



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TABAKALI CAM/KARBON ELYAF
TAKVİYELİ KOMPOZİT YÜZLÜ SANDVIÇ
KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

Kübra AKTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz -2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ TABAKALI CAM/KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT YÜZLÜ SANDVIÇ KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Kübra AKTAŞ

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Emrah MADENCİ
Eş Danışman: Doç. Dr. Lokman GEMİ**

2022, 114 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Emrah Madenci
Doç. Dr. Şakir Yazman
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar Ecemiş**

Kompozit sandviç kirişler, ince rijit yüzey plakaları arasına yerleştirilen daha kalın hafif ara tabakalardan (çekirdek) oluşan kompozit laminalardır. Bu yapılar, ağırlıklarına oranla yüksek mukavemet ve enerji sönümlenme özelliğinin avantajları sayesinde otomotiv, havacılık ve inşaat mühendisliği gibi pek çok sektörde kullanımı yaygınlık göstermektedir. Bu yapılarda, genellikle eğilme kuvveti yüzey levhaları tarafından oluşturulan kuvvet çifti tarafından taşınırken, kayma kuvvetini ise hafif yapıdaki ara tabaka malzemeleri taşır. Çekirdek bölgesinin temel amacı yüksek bir atalet momenti sağlamaktır. Bu amaca ek olarak çekirdek bölgesi yanal kuvvetlere karşı mukavemet gösterir ve yüzey levhalarını global ve lokal burkulmalara karşı dengelenmesini sağlayarak yapının rijitliğini artırmaktadır. Bu çalışmanın asıl amacı üç nokta eğilme altındaki sandviç kiriş tasarımında, takviye malzemesi olarak kullanılan, elyaf türü ve elyaf sıralama konfigürasyonunun mekanik özelliklerine etkisini incelemektir. Yapılan bu tez çalışması kapsamında 4 farklı kombinasyonda çekme numune grubu, 8 farklı kombinasyonda eğilme numune grubunun üretimi elle yatırma ve vakum torbalama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sandviç kiriş üretiminde takviye malzemesi olarak cam ve karbon elyaf, matris malzemesi olarak epoksi ve çekirdek malzemesi olarak PVC köpük kullanılmıştır. Sandviç kirişlerin hem mekanik özelliklerini belirlemek hem de üç nokta eğilme testi altındaki davranışını incelemek amacıyla numuneler çekme testi ile üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar derlenmiş ve kuvvet (N)-deplasman (mm) grafikleri oluşturularak karşılaştırılıp yorumlanmıştır. Kuvvet (N)-deplasman (mm) grafikleri ve deney sonrası oluşan hasarlar görselleri kullanarak makro ve mikro hasar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam Elyaf, Çekme testi, Debonding, Delaminasyon, Eğilme analizi, Hasar analizi, İstifleme sırası, Karbon elyaf, PVC köpük, Sandviç kiriş

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF BENDING BEHAVIOR OF LAMINATED GLASS/CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE FACED SANDWICH BEAMS

Kübra AKTAŞ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Emrah MADENCİ

Co-visor: Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ

2022, 114 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Emrah MADENCİ

Assoc. Prof. Dr. Şakir YAZMAN

Asst. Prof. Dr. Ali Serdar Ecemiş

Composite sandwich beams are composite laminas consisting of thicker light intermediate layers (cores) placed between thin rigid surface plates. Due to the advantages of high strength and energy damping properties compared to their weight, these structures are widely used in many sectors such as automotive, aviation and civil engineering. In these structures, usually the bending force is carried by the force pair created by the surface plates, while the shear force is carried by the decking materials in the light structure. The main purpose of the core region is to provide a high moment of inertia. In addition to this purpose, the core region resistance to lateral forces and increases the rigidity of the structure by ensuring that the surface plates are balanced against global and local buckling. The main purpose of this study is to examine the effect of fiber type and fiber sorting configuration on mechanical properties used as reinforcement material in sandwich beam design under three-point bending. Within the scope of this thesis study, the production of 4 different combination tensile sample groups, 8 different combination bending sample groups was carried out using the hand layup and vacuum bagging method. Glass and carbon fiber as reinforcement materials, epoxy as matrix material and PVC foam as core material were used in the production of sandwich beams. In order to determine both the mechanical properties of sandwich beams and to examine the behavior of those under the three-point bending test, samples were subjected to tensile test and three-point bending test. The obtained results were compiled and compared and interpreted by creating force (N)-displacement (mm) graphs. Macro and micro damage analyses were performed using force (N)-displacement (mm) graphs and post-experiment damage images.

Keywords: Bending analysis, Carbon fiber, Damage analysis, Debonding, Delamination, Glass fiber, PVC foam, Sandwich beam, Stacking sequences, Tensile test

ÖNSÖZ

Lisans eğitimim ve yüksek lisans eğitimim boyunca hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, gerek bilgi gerekse tecrübeleri ile beni aydınlatıp yol gösteren akademik hayatımın ilk basamaklarındaki en büyük şansım olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Emrah MADENCİ'ye, yüksek lisans eğitimim sürecinde sabırla beni dinleyen, fikirleriyle akademik hayatımı yönlendirmeyi katkı sağlayan ve tez çalışmamda büyük emek gösteren değerli eş (ikinci) danışman hocam Doç. Dr. Lokman GEMİ'ye ve değerli hocam Doç. Dr. Şakir YAZMAN'a tez çalışmam sürecinde eleştiri, öneri ve yönlendirmeleri için sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Değerli bilgi ve tecrübeleri ile akademik hayatımın gelişmesine katkı sağlayan fakültemizin İnşaat Mühendisliği bölümündeki tüm hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması kapsamında malzeme satın alımı gerçekleştirilebilmesi için 211319023 nolu yüksek lisans tez projesi ile maddi destek sağlayan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAP) ve mekanik testlerin yapılmasına katkı sağlayan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) personeline teşekkür ederim.

Tez çalışmam sürecinde manevi destek sağlayan değerli arkadaşlarıma sevgilerimi sunarım. Son olarak, bu hayattaki en büyük şansım olan, hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan her koşulda sonsuz sevgi gösteren aileme saygı, sevgi ve teşekkürlerimle...

Kübra AKTAŞ
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.2. Kompozit Malzeme.....	3
1.2.1. Kompozit malzemenin matris fazına göre sınıflandırılması.....	4
1.2.2 Kompozit malzemenin takviye elemanına göre sınıflandırılması	5
1.3. Sandviç Kompozit.....	6
1.3.1. Sandviç kompozit üretim yöntemleri.....	7
1.3.1.1. Elle Yatırma Yöntemi.....	8
1.3.1.2. Vakum torbalama yöntemi.....	8
1.3.2. Sandviç kompozitte yaygın olarak kullanılan polimer reçineler	10
1.3.3. Sandviç kompozitin yüzey levhalarında yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeli polimer kompozitler.....	11
1.3.3.1. Cam elyaf takviyeli polimer kompozit	12
1.3.3.2. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit.....	13
1.3.4. Sandviç kompozitlerde kullanılan çekirdek malzeme çeşitleri.....	13
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1. Materyal	25
3.1.1. Epoksi reçine ve reçine sertleştirici	26
3.1.2. Cam elyaf kumaş	26
3.1.3. Karbon elyaf kumaş	27
3.1.4. PVC köpük.....	28
3.1.5. Kalıp ayırıcı	29
3.1.6. Deliksiz Release film	29
3.1.7. Soyma kumaş	30
3.1.8. İnfüzyon filesi	30
3.1.9. İnfüzyon spiral hortum ve vakum hortum	31
3.1.10. İnfüzyon L/T bağlantısı	32
3.1.11. İnfüzyon hortum kelepçesi.....	32
3.1.12. Vakum sızdırmazlık bandı	33
3.1.13. Vakum naylonu.....	34
3.2. Metot.....	34
3.2.1. Numune üretimi	34
3.2.2. Mekanik testler	52
3.2.2.1. Çekme testi	53

3.2.2.2. Üç nokta eğilme testi	54
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	57
4.1. Çekme Testi Sonucu	57
4.1.1. ST1 numunesi çekme test sonucu	57
4.1.2. ST2 numunesi çekme test sonucu	58
4.1.3. ST3 numunesi çekme test sonucu	59
4.1.4. ST4 numunesi çekme test sonucu	60
4.2. Çekme Testi Sonuçlarının Karşılaştırılması	61
4.2. Üç Nokta Eğilme Testi Sonucu	67
4.2.1. SB1 numunesi üç nokta eğilme test sonucu.....	67
4.2.2. SB2 numunesi üç nokta eğilme test sonucu.....	70
4.2.3. SB3 numunesi üç nokta eğilme test sonucu.....	72
4.2.4. SB4 numunesi üç nokta eğilme test sonucu.....	74
4.2.5. SB5 numunesi üç nokta eğilme test sonucu.....	76
4.2.6. SB6 numunesi üç nokta eğilme test sonucu.....	79
4.2.7. SB7 numunesi üç nokta eğilme test sonucu.....	81
4.2.8. SB8 numunesi üç nokta eğilme test sonucu.....	83
4.2.3. Sandviç kiriş numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucunun karşılaştırılması	85
4.2.3.1. Alt ve üst yüzeydeki elyaf istifleme türüne göre simetrik sandviç kirişlerin karşılaştırılması	91
4.2.3.2. Alt ve üst yüzeydeki elyaf istifleme türüne göre asimetrik sandviç kirişlerin karşılaştırılması	93
4.2.3.3. Alt ve üst yüzeydeki elyaf istifleme türüne göre simetrik hibrid sandviç kirişlerin karşılaştırılması	96
4.2.3.4. Alt ve üst yüzeydeki elyaf istifleme türüne göre asimetrik hibrid sandviç kirişlerin karşılaştırılması	98
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	102
5.1 Sonuçlar	102
5.2 Öneriler	107
6. KAYNAKLAR	108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kompozit malzeme ve bileşenleri	3
Şekil 1.2. Matris fazına göre sınıflandırma	4
Şekil 1.3. Takviye elemanına göre sınıflandırılması	5
Şekil 1.4. Sandviç kompozit malzemenin şematik gösterimi	7
Şekil 1.5. Elle yatırma yönteminin şematik gösterimi.....	8
Şekil 1.6. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi	9
Şekil 1.7. Polimer reçine sınıflandırması.....	10
Şekil 1.8. Epoksi reçine	11
Şekil 1.9. CTP kompozit malzeme	12
Şekil 1.10. KTP kompozit malzeme	13
Şekil 1.11. Çekirdek malzeme çeşitleri	14
Şekil 1.12. PVC köpük ve PVC köpüğün sandviç kompozitte kullanımı	15
Şekil 3.1. Epoksi reçine ve reçine sertleştirici	26
Şekil 3.2. Cam elyaf kumaş	27
Şekil 3.3. Karbon elyaf kumaş.....	27
Şekil 3.4. PVC köpük	28
Şekil 3.5. Kalıp ayırıcı	29
Şekil 3.6. Release film	29
Şekil 3.7. Soyma kumaş	30
Şekil 3.8. İnfüzyon filesi.....	31
Şekil 3.9. İnfüzyon spiral hortum ve vakum hortum	31
Şekil 3.10. İnfüzyon L/T bağlantısı	32
Şekil 3.11. İnfüzyon hortum kelepçesi	33
Şekil 3.12. Sızdırmazlık bandı.....	33
Şekil 3.13. Vakum naylonu	34
Şekil 3.14. Çekme numunelerinin tabaka sıralaması ve numune görseli	35
Şekil 3.15. Eğilme numunelerinin tabaka sıralaması ve numune görseli	38
Şekil 3.16. Kompozit üretiminde kullanılan vakum infüzyon tezgâhı	39
Şekil 3.17. Kalıp ayırıcının yüzeye uygulanması	39
Şekil 3.18. Release filmin yüzeye yerleştirilmesi.....	40
Şekil 3.19. Reçinenin hazırlanması	40
Şekil 3.20. Reçinenin karıştırılması.....	41
Şekil 3.21. Reçinenin elyaf kumaşa yedirilmesi.....	41
Şekil 3.22. Soyma kumaşın yerleştirilmesi	42
Şekil 3.23. Vakum infüzyon filesi üzerine reçine ve hava akış hattının oluşturulması... 43	
Şekil 3.24. Vakum torbalama işleminin başlatılması	44
Şekil 3.25. Reçine ve hava akışı	44
Şekil 3.26. Tezgah ısıtma işleminin gerçekleştirilmesi	45
Şekil 3.27. Vakum torbalama sistemi	46
Şekil 3.28. Kompozit malzeme.....	46
Şekil 3.29. Sulu kesim makinesi ve kompozit malzemenin kesim aşaması	47
Şekil 3.30. Kompozit çekme numunesi	47
Şekil 3.31. Sandviç kiriş eğilme numuneleri a) SB1-CTP b) SB2-KTP	48
Şekil 3.32. Yüzey levhaların şematik gösterimi	49
Şekil 3.33. Sandviç kompozit kirişlerin şematik gösterimi	51
Şekil 3.34. Shimadzu AGS-X test cihazı ve veri kaydedici cihaz.....	52
Şekil 3.35. Çekme test düzeneği ve veri kayıt aracı	53

Şekil 3.36. Çekme test düzeneği.....	54
Şekil 3.37. Üç nokta eğilme test düzeneği.....	55
Şekil 3.38. Üç nokta eğilme numuneleri	56
Şekil 4.1. ST1 numunesi gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği	57
Şekil 4.2. ST2 numunesi gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği	58
Şekil 4.3. ST3 numunesi gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği	59
Şekil 4.4. ST4 numunesi gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği	60
Şekil 4.5. Çekme numunelerinin gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) karşılaştırma grafiği	61
Şekil 4.6. Çekme numunelerinin mak. gerilme değerlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 4.7. Çekme numunelerinin uzama (%) değerlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 4.8. Çekme numunelerinin statik tokluk değerlerinin karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.9. Çekme numunelerinin elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 4.10. Çekme numunelerinin max gerilme değerlerinin a) ST1 ve b) ST2'ye göre karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.11. Çekme numunelerinin yüzde uzama değerlerinin a) ST1 ve b) ST2'ye göre karşılaştırılması.....	65
Şekil 4.12. Çekme numunelerinin statik tokluklarını a) ST1 ve b) ST2'ye göre karşılaştırılması.....	66
Şekil 4.13. Çekme numunelerinin elastisite modüllerinin a)ST1 ve b)ST2'ye göre karşılaştırılması.....	66
Şekil 4.14. SB1 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği	67
Şekil 4.15. Üç nokta eğilme altındaki SB1 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları. 69	
Şekil 4.16. SB2 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği	70
Şekil 4.17. Üç nokta eğilme altındaki SB2 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları. 71	
Şekil 4.18. SB3 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği	72
Şekil 4.19. Üç nokta eğilme altındaki SB3 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları. 73	
Şekil 4.20. SB3 numunesinin hasar alması.....	74
Şekil 4.21. SB4 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği	74
Şekil 4.22. Üç nokta eğilme altındaki SB4 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları. 76	
Şekil 4.23. SB5 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği	77
Şekil 4.24. Üç nokta eğilme altındaki SB6 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları. 78	
Şekil 4.25. SB5 numunesinin yoğun hasar alması.....	79
Şekil 4.26. SB6 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği	79
Şekil 4.27. Üç nokta eğilme altındaki SB7 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları. 81	
Şekil 4.28. SB7 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği	81
Şekil 4.29. Üç nokta eğilme altındaki SB8 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları. 83	
Şekil 4.30. SB8 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği	83
Şekil 4.31. Üç nokta eğilme altındaki SB8 numunesi	85
Şekil 4.32. Eğilme numunelerinin mak. kuvvet değerleri	86
Şekil 4.33. Eğilme numunelerinin mak. kuvvetteki deplasman değerleri	86
Şekil 4.34. SB1 numune grubuna göre mak. kuvvet karşılaştırması.....	87
Şekil 4.35. SB1 numune grubuna göre mak. kuvvetteki deplasman karşılaştırması.....	88
Şekil 4.36. SB2 numune grubuna göre mak. kuvvet karşılaştırması.....	89
Şekil 4.37. SB2 numune grubuna göre mak. kuvvetteki deplasman karşılaştırması.....	90
Şekil 4.38. SB1 ve SB2 numunelerinin kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 4.39. SB1 ve SB2 numunelerinin mak. kuvvet ve deplasman karşılaştırması	93
Şekil 4.40. SB3 ve SB4 numunelerinin kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğinin karşılaştırılması.....	94

Şekil 4.41. SB3 ve SB4 numunelerinin mak. kuvvet ve deplasman karşılaştırması	95
Şekil 4.42. SB5 ve SB6 numunelerinin kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğinin karşılaştırılması	97
Şekil 4.43. SB5 ve SB6 numunelerinin mak. kuvvet ve deplasman karşılaştırması	98
Şekil 4.44. SB7 ve SB8 numunelerinin kuvvet (N)-deplasman(mm) grafiğinin karşılaştırılması	99
Şekil 4.45. SB7 ve SB8 numunelerinin mak. kuvvet ve deplasman karşılaştırması	100



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Epoksi reçine ve reçine sertleştiricinin nitelikleri	26
Çizelge 3.2. Cam elyaf kumaşın nitelikleri	27
Çizelge 3.3. Karbon elyaf kumaşın nitelikleri	28
Çizelge 3.4. Airex -C70.75 PVC köpüğün nitelikleri.....	28
Çizelge 3.5. Release filmin nitelikleri	30
Çizelge 3.6. Soyma kumaşın nitelikleri.....	30
Çizelge 3.7. İnfüzyon filesinin nitelikleri	31
Çizelge 3.8. İnfüzyon spiral hortum ve vakum hortumun nitelikleri	32
Çizelge 3.9. İnfüzyon L/T bağlantısının nitelikleri	32
Çizelge 3.10. İnfüzyon hortum kelepçesinin nitelikleri	33
Çizelge 3.11. Sızdırmazlık bandının nitelikleri	33
Çizelge 3.12. Vakum naylonunun nitelikleri.....	34
Çizelge 3.13. Yüzey levha kompozitin kodlanması	49
Çizelge 3.14. Sandviç kompozitin kodlanması	50
Çizelge 4.1. ST1 numunesinin mekanik özellikleri.....	58
Çizelge 4.2. ST2 numunesinin mekanik özellikleri.....	59
Çizelge 4.3. ST3 numunesinin mekanik özellikleri.....	60
Çizelge 4.4. ST4 numunesinin mekanik özellikleri.....	61
Çizelge 4.5. Çekme numunelerinin mekanik özellikleri	61
Çizelge 4.6. SB1 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri ..	68
Çizelge 4.7. SB2 numunelerinin mak. kuvvetler ve bu kuvvet değerindeki deplasman miktarları.....	70
Çizelge 4.8. SB3 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri ..	72
Çizelge 4.9. SB4 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri ..	75
Çizelge 4.10. SB5 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri	77
Çizelge 4.11. SB6 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri	80
Çizelge 4.12. SB7 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri	82
Çizelge 4.13. SB8 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri	84
Çizelge 4.14. Üç nokta eğilme numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri	85
Çizelge 4.15. SB1 ve SB2 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri	92
Çizelge 4.16. SB3 ve SB4 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri	95
Çizelge 4.17. SB5 ve SB6 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri	97
Çizelge 4.18. SB7 ve SB8 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri	100
Çizelge 4.19. ST1-4 numunelerinin mekanik özellikleri.....	101
Çizelge 4.20. SB1-8 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri	101

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E: Elastisite modülü

GPa: Gigapascal

MPa: Megapascal

N: Newton

mm: Milimetre

° : Derece

SB1: Üç nokta Eğilme numunesi 1. grup

SB2: Üç nokta Eğilme numunesi 2. grup

SB3: Üç nokta Eğilme numunesi 3. grup

SB4: Üç nokta Eğilme numunesi 4. grup

SB5: Üç nokta Eğilme numunesi 5. grup

SB6: Üç nokta Eğilme numunesi 6. grup

SB7: Üç nokta Eğilme numunesi 7. grup

SB8: Üç nokta Eğilme numunesi 8. grup

ST1: Çekme numunesi 1. grup

ST2: Çekme numunesi 2. grup

ST3: Çekme numunesi 3. grup

ST4: Çekme numunesi 4. grup

Kısaltmalar

ASTM: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu-American Society for Testing and Materials

CTP: Cam elyaf takviyeli polimer

FDM: Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme

KTP: Karbon elyaf takviyeli polimer

PET: Polietilen tereftalat

PU: Poliüretan

PVC: Polivinil klorür

1. GİRİŞ

Günümüzde yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin geçmişi Paleolitik Çağ'a kadar uzanmaktadır. Tarih öncesinde kil ile samanı beraber kullanarak kerpiç yapı tasarlandığı gözlemlenmiştir (Staab, 2015; Sapuan, 2017). Modern kompozitlerin başlangıcı olan sentetik polimer matrislerinin tarihi ise 1900'lü yıllara dayanmaktadır (Hollaway L.C., 2001; Sapuan, 2017). Gelişen teknoloji ile birlikte konvansiyonel malzemelerin yerini alan kompozit malzemeler her geçen vakit değer kazanmaktadır.

Kompozit malzemeler havacılık, denizcilik, inşaat, otomotiv ve çeşitli diğer sektörlerde kilit taşı önemine sahiptir ve kullanımı yaygınlaşmaktadır (Grande ve ark., 2018; Madenci ve ark., 2020a; Nguyen ve ark., 2020; Yazman, 2021). İnşaat sektöründe en yaygın olarak elyaf takviyeli polimer kompozitler tercih edilmektedir (Madenci ve ark., 2020a). Köprü tasarımında kolon, kiriş ve döşeme elamanı olarak elyaf takviyeli polimer kompozitlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır (Siwowski ve ark., 2018; Kim, 2019; Peng ve ark., 2021). Beton yapı tasarımında korozyon direncinden dolayı elyaf takviyeli polimer donatılar çelik donatılara alternatif olmaktadır (Li ve ark., 2022). Elyaf takviye edilmiş yalıtım malzemeleri yangın geciktirici, enerji koruyucu ve üstün akustik niteliklerinden dolayı yapılarda çatı yalıtımında, duvar ve panel tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Lu ve Viljanen, 2011). Betonarme yapılardaki meydana gelen telafi edilebilir hasarları onarmak amacıyla uygun nitelikte kompozit malzemeler üretilip betonarme güçlendirmesi yapılmaktadır. Kompozit malzemeler, yapıştırma teknoloji ile çeşitli profilleri birbirine bağlamaktadır (Hollaway ve Head, 2001).

Kompozit malzemeler her malzeme gibi birtakım olumlu ve olumsuz niteliklere sahiptir (Madenci ve Özütok, 2011; Madenci, 2016; Sapuan, 2017; Madenci ve ark., 2020b; Yazman, 2021). Kompozit malzemelerin yoğunlukları metal gibi geleneksel malzemelere göre daha düşük olmasından dolayı yapı olarak daha hafif malzemelerdir. Rijitlik/ağırlık oranının yüksek olması kompozit malzemeler için önemli bir avantajdır. Kompozit malzemeler kimyasal reaksiyonlara karşı büyük direnç göstermektedir ve diğer dış etkilere karşı durabilite değeri büyüktür (Özütok ve Madenci, 2017; Madenci ve ark., 2019; 2020b). Hasarlı bir malzemenin, istenmeyen bir durum olan gevrek kırılmaya karşı göstermiş olduğu mukavemeti diğer bir değişle kırılma tokluğu değerinin büyüklüğü ve tekrarlı yükler altındaki yorulma dayanımının büyük olması kompozit malzemelerinin üstün niteliklerindedir. Üretim yöntemlerinin çeşitliliği ve üretim maliyetinin düşük olması bu malzemelerin yaygın olarak tercih edilmesini sağlamaktadır (Yazman, 2021).

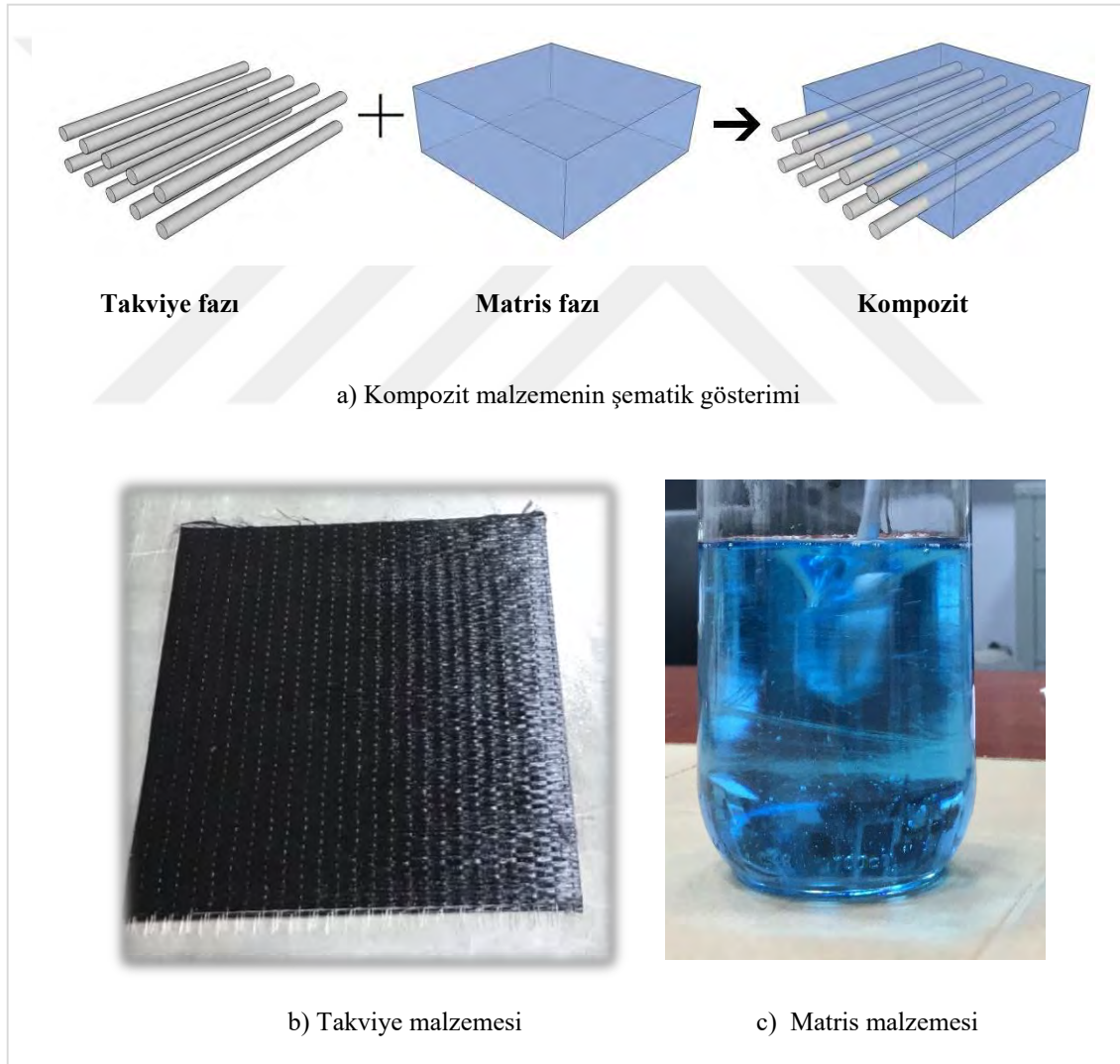
Kompozit yapılarda temel olarak dört farklı türde hasar modu gözlemlenmektedir. Hasar modlarında kompozitin esas malzemesi olan matris fazının kırılması, takviye fazı olan elyafın matris fazından ayrılması sonucu oluşan debonding hasarı, tabakaların birbirinden ayrılması sonucu oluşan delaminasyon hasarı ve takviye malzemesi olarak kullanılan elyafların kırılması olmak üzere dört farklı gruplandırma yapılabilmektedir (Ogin ve ark., 2016).

Bu çalışma içeriğinde konu edinilen sandviç kompozit malzemeler takviye fazına göre sınıflandırmada yapısal kompozit sınıfında yer almaktadır. Sandviç yapılarda kullanılan malzemenin türü, tabakaların yönlendirilmesi ve sıralaması kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel niteliklerini etkilemektedir (Fazzolari, 2017). Tabakalar dizilim düzenine göre çapraz tabaka veya açılı tabaka olarak tanımlanmaktadır. Tabakaların dizilim sırasına ve geometrik görüntüsüne bağlı olarak tabakalı kompozit malzeme simetrik veya antisimetrik olarak da tanımlanmaktadır. (Madenci ve Özütok, 2011). Sandviç kompozit yapı tasarımında farklı tipolojiler mevcuttur fakat en popüler olarak iki rijit yüzey levhası ve köpük gibi hafif malzemeli çekirdek bölgesinden oluşan tür tercih edilmektedir. Sandviç kompozitin bir farklı tipolojisi fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) kullanılmasıyla elde edilebilmektedir (Fazzolari, 2017). FDM seramik ile metalin birlikteliğinden oluşan, malzeme niteliklerinin sürekli ve düzgün biçimde eksenlere bağlı olarak değişkenlik göstermesiyle elde edilen heterojen kompozit malzemedir (Carrera ve ark., 2017; Fazzolari, 2017; Nguyen ve ark., 2020; Ruys ve Sutton, 2021). Fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kompozit yapı, FDM yüzey levhası ve homojen çekirdek malzeme veya homojen yüzey levhası ve FDM çekirdek malzemedir olmak üzere iki farklı tipten oluşmaktadır (Chami ve ark., 2022).

Bu çalışma kapsamında sandviç kirişlerin nihai eğilme mukavemetini, rijitliğini ve enerji dağıtma kabiliyetinin geliştirmek için fonksiyonel olarak farklı tabaka kombinasyonlarına sahip ve polivinil klorür (PVC) köpük çekirdekten oluşan çok katmanlı sandviç kirişler geliştirilmiştir.

1.2. Kompozit Malzeme

Kompozit malzeme, Şekil 1.1 a’da görüldüğü üzere en az bir takviye fazı ve matris fazından oluşan yeni üstün nitelikli malzemedir. Kompozit malzemeyi oluşturan fazların malzeme nitelikleri, geometrik özellikleri ve miktarları kompozitin hem fiziksel hem de mekanik niteliğini belirlemektedir. Kullanılan takviye ve matris fazının miktarları birbiri ile uyumlu olmalıdır. Takviye fazı yeni malzemenin mekanik özelliklerini geliştirirken, takviye faz miktarının fazla kullanımı kompozit malzemede istenmeyen hasar oluşturmaktadır. Kompozitlerin çoğu anizotropik ya da ortotropik malzeme yapısındadır (Staab, 2015).



Şekil 1.1. Kompozit malzeme ve bileşenleri

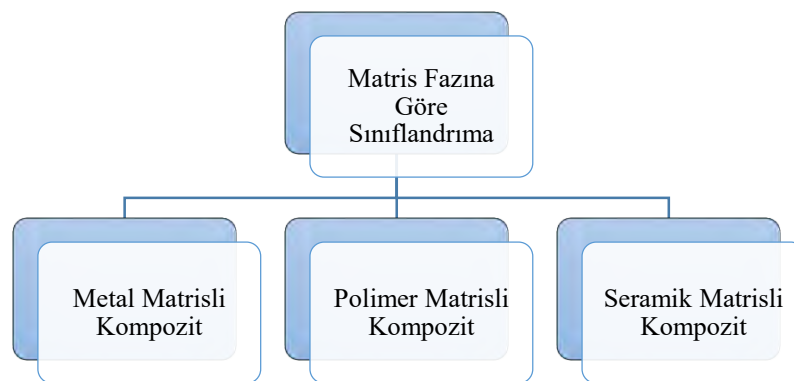
Kompozit malzeme çevresinde hacim olarak daha yoğun halde bulunan Şekil 1.1c’de gösterilen matris fazı, Şekil 1.1b’de gösterilen takviye malzemelerini bir arada

tutarak, takviye faz yapısının korunmasını sağlamaktadır. Malzemeye herhangi bir yük geldiği zaman, ilk olarak yükü matris fazı karşılamaktadır. Daha sonra gerilmeden dolayı herhangi bir deformasyona uğramadan ara yüzey bağlayıcısı aracılığıyla gelen yükü homojen bir şekilde malzemenin mukavemetini belirleyen takviye fazına aktarmaktadır. Kompozit malzemenin asıl işlev gördüğü bölümü takviye fazıdır. Takviye fazı matris fazı aracılığıyla aktarılan yükü hemen hemen çoğu zaman karşılamaktadır. Bu işlevinden dolayı kompozit malzemenin mukavemet özelliklerinin belirlenmesinde takviye fazı önemli rol almaktadır (Wang ve ark., 2011b; Gemi, 2014; Gemi ve ark., 2020).

Bu başlık kapsamında kompozit malzemenin matris fazına ve takviye fazına göre sınıflandırılmasından bahsedilmektedir. Yapılan çalışmada tabakalı cam elyaf takviyeli ve/veya karbon elyaf takviyeli ve epoksi matris malzemesinden oluşan kompozit yüzü sandviç kiriş incelenmiştir.

1.2.1. Kompozit malzemenin matris fazına göre sınıflandırılması

Matris ve takviye fazından oluşan kompozit malzemede, sürekli fazdaki matris malzemesinin görevi takviye malzemesinin etrafını sararak malzemenin şeklini korumak ve kompozitin niteliklerini iyileştirmektir. Kompozit malzemeleri kullanılan matris malzemesine göre Şekil 1.2’de görüldüğü üzere metal matrisli kompozit (Eckold, 1994; Sapuan, 2017), polimer matrisli kompozit ve seramik matrisli kompozit (Sapuan, 2017; Devasia ve ark., 2021) olmak üzere üç grupta incelenmektedir (Kumar Sharma ve ark., 2022).



Şekil 1.2. Matris fazına göre sınıflandırma

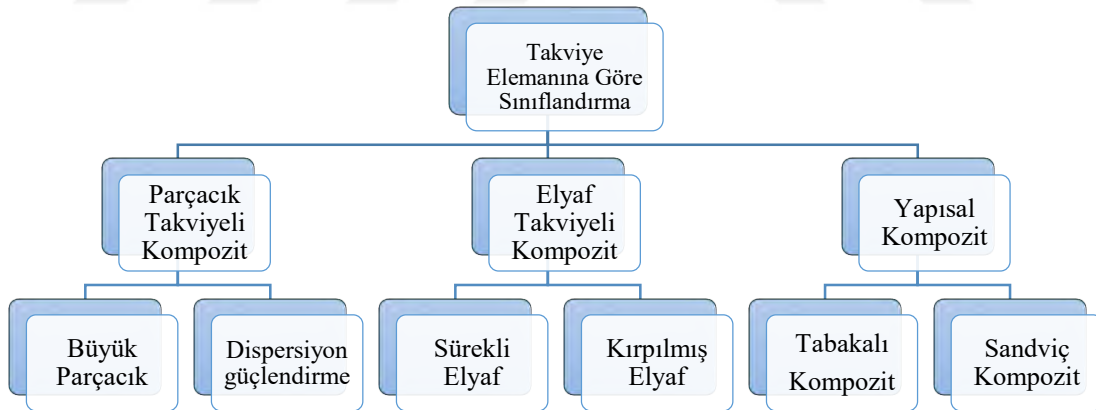
Polimer matrisli kompozit diğer matrisli kompozitler ile karşılaştırıldığında, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, spesifik mukavemet ve spesifik elastisite

modülünün yüksek olması, üretim maliyetinin düşük olması gibi avantajlarından dolayı inşaat sektörü başta olmak üzere diğer pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için cam, karbon ve aramid takviye malzemeleri tercih edilmektedir. Polimer matrisli kompozit malzemenin sınıflandırılması yapılırken, malzemede kullanılan plastiğin türü dikkate alınmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler için termoplastik ve termoset plastik türlerine göre bir sınıflandırma yapılabilir (Advani ve Hsiao, 2012; Kumar Sharma ve ark., 2022).

Bu çalışma doğrultusunda üretilen sandviç kompozit kiriş, matris fazına göre sınıflandırmada polimer matrisli kompozit sınıfında yer almaktadır.

1.2.2 Kompozit malzemenin takviye elemanına göre sınıflandırılması

Kompozit malzemenin takviye elemanına göre sınıflandırılmasına dair yapılan literatür çalışmasında, sınıflandırma için çeşitli gruplandırmaların olduğu görülmüştür. Parçacık takviyeli kompozit, elyaf takviyeli kompozit ve yapısal kompozit olmak üzere Şekil 1.3'te görüldüğü gibi üç ana grup ve alt gruplarından oluşan bir sınıflandırma yapılmıştır (Saba ve Jawaid, 2017).



Şekil 1.3. Takviye elemanına göre sınıflandırılması

Bir kompozit malzemenin matris fazı içerisinde mikrometre boyutunda farklı malzeme parçacıkları içermesiyle oluşan kompozit türü, parçacık takviyeli kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır (Mallick, 2000). İzotropik yapıdaki parçacık takviyeli kompozitin mukavemet değeri içerisinde bulunan parçacıkların sertliği ile bağlantılıdır (Madenci, 2011).

Elyaf takviyeli kompozit, ana malzemenin yani matris fazının mukavemetini artırmak gayesiyle matris fazına elyafın takviye edilmesi sonucu ile oluşan kompozit malzemedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde uygun çap/uzunluktaki elyafların tercih edilmesi gerekmektedir. Bu oran arttıkça takviye fazına yük aktarımı daha iyi bir şekilde gerçekleşmektedir (Madenci, 2011).

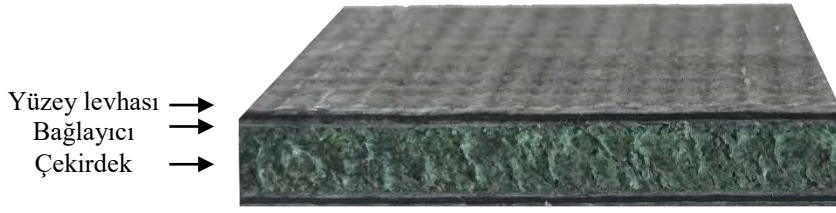
Yapısal kompozit, tabakalı (lamine) kompozit ve sandviç kompozit olmak üzere iki alt gruptan oluşmaktadır. Tabakalı kompozit malzemenin kullanımı geçmişe dayanmaktadır. Geçmişten günümüze kadar farklı sektörlerde çok yaygın olarak kullanılan bir kompozit malzeme sınıfı olan tabakalı kompozit, iki veya daha fazla lamine malzemesinin tabaka oluşturacak şekilde dizayn edilmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Her bir tabaka ayrı bir kompozit malzemeyi temsil etmektedir (Madenci, 2011; Gemi, 2014).

Yapısal kompozit türünün alt sınıfında olan ve tez çalışması kapsamında kullanılan sandviç kompozit hakkındaki bilgiler 1.3. Sandviç Kompozit başlığında ve alt başlıklarında detaylı olarak incelenmiştir.

1.3. Sandviç Kompozit

Sandviç kompozit başlığı kapsamında sandviç kompozit hakkındaki genel bilgilerden, sandviç kompozit üretim yöntemlerinden, sandviç kompozitte yaygın olarak kullanılan polimer reçinelerden ve elyaf takviyelerinden, sandviç yapılarda kullanılan çekirdek malzemelerinden bahsedilmektedir.

Sandviç kompozitler genellikle 2 adet ince, rijit yüzey levhaları ve bu yüzey levhaları arasında 1 adet düşük yoğunlukta ve Şekil 1.4'de görüldüğü üzere yüzey levhalarına göre daha kalın çekirdek malzemesinden tasarlanan kompozit malzeme sınıfının alt türüdür. Sandviç kompozitler günümüzde yaygın olarak inşaat, uzay ve havacılık, denizcilik, mekanik mühendisliği gibi çeşitli sektörlerde tercih edilmektedir (Cheng ve ark., 2016; Gupta ve Pradyumna, 2022). Yüzey levhaları genellikle yüksek mukavemet değerine sahip ve sertken, orta bölümdeki çekirdek elemanın enerji sönümlemesi ve hafif bir yapıda olması için genellikle köpük, bal petek, kıvrımlı gibi yumuşak malzemelerden tasarlanmaktadır (Cheng ve ark., 2016).



Şekil 1.4. Sandviç kompozit malzemenin şematik gösterimi

Sandviç yapılarıdaki rijit yüzey levhaları, eğilme yükünün büyük bir kısmını karşılamaktadır. Sandviç yapıların eğilme yükü karşısındaki davranışları yüzey levhalarının ve çekirdeğin niteliklerine, yüzey levhası ve çekirdek arasındaki bağlantıya, malzemelerin mekanik ve teknik özelliklerine, yapı tasarımı bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Enerji sönmemesi yapan ve hafif bir malzeme olan çekirdek elemanı ise kayma yükünü karşılamaktadır (Li ve ark., 2017; Eric ve ark., 2020). Yüzey levhaları arasındaki çekirdek elemanı, kompozit yapının atalet momentini artırarak sandviç kompozit malzemenin eğilme rijitliğinin artırmasını sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2019).

Bu çalışmadaki sandviç kompozit tasarımında matris ve bağlayıcı malzeme olarak epoksi reçine, alt ve üst tabakalar için cam elyaf takviyeli polimer (CTP) kompozit ve karbon elyaf takviyeli polimer (KTP) kompozit ve çekirdek malzeme olarak PVC köpük tercih edilmiştir.

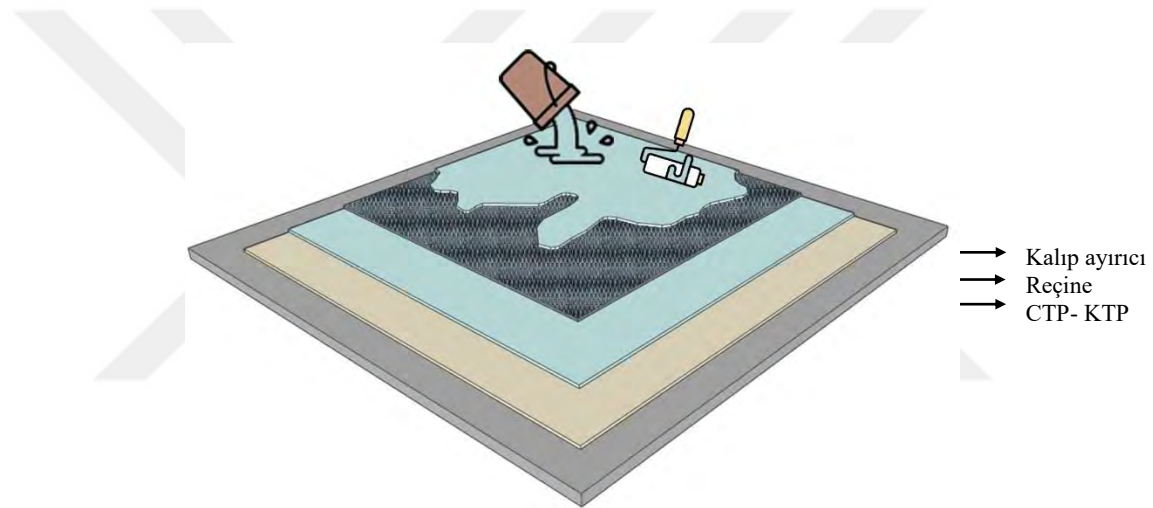
1.3.1. Sandviç kompozit üretim yöntemleri

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde pek çok farklı yöntem mevcuttur. En yaygın olarak kullanılan yöntemler elle yatırma, püskürtme, vakum torbalama ve vakum infüzyon yöntemi, elyaf sarma yöntemi (Sapuan, 2017), enjeksiyon kalıplama, basınçlı kalıplama (Eckold, 1994), otoklav kalıplama (Eckold, 1994), pultrüzyon (Shaw-Stewart ve Sumerak, 2000; Gemi ve ark., 2021) yöntemleridir (Cheng, 2012).

Yapılan bu çalışma kapsamında, sandviç kompozit kiriş üretiminde elle yatırma yöntemi ve vakum torbalama yöntemi tercih edilmiştir. Kumaşlara elle yatırma yönteminden sonra vakum torbalama yönteminin uygulanması ile takviye ve matris malzemesi arasındaki adezyon kuvveti artırılarak kompozit güçlendirilmektedir. Tercih edilen bu yöntemler alt başlıklar altında detaylı olarak anlatılmaktadır.

1.3.1.1. Elle Yatırma Yöntemi

Elle yatırma yöntemi eskiden beri ve yaygın olarak kullanılan kompozit üretim yöntemidir. Lamine kompozitin performansını iyileştirmek için çeşitli elyaflar farklı açılarda yönlendirilerek dizayn edilmektedir. Üretimin ilk aşamasında işlemin uygulanacağı kalıbın yüzeyi temizlenmektedir ve ardından kalıp ayırıcı sürülmektedir. Pigment veya katkı maddesi içeren reçine kalıp yüzeyine eşit bir şekilde uygulanmaktadır. Kalıp yüzeyindeki reçine sertleştikten sonra reçine, kırılmış ya da dokunmuş elyaf takviye kumaşlarına Şekil 1.5’de görüldüğü gibi rulo veya fırça aracılığıyla emdirilmektedir. Üretilen lamine kürleme işlemi tamamlandıktan sonra lamine kalıptan ayrılıp istenilen ebatlara göre kesim işlemi yapılmaktadır (Cheng, 2012).



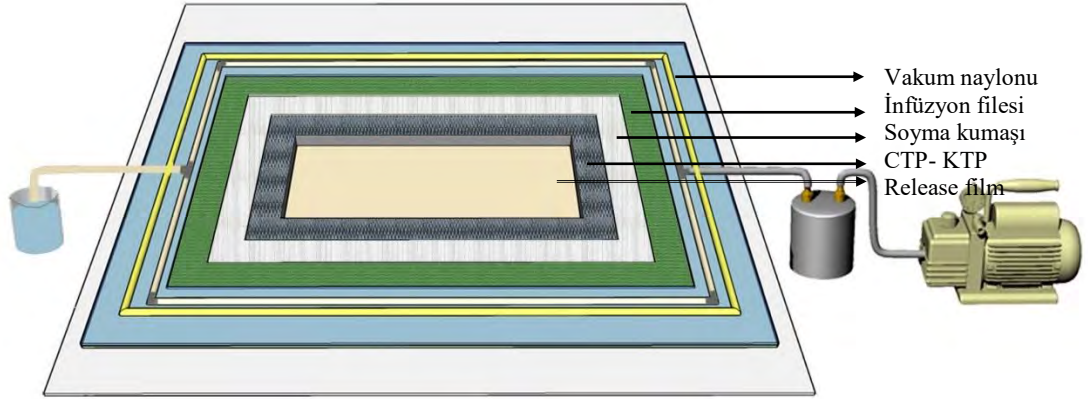
Şekil 1.5. Elle yatırma yönteminin şematik gösterimi

Çalışma bağlamında, bahsedilen bu adımları takip ederek numune üretiminin ilk aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasındaki 3.2.1. Numune Üretimi başlığında sandviç kompozit kiriş üretiminde elle yatırma yönteminin uygulanmasından bahsedilmektedir.

1.3.1.2. Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama yöntemi, elle yatırma yönteminin modifiye edilmesi ile oluşturulan kapalı kalıplama üretim tekniğidir. Şekil 1.6’da vakum torbalama yönteminin şematik gösterimine yer verilmektedir. Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile istenilen kalitede karmaşık ve büyük

geometrik yapıya sahip olan parçalar üretilebilmektedir. Vakumlama yönteminde kullanılan ekipmanın maliyeti düşüktür (Abdurohman ve ark., 2018).



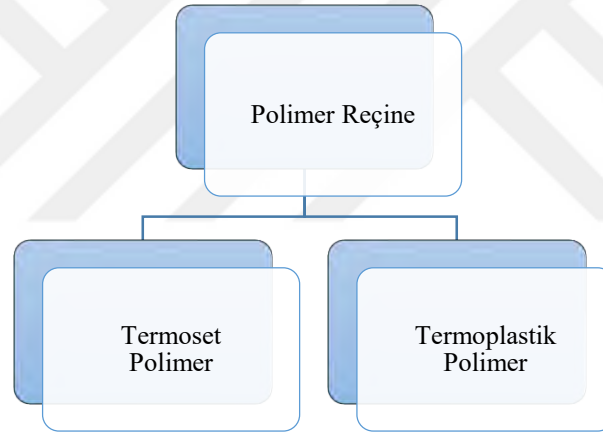
Şekil 1.6. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi

Vakum torbalama yönteminde ilk olarak, kompozit üretiminin gerçekleştirileceği kalıp yüzeyi dikkatlice temizlenip yüzeye kalıp ayırıcı sürülmektedir. Üretilen kompozitin, kürlenme işleminden sonra kalıp yüzeyinden kolayca ayrılması için yüzeye deliksiz release film (deliksiz ayırıcı) serilmektedir. Vakum torbalama yönteminde istenilen yönlendirme ve tabaka sayısına göre reçine, elyaf kumaş ile rulo veya fırça aracılığıyla emdirilmektedir. Kompozit malzeme, ayırıcı film üzerine yerleştirilmektedir. Daha sonra malzemenin üzerine soyma kumaşı serilmektedir. Ardından reçinenin tüm kalıp içerisine dağıtılmasını sağlayan infüzyon filesi ile malzemenin üzeri kaplanmaktadır. İnfüzyon filesinin üzerine infüzyon spiral hortum ve vakum hortumları yerleştirilerek reçine enjeksiyon hattı oluşturulmaktadır ve bu hat aracılığıyla sistemde reçine ve hava akışı gerçekleştirilmektedir. Vakum naylonunu kalıp yüzeyine yerleştirmek için çift taraflı sızdırmazlık bandı kullanılmaktadır. Vakum naylonu hava ve reçine sızdırmayacak şekilde sızdırmazlık bandı ile kalıp yüzeyine yapıştırılmaktadır. Vakum torbalama yönteminde pompa aracılığıyla vakum işlemi başlatılmaktadır ve negatif basıncın sonucu olarak malzemede bulunan fazla reçine, uçucu maddeler ve hava kabarcıkları malzemeden uzaklaşmaktadır. Vakum yöntemindeki reçine ve hava akışı işlemleri tamamlandıktan sonra vakum pompası kapatılıp, reçine enjeksiyon hatları kelepçelenmektedir. Ardından malzeme belirli bir sıcaklık ve basınç altında kürlenme işlemine tabi tutulmaktadır. Üretilen kompozit malzemeye herhangi bir hasar verilmeden, kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra malzeme kalıp yüzeyinden ayrılmaktadır (Hsiao ve Heider, 2012; Sapuan, 2017; Hindersmann, 2019).

Yapılan tez çalışması kapsamında sandviç kompozit kiriş üretiminde ikinci bir aşama olan vakum torbalama yöntemi belirtilen işlem basamakları doğrultusunda uygulanmıştır. Bu tez çalışmasındaki 3.2.1. Numune Üretimi başlığında sandviç kompozit kiriş üretiminde vakum torbalama yönteminin uygulanmasından bahsedilmektedir.

1.3.2. Sandviç kompozitte yaygın olarak kullanılan polimer reçineler

Sandviç kompozitlerin yüzey levhalarında kullanılan matris malzemeleri ile ilgili detaylı bilgi 1.2.1. Kompozit malzemelerinin matris fazına göre sınıflandırılması başlığı kapsamında detaylı olarak açıklanmıştır. Bu çalışma kapsamında polimer matrisli kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.7'de görüldüğü üzere polimer reçineler termoset polimer ve termoplastik polimer olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır.



Şekil 1.7. Polimer reçine sınıflandırması

Yapılan bu çalışmada, sandviç kompozit kiriş üretiminde matris malzemesi olarak termoset polimer sınıfına ait olan epoksi reçine tercih edilmiştir. 3.1.1. Epoksi reçine ve reçine sertleştirici başlığı altında deney kapsamında kullanılan epoksi reçine ile ilgili bilgiler detaylı olarak verilmiştir.

Epoksi reçine, termoset polimer sınıfında yer alan ve yaygın olarak kullanılan reçine türüdür. Şekil 1.8'de gösterilen epoksi reçine elyaf takviyeli polimerlerde matris malzeme, yapısal yapıştırıcı ve koruyucu kalıp olarak kullanılabilir.



Şekil 1.8. Epoksi reçine

Kompozit malzemelerde takviye malzemeleri ile iyi bir adezyon kuvveti oluşturmaktadır. Epoksi reçine vinilester ve polyester gibi diğer termoset polimerlere göre daha iyi mekanik özellikler sergilemektedir. Diğer reçinelere göre maliyeti fazla olmasına rağmen maliyet/ performans indeksi daha iyidir. Malzeme kütleme işleminde epoksi reçine daha az büzülmektedir. Epoksi reçineye katkı malzemeleri ilave edilerek reçinenin nitelikleri geliştirilebilmektedir. Basit epoksinin, kırılma dayanımını iyileştirmek için epoksi reçine sertleştirici kullanılmaktadır. Epoksinin elle yatırma, vakum torbalama ve infüzyon, kalıplama yöntemi gibi çoğu kompozit üretim yöntemlerinde kullanımı uygundur. Epoksi reçinenin moleküler yapısına göre glisidil eter, glisidil ester, glisidil amin, doğrusal alifatik türü ve alisiklik sınıfı olmak üzere beş ana türü vardır (Wang ve ark., 2011a; Fiore ve Valenza, 2013).

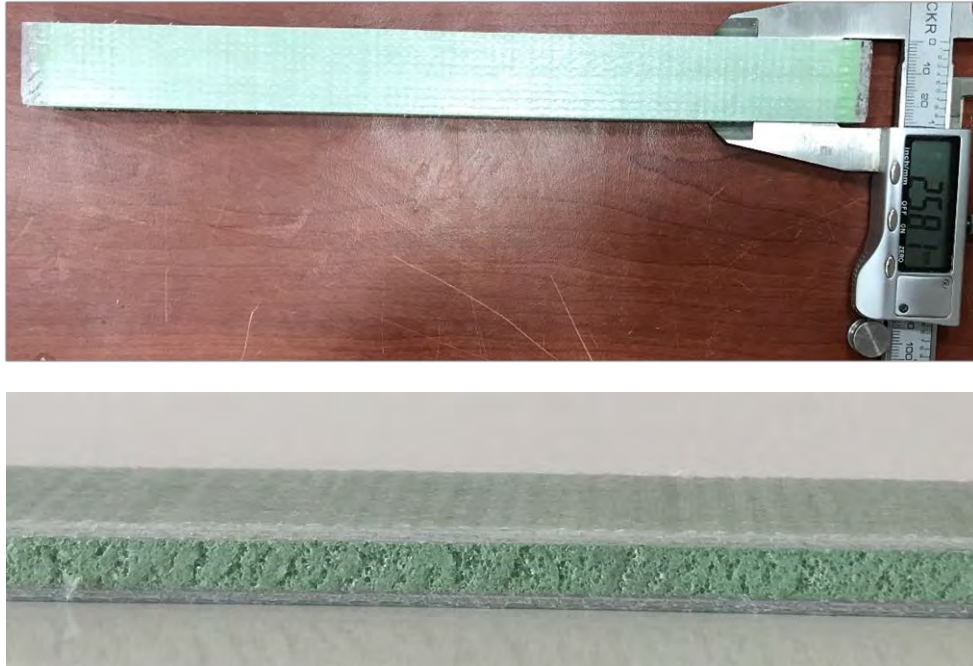
1.3.3. Sandviç kompozitin yüzey levhalarında yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeli polimer kompozitler

Sandviç kompozit yapılarda yüzey levhaları için genellikle elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında sandviç kompozitin yüzey levhaları CTP ve KTP kompozit olarak üretilmiştir.

1.3.3.1. Cam elyaf takviyeli polimer kompozit

Cam elyaf kumaş, polimer matrisli kompozitlerin güçlendirilmesinde en yaygın olarak kullanılan takviye malzemesidir. Şekil 1.9'da CTP kompozit malzeme gösterilmektedir. Cam elyafı oluşturan kuvars kumu, kalker, dolomit, borokalsit ve pirofillit gibi ana maddeler homojen bir şekilde karıştırılıp, ısıtılan fırınlara verilmektedir. Likit bir faza geçen ana maddeler amorf yapıdaki camı oluşturmaktadır. Eriyen cam, tabanında küçük kanal boşlukların bulunduğu ocak bölümünden geçerek cam elyafı oluşturur. Cam elyaflar soğutulduktan sonra sarma işlemleri hızlı bir şekilde yapılarak, cam lifler kullanım amacına göre istenilen çapa ayarlanmaktadır. Genellikle cam elyafın çapı 10-20 mikron arasındadır. Cam elyafları kullanım amacına göre kırılmış, lif, iplik gibi çeşitli yapılarda şekillendirilebilmektedir. CTP'nin çekme mukavemeti diğer inorganik elyafların çekme mukavemeti gibi yüksektir ancak deformasyon kabiliyetinin yüksek olmasından dolayı elastisite modülü düşüktür. CTP kompozitin darbe direnci ve durabilitesi yüksektir (Chawla ve Chawla, 2017; Gemi ve ark., 2021; Wang ve Gao, 2021).

Bu tez çalışmasında kullanılan cam elyaf kumaşın teknik ve mekanik özellikleri 3.1.2. Cam elyaf kumaş başlığı altında detaylı olarak verilmiştir.

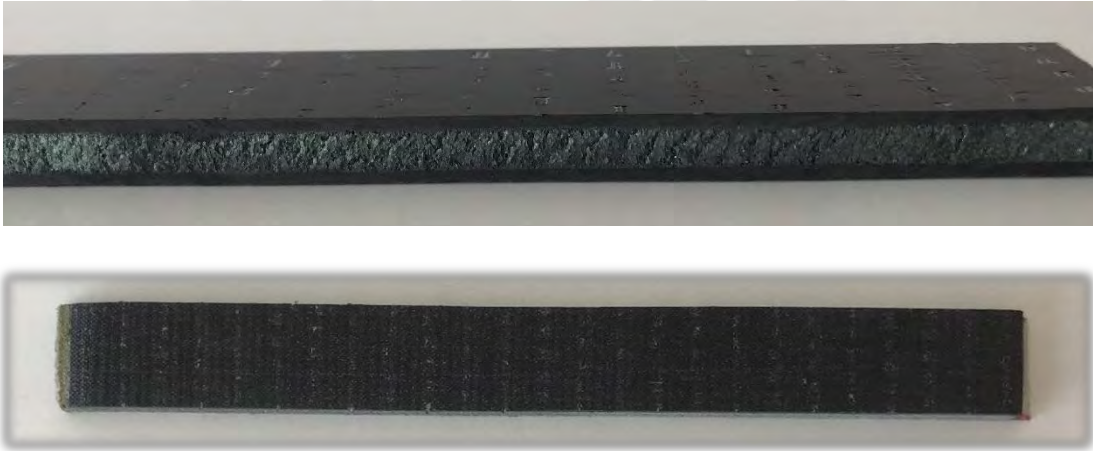


Şekil 1.9. CTP kompozit malzeme

1.3.3.2. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit

Günümüzde karbon elyafın maliyetinin azalmasından dolayı cam elyaftan sonra havacılık, uzay ve inşaat gibi sektörlerde en çok tercih edilen takviye malzemesidir. KTP kompozit malzeme Şekil 1.10'da gösterilmektedir. KTP kompozitin çekme mukavemeti ve elastisite modülü CTP kompozite göre daha büyüktür. Bunun sonucu olarak yüklemeye altındaki karbon elyafın deformasyonu küçüktür. Bilindiği üzere uzama oranı gevreklik ile ters orantılıdır. Elastisite modülünün yüksek olması ve uzama oranının düşük olması karbon elyafta istenmeyen bir durum olan gevrek kırılmaya yol açmaktadır. Karbon elyaf daha düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı cam elyaf göre daha hafif bir yapıdadır. Karbon elyafın çapı 5-7 mikron arasındadır. Termal genişleme katsayısının küçük ve yüksek sıcaklık direnci büyüktür. Sürekli yüklemeye altındaki direnci büyüktür fakat darbe direnci küçüktür (Wang ve Gao, 2021).

Bu tez çalışmasında kullanılan karbon elyaf kumaşın teknik ve mekanik özellikleri 3.1.3. Karbon elyaf kumaş başlığı altında detaylı olarak verilmiştir.

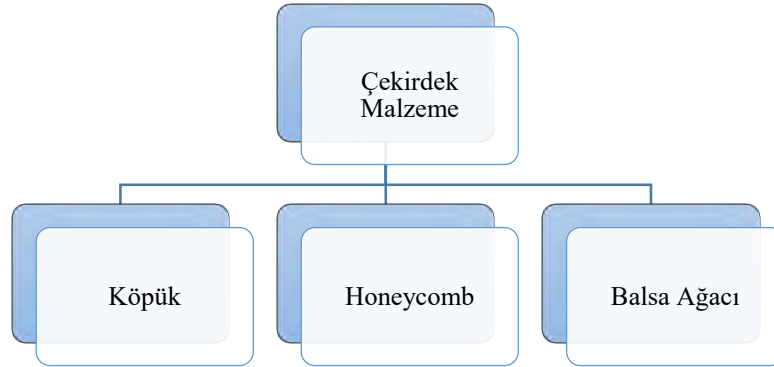


Şekil 1.10. KTP kompozit malzeme

1.3.4. Sandviç kompozitlerde kullanılan çekirdek malzeme çeşitleri

Sandviç kompozitlerde kayma yüklerini karşılayan ve yüzey levhaları arasında bulunan mesafeyi koruyarak malzemenin rijitliğini artıran çekirdek elemanı, yüzey levhalarının niteliklerine, boyutlarına ve kompozit malzemenin işlevine uygun olarak seçilmektedir (Shahdin ve ark., 2009). Sandviç kompozitler çekirdek çeşitliliği bakımından zengindir ama Şekil 1.11'de görüldüğü gibi köpük, honeycomb (Campbell,

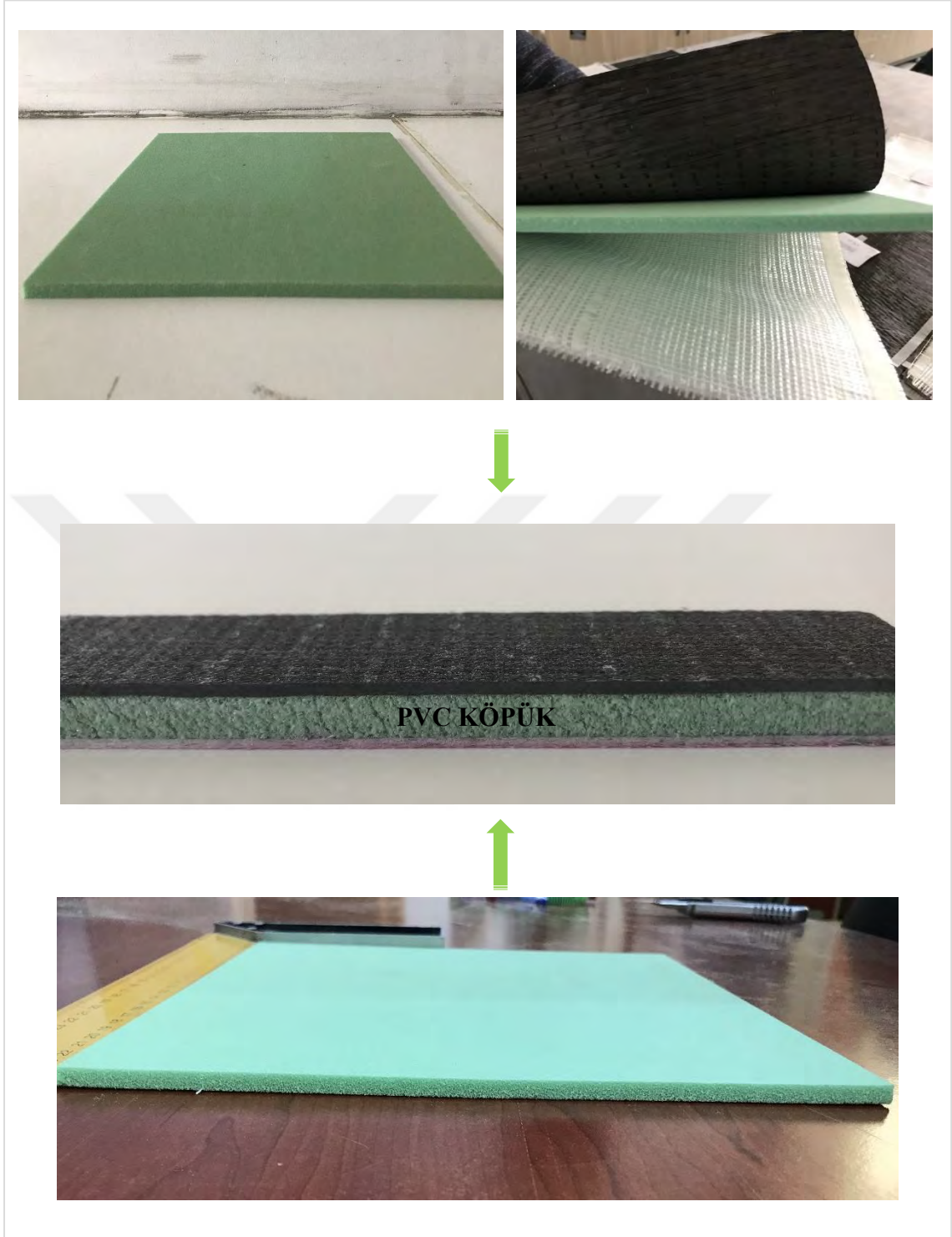
2010; Yin ve ark., 2022) ve balsa ağacı (Mohammadi ve Nairn, 2014) bu çeşitler içerisinde en yaygın olarak kullanılan çekirdek türleridir (Shahdin ve ark., 2009).



Şekil 1.11. Çekirdek malzeme çeşitleri

Sandviç kompozitlerde çekirdek malzemesi olarak poliüretan köpük, PVC köpük, polistiren köpük, polimetil metakrilat köpük gibi polimerik köpükler yaygın biçimde kullanılmaktadır. PVC köpük polimerik köpük sınıfında yer alan ve üstün niteliklerinden dolayı Şekil 1.12’de görüldüğü gibi sandviç yapılarda çoğunlukla tercih edilen türdür. PVC köpük çapraz ya da düz bağa sahiptir. Düz bağlı PVC köpüğün çapraz bağlı PVC köpüğe göre darbe direnci ve rijitliği daha büyüktür, termoformu daha kolaydır. Çapraz bağlı PVC köpük yüksek sıcaklığa ve solventlere karşı daha büyük dayanım göstermektedir fakat daha kırılğan bir yapıdadır. PVC köpük, hücrelerin kapalı ya da açık yapıda olmasına göre 30-400 kg/m³ yoğunluğa ve 65 C°-135 C° maksimum (mak.) sıcaklık değerine sahiptir (Zenkert, 1997; Campbell, 2010).

Yapılan bu çalışmada, sandviç kompozit kiriş üretiminde çekirdek malzemesi olarak PVC köpük tercih edilmiştir. 3.1.4. Köpük başlığı altında deney kapsamında kullanılan PVC köpük hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.



Şekil 1.12. PVC köpük ve PVC köpüğün sandviç kompozitte kullanımı

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sandviç kompozit kirişlerin alt ve üst yüzey tabakalarında kullanılan elyaf takviyeli polimer kompozitlerin ve sandviç kompozit kirişlerin mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik çeşitli çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Tabaka malzeme niteliği, tabaka istifleme sıralaması ve elyaf yönlendirme açısı sandviç kompozit kirişin mekanik özelliklerini etkilemektedir (Fazzolari, 2017; Garouge ve ark., 2022).

Shi ve diğ. (2018) CTP yüzey levhası ve balsa çekirdekten oluşan sandviç kirişin eğilmeli yorulma testi altındaki hasar davranışını incelemiştir. Sandviç kompozitin yüzey levhası sırasıyla $[0^\circ]$, $[0^\circ, 90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ elyaf yönlendirmesinden oluşturulmuştur. CTP yüzey levhasının basınç ve çekme testleri ASTM D3039 ve ASTM D3410'a uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Zhang ve diğ. (2020) sandviç kompozitin $[0/90]^\circ$ elyaf yönlendirmeli CTP yüzey levhasının mekanik niteliklerini belirlemek için ASTM'ye uygun olarak çekme, basınç ve kesme testi yapmıştır.

Wang ve diğ. (2020) yaptıkları sandviç kiriş çalışmasında $[0/90]^\circ$ elyaf yönlendirmesine sahip olan CTP yüzey levhasının mekanik niteliklerini belirlemek için ASTM D3039 ve ASTM D3410'na uygun olarak test yapmıştır.

Özkılıç ve diğ. (2020) pultrüzyon yöntemiyle üretilen CTP levhaların çekme ve basınç davranışlarını incelemiştir.

Nabati ve diğ. (2021) malzemesi değişken yüzey levhalarından oluşan sandviç kirişin eğilme altındaki davranışını incelemiştir. KTP yüzey levhasının mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM D3039'a uygun olarak çekme testi gerçekleştirmiştir.

Xie ve diğ. (2022) ağ takviyeli CTP yüzey levhası ve polietilen tereftalat (PET) köpükten oluşan sandviç kompozit yapının eğilme altındaki davranışını incelemiştir. $[0/90, -45/45, 0/90]$ elyaf yönlendirmesine sahip CTP yüzey levhalarının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çekme, basınç ve kesme testinde ASTM D3039, ASTM D3410 ve ASTM D3518 dikkate alınmıştır.

Hatti ve diğ. (2022) 90° , 45° ve 30° elyaf yönlendirmesine sahip CTP kompozite ASTM D3039'a uygun olarak çekme testi uygulamıştır.

Pareta ve diğ. (2020) uçucu kül partikül takviyeli poliüretan (PU) köpük ve CTP/KTP yüzey levhalarından sandviç kompozit tasarlamıştır. Yüzey levhasının çekme özellikleri belirlemek için ASTM D3039, sandviç yapının eğilme testi ASTM C393'ü dikkate almıştır.

Sokolinsky ve diğ. (2003) sandviç kirişlerin nonlinear eğilme davranışlarını deneysel ve analitik olarak incelemiştir. PVC köpük çekirdek ve alüminyum yüzey levhalarından oluşturulan kompozit sandviç kiriş üzerinde dört nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir ve böylece geometrik olarak nonlinear yüksek derece teorisi kanıtlanmıştır. Deney sonucuna elde edilen veriler klasik sandviç teorisi, lineer ve geometrik olarak nonlinear yüksek derece sandviç teorisi ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları yüksek derece teori ile benzerlik göstermiştir. Artan dış yüklerle beraber kiriş açıklığı boyunca ve belirli kısımlarda tepki parametreleri farklı davranışlar sergilemiştir.

Tagarielli ve diğ. (2004) cam elyaf malzemelerin kullanıldığı yüzey levhaları ve PVC köpük çekirdekten oluşturdukları sandviç kompozit kirişleri üç nokta eğilme testine tabi tutarak kompozitin mukavemet ve deplasman değerini tespit etmiştir. Malzemenin göçmesinin yüzeyde oluşan çok küçük boyuttaki burkulmalara, çekirdeğin kesmeye karşı koyamayıp yenilmesine ve indentasyona (batma) bağlı olduğu ortaya koyulmuştur. Çalışma sonunda, göçme yükleri için basit formüller elde edilmiştir.

Manalo ve diğ. (2010) yapısal elyaf kompozit sandviç kirişlerin düşey ve yatay pozisyonda eğilme davranışını deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Sandviç kirişlerin dizaynında, alt ve üst kısımda CTP levha ve çekirdek olarak adlandırılan, levhaların orta kısmında ise fenolik bir malzeme kullanılmıştır. Her boyuttan beş adet numune hazırlanıp, kompozit sandviç kirişler düşey ve yatay pozisyonlarda yük-sapma davranışı, gerilme-uzama davranışı, göçme yükü ve göçme mekanizmalarını belirlemek için 4 noktalı statik eğilme testine tabi tutulmuştur. Deneysel araştırmanın sonuçları, eğilme yükü altında, yatay pozisyondaki kompozit sandviç kirişlerin gevrek kırılmadan dolayı başarısız olduğunu göstermiştir. Düşey konumlandırılan kirişlerde CTP lamalar kirişlerin taşıyabileceği yükü artırmıştır ve çekirdekte gerilme çatlakları oluşmaya başladığı zaman düşeydeki CTP levhalar kirişin ani ve büyük bir şekilde kırılmasını önlediğini göstermiştir.

Manalo ve diğ. (2010) yaptıkları kompozit malzeme çalışmasında CTP yüzey levhaları ve modifiye çekirdek malzemedен oluşan yeni nesil kompozit sandviç kirişlerin eğilme davranışını incelenmiştir. Kompozit sandviç kirişler dört nokta eğilme testine tabi tutulmuştur ve hem orta açıklık hem de mesnetlere yakın olan bölgelerde mukavemet değerleri belirlenmiştir.

Manalo ve Aravinthan (2012) birbirine tutturulmuş kompozit sandviç kirişlerin eğilme altındaki davranışlarını ve bu malzemenin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabilirlik durumunun belirlenmesi amacıyla inceleme yapmıştır. Bu incelemede,

temel anlamda beton için kullanılan Fiber Model Analizi (FMA) hazırlanan sandviç kompozit kiriş için de kullanılmıştır. Çalışma sonucunda FMA, basınç altındaki çekirdeğin doğrusal olmayan davranışını, çekirdeğin göçmesini ve fiber kompozit kaplamanın doğrusal elastik davranışını açıklanmıştır.

Dariushi ile Sadighi (2014) sandviç kirişler için yeni bir doğrusal olmayan yüksek dereceli teorisini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Yapılan çalışma, yüzey levhaları ve çekirdek bölümlerinde büyük deformasyon meydana gelen ortotropik sandviç kirişler için geometrik olarak doğrusal olmayan sandviç kiriş levha teorisini açıklamaktadır. Denklemler, Green strain ve ikinci Piola-Kirchhoff gerilim tensörünün kullanıldığı yüksek dereceli sandviç panel teorisinden elde edilmiştir. Basit yüklemeli kirişlerin doğrusal olmayan denklemleri ise Ritz metodu ile elde edilmiştir. Elde edilen denklemler Newton-Raphson yineleme tekniği ile çözülmüştür. Üç noktadaki eğilme altındaki kirişler için teorik hesaplamalar elde edilip, yapılmış olan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Geometrik parametrelerin doğrusal ve doğrusal olmayan modeller arasındaki farklılıklara etkisini tartışılmıştır. Aralarındaki farklılıkların doğru sonuçlar elde etmek için önemli olduğunu ve nonlinear analizlerin tercih edilmesinin daha doğru sonuçlar doğuracağını öne sürülmüştür. Ve bu analitik tahminleri doğrulamak için deneyler yapılmıştır. Deney numuneleri farklı boyut ve dizayna göre dört gruba ayrılıp deneye tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerde kiriş uzunluğu, levha kalınlığı ve çekirdek yüksekliği gibi geometrik parametrelerin lineer ve nonlinear analitik tahminlerin doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla dizayn edilmiştir.

Magnucka-Blandzi ve diğ. (2018) üç nokta eğilme altındaki asimetric sandviç kirişi analitik olarak incelemiştir. Yapılan bu çalışmada farklı kalınlık ve farklı malzeme sabitlerine sahip yüzeyleri bulunan üç katmanlı, basitçe desteklenmiş kirişleri analitik olarak açıklamak hedeflenmiştir. Sandviç kirişin çekirdek malzemesini metal köpük olarak tercih edip, mekanik özelliklerini belirlenmiştir. Daha sonra üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Kirişin analitik modeli kirişin enine kesitinin doğrusal olmayan deformasyon hipotezine bağlı olarak formüle edilmiştir. Gerilmeler Hooke kanuna göre belirlenmiştir ve gerilme ile yer değiştirme arasında doğrusal bir bağlantı olduğunu varsayılmıştır. Bununla birlikte elastik şekil değiştirme enerjisi ve yükleme işi belirlenmiştir. Toplam potansiyel enerji prensibine bağlı olarak sistemin denge denklemlerini elde etmiştir ve trigonometrik ifadelerle beraber sistemi analitik olarak çözmüştür. Mak. sapma, kayma gerilmelerini ve tarafsız eksenin konumunu belirlemiştir.

Solidworks programı ile sonlu eleman analizini gerçekleştirip ve yapılan analitik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır.

Paczos ve diğ. (2018) özel bal peteği yapısına sahip çekirdeği bulunan kısa sandviç kirişin üç nokta eğilme davranışlarını incelemiştir. Sandviç kiriş ilaveli üretim tekniği ile elde edilmiştir. Elastik modül değerleri kiriş boyunca değişiklik göstermiştir. Zig- Zag hipotezi yani doğrusal kayma deformasyonu teorisi elde edilen sandviç kiriş için uygulanabilir olarak kabul edip, analitik sonuçlar elde edilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonucu, kiriş sapma değerleri hesaplanmıştır ve analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Wang ve diğ. (2020) CTP sertleştiricilerle güçlendirilmiş kompozit sandviç kirişlerin yorulma davranışını incelemiştir. Sandviç kirişlerin dizaynında, alt ve üst CTP levha ve çekirdek olarak adlandırılan, levhaların orta kısmında ise boyuna ve enine CTP ile güçlendirilmiş köpük bir malzeme kullanılmıştır. Vakum destekli reçine transfer kalıplama teknolojisi ile toplamda 42 adet sandviç kiriş numunesi hazırlanmıştır. Enine ve boyuna yerleştirilen CTP sertleştiricilerinin, hem yorulma ömrü hem de eğilme ve dönme davranışlarının hata modları yapılan eğilme ve yorulma deneyleri aracılığıyla incelenmiştir. Deney sonuçlarına incelendiği zaman, enine CTP ile güçlendirilmiş olan kirişlerde hataların köpük çekirdek arasındaki çekirdek kesmesinden ve ara yüzey ayrışmasından kaynaklandığı, boyuna CTP ile güçlendirilmiş olan kirişlerde ise hataların CTP levhaların basınç başarısızlığından veya boyuna CTP sertleştiricilerinin burkulmasından ya da kırılmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar daha sonra CTP ile güçlendirilmiş sandviç kirişlerde farklı yüklemeler altında oluşacak olan hata döngü sayısı tahmin etmek için yorulma hasar modeli geliştirmiştir.

Pyrzowki ve Sobczyk (2020) yaptıkları üç nokta eğilme deneyi vasıtasıyla alt ve üst CTP levha ve PET çekirdek köpükten oluşan sandviç kirişlerin lokal ve yerel tepkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmalarda deneylerle ve statik hesaplamalarla kirişlerin elastik tepkisini, hasar ve hatalarını tahmin etmeyi ve pratik olarak kullanılacak tanımlamaları yapmak amaçlanmıştır. Deneyde kullanılacak olan CTP levha ve PET köpüklerin istenilen mekanik özelliklerini belirlemek için malzemelerde birtakım deneyler yapılmıştır. Deneyde çekirdek malzemesi olarak standartlarda AC80, AC100 ve AC200 olarak ifade edilen sırasıyla 80, 100 ve 200 kg/m³ olmak üzere üç farklı yoğunluktaki yapısal PET köpükler kullanılmıştır. Deney için levhalar vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Sonra levhalar uygun şekilde parçalara kesildi ve 1220 mm uzunlukta, 90 mm genişlikte ve 75 mm yüksekliğinde çekirdek kalınlığına sahip olan üç farklı yoğunluktaki köpükler ile her numuneden ikişer tane olmak üzere toplamda altı

adet kiriş üretilmiştir. Daha sonra sandviç kirişte üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır ve tüm deneyler kirişlerin koptuğu ana kadar gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde veriler, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kiriş analizinde sonuçlarla benzerlik göstermiştir.

Taghipoor ve diğ. (2020) poliüretan köpük ile doldurulmuş kafes çekirdekli sandviç kirişin üç nokta eğilme davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Çekirdek, genişletilmiş metal levhaları rijit poliüretan köpük ile doldurulmasından elde edilmiştir. Alt ve üst yüzeylere ise çelik levhalar yerleştirilmesiyle sandviç kiriş üretimi gerçekleştirilmiştir. Köpük ile doldurulmuş ve doldurulmamış üç çeşit çelik kafesli çekirdek yarı statik yükleme altında deneye tabi tutulmuştur. Deney sonucu sandviç kiriş için kuvvet yer değiştirme ilişkisi, çökme davranışı, çarpma kuvvetlerinin etkisi ve özgül enerji sönümlenmesi gibi basınç parametreleri incelenmiştir. Sandviç kirişin çekirdek bölümündeki genişletilmiş kafes levhaların hem enine hem boylamasına olan yönlendirilmesinin ve hücre geometrisinin enerji sönümlenmesine etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre çekirdeğin poliüretan köpük ile doldurulması sandviç kirişin enerji sönümlenmesini yaklaşık %80'e kadar artırmıştır. Çekirdekteki genişletilmiş kafesin optimum yön yerleştirilmesinde ise enerji sönümlenmesi %74.6 oranında artırmıştır.

Ma ve diğ. (2020) kompozit sandviç levhaların üç nokta eğilme altındaki yorulma davranışlarını incelemiştir. Bal peteği sandviç levhaların yorulma davranışları için farklı yüklemeler altında gelişmiş üç nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilip, kuvvet/yorulma eğrileri elde edilmiştir. Yorulma hasarlarının kaydedilmesiyle beraber bal peteği sandviç levhaların yorulma hata modları ve yorgunluk kaynağını belirlenmiştir. Bal peteği yüzeyindeki kayma gerilme dağılımının hesaplanmasıyla düşey ve yatay yön sandviç panellerin hata morfolojisindeki farklılığın nedenleri gruplandırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda bal peteği sandviç levhaların yorulma ömrünün tahmini için bir metot önerilmiştir ve doğrulanmıştır.

Liu ve diğ. (2020) sertleştiricilerle güçlendirilen yeni köpük çekirdekli sandviç yapıların eğilme davranışlarını incelemiştir. Sandviç yapıdaki numunelerin yüzeyleri cam elyaf ve vinil reçineden, çekirdekleri ise PVC köpükten oluşmaktadır. Eğilme davranışlarını incelemek için üç tane güçlendirilmiş numune ve üç tane güçlendirilmemiş numune iki farklı yükleme altında üç nokta eğilme deneyine tabii tutulmuştur. İlk olarak eğilme ve kayma dayanımlarını belirlemek için 1kN, nihai taşıma kapasitesi ve hata modlarını belirlemek için ise yıkıcı kuvvet altında mekanik testler yapılmıştır. Sandviç yapının mekanizması Allen'in düz olmayan çekirdek ve kalın yüzey teorisi ile

incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre ağırlık sabit iken, güçlendirilen numunelerin kayma gerilmeleri %25 artmıştır ve toplam sapma %19 azalmıştır. Güçlendirme sonrasında hata modu girinti hatası yerine çekirdek kayması hatası olarak değişmiştir ve nihai yük 2.11 kN'den 2.74 kN'ye artmıştır.

Ryu ve diğ. (2020) ön gerilmeli sandviç levha sistemi kompozit kirişlerin eğilme davranışı üzerine çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada döşeme panelleri için çelik alt ve üst yüzey levhalarından ve yüksek yoğunluklu poliüretan çekirdekten oluşan sandviç levha sistemi kullanılmıştır. Ön gerilmeli sandviç plaka sisteminin eğilme davranışını araştırmak için tam ölçekli deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarında ön gerilmeli sandviç levha sistemi kompozit kiriş numuneleri akma sonrasında süneklilik oranı 12.6 olarak mükemmel sünek davranış sergilemiştir. Nihai yükleme aşamasındaki hata modu yerleştirilen çelik halatların kopması olarak belirlenmiştir ve çelik halatların güçlendirme etkisi ile nihai yük %14 artmıştır. Sandviç levha sistemi döşeme paneli ile çelik kiriş arasındaki yük aktarımı civatalı bağlantılar aracılığı ile sağlanmıştır ve numune kompozit kiriş gibi iyi performans göstermiştir. Ön gerilmeli sandviç plaka sistemi kompozit kirişlerin eğilme mukavemetini ve sertliğini tahmin etmek için bir teorik yöntem öne sürülmüştür. Eğilme davranışını tahmin etmek için ise bir sonlu eleman analizi önerilmiştir.

Li ve diğ. tarafından (2020) hiyerarşik bal peteği çekirdek ve alüminyum yüzey levhasından tasarlanan sandviç kiriş için, petek köşe hücrelerinin ölçek ve boyutunun eğilme davranışına etkisi incelenmiştir. Geleneksel altıgen görünümü veren köşe hücreleri kare ve dairesel yapı elde edilecek biçimde yeniden dizayn edilmiştir. Geleneksel petek ve hiyerarşik petekten oluşan kirişlerin eğilme davranışları sonlu eleman analizi ve üç nokta eğilme deneyi ile karşılaştırılmıştır. Hiyerarşik petek çekirdekli olarak tasarlanan kirişin eğilme mukavemetinin daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır.

Magnucki ve diğ. (2020) genişletilmiş konik sandviç kirişi üç nokta eğilme deneyi ile incelemiştir. Kirişin analitik modelini Zig-Zag teorisine göre geliştirip, SolidWorks aracılığıyla FEM analizi yapılmıştır. Mak. sapma değeri hesaplamalarında kirişin kesme etkisini de dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhang ve diğ. (2020) simetrik/asimetrik KTP yüzey levhası ve alüminyum köpükten oluşan hibrid sandviç kirişin deformasyon ve hata modlarını yarı statik yükleme ve düşük hızlı darbe yükleme deneyi ile incelemiştir. Yüzey levha kırılması, girinti,

simetrik numunede çekirdek kayması, asimetrik numunede çekirdek kayma gerilmesi hata modu elde etmiştir. Üst levhası kalın olan asimetrik kirişte darbe yükü çökmesinin yarı statik çökme yükünden daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Taghipoor ve diğ. tarafından (2020) poliüretan köpük ile doldurulmuş genişletilmiş metal kafes çekirdekli sandviç kirişin çökme ve enerji sönümlenme davranışı üç nokta eğilme deneyi ile incelenmiştir. Kafes çekirdeğin geometrik parametrelerinin ve poliüretan köpük ile doldurulmasının enerji sönümlenme davranışına etkileri araştırılmıştır. Düşey yönlendiren kafes çekirdekli numunenin enerji sönümlenme kapasitesi %74.6'ya kadar, poliüretan ile doldurulan metal kafes çekirdekli sandviç kirişin enerji sönümlenme kapasitesi ise %80'e kadar arttığı sonucuna varılmıştır.

Li ve diğ. (2020) piramit kafes çekirdekli çok katmanlı sandviç kirişlerin deformasyon ilişkisi ve titreşim davranışları üzerine hem deneysel hem de nümerik olarak bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çok katmanlı sandviç kirişler için yeni dinamik bir model geliştirilmiştir. Hamilton prensibi ve önerilen yeni mod metodunu kullanarak kiriş için hareket denklemi elde edilip doğal frekans hesaplanmıştır. Hesaplanan doğal frekansın sonlu elemanlar analizi ve deney sonuçları ile uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Zhao ve diğ. (2020) çok katmanlı kompozit ve lamine sandviç kirişlerde ölçülen yüzey levha gerilmeleri kullanılarak deformasyon alanlarının eş zamanlı yeniden yapılandırılması için şekil algıma teknolojisini tanıtmıştır. Rafine Zig-Zag teorisini ve ters sonlu elemanlar metodunu birlikte kullanılmıştır. Geleneksel ters sonlu elemanlar metoduna karşı kiriş derinliği boyunca aksel yer değiştirmelerin yeniden yapılandırılması doğruluğunu geliştirmek amacıyla ilave kinematik değer tanımlanmıştır.

Zhang ve diğ. (2020) tam kenetlenen ve basitçe desteklenen 1.2 mm, 1.8 mm ve 2.4 mm kalınlığında asimetrik geometrideki KTP yüzey levhaları ve 10 mm, 20 mm ve 30 mm kalınlığında alüminyum köpük çekirdekten oluşan hibrid sandviç kirişin çökme davranışını üç nokta eğilme deneyi ile incelemiştir. Deney sonucunda yüzey kırılması ve çekirdek kayması olarak iki hata modu belirlenmiştir. Mesnet koşullarının ve ön yüzey levha kalınlığı/arka yüzey levha kalınlığı olarak belirlenen asimetrik faktörünün numune dayanımı ve eğilme davranışı üzerine olan etkilerini incelemiştir. Tam kenetlenen sandviç kiriş numunelerinde ön yüzey levha kalınlığı ile kırılma dayanımının, basitçe desteklenen numunelerde ise çekirdek kalınlığı ile kirişin yük taşıma kapasitesinin doğru orantılı olduğunu gözlemlenmiştir.

Zhang ve diğ. (2020) CTP yüzey levhası, balsa çekirdeği ve CTP nervürlerinden tasarlanan kompozit sandviç kirişlerde kesme açıklığı/derinlik (a/d) oranının mekanik

davranışa etkisini üç nokta eğilme deneyi ile incelemiştir. CTP levhalarını, elyaf hacim oranı %60 olarak $[0/90^\circ]$ simetrik E cam dokuma elyaf ve doymamış polyester reçine ile vakum infüzyon yöntemini kullanarak üretmiştir. CTP yüzey levhalarının kalınlığını 3.6 mm, balsa çekirdeğinin kalınlığını 73 mm, CTP nervürlerinin kalınlıklarını ise 0-2.4 mm arasında değişkenlik gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Değişen a/d oranının ve CTP nervürünün sandviç kirişin hata modu, kırılma yükü ve sapmaları üzerindeki etkilerini kanıtlamak için 15 adet numune hazırlanmıştır. Yapılan deney sonuçlarında a/d oranının ve CTP nervürlerinin sandviç kiriş mekanik özelliklerinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Araştırmacılar CTP kalınlıklarının sandviç kirişin rijitliği ve mukavemetine olan etkisi için basitleştirilmiş analitik bir model geliştirip deney sonuçları ile geçerli kılınmıştır.

Cao ve Niu (2020) sandviç kiriş/panellerde burkulma için yeni analitik bir çözüm bulmuştur. Araştırmacılar önceki çalışmalarda göz ardı edilen tabakalar arası kesme etkilerinden kaynaklanan yüzey levhalarının enine kesme deformasyonu bu çalışmada ilk kez dikkate almıştır. Sandviç yapıda çekirdeği izotropik, levhaları ise ortotropik yapıda kabul etmiştir. Yapılan çözümü literatürdeki yaklaşımlarla karşılaştırdıktan sonra sonlu elaman analizi gerçekleştirip, geçerliliğini kontrol edilmiştir. Mevcut olan yaklaşımlarda enine kesme etkileri dikkate alındığı zaman sonuçların daha güvenilir olduğu elde edilmiştir.

Gaur ve diğ. (2021) levha şeklinin ve yüzey levha kalınlığının, eğilme altındaki kompozit sandviç yapı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneylerde kullanılmak üzere yüzey levha malzemesi olarak karbon elyaf, çekirdek malzemesi olarak ise Nomex PN1 kullanılarak kompozit sandviç yapılar elde etmiştir. Çekirdek kalınlıkları sabit, yüzey levha kalınlıkları ise değişken olarak kabul edilmiştir. Kompozit üretiminden sonra ASTM standartlarına göre numuneler hazırlanmış ve ardından 3 nokta eğilme deneyine tabii tutulmuştur. Deney sonuçları incelendiği zaman yüzey levha kalınlığı arttıkça eğilme mukavemeti tüm numunelerde artmıştır ve bununla beraber numune genişliğinin artışı da eğilme mukavemetini artırmıştır. Diğer bir ifade ile genişlik/kalınlık oranının azalması ile eğilme mukavemetinde azalma meydana geldiğini göstermiştir.

Giordano ve diğ. (2021) karbon elyaf ile dokunmuş yüzey levhaları ve yumuşak bir yapıya sahip olan köpük çekirdekten oluşan kompozit sandviç yapıya üç nokta eğilme deneyi uygulamıştır. Numunenin deformasyondan önceki ve sonraki durumlarının görüntüleri kaydedilmiş ve Dijital Görüntü Korelasyon (DIC) programı ile sandviç yapıyı analiz etmiştir. Numuneler için tüm alan yer değiştirmeleri ve gerilmeleri

belirlenmiştir. Yapılan deneydeki kiriş sapmaları klasik model, birinci derece kesme modeli, esneklik, HSAPT, EHSAPT, FEM teorik modelleri ve bir sayısal çözüm ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda sadece birinci derece kesme modelinin tahminlerinin gerçek sonuca göre diğer modellerden daha güvenilir bir sonuç verildiği gösterilmiştir.

Kazemi (2021) yüzey levhası 1050 Al olan ve derecelendirilmiş PU köpük çekirdekten tasarlanan sandviç kompozit kirişin üç nokta eğilme altındaki davranışını incelemiştir. Çalışma kapsamında çekirdek malzemesinde üç farklı yoğunluktaki PU köpük kullanılmıştır. Çekirdek tasarımında katman sayısı ve katman dizilimi değişken olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlere göre eğilme altındaki sandviç kirişin enerji sönümlenme parametrelerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

Wang ve diğ. tarafından (2022) fiziksel olarak asimetric olan metal sandviç yüzey levhası ve Al köpükten oluşan sandviç kompozit kirişinin üç nokta eğilme altındaki başarısızlık davranışları ve optimal tasarım üzerine deneysel ve analitik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sandviç yüzey levhası olarak Q235 çelik ve 1060 Al alaşımı kullanılmıştır. Çeşitli kombinasyonlar doğrultusunda üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda çekirdek kayması, yüzey akması ve girinti hata modları tespit edilmiştir. Bu hata modlarına göre hata mekanizma haritası oluşturulmuştur. Sandviç kirişin taşıyabileceği yük kapasitesinin artırmak amacıyla hata mekanizma haritası ve analitik hesaplara göre optimal tasarım belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında CTP kompozit ve KTP kompozit yüzey levhaları ve PVC esaslı köpük çekirdek tabakadan oluşan, eğilme altındaki kompozit sandviç kirişlerde elyaf türünün ve elyaf dizilim konfigürasyonunun mekanik niteliklere etkisi deneysel incelemeler sonucunda belirlenmiştir. Bu çalışmadaki kompozit yüzey levhalarının mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi numune kombinasyonları, sandviç kirişin üç nokta eğilme altındaki davranışını ve mekanik özelliklerini belirlemek için eğilme testi numune kombinasyonları belirlenmiştir. Belirlenen bu kombinasyonlar doğrultusunda 0° elyaf açısına sahip kompozit numuneler elle yatırma yöntemi ve vakum torbalama yöntemi kullanılarak üretilmiştir.

3.1. Materyal

Kompozit sandviç kiriş üretimi için gerekli olan malzeme ve araçlar Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Kullanılan ana malzemelerin ve yardımcı malzemelerin nitelikleri alt başlıklarda belirtilmiştir. Bu malzemelerin kullanım amaçları hakkındaki bilgiler 1.3.1.1. Elle yatırma yöntemi ve 1.3.1.2. Vakum torbalama yöntemi başlıklarında verilmektedir.

Deney kapsamında kullanılan ana malzeme ve yardımcı malzemeler:

Ana malzeme

- MGS LR 160 epoksi reçine ve LH 160 epoksi sertleştirici
- Cam elyaf kumaş 330 gr/m² UD
- Karbon elyaf kumaş 300gr/m² 12k UD
- Airex-C70.75 PVC köpük

Yardımcı malzeme

- Kalıp ayırıcı
- Deliksiz release film
- Soyma kumaşı
- İnfüzyon filesi
- İnfüzyon spiral hortum ve vakum hortum
- İnfüzyon L ve T bağlantı
- İnfüzyon hortum kelepçesi
- Vakum sızdırmazlık bandı

- Vakum naylonu

3.1.1. Epoksi reçine ve reçine sertleştirici

Matris malzeme olarak Şekil 3.1’de gösterilen MGS LR 160 epoksi reçine ve LH 160 epoksi sertleştirici tercih edilmiştir. 25°C’deki teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.



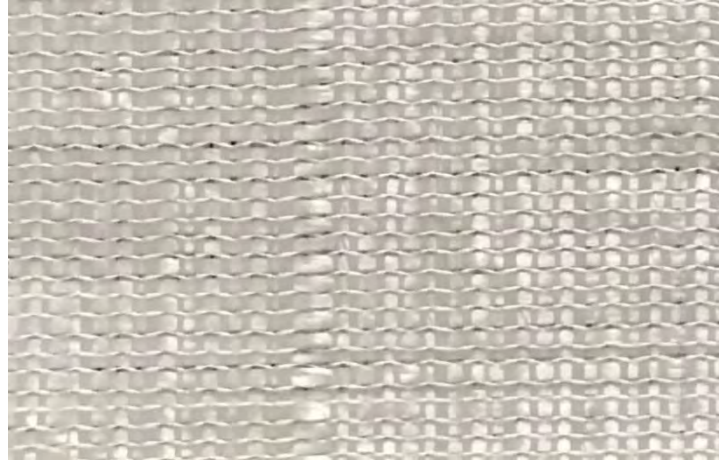
Şekil 3.1. Epoksi reçine ve reçine sertleştirici

Çizelge 3.1. Epoksi reçine ve reçine sertleştiricinin nitelikleri

Malzeme	LR 160	LH 160
Renk	Berrak	Berrak
Yoğunluk	1.13- 1.17 g/cm ³	0.96- 1.00 g/cm ³
Viskozite	700- 900 mPas	10- 50 mPas
Refraktör İndeksi	1.5480-1.5530	1.5200- 1.5210
Karışım Oranı (ağırlıkça)	100: 25	

3.1.2. Cam elyaf kumaş

Takviye malzemesi olarak Şekil 3.2’de gösterilen 0 ° tek eksenli olarak üretilen cam elyaf kumaş tercih edilmiştir. Cam elyaf kumaşın nitelikleri Çizelge 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2. Cam elyaf kumaş

Çizelge 3.2. Cam elyaf kumaşın nitelikleri

Dokuma tipi	UD- tek yönlü
Ağırlık	330 g/ m ²
Çekme dayanımı	3400 MPa
Elastisite Modülü	72 GPa
Yoğunluk	2.54 g/cm ³
Dikiş	76 dtex 10gr/m ²
Atkı elyaf	68 tex 283gr/m ²
Çözümlü elyaf	1200 tex 37gr/m ²

3.1.3. Karbon elyaf kumaş

Takviye malzemesi olarak Şekil 3.3’de gösterilen 0° tek eksenli olarak üretilen karbon elyaf kumaş tercih edilmiştir. Karbon elyaf kumaşın nitelikleri Çizelge 3.3’de verilmektedir.



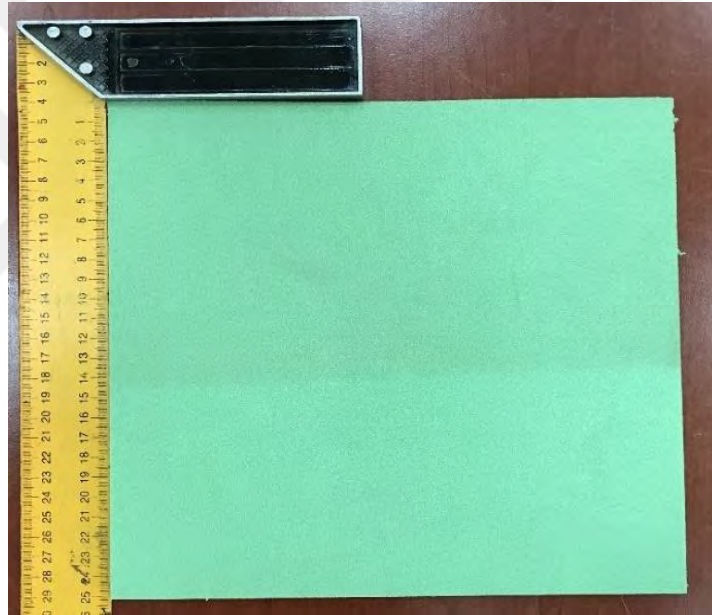
Şekil 3.3. Karbon elyaf kumaş

Çizelge 3.3. Karbon elyaf kumaşın nitelikleri

Dokuma tipi	UD-tek yönlü
Ağırlık	300 g/m ²
Çekme dayanımı	3950 MPa
Elastisite modülü	238 GPa
Yoğunluk	1,76 g/cm ³
Atkı elyaf	Cam elyaf + termoplastik 110 tex ip
Çözümlü elyaf	T700/karbon fiber HT 12K 800 tex ip

3.1.4. PVC köpük

Çekirdek malzemesi olarak Şekil 3.4'deki 5 mm kalınlıktaki Airex-C70.75 PVC köpük türü tercih edilmiştir. PVC köpüğün nitelikleri Çizelge 3.4'de verilmektedir.

**Şekil 3.4.** PVC köpük**Çizelge 3.4.** Airex -C70.75 PVC köpüğün nitelikleri

Nitelik	Standart	Birim	Değer (min.-mak.)
Yoğunluk	ISO 845	Kg/m ³	72-92
Düzlem dışı basınç mukavemeti	ASTM C365	N/mm ²	1.10-1.45
Düzlem dışı basınç modülü	ASTM C365	N/mm ²	67-84
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
Mak. kayma uzaması	ISO 1922	%	10-18
Isıl iletkenlik katsayısı (oda sıcaklığı altında)	ISO 8301	W/m.K	0.033

3.1.5. Kalıp ayırıcı

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan kalıp ayırıcı Wax-QV 5110 Şekil 3.5’de gösterilmektedir. Kalıp ayırıcı, üretilen kompozitin kalıp yüzeyine yapışmasını engellemektedir.



Şekil 3.5. Kalıp ayırıcı

3.1.6. Deliksiz Release film

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Şekil 3.6’daki deliksiz release film üretilen kompozitin, kütleme işleminden sonra kalıp yüzeyinden kolayca ayrılmasını sağlamaktadır. Release filmin nitelikleri Çizelge 3.5’de verilmektedir.



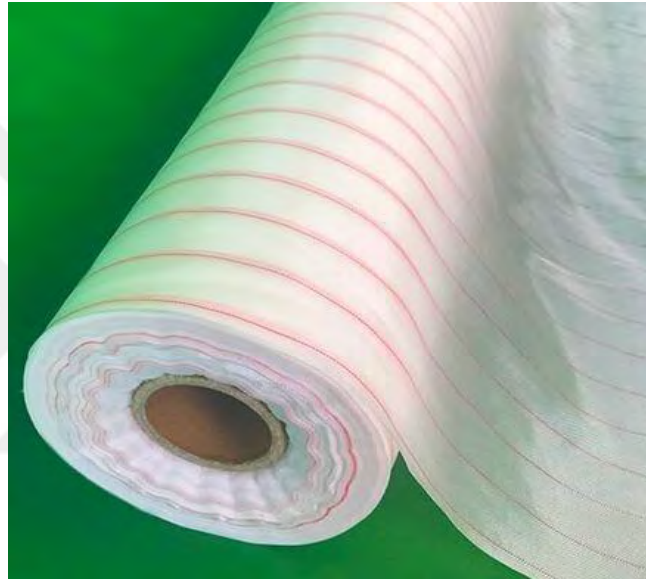
Şekil 3.6. Release film

Çizelge 3.5. Release filmin nitelikleri

Malzeme	Polipropilen
Renk	Sarı
Kalınlık	30 mikron
Mak. Sıcaklık	150 C°
Yapısı	NP deliksiz, pürüzsüz

3.1.7. Soyma kumaş

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Şekil 3.7'deki soyma kumaşın nitelikleri Çizelge 3.6'da verilmektedir.

**Şekil 3.7.** Soyma kumaş**Çizelge 3.6.** Soyma kumaşın nitelikleri

Malzeme	Naylon fiber
Dokuma tipi	Düz
Renk	Beyaz+ kırmızı
Kalınlık	0.15 mm
Ağırlık	83 g/m ²

3.1.8. İnfüzyon filesi

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Şekil 3.8'deki infüzyon filesi reçinenin tüm kalıp yüzeyine dağıtılmasını sağlamaktadır. İnfüzyon filesinin nitelikleri Çizelge 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.8. İnfüzyon filesi

Çizelge 3.7. İnfüzyon filesinin nitelikleri

Malzeme	HD Polietilen
Renk	Yeşil
Kalınlık	600 mikron
Mak. Sıcaklık	100 C°
Ağırlık	135 gr/m ²
Yapısı	Mesh

3.1.9. İnfüzyon spiral hortum ve vakum hortum

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Şekil 3.9'daki infüzyon spiral hortum ve vakum hortum sistemdeki hava ve reçine akışını sağlamaktadır. İnfüzyon spiral hortum ve vakum hortumun nitelikleri Çizelge 3.8'de verilmektedir.



Şekil 3.9. İnfüzyon spiral hortum ve vakum hortum

Çizelge 3.8. İnfüzyon spiral hortum ve vakum hortumun nitelikleri

Araç	Spiral Hortum	Vakum Hortum
Malzeme	Poliyeten	Poliyeten
Dış Çap	14 mm	12 mm
İç Çap	12 mm	10 mm
Kalınlık	1 mm	1 mm
Mak. Sıcaklık	80 C°	80 C°
Yapısı	Kesikli Spiral	Sürekli

3.1.10. İnfüzyon L/T bağlantısı

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Şekil 3.10'daki infüzyon L/T bağlantısı, reçine hattını oluştururken hortumların yönlendirilmesini sağlamaktadır. İnfüzyon L ve T bağlantısının nitelikleri Çizelge 3.9'da verilmektedir.



Şekil 3.10. İnfüzyon L/T bağlantısı

Çizelge 3.9. İnfüzyon L/T bağlantısının nitelikleri

Malzeme	Polioksümetilen
Dış Çap	10 mm
Uyumlu olduğu vakum hortum	10/12 mm
Uyumlu olduğu spiral hortum	14/12mm

3.1.11. İnfüzyon hortum kelepçesi

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Şekil 3.11'deki infüzyon hortum kelepçesi vakum torbalama yönteminde infüzyon hortumunu sıkıştırıp, genişletilerek sistemdeki hava veya reçine akışının kontrol edilmesini sağlayan ekipmandır. İnfüzyon hortum kelepçesinin nitelikleri Çizelge 3.10'da verilmektedir.



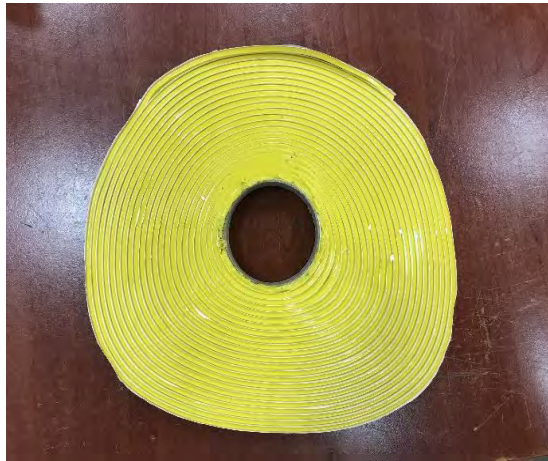
Şekil 3.11. İnfüzyon hortum kelepçesi

Çizelge 3.10. İnfüzyon hortum kelepçesinin nitelikleri

Gövde malzemesi	Metal
Sıkma aparat malzemesi	PE
Uyumlu olduğu hortum	12 mm

3.1.12. Vakum sızdırmazlık bandı

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Şekil 3.12'deki vakum sızdırmazlık bandı sisteme hava giriş çıkışını engellemektedir. Vakum sızdırmazlık bandının nitelikleri Çizelge 3.11'de verilmektedir.



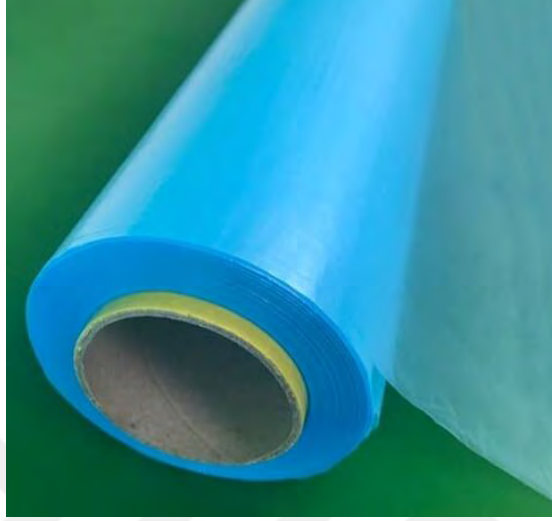
Şekil 3.12. Sızdırmazlık bandı

Çizelge 3.11. Sızdırmazlık bandının nitelikleri

En	12 mm
Kalınlık	3 mm
Renk	Sarı
Mak. Sıcaklık	130 C°

3.1.13. Vakum naylonu

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Şekil 3.13'de gösterilen vakum naylonunun nitelikleri Çizelge 3.12'de verilmektedir.



Şekil 3.13. Vakum naylonu

Çizelge 3.12. Vakum naylonunun nitelikleri

Malzeme	Polietilen
Renk	Yeşil
Kalınlık	75 mikron
Mak. Sıcaklık	100 C°
Uzama	330 %30 ±15
Çekme Dayanımı	MD 33 N/mm ² +/-15% - D 25 N/mm ² +/-15%

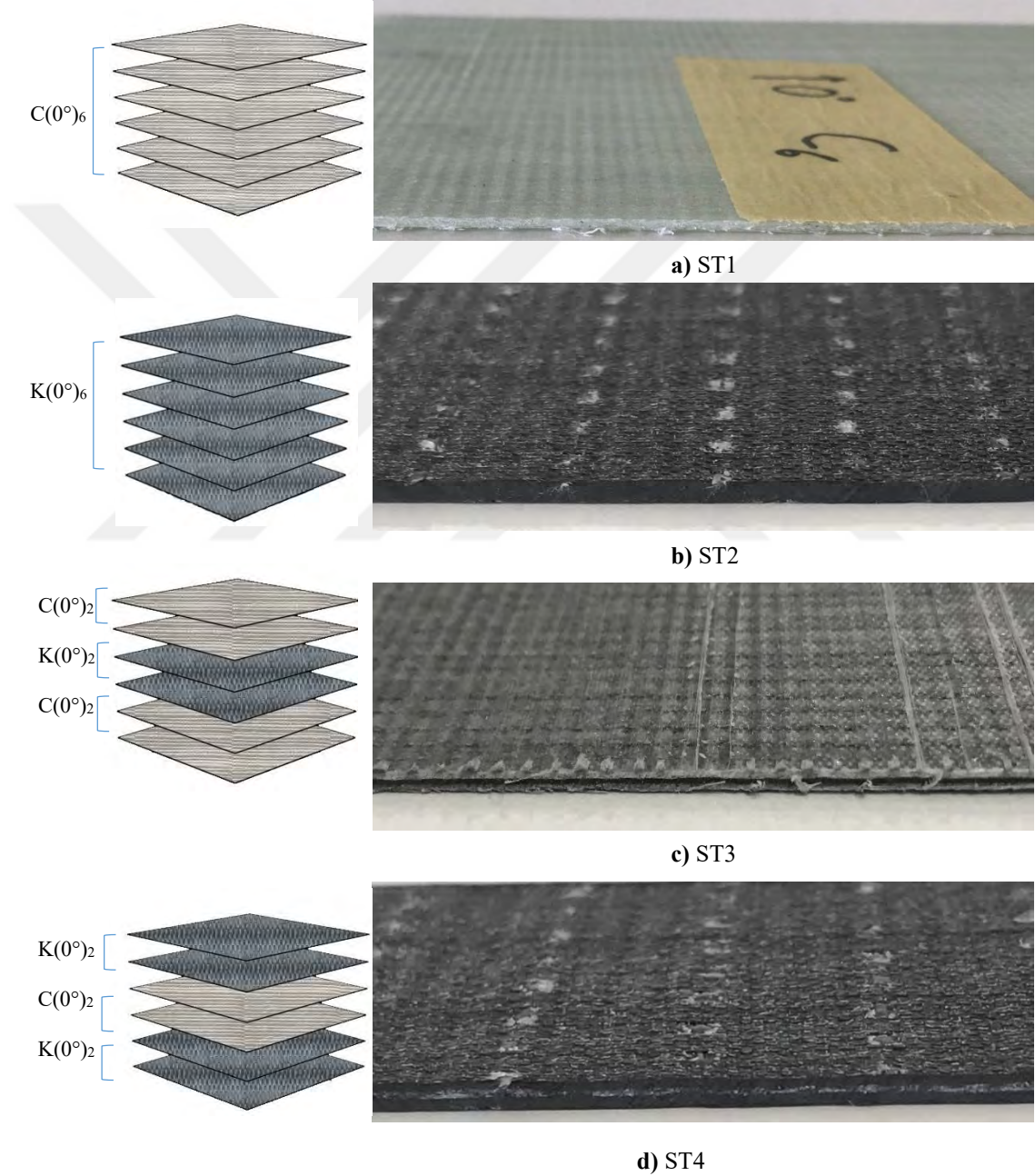
3.2. Metot

Bu başlık kapsamında kompozit numune üretiminden, CTP ve KTP yüzey levhalarının mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan çekme testinden ve eğilme altındaki sandviç kirişlerin mekanik özelliklerini ve davranışlarını incelemek için yapılan üç nokta eğilme testinden bahsedilmektedir.

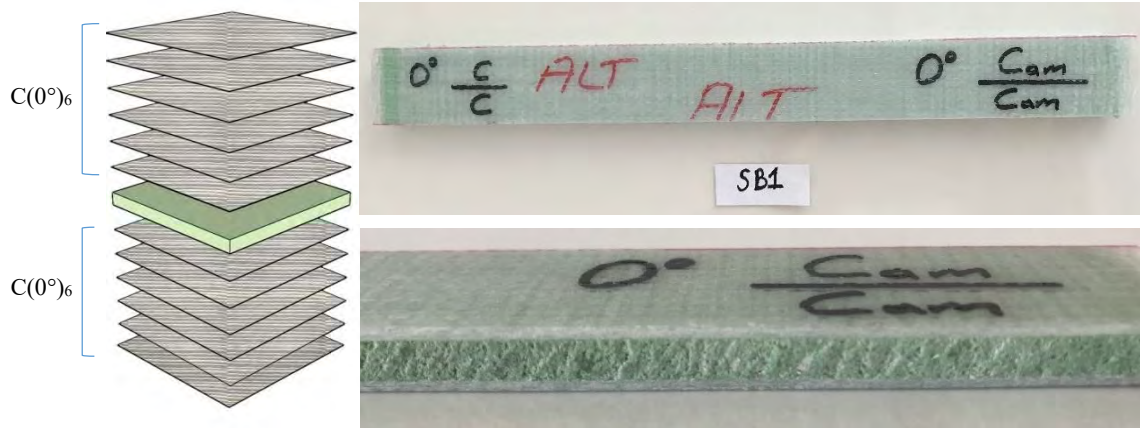
3.2.1. Numune üretimi

Yapılan bu çalışmada kompozit üretimi için elle yatırma yöntemi ve vakum torbalama yöntemi tercih edilmiştir. Tercih edilen üretim yöntemlerinden 1.3.1 bölüm başlığı altında detaylı olarak bahsedilmektedir. Kompozit üretiminde yüzey levhası için

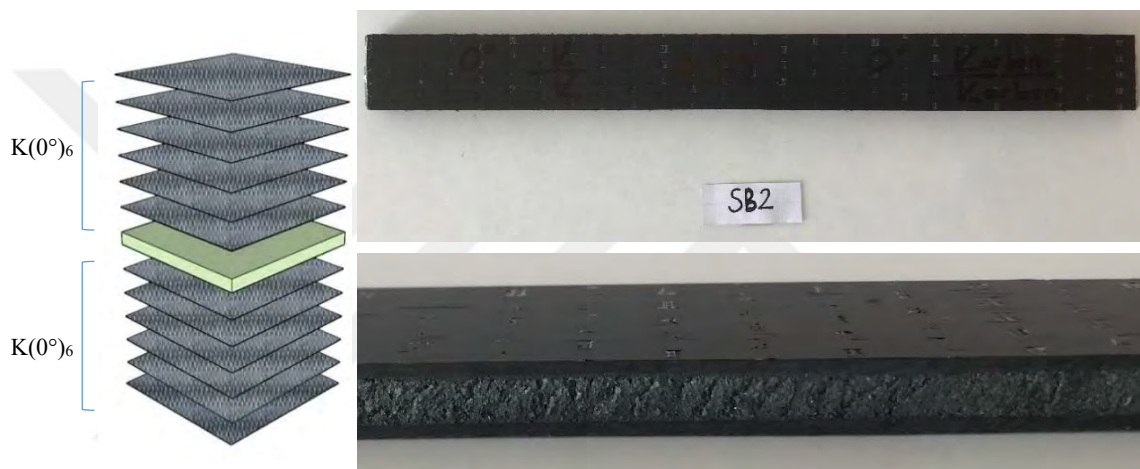
matris malzeme olarak MGS LR 160 epoksi reçine ve LH 160 epoksi sertleştirici, takviye malzemesi olarak cam elyaf kumaş ve karbon elyaf kumaş, köpük malzemesi için PVC Airex-C70.75 köpük kullanılmıştır. Bu malzemelerin nitelikleri bir önceki başlık altında detaylıca belirtilmiştir. Tasarlanan kombinasyonlar doğrultusunda çekme testi için Şekil 3.14’de gösterilen ve üç nokta eğilme testi için Şekil 3.15’de gösterilen kompozit malzeme üretimleri gerçekleştirilmiştir.



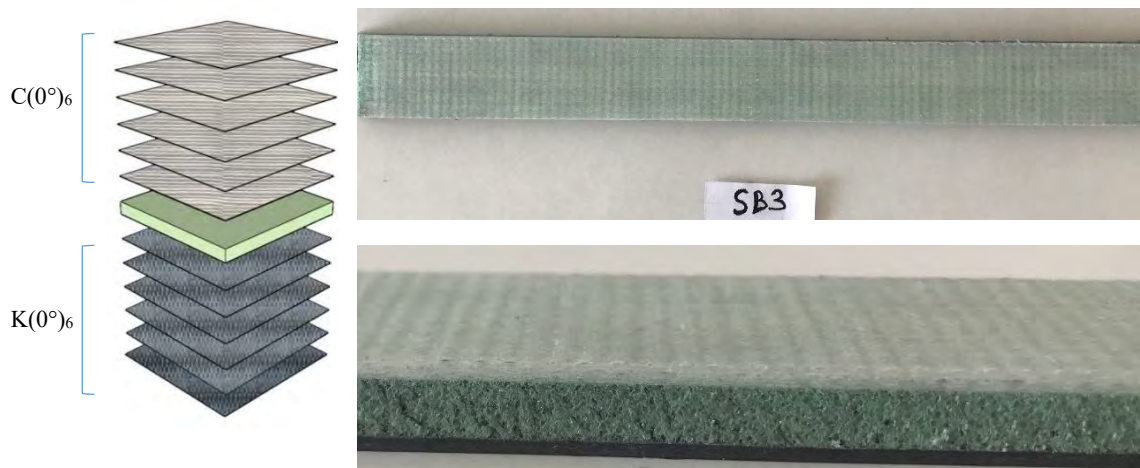
Şekil 3.14. Çekme numunelerinin tabaka sıralaması ve numune görseli



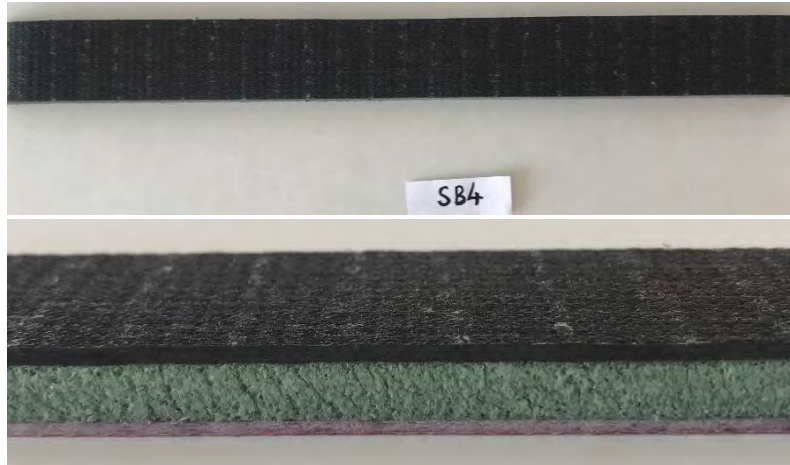
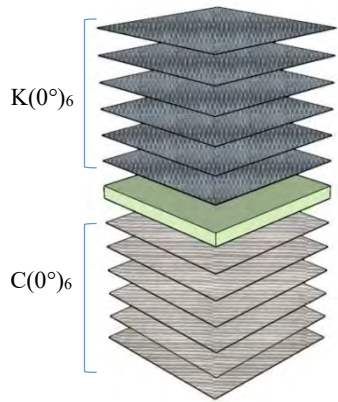
a) SB1



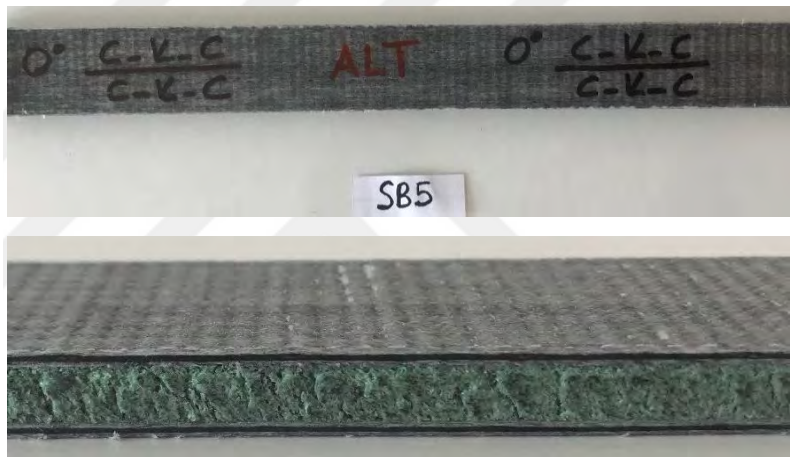
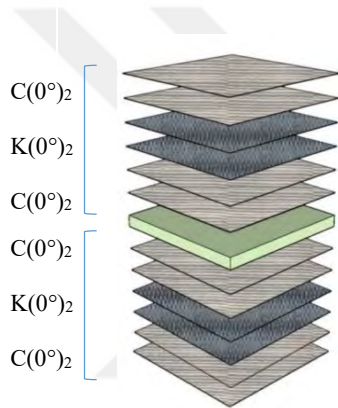
b) SB2



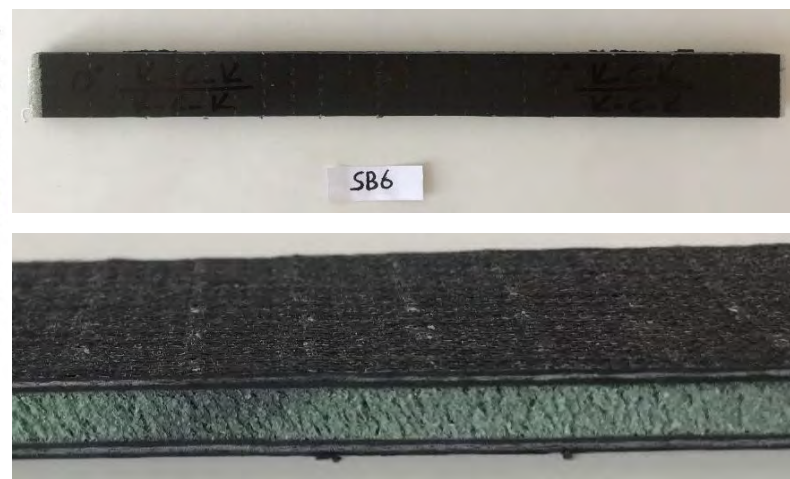
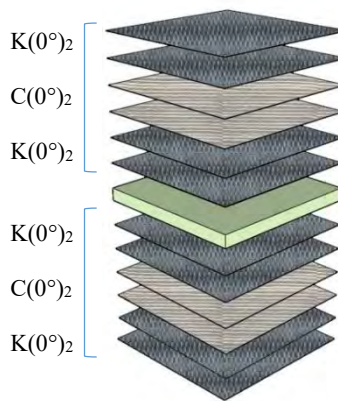
c) SB3



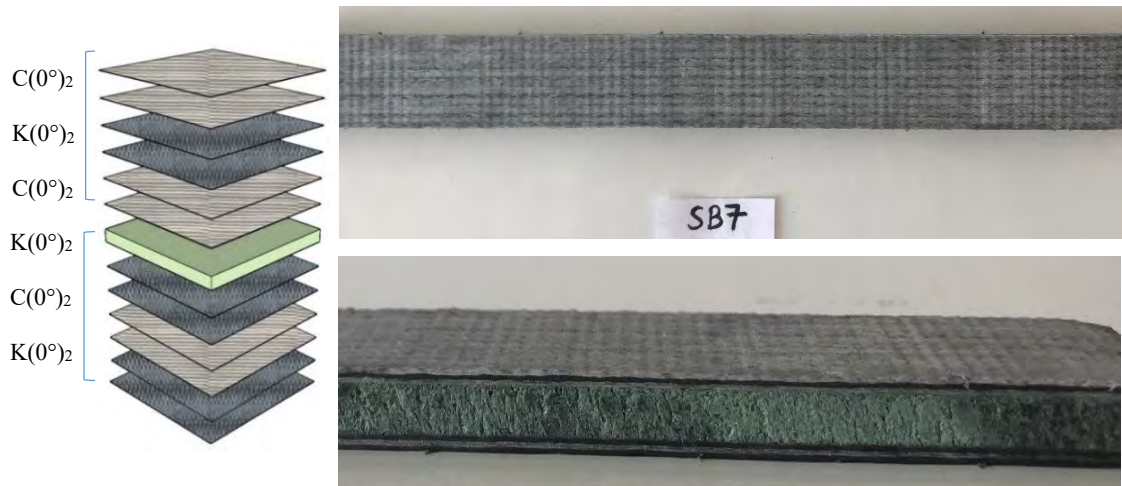
d) SB4



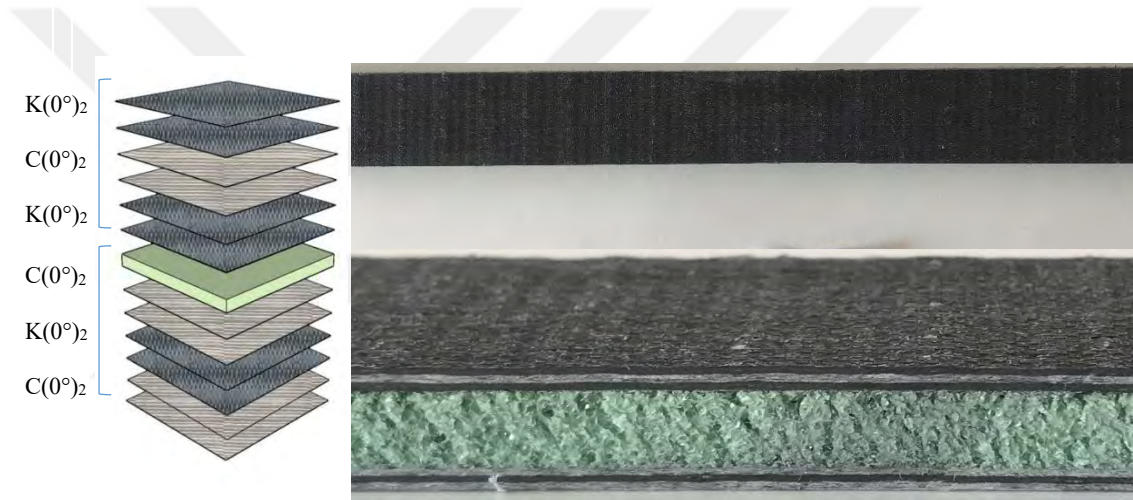
e) SB5



g) SB6



g) SB7



h) SB8

Şekil 3.15. Eğilme numunelerinin tabaka sıralaması ve numune görseli

Sandviç kompozit üretimi için ilk olarak kullanacağımız Şekil 3.16’da gösterilen vakum infüzyon tezgâhının yüzeyi detaylı bir şekilde temizlenip, üretim yapılacak alan kâğıt bant yardımıyla sınırlandırılıp, kalem aracılığı ile her bir numunenin alanı çizilmiştir.



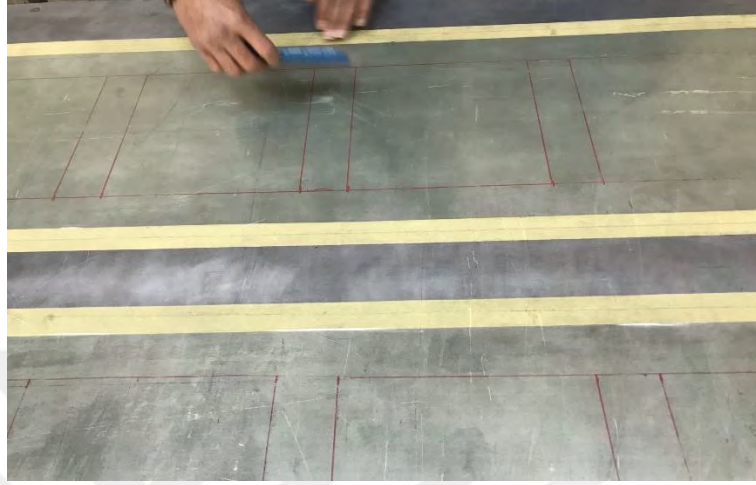
Şekil 3.16. Kompozit üretiminde kullanılan vakum infüzyon tezgâhı

Ardından temizlenen yüzeye Şekil 3.17’de görüldüğü üzere kalıp ayırıcı sürülmüştür.



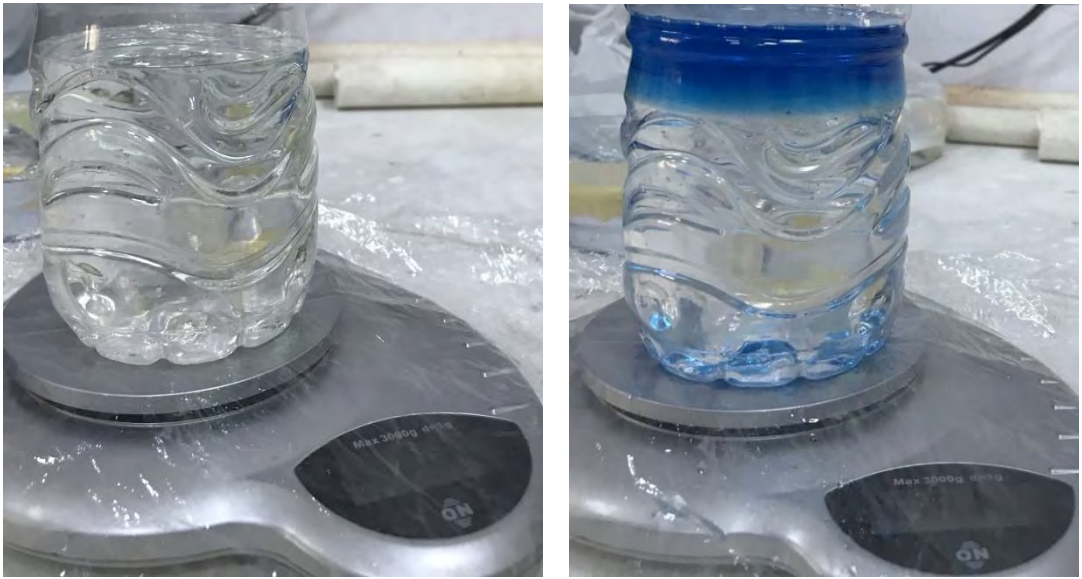
Şekil 3.17. Kalıp ayırıcının yüzeye uygulanması

Üretilen numunelerin ve reçinelerin üretim esnasında tezgâh yüzeyine yapışmaması ve yüzeyden kolayca ayırabilmek için sürülen kalıp ayırıcı vaksın üzerine deliksiz release filmi, hava kabarcığı kalmayacak biçimde Şekil 3.18’de görüldüğü üzere yüzeye yerleştirilmiştir.



Şekil 3.18. Release filmin yüzeye yerleştirilmesi

Daha sonra kombinasyon düzenine göre sıralanmış olan kumaşlar ve köpükler tezgah üzerinde belirlenmiş olan alanlara elle yatırma metodunu uygulamak üzere konulmuştur. Vakum torbalama ve elle yatırma işlemi için gerekli ortam hazırlandıktan sonra reçine hazırlama aşamasına geçilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda firmanın belirttiği epoksi reçine ve epoksi sertleştirici oranı 100:25 olacak biçimde Şekil 3.19’da görüldüğü üzere reçine hazırlanmıştır.



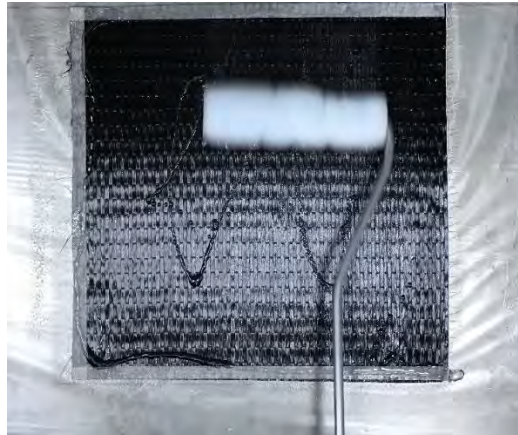
Şekil 3.19. Reçinenin hazırlanması

Hazırlanan reçine, karıştırıcı ile 5 dk boyunca hızı 160 d/dk olarak homojen biçimde Şekil 3.20’de gösterdiği gibi karıştırılmıştır.



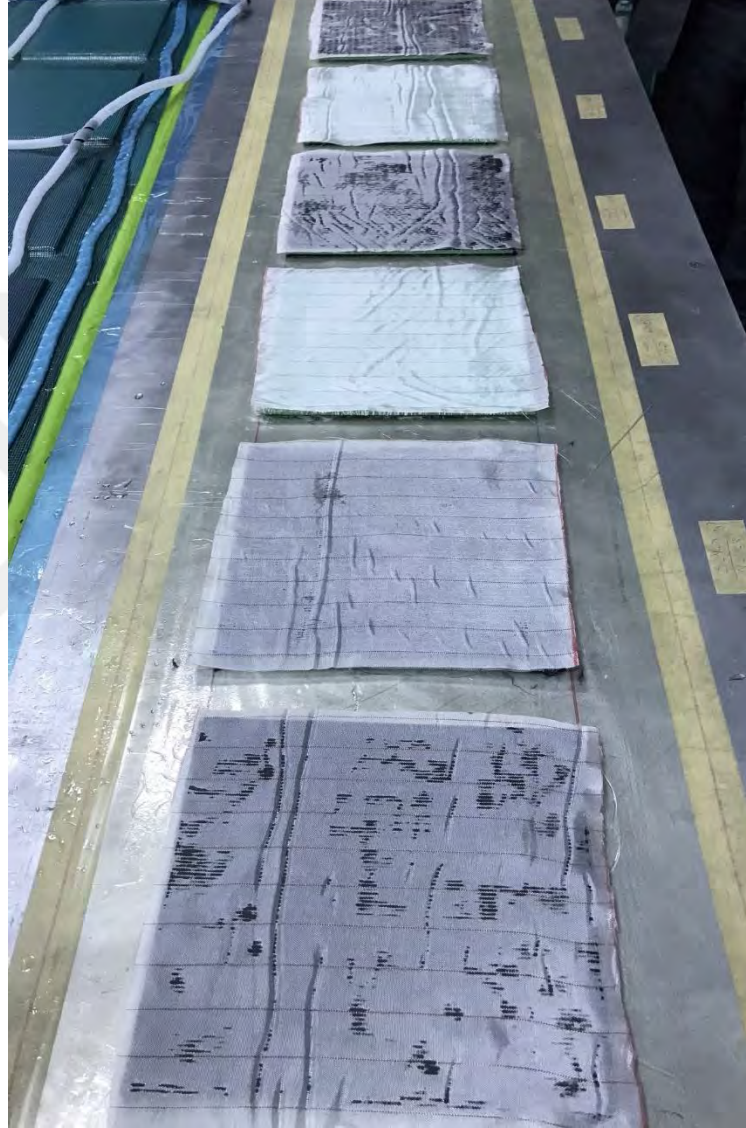
Şekil 3.20. Reçinenin karıştırılması

Elde edilen epoksi reçine, önceden sınırlandırılmış numune alanı üzerinde, elle yatırma yöntemi ile her bir numune grubunun tabaka sıralamasına göre cam ve/veya karbon kumaş ile Şekil 3.21’de görüldüğü gibi kumaşlara emdirilmiştir.



Şekil 3.21. Reçinenin elyaf kumaşa yedirilmesi

Epoksi reçinenin tek tek tabakalara yedirilmesinin ardından 250×250 mm boyutlarında 4 adet çekme numunesi ve 8 adet eğilme numunesi vakum torbalama işlemi için hazır hale getirilmiştir. Elde edilen numunelerin diğer malzemelerden kolayca ayrılabilmesi için Şekil 3.22’de görüldüğü gibi her bir numunenin en üst tabakası üzerine tek tek soyma kumaşı örtülmüştür.



Şekil 3.22. Soyma kumaşın yerleştirilmesi

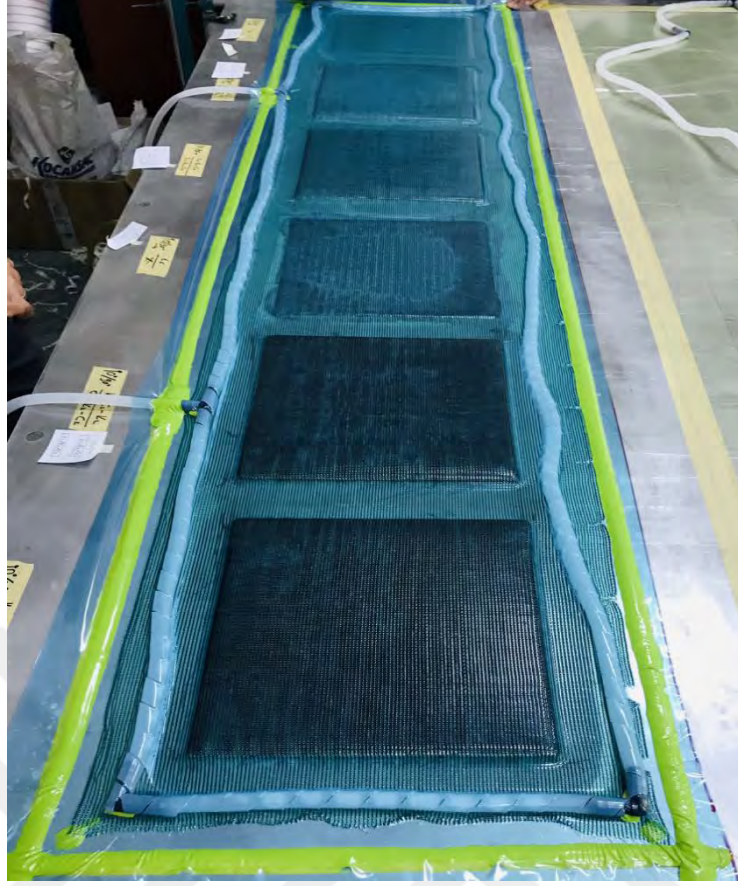
Daha sonra epoksi reçinenin vakum işlemi sırasında akışının kolaylıkla gerçekleşebilmesi için numuneler üzerine infüzyon filesi serilmiştir. Vakumlama sistemindeki hava ve reçine akışı sağlaması amacıyla infüzyon filesi üzerine spiral hortumlar belirli bir düzen çerçevesinde yerleştirilmiştir. Belirli aralıklarla spiral hortum

üzerinde L ve T bağlantıları ile reçine çıkışı ve vakum hortumun hatları Şekil 3.23'deki gibi konumlandırılmıştır.



Şekil 3.23. Vakum infüzyon filesi üzerine reçine ve hava akış hattının oluşturulması

Sınırlandırılmış çerçeve boyunca, vakum torbalama işlemi sırasında hava giriş çıkışını engellemek amacıyla sızdırmazlık bantları yapıştırılmıştır. Sızdırmazlık bantları yapıştırılırken küçük bir boşluğun dahi kalmamasına dikkat edilmiştir. Sızdırmazlık bantlarının üzerine vakum naylonu serilmiştir ve sistemde hava giriş çıkışının olmaması için bant üzerinden tekrar geçilmiştir. Tüm bu işlemlerin ardından sistem vakum torbalama işlemi için hazır hale getirilmiştir. Belirli bir süre vakum pompası çalıştırıp, Şekil 3.24'deki gibi sistemdeki havanın alınıp boşluğun giderilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.24. Vakum torbalama işleminin başlatılması

Hava alınma işleminin ardından vakum pompası kapatılıp sistemde herhangi bir hava kaçağı olup olmadığı kontrol edilmiştir. Hava kaçağının olmadığını teyit ettikten sonra tekrardan vakum pompası çalıştırılmıştır ve Şekil 3.25’de görüldüğü gibi reçine/hava akışı gerçekleştirilmiştir.



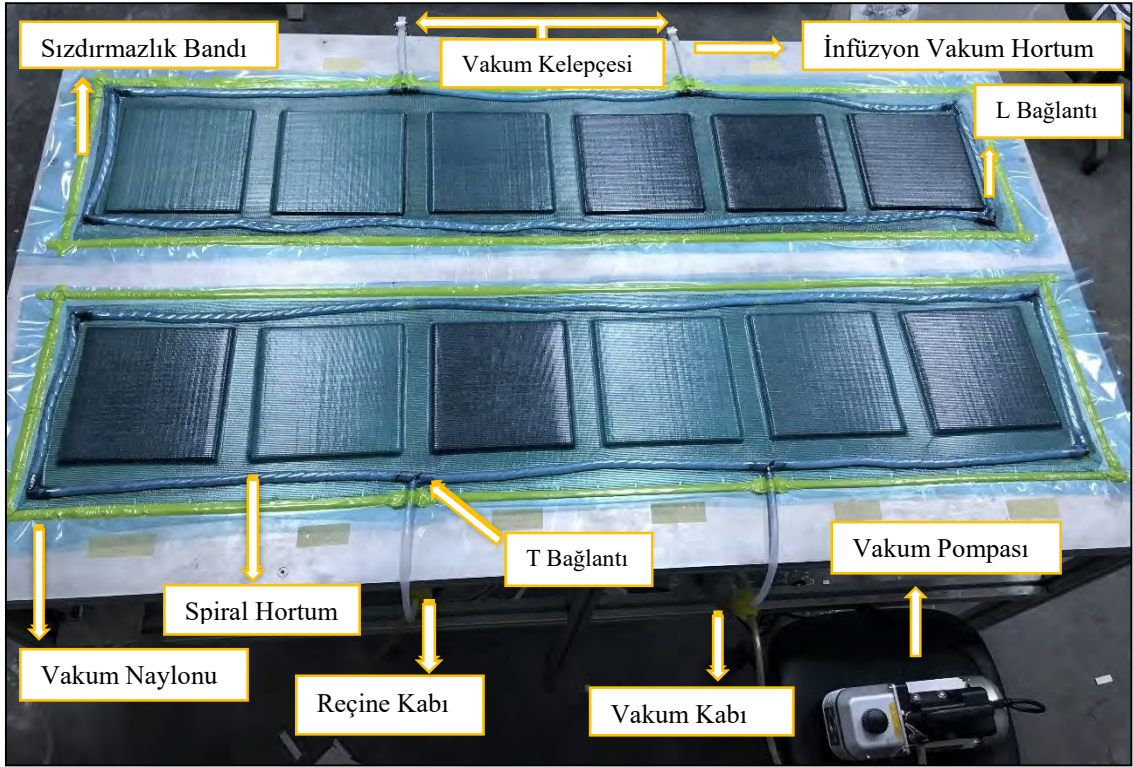
Şekil 3.25. Reçine ve hava akışı

Bu süre boyunca Şekil 3.26’da görüldüğü üzere tezgâh 80°C’ye kadar ısıtılmış ve sistemdeki reçine akışı 30 dakika boyunca devam etmiştir.



Şekil 3.26. Tezgah ısıtma işleminin gerçekleştirilmesi

Tamamlanan süreden sonra reçine ve vakum hortumlarından giriş çıkışlar kelepçe yardımıyla kapatılmıştır. Numuneler 8 saat 80°C sıcaklığında kürlenme işlemine bırakılmıştır. Kompozit malzeme üretiminin gerçekleştirildiği vakum torbalama işleminin genel düzeni Şekil 3.27’de gösterilmektedir.



Şekil 3.27. Vakum torbalama sistemi

Kompozit malzemenin kürlleme işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 3.28’de gösteriliği gibi 0° elyaf açısına sahip kompozit malzeme üretimi tamamlanmıştır.



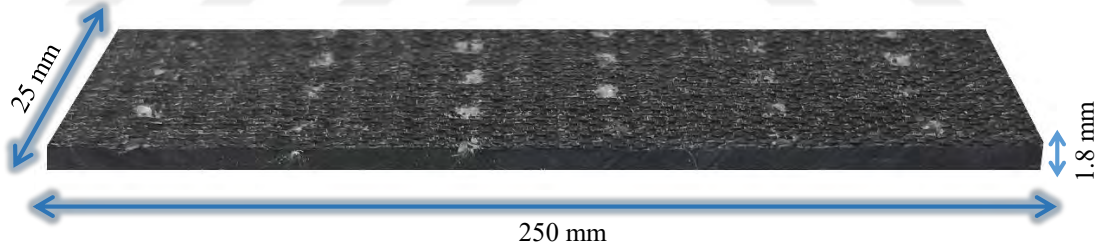
Şekil 3.28. Kompozit malzeme

Sandviç kompozit kirişin yüzey levhalarının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılacak olan çekme testi, eğilme altındaki sandviç kirişin mekanik özellikleri ve eğilme davranışını incelemek amacıyla yapılacak olan üç nokta eğilme testi için Şekil 3.29’daki gibi kesim makinesi kullanılmıştır.

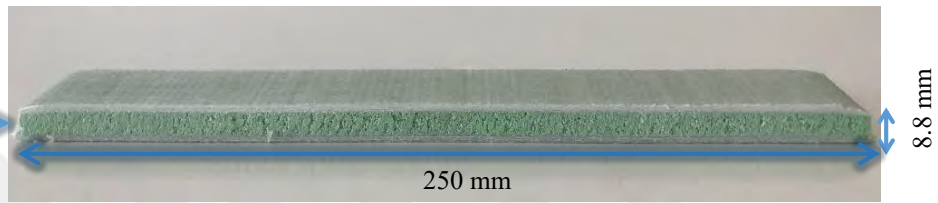
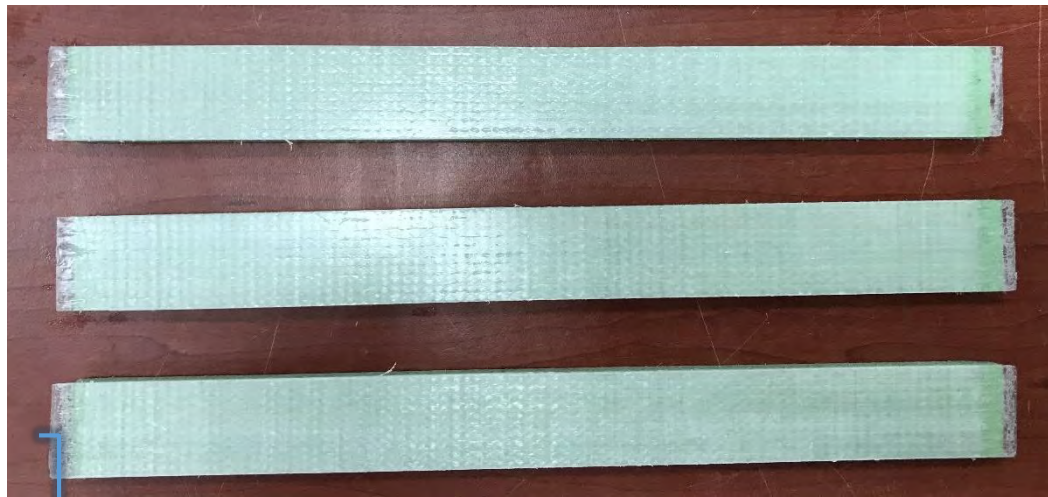


Şekil 3.29. Sulu kesim makinesi ve kompozit malzemenin kesim aşaması

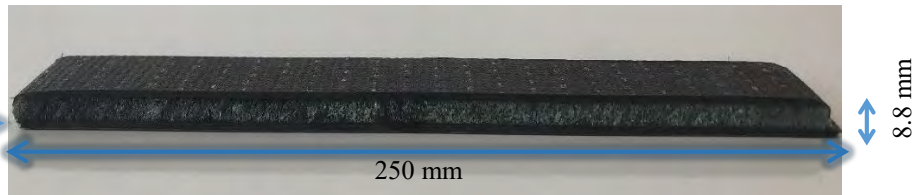
Her bir kombinasyon doğrultusunda Şekil 3.30’da görüldüğü üzere çekme numunesi $1.8 \times 25 \times 250$ mm ve Şekil 3.31’de görüldüğü üzere eğilme numunesi $8.8 \times 25.5 \times 250$ mm boyutlarında olacak şekilde üçer adet numune kesilmiştir. Elde edilen numunelerin kenarları zımpara ile düzeltilmiştir.



Şekil 3.30. Kompozit çekme numunesi



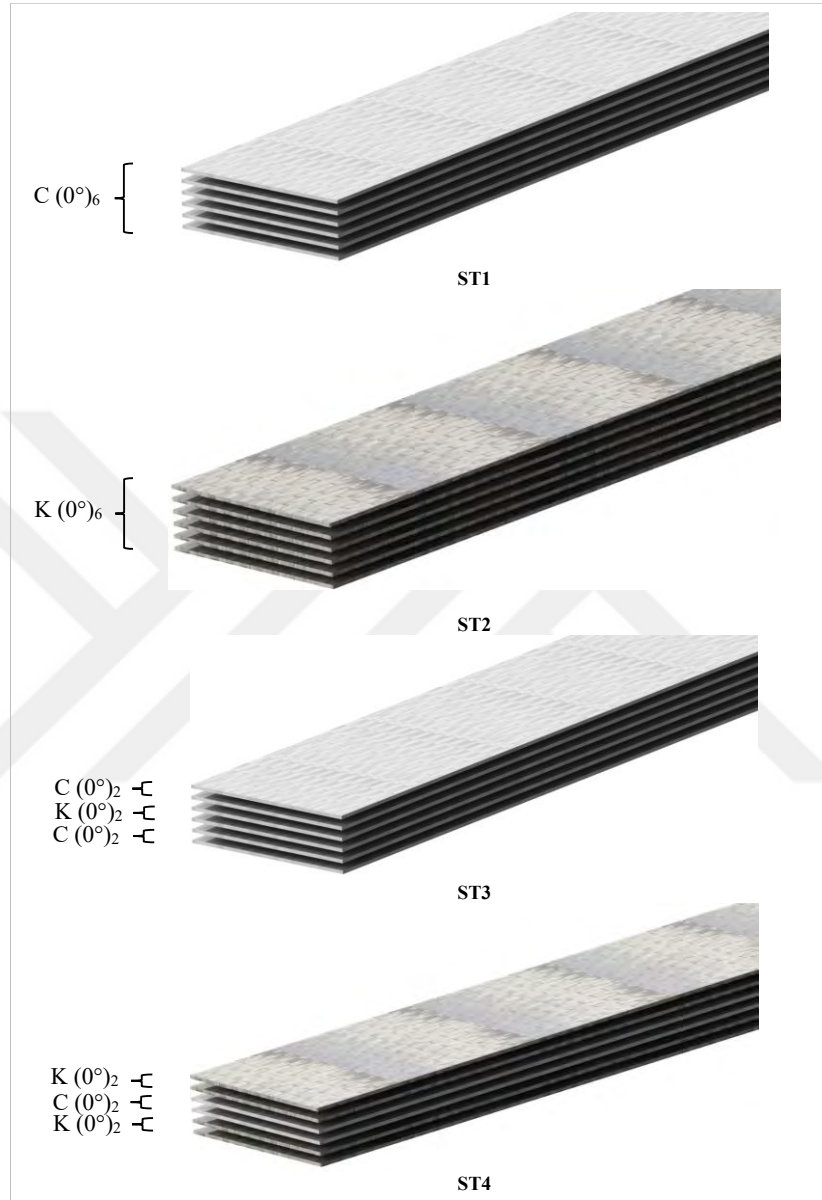
a) CTP



b) KTP

Şekil 3.31. Sandviç kiriş eğilme numuneleri a) SB1-CTP b) SB2-KTP

Toplamda 12 adet çekme numunesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.32’de yüzey levhalarının şematik gösterimine yer verilmiştir. Üretilen numunelerin kodları Çizelge 3.13’de gösterilmektedir.



Şekil 3.32. Yüzey levhaların şematik gösterimi

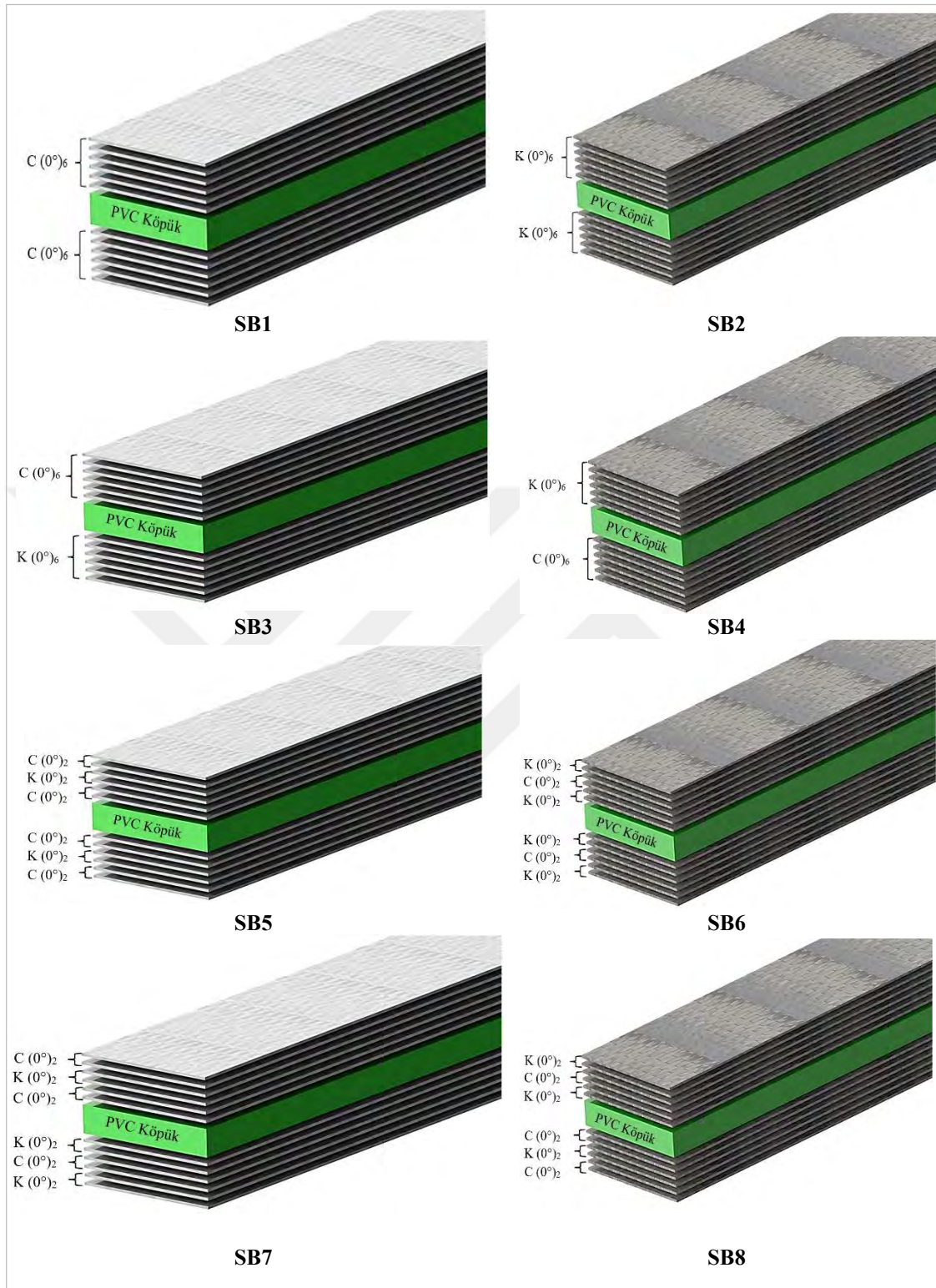
Çizelge 3.13. Yüzey levha kompozitin kodlanması

KOD	TABAKA	KOD	TABAKA
ST1_1		ST3_1	
ST1_2	Cam 6 (CTP)	ST3_2	Cam 2/Karbon2/Cam2 (CTP, KTP, CTP)
ST1_3		ST3_3	
ST2_1		ST4_1	
ST2_2	Karbon 6 (KTP)	ST4_2	Karbon2/Cam2/Karbon2 (KTP, CTP, KTP)
ST2_3		ST4_3	

Toplamda 24 adet eğilme numunesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.33’de sandviç kompozit kırırların şematik gösterimine yer verilmiştir. Üretilen numunelerin kodları Çizelge 3.14’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.14. Sandviç kompozitin kodlanması

KOD	ÜST TABAKA	ALT TABAKA
SB1_1		
SB1_2	Cam ₆ (CTP)	Cam ₆ (CTP)
SB1_3		
SB2_1		
SB2_2	Karbon ₆ (KTP)	Karbon ₆ (KTP)
SB2_3		
SB3_1		
SB3_2	Cam ₆ (CTP)	Karbon ₆ (KTP)
SB3_3		
SB4_1		
SB4_2	Karbon ₆ (KTP)	Cam ₆ (CTP)
SB4_3		
SB5_1		
SB5_2	Cam ₂ /Karbon ₂ /Cam ₂ (CTP, KTP, CTP)	Cam ₂ /Karbon ₂ /Cam ₂ (CTP, KTP, CTP)
SB5_3		
SB6_1		
SB6_2	Karbon ₂ /Cam ₂ /Karbon ₂ (KTP, CTP, KTP)	Karbon ₂ /Cam ₂ /Karbon ₂ (KTP, CTP, KTP)
SB6_3		
SB7_1		
SB7_2	Cam ₂ /Karbon ₂ /Cam ₂ (CTP, KTP, CTP)	Karbon ₂ /Cam ₂ /Karbon ₂ (KTP, CTP, KTP)
SB7_3		
SB8_1		
SB8_2	Karbon ₂ /Cam ₂ /Karbon ₂ (KTP, CTP, KTP)	Cam ₂ /Karbon ₂ /Cam ₂ (CTP, KTP, CTP)
SB8_3		

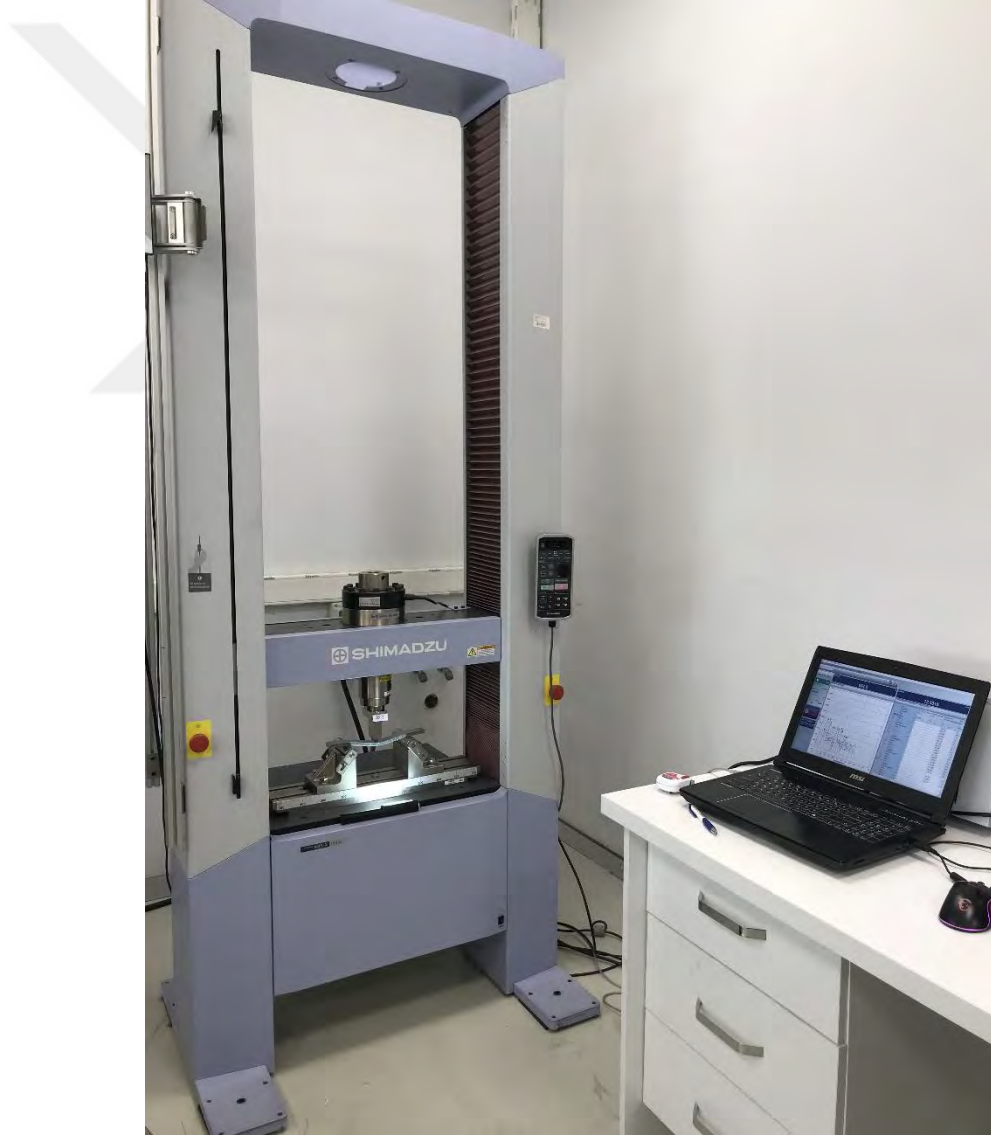


Şekil 3.33. Sandviç kompozit kirişlerin şematik gösterimi

3.2.2. Mekanik testler

Tabakalı CTP ve KTP kompozit sandviç kirişi oluşturan yüzey levhasının mekanik özelliklerini belirlemek ve çekme hasar davranışını incelemek için çekme testi, sandviç kirişlerin eğilme altındaki mekanik özelliklerini belirlemek ve eğilme davranışını incelemek için üç nokta eğilme testi gerçekleştirilmiştir.

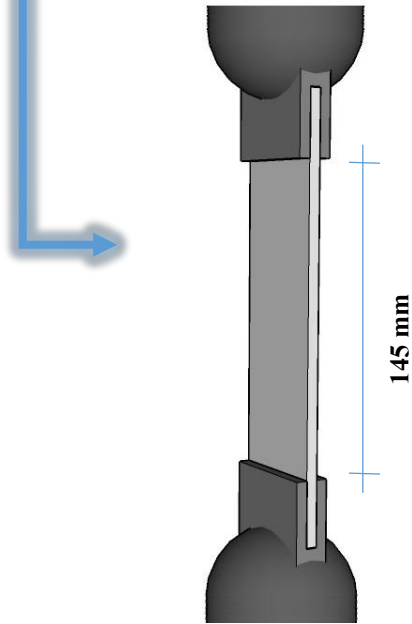
Çekme testi ve üç nokta eğilme testi Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan mekanik test laboratuvarında, 100 kN kapasiteli Şekil 3.34’de gösterilen SHIMADZU AGS-X test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.34. Shimadzu AGS-X test cihazı ve veri kaydedici cihaz

3.2.2.1. Çekme testi

Tabakalı CTP VE KTP kompozit yüzey levhanın çekme mekanik özelliklerini ve davranışını belirlemek amacıyla ASTM D3039 standardına uygun olarak yapılan çekme testinde, deney sabit yükleme hızı 2 mm/dk ve kompozit kirişlerin iç açıklık uzunluğu 145 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.35’de çekme testi düzeneği ve veri kayıt aracı gösterilmektedir.



Şekil 3.35. Çekme test düzeneği ve veri kayıt aracı

Çekme testinde, numunedeki uzama miktarını ölçmek amacıyla Şekil 3.36'da görüldüğü üzere ekstansometre kullanılmıştır.



Şekil 3.36. Çekme test düzeneği

Yapılan deneyin doğruluğunu kontrol etmek için hazırlanan $1.8 \times 25 \times 250$ mm boyutlarındaki ST1, ST2, ST3 ve ST4 numune gruplarının her birinden üç adet numuneye çekme testi uygulanmıştır.

3.2.2.2. Üç nokta eğilme testi

Tabakalı cam ve/veya karbon elyaf takviyeli kompozit yüzü sandviç kirişlerin eğilme altındaki mekanik özelliklerini ve davranışını belirlemek amacıyla ASTM D7250,

ASTM D7264 ve ASTM C393 standartlarına uygun olarak üç nokta eğilme testi yapılmıştır.

Üç nokta eğilme testindeki, deney presinin sabit yükleme hızı 5 mm/dk ve sandviç kompozit kirişlerin iç açıklık uzunluğu 160 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.37’de üç nokta eğilme test düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.37. Üç nokta eğilme test düzeneği

Yapılan deneyin doğruluğunu kontrol etmek için hazırlanan $8.8 \times 25.5 \times 250$ mm boyutlarındaki Şekil 3.38’de görüldüğü üzere SB1, SB2, SB3, SB4, SB5, SB6, SB7 ve SB8 numune gruplarının her birinden üç adet numuneye eğilme testi uygulanmıştır.



Şekil 3.38. Üç nokta eğilme numuneleri

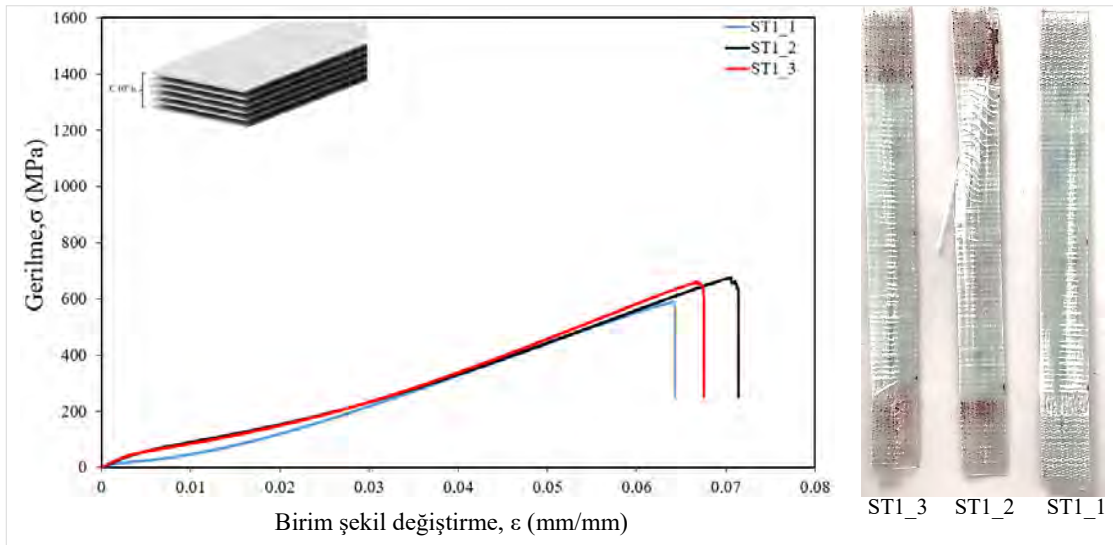
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Çekme Testi Sonucu

CTP ve KTP kompozit yüzey levhalarının çekme testi altındaki davranışları, testlerin gerçekleştirilme esnasında yapılan yorumlar ile birlikte test sonucundan elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiğine göre yorumlanıp. 4.1 bölüm başlığının alt başlıkları altında açıklanmıştır. Çekme testi sonucunda gerilme, birim şekil değiştirme, çekme elastisite modülü ve statik tokluk değerleri elde edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre kompozit malzeme üretiminde cam elyaf yerine karbon elyafın kullanılması çekme mukavemet değerini ve elastisite modülünü önemli ölçüde artırırken, karbon elyaf yerine cam elyafın kullanılması çekme mukavemetindeki değişiklik kadar olmamasına rağmen deformasyon miktarını artırdığı tespit edilmiştir ve bu sonuç literatürdeki sonuçlar ile desteklenmiştir (Nadir ve ark., 2016; Pareta ve ark., 2020).

4.1.1. ST1 numunesi çekme test sonucu

ST1 yüzey levha numunesi 6 CTP tabakadan oluşmaktadır. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği Şekil 4.1'de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre ST1_1, ST1_2 ve ST1_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. ST1 numunesi gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği

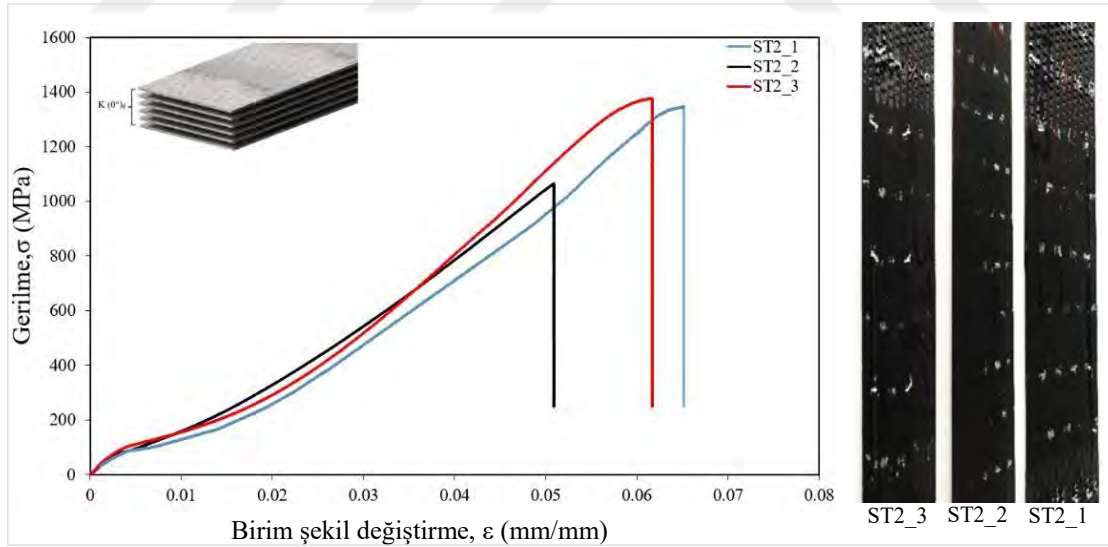
ST1 yüzey levhasının mekanik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmektedir. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiğinde verilen bilgiler doğrultusunda, ST1 numunesinin her üç grubunun ortalamasına göre mak. çekme gerilme değeri 460.45 MPa, yüzde çekme uzama değeri 6.71, statik tokluk değeri 19780 kJ/m³, Young Modülü 13.79 GPa olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. ST1 numunesinin mekanik özellikleri

Numune	σ_{mak} (MPa)	ϵ (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	Eç (GPa)
ST1_1	588.76	6.41	16685	13.88
ST1_2	673.94	7.05	22399	13.17
ST1_3	658.64	6.68	20258	14.32

4.1.2. ST2 numunesi çekme test sonucu

ST2 yüzey levha numunesi 6 KTP tabakadan oluşmaktadır. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği Şekil 4.2’de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre ST2_1, ST2_2 ve ST2_3 numunelerinin davranışlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. ST2 numunesi gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği

ST2 yüzey levhasının mekanik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmektedir. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiğinde verilen bilgiler doğrultusunda, ST2 numunesinin her üç grubunun ortalamasına göre mak.

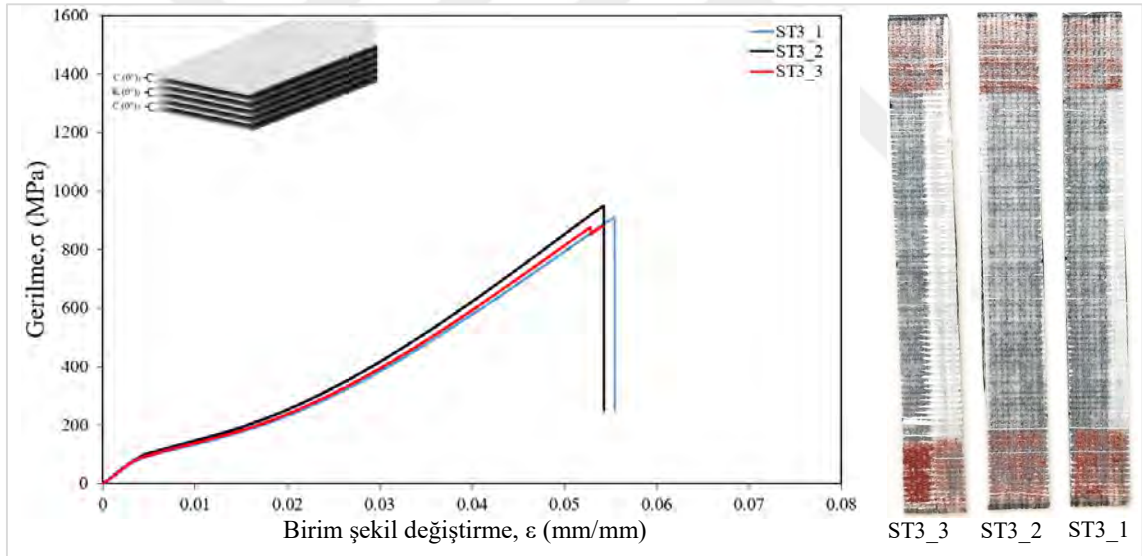
çekme gerilme değeri 1263.59 MPa, yüzde çekme uzama değeri 6.09, statik tokluk değeri 32883 kJ/m³, Young Modülü 26.22 GPa olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. ST2 numunesinin mekanik özellikleri

Numune	$\sigma_{\text{mak.}}$ (MPa)	ε (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	Eç (GPa)
ST2_1	1346.07	6.40	36288	24.16
ST2_2	1064.86	5.09	24317	26.20
ST2_3	1376.85	6.16	38046	28.31

4.1.3. ST3 numunesi çekme test sonucu

ST3 yüzey levha numunesi 2 CTP, 2 KTP, 2CTP tabakadan oluşmaktadır. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği Şekil 4.3'de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre ST3_1, ST3_2 ve ST3_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. ST3 numunesi gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği

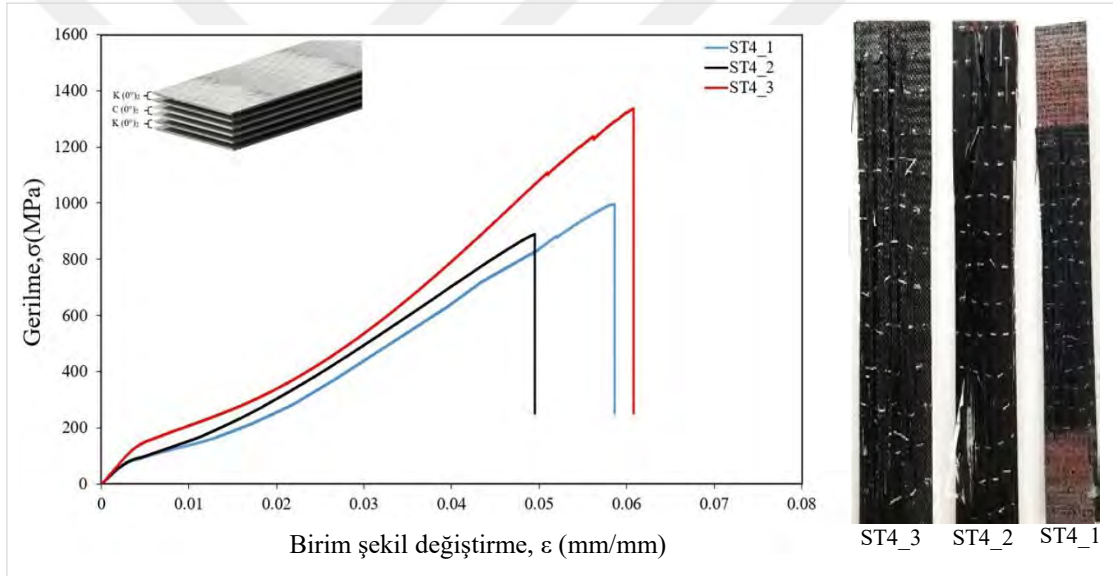
ST3 yüzey levhasının mekanik özellikleri Çizelge 4.3'de verilmektedir. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiğinde verilen bilgiler doğrultusunda, ST3 numunesinin her üç grubunun ortalamasına göre mak. çekme gerilme değeri 913.41 MPa, yüzde çekme uzama değeri 5.46, statik tokluk değeri 21947 kJ/m³, Young Modülü 20.19 GPa olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. ST3 numunesinin mekanik özellikleri

Numune	$\sigma_{\text{mak.}}$ (MPa)	ε (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	Eç (GPa)
ST3_1	910.64	5.54	21946	20.20
ST3_2	949.27	5.42	22546	20.19
ST3_3	880.316	5.42	21349	20.19

4.1.4. ST4 numunesi çekme test sonucu

ST4 yüzey levha numunesi 2 KTP, 2 CTP, 2 KTP tabakadan oluşmaktadır. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği Şekil 4.4’de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre ST4_1, ST4_2 ve ST4_3 numune davranışlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. ST4 numunesi gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği

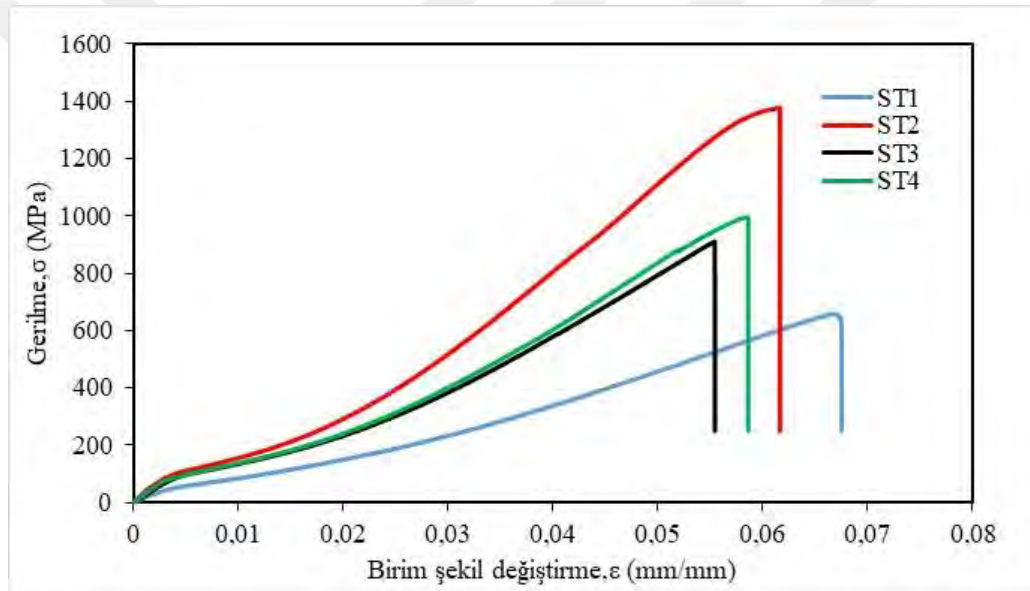
ST4 yüzey levhasının mekanik özellikleri Çizelge 4.4’de verilmektedir. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiğinde verilen bilgiler doğrultusunda, ST4 numunesinin her üç grubunun ortalamasına göre mak. çekme gerilme değeri 1073.29 MPa, yüzde çekme uzama değeri 5.63, statik tokluk değeri 28020 kJ/m³, Young Modülü 29.59 GPa olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. ST4 numunesinin mekanik özellikleri

Numune	$\sigma_{\text{mak.}}$ (MPa)	ε (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	Eç (GPa)
ST4_1	995.24	5.86	26022	26.26
ST4_2	887.69	4.95	20706	27.72
ST4_3	1336.95	6.08	37332	34.80

4.2. Çekme Testi Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sandviç kiriş tasarımında kullanılan alt ve üst yüzey levhaların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çekme testi sonucu elde edilen gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) grafiği doğrultusunda ST1, ST2, ST3 ve ST4 numunelerinin karşılaştırılması Şekil 4.5’de gösterilmektedir.



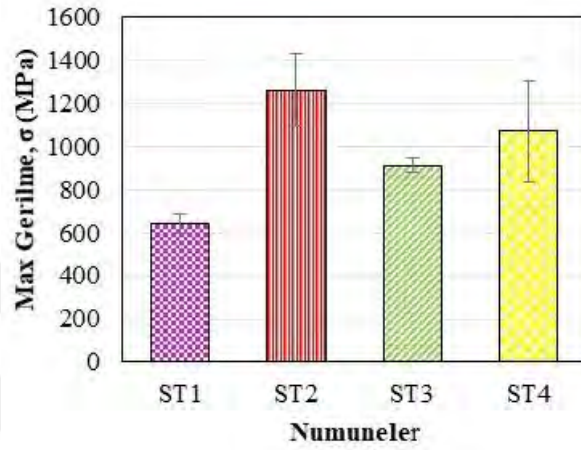
Şekil 4.5. Çekme numunelerinin gerilme (MPa)-birim şekil değiştirme (mm/mm) karşılaştırma grafiği

Çekme testi sonrasında sandviç kiriş yüzey levhalarının mak. gerilme değeri, yüzde çekme uzaması, statik tokluk değeri ve elastisite modülü değeri numunelerin ortalama değerlerini ve standart sapmalarını dikkate alarak Çizelge 4.5’de verilmektedir.

Çizelge 4.5. Çekme numunelerinin mekanik özellikleri

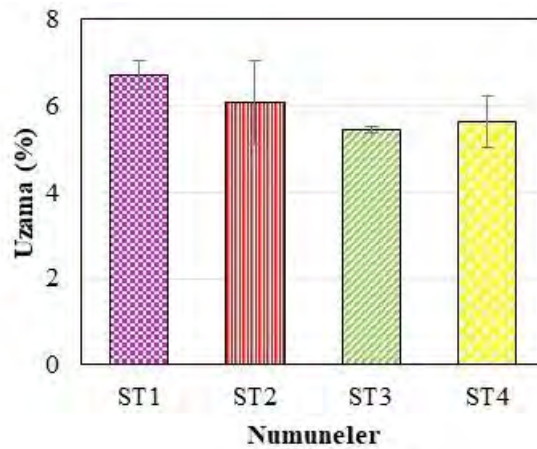
Numune	$\sigma_{\text{mak.}}$ (MPa)	ε (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	Eç (GPa)
ST1	640.47±45.41	6.71±0.32	19780±2886	13.79
ST2	1263.59±170.21	6.09±0.69	32883±7470	26.22
ST3	913.41±34.56	5.46±0.07	21947±598	20.19
ST4	1073.29±234.58	5.63±0.60	28020±8491	29.59

Çekme testi sonucuna göre dört çekme numune grubu arasında, sadece karbon elyaf tabakadan oluşan ST2 grubunun mak. gerilme değerinin en büyük olduğu tespit edilirken, sadece cam elyaf tabakadan oluşan ST1 grubunun mak. gerilme değerinin en küçük olduğu tespit edilmiştir. KTP, CTP, KTP istifleme sıralamasından oluşan hibrid ST4 numunesinin mak. gerilme değeri CTP, KTP, CTP istifleme sıralamasından oluşan hibrid ST3 numunesinin mak. gerilme değerine göre daha iyi olduğu Şekil 4.6'daki grafikte görülmektedir.



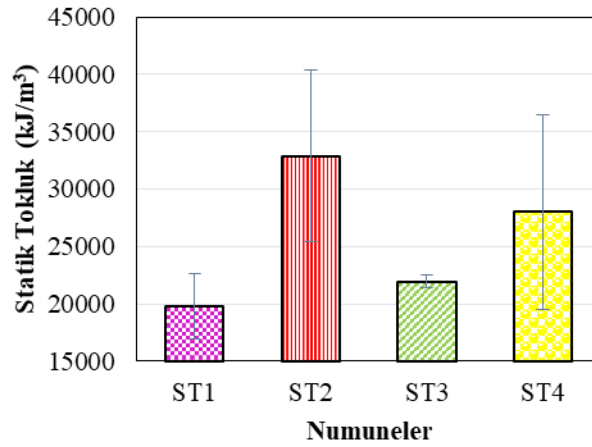
Şekil 4.6. Çekme numunelerinin mak. gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Çekme testi sonucuna göre Şekil 4.7'de görüldüğü üzere tüm numuneler arasında, cam elyaf tabakadan oluşan ST1 numunesinin yüzde çekme uzama değerinin mak. olduğu sonucu elde edilirken CTP, KTP, CTP istifleme sıralamasından oluşan ST3 numunesinin minimum olduğu sonucu elde edilmiştir.



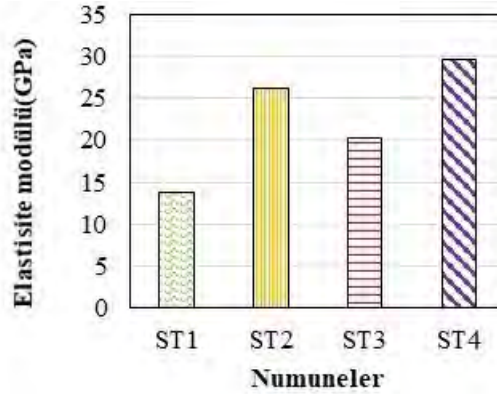
Şekil 4.7. Çekme numunelerinin uzama (%) değerlerinin karşılaştırılması

Çekme testi sonucu elde edilen verilere göre Şekil 4.8’de görüldüğü üzere sadece karbon elyaf tabakadan oluşan ST2 numunesinin statik tokluk değeri mak. olduğu görülürken, sadece cam elyaf tabakadan oluşan ST1 numunesinin statik tokluk değeri minimum olduğu görülmektedir. Yüzey levha tasarımında takviye malzemesi olarak kullanılan karbon elyaf tabaka sayısının artmasına bağlı olarak hibrid ST4 numunesinin statik tokluk değeri ST3 numunesinin statik tokluk değerine göre daha iyi olduğu bilgisine ulaşılmıştır.



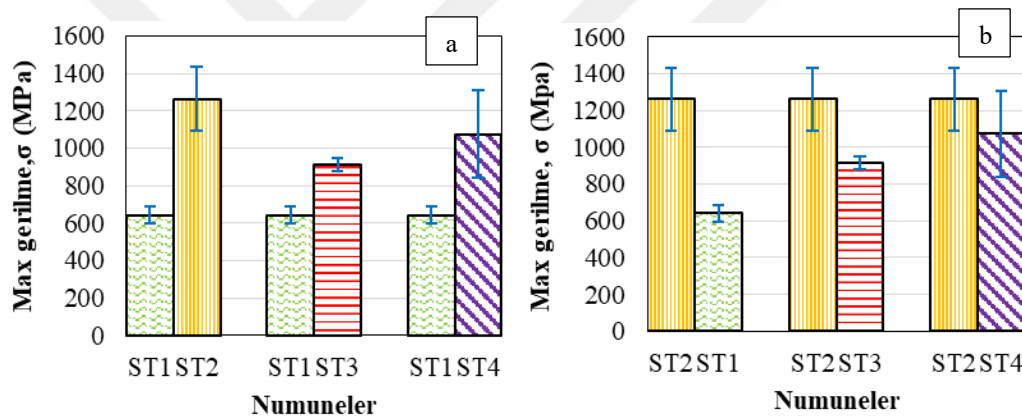
Şekil 4.8. Çekme numunelerinin statik tokluk değerlerinin karşılaştırılması

Çekme testi sonucuna göre elde edilen elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.9’da verilmektedir. Grafiğe göre üst yüzeyi KTP, CTP, KTP alt yüzeyi CTP, KTP, CTP elyaf istiflemesinden oluşan ST4 numunesinin mak. değere sahipken, tüm yüzeyleri sadece cam elyaftan oluşan ST1 numunesinin minimum değere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. Çekme numunelerinin elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması

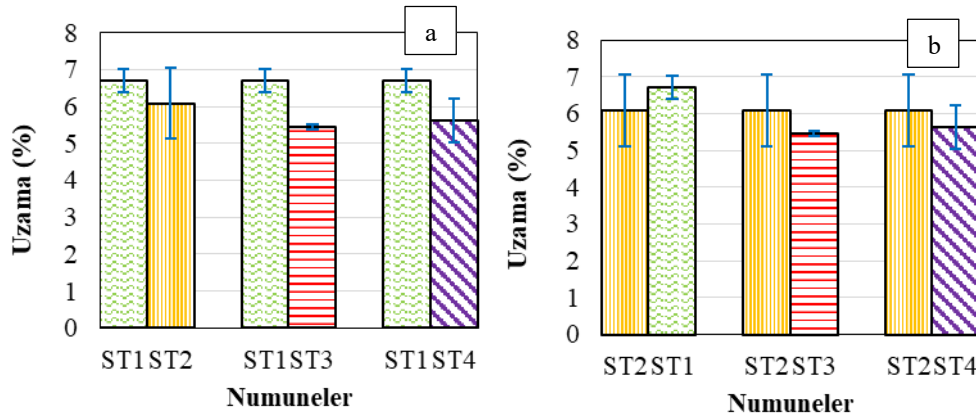
Çekme testi sonuçları incelendiğinde Şekil 4.10a'da görüldüğü üzere karbon elyaf tabaklardan oluşan ST2 numunesinin mak. gerilme değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %97.14 artmıştır. CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST3 numunesinin mak. gerilme değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %42.62 artmıştır. KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST4 numunesinin mak. gerilme değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %67.58 artmıştır. Şekil 4.10b'de verilen grafikte görüldüğü üzere cam elyaf tabakadan oluşan ST1 numunesinin mak. gerilme değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %49.28 azalmıştır. CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST3 numunesinin mak. gerilme değeri sadece karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %27.66 azalmıştır. KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST4 numunesinin mak. gerilme değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %14.99 azalmıştır.



Şekil 4.10. Çekme numunelerinin max gerilme değerlerinin a) ST1 ve b) ST2'ye göre karşılaştırılması

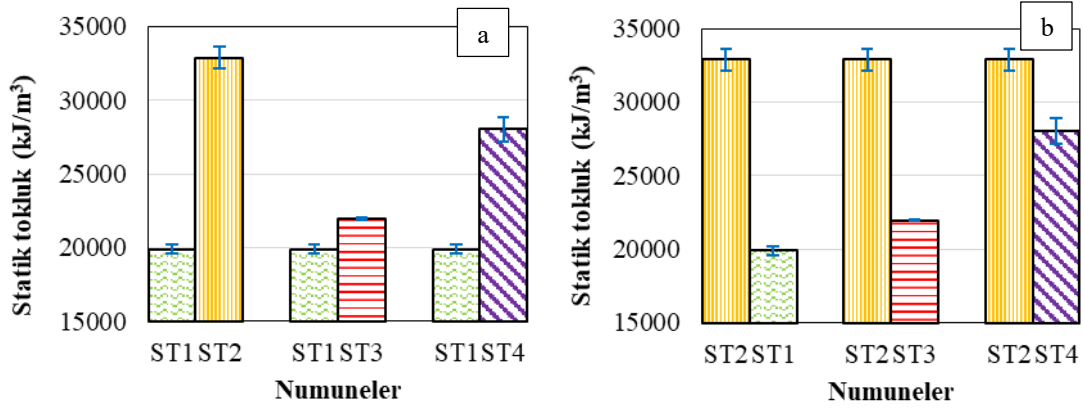
Şekil 4.11a'da verilen çekme testi sonuçları incelendiğinde karbon elyaf tabaklardan oluşan ST2 numunesinin yüzde uzama değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %9.24 azalmıştır. CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST3 numunesinin yüzde uzama değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %18.63 azalmıştır. KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST4 numunesinin yüzde uzama değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %16.09 azalmıştır. Şekil 4.11b'de verilen grafikte görüldüğü üzere cam elyaf tabakadan oluşan ST1 numunesinin yüzde uzama değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %10.18 artmıştır. CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST3 numunesinin yüzde uzama değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %10.34 azalmıştır. KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST4

numunesinin yüzde uzama değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %7.55 azalmıştır.



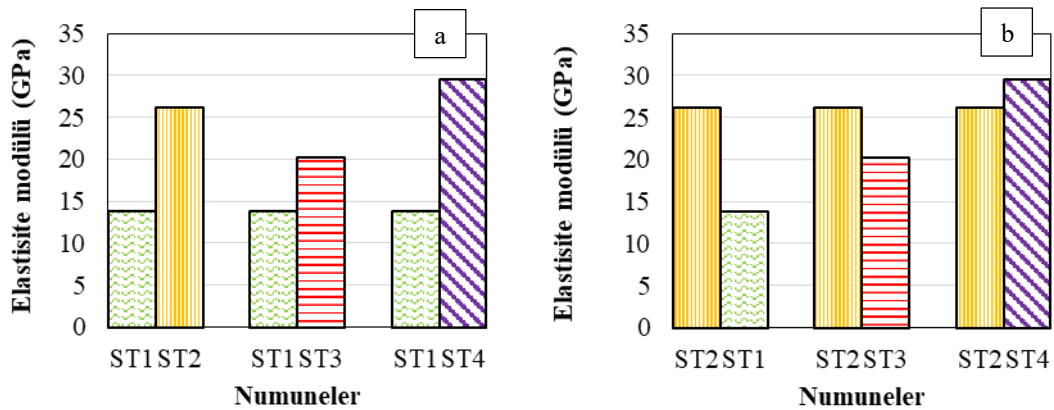
Şekil 4.11. Çekme numunelerinin yüzde uzama değerlerinin a) ST1 ve b) ST2'ye göre karşılaştırılması

Şekil 4.12a'da verilen çekme testi sonuçları incelendiği zaman Şekil 4.12a'da görüldüğü üzere karbon elyaf tabaklardan oluşan ST2 numunesinin statik tokluk değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %65.33 artmıştır. CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST3 numunesinin statik tokluk değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %10.36 artmıştır. KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST4 numunesinin statik tokluk değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %40.87 artmıştır. Şekil 4.12b'de verilen grafikte görüldüğü üzere cam elyaf tabakadan oluşan ST1 numunesinin statik tokluk değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %39.51 azalmıştır. CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST3 numunesinin statik tokluk değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %33.25 azalmıştır. KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST4 numunesinin statik tokluk değeri sadece karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %14.79 azalmıştır.



Şekil 4.12. Çekme numunelerinin statik tokluklarını a) ST1 ve b) ST2'ye göre karşılaştırılması

Çekme testi sonuçları incelendiğinde Şekil 4.13a'da gösterildiği üzere karbon elyaf tabaklardan oluşan ST2 numunesinin elastisite modülü değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %90.14 artmıştır. CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST3 numunesinin elastisite modülü değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %46.41 artmıştır. KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST4 numunesinin elastisite modülü değeri cam elyaf tabakalardan oluşan ST1 numunesine göre %114.58 artmıştır. Şekil 4.13b'de verilen grafikte gösterildiği üzere cam elyaf tabakadan oluşan ST1 numunesinin elastisite modülü değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %47.41 azalmıştır. CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasında üretilen hibrid ST3 numunesinin elastisite modülü değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %22.99 azalmıştır. KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sıralamasında üretilen hibrid ST4 numunesinin elastisite modülü değeri karbon elyaf takviye malzemesinden oluşan ST2 numunesine göre %12.85 artmıştır.



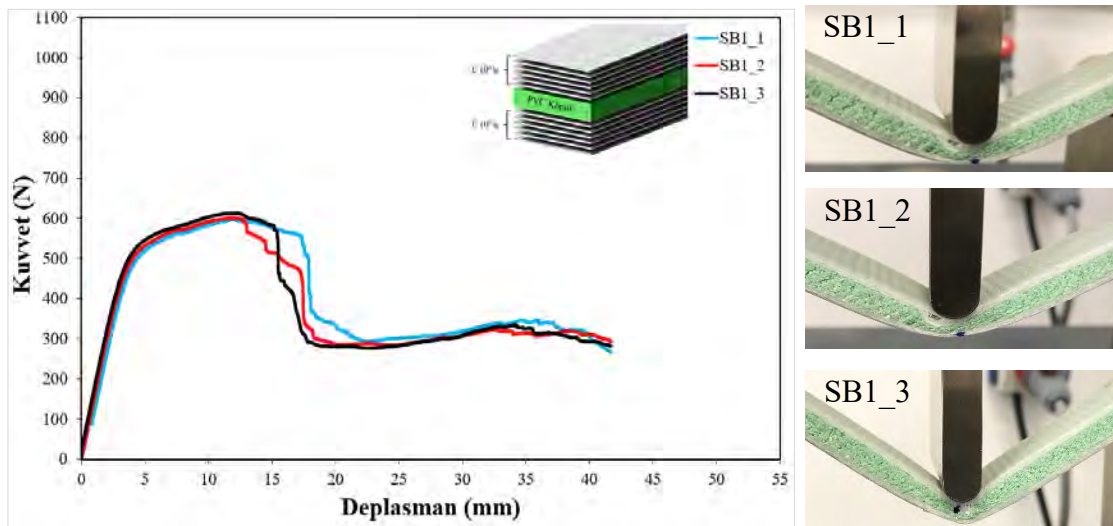
Şekil 4.13. Çekme numunelerinin elastisite modüllerinin a) ST1 ve b) ST2'ye göre karşılaştırılması

4.2. Üç Nokta Eğilme Testi Sonucu

CTP ve KTP sandviç kompozit kirişlerin üç nokta eğilme testi altındaki davranışları, testlerin gerçekleştirilme esnasında yapılan yorumlar ile birlikte test sonucundan elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğine göre yorumlanmış ve 4.2 bölüm başlığının alt başlıkları altında açıklanmıştır. Sandviç kirişin yüzey levhalarında takviye malzemesi olarak tek yönlü cam elyaf kumaşın yerine karbon elyaf kumaşın kullanılması üç nokta eğilme testi altında kirişin taşıyabileceği yük değerini artırırken, karbon elyaf kumaş yerine cam elyaf kumaşın kullanılması sandviç kirişin sünek davranışını sergilediği test sonuçlarından anlaşılmaktadır. Bu sonuçların literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür (Nadir ve ark., 2016; Pareta ve ark., 2020). Üretilen sandviç kirişlerde elyaf türü ve elyaf dizilim (istifleme sırası) konfigürasyonuna bağlı olarak sandviç kirişin eğilme altındaki davranışları değişiklik göstermektedir.

4.2.1. SB1 numunesi üç nokta eğilme test sonucu

SB1 sandviç kiriş numunesinde üst ve alt yüzey levhaları 6 CTP tabakadan oluşmaktadır. Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği Şekil 4.14'de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre SB1_1, SB1_2 ve SB1_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.14. SB1 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği

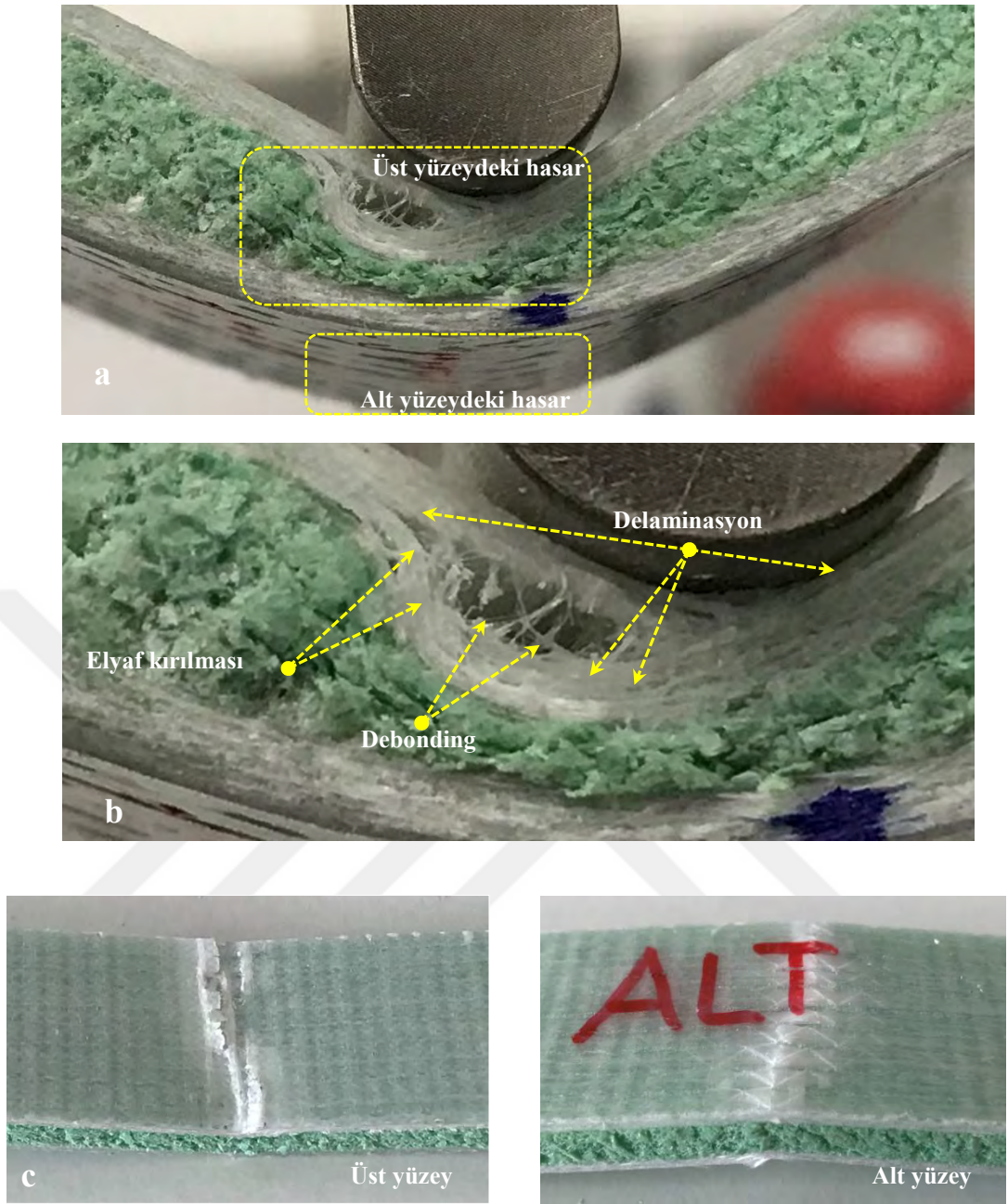
SB1 numuneleri Şekil 4.14 ve Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere yaklaşık olarak mak. 600 N kuvvet taşımaktadır. Kompozit kirişte ilk hasar matris fazında meydana gelmektedir. Mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri 12.08 mm'dir.

Çizelge 4.6. SB1 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri

Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB1_1	596.22	12.08
SB1_2	600.85	11.81
SB1_3	613.58	12.08

Üst yüzey bölgesindeki CTP tabakaların yoğun hasar gördüğü 600 N ve 15 mm deplasman değerinden sonra 300 N'a kadar ani bir kuvvet düşüşünün meydana geldiği görülmüştür. Kuvvet değerinin düşmesi ile beraber numunenin deplasman yapmaya devam etmesi üst tabakaların sünek davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 4.15'de gösterilen yoğun hasar sonrasında numuneye gelen yükü alt yüzey levhasındaki CTP tabakalar taşımıştır. Alt yüzey bölgesindeki CTP tabakalar yaklaşık 340 N ve 35 mm deplasmana kadar yük taşımıştır ve daha sonra kuvvet değeri düşme eğilimi göstermeye başlamıştır. Kuvvet mak. değere ulaştıktan sonra kuvvet değerinde azalma ile beraber deplasmanın devam etmesi alt tabakaların da sünek davranış sergilediğini göstermektedir. SB1 numuneleri yük taşıma özelliğini kaybettikten sonra üç nokta eğilme testi sonlandırılmıştır.

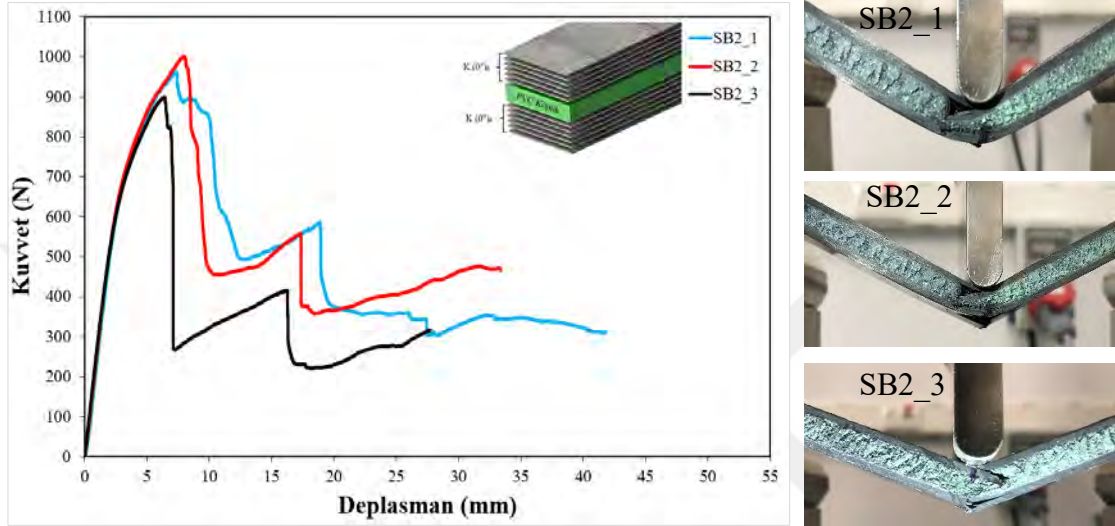
Şekil 4.15a'da görüldüğü üzere gelen yükleme karşısında sandviç kiriş nihai kuvvet değerine ulaşınca üst yüzey tabakasında ve PVC köpükte eğilme hasarı meydana gelmiştir. Yükleme devam edildiğinde deplasman artışı ile üst yüzey bölgesinde hasar ilerlemiş ve delaminasyon, elyaf kırılması ve debonding hasarlarının olduğu görülmüştür (Şekil 4.15b-c). Yükleme devam edildiğinde yaklaşık 35 mm deplasman değerinde alt tabakada eğilme hasarları gerçekleşmiş ve elyaflarda kopmaların olduğu görülmüştür. Oluşan hasarın eğrisel görüntüsü Şekil 4.14'de verilen grafikteki eğrilerin görüntüsüne benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15. Üç nokta eğilme altındaki SB1 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları

4.2.2. SB2 numunesi üç nokta eğilme test sonucu

SB2 sandviç kiriş numunesinde üst ve alt yüzey levhaları 6 KTP tabakadan oluşmaktadır. Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği Şekil 4.16'da verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre SB2_1, SB2_2 ve SB2_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.16. SB2 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği

SB2 numuneleri Şekil 4.16 ve Çizelge 4.7'de görüldüğü üzere yaklaşık 950 N kuvvet taşımaktadır. Mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri ortalama 7.25 mm'dir. Kompozit kirişte ilk hasar matris fazında oluşmaktadır. Üst yüzey bölgesindeki KTP tabakaların yoğun hasar gördüğü 950 N ve 7.25 mm deplasman değerinden sonra 480 N'a kadar ani bir kuvvet düşüşünün meydana geldiği görülmüştür.

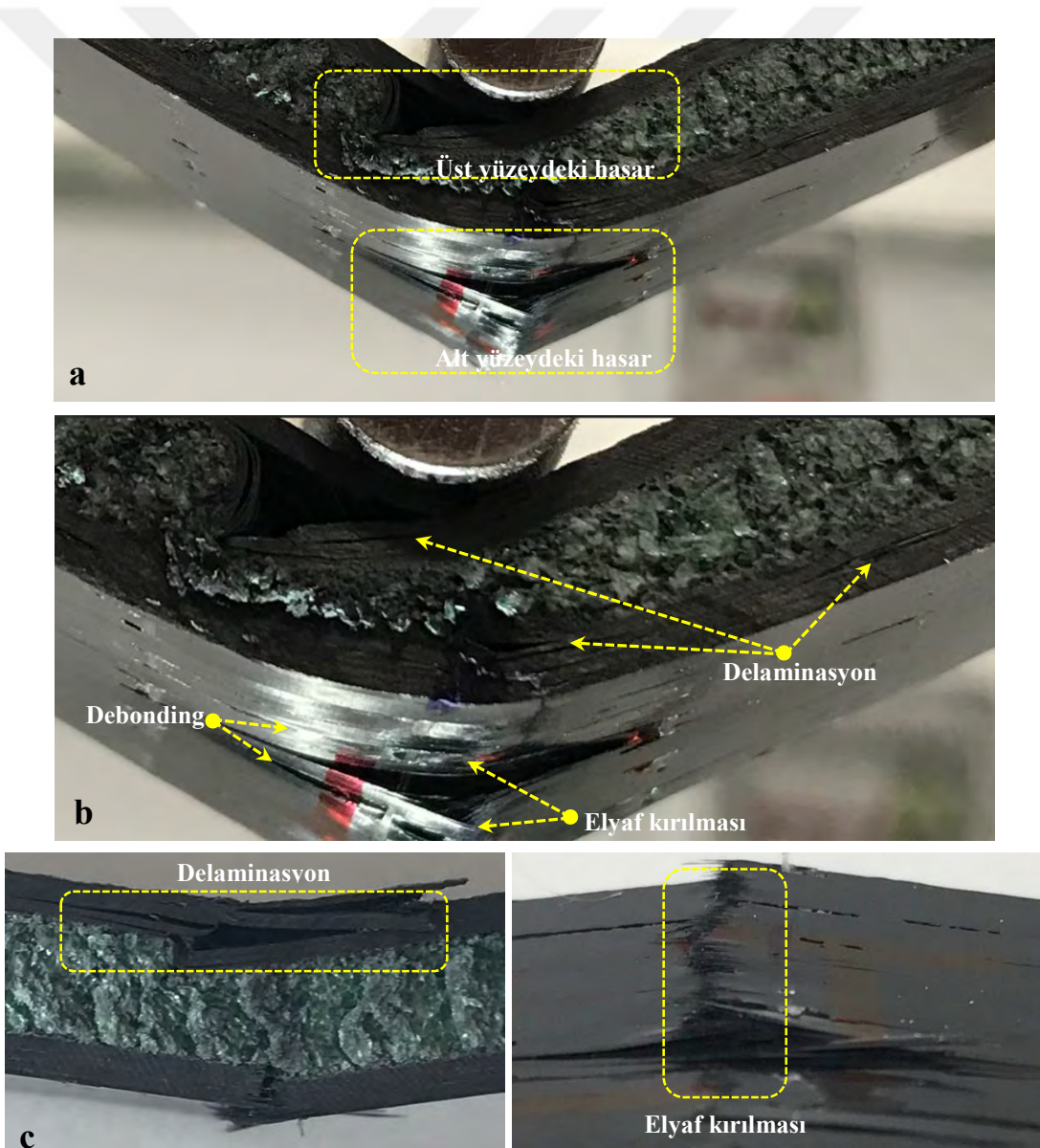
Çizelge 4.7. SB2 numunelerinin mak. kuvvetler ve bu kuvvet değerindeki deplasman miktarları

Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB2_1	953.56	7.36
SB2_2	1000.91	7.97
SB2_3	899.54	6.41

Eğilme altındaki SB2 numunelerinin bu performansı ile beraber üst yüzey bölgesindeki KTP tabakaların gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu yoğun hasar sonrasında numuneye gelen yükü alt yüzey bölgesindeki KTP tabakalar taşımıştır. Alt yüzey bölgesindeki KTP tabakalar yaklaşık 570 N ve 17 mm deplasmana kadar yük taşımış ve daha sonra kuvvet değeri ani düşme eğilimi göstermeye başlamıştır.

Eğilme altındaki SB2 numunelerinin bu performansı ile beraber alt yüzey bölgesindeki KTP tabakaların da gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Yaklaşık 19 mm deplasmandan sonra alt yüzeydeki KTP küçük bir miktar dahi olsa tekrardan yük taşımaya başlamıştır. Sandviç kiriş Şekil 4.17’de görüldüğü üzere yoğun hasar sonucu yük taşıma niteliğini kaybettikten sonra deney sonlandırılmıştır.

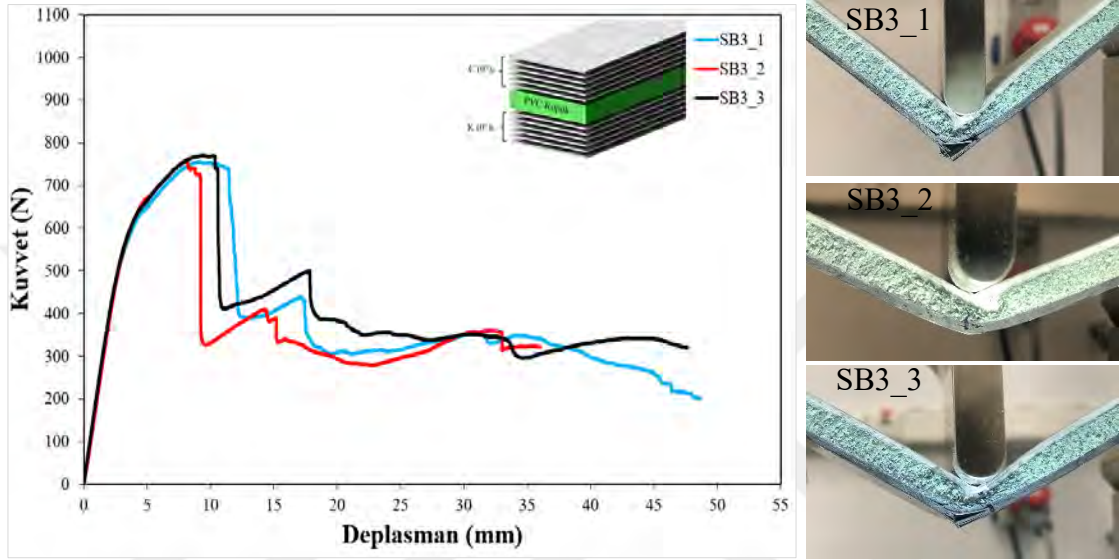
Şekil 4.17a’da görüldüğü üzere yükleme sonucunda ST2’nin üst yüzey levhasında ve alt yüzey levhasında eğilme hasarı meydana gelmiştir. Şekil 4.17b-c’de gösterilen üst yüzeydeki elyafların kırılma hasarı Şekil 4.16’da verilen grafikteki eğrilerin görüntüsü gibi keskin olduğu görülmektedir. Alt ve üst yüzey levhalarında matris çatlamasının ardından debonding, tabakaların ayrılması yani delaminasyon ve elyaf kırılma hasar modları görülmektedir.



Şekil 4.17. Üç nokta eğilme altındaki SB2 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları

4.2.3. SB3 numunesi üç nokta eğilme test sonucu

SB3 sandviç kiriş numunesinde üst yüzey levhası 6 CTP ve alt yüzey levhası 6 KTP tabakadan oluşmaktadır. Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği Şekil 4.18’de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre SB3_1, SB3_2 ve SB3_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18. SB3 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği

SB3 numuneleri Şekil 4.18 ve Çizelge 4.8’de görüldüğü üzere yaklaşık 760 N kuvvet taşımaktadır. Mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri ortalama 8.86 mm’dir. Üst yüzey bölgesindeki CTP tabakaların yoğun hasar gördüğü 760 N ve 11 mm deplasman değerinden sonra 370 N’a kadar ani bir kuvvet düşüşünün meydana geldiği görülmüştür. Üst yüzey bölgesindeki tabakanın sünek kırılma davranışı sergilediği Şekil 4.18’de görülmektedir.

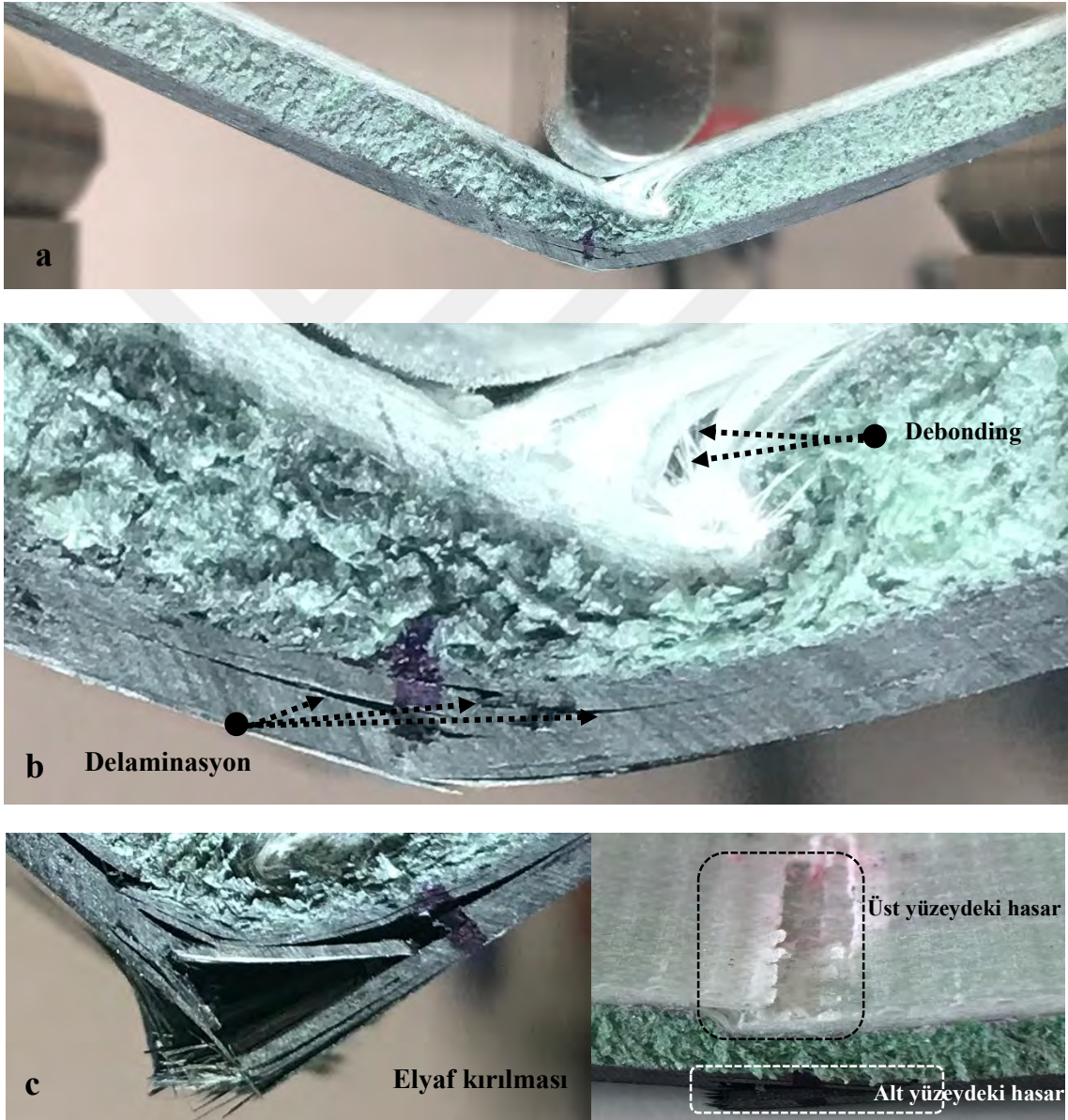
Çizelge 4.8. SB3 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri

Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB3_1	754.19	9.09
SB3_2	760	8.13
SB3_3	769.74	9.36

Şekil 4.19a’da görüldüğü gibi üst yüzey bölgesinde oluşan yoğun hasar sonrasında numuneye gelen yükü alt yüzey bölgesindeki KTP tabakalar taşımaya başlamışlardır. Alt yüzey bölgesindeki KTP tabakalar yaklaşık 430 N ve 16 mm deplasmana kadar yük

taşımıştır ve daha sonra kuvvet değerinde ani düşme eğilimi göstermeye başlamıştır. Alt yüzey bölgesindeki tabakanın gevrek kırılma davranışı sergilediği Şekil 4.18-20'de görülmektedir.

CTP üst yüzey levhada eğilme hasarları meydana gelmiştir. Şekil 4.19b'de net bir şekilde matris ve takviye ayrılması olan debonding hasar görülmektedir. KTP alt yüzey levhada eğilmeden kaynaklı olarak Şekil 4.19c'de görüldüğü üzere yoğun elyaf kırılması ve delaminasyon hasar modları gözlemlenmektedir.



Şekil 4.19. Üç nokta eğilme altındaki SB3 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları

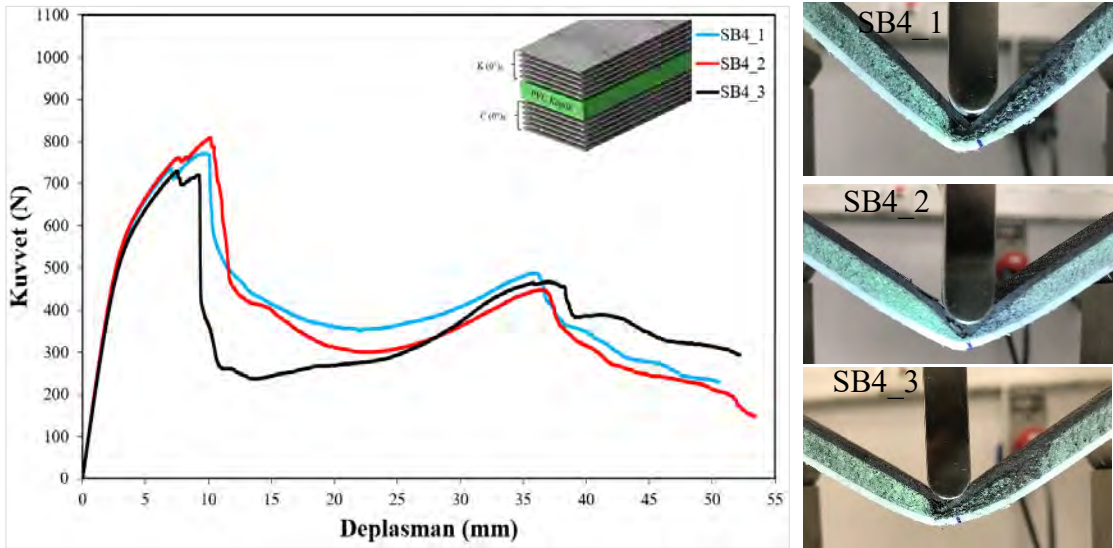
SB3 numuneleri Şekil 4.20’de görüldüğü üzere yoğun hasar alıp, 38 mm yüksek deplasman değerinde yük taşıma özelliğini kaybettiğinden sonra üç nokta eğilme testi sonlandırılmıştır.



Şekil 4.20. SB3 numunesinin hasar alması

4.2.4. SB4 numunesi üç nokta eğilme test sonucu

SB4 sandviç kiriş numunesinde üst yüzey levhası 6 KTP ve alt yüzey levhası 6 CTP tabakadan oluşmaktadır. Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği Şekil 4.21’de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre SB4_1, SB4_2 ve SB4_3 numune sonuçlarının ve hasar gelişiminin birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.21. SB4 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği

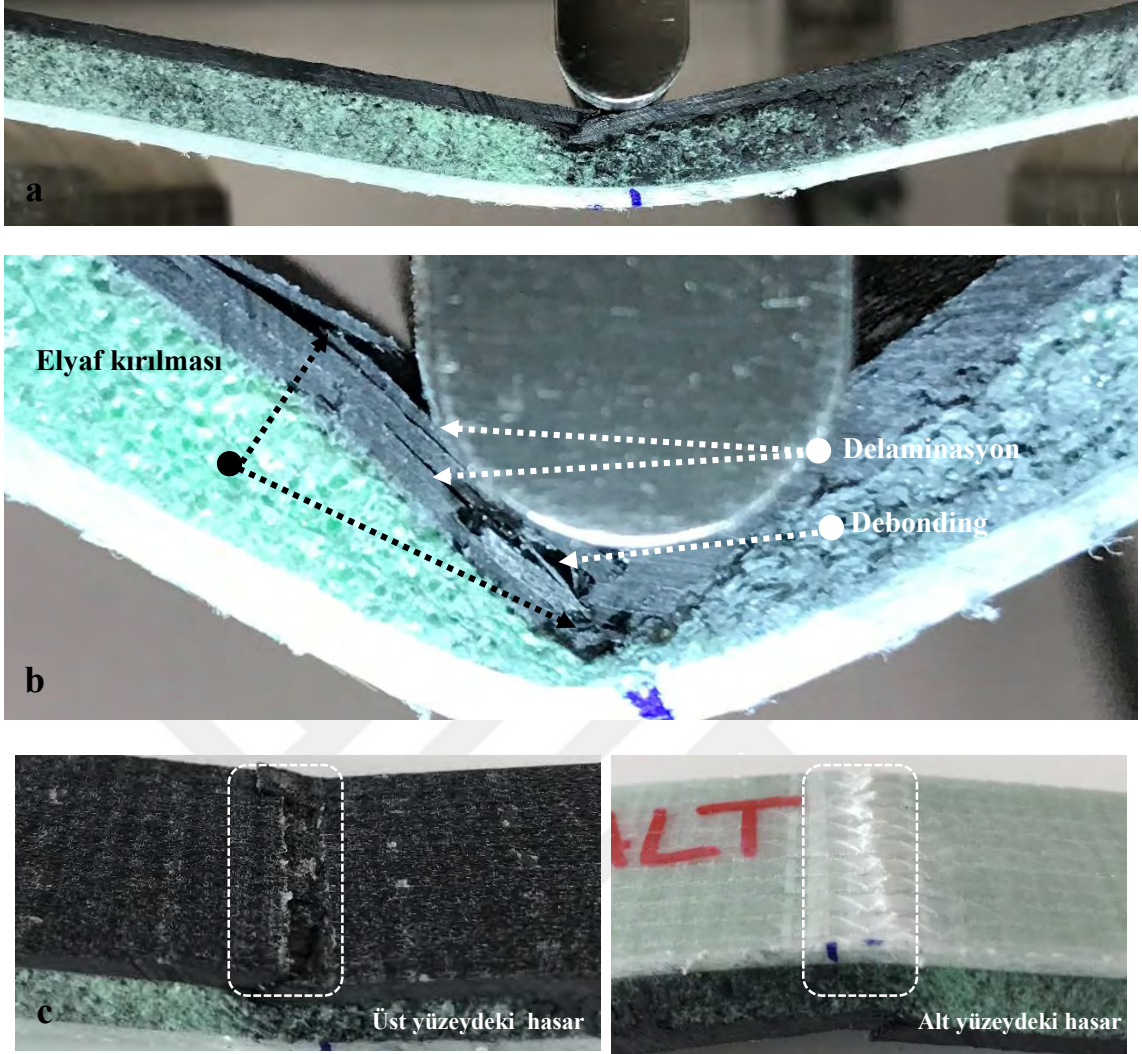
SB4 numuneleri Şekil 4.21 ve Çizelge 4.9’da görüldüğü üzere yaklaşık 770 N kuvvet taşımaktadır. Mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri yaklaşık 9 mm’dir. Üst yüzey levha bölgesindeki KTP tabakaların yoğun hasar gördüğü 770 N ve 9 mm deplasman değerinden sonra 330 N değerine kadar ani bir kuvvet düşüşünün meydana geldiği görülmüştür.

Çizelge 4.9. SB4 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri

Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB4_1	771.16	9.66
SB4_2	808.59	10.19
SB4_3	729.59	7.52

Üst yüzey levha bölgesindeki tabakaların gevrek kırılma davranışı sergilediği Şekil 4.22b’de gözlemlenmektedir. Şekil 4.22b’de basma noktasında yoğunlaşan hasarlarda tabaka kırılması ile beraber delaminasyon hasarlarının da oluştuğu görülmüştür. Yoğun hasar sonrasında numuneye gelen yükü alt yüzey bölgesindeki CTP tabakalar taşımıştır. Alt yüzey bölgesindeki CTP tabakalar yaklaşık 450 N ve 36 mm deplasman değerine kadar yük taşımıştır. Daha sonra deplasman artışı ile kuvvet değeri düşme eğilimi göstermeye başlamıştır. Alt yüzey bölgesindeki tabakaların sünek kırılma davranışı sergilediği Şekil 4.21’de gözlemlenmektedir. SB4 numuneleri yoğun hasar alıp, yük taşıma özelliğini kaybettikten sonra üç nokta eğilme testi sonlandırılmıştır.

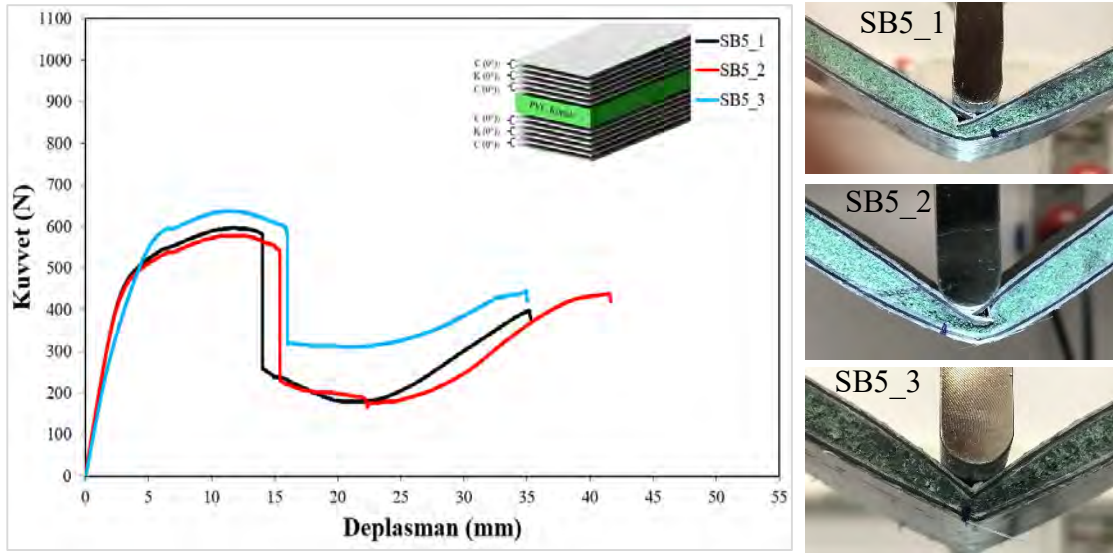
Üç nokta eğilme testine tabi tutulan SB4 numunesinde oluşan hasarlar Şekil 4.22’de gösterilmektedir. KTP üst yüzeyde yoğun olarak Şekil 4.22b’de görüldüğü üzere delaminasyon ve elyaf kırılma hasarları görülmektedir. CTP alt yüzeyde Şekil 4.22c’de görüldüğü üzere eğilmeden kaynaklı beyazlaşma ve yoğun debonding hasarlarının meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22. Üç nokta eğilme altındaki SB4 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları

4.2.5. SB5 numunesi üç nokta eğilme test sonucu

SB5 sandviç kiriş numunesinde üst yüzey levhası 2 CTP, 2 KTP, 2 CTP ve alt yüzey levhası 2 CTP, 2 KTP, 2 CTP tabakadan oluşmaktadır. Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği Şekil 4.23'de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre SB5_1, SB5_2 ve SB5_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



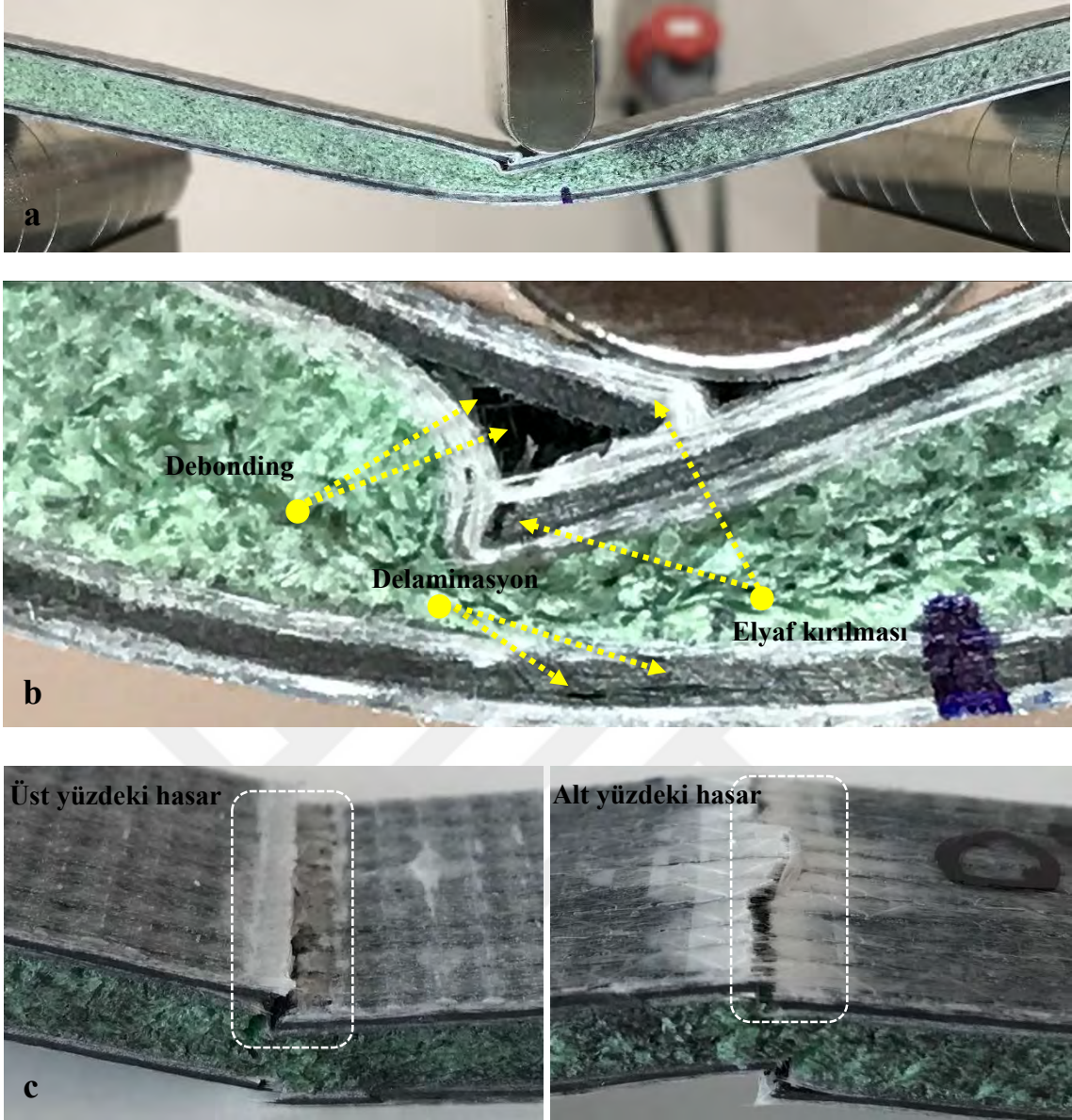
Şekil 4.23. SB5 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği

SB5 numuneleri Şekil 4.23 ve Çizelge 4.10’da görüldüğü üzere yaklaşık 600 N kuvvet taşımaktadır. Mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri yaklaşık 11 mm’dir. Kompozit kirişte ilk hasarlar matris fazında meydana gelmektedir. Üst yüzey bölgesindeki tabakaların yoğun hasar gördüğü 600 N ve 15 mm deplasman değerinden sonra 240 N’a kadar ani bir kuvvet düşüşünün meydana geldiği görülmüştür. Kuvvetteki azalma ile birlikte numunenin deplasman yapmaya devam etmesi sünek kırılma davranışının sergilendiğini göstermektedir.

Çizelge 4.10. SB5 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri

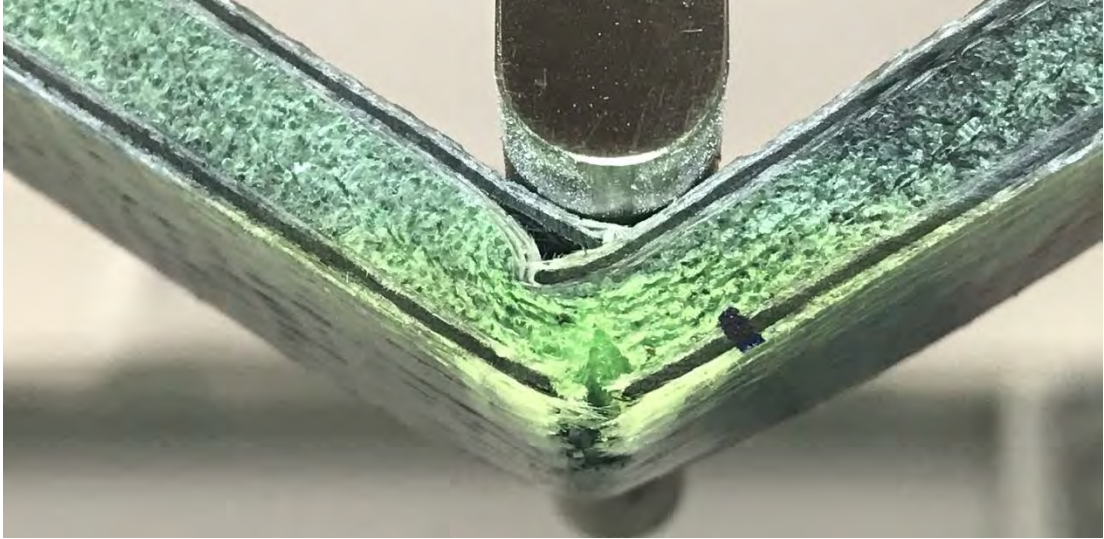
Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB5_1	596.44	11.81
SB5_2	578.21	11.07
SB5_3	637.21	11.26

Şekil 4.24a’da gösterilen üst yüzey bölgesinde oluşan yoğun hasar sonucunda numuneye gelen yükü alt yüzey bölgesindeki tabakalar taşımıştır. Alt yüzey bölgesindeki tabakalar yaklaşık 410 N ve 36 mm deplasmana kadar yük taşımış ve daha sonra kuvvet değeri düşme eğilimi göstermeye başlamıştır. Matris fazı çatlamasından sonra sandviç kirişte debonding, delaminasyon ve elyaf kırılma hasarları oluşmuştur. Şekil 4.24c’de görüldüğü üzere üst yüzey levhalarda ve alt yüzey levhalarda eğilmeden kaynaklı hasarlar oluşmuştur. KTP, CTP, KTP üst yüzey levhasında cam elyaflar süreklilik gösterir iken karbon elyafların süresiz kırıldığı Şekil 4.24b ve Şekil 4.25’de gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Üç nokta eğilme altındaki SB5 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları

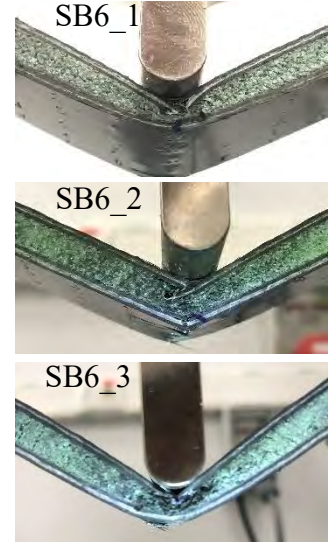
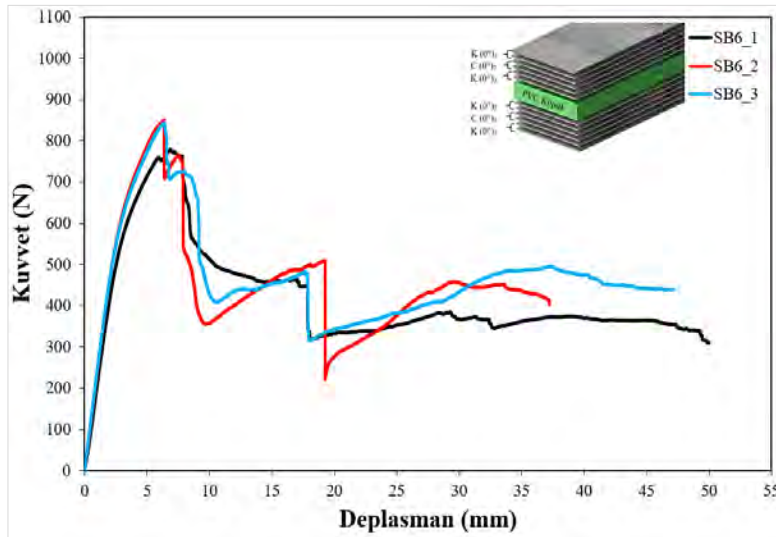
Şekil 4.25’de PVC köpük malzemesinde eğilmeden kaynaklı hasarlar gözlemlenmektedir. SB5 numunesinde karbon tabakasının cam tabakalar arasında istiflenmesi hasar gelişimini etkilemiş ve 13-15 mm gibi yüksek deplasman değerine kadar hasar oluşmaksızın yük taşımaya devam etmiştir.



Şekil 4.25. SB5 numunesinin yoğun hasar alması

4.2.6. SB6 numunesi üç nokta eğilme test sonucu

SB6 sandviç kiriş numunesinde üst yüzey levhası 2 KTP, 2 CTP, 2 KTP ve alt yüzey levhası 2 KTP, 2 CTP, 2 KTP tabakadan oluşmaktadır. Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği Şekil 4.26'da verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre SB6_1, SB6_2 ve SB6_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.26. SB6 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği

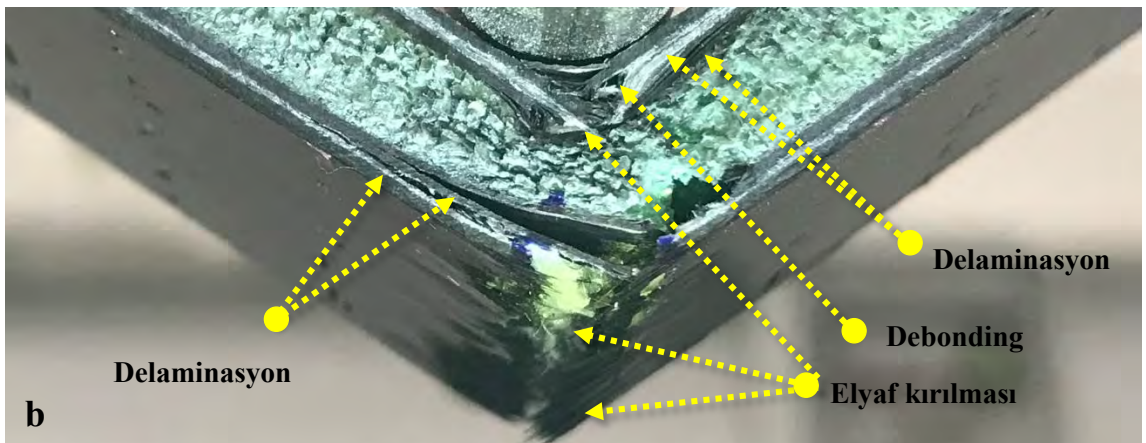
SB6 numuneleri Şekil 4.26 ve Çizelge 4.11'de görüldüğü üzere yaklaşık 825 N kuvvet taşımaktadır. Mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri yaklaşık 6.4 mm'dir. Kompozit kirişte ilk hasar matris fazında oluşmaktadır. Üst yüzey bölgesindeki

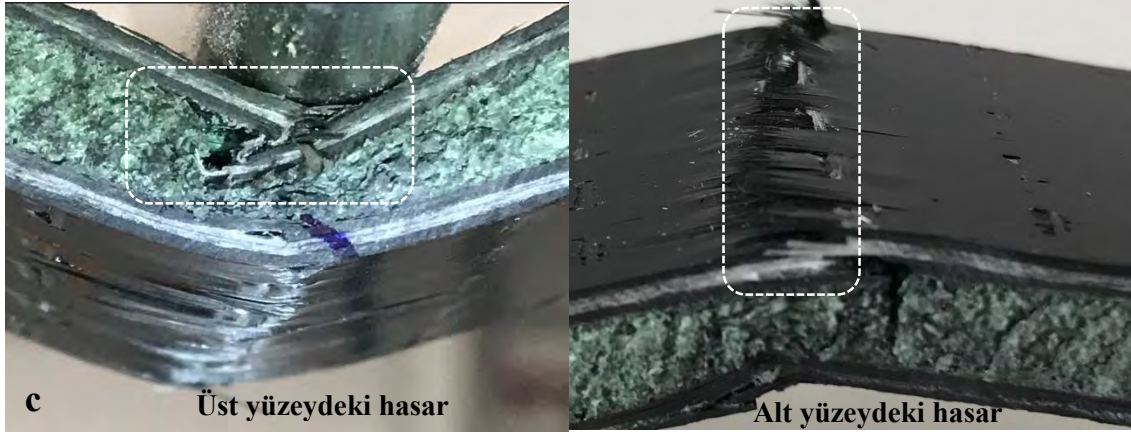
tabakaların Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de görüldüğü üzere yoğun hasar gördüğü 825 N ve 8 mm deplasman değerinden sonra 380 N’a kadar ani bir kuvvet düşüşünün meydana geldiği görülmüştür.

Çizelge 4.11. SB6 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri

<u>Numune</u>	<u>Mak. kuvvet (N)</u>	<u>Deplasman (mm)</u>
SB6_1	780.03	6.91
SB6_2	850.64	6.37
SB6_3	842.78	6.39

Şekil 4.26’da verilen grafikte 10-20 mm deplasman değeri aralığında oluşan zikzak eğriler, üst yüzey tabakadaki kırılmayan elyafların tekrar yük taşımaya başlaması ile oluşmuştur ve tüm elyaflar hasar aldıktan sonra tekrar ani bir kırılma meydana gelmiştir. Şekil 4.27’de gösterilen üst yüzey bölgesinde oluşan yoğun hasar sonucunda numuneye gelen yükü alt yüzey bölgesindeki tabakalar taşımıştır. Alt yüzey bölgesindeki tabakalar yaklaşık 480 N ve 35 mm deplasmana kadar yük taşımış ve daha sonra kuvvet değeri düşme eğilimi göstermeye başlamıştır. Şekil 4.27b’de görüldüğü üzere üst ve alt yüzey levhalarında eğilmeden kaynaklı olarak debonding, delaminasyon hasar modlarının olduğu görülürken Şekil 4.27.c’de alt yüzeyde diğer hasar modlarına ilave olarak tabakaların yoğun hasar alıp elyafların tamamen kırıldığı görülmektedir.

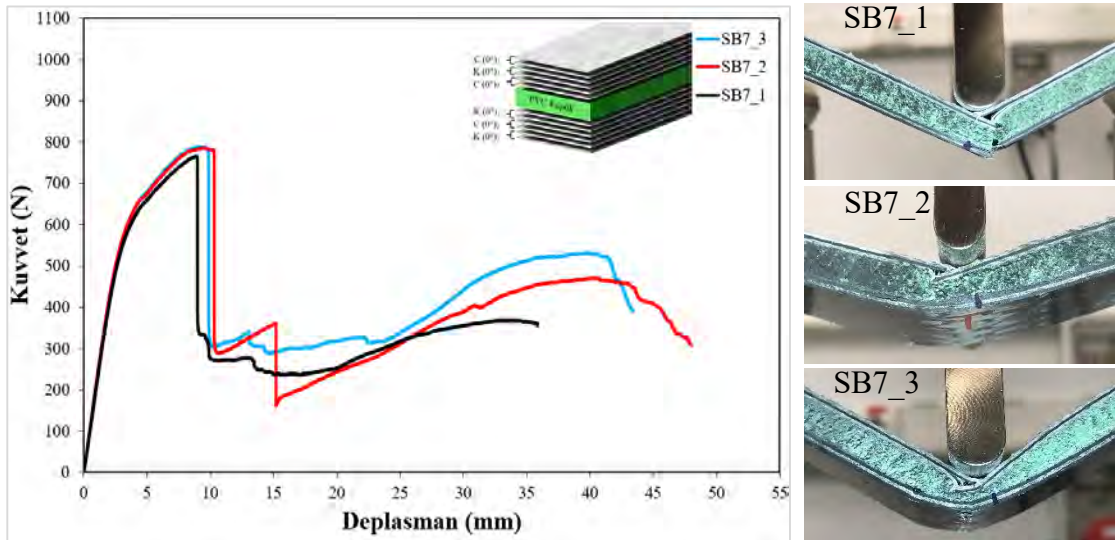




Şekil 4.27. Üç nokta eğilme altındaki SB6 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları

4.2.7. SB7 numunesi üç nokta eğilme test sonucu

SB7 sandviç kiriş numunesinde üst yüzey levhası 2 CTP, 2 KTP, 2 CTP ve alt yüzey levhası 2 KTP, 2 CTP, 2 KTP tabakadan oluşmaktadır. Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği Şekil 4.28’de verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre SB7_1, SB7_2 ve SB7_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



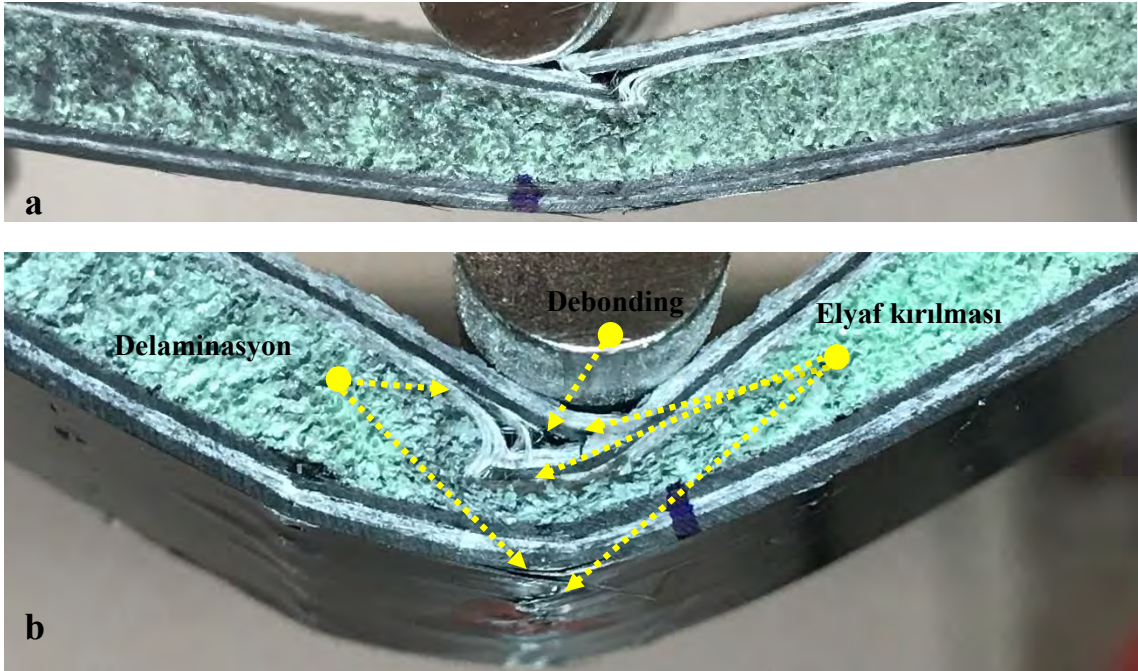
Şekil 4.28. SB7 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği

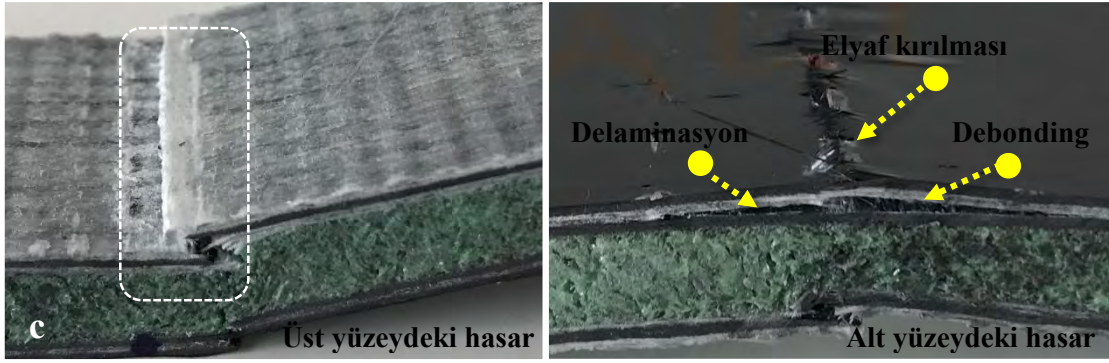
SB7 numuneleri Şekil 4.28 ve Çizelge 4.12’de görüldüğü üzere yaklaşık 780 N kuvvet taşımaktadır. Mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri yaklaşık 9 mm’dir. Kompozit sandviç kirişte ilk hasar matris fazında meydana gelmektedir.

Çizelge 4.12. SB7 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri

Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB7_1	765.13	8.81
SB7_2	785.24	9.52
SB7_3	787.37	9.09

Üst yüzey bölgesindeki tabakaların Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’de görüldüğü üzere yoğun hasar gördüğü 785 N ve 10 mm deplasman değerinden sonra 290 N’a kadar ani bir kuvvet düşüşünün meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.29b-c’de gösterilen üst yüzey bölgesinde oluşan yoğun hasar sonucunda numuneye gelen yükü alt yüzeydeki tabakalar taşımıştır. Alt yüzeydeki tabakalar yaklaşık 490 N ve 40 mm deplasmana kadar yük taşımıştır ve daha sonra oluşan hasarlardan dolayı kuvvet değeri düşme eğilimi göstermeye başlamıştır. Şekil 4.29’da verilen grafikte 10-15 mm deplasman değeri aralığındaki zikzak eğriler, üst yüzeyde kırılmayan elyafların yük taşıması sonucu oluşmuştur. Şekil 4.29b-c’de görüldüğü üzere elyaf istifleme sıralamasından kaynaklı olarak üst yüzeydeki cam elyafların aradaki karbon elyaf tabakasını SB5 numunesindeki gibi koruduğu, yüklemeye devam edildikçe sandviç kırıta debonding, delaminasyon ve elyaf kırılma hasarlarının meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.29c’de verilen görselde alt yüzeyde oluşan delaminasyon hata modları belirgin olarak görülmektedir.

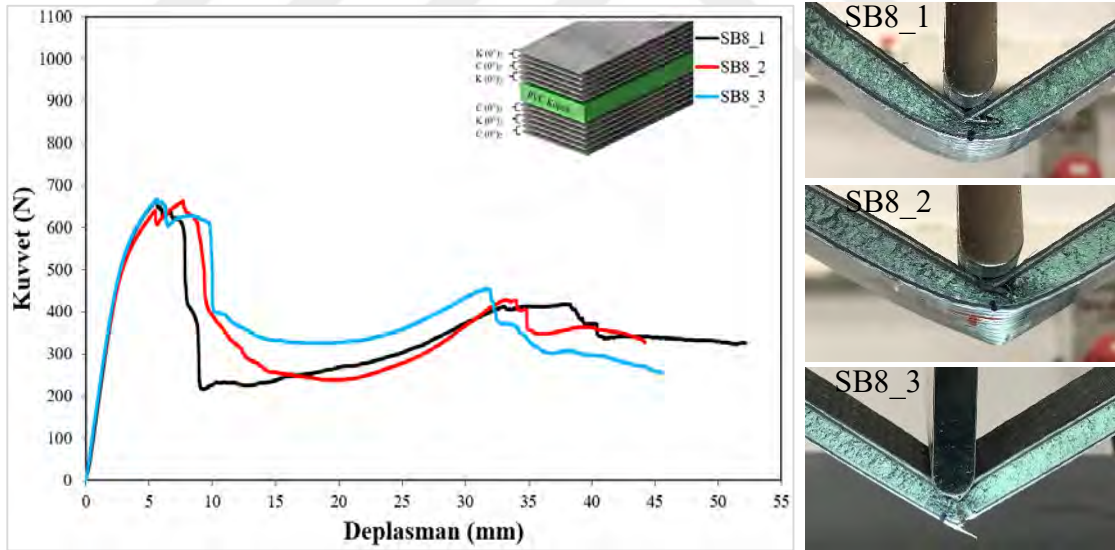




Şekil 4.29. Üç nokta eğilme altındaki SB7 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları

4.2.8. SB8 numunesi üç nokta eğilme test sonucu

SB8 sandviç kiriş numunesinde üst yüzey levhası 2 KTP, 2 CTP, 2 KTP ve alt yüzey levhası 2 CTP, 2 KTP, 2 CTP tabakadan oluşmaktadır. Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği Şekil 4.30'da verilmektedir. Grafik sonuçlarına göre SB8_1, SB8_2 ve SB8_3 numune sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu gözlemlenmiştir.



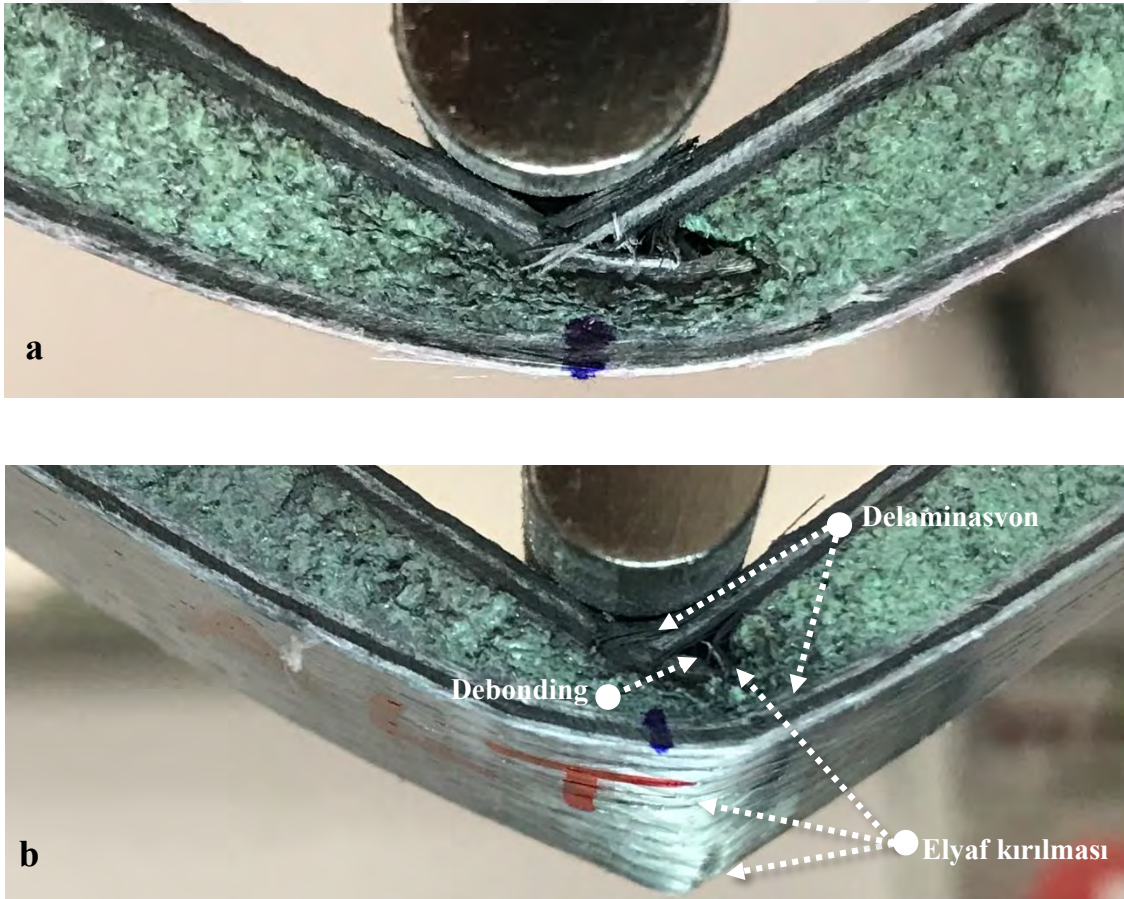
Şekil 4.30. SB8 numunesi kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği

SB8 numuneleri Şekil 4.30 ve Çizelge 4.13'de görüldüğü üzere yaklaşık 665 N kuvvet taşımaktadır. Mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri yaklaşık 5.6 mm'dir. Sandviç kirişte ilk hasar matris fazında oluşmaktadır.

Çizelge 4.13. SB8 numunelerinin mak. kuvveti ve mak. kuvvetteki deplasman değeri

Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB8_1	666.62	5.61
SB8_2	663.09	7.71
SB8_3	666.68	5.57

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31a-b’de görüldüğü üzere üst bölgede KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasından kaynaklı olarak orta tabakadaki cam elyaflar üst yüzeyin deplasman miktarını artırdığı ve alt yüzeydeki CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasından kaynaklı olarak alt yüzeyin sünek kırılma davranışı sergilediği sonucuna ulaşılmaktadır. Kompozit kirişte meydana gelen debonding, delaminasyon ve yüklemenin devam etmesiyle oluşan Şekil4.31c’de görülen elyaf kırılması ile beraber tabakaların kırılmasından sonra sandviç kiriş taşıma özelliğini kaybetmiştir.





Şekil 4.31. Üç nokta eğilme altındaki SB8 numunesinde oluşan hasar mekanizmaları

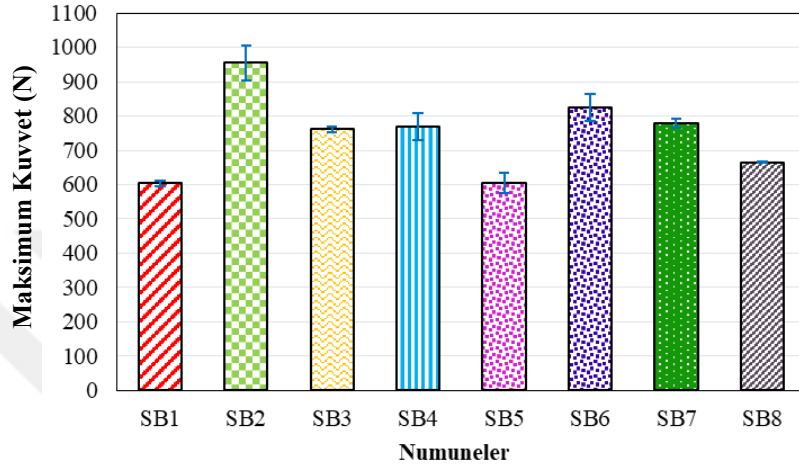
4.2.3. Sandviç kiriş numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucunun karşılaştırılması

Kompozit malzeme tasarımında elyaf türünün ve elyaf dizilim konfigürasyonunun (İstifleme sırası) sandviç kompozit kirişin üç nokta eğilme altındaki davranışına etkisini araştırmak için bu başlık doğrultusunda tüm numuneler arasında genel bir karşılaştırma yapıp bu bölümün alt başlıklarında belirtilen dört farklı gruplandırma ile daha detaylı bir karşılaştırma yapılmıştır. Sandviç kompozit kirişler elyaf istifleme türüne göre simetrik sandviçlerin karşılaştırılması başlığında SB1 ve SB2, elyaf istifleme türüne göre asimetrik sandviçlerin karşılaştırılması başlığında SB3 ve SB4, elyaf istifleme türüne göre hibrid simetrik sandviçlerin karşılaştırılması başlığında SB5 ve SB6, ve elyaf istifleme türüne göre hibrid asimetrik sandviçlerin karşılaştırılması başlığında SB7 ve SB8 numuneleri karşılaştırılmıştır. Genel karşılaştırma yapılırken üç nokta eğilme testi sonucu elde edilen mak. kuvvet değeri ve bu kuvvet değerine denk gelen deplasman değerinin ortalaması ve standart sapması Çizelge 4.14’de gösterildiği gibi dikkate alınırken, detaylı numune gruplarının karşılaştırılmasında en iyi yorum yapılabilecek numuneler seçilmiştir.

Çizelge 4.14. Üç nokta eğilme numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri

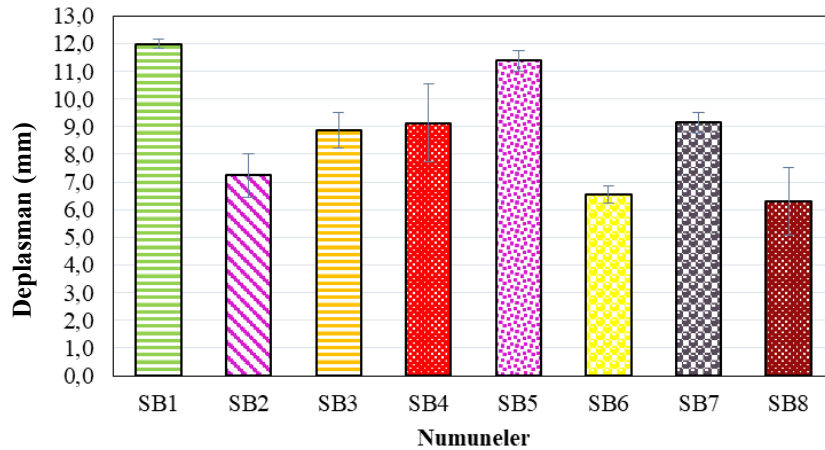
Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB1	603.55± 8.99	11.99±0.16
SB2	954.67±51.27	7.25±0.79
SB3	761.31±7.86	8.86±0.65
SB4	769.78±39.52	9.12±1.41
SB5	603.96±30.21	11.38±0.38
SB6	824.48±38.70	6.56±0.31
SB7	779.25±12.27	9.14±0.36
SB8	665.46±2.06	6.30±1.22

Üç nokta eğilme testi sonrasında elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğine göre numunelerin mak. kuvvet değerleri Çizelge 4.14 ve Şekil 4.32’de verilmektedir. Tüm numuneler arasında mak. kuvvet değeri en büyük olan numunenin, karbon elyaftan oluşan SB2 numune grubu olduğu tespit edilmiştir. Mak. kuvvet değerlerinde en kötü davranışını sergileyen cam elyaf kumaşlardan oluşan SB1 numunesi olduğu tespit edilmiştir.



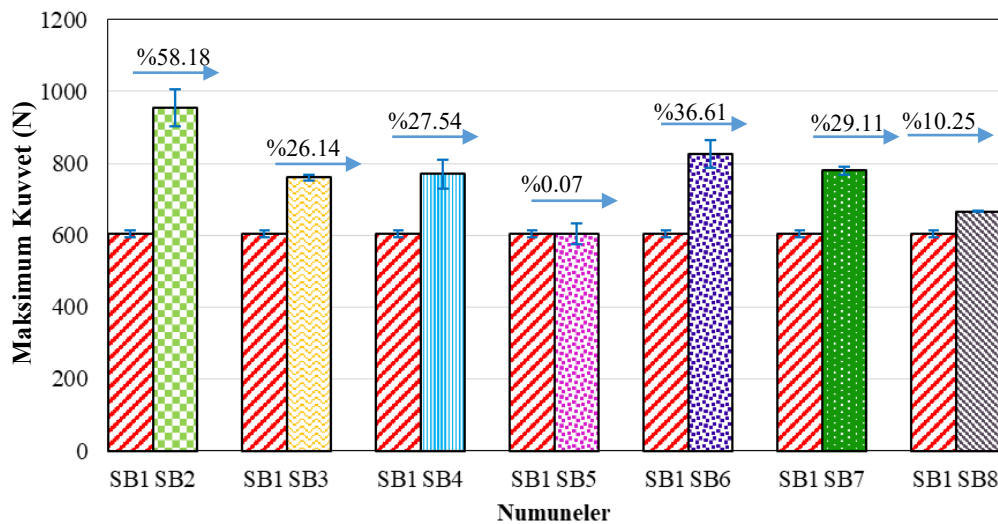
Şekil 4.32. Eğilme numunelerinin mak. kuvvet değerleri

Üç nokta eğilme testi sonrasında elde edilen kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğine göre numunelerin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerleri Çizelge 4.14 ve Şekil 4.33’de verilmektedir. Tüm numuneler arasında mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değeri en büyük olan numune cam elyaftan oluşan SB1 numune grubu olduğu tespit edilmiştir. SB1 numunesinin diğer numune gruplarına göre daha iyi sünek davranış sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.33. Eğilme numunelerinin mak. kuvvetteki deplasman değerleri

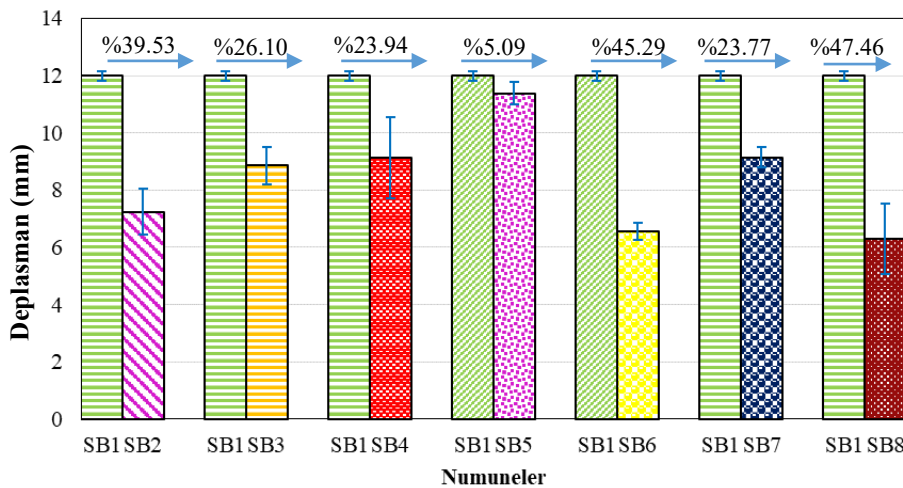
Şekil 4.34’de SB1 numune grubuna bağlı olarak diğer numune gruplarının mak. kuvvet değerinde artış ve azalışlar gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %58.18 artmıştır. Üst yüzey cam elyaf, alt yüzey karbon elyaf olmak üzere asimetrik biçimde tasarlanan SB3 numunesinin mak. kuvvet değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %26.14 artmıştır. Üst yüzeyin karbon elyaf, alt yüzeyin tamamı cam elyaf olacak şekilde asimetrik biçimde tasarlanan SB4 numunesinin mak. kuvvet değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %27.54 artmıştır. Hibrid simetrik olarak tasarlanan cam elyaf tabaka sayısı fazla (CTP, KTP, CTP) olan SB5 numunesinin mak. kuvvet değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %0.07 artmıştır. Hibrid simetrik olarak tasarlanan karbon elyaf tabaka sayısı fazla (KTP, CTP, KTP) olan SB6 numunesinin mak. kuvvet değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %36.61 artmıştır. Hibrid asimetrik olarak tasarlanan karbon elyaf sayısı alt yüzeyde fazla olan SB7 numunesinin mak. kuvvet değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %29.11 artmıştır. Hibrid asimetrik olarak tasarlanan karbon elyaf sayısı üst yüzeyde fazla olan SB8 numunesinin mak. kuvvet değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %10.25 artmıştır.



Şekil 4.34. SB1 numune grubuna göre mak. kuvvet karşılaştırması

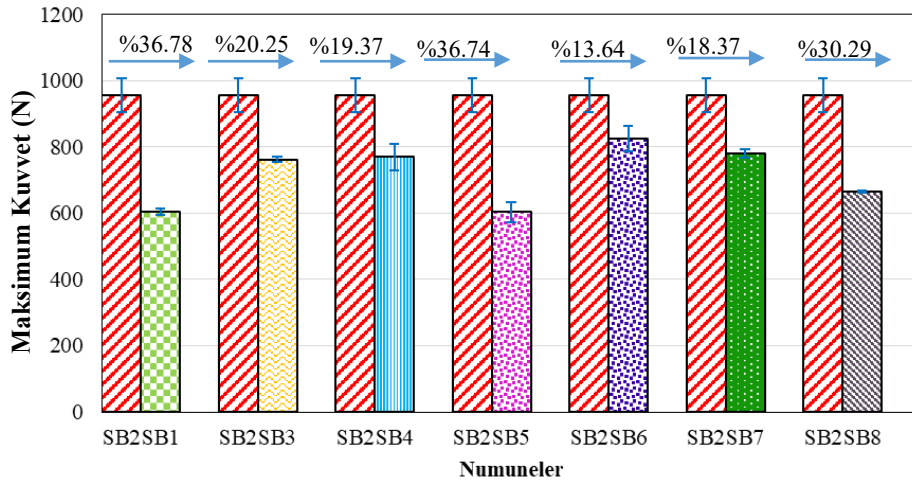
Şekil 4.35’de SB1 numune grubuna bağlı olarak diğer numune gruplarının mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerindeki artış ve azalışlar gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvete denk

gelen deplasman değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %39.53 azalmıştır. Üst yüzeyin cam elyaftan, alt yüzeyin karbon elyaftan oluşan asimetrik biçimde tasarlanan SB3 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %26.10 azalmıştır. Üst yüzeyin tamamı karbon elyaftan, alt yüzeyin tamamı cam elyaftan oluşan asimetrik biçimde tasarlanan SB4 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %23.94 azalmıştır. Hibrid simetrik olarak tasarlanan cam elyaf tabaka sayısı fazla olan SB5 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %5.09 azalmıştır. Hibrid simetrik olarak tasarlanan karbon elyaf tabaka sayısı fazla olan SB6 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %45.29 azalmıştır. Hibrid asimetrik olarak tasarlanan karbon elyaf sayısı alt yüzeyde fazla olan SB7 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %23.77 azalmıştır. Hibrid asimetrik olarak tasarlanan karbon elyaf sayısı üst yüzeyde fazla olan SB8 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %47.46 azalmıştır.



Şekil 4.35. SB1 numune grubuna göre mak. kuvvetteki deplasman karşılaştırması

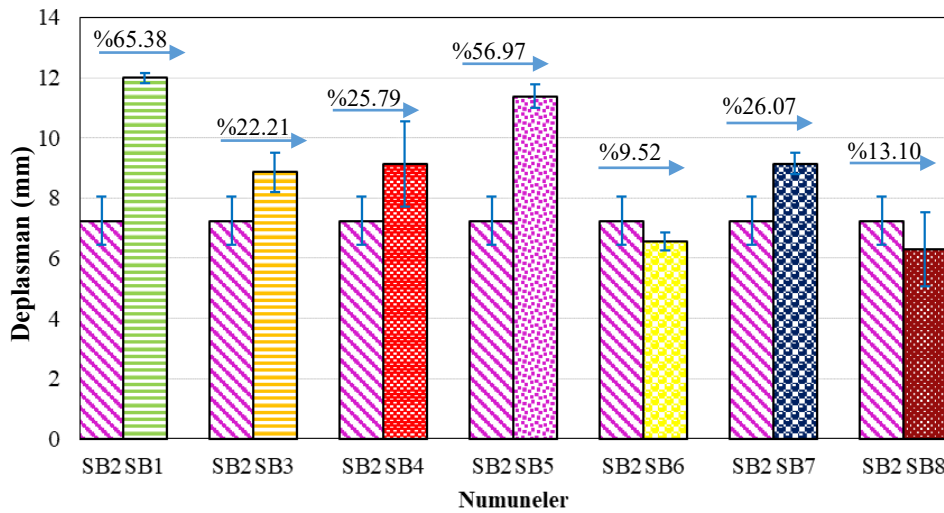
Şekil 4.36’da SB2 numune grubuna bağlı olarak diğer numune gruplarının mak. kuvvet değerinde artış ve azalışlar gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvet değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %36.78 azalmıştır. Üst yüzeyin tamamı cam elyaftan oluşan asimetrik biçimde tasarlanan SB3 numunesinin mak. kuvvet değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %20.25 azalmıştır. Üst yüzeyin karbon elyaftan oluşan asimetrik biçimde tasarlanan SB4 numunesinin mak. kuvvet değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %19.37 azalmıştır. Hibrid simetrik olarak tasarlanan cam elyaf tabaka sayısı fazla olan SB5 numunesinin mak. kuvvet değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %36.74 azalmıştır. Hibrid simetrik olarak tasarlanan karbon elyaf tabaka sayısı fazla olan SB6 numunesinin mak. kuvvet değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %13.64 azalmıştır. Hibrid asimetrik olarak tasarlanan karbon elyaf sayısı alt yüzeyde fazla olan SB7 numunesinin mak. kuvvet değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %18.37 azalmıştır. Hibrid asimetrik olarak tasarlanan karbon elyaf sayısı üst yüzeyde fazla olan SB8 numunesinin mak. kuvvet değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine göre yaklaşık %30.29 azalmıştır.



Şekil 4.36. SB2 numune grubuna göre mak. kuvvet karşılaştırması

Şekil 4.37’de SB2 numune grubuna bağlı olarak diğer numune gruplarının mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerindeki artış ve azalışlar gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere cam elyaftan oluşan SB1 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine denk

gelen deplasman değerine göre yaklaşık %65.38 artmıştır. Üst yüzeyin cam elyaftan oluşan asimetrik biçimde tasarlanan SB3 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %22.21 artmıştır. Üst yüzeyin karbon elyaftan oluşan asimetrik biçimde tasarlanan SB4 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %25.79 artmıştır. Hibrid simetrik olarak tasarlanan cam elyaf tabaka sayısı fazla olan SB5 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %56.97 artmıştır. Hibrid simetrik olarak tasarlanan karbon elyaf tabaka sayısı fazla olan SB6 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %9.52 azalmıştır. Hibrid asimetrik olarak tasarlanan karbon elyaf sayısı alt yüzeyde fazla olan SB7 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvet değerine denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %26.07 artmıştır. Hibrid asimetrik olarak tasarlanan karbon elyaf sayısı üst yüzeyde fazla olan SB8 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değeri karbon elyaftan oluşan SB2 numunesinin mak. kuvvete denk gelen deplasman değerine göre yaklaşık %13.10 azalmıştır.



Şekil 4.37. SB2 numune grubuna göre mak. kuvvetteki deplasman karşılaştırması

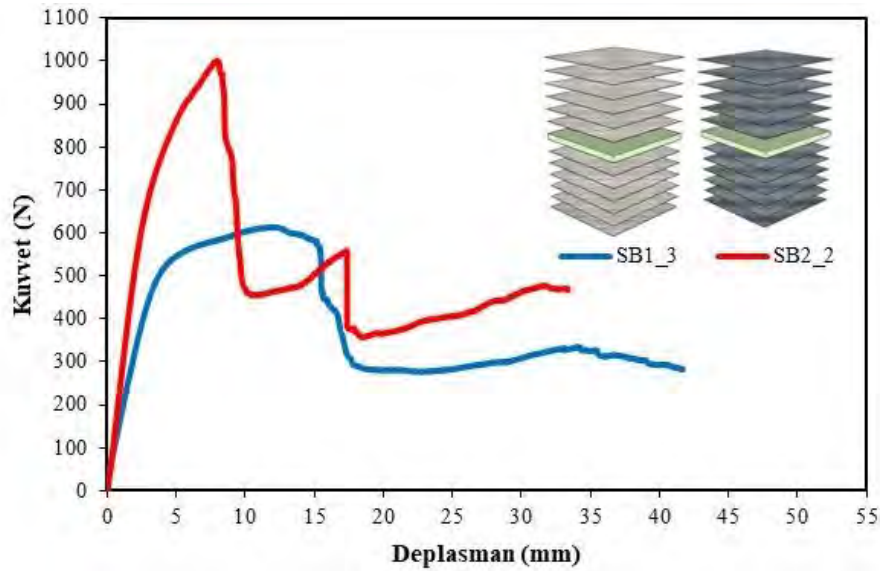
4.2.3.1. Alt ve üst yüzeydeki elyaf istifleme türüne göre simetrik sandviç kirişlerin karşılaştırılması

Alt ve üst yüzeydeki elyaf takviye türüne göre simetrik sandviç kirişlerin, üç nokta eğilme testi altındaki davranışlarının karşılaştırılması için SB1 (SB1_1, SB1_2, SB1_3) ve SB2 (SB2_1, SB2_2, SB2_3) kombinasyonuna göre tasarım gerçekleştirilip, üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. SB1 numuneleri cam elyaf kumaşların çekirdeğe göre simetrik olarak istiflenmesi ile elde edilirken SB2 numuneleri karbon elyaf kumaşların çekirdeğe göre simetrik olarak istiflenmesi ile elde edilmiştir.

Üç nokta eğilme altındaki SB1 ve SB2 numunelerinin eğilme altındaki davranışları deneyin gerçekleştirilme sırasındaki incelemeler ile birlikte Şekil 4.38'deki kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğine göre yorumlanmıştır.

SB1 ve SB2 numunelerinin Şekil 4.38'deki kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği detaylı olarak yorumlandığı zaman, yükleme altındaki SB1 ve SB2 numunelerinin birbirinden farklı davranış sergilediği gözlemlenmiştir. SB2 numunesi, SB1 numunesinin yaklaşık 1.6 katı mak. kuvvet taşımıştır. SB1 numunesinin mak. kuvvet değerine ulaşması ve üst yüzey levhanın hasar almasından sonra kuvvet değerindeki azalmanın meydana gelişinde, grafikte de görüldüğü üzere daha geniş bir parabol eğrisinin oluştuğu, SB2 numunesinde bu yükleme aşamasında daha dar (keskin) bir parabol eğrisinin oluştuğu görülmüştür. SB1 ve SB2 numuneleri I. pik noktasına ulaştıktan sonra kuvvet değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. SB1 numunesinde kuvvet değerinde düşüş meydana gelirken numunenin deplasman değeri artmaya devam etmiştir. Grafik yorumu ve deney sırasındaki gözlemlere dayanarak CTP üst yüzey levhasının KTP üst yüzey levhasına göre daha sünek davranış sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Üst yüzey levhada hasar oluşmasından sonra kompozit kiriş numunelerine gelen yükü her iki numunede de alt yüzey levhalar taşımaya devam etmiştir. SB2 numunesinin alt yüzey levhası SB1 numunesinin 1.6 katı kadar mak. kuvvet taşımıştır. SB1 ve SB2 numuneleri mak. kuvvete ulaştıktan sonra alt yüzey levhaların, üst yüzey levhaların sergiledikleri davranışı sürdürdükleri görülmüştür. SB1 numunesinde mak. kuvvete ulaştıktan sonra kuvvet değerindeki azalma ile birlikte deplasman yapmaya devam etmesi CTP kompozitlerin sünek bir davranış sergilediğini kanıtlamıştır. SB2 numunesinde mak. kuvvete ulaştıktan sonra kuvvet değerindeki ani düşmenin gerçekleşmesi ve deplasmanın sabit olması KTP kompozitlerin gevrek bir davranış sergilediğini kanıtlamıştır. SB1 numunesinde II. pik kuvvet değerine ulaştıktan sonra kademeli olarak kuvvet değerinde düşmeler devam

etmiştir. SB2 numunesinde II. pik kuvvet değerinden sonra düşmeler devam ederken 20 mm deplasmandan itibaren numunede tekrar kuvvet artışının olduğu ve 510 N değerinde tekrar pik yaptıktan sonra ani bir gevrek kırılmanın meydana geldiği üç nokta eğilme testinde ve Şekil 4.38'deki grafikten gözlemlenmiştir. Her iki grup için numuneler taşıma özelliğini kaybettikten sonra üç nokta eğilme testi sonlandırılmıştır.



Şekil 4.38. SB1 ve SB2 numunelerinin kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğinin karşılaştırılması

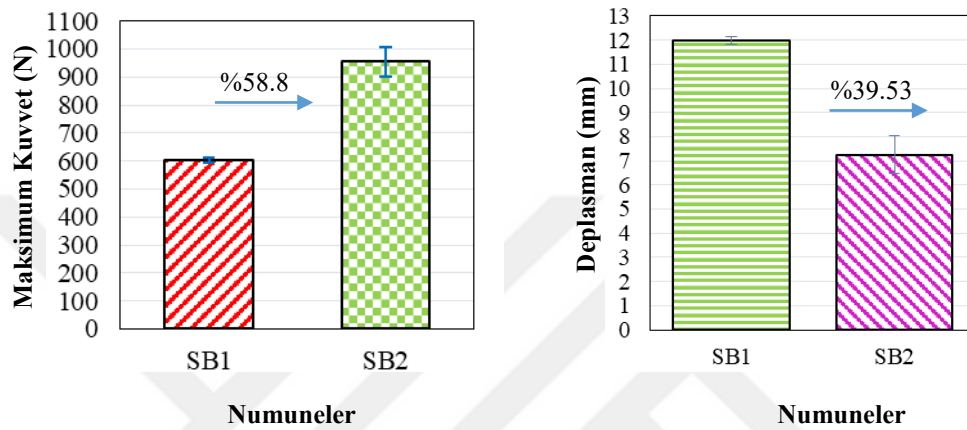
CTP ve KTP yüzey levhasına sahip sandviç kirişlerin üç nokta eğilme testi sonuçları karşılaştırıldığı zaman yükleme altındaki SB1 numunesinin mak. kuvvet değeri 613.58 N ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinin 12.08 mm, SB2 numunesinin mak. kuvvet değeri 1000.91 N olduğu ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinin 6.41 mm olduğu Şekil 4.38 ve Çizelge 4.15'de gösterilmektedir. Elde edilen bu değerlere göre KTP kompozit kirişin CTP kompozit kirişe göre mukavemet değerinin daha büyük olduğu ve daha gevrek bir malzeme özelliği taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.15. SB1 ve SB2 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri

Numune	SB1_3	SB2_2
1. pikteki kuvvet değeri (N)	613.58	1000.91
1. pikteki deplasman değeri (mm)	12.08	6.41
2. pikteki kuvvet değeri (N)	335.47	559.04
2. pikteki deplasman değeri (mm)	34.10	17.33

Her grubun ortalama değerlere göre elde edilen Şekil 4.39'daki grafikler SB1 ve SB2 numunelerinin mak. kuvvet değerlerini ve o değere denk gelen deplasman

değerlerini göstermektedir. Alt ve üst yüzeylerde sadece bir elyaf türü kullanılarak elde edilen kiriş numunelerinde karbon elyaf takviye malzemesinin kullanıldığı SB2 numunesinde cam elyaf takviye malzemesinin kullanıldığı SB1 numunesi göre taşıyabileceği mak. kuvvet değerinde %58.8 artış meydana gelirken, bu değerdeki deplasman değerinde %39.53 azalma gözlemlenmiştir. Sandviç kirişlerdeki II. pik kuvvet noktasında SB2 numunesi SB1 numunesine göre %54.18 artış, II. pik kuvvet noktasındaki deplasman değerinde %48.32 azalış geldiği tespit edilmiştir.



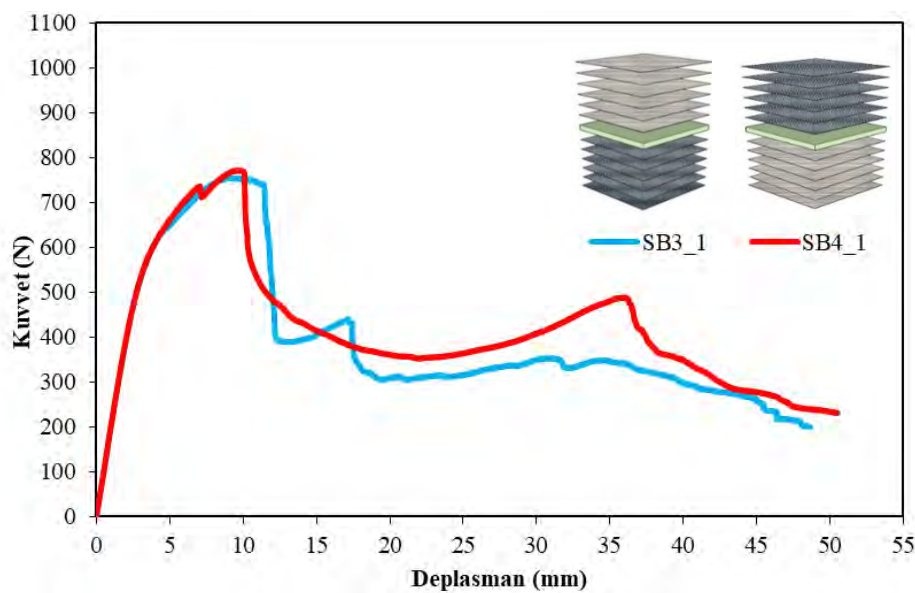
Şekil 4.39. SB1 ve SB2 numunelerinin mak. kuvvet ve deplasman karşılaştırması

4.2.3.2. Alt ve üst yüzeydeki elyaf istifleme türüne göre asimetrik sandviç kirişlerin karşılaştırılması

Alt ve üst yüzeydeki elyaf takviye türüne göre asimetrik sandviç kirişlerin, üç nokta eğilme testi altındaki davranışlarının karşılaştırılması için SB3 (SB3_1, SB3_2, SB3_3) ve SB4 (SB4_1, SB4_2, SB4_3) kombinasyonuna göre tasarım gerçekleştirilip, üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. SB3 numuneleri cam elyaf kumaşların üst yüzeyde, karbon elyaf kumaşların alt yüzeyde istiflemesi ile elde edilirken SB4 numuneleri karbon elyaf kumaşların üst yüzeyde, cam elyaf kumaşların alt yüzeyde istiflemesi ile elde edilmiştir. Üç nokta eğilme altındaki SB3 ve SB4 numunelerinin eğilme altındaki davranışları deneyin gerçekleştirilme sırasındaki incelemeler ile birlikte Şekil 4.40'daki kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğine göre yorumlanmıştır.

SB3 ve SB4 numunelerinin Şekil 4.40'daki kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği detaylı olarak yorumlandığı zaman, yükleme altındaki SB3 ve SB4 numunelerinin davranışları gözlenmiştir. SB4 numunesi, SB3 numunesinin yaklaşık 1.02 katı mak. kuvvet taşıdığı yani birbirine çok yakın bir değer olduğu görülmüştür. SB3 numunesi

mak. kuvvet değerine (I. pik) ulaştıktan sonra üst yüzey levhanın hasar alması sonucu deplasman ile birlikte kuvvet değerinde azalma görülmüştür. SB3 numunesi grafikte görüldüğü üzere deplasman ekseninde 12 mm ve 15 mm arasında 3 mm'lik deplasman yaptıktan hemen sonra kuvvet taşımaya tekrar başlamıştır. KTP alt yüzey levhanın yük taşımaya başladığı grafikteki bu bölgede ters keskin bir parabol eğrisinin oluştuğu görülmüştür. SB4 numunesi mak. kuvvet değerine ulaştıktan sonra üst yüzey levhanın hasar almasından dolayı kuvvette ani bir düşme meydana gelmiştir. SB4 numunesi grafikte görüldüğü üzere deplasman ekseninde 12 mm ve 22 mm arasında 10 mm'lik deplasman yaptıktan sonra kuvvet taşımaya tekrar başlamıştır. CTP alt yüzey levhanın yük taşımaya başladığı grafikteki bu bölgede ters geniş bir parabol eğrisinin oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.40'daki grafikte de görüldüğü üzere numuneler mak. kuvvete ulaştıktan sonra kuvvet değerindeki azalma meydana gelirken SB4 numunesi SB3 numunesinde göre daha fazla deplasman yapmıştır. Üst yüzey levhalarının yoğun hasar alması sonucu her iki numunede de gelen yükleri alt yüzey levhalar taşımaya devam etmiştir. Bunun sonucunda SB3 numunesinin II. pik noktasındaki kuvvet değeri 440.07 N'a, SB4 numunesinin II. pik noktasındaki kuvvet değeri 488.12 N'a ulaşmıştır. SB3 numunesi II. pik değerine ulaştıktan sonra kuvvette ani düşme meydana gelmiştir ve numune deplasman yapmaya devam ederken 20 mm deplasmana ulaştığında kuvvette artış meydana geldiği görülmüştür. SB4 numunesinde ise II. pik değerine ulaştıktan sonra kademeli olarak kuvvette azalma meydana gelmiştir. Her iki grup için numuneler taşıma özelliğini kaybettikten sonra üç nokta eğilme testi sonlandırılmıştır.



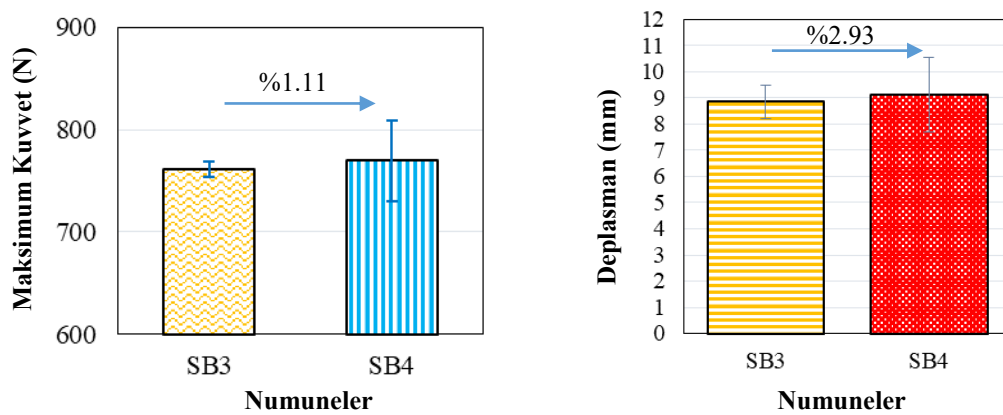
Şekil 4.40. SB3 ve SB4 numunelerinin kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğinin karşılaştırılması

Sırasıyla üst ve alt CTP, KTP ve KTP, CTP yüzey levhasına sahip sandviç kirişlerin üç nokta eğilme testi sonuçları karşılaştırıldığı zaman yükleme altındaki SB3 numunesinin mak. kuvvet değeri 754.19 N ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinin 9.09 mm, SB4 numunesinin mak. kuvvet değeri 771.16 N olduğu ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinin 9.66 mm olduğu Şekil 4.40 ve Çizelge 4.16'da gösterilmektedir. Elde edilen bu değerlere göre SB3 ve SB4 numunelerinin mak. kuvvet değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.16. SB3 ve SB4 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri

Numune	SB3_1	SB4_1
1. pikteki kuvvet değeri (N)	754.19	771.16
1. pikteki deplasman değeri (mm)	9.09	9.66
2. pikteki kuvvet değeri (N)	440.07	488.12
2. pikteki deplasman değeri (mm)	17.17	35.82

Ortalama değerlere göre elde edilen Şekil 4.41'deki grafikler SB3 ve SB4 numunelerinin mak. kuvvet değerlerini ve o değere denk gelen deplasman değerlerini göstermektedir. Alt ve üst yüzeylerde farklı elyaf türü kullanılarak elde edilen kiriş numunelerinde karbon elyaf takviye malzemesinin alt yüzeyde kullanıldığı SB3 numunesine göre karbon elyaf takviye malzemesinin üst yüzeyde kullanıldığı SB4 numunesinin taşıyabileceği mak. kuvvet değerinde %1.11 artış meydana gelirken, bu değerdeki deplasman değerinde %2.93 artış gözlemlenmiştir. Sandviç kirişlerdeki II. pik kuvvet noktasında SB3 numunesi SB4 numunesine göre %1.16 artış, II. pik kuvvet noktasındaki deplasman değerinde %121.38 artış meydana geldiği tespit edilmiştir.



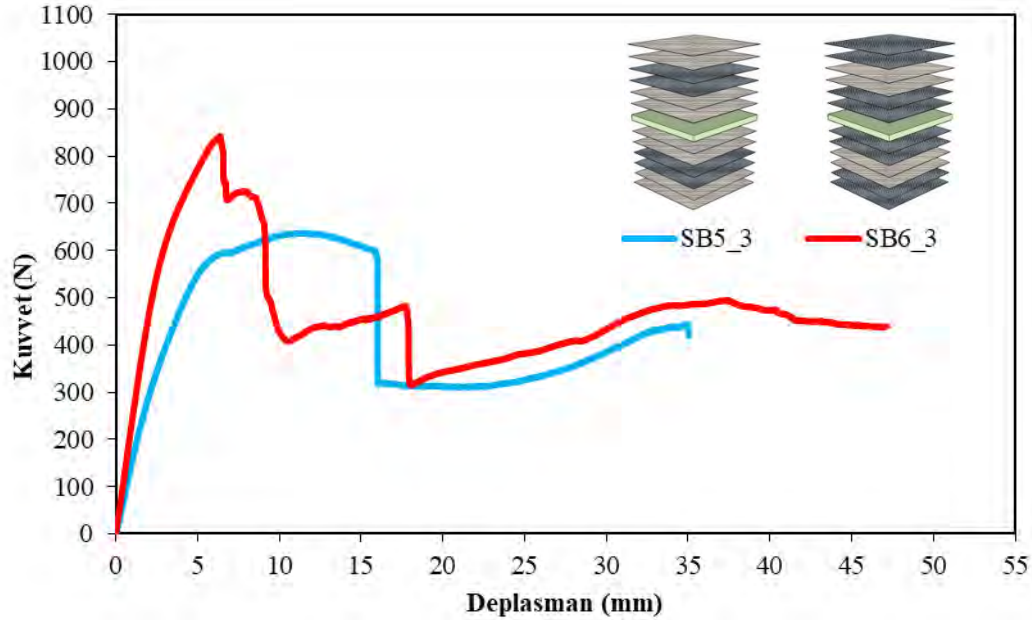
Şekil 4.41. SB3 ve SB4 numunelerinin mak. kuvvet ve deplasman karşılaştırması

4.2.3.3. Alt ve üst yüzeydeki elyaf istifleme türüne göre simetrik hibrid sandviç kirişlerin karşılaştırılması

Alt ve üst yüzeydeki elyaf takviye türüne göre hibrid simetrik sandviç kirişlerin, üç nokta eğilme testi altındaki davranışlarının karşılaştırılması için SB5 (SB5_1, SB5_2, SB5_3) ve SB6 (SB6_1, SB6_2, SB6_3) kombinasyonuna göre tasarım gerçekleştirilip, üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. SB5 numuneleri CTP, KTP, CTP istifleme sıralamasına bağlı olarak elyaf kumaşların çekirdeğe göre simetrik olarak dizayn edilmesi ile elde edilmiştir. SB6 numuneleri KTP, CTP, KTP sırasına bağlı olarak ²elyaf kumaşların çekirdeğe göre simetrik olarak dizayn edilmesi (istiflenmesi) ile elde edilmiştir. Üç nokta eğilme altındaki SB5 ve SB6 numunelerinin eğilme altındaki davranışları deneyin gerçekleştirilme sırasındaki incelemeler ile birlikte Şekil 4.42'deki kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğine göre yorumlanmıştır.

SB5 ve SB6 numunelerinin Şekil 4.42'deki kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği detaylı olarak yorumlandığı zaman, yükleme altındaki SB5 ve SB6 numunelerinin davranışları gözlenmiştir. SB5 numunesi mak. kuvvet değerine ulaşırken 7 mm deplasman değerine karşılık gelen noktadaki ani yük değişimi, kuvvetin KTP tabakasına aktarılmasından kaynaklı olduğu görülmüştür. Numune I. pik noktasına ulaştıktan sonra kuvvette 300 N'a kadar ani bir düşme eğilimi görülmüştür ve 15 mm'ye kadar deplasman yapmıştır. SB6 numunesi mak. kuvvet değerine ulaştıktan sonra grafikte gösterdiği üzere tabakalar arası yük aktarımı yaparak kuvvet yaklaşık 400 N'a kadar düşmüştür. I. pik noktasından 10 mm deplasmana kadar olan eğrideki zikzaklar KTP, CTP, KTP üst yüzey levhasındaki tabakalar arasındaki yük aktarımının gerçekleştiğini göstermektedir. Grafiğe ve deney esnasındaki yorumlara dayanarak, mak. kuvvete ulaştıktan sonra meydana gelen hasarlardan dolayı numunelerin taşıma özelliğini alt yüzey levhalar üstlenmiştir. SB5 numunesi 15 mm deplasmandan sonra tekrar yük taşımaya başlamışken ters ve geniş bir parabol eğrisi oluşturmuştur. II. pik noktasına ulaştıktan sonra artan deplasmanla birlikte kademeli olarak yükte azalmalar meydana gelmiştir. SB6 numunesinde KTP'lerin yoğun olmasından dolayı kuvvet değişimlerinin ani olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak SB6 numunesi 10 mm deplasmandan sonra tekrar yük taşımaya başlamasından itibaren daha lineer bir artışla II. pik noktasına ulaştığı grafiğe bakarak gözlemlenmiştir. SB6 numunesi I. pik noktasından sonra alt yüzey levhalar yoğun hasar almıştır ve ani bir kuvvet azalması meydana gelmiştir. Numune 17 mm deplasmandan sonra KTP'lerin yoğun olmasından kaynaklı SB2 ve SB3

numunelerine benzer biçimde kuvvette az miktarda artış meydana gelmiştir. Her iki numune grubu kuvvet taşıma özelliğini kaybettikten sonra üç nokta eğilme testi sonlandırılmıştır.



Şekil 4.42. SB5 ve SB6 numunelerinin kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğinin karşılaştırılması

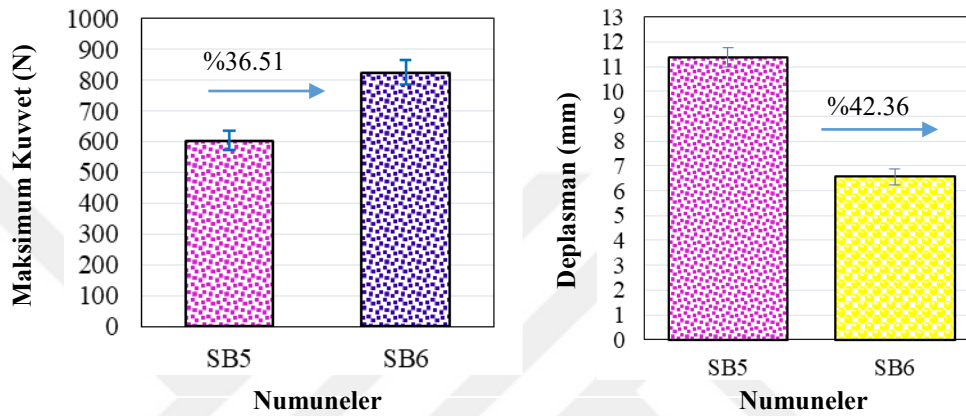
Çekirdeğe göre simetrik ikişer tabaka olarak CTP, KTP, CTP elyaf istifleme sırasına sahip SB5 ile KTP, CTP, KTP elyaf istifleme sırasına sahip SB6 sandviç kirişlerin üç nokta eğilme testi sonuçları karşılaştırıldığı zaman yükleme altındaki SB5 numunesinin mak. kuvvet değeri 637.21 N ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinin 11.26 mm, SB6 numunesinin mak. kuvvet değeri 842.78 N olduğu ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinin 6.39 mm olduğu Şekil 4.42 ve Çizelge 4.17’de gösterilmektedir. Elde edilen bu değerlere göre SB6 mak. kuvvet değeri SB5 numunesinin mak. kuvvet değerinin yaklaşık 1.3 katı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.17. SB5 ve SB6 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri

Numune	SB5_3	SB6_3
1. pikteki kuvvet değeri (N)	637.21	842.78
1. pikteki deplasman değeri (mm)	11.26	6.39
2. pikteki kuvvet değeri (N)	444.86	467.6
2. pikteki deplasman değeri (mm)	34.92	36.92

Ortalama değerlere göre elde edilen Şekil 4.43’de verilen grafikler SB5 ve SB6 numunelerinin mak. kuvvet değerlerini ve o değere denk gelen deplasman değerlerini

göstermektedir. KTP, CTP, KTP elyaf takviyelerinin kullanıldığı hibrid simetrik sandviç kirişte yani SB6 numune grubunda CTP, KTP, CTP elyaf takviyelerinin kullanıldığı hibrid simetrik kirişe yani SB5 numunesine göre taşıyabileceği mak. kuvvet değerinde %36.51 artış meydana gelirken, bu değerdeki deplasman değerinde %42.36 azalma gözlemlenmiştir. Sandviç kirişlerdeki II. pik kuvvet noktasında SB6 numunesi SB5 numunesine göre %13.64 artış, II. pik kuvvet noktasındaki deplasman değerinde %49.03 azalış meydana geldiği tespit edilmiştir.



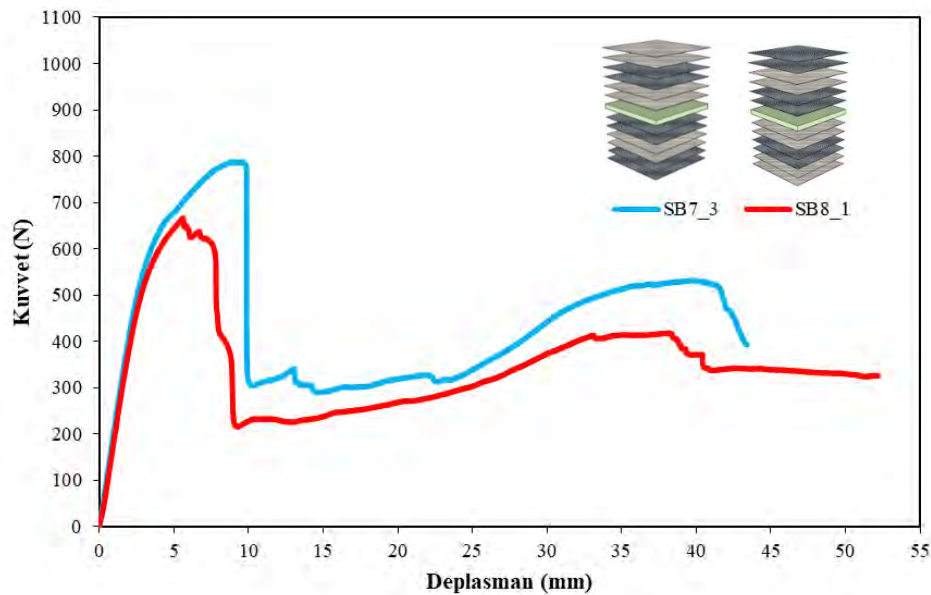
Şekil 4.43. SB5 ve SB6 numunelerinin mak. kuvvet ve deplasman karşılaştırması

4.2.3.4. Alt ve üst yüzeydeki elyaf istifleme türüne göre asimetrik hibrid sandviç kirişlerin karşılaştırılması

Alt ve üst yüzeydeki elyaf takviye türüne göre hibrid asimetrik sandviç kirişlerin, üç nokta eğilme testi altındaki davranışlarını karşılaştırılması için SB7 (SB7_1, SB7_2, SB7_3) ve SB8 (SB8_1, SB8_2, SB8_3) kombinasyonuna göre tasarım gerçekleştirilip, üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. SB7 numuneleri üst yüzey levhada sırasıyla CTP, KTP, CTP elyaf kumaşların çekirdeğe göre asimetrik olarak alt yüzey levhada KTP, CTP, KTP olarak, istiflenmesi ile elde edilmiştir. SB8 numuneleri üst yüzey levhada sırasıyla KTP, CTP, KTP elyaf kumaşların çekirdeğe göre asimetrik olarak alt yüzey levhada CTP, KTP, CTP olarak istiflenmesi ile elde edilmiştir. Üç nokta eğilme altındaki SB7 ve SB8 numunelerinin eğilme altındaki davranışları deneyin gerçekleştirilme sırasındaki incelemeler ile birlikte Şekil 4.44'deki kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiğine göre yorumlanmıştır.

SB7 ve SB8 numunelerinin Şekil 4.44'deki kuvvet (N)-deplasman (mm) grafiği detaylı olarak yorumlandığı zaman, yükleme altındaki SB7 ve SB8 numunelerinin

davranışları gözlenmiştir. Grafikten ve üç nokta eğilme testi esnasındaki yorumlara bağlı olarak SB7 ve SB8 numunelerinin eğilme altındaki davranışları birbirileri ile benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. SB7 numunesi mak. kuvvet değerine ulaştıktan sonra 10 mm deplasman değerindeyken ani bir kuvvet düşüşü meydana gelmiştir. SB8 numunesi mak. kuvvete ulaştıktan sonra grafikte görüldüğü üzere zikzaklar şeklinde kuvvette azalmalar meydana gelmiştir. Her iki gruptaki numuneler 10 mm deplasman değerinde minimum kuvvet taşımıştır. Üst yüzey levhalar yoğun hasar aldıktan sonra numunelere gelen kuvveti alt yüzey levhalar taşımaya başlamıştır. SB8 numunesi SB7 numunesine göre 10 mm ve 30 mm değer aralığında daha lineer bir artış sergilemiştir. Her iki numune II. pik noktasına ulaştıktan sonra kuvvet değerinde azalmalar meydana gelmeye başlamıştır ve numuneler kuvvet taşıma özelliğini kaybettikten sonra deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.44. SB7 ve SB8 numunelerinin kuvvet (N)-deplasman(mm) grafiğinin karşılaştırılması

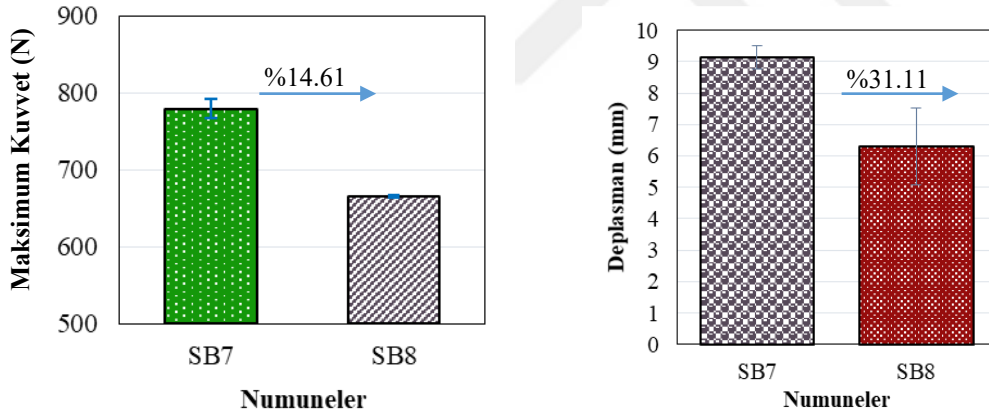
Sırasıyla üst ve alt ikişer tabaka CTP, KTP, CTP ve KTP, CTP, KTP istifleme sırasından oluşan SB7 numunesi ile KTP, CTP, KTP ve CTP, KTP, CTP istifleme sırasından oluşan SB8 numunesinin üç nokta eğilme testi sonuçları karşılaştırıldığı zaman yükleme altındaki SB7 numunesinin mak. kuvvet değeri 787.37 N ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinin 9.09 mm, SB8 numunesinin mak. kuvvet değeri 666.62 N olduğu ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinin 5.61 mm olduğu Şekil 4.44 ve

Çizelge 4.18’de gösterilmektedir. Elde edilen bu değerlere göre SB7 mak. kuvvet değeri SB8 numunesinin mak. kuvvet değerinin yaklaşık 1.2 katı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.18. SB7 ve SB8 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri

Numune	SB7_3	SB8_1
1. pikteki kuvvet değeri (N)	787.37	666.62
1. pikteki deplasman değeri (mm)	9.09	5.61
2. pikteki kuvvet değeri (N)	531.56	418.03
2. pikteki deplasman değeri (mm)	39.78	38.19

Ortalama değerlere göre elde edilen Şekil 4.45’deki grafikler SB7 ve SB8 numunelerinin mak. kuvvet değerini ve o değere denk gelen deplasman değerlerini göstermektedir. Üst yüzeyde KTP, CTP, KTP alt yüzeyde CTP, KTP, CTP elyaf istiflemesinden oluşan sandviç kirişin mak. kuvvet değeri üst yüzeyde CTP, KTP, CTP alt yüzeyde KTP, CTP, KTP istiflemesinden oluşan sandviç kirişe göre %14.61 azalırken bu değerdeki deplasman değerinin %31.11 azaldığı, II. pik kuvvet noktasının değeri %4.98 azalırken bu değerdeki deplasman değerinin %9.74 azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.45. SB7 ve SB8 numunelerinin mak. kuvvet ve deplasman karşılaştırması

Gerçekleştirilen çekme testi ve üç nokta eğilme testinin tüm sonuçları Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.19’da çekme numuneleri olarak her bir grubun üçerli tekrarları olmak üzere toplamdaki 12 adet numunenin mak. çekme gerilme değeri, % yüzde çekme uzama değeri, statik tokluk değeri ve çekme elastisite modülü değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.19. ST1-4 numunelerinin mekanik özellikleri

Numune	$\sigma_{\text{mak.}}$ (MPa)	ϵ (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	Eç (GPa)
ST1_1	588.76	6.41	16685	13.88
ST1_2	673.94	7.05	22399	13.17
ST1_3	658.64	6.68	20258	14.32
ST2_1	1346.07	7.01	36288	24.16
ST2_2	1064.86	5.09	24317	26.20
ST2_3	1376.85	6.16	38046	28.31
ST3_1	910.64	5.54	21946	20.20
ST3_2	949.27	5.42	22546	20.19
ST3_3	880.316	5.42	21349	20.19
ST4_1	995.24	5.86	26022	26.26
ST4_2	887.69	4.95	20706	27.72
ST4_3	1336.95	6.08	37332	34.80

Çizelge 4.20’de eğilme numuneleri olarak her bir grubun üçerli tekrarları olmak üzere toplamdaki 24 adet numunenin mak. kuvvet değeri ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.20. SB1-8 numunelerinin mak. kuvvet ve mak. kuvvetteki deplasman değerleri

Numune	Mak. kuvvet (N)	Deplasman (mm)
SB1_1	596.22	12.08
SB1_2	600.85	11.81
SB1_3	613.58	12.08
SB2_1	953.56	7.36
SB2_2	1000.91	7.97
SB2_3	899.54	6.41
SB3_1	754.19	9.09
SB3_2	760.00	8.13
SB3_3	769.74	9.36
SB4_1	771.16	9.66
SB4_2	808.59	10.19
SB4_3	729.59	7.52
SB5_1	596.44	11.81
SB5_2	578.21	11.07
SB5_3	637.21	11.26
SB6_1	780.03	6.91
SB6_2	850.64	6.37
SB6_3	842.78	6.39
SB7_1	765.13	8.81
SB7_2	785.24	9.52
SB7_3	787.37	9.09
SB8_1	666.62	5.61
SB8_2	663.09	7.71
SB8_3	666.68	5.57

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılan tez çalışmasının amacı, sandviç kiriş tasarımında kullanılan elyaf türlerinin ve elyaf diziliş (istifleme) sıralamasının üç nokta eğilme altındaki kompozit malzemenin mekanik özelliklere etkisini incelemektir. Tez çalışması kapsamında yüzey levha üretiminde takviye malzemesi olarak tek yönlü cam kumaş ve karbon kumaş, matris malzemesi olarak epoksi reçine ve çekirdek bölgesi için PVC köpük kullanılmıştır. Sandviç kirişin mekanik özelliklerini belirlemek ve üç nokta eğilme testi altındaki davranışını yorumlayabilmek için çekme testini uygulamak amacıyla 4 farklı kombinasyonda (ST1, ST2, ST3 ve ST4), üç nokta eğilme testini uygulamak amacıyla 8 farklı kombinasyonda (SB1, SB2, SB3, SB4, SB5, SB6, SB7, SB8) 0° elyaf yönlendirmesine sahip numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme üretim aşamasında ele yatırma yöntemi ile birlikte vakum torbalama yöntemi tercih edilmiştir. Üretimi tamamlanan numunelere çekme testi ve üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Çekme testi sonucunda elde edilen verilere göre karbon elyafın kullanıldığı yüzey levha numune grubunun çekme gerilme değerinin en büyük olduğu görülürken cam elyafın kullanıldığı yüzey levhalarının çekme gerilme değerinin en küçük olduğu görülmüştür. Karbon elyaftan oluşan numune cam elyaftan oluşan numuneye göre çekme mukavemet değerinde %97.14 artış sağlarken cam elyafın kullanıldığı kompozitte çekme uzama değeri karbon elyafın kullanıldığı kompozite göre %10.18 artmıştır. Kısaca tek bir takviye malzeme türünden oluşan yüzey levhalarında karbon elyafın ve cam elyafın kendi mekanik özelliklerinin elde edilen kompozit malzemeye doğrudan yansıdığı görülmüştür.
- Hibrit tasarım yapılan çekme numunelerinde KTP, CTP, KTP dizilim konfigürasyonunda karbon elyaf tabaka sayısının CTP, KTP, CTP dizilim konfigürasyonuna göre daha fazla olmasının avantajı sayesinde mak. çekme gerilme değerinin arttığı tespit edilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen grafiğe göre çekme uzama değerinin cam elyaftan oluşan kompozitte mak. değer CTP, KTP, CTP

hibrit dizilim konfigürasyonuna sahip kompozitte minimum değer olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çekme testinde elastisite modülünün hibrit yapıdaki KTP, CTP, KTP dizilim konfigürasyonunda mak. iken cam elyafta minimum olduğu elde edilmiştir. Böylece hibrit kompozit üretimi ile mak. verim elde edildiği sonucu çıkarılmıştır.

- Elde edilen çekme testi sonucuna göre statik tokluk değerinin karbon elyaftan oluşan grupta mak. iken, cam elyaftan oluşan grupta min. olduğu tespit edilmiştir. Hibrit numunelerde KTP, CTP, KTP dizilim konfigürasyonunun CTP, KTP, CTP istiflemesine göre statik tokluk değerinin daha büyük olduğu görülmüştür. Yüzey levhalarında kullanılan karbon elyaf tabaka sayısının artması kompozitin statik tokluğunu iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Çekme testi sonuçlarına göre takviye malzemesi olarak kullanılan elyafın türü ve hibrit yapılardaki dizilim konfigürasyonu malzemenin çekme mukavemeti, çekme uzaması, statik tokluk ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini etkilediği görülmüştür. Çekme testine dair tüm maddelerin özeti olarak karbon elyafın mukavemet değeri, statik tokluğu ve cam elyafın şekil değiştirme değeri ile en avantajlı numune üretimini gerçekleştirmek için hibrit yüzey levhalarını üretmenin yapının mekanik niteliklerini iyileştirdiği söylenebilir.
- Sandviç giriş tasarımında, takviye malzemesi olarak cam elyaf kullanılması kompozitin süneklilik davranışını olumlu yönde etkilerken karbon elyaf kullanılması istenmeyen gevrek kırılmalara neden olduğu görülmüştür. Cam elyaftan oluşan kompozitin taşıyabileceği mak. kuvvet karbon elyaftan oluşan kompozitin taşıyabileceği mak. kuvvet değerine göre %36.75 azaldığı olduğu görülmüştür.
- Üç nokta eğilme test sonucuna göre üst ve alt yüzeyinde tek türdeki elyaf kullanımlarında cam elyaf kumaşın yerine karbon elyaf kumaşın kullanılması mak. kuvvet değerini yaklaşık %58.8 artırırken II. pik kuvvet noktasının değerini %54.18 artırmıştır. Bunun sonucu olarak tek türdeki elyaf takviyesi ile simetrik dizayn edilen sandviç girişlerde kullanılan cam elyaf ya da karbon elyafın mak. kuvvet değerini önemli ölçüde etkilediği ve karbon elyaf kumaşın takviye malzemesi olarak kullanılmasının eğilme mukavemeti açısından önemli avantaj sağladığına ulaşılmıştır.
- Üst ve alt yüzeyi bir elyaf kumaş türünün kullanılması ile üretilen simetrik sandviç giriş tasarımında cam elyaf kumaşın yerine karbon elyaf kumaşın tercih edilmesi I. pik kuvvet noktasına karşılık gelen deplasman değerini yaklaşık % 39.53 azaltırken II. pik kuvvet noktasına karşılık gelen deplasman değerini %48.32 artırmıştır. Cam

elyaf ve karbon elyaf kumaşlardan oluşan sandviç kirişlerin kuvvet (N)-deplasman (mm) grafikleri ve numunelerin hasar görüntüleri incelendiği zaman, üst ve alt yüzeyleri, cam elyaftan oluşan sandviç kirişte sünek kırılma (Prograsif-ilerlemeli hasar) meydana gelirken karbon elyaftan oluşan sandviç kirişte istenmeyen durum olan gevrek kırılmanın (Catastrophic-yıkıcı hasar) meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Buna bağlı olarak tek türde elyaf takviyesi kullanılan simetrik sandviç kiriş tasarımında cam elyaf malzemesinin yerine karbon malzemesinin kullanılması sandviç kiriş deplasman değerlerini ve buna bağlı olarak kırılma davranışlarını doğrudan etkilediği sonucu elde edilmiştir ve cam elyafın sünek kırılma davranışı ile yapıya avantaj sağlarken karbon elyafın kullanılması yapıda istenmeyen gevrek kırılma davranışına neden olduğu görülmüştür.

- İki farklı tür elyaf takviyesi kullanılarak hibritlenen asimetric biçimde tasarlanan sandviç kirişlerde alt ve üst yüzeylerin kırılma davranışını kullanılan elyaflar belirlemiştir. Karbonun kullanıldığı yüzeyde gevrek kırılmalar meydana gelirken, camın kullanıldığı yüzeyde sünek kırılmaların meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Üç nokta eğilme test sonucuna göre çekirdek bölgesine bağlı olarak asimetric dizayn edilen üst yüzeyi cam elyaf kumaştan ve alt yüzeyi karbon elyaf kumaştan oluşan sandviç kirişin taşıyabileceği ortalama mak. kuvvet değeri ile üst yüzeyi karbon elyaf kumaştan ve alt yüzeyi cam elyaf kumaştan oluşan sandviç kirişin taşıyabileceği ortalama mak. kuvvet değerinin birbirine çok yakın olduğuna ulaşılmıştır. Üst yüzeydeki cam elyafın yerini karbon elyafın, alt yüzeydeki karbon elyafın yerini cam elyafın alması (istiflenmesi) ile sırasıyla I. ve II. pik noktasındaki kuvvet değerinde yaklaşık %1.11 ve %1.16' lik bir artış gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak cam elyaf ve karbon elyaf olmak üzere iki farklı elyaf türü ile asimetric dizayn edilen sandviç kirişte elyaf konfigürasyonunun değişmesi mak. kuvvet değerine etkisinin çok az olduğu sonucu elde edilmiştir.
- Çekirdek bölgesine bağlı olarak asimetric dizayn edilen üst yüzeyi cam elyaf kumaştan ve alt yüzeyi karbon elyaf kumaştan oluşan sandviç kirişte I. pik kuvvet noktasına karşılık gelen deplasman değeri ile üst yüzeyi karbon elyaf ve alt yüzeyi cam elyaf kumaştan oluşan sandviç kirişin I. pik kuvvet noktasına karşılık gelen deplasman değerinin birbirine çok yakın olduğuna görülürken karbon elyafın üst yüzeyde olduğu durumda II. pik kuvvet noktasına karşılık gelen deplasman değerinin cam elyafın üst yüzeyde olduğu duruma göre yaklaşık % 121.38 artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna bağlı olarak cam elyaf ve karbon elyaf takviye malzemeleri

kullanılarak çekirdek bölgesine göre asimetric dizayn edilen sandviç kirişlerde I. pik noktasına karşılık gelen deplasman değerini yaklaşık %2.93 gibi çok küçük değerde etkilerken, II. pik kuvvet noktasına karşılık gelen deplasman değerini büyük ölçüde etkilediği sonucu elde edilmiştir. Asimetric sandviç kirişlerin kuvvet (N)-deplasman (mm) grafikleri ve numunelerin hasar görüntüleri incelendiği zaman, cam elyafın üst yüzeyde dizayn edilmesi (istiflenmesi) ile oluşan sandviç kiriş I. pik noktasında ulaştıktan sonra kuvvet değerinde azalma meydana gelirken sandviç kirişin üst yüzey levhasında sünek kırılma davranışını sergilediği, karbon elyafın üst yüzeyde dizayn edilmesi ile oluşan sandviç kirişin üst yüzey levhasında istenmeyen gevrek kırılmanın gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Sandviç kiriş II. pik kuvvet noktasına ulaşırken alt yüzeyin cam elyaf olduğu kiriş numunesinde alt yüzey levhasının sünek bir davranış sergilediği, alt yüzeyin karbon elyaf olduğu kiriş numunesinde gevrek bir davranış sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Kısaca çekirdeğe göre cam elyaf ve karbon elyaf olmak üzere iki farklı elyaf türü kullanılarak asimetric olarak üretilen üç nokta eğilme altındaki sandviç kirişlerde alt ve üst yüzeydeki elyaf dizilim konfigürasyonunun değişmesi yüzeylerde meydana gelen kırılma davranışını belirlediği tespit edilmiştir bunun sonucunda cam elyafın olduğu yüzey levhasında sünek kırılma davranışı meydana gelirken karbon elyafın olduğu yüzeyde gevrek kırılma meydana gelmektedir.

- Mukavemet, süneklilik, statik tokluk, hafiflik ve maliyet gibi özelliklerin en iyi seviyede olabilmesi için hibrit tasarımlar gerçekleştirilmesi sonucunda cam ve karbon elyafların bir arada kullanılması durumunda cam elyaf kompozitin sünekliliğini artırırken, karbon elyaf kompozitin hafifliğini ve mukavemet değerini artırdığı tespit edilmiştir.
- Üç nokta eğilme test sonucuna göre çekirdeğe bağlı olarak simetric dizayn edilen hibrit sandviç kiriş tasarımında üst ve alt yüzeyi ikişer tabaka olarak KTP, CTP, KTP elyaf takviyelerinden (istifleme diziliminden) oluşan sandviç kirişin mak. kuvvet değerinin üst ve alt yüzeyi ikişer tabaka olarak CTP, KTP, CTP elyaf takviyelerinden oluşan sandviç kirişe göre yaklaşık %36.41 artarken, II. pik kuvvet değerinde 13.64 artmış görülmüştür. Bunun sonucu olarak asimetric dizayn edilen sandviç kiriş numunesinde karbon elyafın kullanıldığı tabaka sayısının artması ile birlikte sandviç kirişin taşıyabileceği yük kapasitesinin arttığı sonucu elde edilmiştir.
- Hibrit simetric sandviç kiriş olarak dizayn edilen kiriş numunelerinde üst ve alt yüzeyi ikişer tabaka olarak KTP, CTP, KTP elyaf dizilim konfigürasyonu yerine CTP, KTP,

CTP elyaf dizilim konfigürasyonu kullanıldığı zaman mak. kuvvet değerine karşılık gelen deplasman değeri yaklaşık %103.96 artırırken II. pik kuvvet noktasına denk gelen deplasman değerini yaklaşık %96.17 artırdığı görülmüştür. Bu duruma bağlı olarak cam elyaf tabaka sayısının artması sandviç kirişte mak. kuvvete denk gelen deplasman değerini önemli derecede artırdığı sonucu elde edilmiştir. Kuvvet (N)-deplasman (mm) grafikleri ve numunelerin hasar görüntüleri incelendiği zaman, üst ve alt yüzeyleri CTP, KTP, CTP elyaf dizilim konfigürasyonuna sahip sandviç kirişin alt ve üst yüzey levhalarında sünek kırılma davranışı sergilerken KTP, CTP, KTP elyaf dizilim konfigürasyonuna sahip sandviç kirişin alt ve üst yüzey levhalarında istenmeyen gevrek kırılma davranışının gerçekleştiği görülmüştür. Kısaca hibrit simetrik olarak dizayn edilen sandviç kirişlerde takviye malzemesi olarak kullanılan cam elyaf tabaka sayısının artması kirişin daha sünek davranış sergilemesini sağlarken, karbon elyaf tabaka sayısının artması kirişin gevrek davranış sergilemesine neden olduğu sonucu tespit edilmiştir.

- Üç nokta eğilme test sonucuna göre çekirdek bölgesine bağlı olarak asimetrik dizayn edilen üst yüzeyde KTP, CTP, KTP ve alt yüzeyde CTP, KTP, CTP dizilim konfigürasyonun yerine üst yüzeyde CTP, KTP, CTP ve alt yüzeyde KTP, CTP, KTP dizilim konfigürasyonun kullanılması mak. kuvveti yaklaşık %17.1 artırırken II. pik kuvvet noktasındaki değeri yaklaşık %5.24 artırdığı gözlemlenmiştir. Bunlara bağlı olarak hibrit asimetrik sandviç kirişlerde elyaf istifleme sırasında alt yüzeyde kullanılan karbon elyaf tabaka sayısının artması kirişin taşıyabileceği mak. kuvvet değerini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Hibrit asimetrik sandviç kiriş olarak tasarlanan kiriş numunelerinde üst yüzeyde KTP, CTP, KTP ve alt yüzeyde CTP, KTP, CTP dizilim konfigürasyonun yerine üst yüzeyde CTP, KTP, CTP ve alt yüzeyde KTP, CTP, KTP dizilim konfigürasyonun tercih edilmesi ile I. pik kuvvet noktasına denk gelen deplasman değerini yaklaşık %45.16 artırırken II. pik kuvvet noktasına denk gelen deplasman değerini %10.8 artırdığı görülmüştür.
- Kiriş tasarımında çekirdek bölgesinin sayesinde gelen kuvvetler sırasıyla diğer tabakalara aktarılıp kuvvet değerinde sürekli düşmeler meydana gelmesini önleyerek üst tabakanın hasar almasından sonra alt tabakada tekrar yük artışını meydana gelmesi sağlanmıştır.

5.2 Öneriler

Yapılan tez çalışması bütünüyle göz önüne alınarak şu önerilerde bulunulabilir:

- Malzeme özelliği tanımlamak için gerekli olan parametreler belirlendikten sonra Sonlu Elemanlar Analizi yapılabilir.
- Elyaf türlerine aramid kumaş eklenerek kombinasyonlar genişletilebilir.
- Sandviç kirişte, çekirdek malzeme türü değişken olarak kabul edilip yeni tasarım yapılabilir.
- Aynı kombinasyonlar kullanılarak farklı ebatlarda sandviç kiriş tasarlanabilir.
- Diğer parametreler sabit tutularak farklı elyaf yönlendirme açlarına sahip sandviç kiriş tasarlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdurohman, K., Satrio, T., Muzayadah, N. L. ve Teten, 2018, A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites, *Journal of Physics: Conference Series*, 1130, 012018.
- Advani, S. ve Hsiao, K.-T., 2012, Introduction to composites and manufacturing processes, In: *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Eds: Elsevier, p. 1-12.
- Ariana, A. ve Mohammadi, A. K., 2020, Nonlinear dynamics and bifurcation behavior of a sandwiched micro-beam resonator consist of hyper-elastic dielectric film, *Sensors and Actuators A: Physical*, 312, 112113.
- Campbell, F. C., 2010, *Structural composite materials*, ASM international, p.
- Cao, P. ve Niu, K., 2020, New unified model of composite sandwich panels/beams buckling introducing interlayer shear effects, *Composite Structures*, 252, 112722.
- Carrera, E., Fazzolari, F. A. ve Cinefra, M., 2017, Chapter 13 - Thermal stresses in functionally graded materials, In: *Thermal Stress Analysis of Beams, Plates and Shells*, Eds: Carrera, E., Fazzolari, F. A. ve Cinefra, M., *Oxford: Academic Press*, p. 375-391.
- Chami, G. M. B., Kahil, A. ve Hadji, L., 2022, Influence of porosity on the fundamental natural frequencies of FG sandwich beams, *Materials Today: Proceedings*, 53, 107-112.
- Chawla, K. K. ve Chawla, N., 2017, Fibrous reinforcements for composites, In: *Comprehensive Composite Materials II*, Eds: Elsevier, p. 1-12.
- Cheng, Q., 2012, *Fiber-Reinforced Composites*, *New York*, Nova Science Publishers, Inc, p.
- Cheng, S., Qiao, P., Chen, F., Fan, W. ve Zhu, Z., 2016, Free vibration analysis of fiber-reinforced polymer honeycomb sandwich beams with a refined sandwich beam theory, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 18 (2), 242-260.
- Dariushi, S. ve Sadighi, M., 2014, A new nonlinear high order theory for sandwich beams: An analytical and experimental investigation, *Composite Structures*, 108, 779-788.
- Devasia, R., Painuly, A., Devapal, D. ve Sreejith, K., 2021, Continuous fiber reinforced ceramic matrix composites, In: *Fiber Reinforced Composites*, Eds: Elsevier, p. 669-751.

- Eckold, G., 1994, Design and manufacture of composite structures, Woodhead publishing, p.
- Eric, C., William, C., Francois, M. ve Keith, A., 2020, Care and Repair of Advanced Composites, *Warrendale, Pennsylvania*, SAE International, p.
- Fazzolari, F. A., 2017, 2 - Sandwich Structures, In: Stability and Vibrations of Thin Walled Composite Structures, Eds: Abramovich, H.: Woodhead Publishing, p. 49-90.
- Fiore, V. ve Valenza, A., 2013, 5 - Epoxy resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites, In: Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications, Eds: Bai, J.: Woodhead Publishing, p. 88-121.
- Garouge, S. E. L., Tarfaoui, M., Hashim Hassoon, O., Minor, H. E. L. ve Bendarma, A., 2022, Effect of stacking sequence on the mechanical performance of the composite structure under slamming impact, *Materials Today: Proceedings*, 52, 29-39.
- Gaur, A. K. ve Aggarwal, A., 2021, Effects of varying face sheet thickness and panel shape on flexural strength of a composite sandwich structure, *Materials Today: Proceedings*, 38, 218-222.
- Gemi, L., 2014, Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı, *Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya-Turkey*.
- Gemi, L., Madenci, E. ve Özkılınç, Y. O., 2020, Çelik, Cam FRP ve hibrit donatılı betonarme kirişlerin eğilme performansının incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2), 1470-1483.
- Gemi, L., Madenci, E. ve Özkılınç, Y. O., 2021, Experimental, analytical and numerical investigation of pultruded GFRP composite beams infilled with hybrid FRP reinforced concrete, *Engineering Structures*, 244, 112790.
- Giordano, A., Mao, L. ve Chiang, F.-P., 2021, Full-field experimental analysis of a sandwich beam under bending and comparison with theories, *Composite Structures*, 255, 112965.
- Grande, D. H., Greist, S., Jessie, T. ve Daniel, J., 2018, 3.18 Composites in Sports Applications.
- Gupta, A. ve Pradyumna, S., 2022, Geometrically nonlinear dynamic analysis of variable stiffness composite laminated and sandwich shell panels, *Thin-Walled Structures*, 173, 109021.
- Hatti, P. S., L, S. K., Somanakatti, A. B. ve M, R., 2022, Investigation on tensile behavior of glass-fiber reinforced polymer matrix composite with varying orientations of fibers, *Materials Today: Proceedings*, 54, 137-140.

- Hindersmann, A., 2019, Confusion about infusion: An overview of infusion processes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 126, 105583.
- Hollaway L.C., H. P. R., 2001, Introduction, In: *Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure*, Eds, p. 1-4.
- Hollaway, L. C. ve Head, P. R., 2001, Chapter 5 - FRP strengthening and repair of reinforced concrete systems, In: *Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure*, Eds: Hollaway, L. C. ve Head, P. R., *Oxford: Elsevier Science Ltd*, p. 109-159.
- Hsiao, K. T. ve Heider, D., 2012, 10 - Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites, In: *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Eds: Advani, S. G. ve Hsiao, K.-T.: Woodhead Publishing, p. 310-347.
- Kazemi, M., 2021, Experimental analysis of sandwich composite beams under three-point bending with an emphasis on the layering effects of foam core, *Structures*, 29, 383-391.
- Kim, Y. J., 2019, State of the practice of FRP composites in highway bridges, *Engineering Structures*, 179, 1-8.
- Kumar Sharma, A., Bhandari, R., Sharma, C., Krishna Dhakad, S. ve Pinca-Bretotean, C., 2022, Polymer matrix composites: A state of art review, *Materials Today: Proceedings*.
- Li, G., Fang, Y., Hao, P. ve Li, Z., 2017, Three-point bending deflection and failure mechanism map of sandwich beams with second-order hierarchical corrugated truss core, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19 (1), 83-107.
- Li, M., Du, S., Li, F. ve Jing, X., 2020a, Vibration characteristics of novel multilayer sandwich beams: Modelling, analysis and experimental validations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 142, 106799.
- Li, W., Tang, S., Huang, X., Liu, W., Yang, X. ve Shi, T., 2022, Carbon fiber-reinforced polymer mesh fabric as shear reinforcement in reinforced concrete beams, *Journal of Building Engineering*, 53, 104433.
- Li, Z., Wang, Z., Wang, X. ve Zhou, W., 2020b, Bending behavior of sandwich beam with tailored hierarchical honeycomb cores, *Thin-Walled Structures*, 157, 107001.
- Liu, J., Tao, J., Li, F. ve Zhao, Z., 2020, Flexural properties of a novel foam core sandwich structure reinforced by stiffeners, *Construction and Building Materials*, 235, 117475.
- Lu, X. ve Viljanen, M., 2011, Fibrous insulation materials in building engineering applications, In: *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*, Eds: Elsevier, p. 271-305.

- Ma, M., Yao, W., Jiang, W., Jin, W., Chen, Y. ve Li, P., 2020, Fatigue Behavior of Composite Sandwich Panels Under Three Point Bending Load, *Polymer Testing*, 91, 106795.
- Madenci, E., 2011, Kompozit kirişlerin karışık sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analizi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, Türkiye.
- Madenci, E. ve Özütok, A., 2011, Çapraz Tabakalı Kompozit Kirişlerin Karışık Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Analizi.
- Madenci, E., 2016, Yüksek Mertebe Kayma Deformasyon Teorisine Dayalı Çapraz Tabakalı Kompozit Plakların Karışık Sonlu Eleman Yöntemi ile Analizi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, Türkiye.
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O. ve Gemi, L., 2019, The Effects of Length to Depth Ratio on the Reinforced Concrete Pultruded GFRP Beams, *1st International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology*, 386-391.
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O. ve Gemi, L., 2020a, Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses, *Composite Structures*, 242, 112162.
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O. ve Gemi, L., 2020b, Buckling and free vibration analyses of pultruded GFRP laminated composites: Experimental, numerical and analytical investigations, *Composite Structures*, 254, 112806.
- Magnucka-Blandzi, E., Kędzia, P. ve Smyczyński, M. J., 2018, Unsymmetrical sandwich beams under three-point bending—Analytical studies, *Composite Structures*, 202, 539-544.
- Magnucki, K., Lewinski, J., Far, M. ve Michalak, P., 2020, Three-point bending of an expanded-tapered sandwich beam—Analytical and numerical FEM study, *Mechanics Research Communications*, 103, 103471.
- Mallick, P. K., 2000, 2.09 - Particulate and Short Fiber Reinforced Polymer Composites, In: *Comprehensive Composite Materials*, Eds: Kelly, A. ve Zweben, C., *Oxford: Pergamon*, p. 291-331.
- Manalo, A., Aravinthan, T. ve Karunasena, W., 2010a, Flexural behaviour of glue-laminated fibre composite sandwich beams, *Composite Structures*, 92 (11), 2703-2711.
- Manalo, A., Aravinthan, T., Karunasena, W. ve Islam, M., 2010b, Flexural behaviour of structural fibre composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions, *Composite Structures*, 92 (4), 984-995.
- Manalo, A. ve Aravinthan, T., 2012, Behaviour of glued fibre composite sandwich structure in flexure: experiment and fibre model analysis, *Materials & Design*, 39, 458-468.

- Mohammadi, M. S. ve Nairn, J. A., 2014, Crack propagation and fracture toughness of solid balsa used for cores of sandwich composites, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 16 (1), 22-41.
- Nabati, A., Ghanbari-Ghazijahani, T. ve Valipour, H. R., 2021, Innovative flitch sandwich beams with steel core under four-point bending, *Engineering Structures*, 233, 111724.
- Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M. ve Arif M, M., 2016, Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets, *Construction and Building Materials*, 112, 547-555.
- Nguyen, N.-D., Vo, T. P. ve Nguyen, T.-K., 2020, An improved shear deformable theory for bending and buckling response of thin-walled FG sandwich I-beams resting on the elastic foundation, *Composite Structures*, 254, 112823.
- Ogin, S. L., Brøndsted, P. ve Zangenberg, J., 2016, 1 - Composite materials: constituents, architecture, and generic damage, In: *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*, Eds: Talreja, R. ve Varna, J.: Woodhead Publishing, p. 3-23.
- Özkılıç, Y., Madenci, E. ve Gemi, L., 2020, Tensile and Compressive Behaviors of the Pultruded GFRP Lamina, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 4, 169-175.
- Özütok, A. ve Madenci, E., 2017, Static analysis of laminated composite beams based on higher-order shear deformation theory by using mixed-type finite element method, *International Journal of Mechanical Sciences*, 130, 234-243.
- Paczos, P., Wichniarek, R. ve Magnucki, K., 2018, Three-point bending of sandwich beam with special structure of the core, *Composite Structures*, 201, 676-682.
- Pareta, A. S., Gupta, R. ve Panda, S. K., 2020, Experimental investigation on fly ash particulate reinforcement for property enhancement of PU foam core FRP sandwich composites, *Composites Science and Technology*, 195, 108207.
- Peng, Z., Wang, X., Ding, L., Yang, Y., Wu, Z. ve Zhu, Z., 2021, Static and sustained loading behavior of a basalt FRP shell–concrete composite bridge deck: An experimental and numerical study, *Engineering Structures*, 230, 111689.
- Pyrzowski, Ł. ve Sobczyk, B., 2020, Local and global response of sandwich beams made of GFRP facings and PET foam core in three point bending test, *Composite Structures*, 241, 112122.
- Ruys, A. J. ve Sutton, B. A., 2021, 9 - Metal-ceramic functionally graded materials (FGMs), In: *Metal-Reinforced Ceramics*, Eds: Ruys, A. J.: Woodhead Publishing, p. 327-359.
- Ryu, J., Lho, S.-H., Lee, C.-H. ve Ju, Y. K., 2020, Flexural behavior of prestressed sandwich plate system composite beams, *Engineering Structures*, 215, 110705.

- Saba, N. ve Jawaid, M., 2017, 3 - Epoxy resin based hybrid polymer composites, In: Hybrid Polymer Composite Materials, Eds: Thakur, V. K., Thakur, M. K. ve Pappu, A.: Woodhead Publishing, p. 57-82.
- Sapuan, S. M., 2017, Composite Materials, 57-93.
- Shahdin, A., Mezeix, L., Bouvet, C., Morlier, J. ve Gourinat, Y., 2009, Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: A comparison with honeycomb and foam sandwich beams, *Composite Structures*, 90 (4), 404-412.
- Shaw-Stewart, D. ve Sumerak, J. E., 2000, 2 - The pultrusion process, In: Pultrusion for Engineers, Eds: Starr, T. F.: Woodhead Publishing, p. 19-65.
- Shi, H., Liu, W. ve Fang, H., 2018, Damage characteristics analysis of GFRP-Balsa sandwich beams under Four-point fatigue bending, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109, 564-577.
- Siwowski, T., Kulpa, M., Rajchel, M. ve Poneta, P., 2018, Design, manufacturing and structural testing of all-composite FRP bridge girder, *Composite Structures*, 206, 814-827.
- Sokolinsky, V. S., Shen, H., Vaikhanski, L. ve Nutt, S. R., 2003, Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams, *Composite Structures*, 60 (2), 219-229.
- Staab, G. H., 2015, Introduction to composite materials, 1-16.
- Tagarielli, V., Fleck, N. ve Deshpande, V., 2004, Collapse of clamped and simply supported composite sandwich beams in three-point bending, *Composites Part B: Engineering*, 35 (6-8), 523-534.
- Taghipoor, H., Eyvazian, A., Musharavati, F., Sebaey, T. A. ve Ghiaskar, A., 2020, Experimental investigation of the three-point bending properties of sandwich beams with polyurethane foam-filled lattice cores, *Structures*, 28, 424-432.
- Wang, B. ve Gao, H., 2021, Fibre Reinforced Polymer Composites, In: Advances in Machining of Composite Materials: Conventional and Non-conventional Processes, Eds: Shyha, I. ve Huo, D., Cham: Springer International Publishing, p. 15-43.
- Wang, L., Zhang, Y. W., Ho, J. C. M. ve Lai, M. H., 2020, Fatigue behaviour of composite sandwich beams strengthened with GFRP stiffeners, *Engineering Structures*, 214, 110596.
- Wang, M., Yu, X., Zhang, J. ve Qin, Q., 2022, Three-point bending of physically asymmetric metal sandwich beams with aluminum foam core: Failure behavior and optimal design, *Composite Structures*, 280, 114873.
- Wang, R.-M., Zheng, S.-R. ve Zheng, Y.-P., 2011a, 3 - Matrix materials, In: Polymer Matrix Composites and Technology, Eds: Wang, R.-M., Zheng, S.-R. ve Zheng, Y.-P.: Woodhead Publishing, p. 101-548.

- Wang, R.-M., Zheng, S.-R. ve Zheng, Y.-P., 2011b, 1 - Introduction to polymer matrix composites, In: *Polymer Matrix Composites and Technology*, Eds: Wang, R.-M., Zheng, S.-R. ve Zheng, Y.-P.: Woodhead Publishing, p. 1-548.
- Xie, H., Shen, C., Fang, H., Han, J. ve Cai, W., 2022, Flexural property evaluation of web reinforced GFRP-PET foam sandwich panel: Experimental study and numerical simulation, *Composites Part B: Engineering*, 234, 109725.
- Yazman, Ş., 2021, The effects of back-up on drilling machinability of filament wound GFRP composite pipes: Mechanical characterization and drilling tests, *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1535-1552.
- Yin, J., Wang, Z., Liao, W., Hong, L., Ding, Y. ve Zhou, Z., 2022, A data fusion based diagnostic methodology for in-situ debonding detection in beam-like honeycomb sandwich structures with fiber Bragg grating sensors, *Measurement*, 191, 110810.
- Zenkert, D., 1997, *The handbook of sandwich construction*, Engineering Materials Advisory Services, p.
- Zhang, F., Liu, W., Fang, H. ve Jia, Z., 2019, Flexural behavior of composite sandwich beams with different kinds of GFRP ribs in flatwise and edgewise positions, *Composites Part B: Engineering*, 156, 229-239.
- Zhang, F., Xu, J., Esther, B., Lu, H., Fang, H. ve Liu, W., 2020a, Effect of shear span-to-depth ratio on the mechanical behavior of composite sandwich beams with GFRP ribs and balsa wood core materials, *Thin-Walled Structures*, 154, 106799.
- Zhang, W., Qin, Q., Li, J., Li, K., Poh, L. H., Li, Y., Zhang, J., Xie, S., Chen, H. ve Zhao, J., 2020b, Deformation and failure of hybrid composite sandwich beams with a metal foam core under quasi-static load and low-velocity impact, *Composite Structures*, 242, 112175.
- Zhao, F., Bao, H., Liu, J. ve Li, K., 2020, Shape sensing of multilayered composite and sandwich beams based on Refined Zigzag Theory and inverse finite element method, *Composite Structures*, 113321.