

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARE KESİTLİ ALÜMİNYUM ALAŞIMI KİRİŞLERDE
YÜK TAŞIMA KABİLİYETİ VE İLAVE TAKVİYE
MALZEMELERİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Kenan ACAR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM ve İMALAT

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kenan GENEL

Ağustos 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARE KESİTLİ ALÜMİNYUM ALAŞIMI KİRİŞLERDE
YÜK TAŞIMA KABİLİYETİ VE İLAVE TAKVİYE
MALZEMELERİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Kenan ACAR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM ve İMALAT

Bu tez 15 / 08 /2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr.
Kenan GENEL

Jüri Başkanı

Doç.Dr.
Ali Osman AYHAN

Üye

Yrd.Doç.Dr.
İ.Kutay YILMAZÇOBAN

Üye

ÖNSÖZ

Bu çalışmada günümüzde gelişen teknoloji ile malzeme çeşitliliğinin artması ve geliştirilen yeni malzemelerin uygun şekil ve oranlarda kare kesitli alüminyum alaşımı kırıtlara takviye edilmesi sonucunda geleneksel malzemelerden daha hafif, yük taşıma kabiliyeti daha yüksek ürünler elde edilmesi amaçlanmıştır.

Çalışma boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen değerli hocam Doç.Dr. Kenan GENEL'e, analiz ve deneye hazırlık safhalarındaki önemli katkılarından ötürü Arş.Gör. Seçil EKŞİ'ye, sabır ve destekleri ile hep yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma SAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir.
(Proje No: 2011-50-01-021)

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT MALZEMELER ve KULLANIM ALANLARI	5
2.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	8
2.1.1. Matris malzemeleri	8
2.1.2. Takviye elemanları	11
2.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Avantajları	13
2.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Uygulamaları	15
BÖLÜM 3.	
KOMPOZİT İMALAT YÖNTEMLERİ	19
3.1. Açık Kalıplama Teknikleri	19
3.1.1. El yatırması yöntemi	19
3.1.2. Püskürtme yöntemi	21
3.1.3. Elyaf sarma (filament sarım yöntemi)	23
3.2. Kapalı Kalıplama Teknikleri	25

3.2.1. Profil çekme (pultrüzyon) yöntemi	25
3.2.2. Reçine transfer yöntemi (RTM)	29
3.2.3. Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama prosesi (SRIM).....	31
3.2.4. Baskı kalıplama yöntemi	32
3.2.5. Savurma Döküm (Santifrüj) Kalıplama	33
3.2.6. Vakum Torbası/ Otoklav Prosesi	34
BÖLÜM 4.	
TÜP KİRİŞİN SONLU ELEMAN MODELİ VE ANALİZİ	36
4.1. Kirişin Modellenmesi	36
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMA	39
5.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması	39
5.1.1. Ana Taşıyıcı Malzeme	39
5.1.2. Takviye Malzemeleri	39
5.2. Üretim Metodu	41
5.3. Deney cihazı	42
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	43
6.1. Analiz Sonuçları	43
6.2. Deney Sonuçları	47
6.3. Öneriler	65
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CTP	Cam elyaf takviyeli plastik
PVC	Poli Vinil Klorür
Si	Silisyum
Mg	Magnezyum
Fe	Demir
Ti	Titanyum
Cr	Krom
Cu	Bakır
Mn	Mangan
C	Karbon
P	Fosfor
S	Kükürt
Mo	Molibden
Ni	Nikel
SiO ₂	Silikondioksit
CE	Cam elyaf
RTM	Reçine transfer yöntemi
kPa	Kilopascal
SMC	Tabaka kalıp bileşeni
BMC	Hacimli kalıp bileşeni
ASTM	American Society for Testing and Materials
kN	Kilonewton
MYTM	Maksimum yük taşıma miktarı
ÖYTM	Özgül yük taşıma miktarı
EAEM	Enerji absorbe etme miktarı
ÖEAEM	Özgül enerji absorbe etme miktarı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Kecman'ın mafsal mekanizması	4
Şekil 2.1.	V-22 Osprey Hava Aracı	7
Şekil 2.2a.	Kompozit tenis raketi.....	7
b.	Kompozit keman.....	7
c.	Kompozit protez.....	7
Şekil 2.3.	Cam Elyaf Lifi	11
Şekil 2.4.	Karbon Elyaf Lifi	12
Şekil 3.1.	El Yatırması Prosesi Aşamaları	19
Şekil 3.2.	Püskürtme Yöntemi	22
Şekil 3.3.	Elyaf Sarım Prosesi Düzeneği	24
Şekil 3.4.	Profil Çekme Yöntemi Düzeneği	26
Şekil 3.5.	Profil Çekerken Şekillendirme	28
Şekil 3.6.	RTM Yöntemi	30
Şekil 3.7.	SMC hazır kalıplama bileşeni ile baskı kalıplama	32
Şekil 3.8.	Santifrüj Kalıplama Düzeneği	34
Şekil 3.9.	Vakum torba kalıplama düzeneği	35
Şekil 3.10.	Basınç torba kalıplama	35
Şekil 4.1.	Kirişin simetri eksenlerine göre modeli	36
Şekil 4.2a.	Çekme numunesi	37
b.	Videoekstansometreli çekme cihazı (Instron)	37
Şekil 4.3.	Çekme deneyi sonuçları	37
Şekil 4.4.	Tüp kirişin sonlu eleman modelinin gösterimi	38
Şekil 5.1.	Twill dokuma cam elyaf kumaş	40
Şekil 5.2.	Alüminyum tüp kiriş ve kestamit takozlar	40
Şekil 5.3.	El yatırması yöntemiyle numunenin hazırlanması	41
Şekil 5.4.	Vakum torbalama uygulaması	41

Şekil 5.5.	Deney cihazı	42
Şekil 6.1.	Tüp kirişe ait deney ve analiz sonuçları	43
Şekil 6.2.	Mafsal bölgesinde deplasmana bağlı oluşan gerilmelere ait kesit görüntüleri (a=0,5 mm, b=1, c=2, d=2.75, e=3, f=4, g=5, h=6, i=7mm)	44
Şekil 6.3.	1 mm deplasmanda oluşan gerilmeler	46
Şekil 6.4.	2.75 mm deplasmanda oluşan gerilmeler	46
Şekil 6.5.	7 mm deplasmanda oluşan gerilmeler	46
Şekil 6.6.	Kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları	47
Şekil 6.7.	Kestamit takviyeli numunelerin yandan(a) ve üstten(b) görünümü	48
Şekil 6.8.	Kısa kestamit (70mm) takviyeli kirişte oluşan hasarın görüntüsü	49
Şekil 6.9.	210 mm kestamit takviyeli kirişte mesnet noktasında oluşan hasarın yandan(a) ve alından(b) görüntüsü	50
Şekil 6.10.	2, 4 ve 6 kat cam elyaf takviyeli numunelere ait deney sonuçları	51
Şekil 6.11.	2 kat CE(1), 4 kat CE(2) ve 6 kat CE(3) takviyeli numunelerde oluşan hasar yandan (a) ve üstten (b) görünüşü	52
Şekil 6.12.	2 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları	54
Şekil 6.13.	2 kat cam elyaf ve kestamit takviyeli kirişlerin yandan (a) ve üstten (b) görünümü	55
Şekil 6.14.	2 kat cam elyaf ve 210 mm kestamit takviyeli kirişte mesnet tarafından oluşturulan hasar	55
Şekil 6.15.	4 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları	57
Şekil 6.16.	4 kat CE ve kestamit takviyeli kirişin yandan (a) ve üstten görünümü (b)	58
Şekil 6.17.	6 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları	59
Şekil 6.18.	6 kat CE ve kestamit takviyeli kirişin yandan (a) ve üstten görünümü(b).....	60

Şekil 6.19. 2 kat CE ve 70 mm kestamit takviyesinin oluşturduğu bileşik etki	61
Şekil 6.20. 2 kat CE ve 140 mm kestamit takviyesinin oluşturduğu bileşik etki	61
Şekil 6.21. 2 kat CE ve 210 mm kestamit takviyesinin oluşturduğu bileşik etki	64

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1.	Alüminyum 6063 malzemenin kimyasal bileşimi	39
Tablo 6.1.	Kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları	48
Tablo 6.2.	2, 4 ve 6 kat cam elyaf takviyeli numunelere ait deney sonuçları	52
Tablo 6.3.	2 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları	56
Tablo 6.4.	4 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları	58
Tablo 6.5.	6 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları	60

ÖZET

Anahtar kelimeler: Alüminyum kare tüp kiriş, CTP, Üç nokta eğme

Bu tez kapsamında kompozit takviyenin kare kesitli alüminyum alaşımı tüp kirişin yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetlerine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Dışarıdan takviye elemanı olarak cam elyaf katkılı polimer (CTP), içeriden takviye elemanı olarak ise farklı boylardaki kestamit kullanılmıştır.

Üç nokta eğme deneylerinden, CTP ve kestamit takviyeli kirişin, takviyesiz yapıya göre yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu davranış mafsal mekanizması ve bunun yerinin değişmesiyle açıklanabilir.

LOAD CARRYING CAPACITY OF ALUMINUM SQUARE TUBE BEAMS AND THE EFFECT OF REINFORCEMENT MATERIALS

SUMMARY

Keywords: Aluminum square tube, GFRP, 3 point bending

In this thesis, the effect of composite reinforcements are investigated in experimental studies on aluminum square tubes for improving load carrying and energy absorption ability. Glass fiber reinforced polymers are used as external reinforcement material, also different size of cast PA6 plugs are used as internal reinforcement material.

Under 3-point bending loads, aluminum-GFRP-PA6 composite tube beams showed high performance in energy absorption and load carrying ability in comparison to the base aluminum tube. It can be explained by change in hinge mechanism and its location.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İçi boşaltılmış kirişler özgül yük taşıma kabiliyetlerinin yüksek olması, hafiflikleri ve düşük maliyetleri nedeni ile günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılarda deformasyon esnasında enerji absorbe etme kabiliyetleri de dikkat çekicidir. Profil kesitlerin aynı ağırlıktaki dolu kirişlere göre çok daha büyük atalet momentlerine sahip olması bu tür parçaların yük taşıma kabiliyetlerini arttırmaktadır. Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ile yaygınlaşan ve nispeten maliyeti düşen elyaf takviye malzemelerin uygun şekilde kullanılmasıyla bu tür yapıların hem yük taşıma hem de enerji absorbe etme kabiliyetleri büyük ölçüde iyileştirilebilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalarda, kare kesitli profiller için yük taşıma kabiliyetine etki eden faktörler incelenmiştir. Bunlardan biri de eğme esnasında gerçekleşen mafsalsal oluşumu ve lokal deformasyonlardır. Lee ve ark.[1] eğme durumunda oluşan Kecman'ın mafsalsal mekanizmasına dayanarak yaptıkları çalışmalarda bölgesel ve genel olarak uyguladıkları cam elyaf takviyeler ile oldukça iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Jung ve ark. alüminyum kiriş üzerinde yaptıkları deneylerde kiriş etrafına sarılan cam elyaf takviyeli yüzey kaplamasının eğilme esnasındaki hasarlanma davranışı ve eğme momentlerine olan etkilerini incelemişlerdir. 20x20mm ölçülerinde ve 1 mm et kalınlığına sahip içi boş kare kesitli kirişe yaptıkları $[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$ 0.5 mm'lik cam elyaf kaplanmıştır. Bu işlem sonrasında yapılan deneylerde takviye edilmemiş kirişin 1016.17 N.m/kg, takviye edilmiş kirişin ise 1694.18 N.m/kg özgül moment değerlerine ulaştığı yani %67 mertebesinde artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Yine aynı deneylerde takviye edilmemiş kirişin 328.25 J/kg, takviye edilmiş kirişin ise 422.43 J/kg özgül maksimum özgül enerji değerlerine ulaştığı ve %29 mertebesinde özgül enerji absorbe etme miktarlarında artış sağlamışlardır [2].

Lee ve Choi, kare kesitli alüminyum tüp kiriş üzerinde yaptıkları 4 nokta eğme testlerinde mandrel temas noktalarında meydana gelen bölgesel deformasyon ve mafsal mekanizmasını incelemişlerdir. Çalışmada tüp kiriş içine ortası boş kalacak şekilde 2 adet çelik takoz kısmi olarak takviye edilmiştir. Tüp kiriş üzerinde yapılan deneylerde deformasyon mandrel temas noktalarında gerçekleşmiştir. Çelik takozlarla kısmi olarak takviye edilmiş kirişte ise deformasyon kirişin boş olan orta noktasında meydana gelmiştir. Çelikle kısmi olarak takviye edilen kirişin rijitliği, tüp kirişle kıyaslandığında az da olsa yüksek olduğu rapor edilmiştir. Maksimum yükün ölçüldüğü deplasman değeri kısmi çelik takoz takviyeli kirişte daha büyüktür. Bu durum tüp kirişin daha erken hasara uğramaya başlamasıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Bunun sebebi olarak mandrel temas noktalarında yoğunlaşan gerilmenin kirişin hasarlanmasını tetiklediği işaret edilmiştir [3].

Alüminyum alaşımı olarak 6063-T7'nin imal edilmiş profile alüminyum köpük ve alüminyum peteğin takviye edilmesiyle eğme deformasyon davranışına olan etkisi incelenmiş, yapılan çalışmalardan ; köpük ile alüminyum yüzeylerin yapıştırılmamış olduğu durumda maksimum eğme momentinde %18 artış, yapıştırılmamış alüminyum petek yapı kullanılan grupta ise %15'lik artış sağlanmıştır. Yapıştırma işlemi uygulandığında ise iyileşme oranı hasar mekanizmasının geciktirilmesi nedeniyle oldukça artmıştır. Alüminyum köpük kullanılan numunede %85 artış, petek yapıda ise %80 mertebelerindedir [4].

Açık profiller kullanılarak oluşturulan (kaynakla) kapalı tip profillerde 0.27 gr/cm^3 yoğunluktaki alüminyum köpük dolgu malzemesi olarak kullanılmış, ve yapılan deneyler sonunda özgül enerji absorbe etme miktarında %14 oranında artış tespit edilmiştir. Aynı profilde orta kısmın kısmi takviye edilmesi durumunda ise artış miktarı %45 mertebelerine ulaşmıştır [5].

Bir diğer çalışmada cam elyaf takviyeli kare kesitli alüminyum tüp kirişlerde, eksenel çarpma ve eğme testleri ile enerji absorbe etme kabiliyetini incelemiş ve sonuçları hesaplama ile elde edilen teorik verilerle karşılaştırmıştır. Eksenel çarpma testlerinde 90° yönlenmesi ile sarım yapılan cam elyaf takviyeli tüp kirişlerin, eğme

testlerinde ise $0/90^\circ$ yönlenmesi ile sarım yapılan cam elyaf takviyeli tüp kirişlerin en başarılı sonucu verdiği belirtilmiştir [6].

Farklı yönlenmelere sahip karbon elyaf ile takviye edilen kare kesitli alüminyum kirişler üzerinde eğme testlerinden en iyi kiriş rijitlik ve dayanımlarının $[0/90]_4$ ve $[90/0]_4$, elyaf yönlenmelerinde elde edildiği görülmektedir [7]. Basavaraju, otomobillerde kullanılan lateral barlara alternatif olarak, karbon elyaf takviyeli, %65 daha hafif, enerji absorbe etme kabiliyeti daha fazla ve daha dayanıklı bir ürün tasarlamıştır [8].

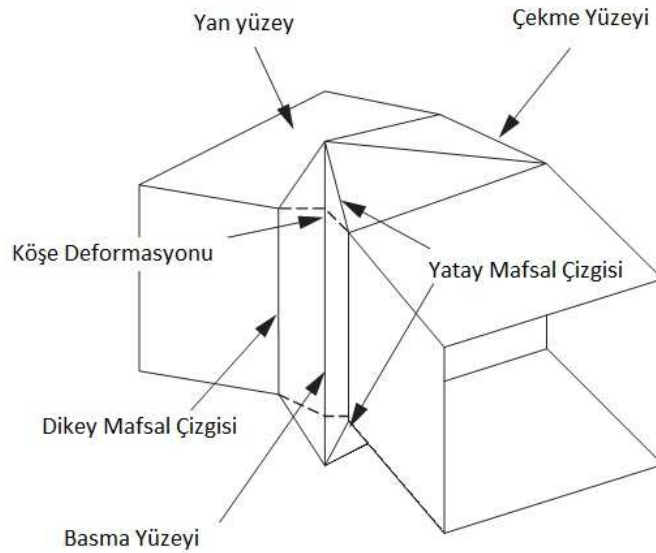
Ghasemnejad ve ark. CE takviyeli kompozitlerde katmanlar arası çatlak oluşumunun enerji absorbe etme kabiliyetine etkisi deneysel olarak incelemiştir [9]. M.Güden ve ark. alüminyum köpük doldurulmuş hegzagonal ve kare tüplerin alüminyum kirişin yarı-statik basma davranışları incelenmiştir. İçerisine çok sayıda tüpün yerleştirildiği kirişin enerji absorbe kabiliyeti daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [10].

Bu tez çalışmasında 6063-T5 alaşımından üretilmiş kare kesitli (40x1,5) profilin dışarıdan cam elyaf-epoksi, içeriden ise polimerik malzeme (kestamit) yerleştirilerek üç nokta eğme şartlarındaki davranışı farklı elyaf katman sayısı ve içeriden takviyede farklı boydaki kestamitler için sistematik olarak incelenmiştir. $0^\circ/90^\circ$ elyaf yönlenmesine sahip kumaşın 2, 4 ve 6 katman dış yüzeyden takviye edildiği ve sadece içeriden polimerik malzemenin yerleştirildiği durumlarda oluşan hasar ve mekanizmaları incelenmiştir. Yük-Deplasman eğrileri deneysel olarak elde edilmiştir. Her iki takviyenin uygulanmasıyla da yük değeri maksimize edilmeye çalışılmıştır.

Üç nokta eğme deneylerinde profil boyutuna uygun olarak 40 mm çaplı mandrel ve buna uygun mesnetler kullanılmıştır. Mesnetler arası mesafe 280 mm olarak seçilerek mesnetler arası mesafe/çap oranı 7 olması sağlanmıştır.

Ayrıca üç nokta eğme şartları ANSYS sonlu elemanlar programıyla simüle edilerek deformasyon davranışı incelenmiş ve yapılan takviyelerin etkisi analiz sonuçlarıyla birlikte değerlendirilerek açıklanmaya çalışılmıştır.

Kompozit kare kesitli tüp kirişlerin eğme davranışı: Kare kesitli içi boş kirişlerde eğme esnasında yük-yer değiştirme eğrisini etkileyen en önemli oluşum mafsallardır. Mafsallarda oluşumu plastik bölge içinde gerçekleşmektedir. Yükün en büyük değerini ulaşmadan önce cidarlarda başlayan akma ve burkulma daha sonra yükte belirgin bir şekilde düşüşe neden olmaktadır. Mafsallarda oluşumunu başlangıcında kuvvet pik değerine ulaşır daha sonra kirişin yan yüzeyleri dışa doğru, alt yüzeyi içe doğru burkulmaya başlar ve mafsallarda oluşumu tetiklenir. 3 nokta eğme deneyinde buna ek olarak mandrel temas noktasında oluşan lokal deformasyon hasarlanma sürecini kolaylaştırmaktadır. Oluşan bu hasar mekanizmasında kalıcı deformasyon mafsallarda çevresiyle sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle literatürde yapılan çalışmalarda içten takviye edilen kirişlerde kısmi olarak uygulanan takviyeler daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu noktada kısmi takviye malzemesi uygulanan yükü yaymakla birlikte mandrel temasından kaynaklanan lokal deformasyonu engeller ya da geciktirir.



Şekil 1.1 Kare kesitli tüpte mafsallarda oluşumu [11]

BÖLÜM 2. KOMPOZİT MALZEMELER ve KULLANIM ALANLARI

Aynı ya da farklı gruplardan birden fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzemede toplamak, ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler, kompozit (karma) malzemeler olarak adlandırılırlar. Atomsal veya molekül düzeyde birleştirilen malzemeler (örneğin alaşımlar) makroskopik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar [12].

Kompozit malzemelerin avantajı, bileşenlerinin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Kompozit malzemelerin üretimiyle aşağıdaki özelliklerin biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır:

- Dayanım
- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklık özellikleri
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliği
- Akustik iletkenlik
- Rijitlik
- Ağırlık
- Fiyat
- Estetik görünüm vs

Bu özelliklerin hepsinin aynı anda iyileşmesi mümkün değildir. Bileşenlerinin özellikleri bilinen bir kompozit malzemenin, bazı özellikleri hesaplanarak bulunabilir (yoğunluk, elastik özellikler vb). Bazı özellikler için ise bu mümkün değildir (yorulma dayanımı, tokluk vb.). Tasarımcı bu durumda emniyetli davranarak emniyet katsayılarını çok yüksek seçmek zorunda kalır ve kompozit malzeme kullanımı ekonomik olmaktan çıkabilir[12].

Günümüzde çok gelişmiş olan bu malzemeler, aslında binlerce yıldan beri kullanılmaktadır. Örneğin çamur içine karıştırılan saman çöpleri ile yapılan kerpiç, bir kompozit malzemedir. Ok yayı yapılırken üst üste konulan, özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar kompozit bir malzeme oluştururlar. Ayrıca kompozit malzemeler doğada da değişik biçimlerde bulunmaktadır (ahşap malzemeler, kemik vs) [12].

Kompozit malzeme üretiminin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla yeni malzemelerin geliştirilmesi ancak 1940'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanımı ile başlamıştır. Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeniyle bu amaç için kullanılabilir en uygun malzemedir. İlk CTP tekne 1942'de yapılmış, ilk elyaf sarma patenti ise 1946'da A.B.D.'de alınmıştır. 1950'lerde ise uçak pervaneleri kompozit malzemedan yapılmaya başlanmıştır. Bugün uçak endüstrisinde %30'a varan oranlarda kullanılan kompozit malzemelere örnek olarak, çeşitli polimerler (plastikler) içerisine gömülmüş karbon lifleri, alüminyum içerisine dizilmiş boron lifleri veya 1000 °C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan ve nikel-alüminyum alaşımı içerisnde oluşturulmuş nikel-niobiyum levhaları ile kuvvetlendirilen malzemeler gösterilebilir. Bu üstün nitelikli kompozit malzemelerin yanında ucuzluğu ve elde edilmesi oldukça kolay olan cam elyaf-polyester (CTP) malzeme oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere kullanılacak kompozit malzeme istenen mekanik özellikler, çevre şartlarına dayanıklılık, görünüm, maliyet vb özellikler ile çok çeşitli olabilmekte ve hemen hemen her şartı karşılayabilecek uygun bir takviye-matris çifti oluşturulabilmektedir [12].

Kompozit malzemelerin tenis raketinden uzay mekiğine kadar geniş uygulama alanları vardır. Askeri havacılık endüstrisi polimer matrisli kompozitlerin kullanımında çoğunlukla başı çekmektedir. 1970'li yıllarda F-15 uçaklarında kompozit malzemelerin oranı ağırlıkça %2'sinden daha az iken, bu oran 1990'larda AV-8B uçaklarında %30'lara ulaşmıştır. Bu sayede metal parçaların ağırlığında %20'den fazla düşüş sağlanmıştır [18]. V-22 Osprey (Şekil 2.1) rotor döndürebilen hava araçlarının gövdesinde %43'ten fazla kompozit malzeme kullanılmıştır [21].



Şekil 2.1. V-22 Osprey Hava Aracı [21]

Hava ve uzay endüstrileri yanında kara ve deniz taşımacılığı, çeşitli spor malzemeleri (yüksek atlama sırtı, bisiklet, tenis, sörf, yat ve yarış tekneleri vs) tıp gereçleri, robot yapımı (eylemsizlikleri az, rijitlikleri yüksek olduğundan), kimya sanayi (korozyona dayanıklı olduklarından), elektroteknik ve elektronik (yalıtkan olduklarından) ve müzik aletleri yapımı gibi bir çok uygulama sahası bulmuş durumdadır (Şekil 2.2a,b,c). Sıralanan bu uygulamalarda kompozit malzemeler geleneksel bazı malzemelerle yarış halindedirler [12].



a [22]



b [23]



c [24]

Şekil 2.2a. Kompozit tenis raketi
b. Kompozit keman
c. Kompozit protez

2.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

CTP, polimer matris içerisinde sürekli veya parçalar halinde cam elyaf bulunan, en yaygın üretilen kompozit malzeme türüdür. Cam elyafın takviye malzemesi olarak tercih edilmesinin başlıca nedenleri;

- Ergimiş halden kolaylıkla dayanıklı elyaf haline getirilebilir.
- Halihazırda kullanılan bir çok yöntem ile kolayca CTP olarak üretilir.
- Elyaf haline kıyasla plastik matris içerisine katıldığında çok daha güçlü olur. Bu da kompozit ürünün çok yüksek dayanım özelliklerine sahip olmasını sağlar.
- Uygun plastiklere katıldığında korozyon dayanım özelliklerine sahip olabilir.
- Benzer dayanım özelliklerine sahip diğer malzemelere kıyasla oldukça hafiftirler. Otomotiv denizcilik taşımacılık gibi alanlarda ağırlığı azaltarak yakıt tasarrufu sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılır [13].

2.1.1. Matris malzemeleri

Matris, kompozit yapılarda sürekli fazı oluştururlar. Üstlendikleri bazı önemli görevler ;

- Takviye malzemesini bir arada tutmak
- Takviye malzemeleri arasında yükü transfer etmek
- Takviye malzemelerini olumsuz ortam şartlarından korumak şeklinde sıralanabilir [15] .

Tek yönlü elyaf takviyeli kompozitlerde matrisin boyuna çekme dayanımına katkısı düşük seviyededir. Ancak matris seçimi tek yönlü elyaf takviyeli kompozitlerde aşağıdaki özelliklere etki eder:

- Enine gerilme modülü ve enine gerilme dayanımı
- Enine ve boyuna basma dayanımı
- Kayma modülü ve kayma dayanımı

Bu özellikler daha çok matris seçimine bağlıdır [15].

İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gösterir. Yine yükü elyaflara eşit dağıtmak ve yük altında matrisle elyaf arasında kırılma ya da kopma olmaması yapışkanlık özelliğinin iyi olmasına bağlıdır [14].

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf ya da matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise, elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğru bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kopma yüzeyi pürüzlü ve karmaşık şekilli bir yapı oluşturur [14].

Matris malzemeler öncelikler iki ana gruba ayrılırlar:

Termoplastikler: Termoplastik malzemeler, genellikle sünek ve termoset malzemelerden daha sert malzemelerdir. Yapısal olmayan uygulamalarda dolgu ve takviye kullanmaksızın yaygın şekilde kullanılırlar. Termoplastikler ısı ile eritilebilir ve soğutma ile katılaştırılırlar. Bu da onlara tekrar şekil verdirilebilme kabiliyeti sağlar. Termoplastik moleküller çapraz bağlanma yapmadıklarından esnektirler ve yeniden şekillendirilebilirler[19]. Kompozitlerde kullanılan termoplastikler [14]:

- Naylon (PA)
- Polifinilen Sülfür (PPS)
- Sıvı Kristal Polimerler (LCP)
- Polyetheretherketone (PEEK)
- Polipropilen (PP)
- Polietilen (PE)
- Polyetherimid (PEI)
- Fluoropolimerler

olarak sıralanabilir.

Termosetler: Termoset matrisler, küçük monomer moleküllerini, uzun ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için genellikle katılaştırıcı kullanılır. Termoset matrisler elyaf takviyeli kompozit yapımında daha fazla kullanılırlar. Termoset matrisler sıvı halde bulunurlar. Katılaştırıcı ilavesi ile önce jel haline gelir ve sonra da katılırlar. Termoset reçineler izotropiktirler. Elyaf takviyeli kompozit yapımında genellikle düşük viskozitede olmaları tercih edilir [19]. Kompozit endüstrisinde kullanılan termosetler [14]:

- Doymamış Polyesterler,
- Epoksiler,
- Vinilester,
- Poliüretanlar,
- Fenolikler,
- Melamin ve Üreformaldehid,
- Poliimidler,
- Silikon
- Reçineler,
- Friedel-Crafts Reçineleri

olarak sıralanabilir.

2.1.2 Takviye elemanları

Takviye elemanlarının kullanım amacı sonuçta çıkacak olan kompozit parçanın dayanımını arttırmaktır. Yaygın olarak kullanılan elyaflar:

- Cam Elyaf
- Karbon Elyaf (Grafit)
- Aramid Elyaf (Kevlar) 'dır.

Cam Elyaf: Cam lifinin ana malzemesi silikadır. Lif içersinde SiO₂ olarak bulunur. Çapları 9-23 mikron olan cam lifleri elektrikle ısıtılan platin rodyum alaşımı, üzerinde çok sayıda delik bulunan kovanlardan yüksek hızlarda çekilir [14]. Lif çapının küçük olması üretim esnasında oluşabilecek iç hataların en aza

indirgenmesini sağlar [18]. Serbest bir halde akan cam lifleri, su ve hava ile soğutularak bir araya getirilir ve demetler elde edilir. Ürünlerin korunması ve kompozit tabakaların özelliklerinin artırılması amacıyla kimyasal bir bağlayıcıyla kaplanır [14].

Cam liflerinin tipik örnekleri A, C, D, E ve S tipi cam lifleridir. En çok kullanılan E tipi camdır. Esas olarak elektrik amaçlı düşünülmesine rağmen iyi mekanik özelliklere ve ısı dirence sahip olduğu için bugün birçok sanayi dalında kullanılmaktadır. C tipi cam lifleri kimyasal direnci yüksek olduğu için kimyasal korozyona dayanıklı olması istenen yerlerde kullanılır. S tip cam lifi yüksek modüle ve mukavemete sahip olmasına karşın yüksek maliyetinden dolayı ancak özel kullanım alanlarına uygundur [19].



Şekil 2.3: Cam Elyaf Lifi [16]

Karbon Elyaf: Çoğunlukla iki malzemeden elde edilir. Zift ve Poliakrilonitril (PAN). Zift tabanlı karbonlar daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. PAN tabanlı karbonlar daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli geliştirilmektedir. PAN'ın Karbon elyafına dönüşümü dört aşamada olur.

1. Oksidasyon: Elyaf lar hava ortamında 300°C'de ısıtılır. Böylece, elyaftan H ayrılır daha uçucu olan O eklenir. Ardından elyaflar kesilerek grafit teknelerine konur ve kararlı yapıya dönüşürler. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyaha dönüşür.

2.Karbonizasyon: Elyaf ların yanıcı olmayan atmosferde 3000° C'ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşması sağlanır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafının sınıfını belirler.

3.Yüzey İyileştirme: Karbon, yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.

4.Kaplama: Elyafı sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır [20].



Şekil 2.4: Karbon Elyaf Lifi [25]

Aramid Elyaf: Benzen halkaları içeren ‘‘aromatik poliamidler’’ de denir. Yapıdaki aromatik halka zincirin katılığını artırır. Bu özellikleri yüzünden erimezler ve çözültiden elde edilirler. Üretim esnasında katı polimer molekülleri lif eksenine paralel olarak yönlendirilirler. Söz konusu yönlendirme, yüksek modülün kazanılmasına yardım eder [19].

2.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit ürünlerin günümüzde mühendisler, tasarımcılar, üreticiler ve yöneticiler tarafından yaygın olarak kabul görmesindeki en önemli etken sunduğu değişik performans avantajlarıdır. Kompozit malzemeler tüketiciler ve üreticilerin kullanımında çeşitli faydalar sağlamaktadır. Kompozitlerin sağlayacağı bu faydaların daha iyi anlaşılması sonucunda, tasarımcılar, mühendisler ve tasarımlarını son ürüne dönüştüren ilgili diğer meslek grupları, işlerini daha kolay ve etkin şekilde yapabilirler. Kompozit uygulamalarının üstün yanlarını şu başlıklar altında özetleyebiliriz [16];

Yüksek Mukavemet: Kompozitler yüksek mukavemet değerleri sağlayan malzemeler arasında en etkin olanlardan birisidir. Çekme, eğilme, darbe ve basınç dayanımı gibi mekanik değerlerin sağlanmasına yönelik tasarlanabilmektedirler. Geleneksel malzemelerin aksine kompozitler, bir uygulamadaki özel tasarım beklentilerine uygun mukavemet değerlerini sağlayabilmektedirler.

Hafiflik: Kompozitler birim alan ağırlıklarında hem takviyesiz plastıklere, hem de metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunmaktadırlar. Ürüne sağladığı yüksek mukavemet/hafiflik özelliği etkin bir şekilde kullanılmasındaki en önemli nedenlerden biridir.

Tasarım Esnekliği: Kompozitler bir tasarımcının aklına gelebilecek her türlü karmaşık, basit, geniş, küçük, yapısal, estetik, dekoratif ya da fonksiyonel şekle sokulabilirler. Maliyet düşürme çalışmalarının yanı sıra, kompozit ürün tasarımcıları prototip üründen seri üretime geçme yönünde yeni yaklaşımları denemektedirler.

Boyutsal Stabilité: Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevselliklerini korumaktadırlar. Kompozitler takviyesiz termoplastiklerin viskoelastik ve büzüşme özelliklerini sergilemezler. Isıl genişleme katsayıları daha düşüktür. Kompozitlerin sünme noktası genel olarak kırılma noktasına eşdeğerdur.

Yüksek Dielektrik Direnimi: Kompozitlerin göze çarpan elektrik yalıtım özellikleri, birçok komponentin üretimi konusunda açık bir tercih nedenidir. Ayrıca uygulama gereği, uygun modifiye edicilerin ve katkı malzemelerinin kullanılması durumunda kompozit ürüne elektriksel iletkenlik niteliği katmak da mümkündür.

Korozyon Dayanımı: Kompozitler paslanmaz ve aşınmaz. Çeşitli kimyasal ve ısı ortamlara dayanım sağlamak amacı ile geliştirilmiş birçok reçine sistemi mevcuttur. Uygun tasarlandığında kompozit ürünlerin en az bakımla, uzun süreli hizmet ömrüne sahip olmaları sağlanabilir.

Kompozit Parçaların İmalatı: Kompozit ürünler çelik türündeki geleneksel malzemelerde karşılaşılan “birçok parçanın birleştirilmesi ve sonradan monte edilmesi” işlemini “tek parçada kalıplama” olanağı ile ortadan kaldırırlar. Böylece üretim maliyetinin daha düşük olmasını ve montaj sırasında karşılaşılabilecek sorunların azaltılması sağlanmaktadır.

Yüzey Uygulamaları: Kompozit uygulamalarının çoğunda renk kalıplama sırasında ürüne kazandırılabilmekte ve uzun süre bakım gerektirmeden kullanılabilir. Düzgün yüzey (A sınıfı) ve düşük çekme özelliklerine sahip reçine sistemleri metalik boyama uygulamalarına uyumludur. Kalıpların uygun tasarımı ve uygun malzeme seçimi trim atıkları, zımpara ve kenar firelerinin azaltılabilmesini sağlayabilmektedir.

Düşük Araç/Gereç Maliyeti: Genel bir kural olarak seçilen kalıplama yöntemi ne olursa olsun kompozit üretimi için seçilen araç ve gereçlerin maliyeti çelik, alüminyum ve metal alaşımli geleneksel malzemelere göre daha ucuzdur.

Geçmişteki Başarılı Uygulamalar: Geçen kırk beş yıl içinde, elli binin üzerinde başarılı kompozit uygulaması bu ilginç malzemenin değerini ortaya koymaktadır. Daha düne kadar kompozit endüstrisinin öncüleri, kompozit malzemelerin kabul görmesi için çalışırken bugünün mühendisleri, tasarımcıları, pazarlama uzmanları son kullanım ve uygulamalarda, kompozit malzemelerin artan başarısı nedeniyle bu tür malzemelere karşı duydukları güveni vurgulamaktadırlar. Bu uygulamalar kompozitlerin maliyet ve performans değerlerini kanıtlamaktadır.

Kompozitler ayrıca; sınırsız kalıplama boyutları, çok sayıda üretim tekniği, diğer malzemelerle uyuma özelliği (takviye amacı ile köpük kullanımı), kendinden renklendirilme olanağı isteğe bağlı olarak, ışık geçirgen özellikte üretilebilme olanağı gibi avantajlara da sahiptir.

2.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Uygulamaları

Kompozitler yaygın olarak birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır. Kompozit/CTP endüstrisine ilişkin on farklı sektörden ürün örnekleri aşağıda verilmiştir [16].

Havacılık/ Uzak/Savunma

- | | |
|----------------------|---------------------------------|
| -Kargo konteynerleri | -Tuvalet birimleri |
| -Kanatlar | -Oturma elemanları |
| -Pervaneler | -Antenler |
| -Kontrol panelleri | -Planörler |
| -Radar koruyucusu | -Uçak ve helikopter gövdeleri |
| -Pencere çerçeveleri | -Roket motoru kaplama panelleri |

Ev Aletleri ve İş Ekipmanları

- | | |
|-----------------------|--|
| -Buzdolapları | |
| -Dondurucular | -Servis tepsileri |
| -Mikro dalga fırınlar | -Abajurlar |
| -Küçük ev aletleri | -Depolama tankları ve çöp konteynerleri |
| -Motorlu aletler | -Mobilya ev eşyaları (Oturma koltukları, |

- Fırınlı ocaklar yataklar, dolaplar)
- Dikiş makinesi parçaları -Emniyet baretleri
- Hesap makineleri -Paletler
- Profiller

Yapı Sektörü

- Saniter malzemeler (banyo küvetleri, duş tekneleri, lavabolar, banyo ve mutfak tezgahları v.s) -Beton kalıpları
- Yağmur suyu taşıma sistemleri (Yağmur oluğu, su indirme boruları, baca dibi v.s) -Sera panelleri
- Yüzme havuzları -Temel kazıkları
- Soğutma kule componentleri -Dış ve iç cephelerde ve duvarlarda giydirme cephe panelleri
- Köprü platformu ve ayakları -Prefabrik binalar
- Otoyol korkulukları ve işaret levhaları -Modüler kabinler
- Borular -Çatı ve cephe kaplama levhaları
- Dekoratif elemanlar -Taşıyıcı profiller
- Çatı, teras, cami ve muhtelif amaçlı izolasyon işleri

Tüketim Malları ve Spor/Eğlence

- Yüzme havuzları -Tenis raketleri
- Yüzme havuzu aksesuarlar ve ekipmanları -Kasklar
- Fıskiyeli süs havuzları -Motorlu kızaklar
- Su kaydırakları -Bowling aletleri
- Olta kamışları -Bisikletler
- Kayaklar -Egzersiz aletleri
- Snowboardlar -Karavanlar
- Golf sopalar -Tribün oturma elemanları
- Lunapark gereçleri

Korozyon Dayanımlı Ürünler

- Boru ve bağlantı parçaları -Konteynerler
- Endüstriyel tanklar -Aritma tesisleri

- Silolar
- Pompa gövdeleri
- Kanallar
- Fan kanatları (Pervaneler)

- Yer ızgaraları
- Kimyasal proses tankları
- Su ve su atık boruları
- Baca arıtma cihazları

Elektrik/Elektronik

- İzolatörler
- Antenler
- Baskılı devre panelleri
- Devre kesiciler
- Sigorta – Panel kutuları
- Aydınlatma gövdeleri
- Yalıtkan platformlar
- Elektrik ve aydınlatma direkleri
- Elektrik direk bazaları
- Projektörler

- Devre kesici kutular
- Rüzgar jeneratörleri
- Kablo taşıyıcıları
- Kablo kanalları
- Doğal gaz kutuları
- Sokak lamba gövdeleri
- Sayaç panoları
- Merdivenler
- Kofralar

Denizcilik

- Yelkenli ve motorlu tekneler
- Can filikaları
- Motor kapakları
- Şamandıralar
- Cankurtaran simitleri
- Sallar

- Kanolar
- Su kayakları
- Dubalar İskeleler
- Sörf tahtaları
- Deniz motosikleti

Taşımacılık ve Otomotiv

- Karayolu işaretleri
- Tampon ve çamurluklar
- Kaporta parçaları
- Frigorifik kamyon kasaları
- Makaslar
- Şaftlar
- Kamyonet kabinleri

- Rüzgar deflektörü
- Treyler gövde panelleri
- Araç kapıları ve gövde panelleri
- Traktör parçaları
- Motosiklet parçaları
- Banliyö trenleri araç koltukları ve tutamakları

-Fren ve debriyaj balataları

Askeri Uygulamalar

-Miğferler

-Balistik koruyucu paneller

-Konteynerler

-Taşıt araç parçaları

-İstihkam malzemeleri

-Silah ve roket parçaları

-Planörler

-Çıkartma gemileri

-Helikopter kaportaları

-Pervaneler

-Barınaklar

-Mayın avlama gemileri

-Sahil koruma botları

Tarım / Gıda Sektörü

-Silolar

-Sulama boruları

-Yem tesisi gereçleri

-Gıda depolama tankları

-Salamura tankları

-Balık çiftlikleri

-Çiftlik ekipmanı

-Taşıma kapları

-Pulvarizatör

BÖLÜM 3. KOMPOZİT İMALAT YÖNTEMLERİ

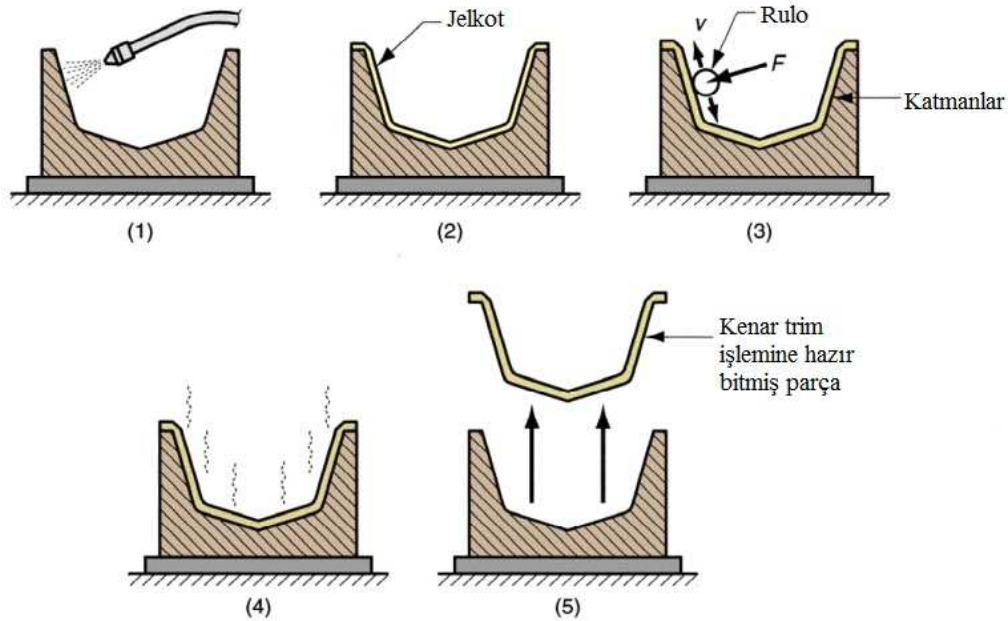
Kompozit imalat yöntemlerini iki ana gruba ayırmak mümkündür.

1. Açık kalıplama yöntemleri (temas yüzeyli kalıplama): Açık kalıplama yönteminde üretim süresince jelkot ve laminalar hava ile temas halindedir.

2. Kapalı kalıplama yöntemleri: Kapalı kalıplama yönteminde ise üretim çift taraflı kalıplarla ya da vakum torbasıyla olur. Bu iki kategoriye dahil olan birçok üretim yöntemi vardır.

3. 1. Açık Kalıplama Teknikleri

3. 1. 1. El yatırması yöntemi



Şekil 3.1: El Yatırması prosesi aşamaları [26]

Düşük üretim düzeylerinde yaygın kullanımı olan bu kalıplama yöntemi, ilk zamanlardan beri endüstride sürekli gelişime açık olan ve üzerinde çalışılan üretim yöntemlerinden biri olmuştur. Kompozit endüstrisi kalıplama yöntemleri arasında temel ve evrensel olarak en uygulanabilir yöntem olarak kabul edilmektedir[16]. Kullanılan en eski yöntemdir. İlk olarak 1940'ta tekne yapımında kullanılmıştır [26]. Bir çok uygulama alanı olan bu yöntem özellikle yüksek mukavemet gerektiren büyük parçaların üretiminde kullanılmaktadır [16]. Emek yoğun bir işlemdir. Kenar düzeltme işlemleri gibi tamamlayıcı prosesler gerektirebilir.

Üretimin başlangıç aşamasında kalıp yüzeyine fırça veya sprey tabancası ile pigment katkılı, ayırıcı özelliğe sahip jelkot tabaka halinde uygulanır. Jelkot yeterli derecede sertleştiğinde takviye malzemesi tabakalar halinde jelkotun üzerine yerleştirilir ve reçine elle açık kalıba uygulanır. Bu işlem istenen kalınlık elde edilene kadar sürer. Takviye malzemesi üzerine uygulanan reçine sertleşene kadar rulolama işlemine tabi tutulur. Bu işlem sayesinde tabakalar arasındaki hava kabarcıkları giderilir ve reçinenin elyaf tabakalarına iyice emdirilmesi sağlanır [16]. Bu da matris malzemesin takviye malzemelerini daha iyi sararak bir arada tutmasına ve yüksek dayanım değerlerine ulaşmasına imkan verir.

Takviye malzemesinin kalınlık ve çeşidi tasarımda belirlenen değerlere göre seçilir. Ayrıca reçine içerisine katılacak hızlandırıcılar sayesinde dışarıdan ısı kaynağına gerek duymadan oda sıcaklığında sertleştirilebilir. Reçinede meydana gelen kimyasal reaksiyonlar malzemeyi yüksek dayanımlı ve hafif ürünler elde edebilecek şekilde sertleştirir [16]. El yatırması yöntemi oldukça esnek bir prosestir ve kullanıcıya değişik tipte kumaş veya hasır malzemeler yerleştirmek suretiyle parçanın optimizasyonuna müsaade eder [14].

El yatırması prosesinde genelde polyester veya epoksi reçineler kullanılır. Polyester düşük maliyeti ve kullanım kolaylığından dolayı epoksiyle kıyaslandığında daha yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca polyesterleri kalıptan ayırmak için çok çeşitli ayırıcılar vardır. Ancak epoksideki "iyi yapışma" özelliğinden dolayı daha özel yapıda kalıp ayırıcılara ihtiyaç duyulmaktadır [14].

El yatırması prosesinin başlıca avantajları [16]:

- Düşük üretim maliyeti
- Üretilen parçaların boylarında teorik olarak kısıtlama olmaması
- Tasarımda gerektiğinde değişiklik yapılabilmesi
- Nispeten en düşük yatırım maliyetine sahip olması
- Çeşitli renklerde dekoratif yüzeyler elde edilebilmesi
- Yerinde kalıplama olanağı
- Prototip üretimine ve büyütmeğe uygun olması
- Tasarım esnekliği, istenirse belirli bölgelerin daha mukavim yapılabilme olanağı
- Montaj kolaylığı

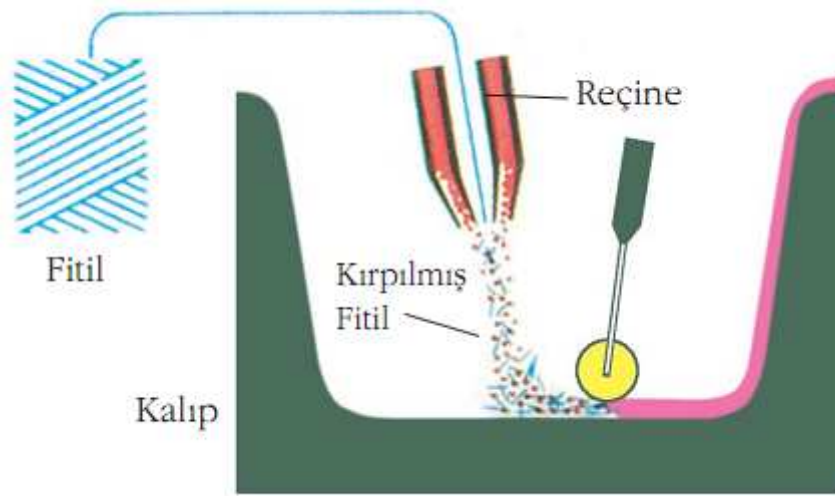
Dezavantajları [16]:

- Sadece tek yüzü düzgün elde edilebilmesi
- Emek yoğun olması
- Üretim kalitesinin işçinin yeteneklerine bağlı olması
- Reçine içerisindeki uçucu kimyasallar (Stiren)

Bu yöntemle üretilen tipik son ürün uygulamaları tekne gövdeleri, otomobil ve kamyon gövde panelleri, yüzme havuzları, depolama tankları, korozyona dayanımlı ürünler, mobilya ve aksesuarlar, elektrikli ev aletleri ve havalandırma kanalları gibi ürünlerdir [16].

3.1.2. Püskürtme yöntemi

Bu yöntem el yatırması yönteminin biraz daha geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Reçine ile lifin kalıp yüzeyine uygulama tarzı farklılık göstermektedir. El yatırması prosesi reçine ve takviye elemanları el yordamıyla yapılırken bu proste püskürtme tabancasının kullanılması emek yoğunluğu azalmaktadır. Püskürtme tabancası, eş zamanlı olarak sürekli elyafi kırpmakta ve püskürtmeyle uygulanan reçineye katalizör karıştırma işlemini de yapmaktadır. Ürünün dayanımının çok önemli olmadığı yerlerde, püskürtme yöntemi en uygun seçenektir [14].



Şekil 3.2: Püskürtme yöntemi [16]

Püskürtme yöntemindeki işlem basamakları, el yatırma yöntemine çok benzerdir. İlk önce kalıba çözücü ajan uygulanır. Daha sonra, bir kat jel tabaka uygulanır ve sertleşmesi beklenir. Jel tabaka sertleşince, lif reçine karışımı kalıp yüzeyine spray tabancası kullanılarak püskürtülür. Spray tabancası gelen elyaf şeritleri (bir veya daha çok şerit) belirlenen uzunluklarda (20-40 mm) keser ve lifi, reçine / katalizör karışımına sevk eder. Spray tabancası temelde iki çeşittir. Birincisi ve yaygın olarak kullanılanı, daha önceden hızlandırıcısı katılmış reçineye özel bir aracılığıyla katalizör ilave edilen katalizör enjeksiyon tabancalarıdır. Bir diğer çeşidi ise çift kap sistemli püskürtme tabancalarıdır. Bu sistemde ise reçine iki kısma bölünür. İlk kaptaysa reçineye katalizör, ikinci kaptaysa reçineye hızlandırıcı katılır. İki kısım beraberce püskürtüldüğünde tabanca dışında birleşir ve kalıp yüzeyinde sertleşme başlar. Tabanca içerisinde sağlanan karıştırma işlemi, sağlık açısından operatöre verebileceği zararları minimuma indirir [14].

Çalışma prensiplerine göre de havasız ve hava püskürtmeli olmak üzere ikiye ayrılırlar. Hava kullanılmayan spray tabancaları daha yaygın hale gelmektedir. Çünkü, bunlar daha kontrollü bir püskürtme ve daha az uçucu parçacık yayılımı sağlarlar. Hidrolik basınçla özel nozullardan verilen reçine takviye malzemesini doygunluk noktasına getirecek şekilde damlacıklar halinde püskürtülür. Hava püskürtmeli tabancalarda reçineyi püskürtmek için basınçlı hava kullanılır. El yatırması prosesiyle aynı avantaj ve kullanım alanlarına sahip olmakla birlikte [14]:

- Bu yöntemde kullanılacak malzemenin el yatırması yönteminde kullanılanlardan daha ucuza mal edilebilir olması
- Kullanılan fazla malzemedan tasarruf edilebilmesi
- Püskürtme tabancasının kullanımı sayesinde reçine uygulama ve emdirme zamanının düşürülmesi
- Çalışan emeğini azaltılması
- Katalizör katılmış reçine israfının önlenmesi
- Püskürtme yöntemini el yatırması yönteminden maliyet açısından daha avantajlı kılmaktadır.

3.1.3. Elyaf sarma (filament sarım yöntemi)

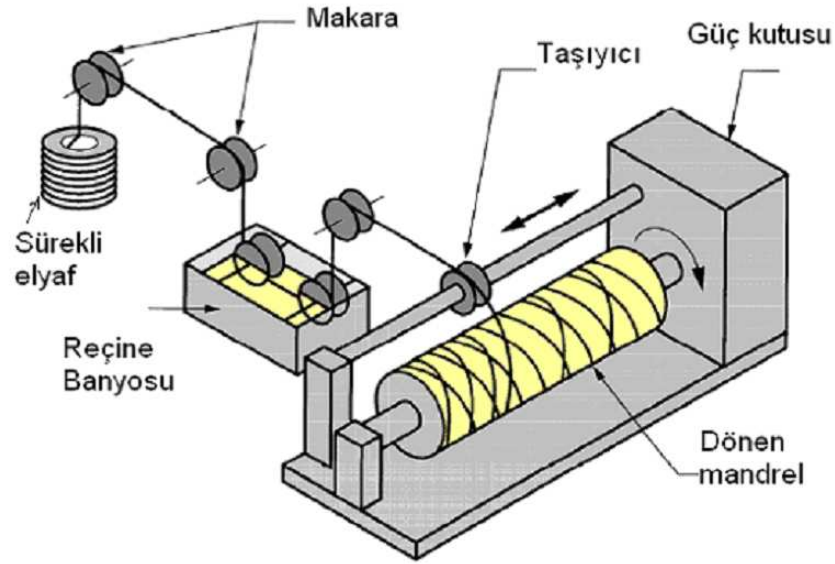
Önceden veya sarım sırasında reçine emdirilmiş sürekli liflerin dönen bir kalıp yüzeyine veya makine kontrollü geometrik yapıya sahip mandreller üzerine tasarımla belirlenmiş sarım geometrisine uygun sarılması yöntemidir. İstenen sarımı elde etmek için operatörler, boru çapları, mandrel hızı, basınç oranı, bant genişliği, lif açısı vs. gibi birçok değişkeni girer [14]. Reçine emdirilmiş sürekli elyaf dönen bir mandrelin etrafına sarılır, reçine sertleştirilir ve parça mandrelden çıkarılır. Sürekli elyaf reçine banyosundan geçirilerek mandrelin üzerinde helisel bir yol üzerinde sarılır. Üst üste tabakalar sarılmasıyla istenen kalınlık elde edilene kadar işlem devam ettirilir. Birbirini izleyen tabakaların sarımları birbirine çapraz biçimdedir [26].

Avantajları [16]:

- Özelliklerin tam kontrol altında tutulabilmesi.
- Çeşitli mukavemet değerlerinin elde edilebilir olması.
- İşçilik oranının düşük olması.
- Çok sayıda takviye malzemesi ve reçine seçeneği bulunması
- Prosesin çok yüksek düzeyde otomasyona uyarlanabilmesi.
- Termoset ve termoplastik kullanımına imkan vermesi.

Dezavantajları [16]:

- Yalnızca aksel ürünler için kullanılabilmesi.
- Tesis yatırımı gerektirmesi
- Uçucu organiklerin emisyonu nedeniyle mekanik kontroller gerektirmesi



Şekil 3.3. Elyaf sarım prosesi düzeneği [14]

İki aksenliden altı aksenliye kadar değişen, çok çeşitli nümerik kontrollü sarım makineleri bulunmaktadır. Elyaf sarma değişik ekipmanlarla da mümkündür [14]:

- Sürekli Sarıcı: dönmeyen (hareketsiz) mandrel sürekli sarıcı bir sarım istasyonu arasında hareket eder.
- Kutupsal Sarım: mandreller kapalı bir silindir oluşturacak şekilde iki eksende dönerler.
- Kontinü Sarım: takviye malzemesi ve reçine kesintisiz boru üretebilen, sonsuz hareket kabiliyetli bir kalıp sistemi üzerine uygulanır.
- Örgü Sarıcı: bir çemberden geçirilerek bu yapının oluşması sağlanır.
- Kırpma Çemberi: Hibrid bir prosestir. Büyük boyutlu uygulamalarda püskürtme yöntemi ve elyaf sarım yöntemi karışımı şeklindedir.

Elyaf Sarım Yönteminin Uygulama Alanları [16]:

- Petrol ve gaz için tank ve boru ürünleri, kimyasal üretim endüstrisi ve su/atık su arıtması için kullanılan boru ve tanklar,

- Tank ve borular için parçalar
- Uçak yakıt tankları
- Roket motor ve kovan kaplamaları
- Silah ve top namluları
- Gemi/yat direkleri,
- Tenis raket çerçeveleri,
- Tren vagonları

3.2. Kapalı Kalıplama Teknikleri

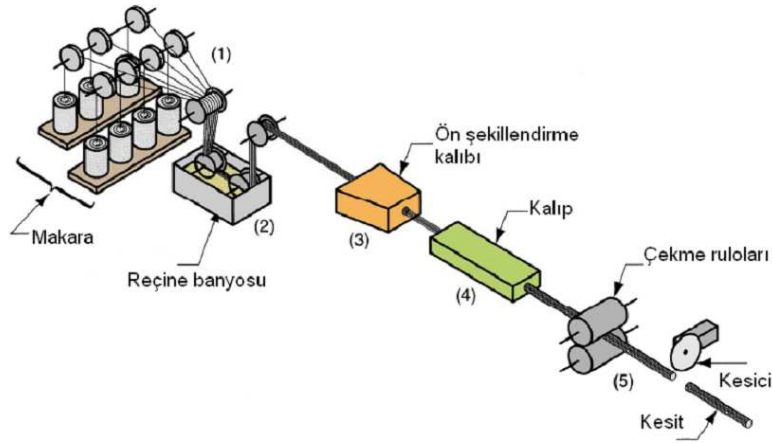
3.2.1. Profil çekme (pultrüzyon) yöntemi

İstenilen şekilde profillerin ve özel kesitli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bu yöntem 1940'ların sonundan itibaren başlıca iki tür ürün elde etmek amacıyla kullanılmıştır; Rijit çubuk ve lamalar; boru, kanal, kiriş gibi endüstriyel profil şekilleri. Profil şekilleri tamamen kullanılan kalıba bağlı olup çıkan ürünlerin boyuna mukavemetleri çok yüksektir.

“Profil çekme” genelde eş yönlü lifler içeren parçaların üretiminde kullanılır. E-cam, S-cam, karbon ve aramid lifleri takviye elemanı olarak kullanılır. En çok kullanılan takviye tipi E-cam fitiller olmakla birlikte, tek uçlu veya çok uçlu fitiller ve karbon elyafı, bükümlü fitiller, sürekli keçeler, cam ve karbon elyafından tüller, örgü kumaşlar, dikişli veya dokunmuş ürünler veya bunların kombinasyonlarından bir veya birkaçı çift yönlü ve çok yönlü dayanım özelliklerini sağlama için tercih edilir. Bu yöntemde elyaflar iki türlü uygulama ile çekilerek ısıtılmış çelik kalıptan geçirilir ve belirlenen kesitte sertleşmesi sağlanır [14]:

1. Çekilecek elyaflar önceden katalizlenmiş reçine banyosundan geçirilir ve sonra ısıtılmış kalıptan reçine fazlalıkları sıyrılarak çekilir.
2. Bu uygulama türünde ise elyaf belli bir gerilim ile kuru olarak ısıtılmış kalıptan geçirilir ve kalıp içerisinde reçine enjekte edilir.

Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçilerek sertleşmesi sağlanır. Kalıp içerisinden geçirilen malzeme kısmen veya tamamen kür edilmiş olur ve çıkan parçalar düzgün olduğu için genellikle ard işlem gerektirmez. Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir. Kalıptan çıkan ürün bıçaklarla istenilen uzunluklarda kesilir. Pultrüzyon yöntemi, düşük işgücü gerektirmektedir otomatik bir prosestir [14].



Şekil 3.4. Profil Çekme Yöntemi Düzenegi [14]

- Şekilden de takip edebileceğimiz gibi pultrüzyon prosesinde işlevi olan ekipmanlar:
- Takviye malzemelerinin saklanması ve dağıtımı için keçe ve fitil sehpaları
- Reçine banyoları (takviye malzemelerinin ıslanmasını sağlamak için)
- Kalıp şekline göre takviye malzemelerini ön şekillendirmeye tabi tutan ve reçine fazlalıklarını ayıran şekillendirme kılavuzları
- Kontrol paneli (kalıp sıcaklığı, kesme hızı, kesme şekli (devamlı veya kesikli) kontrolünü sağlamak amaçlı)
- Üretilen profilleri istenen uzunlukta kesmek için kesme bıçakları şeklindedir.

Pultrüzyon yönteminin avantajları: Pultrüzyon, yönlendirilmiş elyaf kullanılan bir prosestir. Elyafın büyük bir kısmı optimum çekme dayanımı elde edecek yönde boyuna yerleştirilirken, bir kısım elyaf da istenen ürün özelliklerini sağlayacak şekilde farklı yönde düzenlenebilir. Düşük işçilik gerektiren büyük ölçüde otomatikleştirilmiş bir prosestir. İşçilik maliyeti satış fiyatının %5-10'u arasındadır. Pultrüzyon yönteminde ekipman yatırım masraflarının diğer yüksek hacimde üretim yapılan yöntemlerle kıyaslandığında düşük olduğu görülmektedir. Tüm bu unsurlar, orta-yüksek hacimli uygulamalar için pultrüzyon yöntemini ekonomik kılmaktadır [16].

Dezavantajları: Pultrüzyon prosesinde elyafın büyük bölümü çekme dayanımı sağlayacak yönde yerleştirildiğinden, genellikle çapraz yönde mukavemet düşüktür. Genel olarak çapraz yönlerde elde edilen özellikler, gerçek çekme dayanımının %10-25'idir. Buna rağmen örgü, dikişli ve dokunmuş kumaşların artan kullanımı, pultrüzyon yöntemini bazı yapısal uygulamalarda izotropik (özelliklerin her yönde aynı) özellikler sağlayabilecek hale getirmiştir. Pultrüzyon ürünleri genellikle rekabet halinde oldukları malzemelerle aynı rijitlik değerlerine sahip değillerdir. Bu durum rakip malzemelerin rijitlik değerlerine ulaşmak için kesitte ya da et kalınlığında tasarım değişikliklerinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır [16].

Kullanım alanları:

Önceleri eğlence ve elektrik sektöründe daha yaygın kullanılırken ekonomik bir yöntem oluşu ve hızlı gelişim göstermesiyle birlikte havacılık, otomotiv, korozyon ve inşaat sektöründe de kullanımı yaygınlaşmıştır [14].

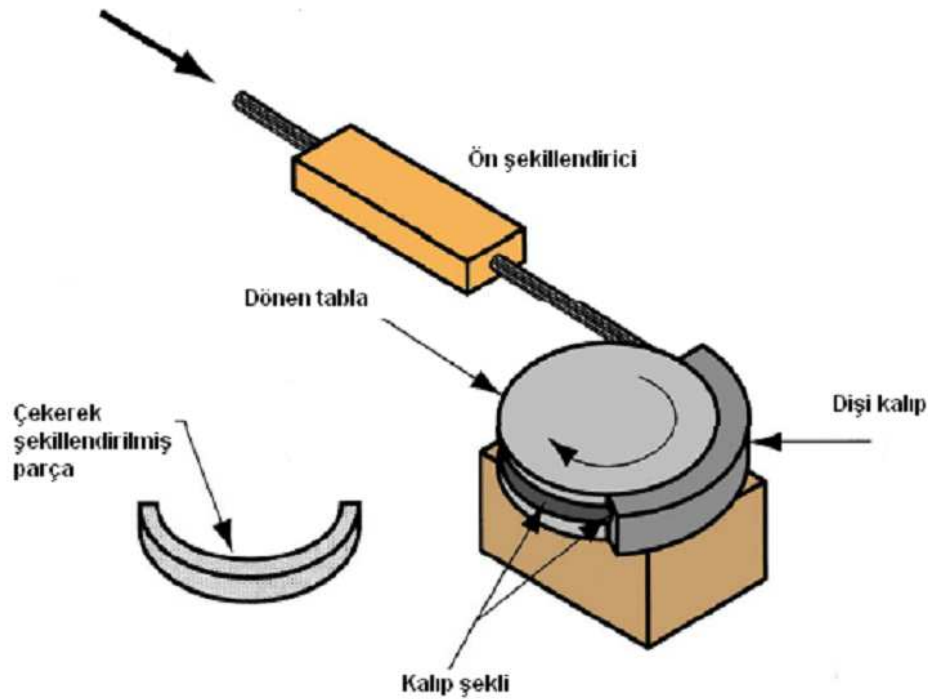
Hafifliğin ve kimyasal dayanım özelliklerinin ön planda olduğu korozyon sektöründe su, atık su temizleme tesislerinde ve kimyasal üretim tesislerindeki kullanımlarıyla en hızlı gelişimi göstermiştir [14].

Tasarımcılar açısından bakıldığında en büyük avantajı başka malzemelerden yapılmış olan çok sayıdaki standart yapısal şekil profilleri bu yönteme kolayca uyarlanmıştır (merdiven, tırabzan, parmaklık, kablo döşeme sistemleri). Mükemmel ısı yalıtımı ve düşük ısıl genleşme katsayısıyla ve de su sızdırmazlıktaki yüksek

performanslarıyla kompozitten yapılmış kapı ve pencereler inşaat sektörünü hareketlendirmiştir. Ahşap malzeme kullanımını maliyeti de arttırdığı için kompozitlerin sektörde yer alması kolaylaşmıştır [14].

Alt yapı uygulamalarında kullanımı artmış ve gelişmeler göstermektedir. Yoğun aksenal takviye yüklemesiyle yüksek sertlik değerlerine ulaşmak ve büyük boyutlu parçaların üretimine elverişlilik köprü gövdelerinde, yaya üst geçitlerinde, yürüyüş yollarında, zemin ve ekipman desteklerinde ve taşıt köprü platformlarında pultrüzyon yönteminin tercih edilmesinde etkin rol oynamıştır [14].

Bu yöntem düz kesitlerin yanı sıra farklı şekillendirme kalıpları kullanılarak aşağıdaki gibi profil çekerken şekillendirme imkanı da sağlamaktadır [14].



Şekil 3.5: Profil Çekerken Şekillendirme [14]

3.2.2. Reçine transfer yöntemi (RTM)

Reçine transfer kalıplama prosesi (RTM), sıvı transfer kalıplama yöntemi olarak da bilinir. Enjeksiyon kalıplama ve baskı kalıplama metotları yüksek kapasiteli üretim

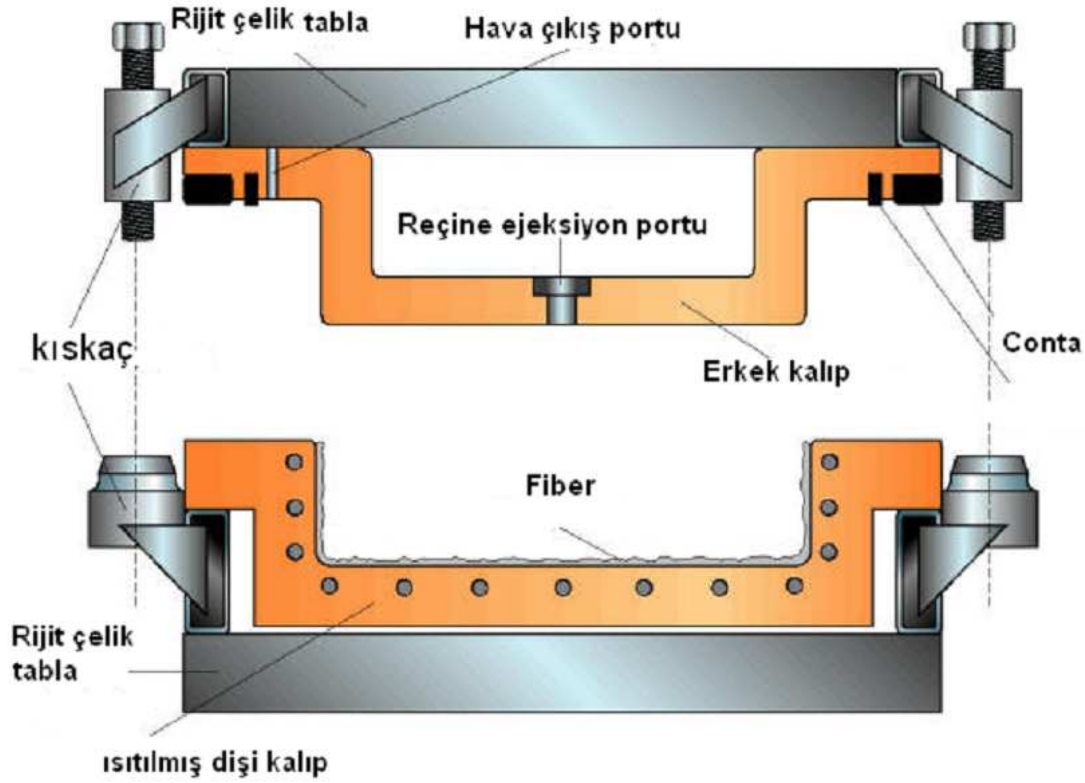
yöntemleri olmaları nedeniyle popülarite kazanmışlardır. Bu proseslerle üretilen parçaların kullanımı yapısal olmayan uygulamalarla sınırlıdır. Bu kalıplama proseslerinin aksine, RTM prosesi, maliyet açısından verimli parçaların üretimini, düşük maliyetli ekipman kullanımıyla başarmaktadır. RTM, lif yönlendirilmesi kontrol altında tutulduğu bir prosestir ve yaklaşık net şekilli parçaların üretimini sağlar [19].

RTM prosesinde genellikle sürekli lifler kullanılır. Kalıp iki bölümden oluşur. Birinci bölüm, ikinci bölüm üzerine gelir ve iki kısım birleşir. Daha sonra dağıtım ekipmanları kullanılarak, basınç altında tutulan termoset reçine, katalizör, renk, dolgu vs. karışımı tek yada çok port kullanılarak kalıp içerisine basılır. Karışımın kür kinetiğine bağlı olarak, 6-30 dakika kür edilir ve kalıptan çıkarılır. Bu nedenle, RTM prosesi yapısal parçaların her iki yüzeyinde de iyi yüzey kalitesi sağlar [19] .

RTM prosesi otomotiv, havacılık, spor malzemeleri ve tüketim malzemeleri üretiminde kullanılabilir. Genellikle bu yöntemle; kasklar, kapılar, hokey sopası, bisiklet kasası, yel değirmeni kanadı, spor araba kasası, otomobil panelleri ve uçak parçaları üretilmektedir [19].

RTM prosesinde, lif ön formları veya kumaşlar takviye olarak kullanılabilir. Çok değişik türde ön formlar (ısıl işleme şekillenebilen hasırlar, braiding ile oluşturulmuş yapılar) RTM prosesinde kullanılabilir [19].

RTM prosesinde polyester, vinil ester, epoksi, fenolik reçine ve pigment ve dolgularla (alüminyum trihidrat ve kalsiyum karbonat) kombine edilmiş metil metakrilat reçineleri kullanılabilir. RTM prosesinde en çok kullanılan reçine türü doymamış polyester ve epoksilerdir. Epoksi ve diğer yüksek viskoziteli reçinelerin kullanımı ekipmanda değişiklikler gerektirmektedir. Yeni geliştirilen epoksi reçineler hızlı kür edilebilmektedir. Böylece üretim oranı artırılmaktadır [19].



Şekil 3.6: RTM Yöntemi [14]

RTM prosesinde bir ön form olan cam lifinden hasır malzeme veya kumaş kalıptaki boşluğa Şekil 3.6'daki gibi yerleştirilir. Genellikle balsa ve köpük özler, öz malzeme olarak kullanılır. Ticari olarak elde edilebilen ve etrafında bir kaplayıcı örtü bulunan polipropilen özler de kullanılmaktadır. Bu örtü reçinenin öz içerisine geçişini engellemektedir. Öz malzeme kullanılması ile yapının hafif olması ve bir sandviç yapı oluşturmak suretiyle yapının güçlü olması sağlanmaktadır [19].

Takviye ve öz malzeme kalıp boşluğuna konulduktan sonra kalıp kapatılır. Kapatılan kalıba sıvı reçine düşük ya da orta basınçta kalıp boşluğuna basılır. Reçine enjeksiyon basıncı; reçine viskozitesi, kalıp büyüklüğü, boşluklu yapının geçirgenliği, gerekli kalıp dolun süresi ve reçinenin kür kinetiklerine bağlı olarak 69-690 kPa arasında değişir. Reçine ve katalizör farklı tanklarda depolanmaktadır ve statik bir karıştırıcıdan geçerek kalıba enjekte edilmektedir. Enjeksiyon işlemi aşağıdan yukarıya doğru yapılır. Bu tercih, sıkışan havanın minimuma indirilmesi için gereklidir. Kalıp üst kısmında hava menfezleri bulunmaktadır [19].

RTM prosesinde, reçine akışı ve lif ıslanması kritiktir. RTM kalıbı içerisindeki reçine akışı birçok parametre tarafından belirlenir. Bunlar: enjeksiyon basıncı, kalıptaki vakum, reçine sıcaklığı, viskozite ve ön formun geçirgenliği şeklinde belirtilmektedir. Ön formun geçirgenliği lif türüne, lif yapısına, lif hacimsel oranına vs. bağlıdır [19].

RTM prosesinde oluşabilecek kuru noktalar (uygun olmayan ıslatmadan kaynaklanan) en büyük sorundur. Düzgün bir reçine akışı ve kuru noktaları elemine etmek için, kalıptaki hava kanallarından vakum uygulanarak takviye elemanlarındaki hava çıkarılmaktadır. Vakum aynı zamanda kalıbın hızlı dolmasını da sağlamaktadır. Kalıbın dolması çapraz bağlanmanın başlangıcının hemen öncesinde bitmektedir. Kalıp reçine ile dolduktan sonra, hızlı bir kür ve ardından kalıptan çıkarma işlemi gerçekleşir [19].

RTM avantajları [14]:

- Kapalı kalıplama yöntemi olduğu için daha az organik uçucu gaz ortama yayılır.
- Kalıplar diğer kapalı kalıplama yöntemi kalıplarına göre daha ucuzdur.
- İki yüzü düzgün parça üretimi sağlar
- Dolgu sistemi maliyeti düşürmekte, alevlenmeme, duman yaymama özellikleri, daha iyi yüzey görünümü ve daha yüksek kırılma dayanımı gibi performans özellikleri katar.

Kalıp maliyetleri, orta ölçekli bir üretim yöntemi olması, enjeksiyon basıncının ayarlanabilmesi, kalıpların tasarlanması ve üretimi, kilit ve conta sistemi ele alındığında proses biraz daha karmaşık hal almakla birlikte dezavantaj da oluşturmaktadır [14].

3.2.3. Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama prosesi (SRIM)

RTM'le benzer olup kullanılan reçine ve enjeksiyon karıştırma yöntemi farklıdır. İki reçine bir kamarada yüksek hızda karıştırılarak kalıp içine basılır. Reçine çok düşük viskoziteli ve çok yoğun kullanımı olan poliizosiyaüretattır. Reçine enjeksiyon oranı RTM'de kullanılan vinilester ve polyesterden çok daha hızlı gerçekleşir. Kür hızını

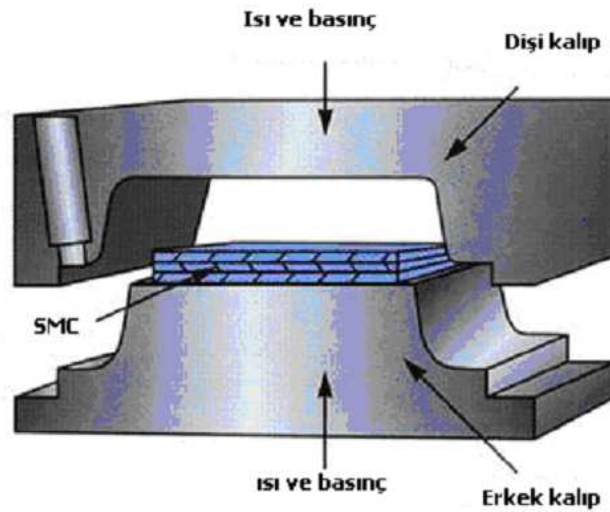
arttırmak için de kalıp belli bir sıcaklığa kadar ısıtılabilir. Yüksek hacim ve düşük maliyet gerektiren alanlarda kullanılır. (Ör: otomotiv sanayi) tamponda, göğüs panelleri, pikapların taşıyıcı kısımları gibi [14].

3.2.4. Baskı kalıplama yöntemi

Yüksek üretim kapasitesi gerektiren yerlerde çok yaygındır. Dört adet temel baskı kalıplama yöntemi vardır [14]:

1. SMC hazır kalıplama bileşeni (tabaka kalıp bileşeni)
2. BMC hazır kalıplama bileşeni (hacimli kalıp bileşeni)
3. Islak sistemli preform ve keçeleri presleme
4. Takviyeli termoplastik levha presleme .

Bu yöntemde dişi-erkekli kalıp kullanılır. Önceden hazırlanmış olan baskı kalıplama maddeleri ısıtılmış kalıp arasına yerleştirilir ve belirli bir basınçta kalıp kapatılarak dolgu malzemesine istenilen şekil verilmiş olur [14].



Şekil 3.7. SMC hazır kalıplama bileşeni ile baskı kalıplama [14]

Prosesin en önemli avantajı, delik, flanş ve doğrusal olmayan kalınlıkları üretebilmesi ve ikincil bir işleme gerek kalmamasıdır. Kaliteli yüzeyler için lif oranı %30 'la sınırlıdır. Bu yüzden bu oran göz önünde bulundurularak mekanik özellikler optimize edilmelidir. Kalıp hareketiyle malzeme kalıp boşluğuna yayılır ve bu esnada da malzemenin içine sıkışan havanın dışarı çıkmasını sağlar. Bu yöntemde

üretilem parçalar RTM ve Enjeksiyon kalıplamayla üretilem parçalardan daha incedirler. Bu nedenle kalınlık boyunca sıcaklık değışimi düzgün doğrusaldır. Bu üniform bir kür işleml demektir. Üniform kür de parçada ilave gerilmelerin önlenmesi demektir [14].

Kalıp malzemesi olarak çelik seçilir. Yüzey kalitesini arttırmak için de kalıp yüzeyi krom ve nikelle kaplanır.

SMC takviye malzemeleri, reçine, dolgu malzemeleri, kimyasal kalınlaştırıcılar, katalizörler, kalıp ayırıcılar ve raf ömrünün uzamasını sağlayan diğler katkıların birleştirildiğı, tamamen bütünleştirilmiş kalıplama bileşendir. Levha halindeki çeliğın kompozit karşılığı da denebilir [14].

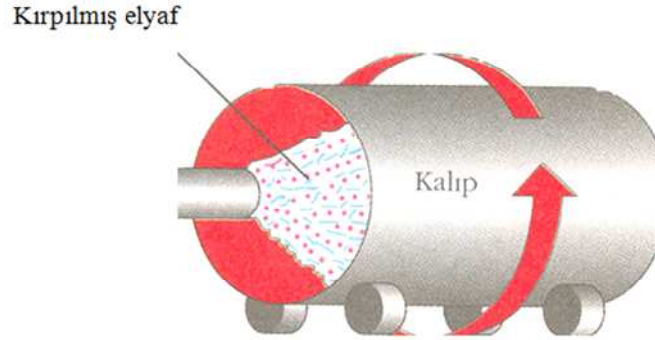
Otomotiv, elektrik/elektronik ve ev aletlerinde ağırlıklı olarak kullanılır. Örnek radyatör destekleri, ağır taşıtların sürücü kabinleri, motor bileşenleri, kişisel tekneler, küvetler ve cephe lambalarında.

3.2.5. Savurma Döküm (Santifrüj) Kalıplama

Bu kalıplama yöntemi, boru, direk, depo, tank gibi silindirik yapıların üretiminde kullanılır. İçi boş mandrel (kalıp) içerisine kırılmış matlar reçineyle birlikte püskürtülür. Yüksek bir çevresel hızla dönen kalıbın oluşturduğu merkezkaç kuvveti, reçine ile temas eden takviye malzemelerin ıslanmasını ve laminatın kalıp yüzeyine yapışmasını sağlamaktadır. Bu yöntemde üretilem parçanın kalıbın iç yüzeyine temas eden dış kısmı parçanın düzgün yüzünü temsil eder, genelde her iki yüzü düzgün ürün elde edilir. Üretilem kompozit parçanın kimyasal dayanımını arttırmak için, iç yüzüne ince bir kat saf reçine püskürtülebilir. Bu sayede iç yüzey daha da düzgün hale getirilebilir. Döndürmeli kalıplama yönteminde kalıp içerisindeki parça arzu edilen biçimi aldığıında, su veya soğutma sıvısı püskürtülerek ya da basınçlı hava ile kalıp soğutulur. Bazen de kalıp yarımaları içerisine açılan soğutma kanallarından gönderilem sıvı ile kalıp soğutulur [14].

Avantajları: Düzgün dış yüzeylerin elde edilmesinde bir sorun yaşanmaması ve üretim esnasında çıkan organik gazların kontrol edilebilmesi olarak sayılabilir.

Dezavantajları: Büyük boyutlu kalıpları döndürmede sıkıntı yaşanması ve iç yüzeye tül uygulama zorluğu yaşanmasıdır.

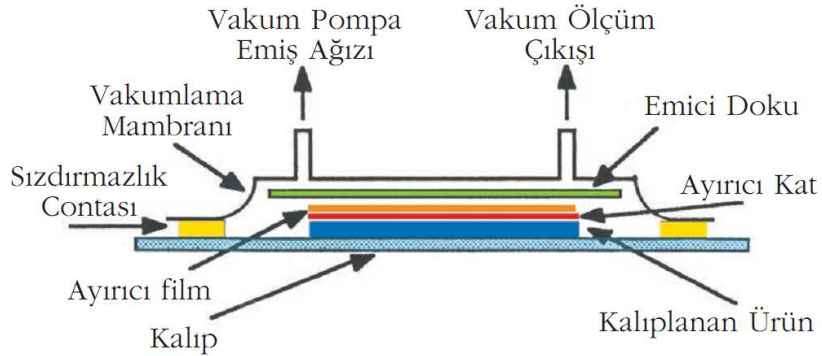


Şekil 3.8. Santifrij Kalıplama Düzenegi [14]

3.2.6. Vakum Torbası/ Otoklav Prosesi

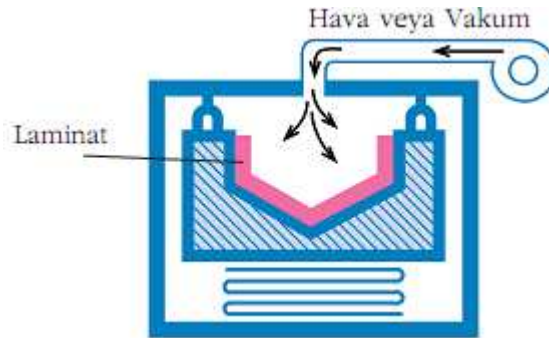
Uçak ve uzay endüstrisi ve talep edilen birçok son ürün alanında high-tech kompozit malzemelerinin kullanımı, özel kompozit kalıplama yöntemlerinin gelişmesini sağlamıştır. Bu prosesler, ticari amaçla üretilen kompozit malzemelerin kullanımı açısından küçük bir tonaja sahip olmasına rağmen, özel ya da performansın kritik olduğu uygulamalarda kullanılır. El yatırmasıyla benzerlik göstermektedir. Belirgin olan fark ise, sertleşme işlemi sırasında basınç uygulanmasıdır. Bu kalıplama yöntemlerinin her birinde malzeme uygulama aşamasında, ıslak sistemler ve prepregler kullanılır. Islak sistemlerde keçe veya dokunmuş fitil takviyeleri kalıba yerleştirilir. Sıvı reçine, takviye malzemesi yüzeyine uygulanır. Kolay şekillenebilir plastik bir film (torba diye de adlandırılır), reçine emdirilmiş takviye malzemesinin üzerine yerleştirilerek, parçanın çevresinde kalıba yapıştırılır. Islak sistem yerine prepreg kullanıldığında, levhalar ve şeritler kalıp yüzeyine el ile yerleştirildikten sonra, plastik film kaplanır. Vakum torba kalıplamada, kalıp yüzeyi ile plastik film (torba) arasındaki hava vakumlanır. Islak sistem kullanıldığında, önce reçine takviye malzemesine emdirilir. Daha sonra, sertleşme tamamlanana kadar vakum uygulanarak, plastik filmin atmosferik basınç altında kalması sağlanır. Sertleşme

süreci, ayrıca ısı uygulanarak da hızlandırılabilir. Basınç torba kalıplama, atmosferik basınçtan daha yüksek basınçların kullanılması gereken uygulamalarda kullanılır. Bu yöntemde prepreg veya yaş sistem malzemeleri kullanılabilir. Esnek plastik film reçine emdirilmiş takviye malzemesi üzerine yerleştirildikten sonra, yaklaşık 3,5 bar'lık basınç sertleşme tamamlanana kadar plastik film yüzeyine uygulanır [16].



Şekil 3.9. Vakum torba kalıplama düzeneği [16]

Otoklav kalıplamayla vakum ve basınçlı torba kalıplama yöntemleri kombine edilmiştir. Prepreg veya ıslak sistemlerin her ikisi de kullanılır. Kalıp ve kompozit parça üzerine önce vakum uygulanır, daha sonra sertleşme reaksiyonu için otoklava yerleştirilir. Bu arada vakum uygulamasına devam edilir. Isı ve dış basınç yüksek basınçlı buhar kullanılarak sağlanır. Günümüzde bir çok yüksek performanslı kompozit uçak parçası, bu yöntemle üretilmektedir [16].

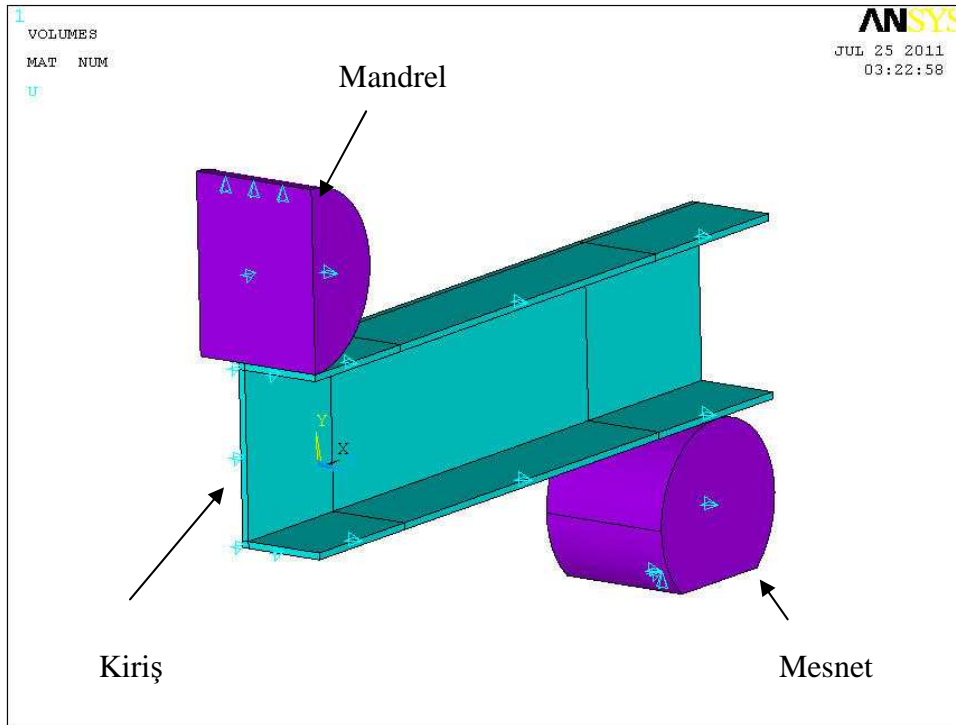


Şekil 3.10. Basınç torba kalıplama [16]

BÖLÜM 4. TÜP KİRİŞİN SONLU ELEMAN MODELİ VE ANALİZİ

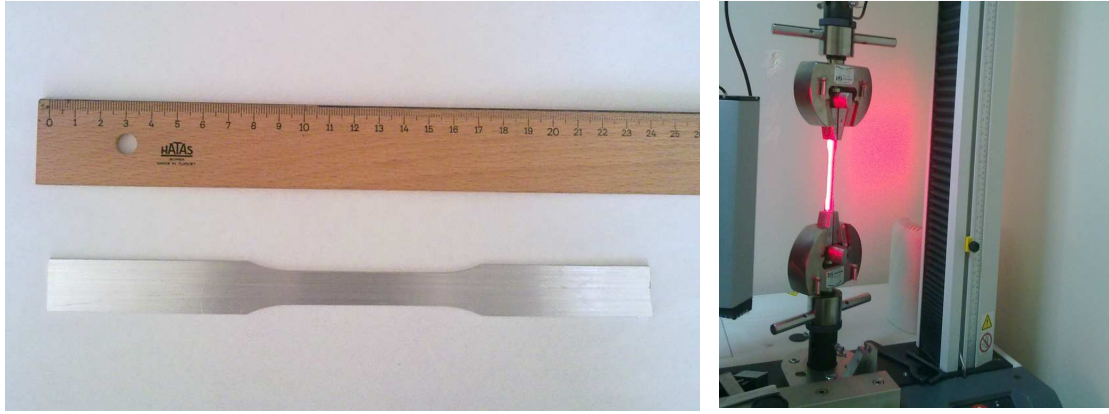
4.1. Kirişin Modellenmesi

Kiriş ANSYS 12.0 sonlu elemanlar yazılımında simetri eksenlerinden yararlanılarak 3 nokta eğme şartlarında Şekil 4.1’de görüldüğü gibi çeyrek olarak modellenmiştir.



Şekil 4.1. Kirişin simetri eksenlerine göre modeli

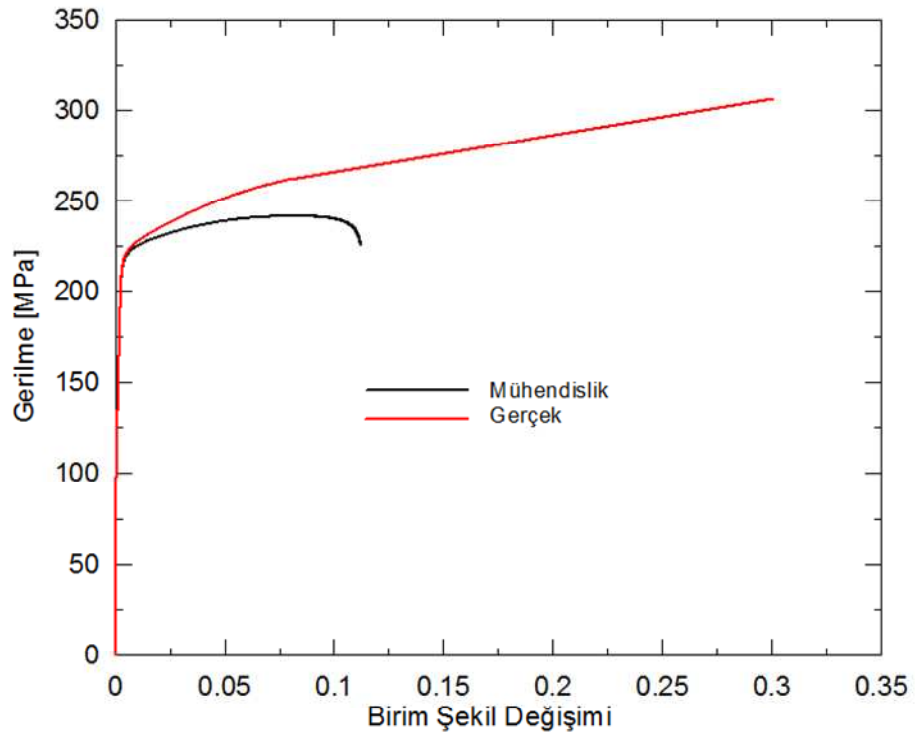
Tüp kirişten ASTM standartlarına göre çıkarılan numune, Instron marka cihazda video ekstansometreli çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4.2).



a

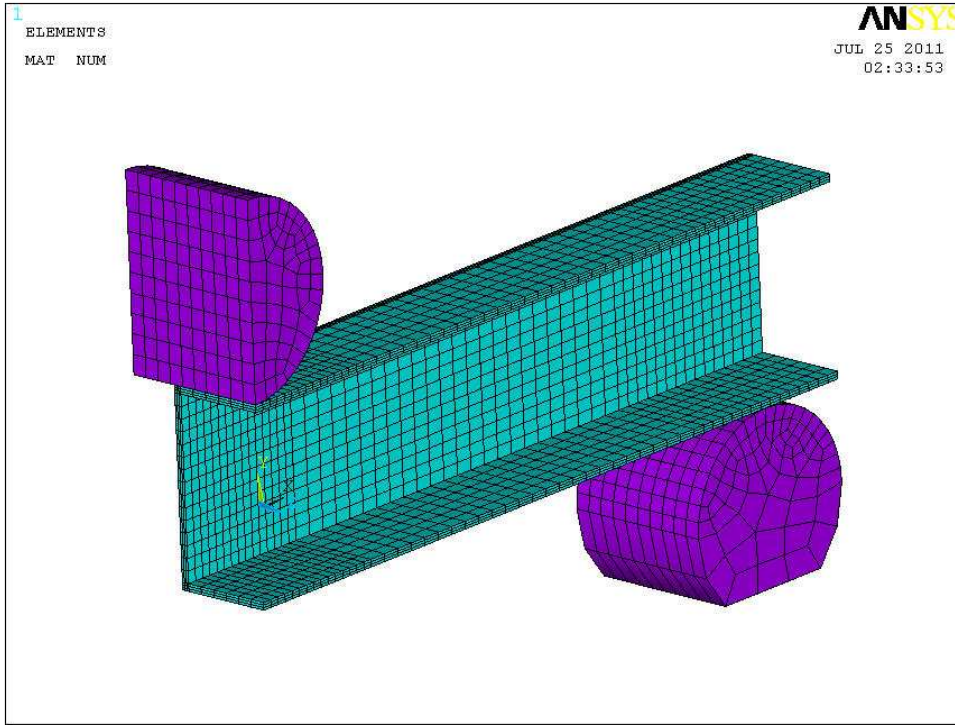
b

Şekil 4.2.a Çekme numunesi, b Videoekstansometreli çekme cihazı (Instron)



Şekil 4.3. Çekme deneyi sonuçları

Instron'da yapılan çekme testinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 4.3'te verilmiştir. Elde edilen veriler ışığında hazırlanan sonlu elemanlar modelinde eleman tipi olarak Solid 95 seçilmiştir. Eleman sayısı da 5346 olarak belirlenmiştir. Mandrel ve mesnet temas bölgelerinde daha hassas veriler elde etmek için Şekil 4.4'te görüldüğü gibi eleman sayısı fazla tutulmuştur.



Şekil 4.4. Tüp kirişin sonlu eleman modelinin gösterimi

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

5.1.1. Ana Taşıyıcı Malzeme

Ana taşıyıcı olarak 6063-T5 malzemesinden 40x40 mm kesitinde, et kalınlığı 1.5 mm, boyu 320 mm olan kare kesitli alüminyum tüp kiriş kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Alüminyum 6063 malzemenin kimyasal bileşimi

Element	% Oran	Element	% Oran
Si	0.44	Cu	0.02
Mg	0.50	Zn	0.0111
Fe	0.22	Mn	0.0132
Ti	0.0093	Cr	0.003
Pb	0.003		

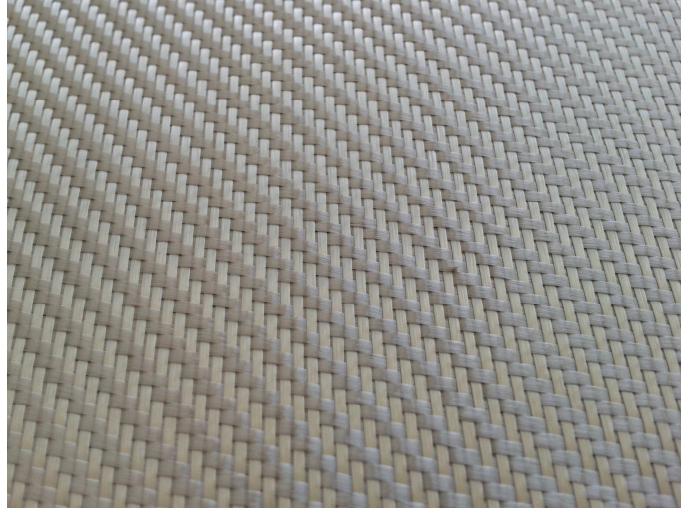
5.1.2. Takviye Malzemeleri

- Matris Malzemesi:

Matris malzemesi olarak Hexion marka MGS L285 epoksi reçine ve MGS H285 sertleştirici kullanılmıştır. Karışım, 100 g epoksi için 40 g sertleştirici kullanarak yapılmaktadır. Epoksi içine sertleştirici katıldıktan sonra 4-5 dk. karışım berraklaşana kadar yavaşça karıştırılır.

- Elyaf Türü:

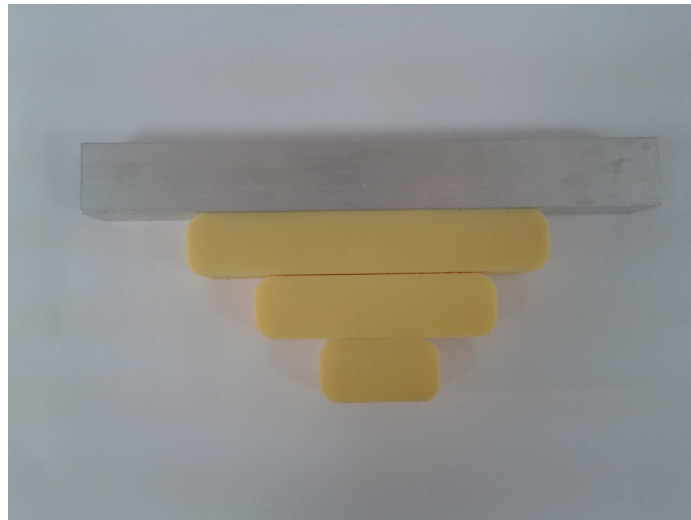
Takviye malzemesi olarak 0/90 elyaf yönlenmesine sahip 300 g/m² twill dokuma cam elyaf kumaş kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Twill dokuma cam elyaf kumaş

- İç Takviye Malzemesi:

Ana taşıyıcıyı içerden takviye etmek üzere 70,140 ve 210 mm ölçülerinde kestamid takozlar hazırlanmıştır (Şekil 5.2). Takozların eğme deneyi esnasında çentik etkisi oluşturabilecek köşelerine 10 mm yuvarlatma yarıçapı uygulanmıştır.



Şekil 5.2. Alüminyum tüp kiriş ve kestamit takozlar

5.2. Üretim Metodu

El yatırması yöntemiyle (Şekil 5.3) ıslatılan elyaflar taşıyıcı malzemenin üzerine dikkatlice sarılır.



Şekil 5.3. El yatırması yöntemiyle numunenin hazırlanması

Deney numuneleri ilk olarak delikli naylon torba ile sarılır. Bu torba vakum altında fazla epoksinin dışarı atılmasını sağlar. Daha sonra vakum battaniyesi ile sarılan numuneleri pürüzsüz düz bir yüzeye yerleştirilir. Üzerine son katman olan özel vakum naylonu sızdırmazlık bandı ile uygulanır. Numuneler oda sıcaklığında -600 mmHg vakum altında bir gün boyunca bekletilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Vakum torbalama uygulaması

5.3. Deney Cihazı

Deneyler Şekil 5.5'te görülen bilgisayar kontrollü 50 kN kapasiteli 3 nokta eğme deney cihazında yapılmıştır.

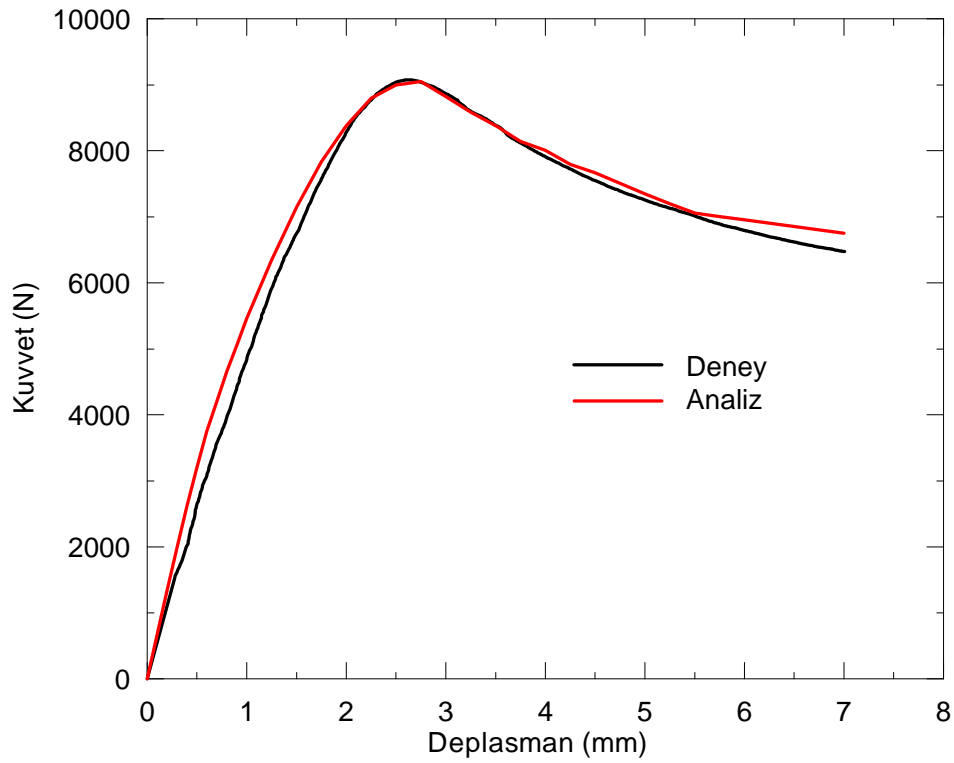


Şekil 5.5. Deney cihazı

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Analiz Sonuçları

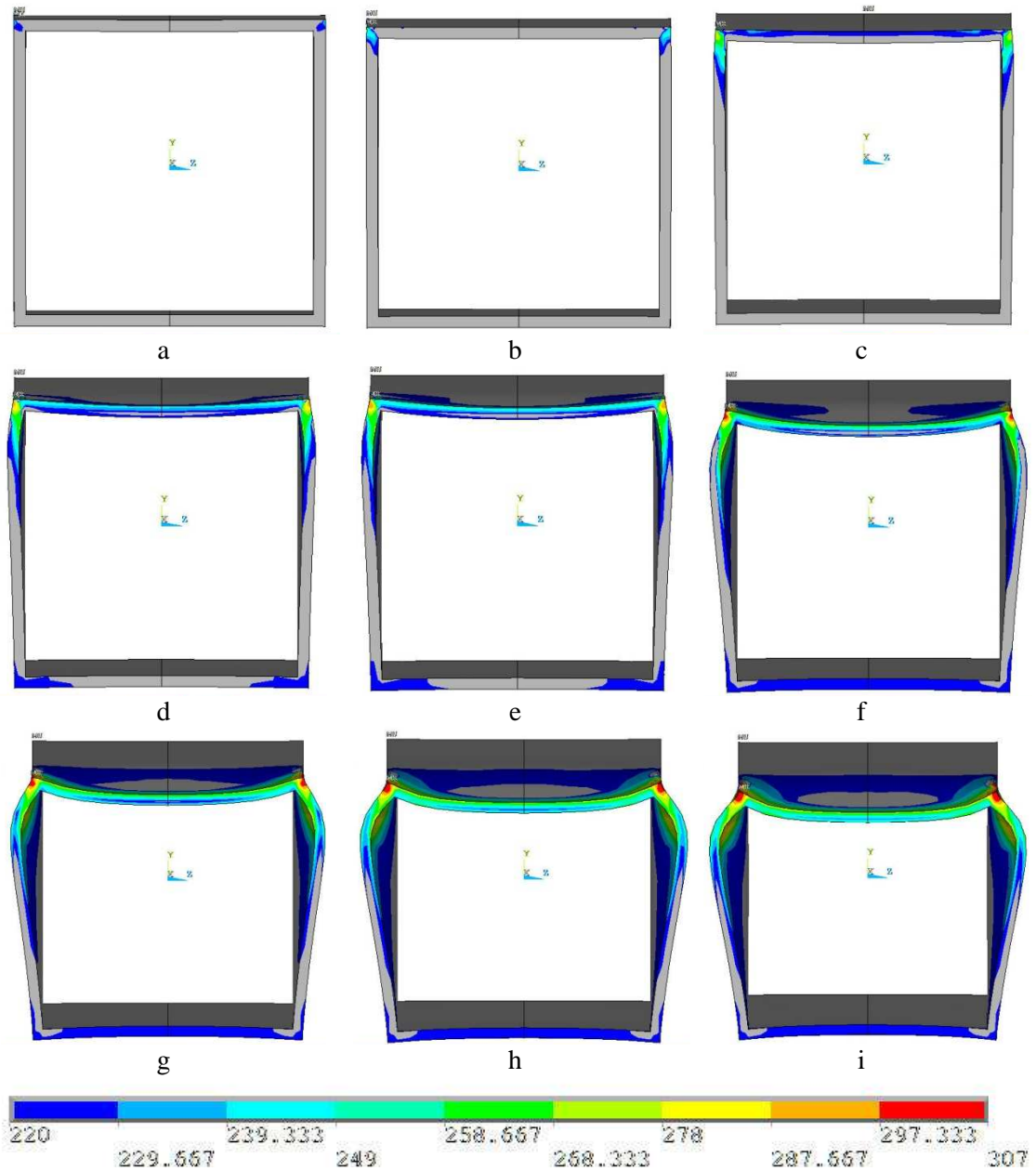
Tüp kirişin ANSYS sonlu elemanlar programıyla 3 nokta eğme şartlarında simüle edilmesiyle deney esnasındaki hasar oluşumu hakkında bilgiler elde edilmiştir. Elde edilen bu bilgiler takviyesiz kirişin deneyleriyle oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Kirişin deformasyon davranışı dikkate alınarak takviye olarak kullanılacak malzeme seçimi ve boyutlarının belirlenmesinde yol gösterici olmuştur (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Tüp kirişe ait deney ve analiz sonuçları

Şekil 6.1 incelendiğinde deney sonuçları ve analiz sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür. Bu sonuçlar deney esnasında görülmeyen bazı hasar oluşumları ve gerilmeler hakkında daha sağlıklı yorumlar yapma imkanı sunmuştur.

Yapılan analizler sonucunda mandrel temas noktasındaki gerilmelerin (Von-Mises) incelenmesi amacıyla bölgenin kesit görüntüsü farklı deplasman değerleri için Şekil 6.2’de toplu olarak verilmiştir.

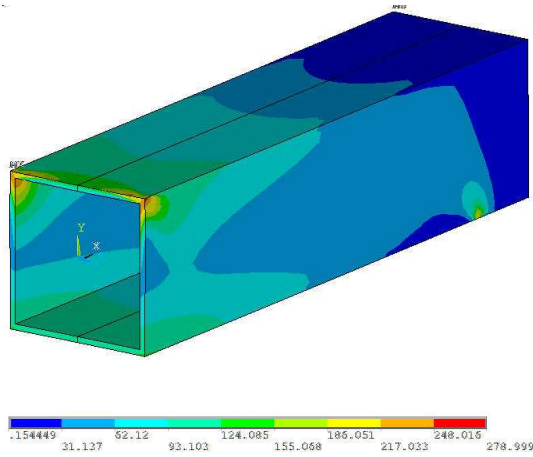


Şekil 6.2. Mafsal bölgesinde deplasmana bağlı oluşan gerilmelere (Von-Mises) ait kesit görüntüleri (a=0.5 mm, b=1, c=2, d=2.75, e=3, f=4, g=5, h=6, i=7mm)

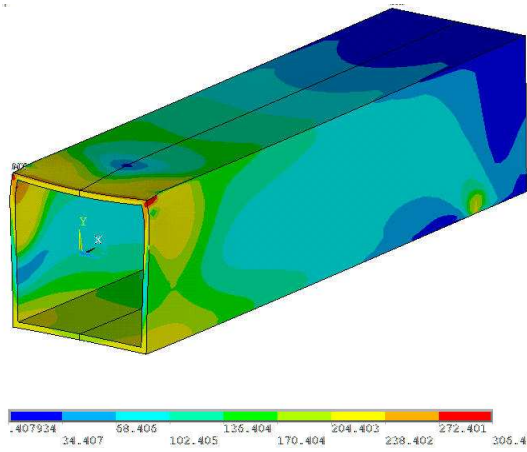
Verilen görüntülere ait skalada alt gerilme değeri akma sınırı (220 MPa) olarak seçilmiştir. Gri bölgelerde akmanın oluşmadığı anlaşılmalıdır.

Şekil 6.2 İncelendiğinde 0.5 ve 1 mm deplasmanlarda (Şekil6.2a-b) mandrel temas noktasında köşelerde oluşturduğu gerilme 2 mm deplasmanda(Şekil 6.2c) üst yüzeye de yayılmakta 2.75 mm deplasmanda (Şekil 6.2d) yük maksimum değerine ulaşan kuvvetin etkisiyle burkulmaya başlamaktadır. Burkulmanın da etkisiyle alt köşelerde de hasarlanma oluşumu başlangıcı göze çarpmaktadır. Takip eden deplasman değerlerinde(Şekil 6.2e-f-g-h-i) mafsall oluşumunun hızlandığı, mafsall bölgesinde yan yüzeyler dışa, üst ve alt yüzeylerin içe doğru hareket ettiği görülmektedir. Deneysel çalışmalarda da malzemenin sertliğine göre gerilmenin yoğunlaştığı bölgelerde yırtılmalar oluştuğu gözlemlenmiştir.

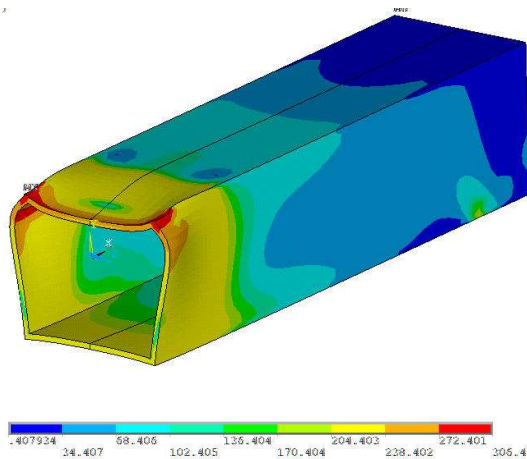
Ayrıca Şekil 6.5'te görülen kiriş yüzeylerdeki gerilme dağılımı ile CE takviye edilmiş kiriş yüzeylerindeki gerilme beyazlığı olarak adlandırılan hasar oluşumu (Bkz. Şekil 6.11) benzerlik göstermektedir.



Şekil 6.3. 1 mm deplasmanda oluşan gerilmeler



Şekil 6.4. 2.75 mm deplasmanda oluşan gerilmeler



Şekil 6.5. 7 mm deplasmanda oluşan gerilmeler

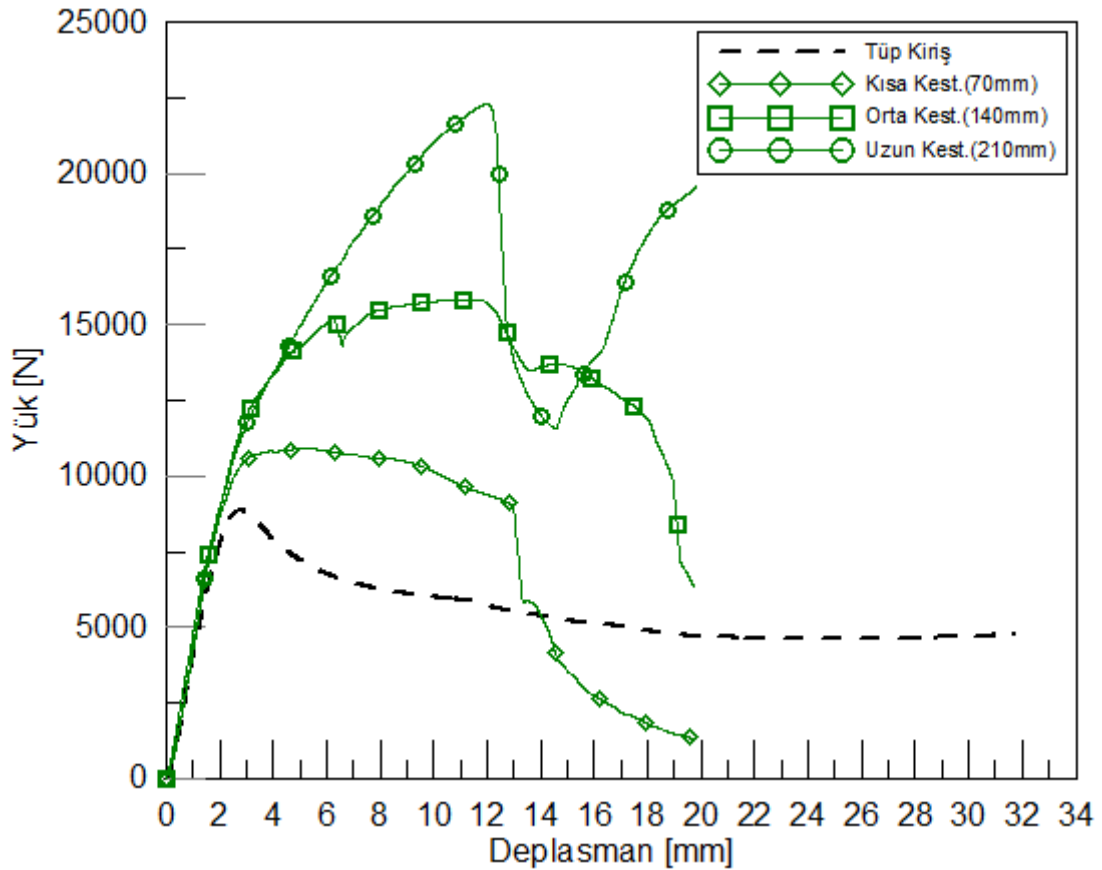
Şekil 6.3 incelendiğinde gerilmelerin temas mandrel ve mesnet temas bölgelerinin yoğunlaştığı görülmektedir. Eğme hareketiyle oluşan dönmeyle üst ve alt yüzeylerde yoğunlaşan gerilmelerin, yan yüzeylerin ortasına doğru azaldığı görülmektedir.

Numunenin maksimum yük taşıma değerine ulaştığı deplasman olan 2.75 mm'de kirişte akma sınırını geçen yani kalıcı deformasyona uğrayan üst temas noktaları ezilerek kirişin yan yüzeylerinin dışa burkulmasını tetiklemekte ve mafsal oluşumu hız kazanmaktadır.

Kirişin 7 mm deplasman değerine ulaştığı durumda kirişin çökmesinden dolayı yan ve üst yüzeylerdeki gerilme yoğunluğunun azaldığı, mandrel temas yüzeyi ile sınırlı kalan bölgede yoğunluğun arttığı görülmektedir. Şekil 6.5'te görülen gerilme dağılımı ve kalıcı deformasyon, kirişe yapılacak kısmi takviyeler konusunda aydınlatıcı bilgiler vermektedir.

6.2. Deneysel Sonuçları

Kirişin içeriden farklı boydaki kestamitlerle takviye edilmesi durumunda kirişe ait Yük-Deplasman eğrisi Şekil 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.6. Kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deneysel sonuçları

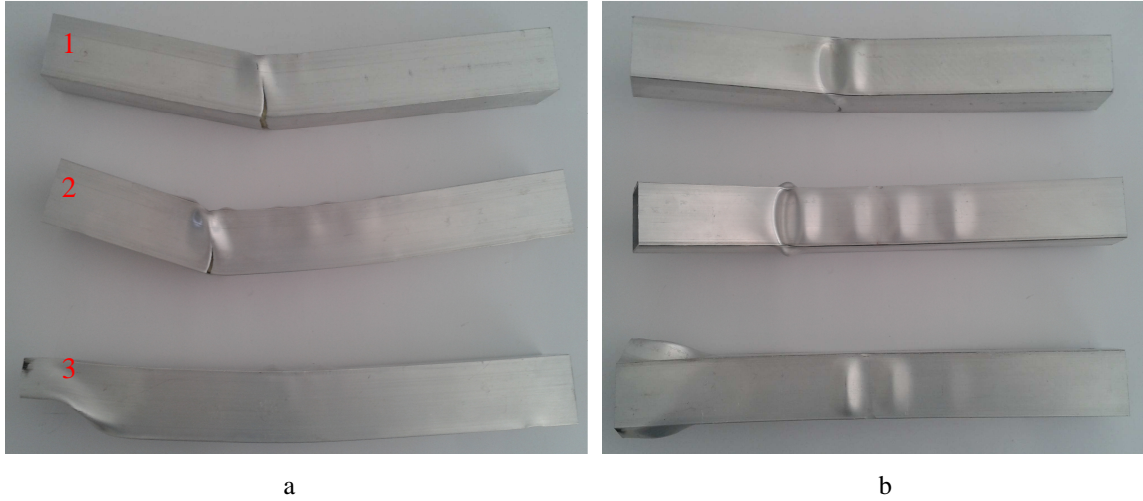
Şekil 6.6 incelendiğinde, kirişin içerisine yerleştirilen kestamitin boyuna bağlı olarak yük taşıma kabiliyetinin farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Artan kestamit boyu ile elde edilen maksimum yük değeri 22 kN ‘un üzerine çıkmıştır. Eğrilere ait maksimum yük taşıma miktarı (MYTM), özgül yük taşıma miktarı (ÖYTM), enerji absorbe etme miktarı (EAEM), özgül enerji absorbe etme miktarı (ÖEAEM) Tablo 6.1’de toplu olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.1: İçeriden kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları

	Ağırlık (g)	MYTM (N)	Değişim oranı	ÖYTM (N/g)	Değişim oranı	EAEM (Nmm)	Değişim oranı	ÖEAEM (Nmm/g)	Değişim oranı
Tüp Kiriş	200	8876	1	44,38	1	171669	1	858,35	1
Kısa Kest. (70mm)	300	10925	1,23	36,42	1,17	142760	0,83	475,87	0,56
Orta Kest. (140mm)	408	15833	1,78	38,81	1,12	251168	1,46	615,61	0,72
Uzun Kest. (210mm)	517	22279	2,51	43,09	0,97	302439	1,76	584,99	0,68

Kestamitin varlığı, mandrelin içi boş kirişte yerel olarak neden olduğu deformasyonu engellenmiş olması beraberinde cidar yan yüzeylerinin de burkulmasını da engellemiştir. Buna karşın, kısa ve orta kestamitli kirişlerde takviye malzemesinin sona erdiği üst cidarlarda buruşma, yan cidarda burkulmayı takip eden süreçte alt cidarda gerilme yoğunlaşması sonucu yırtılma meydana gelmiştir. Yırtılmanın etkisi grafikte yük değerinin ani düşüşü şeklinde kendini göstermiştir (Şekil 6.6).

Literatürde benzer şekilde içeriden takviye malzemesi olarak alüminyum köpüğün kullanıldığı bir çalışmada kısmi takviye malzemesinin artan boyu ile yük taşıma kabiliyetinin iyileştiği ifade edilmiştir. Ancak gözenekli alüminyum yapı yüklemenin etkisiyle sıkışmakta ve dolayısıyla taşıyıcı kiriş cidarında herhangi bir hasar görülmemiştir [4].



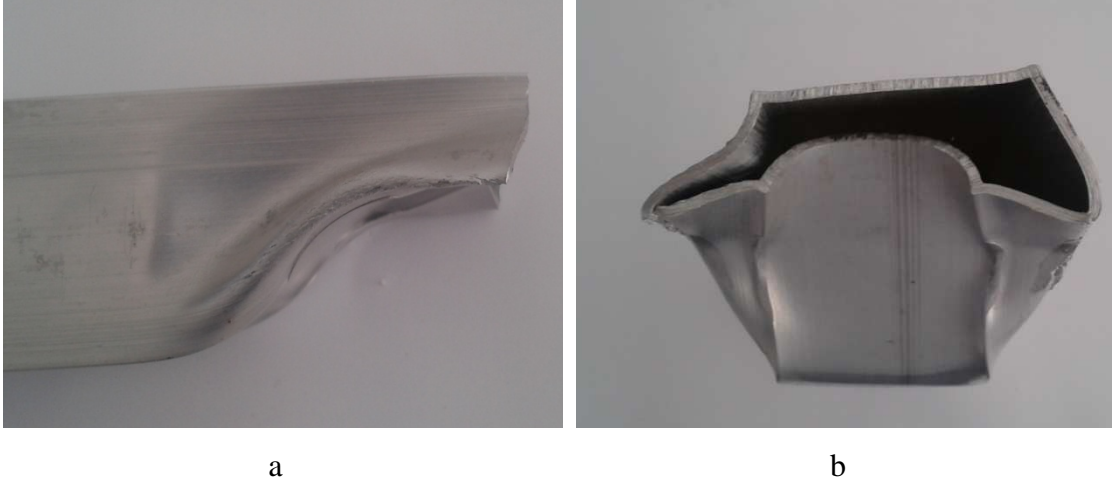
Şekil 6.7. Kestamit takviyeli numunelerin yandan(a) ve üstten(b) görünümü

Sadece içeriden takviye edilmiş kirişlerde, takviyesiz olanlarda farklı bir hasar mekanizması gözlemlenmiştir. Ayrıca takviye malzemesinin boyutuna göre de hasar mekanizması farklılık göstermiştir. Örneğin takviye malzemesinin boyu kısa tutulduğunda deney esnasında kiriş cidarları kestamit takozun alt kenarları etrafında sarılmakta ve bu bölgede yoğunlaşan gerilmeye bağlı olarak alüminyum cidarda yırtılma gerçekleşmektedir (Bkz. Şekil 6.6. Deplasman 13 mm).

Kestamit takoz boyu arttıkça, kestamit üzerinden yük daha geniş bir alanda etkin olduğundan, takozun bitim noktasında sarılma nispeten daha düşük, dolayısıyla da yırtılma daha yüksek yüklerde gerçekleşmiştir.



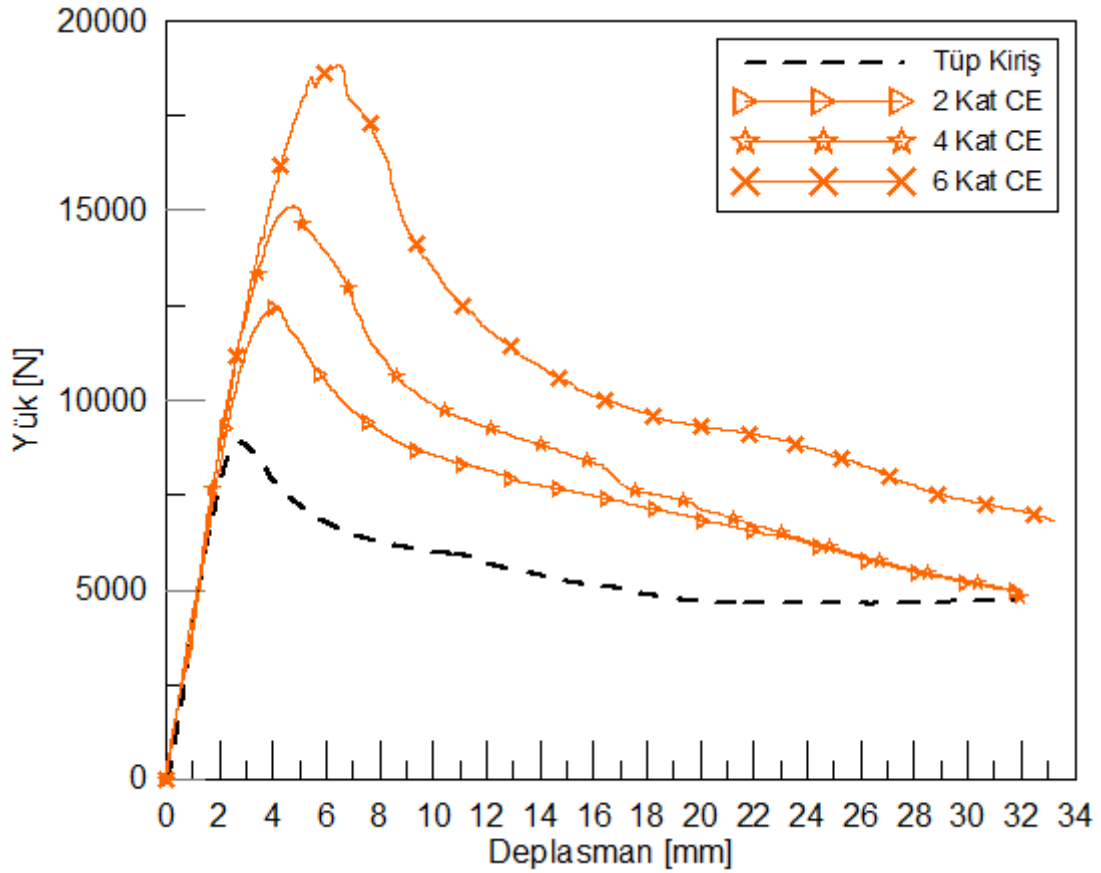
Şekil 6.8. Kısa kestamit (70mm) takviyeli kirişte oluşan hasarın görüntüsü



Şekil 6.9. 210 mm kestamit takviyeli kirişte mesnet noktasında oluşan hasarın yandan(a) ve alından(b) görüntüsü

Kestamit malzemesinin boyuna göre hasar gören bölgelerin yeri değişmiştir. En uzun kestamit parçası için kiriş cidarında diğerlerinden farklı olarak yırtılma oluşmamış ancak kiriş mesnetlerin bulunduğu noktada aşırı deformasyonun etkisiyle yığılmıştır (Şekil 6.9).

Dışarıdan CE takviye edilmiş numunelerin Kuvvet-Deplasman eğrileri Şekil 6.10'da verilmiştir.

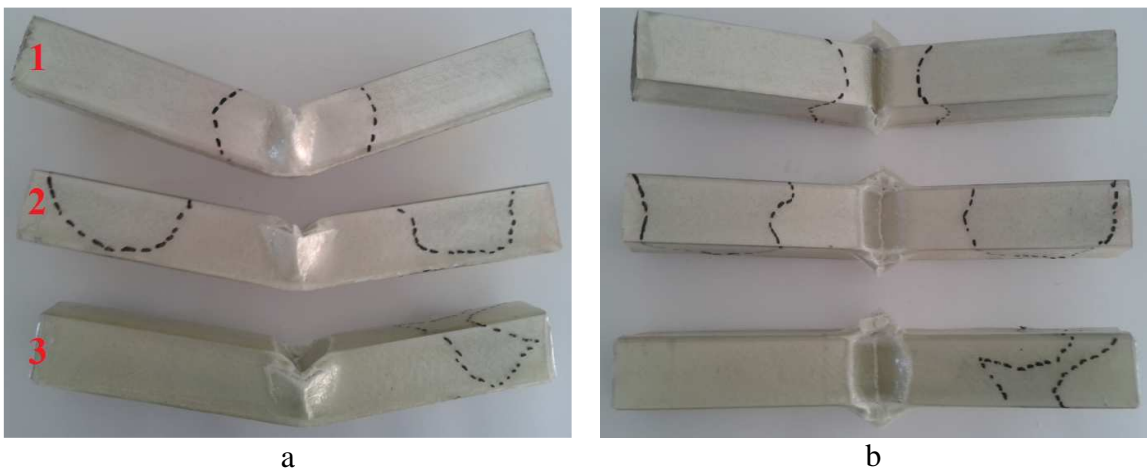


Şekil 6.10. 2, 4 ve 6 kat cam elyaf takviyeli numunelere ait deney sonuçları

Şekilde görüldüğü gibi artan katman sayısı ile kirişin yük taşıma kabiliyeti belirgin bir şekilde iyileştiği dikkat çekmektedir. Bu davranış, literatürde dışarıdan takviye edilmiş kirişler üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla örtüşmekte, kullanılan elyafın mukavemet değerleri, türü ve yönlenmesi ile orantılı olarak kirişin yük taşıma kabiliyeti arttırılabilmektedir[1,2,8,9].

Grafiklerde maksimum yük aşıldıktan sonra ana taşıyıcıda (alüminyum tüp kiriş) yırtılma oluşmadığı için ani düşüşler görülmemektedir. Katman sayısı ile yük taşıma kabiliyetine ilaveten enerji absorbe etme kabiliyeti de artmıştır.

Cam elyaf takviyeli tüp kirişlerle yapılan deneylerde hasar mekanizmasının değişmediği ancak hasar oluşumunun geciktiği gözlemlenmiştir. Bu şu şekilde açıklanabilir; profil yan cidarları mandrel kuvvetinin etkisi altında dışarı doğru burkulmaya çalışırken yüzeydeki elyaf cidarın bu hareketini kısıtlamaktadır. Doğal olarak artan katman sayısı ile cidarlar ancak daha büyük yükler altında burkulma gösterebilmektedir. Elyaf takviyesinin kirişe tesir eden yükün bir kısmını üstlendiği ve yük taşıma kapasitesini arttırdığı deney esnasında gözlemlenen elyaf hasarlanmasından da anlaşılmaktadır. Şekil 6.10'da 4 kat cam elyaf takviyeli kirişin elyafları 24 mm deplasmandan sonra etkisini kaybetmeye başlamıştır. Hasar gören elyaflar yük taşıma kabiliyetini yitirdiği için kiriş önce 2 katmanlı kompozit kirişin taşıma yüküne, 32 mm deplasmandan sonra da elyaf epoksi ve metak epoksi arayüzeyindeki aşırı hasar sonucu olarak takviyesiz kirişin (sadece alüminyum tüp) yük değerine düşmüştür. Yük uygulanan kirişte deney esnasında görülen gerilme beyazlığı olarak adlandırılan oluşum, ara yüzeyler arasındaki ayrılmadan kaynaklanan görünüm farklılığıdır (Şekil 6.11). Bu literatüre gerilme beyazlığı olarak geçmiştir [12]. Oluşum esnasında kiriş üzerinde cam epoksiye göre nispeten daha açık renkler görülmüştür. Ara yüzeylerde oluşan bu hasarın gerçekleşebilmesi için daha fazla yük ve enerji uygulanması gerekmektedir. Takviye edilen elyafın katman sayısına bağlı olarak yük taşıma kapasitesinin artması beklenen bir davranıştır.



Şekil 6.11. 2 kat CE(1), 4 kat CE(2) ve 6 kat CE(3) takviyeli numunelerde oluşan hasar yandan (a) ve üstten (b) görünüşü.

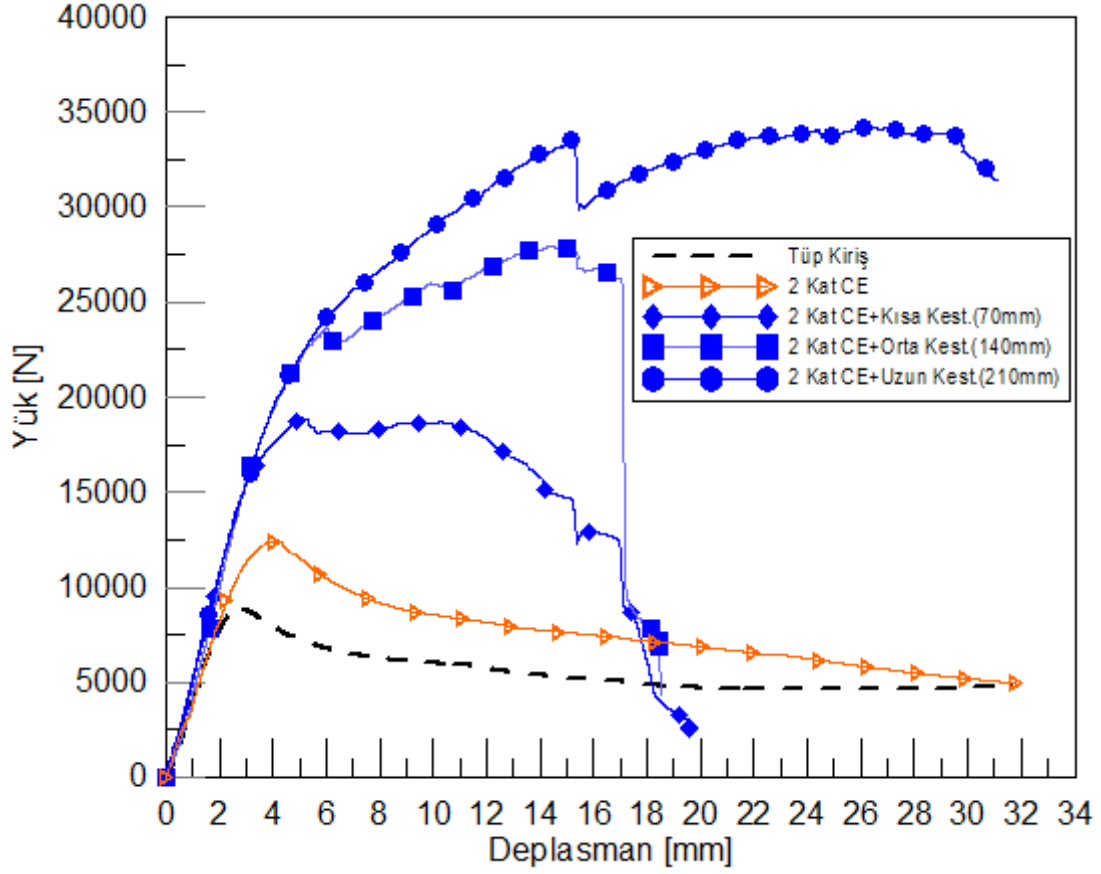
2, 4 ve 6 cam elyaf takviyeli deney numunelerine ait sayısal veriler Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. 2, 4 ve 6 kat cam elyaf takviyeli numunelere ait deney sonuçları

	Ağırlık (g)	MYTM (N)	Değişim oranı	ÖYTM (N/g)	Değişim oranı	EAEM (Nmm)	Değişim oranı	ÖEAEM (Nmm/g)	Değişim oranı
Tüp Kiriş	200	8876	1	44,38	1	171669	1	858,35	1
2 Kat CE	269	12425	1,39	46,19	1,04	236694	1,37	879,90	1,02
4 Kat CE	316	15110	1,70	47,82	1,08	264475	1,54	836,95	0,97
6 Kat CE	367	18820	2,11	51,28	1,15	350599	2,04	955,31	1,11

Tablo 6.2 incelendiğinde yapılan CE takviyelerinin olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. 4 kat CE takviyesi yapılan numunede erken oluşan hasar ÖEAEM değerinin bir miktar düşük çıkmasına neden olmuştur. Maksimum yük taşıma ve enerji absorbe etme miktarları 2 kattan fazla arttırılmıştır.

Dışarıdan 2 kat CE, içeriden farklı boylarda kestamit takviye edilmiş numunelerin Yük-Deplasman eğrileri Şekil 6.12’da verilmiştir.



Şekil 6.12. 2 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları

Şekil 6.12 incelendiğinde dışarıdan cam elyaf takviyesi yapılmış kirişlerin içerisine kestamit takozlar yerleştirilmesi, kirişin rijitliğini belirgin bir şekilde arttırmıştır. Ayrıca içeriden yapılan kestamit takviyesinden sonra kirişte meydana gelen hasar mekanizması değişmiş, cam elyafta oluşan hasarlı bölge alanı genişlemiştir. (Şekil 6.13) Bu da cam elyaf takviyesinden faydalanma oranının arttığını göstermektedir.



Şekil 6.13. 2 kat cam elyaf ve kestamit takviyeli kirişlerin yandan(a) ve üstten(b) görünümü



Şekil 6.14. 2 kat cam elyaf ve 210 mm kestamit takviyeli kirişte mesnet tarafından oluşturulan hasar

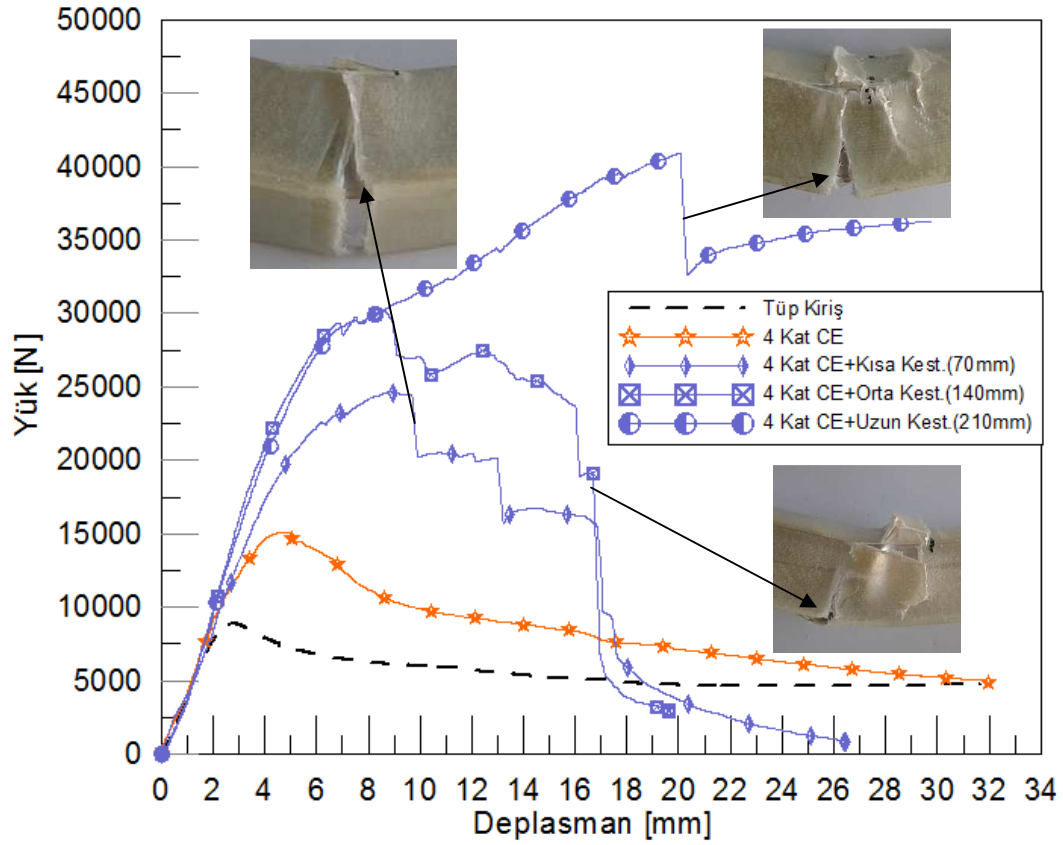
Şekil 6.14'te 2 kat cam elyaf ve 210 mm kestamit takviyeli numuneye mesnet tepkisinin verdiği hasar görülmektedir. Eğme testinde kirişe verilen yükün 32 kN mertebelerine ulaşmasıyla mesnetlerdeki tepki kuvveti 16 kN değerlerine ulaşmıştır. Mesnet bölgelerinde içi boş olan kiriş bu yüke dayanamamıştır. Şekil 6.12'de de görüldüğü gibi 16 kN değeri 2 kat cam elyaf takviyeli tüp kirişin ulaştığı maksimum yükün üzerindedir. Takviye edilen kestamitin uzunluğu 210mm olduğunda hasar mekanizması diğer takviyelere göre farklılık göstermektedir. Deneylere ait sayısal veriler Tablo 6.13'te verilmiştir.

Tablo 6.3: 2 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları

	Ağırlık (g)	MYTM (N)	Değişim oranı	ÖYTM (N/g)	Değişim oranı	EAEM (Nmm)	Değişim oranı	ÖEAEM (Nmm/g)	Değişim oranı
Tüp Kiriş	200	8876	1	44,38	1	171669	1	858,4	1
2 Kat CE+ kısa kest. (70 mm)	358	18911	2,13	52,82	1,19	276268	1,61	771,7	0,9
2 Kat CE + orta kest. (140 mm)	460	27952	3,15	60,77	1,37	383452	2,23	833,6	0,97
2 Kat CE + uzun kest. (210 mm)	570	34175	3,85	59,96	1,35	880215	5,12	1544,2	1,8

Tablo 6.13 incelendiğinde MYTM değerinin yaklaşık 4 kat EAEM değerlerinin yaklaşık 5 kat arttırıldığı görülmektedir. 70 ve 140 mm takviyeli deney numunelerinde ÖEAEM değerlerinin takviyesiz kirişe oranla düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni kirişin takviye malzemesinin bittiği yerden yırtılarak diğer numunelerden daha düşük deplasman değerlerinde (Bkz. Şekil 6.12) yırtılarak yük taşıma kabiliyetini kaybetmesi olarak gösterilebilir.

Dışarıdan 4 kat CE, içeriden farklı boylarda kestamit takoz takviye edilmiş numunelerin Yük-Deplasman eğrileri Şekil 6.15’de verilmiştir



Şekil 6.15. 4 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları

Şekil 6.15 incelendiğinde dışarıdan 4 kat CE takviye edilmesiyle 70 mm takviye edilmiş numunede elyaftaki hasara bağlı olarak kuvvetin kademeli olarak azaldığı, ana taşıyıcı malzemenin yırtılmasıyla da aniden düştüğü görülmüştür. Kademeli olarak düşüşün sebebi elyafta oluşan hasarın homojen olmamasıyla açıklanabilir.



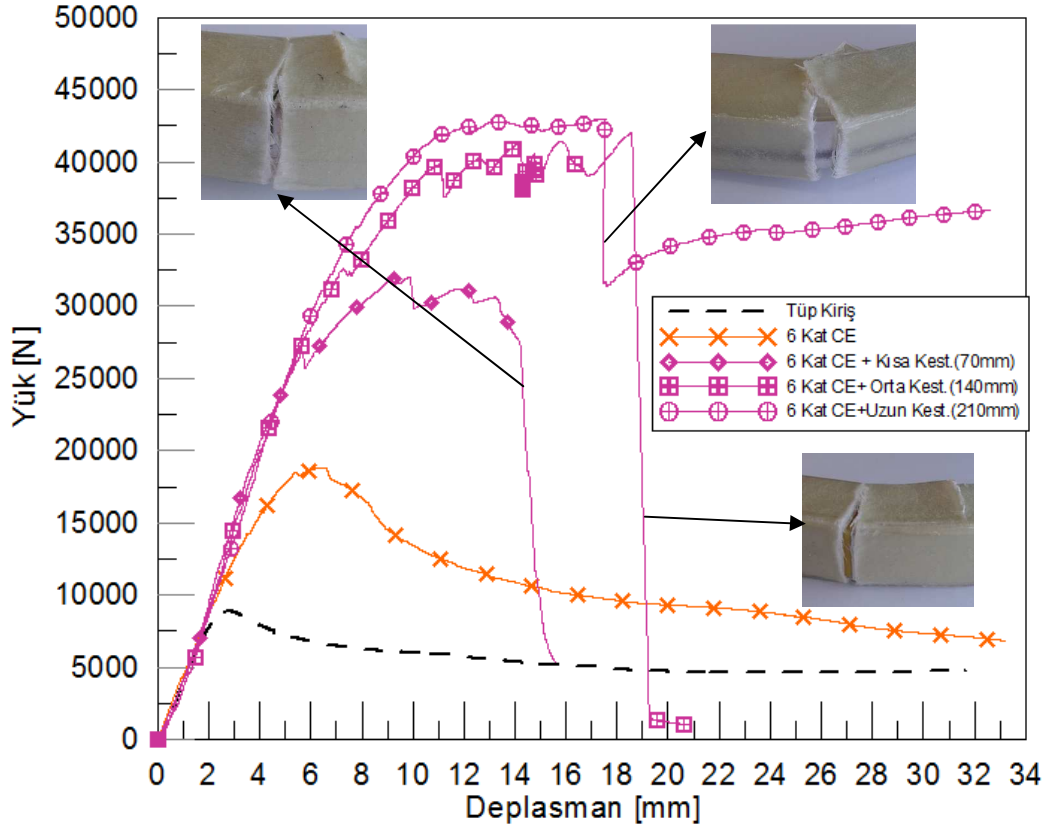
Şekil 6.16 4 kat CE ve kestamit takviyeli kirişin yandan (a) ve üstten görünümü(b)

4 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli deney numunelerine ait sayısal veriler Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4: 4 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları

	Ağırlık (g)	MYTM (N)	Değişim oranı	ÖYTM (N/g)	Değişim oranı	EAEM (Nmm)	Değişim oranı	ÖEAEM (Nmm/g)	Değişim oranı
Tüp Kiriş	200	8876	1	44,38	1	171669	1	858,4	1
4 Kat CE+ kısa kest. (70 mm)	420	24697	2,78	58,8	1,32	522255	3.04	124,53	1,44
4 Kat CE + orta kest. (140 mm)	516	30106	3,39	58,34	1,31	505364	3.53	1175,12	1,36
4 Kat CE + uzun kest. (210 mm)	627	40903	4,6	65,24	1,47	1130202	6.58	1802,5	2,1

Dışarıdan 4 kat CE, içeriden farklı boylarda kestamit takoz takviye edilmiş numunelerin Yük-Deplasman eğrileri Şekil 6.17’de verilmiştir



Şekil 6.17. 6 kat CE ve kısmi kestamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları

Şekil 6.17 incelendiğinde 6 kat cam elyaf takviye edildiği zaman 70 mm kestamit takviyeli numune daha önceki 2 ve 4 kat takviye edilenlerle benzer biçimde hasar gördüğü fakat yük taşıma kapasitesinin boş numuneyle göre 3.6 kat (Tablo 6.5) arttığı görülmektedir. 6 kat cam elyaf ile 140 mm kestamit takviyeli numunede yırtılma davranışı bir miktar geciktirilmiştir. 4 kat CE takviyesi ile 3.39 kat artış sağlanabilirken bu değer 6 kat CE takviyesiyle 4.73 kata çıkmıştır. 210 mm takviyeli kırışte yırtılma görülmemiştir. Şekil 6.17’de de görülen eğrideki ani düşüş cam elyaf takviyesinin orta bölgeden yırtılmasıyla meydana gelmiştir. Ancak bu cam elyafın tamamen devreden çıktığı anlamına gelmemektedir. CE takviyesi mesnet bölgesinde yığılmayı önleyici bir etmen olarak görevine devam etmektedir.

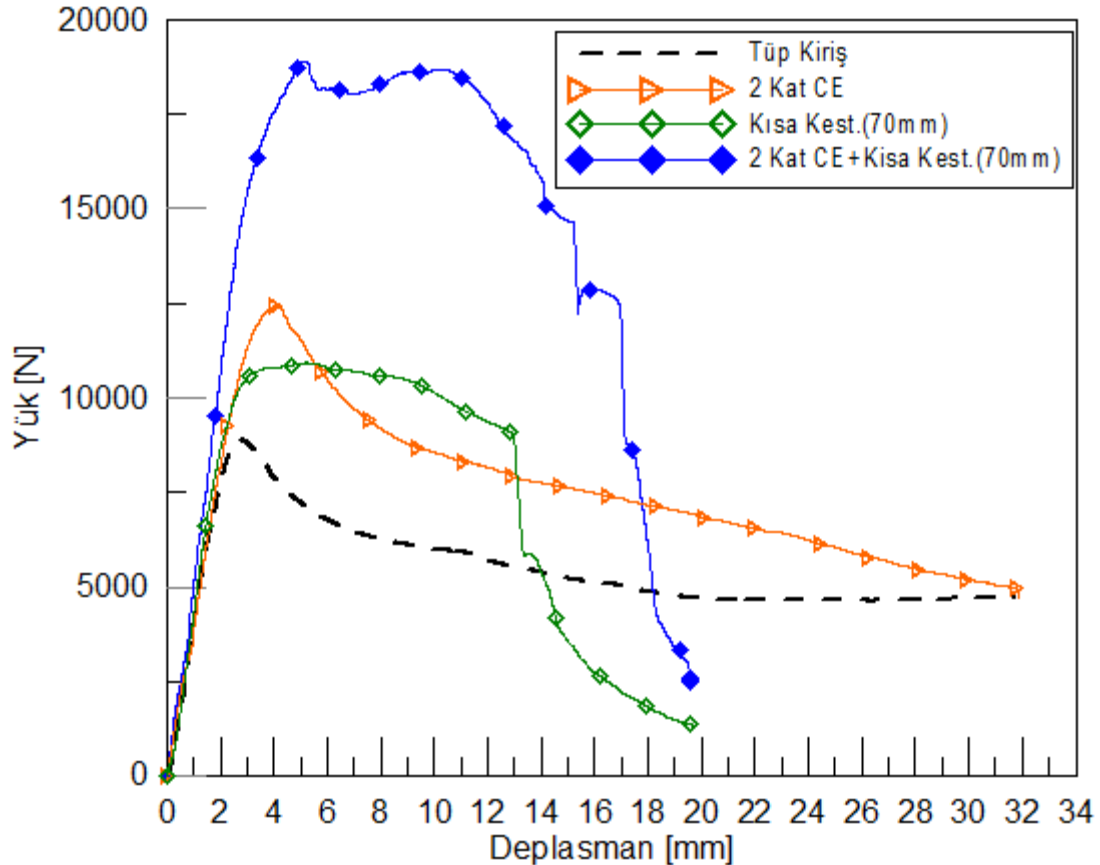


Şekil 6.18. 6 kat CE ve keşamit takviyeli kirişin yandan (a) ve üstten görünümü (b)

Tablo 6.5. 6 kat CE ve kısmi keşamit takviyeli numunelere ait deney sonuçları

	Ağırlık (g)	MYTM (N)	Değişim oranı	ÖYTM (N/g)	Değişim oranı	EAEM (Nmm)	Değişim oranı	ÖEAEM (Nmm/g)	Değişim oranı
Tüp Kiriş	200	8876	1	44,38	1	171669	1	858,4	1
6 Kat CE+ kısa kest. (70 mm)	470	32004	3,6	68,09	1,53	493318	2,88	1049,6	1,22
6 Kat CE + orta kest. (140 mm)	589	42034	4,73	71,37	1,6	691654	4	1174,3	1,36
6 Kat CE + uzun kest. (210 mm)	690	42992	4,84	62,31	1,44	1250770	7,28	1812,7	2,11

Sadece içeriden takviye edilen kısa kestamit (70mm) ve dışarıdan takviye edilen 2 kat CE'nin oluşturduğu bileşik etkiyi incelemek için bu deneylere ait Şekil 6.19'da bir arada gösterilmiştir.



Şekil 6.19. 2 kat CE ve 70 mm kestamit takviyesinin oluşturduğu bileşik etki

Yapılan deneylerde, sadece dışarıdan 2 katman cam elyaf takviyeli numunelerde yük taşıma ve enerji absorbe etme kapasitesinde yaklaşık %40'a, özgül yük taşıma kapasitesinde % 4 ve özgül enerji absorbe etme kapasitesinde %2,5'e varan artış sağlanmıştır.

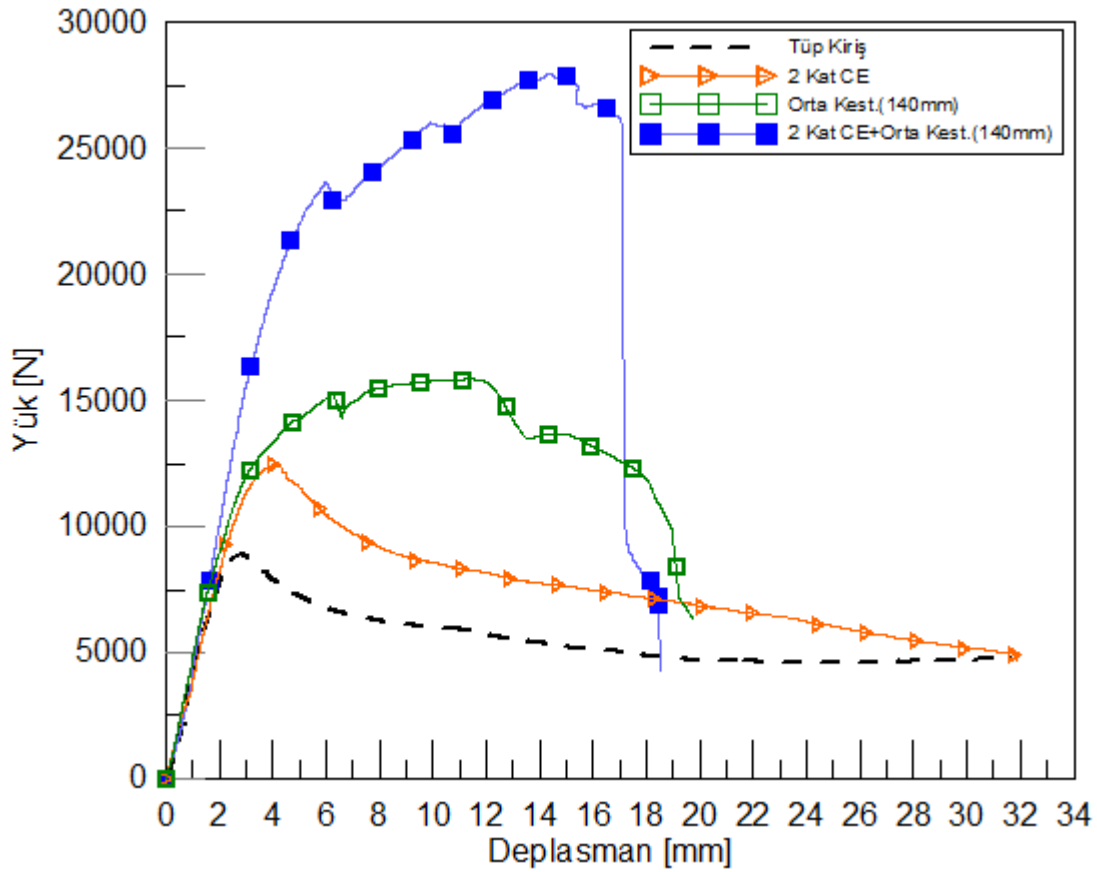
Sadece içeriden 70 mm'lik kestamit takoz ile yapılan kısmi takviye ile yapılan numunelerde ise yük taşıma kapasitesinde %23 artış, enerji absorbe etme kapasitesinde %17 düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüşün sebebi içeriden takviye edilen

takozun hasar mekanizmasını değiştirmesi ve numunenin yırtılarak hasar görmesine neden olmasdır.

Bu deneylerde sadece dđřarıdan yapılan cam elyaf takviyelerinde yan yüzeilerin dđřa hareketini geciktirerek olumlu sonuçlar elde edilmesine karşın, mandrel temas noktasında meydana gelen bölgesel hasar ve devamında oluşan mafsal kirişin çökmesini hızlandırmaktadır.

Kiriş içeriden ve dđřarıdan birlikte takviye edildiğinde (şekil 6.19) yük taşıma kapasitesi %113, yani ayrı ayrı yapılan takviyelerin toplamının yaklaşık iki katı mertebesinde gerçekteşmiştir. İçten ve dđřtan yapılan takviyelerle bileşik etki oluşturularak yük taşıma kapasitesi büyük ölçüde arttırılmıştır.

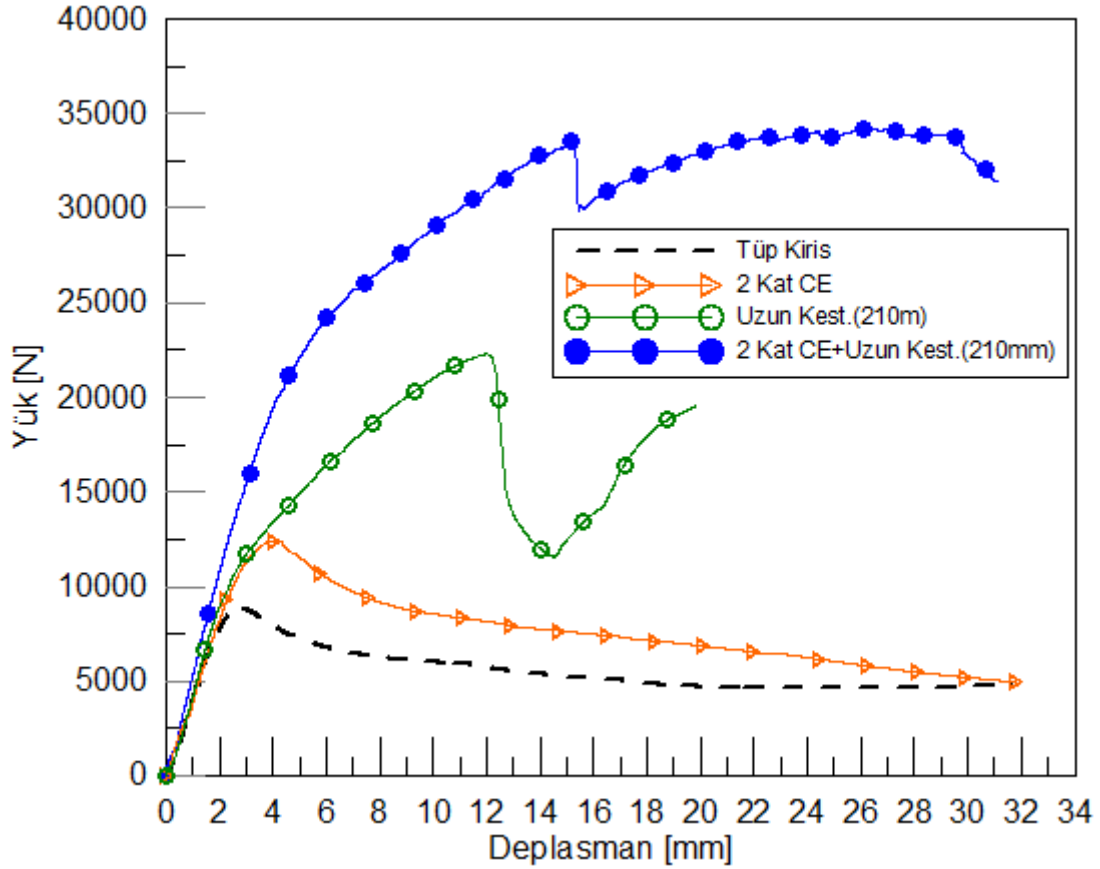
Sadece içeriden takviye edilen orta kestamit(140 mm) ve dışarıdan takviye edilen 2 kat CE'nin oluşturduğu bileşik etkiyi incelemek için bu deneylere ait Şekil 6.20'de bir arada gösterilmiştir.



Şekil 6.20. 2 kat CE ve 140 mm kestamit takviyesinin oluşturduğu bileşik etki

140 mm kestamit takviyeli tüp kiriş dışına CE takviyesi yapılmadığı zaman maksimum 15 kN mertebesinde yük taşıyabilmektedir. Maksimum yük taşıma noktasına ulaştıktan sonra 7-8 mm deplasman boyunca hasarlanarak yırtılmıştır. Cam elyaf takviye edildiğinde ise kirişin rijitliği belirgin bir şekilde artmış yük belirli bir süre artmaya devam ettikten sonra cam elyafın da hasar görüp devreden çıkmasıyla, 27 kN seviyelerine ulaşmış olan kestamit takviyeli kirişte ani bir çökme meydana gelmiştir. Bunun nedeni nispeten gevrek bir malzeme olan CTP'nin hasar gördükten sonra tüm yükü kirişteki diğer elemanlara aktarmış olmasıdır.

Sadece içeriden takviye edilen uzun kestamit (210mm) ve dışarıdan takviye edilen 2 kat CE'nin oluşturduğu bileşik etkiyi incelemek için bu deneylere ait Şekil 6.21'de bir arada gösterilmiştir.



Şekil 6.21. 2 kat CE ve 210 mm kestamit takviyesinin oluşturduğu bileşik etki

Şekil 6.21 incelendiğinde 210 mm kestamit takviyeli kirişe dışarıdan yapılan CE takviyesi rijitliği artırmıştır. Ayrıca mesnet bölgesinde oluşan hasarlanmayı geciktirmiş, bu sayede kirişin enerji absorbe etme miktarını belirgin bir biçimde artırmıştır. Kestamit ve CE takviyesinin birlikte uygulanması, ayrı ayrı uygulanmasına kıyasla çok daha başarılı sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

6.3. Öneriler

Bu çalışmada içeriden takviye ile yan cidarların burkulması engellenmeye çalışılmış, cam elyaf takviyeli kompozit ile de kirişin genel olarak eğme performansı artırılmıştır. Dışarıdan yapılan elyaf yönlenmesi için tek bir dokuma tipi göz önüne alınmıştır.

Dokuma tipinde önemli bir parametre olduğu hatırlanacak olursa, yük taşıma kabiliyeti maksimize edilmiş bir yapıya içeriden yapılacak olan takviyenin toplamda bileşik etkisinin daha fazla olması beklenebilir. Bu açıdan konunun irdelenmesi yerinde olacaktır.

Ayrıca bir diğer değerlendirme kriteri olan özgül yük taşıma ve özgül enerji absorbe etme miktarlarını iyileştirmek amacıyla numunelerin ağırlıkları azaltmak da mümkündür. Bu numunede deformasyon davranışına ve dolayısıyla yük taşıma kabiliyetine katkısı olmayan fazlalık malzemelerin giderilmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] LEE, S. H., KIM, H. J., CHOI, N. S., Bending Performance Analysis of Aluminum-composite Hybrid Tube Beams, *Key Engineering Materials* Vols. 306-308, pp 769-774, 2006
- [2] JUNG, D., Aluminum–GFRP hybrid square tube beam reinforced by a thin composite skin layer, *Composites, Part A* 40, pp 1558–1565, 2009
- [3] LEE, S., An Analysis of the Local Buckling Collapse Behavior of an Aluminum Square Tube under Concentrated Bending Moment Loads, *Key Engineering Materials* Vols. 261-263, 633-638, 2004
- [4] CHEN, W., WIERZBICKI, T., SANTOSA, S., Bending Collapse of Thin Walled Beams with Ultralight Filler: Numerical Simulation and Weight Optimization, *Acta Mechanica* 153, pp 183-206, 2002
- [5] CHEN, W., Experimental and Numerical Study on Bending Collapse of Aluminum Foam Filled Hat Profiles, *International Journal of Solid and Structures* 38, pp 7919-7944, 2001
- [6] SHIN, K. C., Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability., *Composite Structures* 57, pp 279–287, 2001
- [7] KIM, J. H., Yang I. Y., Characteristics of CFRP Structure of Bending Strength and Rigidity According to Stacking Orientation Angle, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 34, Number 1C, 2008
- [8] BASAVARAJU, D. H., Design and Analysis of a Composite Beam for Side Impact Protection of a Sedan, Mysore University, India, 1998
- [9] GHASEMNEJAD, H., BLACKMAN, B. R. K., HADAVINIA, H., SUDALL, B., Experimental studies on fracture characterisation and energy absorption of GFRP composite box structures, *Composite Structures* 88, pp 253–261, 2009
- [10] GÜDEN, M., KAVIA, H., Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes, *Thin-Walled Structures*, 44, pp 739-750, 2006

- [11] LIU, Y. C. , DAY, M. L., Bending collapse of thin-walled beams with channel cross-section, International Journal of Crashworthiness, Vol. 11 No. 3, 2006
- [12] ARAN, A., Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler Ders Notları, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, İstanbul, 1990
- [13] CALLISTER, W.D., Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Edition, A.B.D., 2008
- [14] IŞIK, A., Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. F.B.E., İstanbul, 2008
- [15] MALLICK, P.K., Composite Engineering Handbook, Markel Dekker Inc., New York, 1997
- [16] CTP Teknolojisi , Cam Elyaf Sanayii Yayınları
- [17] ŞAHİN, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000
- [18] KAW, A. K., Mechanics of Composite Materials, Taylor&Francis Group, ABD, 2006
- [19] ERSOY, M. S., Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme Tasarımı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, F.B.E., Kahramanmaraş, 2005
- [20] ARICASOY, O., Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 2006
- [21] http://www.bellhelicopter.com/MungoBlobs/919/124/EN_V-22_GuideBook.pdf , Mayıs 2011
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/Racquet> , Haziran 2011
- [23] <http://www.luisandclark.com/> , Haziran 2011
- [24] http://www.simaymedical.com/?SID=dynamic_walk , Haziran 2011
- [25] <http://www.dostkimya.com/tr/urunler/ipler-fitiller> , Haziran 2011
- [26] ARAN, A., IML212-N8 Ders Notları

ÖZGEÇMİŞ

Kenan ACAR, 1983 yılında Adapazarı'nda doğmuştur. Sakarya Anadolu Lisesi'nden ve İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Halen Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Tasarım ve İmalat Programı'nda yüksek lisans öğrencisidir.