

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**GELENEKSEL VE ALTERNATİF MALZEMELİ DENİZEL
KOMPOZİTLERİN ÜRETİM PARAMETRELERİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

FATİH BALIKOĞLU

DOKTORA TEZİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nurettin ARSLAN (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU
Prof. Dr. Ali ORAL
Doç. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK
Dr. Öğr. Üyesi Alaaddin TOKTAŞ

BALIKESİR, ŞUBAT - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Fatih BALIKOĞLU tarafından hazırlanan “**GELENEKSEL VE ALTERNATİF MALZEMELİ DENİZEL KOMPOZİTLERİN ÜRETİM PARAMETRELERİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 4 Şubat 2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman

Prof. Dr. Nurettin ARSLAN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU
Dokuz Eylül Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. Ali ORAL
Balıkesir Üniversitesi

Üye

Doç. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Alaaddin TOKTAŞ
Balıkesir Üniversitesi

İmza



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR



ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Geleneksel ve Alternatif Malzemeli Denizel Kompozitlerin Üretim Parametreleri ve Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fatih BALIKOĞLU



Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Birimi tarafından (2013/08) nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

**GELENEKSEL VE ALTERNATİF MALZEMELİ DENİZEL KOMPOZİTLERİN
ÜRETİM PARAMETRELERİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI
DOKTORA TEZİ
FATİH BALIKOĞLU
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. NURETTİN ARSLAN)
(EŞ DANIŞMAN: PROF. DR. İRFAN AY)
BALIKESİR, ŞUBAT - 2020**

Bu çalışmada, farklı boyutlara sahip delik ve yüzeysel oluklar işlenmiş PVC köpük içeren denizel sandviç kompozitlerin mekanik davranışları araştırılmıştır. Sandviç kompozit numuneler, vinil ester reçine sistemi ve vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Köpük malzemeye kalınlık doğrultusunda farklı delik delme şablonları uygulanmış ve açılan deliklerin infüzyon işlemi sırasında reçine ile dolması neticesinde pim takviyeli köpük yapılar elde edilmiştir. Delik şablonlarının sandviç panellerin düzlem dışı basma ve çekirdek kayma özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Pim takviyeli sandviç numunelerin, %67' ye kadar ulaşan ağırlık artışına karşılık üç nokta eğilme hasar yükleri, düz çekirdek içeren referans panele kıyasla %133.8 artış göstermiştir. Köpük ezilmesine neden olan düzlem dışı basma hasar yükü değerlerinde, köpük malzemenin katı reçine pimleri ile güçlendirilmesiyle maksimum %570 artış sağlanmıştır. Bu sonuçlara ek olarak, çeşitli çekirdek işleme konfigürasyonu uygulanmış PVC köpük içeren sandviç kompozit kirişlerin dört nokta eğilme davranışları deneysel, analitik ve sayısal çözümlene teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Eğilme dayanımı ve efektif eğilme rijitlik değerlerinde, referans numuneye kıyasla sırasıyla maksimum %34 ve %61 oranında artış sağlanmıştır. Orta açıklık sehimi, eşdeğer eğilme rijitliği ve eğilme hasar yükleri hesaplanmıştır. Sandviç kirişlerin eğilme davranışları, yüzey tabakaları lineer ortotropik ve köpük çekirdek davranışını temsilen izotropik sertleşme plastisite (isotropic hardening model plasticity) malzeme modelleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (ANSYS yazılımı) ile sayısal olarak analiz edilmiştir. Köpük malzemelerin işlenmesinin infüzyon üretim sistemlerinde reçine akış geçirgenliği sağlamanın yanı sıra sandviç panellerin mekanik performansını artırmak için de başvurulacak basit, uygulanabilir ve ekonomik bir yöntem olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Sandviç kompozit, eğilme, basma, kayma, PVC köpük, sonlu elemanlar analizi

ABSTRACT

MANUFACTURING PARAMETERS OF MARINE COMPOSITES MADE OF CONVENTIONAL AND ALTERNATIVE MATERIALS AND THEIR EFFECTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES

PH.D THESIS

FATİH BALIKOĞLU

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. NURETTİN ARSLAN)

(CO-SUPERVISOR: PROF. DR. İRFAN AY)

BALIKESİR, FEBRUARY - 2020

In this study, the mechanical behavior of marine sandwich composites containing PVC foam with holes and surface grooves of different sizes were investigated. Sandwich composite samples were produced using vinyl ester resin system and vacuum assisted resin transfer molding method. Different hole drilling square patterns were applied to the foam material in thickness direction and pin reinforced core structures were obtained as a result of filling holes with resin during infusion process. The effect of hole patterns on out-of-plane compression and core shear properties of sandwich panels was investigated experimentally. The three point bending failure load of pin reinforced sandwich panels increased by 133.8% compared to the reference panel at the expense of increased panel weight up to 67%. Out-of-plane compression failure load causing core crushing increased by 570% by reinforcing the foam material with cured resin pins. In addition, the four point bending behavior of sandwich composite beams containing PVC foam with various core machining configurations was investigated experimentally, analytically and numerically. The bending strength and effective bending stiffness increased up to 34% and 61%, respectively, in comparison to a control beam without core modification. Analytical equations were utilized for calculating the mid-span deflection, equivalent bending stiffness and ultimate bending strength of the sandwich beams. Finite element analysis was also performed to analyze the flexural response of the specimens taking into account the combined effect of orthotropic linear elasticity of the face sheet and the non-linear behavior of the foam core. It has been found that the core cutting of foam materials is a simple, economical and feasible method to improve the mechanical performance of marine sandwich panels as well as to provide resin flow permeability in infusion systems.

KEYWORDS: Sandwich composite, bending, compression, core shear, PVC foam, finite element analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
KISALTMALAR LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Kompozit Malzeme Tanımı ve Sınıflandırılması	1
1.2 Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozit Malzemeler.....	2
1.2.1 Laminat Kompozitler	3
1.2.2 Sandviç Kompozitler	3
1.3 Deniz Taşıtlarında Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerin Kullanımı	6
1.4 Kompozit Deniz Taşıtı Örnekleri ve Tarihsel Gelişimi	7
1.5 Denizel Sandviç Kompozit Malzemeler	11
1.5.1 Takviye Elemanları	12
1.5.2 Reçineler	13
1.5.3 Çekirdek Malzemeler	13
1.5.4 Denizel Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	16
1.5.4.1 El Yatırma ve Püskürtme Yöntemleri	19
1.5.4.2 Reçine İnfüzyon Yöntemleri	22
1.5.4.3 Denizel Sandviç Kompozitlerin Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Metodu ile Üretimi.....	26
2. LİTERATÜR ÖZETİ	31
2.1 Z-İğneleme Yöntemi	35
2.2 Dikiş-Birleştirme Yöntemi.....	36
2.3 Delaminasyon-Sınırlama Yöntemi.....	36
2.4 Çekirdek Modifikasyonu	37
2.4.1 Kayma Kamalı Çekirdek Yapılar.....	37
2.4.2 Delik-Oluk İşlenmiş Çekirdek Yapılar	39
2.4.3 Hücre (Ağ) Yapılı Çekirdek Yapılar.....	40
2.4.3.1 Katı Reçine İçeren Çapraz Kesik Çekirdek Yapılar.....	41
2.4.3.2 Takviye ile Güçlendirilmiş Hücre (Ağ) Yapılı Çekirdek Yapılar	42
3. SANDVIÇ KOMPOZİT MALZEMELERİN EĞİLME DAVRANIŞI VE HASAR MEKANİZMALARI	45
3.1 Sandviç Kompozit Kirişlerin Eğilme Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması.....	45
3.2 Sandviç Kompozit Kirişlerin Sehım Değerlerinin Hesaplanması	47
3.3 Sandviç Kompozit Kirişlerde Normal Ve Kayma Gerilmelerinin Hesaplanması	49
3.4 Sandviç Kompozit Malzemelerin Hasar Yükleri ve Mekanizmaları	50
3.4.1 Çekme-Basma Yükü Altında Kritik Hasar Yüklerinin Hesabı.....	52
3.4.2 Çekirdek Kayma Hasarı Yükü Hesabı	53

4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	55
4.1 Pim Takviyeli PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozitler.....	55
4.1.1 Materyal ve Üretim	55
4.1.2 Test Standartları	58
4.2 Delik, Oluk ve Çapraz Kesik İşlenmiş PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozitler	60
4.2.1 Materyal ve Üretim	60
4.2.2 Test Standartları	63
4.2.3 Sonlu Elemanlar Analizi	64
5. BULGULAR VE İRDELEME.....	67
5.1 Pim Takviyeli PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozitlerin Test Bulguları	67
5.1.1 Üç Nokta Eğilme Test Sonuçları	67
5.1.2 Düzlem Dışı Basma Test Sonuçları	74
5.1.3 Ağırlık Artış Tespiti	76
5.2 Delik, Oluk Ve Çapraz Kesik İşlenmiş PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozitlerin Test Bulguları	79
5.2.1 Referans Numune Eğilme Test Sonuçları	79
5.2.2 Delik Açılmış PVC Köpük İçeren Sandviç Numunelerin (DKS) Eğilme Test Sonuçları	80
5.2.3 Çapraz Kesik PVC Köpük İçeren Numunelerin (ÇKS) Test Sonuçları	81
5.2.4 Delik açılmış Çapraz Kesik PVC Köpük İçeren Numunelerin (DÇKS) Test Sonuçları	82
5.2.5 Oluk Açılmış PVC Köpük İçeren Numunelerin (OKS) Test Sonuçları	83
5.2.6 Delik-Oluk Açılmış PVC Köpük İçeren Numunelerin (DOKS) Test Sonuçları	85
5.2.7 Yük- Şekil Değiştirme Grafikleri.....	88
5.2.8 Ağırlık Artış Tespiti	90
5.2.9 Analitik Çalışma	91
5.2.9.1 Hasar Yükü ve Tipi	91
5.2.9.2 Orta Nokta Sehım Değeri	93
5.2.9.3 Eğilme Rijitliği	96
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	100
6.1 Pim Takviyeli PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozit Numunelere Ait Sonuçların Değıerlendirilmesi	100
6.2 Delik, Oluk Ve Çapraz Kesik Açılmış PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Numunelere Ait Sonuçların Değıerlendirilmesi	101
7. KAYNAKLAR	103
EKLER	120
EK A: Laminat Kompozit Tabakaların Kayma ve Basma Özelliklerini Belirlemek Amacıyla Sırasıyla ASTM D7078 ve ASTM D6641 Standartlarına Uygun Şekilde Yapılan Testlere Ait Görseller.....	120
EK B: Lineer Besleme Uygulanarak Üretilen Düz PVC Köpük İçeren Referans Numuneye Ait Resim.	121
EK C: PVC Köpük Malzemenin ASTM D1621 Standardına Uygun Yapılan Basma Test Sonuçları	122
ÖZGEÇMİŞ	123

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Sandviç kompozit malzeme bileşenleri.	4
Şekil 1.2: Sandviç yapı etkisi.	5
Şekil 1.3: Sandviç yapı ve I profil yapı elamanlarının karşılaştırılması.	5
Şekil 1.4: Denizel kompozit malzemelerin askeri alanda gelişimi, a) Visby Sınıfı Korvet, b) HMS Wilton MCMV, c) Hunt Sınıfı MCMV, d) Landsort Sınıfı MCMV, e) Standard Flex 300 [45].	10
Şekil 1.5: Denizel kompozit malzemelerde takviye eleman kullanımı (%) [32].	15
Şekil 1.6: Denizel kompozit malzemelerde reçine kullanımı (%) [32].	15
Şekil 1.7: Denizel kompozit malzemelerde çekirdek malzeme kullanımı (%) [32].	16
Şekil 1.8: Deniz taşıt üretiminde tercih edilen üretim yöntemleri [32].	17
Şekil 1.9: Sandviç kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi [32].	17
Şekil 1.10: Polyester tekne gövde ve güverte kalıpları (Mercan Yat Ltd. Şti, Çiğli, İzmir).	19
Şekil 1.11: El yatırma yöntemi ile tekne imalatı (Güven Tekne Ltd. Şti, Çiğli, İzmir), a) Dişi polyester gövde kalıp, b, c) Cam elyaf yatırma, d) Reçine emdirme... ..	21
Şekil 1.12: VARIM üretim tesisatı [46].	24
Şekil 1.13: VARIM tekniğinde reçine besleme stratejileri [21].	24
Şekil 1.14: VARIM kalıp içerisinde basınç dağılımı [21].	25
Şekil 1.15: VARIM ile sandviç kompozit malzeme üretimi.	26
Şekil 1.16: Sandviç kompozit malzemenin VARIM üretim aşamaları (GCG Yat İmalat Sanayi A.Ş, Sarnıç, İzmir), a) Cam elyaf ve köpük malzemelerin kalıba yerleşmesi b) spiral hortumların çekilmesi, c, d) Reçine ve vakum hortumların takılması, e) Vakum naylonun yerleşmesi, f) Sızdırmazlık macunun yapıştırılması, g, h) Reçine besleme hattının açılması ve reçine emdirilmesi.. ..	28
Şekil 3.1: Sandviç kompozit kesitin detayları [19].	45
Şekil 3.2: Üç (3) nokta ve dört (4) nokta eğilme yüklemeleri altında kesme (V) ve moment (M) diyagramları [87, 167].	48
Şekil 3.3: Sandviç kompozit kesitte oluşan normal (σ) ve kayma (τ) gerilme dağılım profilleri a) Yaklaşım yok, b) $E_c \ll E_s$, c) $E_c \ll E_s$ ve $t_s \ll t_c$ [19].	50
Şekil 3.4: Sandviç kompozit malzemedeki karşılaşılan genel hasar türleri [179].	52
Şekil 4.1: Pim takviyeli sandviç kompozit malzemelerin şematik gösterimi.	55
Şekil 4.2: Sandviç kompozit plakalara ait VARIM üretim resimleri ve şematik gösterimleri a) Düz PVC içeren referans plaka, b) Pim takviyeli köpük içeren sandviç kompozit plaka.	57
Şekil 4.3: Üç (3) nokta eğilme testi konfigürasyonu a) Alt-eğilme yükleme, b) Üst-eğilme yükleme [185].	59
Şekil 4.4: Düzlem dışı basma testi konfigürasyonu [187].	59
Şekil 4.5: Sandviç kompozit panel üretimi (çevresel besleme).	60
Şekil 4.6: PVC köpük malzemenin CNC tezgâhında işlenmesi a) Oluk açma, b) Delik delme.	62
Şekil 4.7: Çekirdek modifikasyonlarının şematik gösterimi a) DKS_Ø2,4K, b) DKS_Ø2,4X, c) ÇKS, d) DÇKS_Ø2,4, e) OKS2×2, 2×4, 4×2, 4×4, f) DOKS_Ø2,4 numuneler.	63
Şekil 4.8: Dört (4) nokta eğilme test konfigürasyonu ve gerinim ölçer düzeneği [185].	64
Şekil 4.9: Sandviç kompozit kirişin çeyrek (1/4) sonlu elemanlar modeli.	65

Şekil 4.10: PVC köpük malzemenin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri a) Üç nokta eğilme testi, b) Düzlem dışı basma testi.	66
Şekil 4.11: Ağ boyutunun bir fonksiyonu olarak köpükte oluşan maksimum nümerik kayma gerilmesi değişimi.	66
Şekil 5.1: Referans numunesinin üst ve alt eğilme yükleri altında yük-deplasman grafiği.	67
Şekil 5.2: Ø4 mm pim takviyeli sandviç numunelerin alt-eğilme yük-deplasman grafikleri, a) Ø4-s12. b) Ø4-s14. c) Ø4-s16. d) Ø4-s18 pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.	68
Şekil 5.3: Ø6 mm pim takviyeli sandviç numunelerin alt-eğilme yük-deplasman grafikleri, a) Ø6-s12. b) Ø6-s14. c) Ø6-s16. d) Ø6-s18 pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.	69
Şekil 5.4: Ø8 mm pim takviyeli sandviç numunelerin alt-eğilme yük-deplasman grafikleri, (a) Ø8-s12. (b) Ø8-s14. (c) Ø8-s16. (d) Ø8-s18 pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.	69
Şekil 5.5: Sandviç numunelerin alt-eğilme (a, b, c) ve üst-eğilme (d) yükleri altında hasar gören kesitlerinin ayrıntıları.	71
Şekil 5.6: Ø4, 8-s12, Ø4, 8-s16 numunelerinin üst-eğilme yük-deplasman grafikleri, a) Ø4-s12. b) Ø4-s16. c) Ø8-s12. d) Ø8-s16.pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.	72
Şekil 5.7: Hasar alan pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.	73
Şekil 5.8: Pim takviyeli ve referans numunelerinin düzlem dışı basma yük-deplasman grafikleri, a) Ø4-s12. b) Ø4-s16. c) Ø6-s14. d) Ø6-s16. e) Ø8-s12. f) Referans.	75
Şekil 5.9: Düzlem-dışı basma yükü altında hasar gören sandviç kompozit numunelerinin kesit görüntüleri, a) Ø4-s12. b) Ø4-s16. c) Ø6-s14. d) Ø6-s16. e) Ø8-s12 pim takviyeli sandviç kompozitler.	76
Şekil 5.10: a) Sandviç kompozitlerin ağırlık ölçümleri, b) teorik ağırlık tahminleri, c) spesifik eğilme, d) spesifik basma hasar yük oranları.	78
Şekil 5.11: Referans numuneye ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.	79
Şekil 5.12: DKS_Ø2,4K numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.	80
Şekil 5.13: DKS_Ø2,4X numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.	81
Şekil 5.14: ÇKS numunesine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.	82
Şekil 5.15: DÇKS_Ø2,4 numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.	83
Şekil 5.16: OKS2×2, OKS2×4 numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.	84
Şekil 5.17: OKS4×2, OKS4×4 numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.	84
Şekil 5.18: DOKS_Ø2, 4 numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.	85
Şekil 5.19: Sandviç kompozit kirişlerin hasar davranışları, a) Referans, b) ÇKS, c) OKS2×4, d) OKS2×4, e) DOKS_Ø2, f) DOKS_Ø4 numuneler.	86
Şekil 5.20: Oluk içeren sandviç kompozit numunelere ait SEA sonuçları a) Hasar alan OKS numuneleri, b) Plastik şekil değiştirme değerleri, c) Maksimum kayma gerilmesi dağılımı, d) Maksimum kayma şekil değiştirmesi değerleri.	87
Şekil 5.21: Hasar alan OKS numunelerinin tam görüntüsü.	87
Şekil 5.22: Yük-şekil değiştirme grafikleri, a) DKS_Ø2,4K ve referans, b) DKS_Ø2,4X ve referans, c) DÇKS_Ø2,4 ve ÇKS, d) OKS2×2, OKS2×4 ve referans, e) OKS2×4, OKS4×4 ve referans, f) DOKS_Ø2,4 ve referans numuneler.	89
Şekil 5.23: Dört (4) eğilme yükleme şeması ve kompozit sandviç kirişinin kesit ölçüleri.	91
Şekil 5.24: Eğilme hasar yüklerinin analitik, deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması.	98

Şekil 5.25: Başlangıç eğilme rijitlik değerlerinin karşılaştırılması.....	98
Şekil 5.26: Efektif eğilme rijitlik değerlerinin karşılaştırılması.....	99
Şekil 5.27: Spesifik efektif eğilme rijitlik değerlerinin karşılaştırılması.....	99
Şekil A.1: ASTM D7078 Kayma Test Düzeneği.....	120
Şekil A.2: ASTM D6641 Basma Test Düzeneği	120
Şekil B.1: Lineer Besleme Yöntemi ile Referans Numune Üretimi	121
Şekil C.1: PVC köpük malzemenin basma test sonuçları.....	122

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1: Yüzey tabakaların istiflenme düzeni	56
Tablo 4.2: Yüzey tabakaların mekanik özellikleri.....	58
Tablo 4.3: AIREX® C70.75 köpük malzemenin mekanik özellikleri [184].....	58
Tablo 4.4: Sertleşmiş Polives™ 702 reçine için mekanik özellikleri [188].....	61
Tablo 4.5: [0/90] _{2s} E-cam/ vinil ester tabakanın efektif mekanik özellikleri	61
Tablo 4.6: Ağ boyutu inceltme ve yakınsama analizi sonuçları.....	66
Tablo 5.1: Üç (3) nokta eğilme test sonuçları	70
Tablo 5.2: Düzlem dışı basma test sonuçları	76
Tablo 5.3: Pim takviyeli sandviç kompozit numunelerin ağırlık artış değerleri	78
Tablo 5.4: Dört (4) nokta eğilme test sonuçları	88
Tablo 5.5: Sandviç kompozit numunelerin ağırlık karşılaştırması.....	90
Tablo 5.6: Eşdeğer eğilme ve kayma rijitlik değerlerin analitik denklemleri	92
Tablo 5.7: Analitik ve deneysel sehim değerlerinin karşılaştırılması	95
Tablo 5.8: Başlangıç rijitlik, efektif rijitlik, eşdeğer ve efektif rijitlik oranları, spesifik efektif rijitlik, maksimum basma ve çekme gerinim değerleri	97

SEMBOL LİSTESİ

A	: Kesit alanı (mm^2)
a	: Kiriş kesme açıklığı (mm)
b	: Kiriş genişliği (mm)
D	: Eğilme rijitliği ($\text{N}\cdot\text{mm}^2$)
d	: Yüzey tabakaların nötr eksenleri arası uzaklık (mm)
E	: Elastisite modülü (N/mm^2)
E_s	: Yüzey tabakanın elastisite modülü (N/mm^2)
E_c	: Çekirdek malzemenin elastisite modülü (N/mm^2)
G	: Kayma modülü (N/mm^2)
G_{reçine}	: Reçine malzemenin kayma modülü (N/mm^2)
G_{köpük}	: Köpük malzemenin kayma modülü (N/mm^2)
h	: Sandviç kompozit malzemenin toplam yüksekliği (mm)
I	: Alan atalet momenti (mm^4)
K_i	: Başlangıç eğilme rijitliği (N/mm)
kN	: Kilo newton (10^3 N)
L	: Kirişin destek arası mesafesi (mm)
M	: Eğilme momenti ($\text{N}\cdot\text{mm}$)
M_y	: y-ekseninde etki eden eğilme momenti ($\text{N}\cdot\text{mm}$)
P_s	: Sayısal hesaplanan (nümerik) hasar yükü (N)
P_d	: Deneysel hasar yükü (N)
P_a	: Analitik hesaplanan hasar yükü (N)
P_{ref}	: Referans numuneye ait deneysel hasar yükü (N)
P_{s,kr}	: Yüzey tabaka kritik hasar yükü (N)
P_{c,kr}	: Çekirdek malzeme kritik hasar yükü (N)
t_c	: Çekirdek malzemenin kalınlık değeri (mm)
t_s	: Yüzey tabakanın kalınlık değeri (mm)
t_k	: Çapraz kesik köpük malzemede ağ yapının kalınlık değeri (mm)
V	: Kesme kuvveti (N)
V_{ağ}	: Çapraz kesik köpük malzemede ağ yapının hacim oranı (%)
V_{pim}	: Pim boşluklarının hacim oranı (%)
V_{oluk}	: Oluk geometrisinin hacim oranı (%)
V_{köpük}	: Köpük malzemenin hacim oranı (%)
σ	: Normal gerilme (N/mm^2)
σ_s	: Yüzey tabakada oluşan normal gerilme (N/mm^2)
σ_c	: Çekirdek malzemede oluşan normal gerilme (N/mm^2)
σ_{sb}	: Yüzey tabakanın basma dayanımı (N/mm^2)
σ_{cb}	: Çekirdek malzemenin basma dayanımı (N/mm^2)
σ_{sc}	: Yüzey tabakanın çekme dayanımı (N/mm^2)
σ_{cc}	: Çekirdek malzemenin çekme dayanımı (N/mm^2)
τ	: Kayma gerilmesi (N/mm^2)
τ_s	: Yüzey tabakada oluşan kayma gerilmesi (N/mm^2)
τ_c	: Çekirdek malzemede oluşan kayma gerilmesi (N/mm^2)
τ_{ck}	: Çekirdek malzemenin kayma dayanımı (N/mm^2)
γ	: Kayma şekil değiştirme miktarı (mm/mm)
δ	: Deplasman, sehim (mm)
δ_e	: Eğilme yükünden kaynaklanan sehim (mm)
δ_k	: Kayma yükünden kaynaklanan sehim (mm)

KISALTMALAR LİSTESİ

AEM/S	: Gelişmiş kapalı radar direği
FTP	: Fiber takviyeli polimer/plastik/polyester
CNC	: Nümerik kontrollü takım tezgâhı
CTP	: Cam takviyeli polimer kompozit
ÇKS	: Çapraz kesik köpük içeren sandviç kompozit
DKS	: Delik açılmış köpük içeren sandviç kompozit
DÇKS	: Delik açılmış çapraz kesik köpük içeren sandviç kompozit
DOKS	: Delik ve oluk açılmış köpük içeren sandviç kompozit
EP	: Epoksi
KE	: Köpük malzeme ezilme hasarı
KK	: Köpük malzeme kayma hasarı
OXS	: Yüzeysel oluk açılmış köpük içeren sandviç kompozit
MEKP	: Metil etil keton peroksit
PA	: Poliamid
PE	: Polietilen
PEEK	: Polietereterketon
PEI	: Polieterimid
PET	: Polietilen tereftalat
PMI	: Polimetakrilimid
PP	: Polipropilen
PTS	: Pim takviyeli sandviç kompozit
PS	: Polistiren
PU/PUR	: Poliüretan
PVC	: Polivinil klorür
RFI	: Reçine film infüzyon
RFIM	: Reçine film infüzyon kalıplama
RIF	: Reçine film infüzyon
RIFT	: Esnek kalıp altında reçine infüzyon yöntemi
RTM	: Reçine transfer kalıplama
SCRIMP	: Seemann kompozit reçine infüzyon yöntemi
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
UFK	: Üst fiber kırılma hasarı
UHMWPE	: Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen
VAIM	: Vakum destekli infüzyon kalıplama
VARI	: Vakum destekli reçine infüzyon
VARIM	: Vakum destekli reçine infüzyon kalıplama
VARTM	: Vakum destekli reçine transfer kalıplama
VB	: Vakum torbalama
VIM	: Vakum infüzyon kalıplama
VIMP	: Vakum infüzyon kalıplama prosesi
VOC	: Organik uçucu bileşenler
YÇA	: Yüzey tabaka-çekirdek ayrılması hasarı
YB	: Yüzey burkulma hasarı
XPS	: Ekstrüzyonla üretilen polistiren

ÖNSÖZ

Her şeyden önce uzun yıllar süren bir emeğin sonucu olarak ortaya çıkarılan bu tezin tamamlanması sürecinde bana yol gösteren, zamanını ve bilgisini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Nurettin Arslan'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tezin her aşamasında değerli görüş ve önerilerinden faydalandığım, bilgi ve tecrübelerini bana aktaran değerli hocalarım Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU'ya, Dr. Öğr. Üyesi Akın ATAŞ'a ve Dr. Öğr. Üyesi Alaaddin TOKTAŞ'a en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Bunun dışında özellikle laboratuvarında uzun saatler süren deneysel çalışmalarda ve sonlu elemanlar analizlerinde yardımcı olan Arş. Gör. Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU'na desteğinden dolayı şükranlarımı sunarım. Ayrıca doktora sürecimde her zaman yanımda olan ve sabır gösteren sevgili dostum Doç. Dr. Umut OKKAN'a, teşekkürlerimi sunarım.

Akademik disiplin kazanmama ve doktora sürecine başlamama vesile olan İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne ve yüksek lisans tez danışmanım Prof. Dr. Sedat AKKURT'a minnettarlıklarımı sunarım.

Bütün hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen, her koşulda yanımda olan ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan canım annem ve babama en kalpten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak, sevgili eşim Arzu'ya tez yazım aşamasında gösterdiği anlayış ve destek için ayrıca teşekkür ederim.

Balıkesir, 2020

Fatih BALIKOĞLU

1. GİRİŞ

1932 yılında cam fiberin tesadüfen keşfedilmesi ve sonrasında ticari ürüne dönüşmesi (1935, Owen Corning Company) ve doymamış polyester (1936, C. Ellis) reçinenin buluşu gibi önemli gelişmelerin ardından ilk nesil kompozit malzemeler: cam elyaf takviyeli polimerler (CTP) üretilebilmiştir [1-3]. 1946 yılında Ray Green tarafından CTP kompozitler ilk defa tekne imalatında kullanılmıştır. II. Dünya savaşı yıllarında ise havacılık sanayinde hafif ve mukavemeti yüksek materyallere olan ihtiyacın artması ve metal malzemelerin temin edilmesinin giderek zorlaşması sebebiyle kompozit malzemelerin askeri amaçlı uygulamalarda kullanılması zorunlu hale gelmiştir [4]. 1960 yılların ortasında askeri uzay programlarındaki istekler doğrultusunda daha mukavim, yüksek rijitliğe sahip ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı ikinci nesil kompozitlerin: karbon (1968), boron (1970) ve aramid (1973) fiberlerin üretim teknikleri üzerine yoğunlaşan araştırma ve geliştirme faaliyetleri hız kazanmıştır [5]. Günümüzde, yüksek özgül dayanım (dayanım/yoğunluk) ve özgül rijitlik (young modülü/yoğunluk) özelliklerine sahip kompozit malzemelerin havacılık, uzay, savunma, deniz inşaat, otomotiv, enerji, biyomedikal, spor araç/ gereçleri ve yapı/inşaat gibi teknolojik gelişimin hızlı ve rekabetin mühim olduğu farklı sektörlerde konvansiyonel malzemelerin yerine geçtiği görülmektedir [6, 7].

1.1 Kompozit Malzeme Tanımı ve Sınıflandırılması

Kompozit malzeme; iki veya daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki bileşenin en iyi özelliklerini tek bir yapı altında toplamak için, makro seviyede ve birbiri içinde çözünmeden bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni tip yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır [8-10]. Kompozitler homojen değildir, heterojen yapılarından dolayı özellikleri malzemenin değişik noktalarında farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca genel olarak özellikleri yönlerden bağımsız değildir; anizotropik davranışa sahiptirler. Bileşenlerden biri takviye elemanı diğeri ise matris fazı olarak sınıflandırılmaktadır. Matris fazı (primer faz) sürekli ve esnektir, görevi ise takviye elemanlarını dış ve çevresel etkilere karşı korumak (aşınma, darbe, korozyon vb.), uygulanan yükü takviye elemanlarına iletmek ve tüm yapıyı bir arada tutmaktır. Takviye elemanı (dispers faz); matrise göre daha rijit ve dayanıklı olup kompozit yapı içerisinde yükün büyük kısmını taşıyan ve matris faz içerisinde rastgele veya sürekli düzenlemeye sahip olan malzemelerdir. Takviyenin yapı içerisindeki formu, hacimsel oranı (miktarı), geometrisi (fiber uzunluk ve çap) ve yönelimi

kompozit malzemenin özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması ise takviye geometrisi: fiber, parçacık, pul ve matris malzemesine: polimer, metal, seramik ve karbon göre yapılabilmektedir. Endüstride en geniş kullanım alanı olan kompozit malzeme sınıfı ise fiber takviyeli polimer matris kompozit (FTP) malzemelerdir [10-12]. Takviye ve matris fazlarının temas yüzeylerinde fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimlerin bulunduğu ara faz (ara yüz) bölgesi de bulunmaktadır. Ara fazın görevi matris ve fiber arasında yük transferini sağlamaktır. Yükün verimli şekilde iletilebilmesi için ara faz adezyonunun kuvvetli olması şarttır. Ara faz bölgesi yük altında matris kadar dayanım sağlayamaz ise fiber ve matris ara yüz ayrılması; delaminasyon hasarı oluşmakta ve kompozit yapı hasara uğramaktadır [13].

1.2 Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozit Malzemeler

Bu malzemelerde, takviye elemanı olarak genellikle cam, karbon ve aromatik poliamid ürünü kevlar fiberler kullanılmaktadır. Uygulama alanı sınırlı olan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), boron, alüminyum oksit ve silikon karbür fiberler de bulunmaktadır [7, 12]. Fiberler kısa (kesik fiber) veya uzun (sürekli) geometrilere sahip olabilirler. Anizotropik özellikleri sayesinde fiberler boylamasına doğrultuda yüksek mekanik performansa sahip iken, enlemesine yönde zayıftırlar [10]. Farklı yönlerde yük taşıma kabiliyetlerini artırmak için sürekli ve kesik fiberlerin kullanıldığı iki (2) boyutlu ve üç (3) boyutlu kumaşlar (preform) üretilmektedir. Kumaşlar tek yönlü, keçe (rastgele kesik kısa veya sürekli fiber takviyeli), dokuma, şeritli, örgü ve dikişli (atki ve çözgü) formlara sahip olabilirler [9]. Polimerler, kumaşlara kolaylıkla emdirilebildiği için FTP kompozitlerin üretiminde sıklıkla kullanılan matrislerdir. Matris fazı olarak en çok tercih edilen polimerler ise termosetler: epoksi (EP), doymamış polyester, vinil ester, poliüretan (PUR), fenolik ve amino (üre ve melamin-formaldehit) reçinelerdir. Termoplastik: poliamid (PA), polieterimid (PEI), polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen (PE), polietereterketon (PEEK) ve elastomer tip reçineler de matris fazı olarak kullanılmaktadır [14, 15]. FTP malzemelerde kullanılan çok sayıda matris ve fiber elemanlarının kendilerine has karakteristikleri bulunmaktadır; örnek olarak yoğunluk, viskozite, termal direnci ve genişmesi, mekanik özellikleri ve darbe dayanımı, korozyon direnci ve fiyat vs. gibi. Ancak bu malzemelerin performansı sadece matris ve fiberlerin özellikleri ile sınırlı kalmaz, üretim parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

En yaygın kullanılan FTP malzemeler ise dört ana grup altında toplanabilir: cam-fiber-takviyeli, karbon-fiber takviyeli, aramid (Kevlar)-fiber-takviyeli ve diğer fiber takviyeli polimer kompozitler. Bu malzemeler yapısal uygulamalar için laminat ve sandviç yapıya sahip çok tabakalı formlar şeklinde üretilmektedir [10, 11].

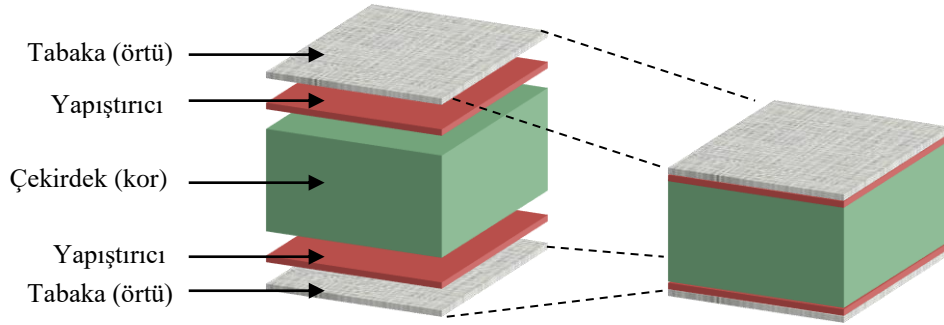
1.2.1 Laminat Kompozitler

Laminat kompozitler tasarım amaçlarına bağlı olarak fiber yönelimlerine sahip iki boyutlu tabakaların; fiber takviyeli laminelerin üst üste istiflenmesi ve yapıştırılması ile üretilen çok katmanlı yapılardır. Tabaka sayısı artışı ve tabakaların kuvvet-yönünde düzenlenmesi sağlanarak; x-y düzleminde (düzlem içi) etki eden kuvvetlere karşı daha mukavim laminat yapılar üretilebilmektedir [6, 11]. Laminat kompozit yapılarda düzleme (kesite) dik doğrultuda; z- yönünde kuvvet uygulanması durumunda ise fiberlerin yük taşıma kabiliyetleri düşmektedir. Aslında, düzlem dışı dayanım ve rijitlik değerleri matrisin mekanik özelliklerine bağlıdır. Başka bir deyişle, z-yönünde etki eden yüklere karşı kompozit yapının avantajı; matris ve fiberin görevdeşliği kaybolmaktadır. Bu problemin çözümü için ise sandviç kompozit yapılar geliştirilmiştir [12].

1.2.2 Sandviç Kompozitler

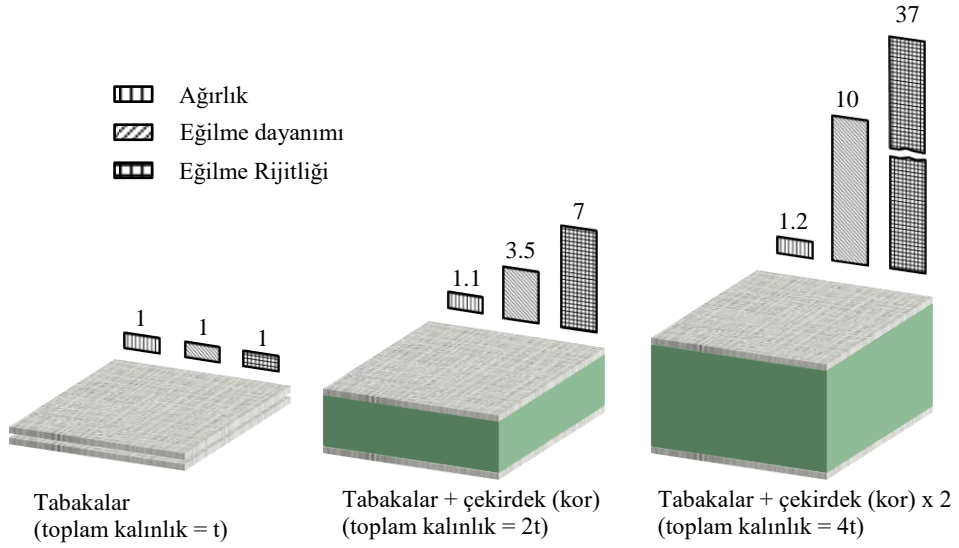
Sandviç kompozitler ise rijit ve ince iki tabaka arasına, nispeten daha kalın ve hafif çekirdek malzemelerin yerleştirildiği tabakalı kompozitlerin özel bir türüdür [16] (Şekil 1.1). Bu yapılarda rijit ve mukavemetli tabakalar düzlem içi gerilmelere maruz kalır, çekirdek yapı ise kayma yüklerini üzerine alarak tabakaların genel ve yerel burkulmalara karşı dengesine katkıda bulunur. Ayrıca, çekirdek düzlem dışı kuvvetlere; kesme ve basma yüklerine karşı rijit olmalı ve tabakalar arası sabit mesafeyi koruyabilmelidir. Aksi takdirde özellikle eğilme yükü altında alt ve üst tabakalar bağımsız hareket eder, sandviç etki azalır ve yapı hasara uğrayabilmektedir. Yüzey tabakalar ve çekirdek yapı arasındaki işbirliğinin devam etmesi için ara yüzeyin de yük transferini sağlaması gerekmektedir. Bu yüzden ara yüzeyin, çekirdek malzemesi ile aynı kesme kuvvetlerini taşıyabilmesi şarttır [17-19]. Tabakalar (örtü) için yaygın olarak kullanılan malzemeler metalik malzemeler (çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımları) veya metal olmayan malzemeler (ahşap kontrplak, fiber takviyeli plastikler) olarak sınıflandırılabilirken, yük taşıyan sandviç yapılarda kullanılan çekirdekler ise oluklu karton veya metal yapılar, bal peteği (alüminyum, polipropilen, Nomex, Kevlar), balsa ağacı ve polimer köpüklerdir. Tabakaları

ve çekirdek yapıyı bir arada tutan ve birlikte çalışmasını sağlayan yapıştırıcılar ise; epoksi, poliüretan, silikon, akrilik, fenolik yapıştırıcılar ve reçinelerdir [8, 20].

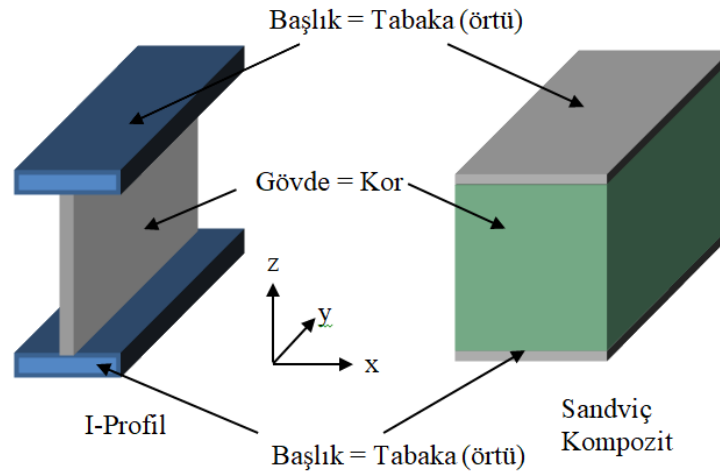


Şekil 1.1: Sandviç kompozit malzeme bileşenleri.

Laminat yapılarla kıyasla sandviç kompozitlerin en önemli avantajı ise ağırlıkta önemli bir artışa neden olmadan dayanım ve rijitlik artışı sağlanmasıdır. Tabaka kalınlıkları sabit kalmak şartıyla bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç panelin toplam kalınlığı iki (2) katına çıktığı takdirde eğilme rijitliği 7 kat, eğilme dayanımı ise 3.5 kat artar. Toplam kalınlığın dört (4) katına çıkması durumunda ise rijitlik 37 kat, dayanım değeri ise yaklaşık 10 kat artar (bkz. Şekil 1.2). Ağırlık artışının köpük ve balsa ağacı kullanılması durumunda ise daha fazla olması beklenir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir: sandviç yapıdaki elamanlar, ağırlık tasarrufu sağlamak için I-kirişinde olduğu gibi etkili şekilde düzenlenmiştir (Şekil 1.3). Bu malzemelerde rijit yüzey tabakaların (örtü) tarafsız eksenden uzağa yerleştirilmesiyle yüksek eğilme rijitliği elde edilmiştir. Fakat I-kiriş ve sandviç yapı arasında önemli bir fark bulunmaktadır; sandviç sistemde çekirdek malzeme yükün dağılmasını sağlayarak, kuvvetin tek noktadan etki etmesini engellemektedir. Bu yüzden, çekirdek yapının çelik kadar sağlam ve rijit yapıya sahip olmasına gerek bulunmamaktadır [12].



Şekil 1.2: Sandviç yapı etkisi.



Şekil 1.3: Sandviç yapı ve I profil yapı elamanlarının karşılaştırılması.

Sandviç kompozitlerin tasarımında yapısal ve çevresel faktörler önem taşımaktadır. Tasarımcı geometrik boyutlandırma ve malzeme seçimi aşamalarında; yükleme koşulları, ağırlık, üretim ve maliyet gibi yapısal etmenleri dikkate almaktadır [21]. Örnek olarak; sabit kalınlığa sahip sandviç yapıda; çekirdekte, kalınlık artışı ve laminat tabakalarda azalma yapının hafiflemesini ve üretim maliyetinin düşmesini sağlarken, düzlem içi

mukavemet ve rijitlik değerlerinin azalmasına sebep olur [12]. Çalışma koşullarında uzun süre işlevlerini sürdürebilmeleri için; nem, sıcaklık, yanıcılık ve yorulma gibi çevresel etmenler tasarım sürecinde dikkate alınmaktadır. Bu süreçte parametreler farklılık gösterebilir örnek olarak; askeri amaçlı gemi gövdelerinin su altı patlama ve çarpma yüklerine karşı dayanıklı tasarlanması aynı zamanda hafif ve mukavim olması istenebilir. Ayrıca, su altındaki tüm deniz yapıları için ortak endişe ise, nem emilimi ve mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisidir [21]. Son olarak, tüm bu değişkenler ayrıntılı bir mühendislik yaklaşımı ve araştırma yöntemiyle incelenmektedir. Optimum sandviç tasarımının elde edilmesi için tüm girdi ve çıktılar belirlenerek izlenecek işlemler arasında geri besleme yöntemi izlenir. Tasarım süreçlerinin tüm basamaklarında, sonlu elemanlar paket programları kullanılarak sandviç kompozitlerin yapısal analizleri yapılmalıdır [12].

1.3 Deniz Taşıtlarında Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerin Kullanımı

Deniz yapıları hizmet ömürleri boyunca nem, sıcaklık, farklı mekanik yüklerin birleşik etkilerini içeren zorlu çalışma şartlarına maruz kalırlar. Ahşap, elik ve alüminyum gibi geleneksel malzemeler, deniz taşıtlarında yapı malzemesi olarak uzun yıllardan beri kullanılmıştır. 1950 yıllarından itibaren istikrarlı şekilde fiber takviyeli polimerler deniz inşaat endüstrisinde konvansiyonel malzemelerin yerini almaya başlamıştır. FTP uygulamaları başlangıçta kurtarma filikaları, kanolar, cankurtaranlar ile sınırlı kalmasına rağmen, zaman içerisinde gemi gövdeleri ve st yapıları, denizaltılar ve açık deniz yapıları (genellikle elektrik, petrol, gaz ve diğer kaynakların üretimi ve iletimi sağlayan tesisler) gibi büyük ölçekli yapılarda uygulama alanı bulmuştur. Bu duruma yüksek performansa sahip reçine ve fiber malzemelerin geliştirilmesi, üretim yöntemlerinde ve tasarım aşamalarındaki ilerlemeler sebep olmuştur [21].

Fiber takviyeli polimerler, yüksek özgül dayanım ve rijitlik, darbe dayanımı, üretim esnekliği (kolay montaj edilme), bakım ve onarım kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı, deniz inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Ayrıca deniz suyu korozyonu, ultraviyole işık ve deniz organizmalarına karşı yaşlanma dirençlerinin yüksek olması, konvansiyonel malzemelere: elik, ahşap ve alüminyuma göre üstün oldukları diğer üstün özellikleridir [22, 23]. Bu nedenle elik ve alüminyum teknelerin hizmet süresi 15 yıl iken, kompozit teknelerin ömrü 20 yıla kadar devam etmektedir. elik ve alüminyum teknelerinin bakım masraflarının 15 yıl sonrası artış gösterdiği raporlanmıştır

[24]. Deniz taşıtlarında, geniş ve karmaşık geometriye sahip parçaların; karina (gövde), güverte, üst yapı gibi ana parçaların tek seferde üretiminin yanı sıra; salma, dümen, radar kuleleri, şaft, pervane, baca, güverte ara bölmeleri, kapı ve kapaklar, denizaltı kaplaması, radar ve gözlem kulesi gibi elemanların da imalatına olanak sağlamıştır [23]. Bu durum bağlantı eleman sayılarını azalmasını sağlayarak (perçin, cıvata, somun vs.) deniz taşıtlarının ağırlık merkezinin daha alt seviyeye inmesini ve deniz taşıt dengesinin iyileşmesine katkıda bulunmuştur. Yapıların hafiflemesi ile deniz taşıtlarının hızlanması ve yakıt tüketimlerinin ve emisyon değerlerinin düşmesi sağlanmıştır [22, 25]. FTP malzemeler rakipleri ile mukayese edildiğinde en önemli dezavantajları ise, heterojen yapılarından kaynaklanan geri kazanım süreçlerinin maliyetli ve karmaşık olması [26, 27] ve polimerlerin organik doğaları nedeniyle ise tutuşma ve alev yayılma gibi termal dirençlerinin düşük olmasıdır [28, 29]. Reçine sistemlerine ilave edilen dolgular sayesinde iyileşme sağlanmış olsa da alev yükü altında dayanım değerleri hızlı şekilde azalma göstermektedir [30, 31].

1.4 Kompozit Deniz Taşıtı Örnekleri ve Tarihsel Gelişimi

Fiber takviyeli polimer tekne yapımının başlaması II. Dünya Savaşı'ndan sonrasına denk gelmektedir. 1950'den önce kompozit teknelerin uzunluğu yaklaşık 15 metre, tonajları ise 20 ton ile sınırlı kalmıştır, ancak düşük maliyetli kompozitlerin gelişmiş tasarım, üretim ve mekanik performansları sayesinde tekne gövde ebatları artmış, günümüzde kompozit hafif savaş gemileri korvetlerin üretilmesi mümkün olmuştur. İlk öncü adımlar donanma gemilerinde uygulanmıştır. 2. Dünya Savaşı'ndan sonrası ABD Donanması kompozit personel bot üretimi için ilk adımı atmıştır. Vietnam savaşında üretilen yüzlerce personel, çıkarma, keşif ve devriye botları görev almıştır. Bu gelişme 40'lı ve 60'lı yıllarda kompozit tekne üretiminin hızlı bir şekilde genişlemesine neden olmuştur. İlk örnekler gezinti tekneleri, kanolar, sürat ve cankurtaran botları olmuştur. 60'lı yıllarda, CTP tekne yapımı çoğalmış ve tekne sahipliğinde hızlı bir artış olmuştur [23]. Neredeyse hiç bakım gerektirmeyen ve düşük maliyetli CTP teknelerin kitlesel çekiciliği, Amerika'da kayıkçı sınıfını başlatmıştır [32]. Kompozit malzemeler sadece sivil denizcilik için değil ülkelerin donanma kuvvetlerinde; devriye, mayın tarama/imha botları ve korvet sınıfı gemiler gibi orta büyüklükte savaş gemilerinin inşaatında hızla kullanılmaya başlamıştır. 1960 ve 1970 yıllarında üretilen CTP devriye botları sahil hatlarında ve iç suyollarında çalışıyor, en fazla 10 metre uzunluğa ve 10 ton deplasman tonaja sahipti, nadiren 20 metre uzunluğa ulaşabiliyorlardı. 25 metre uzunluğa sahip devriye botların imalatında alüminyum veya

çelik tercih ediliyordu. Kısıtlayıcı faktör ise kompozit gövde kirişinin düşük rijitlik değerine sahip olmasıydı. Günümüzde ise birçok ülke tarafından 55 metre uzunluğa ve 300 ton deplasman tonaja ulaşan açık deniz devriye botları kullanılmaktadır. Devriye botlarına ait fizibilite çalışmaları sandviç kompozit kullanımının, alüminyum ve çelik yapıları benzerlerine kıyasla sırası ile %10 ve %36 oranında hafiflik sağladığını göstermiştir [24, 33, 34]. Reçine enjeksiyon üretim yöntemlerinin gelişimi ve karbon fiber takviyelerinin kullanımı ile tekne gövdelerinin daha hafiflemesi sağlanmıştır. Fakat kompozit gövde kirişinin (50 metre tam boya sahip sandviç yapıları teknelerde), çelik yapıları rakiplerine göre yaklaşık %300 oranında daha fazla sehim yapabileceği çalışmalarda raporlanmıştır [34]. Tekne gövdesindeki aşırı şekil değiştirmenin ise, pervane şaftı hattındaki hizalamayı etkileyebileceği ve aynı zamanda birleşme ve bağlantılar etrafında yorulma çatlamlarına yol açabileceği vurgulanmıştır. Yapısal problemler ülkelerin donanma kuvvetlerine ait orta büyüklükte savaş gemilerinin tasarım ve üretim süreçlerinde çözülmüştür. 1999 yılında görevlendirilen Kraliyet Norveç Donanması'na ait 46.8 metre uzunluğa, 13.5 metre genişliğe ve 270 ton deplasman tonaja sahip sınıfının en büyüğü Skjold devriye botu suya indirilmiştir. Bu devriye botu tamamen; gövde ve üst yapı karbon ve cam fiber laminat tabakalı ve polivinil klorür (PVC) köpük içeren sandviç kompozit malzemedir üretilmiştir [35, 36]. Bir başka örnek ise İsveç Kraliyet Donanması tarafından imal edilen Smyge MPC2000'dir. Bu devriye gemisi 30 m uzunluğundadır ve 1980'lerin sonunda inşa edilmiştir. Üretiminde karbon, cam ve kevlar/vinil ester laminat tabaka ve PVC köpük içeren sandviç kompozit malzeme kullanılmıştır. Üretilen en uzun donanma gemisi ise, 2000 yılı haziran ayında denize indirilen 72 metre uzunluğunda, 10.4 metre genişliğinde ve 620 ton deplasman tonaja sahip İsveç Visby (YS-2000) tipi korvettir (bkz. Şekil 1.4(a)). Sandviç konstrüksiyona sahip korvetin üretiminde PVC köpük çekirdek ile hibrit karbon ve cam fiber takviyeli elyaflar kullanılmıştır. İlk defa bu geminin gövdesinde karbon fiber takviyeli polimer kompozitler önemli miktarda uygulanmış ve böylece gemi gövdesinde %30 oranında hafiflik sağlanmıştır [37, 38]. Devriye ve korvet sınıflarında sandviç kompozit malzeme kullanımı gemi tasarımını basitleştirmiş ve askeri gemiler için kritik önemi olan manevra kabiliyetini ve sualtı şok yüklerine karşı darbe hasar direncini artırmış ayrıca bir dizi gizlilik özelliğine; düşük kızılötesi, manyetik, akustik ve radar imzalarına sahip olmalarını sağlamıştır [34]. Skjold ve Smyge MPC2000'in üstün özelliklerine rağmen, büyük devriye botlarında, kompozit malzemelerin yüksek maliyetleri nedeniyle genellikle çelik ve alüminyum alaşımlar kullanılmaya devam etmektedir. Devriye botları ve korvet sınıfı gemilere ek olarak, FTP malzemeler mayın önleme gemilerinde yaygın

olarak kullanılmıştır [23]. Geleneksel mayın tarama gemileri 60'lı yıllardan önce manyetik özellikleri bulunmayan ahşap gövdeye sahipti. Birleşik Krallık donanması 1973 yılında 46.6 metre uzunluğa ve 450 ton deplasman tonaja sahip ilk kompozit mayın tarama/imha gemisi HMS Wilton'u denize indirmiştir (Şekil 1.4(b)) [39]. Bu malzemelerin mayın tarama/imha gemilerinde kullanılması, yerel burkulma yüklerine karşı direnç gösterebilen, daha yüksek gövde kiriş rijitliği sağlayan ve su altı şoklarına karşı üstün direnç gösteren yenilikçi gemi gövde tasarımlarına yol açmıştır [40, 41]. 1980 yıllarda ise birçok ülkede 200 adet üzeri farklı tip yapıya sahip; monokok laminat, takviyeli laminat (gövde içerisinde enine; stiffner ve boylamasına; stringer destekli) ve sandviç yapıları mayın tarama/imha gemileri üretilmiştir. Bunlar arasında en çok üretilen ise takviyeli laminat gövdeli mayın gemileri olmuştur. Örnek olarak mayın tarama sınıfının en büyükleri olan İngiltere Kraliyet donanmasına ait Hunt (60 metre) ve Sandown (52.5 metre) sınıfı gemiler takviyeli laminat gövdeye sahipti (Şekil 1.4 (c)). Tek parça (monokok) tasarımda ise gerekli gövde kiriş rijitliği ve sualtı patlama direncini sağlamak amacıyla 15 ve 20 cm arasında et kalınlığına sahip laminat gövdeler üretilmiştir [23]. Cam elyaf takviyeli polimer ve PVC köpük malzemeler kullanılarak üretilen İsveç Landsort (Şekil 1.4d) ve Danimarka Standard Flex300 (Şekil 1.4(e)) mayın tarama/imha gemileri ise sandviç yapıları örnek verilebilir [42].

Sivil ve askeri denizcilik alanındaki önemli gelişmeler sayesinde kompozit gemi inşaat sektöründe hızlı büyüme sağlanmıştır. Orta büyüklükte; 80 ile 90 metre arasında tam boya sahip korvet sınıfı savaş gemilerin üretimi mümkün olmuştur. Günümüzde kompozit malzeme kullanımının toplam gemi inşaat sektöründeki payı %6'ya ulaşmıştır. Gezinti amaçlı tekne (maksimum 50 metre tam boya sahip gezinti tekneleri) imalat endüstrisinde, kompozitler %83'lük bir paya sahip olmuştur. Küresel denizel kompozit malzeme pazarı 2011'de 13500 ton kütleyle ulaşmış ve 2018'de %5.6 yıllık bileşik büyüme oranı ile 200.000 tona ulaşması sağlanmıştır [22, 43]. Firmaların gelecek perspektiflerinde ise çalışma koşullarının iyileştirilmesi, ömrü biten teknelerin geri dönüşümü ve kazanımı, yangın güvenliği ve çevre dostu malzemelerin adaptasyonu gibi önemli başlıklar yer almaktadır. Askeri alanda ise farklı stratejiler geliştirilmektedir; örneğin ebatları 10-20 metre arası değişen otonom kompozit mayın tarama/imha sistemlerinin hayata geçirilmesi öngörülmektedir [44].



a.



b.



c.



d.



e.

Şekil 1.4: Denizel kompozit malzemelerin askeri alanda gelişimi, a) Visby Sınıfı Korvet, b) HMS Wilton MCMV, c) Hunt Sınıfı MCMV, d) Landsort Sınıfı MCMV, e) Standard Flex 300 [45].

1.5 Denizel Sandviç Kompozit Malzemeler

Günümüzde, sandviç kompozitlerin üretimi için çok sayıda malzeme bulunmaktadır. Özellikle son yıllarda fiber takviyeli polimerlerin ve hücresel köpüklerin kullanılmasından bu yana malzeme listesi belirgin şekilde genişlemiştir. Bu yüzden, sandviç yapıların tasarımında, geometrik boyutlandırma süreci kadar malzeme seçimi de önemli bir aşamadır. Mevcut malzemelerin çok sayıda olması karmaşık görünmektedir, ancak sandviç kompozit malzemenin deniz ortamında kullanılmasını sağlayan özellikler ön planda tutulmalıdır. Belirli uygulamalarda zayıf malzeme özellikleri geometrik boyutlandırmada yapılacak rötuşlar ile iyileştirilmektedir: örnek olarak, sandviç yapılar metallere göre daha az rijitlik gösterir, ancak çekirdek kalınlığının artırılmasıyla uygulanabilir bir rijitlik değeri elde edilebilmektedir. Malzeme seçiminde sadece mekanik performans değil, aynı zamanda çevresel direnç (UV, nem, sıcaklık vb.), yüzey kalitesi, üretim yöntemi, maliyet, aşınma direnci vb. parametreler de düşünülmelidir. Tabakalar için ihtiyaç duyulan temel özellikler, yüksek eğilme rijitliği, yüksek çekme ve basma dayanımı, yüzey kalitesi, darbe dayanımı, çevresel direnç ve aşınma direncidir. Öte yandan, çekirdek malzemeden ise düşük yoğunluk, yüksek kayma dayanımı ve rijitliği, yüksek basma rijitliği, ses ve ısı yalıtımı gibi özellikler istenmektedir [46].

Sandviç kompozitlerin deniz inşaat sektörü uygulamalarında tercih edilme nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz;

- Yüksek eğilme mukavemeti ve rijitliği sayesinde; sarkma ve çökme durumlarında tekne gövde kirisinin maruz kaldığı eğilme yüklerine karşı dayanım sağlar [19];
- Darbe direnci yüksektir ve su altı şok yüklerine karşı mukavimdir [47-49];
- Ağırlıkta tasarruf sağlar; kargo kapasitelerinin artışına, yakıt tasarrufuna, daha yüksek hızlanmaya ve geminin dengede (stabilite) olmasına katkı sağlar [50];
- Korozyona karşı dayanıklıdır [51, 52];
- Tasarım ve üretim esnekliği sağlar [20];
- Bakım masrafları düşüktür [24];
- Karmaşık ve pürüzsüz hidrodinamik yüzeylerin üretilmesine imkân sağlar [10];
- Askeri uygulamalar için kritik özelliklere: düşük termal, akustik, manyetik ve elektromanyetik izlere sahiptir [23].

Sandviç kompozitlerin en büyük bir dezavantajı, geleneksel malzemelere (çelik, alüminyum ve ahşap) ile karşılaştırıldığında daha yüksek üretim maliyetlerine sahip olmalarıdır; çünkü bu malzemelerin üretimi yoğun emek istemektedir. Denizel sandviç kompozit yapılarda, cam, karbon, kevlar fiber takviyeli polimer matris tabakalar ile birlikte polimer köpükler (yani özellikle polistiren veya PVC köpük), balsa ağacı ve bal peteği çekirdek malzemeler kullanılmaktadır. Epoksi, vinil ester ve polyester reçineleri ise, kompozit deniz yapıları için en yaygın üç matris malzemesidir [23, 46, 53-55].

1.5.1 Takviye Elemanları

Karbon ve cam, denizcilik uygulamaları için en yaygın kullanılan iki fiber türüdür (bkz. Şekil 1.5). Cam fiberler genellikle düşük maliyetleri ve iyi kimyasal dirençlerinden dolayı gezinti amaçlı teknelerde, karbon elyaflar ise yüksek dayanım ve rijitlik özelliklerinin istendiği yüksek performanslı deniz taşıtlarında (askeri amaçlı korvet, hücum botları ve yarış yatları) tercih edilmektedirler. En yaygın aramid lifi ise DuPont tarafından geliştirilen Kevlar® malzemedir. Takviye malzemesi, laminat kompozitlerin mekanik özelliklerini belirleyen en etkili elemandır. Bu nedenle deniz uygulamaları için uygun fiber malzemesini seçerken çevresel bozulma direnci göz önünde bulundurulmalıdır. Neme bağlı bozulma, mevcut fiberler arasında değişmektedir. Karbon lifleri kimyasal saldırılara karşı duyarlı olsalar da, deniz suyuna dayanıklıdır. Cam elyafı ise deniz suyuna maruz kaldığında mukavemet değerlerinde azalma gözükmektedir [51]. Kevlar® 49'un nem emilimi diğer takviyelerden daha yüksektir, buna rağmen Kevlar® 149, Kevlar® 49'un üçte ikisi kadar daha az nem emme özelliğine sahiptir. Uygulamada ise fiberlerin nem emilimi reçine matris emdirilmesi ve dış kaplama uygulamaları (jelkot) ile azalmaktadır. Fiberler üretim yöntemlerine uygulanabilmeleri için, farklı formlarda tekstil ürünleri olarak üretilmiştir. Tekne endüstrisi, tek yönlü ve dokuma kumaş takviyeleri piyasaya sürülene kadar cam elyafın yöne bağlı anizotropik özelliklerinden tam olarak yararlanamamıştır. İlk yıllarda izotropik özelliklere sahip keçe ve kırılmış cam elyaf takviyeler tekne imalatında kullanılmıştır. Tek yönlü elyaf kullanımı ile gövde kirişi gibi uzunlamasına mukavemet elemanlarında veya gövde merkez çizgileri boyunca gerekli rijitlik değerleri sağlanmıştır. ± 45 yönlenmeye sahip dikişli çift yönlü elyaflar ile tekne gövdelerinin kayma dayanımı artırılmış ve burulma yüklerine karşı dirençleri iyileşmiştir. Günümüzde ise çeşitli tekstil mimarisine sahip fiberler; dokuma, dikişli, tek yönlü, keçe ve dolgu (dokuma olmayan) gibi vs. takviye elemanları deniz inşaat sektöründe kullanılmaktadır [21, 32].

1.5.2 Reçineler

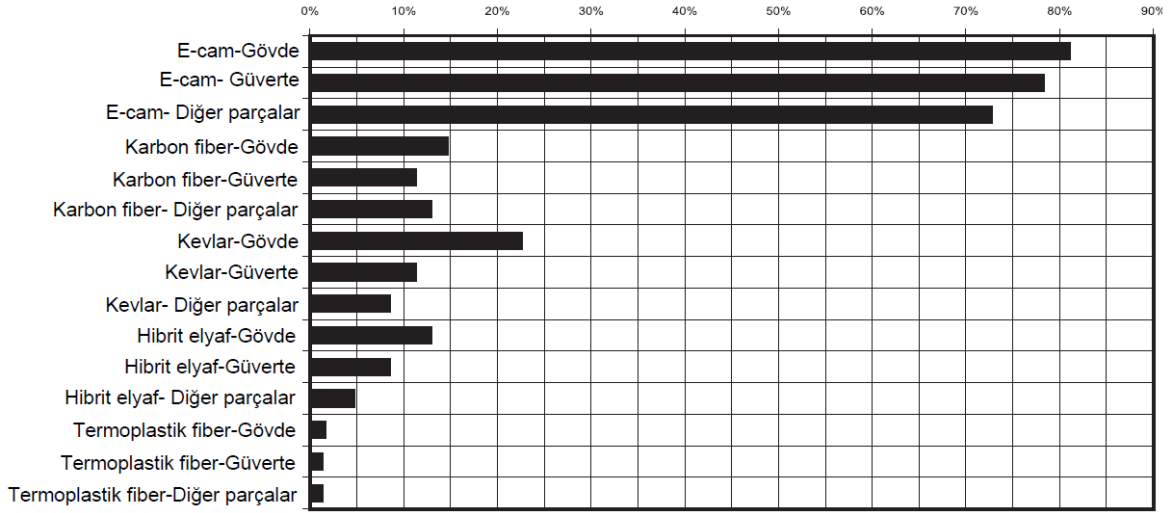
Polyester reçineler, vinil ester ve epoksi rakipleri ile karşılaştırıldığında düşük mekanik özelliklere ve daha yüksek seviyede nem emilim riskine sahiptir. Ortoftalik ve izoftalik olmak üzere iki tip polyestere reçine bulunmaktadır. Polyester reçineler düşük maliyetleri nedeniyle küçük gezinti teknelerinin üretimi gibi daha az kritik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (bkz. Şekil 1.6). Bu tür teknelerde, nem emilimine karşı kompozit yapı ile deniz suyu arasında koruyucu bariyer görevi üstlenen jelkot veya bariyer uygulamalarına güvenilmektedir. Bu dış kaplamalarda su emilimine karşı daha fazla direnç gösteren izoftalik polyester reçineler kullanılmaktadır. Vinil esterler tipik olarak mekanik performans ve maliyet açısından epoksi ve polyester reçineler arasında bulunur. Vinil esterler düşük nem emme değerlerine sahip olmalarından dolayı tekne yapımında ve diğer deniz yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu reçinelerde katalizör ve reçine karışım oranları çevresel koşullara bağlı olarak; ısı, nem vb. değişebilmektedir. Ayrıca, polyesterlere kıyasla kimyasallara ve çevresel bozulmalara karşı dirençlerinin yüksek olması bu reçineleri denizcilik uygulamaları için uygun kılmaktadır. Hem polyester hem de vinil ester reçineler stiren içerir, bu da kürleşmeleri sırasında zararlı uçucu organik gazların (VOC) dağılmasına neden olur. Çalışanları potansiyel sağlık riski taşıyan stiren, solvent ve katalizör buharından korumak için fabrikalarda havalandırma sistemlerinin olması şarttır. Bu önlemler bile, stiren buharının fabrika sahasında teneffüs edilmesini engelleyemeyebilir. Bu yüzden düşük stiren içerikli reçineler tercih edilmektedir. Epoksi reçineler ise, vinil ester veya polyester reçinelerden daha yüksek mekanik özelliklere ve daha iyi çevresel bozulma direncine sahiptirler. Epoksi uygulamalarında sertleştirici ve reçine karışım oranları sabittir. Kürleşme neticesinde polyester ve vinil ester reçineler %7 ile %10 arasında çekme gösterirken, epoksi reçineler % 2' den daha düşük çekme payı değerlerine sahiptir. Bu durum ise kalıptan çıkan ürünlerin pürüzsüz yüzeylere sahip olmasını sağlamaktadır [21, 32, 56-58].

1.5.3 Çekirdek Malzemeler

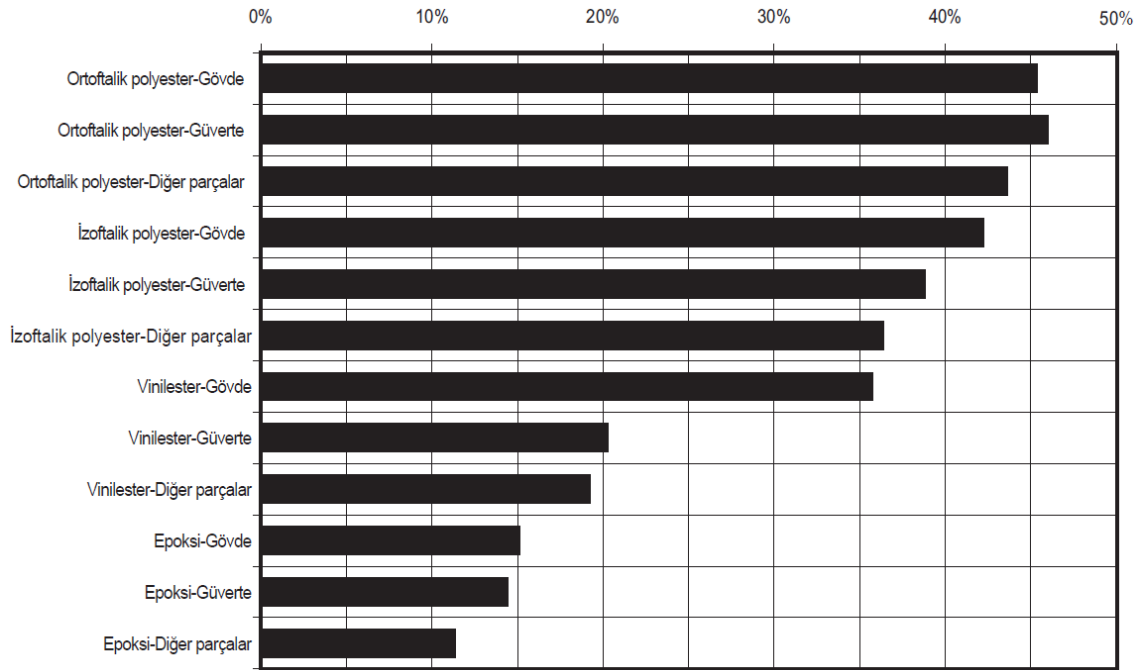
Balsa ahşabı ve mantar gibi doğal malzemeler, hafiflik ve sürdürülebilirlik sağladıkları için sandviç yapılarda uzun süre tercih edilmiştir (bkz. Şekil 1.7) [59-61]. Bal peteğine benzer hücre yapısına sahip balsa ahşabı, PVC köpük ve diğer çekirdek malzemelerine kıyasla daha yüksek kayma özelliklerine sahiptir [62]. Balsa çekirdeğe sahip sandviç kompozitler örneğin; ABD Deniz Kuvvetlerine bağlı Arthur W. Radford destroyerinde gelişmiş kapalı

radar direği (AEM/S) dış kaplamasında ve diğer birçok denizcilik uygulamasında kullanılmıştır [55, 63].

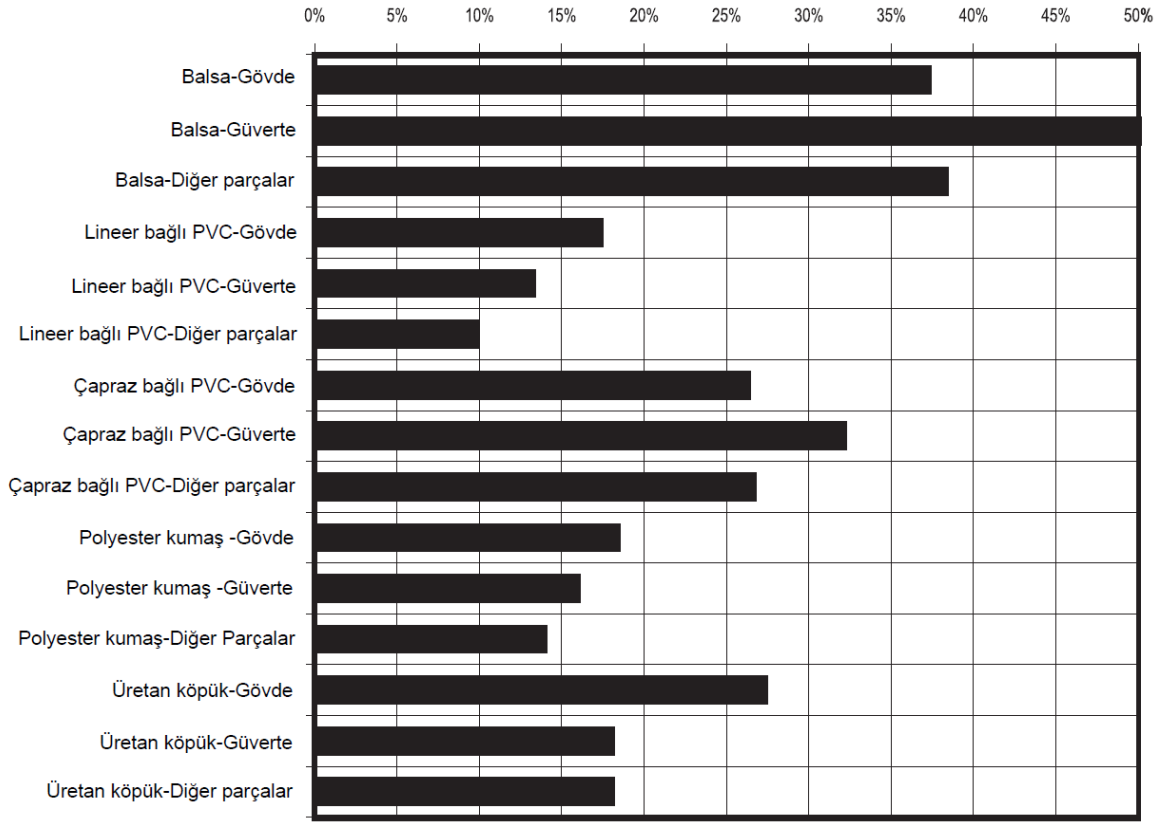
Balsa ahşabı mükemmel mekanik özelliklere sahip olsa da, günümüzde polimer köpükler geliştirilmiş ve sandviç yapıların tasarımında tamamlayıcı seçenekler olarak pazara sunulmuştur. PVC köpükler küçük ve orta büyüklükteki tekne ve yat imalat sektöründe en çok tercih edilen çekirdek malzemesidir. Balsa ahşabına göre, bu malzemeler düşük yoğunluk, düşük nem emme kapasitesi ve darbe hasar toleransı gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu polimerler, açık ve kapalı hücreli köpük kategorisinde sınıflandırılan hücresel malzemelerdir. Açık hücreli köpüklerde, hücreler birbirine bağlanır ve deniz suyu köpüğün kalınlığı boyunca nüfuz edebilir. Bu nedenlerden dolayı, denizel sandviç yapılarda çekirdek malzemesi olarak kapalı hücreli köpükler tercih edilir. Kapalı hücre yapısı, açık hücreli köpüklere kıyasla yüksek basma mukavemeti ve rijitlik elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Köpük hücrelerine sıkışan gaz, bu malzemelerin basma ve darbe özelliklerinin geliştirilmesine yardımcı olan geri basınç uygulanmasını sağlamaktadır. PVC köpükler kimyasal olarak ise lineer ve çapraz bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Lineer olan köpüklerin, çapraz bağlı olanlara göre statik dayanım değerleri düşük, darbe yükü altındaki performansları ise daha yüksektir. Çapraz bağlı olanlar PVC köpükler ise daha sık kullanılmaktadır. Verilen rnekler dışında, polistiren köpük, polyester dokumasız dolgu, ahşap kontrplak, fenolik ve polipropilen bal peteği gibi çekirdek yapılar da bulunmaktadır. Çekirdek materyalin neme karşı duyarlı olması deniz suyuna maruz kalacak yapısal uygulamalar için önemli bir husustur. Nemin emilimi ile sandviç yapının mekanik, elektriksel ve ısıl yalıtım özellikleri etkilenir. Nem alımına bağlı büyük boyutsal değişiklikler hatta şişme, kabarma ve delaminasyon ile sonuçlanan hasarlar oluşabilmektedir. Bu yüzden, ahşap kontrplak ve bal peteği yapılar yüksek nem emme kapasiteleri yüzünden geniş uygulama alanı bulamamıştır. Polistiren köpüğün ise düşük mekanik özelliklere sahip olması ve polyester reçine ile tepkimeye girmesi kullanımını kısıtlamıştır. Polyester dokumasız dolgulara ise laminat tekne güvertelerinde kalınlık artışı sağlamak amacıyla başvurulmaktadır [21, 32].



Şekil 1.5: Denizel kompozit malzemelerde takviye eleman kullanımı (%) [32].



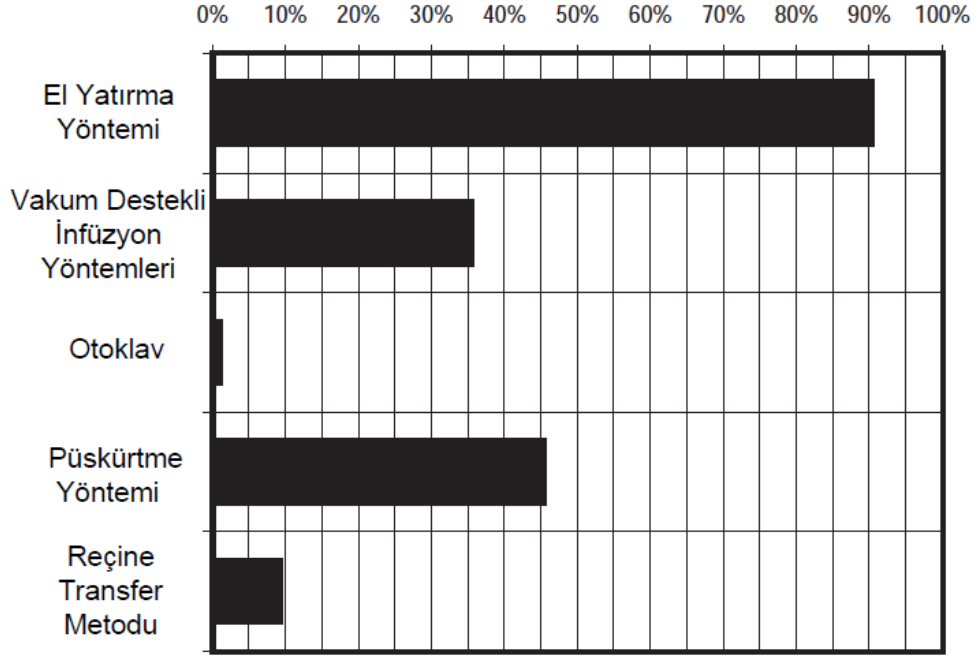
Şekil 1.6: Denizel kompozit malzemelerde reçine kullanımı (%) [32].



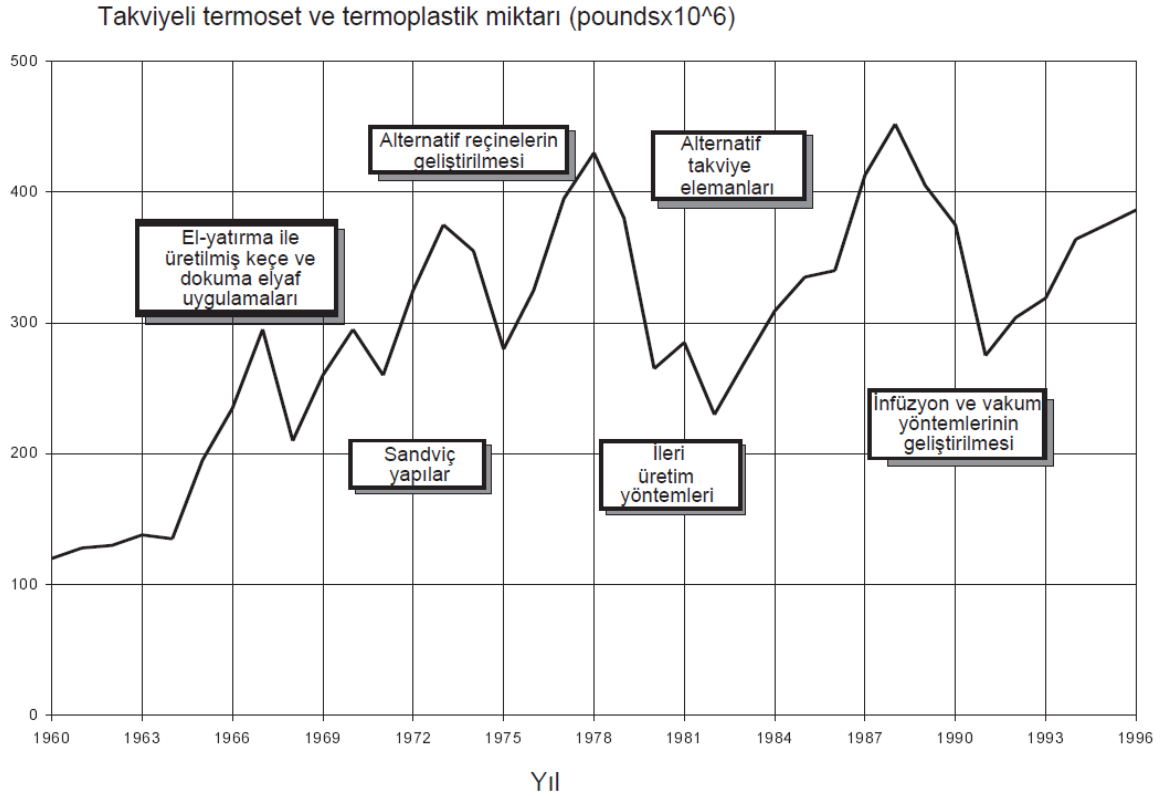
Şekil 1.7: Denizel kompozit malzemelerde çekirdek malzeme kullanımı (%) [32].

1.5.4 Denizel Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Tekne imalatında uygun yöntemi seçmek için şu parametreler: üretim hızı, maliyet, dayanım, yapının büyüklük ve şekli önem taşımaktadır. Tekne gövdesi gibi geniş yapılar için en çok kullanılan teknik açık kalıplama yöntemleri olmuştur. İlk CTP tekne örnekleri, makul panel boyutlarını korumak için güçlendirilmiş monokok tasarıma sahipti. Bu yapılar izotropik özellik gösteren cam fiber keçe malzemesi ve ortoftalik polyester reçine kullanılarak, elle yatırma ya da püskürtme yöntemleriyle üretilmiştir (Şekil 1.8). El yatırma uygulaması, 1960'lı yıllardan günümüze kadar küçük ve orta büyüklükteki tekne ve yat üretiminde baskın imalat yöntemi olmuştur. 1970'li yıllarda sandviç yapı uygulamalarına geçilmiştir. 1990'lı yıllarda ise denizcilik sektörü vakum torbalama ve reçine infüzyon yöntemleri ile tanışmıştır (bkz. Şekil 1.9) [22, 32].



Şekil 1.8: Deniz taşıt üretiminde tercih edilen üretim yöntemleri [32].



Şekil 1.9: Sandviç kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi [32].

Çalışma kapsamında tekne ve yat imalatında uygulanan üretim yöntemlerini ve malzemeleri bizzat görmek amacıyla İzmir çevresindeki firmalar gezilmiştir. Aşağıda ziyaret edilen firmalar ve ürettiği tekneler ile kısa bilgiler verilmiştir. Toplam boyu 10 metre ve daha kısa olan motor, balıkçı ve spor teknelerinde monokok yapı ve el yatırma yöntemi baskın olarak karşımıza çıkarken, 12 ile 20 metre arası boya sahip teknelerde ise sandviç kompozit malzemelerin ve reçine infüzyon üretim tekniğinin kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Tek parça (Monokok laminat, takviyeli laminat) CTP tekne üreticileri

- Mercan Tekne Ltd. Şti. (El-Yatırma-Polyester-5.5-6.5-10-11 m tekneler)
- Tacarlar Tekne A.Ş (El Yatırma-Polyester)
- Güven Yat Ltd. Şti. (El Yatırma-Polyester-4-4.9-5.8 m tekneler)
- İzmir Marine Ltd. Şti. (El Yatırma-Polyester-4.1-4.4-4.9-6-6.2 m tekneler)

Sandviç kompozit yapıli tekne üreticisi

- GCG Yat İmalat A.Ş (VARIM- Vinilester-12.8-16.9-17.12 m tekneler)

Tekne gövdesi, güvertesi ve üstyapı kısımları bir kalıp içinde imal edilmektedirler. Tekne imalatı dişi veya erkek kalıplarla yapılmaktadır. Genellikle dış cephede yüzey kalitesi elde etmek için monokok gövdelerde dişi kalıplar; kalıp içerisinde üretim tercih edilir. Böylece teknenin dış yüzeyinin hiçbir ek işleme; zımparalama, macunlama ve boyama gerektirmeyecek şekilde eksiksiz biçimde şekillenmesi sağlanır. Sandviç gövdelerde ise içbükey ve dışbükey yüzeye sahip dişi ve erkek kalıplar kullanılmaktadır. Kalıplar çok parlak bir yüzeye sahip olmalı ve sert olmalıdır. Hafif, ucuz ve korozyona dayanıklı oldukları için polyeşter kalıplar kullanılmaktadır (Şekil 1.10). Torbalı (vakum torbalama ve infüzyon) teknikler için, sızdırmazlık bandının yerleştirelmesi için bu kalıplara flanş dâhil edilmektedir.



Şekil 1.10: Polyester tekne gövde ve güverte kalıpları (Mercan Yat Ltd. Şti, Çiğli, İzmir).

1.5.4.1 El Yatırma ve Püskürtme Yöntemleri

Daha önce belirtildiği gibi, kompozit teknelerin üretimi için en yaygın kullanılan imalat tekniği el yatırma yöntemi olmuştur. Bu teknik ile monolitik laminat ve sandviç kompozitler üretilebilmektedir. Monokok laminat tekne güverte üretimine ait örnek Şekil 1.11’ de verilmiştir. Bu yöntemde boşluk içeriği, sandviç yapının yapısal davranışını etkileyen ana zararlı etmenlerden biridir. Boşluklar üretim kaynaklı kusurlardır. Reçinenin karıştırılması sırasında oluşabilirler. Depolama sırasında veya üretim sırasında reçine tarafından emilen nem içeriği de boşluk oluşumuna yol açabilir. Boşluk içeriği yapının düşük yorulma direncine ve su emilimine karşı daha fazla duyarlı olmasına neden olmaktadır. Asgari boşluk içeriği, kompozit yapının kalitesi için kritiktir: yani, kaliteli bir kompozit yapının, %1'den daha az boşluğa sahip olması gerekir, oysa zayıf bir kompozit ise, %5'e kadar boşluğa sahip olabilir. Boşluk ve yabancı katkılar tabaka ile çekirdek arasındaki ara yüzeyde de ortaya çıkabilir. Bu gibi üretim kusurları, tekne gövdelerine etki eden kayma gerilmeleri etkisiyle kolayca delaminasyon hasarına dönüşebilir. Bu yüzden el yatırma yöntemi mümkünse yeterli sayıda çalışan ve donanım ile hızlı bir biçimde, ancak tüm aşamaları önceden iyice planlanmış şekilde yürütülmelidir [46].

El yatırma yöntemi ile sandviç kompozit üretimi şu aşamalardan oluşmaktadır [10, 46]:

- Kalıp ölçüsü alınarak elyaf katları önceden bir tezgâh üzerinde kesilmesi ve numaralandırma yapılması;
- Kalıbın temizlenmesi ve kalıp ayırıcı uygulaması;
- Kalıba jelkot uygulaması (teknenin renkli ve parlak dış kısmını oluşturacak yüzey);

- Keçe ve dokuma elyaf katları laminasyon planına göre yerleştirilir ve reçine emdirilir (fırça, ıslatma ve yatırma ruloları kullanılır), bu aşamada katların kuruması beklenmeden, bir önceki ıslak katın üzerine diğer elyaf uygulanır;
- Çekirdek malzeme yerleştirilir ve üzerine reçine uygulanır;
- Diğer tabaka için elyaf katları çekirdek malzeme üzerine uygulanır ve reçine emdirilir;
- 24-48 saat arasında reçineye bağlı olarak parça kürleşmesi sağlanmaktadır.

Bu yöntem çeşitli avantajlar sunmaktadır [10, 46]:

- Düşük yatırım maliyeti gerektirdiğinden çok ekonomiktir;
- Kalıplar basittir ve üretimde sadece temel el aletleri gereklidir;
- Teorik olarak, üretilebilecek parçanın boyutuyla ilgili herhangi bir kısıtlama yoktur;
- Maksimum tasarım esnekliği sağlar;
- Laminat ve sandviç kompozit malzeme üretimine uygundur;
- Prototip yapımı ve ölçek büyütme için uygun bir sürece sahiptir;
- 24 metreden küçük tekne imalatı için düşük maliyetli işlemdir;
- Düşük hacimli üretim için idealdir (ayda 50 ile 100 arası parça).

Bu yöntemin dezavantajlarını ise şu şekilde sıralayabiliriz [10, 46]:

- Sadece tek tarafta yüzey kalitesi sağlar (açık kalıplama);
- Usta/çalışan becerisine oldukça bağlıdır;
- Homojen olmayan reçine dağılımına neden olur; kuru ve reçinece zengin bölgeler oluşabilir;
- Parça kalınlığı, fiber, reçine ve boşluk içeriğini kontrol etmek kolay değildir;
- Reçinenin kürleşme döngüsü sırasında stiren içerikli yüksek buhar/ duman yayma oluşturur;
- Tersane sahasında kişisel koruyucu ekipmanlar ve havalandırma sistemi (stiren, solvent ve katalizör buharları, cam fiber tozu ve ısı tahliyesi için) kullanımı şarttır.



a.



b.



c.



d.

Şekil 1.11: El yatırma yöntemi ile tekne imalatı (Güven Tekne Ltd. Şti, Çiğli, İzmir),
a) Dişi polyester gövde kalıp, b, c) Cam elyaf yatırma, d) Reçine emdirme.

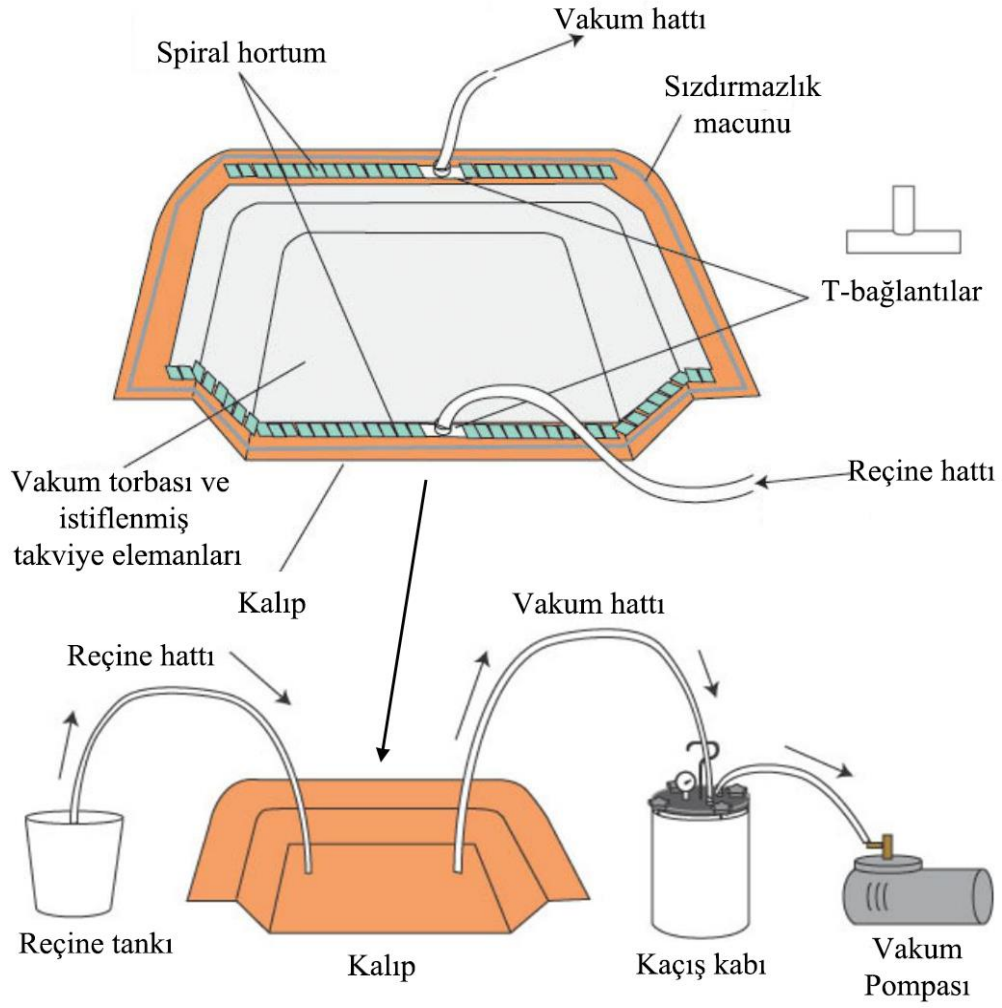
Diğer yöntem ise püskürme işlemi, el yatırma işlemine benzemektedir, farkı ise kalıba elyaf ve reçine malzemelerinin uygulama şeklidir. Püskürme işleminde, kırılmış cam elyaf ve reçine/katalizörü kalıbın üzerine bir püskürtme tabancası uygulanmaktadır. Püskürtme işlemi el yatırma işleminden çok daha hızlı ve az maliyetli bir yöntemdir. Kütetler, yüzme havuzları, monokok tekne gövdeleri, depolama tankları ve mobilya bileşenleri bu yöntem ile üretilen ticari ürünlerden bazılarıdır. Fakat bu yöntem sandviç kompozit imalatına uygun değildir.

1.5.4.2 Reçine İnfüzyon Yöntemleri

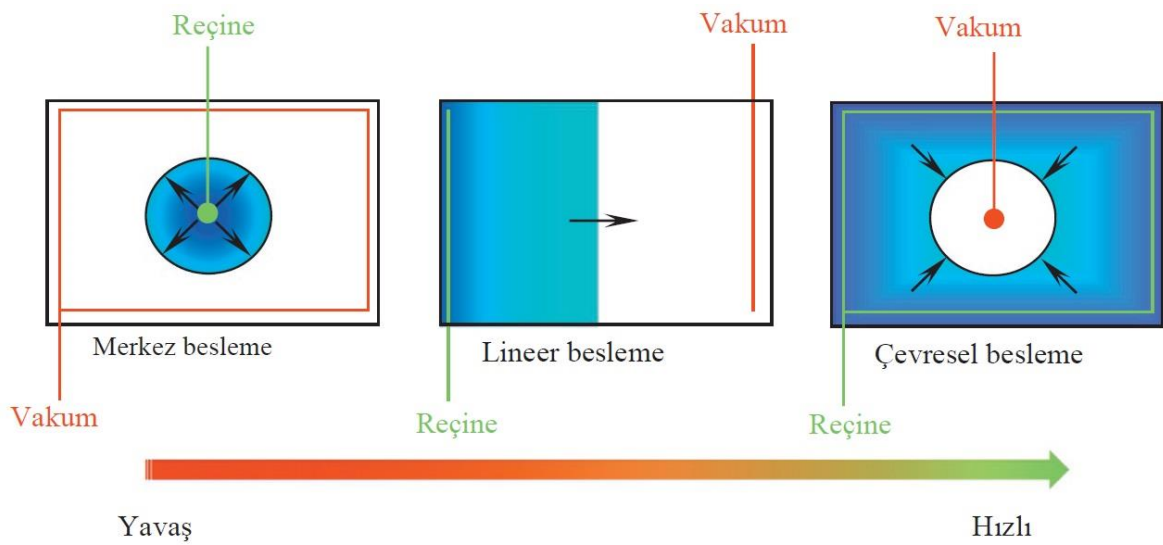
Yukarıda belirtilen tekniklerin kusurları, vakum teknolojilerinin; vakum torbası (VB) ve reçine infüzyon (VARIM, SCRIMP, RIFT vs.) yöntemlerinin gelişimine yol açmıştır. Vakum torbalama teknolojisi, presle elde edilemeyen karmaşık şekle sahip parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir. Bu teknik ile sandviç ve laminat kompozitler üretilmektedir. a) İlk aşaması el yatırma yöntemine benzerdir; takviye katmanları ve çekirdek uygun rulolar veya fırçalar kullanılarak ustalar tarafından reçine ile ıslatılır. Bu aşama, yapının laminasyon planına ulaşıldığında sona erer. b) İkinci aşamada ise kompozit yapı üzerine sırası ile soyma kumaşı, delikli naylon ve polyester emici katlar üst üste dizilir. Soyma kumaşı fazla reçinenin polyester emici kata ulaşmasını sağlar. Bu kumaş, astar boya veya son kat boyalarının dış yüzeye iyi tutunmasını sağlar ve fazladan zımpara yüzey işlemlerine gerek bırakmaz. c) Son aşamada ise, kalıp çevresi esnek naylon vakum torbası ve sızdırmazlık macununa kullanılarak mühürlenmektedir. Kürleşme sırasında ise (atmosferik basınçtan daha düşük bir basınç) bir vakum pompası vasıtasıyla kalıba negatif basınç uygulanmaktadır. Bu işlemin amacı, kür döngüsü sırasında kompozit yapı üzerinde mekanik basınç sağlamaktır. Bu süreçte, torbalanmış kalıp sistemi ve pompa arasında, fazla reçinenin pompaya ulaşmasını ve hasara uğramasını önlemek için mutlaka bir reçine kaçış kabı bulunması gerekmektedir. Vakum uygulamasının birçok avantajı bulunmaktadır. İlk olarak, ıslak tabakalar arasında istiflenme oluşturarak sıkışan hava, uzaklaştırılır. İkincisi, yapı üzerine uygulanan mekanik basınç, tabakalar arasında optimum yapışmaya izin verir, böylece fiberlerin yanlış hizalanmasını ve kürleşme işlemi sırasında boşlukların oluşmasını engellemektedir. Üçüncüsü, kürleşme sırasında havanın boşaltılmasını sağlayarak düşük nem emilimine yardımcı olmaktadır. Son olarak, yapı içerisinde kuru veya fazla reçine içeren bölgelerin oluşmasını engellenerek homojen reçine dağılımı sağlanmaktadır. Ayrıca, vakum torbalama tekniği ile fiber/reçine oranı artışı sağlanmakta; çünkü fazla reçine vakum işlemi sırasında polyester battaniye tarafından emilmektedir. Bu yöntemle üretilen sandviç kompozitler, el yatırma tekniği ile imal edilenlere kıyasla daha düşük hava kabarcığı (boşluk), daha düşük ağırlık, daha iyi mekanik özellikler, sabit kalınlık ve daha yüksek fiber içeriği sergilemektedir [20, 46].

Diğer teknik ise 1990 yılında Bill Seeman tarafından patenti alınan Seemann kompozit reçine infüzyon yöntemi (SCRIMP) yöntemi başta ABD olmak üzere tüm dünyada, farklı sanayi dallarında uygulanmakta olan kapalı kalıp kompozit imalat tekniğidir [64]. Bu yöntem çeşitli farklı isimler ve kısaltmalar ile tarif edilmiştir: VARTM, RIF, SCRIMP,

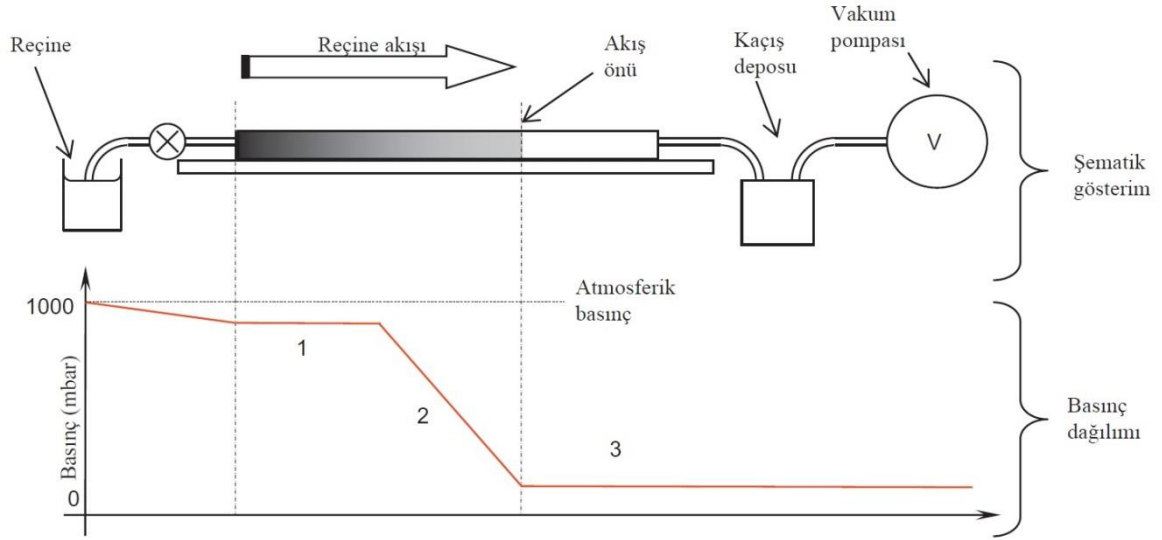
RFI, RFIM, VAIM, VARI, VARIM, VIM, VIMP vb. akronimler kullanılmaktadır [31, 65]. En yaygın isimler, esnek kalıplama altında reçine infüzyon (RIFT), Seemann kompozit reçine infüzyon kalıplama işlemi (SCRIMP) ve vakum destekli reçine infüzyon metodu (VARIM)' dur. Tekne imalatında kullanılan VARIM metodu, reçine transfer kalıplama (RTM) ile benzerlikler sunan kapalı kalıp reçine infüzyon yöntemidir. Ana fark, RTM' de kullanılan tamamen kapalı, iki parçalı sert kalıpların yerini, bir vakum torbasıyla kapatılmış tek parçalı bir sert kalıpla değiştirilmiş olmasıdır. VARIM ile vakum torbalama arasındaki temel fark ise, VARIM' da, takviyeler ve çekirdek yapı, kalıbın içine kuru yerleştirilmektedir. Başka bir deyişle el yatırma işlemini içermemektedir. Vakum uygulaması hem katmanları sıkıştırmak hem de reçinenin yapının içinde ilerlemesini sağlamak için kullanılır. Böylece, imalat hazırlıkları tamamlanmış ürünün el değmeden imal edilmesi mümkün olmaktadır. VARIM yönteminde, vakum torbalama imalatında kullanılan malzemelerden farklı olarak akışı kolaylaştırmak ve dolum süresini azaltmak için kullanılan bir "akış filesi" katmanı soyma kumaşının üstüne yerleştirilir. VARIM yönteminde kalıp bileşenleri: kalıp, spiral hortum, T-bağlantılar, reçine ve vakum hatları, sızdırmazlık macunu ve vakum naylonu olarak sıralanabilir (Şekil 1.12). Bu yöntem dört (4) bölümden oluşur: vakum pompası, reçine kaçış deposu, kalıp ve reçine tankı (Şekil 1.12). Sistem basit tanımıyla; kapalı kalıp sistemde reçinenin besleme hattından vakum hattına doğru ilerlemesini sağlayan infüzyon sürecini içermektedir. Reçine hatları kalıp içerisinde merkez, lineer ve çevresel besleme yapacak şekilde ayarlanmaktadır. Vakum ve besleme hatlarının farklı düzenlemesi ise üretimi sürelerini etkilemektedir (Şekil 1.13). VARIM ile üretim sırasında ürüne uygulanan mutlak basınç; negatif vakum basıncı ve atmosfer basıncının toplamına eşittir ve toplamları 50 ile 200 mbar arasında değişmektedir (Şekil 1.14) [46].



Şekil 1.12: VARIM üretim tesisatı [46].



Şekil 1.13: VARIM tekniğinde reçine besleme stratejileri [21].



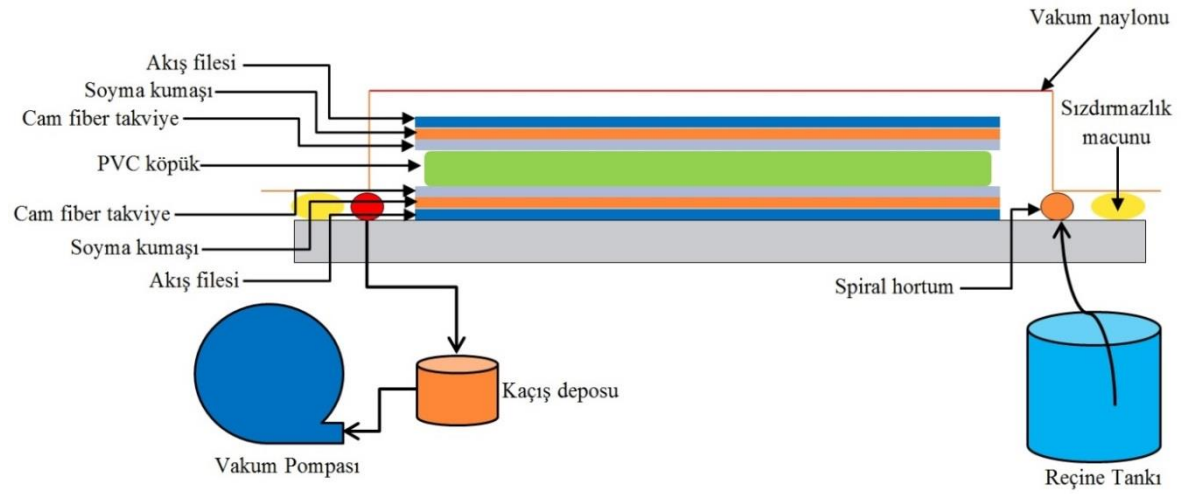
Şekil 1.14: VARIM kalıp içerisinde basınç dağılımı [21].

VARIM metodunda reçine ve takviye malzemelerin seçimi önemlidir. Genellikle, takviye fazına daha kolay nüfuz edebilecek düşük viskozite özelliğine sahip reçineler tercih edilmektedir. Piyasada infüzyon tipi olarak sınıflandırılan reçineler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek viskoziteli reçineler de VARIM’ da kullanılabilir, ancak daha dikkatli planlama gerekir; sayıca fazla ve kısa reçine emiş hatları döşemek zorunlu olur. Takviye seçimi, tüm kompozit yapılar için önemli bir aşamadır, ancak bu malzemeler, VARIM metodu ile sandviç kompozit üretmek için kullanıldığında yapılması gereken ilave hususlar vardır. Tüm kumaşlara infüzyon tekniği uygulanabilir, ancak farklı malzemeler ve tekstil stilleri reçine akış hızlarını ciddi şekilde etkileyebilir. Özellikle, dokuma kumaşlarda daha az çözümlü ve atkı kesişmesi bulunduğu için reçine ilerlemesi daha kolay gerçekleşmektedir. Örme kumaşlar ve keçe takviyeleri de, reçine emilimi için yüksek miktarda boşluk içerir. Dikişli kıvrımsız kumaşlar ise reçine emilimi hızının en düşük olduğu takviye elemanlarıdır. Ayrıca, çoğu kumaşın vakum basıncı altında %30'a kadar kalınlık düşmesine uğradıklarını tasarımda dikkate almak gerekir. Reçine ve takviyeler olduğu gibi, çekirdek malzemelerin seçimi de önem taşımaktadır [46]. VARIM için uygun bir çekirdek malzemelerin kapalı hücreli olması gerekir. Bal peteği yapıları çekirdek malzemelerinin çoğu açık hücreleri nedeniyle infüzyon yöntemleri için uygun değildir. Reçine geçirgenliğini artırarak yeterli akış ve emilim sağlamak için çekirdek malzemelere delikler, oluklar ve kesikler açılmaktadır. Bu modifikasyonlar akış filesi kullanılmadan sandviç kompozitlerin üretimine imkân sağlamaktadır. Köpük üreticileri (DIAB, Airex,

Baltek şirketleri vb.) müşterilerinin isteği doğrultusunda infüzyon sırasında reçine transferini kolaylaştıracak modifikasyon içeren ürünleri tedarik etmektedir [66, 67].

1.5.4.3 Denizel Sandviç Kompozitlerin Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Metodu ile Üretimi

Şekil 1.15’de VARIM tekniği ile sandviç kompozit üretimi şematik olarak verilmiş ve sonrasında aşamaları detaylı olarak anlatılmıştır (bkz. Şekil 1.15).



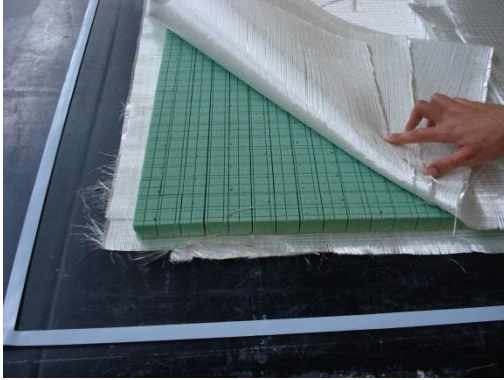
Şekil 1.15: VARIM ile sandviç kompozit malzeme üretimi.

VARIM yöntemi ile sandviç kompozit üretimi şu aşamalardan oluşmaktadır:

- Kalıp ölçüsü alınarak elyaf katları önceden bir tezgâh üzerinde kesilmesi ve numaralandırma yapılması gerekir;
- Kalıbın temizlenir ve kalıp ayırıcı uygulanır;
- Kuru elyaf ve çekirdek malzemenin laminasyon planına uygun şekilde kalıba yerleştirilmesi sağlanır;
- Kalıp içerisinde reçine ve vakum hatları için spiral hortumlar kesilir, spiral hortumlara vakum ve reçine emiş hortumlarınının bağlanması için T bağlantılar takılır, çift taraflı sızdırmazlık macunu kalıbı çevreleyecek şekilde uygulanır;
- Vakum torbası kalıp üzerine yeterli basınç uygulayabilmesi için parça kalınlığı ve kalıp derinliği hesaba katılarak kesilir. Vakum torbası kesildikten sonra sızdırmazlık macunu ile kalıp çevresine yapıştırılır;

- Vakum ve reçine emiş hatları için polietilen hortumlar kesilir, spiral hortumlara T bağlantılar vasıtasıyla bağlanırlar. Vakum hortumu reçine kaçış kabına bağlanır, reçine emiş hortumu ise kapalı tutulur. Vakum torbasında kaçak olup olmadığı reçine kaçış kabı ve pompa üzerindeki manometreler karşılaştırılarak kontrol edilir;
- Laminasyon planına göre reçine miktarı belirlenir, bu miktar hazırlanırken hortumlarda kalacak reçine miktarı dikkate alınmalıdır. Reçineye gerekli sertleştirici ve hızlandırıcılar eklenir ve karıştırılır;
- Reçine hattı açılır ve kompozit yapının tamamı ıslandıktan sonra, reçine girişleri kapatılır ve sandviç yapının kürleşmesine izin verilir. Kürleşme atmosfere açık ortamda veya fırınlama yöntemi (reçine kürleşme döngüsü dikkate alınır) ile yapılabilir.

GCG Yat İmalat Ltd. Şti. (Gaziemir/İzmir) yapılan ziyaret sırasında VARIM üretim tekniği kullanılarak üretilen sandviç kompozit panelin üretim aşamaları Şekil 1.16'da verilmiştir.



a.



b.



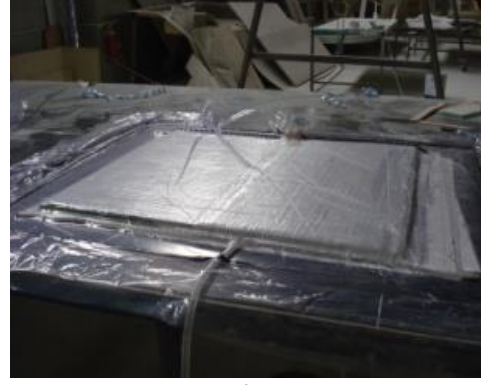
c.



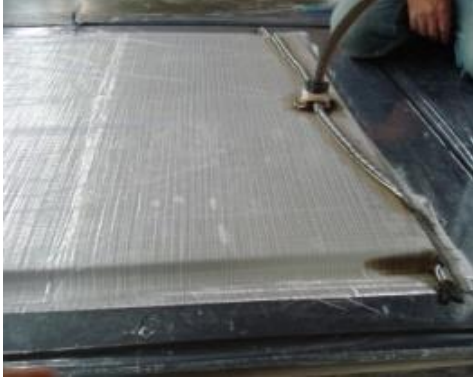
d.



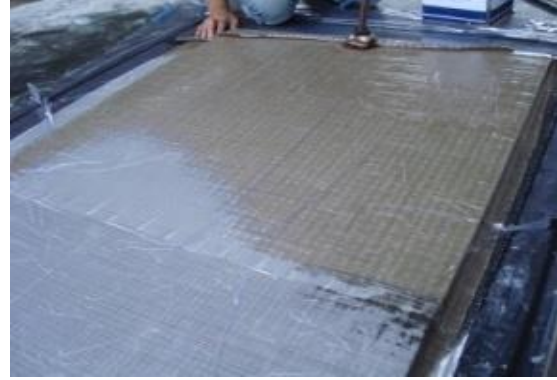
e.



f.



g.



h.

Şekil 1.16: Sandviç kompozit malzemenin VARIM üretim aşamaları (GCG Yat İmalat Sanayi A.Ş, Sarnıç, İzmir), a) Cam elyaf ve köpük malzemelerin kalıba yerleşmesi b) spiral hortumların çekilmesi, c, d) Reçine ve vakum hortumların takılması, e) Vakum naylonun yerleşmesi, f) Sızdırmazlık macunun yapıştırılması, g, h) Reçine besleme hattının açılması ve reçine emdirilmesi

VARIM yönteminin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz [21, 46, 65];

- Yüksek fiber/reçine (70/30) oranı sağlar; hafif, dayanıklı ve rijit yapılar sağlar;
- Düşük boşluk içeriği (%1 den az) sağlar; hasar başlangıcı riski azalır;
- Reçinece zengin veya kuru bölgelerin oluşmasını engeller, homojen dağılım sağlar;
- Düşük stiren buhar emisyonu sağlar; Avrupa ülkelerinde 20 ppm ile 100 ppm değerleri arasında, ABD'de ise ortalama 35 ppm' lik emisyon sınırları uygulanmaktadır.
- El yatırma süreci içermez böylece düşük atık ve malzeme tasarrufu sağlar;
- Diğer yöntemler gibi reçine jelleşmesinin neden olduğu süre kısıtlaması yoktur; tabakalar kuru olarak kalıba yerleştirilir;
- Üretim kusurlarını azaltır, örneğin; reçinece zengin bölgelerin neden olduğu yüksek ekzotermik sıcaklıklar oluşmaz ve üretilen parçalarda çarpılma gözlenmez;

- Reçine infüzyon, tekrarlanabilir laminat özellikleri sağlar. Vakum basıncı ve reçine viskozitesi gibi proses değişkenleri ölçülebilir ve ayarlanabilir. Çalışanların katman sayısı ve elyaf sıralama işlemlerini laminasyon planı doğrultusunda yapması yeterlidir.

VARIM yöntemi açık kalıplama yöntemlerine kıyasla birçok avantaj sağlasa da, aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir [21, 46, 65]:

- Personelin infüzyon süreci konusunda eğitim almış olması gerekir; infüzyon sarf malzemeleri ve tesisatı bilgisine, laminasyon planlarını okuma ve uygulama becerisine sahip olması şarttır;
- Üretim parametre sayısı açık kalıplama yöntemlerine göre daha fazladır. Genel olarak atölye sıcaklığı ve nem değerleri, elyaf ağırlıkları, reçine, sertleştirici ve hızlandırıcı karışım oranları ve kalıp sıcaklığı gibi değişkenler kontrol edilir. İnfüzyon sürecinde ilave olarak reçine viskozitesi ve vakum basınç seviyeleri gibi parametrelerin takip edilmesi gerekir;
- VARIM metodu yatırım ve üretim maliyetleri bakımından, açık kalıplama yöntemlerine göre masraflıdır. Vakum pompası, kaçış kabı, tesisatı, vakum torbası, sızdırmazlık macunu, spiral ve düz hortumlar vb. birçok tüketim malzemesine ihtiyaç vardır;
- Açık kalıplama yöntemi düşük risk içermektedir. VARIM yönteminde ise reçinenin kalıba aktarılması sonrası geri dönüş imkânsızdır, örneğin elektrik kesintisi nedeniyle vakum seviyesinin azalması veya hazır olmayan reçinenin katmanlara emdirilmesi üretimin sonlandırılmasına neden olmaktadır;
- Kalıp ve vakum torbasında oluşacak hava kaçaklarına karşı dikkatli olunmalıdır;
- VARIM yöntemi herhangi bir boyuttaki parça için kullanılabilir, ancak karmaşık şekle sahip küçük parçalar için tercih edilmez, oysa tekne gövdeleri gibi kısa sürede üretilen geniş parçalar için en uygun tekniktir;
- Deneme-yanılma yaklaşımının, reçine ve vakum hatlarının yerlerinin tanımlanması için uygulanması masraflı bir yöntemdir. Bu yüzden, PAM-RTM, LIMS, PolyWorx ve myRTM gibi ticari sonlu elemanlar analizi programları ile infüzyon sürecine ait simülasyonlar yapılmaktadır. Ayrıca, araştırmacılar üretim parametrelerinin kontrol edilmesine imkân veren, ön deneysel verileri sağlayan, reçine infüzyon düzenekleri

de geliştirmiştir. Böylece parça üretiminin ilk aşamalarında oluşacak başarısızlık riski ortadan kalkmaktadır.

Günümüzde, yat ve tekne üreticilerinin önemli bir bölümü, ürün kalitesini artırmak, üretim sürecini hızlandırmak ve daha sıkı sağlık ve güvenlik mevzuatlarına uymak amacıyla reçine infüzyon üretim tekniklerini benimsemiştir. Tüm göstergeler, bu eğilimin hız kazanacağı ve açık kalıp tekniklerinin terk edileceğini göstermektedir. Çalışma kapsamında sektöre yapılan ziyaretlerde de bu durum gözlemlenmiştir. Sandviç yapılı yatların üretildiği tersanelerde VARIM tekniğinin tercih edildiği bizzat grlmştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Sandviç kompozit malzemelerin denizcilik alanında sağladığı avantajlar önceki bölümde detaylı açıklanmıştır. Bu yapı malzemeleri çalışma şartlarında farklı mekanik yüklerin etkisi altında kalmaktadır. Tekne gövdesine etkileyen yükler genel ve bölgesel olarak ayrılmaktadır. Genel yükler tekneye tümüyle etki etmekte, örneğin güvertenin yukarısına uzayan ekipmanlar: direk, bumba, pupa palangası ve makara sistemlerine ait ağırlıklar kısacası arma yükleri gövde kirişinin eğilmesine neden olmaktadır. Kirişin eğilmesine neden olan diğer genel yükler ise sarkma ve çökme sırasında oluşan moment değerleridir. Sarkma gövde kesitinin dalga tepesinde olması ve çökme ise dalga çukurunda olduğu durumu belirtmektedir. ISO 12215 standardına göre 24 m'den (80 ft) küçük gezinti teknelerinde sarkma ve çökme etkisi tasarım sürecinde hesaba katılmamaktadır. Yüklerden kaynaklanan gerilmeler ve şekil değiştirmeler ise basit kiriş teorisi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Deniz ve dalgalardan kaynaklanan hidrostatik/hidrodinamik yükler, çarmıh ayağı, salma, dümen, vinç, iskota ve benzeri elemanlardan tekneye iletilen ilave yükler ise bölgesel olarak sınıflandırılmaktadır [68]. Tekne gövdesini oluşturan sandviç yapıların öncelikli olarak eğilme yüklerine maruz kaldığı açıkça görülmektedir [69, 70].

Literatürde, sandviç kompozitlerin eğilme yükleri altındaki mekanik davranışlarının araştırılması için çok sayıda deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar yapılmıştır [69-79]. Sandviç kompozitlerin eğilme davranışını inceleyen araştırmalarda lineer olmayan sonlu elemanlar analizleri başarılı sonuçlar vermiştir [71-74, 80]. Mostafa vd. [73, 74] cam elyaf takviyeli tabakalı ve poliüretan (PU) ve polivinil klorür (PVC) çekirdek içeren sandviç kompozitlerin eğilme davranışlarını deneysel, analitik ve sayısal olarak incelemiştirler. Sonlu elemanlar analizinde tabakalar bi-lineer elastik, çekirdek ise izotropik-pekleşme malzeme modelleri kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizinde tabaka-çekirdek arasındaki kohezif etkileşim, geometri ve malzeme özelliklerinin doğrusal olmayan etkileri hesaba katılırken, eğilme davranışını tahmin etmek için klasik sandviç teorisi kullanılmıştır. Her ne kadar nümerik sonuçları malzemenin elastik ve plastik bölgelerdeki eğilme tepkisini doğru bir şekilde temsil etse de, teorik olan neticeler lineer varsayımları nedeniyle sandviç panelin sadece elastik bölgedeki davranışını yansıtabilmiştir. Ayrıca araştırmalar çoğunlukla sandviç kirişlerin düzlem ve kılıçlama yönlerde ve farklı destek mesafelerindeki mekanik davranışlarının karşılaştırılması üzerine de yoğunlaşmıştır [81-84]. Beklendiği gibi destek (L) veya kesme açıklığı (a)

değerlerindeki artışın, sandviç kirişlerin moment taşıma kabiliyetlerini azaltırken, sehim değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Kiriş hasar başlangıçlarının maksimum kesme ve moment değerlerinin oluştuğu yükleme pimleri altında gerçekleştiği görülmüştür. Sandviç kompozit kirişlerin düzlem yönde yüksek eğilme rijitliği, kılıçlama yönde ise yüksek kayma mukavemeti sergilediği belirtilmiştir. Manalo vd. [85], cam elyaf tabakalı (CTP) ve fenolik çekirdekli sandviç kirişlerin düzlem ve kılıçlama yönlerde eğilme davranışlarını araştırmıştır. Kılıçlama yükleme altında kirişlerin daha düşük sehim değerlerine karşılık daha fazla yük taşıdığı belirlenmiş ve sandviç yapıda kademeli yüzey tabakası hasarı ve çekirdek çekme çatlakları gözlemlenmiştir. Düzlem yüklemde ise çekirdek kayma kesilmesi ve üst tabaka basma hasarlarına rastlandığı raporlanmıştır. Mathieson ve Fam [83], farklı kesme açıklığı/toplam kalınlık (a/h :1.3, 2.0, 3.33, 4.77), çekirdek kalınlığı/yüzey kalınlığı (c/t :23,47), toplam kalınlık/yüzey kalınlığı (h/t :47, 94) oranlarına sahip CTP tabaka ve poliüretan köpükten oluşan sandviç kirişlerin eğilme davranışlarını ve hasar türlerini incelemişlerdir. Kirişlerin moment taşıma kapasiteleri, a/h oranı 1.33 den 4.67'ye çıktığında, h/t :94 olan numunelerde yaklaşık üçte bir oranında, diğer h/t :47 olan örneklerde ise dörtte bir kadar azalmıştır. Bu azalmanın nedeni ise yüzey tabaka katlanması (burkulma) hasarının baskın duruma gelişi gösterilmiştir. Yüzey kalınlığının iki katına çıkarılması (h/t :47,94) moment kapasitesini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu artış, a/h oranına bağlı olarak %55 ile %95 oranında olmuştur. Maksimum yük ve rijitlik değerlerinin tahmini için geliştirilen analitik denklemler, deneysel neticeler ile karşılaştırıldığında %20 sapma göstermiştir. Ferdous vd. [81, 82] cam elyaf takviyeli yüzey tabaka ve fenolik köpük içeren sandviç kirişlerin düzlemesine ve kılıçlama yönde eğilme davranışlarını incelemiştir. Sandviç kompozit kirişlerin farklı kesme açıklığı/kalınlık (a/d :0.5-12) oranlarında dört nokta eğilme testleri yapılmıştır. Beklendiği gibi a/d değerinin artışı ile her iki yükleme tipinde kirişlerin moment yük taşıma kapasiteleri azalmıştır. Düzlem yönde yapılan testlerde hasar tipinin ani ve kırılğan olduğu, çekirdek kayma kesilmesi ve sonrasında tabaka-çekirdek ayrılması ile neticelendiği görülmüştür. Kılıçlama yönde ise kirişlerin yüzey örtülerinde çekme ve basma hasarlarının yanı sıra kayma etkisi ile oluşan çapraz çatlaklar gözlenmiştir. Düzlem yüklemde, $a/d \leq 2$ oranında çekirdek kayma hasarı, $2 < a/d < 6$ değerinde çekirdek kayma hasarı ve tabaka-çekirdek delaminasyon hasarı (geçiş bölgesi) ve $a/d \geq 6$ de ise üst yüzey basma hasarı gözlemlenmiştir. Geçiş bölgesi eğilme ve kayma etkisinin birlikte tesir ettiği alan olarak bilinmektedir. Kılıçlama testlerde ise kısa açıklıkta laminat tabakaların kayma hasarına uğradığı, kesme mesafesi artışı ($a/d \geq 6$) ile dikey konumlanmış tabakalarda çekme ve basma çatlaklarının neden

olduğu burkulma hasarına rastlandığı belirlenmiştir. Geçiş bölgeleri malzeme bileşenleri ve test yöntemine (kısa ve asimetrik kiriş testler) bağlı olarak farklılıklar göstermiştir [83, 86]. Bu kaynaklarda kesme açıklığı değişimine bağlı olarak kirişlerin eğilme hasar haritaları çıkarılmıştır.

Çoğu durumda, çekirdek malzemenin mekanik özellikleri, özellikle eğilme yükü altında, tüm sandviç yapının mekanik performansını belirlemektedir. Çekirdek malzemenin gevrek doğası ani şekilde hasar almasına neden olmakta ve sandviç yapıların tasarlanmasında sınırlayıcı faktör haline gelebilmektedir. Bu malzemelerin dezavantajları göz önünde bulundurularak farklı metotlar geliştirilmiştir; sandviç sistemlerin yük taşıma kapasitelerinin artışı ve hasar dirençlerinin iyileşmesi sağlanmıştır. Umer vd. [87], yoğunluk ve kalınlık değerleri farklı PVC köpük içeren iki farklı sandviç kirişin eğilme davranışlarını karşılaştırmıştır. Köpük malzemenin yoğunluk değerlerinin kirişlerin kayma özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğu ve kalınlık değerlerinin artışı ile eğilme yükü taşıma kapasitelerinde artış sağlandığını tespit etmişlerdir. Sharaf vd. [88], poliüretan köpük yoğunluk değerlerinin (0.31 kN/m^3 ve 0.63 kN/m^3) sandviç panellerin eğilme davranışlarına etkisini araştırmıştır. Kirişlerin eğilme dayanımı ve rijitlik değerlerinin, çekirdek yoğunluğunun iki katına çıkması nedeniyle sırasıyla %165 ve %113 oranında arttığı belirlenmiştir. Düşük yoğunluğa sahip köpük malzemenin daha fazla kayma şekil değişimine ve tabaka katlanması (kırışması) hasar riskine neden olduğu saptanmıştır. Bezazi vd. [89], farklı yoğunluk (60 kg/m^3 ve 80 kg/m^3) ve kalınlığa (15 mm ve 25 mm) sahip PVC köpük içeren sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme performanslarını karşılaştırmıştır. Köpük kalınlık artışının başlangıç rijitlik değerine etkisi olmadığı fakat hasar yükünde %37 oranında artış sağladığı tespit edilmiştir. Kısacası tasarım sürecinde çekirdek yapının tipi, yoğunluk değeri ve boyutlarının değişimi sağlanarak sandviç yapıların mekanik performanslarında artış elde edilmiştir. Uygulamada başvuru olan bu yöntemlerin yapıda ağırlık ve maliyet artışına sebep olacağı açıktır.

Yukarıda önerilen seçenekler sadece malzeme bilimi perspektifinde düşünülmüş ancak alternatif yapısal çözümler de geliştirilmiştir. Kampner ve Grenstedt [90] köpük içeren sandviç kompozit malzemeleri hafifletmek ve kayma yükü taşıma kapasitesini artırmak için oluklu yüzey geometrisi geliştirmiştir. Oluklu tabaka ayrıca basma yükü altında sandviç kompozitlerin tabaka katlanma (kırışma) mukavemetini de arttırmıştır. Sonuç olarak, oluklu yapı sandviç kompozitlerin mukavemet değerlerinde düşüşe neden olmadan

%10-20 oranında hafiflik sağlamıştır. Manalo vd. [85], sandviç kirişlerin geometrik oryantasyonu değiştirildiğinde; kılıçlama yönde kullanılması durumunda düzlem içi kayma dayanımlarının arttığını ve kademeli, sünek hasar aldıklarını belirlemiştir. Sandviç kompozit paneller sınırlı kalınlıklarda üretildiği için, bu malzemeler, yatay ve dikey konumlarda veya her ikisinin kombinasyonu şeklinde yapıştırılarak yapısal amaçlı kirişler elde edilmiştir. Manalo vd. [91-93], tutkal ile yapıştırılmış kirişlerin eğilme davranışlarını yoğun biçimde araştırmıştır. Dikey pozisyonda lamine edilen kirişlerin, yatay konumda olduğundan %25 daha fazla eğilme dayanımına sahip olduğu [92] ve %200' den daha yüksek kayma mukavemetine ulaşarak [93], daha etkin kullanılabileceği belirlenmiştir.

Reis ve Rizkalla [94], köpük çekirdek malzemeye kalınlık doğrultusunda fiber takviyeleri yerleştirerek yeni bir tip sandviç panel geliştirmiştir. Bu yöntemin, delaminasyon sorununu giderebildiği bununla birlikte sandviç panellerin kayma dayanım ve rijitlik değerlerinde de artış sağladığı raporlanmıştır. Dawood vd. [95], köpük kısmı cam fiber takviyeli pimler ile güçlendirilmiş sandviç kompozitlerin statik ve yorulma karakteristiklerini deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Araştırma bulguları sandviç panelin kayma özelliklerinin panel kalınlığı, pim dizilimi ve yoğunluğuna bağlı olduğunu göstermiştir. Panel kalınlığının azaltılması ve takviye yoğunluğunun artışı panellerin efektif kayma rijitlik değerlerinin artışı sağlamıştır. Yazarın diğer bir çalışmasında [96], panellerin noktasal yüklenmesi durumunda, laminat katman sayısı ve rijitliği, pim takviye yoğunluğu, panel kalınlığı ve boy/en oran değerlerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak için uygun bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Panellerin yük-deplasman davranışı, sonlu elemanlar modeli kullanılarak tahmin edilebilmiş, deneysel değerler ile eşleştirmiştir. Köpük malzemede pim oranı arttıkça, kayma rijitliği artmış, plakada membran etkisiyle taşınan yük yüzdesinin azaldığı, eğilme mekanizmasının baskın duruma geldiği gözlemlenmiştir.

Diğer başvurulan teknikler arasında çok katmanlı ve ara tabakalı sandviç yapıların üretilmesi bulunmaktadır. Osei-Antwi vd. [97, 98], çok katmanlı farklı yoğunluklara sahip balsa çekirdek içeren sandviç kompozitlerin yük taşıma kabiliyetlerini optimize etmiştir. Bu tasarımda, sandviç yapının üst kısmın da yüksek yoğunluklu balsa kullanılarak ezilme ve tabaka katlanması (kırışması) hasarları engellenmiş ayrıca kirişlerin destek noktalarında yeterli rijitlik ve dayanım göstermeleri sağlanmıştır. Toplam ağırlığı en aza indirmek için daha az stresli bölgelerde düşük yoğunluğa sahip balsa kullanılmıştır. Mukavim yapı

oluşması için balsa katmanları arasında ara kemer şeklindeki cam elyaf takviyeli laminat kullanılmıştır. Bu katmanlı çekirdek yapının etkinliği, yaya köprü gövdesinde kullanılarak değerlendirilmiştir [99]. Mamalis vd. [100], ara tabakalı hibrit sandviç konseptini geliştirmiş, sandviç kompozitlerin darbe direncini geliştirmek için yüzey tabakaları ve PVC köpük çekirdek arasında ara kontrplak tabakası kullanmışlardır. Fang vd. [101], cam elyaf takviyeli tabakalar ile ahşap çekirdek arasında ara bambu tabakası içeren sandviç kirişler geliştirmiştir. Bambu ve CTP katmanlarının kalınlığının arttırılması ve bileşenler arasında iyi bir yapışma direnci sağlanarak yapının eğilme rijitliği ve hasar yükü önemli ölçüde artmıştır.

Üretilen çözümler genel olarak inşaat mühendisliğine ait yapısal uygulamalarda başvurulan yöntemleri kapsamaktadır [102]. Polimer köpük içeren denizel sandviç kompozitler için performans, maliyet ve uygulanabilirlik açısından rekabet eden farklı stratejiler geliştirilmiştir. Bu tekniklerde temel amaç ise çekirdek yapıyı güçlendirmek ve tabaka-çekirdek ara yüzeyinde gerçekleşecek delaminasyon hasarını engellemek olmuştur. İleri sürülen çözümler arasında: Z-İğneleme, dikiş-birleştirme, delaminasyon-sınırlama ve çekirdek modifikasyon teknikleri bulunmaktadır.

2.1 Z-İğneleme Yöntemi

Z-İğneleme (Z-pinning) yönteminde, 0.1 mm ile 1 mm aralığında çap değerlerine sahip metal (çelik, titanyum) veya kompozit (karbon fiber bismaleimide) pimler kompozit yapıların kalınlık doğrultusunda ultrasonik tabanca vasıtasıyla yerleştirilmektedir [103]. Z-İğneleme pahalı bir yöntem olmakla birlikte sadece havacılık sektöründe uygulama alanı bulabilmiştir. Bunun dışında, yapı ve ulaşım sektöründe kullanılması öngörülen pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş sandviç kompozit malzemelere de uygulandığına kaynaklarda rastlanmıştır [94-96]. Z-İğneleme işleminin tekstil dokumalarında fiberlerin dalgalanmasına, kıvrılmasına ve kopmasına ayrıca laminat içerisinde reçinece zengin bölgelerin oluşmasına neden olduğu bilinmektedir. Bu durumun ise, laminat kompozitlerin düzlem içi mekanik özelliklerine negatif etki ettiği görülmüştür [103-107]. Öte yandan, laminat tabakaların kırılma tokluğu, delaminasyon direnci, düzlem dışı rijitliği ve darbe dayanımı değerlerinde ise artış sağladığı raporlanmıştır. Bu teknikle sandviç kompozitlerin basma dayanımı değerlerinde %700, absorbe edilen şekil değiştirme enerji miktarında ise %600 artış sağlandığı raporlanmıştır [108]. Basma özelliklerinde, çap ve mesnet koşullarına göre hacimsel pim oranının daha etkili olduğu belirtilmiştir. Kesitteki pim

artışına (pim/cm²) bağlı olarak sandviç panellerin basma, eğilme ve kayma dayanım değerlerinde artış sağlanmıştır [109-111]. Ayrıca, pimlerin çekirdek ezilmesi hasarına neden olacak düşük hızlı darbe yüklerinde etkili olduğu belirlenmiştir [112]. Özetlenirse, pim düzeni (piramit, çapraz, X-Kor, K-Kor) [113-115], pim çapı (Ø) [108, 109], hacimsel (%) ve alansal (pim/in², cm²) [115, 116] oranlarının sandviç yapıların mekanik davranışlarına etkisi geniş bir şekilde araştırılmıştır. Ancak, Z-iğneleme tekniğinin yavaş ve pahalı olması sadece havacılık sektöründe uygulama alanı bulmasına neden olmuştur [55].

2.2 Dikiş-Birleştirme Yöntemi

Dikiş-birleştirme (stitching) yönteminde, yüksek dayanımlı iplikler ve sanayi tipi dikiş makinesi kullanılarak laminat kompozitlerin veya sandviç kompozitlerin tabakaları ve/veya çekirdek kısımlarının dikilmesi sağlanmaktadır. Bu teknik tekstil dokumalarının birleştirilmesi, laminat kompozitlerin ara yüzey kırılma tokluk değerlerinin ve darbe dirençlerinin artırılması için başvurulan bir yöntemdir. Yalnız birçok ticari uygulamada başarılı olamamıştır; çünkü dikiş işlemi sırasında yük taşıyan liflerin kopmasına, dolanmasına ve yanlış hizalanmasına neden olabilecek ön hasarlara neden olmuştur [117, 118]. Dikiş-birleştirme uygulanan sandviç kompozitlerin eğilme dayanımlarında ise %50'ye kadar artış sağlamıştır; lakin eğilme yorulma dayanımlarında ise düşme gözlenmiştir [119]. Dikiş sıklığı artışı eğilme hasar yüklerinin artışına, düzlem içi rijitlik değerlerinin ise düşmesine neden olmuştur. Eğilme rijitlik değerlerindeki düşme nedeni ise dikiş işlemi sırasında katmanların zarar görmesi olarak açıklanmıştır [120]. Düşük hızda gerçekleşen darbe yüklerinde dikiş uygulanmış sandviç panellerin absorbe ettiği enerji miktarları artmış ve delaminasyon hasar bölgeleri ise daralmıştır [121, 122]. Noktasal yükleme (yarı-statik) altında sandviç yapıların yük taşıma kabiliyetlerinin artışı ve delaminasyon hasarlarının azalması bu teknik ile sağlanmıştır [123]. Dikiş-birleştirme yöntemi, üretim öncesi başlangıç hasarlarına ve üretim maliyetlerinde artışa neden olmasından dolayı denizcilik uygulamaları için uygun bulunmamıştır [117].

2.3 Delaminasyon-Sınırlama Yöntemi

Delaminasyon-sınırlama, teknelerde dış tabaka delaminasyon hasarını durdurmak amacıyla geliştirilen bir yöntemdir. İlk uygulamaları sandviç yapılarda çatlağın yön değiştirmesini amaçlayan üst-alt tabaka birleşimini kapsamaktaydı, ancak bu çözümün yapısal bütünlüğe zarar verdiği belirtilmiştir [124]. Daha sonraki örneklerde ise düzlem-içi dayanımları eşit

fakat eğilme dayanımları farklı tabakaların birlikte çalışması sağlanmıştır. Böylece ara yüzeyde oluşan çatlakların birleşme noktasına doğru yönelmesi ve zayıf tabakanın köpükten tamamen ayrılması; delaminasyon hasarının sonlanması sağlanmıştır [124-126]. Son olarak çekirdek yapı ile benzer mekanik özelliklere sahip elasto-plastik birleştirme elemanları sandviç yapıya eklenerek ara yüzey çatlaklarının yolunun değiştirilmesi ve sınırlı bir bölgede kalması amaçlanmıştır [126]. Bu yöntem ise üretim zorluğu ve maliyetleri nedeni ile sınırlı uygulama alanı bulabilmiştir [127].

2.4 Çekirdek Modifikasyonu

Sandviç kompozit malzemelere uygulanan z-ışınleme, dikiş ve delaminasyon-sınırlama yöntemlerine kıyasla daha ekonomik ve kolay bir çözüm olan çekirdek modifikasyon (core modification) işlemleri geliştirilmiştir [55]. Bu yöntem çekirdek malzemelere talaşlı imalat yöntemiyle oluklar ve delikler işlenmesini içermektedir [128]. Kor modifikasyonlarının birincil görevi infüzyon destekli üretim yöntemlerinde (RTM, VARIM, RIFT, SCRIMP) reçine akışını kolaylaştırmak olmuştur [129-131]. Bu sayede infüzyon sırasında fiber takviyeli kumaşların ve tabaka-çekirdek ara yüzeyin ıslanması sağlanmaktadır. Oluk içeren köpük malzemelerin, akış filesi ile sağlanan akıştan daha hızlı ve daha fazla reçine akışı sağladığı da raporlanmıştır. Bu durumda akış filesinin üretilecek parçaya yerleştirilmesinin gerekmediği ve böylece üretim süresinde tasarruf sağlanabileceği de vurgulanmıştır [21]. Fakat bu modifikasyonlar yapıda reçine hacminin artmasına ve sandviç panellerin ağırlığında artışa neden olmaktadır [132]. Çekirdek materyalinde işlenen boşluklar takviye elemanları ile güçlendirildiği gibi sadece kürlenmiş reçine de içerebilmektedir. Literatürde çekirdek yapıda oluşturulan modifikasyonların sandviç yapıların mekanik performansına etkisi detaylı şekilde araştırılmıştır.

2.4.1 Kayma Kamalı Çekirdek Yapılar

Mitra [55], kayma kaması olarak isimlendirdiği prepreg cam fiber ve balsa takviyeli yüzeysel olukların sandviç kompozitlerin düzlem içi kayma mukavemetlerine etkilerini araştırmıştır. Olukları geometrisini, yarım daire ve “V” şekli olarak belirlemiştir. Yarım daire şekle sahip olukların kullanılması durumunda daha yüksek kayma mukavemetleri elde edilmiştir. V şekilli olukların uç noktalarında oluşan gerilme yığılmalarının çekirdek malzeme de çatlak başlangıcını hızlandırdığını ve erken hasara neden olduğu belirlenmiştir. Merkezleri çakışık olmayan ve merkezleri arası çap mesafesi kadar boşluk bırakılan üst ve alt oluklar ise dayanım değerlerine olumlu etki yapmıştır. Yarım daire kayma kaması çap

değerlerinin Ø8 mm'den Ø16 mm' ye çıkması ise kayma dayanımında azalmaya ve hasar ilerleyişinin hızlanmasına neden olmuştur. Ayrıca, kayma kaması kullanımı, sandviç kompozitlerin düzlem içi basma yükü altında hasar tiplerini ve yük taşıma kabiliyetlerini etkilemiştir [133, 134]. Tabaka-çekirdek delaminasyon hasar direncinde %25 iyileşme sağlandığı raporlanmıştır [133]. Tabaka kalınlık artışına gerek kalmadan sandviç kolonların basma dayanım değerlerinde artış sağladığı gözlenmiştir. Kamalar tabaka kırışmasını engellemiş, sandviç kolonlarda genel burkulma ve yüzey örtülerin mikro burkulması hasar tiplerine yol açmıştır [134]. Mostafa vd. [135-138], farklı çap ve yönlenmelere sahip kayma kamalarının sandviç plakaların düzlem içi kayma davranışlarına etkilerini Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanarak karşılaştırmıştır. Yarım daire kama çap değerleri Ø2, Ø5, Ø8, Ø11 ve Ø14 mm olarak belirlenmiştir. Çap değeri artışı ile sandviç plakaların kayma rijitlik değerlerinde artış, maksimum kayma şekil değiştirme miktarlarında ise azalma saptanmıştır. SEY sonuçlarında, Ø8 mm çap değerine sahip kamanın kayma dayanım değerlerinde en yüksek artışı sağladığı raporlanmıştır [135]. Aynı yazarlar farklı bir çalışmada ise [136], çift eksenli kamaların kayma rijitliği, tek eksenli olanlarının ise kayma dayanımında etkili olduğunu nümerik olarak ispatlamışlardır. Çift eksenli kamalar arasındaki açı değerinin 60°'nin üstüne çıkması durumunda ise kayma dayanımlarında azalma tespit edilmiştir. SEY neticelerinde beklendiği üzere hasar yüzey tabaka-çekirdek yapı arasında başlamıştır. Mostafa vd. [139], yarım daire kayma kaması merkezleri arası uzaklığın sandviç plakaların kayma davranışına etkisini de incelemiştir. Kama çap değeri sabit Ø8 mm ve merkezleri arası 15 mm, 25 mm, 35 mm, 45 mm ve 55 mm olacak şekilde numuneler sonlu elemanlar analiz programında modellenmiştir. En yüksek kayma dayanımı 45 mm kama mesafesinde elde edilmiştir. Fakat kama mesafesi artışı sandviç plakaların kayma rijitlik değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Kayma kamasının sandviç plakaların eğilme davranışına etkisi ise deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Kama çap değerinin Ø8 mm ve kama merkezleri arası mesafenin 45 mm olarak belirlendiği numunelerde düz kor içeren numunelere kıyasla eğilme dayanım ve rijitlik değerlerinde sırası ile %7.8 ve %25 artış belirlenmiştir [140]. Farklı geometrilere sahip kama kullanımı da çalışmalarda görülmüştür. Yarı halka şeklide kırılmış-cam elyaf prepreg dolgulu yüzeysel kama uygulaması ile geleneksel sandviç panellerin kayma yükü taşıma kapasitelerinde %22 artış sağlanmıştır [141]. Sonuç olarak çalışmalar göstermiştir ki kayma kaması yöntemi sandviç kompozit panellerin düzlem içi basma, kayma ve eğilme davranışlarında iyileşme sağlamaktadır.

2.4.2 Delik-Oluk İşlenmiş Çekirdek Yapılar

Fang vd. [142], polivinil klorür (PVC) köpükte açılan delik ($\text{Ø}2.5$ mm) ve olukların ($1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$) kayma dayanım ve rijitlik değerlerinde %9.2 ve %3.5 artış, basma dayanım ve rijitliğinde ise %74.4 ve %13.1 artış sağladığını tespit etmişlerdir. Sonraki aşamada çekirdek modifikasyonu içeren PVC yapıları sandviç kompozitlerin; 150 mm, 300 mm ve 450 mm destek mesafelerinde üç nokta eğilme, 450 mm destek mesafesinde ise dört nokta eğilme testleri yapılmıştır. Üç nokta eğilme testler neticesinde 150 mm kısa kiriş mesafesinde kor kayma hasarı, 300 mm ve 450 mm uzun kiriş mesafelerinde ise üst tabaka basma hasarı görülmüştür. Destek mesafesi artışı ile kirişlerin eğilme yükü taşıma kabiliyetleri düşmüştür. Çekirdek modifikasyonlarının çekirdek kayma hasarı sonrası ilerleyen tabaka-çekirdek ayrılmasını engelledikleri gözlemlenmiştir. Halimi vd. [130] ve arkadaşları altıgen ve kare dizilime sahip $\text{Ø}2$ ve $\text{Ø}4$ mm çapında delik açılmış PVC kor malzemeye sahip sandviç kompozitlerin eğilme davranışını ve tabaka-çekirdek ayrılma kırılma tokluğu sonuçlarını incelemiştirler. Eğilme hasar yüklerinde ve absorbe edilen enerji miktarlarında sırası ile %38.7 ve %100.2 artış elde edilmiştir. Maksimum ağırlık artışı ise %3.6 olarak belirlenmiştir. Kırılma tokluğu testlerinde, kritik yük ve kırılma tokluk değerlerinde pozitif etki sağlandığı saptanmıştır. May-Pat vd. [143], $\text{Ø}3.2$ mm çapında kare dizilime sahip delik açılmış PVC köpük içeren sandviç kompozitlerin düzlem dışı basma, düzlem içi kayma ve kırılma tokluğu testlerini yapmışlardır. Çalışmalarında deliklerin reçine ile tamamen veya kısmen dolmasının test numunelerinin mekanik davranışlarına farklı etki ettiği ortaya çıkmıştır. Kısmen boş delik içeren numunelerin basma dayanımlarında %20.8 düşme, reçine ile tamamen dolan numunelerde ise %29.7 artış tespit edilmiştir. Delikleri tamamen dolu plakaların ağırlıkları %28.1 artmıştır. Numunelerin düzlem içi kayma mukavemeti ve hasar mekanizmaları fazla etkilenmemiştir. Reçine dolu deliklerin çatlak ilerlemesini engelleyici unsur oldukları belirlenmiştir. Ortalama kırılma tokluğu değerlerinde artış sağlanmış fakat standart sapma değerleri yüksek çıkmıştır. Yokozeki ve Iwamoto [128], delik açılmış sandviç plakaların tabaka-çekirdek ayrılma tokluk değerlerinin yüzeysel oluk içerenlere kıyasla daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Hem delik hem oluk içeren numunelerin ayrılma kırılma toklukları ise en yüksek değere ulaşmıştır. Delik çap değerinin artışı da kırılma tokluk değerlerinin artışını sağlamıştır. Truxel vd. [129], tabaka-çekirdek ayrılma direnç artışını sağlamak amacıyla ara yüzey bölgesinde keçe kullanılmasının etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışmalarında yüzeysel oluk derinlik değerindeki artışın köpük malzemede çatlak ilerlemesini engellediğini tespit etmişlerdir. Abdi vd. [144, 145], delik

çap ve test hız değerlerinin sandviç numunelerin düzlem dışı basma ve batma dirençlerine etkilerini incelemiştir. Numunelere, merkezleri arası 10 mm olan kare dizilime sahip Ø2 mm ve Ø3 mm delikler açılmış ve batma testleri 1, 10 ve 100 mm/dakika, basma testleri ise 1 mm/dakika hızlarında gerçekleşmiştir. Basma testlerinde düz kor yapıya sahip kontrol numunesine göre Ø2 mm ve Ø3 mm delik içeren numunelerin maksimum yükleri sırası ile 3.60 ve 5.53 kat daha yüksek çıkmıştır. Batma testlerinde ise test hızının 1 mm/dakika' dan 100 mm/dakika'ya çıkması maksimum hasar yükünün ve maksimum sehim değerlerinde sırası ile %29.50 ve %9.52 artışa neden olmuştur. Aynı numunelerin kontrol numunesine kıyasla eğilme dayanımlarındaki artış miktarı ise delik çap artışına bağlı olarak %77.20 (Ø2 mm) ve %97(Ø3 mm) olarak belirlenmiştir. Eğilme testlerinde test hızı 1 mm/dakika' dan 10, 100 ve 500 mm/dakika' ya çıkarılmıştır. Hız artışına bağlı olarak eğilme hasar yüklerinde artış saptanmıştır. Artışlar, kontrol numunesinde %3.23, %17.62 ve %19.2, Ø2 mm delik içeren numunede %10.6, %17.9 ve %27.2, Ø3 mm delik içeren numunede ise %8.6, %19.3 ve %29.1 olarak belirlenmiştir. Şekil değiştirme hızının delik içeren numunelerde daha etkili olduğu belirtilmiştir. Çınar [146], cam fiber-epoksi boruları polistiren köpük yapıda takviye elemanı olarak kullanmıştır. 14 mm (1 mm) ve 30 mm (1.5 mm) dış çaplara ve et kalınlığına sahip ince borular XPS çekirdek yapıda daha önceden açılan deliklere yerleştirilmiş ve merkezleri arası mesafeyi 5 mm, 10 mm, 15 mm olarak belirlemiştir. Delik mesafelerin azalması ve çap artışı ise eğilme rijitliği ve çekirdek kayma dayanım değerlerinin artışını sağlamıştır. Basma dayanımı da boru çap artışına bağlı olarak artış göstermiştir. Bazı çalışmalarda dikiş ve delik delme işlemleri birlikte uygulanmış; açılan delikler cam fiber iplikler ile güçlendirilmiştir [147, 148]. Cam fiber takviyeli polimer pim yapılı sandviç panellerin çekme, basma, eğilme, kayma ve darbe yüklerinde polimer (sadece katı reçine) pim içeren numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Delikleri dolduran iplik ağırlık artışının mekanik performanslara olumlu etki ettiği görülmüştür [147]. Jishi vd. [149] ise, polietilen tereftalat (PET) köpük malzemede açılan deliklerin cam elyaf iplik ile güçlendirilmesi durumunda sandviç kompozit yapıların ara yüzey kırılma tokluk değerlerinde kontrol numunesine göre %300 artış sağlanırken sadece delik içeren numuneler için ise artışın %27 ile sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

2.4.3 Hücre (Ağ) Yapılı Çekirdek Yapılar

Tekne gövdesi ve güvertesi, rüzgâr türbini kanatları gibi geniş, üç boyutlu ve kavisli parçaların üretimi için Çapraz Kesilmiş (ÇK) köpükler kullanılmaktadır. ÇK köpükler kalıpların eğimli kısımlarında bükülebilmekte ve infüzyon üretim yöntemlerinde reçine

akışını kolaylaştırmaktadır. Köpükler istenilen ebatlarda ve farklı oluk ölçülerine sahip küpler şeklinde kesilebilmektedir. Spesifik uygulamalar için üretilen ürünler olmaları nedeniyle kaynaklarda mekanik davranışlarını inceleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır.

2.4.3.1 Katı Reçine İçeren Çapraz Kesik Çekirdek Yapılar

Fathi vd. [150], cam fiber takviyeli tabakalı ve farklı çekirdek yapılarına sahip; balsa (94 kg/m³), Poliüretan (PU), Polietilen Tereftalat (PET), Polivinil Klorür (PVC) köpükler içeren sandviç kirişlerin dört (4) nokta eğilme performanslarını karşılaştırmıştır. PVC (60 kg/m³), PET (105kg/m³) ve PU (90 kg/m³) köpüklere Airex firmasına ait kesim şablonlarında yer alan: testere-kesim, bıçak-kesim ve esnek-kesim olarak adlandırılan talaşlı imalat işlemleri uygulanmıştır. Balsa ağacı çekirdek yapıları sandviç kirişler eğilme testlerinde köpük çekirdek içeren yapılara göre yüksek eğilme rijitlik ve hasar yükü göstermiştir. PVC ve PU köpük içeren numuneler ise daha fazla sehim yapmış ve düşük hasar yükleri göstermiştir. Kesik çekirdek içeren sandviç kompozitlerin hasar yüklerinin ve rijitlik (eğilme ve kayma) değerlerinin arttığı; fakat tokluk değerlerinin azaldığı ve daha az sehim yaparak hasara uğradıkları raporlanmıştır. Esnek-kesim uygulanmış PVC çekirdek yapıları sandviç numunenin kayma dayanımı %37 oranında artmıştır. Kesme işlemlerinin sandviç kompozitlerin hasar durumlarını da etkilediği gözlenmiştir. Düz ve bıçak-kesim PVC çekirdek içeren numunelerde benzer hasar durumlarına rastlanmıştır; delaminasyon ve çekirdek kayma hasarları görülmüştür. Esnek ve testere-kesim PVC içeren numunelerde ise hasar ilerleyişi farklılık göstermiştir. Çatlak ilerlemesi testere-kesim PVC köpük malzemede oluk içermeyen bölgelerde rahatlıkla ilerlemiş; fakat düz ve bıçak-kesim çekirdek yapıları numunelere kıyasla çatlakların daha kısa ve süresiz olduğu görülmüştür. Esnek-kesim PVC içeren numunelerde ise çatlaklar çekirdek yapıdaki alt ve üst oluklar ile karşılaştığında çekirdek iç kısmına yönelmiş, bu durum çatlakların kısa kalmasına ve delaminasyon hasarının ertelenmesine neden olmuştur. Testere ve esnek kesim köpük içeren sandviç kompozit kirişlerde çatlakların kısa kalma nedeni eğilme yükü altında daha az elastik enerji depolamaları olarak açıklanmıştır. Ayrıca, farklı kesim işlemlerinin çekirdek yapıda homojen olmayan kayma şekil değiştirme dağılımına sebep olduğu vurgulanmıştır. Laustsen vd. [151, 152] ise rüzgâr türbin kanatlarının dış kabuk ve kesme perde kısımlarında kullanılan çapraz kesik köpük yapıları sandviç kompozitlerin çalışma şartlarında maruz kaldıkları zorlamalara benzer şekilde çok eksenli statik yüklemeler altında hasar davranışlarını incelemiştir. Çekme ve eğilme yükleri altında hasar başlangıçlarının reçine oluklarında olduğu görülmüştür. Basma ve eğilme yüklerinin

birleşik etkisinde ise enine yönlenmiş oluklarda ilerleyen çatlaklar neticesinde aşamalı hasar durumu meydana gelmiş; delaminasyon ve tabaka katlanması (kırışması) oluşmuş ve yapıda rijitlik kaybı belirlenmiştir. Bu yüzden ÇK köpüklü sandviç kompozit kabuk yapının çift eksenli basma yüklerine karşı daha hassas olduğu ve dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

2.4.3.2 Takviye ile Güçlendirilmiş Hücre (Ağ) Yapılı Çekirdek Yapılar

Köpüklerin kalınlık doğrultusunda kesilerek ara kısımlarına cam fiber takviyeli elyaflar ile güçlendirme yapıldığı ağ veya hücre yapılı sandviç kompozitlerin de mekanik davranışları kaynaklarda incelenmiştir. Çalışmalarda düşük yoğunluğa sahip köpük içeren sandviç yapılar, E-cam dokuma veya keçe elyaflar kullanılarak güçlendirilmiştir. Araştırmalar, PU çekirdek yapılı sandviçlerin inşaat mühendisliği uygulamalarında: bina giydirme, çatı ve duvar panelleri ve yaya köprüsü kiriş ve panel olarak kullanıldığı örnekler üzerinde yoğunlaşmıştır. Wang vd. [153], E-cam keçe takviyeli ve poliüretan köpük hücre yapılı sandviç kompozitlerin eğilme hasar yüklerinde, düz köpük içeren referans numuneye göre %410 artış sağlandığını raporlamıştır. Köpük hücreler arasındaki olukların kalınlık artışı ile birlikte kirişlerin eğilme yükü taşıma kapasiteleri ve rijitlik değerleri artış göstermiştir. Çalışmada hücre yapılı köpük için eşdeğer elastisite ve kayma modülü değerleri türetilmiştir. Ayrıca numunelerin hasar yükü, başlangıç eğilme rijitlik ve sehim değerleri için de analitik denklemler geliştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Hücre yapılı çekirdek yapının delaminasyon hasarını engellediği belirtilmiştir. Wu vd. [154] ise, E-cam dokuma/polyester takviyeli hücre yapılı sandviçlerin düzlem dışı basma yükü altında hasar yüklerinde yaklaşık %1600 artış elde etmişlerdir. Ağ yapısını oluşturan küp şeklide köpüklerin genişliklerinin küçülmesi ve oluk kalınlıklarının artışı basma hasar yüklerinin ve enerji absorbe değerlerinin yükselmesini sağlamıştır. Qi vd. [155], dört tarafı mesnetli takviyeli poliüretan ağ yapılı sandviç kompozit panellerin noktasal ve yayılı yüklemeler altında eğilme davranışlarını incelemiştirler. Çalışmada, ağ yapıda köpük hücrelerin genişlik ve kalınlık değerleri parametre olarak belirlenmiştir. Yayılı yük altında kalınlıkları eşit tutmak şartıyla hücre genişliklerinin azaltılması eğilme rijitlik değerinin artmasına ve sehim miktarlarının düşmesine neden olmuştur. Ayrıca yayılı yüklemelerde hücre kalınlıklarının artışı ise sehim değerlerini azaltmıştır. Noktasal yüklemelerde, ağ yapılı sandviç panellerin hasar yüklerinin kontrol numunesi değerinin 4.63 katına ulaştığı saptanmıştır. Sharaf vd. [156, 157], PU köpük çekirdek malzemede uyguladıkları cam elyaf takviye kaburga ve dış kaplama takviyesinin düzgün yayılı yük altında çalışan

sandviç panellerin eğilme davranışlarına etkisini araştırmıştır. Kaburga düzenine bağlı olarak düz köpük içeren panele kıyasla eğilme dayanımlarında %40 ile %140 oranında artış sağlanmıştır. Takviyeli çekirdek sayesinde kirişlerin kayma etkisinin %50 den %15-%20 oranlarına düştüğü ve eğilme etkisinin daha baskın duruma geldiği açıklanmıştır. Kaburga olarak isimlendirilen takviyelerin üst tabaka katlanması (kırışması) hasar tipini engellediği ve tabakaların basma yükü altında ezilerek hasara uğramalarına neden oldukları belirlenmiştir.

Zhang vd. [158], E-cam/polyester tabakalı ve PU köpük içeren sandviç kompozitlerin çekirdek yapısına boylamasına, enine ve yatay yerleştirilen E-cam elyaf takviyelerinin dört nokta eğilme davranışlarına etkilerini kılıçlamasına ve düzlemesine yapılan testlerde incelemiştir. Kılıçlamasına yapılan yüklemelerde takviye elemanın yükü taşımada daha etkin olmasından dolayı kirişlerin hasar yüklerinin ve eğilme rijitlik değerinin yüksek çıktığı belirlenmiştir. Boylamasına yerleştirilen takviyelerin düzlem yüklemelerde eğilme sonuçları üzerine etkisinin enine ve yatay elemanlara kıyasla daha fazla olduğu vurgulanmıştır. Diğer araştırmalarda, boylamasına PU köpük içerisine yerleştirilen E-cam dokuma takviye elemanlarının kirişlerin eğilme dayanım değerlerinde yaklaşık %300-700 oranında artış sağladığı belirlenmiştir [159-161]. Köpük hücreler arasında takviye olarak kullanılan elyafın yönlendirmesinin kirişlerin eğilme test performanslarında etkili olduğu görülmüştür. $[\pm 45]^\circ$ dizilime sahip dokuma E-cam elyaf takviyesinin, $[0/90]^\circ$ ve $[\pm 60]^\circ$ takviyelere göre eğilme dayanım ve rijitlik neticelerine daha olumlu etki ettiği saptanmıştır [161]. Mohamed vd. [162], köpük hücrelerin geometrisinin sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerini etkilediğini belirlemiştir. İkizkenar yamuk geometrisi şeklinde kesilen hücresel köpüklerin $[\pm 45]^\circ$ cam elyaf katmanları ile güçlendirilmesi neticesinde eğilme, düzlem dışı ve enine basma (düzlem içi) testlerinde, düz ve küp hücreli rakiplerine göre daha fazla yük taşıdıkları görülmüştür. Tuwair vd. [163] ise düz (96 kg/m^3), küp hücreli (32 kg/m^3) ve trapez forma (32 kg/m^3) sahip PU köpük içeren sandviç kirişlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Trapez forma sahip olanlarda yüzey tabaka ve çekirdek arasında katman olarak $[\pm 45]^\circ$ yönelime sahip cam elyaf katman kullanılmıştır. Düz ve küp hücre yapılı sandviç numunelerin çekme ve basma test sonuçları incelendiğinde: hücre yapılı numunelerde basma yükü altında oluk yapının burkulma hasarına ve ardından da köpükten ayrılarak delaminasyon hasarına uğradıkları, düz köpük içeren numunelerin ise köpüğün davranışını yansıttığı, lineer davranışı sonrasında plastik şekil değiştirerek ezildiği gözlemlenmiştir. Çekme testlerinde ise düz köpük içeren numunede köpük

malzemede yırtılma ve kopma olur iken, hücre yapılı olanlarda ise hasar tabaka-çekirdek ara yüzeyinde gerçekleşmiştir. Eğilme testlerinde ise trapez forma sahip köpük içeren numunelerin kısa ve uzun giriş destek mesafelerinde daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Trapez form köpük hücreli panellerin çekirdek kayma ve delaminasyon hasarlarına maruz kalmadığı; üstelik lokal basma yüklerine karşı daha mukavim ve rijit tepki verdiği belirtilmiştir. Taghizadeh vd. [164], cam elyaf takviyeli (kaburga) üçgen, yamuk ve dikdörtgen hücreli PVC köpük içeren sandviç kompozitlerin yayılı, lineer ve noktasal basma yükleri altında performanslarını incelemiştirler. Hücre geometrisinin ve sayısının basma özelliklerini doğrudan etkilediğini belirlenmiştir. Dikdörtgen hücreli numunelerin üçgen ve trapez forma sahip olanlara göre basma yükü altında hasar yükü ve enerji absorpsiyonu bakımından daha başarılı olduğu görülmüştür.

Kaynaklarda ileri sürülen yöntemler arasında denizcilik alanında uygulanabilirliği yüksek ve ekonomik olan tekniğin çekirdek modifikasyonu olduğu açıktır. Denizcilik sektörüne gerçekleşen ziyaretler neticesinde; kapalı kalıplama infüzyon tekniklerinde delik ve oluk açılmış ticari köpük ürünlerin hâlihazırda tekne ve yat imalatında kullanıldığı görülmüştür. Bu bilgiler ışığında farklı köpük modifikasyonlarının sandviç kompozit malzemelerin mekanik davranışlarına ve hasar mekanizmalarına etkisinin incelenmeye açık bir alan olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda ilk aşamada tekne üreticilerinde kullanılan sarf malzemeler ve uygulanan üretim yöntemleri ziyaretler sırasında gözlemlenerek (fotoğraf, video çekim, uygulama) ve not alınarak gerekli bilgi altyapısı oluşturulmuştur. Sonrasında kompozit malzeme üretmek amacıyla Balıkesir Üniversitesi Makine Laboratuvar binası Kompozit Malzemeler ve Mekanik Laboratuvarında VARIM üretim sistemi kurulmuştur. Mekanik testler ise Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜBTAM)'da yer alan Makine laboratuvarı imkânları dâhilinde yürütülmüştür.

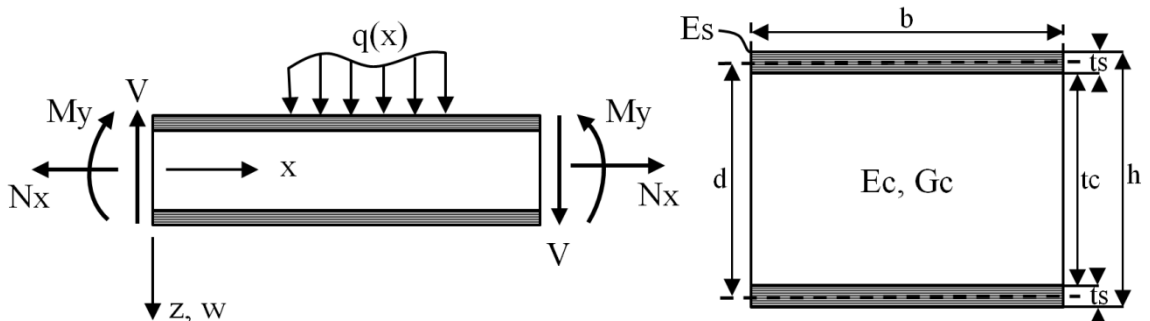
3. SANDVIÇ KOMPOZİT MALZEMELERİN EĞİLME DAVRANIŞI VE HASAR MEKANİZMALARI

3.1 Sandviç Kompozit Kirişlerin Eğilme Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması

Klasik sandviç kiriş teorisi, sandviç yapıların karakterizasyonu ve tasarımına yönelik basit bir yaklaşım sağlamaktadır [19]. Yüksek mertebe sandviç panel teorisi (HOSPT) veya sonlu elemanlar analizi gibi daha gelişmiş teorilerden daha az doğru olmasına rağmen, sadeliği, çok çeşitli yük senaryoları altında gerilme ve sehim hesapları için kapalı formda analitik çözümler sağlamakta ve bu durum sandviç kompozitlerin tasarım süreçlerinde etkili şekilde kullanılmasına neden olmaktadır. Açıkçası, öne sürülen analitik denklemlerin doğru kullanımı, sonuçların değerlendirilmesi için önem taşımaktadır. Ana varsayım ise çekirdek malzemede oluşan enine şekil değiştirme ve gerilmelerin yok sayılmasıdır (çekirdek bölge enine sıkıştırılmaz ve sadece kayma deformasyonu hesaba katılmaktadır) [165, 166].

Sandviç kompozit kirişin farklı bileşenlerine ait geometrik detaylar Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekilde, t_s ve t_c sırasıyla yüzey tabakanın ve çekirdek malzemenin kalınlıklarını ve d ise, yüzey tabakaların merkezi, arasındaki mesafeyi t_c+t_s vermektedir. h ve b sırasıyla kesitin toplam yüksekliği ve genişliğidir.

Sandviç kiriş kesiti göz önüne alındığında, yüzey tabakaların ve çekirdeğin, merkezi eksen-yy'ye göre genel atalet momentine katkısı, teorik eğilme rijitlik değeri $D=EI$ olarak ifade edilir.



Şekil 3.1: Sandviç kompozit kesitin detayları [19].

$$D = 2 \left[E_s \cdot \left(\frac{bt_s^3}{12} \right) + E_s \cdot \left(\frac{bt_s d^2}{4} \right) \right] + \left[E_c \cdot \left(\frac{bt_c^3}{12} \right) \right] \quad (3.1)$$

$$D = E_s \cdot \frac{bt_s d^2}{2} + E_s \cdot \frac{bt_s^3}{6} + E_c \cdot \frac{bt_c^3}{12} = D_o + 2D_s + D_c$$

Denklem 3.1, sandviç yapının eşdeğer eğilme rijitlik değerini vermektedir [19]. E_s , yüzey tabaka malzemesinin elastik modülü, E_c ise köpük çekirdeğinin elastik modülüdür. Denklemlerde “s” ve “c” alt ifadeler sırasıyla yüzey tabaka ve çekirdek malzemeleri ifade etmektedir. İlk terim, yüzey tabakaların kendi merkez eksenleri etrafındaki yerel eğilme rijitlik değerlerine karşılık gelmektedir ve $d / t > 5.77$ olduğunda, çok ince yüzey tabakaları $t_s \ll t_c$ için ihmal edilebilmektedir. İkinci terim, yüzeylerin tüm kesitin merkez çizgisine göre eğilme rijitlik değeridir. Üçüncü terim, köpük çekirdeğin rijitlik değeridir ve köpük çekirdeğin elastik modülü, yüzey tabakasının malzemesinden yeterince küçük; $E_c \ll E_s$ ise göz ardı edilebilir (Denklem 3.2). Bu nedenle, eğer bu koşullar doğrulanırsa, eğilme rijitlik ifadesi Denklem 3.3 formuna indirgenmektedir [19].

$$\frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{t_s d^2}{t_c^3} > 16.7 \quad (3.2)$$

$$D = E_s \cdot \frac{bt_s d^2}{2} \quad (3.3)$$

Sandviç kompozit yapının kayma rijitliği, $T_z(x)$ enine kesme kuvveti ile oluşan kayma gerilmesi neticesinde kesitte oluşan deformasyon miktarı göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Kayma deformasyonunun sadece çekirdekte (zayıf çekirdek $E_c \ll E_s$ ve ince yüzey tabaka) meydana geldiği ve kayma gerilmesinin çekirdeğin her kesiti için sabit olduğu varsayılmaktadır (bkz. Denklem 3.4). Kayma açısı γ_{xz} ile ifade edilen kayma gerilmesi formülasyonu ise Denklem 3.5’ de verilmiştir. Denklem 3.5’ de, G , çekirdek malzemenin kayma modülüdür. Kayma rijitliği, U , enine kesitin ortalama kayma açısı hesaplanarak bulunmaktadır (bkz. Denklem 3.6). Denklem 3.7’ de kesme kuvvetinin etkisinde şekil değiştirme enerjisi denklemleri kullanılarak kayma rijitlik değeri ifade edilmiştir. İnce yüzey tabakalar için ve $d = t_c + t_s$ ise (bkz. Şekil 3.1), ifade denklem formuna basitleştirilebilir. Genellikle dikdörtgen kesitler için, kayma rijitliği U , $A.G$ olarak belirtilir, burada A enine kesit alanıdır.

$$\tau_{xz} = \frac{T_z(x)}{bd} \quad (3.4)$$

$$\tau_{xz} = G \cdot \gamma_{xz} = \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \cdot \frac{T_z(x)}{bd} \quad (3.5)$$

$$\gamma = \frac{T_z(x)}{bU} \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{2} \int T_z(x) \gamma = \frac{1}{2} \int \tau_{xz} \gamma_{xz} dz = \frac{1}{2} \int_{-\frac{t_c}{2}}^{\frac{t_c}{2}} \frac{T_z(x)}{bd} \cdot \frac{T_z(x)}{Gbd} dz = \frac{T_z(x)^2 \cdot t_c}{2Gb^2d^2} \quad (3.7)$$

$$\frac{T_z(x)^2}{2bU} = \frac{T_z(x)^2 \cdot t_c}{2Gb^2d^2} = U = \frac{b \cdot d^2}{t_c} \cdot G \cong b \cdot t_c \cdot G = A \cdot G$$

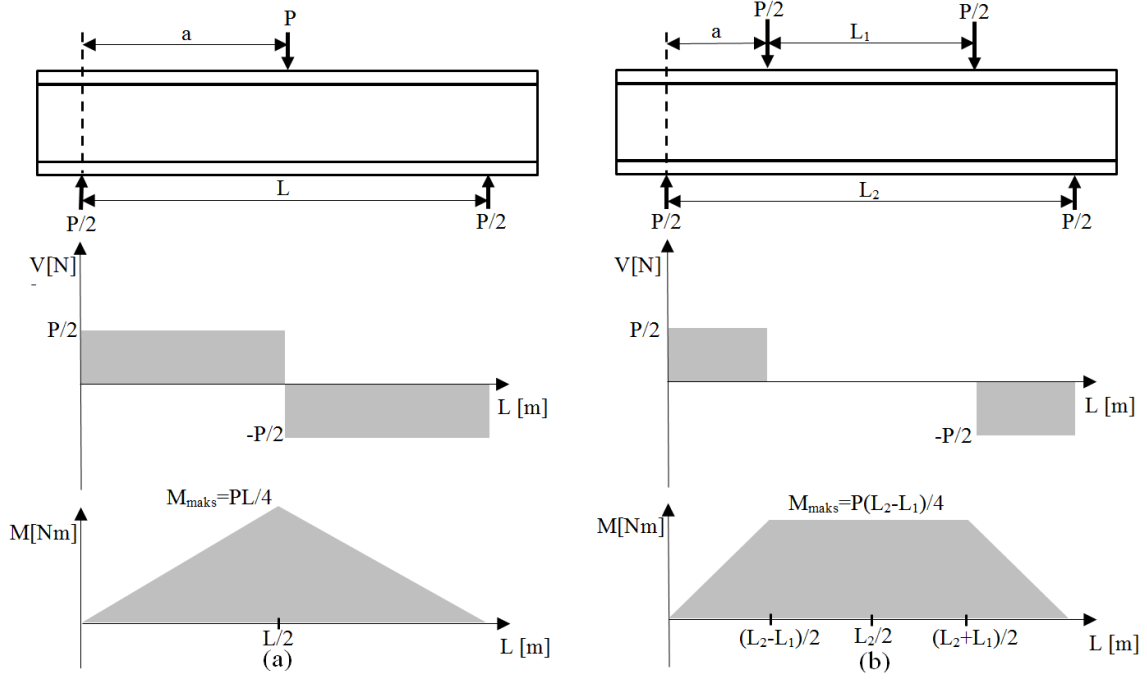
3.2 Sandviç Kompozit Kirişlerin Sehim Değerlerinin Hesaplanması

Sandviç kompozit panellerin yük-deplasman davranışını elde etmek için kullanılan kayma şekil değiştirme teorisi, toplam deplasmanı eğilme ve kayma sehim değerlerinin toplamı olarak hesaplamaktadır. Çekirdeğin yüzey tabakalarına kıyasla nispeten düşük kayma rijitlik değerine sahip olması sandviç yapının kayma deformasyonu miktarının artışına neden olmaktadır. Bu durumda, sandviç kompozit malzemenin toplam sehim hesabı denklem 3.8 şeklinde yazılabilir [9].

$$\delta_{\text{toplam}} = \delta_{\text{eğilme}} + \delta_{\text{kayma}} \quad (3.8)$$

δ_{toplam} , $\delta_{\text{eğilme}}$ ve δ_{kayma} ifadeleri sırasıyla toplam sehim ifadesini, eğilme ve kayma yüklerinden kaynaklanan sehim bileşenlerini belirtmektedir.

Uygulanan bir P yükü ve kesme açıklığı a olan basit mesnetlenmiş kirişlerin üç (3) ve dört (4) nokta eğilme yükleri altında kesme (V) ve moment (M) diyagramları Şekil 3.2' de verilmiştir. Kirişlerin eğilme momentinden kaynaklanan sehim değerlerinin hesabında moment-alan metodu kullanılmıştır [74, 83]. Kayma yer değiştirme miktarı için k/AG faktörü uygulanmış, denklemde AG sandviç yapının kayma rijitliği ve k ise kesme düzeltme faktörü olarak bilinmektedir. Üç (3) ve dört (4) nokta eğilme testleri için kesme açıklıkları sırasıyla $a = L/2$ ve $a = L/3$, kayma düzeltme faktörü ise $k=1.0$ olarak belirlenmiş, toplam sehim değerleri ise sırasıyla denklem (3.11) ve (3.14) verilmiştir.



Şekil 3.2: Üç (3) nokta ve dört (4) nokta eğilme yüklemeleri altında kesme (V) ve moment (M) diyagramları [87, 167].

$$\delta_{\text{eğilme}} = \int_0^a \left(\frac{M}{EI} \right) \frac{2}{3} x dx = \frac{PL^3}{48EI} \quad (3.9)$$

a=kesme açıklığı=L/2

$$\delta_{\text{kayma}} = \frac{k}{2GA} |Px|_0^a = \frac{PL}{4GA} \quad (3.10)$$

$$\delta_{\text{toplam}} = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{PL}{4GA} \quad (3.11)$$

$$\delta_{\text{eğilme}} = \int_0^a \left(\frac{M}{EI} \frac{x}{a} \right) x dx + \int_a^{L/2} \left(\frac{M}{EI} \right) x dx = \frac{23PL^3}{1296EI} \quad (3.12)$$

a=kesme açıklığı=L/3

$$\delta_{\text{kayma}} = \frac{k}{2GA} |Px|_0^a = \frac{PL}{6GA} \quad (3.13)$$

$$\delta_{\text{toplam}} = \frac{23PL^3}{1296EI} + \frac{PL}{6GA} \quad (3.14)$$

3.3 Sandviç Kompozit Kirişlerde Normal Ve Kayma Gerilmelerinin Hesaplanması

Normal ve kayma gerilme dağılımları ise analitik olarak aşağıdaki denklemler vasıtasıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma_s = \frac{M_y z E_s}{D} \quad \frac{t_c}{2} < |z| < \frac{t_c}{2} + t_s \quad (3.15)$$

$$\sigma_c = \frac{M_y z E_c}{D} \quad |z| < \frac{t_c}{2} \quad (3.16)$$

burada $D=EI$ ve E_s , sırasıyla tüm sandviçin yapının eğilme rijitliği ve yüzey tabakanın elastik modülüdür. Sandviç kompozit yapının toplam eğilme rijitliği, bileşik parçaların eğilme rijitliklerinin merkez eksene göre toplamı hesaplanarak (nötr eksene taşıma) elde edilmiştir. Eğilme rijitliği, EI , denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

Sandviç yapılarda kayma gerilmesinin merkez ekseninde maksimum ve üst ve alt yüzeylerde sıfır olduğu bilinmektedir. Yapıdaki kayma gerilimi ise denklem 3.17 ile hesaplanmaktadır. Yüzey tabakada ve çekirdek malzemede oluşan kayma gerilmeleri sırasıyla denklem 3.18 ve 3.19 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} \quad (3.17)$$

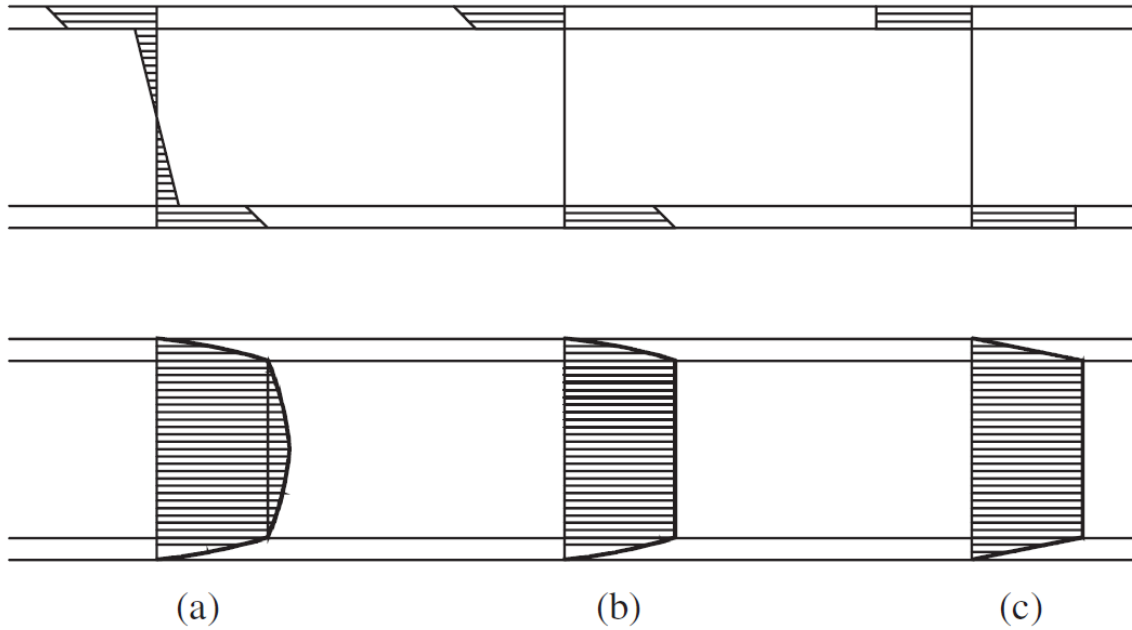
$$\tau_s(z) = \frac{VE_s}{2D} \left(\frac{t_c^2}{4} + t_s t_c + t_s^2 - z^2 \right) \quad \frac{t_c}{2} < |z| < \frac{t_c}{2} + t_s \quad (3.18)$$

$$\tau_c(z) = \frac{V}{D} \left[\frac{E_s t_s d}{2} + \frac{E_c}{2} \left(\frac{t_c^2}{4} - z^2 \right) \right] \quad |z| < \frac{t_c}{2} \quad (3.19)$$

burada V , panelin kesitinde oluşan enine kesme kuvvetidir ve Q , alanın moment değeridir (ilgilenen bölgenin üstündeki kısmın merkez eksenine göre momenti değeri).

Normal ve kayma gerilmesi dağılımları Şekil 3.3 'de gösterilmektedir. Eğer $E_c \ll E_s$ ise gerilme dağılımları Şekil 3.3 (b) 'de gösterilen idealize edilmiş şekillere yaklaşmakta ve ek olarak $t_s \ll t_c$ şartı sağlanırsa, Şekil 3.3 (c)' deki gibi daha da idealize edilmiş dağılım gösterirler ($\sigma_c=0$, $\tau_s=0$). İdealleştirilmiş koşullar için (Şekil 3.3 (c)), normal ve kayma

gerilmelerine ilişkin formüller yaklaşık olarak aşağıdaki denklem 3.20 ve 3.21' de verilmiştir [19].



Şekil 3.3: Sandviç kompozit kesitte oluşan normal (σ) ve kayma (τ) gerilme dağılım profilleri a) Yaklaşım yok, b) $E_c \ll E_s$, c) $E_c \ll E_s$ ve $t_s \ll t_c$ [19].

$$\sigma_s = \frac{M_y}{t_s db} \quad (3.20)$$

$$\tau_c = \frac{V}{db} \quad (3.21)$$

3.4 Sandviç Kompozit Malzemelerin Hasar Yükleri ve Mekanizmaları

Sandviç kompozit yapıların hasar davranışları ise birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Başlıca kaygı, değişken malzeme özelliklerine ve geometrilere sahip sandviç kompozitlerin farklı mekanik yükler ve çevresel koşullar altında dayanabileceği kritik hasar yükünü belirlemek olmuştur. Bununla birlikte, sandviç yapıların karmaşık yapılarına bağlı olarak (malzeme seçeneklerinin geniş olmasından ötürü), farklı senaryolar altında birçok farklı hasar tipi belirlenmiştir. Özel hasar tipleri aynı anda ortaya çıkabilmekte ve/veya herhangi bir hasar tipi başka birini tetikleyebilmektedir. Bu nedenle, yapının nihai hasarı beklenenden farklı özelliklere sahip olabilmektedir.

Son yıllarda bazı araştırmacılar bazı referans yükleme koşullarını ve sandviç yapıları seçerek hasar mekanizmalarına yol açan koşulları sistematik yolla çalışmıştır. Üç (3) nokta eğilme testi, hasar modellerinin geliştirilmesinde ve parametrik hasar haritalarının inşa edilmesinde en yaygın kullanılan temel ölçütlerden biri olmuştur. Steeves ve Fleck, cam elyaf/epoksi yüzey tabakası ve polimer köpük çekirdek içeren sandviç kirişlerin üç nokta eğilme davranışını araştırmıştır [168, 169]. Testlerde çekirdek kayma (kesilmesi) hasarı, üst/alt tabaka hasarı (çekme/basma), yüzey katlanması (burkulması) ve çekirdek ezilmesi hasarlarına neden olan gerilme değerleri için analitik denklemler türetilmiştir. Bu hasar tiplerinin şematik görünüşü Şekil 3.4’de gösterilmektedir. Farklı hasar tipleri için çıkarılan denklemler, sandviç yapıların hasar mekanizması haritalarının ve minimum ağırlık tasarımlarının kurulumunda kullanılmıştır. Geliştirilen analitik ifadelerin deneysel ve sayısal doğrulaması ise diğer makalelerinde gösterilmiştir [169]. Tagarielli vd. [170], Steeve ve Fleck’in geliştirdiği denklemleri üç nokta eğilme yükü altında test edilen ankastre mesnetli sandviç kirişler için genişletmiştir. Öne sürülen analitik ifadeler ile deneysel ve sonlu elemanlar sonuçları uyum göstermiştir. Üretilen hasar mekanizması haritaları, E-cam/vinilester tabaka ve PVC köpük içeren sandviç kirişlerin minimum ağırlık tasarımlarının elde edilmesinde uygulanmıştır. Gibson ve Ashby [171], Triantafillou ve Gibson [172, 173], Lingaiah ve Suryanarayana [174], Theotokoglou [175], Zenkert [19], Chen vd. [176] ve Lim vd. [177] gibi araştırmacılar da eğilme testlerinde karşılaşılan hasar mekanizmalarını doğrulamışlardır. Ayrıca farklı yüklemeler (düzlem içi yüklemeler) neticesinde genel burkulma ve kayma katlanması (burkulması) gibi hasarlara da rastlandığı bilinmektedir (bkz. Şekil 3.4). Sandviç yapılar için en yaygın eğilme hasar türlerinin ise çekme-basma hasarları (yüzey tabakası ve çekirdek malzeme) ve çekirdek kesilmesi (kayma hasarı) olduğu gözlenmiştir [172, 178]. Aşağıda verilen şartlar sağlandığında çekme/basma ve çekirdek kayma hasarları gerçekleşmektedir [69].

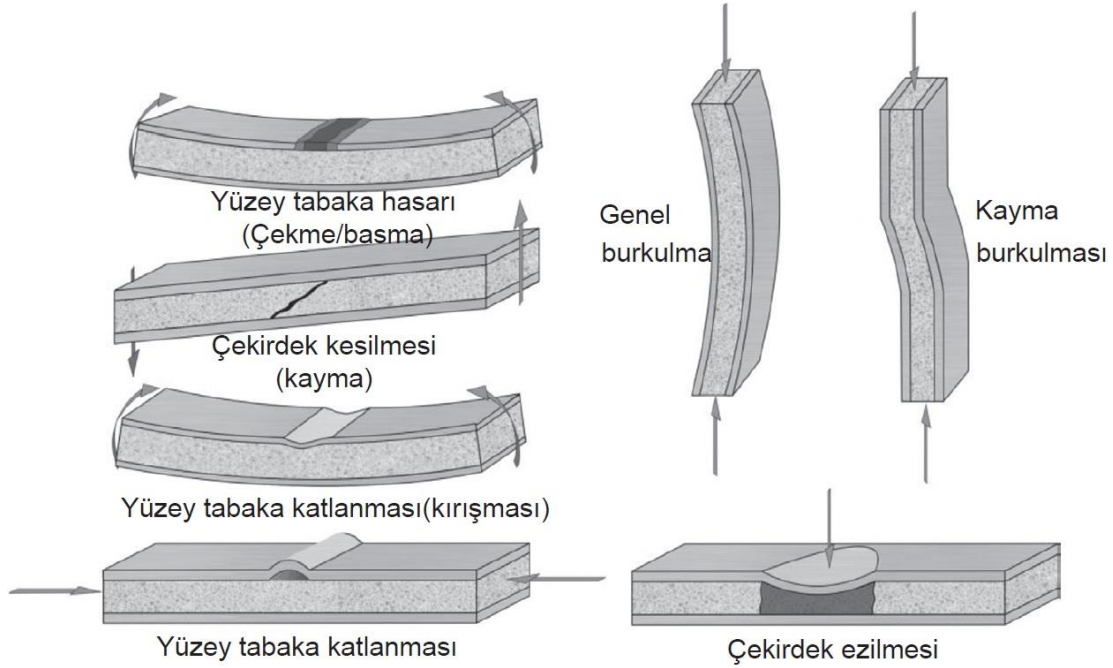
1. Yüzey tabaka çekme/basma hasarı: $-\sigma_{sb} \leq \sigma_s \leq \sigma_{sc}$

2. Çekirdek kayma (kesilmesi) hasarı: $\tau_c \leq \tau_{ck}$

3. Çekirdek çekme/basma hasarı: $-\sigma_{cb} \leq \sigma_c \leq \sigma_{cc}$

Yukarıdaki sınır şartlarında, σ_{sb} , σ_{cb} : yüzey tabaka ve çekirdek malzeme basma dayanımı, σ_{sc} , σ_{cc} : yüzey tabaka ve çekirdek malzeme için çekme dayanımı ve τ_{ck} =çekirdek malzeme kayma dayanımı değerlerine karşılık gelmektedir. Alt ifadelerde ilk terim “s” ve “c” sırası

ile yüzey tabaka ve çekirdek malzeme için, ikinci terimler “b” ve “c” basma ve çekme zorlamaları için kullanılmıştır.



Şekil 3.4: Sandviç kompozit malzemede karşılaşılan genel hasar türleri [179].

3.4.1 Çekme-Basma Yüğü Altında Kritik Hasar Yüğülerinin Hesabı

Yüzey tabakanın düzlem içi hasarı (çekme/basma), uygulanan yükün tabaka malzemesinin dayanım değerlerine ulaştığında meydana gelmektedir. Sandviç panellerin hasarı genel olarak üst tabakaya etki eden basma yükü nedeniyle ortaya çıkmaktadır, çünkü tabakalar basma dayanımından daha yüksek bir çekme dayanımına sahiptir. Klasik sandviç teorisinde, eksen doğrultusundaki şekil değiştirmenin Euler-Bernoulli teorisinde olduğu gibi kirişin kesitinde doğrusal olarak değiştiği varsayılmaktadır. Bu nedenle, hasar yükü tespitinde eğilme momentinden kaynaklanan normal gerilme denklemi (Denklem 3.22) kullanılmıştır [175].

$$\sigma_{sb} = \frac{M_y h E_s}{2EI} \quad (3.22)$$

burada σ_{sb} , yüzey tabakanın basma dayanımıdır, M, moment ve I, nötr eksene göre hesaplanan ikinci alan momenti, h ise sandviç yapının toplam kalınlığıdır. Bu denklem kullanılarak kirişlerin basma hasarına neden olan kritik yük ($P_{s,kr}$) değerleri tespit

edilebilmektedir. Denklemler 3.23 ve 3.24 sırası ile üç (3) ve dört (4) nokta yüklemeleri için belirlenen yüzey tabakaya ait kritik basma hasar yüklerini vermektedir.

$$P_{s,kr} = \frac{8\sigma_{sb}EI}{LE_s h} \quad M_{maks} = \frac{PL}{4} \quad \text{Kesme açıklığı } a=L/2 \quad (3.23)$$

$$P_{s,kr} = \frac{12\sigma_{sb}EI}{LE_s h} \quad M_{maks} = \frac{PL}{6} \quad \text{Kesme açıklığı } a=L/3 \quad (3.24)$$

Çekme ve basma normal gerilmeleri, çekirdek malzemenin mukavemet değerlerini aştığı takdirde ise, çekirdek malzemede hasar gerçekleşmektedir. Bu hasar modu için kritik yük $P_{c,kr}$ denklemler 3.25 ve 3.26 tarafından tahmin edilmektedir. Çekirdek malzeme için hasar yükü hesaplamaları sadece dört (4) nokta eğilme yükü durumu için yapılmıştır.

$$P_{c,kr} = \frac{12\sigma_{cb}EI}{LE_c t_c} \quad \text{Kritik basma hasar yükü hesabı} \quad (3.25)$$

$$P_{c,kr} = \frac{12\sigma_{cc}EI}{LE_c t_c} \quad \text{Kritik çekme hasar yükü hesabı} \quad (3.26)$$

burada σ_{cb} ve σ_{cc} çekirdek malzemenin sırasıyla basma ve çekme dayanım değerleridir.

3.4.2 Çekirdek Kayma Hasarı Yükü Hesabı

Kayma hasarı çekirdeğin kayma dayanımı aşıldığında ortaya çıkmaktadır [169]. Sandviç kompozit paneller için çekirdek kayma dayanımı tahmin edilebilir, çünkü yapının kesitinde maksimum kayma gerilimi nötr ekseninde meydana gelir ve panelin hem üst hem de alt yüzeylerinde ise sıfır değerini almaktadır. Çekirdek malzemede oluşan maksimum kayma gerilmesi (kesitin orta kısmında) ve kritik hasar yükü ise sırasıyla aşağıdaki denklemler 3.27 [19], 3.28 [85] ve 3.29 [85] ile hesaplanmaktadır.

$$\tau_c(\text{maks}) = \frac{V}{2D} \left[\frac{E_s t_s d}{2} + \frac{E_c t_c^2}{8} \right] \quad z=0 \text{ maksimum çekirdek kayma gerilmesi oluşmaktadır.} \quad (3.27)$$

$$P_{c,kr} = \frac{2\tau_{ck}EI}{\left[\frac{E_s t_s d}{2} + \frac{E_c t_c^2}{8} \right]} \quad (3.28)$$

$$P_{c,kr} = \frac{2\tau_{ck}GI}{\left[\frac{G_s t_s d}{2} + \frac{G_c t_c^2}{8}\right]} \quad (3.29)$$

τ_{ck} , çekirdek malzemenin kayma dayanımıdır. Çekirdek ve yüzey tabakasına ait elastik modül oranı (E_c/E_s), kayma modülleri oranından (G_c/G_s) çok daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, kayma modül değerlerinin kullanılmasının, kayma kritik yük hesaplamalarında daha olumlu sonuçlar verdiği bilinmektedir [73]. Denklem 3.28 ve 3.29 kritik kayma yükü hesaplamalarını vermektedir. Eşdeğer kayma rijitliği ifadesi (GI) denklem 3.29' da kullanılmıştır. Hesaplama yüzey tabakasının ve çekirdek malzemenin elastikiyet modül ifadeleri kayma modülüyle değiştirilmiştir.

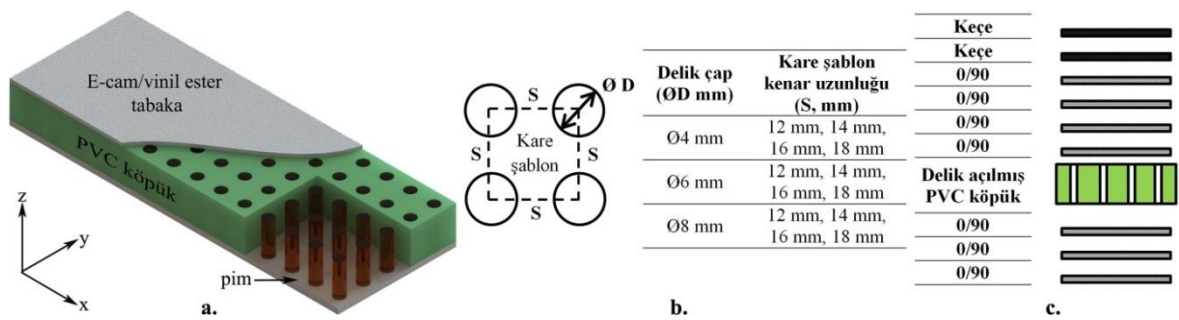
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda tez kapsamında çalışılan farklı çekirdek modifikasyonları uygulanmış denizel sandviç kompozitlerin malzeme karakterizasyonu, üretim ve test bilgileri yer almaktadır.

4.1 Pim Takviyeli PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozitler

4.1.1 Materyal ve Üretim

Bu alt bölümde, E-cam/vinil ester tabakalı ve kapalı hücreli PVC köpük çekirdek içeren pim takviyeli denizel sandviç kompozitler çalışılmıştır. Çekirdek yapı olarak Airex C70.75 ticari marka ile satılan 80 kg/m^3 yoğunluğa sahip, 25 mm kalınlığında köpük malzeme seçilmiştir. Kare düzene sahip delik şablonları köpük malzemeye et kalınlığı boyunca CNC freze tezgâhında işlenmiştir. Ardından delikler, tozu ve diğer parçacıkları çıkarmak için basınçlı hava ile temizlenmiştir. Delikler, hem infüzyon işlemi sırasında reçinenin akışını kolaylaştırmak hem de pim oluşumunu sağlamak amacıyla köpük malzemeye açılmıştır. Delik çapları ve merkezleri arası uzunluklar (kare şablona ait kenar uzunluğu) Şekil 4.1'de verilmiştir. Tabaka malzeme sistemi ise, sırası ile 850 g/m^2 ve 450 g/m^2 alansal ağırlıklara sahip E-cam çift eksenli kıvrımsız dikişli kumaş ve E-cam keçelerden oluşmaktadır. Üst ve alt tabakaların istiflenme düzenleri ve kalınlıkları Tablo 4.1'de verilmiştir. Tabakaların efektif mekanik özellikleri (kumaşların çözgü yönünde ve giriş uzunluk yönünde) ISO ve ASTM test standartlarına göre belirlenmiş [180-183] ve Tablo 4.2'de listelenmiştir (bkz. Şekil A.1, A.2). PVC köpük fiziksel ve mekanik özellikleri ise ticari ürün verilerinden elde edilmiştir [184] (bkz. Tablo 4.3).



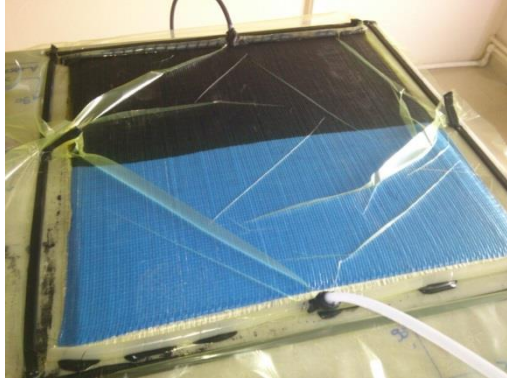
Şekil 4.1: Pim takviyeli sandviç kompozit malzemelerin şematik gösterimi.

Sandviç kompozit paneller Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Malzeme ve Mekanik laboratuvarında VARIM metodu kullanılarak ile üretilmiştir. Vakum infüzyon üretimi sırasında vakum pompası negatif basınç sağlanmıştır. Pim takviyeli sandviç kompozitlerin

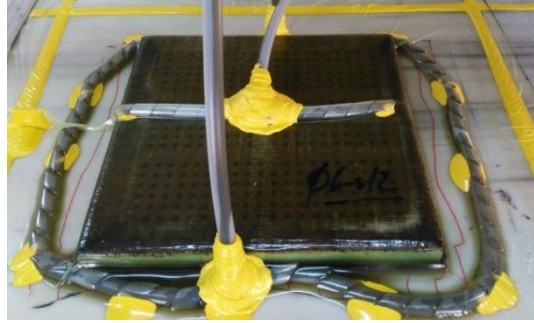
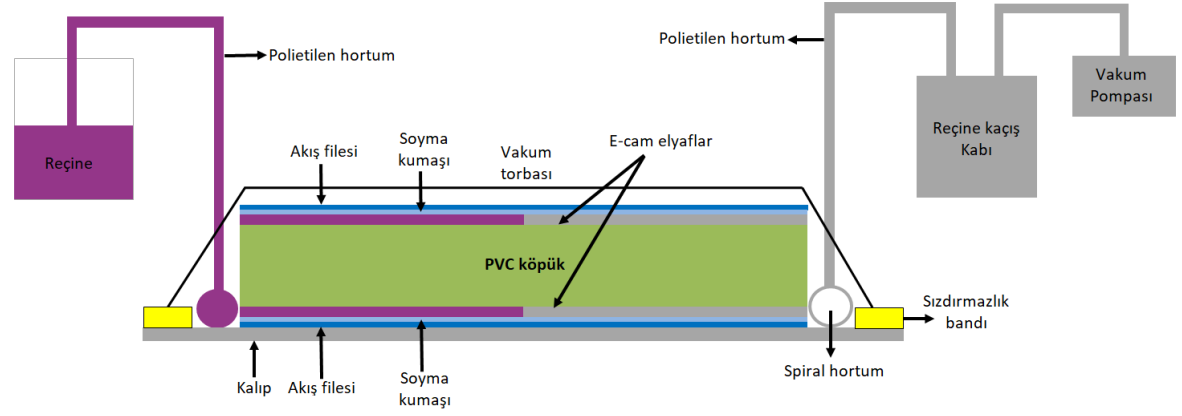
üretiminde kalıp üzerinde vakum ve reçine hatları belirlendikten sonra, spiral hortumlar sandviç plaka etrafına yerleştirilmiştir. Reçine hattı spiral hortumlara bağlanmış ve vakum hattı ise sandviç plakanın üst kısmına yerleştirilmiştir. Böylece reçinenin sandviç kompozit plakayı alt kısımdan başlayarak vakum hattına ulaşana kadar ıslatması sağlamıştır; çevresel besleme yapılmıştır. Delik açılmış PVC çekirdek malzeme içeren sandviç plaka üretiminde akış filesi ve soyma kumaşı kullanılmasına gerek kalmamıştır (bkz. Şekil 4.2(b)). Referans numune olarak isimlendirilen düz PVC içeren plakalar ise lineer besleme uygulanarak üretilmiştir (bkz. Şekil 4.2(a)). VARIM üretimine uygun Poliya marka Polives 702 infüzyon tipi Bisfenol-A Epoksi vinilester reçine tercih edilmiştir. Reçine içerisine, sertleştirici olarak ağırlıkça %1-2 oranında Butanox M60 MEKP (Metil etil keton peroksit), hızlandırıcı olarak ağırlıkça %0.2-0.5 oranında kobalt naftanat kullanılmıştır. Sandviç kompozit paneller test numunesi olarak kesilmeden önce iki (2) hafta kadar tamamen kürleşmesi için açık havada bekletilmiştir. Sandviç paneller bu kısımda delik çap (mm) ve merkezleri arası uzunluk (mm) belirtilerek isimlendirilecektir. Örnek olarak, Ø4-s12, Ø4 mm delik çapı ve 12 mm; delik merkezleri arası uzunluğu temsil etmektedir.

Tablo 4.1: Yüzey tabakaların istiflenme düzeni

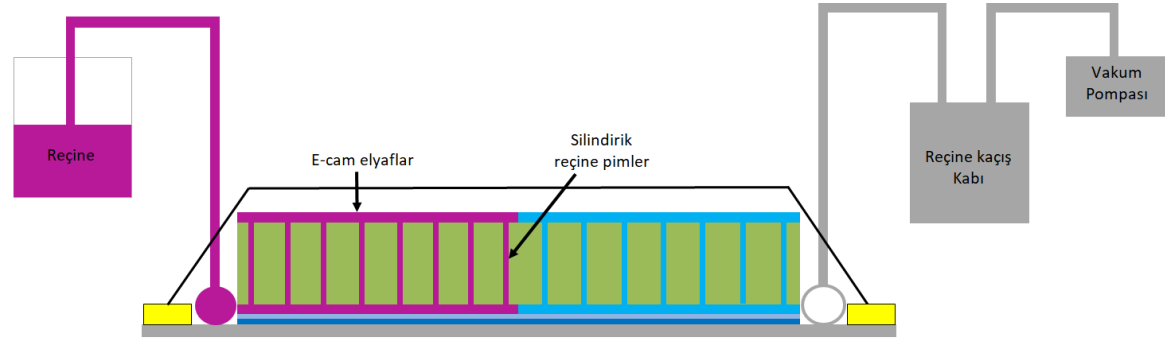
Tabaka	Kalınlık	İstiflenme Düzeni	Katmanlar	Alansal ağırlık (kg/m ²)
Üst tabaka	4 mm	1	Keçe	0.45
		2	Keçe	0.45
		3	Çift eksenli 0/90 kumaş	0.85
		4	Çift eksenli 0/90 kumaş	0.85
		5	Çift eksenli 0/90 kumaş	0.85
		6	Çift eksenli 0/90 kumaş	0.85
Alt tabaka	2.4 mm	1	Çift eksenli 0/90 kumaş	0.85
		2	Çift eksenli 0/90 kumaş	0.85
		3	Çift eksenli 0/90 kumaş	0.85



a) Lineer besleme



b) Çevresel besleme



Şekil 4.2: Sandviç kompozit plakalara ait VARIM üretim resimleri ve şematik gösterimleri a) Düz PVC içeren referans plaka, b) Pim takviyeli köpük içeren sandviç kompozit plaka

Tablo 4.2: Yüzey tabakaların mekanik özellikleri

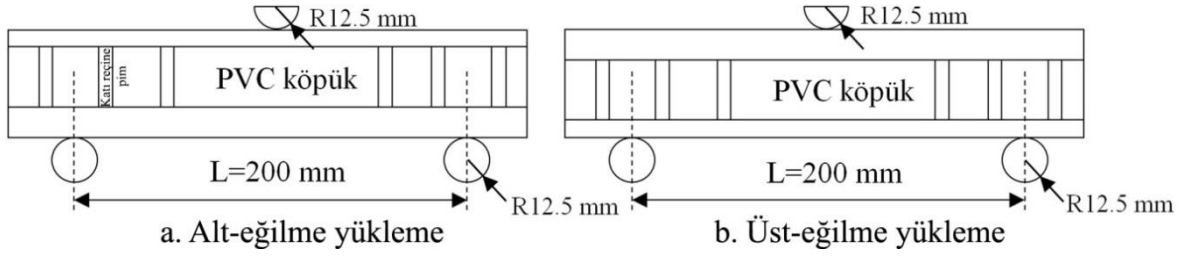
Test	Standart	Özellik	Üst tabaka	Alt tabaka
Eğilme	ISO 14125[180]	Modül (GPa)	14.77	12.19
		Dayanım (MPa)	431.38	378.75
Çekme	ISO 527-1[181]	Modül (GPa)	22.49	20.69
		Dayanım (MPa)	394.13	355.92
		Poisson oranı	0.17	0.143
Basma	ASTM D6641[182]	Dayanım (MPa)	244.18	226.67
Kayma	ASTM D7078[183]	Modül (GPa)	4.37	4.07
		Dayanım (MPa)	53.5	51.6

Tablo 4.3: AIREX® C70.75 köpük malzemenin mekanik özellikleri [184]

Özellik	Standart	Birim (metrik)	Değer (min-maks)
Yoğunluk	ISO 845	kg/m ³	72 - 92
Düzlem dışı basma mukavemeti	ISO 844	N/mm ²	1.10-1.45
Düzlem dışı basma modülü	DIN 53421	N/mm ²	80-104
Düzlem içi çekme mukavemeti	ISO 527 1-2	N/mm ²	1.6-2.0
Düzlem içi çekme modülü	ISO 527 1-2	N/mm ²	50-66
Kayma mukavemeti	ISO 1922	N/mm ²	1.0-1.2
Kayma modülü	ASTM C393	N/mm ²	24-30
Maksimum kayma uzaması	ISO 1922	%	10-18
Isıl iletkenlik katsayısı (Oda sıcaklığında)	ISO 8301	W/m.K	0.033

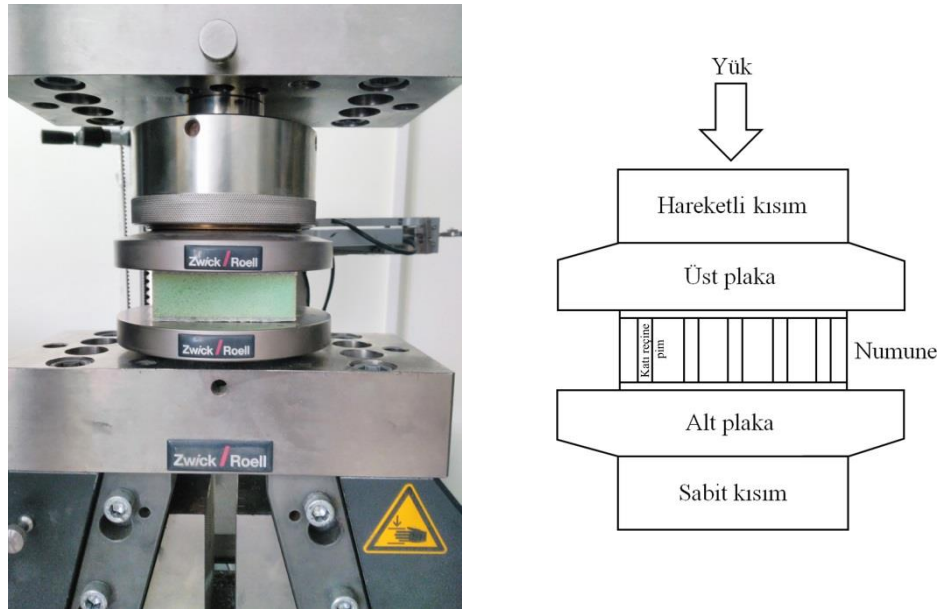
4.1.2 Test Standartları

Sandviç kompozit numunelerin ASTM C393/C393M-11 [185] standartlarına uygun olarak üç (3) nokta eğilme testleri yapılmıştır. Üç (3) nokta eğilme testleri için destek mesafesi 200 mm belirlenmiştir. Eğilme testleri Zwick Roell 250 kN elektromekanik çekme-basma cihazında 6 mm/dak yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında sehim değerleri cihaz üzerinden alınmıştır. Alt ve üst tabakaların farklı olmasından dolayı; balans olmayan kirişler her iki taraftan eğilme yükü altında sırasıyla test edilmiştir. Eğilme test düzeneği Şekil 4.3’de şematik olarak gösterilmiştir. Uyguladığımız test tipolojisi daha önce Di Bella vd.[53, 186] tarafından kullanılmıştır. Test numunelerinin boyutları standart gereği 250 mm x 90 mm olarak belirlenmiştir. Pim takviyeli sandviç (PTS) numunelere ait eğilme hasar yükleri ve hasar durumları, düz köpük yapıları kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır. Her bir numune için en az üç (3) adet test yapılmıştır.



Şekil 4.3: Üç (3) nokta eğilme testi konfigürasyonu a) Alt-eğilme yükleme, b) Üst-eğilme yükleme [185].

Sandviç numunelerin ASTM C365/C365M-05 [187] standardına uygun şekilde 0,5 mm/dk. test hızında düzlem dışı basma testleri yapılmıştır. Pim takviyeli numunelerinin basma dayanımı ve modülü değerleri, kontrol numunesinin sonuçları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Basma testi tertibatının şematik resmi Şekil 4.4’de verilmiştir. Test numunelerin boyutları 80 mm×80 mm olarak belirlenmiştir. Seçilen numunelerin (Ø4-s12, Ø4-s16, Ø6-s14, Ø6-s16, Ø8-s12 ve kontrol numunesi) basma testi sonuçları, çekirdek ezilme dirençlerinin karşılaştırılmasına imkân vermiştir. Basma testi sonuçlarından emin olmak için her numune için testler en az üç kez tekrarlanmıştır.



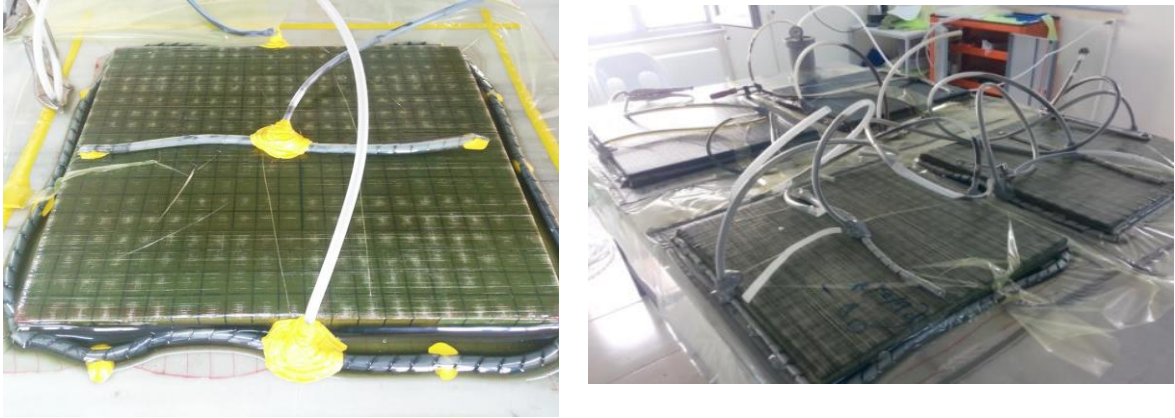
Şekil 4.4: Düzlem dışı basma testi konfigürasyonu [187].

4.2 Delik, Oluk ve Çapraz Kesik İşlenmiş PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç

Kompozitler

4.2.1 Materyal ve Üretim

Çekirdek modifikasyonu uygulanan sandviç kompozit numuneler, E-cam/vinil ester tabaka ve kapalı hücreli PVC köpük içermektedir. Çekirdek malzemesi olarak 80 kg/m^3 yoğunluğa sahip ve 25 mm kalınlığında düz ve çapraz kesik köpük (Airex C70.75, mekanik özellikler için Tablo 4.3'e bakınız) seçilmiştir [184]. Üst ve alt tabakalar için $[0/90]_{2s}$ diziliminde E-cam çift eksenli, kıvrımsız, dikişli 850 g/m^2 alan yoğunluğuna sahip kumaşlar kullanılmıştır. Sandviç paneller VARIM metodu kullanılarak üretilmiştir. Çekirdek modifikasyonu uygulanan plakaların üretimi sırasında çevresel besleme uygulanmıştır (bkz. Şekil 4.5). Düz PVC içeren referans numune ise lineer besleme ile üretilmiştir (bkz. Şekil B.1). Poliya marka Polives 702 Bisfenol-A epoksi vinil ester reçinesi matris malzemesi olarak kullanılmıştır (Tablo 4.4) [188]. Reçine içerisine katılan sertleştirici ve hızlandırıcı oranları bir önceki bölümdeki ile aynı kullanılmıştır. Laminat tabakaların ortalama ölçülen kalınlığı, 2.5 mm ve sandviç yapının toplam kalınlığı ise 30 mm ölçülmüştür. Tabakaların efektif mekanik özelliklerinin ortalama değerleri, ISO ve ASTM standartlarına uygun şekilde yapılan testler neticesinde belirlenmiştir (Tablo 4.5) [180-183].



Şekil 4.5: Sandviç kompozit panel üretimi (çevresel besleme).

Tablo 4.4: Sertleşmiş Polives™ 702 reçine için mekanik özellikleri [188]

Özellik	Standart	Sapma	Değer
Yoğunluk (gr/cm ³)	ISO 1675	±%5	1.004
Eğilme Mukavemeti (MPa)	ISO 0178	±%10	155
Eğilme modülü (GPa)	ISO 0178	±%10	3.5
Kopmadaki uzama (%) - eğilme	ISO 0178	±%10	6
Çekme mukavemeti (MPa)	ISO 0527	±%10	76
Çekme modülü (GPa)	ISO 0527	±%10	3
Kopmadaki uzama (%) - çekme	ISO 0527	±%10	5

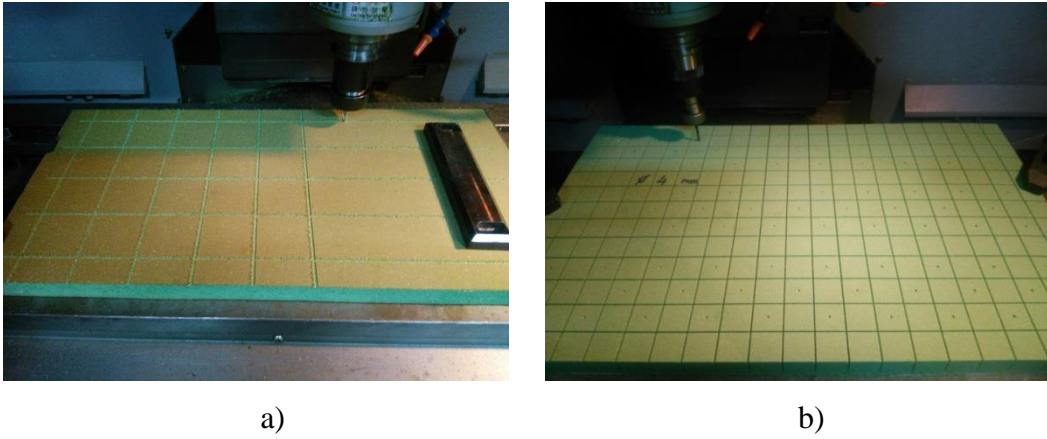
Tablo 4.5: [0/90]_{2s} E-cam/ vinil ester tabakanın efektif mekanik özellikleri

Test	Standart	Özellik	Çözgü	Atkı	
Eğilme	ISO 14125[180]	Modül (GPa)	18.16	11.4	
		Dayanım (MPa)	431	396	
Çekme	ISO 527-1[181]	Modül (GPa)	22.5	22.8	
		Dayanım (MPa)	332	464	
		Maksimum uzanım (%)	1.89	2.61	
		Poisson oranı	v12	0.107	
			v21	0.117	
Modül (GPa)	22.5	22.8			
Basma	ASTM D6641[182]	Dayanım (MPa)	149	218	
		Maksimum uzanım (%)	1.13	1.97	
Kayma	ASTM D7078[183]	Modül (GPa)	4.96		
		Dayanım (MPa)	51.6		

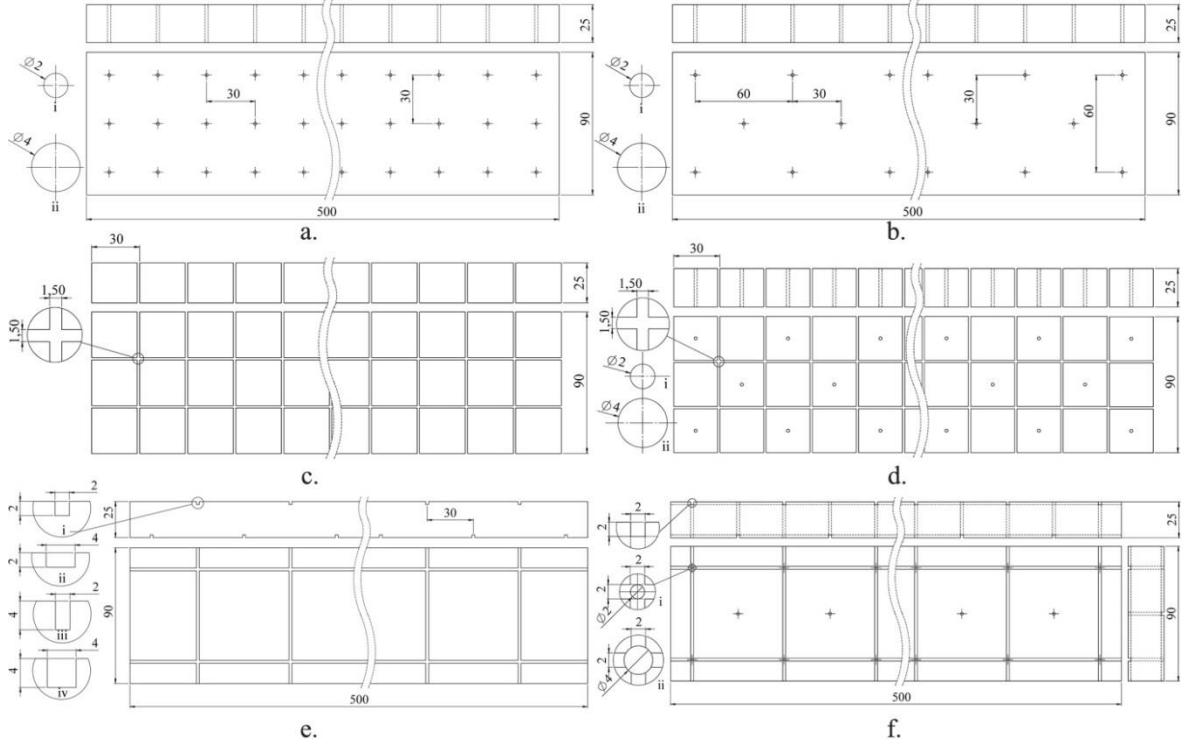
Bu bölümde, beş farklı tasarım: delik açılmış köpük (DKS), çapraz-kesik köpük (ÇKS), delik açılmış çapraz-kesik köpük (DÇKS), oluk açılmış köpük (OKS) ve delik-oluk (DOKS) açılmış köpük içeren sandviç kompozitlerin eğilme davranışları araştırılmıştır. Sonuçlar, düz köpük içeren referans numunesi ile karşılaştırılmıştır. PVC köpük malzemeye, Ø2 mm ve Ø4 mm çapında delikler ve farklı boyutlarda oluklar CNC freze tezgâhında işlenmiştir (bkz. Şekil 4.6 (a), (b)). Çekirdek modifikasyonlarının detaylı şematik resmi Şekil 4.7' de verilmiştir. Sıvı reçine, delik ve oluk boşluklarını VARİM üretimi sırasında doldurmuş, katılarak pim ve yiv olarak sertleşmiştir. Önceki çalışmalarda, delik merkezi arasındaki uzaklık 30 mm 'in üzerine çıktığında kuru alanlar;

ıslanma problemi gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada deliklerin merkezleri arası 30 mm olarak belirlenmiştir. Çapraz-kesik köpükler ise katı reçine kaburga içeren sandviç kompozitlerin üretiminde kullanılmıştır.

Şekil 4.7 (a) ve (b), "K" kare ve 2 "ve" X " çapraz düzene sahip Ø2 mm ve Ø4 mm çapında delik açılmış köpük yapıları sandviç tasarımını (DKS) göstermektedir. Şekil 4.7 (c), çapraz-kesik köpük yapıları sandviç yapıyı (ÇKS) göstermektedir. Delik açılmış çapraz-kesik köpük yapıları sandviç kompozitler (DÇKS) Şekil 4.7 (d)'de gösterilmiştir. Oluk içeren köpük yapıları numunelerde (OKS), köpüğün üst ve alt yüzeylerinde merkezleri (çakışık olmayan) arası 30 mm olan 2 mm x 2 mm, 4 mm x 4 mm, 4 mm x 2 mm ve 2 mm x 4 mm ölçülerinde oluklar açılmıştır (Şekil 4.7 (e)). Delik-oluk içeren köpük içeren sandviç yapılarında (DOKS) ise 2 mm x 2 mm yüzeyel oluklar ile birlikte Ø2 mm ve Ø4 mm çaplara sahip delikler işlenmiştir (Şekil 4.7 (f)). PVC köpük yüzeyine açılan olukların sıradan sandviç kompozit panellerin kayma özelliklerini ve delaminasyon direncini arttırdığı görülmüştür. Bu nedenle oluk geometrisi, ağırlık artışını asgari düzeyde olması için küçük tutulmuştur.



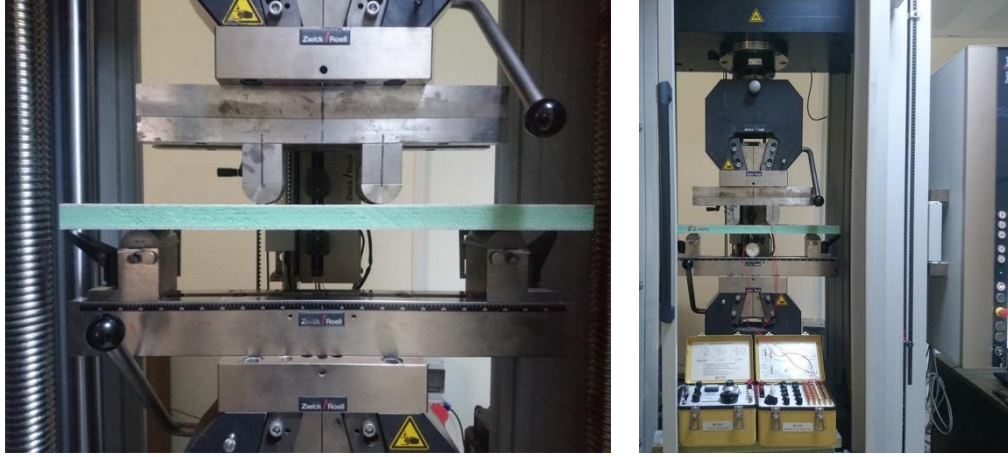
Şekil 4.6: PVC köpük malzemenin CNC tezgâhında işlenmesi a) Oluk açma, b) Delik delme.



Şekil 4.7: Çekirdek modifikasyonlarının şematik gösterimi a) DKS_Ø2,4K, b) DKS_Ø2,4X, c) ÇKS, d) DÇKS_Ø2,4, e) OKS2x2, 2x4, 4x2, 4x4, f) DOKS_Ø2,4 numuneler.

4.2.2 Test Standartları

Dört nokta (4) eğilme testleri ASTM C393 C393M-16 [185] standardına uygun şekilde yapılmıştır. Testler için 500 mm (boy) x 90 mm (en) x 30 mm (kalınlık) boyutunda sandviç kirişler üretilen geniş panellerden kesilmiştir. Eğilme testleri için destek mesafesi uzunluğu 450 mm belirlenmiştir. Yükleme pimi ve destek pimlerin çap değerleri ise, kiriş üzerinde yerel hasarları önlemek için Ø50 mm ayarlanmıştır. Eğilme testleri, 250 kN yük hücreesine sahip Zwick Roell Z-250 test cihazında 6 mm/dk. test hızı ile yapılmıştır. Dört (4) nokta eğilme test düzeneği, Şekil 4.8' de gösterilmektedir. Her bir sandviç kiriş konfigürasyonu için 5'er numune hazırlanmıştır, numuneler tabakaların çözgü yönünde test edilmiştir. Kirişlerin elastik bölgedeki başlangıç rijitlik değerlerini belirlemek için, numunelerin alt orta nokta noktasında sehim değerleri komparatör saati ile ölçülmüştür. Kirişlerin alt ve üst yüzeylerinin orta noktalarına gerinim değerlerini belirlemek için tek eksenli 120 Ω ohm dirence sahip 5 mm boyutunda gerinim-ölçerler yapıştırılmıştır. Tüm numunelerin, eğilme dayanımı ve hasar mekanizmalarını belirlemek amacıyla testlerde hasar almaları sağlanmıştır.

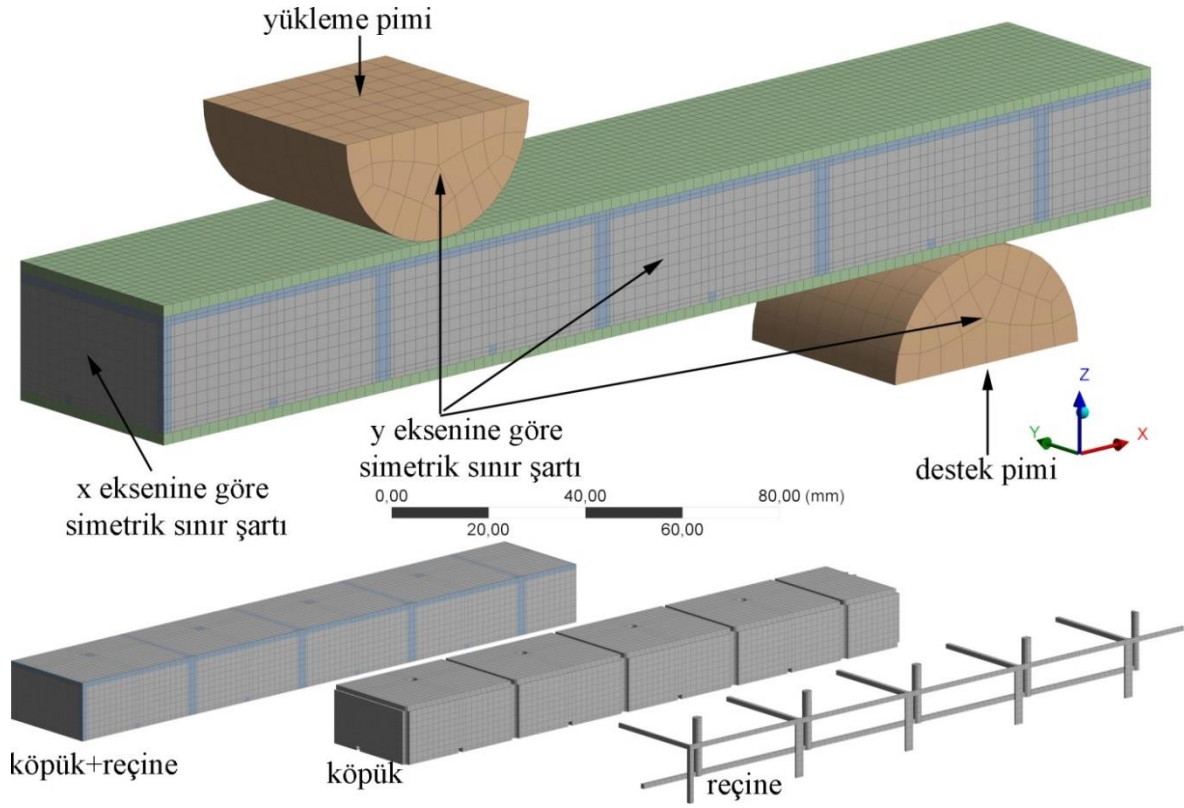


Şekil 4.8: Dört (4) nokta eğilme test konfigürasyonu ve gerinim ölçer düzeneği [185].

4.2.3 Sonlu Elemanlar Analizi

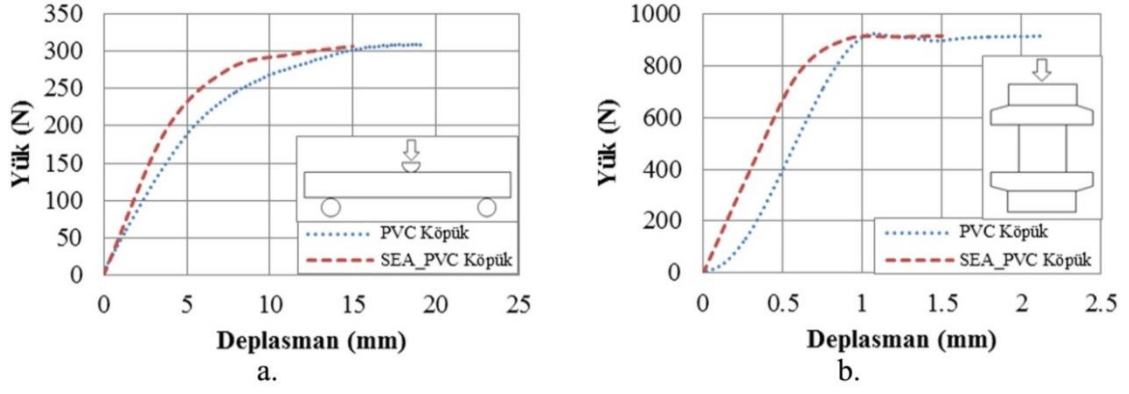
Sandviç kirişlerin sonlu elemanlar analizi (SEA) ANSYS 16.0 (Workbench, 2015) ticari paket programı kullanılarak yapılmıştır [189]. Deneysel hasar yüklerine karşılık gelen sehim değerleri nümerik analizlerde girdi olarak kullanılmıştır. Analizlerde delaminasyon hasarı incelenmemiş, bu yüzden köpük ve yüzey tabakaları arasında yapışık kontak ilişkisi verilmiştir [80, 85, 162, 163]. Sandviç kirişler eleman sayısını azaltmak ve çözüm sürelerini kısaltmak için $\frac{1}{4}$ çeyrek olarak modellenmiştir (bkz. Şekil 4.9). X ve Y yönlerinde yüzeylere simetri koşulu verilmiştir. PVC köpük ve reçine malzemelerinin mekanik özellikleri ürün veri kataloglarından temin edilmiştir [184, 188]. Tabakaların mekanik özellikleri Tablo 4.5’ de verilmiştir. Çeyrek modellerde 20 düğüm noktalı Hex-20 altı yüzlü elemanlar ile ağ modeli oluşturulmuştur. 20 düğüm noktalı elemanlar x, y ve z yönlerinde her bir düğüm için öteleme serbestlik derecesine sahiptir. Destek ve basma pimleri ile kirişler arasında kayar temas kontak ilişkisi verilmiştir. Basma pimine sadece Z yönünde deplasman verilmiş, diğer yönlerde ise sabitlenmiştir. Destek pimleri ise üç ekseninde de sabitlenmiştir. Tabakalar lineer ortotropik [85, 136, 162], PVC çekirdek ise çoklu-lineer izotropik sertleşme [190-193] malzeme modeli kullanılarak tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde (SEY), köpük malzemesinin tek eksenli basma testi sonuçlarından elde edilen akma sonrası plastik uzanım ve gerilme verileri kullanılmıştır. SEA sonuçları ile kıyaslamak amacıyla PVC köpüğün statik basma ve eğilme testleri ASTM standartlarına uygun olarak yapılmıştır [185, 194]. Şekil 4.10 (a) ve (b)'den SEY modelinin elastik ve akma sonrası test sonuçları ile uyum sağladığı görülmektedir.. Bu

sonuçlar, köpüğün plastik davranışının, sayısal analizlerde çoklu-lineer izotropik sertleşme malzeme modeli kullanılarak yakalanabileceğini göstermiştir.

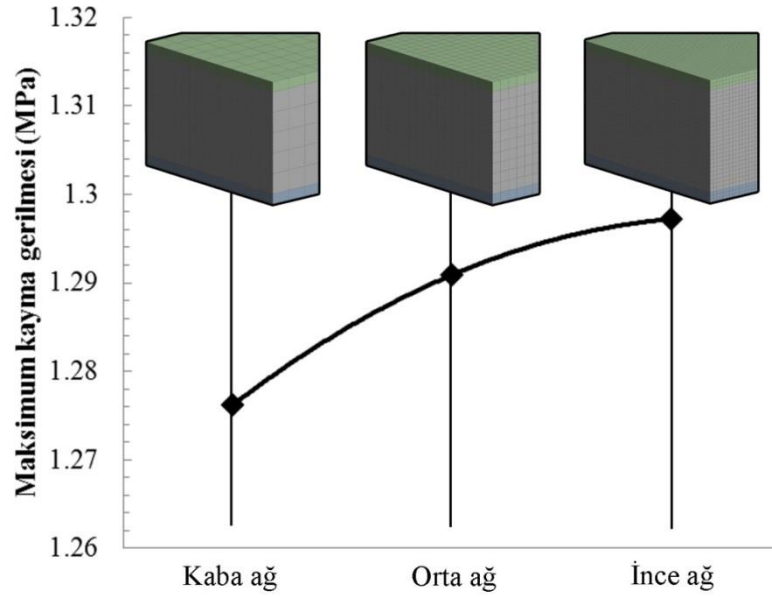


Şekil 4.9: Sandviç kompozit kirişin çeyrek (1/4) sonlu elemanlar modeli.

Sayısal analizlerden doğru sonuçlar elde etmek için modellere en uygun ağ yapısının seçilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, uygun ağ boyutlarının belirlenmesi için yakınsama analizi yapılmıştır. Düz köpük içeren sandviç kompozit modelin kaba (5 mm), orta (2.5 mm) ve ince (1 mm) gibi farklı ağ (mesh) boyutlarına sahip üç nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Toplam eleman sayısı kaba ağ için 1890, orta ağ için 12960 ve ince ağ için 209250 olarak belirlenmiştir. Her bir ağ boyutu için köpükte öngörülen maksimum kayma gerilmesi değışimi Şekil 4.11 'de sunulmuştur. Tablo 4.6' daki sonuçlarda orta ve ince ağ modelin sonuçları arasında çok az değışim gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra ince ağ boyutu çözüm süresini çok önemli ölçüde arttırmıştır. Bu nedenlerden dolayı maksimum eleman boyutu 2.5 mm olarak belirlenmiştir. Tüm analizler, Intel Core-i7-3770 3.5 GHz işlemciye, 8 GB RAM' e ve 64 bit Windows 7 Home Premium işletim sistemine sahip bir Asus PC CG8265 masaüstü bilgisayarda yapılmıştır.



Şekil 4.10: PVC köpük malzemenin deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri a) Üç nokta eğilme testi, b) Düzlem dışı basma testi.



Şekil 4.11: Ağ boyutunun bir fonksiyonu olarak köpükte oluşan maksimum nümerik kayma gerilmesi değişimi.

Tablo 4.6: Ağ boyutu inceltme ve yakınsama analizi sonuçları

Çözüm Kalitesi	Ağ boyutu (mm)	Maks. Kayma Gerilmesi (MPa)	Değişim (%)	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	İşlem süresi (s)
1 (Kaba)	5	1.2762	-	11060	1890	18
2 (Orta)	2.5	1.2909	1.152	64863	12960	209
3 (İnce)	1	1.2972	0.488	917120	209250	1105

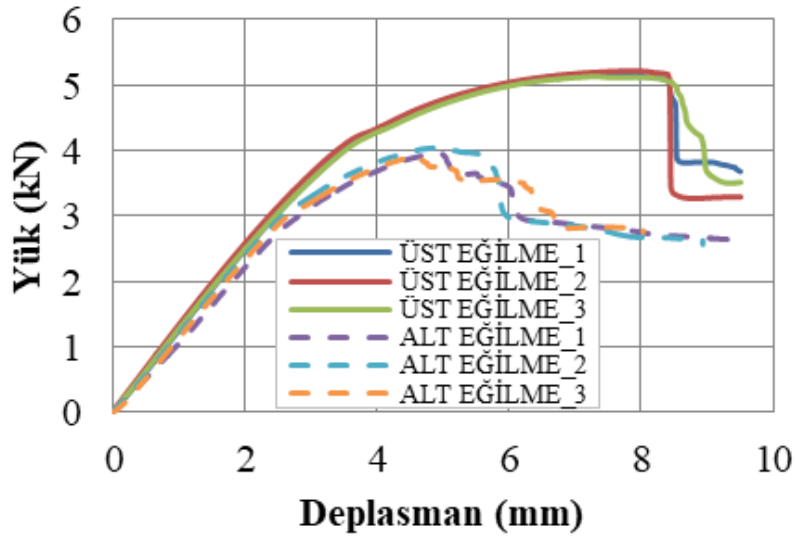
5. BULGULAR VE İRDELEME

5.1 Pim Takviyeli PVC Köpük İçeren Sandviç Kompozitlerin Test Bulguları

Bu kısımda sadece delik açılmış PVC köpük içeren sandviç kompozitlerin kısa kiriş eğilme ve düzlem dışı basma testleri yapılmıştır. Son olarak yapılan modifikasyonlar neticesinde ağırlıklarındaki artış miktarları belirlenmiş, özgül eğilme ve basma dayanım değerleri karşılaştırılmıştır.

5.1.1 Üç Nokta Eğilme Test Sonuçları

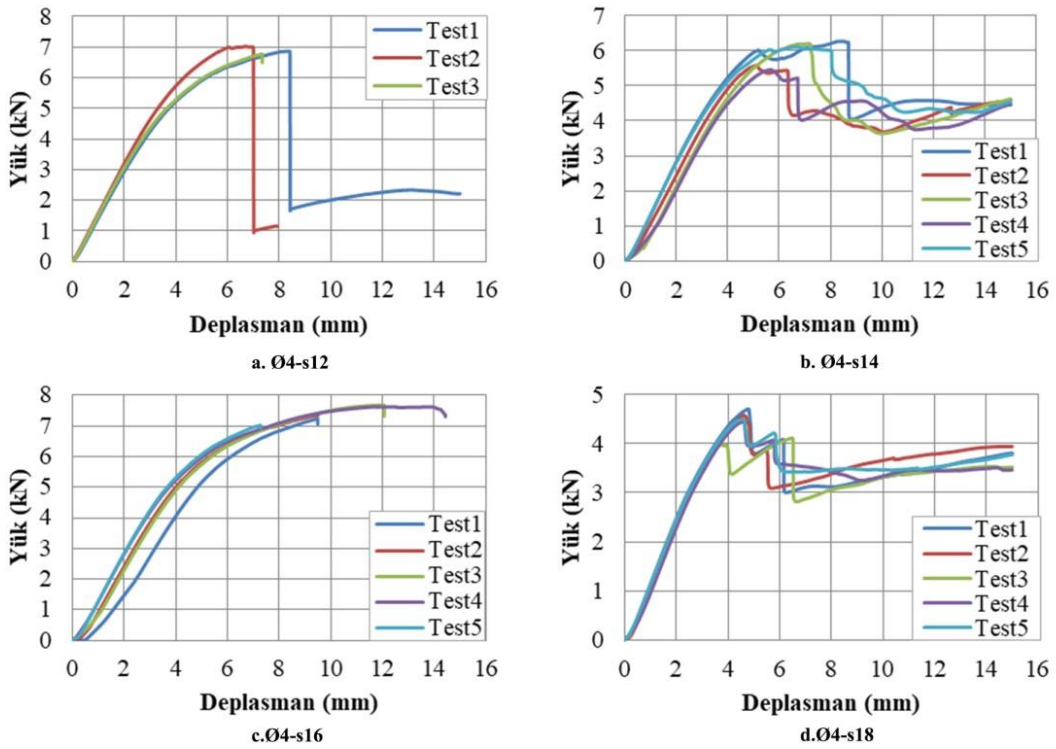
Üç nokta (3) eğilme yükü altında test edilen pim takviyeli ve referans sandviç numunelerinin yük-sehim eğrileri Şekil 5.1-4 ve 5.6'da verilmiştir. Numunelerin hasar yükleri, hasar sehimleri, maksimum yük artışları ve hasar tipleri Tablo 5.1' de listelenmiştir. Referans numunesinin üç nokta eğilme testi sonuçları Şekil 5.1' de gösterilmektedir. Üst-eğilme testlerinde hasar yükü ve hasar sehim değerleri daha yüksek çıkmıştır (bkz. Tablo 5.1). Bu durum, kalın tabakanın yerel burkulmalara karşı daha yüksek direnç göstermesiyle ilgilidir. Üst ve alt eğilme testlerinde referans numune basma pimi altında üst tabaka yerel burkulma hasarına uğramıştır.



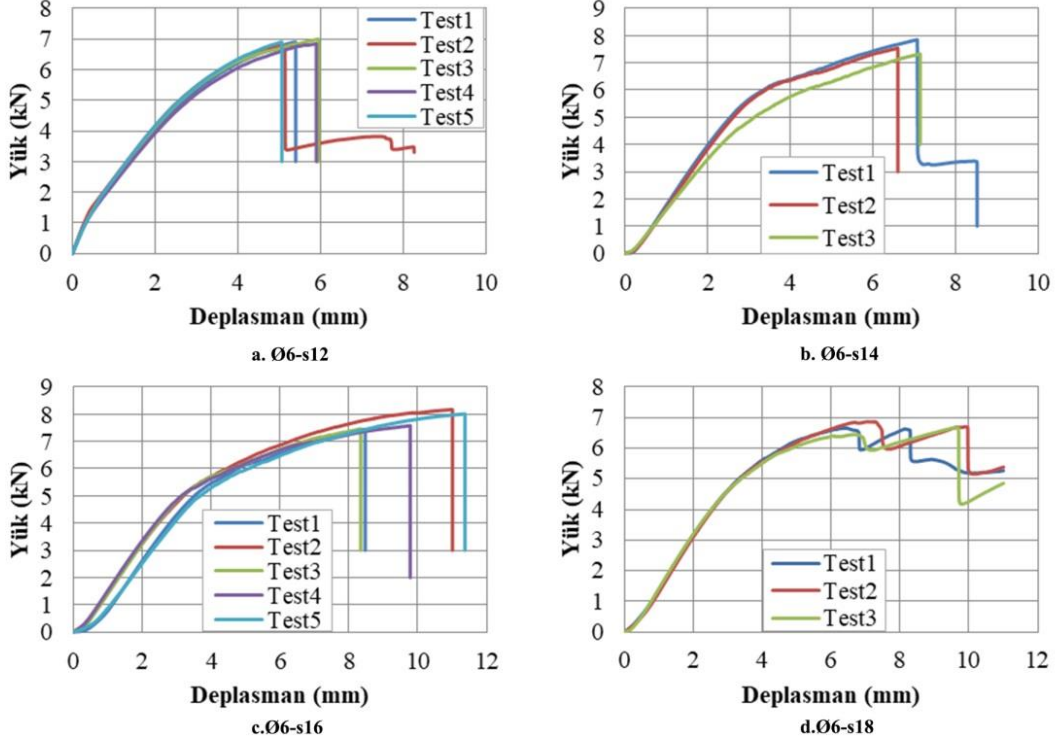
Şekil 5.1: Referans numunesinin üst ve alt eğilme yükleri altında yük-deplasman grafiği.

Merkezleri arası 12, 14, 16 ve 18 mm ve çapları Ø4, Ø6 ve Ø8 mm olan kare şablon düzeninde delik açılmış numunelerin alt-eğilme test sonuçları Şekil 5.2-4' de verilmiştir. Eğilme zorlaması altında, Ø8 mm delik açılmış örneklerin en yüksek yük taşıma

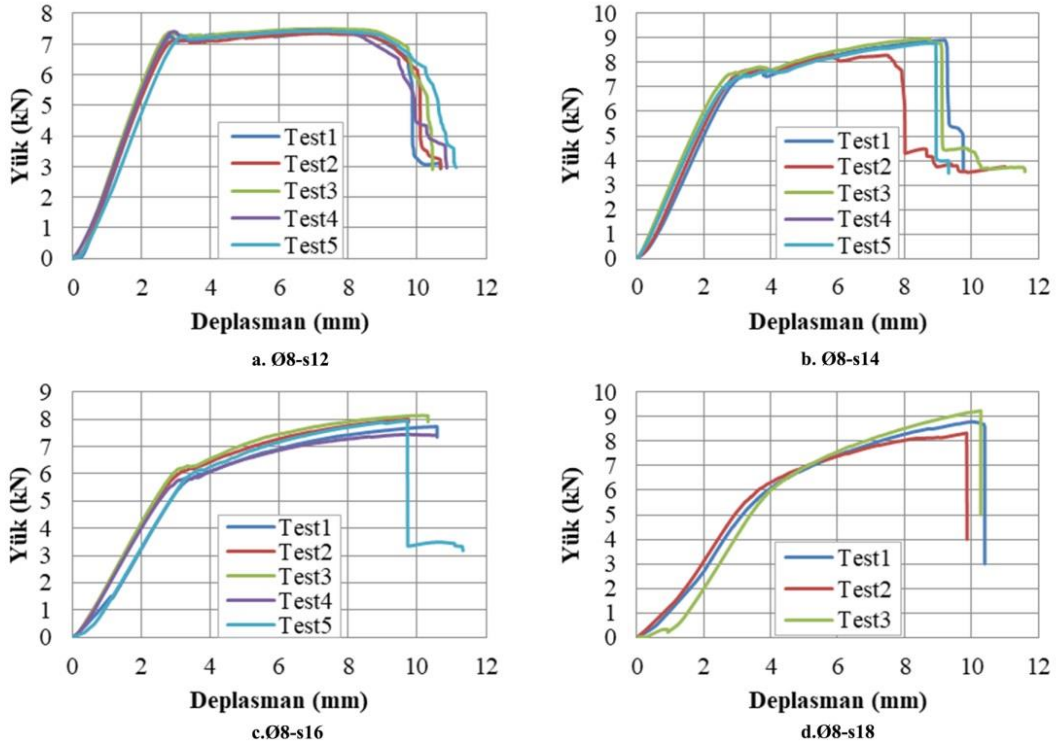
kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Referans numunesine göre, Ø8-s18 numunesi eğilme hasar yükünde yaklaşık %134 artış göstermiştir. Ayrıca, referans ve Ø8-s18 numuneleri sırasıyla 4.573 mm ve 10.057 mm deplasman değerlerinde hasara uğramıştır (bkz. Tablo 5.1). Pimler, sandviç yapının eğilme rijitlik değerini ve maksimum yük taşıma kapasitesini arttırmıştır Pim çapının artışı ile üç nokta eğilme testi altında PTS panellerinin hasar yüklerinde artış gözlemlenmiştir. Çünkü artan pim çapı nispeten daha yumuşak PVC köpüğün hacmini düşürmüştü ve panellerinin kayma özelliklerini geliştirmiştir. Pimler PVC köpüğü, düşük kesme yüklerinde hasara karşı güçlendirmiş, köpük çekirdek ise pimleri destekleyip ve kesme kuvveti etkisi altında hasar almalarını önlemiştir.



Şekil 5.2: Ø4 mm pim takviyeli sandviç numunelerin alt-eğilme yük-deplasman grafikleri, a) Ø4-s12. b) Ø4-s14. c) Ø4-s16. d) Ø4-s18 pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.



Şekil 5.3: Ø6 mm pim takviyeli sandviç numunelerin alt-eğilme yük-deplasman grafikleri, a) Ø6-s12. b) Ø6-s14. c) Ø6-s16. d) Ø6-s18 pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.



Şekil 5.4: Ø8 mm pim takviyeli sandviç numunelerin alt-eğilme yük-deplasman grafikleri, (a) Ø8-s12. (b) Ø8-s14. (c) Ø8-s16. (d) Ø8-s18 pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.

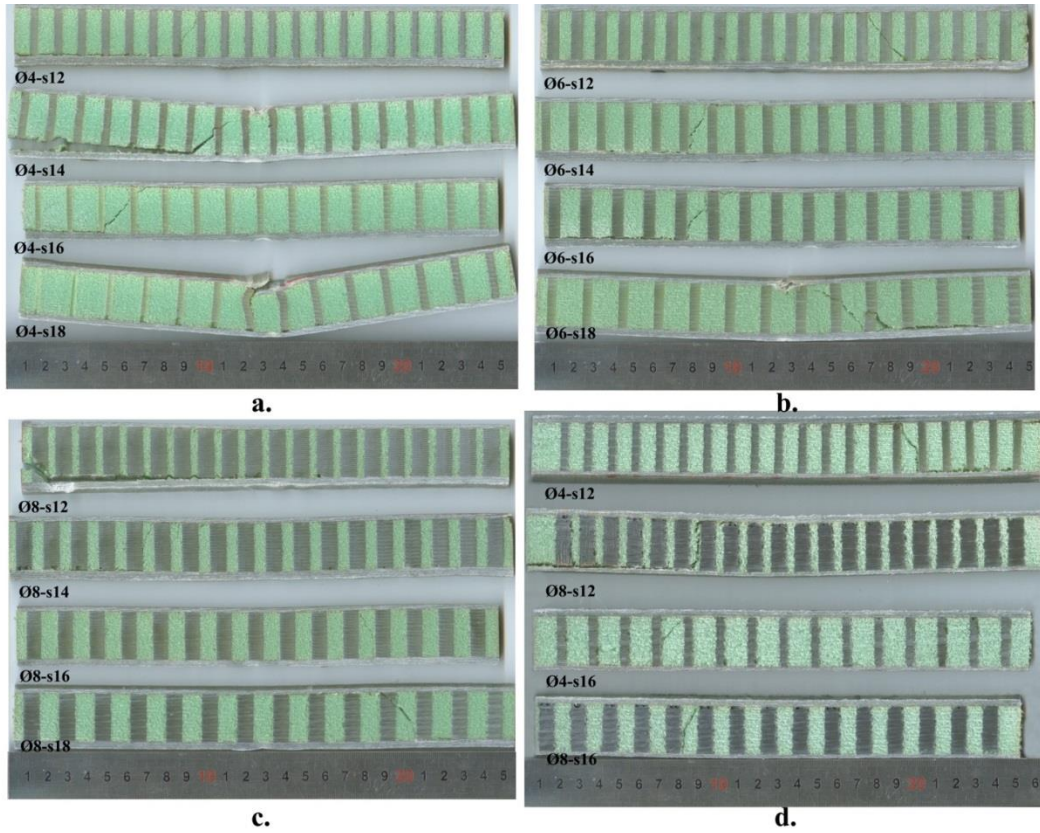
Tablo 5.1: Üç (3) nokta eğilme test sonuçları

Yükleme	Çap (mm)	Numune	Hasar Yükü (N)	Hasar Deplasmanı (mm)	Yük artışı %	Hasar	
ALT EĞİLME	Ø4	Ø4-s12	6760	7.486	70.1	KK	
		Ø4-s14	5905	7.438	48.6	UFK-KK	
		Ø4-s16	7383	9.507	85.8	KK	
		Ø4-s18	4468	4.651	12.5	UFK-KE	
	Ø6	Ø6-s12	7070	5.478	48.1	KK	
		Ø6-s14	7888	6.946	98.5	KK	
		Ø6-s16	7734	9.389	94.7	KK	
		Ø6-s18	6624	9.321	66.7	UFK-KK	
	Ø8	Ø8-s12	7409	7.312	86.5	KK	
		Ø8-s14	8786	8.842	121.1	KK	
		Ø8-s16	7855	10.040	97.7	KK	
		Ø8-s18	9289	10.057	133.8	KK	
			Referans	3973	4.573	-	UFK
	ÜST EĞİLME	Ø4	Ø4-s12	7259	6.454	40.7	KK
			Ø4-s16	7115	7.455	37.9	KK
		Ø8	Ø8-s12	7972	7.088	54.6	KK
Ø8-s16			8516	8.137	65.1	KK	
			Referans	5158	7.169	-	UFK

Not: KK: Köpük kayma hasarı, UFK: Üst fiber kırılması, KE: Köpük ezilmesi, hasar durumları kısaltılmış olarak verilmiştir.

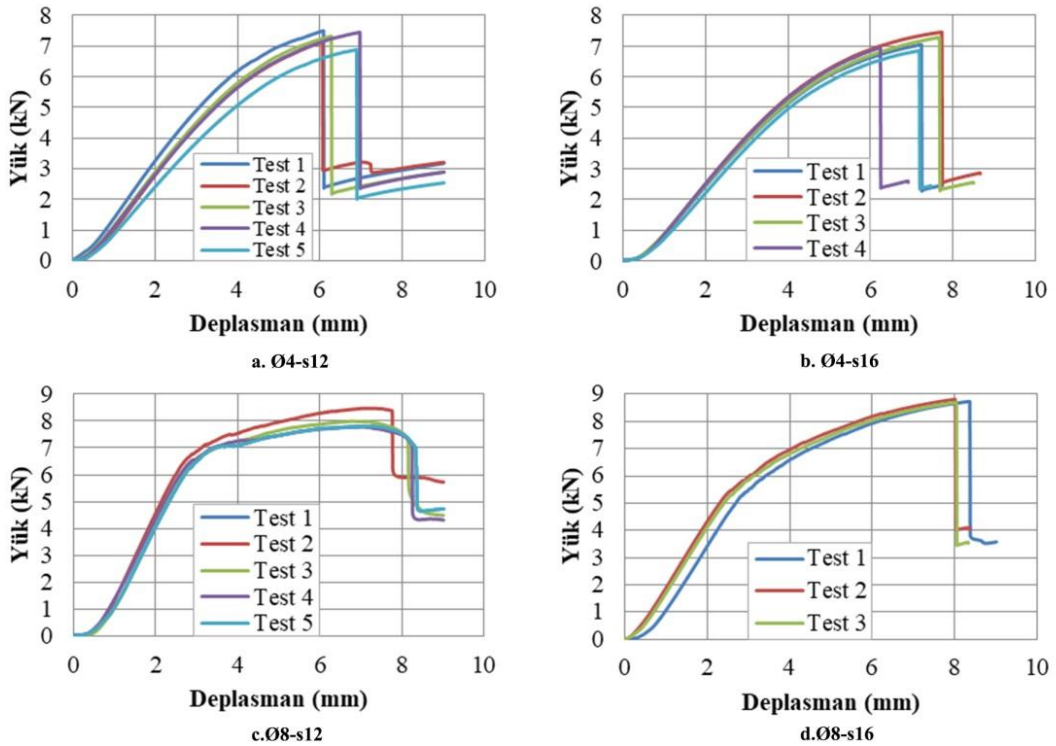
Deneysel sonuçlar pim takviyeli sandviç (PTS) panellerinin alt-eğilme testlerinde farklı hasar mekanizmalarına sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 5.5 (a) ile (c), alt-eğilme yüklemeye maruz kalan PTS numunelerinin hasar tiplerini göstermektedir. Ø4-s18 numunesinde, basma pimi altında lokal yüzey tabakası burkulması olmuş ve köpük yapıda ise herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Reçine pimleri bükülmüş ve yüklemeye pimi temas noktasında üst tabakalar hasara uğramıştır. Ø4-s14 ve Ø6-s18 numuneleri hem üst tabaka burkulması hem de çekirdek kesme hasarları göstermiştir. Diğer numuneler ise kesme hasarına uğramıştır. Sandviç örneklerin hasar yüklerinde ve maksimum sehim değerlerindeki değişkenlik görülmesi hasar mekanizmalarıyla ilgilidir. Tablo 5.1' den görülebileceği gibi, Ø4-s14 numunesi, Ø4-s12 numunesi ile karşılaştırıldığında, hasar tipi farklı olduğu için aynı deplasman değerinde daha düşük hasar yükü göstermiştir. Aynı sonuç Ø6-s16 ve Ø6-s18 sandviç örneklerde de görülmektedir. Ø4-s14 ve Ø6-s18 numuneleri için, yük-sehim eğrileri, Şekil 5.2 (b) ve 5.3 (d) 'de görüldüğü gibi çekirdek

kayma hasarı öncesi salınımlar göstermiştir. Bu salınımlar, üst tabaka hasarı ile ilgilidir. Ø4-s12 ve Ø6-s12 örnekleri köpükte ilk kesme çatlağının başlamasına kadar doğrusal davranış göstermiştir. Bunu takiben, köpük malzemenin kırılmasından dolayı düşen rijitlik neticesinde eğrinin doğrusal olmayan davranışı ve pimlerin hasar alması izlenmektedir (bkz. Şekil 5.2 (a) ve 5.3 (a)). Bununla birlikte, Ø8-s12 örnekleri başlangıçta yükte hafif bir düşüş ve ardından maksimum yükten sonra plato benzeri bir bölge göstermiştir. Bu plato bölgeye, alt tabaka ve köpük arasındaki çatlak ilerlemesi neden olmaktadır. Şekil 5.4 (a) 'da gösterildiği gibi uygulanan yükte bir artış olmadan sehim değeri artmıştır. Pimler, delaminasyon tamamlanıncaya kadar hasar görmeden yükü taşımaya devam etmiştir. Ø8-s14, Ø8-s16 ve Ø8-s18 örnekleri ise bi-lineer davranış sergilemiştir (Şekil 5.4 (b), (c), (d)). Bu durumun nedeni, reçine pimlerinin eğilme yükü altında burkulma direnci göstermesidir. Benzer bir davranış Wang [116] tarafından raporlanmıştır. Ayrıca, bu numunelerde kayma yükü sebebiyle reçine pimlerinin hasarı görülmemiştir (Şekil 5.5 (c)). Bu sonuç, Ø8 mm pimlerde kesme çatlağına neden olacak kuvvetin, köpük kayma hasar yükünden daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.5: Sandviç numunelerin alt-eğilme (a, b, c) ve üst-eğilme (d) yükleri altında hasar gören kesitlerinin ayrıntıları.

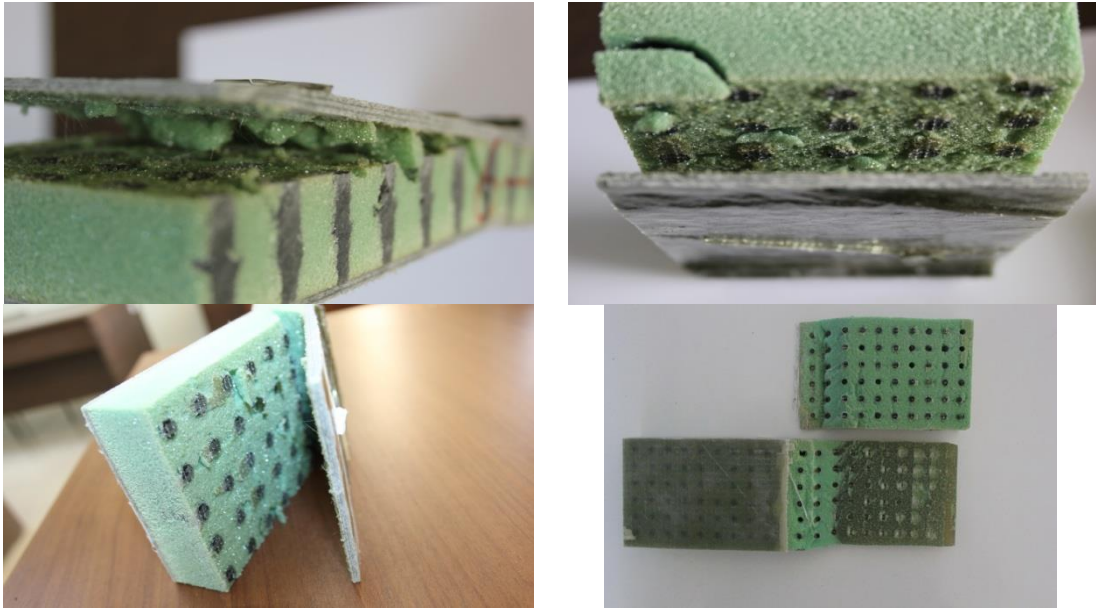
Merkezleri arası 12 ve 16 mm ve çapları $\text{Ø}4$ ve $\text{Ø}8$ mm kare şablon delik açılmış pim takviyeli numunelerinin üst-eğilme testi sonuçları Şekil 5.6 (a)-(d) 'de verilmiştir. Bu seçilen numuneler, üst-eğilme zorlaması koşulunda pimlerin herhangi bir artış sağladıklarını tayin etmek için test edilmiştir. Şekil 5.5 (d), üst-eğilme yüklemesi altında test edilen sandviç panellerin hasar tiplerini göstermektedir. $\text{Ø}4$ -s12 ve $\text{Ø}4$ -s16 numuneleri köpük kayma hasarı nedeniyle zarar görmüştür. Bu numuneler, Şekil 5.6 (a) ve (b) 'deki grafiklerde hasara kadar doğrusal olmayan davranış göstermiştir. $\text{Ø}8$ -s12 ve $\text{Ø}8$ -s16 kirişleri ise alt-eğilme yüklemesi neticeleri ile karşılaştırıldığında grafikler benzer davranış sunmuştur. Üst-eğilme pozisyonunda test edilen tüm PTS numunelerde köpük kayma hasarı daha kırılğan davranış sergilemiştir. Bu netice, Tablo 5.1' de gösterildiği gibi hasar yükündeki düşük sehim değeri ile kanıtlanmaktadır. Sandviç yapıda zayıf yük transfer kabiliyetine neden olan üst tabaka hasarı, üst-eğilme testlerinde gözlenmemiştir [186] (bkz. Şekil 5.5 (d)).



Şekil 5.6: $\text{Ø}4$, 8-s12, $\text{Ø}4$, 8-s16 numunelerinin üst-eğilme yük-deplasman grafikleri, a) $\text{Ø}4$ -s12. b) $\text{Ø}4$ -s16. c) $\text{Ø}8$ -s12. d) $\text{Ø}8$ -s16.pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.

Reçine ile dolan deliklerin (katı reçine), üst ve alt tabakaları PVC köpük malzemeye birleştiren pimler (çivi) gibi davrandığı ve böylece uygulanan yükün köpük içinde katı

pimler vasıtasıyla alt tabakaya aktarılabilmesi sonucuna varılabilir. Sandviç yapılar tasarlanırken çekirdek yapının kayma mukavemetinin kritik bir parametre olduğu bilinmektedir [86]. Bu pimler, kesme kuvvetine karşı direnç sağlamak ve yapıların yük taşıma özelliklerini iyileştirmektedir. Eğilme testleri sonucunda PVC köpükte oluşan kayma çatlaklarının alt tabaka-çekirdek ara yüzüne ilerleyişi ve delaminasyon şeklinde oluşan hasar ayrıntılı olarak Şekil 5.7’ de görülmektedir. Reçine dolan deliklerin çivi gibi davranarak yüzey tabakaları PVC köpük malzemeye bağlamış olduğu ve delaminasyon hasarını engellediği görülmektedir. Pim takviyeli numunelerin yük-deplasman eğrilerinden başlangıçtaki eğilme rijitlik değerleri karşılaştırılırsa; delik çapı artışı ile daha rijit paneller elde edileceği açıktır. Pim çapının, çekirdek kayma hasar yükü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki yükleme tipi için (alt ve üst eğilme) delik merkezleri arasındaki mesafeyi artırarak, hasar sehim değerlerinde artış sağlamak mümkün olmuştur. Bununla birlikte, PVC köpük üzerindeki oluşturulan deliklerin reçine ile dolmasından dolayı numunelerin ağırlıkları artmıştır. Farklı kare delik düzenlerine sahip numunelerin ağırlıklarındaki değişim miktarları 5.1.3’ de ayrıntılı verilmiştir.



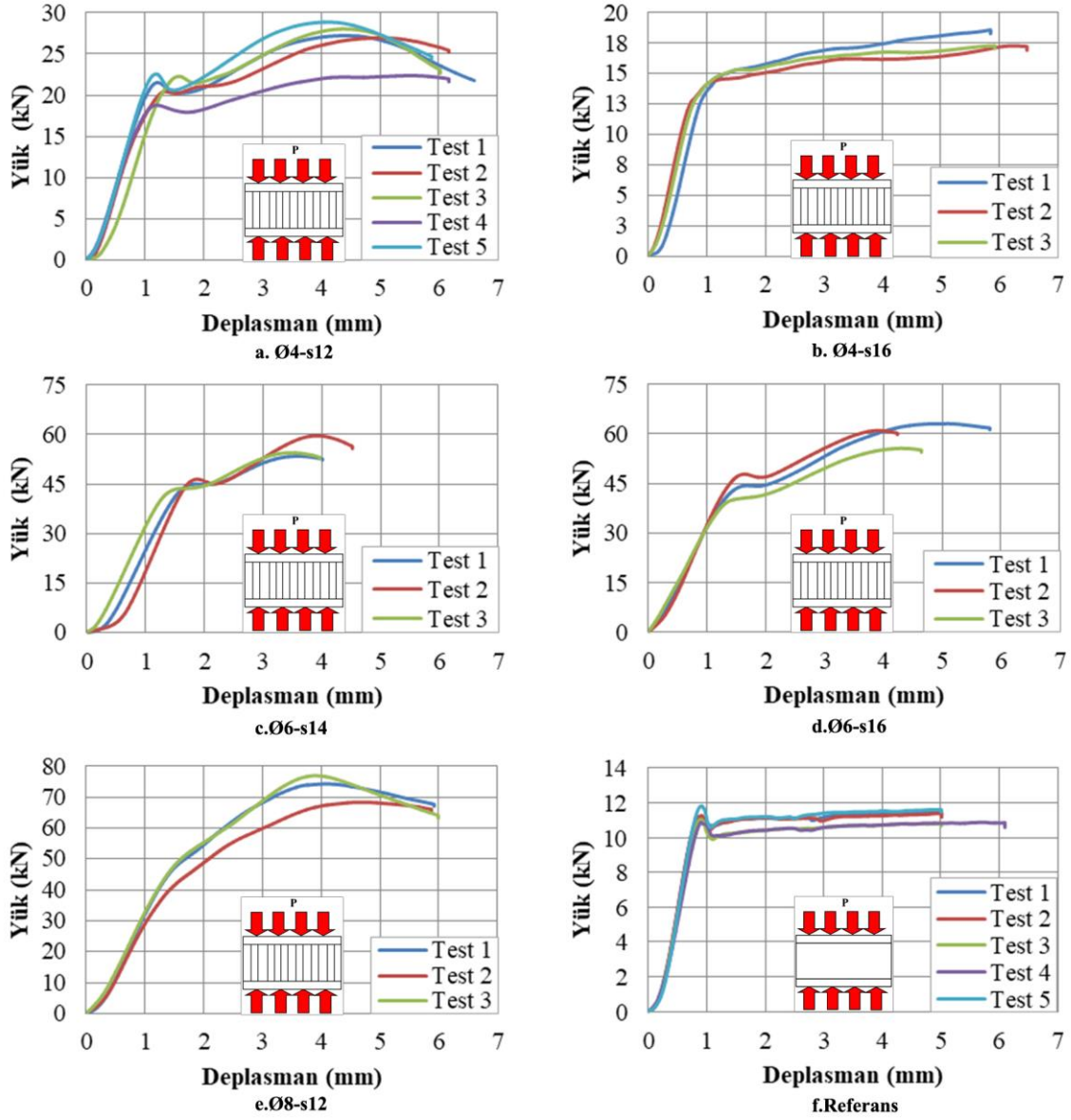
Şekil 5.7: Hasar alan pim takviyeli sandviç kompozit numuneler.

5.1.2 Düzlem Dışı Basma Test Sonuçları

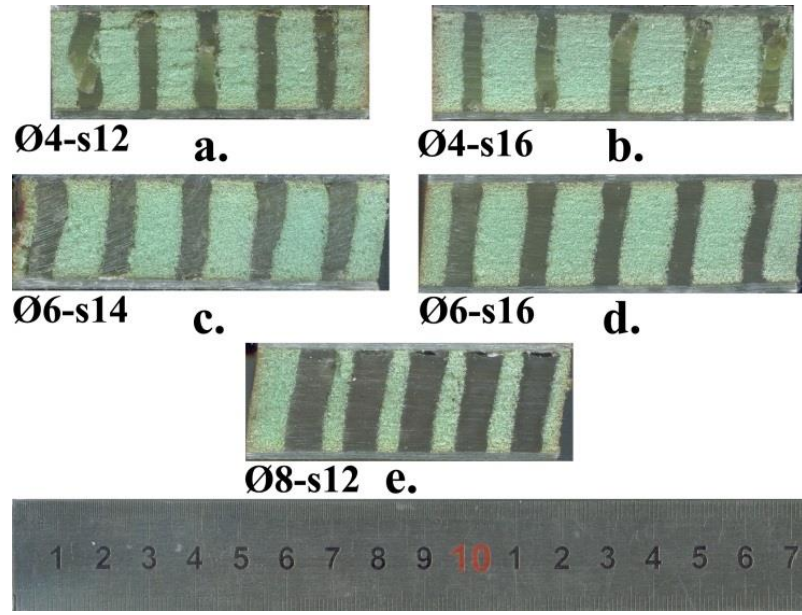
Şekil 5.8 (a)-(f), pim takviyeli ve referans sandviç numunelerinin düzlem dışı basma davranışlarının oldukça farklı olduğunu göstermektedir. Pim takviyeli kirişlerin basma yükü altında oluşan hasar tipleri Şekil 5.9'da verilmiştir. Testler neticesinde PTS panellerinin basma sonuçları, referans numunesine göre oldukça yüksek çıkmıştır (bkz. Tablo 5.2). Farkın nedeni ise, pimlerin (katı reçine) basma özelliklerinin, PVC köpük malzemeye göre daha yüksek olmasıdır. Böylece, köpük yapıda reçine pimlerinin miktarı artırılarak basma dayanımı ve modül değerlerinde artış sağlanmıştır. Pimler, basma yükü altında köpük ezilme direncini önemli ölçüde arttırmıştır. Ø8-s12 numunesinin basma hasar yükünde, referans numunesine göre yaklaşık %570 artış sağlanmıştır (bkz. Tablo 5.2). Düz köpük içeren numunede (referans) köpük tek başına basma yükünü taşımakta ve basma yükü maksimum değere ulaştığında, yük-sehim eğrisinde geniş düzlük bölge oluşmaktadır (Şekil 5.8 (f)). Ayrıca referans numune, PVC köpüğün basma dayanımı olan 1.4 MPa gerilme seviyesinde hasara uğramıştır [143] (bkz. Şekil C.1). Fakat pim takviyeli numunelerde ise basma yükü çoğunlukla pimler tarafından taşınmıştır. Ø4-s12, 16, Ø6-s14,16'nın yük-deplasman eğrileri, akmaya kadar lineer olarak artmış ve daha sonra maksimum yüke kadar lineer olmayan artışla devam etmiştir (bkz. Şekil 5.8 (a)-(d)). Bundan sonra, artan sehim ile birlikte yük düşme eğilimi göstermiştir. Akma noktası, basma yükü altındaki reçine pimlerinin ezilme hasarına karşılık gelmektedir. Bu noktanın sonrasında, pimler burkulma hasarına uğrayarak kalıcı hasara maruz kalmıştır. Şekil 5.9 (a) ve (b) 'de, Ø4-s12 ve Ø4-s16 numuneler pimler burkulma sonrası kırılmıştır, oysa Ø6-s14 ve Ø6-s16 örneklerinde ise pimler hasardan önce daha fazla eğim göstermiştir (bkz. Şekil 5.9 (c) ve (d)).

Şekil 5.8 (e)' de görüldüğü gibi, maksimum yüke kadar doğrusal olmayan bir davranış sergileyen Ø8-s12 numunelerinde belirgin bir akma noktası olmadığı açıktır. Bu davranışı sergilerken, Ø8 mm çapında pimler plastik deformasyona maruz kalmıştır. Ø8-s12 numunesi diğer kirişler arasında en büyük pim eğimini göstermiştir (Şekil 5.9 (e)). Daha sonrasında pimler burkulmaya ve takiben tabaka ile temas bölgesinde ezilmeye maruz kalmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, çap değeri artışı ile pimler hasara kadar daha fazla eğim açısı yapmıştır. Beklendiği gibi, çap değeri artışı pimlerin burkulmaya karşı daha dirençli olmasını sağlamıştır. Basma testi sonuçları ayrıca, delikli kare şablonun artan kenar

uzunluğunun (delik merkezleri arası uzunluk) test numunelerinin basma dayanımını ve rijitlik değerlerini azalttığını göstermiştir.



Şekil 5.8: Pim takviyeli ve referans numunelerinin düzlem dışı basma yük-deplasman grafikleri, a) Ø4-s12. b) Ø4-s16. c) Ø6-s14. d) Ø6-s16. e) Ø8-s12. f) Referans.



Şekil 5.9: Düzlem-dışı basma yükü altında hasar gören sandviç kompozit numunelerinin kesit görüntüleri, a) Ø4-s12. b) Ø4-s16. c) Ø6-s14. d) Ø6-s16. e) Ø8-s12 pim takviyeli sandviç kompozitler.

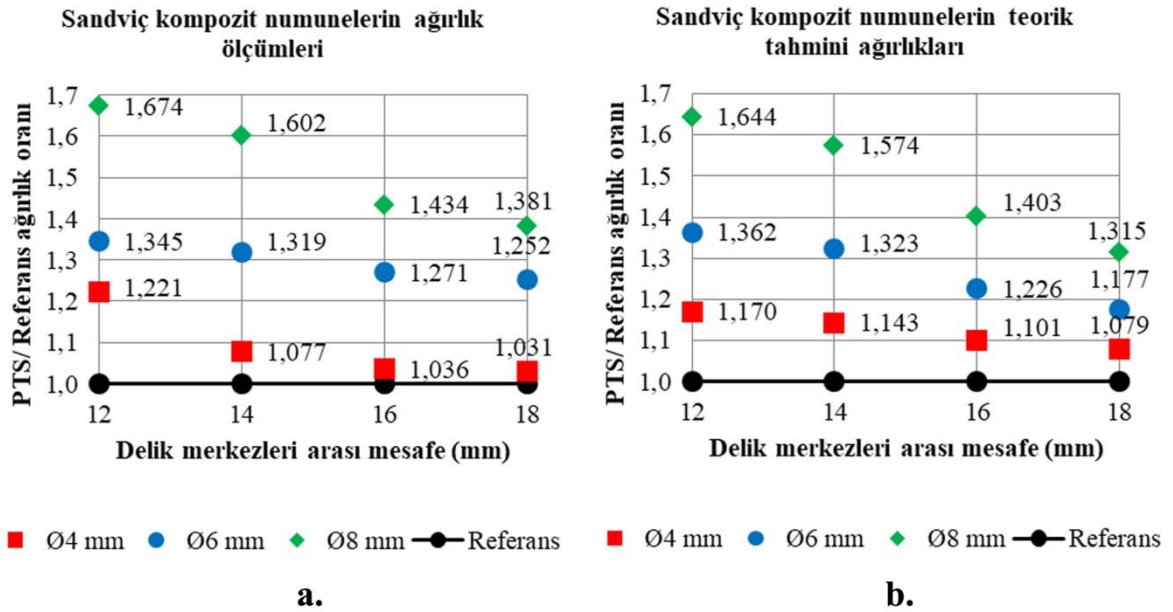
Tablo 5.2: Düzlem dışı basma test sonuçları

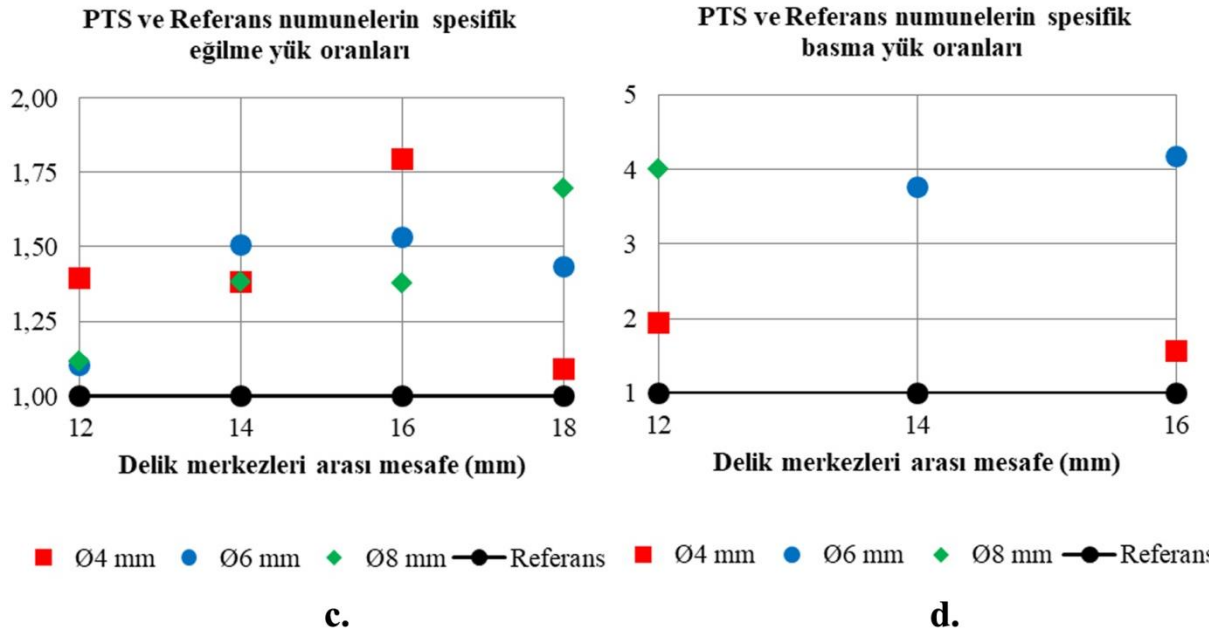
Düzlem dışı Basma Testi	Ø4-s12	Ø4-s16	Ø6-s14	Ø6-s16	Ø8-s12	Referans
Modül (MPa)	187.7	105.8	207.7	174.9	270.7	76.5
Maks.Yük (kN)	26.7	18.3	56.0	59.9	75.7	11.3
Maks. Gerilme (MPa)	7.0	2.9	10.2	9.4	15.7	1.4
Maks. Yük Karşılık gelen Deplasman (mm)	4.6	5.9	3.6	4.3	3.9	5.0

5.1.3 Ağırlık Artış Tespiti

Sandviç kompozitlerin mekanik performansını artırmak için, ağırlık artışına rağmen reçine pimlerinin kullanılmasının gerekli olduğu gösterilmelidir. Reçine dolgusu nedeniyle pim takviyeli örneklerin ağırlık artışını belirlemek için, VARIM işleminden sonra 250 mm×500 mm sandviç paneller tartılmıştır. Pim takviyeli panellerin teorik ağırlıkları, reçine, köpük ve yüzey tabaka malzemelerinin yoğunluklarına ve hacimlerine dayanarak tahmin edilmiştir [143]. Tüm numunelere ait ölçülen ve teorik ağırlık oranları, Şekil 5.10 (a) ve (b) 'de gösterilmektedir. Beklendiği gibi, numune ağırlık oranları (PTS/Referans) delik çapı artışı ve delikler arasındaki mesafenin düşmesi ile artmıştır. Teorik hesaplamalar ve ölçümler arasındaki farkın az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum köpükte açılan deliklerin

neredeşye tamamen reçine ile dolduğunu göstermektedir. Tablo 5.3, numunelerin alansal delik miktarını (%), ağırlık artışını (%) ve PTS/Referans numunelerin ağırlık oranlarını göstermektedir. Alansal delik miktarı artışı ile reçinenin ıslatmadığı kuru alanların önlenmesi, çekirdek ezilme direncinin ve yük taşıma kapasitesinin arttırılması amaçlanmıştır. Referans plakaya göre asgari ve maksimum ağırlık artışları sırasıyla %3.1 (Ø4-s18) ve %67.4 (Ø8-s12) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, PTS ve referans numunelerinin spesifik eğilme ve basma yükleri oranları, şekil 5.10 (c) ve (d) 'de verilmiştir. Tüm numunelerin maksimum eğilme yüklerinde ağırlıklarından daha fazla artış sağlanmıştır. PTS numunelerinin spesifik basma hasar yüklerinin ise, referans numune değerinin en az 1.5 katı ve en fazla 4 katı büyüklüğüne ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle, sağlanan ağırlık artışının, eğilme ve basma performansının önemli olduğu kritik uygulamalarda tolere edilebileceği görülmektedir.





Şekil 5.10: a) Sandviç kompozitlerin ağırlık ölçümleri, b) teorik ağırlık tahminleri, c) spesifik eğilme, d) spesifik basma hasar yük oranları.

Tablo 5.3: Pim takviyeli sandviç kompozit numunelerin ağırlık artış değerleri

Numune	Deliklerin Alansal Oranları	Ağırlık artışı (%)	DKS/Referans ağırlık oranları
Ø4-s12	0.151	22.1	1.221
Ø4-s14	0.136	7.7	1.077
Ø4-s16	0.094	3.6	1.036
Ø4-s18	0.075	3.1	1.031
Ø6-s12	0.339	34.5	1.345
Ø6-s14	0.305	31.9	1.319
Ø6-s16	0.212	27.1	1.271
Ø6-s18	0.17	25.2	1.252
Ø8-s12	0.603	67.4	1.674
Ø8-s14	0.543	60.2	1.602
Ø8-s16	0.377	43.4	1.434
Ø8-s18	0.302	38.1	1.381

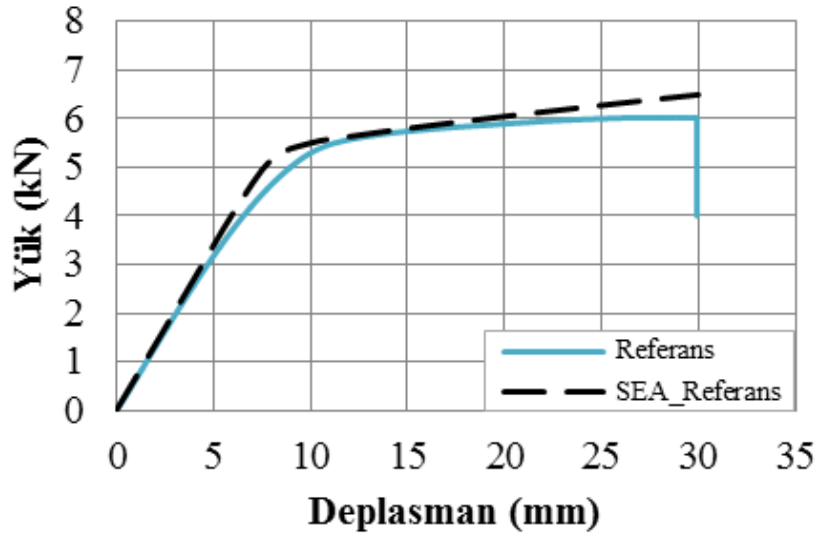
5.2 Delik, Oluk Ve Çapraz Kesik İşlenmiş PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç

Kompozitlerin Test Bulguları

Bu kısımda delik, oluk ve çapraz kesik işlenmiş PVC köpük yapıları sandviç kompozitlerin deneysel ve sonlu elemanlar analizleri neticeleri yük-deplasman grafikleri üzerinde karşılaştırılmıştır. Eğilme testleri sırasında karşılaşılan hasar mekanizmaları tespit edilmiş ve aralarındaki farklar ve nedenleri tartışılmıştır. Çekirdek modifikasyonu uygulanan sandviç kirişlerin ağırlık artışları belirlenmiş ve sonrasında spesifik eğilme hasar yükleri ve rijitlik değerleri hesaplanmıştır. Kirişlerin deneysel ve analitik olarak tespit edilen orta-nokta sehim miktarları ve ölçülen gerinim değerleri sunulmuştur.

5.2.1 Referans Numune Eğilme Test Sonuçları

Referans numunesi, yükleme pimi altında üst tabaka hasarı, ardından çekirdek ezilmesine uğramıştır. Şekil 5.11' de gösterildiği gibi akma sonrası düzlük bölge gözlemlenmiştir, bu sonuç kontrol numunesinin üst tabakası tamamen zarar görene kadar yük taşımaya devam ettiğini ancak fazla sehim yaptığını göstermektedir (bkz. Şekil 5.11). Köpük malzemenin doğrusal olmayan davranışının sonlu elemanlar modeline aktarılmasıyla, sayısal ve test sonuçları uyumlu sonuç vermiştir.

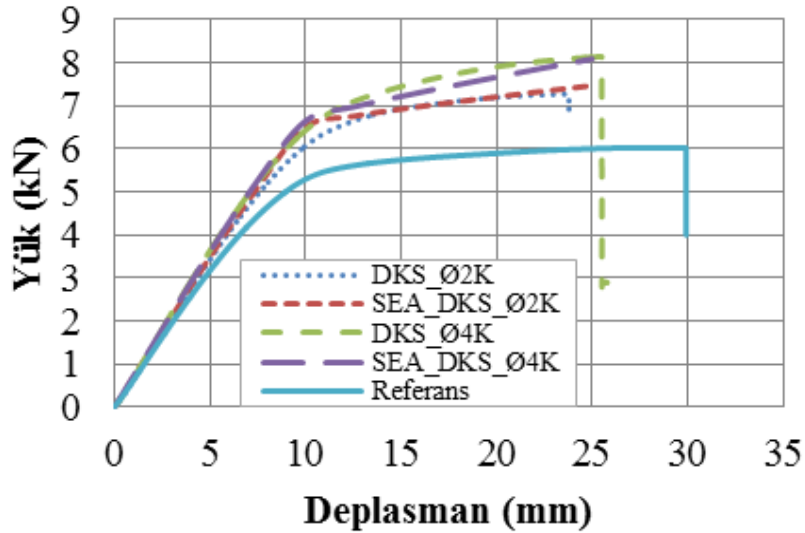


Şekil 5.11: Referans numune için deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.

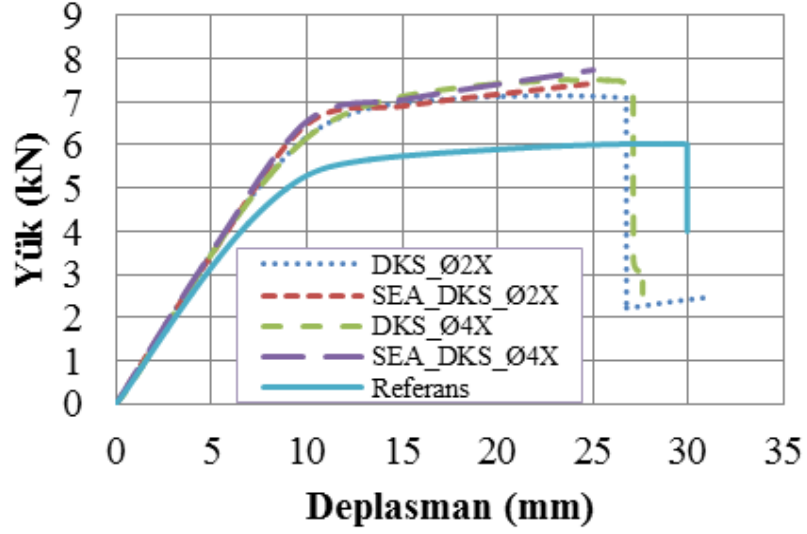
5.2.2 Delik Açılmış PVC Köpük İçeren Sandviç Numunelerin (DKS) Eğilme Test

Sonuçları

Şekil 5.12 ve 5.13' de, pimlerin sandviç yapıların yük taşıma kapasitesini ve eğilme rijitlik değerini açıkça geliştirdiği görülmektedir. Bunun nedeni, köpük malzemedeki pimlerin eğilme yükü altında şekil değiştirme direnci göstermesidir. Ayrıca, artan pim çapı kirişlerin eğilme dayanımlarının artmasına neden olmuştur çünkü pim çap artışı nispeten daha yumuşak köpüğün hacmini azaltmış ve sandviç kirişlerin kayma özelliklerini geliştirmiştir. Pimler, PVC köpüğü düşük kesme yüklerine karşı güçlendirmiştir, köpük ise pimleri desteklemiş ve erken hasar almalarını önlemiştir [132]. SEA sonuçları, DKS numunelerinin başlangıç rijitliği bölgesi ve akma sonrası davranışlarını başarıyla yakalamıştır. DKS_Ø2, 4X örneklerinde, yükleme noktalarının altında üst tabaka fiber kırılması olurken, DKS_Ø2, 4K örnekleri ise köpük kayma hasarına uğramıştır. DKS_Ø4K örneğinin eğilme dayanımında %34' lük azami artış tespit edilmiştir. DKS_Ø2K, Ø4K numuneleri hasar yükünde yaklaşık 25 mm sehim yapmıştır. DKS_Ø4X ve DKS_Ø2X numunelerinin maksimum eğilme yükleri, referans numunesine göre sırasıyla yaklaşık %24 ve %18 artış göstermiş ayrıca 6 kN kuvvetin altında kalmıştır. Ek olarak, her iki DKS_Ø2X, Ø4X kirişlerinin maksimum sehim değeri yaklaşık 27 mm iken referans numunesinin ise 30.2 mm'dir. Eğilme rijitlik değerleri de önemli ölçüde artmıştır. DKS_Ø2K, DKS_Ø4K, DKS_Ø2X, DKS_Ø4X kirişlerinin efektif eğilme rijitliği (EI_{ef}) artışı, referans örneğe göre sırasıyla %25, %29, %14 ve %17 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.12: DKS_Ø2,4K numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.

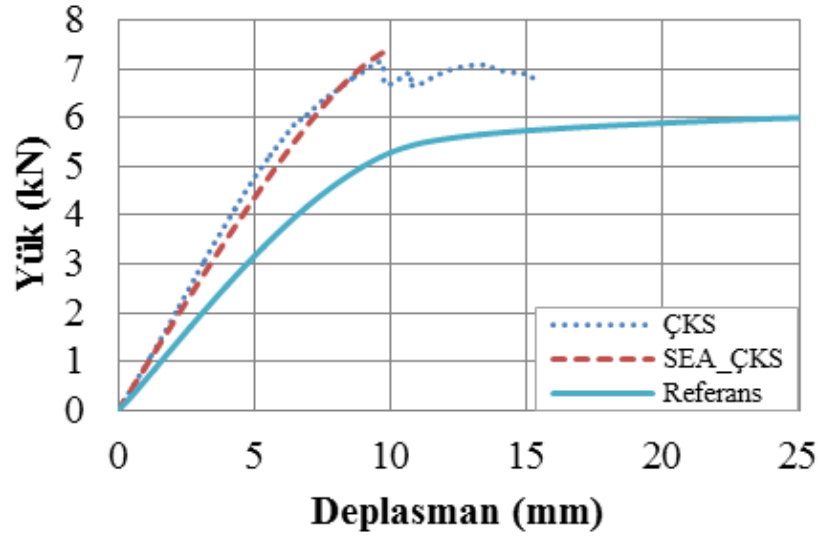


Şekil 5.13: DKS_Ø2,4X numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.

5.2.3 Çapraz Kesik PVC Köpük İçeren Numunelerin (ÇKS) Test Sonuçları

Şekil 5.14' de, ÇKS numunelerinin yük-deplasman eğrileri referans numunesi ile birlikte karşılaştırılmıştır. ÇKS numunesi, 15.3 mm sehim altında yaklaşık 7 kN kuvvet değerinde hasara uğramıştır. Yük-deplasman eğrisi, 5 kN kuvvet değerine kadar lineer davranış göstermiş sonrasında hasara kadar lineer olmayan rejim sergilemiştir. Eğride ilk rijitlik azalması, kayma çatlak başlangıcından kaynaklanmıştır. Yük eğrisinde salınımlara, enine ağların köpük malzemede hızlı çatlak ilerleyişini engellemesi neden olmuştur (Şekil 5.19 (b)) [158]. Üst yüzey tabaka ile köpük çekirdek arasında delaminasyon olmamış ve maksimum yüke kadar üst tabakada basma hasarı gözlenmemiştir. Reçine dolgulı ağların varlığı, yüzey tabakaları ve köpük çekirdeği arasındaki yapışmayı artırırken, üst tabakaya ekstra destek sağlayarak yerel rijitliği ve mukavemeti arttırmıştır [160]. Sonuçlar, ağlar içindeki katı reçinenin kayma kaynaklı hasara dayanabileceğini ve kirişlerin eğilme hasar yüklerini %15'e kadar artırdığını göstermiştir (bkz. Tablo 5.4). Referans numunesi ile karşılaştırıldığında, ÇKS numunesinin efektif eğilme rijitliği %61 oranında artış göstermiş, bu değer test edilen tüm örnekler arasında elde edilen maksimum değer olmuştur. SEA neticeleri akma sonrası bölgede sapma göstermiş, sadece başlangıçtaki deneysel eğri ile iyi bir uyuma sağlamıştır. Sonlu elemanlar analizinde, sandviç kirişlerin maksimum yüküne karşılık gelen sehim değeri girdi olarak kullanılmıştır. Bu sehim noktasından sonra, ÇKS ve DÇKS numunelerinin deneysel eğrileri, sayısal eğrilerden yüksek bir sapma

göstermiştir. Çünkü SEA' da ağ yapılarının doğrusal olmayan davranışı ve hasar ilerleyişi modele aktarılmamıştır.

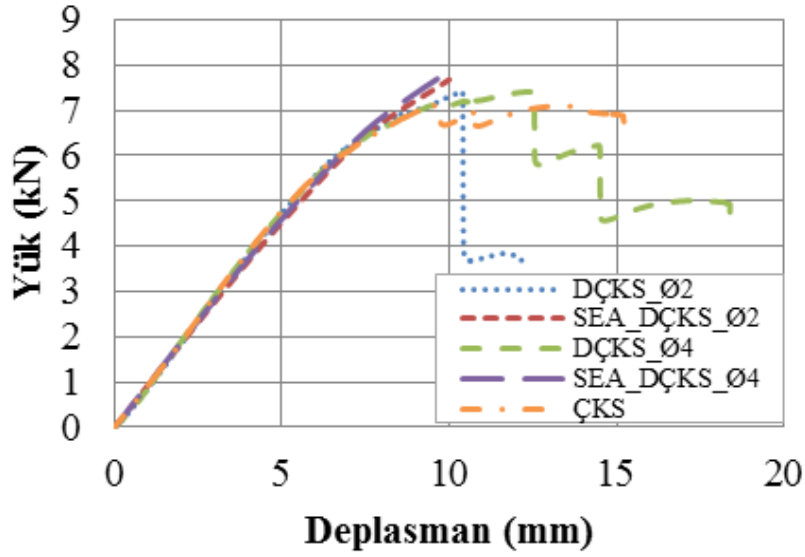


Şekil 5.14: ÇKS numunesine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.

5.2.4 Delik açılmış Çapraz Kesik PVC Köpük İçeren Numunelerin (DÇKS) Test

Sonuçları

DÇKS numunelerinin yük-deplasman eğrileri, Şekil 5.15' de gösterilmektedir. Tüm eğriler neredeyse 5 kN' a kadar doğrusal davranış göstermiş ve ardından doğrusal olmayan kısım izlemiştir. Doğrusal olmayan kısım, köpük malzemenin kayma çatlak yüzünden kaynaklanmıştır. Kayma çatlakları yükleme noktalarında başlamış ve yaklaşık 45° 'lik bir eğim açısı ile köpük boyunca ilerlemiştir. DÇKS_Ø2 ve DÇKS_Ø4 numunelerinin yük taşıma kapasitesi, ÇKS numunesine göre sırasıyla %6.9 ve %1.4 artmıştır. Pimler, DÇKS numunelerin eğilme mukavemetini az etkilemiştir. DÇKS_Ø2 ve DÇKS_Ø4 örneklerinin efektif eğilme rijitlik değerleri referans numuneye göre sırasıyla %59 ve %48 daha fazla çıkmıştır. Artan yükleme ile SEA sonuçları, ÇKS numunelerinde olduğu gibi akma sonrası bölgede test eğrisinden sapma göstermiştir.

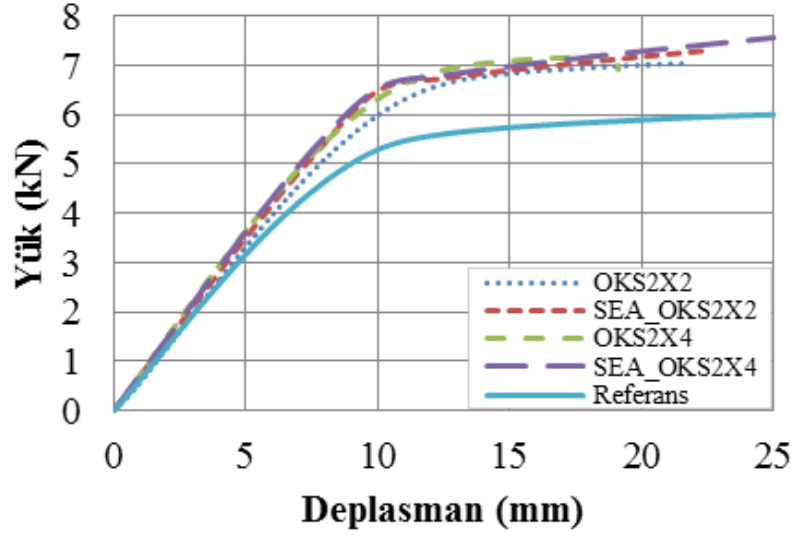


Şekil 5.15: DÇKS_Ø2,4 numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.

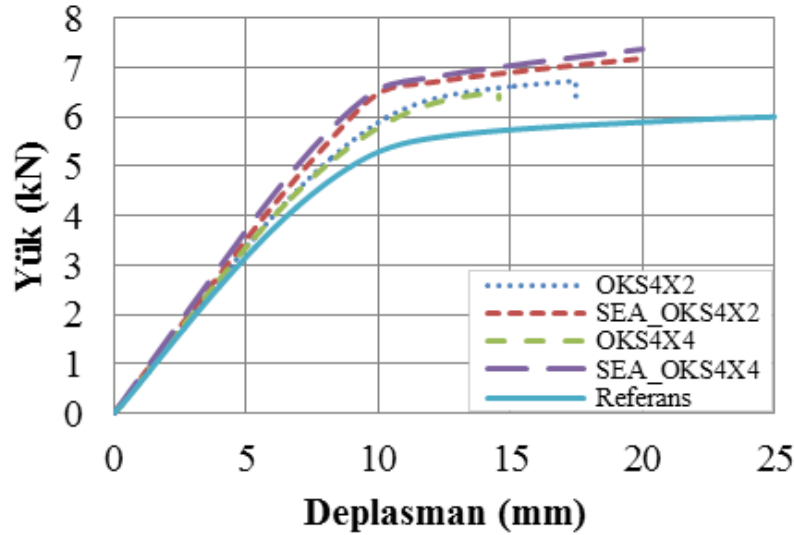
5.2.5 Oluk Açılmış PVC Köpük İçeren Numunelerin (OKS) Test Sonuçları

Şekil 5.16 ve 5.17' de verilen yük-deplasman eğrileri, köpük yapıda kesme çatlaklarının oluşumuna kadar neredeyse doğrusal davranış göstermiştir. Doğrusal bölgenin ardından, eğimler keskin bir şekilde düşmüş ve hasara kadar doğrusal olmayan rejim gözlemlenmiştir. Şekil 5.19 (c) ve (d). 'de gösterildiği gibi hem üst hem de alt yüzey tabakalarda ayrılma hasarı meydana gelmiştir. OKS2×2 ve OKS4×4 numunelerinin hasar yükleri karşılaştırıldığında, olukların hem derinliğinin hem de genişliğinin artışı köpük yapının bütünlüğünü zayıflatmış ve böylece sandviç kirişlerin eğilme hasar yüklerinin azalmasına neden olmuştur (bkz. Tablo 5.4). OKS2×2, OKS4×4, OKS4×2 ve OKS2×4 numunelerinin eğilme hasar yükleri, referansa göre sırasıyla %16, %7, %11 ve %19 oranlarında artmıştır. OKS numuneleri arasında, referans numuneye kıyasla efektif eğilme rijitliği değerindeki en yüksek artışı, %22 değerine sahip OKS4×4 numunesi göstermiştir. Oluklar içerisinde katılaştıran reçine sandviç yapının rijitlik değerini artırmıştır. Simülasyonlar aynı zamanda, olukların geometrisine bağlı olarak sandviç kirişlerinin hasar ilerleyişini yakalamıştır. SEA sonuçları ve OKS numunelerinin deneysel hasar sonuçları, Şekil 5.20 (a) ile (d) arasında karşılaştırılmıştır. Oluklar, yüzey tabakası ile köpük malzemenin etkileşimini arttırmak için köpük yüzeyine etkili bir şekilde işlenmiştir. Şekil 5.20 (a) ve (c)' de gösterildiği gibi, olukların etrafındaki kayma gerilimi, oluk uç noktalarında çatlak gelişimine, ardından çatlak ilerlemesinin çaprazlama alt tabaka ile

köpük ara yüzüne erişmesine neden olmuştur. Ayrıca, oluk derinliğindeki artış köpük çekirdeğindeki plastik şekil değiştirme değerlerinde artışa neden olmuştur (Şekil 5.20 (b)), maksimum kayma gerilmesi ve elastik şekil değiştirme değerleri ise tüm OKS numuneleri için sabit kalmıştır (bkz. Şekil 5.20. (c), (d)). OKS2×4 numuneleri için, çatlaklar, üst yüzey tabaka-köpük ara-yüzünde ilerlemiş ve ayrılmaya sebep olmuş ve ardından kayma hasarına yol açmıştır. Bununla birlikte, diğer OKS numunelerinde, kayma çatlakları, Şekil 5.21' de gösterildiği gibi olukların etrafından geçme eğilimi göstermiştir.



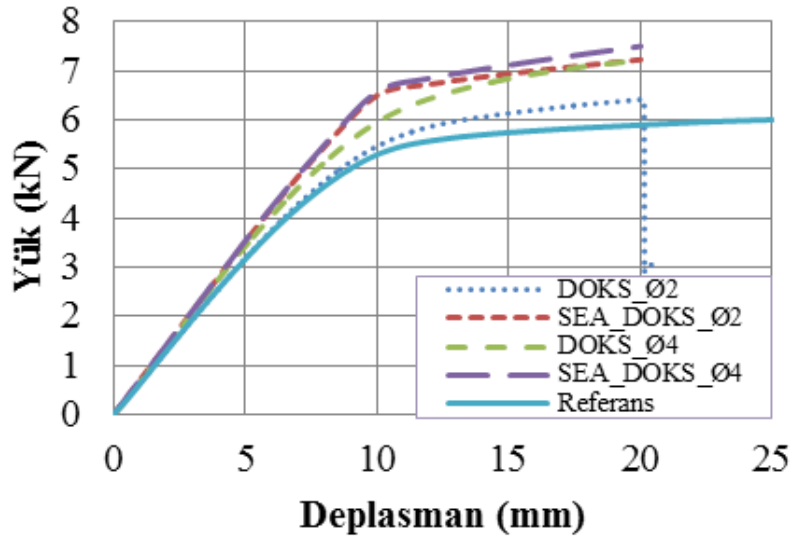
Şekil 5.16: OKS2×2, OKS2×4 numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.



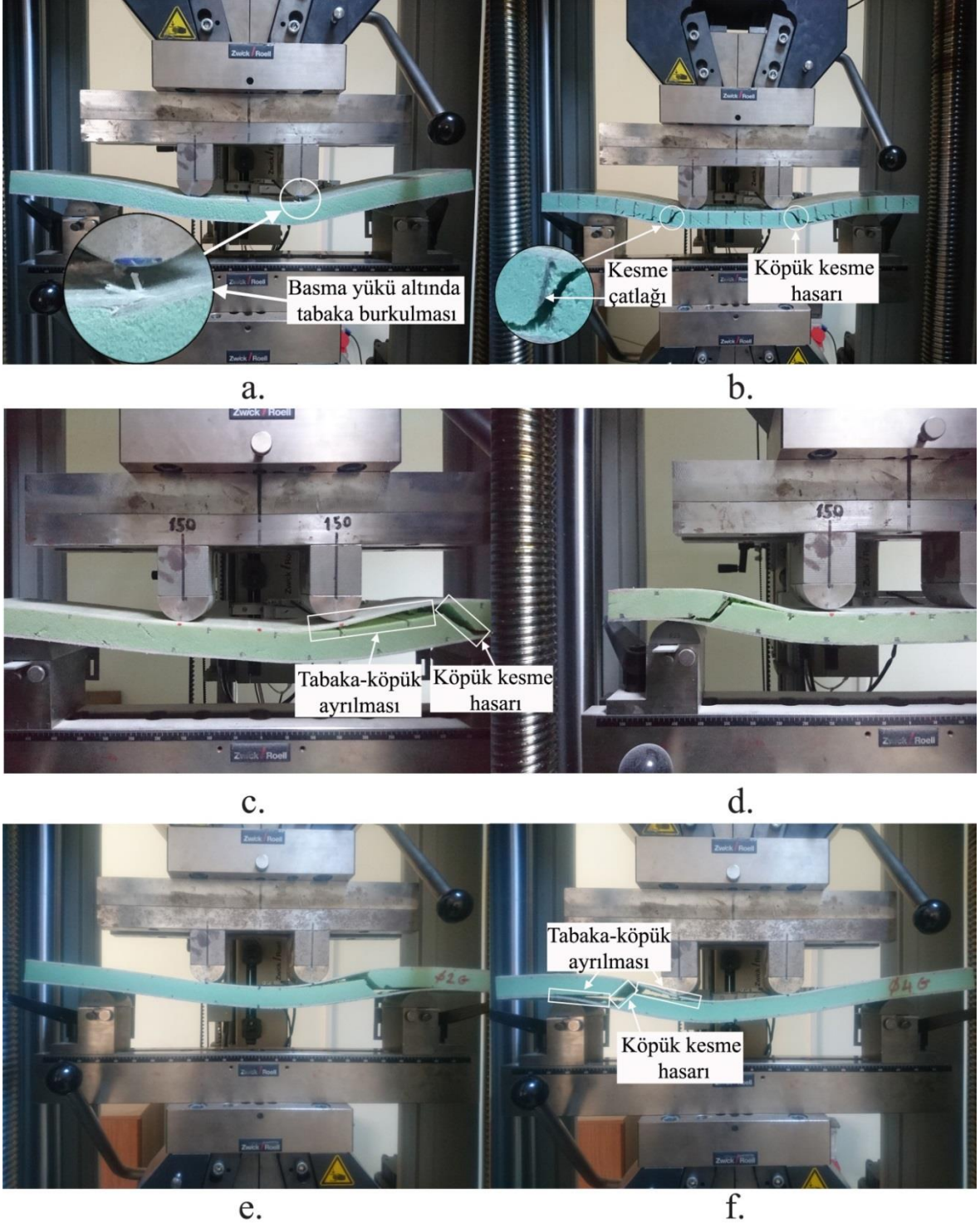
Şekil 5.17: OKS4×2, OKS4×4 numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.

5.2.6 Delik-Oluk Açılmış PVC Köpük İçeren Numunelerin (DOKS) Test Sonuçları

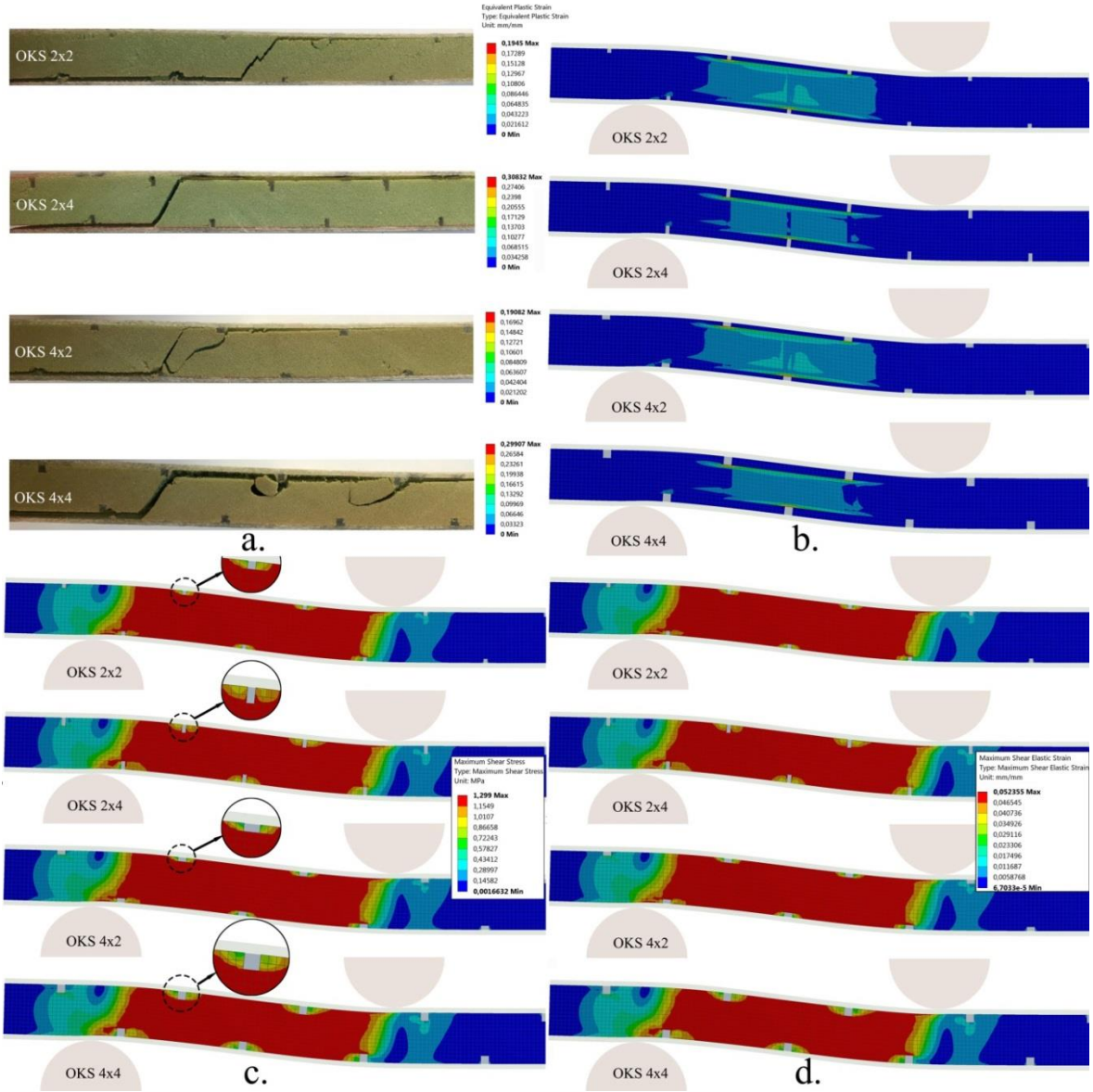
Şekil 5.18’ de, DOKS numunelerinin yük-deplasman eğrisini göstermektedir. Örnekler OKS numunelerine benzer hasar başlangıç ve ilerleme davranışı göstermiştir (bkz. Şekil 5.19 (e),(f)). Pim çapının arttırılması, eğilme özellikleri üzerinde olumlu bir etki yapmıştır (Tablo 5.4). Ancak, OKS2×2 ve DOKS_Ø4 kirişleri karşılaştırıldığında, pimlerin test sonuçları üzerindeki etkisinin sadece %6.6 civarında olduğu ortaya çıkmıştır. Oluk içeren köpük yapıya ek olarak delik açılmasının, ilave çaba ve zaman nedeniyle ve maliyet açısından da etkin olmadığı görülmüştür. Referans örneği ile karşılaştırıldığında, DOKS_Ø2 ve DOKS_Ø4 örneklerinde efektif eğilme rijitliği değerlerindeki artış sırasıyla %8 ve %13 ile sınırlı kalmıştır. SEA sonuçları ile deneysel neticeler arasında ilk yükleme aşamasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Akma sonrası plastik bölgede gözlenen az miktardaki farklılık köpük yapısındaki erken kayma çatlaklarından kaynaklanmıştır.



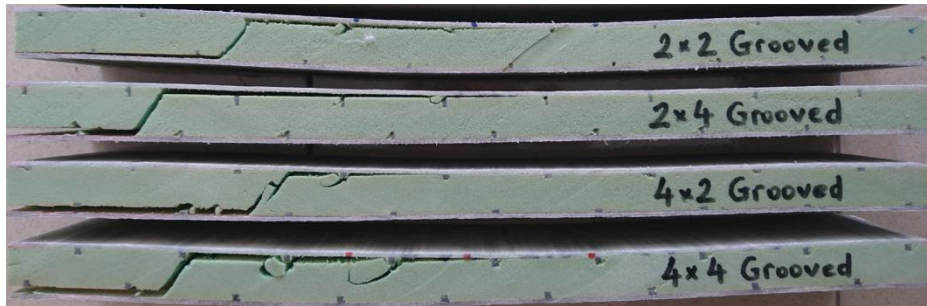
Şekil 5.18: DOKS_Ø2, 4 numunelerine ait deneysel ve sayısal yük-deplasman grafikleri.



Şekil 5.19: Sandviç kompozit kirişlerin hasar davranışları, a) Referans, b) ÇKS, c) OKS2×4, d) OKS2×4, e) DOKS_Ø2, f) DOKS_Ø4 numuneler.



Şekil 5.20: Oluk içeren sandviç kompozit numunelere ait SEA sonuçları a) Hasar alan OKS numuneleri, b) Plastik şekil değıştirme değeri, c) Maksimum kayma gerilmesi dağılımı, d) Maksimum kayma şekil değıştirmesi değeri.



Şekil 5.21: Hasar alan OKS numunelerinin tam görüntüsü.

Tablo 5.4: Dört (4) nokta eğilme test sonuçları

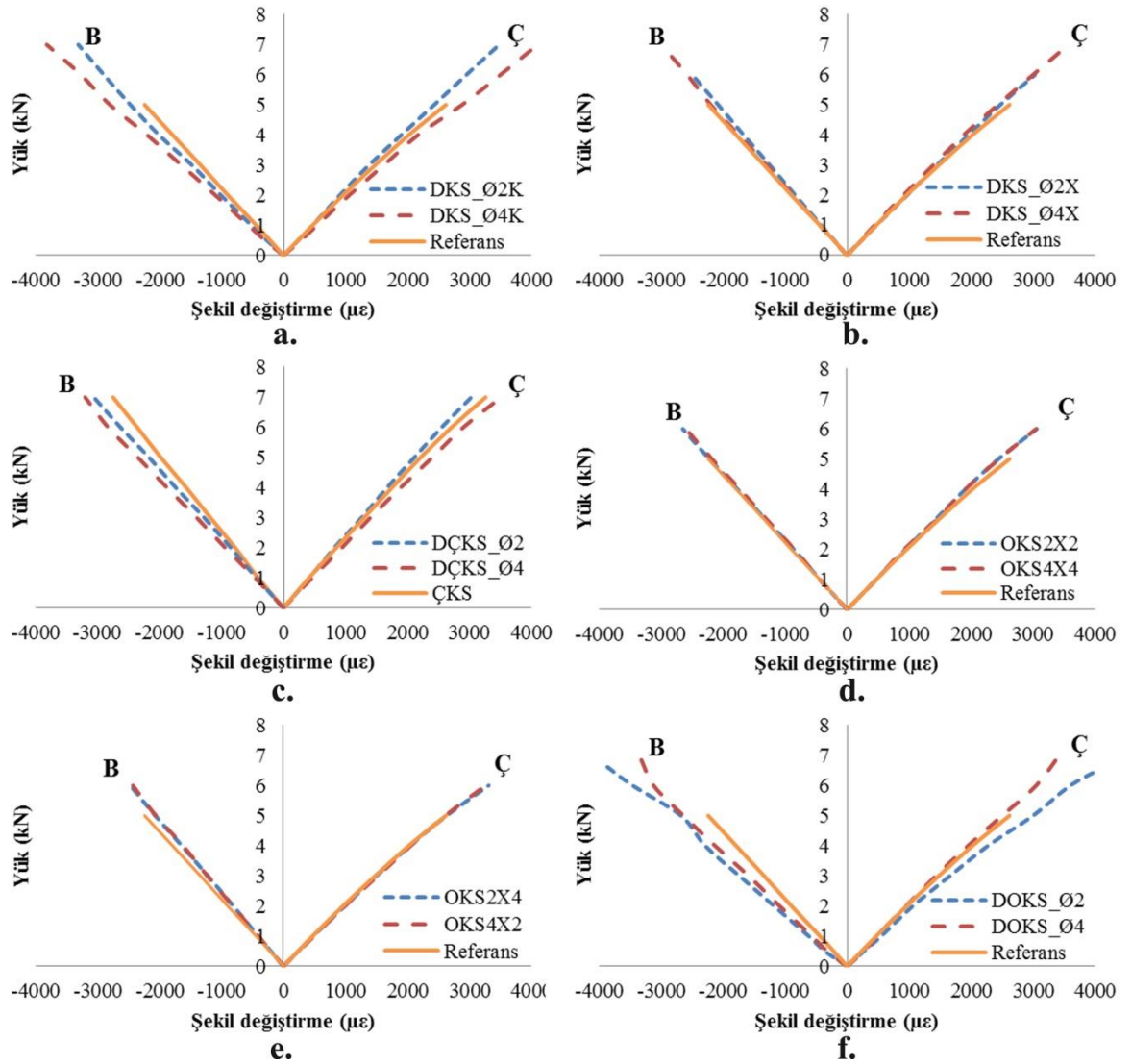
Numune	P_d (N)	$P_d/P_{Ref.}$	P_d/W (kN/kg)	P_a/P_d	P_s/P_d	Hasar modu	
Referans	6068	-	10.3	1.261	1.056	UFK+YB	
DKS	DKS_Ø2K	7306	1.20	10.6	0.943	1.018	KK+YÇA
	DKS_Ø4K	8160	1.34	11.5	0.853	1.020	KK+YÇA
	DKS_Ø2X	7136	1.18	11.8	1.14	1.028	UFK
	DKS_Ø4X	7554	1.24	12.4	1.085	1.025	UFK
DÇKS	ÇKS	6992	1.15	8.4	1.036	1.066	KK
	DÇKS_Ø2	7474	1.23	8.9	0.976	1.028	KK
	DÇKS_Ø4	7108	1.17	8.4	1.033	1.108	KK
OKS	OKS_2X2	7043	1.16	11.5	0.967	1.032	KK+YÇA
	OKS_4X4	6498	1.07	10.2	1.048	1.079	KK+YÇA
	OKS_4X2	6735	1.11	10.7	1.012	1.047	KK+YÇA
	OKS_2X4	7216	1.19	11.5	0.944	1.002	KK+YÇA
DOKS	DOKS_Ø2	6337	1.04	9.9	1.083	1.141	KK+YÇA
	DOKS_Ø4	7140	1.18	11	0.968	1.051	KK+YÇA

Not: P_d : deneysel hasar yükü, P_{ref} : referans numuneye ait deneysel hasar yükü, P_a : analitik hasar yükü, P_s : sayısal (nümerik) hasar yükü, UFK: üst fiber kırılması, KK: kor kayma hasarı, YÇA: yüzey tabaka-çekirdek ayrılması, YB: yüzey tabaka burkulması (katlanma).

5.2.7 Yük- Şekil Değişirme Grafikleri

Numunelerin yük-şekil değişirme eğrileri Şekil 5.22' de gösterilmiştir (Boyuna çekme ve basma gerinim ifadeleri sırasıyla Ç ve B olarak belirtilmiştir). Örneklerin orta noktalarından ölçülen maksimum çekme ve basma gerinim değerleri Tablo 5.8' de verilmiştir. Deneysel sonuçlar, hem çekmede hem de basmadaki şekil değişirme değerlerinin, yüklemenin ilk aşamalarında doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, tüm örneklerde daha yüksek çekme gerinim değerleri ölçülmüştür. Bu netice laminat kompozit tabakanın, çekme modülünün basmaya göre daha düşük olduğunu ispatlamaktadır (bkz. Tablo 4.5). 3000 ile 3500 mikro çekme gerinim değerlerinde, numunelerin çekme tarafındaki (alt orta kısım) gerinim ölçer durmuş, hasar meydana gelmiştir. Bu gerinim seviyesi, yüzey tabakasının maksimum çekme gerinim değerinin yalnızca %16.6'sına denk gelmektedir. Bununla birlikte, köpük malzemenin maksimum çekme gerinim değerinden ise daha yüksektir (bkz. Tablo 4.3). Bu sonuç, kirişlerin alt yüzey tabakalarının çekme hasarına maruz kalmadığını doğrulamıştır.

DKS_Ø2K, Ø4K (Şekil 5.22 (a)), ÇKS (Şekil. 5.22 (c)), DÇKS (Şekil.5.22 (c)), OKS (Şekil 5.22 (d), (e)) ve DOKS (Şekil 5.22(f)) numunelerine ait grafiklerin çekme taraflarında köpük kayma hasarından dolayı az miktarda lineer olmayan davranış gözlemlenmiştir. Ancak, DKS_Ø2X, DKS_Ø4X ve referans numunelerinin şekil değiştirme eğrileri, Şekil 5.22 (b)'de görüldüğü gibi, hasara kadar doğrusal davranış sergilemiştir. Beklendiği gibi, oluk kesitleri benzer olan (kare veya dikdörtgen) örnekler benzer davranış sergilemiştir (bkz. Şekil 5.22 (d) ve (e)). Ek olarak, dikdörtgen oluk içeren kirişlerin çekme gerinim değerleri daha yüksek çıkmıştır. Köpük yapı içerisinde ağların veya olukların mevcudiyeti, referans numunesine kıyasla daha yüksek basma gerinim değerlerine neden olmuş ve üst yüzey tabakanın basma hasarını önlemiştir.



Şekil 5.22: Yük-şekil değiştirme grafikleri, a) DKS_Ø2,4K ve referans, b) DKS_Ø2,4X ve referans, c) DÇKS_Ø2,4 ve ÇKS, d) OKS2×2, OKS2×4 ve referans, e) OKS2×4, OKS4×4 ve referans, f) DOKS_Ø2,4 ve referans numuneler.

5.2.8 Ağırlık Artış Tespiti

Kompozit sandviç kirişlerin çekirdek modifikasyon işlemi (düşük yoğunluklu PVC köpük malzemesinin nispeten daha yoğun vinil ester reçine ile yer değiştirmesi), ağırlık artışına rağmen uygulanmıştır. Sandviç kirişlerin eğilme özelliklerinin kendi ağırlıklarıyla normleştirilmesi sağlanmıştır. Bu nedenle, her bir köpük konfigürasyonu için 1.0 m²'lik sandviç panellerin ağırlıkları ölçülmüştür. Tablo 5.4' de, kirişlerin eğilme hasar yükü / ağırlık oranını (P_d/W) içeren eğilme testi sonuçlarını göstermektedir. Tablo 5.5'de, her bir konfigürasyon için boşluk hacmi (%), ağırlığı (kg/m²) ve ağırlık artışı (%) verilmiştir. Asgari ve azami ağırlık artışları ise DKS_Ø2X için %2.8 ve DÇKS_Ø4 numuneler için %43.7 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.5: Sandviç kompozit numunelerin ağırlık karşılaştırması

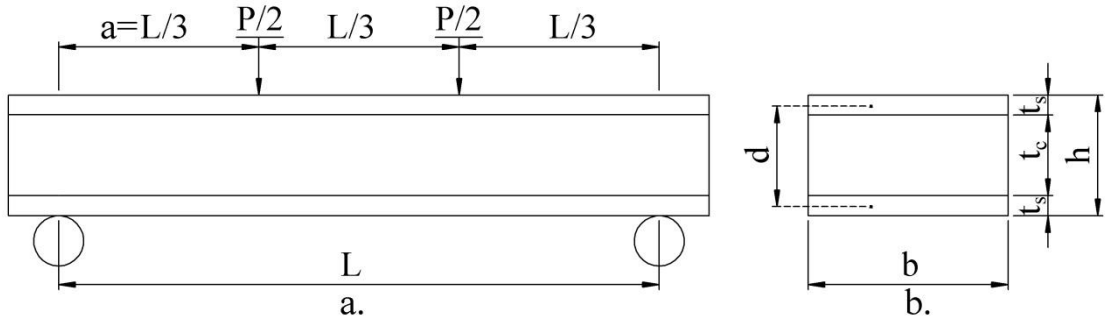
Numune	Boşluk hacmi (%)	Ağırlık (kg/m ²)	Ağırlık artışı (%)	
Referans	-	11.8	-	
DKS	DKS_Ø2K	0.32	12.3	4.1
	DKS_Ø4K	1.26	12.5	5.8
	DKS_Ø2X	0.2	12.1	2.8
	DKS_Ø4X	0.7	12.2	3.6
DÇKS	ÇKS	11.4	16.6	40.4
	DÇKS_Ø2	11.6	16.9	43.1
	DÇKS_Ø4	12.1	17.0	43.7
OKS	OKS2X2	1.0	12.2	3.5
	OKS4X4	4.2	12.8	8.5
	OKS4X2	2.1	12.6	6.8
	OKS2X4	2.1	12.6	6.8
DOKS	DOKS_Ø2	1.2	12.8	8.6
	DOKS_Ø4	1.7	13.0	10.4

5.2.9 Analitik Çalışma

Bu kısımda, sandviç kirişlerinin dört nokta eğilme yükü altındaki mekanik davranışları, kompozit laminat tabakaların ve PVC köpük çekirdeğinin genel mekanik özellikleri kullanılarak analitik olarak detaylı şekilde incelenmiştir.

5.2.9.1 Hasar Yükü ve Tipi

Şekil 5.23, kompozit sandviç kirişin yükleme tipini ve kesit geometrisini göstermektedir, t_s , yüzey tabaka kalınlığı, t_c , çekirdek malzemenin kalınlığı, b , sandviç kirişinin genişliği, $h = t_c + 2t_s$ sandviç kirişin toplam kalınlığıdır ve $d = t_c + t_s$ yüzey tabakalarının merkezi arasındaki uzaklığı göstermektedir.



Şekil 5.23: Dört (4) eğilme yükleme şeması ve kompozit sandviç kirişin kesit ölçüleri.

Sandviç kompozitlerin hasar tipi ve yük taşıma kapasiteleri, geometrik boyutlar, yüzey tabakasının ve çekirdek malzemenin mekanik özellikleri ve yükleme tipi gibi parametrelere bağlıdır. Kayma hasarı, çekirdeğin kayma mukavemeti değeri aşıldığında meydana gelmektedir [195]. Çekirdek kayma hasar yükü ($P_{c,kr}$) denklem 5.1' de verilmiştir [85].

$$P_{c,kr} = \frac{16(EI_{eş})\tau_{ck}}{4E_s t_s d + E_c t_c^2} \quad (5.1)$$

τ_{ck} , köpük malzemesinin kayma dayanımı, E_s ve E_c , sırasıyla yüzey tabaka ve köpük malzemelerinin elastikiyet modül değerleridir. Sandviç kiriş teorisine göre, referans numunesinin eşdeğer eğilme rijitliği ($EI_{eş,ref}$) denklem 5.2'ye göre hesaplanmaktadır [196].

$$EI_{eş,ref} = E_s \frac{bt_s d^2}{2} + E_s \frac{bt_s^3}{6} + E_c \frac{bt_c^3}{12} \quad (5.2)$$

Sandviç yapının ($EI_{eş}$) eşdeğer eğilme rijitliği hesabında paralel eksen teoremi uygulanmıştır. Pimlerin ve ağların enine kesitindeki katkısı göz önüne alınmış, ancak olukların eğilme rijitliği katkısını göz ardı edilerek, sandviç yapının ($EI_{eş}$) eşdeğer eğilme rijitliği (Denklem 5.3) elde edilmiştir [160, 197]. Ayrıntılı eşdeğer eğilme rijitlik denklemleri, Tablo 5.6 'da verilmiştir.

$$EI_{eş} = EI_{eş,ref} + \sum_{i:1}^n (E_{reçine} - E_{köpük}) I_{pim} + \sum_{i:1}^n (E_{reçine} - E_{köpük}) I_{ağ} \quad (5.3)$$

Tablo 5.6: Eşdeğer eğilme ve kayma rijitlik değerlerin analitik denklemleri

Numune	$EI_{eş}$	$AG_{eş}$
Referans	$EI_{eş,ref} = EI_{köpük} + 2 \times EI_{tabaka}$	$AG_{köpük}$
DKS	$EI_{eş,ref} + n \times (E_{reçine} - E_{köpük}) \frac{Dt_c^3}{12}$	$A \times \frac{G_{köpük} \times G_{reçine}}{V_{köpük} \times G_{reçine} + V_{pim} \times G_{köpük}}$
ÇKS	$EI_{eş,ref} + n \times (E_{reçine} - E_{köpük}) \frac{t_k t_c^3}{12}$	$A \times \frac{G_{köpük} \times G_{reçine}}{V_{köpük} \times G_{reçine} + V_{ağ} \times G_{köpük}}$
DÇKS	$EI_{eş,ref} + n \times (E_{reçine} - E_{köpük}) \left[\frac{t_k t_c^3}{12} + \frac{Dt_c^3}{12} \right]$	$A \times \frac{G_{köpük} \times G_{reçine}}{V_{köpük} \times G_{reçine} + (V_{pim} + V_{ağ}) \times G_{köpük}}$
OKS	$EI_{eş,ref}$	$A \times \frac{G_{köpük} \times G_{reçine}}{V_{köpük} \times G_{reçine} + V_{oluk} \times G_{köpük}}$
DOKS	$EI_{eş,ref} + n \times (E_{reçine} - E_{köpük}) \frac{Dt_c^3}{12}$	$A \times \frac{G_{köpük} \times G_{reçine}}{V_{köpük} \times G_{reçine} + (V_{pim} + V_{oluk}) \times G_{köpük}}$

Eğilmeden kaynaklanan düzlem içi gerilme, laminat kompozit tabakanın çekme/basma mukavemetini aşarsa hasar meydana gelmektedir. Kritik basma hasar yükü ($P_{s,kr}$) ise denklem 5.4 ile hesaplanmaktadır [85].

$$P_{s,kr} = \frac{\sigma_{sb}(EI_{eş})}{CE_S L \left(\frac{t_c}{2} + t_s \right)} \quad (5.4)$$

σ_{sb} , yüzey tabakasının basma dayanımı, L kirişin destekler arası mesafesi, C katsayısı dört (4) nokta eğilme testinde (yükleme noktaları arası uzunlu: L/3) için 1/6'dır.

Şekil 5.24, analitik olarak tahmin edilen (P_a), deneysel (P_d) ve sayısal (P_s) maksimum eğilme yükü değerlerini vermektedir. Eğilme hasar yüklerinin analitik ve deneysel sonuçları arasındaki sapma %1.15 ile %26.05 arasında değişmiştir. Eğilme hasar yüklerine ait deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki en büyük sapma referans numune için 1.58 kN

olarak belirlenmiştir. Bu duruma yükleme pimi altında basma/burkulma ve ezilme hasar tiplerinin aynı anda olması neden olmuştur.

Pimlerin plastik deformasyonu (burkulma hasarı) analitik hesaplamalarda dikkate alınmamıştır, bu durum DKS numuneler için sapma değerlerinin artışına neden olmuştur. Genel olarak, analitik hasar modellerinin, deneysel neticeleri: kayma hasar yüklerini %30 ve eğilme hasar yüklerini %20 hata içerisinde tahmin ettiği bilinmektedir. Bu fark, temas bölgesindeki karmaşık gerilme durumundan ve delaminasyon hasarının hesaba katılmamasından kaynaklanmıştır [82]. Eğilme hasar yüklerinin sayısal ve deneysel sonuçları arasındaki sapma, %0.2 ile %14 arasında değişmiştir. SEA ve deneysel sonuçlar analitik hesaplamalara kıyasla daha iyi uyum sağlamıştır (Şekil 5.24). DKS, OKS ve DOKS sandviç kirişlerin eğilme yükü taşıma kapasiteleri, referans örneğine göre %4 ile %34 oranında artmıştır (Tablo 5.4). DÇKS_Ø2 ve DÇKS_Ø4 numunelerinin eğilme hasar yükü, ÇKS numunesine kıyasla sırasıyla %7 ve %2 artış göstermiştir. Elde edilen bulgular, çekirdek işleme konfigürasyonlarının, denizel sandviç kompozitlerin eğilme hasar yüklerini arttırdığını ortaya koymuştur.

Ayrıca, sandviç kirişlerin (P_d/W) spesifik eğilme yükleri Tablo 5.4' de verilmiştir. ÇKS numunesinin ağırlık kazancının, özel uygulamalara ve performans gereksinimlerine bağlı olarak göz ardı edilebileceği bilinmelidir. Çapraz kesik köpükler tekne gövdesinde daha fazla rijitlik gereksinimi duyulan karina ve borda bölgeleri gibi eğrisel yüzeyleri üretmek için (bükülebilirlik) tercih edilmektedir [150]. Öte yandan, düz köpük paneller ise güverte zemininde ve perde panel gibi tekne yapımındaki iç uygulamalarında kullanılmaktadır. OKS4×4 ve DOKS_Ø2 numuneleri dışında, tüm örnekler referans numunesinden daha yüksek spesifik eğilme mukavemeti sağlamış, böylece ağırlık artışının tolere edilebildiği ve eğilme performansının gerekli olduğu kritik uygulamalar için çekirdek modifikasyon prosesinin işlevini yerine getirdiği görülmüştür.

5.2.9.2 Orta Nokta Sehim Değeri

Dört (4) nokta eğilme yükü altında basit mesnetli kompozit sandviç kirişin yük-deplasman davranışı, Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak belirlenmiştir, burada toplam deplasman (Denklemler 5.5) kayma ve eğilme deformasyonlarının toplamına eşittir [159].

$$\delta_{\text{toplam}} = \delta_{\text{eğilme}} + \delta_{\text{kayma}} = \frac{23PL^3}{1296EI_{e\vartheta}} + \frac{PL}{6AG_c} \quad (5.5)$$

Burda, G_c , köpük malzemesinin kayma modülü ve $AG_c = b (t_c + t_s) G_c$, sandviç kompozit kirişin eşdeğer kayma rijitlik değeridir. Bununla birlikte, bu denklem sadece referans numune için kullanılmaktadır.

Çekirdek modifikasyonları dikkate alındığında, köpük çekirdeğin eşdeğer kayma rijitliği ($AG_{eş}$) denklem 5.7 ile hesaplanmaktadır [153, 158].

$$AG_{eş} = \sum b(t_c + t_s)G_{xz,i} \quad (5.6)$$

$$AG_{eş} = b(t_c + t_s) \times \left\{ 1 / \left(\frac{\sum(V_{pim} + V_{ağ} + V_{oluk})}{G_{reçine}} + \frac{V_{köpük}}{G_{köpük}} \right) \right\} \quad (5.7)$$

$V_{köpük}$, V_{pim} , $V_{ağ}$ ve V_{oluk} , sırasıyla köpük, pim, ağ ve olukların hacim oranlarıdır. $G_{köpük}$ ve $G_{reçine}$, sırasıyla köpük ve reçine malzemesinin kayma modülü değerleridir. Çekirdek modifikasyonlarının hacimsel oranları (oluklar, delikler ve ağlar) Tablo 5.5' de sunulmuştur. Ayrıntılı eşdeğer kayma rijitliği denklemleri Tablo 5.6' da verilmiştir. Boşlukları dolduran katı reçine için kayma modülü, G , 1.07 GPa' dır [188]. PVC köpüğün kayma özellikleri üretici firma kataloğundan sağlanmıştır [184].

Tablo 5.7, 1 kN ve 2 kN yükleri için doğrusal elastik bölgeden elde edilen teorik ($\delta_{teo.}$) ve deneysel ($\delta_{deneysel}$) deplasman değerlerini göstermektedir. Teorik formül orta nokta deplasman değerini ortalama %12.6 ve standart sapma 0.119 olacak şekilde fazla tahmin etmiştir. Orta nokta deplasmana ait teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki en büyük farklılık ve maksimum sapma, ÇKS numunesi için sırasıyla, 0.758 mm ve %36.1 olarak tespit edilmiştir. Bu farkın olası nedeni ise, ÇKS numunesinin kayma rijitlik değerini artıran ve kayma deformasyonunu azaltan ağlardaki katılaşmış reçinedir [150]. Reçine dolan çapraz kesik köpük malzemenin deneysel kayma rijitliği değerinin belirlenmesi gerekmektedir, bu deneysel veri kullanılarak teorik toplam deplasman değerindeki sapma miktarı azaltılabilir. Bu varsayımlara dayanarak, toplam teorik sehim değerlerinde yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.7: Analitik ve deneysel sehim değerlerinin karşılaştırılması

Numune	Yük (kN)	$\delta_{e. \text{teo.}}$ (mm)	$\delta_{k. \text{teo.}}$ (mm)	$\delta_{\text{top. teo.}}$ (mm)	$\delta_{\text{deneysel.}}$ (mm)	$\delta_{\text{top. teo.}} / \delta_{\text{deneysel}}$		
Referans	1	0.732	0.877	1.609	1.69	0.952		
	2	1.464	1.754	3.218	3.41	0.944		
DKS	DKS_Ø2K	1	0.724	0.875	1.599	1.33	1.202	
		2	1.448	1.749	3.197	2.76	1.158	
	DKS_Ø4K	1	0.717	0.867	1.584	1.29	1.228	
		2	1.433	1.733	3.166	2.69	1.177	
	DKS_Ø2X	1	0.727	0.876	1.603	1.48	1.083	
		2	1.453	1.751	3.204	2.97	1.079	
	DKS_Ø4X	1	0.722	0.871	1.593	1.44	1.106	
		2	1.443	1.743	3.186	2.9	1.099	
DÇKS	ÇKS	1	0.688	0.741	1.429	1.06	1.348	
		2	1.377	1.482	2.858	2.1	1.361	
	DÇKS_Ø2	1	0.684	0.740	1.423	1.08	1.318	
		2	1.367	1.479	2.847	2.12	1.343	
	DÇKS_Ø4	1	0.679	0.735	1.415	1.16	1.219	
		2	1.358	1.471	2.829	2.28	1.241	
	OKS	OKS2X2	1	0.732	0.868	1.600	1.48	1.081
			2	1.464	1.736	3.200	2.94	1.088
OKS4X4		1	0.732	0.841	1.573	1.4	1.123	
		2	1.464	1.683	3.147	2.78	1.132	
OKS4X2		1	0.732	0.859	1.591	1.63	0.976	
		2	1.464	1.719	3.183	3.18	1.001	
OKS2X4		1	0.732	0.859	1.591	1.49	1.068	
		2	1.464	1.719	3.183	2.96	1.075	
DOKS	PRGFS_Ø2	1	0.727	0.867	1.594	1.572	1.014	
		2	1.453	1.734	3.187	3.125	1.020	
	PRGFS_Ø4	1	0.722	0.862	1.584	1.533	1.033	
		2	1.443	1.724	3.167	2.951	1.073	
Sonuçlar	Ortalama	-	-	-	-	1.126		
	St. Sapma	-	-	-	-	0.119		

Not: $\delta_{e. \text{teo.}}$: teorik eğilme deplasmanı, $\delta_{k. \text{teo.}}$: teorik kayma deplasmanı, $\delta_{\text{top. teo.}}$: toplam teorik deplasman, δ_{deneysel} : deneysel toplam deplasman değeri

5.2.9.3 Eğilme Rijitliği

Kirişlerin başlangıç eğilme rijitlik K_i değerleri, yük-deplasman eğrilerinin eğiminden elde edilmiş ve Şekil 5.25' de verilmiştir. Rijitlik (K_i), uygulanan yük ve sandviç kirişlerin orta nokta sehım değerleri ile ilgilidir. Bu denklemden yola çıkarak yük-deplasman grafik eğrisinin eğimi arttıkça başlangıç rijitlik değerinin arttığı söylenebilir. Başlangıç ve efektif eğilme rijitlik ifadeleri denklem 5.8 ve 5.9'da sırasıyla verilmiştir [197].

$$K_i = \left[\frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right] \quad (5.8)$$

$$EI_{ef.} = \frac{a(3L^2 - 4a^2)}{48} K_i \quad (5.9)$$

burada $(\Delta P/\Delta \delta)$ deneysel yük deplasman eğrisinin başlangıçtaki doğrusal elastik bölümünün eğimi, L destekler arası uzunluk ve a, yükleme noktası ile destek arasındaki mesafeyi belirten kesme açıklığını ifade etmektedir.

Kirişlere ait başlangıç rijitliği, efektif eğilme rijitliği, eşdeğer ve efektif rijitlik oranları, spesifik efektif rijitlik değerleri Tablo 5.8' de verilmiştir.

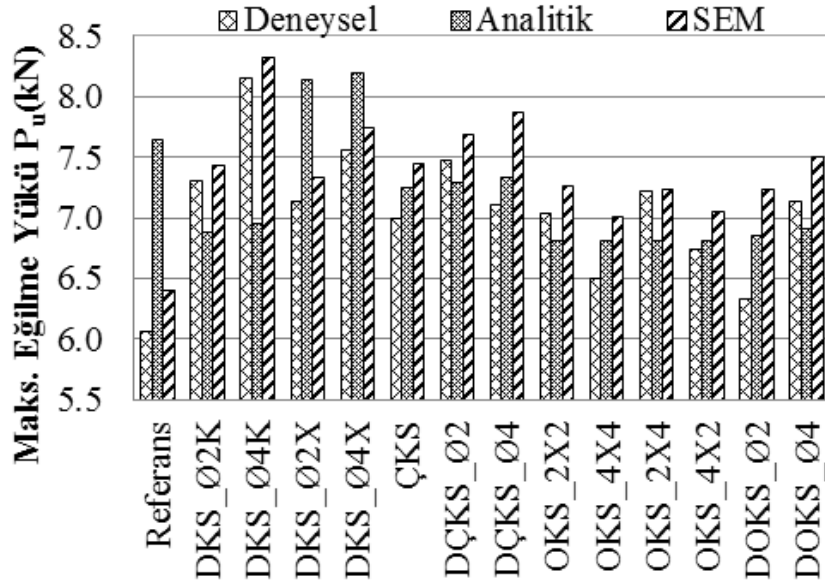
ÇKS numunesi, ağların varlığı nedeniyle en yüksek başlangıç eğilme rijitlik değerini göstermiştir (Şekil 5.25). Benzer sonuç önceki çalışmalarda bildirilmiştir [153]. DÇKS numunelerinin başlangıç eğilme rijitlik değerleri, delik çap artışı ile azalmıştır. Ek delikler yük aktarma kabiliyetini artırmış ancak kirişin elastik bölgede daha fazla sehım yapmasına neden olmuştur. Tüm örnekler için eşdeğer rijitlik değerleri, Tablo 5.6' da verilen ayrıntılı analitik denklemlere göre hesaplanmıştır. ÇKS ve DÇKS numuneleri, Şekil 5.26' da görüldüğü gibi DKS, OKS ve DOKS numunelerine kıyasla daha yüksek efektif eğilme rijitliği göstermiştir. Bununla birlikte, eşdeğer rijitlik değerleri, esasen kayma deformasyonunun önemsiz etkisinden dolayı, efektif rijitlik değerlerine daha yakın çıkmıştır. Ayrıca, ÇKS numunesinin efektif rijitliği, kontrol numunesine göre % 60.9 daha yüksek çıkmıştır. Köpükte açılan olukların ve deliklerin sandviç kirişlerin efektif rijitliği değerlerinde %5 ile %29 arasında artış sağladığı görülmüştür. DKS ve OKS kirişleri için eşdeğer rijitlik verilerinin efektif değerlerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu gözlenmiş, farklılıkların %69.6 ile %102.4 arasında değiştiği tespit edilmiştir. ÇKS

numunesinin en yüksek spesifik efektif rijitlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir (bkz. Şekil 5.27).

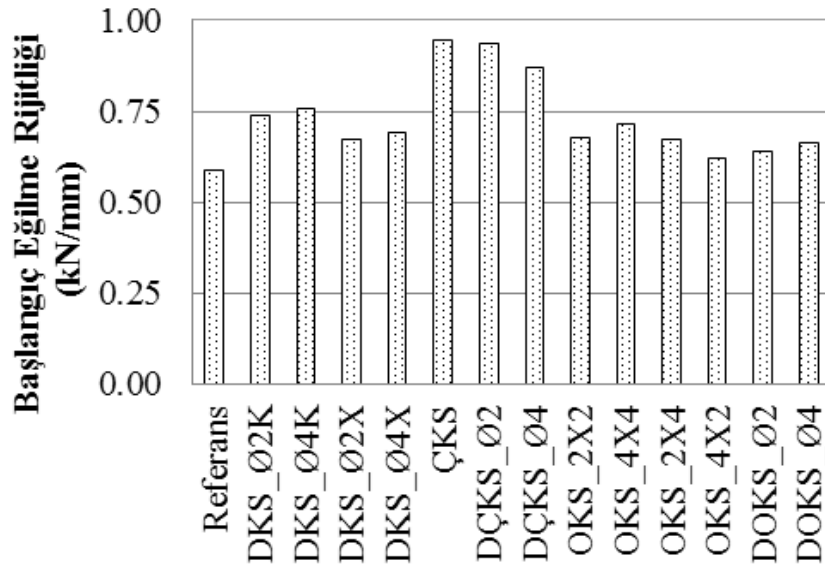
Tablo 5.8: Başlangıç rijitlik, efektif rijitlik, eşdeğer ve efektif rijitlik oranları, spesifik efektif rijitlik, maksimum basma ve çekme gerinim değerleri

Numune	K_i (kN/mm)	$EI_{ef.}$ ($\times 10^9$) (N.mm ²)	$EI_{eş}/EI_{ef.}$	$EI_{ef.}/W$ ($\times 10^9$) (N.mm ² /kg)	Maks. gerinim (mm/mm)		
					Basma (%)	Çekme (%)	
Referans	0.589	0.953	2.022	1.613	-0.224	0.262	
DKS	DKS_Ø2K	0.738	1.193	1.725	1.724	-0.331	0.348
	DKS_Ø4K	0.759	1.227	1.696	1.726	-0.4	0.42
	DKS_Ø2X	0.675	1.091	1.879	1.798	-0.25	0.303
	DKS_Ø4X	0.692	1.119	1.846	1.831	-0.3	0.357
DÇKS	ÇKS	0.948	1.533	1.412	1.851	-0.275	0.326
	DÇKS_Ø2	0.935	1.512	1.442	1.791	-0.306	0.303
	DÇKS_Ø4	0.87	1.406	1.562	1.658	-0.32	0.351
OKS	OKS2×2	0.678	1.096	1.856	1.796	-0.265	0.306
	OKS4×4	0.717	1.159	1.755	1.811	-0.26	0.305
	OKS4×2	0.621	1.005	2.024	1.598	-0.243	0.326
	OKS2×4	0.673	1.089	1.868	1.736	-0.247	0.331
DOKS	DOKS_Ø2	0.638	1.032	1.986	1.611	-0.346	0.36
	DOKS_Ø4	0.665	1.076	1.919	1.651	-0.335	0.363

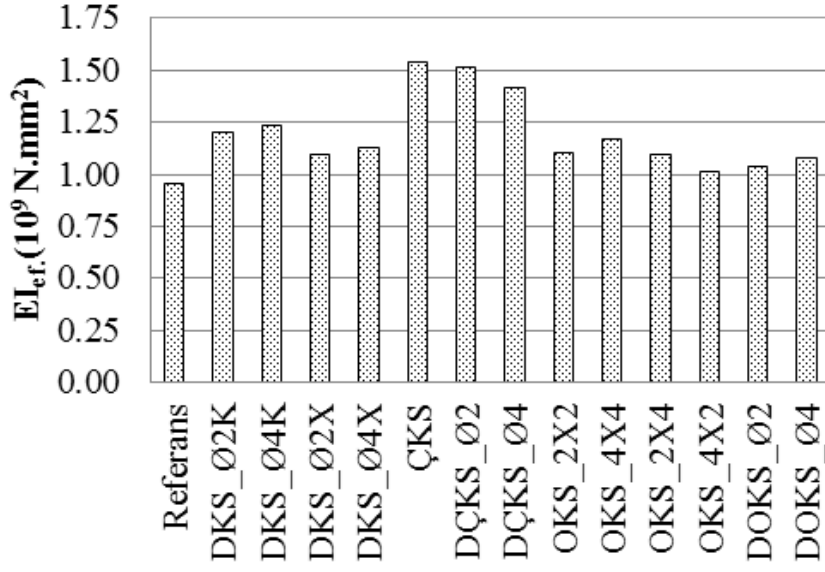
Not: K_i : başlangıç rijitliği (kN/mm), $EI_{ef.}$: efektif rijitlik (N.mm²), $EI_{eş}/EI_{ef.}$: eş değer ve efektif rijitlik oranları, $EI_{ef.}/W$ =spesifik efektif rijitlik değerleri (N.mm²/kg)



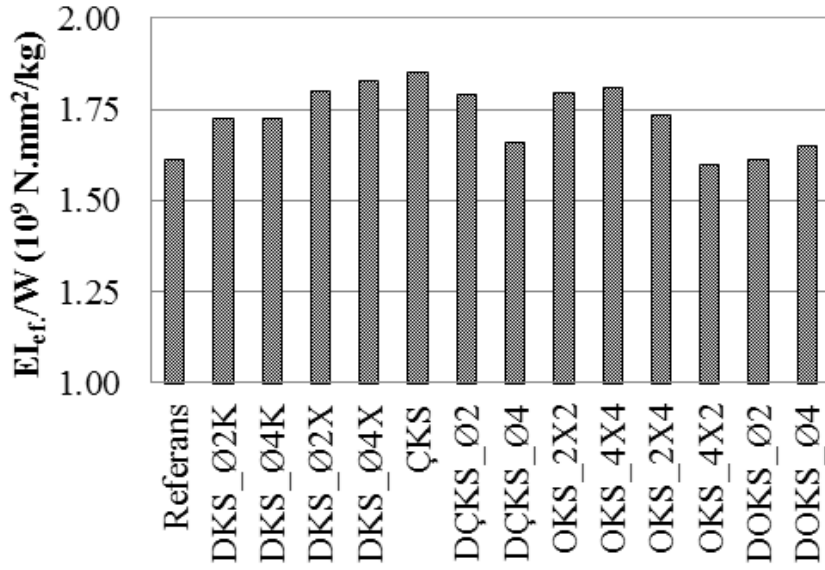
Şekil 5.24: Eğilme hasar yüklerinin analitik, deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 5.25: Başlangıç eğilme rijitlik değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.26: Efektif eğilme rijitlik değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.27: Spesifik efektif eğilme rijitlik değerlerinin karşılaştırılması.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında çekirdek modifikasyonu uygulanmış köpük çekirdek yapıya sahip denizel sandviç kompozitlerin mekanik performansları araştırılmıştır. Bu amaçla bölümümüzün CNC laboratuvarında mevcut olan 3 eksenli freze tezgâhında PVC köpük malzemeye farklı boyutlara sahip delik ve yüzeysel oluk boşluklar işlenmiştir. VARIM tekniği ile sandviç panel üretimi esnasında reçinenin açılan boşlukları doldurması ve çekirdek yapıda pim ve yiv takviyelerini oluşturması sağlanmıştır. Deniz taşıtlarında gövde ve güvertede yer alan yapı malzemelerinin öncelikli olarak eğilme yüküne maruz kalması nedeniyle tez kapsamında sandviç kompozitlerin eğilme davranışının incelenmesi ön planda tutulmuştur.

6.1 Pim Takviyeli PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozit Numunelere Ait Sonuçların Değerlendirilmesi

Tezin ilk bölümünde, farklı çaplara sahip delikler açılmış PVC köpük yapıları denizel sandviç panellerinin üç (3) nokta eğilme ve düzlem dışı basma performansları üzerine deneysel bir çalışma sunulmuştur.

- Delik açılmış PVC köpük yapıları sandviç kompozitler VARIM metodu ile çevresel besleme yapılarak başarıyla üretilmiştir. PVC köpüğün kalınlık doğrultusunda açılan dairesel kesitli boşlukların reçine ile tamamen dolması sağlanmıştır. Akış filesi ve soyma kumaşı sadece kalıp alt tarafında kullanılmıştır. Bu noktada sarf malzeme tüketiminin azalmış olması önemlidir.
- Pim takviyeli denizel sandviç kompozitlerin, eğilme yükü taşıma kabiliyeti ve düzlem dışı basma dayanımı değerlerinde önemli artış sağlanmıştır. Pimler üst ve alt yüzey tabakaları PVC köpük malzemeye rijit olarak bağlanmıştır.
- Üç nokta eğilme testlerinde, pim takviyeli panellerin hasar yükleri ve hasar tipleri, reçine pim çapına, pim merkezleri arasındaki mesafeye ve yükleme tipine (alt veya üst eğilme) bağlı olarak değişmiştir. Beklendiği gibi, düzlem dışı basma özelliklerinde en yüksek artış elde edilmiştir.
- Pim çapı artışı ile sandviç panellerin eğilme ve basma mukavemet değerlerinde artış sağlanmıştır.
- Pimler köpük malzemenin basma dayanımı ve rijitlik değerlerinde artış sağlamıştır. Düzlem-dışı basma testlerinde, Ø8-s12 numunesine ait basma dayanımı ve modül

değerlerinde referans panele kıyasla sırasıyla %570 ve %254 değerlerinde maksimum artış belirlenmiştir.

- Üç (3) nokta eğilme test sonuçlarında ise referans panele göre, Ø8-s18 numunesi için %133.8 değerinde maksimum artış tespit edilmiştir.
- Pim takviyeli sandviç numunelerin ağırlıklarında artış gözlemlenmiş ve her birinin eğilme ve basma dayanım/ağırlık oranları referans numunesi ile karşılaştırılmıştır. Maksimum ağırlık artışı ise Ø8-s12 numunesi için %67.4 olarak belirlenmiştir.
- Pim takviyeli ve referans sandviç kirişlerin spesifik hasar yükü oranları göz önüne alındığında, tüm numuneler basma ve eğilme dayanımları ağırlıklarından daha fazla artış göstermiştir. Bu sonuç, sandviç kompozitlerin tasarım sürecinde daha fazla yük taşıma kapasitesi ve çekirdek ezilme direnci gerektiğinde, köpük malzemede daha yoğun delik boşluğu oluşturularak çözüm bulunabileceğini ortaya koymuştur.
- Ayrıca çekirdek modifikasyonları polimer köpük üreticileri tarafından kolayca işlenebilir ve işlenmiş köpük levhalar ilave hazırlık ve işleme maliyetleri olmadan tekne ve yat üreticileri tarafından kullanılabilir. Bu durum delik açılmış köpük malzemelerin denizcilik uygulamalarında istenen mekanik performansı elde etmek için basit ve uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir.

6.2 Delik, Oluk Ve Çapraz Kesik Açılmış PVC Köpük İçeren Denizel Sandviç Numunelere Ait Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu kısımda, farklı çekirdek modifikasyonu içeren denizel sandviç kompozit kirişlerin dört (4) nokta eğilme yükü altında mekanik performansı deneysel, analitik ve sayısal olarak incelenmiştir.

- Deneysel sonuçlar, çekirdek modifikasyonlarının; delik ve oluk açılmış köpüklerin sandviç kompozit kirişlerin eğilme mukavemetinde önemli bir artış sağladığını göstermiştir.
- Delik açma işleminin, eğilme özelliklerini geliştirmek için oluk geometrisine kıyasla daha etkili olduğu belirlenmiştir. Referans numuneye göre, DKS_Ø4K numunesi eğilme hasar yük değerinde %34 oranında maksimum artış göstermiştir.
- Test edilen sandviç numunelerin eğilme davranışının ve hasar mekanizmalarının, çekirdek işleme konfigürasyonları tarafından manipüle edilebileceği görülmüştür.

- Oluk ve delik geometrisine sahip boşlukların reçine ile dolması neticesinde sandviç panellerin ağırlık değerlerinde artış olmuştur. Ağırlık değerlerinde maksimum artış %40 ile %44 oranında ÇKS ve DÇKS numuneleri için belirlenmiştir.
- Eşdeğer ve efektif eğilme rijitlik değerlerini hesaplamak için analitik denklemler kullanılmıştır. Teorik hesaplamalarda kayma etkisinin dikkate alınamaması nedeniyle efektif ile eşdeğer rijitlik oranları yüksek çıkmıştır. Kayma şekil değiştirme miktarının düşük olduğu ÇKS numunelerde ise bu oran en düşük değeri almıştır.
- ÇKS numunesi efektif eğilme rijitlik değerinde %61 oranında maksimum artış göstermiştir.
- Spesifik eğilme dayanımı ve spesifik efektif rijitlik değerleri incelendiğinde genel olarak ağırlık artışının tolere edilebildiği ve eğilme performansının gerekli olduğu yapısal uygulamalar için çekirdek modifikasyon işleminin işlevini yerine getirdiği belirlenmiştir.
- Sandviç kompozit numunelerin eğilme davranışları, yüzey tabakaları lineer ortotropik ve köpük çekirdek davranışını temsilen izotropik sertleşme plastisite malzeme modelleri kullanılarak ANSYS sonlu elemanlar analizi programında sayısal olarak tahmin edilmiştir.
- SEA simülasyonları referans, DKS, OKS ve DOKS örneklerinin elastik ve plastik bölgelerdeki eğilme tepkilerini doğru bir şekilde yakalamıştır. Ağ yapılarının lineer elastik yaklaşımı nedeniyle, ÇKS ve DÇKS numunelerinde elastik bölgeyi takip eden plastik alanda sapma fazla gözlemlenmiştir.
- Yüzey tabakalarının yüklemeye ve destek pimleri altında bölgesel hasara uğraması ve çekirdek malzemenin ezilmesine sebebiyet vermesi üç (3) ve dört (4) nokta eğilme testlerinin doğal bir neticesi olarak bilinmektedir. Bu nedenle, örnek olarak; düzgün yayılı yüklemeye gibi farklı zorlama koşullarının neden olduğu hasar mekanizmalarının incelenmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

7. KAYNAKLAR

- [1] R. R. Nagavally, "Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications," *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, vol. 5, pp. 87-92, 2016.
- [2] F. A. Cassis and R. C. Talbot, "Polyester and vinyl ester resins," in *Handbook of Composites*: Springer, 1998, pp. 34-47.
- [3] G. Lubin, *Handbook of composites*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [4] A. T. Bhatt, P. P. Gohil, and V. Chaudhary, "Primary Manufacturing Processes for Fiber Reinforced Composites: History, Development & Future Research Trends," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 330, no. 1: IOP Publishing, p. 012107.
- [5] W. W. Adams and R. Eby, "High-performance polymer fibers," *MRS Bulletin*, vol. 12, no. 8, pp. 22-26, 1987.
- [6] I. M. Daniel, O. Ishai, I. M. Daniel, and I. Daniel, *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford university press New York, 1994.
- [7] D. Gay, *Composite materials: design and applications*. CRC press, 2014.
- [8] A. K. Kaw, *Mechanics of composite materials*. CRC press, 2005.
- [9] E. J. Barbero, *Introduction to composite materials design*. CRC press, 2017.
- [10] S. Mazumdar, *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CrC press, 2001.
- [11] T. Clyne and D. Hull, *An introduction to composite materials*. Cambridge university press, 2019.
- [12] A. B. Strong, *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- [13] J. Karger-Kocsis, H. Mahmood, and A. Pegoretti, "Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites," *Progress in Materials Science*, vol. 73, pp. 1-43, 2015.
- [14] K. Edwards, "An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes," *Mater. Design.*, vol. 19, no. 1-2, pp. 1-10, 1998.
- [15] J. Summerscales, "Materials selection for marine composites," in *Marine Composites: Design and Performance*: Elsevier/Woodhead imprint, 2018.
- [16] *ASTM C274-99, ASTM standard terminology of structural sandwich constructions*, ASTM, West Conshohocken, PA, 1999.

- [17] L. A. Carlsson and G. A. Kardomateas, *Structural and failure mechanics of sandwich composites*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [18] J. R. Vinson, *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. CRC Press, 1999.
- [19] D. Zenkert, *An introduction to sandwich structures*. 1995.
- [20] K. F. Karlsson and B. TomasÅström, "Manufacturing and applications of structural sandwich components," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 28, no. 2, pp. 97-111, 1997.
- [21] R. Pemberton, J. Summerscales, and J. Graham-Jones, *Marine Composites: Design and Performance*. Woodhead Publishing, 2018.
- [22] G. Neşer, "Polymer based composites in marine use: history and future trends," *Procedia Eng.*, vol. 194, pp. 19-24, 2017.
- [23] A. Mouritz, E. Gellert, P. Burchill, and K. Challis, "Review of advanced composite structures for naval ships and submarines," *Compos. Struct.*, vol. 53, no. 1, pp. 21-42, 2001.
- [24] C. Russell, "Composites: long-term viability and benefits," *Reinforced Plastics*, vol. 49, no. 9, pp. 36-42, 2005.
- [25] O. Guillermin, "Composites put wind in the sails of all kinds of vessels," *Reinforced Plastics*, vol. 54, no. 4, pp. 28-31, 2010.
- [26] J. Summerscales, M. Singh, and K. Wittamore, "Disposal of composite boats and other marine composites," in *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*: Elsevier, 2016, pp. 185-213.
- [27] M. Singh, J. Summerscales, and K. Wittamore, "Disposal of composite boats and other marine composites," in *Management, Recycling and Reuse of Waste Composites*: Elsevier, 2010, pp. 495-519.
- [28] G. Egglestone and D. Turley, "Flammability of GRP for use in ship superstructures," *Fire Mater.*, vol. 18, no. 4, pp. 255-260, 1994.
- [29] A. P. Mouritz and Z. Mathys, "Post-fire mechanical properties of marine polymer composites," *Compos. Struct.*, vol. 47, no. 1-4, pp. 643-653, 1999.
- [30] S. Job, "Why not composites in ships?," *Reinforced Plastics*, vol. 59, no. 2, pp. 90-93, 2015.
- [31] G. Marsh, "Marine composites—drawbacks and successes," *Reinforced Plastics*, vol. 54, no. 4, pp. 18-22, 2010.
- [32] E. G. Associates, *Marine composites*. Eric Greene Associates, 1999.

- [33] P. Goubalt and S. Mayes, "Comparative analysis of metal and composite materials for the primary structures of a patrol craft," *Naval engineers journal*, vol. 108, no. 3, pp. 387-397, 1996.
- [34] K.-E. Mäkinen, S.-E. Hellbratt, and K.-A. Olsson, "The development of sandwich structures for naval vessels during 25 years," in *Mechanics of Sandwich Structures*: Springer, 1998, pp. 13-28.
- [35] G. Marsh, "Composites boost patrol craft performance," *Reinforced Plastics*, vol. 50, no. 2, pp. 18-22, 2006.
- [36] S. Aksu, S. Cannon, C. Gardiner, and M. Gudze, "Hull Material Selection for Replacement Patrol Boats-An Overview," DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION VICTORIA (AUSTRALIA ...), 2002.
- [37] J. R. Vinson and R. L. Sierakowski, *The behavior of structures composed of composite materials*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [38] S.-E. Hellbratt, "Experiences from design and production of the 72 m CFRP-sandwich corvette visby," in *Proceedings of the 6th international conference on sandwich construction*. CRC Press, Fort Lauderdale, 2003, pp. 15-24.
- [39] J. Thomas, "HMS Wilton—a glass-reinforced plastics minehunter," *Composites*, vol. 3, no. 2, pp. 79-82, 1972.
- [40] D. Hall and B. Robson, "A review of the design and materials evaluation programme for the GRP/foam sandwich composite hull of the RAN minehunter," *Composites*, vol. 15, no. 4, pp. 266-276, 1984.
- [41] D. Chalmers, "Experience in design and production of FRP marine structures," *Mar. Struct.*, vol. 4, no. 2, pp. 93-115, 1991.
- [42] O. Gullberg and K.-A. Olsson, "Design and construction of GRP sandwich ship hulls," *Mar. Struct.*, vol. 3, no. 2, pp. 93-109, 1990.
- [43] L. Dokos, "Adoption of marine composites—a global perspective," *Reinforced Plastics*, vol. 57, no. 3, pp. 30-32, 2013.
- [44] D. Mathijssen, "Now is the time to make the change from metal to composites in naval shipbuilding," *Reinforced Plastics*, vol. 60, no. 5, pp. 289-293, 2016.
- [45] "Composite Materials and Structures for the Marine Environment, Case studies: offshore structures, naval vessels, yacht hulls, canoes, sailcloth." <https://www.fose1.plymouth.ac.uk/sme/composites/marine.htm> (accessed 05.12.2019, 2019).

- [46] L. Calabrese, G. Di Bella, and V. Fiore, "Manufacture of marine composite sandwich structures," in *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*: Elsevier, 2016, pp. 57-78.
- [47] L. Sutherland, "A review of impact testing on marine composite materials: Part I—Marine impacts on marine composites," *Compos. Struct.*, vol. 188, pp. 197-208, 2018.
- [48] L. Sutherland, "A review of impact testing on marine composite materials: Part II—Impact event and material parameters," *Compos. Struct.*, vol. 188, pp. 503-511, 2018.
- [49] L. Sutherland, "A review of impact testing on marine composite materials: Part III—Damage tolerance and durability," *Compos. Struct.*, vol. 188, pp. 512-518, 2018.
- [50] V. Crupi, G. Epasto, and E. Guglielmino, "Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: honeycomb vs. foam," *Mar. Struct.*, vol. 30, pp. 74-96, 2013.
- [51] A. Kootsookos and A. Mouritz, "Seawater durability of glass-and carbon-polymer composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 10-11, pp. 1503-1511, 2004.
- [52] A. Kootsookos and P. Burchill, "The effect of the degree of cure on the corrosion resistance of vinyl ester/glass fibre composites," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 35, no. 4, pp. 501-508, 2004.
- [53] G. Di Bella, L. Calabrese, and C. Borsellino, "Mechanical characterisation of a glass/polyester sandwich structure for marine applications," *Mater. Design.*, vol. 42, pp. 486-494, 2012.
- [54] K. Kolat, G. Neşer, and Ç. Özses, "The effect of sea water exposure on the interfacial fracture of some sandwich systems in marine use," *Compos. Struct.*, vol. 78, no. 1, pp. 11-17, 2007.
- [55] N. Mitra, "A methodology for improving shear performance of marine grade sandwich composites: sandwich composite panel with shear key," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 5, pp. 1065-1072, 2010.
- [56] D. Chalmers, "The potential for the use of composite materials in marine structures," *Mar. Struct.*, vol. 7, no. 2-5, pp. 441-456, 1994.
- [57] J. Hoge and C. Leach, "Epoxy resin infused boat hulls," *Reinforced Plastics*, vol. 60, no. 4, pp. 221-223, 2016.
- [58] G. Marsh, "Vinyl ester—the midway boat building resin," *Reinforced Plastics*, vol. 51, no. 8, pp. 20-23, 2007.
- [59] L. Gil, "Cork composites: a review," *Materials*, vol. 2, no. 3, pp. 776-789, 2009.

- [60] O. Castro, J. M. Silva, T. Devezas, A. Silva, and L. Gil, "Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures," *Mater. Design.*, vol. 31, no. 1, pp. 425-432, 2010.
- [61] L. Reis and A. Silva, "Mechanical behavior of sandwich structures using natural cork agglomerates as core materials," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 11, no. 6, pp. 487-500, 2009.
- [62] C. Cremonini, F. Negro, M. Properzi, and R. Zanuttini, "Wood-based composites in marine craft: The state of the art in Italy," in *COST E49 conference: Lightweight wood-base composites. Production, properties and usage, Bled, 23rd-25th June*, 2008, pp. 15-33.
- [63] C. Ulven and U. Vaidya, "Post-fire low velocity impact response of marine grade sandwich composites," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 37, no. 7, pp. 997-1004, 2006.
- [64] W. H. Seemann III, "Plastic transfer molding techniques for the production of fiber reinforced plastic structures," ed: Google Patents, 1990.
- [65] J. Summerscales and T. Searle, "Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 219, no. 1, pp. 45-58, 2005.
- [66] S. Reuterlöv, "Cost effective infusion of sandwich composites for marine applications," *Reinforced Plastics*, vol. 46, no. 12, pp. 30-34, 2002.
- [67] S. Reuterloev, "Grooved Core Materials Aid Resin Infusion- Influence on Mechanical Properties," *SAMPE journal*, vol. 39, no. 6, pp. 57-64, 2003.
- [68] R. Eliasson, L. Larsson, and M. Orych, *Principles of yacht design*. A&C Black, 2014.
- [69] J. Dai and H. T. Hahn, "Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding," *Compos. Struct.*, vol. 61, no. 3, pp. 247-253, 2003.
- [70] K. Kanny and H. Mahfuz, "Flexural fatigue characteristics of sandwich structures at different loading frequencies," *Compos. Struct.*, vol. 67, no. 4, pp. 403-410, 2005.
- [71] C. Borsellino, L. Calabrese, and A. Valenza, "Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structures," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 10-11, pp. 1709-1715, 2004.
- [72] A. Russo and B. Zuccarello, "Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels," *Compos. Struct.*, vol. 81, no. 4, pp. 575-586, 2007.

- [73] A. Mostafa, K. Shankar, and E. Morozov, "Experimental, theoretical and numerical investigation of the flexural behaviour of the composite sandwich panels with PVC foam core," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 21, no. 4, pp. 661-675, 2014.
- [74] A. Mostafa, K. Shankar, and E. Morozov, "Behaviour of PU-foam/glass-fibre composite sandwich panels under flexural static load," *Materials and Structures*, vol. 48, no. 5, pp. 1545-1559, 2015.
- [75] I. M. Daniel and J. L. Abot, "Fabrication, testing and analysis of composite sandwich beams," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 12-13, pp. 2455-2463, 2000.
- [76] S. Belouettar, A. Abbadi, Z. Azari, R. Belouettar, and P. Freres, "Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests," *Compos. Struct.*, vol. 87, no. 3, pp. 265-273, 2009.
- [77] A. Mouritz and R. Thomson, "Compression, flexure and shear properties of a sandwich composite containing defects," *Compos. Struct.*, vol. 44, no. 4, pp. 263-278, 1999.
- [78] V. S. Sokolinsky, H. Shen, L. Vaikhanski, and S. R. Nutt, "Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams," *Compos. Struct.*, vol. 60, no. 2, pp. 219-229, 2003.
- [79] A. Corigliano, E. Rizzi, and E. Papa, "Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 11, pp. 2169-2180, 2000.
- [80] T. Sharaf and A. Fam, "Numerical modelling of sandwich panels with soft core and different rib configurations," *J. Reinf. Plast. Comp.*, vol. 31, no. 11, pp. 771-784, 2012.
- [81] W. Ferdous, A. Manalo, and T. Aravinthan, "Behaviour of composite sandwich beams with different shear span-to-depth ratios," in *Mechanics of Structures and Materials XXIV: Proceedings of the 24th Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM24, Perth, Australia, 6-9 December 2016)*, 2016.
- [82] W. Ferdous, A. Manalo, and T. Aravinthan, "Effect of beam orientation on the static behaviour of phenolic core sandwich composites with different shear span-to-depth ratios," *Compos. Struct.*, vol. 168, pp. 292-304, 2017.
- [83] H. Mathieson and A. Fam, "In-plane bending and failure mechanism of sandwich beams with GFRP skins and soft polyurethane foam core," *J. Compos. Constr.*, vol. 20, no. 1, p. 04015020, 2015.

- [84] W. Ferdous, A. Manalo, T. Aravinthan, and A. Fam, "Flexural and shear behaviour of layered sandwich beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 173, pp. 429-442, 2018.
- [85] A. Manalo, T. Aravinthan, W. Karunasena, and M. Islam, "Flexural behaviour of structural fibre composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 4, pp. 984-995, 2010.
- [86] A. Manalo, "Behaviour of fibre composite sandwich structures under short and asymmetrical beam shear tests," *Compos. Struct.*, vol. 99, pp. 339-349, 2013.
- [87] R. Umer, E. Waggy, M. Haq, and A. Loos, "Experimental and numerical characterizations of flexural behavior of VARTM-infused composite sandwich structures," *J. Reinf. Plast. Comp.*, vol. 31, no. 2, pp. 67-76, 2012.
- [88] T. Sharaf, W. Shawkat, and A. Fam, "Structural performance of sandwich wall panels with different foam core densities in one-way bending," *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 19, pp. 2249-2263, 2010.
- [89] A. Bezazi, A. El Mahi, J.-M. Berthelot, and B. Bezzazi, "Experimental analysis of behavior and damage of sandwich composite materials in three-point bending. Part 1. Static tests and stiffness degradation at failure studies," *Strength of materials*, vol. 39, no. 2, pp. 170-177, 2007.
- [90] M. Kampner and J. L. Grenestedt, "On using corrugated skins to carry shear in sandwich beams," *Compos. Struct.*, vol. 85, no. 2, pp. 139-148, 2008.
- [91] A. Manalo and T. Aravinthan, "Behavior of full-scale railway turnout sleepers from glue-laminated fiber composite sandwich structures," *J. Compos. Constr.*, vol. 16, no. 6, pp. 724-736, 2012.
- [92] A. Manalo, T. Aravinthan, and W. Karunasena, "Flexural behaviour of glue-laminated fibre composite sandwich beams," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 11, pp. 2703-2711, 2010.
- [93] A. Manalo, T. Aravinthan, and W. Karunasena, "Shear behaviour of glued structural fibre composite sandwich beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1317-1327, 2013.
- [94] E. M. Reis and S. H. Rizkalla, "Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1009-1018, 2008.
- [95] M. Dawood, E. Taylor, W. Ballew, and S. Rizkalla, "Static and fatigue bending behavior of pultruded GFRP sandwich panels with through-thickness fiber insertions," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 41, no. 5, pp. 363-374, 2010.

- [96] M. Dawood, E. Taylor, and S. Rizkalla, "Two-way bending behavior of 3-D GFRP sandwich panels with through-thickness fiber insertions," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 4, pp. 950-963, 2010.
- [97] M. Osei-Antwi, J. De Castro, A. P. Vassilopoulos, and T. Keller, "FRP-balsa composite sandwich bridge deck with complex core assembly," *J. Compos. Constr.*, vol. 17, no. 6, p. 04013011, 2013.
- [98] M. Osei-Antwi, J. De Castro, A. P. Vassilopoulos, and T. Keller, "Modeling of axial and shear stresses in multilayer sandwich beams with stiff core layers," *Compos. Struct.*, vol. 116, pp. 453-460, 2014.
- [99] M. Osei-Antwi, J. De Castro, A. P. Vassilopoulos, and T. Keller, "Structural limits of FRP-balsa sandwich decks in bridge construction," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 63, pp. 77-84, 2014.
- [100] A. Mamalis, K. Spentzas, N. Pantelelis, D. Manolakos, and M. Ioannidis, "A new hybrid concept for sandwich structures," *Compos. Struct.*, vol. 83, no. 4, pp. 335-340, 2008.
- [101] H. Fang, H. Sun, W. Liu, L. Wang, Y. Bai, and D. Hui, "Mechanical performance of innovative GFRP-bamboo-wood sandwich beams: Experimental and modelling investigation," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 79, pp. 182-196, 2015.
- [102] A. Manalo, T. Aravinthan, A. Fam, and B. Benmokrane, "State-of-the-art review on FRP sandwich systems for lightweight civil infrastructure," *J. Compos. Constr.*, vol. 21, no. 1, p. 04016068, 2016.
- [103] A. Mouritz, "Review of z-pinned composite laminates," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 38, no. 12, pp. 2383-2397, 2007.
- [104] M. Grassi, X. Zhang, and M. Meo, "Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminates," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 33, no. 12, pp. 1653-1664, 2002.
- [105] A. Mouritz, "Compression properties of z-pinned composite laminates," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 15-16, pp. 3110-3120, 2007.
- [106] P. Chang, A. Mouritz, and B. Cox, "Flexural properties of z-pinned laminates," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 38, no. 2, pp. 244-251, 2007.
- [107] P. Chang, A. Mouritz, and B. Cox, "Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 37, no. 10, pp. 1501-1513, 2006.

- [108] A. Nanayakkara, S. Feih, and A. Mouritz, "Experimental analysis of the through-thickness compression properties of z-pinned sandwich composites," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 42, no. 11, pp. 1673-1680, 2011.
- [109] A. Mouritz, "Compression properties of z-pinned sandwich composites," *Journal of materials science*, vol. 41, no. 17, pp. 5771-5774, 2006.
- [110] L. Du, J. Guiqiong, and H. Tao, "Z-pin reinforcement on the core shear properties of polymer foam sandwich composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 43, no. 3, pp. 289-300, 2009.
- [111] E. Selver and G. Kaya, "Flexural properties of sandwich composite laminates reinforced with glass and carbon Z-pins," *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 10, pp. 1347-1359, 2019.
- [112] A. Nanayakkara, S. Feih, and A. P. Mouritz, "Experimental impact damage study of a z-pinned foam core sandwich composite," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 14, no. 4, pp. 469-486, 2012.
- [113] Y. Zheng, J. Xiao, M. Duan, and Y. Li, "Experimental study of partially-cured Z-pins reinforced foam core composites: K-Cor sandwich structures," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 27, no. 1, pp. 153-159, 2014.
- [114] A. I. Marasco, D. D. Cartié, I. K. Partridge, and A. Rezai, "Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: Out-of-plane properties," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 37, no. 2, pp. 295-302, 2006.
- [115] L. Du and G. Jiao, "Indentation study of Z-pin reinforced polymer foam core sandwich structures," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 40, no. 6-7, pp. 822-829, 2009.
- [116] B. Wang, L. Wu, X. Jin, S. Du, Y. Sun, and L. Ma, "Experimental investigation of 3D sandwich structure with core reinforced by composite columns," *Mater. Design.*, vol. 31, no. 1, pp. 158-165, 2010.
- [117] K. Dransfield, C. Baillie, and Y.-W. Mai, "Improving the delamination resistance of CFRP by stitching—a review," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 3, pp. 305-317, 1994.
- [118] A. Mouritz, K. Leong, and I. Herszberg, "A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites," *Compos. Part A-Appl. S.*, vol. 28, no. 12, pp. 979-991, 1997.
- [119] J. H. Kim, Y. S. Lee, B. J. Park, and D. H. Kim, "Evaluation of durability and strength of stitched foam-cored sandwich structures," *Compos. Struct.*, vol. 47, no. 1-4, pp. 543-550, 1999.

- [120] P. Wang, Y. Lei, and Z. Yue, "Experimental and numerical evaluation of the flexural properties of stitched foam core sandwich structure," *Compos. Struct.*, vol. 100, pp. 243-248, 2013.
- [121] B. Lascoup, Z. Aboura, K. Khellil, and M. Benzeggagh, "Impact response of three-dimensional stitched sandwich composite," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 2, pp. 347-353, 2010.
- [122] F. Xia and X.-q. Wu, "Study on impact properties of through-thickness stitched foam sandwich composites," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 2, pp. 412-421, 2010.
- [123] P. a. Potluri, E. Kusak, and T. Reddy, "Novel stitch-bonded sandwich composite structures," *Compos. Struct.*, vol. 59, no. 2, pp. 251-259, 2003.
- [124] J. L. Grenestedt, "Development of a new peel-stopper for sandwich structures," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 11, pp. 1555-1559, 2001.
- [125] C. Wonderly and J. Grenestedt, "Dynamic performance of a peel stopper for composite sandwich ship structures," *J. Compos. Mater.*, vol. 38, no. 10, pp. 805-831, 2004.
- [126] J. Jakobsen, E. Bozhevolnaya, and O. T. Thomsen, "New peel stopper concept for sandwich structures," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 15-16, pp. 3378-3385, 2007.
- [127] J. Jakobsen, O. T. Thomsen, J. H. Andreasen, and E. Bozhevolnaya, "Crack deflection analyses of different peel stopper designs for sandwich structures," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 6, pp. 870-875, 2009.
- [128] T. Yokozeki and K. Iwamoto, "Effects of core machining configuration on the debonding toughness of foam core sandwich panels," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 45-58, 2016.
- [129] A. Truxel, F. Aviles, L. Carlsson, J. Grenestedt, and K. Millay, "Influence of face/core interface on debond toughness of foam and balsa cored sandwich," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 8, no. 3, pp. 237-258, 2006.
- [130] F. Halimi, M. Golzar, P. Asadi, and M. Beheshty, "Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding," *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 15, pp. 1853-1863, 2013.
- [131] Y.-T. Jhan, Y.-J. Lee, and C.-H. Chung, "Resin flowing analysis in sandwich laminates under VARTM process," *J. Reinf. Plast. Comp.*, vol. 30, no. 6, pp. 533-545, 2011.

- [132] F. Balıkoğlu, T. K. Demircioğlu, M. Yıldız, N. Arslan, and A. Ataş, "Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins," *J. Sandw. Struct. Mater.*, p. 1099636218792671, 2018.
- [133] N. Mitra and B. Raja, "Improving delamination resistance capacity of sandwich composite columns with initial face/core debond," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 43, no. 3, pp. 1604-1612, 2012.
- [134] J. Tao, F. Li, Q. Zhao, D. Zhang, and Z. Zhao, "In-plane compression properties of a novel foam core sandwich structure reinforced by stiffeners," *J. Reinf. Plast. Comp.*, vol. 37, no. 2, pp. 134-144, 2018.
- [135] A. Mostafa, K. Shankar, and E. Morozov, "Effect of shear keys diameter on the shear performance of composite sandwich panel with PVC and PU foam core: FE study," *Compos. Struct.*, vol. 102, pp. 90-100, 2013.
- [136] A. Mostafa, K. Shankar, and E. Morozov, "Influence of shear keys orientation on the shear performance of composite sandwich panel with PVC foam core: numerical study," *Mater. Design.*, vol. 51, pp. 1008-1017, 2013.
- [137] A. Mostafa, K. Shankar, and E. Morozov, "In-plane shear behaviour of composite sandwich panel incorporated with shear keys methodology at different orientations: finite element study," *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 24, pp. 2945-2959, 2014.
- [138] A. Mostafa, K. Shankar, and E. Morozov, "Insight into the shear behaviour of composite sandwich panels with foam core," *Mater. Design.*, vol. 50, pp. 92-101, 2013.
- [139] A. Mostafa, "Numerical analysis on the effect of shear keys pitch on the shear performance of foamed sandwich panels," *Eng. Struct.*, vol. 101, pp. 216-232, 2015.
- [140] A. Mostafa, "Experimental and numerical investigation on enhancing the structural integrity of composite sandwich structure," *Adv. Struct. Eng.*, p. 1369433219836177, 2019.
- [141] M. Juliyana and R. S. Krishnan, "Experimental and simulation of split semi-torus key in PVC foam core to improve the debonding resistance of composite sandwich panel," *Mater. Res. Express*, vol. 5, no. 2, p. 025307, 2018.
- [142] H. Fang, W. Liu, W. Lu, and L. Wan, "Flexural properties of grooved perforation sandwich composites," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 25, no. 4, pp. 583-587, 2010.

- [143] A. May-Pat, F. Aviles, and J. Aguilar, "Mechanical properties of sandwich panels with perforated foam cores," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 13, no. 4, pp. 427-444, 2011.
- [144] B. Abdi, S. Azwan, M. Abdullah, A. Ayob, Y. Yahya, and L. Xin, "Flatwise compression and flexural behavior of foam core and polymer pin-reinforced foam core composite sandwich panels," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 88, pp. 138-144, 2014.
- [145] B. Abdi, S. Azwan, M. Abdullah, A. Ayob, and Y. Yahya, "Comparison of foam core sandwich panel and through-thickness polymer pin-reinforced foam core sandwich panel subject to indentation and flatwise compression loadings," *Polym. Composite*, vol. 37, no. 2, pp. 612-619, 2016.
- [146] K. Cinar, "Evaluation of sandwich panels with composite tube-reinforced foam core under bending and flatwise compression," *J. Sandw. Struct. Mater.*, p. 1099636218798161, 2018.
- [147] H. E. Yalkin, B. M. Icten, and T. Alpyildiz, "Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 79, pp. 383-391, 2015.
- [148] H. E. Yalkin, B. M. Icten, and T. Alpyildiz, "Tensile and compressive performances of foam core sandwich composites with various core modifications," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 19, no. 1, pp. 49-65, 2017.
- [149] H. Z. Jishi, R. Umer, and W. J. Cantwell, "Skin-core debonding in resin-infused sandwich structures," *Polym. Composite*, vol. 37, no. 10, pp. 2974-2981, 2016.
- [150] A. Fathi, F. Wolff-Fabris, V. Altstädt, and R. Gätzi, "An investigation on the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 15, no. 5, pp. 487-508, 2013.
- [151] S. Laustsen, E. Lund, L. Kühlmeier, and O. T. Thomsen, "Failure behaviour of grid-scored foam cored composite sandwich panels for wind turbine blades subjected to realistic multiaxial loading conditions," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 16, no. 5, pp. 481-510, 2014.
- [152] S. Laustsen, E. Lund, L. Kühlmeier, and O. T. Thomsen, "Development of a High-fidelity Experimental Substructure Test Rig for Grid-scored Sandwich Panels in Wind Turbine Blades," *Strain*, vol. 50, no. 2, pp. 111-131, 2014.

- [153] L. Wang, W. Liu, L. Wan, H. Fang, and D. Hui, "Mechanical performance of foam-filled lattice composite panels in four-point bending: Experimental investigation and analytical modeling," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 67, pp. 270-279, 2014.
- [154] Z. Wu, W. Liu, L. Wang, H. Fang, and D. Hui, "Theoretical and experimental study of foam-filled lattice composite panels under quasi-static compression loading," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 60, pp. 329-340, 2014.
- [155] Y. Qi, H. Fang, and W. Liu, "Experimental Study of the Bending Properties and Deformation Analysis of Web-Reinforced Composite Sandwich Floor Slabs with Four Simply Supported Edges," *PloS one*, vol. 11, no. 2, p. e0149103, 2016.
- [156] A. Fam and T. Sharaf, "Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and GFRP skins and ribs of various configurations," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 12, pp. 2927-2935, 2010.
- [157] T. Sharaf, "Flexural behaviour of sandwich panels Composed of polyurethane core and GFRP skins and ribs," 2010.
- [158] F. Zhang, W. Liu, H. Fang, and Z. Jia, "Flexural behavior of composite sandwich beams with different kinds of GFRP ribs in flatwise and edgewise positions," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 156, pp. 229-239, 2019.
- [159] L. Wang, W. Liu, H. Fang, and L. Wan, "Behavior of sandwich wall panels with GFRP face sheets and a foam-GFRP web core loaded under four-point bending," *J. Compos. Mater.*, vol. 49, no. 22, pp. 2765-2778, 2015.
- [160] W. Liu, F. Zhang, L. Wang, Y. Qi, D. Zhou, and B. Su, "Flexural performance of sandwich beams with lattice ribs and a functionally multilayered foam core," *Compos. Struct.*, vol. 152, pp. 704-711, 2016.
- [161] F. Zhang, W. Liu, and F. Zhang, "Experimental Study on Composite Sandwich Beams with Longitudinal GFRP Webs," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 394, no. 3: IOP Publishing, p. 032104.
- [162] M. Mohamed, S. Anandan, Z. Huo, V. Birman, J. Volz, and K. Chandrashekhara, "Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures," *Compos. Struct.*, vol. 123, pp. 169-179, 2015.
- [163] H. Tuwair *et al.*, "Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam-cores and ribs," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 79, pp. 262-276, 2015.
- [164] S. Taghizadeh *et al.*, "Characterization of compressive behavior of PVC foam infilled composite sandwich panels with different corrugated core shapes," *Thin Wall. Struct.*, vol. 135, pp. 160-172, 2019.

- [165] H. Shen, V. S. Sokolinsky, and S. R. Nutt, "Accurate predictions of bending deflections for soft-core sandwich beams subject to concentrated loads," *Compos. Struct.*, vol. 64, no. 1, pp. 115-122, 2004.
- [166] K. J. Yoon, C. Kim, and H. C. Park, "Nonlinear flexural deflection of thermoplastic foam core sandwich beam," *J. Compos. Mater.*, vol. 36, no. 13, pp. 1529-1539, 2002.
- [167] R. Juntikka and S. Hallstrom, "Shear characterization of sandwich core materials using four-point bending," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 9, no. 1, pp. 67-94, 2007.
- [168] C. A. Steeves and N. A. Fleck, "Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 46, no. 4, pp. 561-583, 2004.
- [169] C. A. Steeves and N. A. Fleck, "Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 46, no. 4, pp. 585-608, 2004.
- [170] V. Tagarielli, N. Fleck, and V. Deshpande, "Collapse of clamped and simply supported composite sandwich beams in three-point bending," *Compos. Part B-Eng.*, vol. 35, no. 6-8, pp. 523-534, 2004.
- [171] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge university press, 1999.
- [172] T. C. Triantafillou and L. J. Gibson, "Failure mode maps for foam core sandwich beams," *Mat. Sci. Eng.*, vol. 95, pp. 37-53, 1987.
- [173] T. C. Triantafillou and L. J. Gibson, "Minimum weight design of foam core sandwich panels for a given strength," *Mat. Sci. Eng.*, vol. 95, pp. 55-62, 1987.
- [174] K. Lingaiah and B. Suryanarayana, "Strength and stiffness of sandwich beams in bending," *Experimental Mechanics*, vol. 31, no. 1, pp. 1-7, 1991.
- [175] E. E. Theotokoglou, "Analytical determination of the ultimate strength of sandwich beams," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 3, no. 5, pp. 345-353, 1996.
- [176] C. Chen, A. Harte, and N. A. Fleck, "The plastic collapse of sandwich beams with a metallic foam core," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 43, no. 6, pp. 1483-1506, 2001.
- [177] T. S. Lim, C. S. Lee, and D. G. Lee, "Failure modes of foam core sandwich beams under static and impact loads," *J. Compos. Mater.*, vol. 38, no. 18, pp. 1639-1662, 2004.

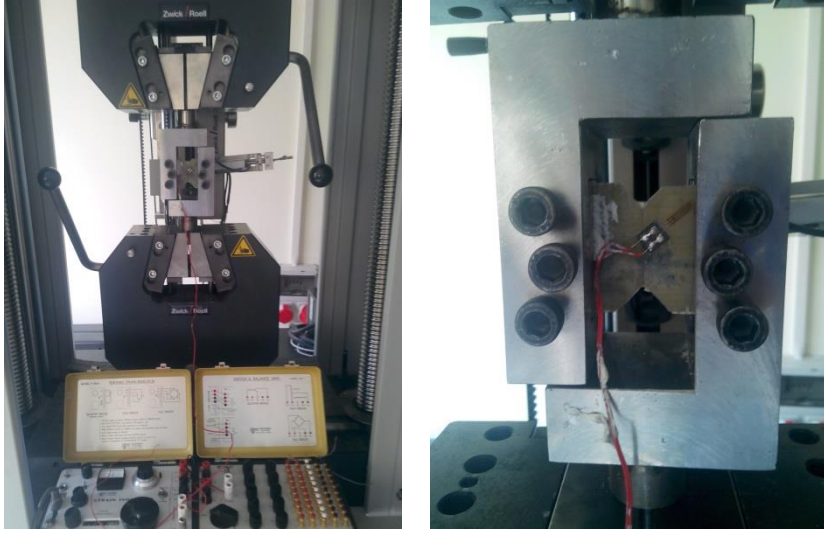
- [178] M. Konsta-Gdoutos and E. Gdoutos, "The effect of load and geometry on the failure modes of sandwich beams," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 12, no. 3-4, pp. 165-176, 2005.
- [179] E. Oterkus, C. Diyaroglu, D. De Meo, and G. Allegri, "Fracture modes, damage tolerance and failure mitigation in marine composites," in *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*: Elsevier, 2016, pp. 79-102.
- [180] *International Standard, ISO 14125, Fibre-reinforced plastic composites – determination of flexural properties*, ISO, 1998.
- [181] *Plastics – ISO 527-1-determination of tensile properties – part 1: General principles*, ISO, 2012.
- [182] *ASTM D6641 / D6641M, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture*, ASTM, West Conshohocken, PA, 2016.
- [183] *D7078 / D7078M, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method*, ASTM, West Conshohocken, PA, Pennsylvania, USA, 2012.
- [184] "Datasheet for Airex C70 PVC Foam." <http://www.airexbaltekbanova.com/airex-c70-pvc-foam.html> (accessed 15.01.2018, 2018).
- [185] *ASTM C393 / C393M-16, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*, ASTM, West Conshohocken, PA, 2016.
- [186] G. Di Bella, C. Borsellino, and L. Calabrese, "Effects of manufacturing procedure on unsymmetrical sandwich structures under static load conditions," *Mater. Design.*, vol. 35, pp. 457-466, 2012.
- [187] *ASTM C365 / C365M-05, Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*, ASTM, West Conshohocken, PA, 2005.
- [188] "Data sheet for cured Polives 702 Bisphenol-A epoxy Vinylester Resin." <http://www.plasto.com.tr/files/upload/files/POLIVES%20702.pdf> (accessed 26.11.2018, 2018).
- [189] A. Workbench, "Release 16.0, ANSYS," *Inc., Canonsburg, USA*, 2015.
- [190] F. Balikoğlu, T. K. Demircioğlu, O. İnal, and N. Arslan, "FEM Analysis of Flexural Behavior of Grooved Perforated and Web Foamed Marine Sandwich Composite Beams Effects of Core Machining Configuration," in *21st International Conference on Composite Structures*, Bologna/Italy, A. J. M. Ferreira, F. Tornabene, N. Fantuzzi, and E. Viola, Eds., 2018, p. 10, doi: 10.15651/978-88-938-5079-7.

- [191] F. Balıkoğlu, M. Yıldız, T. K. Demircioğlu, A. Ataş, and N. Arslan, "Compressive and flexural behaviour of pin reinforced marine composite sandwich beams," in *IV. International Ege Composite Materials Symposium (KOMPEGE 2018)*, İzmir/Turkey, R. İPEK, Ed., 2018, pp. 272-285.
- [192] T. K. Demircioğlu, F. Balıkoğlu, O. İnal, A. Ataş, and N. Arslan, "Flexural Behaviour of Balanced and Unbalanced Marine Sandwich Beams with Different Span to Depth Ratios:Experimental and Numerical Study," in *21st International Conference on Composite Structures*, Bologna/Italy, A. J. M. Ferreira, F. Tornabene, N. Fantuzzi, and E. Viola, Eds., 2018, p. 11, doi: 10.15651/978-88-938-5079-7.
- [193] L. Ramanan, "Simulation of non-linear analysis in ANSYS," in *ANSYS India Users Conference*, 2006.
- [194] D. ASTM, "1621, Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics," *American Society for Testing and Materials, New York*, 2010.
- [195] I. M. Daniel, E. E. Gdoutos, J. L. Abot, and K.-A. Wang, "Deformation and failure of composite sandwich structures," *J. Thermoplast. Compos.*, vol. 16, no. 4, pp. 345-364, 2003.
- [196] S. V. Iyer, R. Chatterjee, M. Ramya, E. Suresh, and K. Padmanabhan, "A Comparative Study Of The Three Point And Four Point Bending Behaviour Of Rigid Foam Core Glass/Epoxy Face Sheet Sandwich Composites," *Mater. Today-Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 12083-12090, 2018.
- [197] Y. Qi, H. Fang, H. Shi, W. Liu, Y. Qi, and Y. Bai, "Bending performance of GFRP-wood sandwich beams with lattice-web reinforcement in flatwise and sidewise directions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 532-545, 2017.

EKLER

EKLER

EK A: Laminat Kompozit Tabakaların Kayma ve Basma Özelliklerini Belirlemek Amacıyla Sırasıyla ASTM D7078 ve ASTM D6641 Standartlarına Uygun Şekilde Yapılan Testlere Ait Görseller.

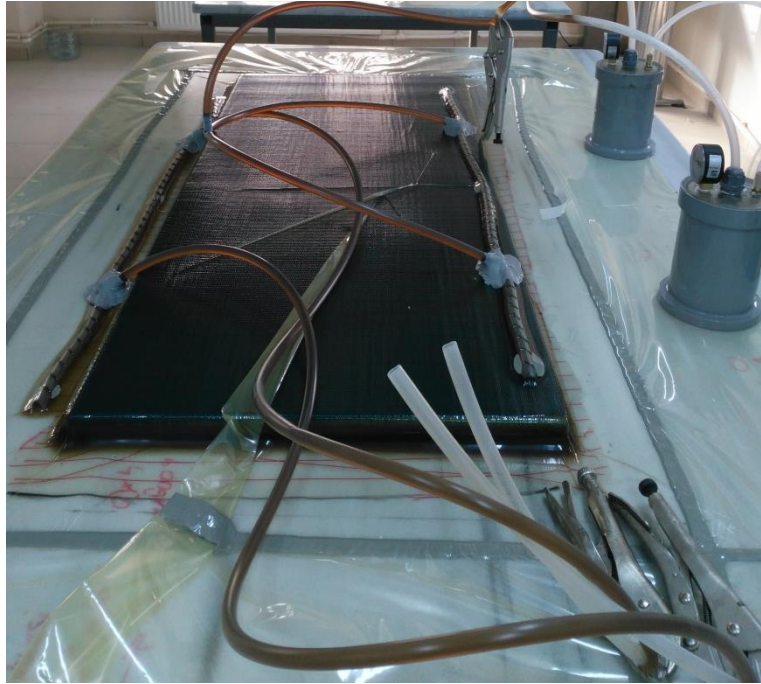


Şekil A.1: ASTM D7078 Kayma Test Düzeneği



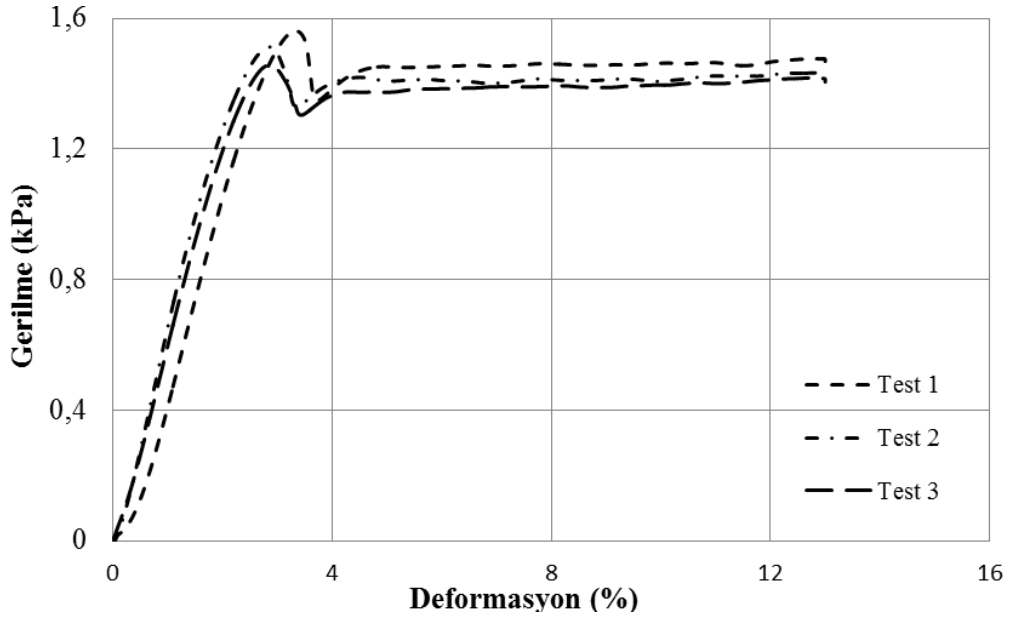
Şekil A.2: ASTM D6641 Basma Test Düzeneği

EK B: Lineer Besleme Uygulanarak Üretilen Düz PVC Köpük İçeren Referans Numuneye Ait Resim.



Şekil B.1: Lineer Besleme Yöntemi ile Referans Numune Üretimi

EK C: PVC Köpük Malzemenin ASTM D1621 Standardına Uygun Yapılan Basma Test Sonuçları



Şekil C.1: PVC köpük malzemenin basma test sonuçları

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Fatih BALIKOĞLU
Doğum tarihi ve yeri : 22/06/1982, İzmir
e-posta : fatih.balikoglu@balikesir.edu.tr

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü/Mühendislik Fakültesi	2005-2008
Lisans	Celal Bayar Üniversitesi/Makine Mühendisliği Bölümü	2000-2004
Lise	İzmir Atatürk Lisesi	1996-2000

Projelerde Yaptığı Görevler

- [1] Geleneksel ve alternatif malzemeli denizel kompozitlerin üretim parametreleri ve mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, Doktora Tezi, 12/02/2013-04/02/2020 (ULUSAL)
- [2] Termoset kompozit atıklar ve bitkisel atıkların sandviç kompozit yapılarda koruma dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi ve elde edilecek sandviç yapının yorulma davranışlarının incelenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, 01/03/2013 - 26/12/2016 (ULUSAL)
- [3] Kıvrımsız-Dikişli Cam Elyaf Kompozit Plakaların Cıvata Bağlantıları için Progresif Hasar Analizinin Değerlendirilmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi Araştırma Projesi, Araştırmacı, 15/01/2017-22/08.2018 (ULUSAL)
- [4] Tübitak Frit Fırın Refrakterlerin İzotermal Korozyon Testi, TÜBİTAK PROJESİ, Araştırmacı, , 01/07/2005 - 01/07/2007 (ULUSAL)

Yayın Listesi

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- [1] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Yıldız M., Arslan N.,Ataş A. (2018). Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins. *Journal Of Sandwich Structures Materials*, 109963621879267, Doi: 10.1177/1099636218792671. **[Tezden türetilmiştir]**

- [2] Balıkoğlu F., Arslan N., Demircioğlu T.K., İnal O., İren M., Ataş A. (2019). Improving four-point bending performance of marine composite sandwich beams by core modification. *Journal of Composite Materials*, Article number: 874502 **Kabul edildi. [Tezden türetilmiştir]**
- [3] Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., İnal O., Arslan N., Ay İ., Ataş A. (2018). Experimental investigation on low-velocity impact response of wood skinned sandwich composites with different core configurations. *Materials Today Communications*, 17, 31-39., Doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.08.003
- [4] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O., Arslan N., Ataş A. (2018). Compression after low velocity impact tests of marine sandwich composites: Effect of intermediate wooden layers. *Composite Structures*, 183(183C), 636-642., Doi: 10.1016/j.compstruct.2017.08.003.
- [5] O. İnal, F. Balıkoğlu, and A. Ataş, "Bolted joints in quasi-unidirectional glass-fibre NCF composite laminates," *Composite Structures*, vol. 183, pp. 536-544, 2018.
- [6] F. Balıkoğlu and S. Akkurt, "Isothermal corrosion testing of frit furnace refractories," *Ceramics International*, vol. 35, pp. 3411-3419, 2009.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

- [1] Efe M.O., Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ay İ., Arslan N., Ataş A. (2019). Finite Element Analysis On The Flexural Behaviour Of Grid-Scored Foam Cored Marine Sandwich Composite Beams. VI. Uluslararası Fen, *Mühendislik ve Mimarlık Bilimlerinde Akademik Çalışmalar Sempozyumu*, 1(1), 772-789.
- [2] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2018). The Low-Velocity Impact Behaviour of Wood Skinned Sandwich Composites with Different Core Configurations. *The International Forest Products Congress Orenko (ORENKO2018)*.
- [3] Balıkoğlu F., Yıldız M., Demircioğlu T. K., Ataş A., Arslan N. (2018). Compressive And Flexural Behaviour Of Pin Reinforced Marine Composite Sandwich Beams. *4th International Symposium on Composite Materials (KOMPEGE 2018) [Tezden türetilmiştir]*
- [4] Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., İnal O., Ataş A., Arslan N. (2018). Flexural behaviour of balanced and unbalanced marine sandwich beams with different span-to depth ratios: Experimental and numerical study. *ICCS21*, 11-12., Doi: 10.15651/978-88-938-5079-7
- [5] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O., Ataş A., Arslan N. (2018). FEM analysis of flexural behaviour of grooved, perforated and web-foamed marine sandwich composite beams: Effects of core machining configuration. *ICCS21*, 11-12., Doi: 10.15651/978-88-938-5079-7. **[Tezden türetilmiştir]**
- [6] Ataş A., Balıkoğlu F. (2018). Bolted Joints In Three Axially Braided Carbon Fibre/Epoxy Textile Composites With Moulded-In And Drilled Fastener Holes. Iv. International Ege Composite Materials Symposium (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4555540)
- [7] İnal O., Balıkoğlu F., Ataş A. (2017). Progressive Damage Modelling Of Bolted Joints In Non-Crimp Fabric Composite Plates. V. International Polymeric Composites Symposium And Workshops (Tam Metin Bildiri/Poster)(Yayın No:3635581)

- [8] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ataş A., Beyaz S., Arslan N. (2017). Investigation of The Effects of Recycled Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Waste Ratio on Mechanical Properties of Bulk Moulding Compound (BMC). *IPC 2017 5th International Polymeric Composites Symposium and Workshops*
- [9] Ataş A., Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O. (2017). Scaling Effect on Tensile Properties of Glass Non-Crimp Fabric/Epoxy Composites. *8th International Advanced Technologies Symposium*
- [10] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ataş A., Arslan N. (2017). Effect of Face Sheet Lay-up on the Static Behavior of Balanced and Unbalanced Sandwich Beams with Different Span-to-Depth Ratios. *8th International Advanced Technologies Symposium*
- [11] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O., Ataş A., Arslan N. (2017). Bending Performance of Grooved-foam-web Core Marine Sandwich Panels: Four-point bending (4PB) Testing Results. *20th International Conference on Composite Structures. [Tezden türetilmiştir]*
- [12] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O., Ataş A., Arslan N. (2017). Mechanical performance of perforated-web-foam core marine sandwich panels in four-point bending: Experimental and Finite Element Analysis Results. *20th International Conference on Composite Structures. [Tezden türetilmiştir]*
- [13] Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., Yıldız M., Ataş A., Arslan N. (2017). Drop weight impact Behaviour of sandwich composites with wooden intermediate layers. *20th International Conference on Composite Structures*
- [14] Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., İnal O., Ataş A., Sakin R. (2017). The Effects of Strain Rate on Tensile Behaviour of Hybrid Composite Laminates Reinforced with Kevlar/Carbon/Glass Woven Fabrics. *ICCS20 20th International Conference on Composite Structures*, Doi: 10.15651/978-88-938-5041-4
- [15] İnal O., Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ataş A. (2017). Pinned joints in quasi-unidirectional glass-fibre NCF /epoxy composite laminates. *3rd International Conference on Mechanics of Composites (MechComp3)*, 131-131., Doi: 10.15651/978-88-938-5029-2
- [16] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2016). Çapraz Oluklu Sandviç Kompozitlerin Eğilme Basma Ve Kayma Performansları. *16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Pamukkale/Denizli. [Tezden türetilmiştir]*
- [17] Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., Arslan N., Özbey F. (2016). Sandviç Kompozitlerin Darbe Sonrası Basma Dayanım Testleri Ahşap Ara Tabaka Etkisi. *16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu*
- [18] Yıldız M., Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2016). Delik Açılmış Pvc Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozitlerin Mekanik Performanslarının Değerlendirilmesi. *16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Pamukkale/Denizli. [Tezden türetilmiştir]*
- [19] İnal O., Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., Ataş A., Arslan N. (2016). Bending performance of marine sandwich composites after low velocity impact LVI. *19 th International Conference on Composite Structures.*
- [20] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2015). Çapraz oluklu ve kesik PVC kor içeren sandviç kompozitlerin eğilme davranışlarının deneysel ve nümerik incelenmesi. *III. Uluslararası Katılımlı Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu. [Tezden türetilmiştir]*
- [21] Balıkoğlu F., Yıldız M., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2015). Delik açılmış PVC kor içeren sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi. *III. Uluslararası Katılımlı Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu. [Tezden türetilmiştir]*

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- [1] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ataş A., Beyaz S., Arslan N. (2018). Termoset Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CTP) Atıkların Mekanik Geri Dönüşüm Ürünlerinin Sıcak Pres Kalıplama Bileşiminde (BMC) Tekrar Değerlendirilmesi. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 8(2), 168-180., Doi: 10.7212/zkufbd
- [2] Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Yıldız M., Arslan N. (2016). Oluklu PVC köpük içeren denizel sandviçkompozitlerin darbe test performansları. *Balıkesir Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

- [1] Balıkoğlu F., Arslan N. (2013). Denizel Sandviç Kompozitlerin Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması. *II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*. **[Tezden türetilmiştir]**
- [2] Esen Ö.,Balıkoğlu F.,Arslan N. (2012). Yaprak Yaylarda Kompozit Malzeme Uygulama Ve Yorulma Analizi. *Timak 2012, Tasarım İmalat Analiz Kongresi*
- [3] Polat O.,Balıkoğlu F.,Arslan N.(2012). S Tipi Kultivatör Ayaklarının Deneysel Olarak Yorulma Ömrünün Araştırılması. *Timak 2012, Tasarım İmalat Analiz Kongresi*.
- [4] Balıkoğlu F.,Ataş A.,Arslan N. (2012). Yat Ve Tekne İmalatında Vakum İnfüzyon Vartm İle Kompozit Üretim Yönteminin Uygulanması. *Timak 2012, Tasarım İmalat Analiz Kongresi*.**[Tezden türetilmiştir]**
- [5] Ataş A.,Balıkoğlu F.,Arslan N. (2012). Kompozit Plakaların Cıvata Bağlantıları İçin Kritik Altı Hasar Modellemesine Dayalı Mukavemet Kestirim Yöntemi. *Timak 2012, Tasarım İmalat Analiz Kongresi*.
- [6] Polat O.,Balıkoğlu F.,Arslan N. (2012). Tiller Tipi Kultivatör Ayaklarının Bilgisayar Destekli Yorulma Analizi. *Timak 2012, Tasarım İmalat Analiz Kongresi*.