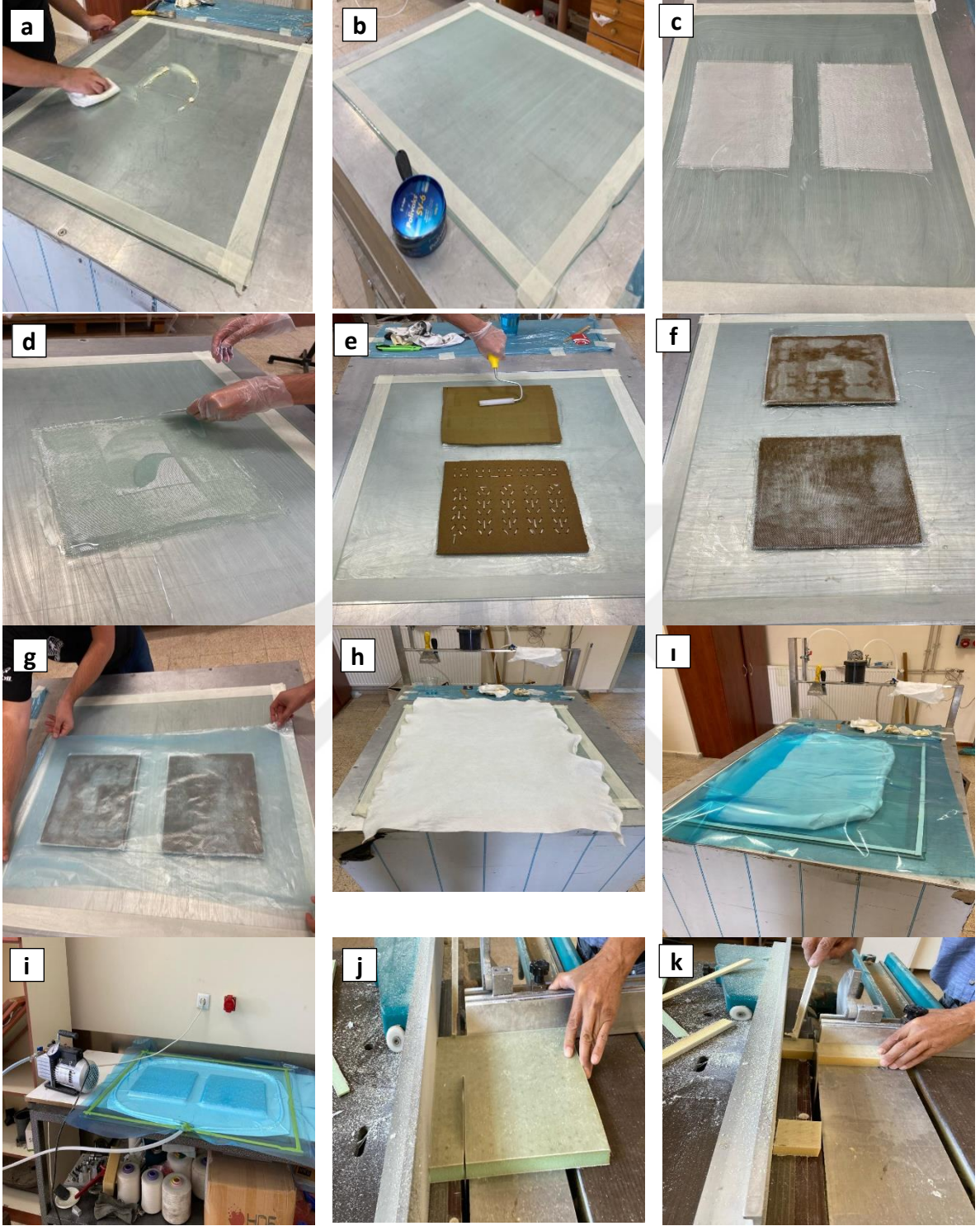
Şekil 3.4. Dikişleme uygulamasının süreç tasarımı, a) referans çekirdekli sandviç, b) Ø2,5 mm delikler açılmış çekirdek yapı, c) E-cam elyaf iplikler ile dikişleme uygulanmış güçlendirilmiş çekirdek yapı

Sandviç yapılar, yukarıda da belirtildiği üzere el yatırması ve vakum torbalama yönteminin uygulanması ile üretilmiştir. Laminasyon işlemi açık kalıplama şeklinde, kompozit üretim tezgahı üzerine yerleştirilmiş temperli cam yüzey üzerinde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle yüzey üzerine Polivaks SV-6 kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Uygulama 15 dk aralıklar ile üç tekrarlı yapılmıştır. Kalıp ayırıcı, üretim işlemi tamamlanan sandviç yapının laminasyon gerçekleştirilen temperli cam yüzeyden kolaylıkla ayrılması görevini üstlenmektedir. Kalıp ayırıcı uygulama işlemi sırasında polimer matris reçine hazırlığı da yapılmıştır. Kullanılacak takviye elemanlarının kütlesi ölçülmüş ve aynı miktarda matris malzemesi hazırlanmıştır. Reçine ve sertleştiricinin ağırlıkça oranı üretici firmanın önerisine istinaden 100:25 olacak şekilde ayarlanmıştır. Reçine içerisine ilave edilen sertleştiricinin karışımı hassas bir şekilde, hava kabarcıklarının oluşumuna imkan vermeden yapılmıştır. Matris malzemesi hazır olduktan sonra sandviç yapının alt yüzey tabakasını oluşturan cam elyaf kumaşlar serilmiştir. Beş kat cam elyaf kumaş her defasında reçine emdirilmek suretiyle serilmiştir. Daha sonra ara çekirdek katmanı yerleştirilmiş ve üzerine beş kat daha cam elyaf kumaşlar serilmiştir. Her katmanda matris uygulaması ile birlikte rulo ile pres yapılmış ve böylece hava kabarcıklarının oluşumuna karşı tedbir alınmıştır. Ayrıca köpük çekirdek yapısına rulo yardımı ile uygulanan pres sayesinde yüzey tabakalar ile çekirdek arayüzeyi arasında tutunma dayanımı mekanik olarak artırılmıştır. Reçine ile sertleştiricinin kimyasal reaksiyonu hızlanmadan laminasyon süreci tamamlanmıştır. El yatırma işleminin tamamlanmasıyla birlikte sandviç yapının üzerine sırasıyla delikli ayırıcı film ve vakum battaniyesi serilmiştir. Delikli ayırıcı film, vakum altında kürlenmesi gerçekleşecek sandviç yapıdan fazla reçinenin uzaklaştırılması, hava

kabarcıklarının tahliye edilmesi ve laminasyonu tamamlanan sandviç kompozit plakaya yapışmamasını sağlamakta; vakum battaniyesi ise fazla reçineyi üzerinde toplamaktadır. Son olarak sandviç kompozit yapı, vakum torbası yardımı ile içerisinde vakum bağlantı hortumlarının yer aldığı tamamen sızdırmaz bir ortam içerisine alınır. Kapalı sistemin sızdırmazlığı cam ve vakum torbası yüzeylerine güçlü tutunan çift taraflı bir bant ile sağlanmıştır.

Sandviç yapıların kürlenme işlemi ise bir vakum pompası yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Sandviçler, vakum atmosferi altında ve oda sıcaklığında yaklaşık 24 saat süre bekletilerek kürlenme işlemi tamamlanmıştır. Kürlenme tamamlandıktan sonra kapalı sistemin vakum basıncı boşaltılmış ve sırasıyla vakum torbası, vakum battaniyesi ve delikli ayırıcı film sandviç yapı üzerinden kaldırılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen sandviç plaka temperli cam kalıp yüzeyinden bir spatula yardımı ile basitçe kaldırılmıştır.

Elde edilen sandviç plakalardan test numuneleri çıkartmak için bir hızar tezgahı kullanılmıştır. Şekil 3.5'te laminasyon, vakum torbalama yönteminin aşamaları, vakum uygulaması ve test numunelerinin elde edilmesine dair fotoğraflar adım adım verilmiştir.



Şekil 3.5. Sandviç kompozit üretimi ve test numunelerinin elde edilmesi, a,b) Kalıp ayırıcı ile yüzey hazırlığı, c,d) laminasyon işlemi, e) rulo uygulaması, f) laminasyonun tamamlanması, g) delikli ayırıcı film yerleştirilmesi, h) vakum battaniyesi yerleştirilmesi, ı) vakum torbasının yerleştirilmesi, i) vakum altında kürlenme, j) eğme test numunesinin elde edilmesi, k) basma test numunesinin elde edilmesi

Bu tez çalışmasında üretimi gerçekleştirilen sandviç yapılarda değişken parametreler çekirdek yoğunluğu, çekirdek kalınlığı ve çekirdek yapının güçlendirilmesinde kullanılan cam elyaf dikiş iplik yoğunluğu olarak ele alınmıştır. Böylece dikkate alınan parametrelerin sandviç yapıların basma ve eğme mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Çizelge 3.4'te göz önünde bulundurulmuş parametreler ve onların seviyeleri verilmiştir. 60 ve 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk ile 10 ve 20 mm kalınlıklı çekirdekler 300-600-1200 tex cam elyaf takviye iplikler ile güçlendirilmiştir. Sonuçların etkisini görebilmek için güçlendirilmemiş referans çekirdekli sandviçler de üretilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Tez çalışmasında dikkate alınan sandviç yapı parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviyeler			
Çekirdek yoğunluğu	60 kg/m <sup>3</sup>	80 kg/m <sup>3</sup>	-	-
Çekirdek kalınlığı	10 mm	20 mm	-	-
Cam elyaf iplik yoğunluğu	0	300 tex	600 tex	1200 tex

Çizelge 3.5'te tasarım parametrelerine istinaden üretilen sandviç yapılar verilmiştir. Burada örneklem adı olarak her bir sandviç yapıyı temsil eden kodlama sistemi kullanılmıştır. Örneğin, örneklem adı K10.Y80.R sandviç kompozitte, K çekirdek kalınlığına (10 mm), Y çekirdek yoğunluğuna (80 kg/m<sup>3</sup>) işaret etmektedir. Sondaki R ise sandviç yapının referans çekirdekli olduğunu yani herhangi bir cam elyaf iplik ile takviye edilmediğini belirtmektedir. K20.Y60.300T sandviç kompozit ise çekirdek yapısı 20 mm kalınlığında, 60 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda ve 300 tex cam elyaf iplik ile güçlendirilmiş anlamına gelmektedir. Çizelge 3.5'ten de anlaşılacağı üzere 12 farklı sandviç kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim ve deney sayısını azaltmak için sandviç kompozitlerin tasarımında Tam Faktöriyel yöntemi yerine Yanıt Yüzey Modeli yöntemi izlenmiş ve bu amaçla çekirdek yoğunluğunun sonuçlar üzerindeki etkisi 20 mm kalınlıklardaki sandviçlerde kıyaslanırken çekirdek kalınlığının sonuçlar üzerindeki etkisi ise 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğundaki PVC köpükler ile üretilen sandviçler arasında kıyaslanmıştır. Çizelge 3.5'te belirtilen her plakadan beşer adet eğme ve basma test numuneleri elde edilmiştir. Toplamda 120 mekanik test yapılmak üzere sandviç kompozitlerin üretimi tamamlanmıştır.

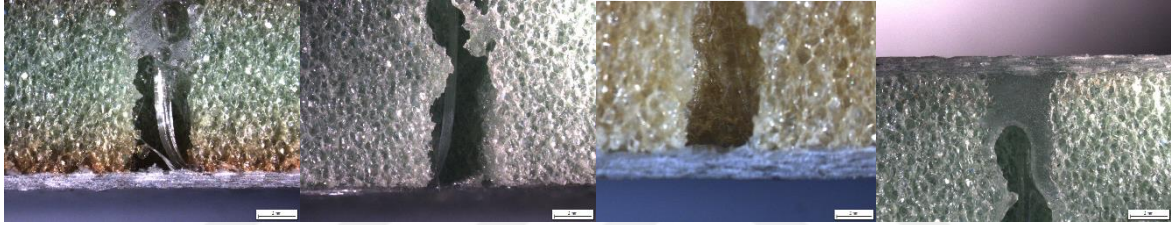
**Çizelge 3.5.** Üretimi gerçekleştirilen sandviç yapıların örneklem adları ve özellikleri

Örneklem adı	Çekirdek kalınlığı (mm)	Çekirdek yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Takviye iplik yoğunluğu (Tex)
K10.Y80.R	10	80	-
K10.Y80.300T	10	80	300
K10.Y80.600T	10	80	600
K10.Y80.1200T	10	80	1200
K20.Y60.R	20	60	-
K20.Y60.300T	20	60	300
K20.Y60.600T	20	60	600
K20.Y60.1200T	20	60	1200
K20.Y80.R	20	80	-
K20.Y80.300T	20	80	300
K20.Y80.600T	20	80	600
K20.Y80.1200T	20	80	1200

Elde edilen test numunelerinin her biri 0,01 hassasiyetli terazi ile ayrı ayrı tartılmış ve 0,05 mm hassasiyetli kumpas yardımı boyutları ölçülerek teorik yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Basma ve eğme numunelerinin kütle ve yoğunluk değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Görüldüğü üzere örneklem grupları arasında az da olsa farklılıklar bulunmaktadır. 10 mm çekirdek kalınlığındaki sandviçlerin basma ve eğme test numuneleri için yoğunluk değerleri arasındaki fark en fazla %0,5 iken 20 mm kalınlıklardaki numunelerin yoğunluk değerleri arasındaki fark en fazla %3 civarındadır. Bu farklılığın nedeni üretim esnasında dikişleme için açılan deliklerde her örneklem gurubu için farklı miktarlarda matris malzemesinin yer aldığı ile ilgili olduğu değerlendirilmiştir. Çünkü numunelerden kesitler alınarak stereomikroskop incelemesi yapılmış ve bu durum Şekil 3.6'da görüldüğü üzere tespit edilmiştir. Dikişleme için açılan deliklerden cam/epoksi takviye çubuklarının kurlenmiş olduğu fakat delikler içerisinde farklı dikiş yoğunlukları için farklı reçine miktarlarının mevcut olduğu görülmektedir. Bu durum aynı üretim parametrelerine sahip sandviçler için çok az da olsa yapısal yoğunlukların farklılaşmasına neden olmuştur.

**Çizelge 3.6.** Basma ve eğme test numunelerinin ortalama kütle ve yoğunluk değerleri

Örneklem adı	Basma test numunelerinin kütlesi (kg)	Eğme test numunelerinin kütlesi (kg)	Basma test numunelerinin yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Eğme test numunelerinin yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
K10.Y80.R	0,00887	0,03535	299,544	298,312
K10.Y80.300T	0,00944	0,03759	318,515	317,198
K10.Y80.600T	0,00959	0,03852	323,578	325,046
K10.Y80.1200T	0,00990	0,03938	334,110	332,321
K20.Y60.R	0,01001	0,04045	183,176	185,108
K20.Y60.300T	0,01100	0,04324	201,446	197,904
K20.Y60.600T	0,01103	0,04334	201,886	198,352
K20.Y60.1200T	0,01133	0,04477	207,378	204,897
K20.Y80.R	0,01117	0,04501	204,485	205,995
K20.Y80.300T	0,01215	0,04809	222,352	220,101
K20.Y80.600T	0,01253	0,04898	229,382	224,146
K20.Y80.1200T	0,01274	0,04932	233,153	225,712



Şekil 3.6. Numunelerin kesitlerinden alınan stereomikroskop görüntüleri

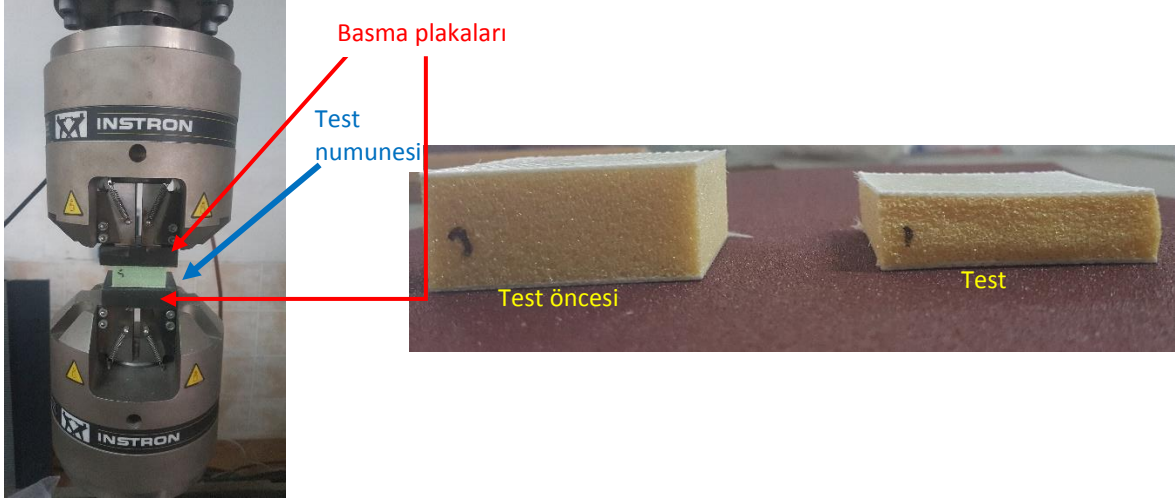
### 3.2.2. Sandviç yapıların basma testleri

Üretimi tamamlanan sandviç kompozit plakalardan 50 mm x 50 mm ölçülerinde basma testi numuneleri hazırlanmıştır. Testler, Instron 8801 (100 kN) üniversal test cihazında, ASTM C365 Standardında [65] belirtildiği üzere dakikada 0,5 mm deplasman hızıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarının tutarlılığını sağlayabilmek için testler beş numune ile tekrarlanmıştır. Şekil 3.6'da basma testine ait fotoğraf verilmektedir. ASTM C365 Standardına göre sandviç yapının basma mukavemeti ve birim şekil değişimi değerleri Eşitlik 3.1 – 3.2 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_c = \frac{P}{a \cdot b} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta_t}{t_c} \quad (3.2)$$

Burada  $\sigma_c$  ve  $\varepsilon_c$  sırasıyla düzlem dışı basma gerilmesi ve birim şekil değişimini, a ve b yüzey boyutlarını,  $t_c$  çekirdek kalınlığını,  $\Delta_t$  ise çökme miktarını belirtmektedir.



Şekil 3.6. Sandviç numunelerin basma testleri

### 3.2.3. Sandviç yapıların eğme testleri

Üretimi tamamlanan sandviç kompozit plakalardan 200 mm x 50 mm ölçülerinde eğme testi numuneleri hazırlanmıştır. Üç nokta eğme testleri ASTM C393 Standardına [66] göre gerçekleştirilmiştir. Instron 8801 universal test cihazında yapılan testlerde sandviç kompozit numuneler 2 mm/dk hız ile eğme yüklerine maruz bırakılmıştır. Mesnetler arası açıklık 150 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.7’de sandviç bir numunenin eğme testi gösterilmiştir. Her örneklem grubu için testler beş kez tekrar edilmiştir.



Şekil 3.7. Sandviç numunelerin eğme testi

Eğme testi neticesinde sandviç kompozitlerin yük taşıma kapasiteleri tespit edilmiş ve ASTM C393 Standardına göre çekirdek kayma gerilmesi ve yüzey tabaka gerilmeleri Eşitlik 3.3 - 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_s^{ult} = \frac{F_{maks}}{(d + c) \cdot b} \quad (3.3)$$

$$\sigma_F^{ult} = \frac{F_{maks} \cdot S}{2t_f \cdot (d + c) \cdot b} \quad (3.4)$$

Burada  $\sigma_s^{ult}$  ve  $\sigma_F^{ult}$  sırasıyla sandviçlerde meydana gelen maksimum çekirdek kayma ve yüzey tabaka gerilmelerini,  $t_c$ ,  $c$ ,  $d$  yüzey tabaka, çekirdek ve sandviç kalınlığını;  $b$  sandviç genişliğini,  $S$  ise mesnetler arası açıklık değerini ifade etmektedir.

### 3.2.4. Mekanik test sonuçlarının değerlendirilmesi

Sandviç üretim parametrelerinin basma ve eğme test sonuçları üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için iki yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Yanıt Yüzey Metodu (RSM: Response Surface Methodology) kullanılarak matematiksel modeller oluşturulmuş ve %95 güven aralığında parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi istatistiksel olarak incelenmiştir. Merkezi kompozit tasarımı kullanılarak parametrelerin sonuçlar üzerindeki bağımsız etkileri ve birbirleri ile etkileşimli etkileri ortaya çıkarılmış ve en etkili parametreler tespit edilmiştir. Basma ve eğme yük taşıma kapasitesi, basma ve eğme altında kuvvet ve yoğunluğun birlikte değerlendirildiği mekanik performansın bir göstergesi olan mekanik avantaj, basma mukavemeti, maksimum çekirdek kayma mukavemeti ve maksimum yüzey tabaka gerilmesi gibi özellikler incelenmiştir.

### 3.2.5. Sandviç yapıların hasar analizi

Basma ve eğme testlerine maruz kalan sandviç yapıların hasar mekanizmalarını tespit edebilmek için hasara uğrayan sandviç kompozitler Nikon SMZ1500 isimli stereomikroskop (Şekil 3.8) ile incelenmiştir. Özellikle dikişleme parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkisi sandviçlerin mekanik kuvvetler altında hasar davranışları ile ilişkilendirilerek açıklanmıştır.

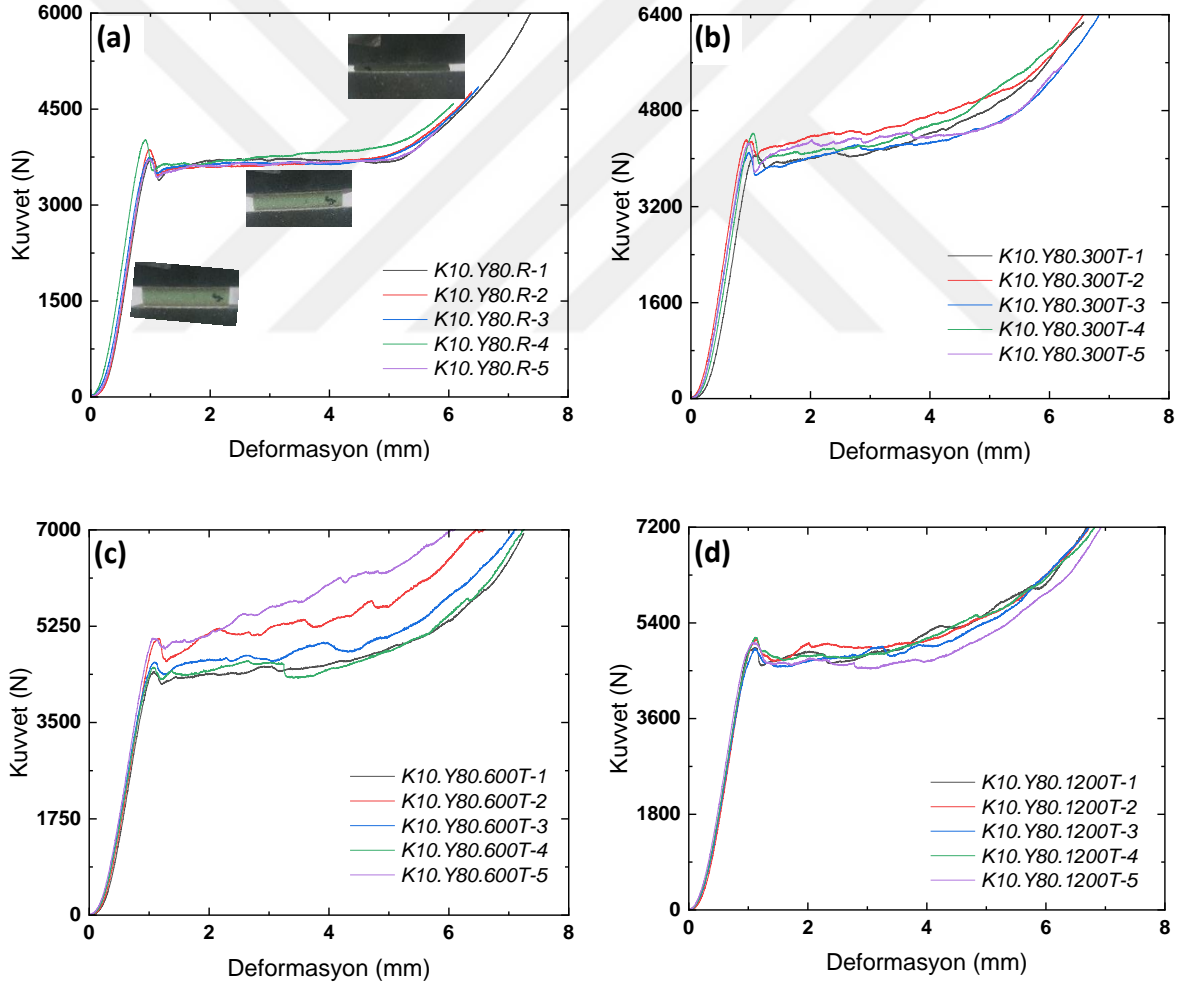


Şekil 3.8. Sandviçlerin hasar analizinde kullanılan stereomikroskop

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Çekirdek Yapıları Güçlendirilmiş Sandviç Yapıların Basma Özellikleri

Çeşitli yoğunluklardaki cam elyaf iplikler ile çekirdek yapısı güçlendirilmiş sandviç yapıların ve kıyaslamada kullanılmak üzere üretimleri gerçekleştirilen referans sade çekirdekli sandviç yapıların düzlem dışı basma testleri neticesinde kuvvet ve deformasyon verileri elde edilmiştir. Bu veriler ışığında basma kuvveti-deformasyon grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.1-4.3'te verilmiştir. Şekil 4.1, 10 mm kalınlık ve  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip sandviç yapıların, Şekil 4.2, 20 mm kalınlık ve  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip sandviç yapıların, Şekil 4.3 de 20 mm kalınlık ve  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip sandviç yapıların test sonuçlarını göstermektedir.



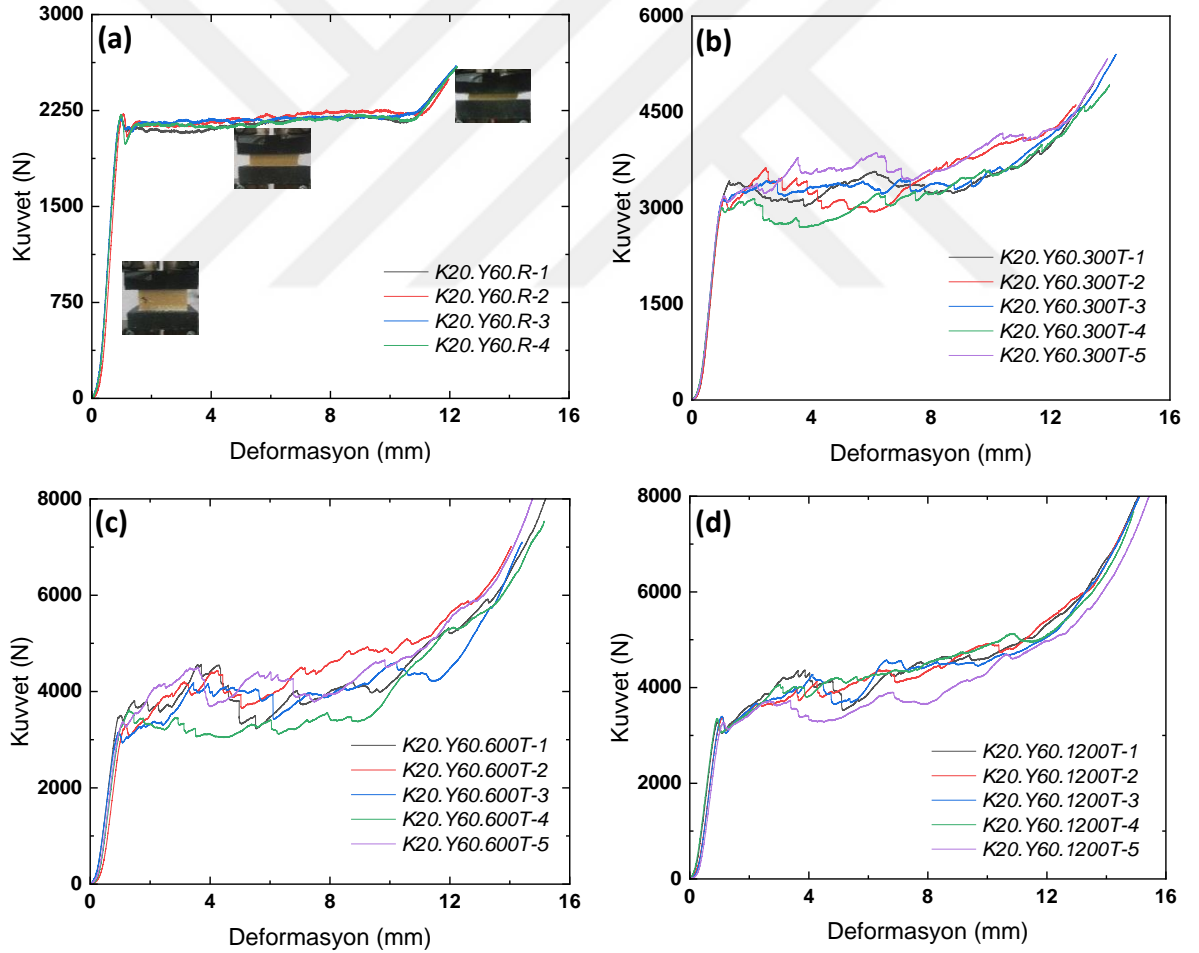
Şekil 4.1. K10.Y80 sandviç yapıların basma yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

Güçlendirilmemiş referans çekirdekli sandviç yapılar (Şekil 4.1a, 4.2a ve 4.3a) basma kuvvetleri altında tipik olarak üç aşamadan sonra hasara uğramıştır. İlk aşama elastik bölge olarak adlandırılan eğimin sabit olduğu kısım, ikinci aşama plastik deformasyon bölgesi, üçüncü aşama ise densifikasyon olarak adlandırılan yoğunlaşmadır [67]. Eğimin sabit olduğu lineer kısımda akma mukavemeti belirlenmektedir. Akma noktasına kadar lineer artış gösteren gerilme değeri daha sonra kısa bir deformasyon aralığı için düşüş göstermektedir. Bunun nedeni köpük çekirdek iç yapısındaki hücrelerde meydana gelen burkulmalardan dolayı basma kuvvetlerinde gözlenen düşüştür [68]. Plastik deformasyon bölgesinde PVC köpük içerisindeki boşluklar birbirine yakınlaşarak kapanmaya başlar ve bu süreç güçlendirilmemiş referans sandviçler için neredeyse sabit bir gerilme değerinde fakat daha uzun bir deformasyon aralığında gerçekleşmektedir. Bu bölgede basma mukavemet değerleri elde edilmektedir. Plastik deformasyon bölgesi geçildikten sonra artık köpük çekirdek içerisinde hiçbir gözenek kalmamıştır ve yapı tamamen katı cisim gibi davranmaya başladığı yoğunlaşma (densifikasyon) bölgesindedir ve bu aşamada gerilme değerlerinde hızlı bir artış meydana gelmektedir. 10 mm ve 20 mm çekirdek kalınlığına sahip sandviç kompozitler yaklaşık %0,50 ve %0,55 birim şekil değişimi değerlerinde yoğunlaşmaya maruz kalmıştır.

Şekil 4.1a'da güçlendirilmemiş sandviç yapı lineer bölgenin sonunda yaklaşık olarak 3766,77 N kuvvete direnç gösterirken Şekil 4.1b'de 300 tex ile güçlendirilen sandviç yapı 4233,48 N, Şekil 4.1c'de 600 tex ile güçlendirilen sandviç yapı 4719,43 N, Şekil 4.1d'de 1200 tex ile güçlendirilen sandviç yapı 5020,25 N kuvvete direnç göstermiştir. Referans çekirdekli sandviç yapılar basma kuvvetleri altında tipik bir eğri çizerken çeşitli yoğunluklardaki cam elyaf iplikler ile çekirdek yapısı takviye edilen sandviç yapıların basma kuvvetleri altındaki eğrileri oldukça farklıdır. Çünkü referans sandviçler lineer bölgenin sonunda kuvvette bir tepe noktasına erişirken, güçlendirilmiş sandviç yapılarda lineer bölge geçildikten sonra plastik deformasyon bölgesinde basma kuvvetlerinde birden fazla tepe noktalara rastlanmıştır. İlaveten referans sandviçler plastik deformasyon bölgesinde artan deformasyona karşı neredeyse sabit bir kuvvette kalmıştır. Buna karşılık dikişleme yönetimiyle çekirdek yapısı güçlendirilmiş sandviçlerde ise plastik deformasyon bölgesinde kuvvet sürekli artan bir eğilimdedir. Burada dikişlemede kullanılan cam elyaf ipliklerin düzlem dışı takviye görevi gördüğü anlaşılmaktadır. Basma yüklerindeki bu artış eğilimine dikkat çekmek için 4 mm deformasyona denk gelen kuvvetler yeniden değerlendirilmiştir. Böylece, 300 tex ile güçlendirilen sandviç yapı

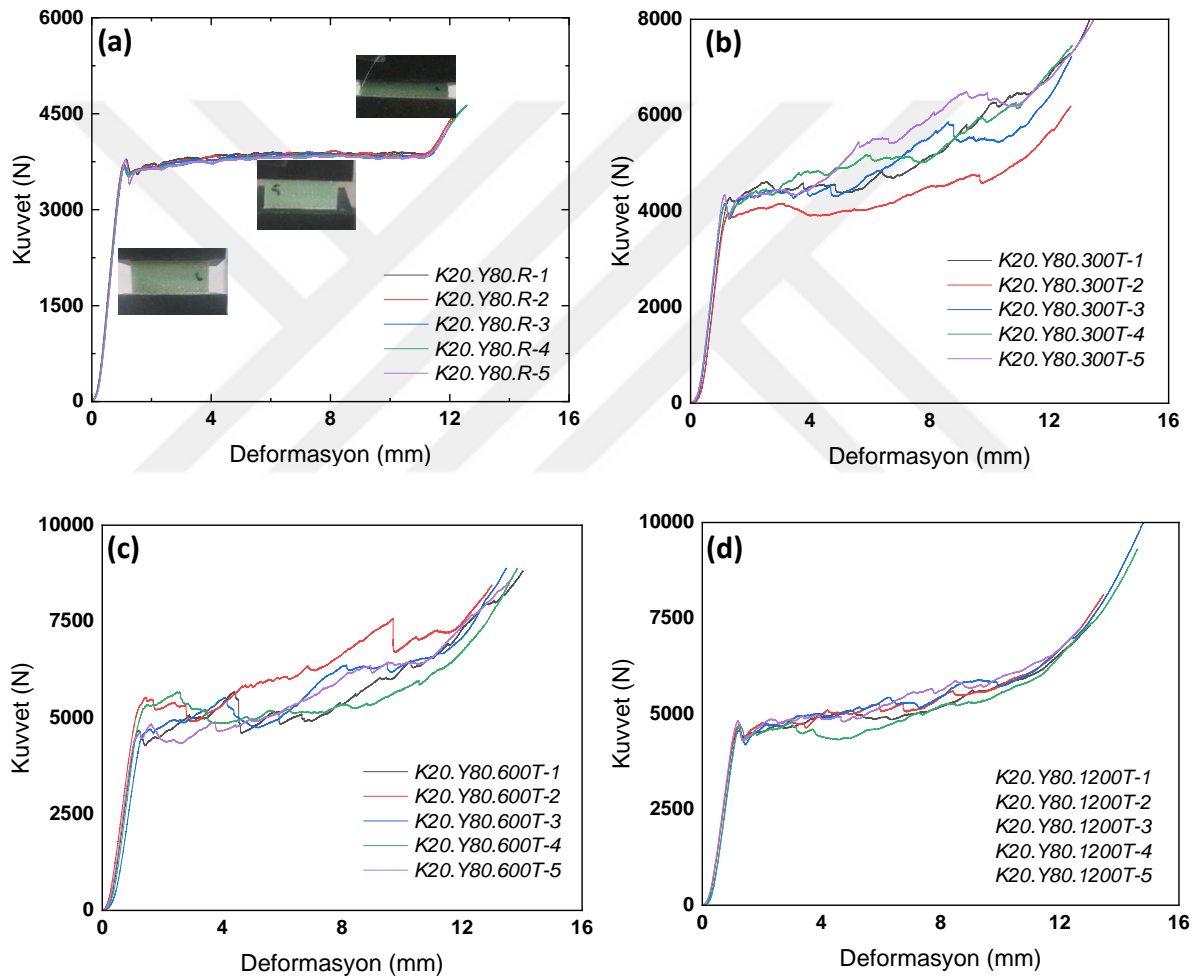
4445,46 N, 600 tex ile güçlendirilen sandviç yapı 5213, 84 N ve 1200 tex ile güçlendirilen sandviç yapı 4630,99 N kuvvete direnç göstererek basma yük taşıma kapasitelerinde ciddi bir artış sağlamıştır.

Şekil 4.2’de çekirdek kalınlığı 20 mm, çekirdek yoğunluğu  $60/m^3$  olan sandviç yapıların (çekirdek yapıları referans ve cam elyaf iplikler ile güçlendirilmiş) kuvvet-deformasyon eğrileri görülmektedir. Referans sandviç yapı lineer bölgenin sonunda en yüksek 2210,54 N kuvvete direnç göstermiştir. Çekirdek yapısı sırasıyla 300-600-1200 tex ile güçlendirilmiş sandviç yapılar ise lineer bölgenin sonunda yaklaşık olarak 3156,59 N, 3394,11 N ve 3338,97 N basma kuvvetine dayanmıştır. Bununla birlikte 4 mm’lik deformasyona denk gelen kısımda ise sırasıyla 3791,74 N, 4438,99 N ve 4094,49 N kuvvete direnç göstermiştir. Lineer bölgedeki maksimum kuvvete kıyasla %20,12, %30,79 ve %22,63 oranında artış söz konusudur.



Şekil 4.2. K20.Y60 sandviç yapıların basma yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

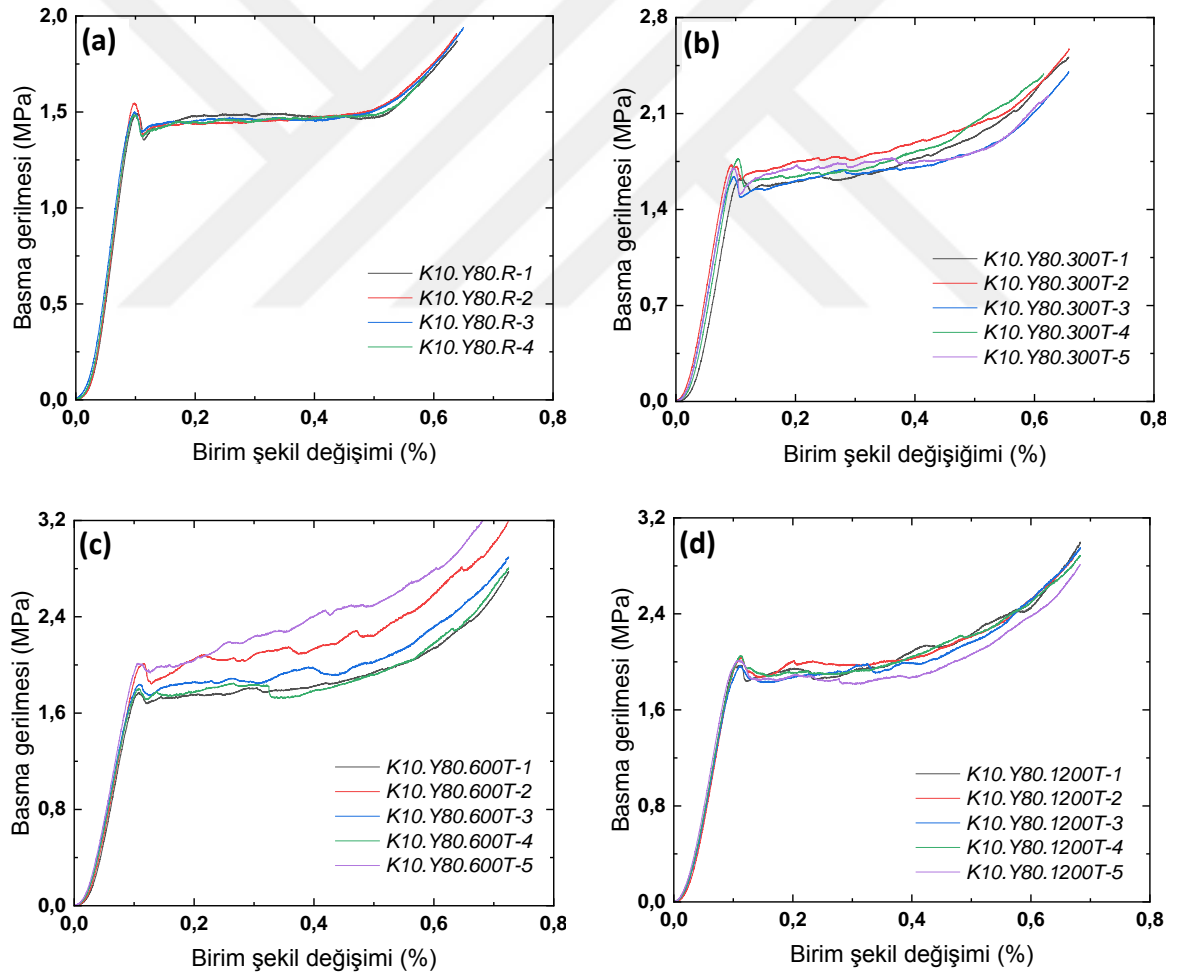
Şekil 4.3'te çekirdek kalınlığı 20 mm, çekirdek yoğunluğu  $80/m^3$  olan sandviç yapıların (çekirdek yapıları referans ve cam elyaf iplikler ile güçlendirilmiş) kuvvet-deformasyon eğrileri görülmektedir. Referans sandviç yapı lineer bölgenin sonunda en yüksek 3732,42 N kuvvete direnç göstermiştir. Çekirdek yapısı sırasıyla 300-600-1200 tex ile güçlendirilmiş sandviç yapılar ise lineer bölgenin sonunda yaklaşık olarak 4231,06 N, 4978,53 N ve 4702,22 N basma kuvvetine dayanmıştır. Bununla birlikte 4 mm'lik deformasyona denk gelen kısımda ise sırasıyla 4848,63 N, 5530,06 N ve 5104,26 N kuvvete direnç göstermiştir. Lineer bölgedeki maksimum kuvvete kıyasla %14,60, %11,08 ve %8,55 oranında artış gözlenmiştir.



Şekil 4.3. K20.Y80 sandviç yapıların basma yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

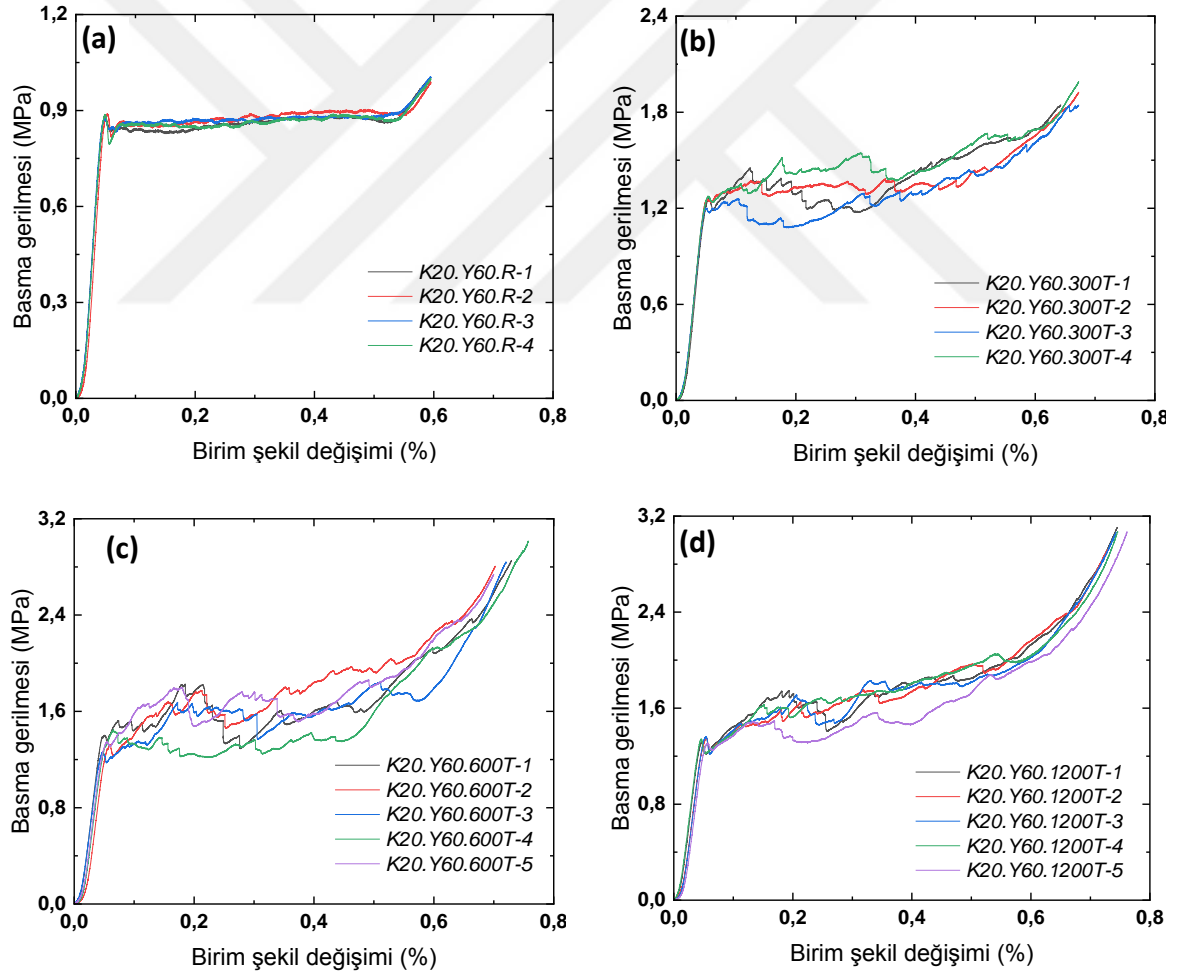
Kuvvet ve deformasyon verileri kullanılarak önceki bölümde verilen Eşitlik 3.1-3.2 yardımı ile basma gerilmesi-birim şekil değişimi eğrileri çizilmiş ve Şekil 4.4-4.6'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde bazı örneklem gruplarının beş numune, bazılarının

dört numune olduğu görülmektedir. Bunun nedeni standart sapmayı en fazla bozan numunenin grafiklerden çıkarılmasıdır. Böylece sonuçların yorumlanmasında daha net ifadeler yer verilebilecektir. Genel olarak bakıldığında güçlendirilmemiş referans sandviçlerin basma mukavemetleri  $60 \text{ kg/m}^3$  ve  $80 \text{ kg/m}^3$  çekirdek yoğunluklu numuneler için yaklaşık olarak sırasıyla  $0,88 \text{ MPa}$  ve  $1,50 \text{ MPa}$  bulunmuştur. Bu mukavemet değerleri önceki bölümde verilen PVC köpük çekirdeklerin basma mukavemet değerleri ile doğrudan uyumludur. Zira bu basma davranışı Mostafa [69] ve Yalkın vd. [51] tarafından da elde edilmiş olup oldukça ince yapılı yüzey tabakaların, sandviçlerin düzlem dışı basma mukavemetlerine anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir.  $10 \text{ mm}$  ve  $20 \text{ mm}$  çekirdek kalınlığına sahip sandviç kompozitler yaklaşık  $\%0,50$  ve  $\%0,55$  birim şekil değişimi değerlerinde yoğunlaşmaya maruz kalmıştır.



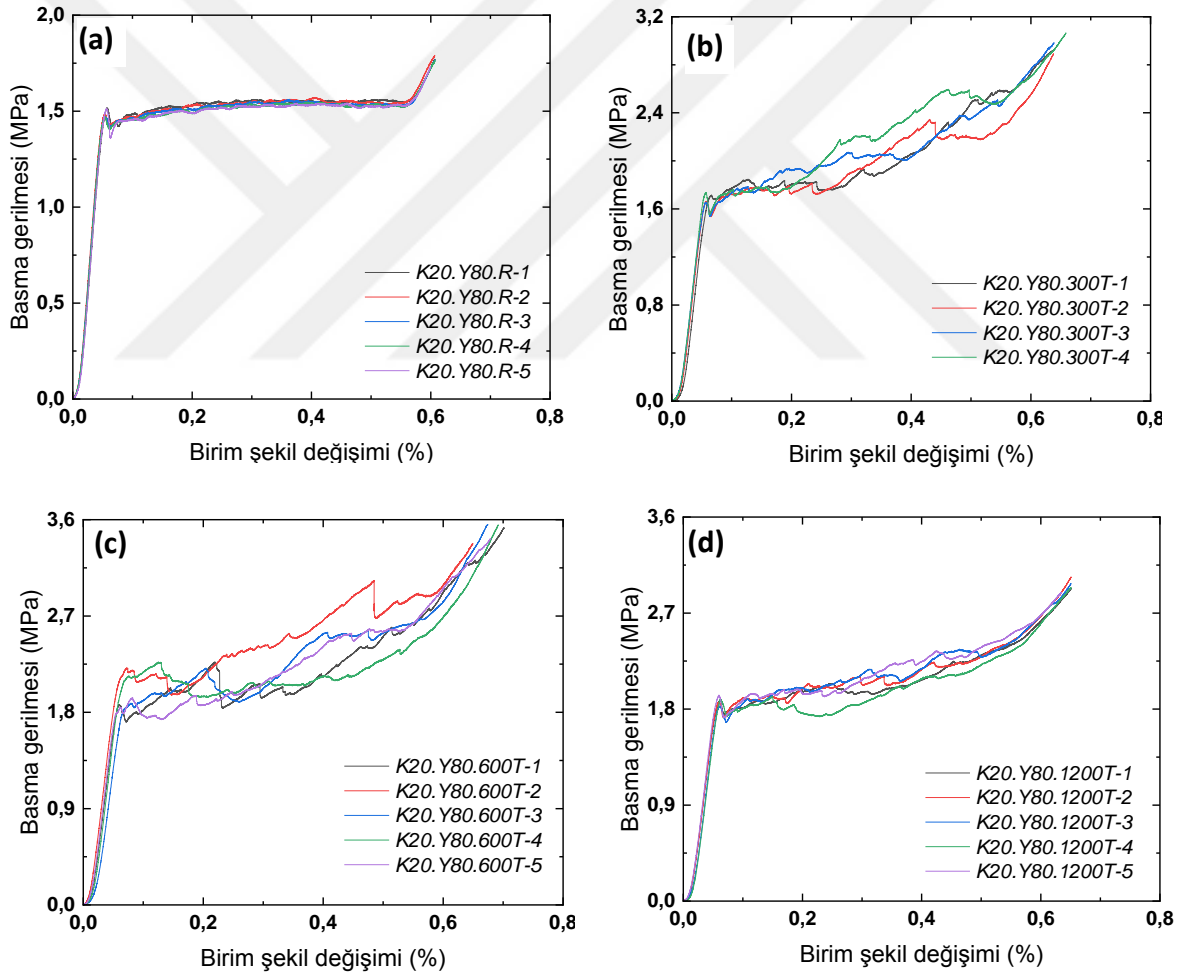
Şekil 4.4. K10.Y80 sandviç yapıların basma yükleri altında gerilme-birim şekil değişimi eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

Şekil 4.4'te lineer bölgenin sonunda elde edilen en yüksek basma mukavemet değerleri incelendiğinde 300-600-1200 tex ile güçlendirilen sandviçlerde sırasıyla 1,693 MPa, 1,888 MPa ve 2,008 MPa olarak hesaplanmıştır. Referans çekirdekli sandviç yapı ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %12,34, %25,28 ve %33,23 oranında artış sağlamaktadır. Kuvvet-deformasyon grafiklerinde olduğu gibi gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinde de güçlendirilmiş sandviç yapıların plastik deformasyon bölgesinde birden fazla tepe noktalara sahip olduğu görülmektedir. Dikişleme parametrelerinin etkisini daha açık bir şekilde ortaya çıkarmak için %0,2 birim şekil değişimine karşılık gelen basma mukavemet değerleri tespit edilmiştir. 300-600-1200 tex ile güçlendirilen sandviçlerde basma mukavemetleri sırasıyla 1,778 MPa, 2,086 MPa ve 1,972 MPa olarak bulunmuştur. Böylece artış oranları %18,48, %38,98 ve %31,42 olacak şekilde yeniden değerlendirilmiştir.



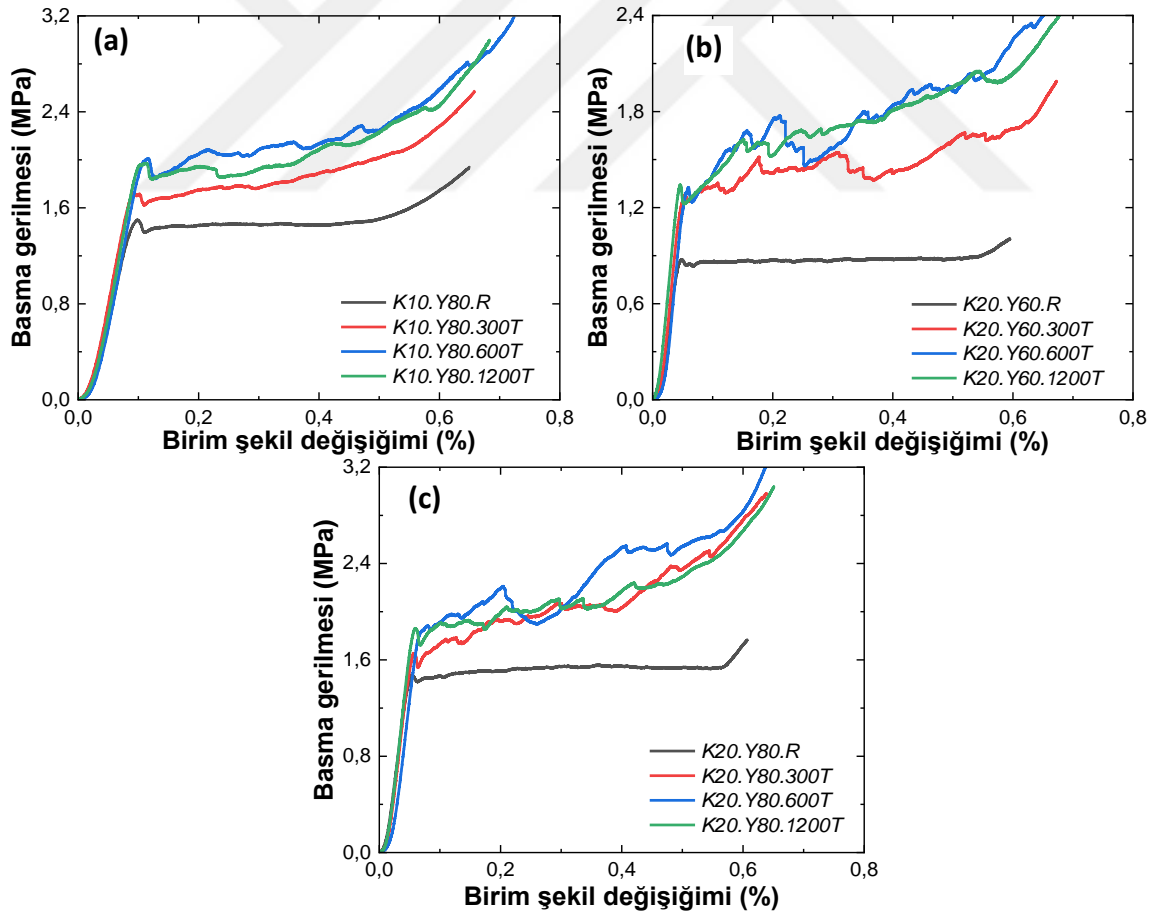
Şekil 4.5. K20.Y60 sandviç yapıların basma yükleri altında gerilme-birim şekil değişimi eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

Şekil 4.5 ise 20 mm kalınlık ve  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu sandviçlerin basma gerilmesi birim şekil değişimi grafiklerini göstermektedir. Referans çekirdekli sandviç yapı 0,884 MPa basma gerilmesine maruz kalmıştır. Diğer taraftan çekirdek yapıları 300-600-1200 tex ile güçlendirilen sandviçlerin elastik bölge sonunda maruz kaldıkları basma gerilmeleri ise sırasıyla 1,263 MPa, 1,358 MPa ve 1,335 MPa olarak belirlenmiştir. Referans çekirdekli sandviç yapı ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %42,85, %53,57 ve %51,06 oranında artış sağlamaktadır. İlâveten, %0,2 birim şekil değişimine karşılık gelen basma mukavemet değerleri incelendiğinde ise 300-600-1200 tex ile güçlendirilen sandviçlerde basma mukavemetleri sırasıyla 1,517 MPa, 1,776 MPa ve 1,638 MPa olarak bulunmuştur. Bu durum basma mukavemetlerinde sırasıyla %73,07, %102,61 ve %86,89 artış elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.6. K20.Y80 sandviç yapıların basma yükleri altında gerilme-birim şekil değişimi eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

Şekil 4.6'da 20 mm kalınlık ve 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu sandviçlerin basma gerilmesi birim şekil değişimi grafikleri gösterilmektedir. Referans çekirdekli sandviç yapının basma mukavemeti 1,493 MPa olarak belirlenmiştir. K10.Y80.R sandviç yapı ile kıyaslandığında mukavemet değerleri arasındaki fark %1'in altındadır. Aradaki düşük farkın sebebi de köpük çekirdeklerin üretim ve saklama koşulları ile test koşullarından kaynaklanmış olabilir. Şekil 4.6b, 4.6c ve 4.6d incelendiğinde çekirdek yapıları 300-600-1200 tex ile güçlendirilen sandviçlerin elastik bölge sonunda maruz kaldıkları basma gerilmesi sırasıyla 1,693 MPa, 1,991 MPa ve 1,881 MPa olarak hesaplanmıştır. Çekirdek yapısı güçlendirilmemiş referans sandviç numunelerin ortalama değerleri ile kıyaslandığında sırasıyla %13,36, %33,38 ve %25,96 oranında artış sağlamaktadır. Ayrıca, %0,2 birim şekil değişimine karşılık gelen basma mukavemet değerleri incelendiğinde ise 300-600-1200 tex ile güçlendirilen sandviçlerde basma mukavemetleri sırasıyla 1,517 MPa, 1,776 MPa ve 1,638 MPa olarak bulunmuş ve bu durumda basma mukavemetlerindeki artış oranı sırasıyla %27,02, %44,87 ve %33,71 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Dikişleme parametrelerinin farklı yoğunluk ve kalınlıklardaki sandviç yapıların basma davranışlarına etkisinin karşılaştırılması, a) K10.Y80, b) K20.Y60, c) K20.Y80

Dikişleme parametrelerinin farklı çekirdek yoğunluğu ve kalınlıklarına sahip sandviçlerin basma yükleri altındaki davranışlarına etkisini göstermek için Şekil 4.4-4.6'da verilen eğrilerden ortalamaya en yakın olanlar seçilmiş ve Şekil 4.7'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. PVC köpük çekirdek yapısının dikişleme yöntemi ile güçlendirilmesi sandviç kompozitlerin basma yükleri altındaki mukavemet değerlerini iyileştirirken hasar davranışını da değiştirmiştir. Referans numunelerin tipik basma davranışında yapı ilk aşamada akma dayanımına kadar lineer artış sergilerken basma mukavemeti de bir tepe noktaya ulaşır, fakat güçlendirilmiş çekirdekli sandviç yapılarda ise mukavemet değerlerinde birden fazla tepe noktalar gözlenmiştir. İlâveten referans numuneler için plastik deformasyon bölgesi sabit bir gerilme değerinde kalırken, dikişleme yoluyla çekirdek yapıları güçlendirilmiş sandviçlerde plastik deformasyon bölgesinde birim şekil değişimine karşılık gerilme değerleri de artış eğilimi göstermektedir. Gerilmelerdeki tepe noktalar dikişlemede kullanılan cam/epoksi iplik takviyeleri sayesinde oluşmuştur. Düzlem dışı takviyeler sandviç yapıların daha yüksek gerilemelere direnç göstermesini sağlamıştır.

Basma özelliklerinin ortalama değerleri Çizelge 4.1-4.3'te verilmiştir. Çizelgelerde lineer elastik bölge sonundaki maksimum kuvvet ( $P_{maks}$ ) ve bu kuvvete karşılık gelen basma mukavemeti ( $\sigma_c$ ) ile %0,2 birim şekil değişimine denk gelen kuvvet ( $P_{max}^*$ ) ve mukavemet ( $\sigma_c^*$ ) değerleri yer almaktadır. İlâveten özgül basma mukavemet değerleri de hesaplanmış ve çizelgelerde verilmiştir. Özgül mukavemet kavramı sandviç yapılar gibi kompozit malzemelerin mukavemet ve yoğunluk değerlerini birlikte dikkate aldığı ve doğrudan yapısal malzemenin mekanik avantajını [21] belirttiği bir göstergedir. Bu tez çalışmasında olduğu gibi çeşitli takviye elemanları ile yapısal güçlendirme yapılan kompozitlerde mekanik performansı tam anlamıyla ortaya çıkarmak özgül mukavemet değerlerinin hesaplanması önem arz etmektedir. Çizelge 4.1-4.3'te hem elastik bölgeden elde edilen özgül mukavemet ( $\sigma_c/\rho \times 1000$ ) değerleri hem de %0,2 birim şekil değişimine karşılık gelen özgül mukavemet ( $\sigma_c^*/\rho \times 1000$ ) değerleri belirtilmiştir. Sandviç yapıların yoğunluk değerleri bir önceki Materyal ve Metot kısmında verilmiştir. Basma özelliklerinin yer aldığı çizelgelerde lineer elastik bölgedeki maksimum kuvvet ve basma mukavemet değerlerinin standart sapmaları da değerlerin hemen altında parantez içerisinde belirtilmiştir. Dikişleme yoluyla güçlendirilmiş sandviç yapıların özgül mukavemet değerlerinin referans sandviçlere göre kıyaslanması Şekil 4.7'de verilmiştir. İlâveten dikiş

iplik yoğunluğunun sandviçlerin basma yükü taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin mekanik avantaj bakımından karşılaştırılması da Şekil 4.8’de gösterilmektedir.

**Çizelge 4.1.** K10.Y80 sandviç yapıların basma özellikleri

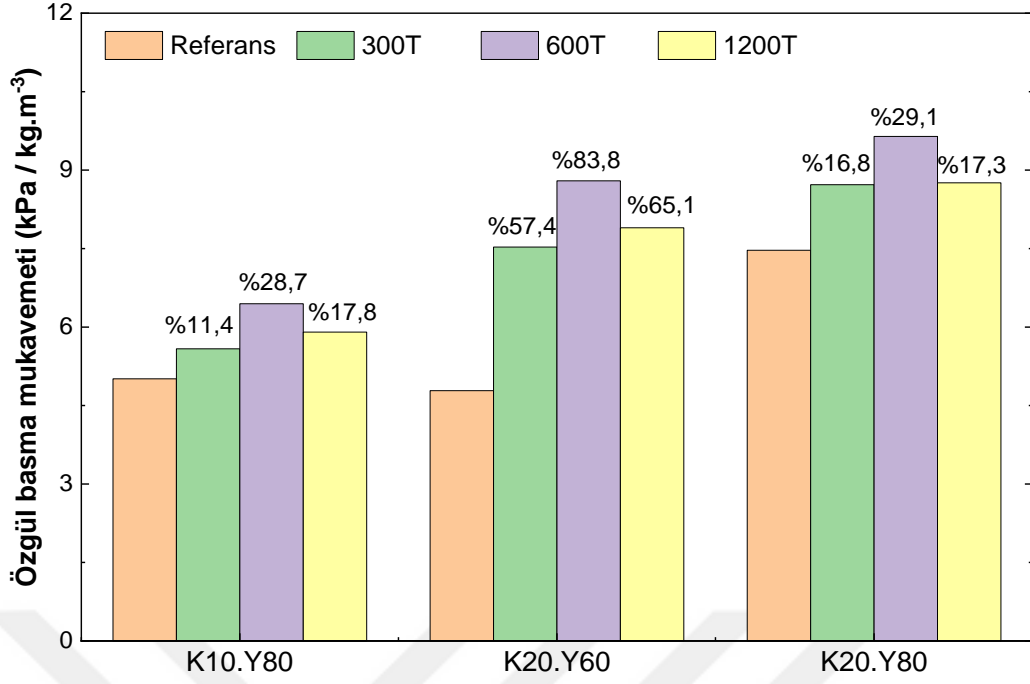
Örneklem adı	$P_{\max}$ (N)	$\sigma_c$ (MPa)	$(\sigma_c/\rho)$ $\times 1000$	$P_{\max}^*$ (N)	$\sigma_c^*$ (MPa)	$(\sigma_c^*/\rho \times 1000)$
K10.Y80.R	3766,77 (58,67)	1,507 (0,023)	5,031	3752,03	1,501	5,010
K10.Y80.300T	4233,48 (135,38)	1,693 (0,054)	5,315	4445,46	1,778	5,583
K10.Y80.600T	4719,43 (262,57)	1,888 (0,105)	5,835	5213,84	2,086	6,446
K10.Y80.1200T	5020,25 (82,76)	2,008 (0,033)	6,009	4630,99	1,972	5,903

**Çizelge 4.2.** K20.Y60 sandviç yapıların basma özellikleri

Örneklem adı	$P_{\max}$ (N)	$\sigma_c$ (MPa)	$(\sigma_c/\rho)$ $\times 1000$	$P_{\max}^*$ (N)	$\sigma_c^*$ (MPa)	$(\sigma_c^*/\rho \times 1000)$
K20.Y60.R	2210,54 (14,56)	0,884 (0,006)	4,826	2190,91	0,876	4,784
K20.Y60.300T	3156,59 (18,73)	1,263 (0,008)	6,268	3791,74	1,517	7,529
K20.Y60.600T	3394,11 (158,42)	1,358 (0,063)	6,725	4438,99	1,776	8,795
K20.Y60.1200T	3338,97 (53,70)	1,335 (0,022)	6,439	4094,49	1,638	7,898

**Çizelge 4.3.** K20.Y80 sandviç yapıların basma özellikleri

Örneklem adı	$P_{\max}$ (N)	$\sigma_c$ (MPa)	$(\sigma_c/\rho)$ $\times 1000$	$P_{\max}^*$ (N)	$\sigma_c^*$ (MPa)	$(\sigma_c^*/\rho \times 1000)$
K20.Y80.R	3732,42 (47,90)	1,493 (0,019)	7,301	3817,34	1,527	7,467
K20.Y80.300T	4231,06 (84,57)	1,693 (0,034)	7,612	4848,63	1,939	8,722
K20.Y80.600T	4978,53 (384,49)	1,991 (0,153)	8,682	5530,06	2,212	9,643
K20.Y80.1200T	4702,22 (84,50)	1,881 (0,033)	8,066	5104,26	2,042	8,757

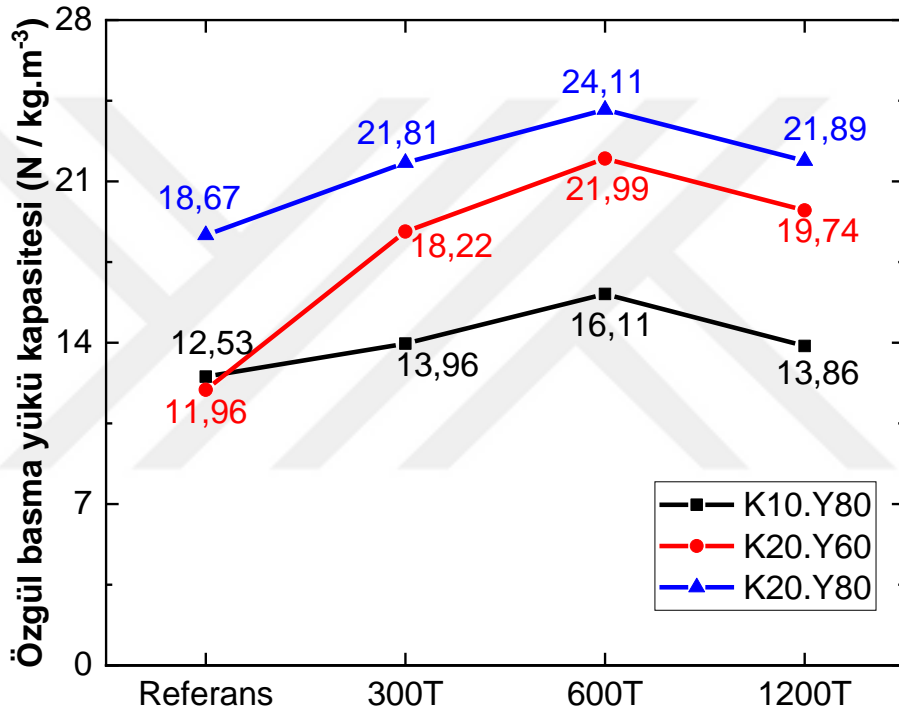


Şekil 4.7. Güçlendirilmiş çekirdekli sandviç yapıların özgül basma mukavemet değerlerinin referans sandviçler ile kıyaslanması

Literatürde Sun vd. [61] bu çalışmadaki ile aynı çekirdek malzemeyi kullanmış ve sırasıyla 12k ve 24k karbon elyaf iplik demetleri ile karbon yüzeyli sandviç kompoziti tamamen dikerek yapısal performans olarak sırasıyla %20,9 ve %43,1 oranında artış elde etmişlerdir. Bununla birlikte basma yükleri altındaki kuvvet-deformasyon eğrilerinde dikişleme uygulamasının yapıldığı sandviçlerde bu tez çalışmasının aksine kuvvet sadece ilk lineer bölge sonunda tepe noktaya erişmiş ve ilave tepe noktalar oluşmamıştır. Bunun nedeni dikişlemede cam elyafa göre daha kırılğan yapıda olan karbon elyaf ipliklerin kullanılması olabilir.

Aynı yoğunluğa sahip farklı çekirdek kalınlığındaki sandviç yapılarda dikişleme parametrelerinin etkisi birbirlerine yakın bulunmuştur. Örneğin çekirdek malzemesi 600 tex cam elyaf iplik ile güçlendirilen sandviç yapı 10 mm ve 20 mm çekirdek kalınlıklı sandviçlerde yaklaşık %29 oranında mekanik avantaj sağlamıştır. Diğer taraftan, aynı kalınlıkta fakat yoğunluğu düşük olan sandviç yapılarda ise dikişleme parametrelerinin etkisi anlamlı bir şekilde daha fazladır. Nitekim, çekirdek malzemesi 600 tex cam elyaf iplik ile güçlendirilen sandviç yapılarda çekirdek yoğunluğu 60 ve 80 kg/m<sup>3</sup> olan sandviçler, güçlendirilmemiş referans numunelere göre yaklaşık olarak sırasıyla %84 ve %29 oranında mekanik avantaj sağlamıştır. 60 kg/m<sup>3</sup> ve 20 mm çekirdekli sandviçler 600

tex ile güçlendirildiği takdirde  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu ve sırasıyla 10 mm ve 20 mm çekirdekli sandviçlere kıyasla %75,5 ve %17,8 oranında daha yüksek özgül basma mukavemetine sahiptir. Bu durum Şekil 4.8’de daha açık bir şekilde görülmektedir. K20.Y60.R sandviç yapının basma performansı K10.Y.80.R’den daha düşük iken çekirdek güçlendirme sayesinde daha üstün değerlere erişmiştir. Bununla birlikte K20.Y80.R sandviç yapı K20.Y60.R sandviç yapıdan %56,10 daha fazla özgül basma yükü kapasitesine sahipken K20.Y60 sandviç yapı 600 tex ile güçlendirildiğinde (K20.Y60.600T) bu farkı kapamakla birlikte %17,78 daha fazla özgül basma yükü kapasitesine sahip olmuştur.



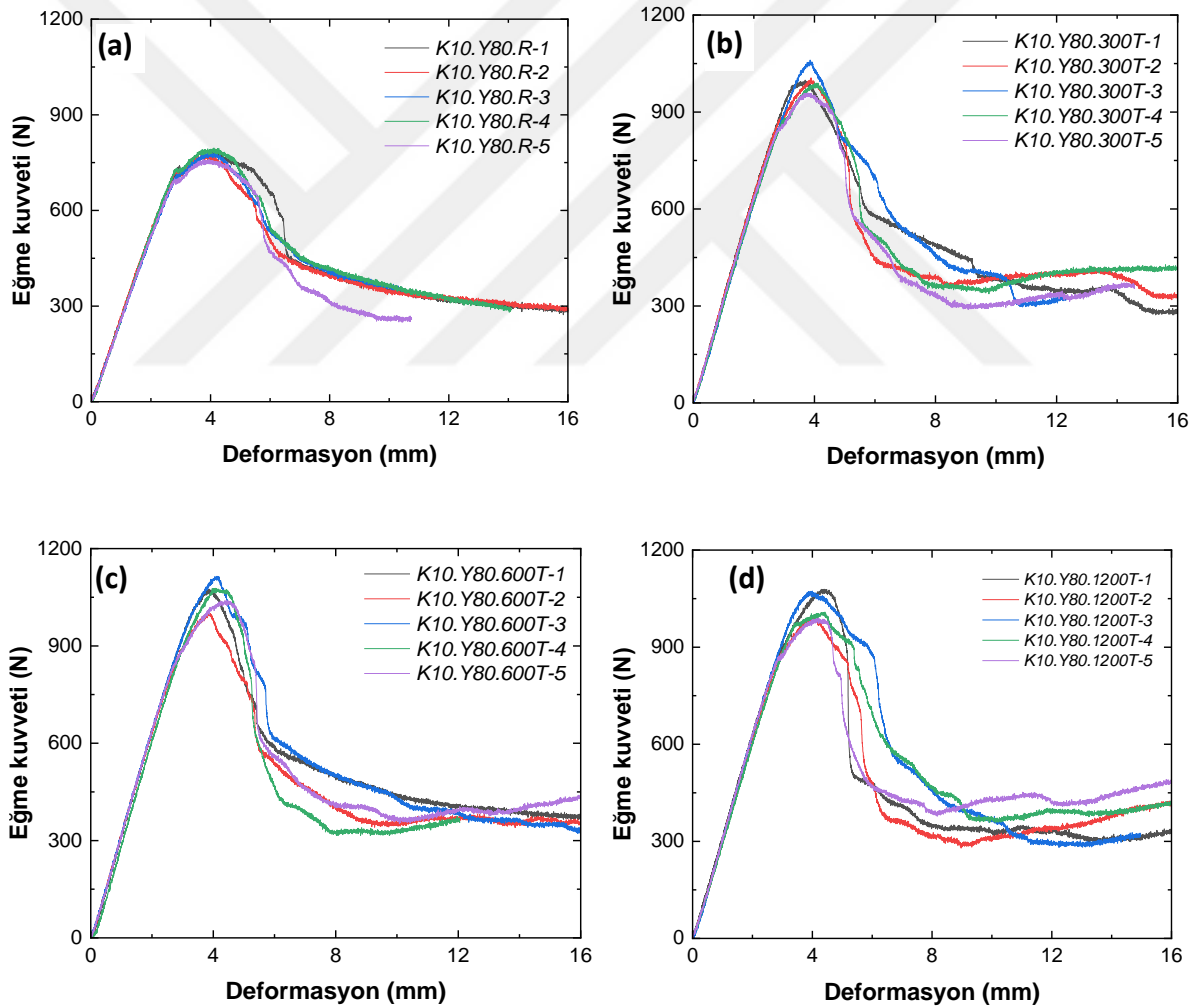
Şekil 4.8. Dikiş iplik yoğunluğunun sandviç yapıların özgül basma yük taşıma kapasitesine etkisi

#### 4.2. Çekirdek Yapıları Güçlendirilmiş Sandviç Yapıların Eğme Özellikleri

Çeşitli yoğunluklardaki cam elyaf iplikler ile dikişleme yöntemiyle çekirdek yapısı güçlendirilmiş sandviç yapıların ve kıyaslamada kullanılmak üzere üretimleri gerçekleştirilen referans sade çekirdekli sandviç yapıların eğme testleri neticesinde kuvvet ve deformasyon verileri elde edilmiştir. Bu veriler ışığında grafikler oluşturulmuş ve Şekil 4.9-4.11’de verilmiştir.

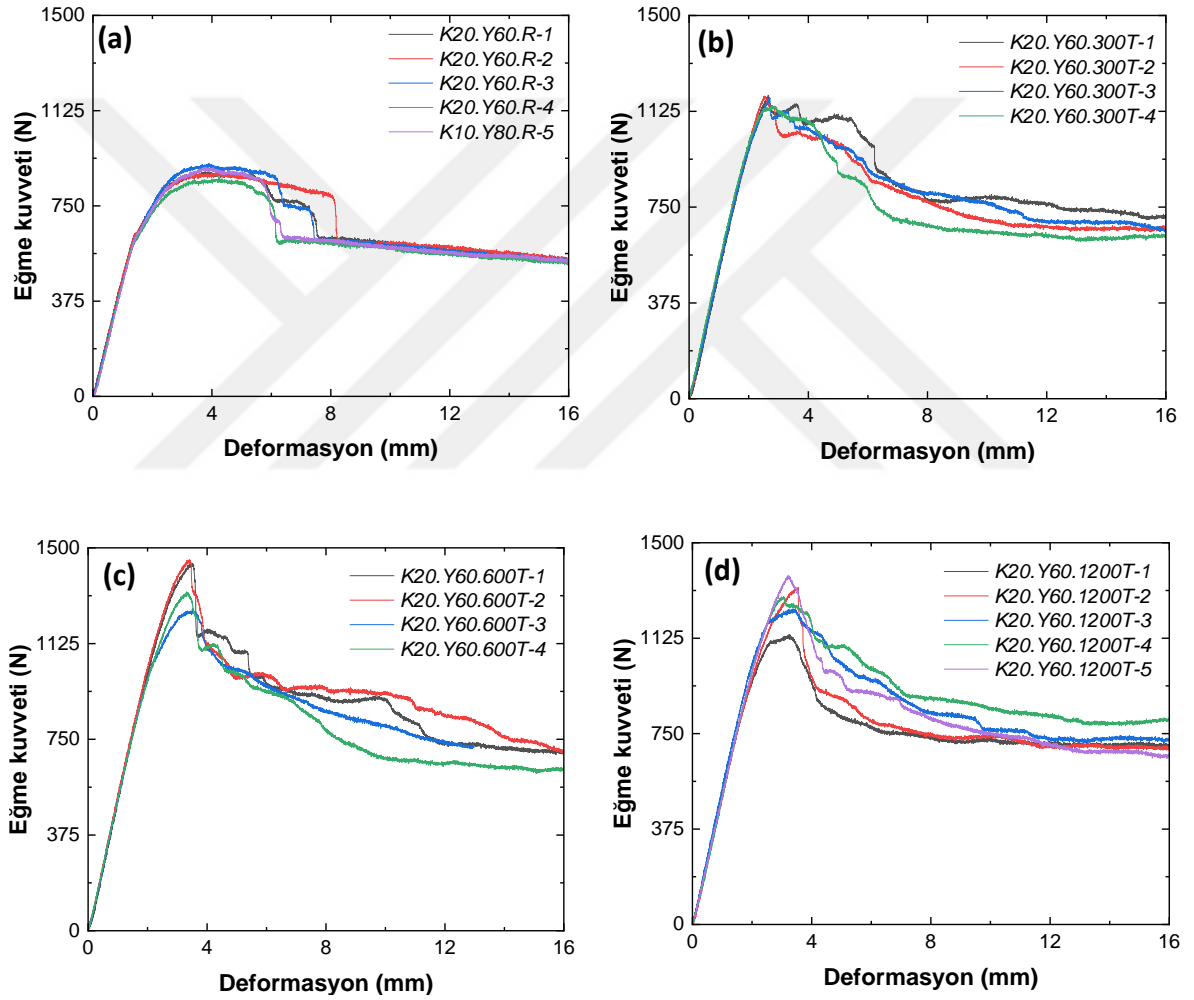
Şekil 4.9’da 10 mm kalınlık ve  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu sandviç yapıların eğme kuvvetleri altında deformasyona bağlı eğme yükü eğrileri verilmiştir. Referans çekirdekli

numunelerde (Şekil 4.9a) sandviç yapı öncelikle lineer bir artışla elastik bölgede kuvvet artışı sergilemiş (yaklaşık 700 N civarında), akabinde lineer olmayan bir artışla kuvvette maksimum noktaya erişmiştir (781,58 N). Belirli bir deformasyon aralığında düzgün bir eğilme davranışı sergiledikten sonra yapısal hasarlar meydana gelmiş ve kuvvet lineer olmayan bir şekilde azalmaya başlamıştır. Çekirdek yapısı cam elyaf iplikler ile takviye edilen sandviçlerde lineer elastik bölgede daha fazla eğme kuvvetine direnç söz konusudur ve sandviç yapılar maksimum noktaya daha yüksek bir eğimle ulaşmaktadır. Sırasıyla 300-600-1200 tex cam elyaf iplikler ile çekirdek malzemesi takviye edilen sandviçler 1002,88 N, 1062,23 N ve 1028,70 N maksimum eğme kuvvetine direnç göstermiştir. Referans sandviçe kıyasla artış oranları sırasıyla %28,32, %35,91 ve %31,62'dir. Güçlendirilmiş sandviçlerde kuvvette yaşanan düşüş daha hızlı ve ani gerçekleşmiştir.



Şekil 4.9. K10.Y80 sandviç yapıların üç nokta eğme yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

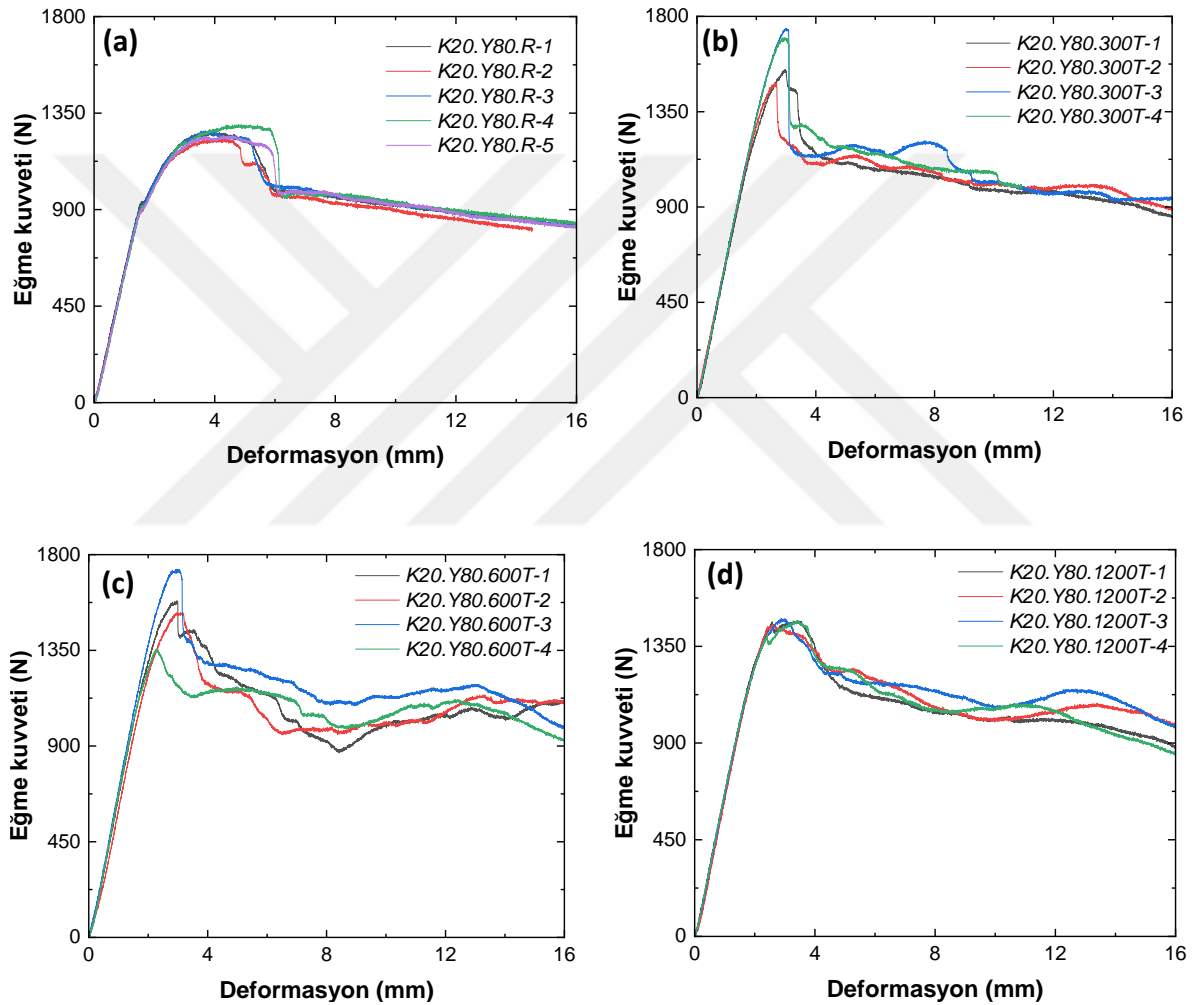
Şekil 4.10'de 20 mm kalınlık ve  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu sandviç yapıların eğme davranışları görülmektedir. Referans çekirdekli numunelerde (Şekil 4.10a) sandviç yapı lineer elastik bölgede en fazla 620 N civarında eğme kuvvetine direnç göstermiş ardından lineer olmayan bir artış ile 890,29 N maksimum kuvvete erişmiştir. Güçlendirilmiş sandviç yapılara bakıldığında ise 300-600-1200 tex cam elyaf takviyesine sahip sandviçler referans yapıya göre sırasıyla %31,90, %52,90 ve %42,97 oranında daha fazla eğme yükü taşımıştır. En yüksek değer 600 tex cam elyaf takviyeli çekirdek malzemeye sahip sandviçte, 1370,12 N olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi sandviçlerde hasar mekanizmalarının irdelendiği ilerleyen bölümlerde detaylı olarak açıklanacaktır.



Şekil 4.10. K20.Y60 sandviç yapıların üç nokta eğme yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

Şekil 4.11'de ise 20 mm kalınlık ve  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu sandviç yapıların eğme davranışları görülmektedir. Kalınlık ve yoğunluk bakımından daha yüksek değerlerde olması sebebiyle en yüksek değerler bu örneklem grubunda elde edilmiştir. Referans

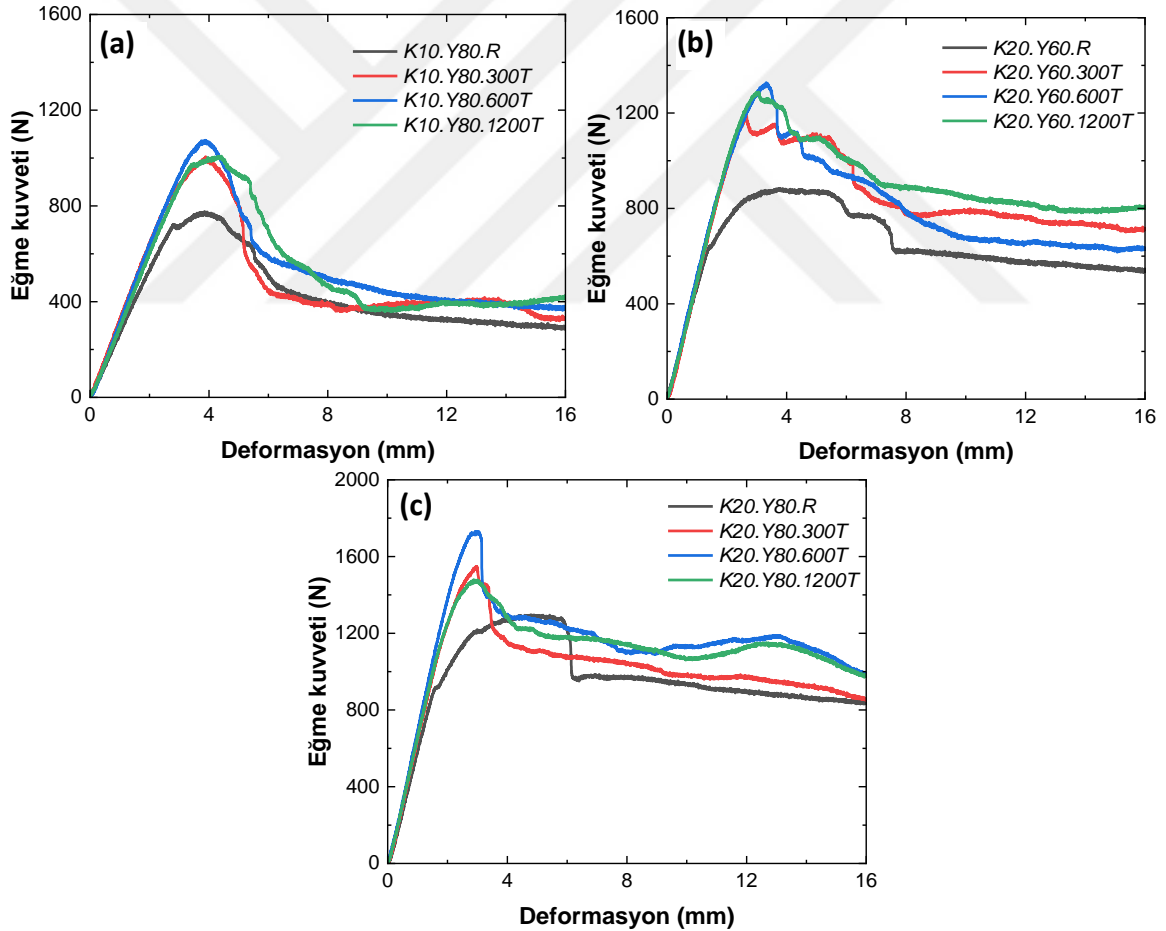
çekirdekli numuneler (Şekil 4.11a) lineer elastik bölgede en fazla 920 N civarında eğme kuvvetine direnç gösterirken lineer olmayan bir artış ile maksimum değer olan 1261,48 N kuvvete erişmiştir. Cam elyaf iplikler ile köpük çekirdek malzemesi takviye edilen sandviçler ise 300-600-1200 tex için sırasıyla 1576,12 N, 1614,02 N ve 1476,81 N yük taşımışlardır. Artış oranları itibariyle K10.Y80 ve K20.Y60 sandviç gruplarından geride kalarak sırasıyla %24,94, %27,95 ve %16,36 oranında referans sandviç yapıya kıyasla daha fazla kuvvet taşımıştır. En yüksek değerler önceki sandviç gruplarında olduğu gibi 600 tex cam elyaf takviyeli çekirdek malzemeye sahip sandviçte elde edilmiştir.



Şekil 4.11. K20.Y80 sandviç yapıların üç nokta eğme yükleri altında kuvvet-deformasyon eğrileri; a) güçlendirilmemiş (referans), b) 300 tex ile güçlendirilmiş, c) 600 tex ile güçlendirilmiş, d) 1200 tex ile güçlendirilmiş

Sandviç numunelerin kuvvet deformasyon eğrilerinden ortalamaya en yakın olanı seçilmiş ve Şekil 4.12’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde cam elyaf iplikler ile çekirdek malzemesi takviye edilen sandviç yapıların lineer elastik bölgelerinde daha fazla eğme yükü taşıdığı anlaşılmakta ve bu da eğilme rijitliğindeki

artışa işaret etmektedir. İlâveten maksimum eğme kuvvetlerinde de ciddi artışlar söz konusudur. Fakat referans numuneler, özellikle 20 mm çekirdek kalınlıklı, maksimum kuvvete eriştikten sonra belirli bir eğilme süresince (deformasyon aralığında) kuvvet değeri sabit kalmıştır. Diğer taraftan çekirdek yapısı güçlendirilmiş sandviçlerde ise maksimum kuvvete eriştikten sonra yapısal hasarlardan dolayı kuvvette hızlı düşüşler görülmektedir. Çekirdek içerisindeki takviyelerin pim çubuklar gibi işlevinin olması köpük çekirdeğin ezilmesine direnç gösterdiği için güçlendirilmiş sandviçler daha yüksek bir eğimle maksimum kuvvete erişmiş ve çubukların hasara uğramasıyla da ani kuvvet düşüşleri yaşanmıştır [47]. Genel olarak bakıldığında, 600 tex cam elyaf iplik ile köpük çekirdek malzemesi takviye edilen sandviçler en yüksek eğme yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bu durumun sebebi sandviçlerin hasar incelemesi kısmında ayrıntılı olarak değerlendirilecektir.



Şekil 4.12. Dikişleme parametrelerinin farklı yoğunluk ve kalınlıklardaki sandviç yapıların eğme davranışlarına etkisinin karşılaştırılması, a) K10.Y80, b) K20.Y60, c) K20.Y80

Çizelge 4.4-4.6’da sandviç yapıların eğme özellikleri verilmiştir. Çizelgelerde sandviçlerin maksimum yük taşıma kapasitesi ( $F_{\max}$ ), çekirdek kayma mukavemeti ( $\sigma_s^{\text{ult}}$ ), maksimum yüzey tabaka gerilmesi ( $\sigma_F^{\text{ult}}$ ) ve eğme mekanik avantaj ölçüsü olarak özgül eğme yükü kapasitesi ( $F_{\max}/\rho$ ) değerleri bulunmaktadır. Çekirdek kayma mukavemeti ve maksimum yüzey tabaka gerilme değerleri Materyal ve Metot bölümünde verilen Eşitlik 3.3-3.4 ile hesaplanmıştır. Yoğunluk değerleri ise yine aynı bölümde Çizelge 3.6’da bulunan verilerden alınarak özgül eğme yükü kapasitesi hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.4.** K10.Y80 sandviç yapıların eğme özellikleri

Örneklem adı	$F_{\max}$ (N)	$\sigma_s^{\text{ult}}$ (MPa)	$\sigma_F^{\text{ult}}$ (MPa)	$F_{\max}/\rho$
K10.Y80.R	781,58 (13,60)	0,715 (0,011)	58,01 (0,903)	2,620
K10.Y80.300T	1002,88 (37,04)	0,918 (0,030)	74,43 (2,458)	3,162
K10.Y80.600T	1062,23 (41,97)	0,972 (0,034)	78,83 (2,786)	3,268
K10.Y80.1200T	1028,70 (44,00)	0,942 (0,036)	76,35 (2,921)	3,095

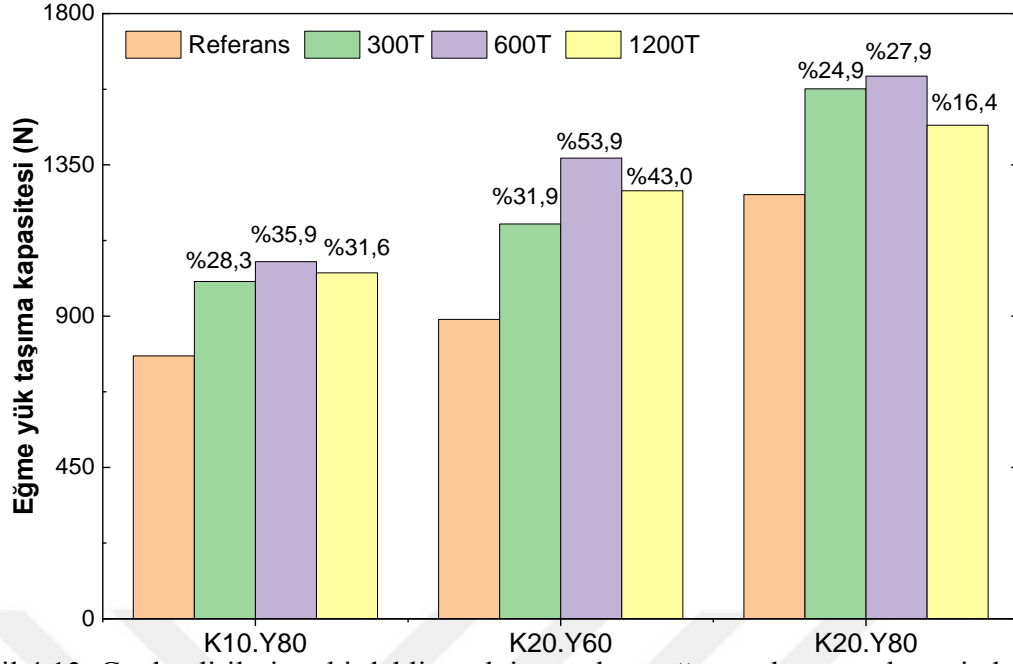
**Çizelge 4.5.** K20.Y60 sandviç yapıların eğme özellikleri

Örneklem adı	$F_{\max}$ (N)	$\sigma_s^{\text{ult}}$ (MPa)	$\sigma_F^{\text{ult}}$ (MPa)	$F_{\max}/\rho$
K20.Y60.R	890,29 (18,28)	0,425 (0,009)	34,50 (0,708)	4,810
K20.Y60.300T	1174,27 (17,00)	0,561 (0,008)	45,50 (0,659)	5,934
K20.Y60.600T	1370,12 (80,34)	0,655 (0,038)	53,09 (3,113)	6,907
K20.Y60.1200T	1272,84 (79,60)	0,608 (0,038)	49,32 (3,084)	6,212

**Çizelge 4.6.** K20.Y80 sandviç yapıların eğme özellikleri

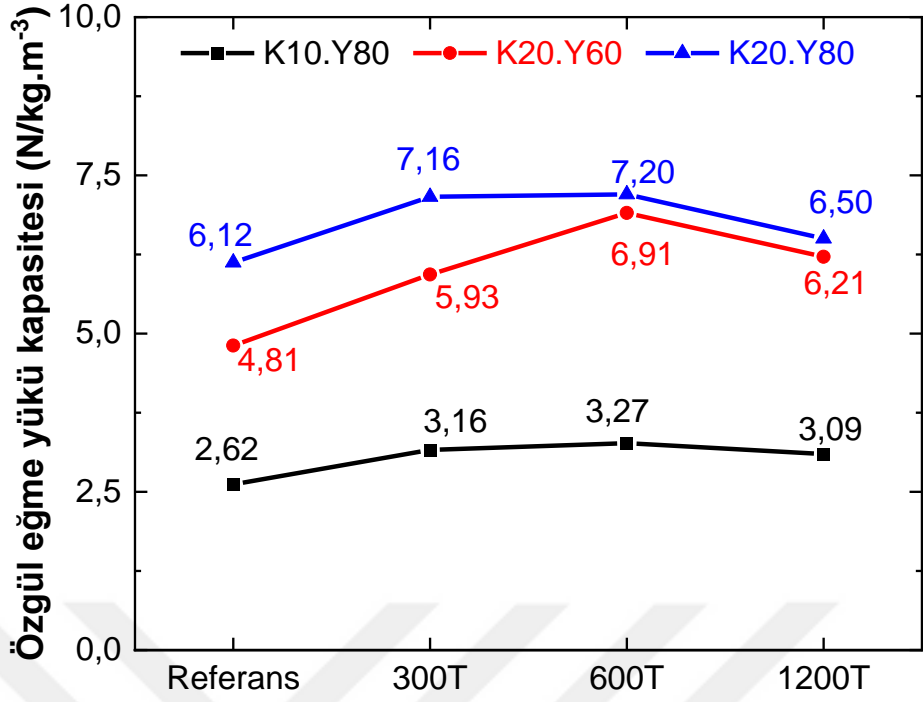
Örneklem adı	$F_{\max}$ (N)	$\sigma_s^{\text{ult}}$ (MPa)	$\sigma_F^{\text{ult}}$ (MPa)	$F_{\max}/\rho$
K20.Y80.R	1261,48 (23,81)	0,603 (0,011)	48,88 (0,923)	6,124
K20.Y80.300T	1576,12 (90,55)	0,753 (0,043)	61,07 (3,509)	7,161
K20.Y80.600T	1614,02 (85,91)	0,771 (0,041)	62,54 (3,329)	7,193
K20.Y80.1200T	1467,81 (9,85)	0,701 (0,005)	56,88 (0,382)	6,510

Yukarıdaki çizelgelerde görüldüğü üzere çekirdek güçlendirmesi sayesinde sandviçlerde elde edilen kuvvet artışlarının nedeni olarak çekirdek kayma ve yüzey tabaka gerilmelerinde meydana gelen artışlar gösterilebilir. Yapısal hasarların düşük kuvvetlerde yaşanması geciktirilerek sandviçler daha yüksek kuvvetlere direnç göstermiştir. Örneğin, 80 kg/m<sup>3</sup> ve 10 mm çekirdek kalınlığına sahip sandviçler eğme yükü altında 781,58 N kuvvete direnç göstermiş olup çekirdek kalınlığı 20 mm olanlarda yük taşıma kapasitesi %61,4 oranında artmıştır. Çekirdek kayma ve yüzey tabaka gerilmeleri ise %15,73 oranında azalarak sandviç yapının kayma ve yüzey tabaka hasarlarından dolayı yapısal bozunmaya uğrama ihtimalini azaltmıştır. Bu sayede kalınlık artışı yük taşıma kapasitesine katkı sağlamıştır. Diğer taraftan aynı çekirdek kalınlığına sahip sandviçlerde yoğunluğu 60 kg/m<sup>3</sup> olanlar 890,29 N yük taşıırken 80 kg/m<sup>3</sup> çekirdek yoğunluklu sandviçler 1261,48 N taşımış ve %41,7 artış göstermiştir. Bununla birlikte çekirdek kayma ve yüzey tabaka gerilmeleri ise %41,7 oranında artış göstermiştir. Diğer taraftan cam elyaf iplikler ile çekirdek malzemesi güçlendirilen sandviç yapılar incelendiğinde takviye iplik yoğunluğuna göre yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiş ve bununla birlikte çekirdek ve yüzey tabakalar da daha yüksek gerilmelere direnç gösterebilmiştir. 12k ve 24k karbon elyaf iplik demetleri ile 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu ve 30 mm kalınlıklı sandviçe dikişleme uygulaması yapan Sun vd. [61] eğme mekanik performansında ancak %5,2 ve %10,4 düzeyinde artış elde etmişlerdir. Şekil 4.13'te dikişleme parametrelerinin (cam elyaf iplik yoğunluğu) sandviç yapıların eğme özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik üzerinde belirtilen artış oranları sadece eğme yükü için değil aynı zamanda çekirdek kayma mukavemeti ve yüzey tabaka gerilmeleri için de aynıdır.



Şekil 4.13. Güçlendirilmiş çekirdekli sandviç yapıların eğme yük taşıma kapasitelerinin referans sandviçler ile kıyaslanması

Çizelge 4.4-4.6’da eğme yükü altındaki sandviç yapıların mekanik avantajı da yük taşıma kapasitesi ve sandviçlerin yoğunluk değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. K10.Y80 sandviç yapı grubunda çekirdek malzemesi 300-600-1200 tex cam elyaf iplikler ile takviye edilen sandviçler referans sandviçlere kıyasla sırasıyla %20,68, %24,73 ve %18,15 oranında üstün mekanik avantaj sağlamıştır. K20.Y60 sandviç yapı grubunda ise artış oranları daha yüksek olup sırasıyla %23,37, %43,62 ve %29,19 oranında daha fazla mekanik avantaj sergilemiştir. K20.Y80 sandviç yapı grubunda ise artış oranları diğerleri kadar yüksek olmayıp %16,94, %17,59 ve %6,19 üstün mekanik avantaj sağlamıştır. Eğme yükü altında elde edilen ve mekanik performansın bir göstergesi olan bu değerler kapsamlı bir şekilde Şekil 4.14’te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Örneğin 80 kg/m<sup>3</sup> ve 20 mm yoğunluğa sahip sandviç yapı (K20.Y80.R) aynı kalınlıktaki 60 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu sandviçten (K20.Y60.R) %27,23 daha yüksek bir mekanik avantaja sahipken çekirdek yoğunluğu 60 kg/m<sup>3</sup> olan sandviç yapı 600 tex cam elyaf iplikler ile güçlendirildiğinde (K20.Y60.600T) 80 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu sandviçe (K20.Y80.R) kıyasla %12,91 daha yüksek bir mekanik performans sunmaktadır.



Şekil 4.14. Dikiş iplik yoğunluğunun sandviç yapıların özgül eğme yük taşıma kapasitesine etkisi

#### 4.3. Mekanik Özelliklerden Elde Edilen Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Sandviç yapıların basma ve eğme testleri neticesinde elde edilen deneysel sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesi iki yönlü varyans analizi (ANOVA) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. ANOVA tabloları oluşturulurken Yanıt Yüzey Metoduna dayanarak merkezi kompozit tasarımı uygulanmıştır. Analizler, aşağıdaki sonuçlar üzerinden gerçekleştirilmiştir.

- Sandviç yoğunluğu
- Basma yük taşıma kapasitesi
- Basma mukavemeti
- Basma kuvvetleri altında mekanik avantajı
- Eğme yük taşıma kapasitesi
- Çekirdek kayma gerilmesi
- Yüzey tabaka gerilmesi
- Eğme kuvvetleri altında mekanik avantajı

Analizler kuadratik matematiksel modeller kurularak gerçekleştirilmiş olup Çizelge 3.4’te verilen parametrelerin sonuçlar üzerindeki bağımsız etkileri ve birbirleri ile etkileşimli etkileri ortaya çıkarılmıştır. Çizelge 4.7-4.14’te analizler neticesinde elde edilen ANOVA tabloları verilmiştir. Çizelgelerde görüldüğü üzere kurulan matematiksel modellere dayalı analiz sonuçlarına göre sandviç parametrelerinin yukarıda belirtilen mekanik özellikler üzerinde %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı etkisi bulunmaktadır. Çünkü modellerin p değerleri incelendiğinde hepsinde 0,05’ten küçük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte her bir parametrenin (A: çekirdek kalınlığı, B: çekirdek yoğunluğu, C: takviye iplik yoğunluğu) bireysel olarak sonuçlar üzerindeki etkisi de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. En etkili parametrelerin tespiti için F değerleri incelenmelidir.

Çizelge 4.7’ye bakıldığında sandviçlerin yoğunluk değerleri üzerinde en etkili parametrenin çekirdek kalınlığı olduğu daha sonra çekirdek yoğunluğu ve son olarak da takviye iplik yoğunluğu olduğu görülmektedir. Takviye iplik yoğunluğunun sandviç yoğunluğunu en az etkileyen parametre olması mekanik avantaja sunmuş olduğu katkının bir göstergesi olarak düşünülebilir. Sandviç yoğunluğu üzerinde parametrelerin etkileşimli etkileri ise istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır zira p değerleri 0,05’ten yüksektir.

**Çizelge 4.7.** Sandviç yapıların yoğunluğu için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	1,700E+05	6	28336,34	115,30	< 0.0001	anlamlı
A-çekirdek kalınlığı	91487,17	1	91487,17	372,24	< 0.0001	
B-çekirdek yoğunluğu	5734,13	1	5734,13	23,33	< 0.0001	
C-takviye iplik	4159,85	1	4159,85	16,93	0,0001	
AC	44,29	1	44,29	0,1802	0,6729	
BC	39,45	1	39,45	0,1605	0,6903	
C <sup>2</sup>	1134,70	1	1134,70	4,62	0,0362	

Çizelge 4.8’de parametrelerin sandviç yapıların basma yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri incelendiğinde çekirdek yoğunluğunun en etkili parametre daha sonra ona yakın bir değerde olan takviye iplik yoğunluğu belirlenirken en az etkili parametrenin çekirdek kalınlığı olduğu ortaya çıkmıştır. Zira sonuçlar incelendiğinde K20.Y80.R sandviç yapısı K20.Y60.R sandviçten yaklaşık %74,24 oranında daha fazla basma yükü taşırken çeşitli yoğunluklara sahip cam elyaf iplik takviyeleri ile yaklaşık %25 civarlarına düşmektedir. Örneğin K20.Y80.600T sandviç yapısı K20.Y60.600T sandviçten %24.58

oranında daha fazla basma yükü taşımaktadır. Fakat K20.Y60.600T sandviç yapısı K20.Y80.R sandviçten %16,28 daha fazla yük taşıyarak takviye iplik yoğunluğunun sonuçlar üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. İlaveten takviye iplik yoğunluğunun sırasıyla çekirdek kalınlığı ve yoğunluğu ile birlikte etkileşimli etkileri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Çekirdek yoğunluğu ile takviye iplik yoğunluğunun birleşik etkisi, çekirdek kalınlığı ile takviye iplik yoğunluğunun birleşik etkisinden daha fazla sonuçlar üzerinde etkisi bulunmaktadır.

**Çizelge 4.8.** Sandviç yapıların basma yük taşıma kapasitesi için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	4,284E+07	6	7,140E+06	243,23	< 0.0001	anlamlı
A-çekirdek kalınlığı	1,099E+06	1	1,099E+06	37,44	< 0.0001	
B-çekirdek yoğunluğu	1,324E+07	1	1,324E+07	451,15	< 0.0001	
C-takviye iplik yoğunluğu	1,071E+07	1	1,071E+07	364,90	< 0.0001	
AC	1,501E+05	1	1,501E+05	5,11	0,0279	
BC	3,408E+05	1	3,408E+05	11,61	0,0013	
C <sup>2</sup>	1,422E+07	1	1,422E+07	484,29	< 0.0001	

Çizelge 4.9’da parametrelerin sandviç yapıların basma mukavemeti üzerindeki etkisi incelendiğinde basma yük taşıma kapasitesi sonuçlarına benzer bulgular elde edildiği görülmektedir. Hatta burada takviye iplik yoğunluğunun etkisi çekirdek yoğunluğu ile neredeyse aynıdır. Fakat takviye iplik yoğunluğunun çekirdek kalınlığı ile birlikte etkileşimli etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Sadece takviye iplik yoğunluğunun çekirdek yoğunluğu ile birlikte etkileşimli etkileri mevcuttur. Çünkü p değerleri ilkinde 0,8831 ikincisinde ise 0,0019 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.10’da parametrelerin sandviç yapıların basma mekanik avantajı üzerindeki etkisi incelendiğinde en etkili parametrenin çekirdek kalınlığı daha sonra takviye iplik yoğunluğu ve son olarak da çekirdek yoğunluğu olduğu görülmektedir. Ancak takviye iplik yoğunluğunun çekirdek kalınlığı ile birleşik etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmazken çekirdek yoğunluğu ile takviye iplik yoğunluğunun birleşik etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur.

**Çizelge 4.9.** Sandviç yapıların basma mukavemeti için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	7,04	6	1,17	230,96	< 0.0001	anlamli
A-çekirdek kalınlığı	0,0902	1	0,0902	17,74	< 0.0001	
B-çekirdek yoğunluğu	2,11	1	2,11	415,08	< 0.0001	
C-takviye iplik yoğunluğu	2,10	1	2,10	413,02	< 0.0001	
AC	0,0001	1	0,0001	0,0218	0,8831	
BC	0,0544	1	0,0544	10,70	0,0019	
C <sup>2</sup>	2,10	1	2,10	412,56	< 0.0001	

**Çizelge 4.10.** Sandviç yapıların basma mekanik avantajı için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	140,96	6	23,49	150,85	< 0.0001	anlamli
A-çekirdek kalınlığı	83,37	1	83,37	535,31	< 0.0001	
B-çekirdek yoğunluğu	16,38	1	16,38	105,20	< 0.0001	
C-takviye iplik yoğunluğu	22,34	1	22,34	143,47	< 0.0001	
AC	0,0916	1	0,0916	0,5879	0,4466	
BC	3,39	1	3,39	21,76	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	30,16	1	30,16	193,69	< 0.0001	

Çizelge 4.11’da parametrelerin sandviç yapıların eğme yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerine bakıldığında en fazla etken parametreden en aza doğru sırasıyla çekirdek kalınlığı çekirdek yoğunluğu ve takviye iplik yoğunluğu olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde K20.Y80.R sandviç yapının K10.Y80.R sandviçten %61,40 daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu buna karşın K20.Y60.R sandviçten ise %41.60 daha yüksek eğme yükü kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Araştırma bulguları da çekirdek kalınlığının çekirdek yoğunluğundan daha etkili olduğunu göstermektedir. Literatürde sandviç kompozitlerin çekirdek kalınlığının artışı ile yapının yük taşıma kapasitesi ve eğme rijitliğinde çok daha yüksek değerlere erişildiği birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir [37, 48]. Fakat bu durum kalınlık ve yoğunluk gibi parametrelerin takviye iplik yoğunluğu parametresi ile birleşik etkileri göz önünde bulundurulduğunda sonuçlara anlamlı bir yansıması da olmaktadır. Çünkü takviye iplik yoğunluğunun çekirdek yoğunluğu ile yaptığı birleşik etki istatistiksel olarak anlamlı bulunurken, çekirdek kalınlığı ile yaptığı birleşik etki istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır (p değeri: 0,1962).

**Çizelge 4.11.** Sandviç yapıların eğme yük taşıma kapasitesi için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	3,850E+06	6	6,417E+05	184,41	< 0.0001	anlamlı
A-çekirdek kalınlığı	2,498E+06	1	2,498E+06	717,96	< 0.0001	
B-çekirdek yoğunluğu	8,183E+05	1	8,183E+05	235,14	< 0.0001	
C-takviye iplik yoğunluğu	5,387E+05	1	5,387E+05	154,79	< 0.0001	
AC	5962,79	1	5962,79	1,71	0,1962	
BC	58367,17	1	58367,17	16,77	0,0001	
C <sup>2</sup>	6,937E+05	1	6,937E+05	199,34	< 0.0001	

Çizelge 4.12 ve 4.13'te parametrelerin sandviç yapıların çekirdek kayma ve yüzey tabaka gerilmeleri üzerindeki etkilerine bakıldığında benzer sonuçlar görülmektedir. En etkili parametre her iki mekanik özellikte de çekirdek kalınlığı olurken ikinci sırada takviye iplik yoğunluğu ve en az etkili parametre olarak da çekirdek yoğunluğu ortaya çıkmaktadır. Çizelge 4.11'deki bulguların aksine takviye iplik yoğunluğunun hem çekirdek kalınlığı ile hem de çekirdek yoğunluğu ile yapmış olduğu birleşik etki istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Hatta çekirdek kalınlığı ile yapılan bu etkileşim sonuçlardaki değişimi daha fazla etkilemiştir. Çekirdek kayma ve yüzey tabaka gerilmesi sonuçları incelendiğinde bu durum daha açık bir şekilde görülmektedir. Örneğin, K20.Y80.R sandviç yapısı K20.Y60.R sandviçten %41,69 oranında daha fazla gerilmeye direnç gösterirken K20.Y80.600T sandviç yapısı K20.Y60.600T sandviçten %17,80 oranında daha fazla gerilmeye direnç göstermiştir. Bir başka örnekte ise K10.Y80.R sandviç yapısı K20.Y80.R sandviçten %18,67 oranında daha fazla gerilmeye maruzken her iki yapının çekirdek malzemesi 600 tex cam elyaf iplikler ile güçlendirildiği durumda bu fark %26,05'e çıkmaktadır. Her iki örnekte de mekanik özelliği daha düşük olan sandviç yapıların cam elyaf iplikler ile takviye edilmesinin yüksek değerlere daha hızlı eriştiği anlaşılmaktadır.

**Çizelge 4.12.** Sandviç yapıların çekirdek kayma gerilmesi için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	1,48	6	0,2470	245,33	< 0.0001	anlamlı
A-çekirdek kalınlığı	0,3413	1	0,3413	339,02	< 0.0001	
B-çekirdek yoğunluğu	0,1867	1	0,1867	185,46	< 0.0001	
C-takviye iplik yoğunluğu	0,2173	1	0,2173	215,89	< 0.0001	
AC	0,0210	1	0,0210	20,82	< 0.0001	
BC	0,0134	1	0,0134	13,30	0,0006	
C <sup>2</sup>	0,2342	1	0,2342	232,70	< 0.0001	

**Çizelge 4.13.** Sandviç yapıların yüzey tabaka gerilmesi için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	9743,49	6	1623,91	247,46	< 0.0001	anamlı
A-çekirdek kalınlığı	2242,65	1	2242,65	341,75	< 0.0001	
B-çekirdek yoğunluğu	1228,22	1	1228,22	187,17	< 0.0001	
C-takviye iplik yoğunluğu	1428,75	1	1428,75	217,72	< 0.0001	
AC	136,99	1	136,99	20,88	< 0.0001	
BC	87,40	1	87,40	13,32	0,0006	
C <sup>2</sup>	1540,98	1	1540,98	234,83	< 0.0001	

Çizelge 4.14'te parametrelerin sandviç yapıların eğme mekanik avantajı üzerindeki etkileri gösterilmekte olup en etkili parametrenin çok büyük bir farkla çekirdek kalınlığı olduğu (F değeri: 2785,16) daha sonra takviye iplik yoğunluğu ve son olarak da çekirdek yoğunluğu olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü eğme mekanik avantaj yük ve yoğunluğu birlikte dikkate alındığından ve Çizelge 4.7 ile 4.11'de de etken parametrenin çekirdek kalınlığı olmasından dolayı burada daha da yüksek çıkması beklenilir bir durumdur. Fakat parametrelerin etkileşimlerine bakıldığında ise çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğunun birleşik etkisi sonuçlar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı değilken çekirdek yoğunluğu ve takviye iplik yoğunluğunun sonuçlar üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu husus elde edilen araştırma bulgularının birbirleri arasındaki farkların hem çekirdek kalınlığının hem de takviye iplik yoğunluğunun birlikte etkisi ile açıklanmayacağı anlamını taşımaktadır. Oysa yoğunlukları farklı olan K20.Y60.R ve K20.Y80.R arasında %27,23 oranından bir fark varken K20.Y60.600T sandviç yapısı K20.Y80.R sandviçten eğme yükler altında %12,91 daha fazla mekanik performans göstermiştir.

**Çizelge 4.14.** Sandviç yapıların eğme mekanik avantajı için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	167,93	6	27,99	586,63	< 0.0001	anamlı
A-çekirdek kalınlığı	132,88	1	132,88	2785,16	< 0.0001	
B-çekirdek yoğunluğu	4,91	1	4,91	102,82	< 0.0001	
C-takviye iplik yoğunluğu	5,06	1	5,06	106,13	< 0.0001	
AC	0,0660	1	0,0660	1,38	0,2448	
BC	1,77	1	1,77	37,15	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	9,81	1	9,81	205,61	< 0.0001	

Analizleri gerçekleştirilen mekanik özelliklerin ANOVA tablolarına göre tahmin edilen korelasyon katsayısı ( $Pred. R^2$ ) ve düzeltilmiş korelasyon katsayısı ( $Adj. R^2$ ) değerleri elde edilmiş ve Çizelge 4.15'te verilmiştir.  $R^2$  değerlerinin 1'e oldukça yakın olması, oluşturulan matematiksel modellerin sandviç parametrelerine bağlı olarak analiz edilen mekanik özelliklerdeki değişimleri güçlü bir şekilde açıklayabildiği anlamı taşımaktadır. İlaveten düzeltilmiş ve tahmin edilen korelasyon katsayılarının birbirleriyle iyi bir uyum içinde olduğu da tespit edilmiştir. Uyumlu korelasyon sayesinde analiz edilen sandviç yapı özellikleri için regresyon analizleri de gerçekleştirilmiş ve parametrelerin sınır değerleri içerisinde özellikleri tahmin edebilen eşitlikler elde edilmiştir. Eşitlik 4.1-4.8'de parametrelere bağlı olarak sandviç yapı özelliklerinin tahmin edilebileceği matematiksel ifadeler yer almaktadır. Böylece farklı değerler için de araştırılan özelliklerin sonuçları tahmin edilebilecektir. Eşitliklerde yer alan A çekirdek kalınlığını, B çekirdek yoğunluğunu ve C takviye iplik yoğunluğunu ifade etmektedir.

**Çizelge 4.15.** Düzeltilmiş ( $Adj.$ ) ve tahmin edilen ( $Pred.$ ) korelasyon katsayıları

Analiz edilen özellik	Düzeltilmiş ( $Adj.$ ) $R^2$	Tahmin edilen ( $Pred.$ ) $R^2$
Sandviç yoğunluğu	0,9208	0,9081
Basma yük taşıma kapasitesi	0,9610	0,9565
Basma mukavemeti	0,9560	0,9530
Basma kuvvetleri altında mekanik avantajı	0,9384	0,9289
Eğme yük taşıma kapasitesi	0,9491	0,9424
Çekirdek kayma gerilmesi	0,9613	0,9562
Yüzey tabaka gerilmesi	0,9616	0,9565
Eğme kuvvetleri altında mekanik avantajı	0,9835	0,9812

$$\begin{aligned} \text{sandviç yoğunluğu} \\ = +307,97 - 9,42A + 1,08B + 0,047C - 0,0005AC + 0,0002BC \\ - 0,00003C^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\text{basma yükü} = -2241,46 + 17,05A + 70,84B + 5,85C - 0,028AC - 0,021BC - 0,003C^2 \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{basma mukavemeti} \\ = -0,931 + 0,0092A + 0,028B + 0,0025C + 7,51 \times 10^{-7}AC - 8,31 \times 10^{-6}BC \\ - 1,17 \times 10^{-6}C^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{basma mekanik avantaj} \\ = -6,59 + 0,28A + 0,104B + 0,011C + 0,00002AC - 0,00007BC \\ - 4,44 \times 10^{-6}C^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

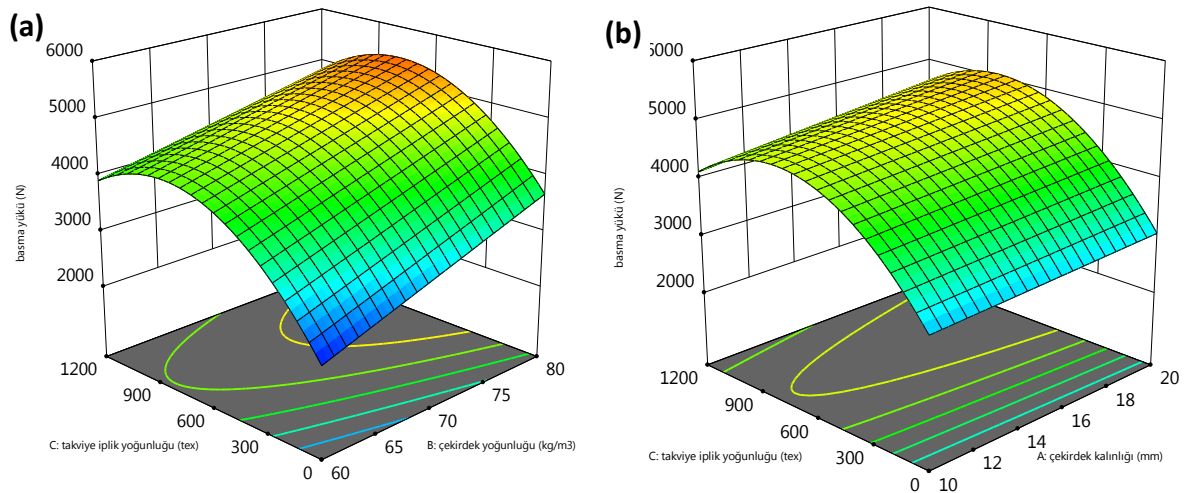
$$\text{eğme yükü} = -1358,16 + 53,99A + 19,67B + 1,76C - 0,006AC - 0,009BC - 0,0007C^2 \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{çekirdek kayma gerilmesi} \\ = +0,105 - 0,013A + 0,009B + 0,001C - 0,00001AC - 4,12 \times 10^{-6}BC \\ - 3,92 \times 10^{-7}C^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

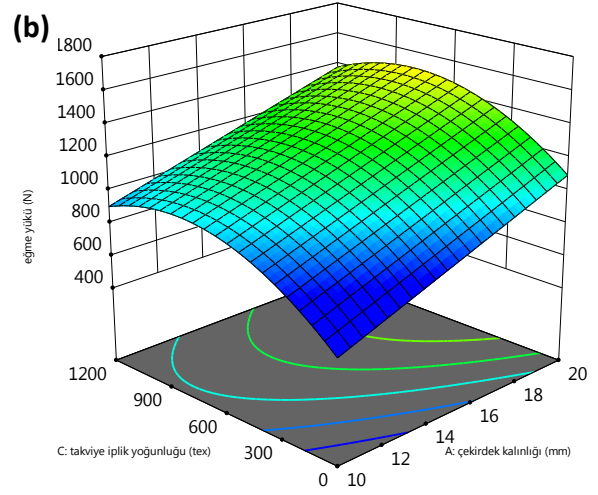
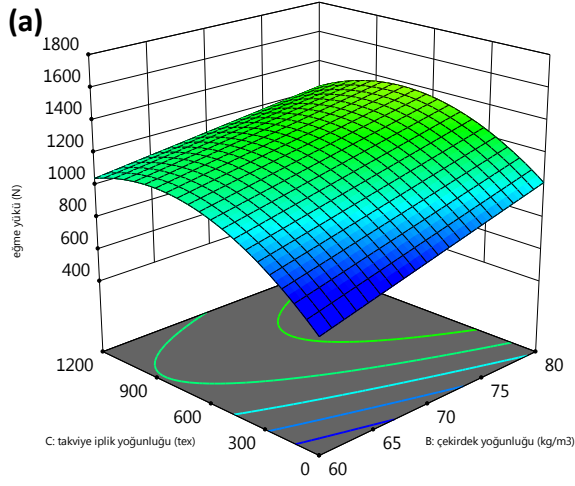
$$\begin{aligned} \text{yüzey tabaka gerilmesi} \\ = +8,59 - 1,02A + 0,762B + 0,087C - 0,0008AC - 0,0003BC - 0,00003C^2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \text{eğme mekanik avantaj} \\ = -6,51 + 0,38A + 0,064B + 0,007C + 0,00002AC - 0,00005BC \\ - 2,53 \times 10^{-6}C^2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

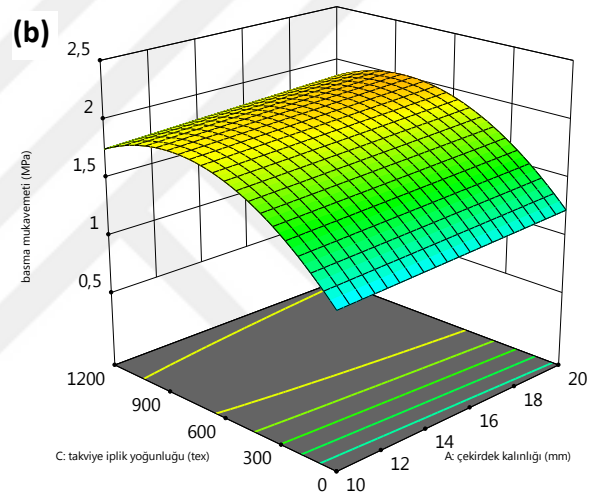
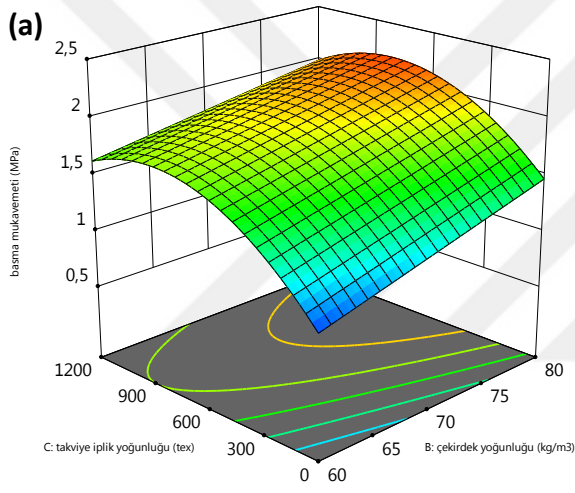
Şekil 4.15 ve 4.16'da basma ve eğme yük taşıma kapasitelerinin sandviç parametrelerine göre değişimi üç boyutlu yüzey grafikleri ile gösterilmiştir. Yüzey grafiklerde 600 tex cam elyaf iplik ile çekirdek malzemesi güçlendirilen sandviç yapıların en yüksek yük kapasitesi değerlerine ulaştığı görülmektedir (diğer parametreler sabit iken). Bununla birlikte cam elyaf iplik yoğunluğunun basma yükleri altında sonuçlar üzerinde daha fazla etkili olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan çekirdek yoğunluğu basma yük kapasitesine daha fazla etki ederken çekirdek kalınlığı eğme yük kapasitesine daha fazla etki etmiştir. Basma mukavemet değerleri incelendiğinde çekirdek yoğunluğunun kalınlık faktöründen daha fazla etkili olduğu Şekil 4.17'de görülmektedir. Şekil 4.18 ve 4.19'da sırasıyla çekirdek kayma ve yüzey tabaka gerilme grafikleri gösterilmekte olup parametrelere göre üç boyutlu yüzey dağılımları birbirine benzerdir. Gerilme değerlerinin çekirdek yoğunluğundaki artış ile arttığı, kalınlıktaki artış ile azaldığı bununla birlikte takviye iplik yoğunluğunun çekirdek yoğunluğundan ziyade çekirdek kalınlığı ile yapmış olduğu birleşik etkinin sonuçlar üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmektedir.



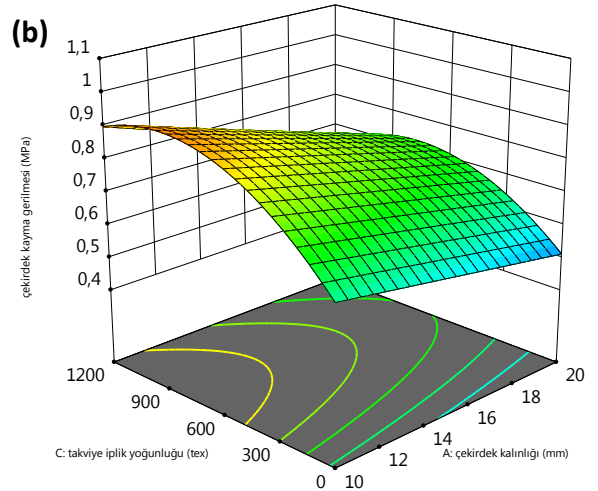
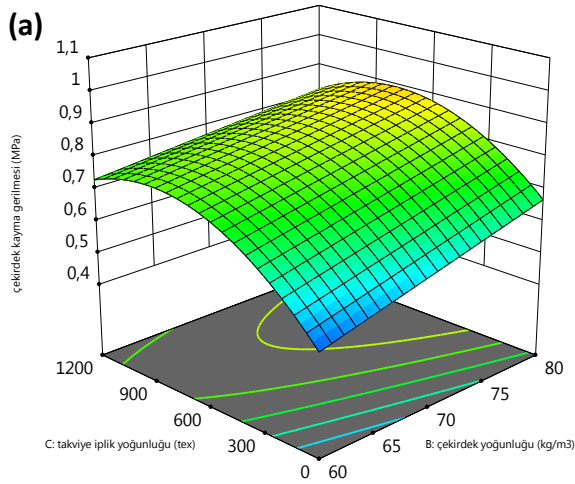
Şekil 4.15. Sandviç basma yük kapasitesinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre



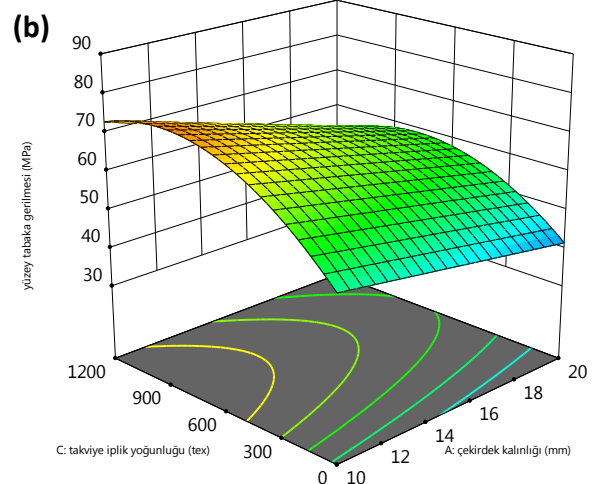
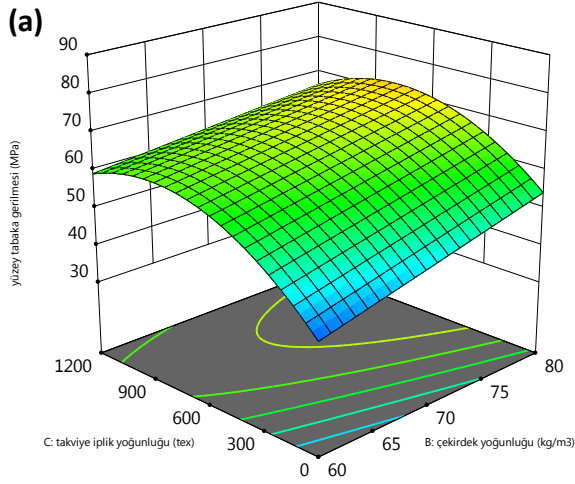
Şekil 4.16. Sandviç eğme yük kapasitesinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre



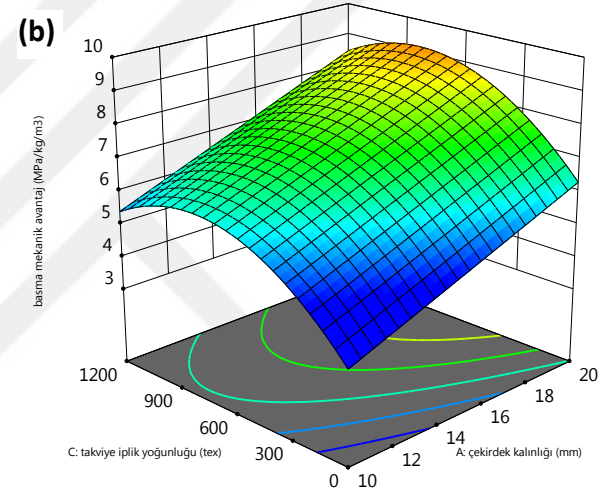
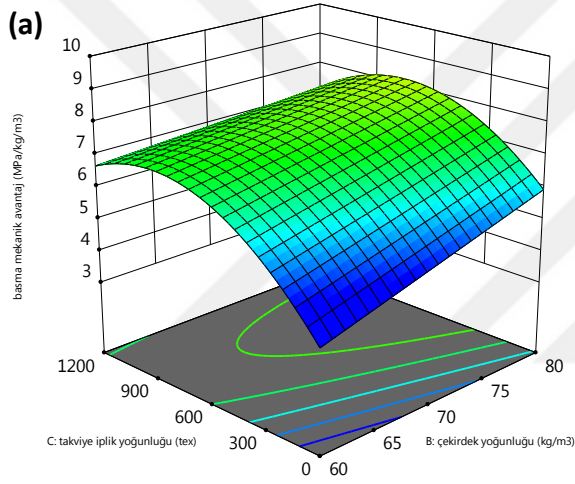
Şekil 4.17. Sandviç basma mukavemetinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre



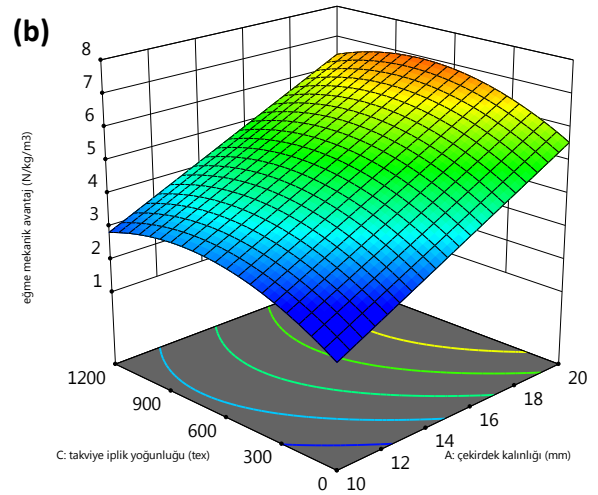
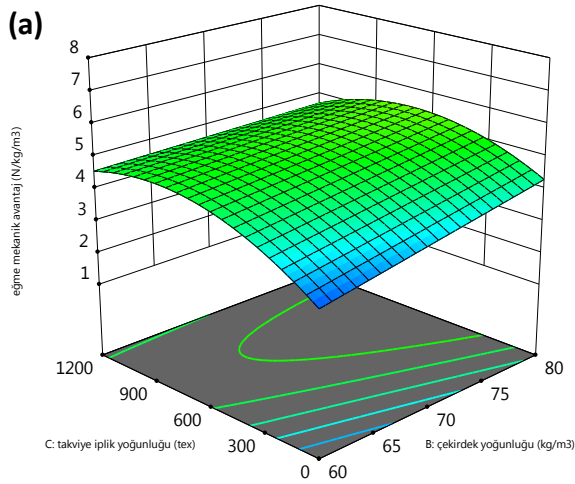
Şekil 4.18. Sandviç çekirdek kayma gerilmesinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre



Şekil 4.19. Sandviç yüzey tabaka gerilmesinin değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre



Şekil 4.20. Sandviç basma mekanik avantajının değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre



Şekil 4.21. Sandviç eğme mekanik avantajının değişimi, a) çekirdek ve takviye iplik yoğunluğuna göre, b) çekirdek kalınlığı ve takviye iplik yoğunluğuna göre

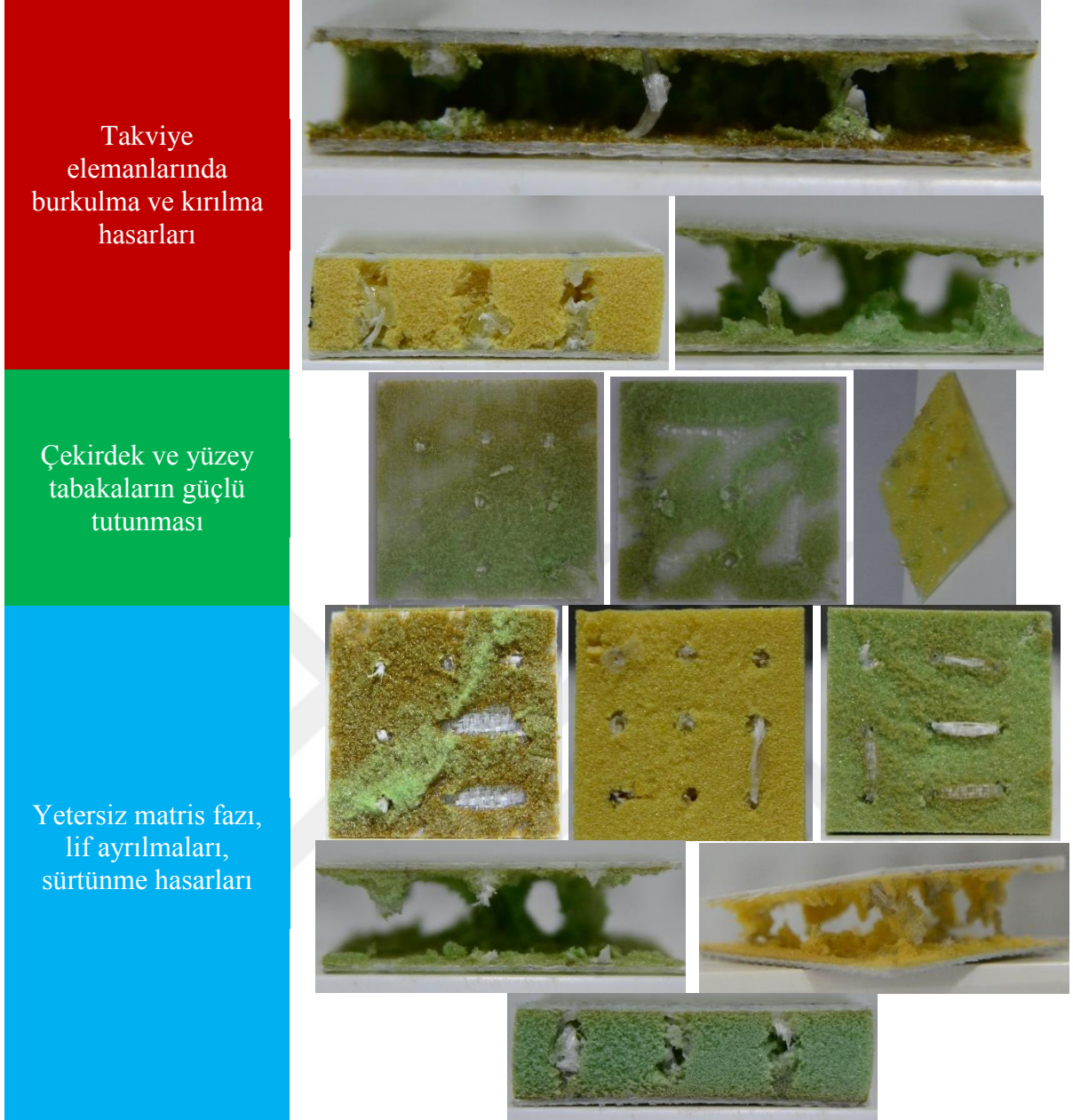
Şekil 4.20 ve 4.21’de ise sandviç yapıların basma ve eğme yükleri altındaki mekanik avantajları üç boyutlu yüzey grafikleri ile gösterilmiştir. Çekirdek malzemenin güçlendirilmesinde kullanılan cam elyaf iplik yoğunluğunun sandviçlerin basma performansında çok daha etkili olduğu görülmektedir.

#### 4.4. Sandviç Yapıların Hasar İncelemesi

Basma ve eğme testleri altında mekanik özellikleri ortaya çıkarılan çekirdek malzemesi cam elyaf iplikler ile dikilerek güçlendirilmiş sandviç yapıların hasar analizi makro ve mikro düzeyde incelenmiştir. Basma yükleri altında güçlendirilmemiş referans sandviçler sadece köpük çekirdek içerisindeki kapalı hücrelerin burkulması şeklinde hasara uğrarken güçlendirilmiş yapılarda hem kapalı hücre burkulması hem de kalınlık boyunca düzlem dışı takviye görevi gören cam/epoksi dikişlerde kırılma, burkulma, dikişlerde lif ayrılması gibi hasarlar gözlenmiştir (Şekil 4.22). Cam elyaf iplikler ile dikilen çekirdek malzemelerde yüzey tabakaların çekirdek malzemeye güçlü bir tutunma sağladığı anlaşılmaktadır. Elde edilen basma mukavemeti değerleri incelendiğinde maksimum özelliklerin 600 tex ile dikilen çekirdek yapıları sandviçlerde ortaya çıkmasının nedeni olarak 1200 tex ile dikilen sandviçlerde takviye elemanların yetersiz reçine emdirilmesi, elyaf ipliklerde sürtünme hasarlarından kaynaklı olarak düzensiz bir profile sahip olması gösterilebilir (Şekil 4.22). Literatürde, Sun vd. [61] de X-ray CT kullanarak yüzey tabakalar ile birlikte dikilmiş sandviçleri incelediklerinde sürtünme kaynaklı olarak liflerin hacim oranlarında azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Eğme yükleri altında ise referans sandviçler zayıf çekirdek-yüzey tabaka arayüzeyi nedeniyle tabakalar arası ayrılma, üst yüzey tabaka kırılması ve basma tarafındaki yüzey altında çekirdek kırılması tipik olarak gözlenen hasar mekanizmalarıdır (Şekil 4.23).

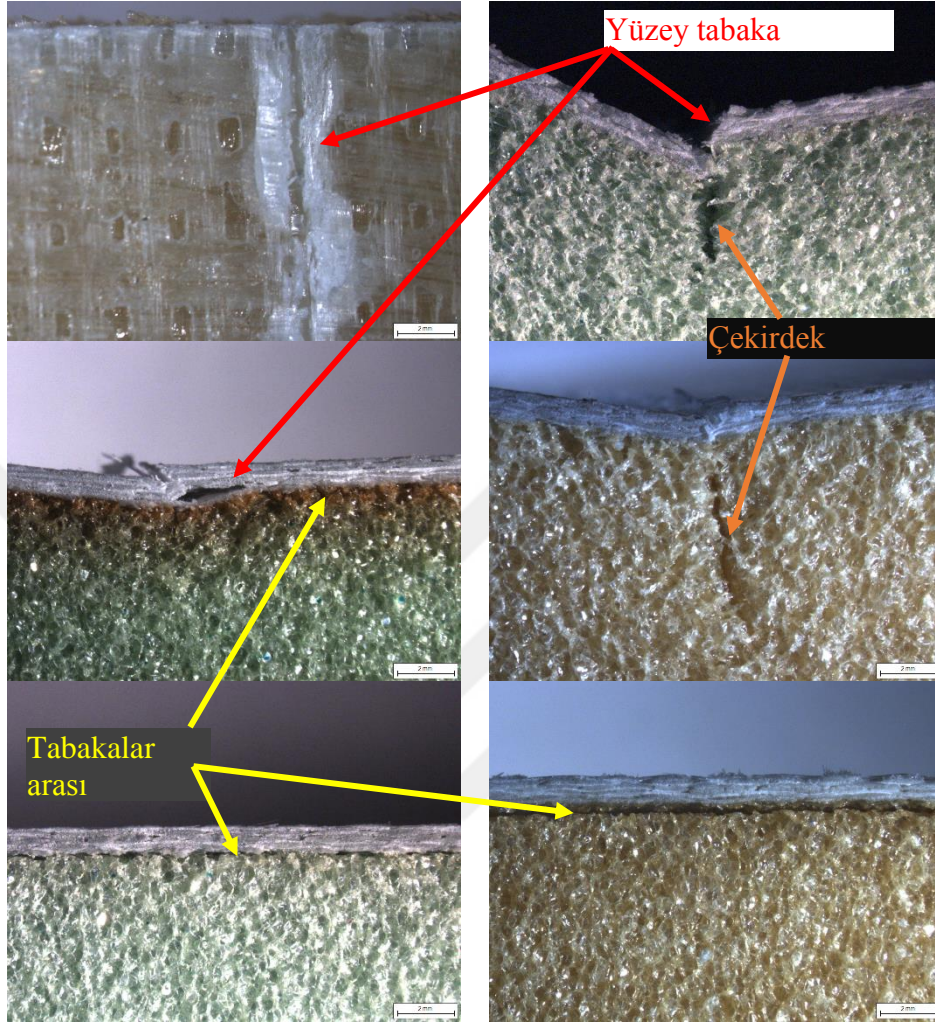
Dikiş yöntemi ile güçlendirilen sandviç yapılarda tabakalar arası ayrılma olmamıştır. Çünkü köpük çekirdek içerisindeki deliklerden geçirilen cam/epoksi iplik takviyeler alt ve üst yüzey tabakalara tutunarak ayrılmayı önlemiştir. Bu durum Şekil 4.24’te açıkça görülmektedir. Sentetik tiner içerisinde bekletilen hasarlı test numuneleri daha sonra temizlenerek çekirdek içerisindeki takviye cam elyaf çubuklar ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 4.22. güçlendirilmiş sandviç yapılarda basma hasar tipleri

Yüzey tabakalar ile dikişleme uygulamasının tutunma durumunu daha iyi gösterebilmek için yüzeyler mekanik olarak çekirdek malzemeden kaldırılmıştır. Yüzeyler arasında oldukça iyi bir tutunma sağladığı stereomikroskop ile alınan detay görüntülerde de mevcuttur (Şekil, 4.25). İlaveten üst yüzey tabaka kırılması ve cam elyaf/epoksi dikişlerde burkulmalar ve dikiş lif hasarları sebebiyle yapısal bozunma meydana gelmiştir (Şekil 4.26). 300 tex gibi düşük iplik yoğunluğunun takviye olarak kullanıldığı durumda takviye çubuklar daha ön planda iken 600 ve 1200 tex gibi yüksek iplik yoğunluğunda sandviç yüzey tabakalar üzerinde çubuk takviyenin etrafında köpük çekirdek malzemesinin de sarılı olduğu gözlenmektedir. Bu durum Drake vd. [70] tarafından daha yoğun

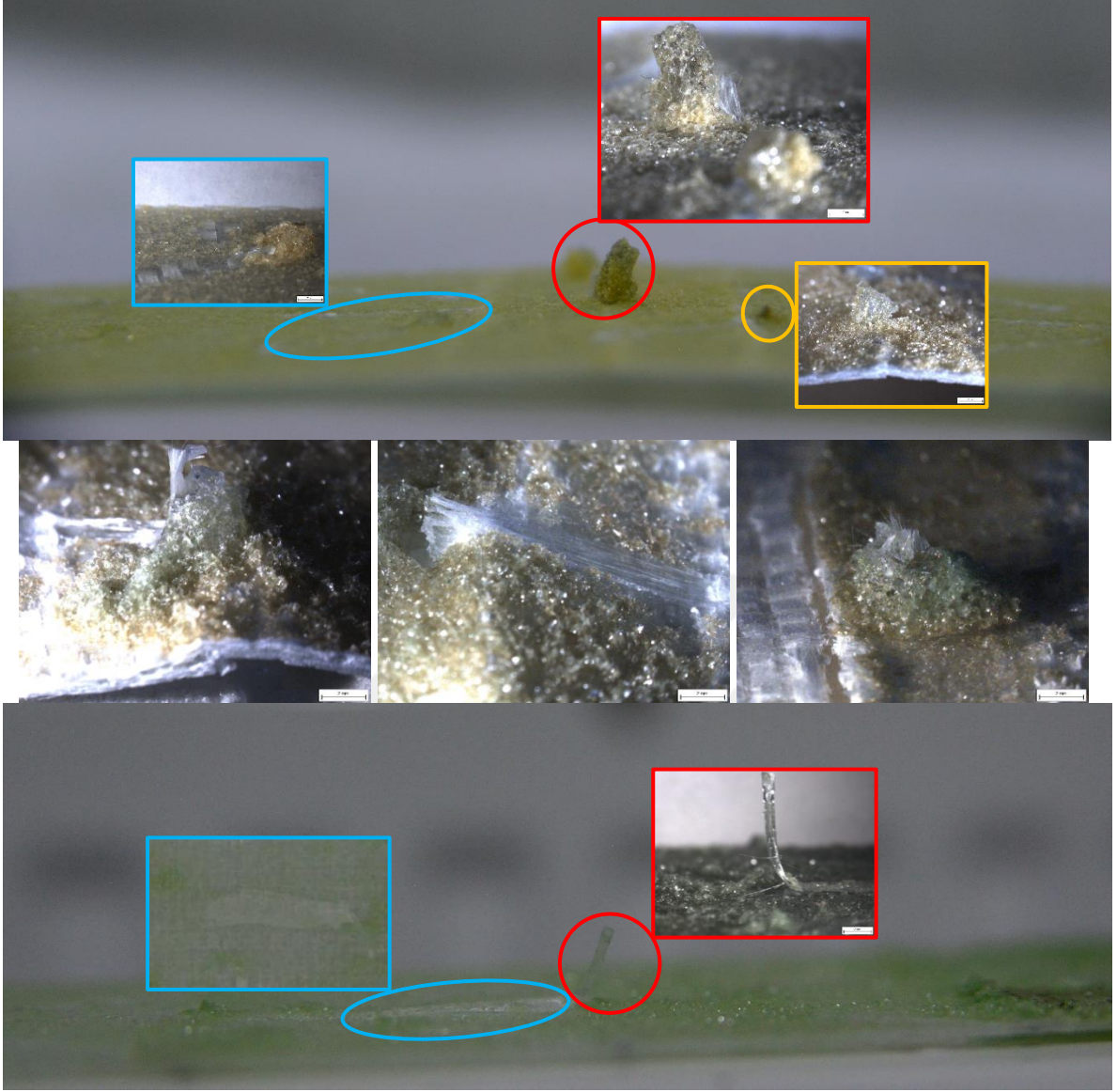
takviyelerde hasar ve çatlak büyümesine karşı sandviç yapıların daha dirençli olduğu şeklinde açıklanmıştır.



Şekil 4.23. Referans sandviçlerin eğme yükleri altında tipik hasar mekanizmaları



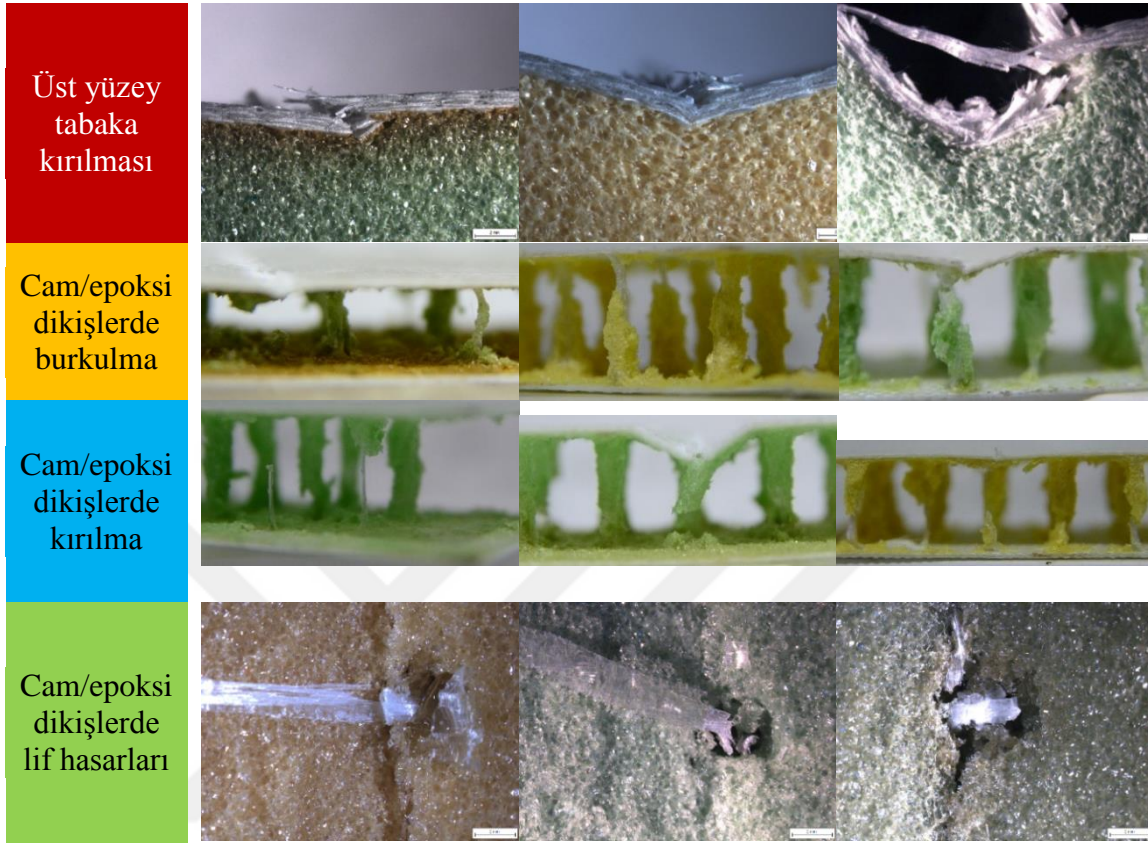
Şekil 4.24. Çekirdek malzeme içerisindeki cam elyaf iplik takviyelerinin yüzey tabakalara tutunması



Şekil 4.25. Cam/epoksi takviye çubukların sandviç yüzey tabalarına güçlü tutunmasına ait stereomikroskop görüntüleri

Yalkın vd. [58] tarafından da belirtildiği üzere dikişleme işlemi sandviç yapının mekanik özelliklerini artırmasının yanı sıra dikişlemede kullanılan cam elyaf ipliklerin yüzey tabaka ile güçlü bağ kurması da çekirdek-yüzey tabaka ayrışmasını geciktirerek mukavemet değerlerinin iyileşmesini sağlamaktadır. Şekil 4.24-25'te görüldüğü gibi çekirdek malzeme içerisinde yer alan cam elyaf/epoksi dikişler yüzey tabakalar ile iyi bir arayüzey dayanımı sağlayarak tabakalar arası ayrılmayı önlemiştir. İlaveten köpük çekirdek içerisindeki cam/epoksi takviye çubuklar yapıya sağladığı rijitlik ile yüksek kuvvetlere direnç gösterilebilmekte ve yapının hasara uğraması için çubukların kırılması gerekmektedir ve bu çatlak ilerlemesi için gereken enerji miktarı da çubuklar sayesinde artmaktadır [53, 61]. Zira Lascoup vd. [71] de dikişli bir sandviç yapının yüzey tabaka-

çekirdek arayüzünde bir çatlak başlatabilmek için gerekli olan enerji miktarının düz sandviçlere kıyasla 10 kat daha fazla olduğunu bildirmiştir.

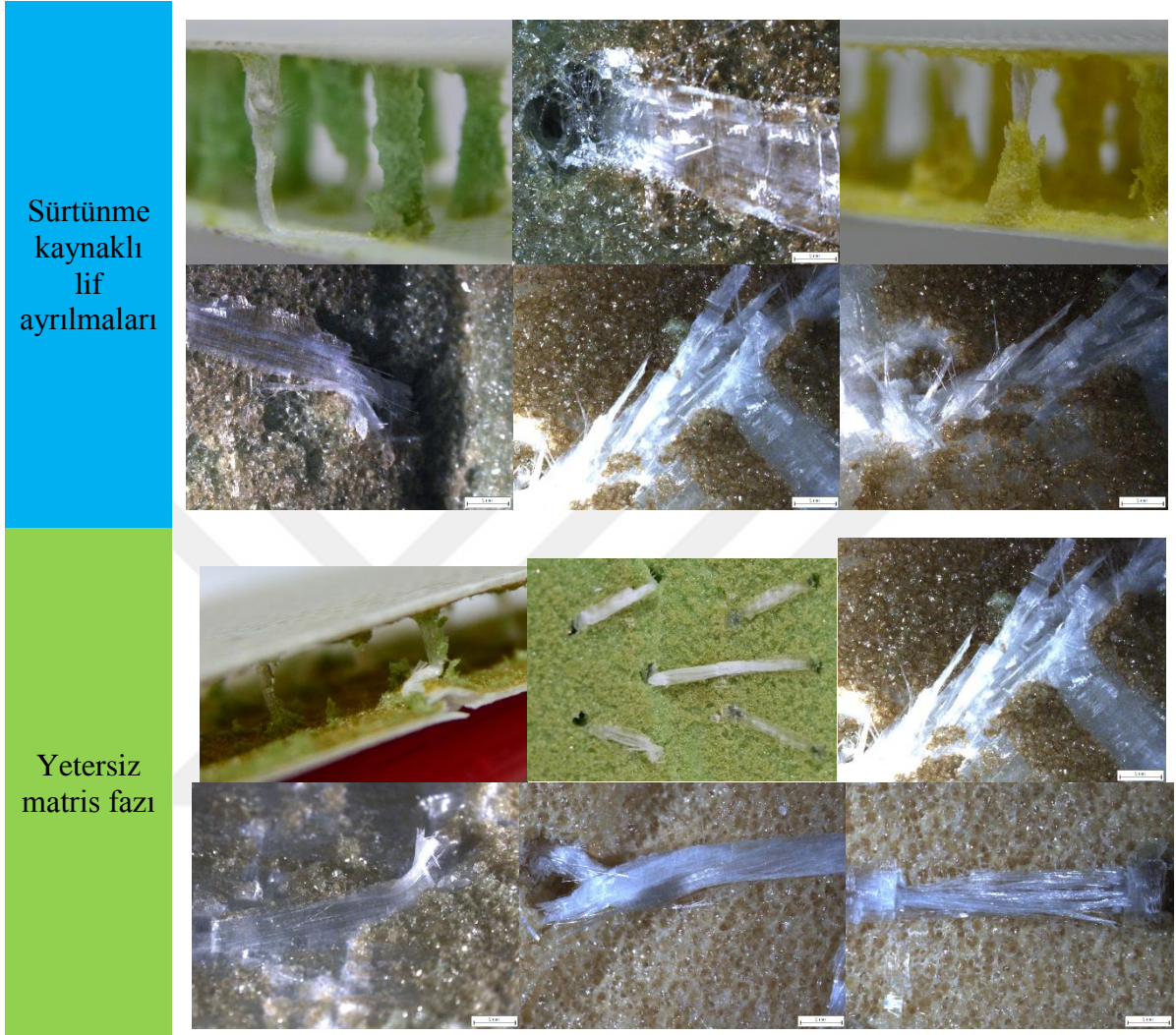


Şekil 4.26. Güçlendirilmiş sandviçlerde meydana gelen hasar tipleri

Ancak mekanik testlerden elde edilen bulgulardan da anlaşılacağı üzere en yüksek sonuçlar 600 tex cam elyaf iplik takviyeleri ile elde edilirken, 1200 tex iplik kullanımında iyileşme oranı düşmektedir. Bunun sebebi olarak dikiş ipliğinin köpük çekirdek içerisindeki sürtünmelerden kaynaklı olarak ipliğin bazı liflerinin hasara uğraması olabilir [51]. Çünkü Şekil 4.27'den de anlaşılacağı üzere köpük çekirdek malzemesi 1200 tex cam elyaf iplikler ile takviye edilen sandviç yapıların dikişleme delikleri içerisinde cam elyaf iplik takviyeler geçirilirken lif ayrılmaları ve yetersiz reçine emdirilmesi gibi istenmeyen durumlar meydana gelmiştir. Yalkın vd. [58] sürtünme kaynaklı hatalardan kaçınmak için reçine emdirilmiş takviye ipliklerinin kullanımını tavsiye etmektedir.

Elde edilen mekanik test bulgularında en yüksek artış oranlarının  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu köpük çekirdek sandviçte gerçekleşmiş olmasının nedeni olarak cam elyaf takviyelerin çubuk pimler gibi işlevinin bulunması ve bunun da özellikle düşük yoğunluklu

köpük çekirdek malzemeye sahip olan sandviçlerde mekanik yükler altında tipik olarak görülen çekirdek ezilmelerine karşı yapıyı daha dirençli hale getirmesi gösterilebilir [47].



Şekil 4.27. 1200 tex cam elyaf iplik takviyesine sahip sandviçlerde sürtünme ve yetersiz matris fazı kaynaklı hasarlar

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında,  $60 \text{ kg/m}^3$  ve  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluk ile 10 mm ve 20 mm kalınlıklı PVC köpük çekirdek malzemeler 300-600-1200 tex cam elyaf iplikler ile dikilerek güçlendirilmiş ve yüzey tabakaları cam elyaf kumaşlardan oluşan sandviç yapılar üretilmiştir. Çekirdek yapıları güçlendirilmemiş olan referans sandviçler ile birlikte toplam 12 farklı sandviç kompozit yapının tasarlandığı çalışmanın üretim aşamasında vakum torbalama yöntemi uygulanmıştır. Cam elyaf iplik yoğunluğu, sandviç çekirdek yoğunluğu ve çekirdek kalınlığı bu tez çalışmasında deneysel parametreler olarak ele alınmış ve üretilen sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri basma ve üç nokta eğme testleri ile araştırılmıştır. ASTM C365 ve C393 standartlarına göre gerçekleştirilen testlerde yük taşıma ve mukavemet değerleri belirlenmiştir. İlavenen kompozit malzemelerde mukavemet ve ağırlık kriterlerini birlikte göz önünde bulunduran ve mekanik avantaj olarak adlandırılan mekanik performans ölçüsü de hesaplanmıştır. Elde edilen bulguların değerlendirilmesinde ise iki yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanmış ve parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Son olarak, testlere tabi tutulan sandviç kompozitlerin stereomikroskop ve makro görüntüleme ile hasar analizleri gerçekleştirilmiş ve güçlendirilmiş sandviç yapılarda meydana gelen hasar mekanizmaları tespit edilmiştir. Böylece araştırma bulgularından elde edilen sonuçlar yapısal sandviç hasarları ile ilişkilendirilerek açıklanmıştır. Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

Basma testleri altındaki referans sandviçler tipik olarak lineer elastik bölgenin sonunda maksimum kuvvete erişmekte ve sabit gerilme altında plastik deformasyona uğramakta iken güçlendirilmiş sandviç yapıların plastik deformasyon bölgelerinde kuvvet ve gerilmelerde birden fazla tepe noktalar tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise çekirdek malzeme içerisindeki cam elyaf takviyelerin rijit çubuklar olarak görev yapması ve hasar için gerekli kuvvet değerlerini yükseltmesidir. Özgül basma mukavemet değerleri incelendiğinde referans sandviç yapıya kıyasla en yüksek artışlar  $60 \text{ kg/m}^3$  ve 20 mm kalınlığındaki sandviçlerin 300-600-1200 tex ile güçlendirildiği durumlarda elde edilmiş olup artış oranları sırasıyla %57,4, %83,8 ve %65,1 olarak belirlenmiştir. Normal referans sandviç şartlarında  $80 \text{ kg/m}^3$  çekirdek yoğunluklu, 10 mm ve 20 mm çekirdek kalınlıklı sandviçlerin mekanik performans olarak gerisinde kalan bu yapı özellikle 600 tex ile güçlendirildiğinde 10 mm  $80 \text{ kg/m}^3$  çekirdekli sandviçten %75,50, 20 mm  $80 \text{ kg/m}^3$  çekirdekli sandviçten ise %17,78 daha yüksek özgül basma mukavemetine sahip olmuştur.

Eğme testleri altında referans sandviçler lineer elastik bölge, lineer olmayan bölge ve sandviç çekirdek yapısındaki hasarların meydana gelmesiyle yapısal bozunmaya uğradığı aşamaları izlerken güçlendirilmiş sandviçlerde lineer elastik bölge daha yüksek kuvvetlere erişmekte ve lineer olmayan bölge ise referans sandviçlere kıyasla neredeyse belirsiz vaziyette olup sandviç hasarları da daha ani ve kırılğan bir şekilde gerçekleşmiştir. Hem hasarın gerçekleşme şekli hem de yüksek lineer kuvvetler çekirdek yapı içerisindeki cam elyaf takviyelerin rijit çubuklar olarak görev yapmasından kaynaklıdır. Basma mekanik özelliklerinde olduğu gibi eğmede de en yüksek değerler  $60 \text{ kg/m}^3$  ve 20 mm kalınlığındaki sandviçlerin güçlendirilmesi ile elde edilmiştir. Eğme yük taşıma kapasitelerine bakıldığında 300-600-1200 tex takviye durumunda artış oranları sırasıyla %31,9, %53,9 ve %43,0 olarak belirlenmiştir. İlaveten diğer yoğunluk ve kalınlıklardaki sandviçlerde de basma özelliklerinin aksine yüksek değerler elde edilmiştir. Özgül yük taşıma kapasitesine göre yapılan değerlendirmede referans sandviç şartlarına göre düşük yoğunluklu sandviç (K20.Y60.R) düşük mekanik özellikler sergilerken 600 tex ile takviyelendirildiğinde yüksek yoğunluklu referans sandviçten (K20.Y80.R) %12,91 oranında daha üstün hale gelmiştir.

İki yönlü ANOVA analizleri gerçekleştirilerek deneysel parametrelerin sandviçlerin teorik yoğunluğu, basma ve eğme yük taşıma kapasiteleri, basma mukavemeti, çekirdek kayma ve yüzey tabaka gerilmeleri ile basma ve eğme mekanik avantajları üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve Yanıt Yüzey Metodolojisine göre oluşturulan modeller parametrelerin sonuçlar üzerinde %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir. Parametrelerin bağımsız etkileri ve etkileşimli etkileri de ortaya çıkarılmıştır. Korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) değerleri %90'ın üzerinde olup oluşturulan matematiksel modellerin sandviç parametrelerine bağlı olarak analiz edilen mekanik özelliklerdeki değişimleri güçlü bir şekilde açıkladığı anlaşılmıştır. Yüksek uyumlu korelasyon değerleri sayesinde regresyon analizleri de gerçekleştirilmiş ve ortaya çıkarılan ampirik eşitlikler sayesinde sandviç mekanik özellikleri deneysel parametrelere bağlı olarak tahmin edilebilir hale getirilmiştir.

Mekanik testler sonrasında hasar analizleri yapılmış ve referans sandviçler için tipik hasar mekanizmaları literatür ile uyumlu olarak tespit edilmiştir. Basma yükleri altındaki sandviçler plastik deformasyon bölgesinde kapalı hücre yapısına sahip çekirdeklerin hücre burkulmaları nedeniyle ve plastik deformasyon bölgesi sonrasında ise yoğunlaşma neticesinde hücresel yapıdaki köpük çekirdeğin tamamen katı cisim gibi

davranması hasarlarıyla sonuçlanmıştır. Eğmede ise referans sandviçler tabakalar arası ayrılma, çekirdek ezilmesi, çekirdekte çatlak ve kırıklar ile basma tarafı yüzey tabakanın kırılması tipik hasar mekanizmalarıdır. Güçlendirilmiş sandviçler tabakalar arası ayrılmayı önlemiş ve yüzey tabakaların çekirdek yapı ile entegrasyonunu güçlü bir şekilde sağlamıştır. Çekirdek yapı içerisindeki cam elyaf iplik takviyelerde burkulma ve kırılma hasar mekanizmaları oluşurken özellikle 1200 tex ile güçlendirilen sandviçlerde sürtünme kaynaklı elyaf hasarları ve yetersiz matris fazı gözlenmiştir.

Elde edilen mekanik test bulgularında en yüksek artış oranlarının  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu köpük çekirdek sandviçte gerçekleşmiş olmasının nedeni olarak cam elyaf takviyelerin çubuk pimler gibi rol alması ve bunun da özellikle düşük yoğunluklu köpük çekirdek malzemeye sahip olan sandviçlerde yük altında tipik olarak görülen çekirdek ezilmelerine karşı yapıyı daha dirençli hale getirmesidir.

Çalışmanın sonuçları sandviç panel tasarımcıları ve üreticileri ile çekirdek malzeme üreticileri tarafından dikkate alındığı takdirde ağırlık kriterinin etkili olduğu mühendislik uygulamalarında üstün mekanik avantaj sağlayan çekirdek malzemesi güçlendirilmiş sandviç yapılar uygun maliyet-etkin bir çözüm olarak sunulabilir. Çünkü mekanik performans açısından düşük mukavemet değerlerine sahip olan düşük yoğunluklu polimer köpük çekirdeklerin daha etkin bir şekilde kullanılma potansiyeli ortaya çıkacaktır.

Diğer güçlendirme tekniklerine kıyasla sandviç bileşenlerine uygulanan dikişleme yöntemi literatüre sunulan ilgi çekici sonuçlar nedeniyle araştırmacıların son zamanlarda yoğun bir şekilde bu konu üzerinde odaklanmalarına neden olmuştur. Bu tez çalışmasından çıkarılan sonuçlar da düşük yoğunluklu köpük çekirdekli sandviçlerin yapısal özelliklerini önemli ölçüde artırdığını göstererek literatüre özgün katkı sağlamıştır. Buradan yola çıkarak çekirdek malzemelerin farklı desenlerde dikilmesi, yöntemin farklı türden çekirdek malzemelere uygulanması, dikişleme yönteminin farklı çekirdek ve yüzey tabaka kalınlıkları üzerindeki etkisi ve sandviç tasarımında bileşenlerin optimizasyonu gibi hususlar ileriki çalışmaların konusu olarak değerlendirilebilir.

## KAYNAKÇA

1. Vasiliev, V.V. and E.V. Morozov, *Advanced mechanics of composite materials and structures*. 2018: Elsevier.
2. Al-Saadi, A.U., T. Aravinthan, and W. Lokuge, *Structural applications of fibre reinforced polymer (FRP) composite tubes: A review of columns members*. *Composite Structures*, 2018. **204**: p. 513-524.
3. Vedernikov, A., et al., *Pultruded materials and structures: A review*. *Journal of Composite Materials*, 2020. **54**(26): p. 4081-4117.
4. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 2007: CRC press.
5. Sharma, S., et al., *Recent progress of composite materials in various novel engineering applications*. *Materials Today: Proceedings*, 2018. **5**(14): p. 28195-28202.
6. Efe, M.O., *Farklı destek mesafelerinde polivinil klorür (pvc) çekirdek yapılu sandviç kompozitlerin eğilme davranışının nümerik analizi*. 2019, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
7. Edition, F. and M.F. Ashby, *Material Selection in Mechanical Design*. 2011, Elsevier Ltd.: Burlington, MA, USA.
8. Chawla, K.K., *Composite materials: science and engineering*. 2012: Springer Science & Business Media.
9. Kesarwani, S., *Polymer Composites in Aviation Sector*. *International Journal of Engineering Research and*, 2017. **V6**.
10. Eşer, K., *Sandviç kompozit yapılarda balpeteği özelliklerinin ve farklı yapıştırıcı tabakaların mekanik özelliklere etkisi*. 2021, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
11. Kar, K.K., *Composite materials: processing, applications, characterizations*. 2016: Springer.
12. Balasubramanian, M., *Composite materials and processing*. Vol. 711. 2014: CRC press Boca Raton.
13. Gibson, R.F., *Principles of composite material mechanics*. 2007: CRC press.

14. Rajak, D.K., et al., *Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications*. Polymers, 2019. **11**(10): p. 1667.
15. Sharma, A.K., et al., *Matrix materials used in composites: A comprehensive study*. Materials Today: Proceedings, 2020. **21**: p. 1559-1562.
16. Balasubramanian, M., *Introduction to composite materials*. Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, 2016: p. 1-38.
17. Chawla, K.K. and K.K. Chawla, *Ceramic matrix composites*. Composite Materials: Science and Engineering, 2019: p. 251-296.
18. Callister Jr, W.D. and D.G. Rethwisch, *Callister's materials science and engineering*. 2020: John Wiley & Sons.
19. Gündođdu, H., *Cam elyaf takviyeli SMC kompozitlerin işlenebilirlik ve vidalı birleştirme yeteneklerinin incelenmesi*. 2018, Necmettin Erbakan University (Turkey).
20. Uzay, Ç., *Studies on mechanical and thermal properties of cubic boron nitride (c-BN) nanoparticle filled carbon fiber reinforced polymer composites*. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2022. **61**(13): p. 1439-1455.
21. Kaw, A.K., *Mechanics of composite materials*. 2005: CRC press.
22. Castanie, B., C. Bouvet, and M. Ginot, *Review of composite sandwich structure in aeronautic applications*. Composites Part C: Open Access, 2020. **1**: p. 100004.
23. Balıkoğlu, F., et al., *Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins*. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2020. **22**(6): p. 2030-2048.
24. Grünewald, J., P. Parlevliet, and V. Altstädt, *Manufacturing of thermoplastic composite sandwich structures: A review of literature*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2017. **30**(4): p. 437-464.
25. Group, D., *Diab guide to core and sandwich*. Laholm, Sweden, 2012.
26. Elmarakbi, A., *Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness*. 2013: John Wiley & Sons.
27. Öztürk, B., *3 boyutlu yazıcı ile üretilen sandviç yapıların statik ve dinamik yük altında davranışlarının incelenmesi*. 2020, Bursa Teknik Üniversitesi.

28. Potluri, P.a., E. Kusak, and T. Reddy, *Novel stitch-bonded sandwich composite structures*. Composite structures, 2003. **59**(2): p. 251-259.
29. Cajani, M., et al. *ATR Life Extension Project*. in *ICAF 2011 Structural Integrity: Influence of Efficiency and Green Imperatives*. 2011. Dordrecht: Springer Netherlands.
30. Özsarikaya, B., *Çok duvarlı karbon nanotüp, molibden disülfid ve silikon katkılı karbon elyaf/poliamit 66 kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
31. Balasubramanian, K., M.T. Sultan, and N. Rajeswari, *Manufacturing techniques of composites for aerospace applications*, in *Sustainable composites for aerospace applications*. 2018, Elsevier. p. 55-67.
32. Dinkci, H., *Vakum torbalamada basınç değişkeninin karbon elyaf matrisli epoksi yapılarda estetik ve mekanik özelliklere etkisi*. 2020.
33. Prabhakar, M.M., et al., *An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability*. Composite Structures, 2019. **230**: p. 111419.
34. Quanjin, M., et al., *Filament winding technique: SWOT analysis and applied favorable factors*. SCIREA Journal of Mechanical Engineering, 2019. **3**(1): p. 1-25.
35. Doğan, A.F., *Kumaş sarım metodu ile üretilen aramid fiber boruların darbe dirençlerinin araştırılması*. 2022, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
36. Chowdhury, I.R. and J. Summerscales, *Cool-Clave—An Energy Efficient Autoclave*. Journal of Composites Science, 2023. **7**(2): p. 82.
37. Kabir, K., T. Vodenitcharova, and M. Hoffman, *Response of aluminium foam-cored sandwich panels to bending load*. Composites Part B: Engineering, 2014. **64**: p. 24-32.
38. Dogan, A., *Low-velocity impact, bending, and compression response of carbon fiber/epoxy-based sandwich composites with different types of core materials*. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2021. **23**(6): p. 1956-1971.

39. Garay, A.C., J.A. Souza, and S.C. Amico, *Evaluation of mechanical properties of sandwich structures with polyethylene terephthalate and polyvinyl chloride core*. Journal of sandwich structures & materials, 2016. **18**(2): p. 229-241.
40. Aslan, M., O. Güler, and Ü. Alver, *Farklı yüzey ve çekirdek malzemelerine sahip sandviç panel kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2018. **24**(6): p. 1062-1068.
41. Uzay, C., et al., *Bending behavior of sandwich structures with different fiber facing types and extremely low-density foam cores*. Materials Testing, 2019. **61**(3): p. 220-230.
42. Jiga, G.G., et al. *Behavior of Different PLA Sandwich Structures Loaded in Three Points Bending*. in *Macromolecular Symposia*. 2021. Wiley Online Library.
43. Kaveloglu, S. and S. Temiz, *Investigation of low-velocity impact performances of sandwich composites manufactured using 3d printer*. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2024. **39**(1): p. 139-150.
44. Hedayati, R. and M. Sadighi, *Effect of using an inner plate between two faces of a sandwich structure in resistance to bird-strike impact*. Journal of Aerospace Engineering, 2016. **29**(1): p. 04015020.
45. Chen, Q., et al., *Mechanical properties in glass fiber PVC-foam sandwich structures from different chopped fiber interfacial reinforcement through vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing*. Composites Science and Technology, 2017. **144**: p. 202-207.
46. Tao, J., et al., *Manufacturing and mechanical performances of a novel foam core sandwich-walled hollow column reinforced by stiffeners*. Thin-Walled Structures, 2019. **139**: p. 1-8.
47. Abdi, B., et al., *Comparison of foam core sandwich panel and through-thickness polymer pin-reinforced foam core sandwich panel subject to indentation and flatwise compression loadings*. Polymer Composites, 2016. **37**(2): p. 612-619.
48. Uzay, Ç. and N. Geren, *Effect of stainless-steel wire mesh embedded into fibre-reinforced polymer facings on flexural characteristics of sandwich structures*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2020. **39**(15-16): p. 613-633.

49. Balıkoğlu, F., et al. *Compressive and flexural behaviour of pin reinforced marine composite sandwich beams*. in *Proceedings of the IV international EGE composite materials symposium (KOMPEGE 2018), Izmir, Turkey*. 2018.
50. Yalkın, H.E., B.M. İcten, and T. Alpyıldız, *Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core*. *Composites Part B: Engineering*, 2015. **79**: p. 383-391.
51. Yalkın, H.E., B.M. İcten, and T. Alpyıldız, *Tensile and compressive performances of foam core sandwich composites with various core modifications*. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2017. **19**(1): p. 49-65.
52. Al-Shamary, A.K.J., R. Karakuzu, and O. Özdemir, *Low-velocity impact response of sandwich composites with different foam core configurations*. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2016. **18**(6): p. 754-768.
53. Han, F., Y. Yan, and J. Ma, *Experimental study and progressive failure analysis of stitched foam-core sandwich composites subjected to low-velocity impact*. *Polymer Composites*, 2018. **39**(3): p. 624-635.
54. Jia, J. and S. Yan, *Fabrication and low-velocity impact response of pyramidal lattice stitched foam sandwich composites*. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2020. **27**(1): p. 245-257.
55. Zhao, Y., S. Yan, and J. Jia, *Fabrication and Statics Performance of Pyramidal Lattice Stitched Foam Sandwich Composites*. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2021. **126**(3): p. 1251--1274.
56. Zangana, S., et al., *A novel hybridised composite sandwich core with Glass, Kevlar and Zylon fibres—Investigation under low-velocity impact*. *International Journal of Impact Engineering*, 2020. **137**: p. 103430.
57. Jebadurai, D.S. and A.R. Rose. *Influence of core and matrix modifications on the mechanical characteristics of sandwich composites*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. IOP Publishing.
58. Yalkın, H.E., R. Karakuzu, and T. Alpyıldız, *Low velocity impact behavior of sandwich composites with different structural configurations of foam core: An experimental study*. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2022. **24**(6): p. 1941-1960.

59. Drake, D.A., et al., *Influence of stitching on the fracture of stitched sandwich composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021. **145**: p. 106383.
60. Drake, D.A., et al., *Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials – A mechanistic review*. Journal of Composite Materials, 2021. **55**(23): p. 3307-3321.
61. Sun, C., et al., *Improving the structural integrity of foam-core sandwich composites using continuous carbon fiber stitching*. Composite Structures, 2023. **324**: p. 117509.
62. Dost\_Kimya-TDS, *Glass Fabric – 200gr/sqm 3K Plain*. 2014, Turkey: Dost Kimya Inc.
63. Airex\_C70-TDS, *Universal Structural Foam: Airex C70*. . 2011: Composites A.
64. Hexion-TDS, *Laminating Resin MGSTM L160 and Hardener H160*. 2009, The Netherlands: Hexion Inc.
65. ASTM-C365, *Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*. 2003, USA: Annual Book of ASTM Standards.
66. ASTM-C393, *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. 2016, Annual Book of ASTM Standards: USA.
67. Çetin, A., et al. *Predicting the indentation load of FRP facesheet/foam core sandwiches*. in *Structures*. 2024. Elsevier.
68. Tita, V. and M.F. Caliri Júnior, *Numerical simulation of anisotropic polymeric foams*. Latin American Journal of Solids and Structures, 2012. **9**: p. 1-21.
69. Mostafa, A., *Numerical analysis on the effect of shear keys pitch on the shear performance of foamed sandwich panels*. Engineering Structures, 2015. **101**: p. 216-232.
70. Drake, D.A., R.W. Sullivan, and S. Clay, *On the use of a trilinear traction-separation law to represent stitch failure in stitched sandwich composites*. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2022. **24**(2): p. 1367-1384.
71. Lascoup, B., et al., *Core–skin interfacial toughness of stitched sandwich structure*. Composites Part B: Engineering, 2014. **67**: p. 363-370.