

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM LİFİ TAKVİYELİ PLASTİK (GFRP) KOMPOZİT VE
BETON İLE ÜRETİLEN HİBRİT YAPI ELEMANLARININ
MEKANİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ferhat AYDIN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet SARIBIYIK

Kasım 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**CAM LİFİ TAKVİYELİ PLASTİK (GFRP)
KOMPOZİT VE BETON İLE ÜRETİLEN HİBRİT YAPI
ELEMANLARININ MEKANİK PERFORMANSININ
ARAŞTIRILMASI**

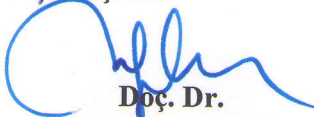
DOKTORA TEZİ


Ferhat AYDIN

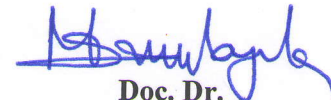
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

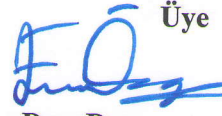
Bu tez 18/11/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Kemalettin YILMAZ
Jüri Başkanı


Doç. Dr.
Serkan SUBAŞI
Üye


Prof. Dr.
Seyhan FIRAT
Üye


Doç. Dr.
Mehmet SARIBIYIK
Üye


Doç. Dr.
Ercan ÖZGAN
Üye

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, akademik hayatım boyunca değerli bilgi ve birikimini paylaşan ve akademik bakış açısı kazandıran danışmanım Doç. Dr. Mehmet SARIBIYIK'a gönülden teşekkürlerimi arz ederim.

Çalışmalarında destek olan sayın hocalarım Prof. Dr. Seyhan FIRAT ve Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ'a, bu çalışma sürecinde birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum değerli bölüm hocalarım ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma, bölümümüz Malzeme laboratuvarında gerçekleştirdiğim deneylerin yapılmasında emeği bulunan teknisyenimiz Sami GÜRSES'e şükranlarımı sunarım.

Doktora tez sürecinde burs aldığım İz Bırakanlar Bursu'ndan dolayı Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TCMB) yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca doktora tezimin başından sonuna kadar beni gönülden destekleyen değerli eşime ve öğrenimim boyunca büyük fedakârlıklarda bulunan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xx
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	8
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT VE HİBRİT YAPI MALZEMELERİ	11
2.1. Taneli Kompozitler	11
2.2. Tabakalı Kompozitler	11
2.3. Taneciklerle Güçlendirilmiş Kompozitler	12
2.4. Lifli Kompozitler	12
2.5. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi	13
2.6. Fiber Takviyeli Plastik Kompozitlerin Üretimi	16
2.6.1. Pultruzyon (profil çekme) metodu	16
2.6.2. GFRP profil çeşitleri	20
2.6.3. Pultruzyon yönteminin avantajları	21
2.6.4. Pultruzyon yönteminin dezavantajları	21
2.7. Kompozit Profillerin Yapılarda Kullanımı	22
2.8. Hibrit Yapı Malzemeleri	29

2.8.1. Betonun FRP profiller ile birlikte kullanımı	30
2.8.2. Konuyla ilgili yapılmış çalışmalar	33
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE METOT	50
3.1. Deneyselde Kullanılan Malzemeler	50
3.1.1. Beton karışım malzemeleri	50
3.1.2. GFRP kutu profiller	53
3.2. Deneysel Çalışmalar	55
3.2.1. Profil lif oranlarının artırılması	57
3.2.2. Basınç deneyleri	57
3.2.2.1. Basınç ön deneyleri	60
3.2.2.2. Numune özelliklerinin geliştirildiği basınç deneyleri ..	61
3.2.3. Eğilme deneyleri	64
3.2.3.1. Eğilme ön deneyleri	74
3.2.3.2. 74 mm kesitli numunelerin eğilme deneyleri	74
3.2.3.3. 100 mm kesitli numunelerin eğilme deneyleri	75
BÖLÜM 4.	
GFRP ÖZELİKLERİNİN BELİRLENMESİ	77
4.1. Deneysel Çalışmalar	77
4.1.1. Birim ağırlık	77
4.1.2. Özgül ağırlık	79
4.1.3. Malzeme çekme özelliklerinin belirlenmesi	80
4.1.3.1. Liflere paralel çekme deneyi sonuçları	84
4.1.3.2. Liflere dik çekme deneyi sonuçları	86
4.1.4. Poisson oranı	87
4.1.4. GFRP lif oranlarının belirlenmesi	90
4.2. Mekanik Özelliklerin Nümerik Olarak Belirlenmesi	95
4.2.1. Mikro mekanik analiz	95
4.2.2.1. Özgül ağırlık	95
4.2.2.2. Liflere paralel yöndeki Elastisite modülü (Voigt modeli)	96

4.2.2.3. Liflere dik yöndeki Elastisite modülü (Reussel modeli)	97
4.2.2.4. Kayma modülü ve Poisson oranı hesabı	99
4.2.2.5. Dış keçe kısmının mekanik özellikleri	100
4.2.3. Makro mekanik analiz	101
4.3. Deneysel ve Teorik Çalışma Sonuçlarının Karşılaştırılması	104

BÖLÜM 5.

DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	106
5.1. Basınç Deneyi Sonuçları	106
5.1.1. Basınç ön deney sonuçları	106
5.1.2. GFRP profil özelliklerinin geliştirildiği basınç deneyi sonuçları	112
5.1.2.1. GFRP profil lif oranları	112
5.1.2.2. 74 mm kesitli numunelerin basınç deney sonuçları ...	118
5.1.3. 100 mm kesitli numunelerin basınç deney sonuçları	126
5.1.3.1. Basınç deneyi sonuçları (C20)	126
5.1.3.2. Basınç deneyi sonuçları (C30)	129
5.1.3.3. Basınç deneyi sonuçları (C40)	132
5.2. Eğilme Deneyi Sonuçları	137
5.2.1. Eğilme ön deney sonuçları	138
5.2.1.1. Eğilme ön deney sonuçları (C20)	139
5.2.1.2. Eğilme ön deney sonuçları (C30)	143
5.2.1.3. Eğilme ön deney sonuçları (C40)	147
5.2.2. 74 mm kesitli numunelerin eğilme deneyi sonuçları	151
5.2.2.1. Standart 74 mm kesitli numunelerin eğilme deneyi sonuçları	153
5.2.2.2. Profil özelliklerinin geliştirildiği eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	158
5.2.3. 100 mm kesitli numunelerin eğilme deneyi sonuçları	173
5.2.4. Teori	186
5.2.5. Maliyet analizi	192

BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	195
KAYNAKLAR.....	202
EKLER.....	211
ÖZGEÇMİŞ.....	228

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Kesit Alanı (mm^2)
ACI	: America Concrete Institute
ASCE	: American Society of Civil Engineers
ASTM	: American Society for Testing and Materials
A.Ş.	: Anonim Şirketi
CTP	: Cam Takviyeli Plastik
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Plastik
CFFT	: Beton Doldurulmuş Fiber Takviyeli Plastik Boru
D	: Eğilme rijitliği
E	: Elastisite Modülü (N/mm^2)
EMPA	: İsviçre Araştırma Enstitüsü
F	: Kayma rijitliği
FRP	: Fiber Takviyeli Plastik
FRPRCS	: Fiber Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures
f_{bb}	: Beton Basınç Dayanımı (MPa)
GFRP	: Cam Fiber Takviyeli Plastik
G_{xy}	: Kayma Modülü (N/mm^2)
Gmt	: Preslenebilir Takviyeli Termoplastik
I	: Atalet Momenti (mm^4)
IIFC	: International Institute for FRP in Construction
KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
K ₂ O	: Potasyum oksit
L	: Mesnet Açıklığı (mm)
L _x	: İlk En Uzunluğu (mm)
M	: Moment (Nmm)
M	: Ağırlık (gr)

MgO	: Magnezyum oksit
Na ₂ O	: Sodyum oksit
P	: Maksimum Yük (N)
R _{tm}	: Reçine Transfer Kalıplama
R ²	: Korelasyon değeri
SPRC	: Structural Plastics Research Council
TCMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TS EN	: Türk standardı
L _y	: İlk Boy Uzunluğu (mm)
V	: Hacim (cm ³)
V _m	: Matris Hacmi
V _f	: Fiber Hacmi
W	: Mukavemet Momenti (mm ³)
W _h	: Malzemenin kuru ağırlığı (gr)
W _s	: Malzemenin su içindeki ağırlığı (gr)
σ	: Gerilme (N/mm ²)
δ	: Özgül Ağırlık
α _b	: Dönüşüm Katsayısı
Δ	: Birim Ağırlık (g/cm ³)
Δl	: Boy Değişimi (mm)
Δx	: En Deformasyonu (mm)
Δy	: Boy Deformasyonu (mm)
ε	: Şekil Değiştirme Oranı
ε _x	: Enine Birim Deformasyon
ε _y	: Boyuna Birim Deformasyon
€	: Euro
ν	: Poisson Oranı
δ _{eğilme}	: Eğilme Sehimi (mm)
γ _c	: Kompozit Malzeme Özgül Ağırlığı
γ _m	: Matrisin Özgül Ağırlığı
γ _f	: Fiberin Özgül Ağırlığı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Beton-Kompozit kirişler ile imal edilmiş Hibrit tren köprüsü	1
Şekil 1.2.	GFRP yaya ve hafif araç köprüsü	3
Şekil 1.3.	Betonarme kolon ve kirişlerin FRP'ler ile güçlendirilmesi	4
Şekil 1.4.	Beton–GFRP kutu profillerin Hibrit kullanımının muhtemel avantajları	6
Şekil 1.5.	Betonun GFRP kutu profil içerisine yerleştirilmesi	7
Şekil 2.1.	FRP kullanılan sivil yolcu uçağı	14
Şekil 2.2.	FRP malzeme kullanılmış askeri araç ve bot	15
Şekil 2.3.	Pultruzyon yöntemi konfigürasyonu	17
Şekil 2.4.	Pultruzyon makinesi	17
Şekil 2.5.	Fital sehpaları ve keçe örneği	18
Şekil 2.6.	Örnek GFRP profil detayı	19
Şekil 2.7.	Pultruzyon metoduyla üretilmiş GFRP profil örnekleri	20
Şekil 2.8.	FRP ile betonarme ve ahşap yapı güçlendirilmesi	23
Şekil 2.9.	GFRP vapur iskelesi	24
Şekil 2.10.	GFRP Metro istasyonu	25
Şekil 2.11.	GFRP profillerden imal edilmiş çok katlı yapı	25
Şekil 2.12.	GFRP profillerden imal edilmiş kuleler	26
Şekil 2.13.	GFRP profillerden imal edilmiş taşıt ve yaya köprüleri	26
Şekil 2.14.	Zemin uygulamalarında GFRP Palplanşlar	26
Şekil 2.15.	Türkiye’de GFRP profiller ile imal edilmiş konutlar	27
Şekil 2.16.	GFRP kirişler ve beton ile imal edilmiş taşıt köprüsü	27
Şekil 2.17.	GFRP kirişler ve beton ile imal edilmiş ağır taşıt köprüsü	28
Şekil 2.18.	Çeşitli Hibrit kiriş kesitleri	33
Şekil 2.19.	İçerisi beton doldurulmuş FRP boru testleri	32
Şekil 2.20.	CFRT boru elemanların kullanım şekilleri	33

Şekil 2.21.	Deskoviç tarafından tasarlanan Hibrit kirişin kesit ve yük-sehim grafiği	34
Şekil 2.22.	Mirmiran tarafından tasarlanan Hibrit kiriş kesitleri ve güçlendirilmesi	34
Şekil 2.23.	Canning tarafından tasarlanan Hibrit kiriş	35
Şekil 2.24.	GFRP ve polimer betondan oluşturulmuş Hibrit kirişler	36
Şekil 2.25.	Hulatt tarafından tasarlanan Hibrit kirişin kesit özellikleri	37
Şekil 2.26.	Fam tarafından tasarlanmış Hibrit kirişler	38
Şekil 2.27.	GFRP I profilden oluşturulmuş Hibrit kirişler	39
Şekil 2.28.	Wenlxiao tarafından tasarlanan Hibrit kirişin kesit ve özellikleri ..	40
Şekil 2.29.	Fam tarafından tasarlanmış kiriş kesitleri	41
Şekil 2.30.	Fam tarafından tasarlanmış Hibrit kirişlerin yük-sehim grafikleri	42
Şekil 2.31.	Teng tarafından tasarlanmış GFRP, Çelik ve Betondan oluşturulmuş Hibrit elemanlar	44
Şekil 2.32.	GFRP I profilden oluşturulmuş Hibrit kirişler	45
Şekil 2.33.	Beton ile I kesitli GFRP profilden oluşturulmuş Hibrit kiriş testi	45
Şekil 2.34.	Joao R. Correia tarafından tasarlanan Hibrit kiriş kesitleri	46
Şekil 2.35.	Bishnu tarafından tasarlanan CFRP ve Beton Hibrit kiriş	47
Şekil 3.1.	Beton karışımında kullanılan agrega granülometrisi	52
Şekil 3.2.	Deneylerde kullanılan GFRP profil örnekleri	53
Şekil 3.3.	GFRP profil kesiti	53
Şekil 3.4.	GFRP kutu profil detayı	54
Şekil 3.5.	Deney numune kesitleri	55
Şekil 3.6.	Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler	56
Şekil 3.7.	Hibrit ve Yalın beton basınç numuneleri	58
Şekil 3.8.	Basınç deneyi ekipmanları	59
Şekil 3.9.	Basınç deney düzeneği	60
Şekil 3.10.	Basınç ön deneylerinde kullanılan Hibrit numuneler	61
Şekil 3.11.	İç yüzeyine kum yapıştırılmış kumlu ve kumsuz GFRP kutu profiller	62
Şekil 3.12.	İçerisi betonla doldurulan GFRP profiller	62
Şekil 3.13.	Farklı özelliklerdeki GFRP profil türleri (74 mm)	63
Şekil 3.14.	Yalın beton ve Hibrit basınç numuneleri (74mm)	63

Şekil 3.15.	Farklı özellikteki basınç numuneleri (100 mm)	64
Şekil 3.16.	Eğilme deneyi numune türleri	65
Şekil 3.17.	Epoksi bileşenleri ve hazırlanması	66
Şekil 3.18.	Hazırlanan Kum ve profil iç yüzeyine epoksi sürülmesi	67
Şekil 3.19.	Profil iç yüzeyinin kumlanması	67
Şekil 3.20.	Cam lifli keçe sargısı	68
Şekil 3.21.	GFRP profillerde ekstra keçe sarılması	68
Şekil 3.22.	Ek keçeli ve kumlu profiller	69
Şekil 3.23.	GFRP profillerin taze beton ile doldurulması	69
Şekil 3.24.	Kendiliğinden Yerleşen Beton uygulaması	71
Şekil 3.25.	Kirişlerin üç noktalı eğilme deney düzeneği	71
Şekil 3.26.	Eğilme deney düzeneği	72
Şekil 3.27.	Eğilme çerçevesi	73
Şekil 3.28.	Eğilme ön deney numuneleri	74
Şekil 3.29.	Eğilme numune tür ve boyutları	75
Şekil 3.30.	Hibrit kirişler	76
Şekil 3.31.	Eğilme numune türleri (100 mm)	76
Şekil 4.1.	GFRP kutu profillerden kesilmiş Birim Ağırlık numuneleri	78
Şekil 4.2.	Özgül Ağırlık deneyinde kullanılan Arşimet terazisi	79
Şekil 4.3.	Lif doğrultusundaki çekme test numuneleri	81
Şekil 4.4.	Çekme makinesi ve donanımı	82
Şekil 4.5.	Extansometre cihazı	82
Şekil 4.6.	Çekme testleri deney düzeneği	83
Şekil 4.7.	Çekme testi sonucunda deforme olmuş deney numunesi	84
Şekil 4.8.	Lif doğrultusuna paralel numuneye ait çekme deney grafiği	86
Şekil 4.9.	Lif doğrultusuna dik numuneye ait çekme deneyi grafiği	87
Şekil 4.10.	Poisson Oranı deney düzeneği	88
Şekil 4.11.	Poisson Oranı örnek deney grafiği	90
Şekil 4.12.	Reçine yakma işleminde kullanılan fırın ve numuneler	91
Şekil 4.13.	Profil lif oranlarının belirlenmesi	92
Şekil 4.14.	Reçine yakma sonrası geriye kalan cam lifler ve tartılması	92
Şekil 4.15.	Voigt paralel fazlı model	96
Şekil 4.16.	Voigt seri fazlı model	98

Şekil 5.1.	Basınç ön deney sonuçlarının karşılaştırılması (C20)	108
Şekil 5.2.	Basınç ön deney sonuçlarının karşılaştırılması (C30)	109
Şekil 5.3.	Basınç ön deney sonuçlarının karşılaştırılması (C40)	110
Şekil 5.4.	Basınç ön deneylerinde Yalın beton ve Hibrit numunelerin basınç dayanımları	111
Şekil 5.5.	Basınç ön deneylerinde Hibrit numunelerdeki basınç dayanımı artış oranları	111
Şekil 5.6.	Basınç deneyi sonrası deforme olmuş Hibrit küp numuneleri	112
Şekil 5.7.	Profil keçe miktarları artış oranları (74 mm)	117
Şekil 5.8.	GFRP profil özelliklerinin basınç dayanımına etkileri (C20)	122
Şekil 5.9.	GFRP profil özelliklerinin basınç dayanımına etkileri (C30)	123
Şekil 5.10.	GFRP profil özelliklerinin basınç dayanımına etkileri (C40)	123
Şekil 5.11.	74 mm kesitli Hibrit numunelerdeki basınç dayanımı artış oranları	124
Şekil 5.12.	Toplam kesitteki profil oranına göre basınç dayanımı artış oranları	125
Şekil 5.13.	Prete kırılmış Hibrit basınç numuneleri	126
Şekil 5.14.	C20 Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiği	128
Şekil 5.15.	C20 Hibrit numunelerin Gerilme–Birim Deformasyon grafiği	128
Şekil 5.16.	C20 Hibrit ve Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılması	129
Şekil 5.17.	Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiği (C30)	131
Şekil 5.18.	Hibrit Gerilme–Birim Deformasyon grafiği (C30)	131
Şekil 5.19.	Hibrit ve Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılması (C30)	132
Şekil 5.20.	Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiği (C40)	134
Şekil 5.21.	Hibrit Gerilme–Birim Deformasyon grafiği (C40)	134
Şekil 5.22.	Hibrit ve Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılması (C40)	135
Şekil 5.23.	Beton basınç dayanımlarının karşılaştırılması (100 mm)	136
Şekil 5.24.	Basınç dayanım artış oranları (100 mm)	136
Şekil 5.25.	Basınç deneyi sonrası deforme olmuş Hibrit numune	137
Şekil 5.26.	Boş profil eğilme ön deney grafiği	138

Şekil 5.27.	Boş profillerde eğilme ön deneyi	139
Şekil 5.28.	Yalın beton eğilme ön deney grafiği (C20)	140
Şekil 5.29.	Hibrit eğilme ön deney grafiği (C20)	141
Şekil 5.30.	Hibrit eğilme ön deney grafiklerinin karşılaştırılması (C20)	142
Şekil 5.31.	Eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (C20)	142
Şekil 5.32.	Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılması (C20)	143
Şekil 5.33.	Yalın beton ön deney eğilme grafiği (C30)	144
Şekil 5.34.	Hibrit eğilme ön deney grafiği (C30)	145
Şekil 5.35.	Hibrit eğilme ön deney grafiklerinin karşılaştırılması (C30)	145
Şekil 5.36.	Eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (C30)	146
Şekil 5.37.	Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılması (C30)	147
Şekil 5.38.	Yalın beton eğilme ön deney grafiği (C40)	148
Şekil 5.39.	Hibrit eğilme ön deney grafiği (C40)	149
Şekil 5.40.	Hibrit eğilme ön deney grafiklerinin karşılaştırılması (C40)	149
Şekil 5.41.	Eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (C40)	150
Şekil 5.42.	Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılması (C40)	151
Şekil 5.43.	Boş GFRP profil eğilme deney grafiği (74 mm)	152
Şekil 5.44.	Boş GFRP profillerin Eğilme deneyi sonrası deforme olmuş hali	153
Şekil 5.45.	Yalın beton numunenin eğilme grafiği (74 mm)	154
Şekil 5.46.	Hibrit standart numunenin yük-sehim grafiği (74 mm)	155
Şekil 5.47.	Hibrit numunelerin eğilme deneyi sonrası deforme olması	156
Şekil 5.48.	Yük-sehim grafikleri karşılaştırılması (74 mm)	156
Şekil 5.49.	Eğilme dayanımı artış oranları (74 mm)	157
Şekil 5.50.	Kırılma tokluğu artış oranları (74 mm)	157
Şekil 5.51.	Eşit eğilme yüküne sahip numuneler	158
Şekil 5.52.	Hibrit kiriş numunenin eğilme grafiği (74 mm)	160
Şekil 5.53.	Hibrit Kumlu numunenin eğilme grafiği (74 mm)	160
Şekil 5.54.	Hibrit ve Hibrit Kumlu numune grafiklerinin karşılaştırılması (74 mm)	161
Şekil 5.55.	Hibrit Ek Keçeli numunenin eğilme grafiği (74 mm)	162
Şekil 5.56.	Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunenin eğilme grafiği (74 mm)	163
Şekil 5.57.	Hibrit Ek Keçeli ve Hibrit Ek Keçeli Kumlu grafiklerinin karşılaştırılması (74 mm)	164

Şekil 5.58.	Hibrit Özel Keçeli numunenin eğilme grafiği (74 mm)	165
Şekil 5.59.	Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunenin eğilme grafiği (74 mm)	166
Şekil 5.60.	Hibrit Özel Keçeli ve Hibrit Özel Keçeli Kumlu grafiklerinin karşılaştırılması (74 mm)	166
Şekil 5.61.	Ek sargılı boş GFRP profilin eğilme grafiği (74 mm)	167
Şekil 5.62.	Ek sargılı ve standart boş profillerin karşılaştırılması (74 mm) ...	168
Şekil 5.63.	Hibrit Ek Sargılı numune eğilme grafiği (74 mm)	169
Şekil 5.64.	Geliştirilen Hibrit numunelerin karşılaştırılması (74 mm)	170
Şekil 5.65.	Eğilme dayanımlarının karşılaştırılması (74 mm)	171
Şekil 5.66.	Kırılma tokluğu değerlerinin karşılaştırılması (74 mm)	172
Şekil 5.67.	Yalın beton ve Hibrit numunelerin basınç ve eğilme dayanım karşılaştırılması (74 mm)	172
Şekil 5.68.	Boş GFRP profil eğilme deney grafiği (100 mm)	176
Şekil 5.69.	Hibrit kirişin eğilme deney grafiği (100 mm)	177
Şekil 5.70.	Boş profil ve Hibrit kirişin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması (100 mm)	178
Şekil 5.71.	Hibrit Kumlu kirişin eğilme deney grafiği (100 mm)	179
Şekil 5.72.	Hibrit ve Hibrit Kumlu kirişin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması (100 mm)	179
Şekil 5.73.	Hibrit Ek Keçeli kirişin eğilme deney grafiği (100 mm)	180
Şekil 5.74.	Hibrit Kumlu ve Hibrit Ek Keçeli numune grafiklerinin karşılaştırılması (100 mm)	181
Şekil 5.75.	Hibrit Kumlu ve Ek Keçeli kirişin eğilme deney grafiği (100 mm)	182
Şekil 5.76.	Eğilme deneylerinde GFRP profillerin kırılma biçimleri	183
Şekil 5.77.	Hibrit Ek Keçeli ve Hibrit Ek Keçeli+Kumlu numune grafiklerinin karşılaştırılması	183
Şekil 5.78.	100 mm kesitli kiriş grafiklerinin karşılaştırılması	184
Şekil 5.79.	Eğilme dayanımlarının karşılaştırılması (100 mm)	185
Şekil 5.80.	Kırılma tokluklarının karşılaştırılması (100 mm)	185
Şekil 5.81.	45 mm kesitli GFRP profilin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması	188

Şekil 5.82.	74 mm kesitli GFRP profilin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması	188
Şekil 5.83.	100 mm kesitli GFRP profilin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması	189
Şekil 5.84.	45 mm kesitli Hibrit numunelerin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması	191
Şekil 5.85.	74 mm kesitli Hibrit numunelerin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması	191
Şekil 5.86.	100 mm kesitli Hibrit numunelerin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması	192

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	GFRP profiller ile diğere malzemelerin karşılaştırılması	20
Tablo 3.1.	Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	51
Tablo 3.2.	Agrega elek analiz değerleri	52
Tablo 3.3.	DeneYlerde kullanılan GFRP profil boyutları	54
Tablo 3.4.	Beton karışım oranları	58
Tablo 3.5.	Kendiliğinden Yerleşen Betonda kullanılan malzeme miktarları .	70
Tablo 4.1.	Birim Ağırlık deneyi sonuçları	78
Tablo 4.2.	Özgöl Ağırlık deneyi sonuçları	80
Tablo 4.3.	Lif doğrultusuna paralel çekme deneyi sonuçları	85
Tablo 4.4.	Lif doğrultusuna dik çekme deneyi sonuçları	86
Tablo 4.5.	Poisson Oranı deney sonuçları	89
Tablo 4.6.	Ağırlıkça lif ve matris oranları	93
Tablo 4.7.	Hacimce lif ve matris oranları	94
Tablo 4.8.	GFRP profil lif oranı sonuçları	94
Tablo 4.9.	GFRP profil bileşen özellikleri	95
Tablo 4.10.	Nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	104
Tablo 5.1.	Basınç ön deney sonuçları (C20)	107
Tablo 5.2.	Basınç ön deney sonuçları (C30)	107
Tablo 5.3.	Basınç ön deney sonuçları (C40)	108
Tablo 5.4.	GFRP profil lif oranları (74 mm)	113
Tablo 5.5.	Kumlu GFRP profil lif oranları (74 mm)	114
Tablo 5.6.	Ek keçeli GFRP profil lif oranları (74 mm)	114
Tablo 5.7.	Ek keçeli kumlu GFRP profil lif oranları (74 mm)	115
Tablo 5.8.	Özel Keçeli GFRP profil lif oranları (74 mm)	115
Tablo 5.9.	Özel Keçeli Kumlu GFRP profil lif oranları (74 mm)	116
Tablo 5.10.	Ek sargılı GFRP profil lif oranları (74 mm)	116

Tablo 5.11.	Yalın beton numune basınç test sonuçları (74 mm)	118
Tablo 5.12.	Hibrit basınç test sonuçları (74 mm)	119
Tablo 5.13.	Hibrit Kumlu basınç test sonuçları (74 mm)	120
Tablo 5.14.	Hibrit Ek Keçeli basınç test sonuçları (74 mm)	120
Tablo 5.15.	Hibrit Ek Keçeli Kumlu basınç test sonuçları (74 mm)	120
Tablo 5.16.	Hibrit Özel Keçeli basınç test sonuçları (74 mm)	121
Tablo 5.17.	Hibrit Özel Keçeli Kumlu basınç test sonuçları (74 mm)	121
Tablo 5.18.	C20 Yalın beton basınç deneyi sonuçları (100 mm)	127
Tablo 5.19.	Hibrit Basınç deneyi sonuçları (C20)	127
Tablo 5.20.	Yalın beton basınç deneyi sonuçları (C30)	130
Tablo 5.21.	Hibrit basınç deneyi sonuçları (C30)	130
Tablo 5.22.	Yalın beton basınç deneyi sonuçları (C40)	133
Tablo 5.23.	Hibrit basınç deneyi sonuçları (C40)	133
Tablo 5.24.	Boş profiller eğilme ön deney sonuçları.....	138
Tablo 5.25.	Yalın beton ön deney sonuçları (C20)	139
Tablo 5.26.	Hibrit eğilme ön deney sonuçları (C20)	140
Tablo 5.27.	Yalın beton ön deney sonuçları (C30)	143
Tablo 5.28.	Hibrit ön deney sonuçları (C30)	144
Tablo 5.29.	Yalın beton ön deney sonuçları (C40)	147
Tablo 5.30.	Hibrit ön deney sonuçları (C40)	148
Tablo 5.31.	Boş GFRP profil deney sonuçları (74 mm)	152
Tablo 5.32.	Yalın beton eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	153
Tablo 5.33.	Hibrit Standart numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm) ...	154
Tablo 5.34.	Hibrit kiriş numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	159
Tablo 5.35.	Hibrit kumlu numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	159
Tablo 5.36.	Hibrit Ek Keçeli numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	162
Tablo 5.37.	Hibrit Ek Keçeli ve Kumlu kiriş numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	163
Tablo 5.38.	Hibrit Özel Keçeli numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	164
Tablo 5.39.	Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	165
Tablo 5.40.	Ek sargılı boş GFRP profillerin eğilme test sonuçları (74 mm) ...	167

Tablo 5.41.	Hibrit Ek Sargılı kirişlerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)	169
Tablo 5.42.	Standart 100 mm kesitli GFRP profil lif oranları.....	173
Tablo 5.43.	Ek Sargılı GFRP profil lif oranları (100 mm)	174
Tablo 5.44.	Boş GFRP profillerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)	175
Tablo 5.45.	Hibrit profillerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)	176
Tablo 5.46.	Hibrit Kumlu numunelerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm) ...	178
Tablo 5.47.	Hibrit Ek Keçeli numunelerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)	180
Tablo 5.48.	Hibrit Ek Keçeli ve Kumlu numunelerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)	182
Tablo 5.49.	GFRP profil kesit özellikleri	186
Tablo 5.50.	Malzeme fiyatları	193
Tablo 5.51.	Malzeme birim dayanım maliyetleri	194

ÖZET

Anahtar kelimeler: Beton, Cam Lifi Takviyeli Plastik, Hibrit Malzeme, Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı

Lif takviyeli plastik kompozit malzemelerin inşaat sektöründe kullanımı son dönemlerde hızla artmaktadır. Kullanımı giderek yaygınlaşan lifli kompozitlerden birisi de profil çekme metodu ile üretilen Cam Lifi Takviyeli Plastik (GFRP) kompozitlerdir. Gelişen üretim teknikleriyle beraber yüksek çekme dayanımı, hafiflik ve korozyon direncine sahip GFRP kompozitler yapılarda tek başlarına taşıyıcı olarak kullanılmakla birlikte betonarme yapılarda güçlendirmede tercih edilmekte ve birçok malzemeye alternatif olma yönünde gelişmektedir. Bu süreç içerisinde, son yıllarda GFRP kompozitlerin beton gibi geleneksel malzemelerle birlikte kullanımı ile ortaya çıkan Hibrit tasarımlar araştırmacıların yoğun ilgi gösterdiği konular arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada, yüksek basınç dayanımı ile tanınan betonun, yüksek çekme dayanımına sahip GFRP kutu profiller ile birlikte Hibrit kullanımı araştırılmıştır. Plastik haldeki betonun GFRP kutu profiller içerisine yerleştirilmesiyle Hibrit yapı elemanları oluşturularak, malzeme üzerinde deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle GFRP profillerin özellikleri tespit edilmiş, farklı dayanımlarda üretilen betonlar ile imal edilen Hibrit malzemenin basınç ve eğilme davranışları araştırılmıştır. Hibrit malzemenin bileşenleri olan Beton ve GFRP profillere göre gösterdiği gelişimler belirlenmiş ve profillerde iyileştirmeler yapılarak malzeme davranışına etkileri araştırılmıştır. Tasarlanan Hibrit kirişler ile ilgili yapılan teorik çalışmalarda deneysel sonuçlara yakın iyi bir uyum elde edilmiştir. Çalışmalar neticesinde Hibrit tasarım oluşumundan kaynaklı birçok avantaja sahip olmasının yanında, bileşen malzemelerine göre daha üstün fiziksel ve mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.

INVESTIGATION OF MECHANIC PERFORMANCE OF HYBRID STRUCTURAL ELEMENT PRODUCED USING GLASS FIBRE REINFORCED PLASTIC (GFRP) COMPOSITE AND CONCRETE

SUMMARY

Key Words: Concrete, Glass Fibre Reinforced Plastic, Hybrid Material, Compressive Strength, Flexure Strength

The use of Fiber-Reinforced Plastic composite materials in the construction sector has been growing rapidly in recent years. One of the increasingly widespread use of fiber composites is Pultruded Glass Fibre Reinforced Plastic (GFRP) materials. Developing production techniques combined high tensile strength, lightweight and non-corrosive properties allowed GFRP to become a competitive alternative to traditional structural materials. Having resolved fundamental manufacturing constraints through the development of the pultrusion process, the mass adaptation of GFRP sections as primary load bearing elements have been used in a number of civil engineering applications. In recent years the use of GFRP composites with concrete caused Hybrid designs, one of the subjects showed great interest of researchers.

In this study, compressive strength and flexural properties of hybrid use of GFRP profile with concrete have been investigated. GFRP box sections of the concrete placed in plastic form, creating hybrid structure elements, the experimental and theoretical studies have been conducted on the material. Properties of GFRP profiles were determined, which are produced with different strength of concretes produced compressive and flexural behavior of Hybrid material were investigated. Hybrid material, which are components of concrete and GFRP profiles were determined and material behavior of GFRP profiles were investigated. Theoretical studies on hybrid beams made evaluating the validity of a good fit were obtained. As a result of studies, Hybrid design has several advantages, as well as being, it has superior physical and mechanical properties according to component materials were determined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanlar, varoluşundan bu yana yaşam kalitesini artırmak amacıyla sürekli gelişim ve değişim içerisinde olmuş ve ihtiyaçlarını karşılamak için yeni arayışlara yönelmişlerdir. Bu amaçla ilk çağlardan beri doğada bulunan malzeme türleri üzerinde çeşitli tasarımlar yaparak daha efektif kullanımlar elde etmişlerdir. Günümüzde tüm teknik alanlarda olduğu gibi malzeme teknolojileri alanında da insanların ihtiyaç ve istekleri, malzemelerde yaşanan problemlere paralel olarak her geçen gün artmaktadır. Bu tür problemleri azaltmak ve talepleri karşılamak amacıyla araştırmacılar yeni malzeme türleri ve uygulamaları üzerinde çalışmakta, yeni tasarımlar ortaya koymaktadırlar. Son dönemlerde araştırmacıların büyük bir kısmı, çalışmalarını Kompozit malzemeler ve bu malzemelerin birlikte kullanıldığı Hibrit tasarımlar üzerinde yoğunlaştırmışlardır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Beton-Kompozit kirişler ile imal edilmiş Hibrit tren köprüsü [1]

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerini tek bir malzemedeki toplamak ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla fiziksel olarak birleştirilen malzemelerdir. Kompozit malzeme yapısını oluşturan bileşenler kimyasal olarak farklıdır ve fazları birbirinden ayıran belirgin bir ara yüzey bulunmaktadır [2]. Kompozit malzemeye “Çok bileşenli malzeme”, “Çok fazlı malzeme”, “Donatılı malzeme” ve “Pekiştirilmiş malzeme” gibi adlarda verilmektedir [3]. Belirtilen kompozit malzeme tanımına göre bir malzemenin Kompozit malzemeler sınıfına girebilmesi için [4]:

- İnsan yapısı olması, yani doğal bir malzeme olmaması,
- Kimyasal birleşimleri birbirinden farklı ve belirli ara yüzeylerle ayrılmış olması,
- En az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Bileşenlerinin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması, bu amaçla üretilmiş olması gerekir.

Belirtilen özelliklere sahip ve inşaat sektöründe aralarında bulunduğu birçok alanda tercih edilen kompozit malzeme türlerinden birisi Fiber Takviyeli Plastik (FRP) kompozitlerdir. FRP’ler genelde bir matris malzemenin liflerle birleştirilmesiyle oluşan ürünlerin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek dayanım ve çevresel etmenlere karşı gösterdiği iyi performansın yanında araştırmacıların arzu ettiği birçok özelliğe sahip ve farklı kombinasyonlarda üretilebilir olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Bu yeni nesil kompozit malzemelerin üstün mekanik dayanımlarının yanı sıra hafifliği, korozyon dayanımı ve kimyasallara karşı yüksek direnç göstermeleri, elektrik yalıtımı, düşük yoğunluk ve dayanım/yoğunluk oranının yüksekliği gibi özellikler araştırmacıların ilgisini çekmekte ve uygulama örnekleri giderek yaygınlaşmaktadır (Şekil 1.2). Ayrıca düşük ısı iletkenliğine sahip olmaları, uzun yıllar bakım ve boya gibi ek bir hizmete ihtiyaç duymamaları v.b. özellikler bu malzemelerin diğer alanlarda olduğu gibi inşaat sektöründe birçok malzemenin alternatifini olma yönünde avantajlı konuma getirmektedir.



Şekil 1.2. GFRP yaya ve hafif araç köprüsü [5]

Yapı endüstrisinde FRP kompozitler genellikle giydirme cephe sistemleri, yaya ve taşıt köprüleri, zemin iyileştirmeleri, borular, tamir ve güçlendirme işlerinde kullanılmaktadır. Yapı sektörü toplam FRP kompozit pazarının %30'u civarındaki kısmını oluşturmakta, ikinci olarak ise otomotiv sektörü gelmektedir. Bununla birlikte henüz bu malzemeler kullanıcılar ve tasarımcılar tarafından iyi tanınmama nedeniyle diğer malzemelerin yerine kullanılabilecek birçok durumda değerlendirilmemektedir. Mevcut uygulamaların büyük bir kısmında FRP kompozitlerin iyi bir çözüm olabileceği öngörülmektedir [6].

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanımı, yapı sektörünün de aralarında bulunduğu birçok teknik alanda hızla artmakta ve her geçen gün gelişim göstermektedir. Bu gelişim süreci içerisinde İnşaat endüstrisi mühendislik problemlerinde yapım teknolojileri ve tasarımlarını geliştirmek, daha ekonomik çözümler elde etmek için sürekli yeni çözümler bulmak için uğraşmaktadır [7]. Genellikle yapı sektöründe taşıyıcı olarak düşünülmeyen ikincil yapı elemanlarında tercih edilen yeni nesil kompozitler, günümüzde taşıyıcı, esas yapı elemanı olarak da kullanılmaktadır. Özellikle FRP kompozitlerin seri üretiminin artmasıyla birlikte

yapılarda farklı amaçlarda daha etkin kullanılmaya başlanılmış, hafif ve yüksek dayanıma sahip fiber takviyeli kompozit malzemelerin betonarme yapılarda güçlendirme, tamir ve iyileştirmede kullanılması artmıştır [8]. FRP laminantların kirişlerin alt yüzeylerine, kolonlarda ise FRP kumaşların tüm yüzeye sarılarak yapılan güçlendirme ve iyileştirme çalışmaları (Şekil 1.3) bu tür kompozit malzemelerin betonla birlikte kullanılan en bilinen uygulamadır [9, 10,11,12 ve 13].



Şekil 1.3. Betonarme kolon ve kirişlerin FRP'ler ile güçlendirilmesi

Farklı lif içeriklerine sahip, genelde karbon ve cam fiberli FRP kumaş veya laminantlar kullanılarak yapılan çalışmalar önümüzdeki süreçte daha da gelişerek, taşıyıcı özelliği olan profil şeklindeki FRP elemanlar ile beton ya da çelik gibi geleneksel yapı malzemeleriyle birlikte kombine çalışan Hibrit sistemler üzerinde ilginin artacağını bu konudaki çalışmalar göstermektedir [14].

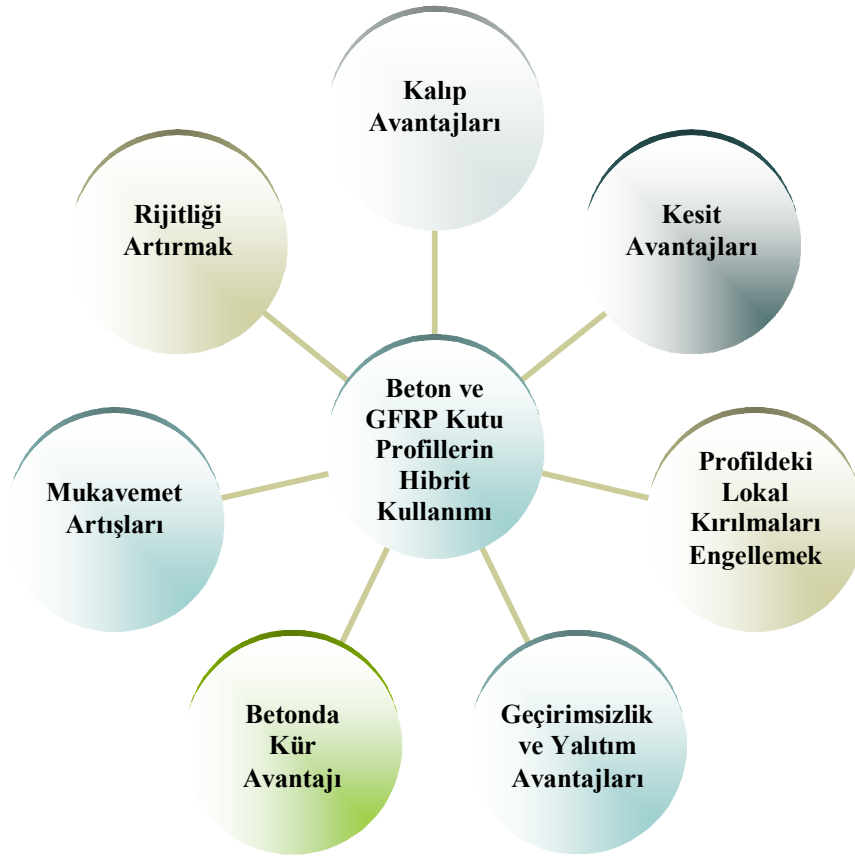
San Diego California Üniversitesi, İngiltere Surrey Üniversitesi, Warwick Üniversitesi ve İsviçre EMPA (Research Institute) gibi araştırma birimlerinde olduğu gibi en son araştırma ve geliştirme çalışmaları, özellikle beton gibi geleneksel yapı malzemeleri ile kompozit malzemelerin birlikte kullanıldığı Hibrit sistemler üzerine odaklanmıştır [7]. Son dönemlerde içerisine beton doldurulmuş ya da içerisi boş şekilde FRP borulardan oluşturulmuş Hibrit FRP kolonlar üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır [15, 16, 17 ve 18]. Bilimsel çalışmalardaki eğilim açıkça göstermektedir ki yakın gelecekte yeni yapılarda FRP kompozitlerin kullanımı temel olarak Hibrit yapı kullanımı üzerine odaklanacaktır [19]. Bu konuda yapılan birçok araştırma FRP kompozitlerin beton gibi geleneksel malzemeler ile birlikte

kullanımının, tamamen FRP'den üretilmiş yapı elemanlarında bulunan bazı sakınca ve dezavantajların giderilmesini sağlayacak çözüm yollarından birisi olduğunu göstermiştir [20].

Fiber takviyeli kompozitler üzerinde artan yoğun ilgiye paralel olarak yapılan bu çalışmada; Günümüzün popüler malzemelerinden birisi olan FRP kompozitler arasında yoğunlukla tercih edilen Cam Fiber Takviyeli Plastik (GFRP) Kompozit ya da diğer ismiyle Cam Takviyeli Plastik (CTP) kutu profiller ile uzun bir geçmişe sahip en temel yapı malzemesi olan betonun hibrit olarak birlikte kullanımı araştırılmıştır. Birçok pozitif özelliğe sahip GFRP profillerin, bu özelliklerini yine birçok avantaja sahip ve en çok tercih edilen yapı malzemesi olan beton ile birleştirerek, her iki bileşen malzemenin pozitif özelliklerinden faydalanarak üretilen yeni Hibrit malzemenin fiziksel ve mekanik davranışlarında oluşan pozitif gelişmeler incelenmiş ve iyileştirmeler yapılmıştır. Üretilen Hibrit malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel olarak test edilmiş, farklı kesit şekil ve boyutlara sahip GFRP'nin kutu profilleri üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak tespit edilen problemlere karşı çözümler önerilmiştir. Ayrıca ilgili deneylerden elde edilen sonuçlarla nümerik ve sayısal hesaplamalar arasında iyi bir uyum tespit edilerek yeni tasarımlar için öneriler ortaya konulmuştur.

Beton ve GFRP profillerin üstün özelliklerinden faydalanılarak iki malzemenin birbirine katkı yapmasının hedeflendiği bu çalışmada Şekil 1.4'te gösterilen avantajların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Belirtilen muhtemel avantajlardan kesit, rijitlik, mukavemet artışları, lokal kırılmalar, küp ve geçirimsizlik avantajları deneysel çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi Beton ve GFRP profiller ile oluşturulan Hibrit malzemenin herhangi birinde olan olumsuz durumu azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak amacı ile birleştirilmesi sonucunda ortaya çıkacak muhtemel avantajları şu şekilde açıklamak mümkündür:



Şekil 1.4. Beton–GFRP kutu profillerin hibrit kullanımının muhtemel avantajları

Kalıp Avantajları; İstenilen şeklin verilebilmesi gibi önemli avantajlara sahip betonun, karışımı yapıldıktan sonra plastik halden katı hale geçmesi sürecinde bir kalıp sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Belirtilen bu kalıbın hazırlanması amacıyla küçük parçaların oluşturulması ile uzun zamana ihtiyaç duyulmakta ve ekstra maliyet gerekmektedir. GFRP kutu profillerin kalıp işlevini gerçekleştirmesinden dolayı, içerisine akıcı halde doldurulan betona şekil verecek ikinci bir elamana ihtiyaç duyulmamaktadır (Şekil 1.5). Dolayısıyla zamandan ve kalıp masraflarından büyük oranda avantaj sağlanmış olacaktır. Literatürde kalıcı kalıp olarak adlandırılan bu özelliği Hibrit malzemenin başlıca avantajlarından sayılmaktadır [21 - 28].



Şekil 1.5. Betonun GFRP kutu profil içerisine yerleştirilmesi

Kesit Avantajları; Betonun GFRP kutu profillerin içerisine taze halde doldurulması ile oluşan tasarımda, iki malzemenin birlikte hareket etmesi ile çekme gerilmelerini yüksek çekme dayanımına sahip GFRP profillerin karşılaması, basınç gerilmelerini ise yine en önemli mekanik özelliği basınç dayanımı olan betonun karşılaması planlanmaktadır. Böylece iki bileşenli Hibrit malzeme ile hem içi boş profile göre hem de yalın betona göre aynı dayanıma sahip fakat daha küçük kesitli elamanlar üretmek mümkün olacaktır.

GFRP Profildeki Lokal Kırılmaları Engellemek; Bir çok üstün özelliği sayılabilen bu malzemeler profil halde iken özellikle eğilme etkisi altında bölgesel ve lokal kırılmalara maruz kalmaktadır [29 ve 30]. İçerisine beton doldurularak oluşturulan GFRP profillerde beton sertleşmiş halde bulunacağından dolayı, lokal kırılmaların azalacağı yada yok edeceği düşünülmektedir. Böylece Hibrit malzemenin eğilme yükleri altında daha yüksek performans göstermesi beklenmektedir.

Geçirimsizlik ve Yalıtım Avantajları; Betonun yapı malzemesi olarak en çok eleştirilen dezavantajları arasında suyu ve nemi geçirerek hem içerisindeki çelik donatıya hem de kendisine zarar vermesidir. Bununla birlikte yine betonun ısıyı hızlı ileten bir yapı malzemesi olması ısı yalıtımı açısından istenmeyen bir durumdur. FRP'leri oluşturan iki temel bileşenden biri olan ve lifleri saran epoksiler plastik

esaslı malzeme olmasından dolayı su geçişine izin vermemektedirler. Dolayısıyla betonun dışını saran GFRP profil su ve nem geçişine izin vermeyerek betonu korumakta ve su içerisinde bulunan minerallerin betona zarar vermesini engellemektedir. Ayrıca ısı geçişlerinden kaynaklanan enerji sarfiyatı ve ısıl gerilmelerden kaynaklı problemlerin sonucunda oluşabilecek olumsuz durumlar, GFRP'lerin iyi yalıtkan malzeme olmasından dolayı daha az yaşanacaktır.

Betonda Kür Avantajı; Yapı malzemelerine dıştan gelen su ve nemi içerisine almayan GFRP kutu profil, aynı zamanda içerisine yerleştirilen plastik kıvamdaki betonun suyunu ve nemini kaybetmesine izin vermeyerek, betonun kürü için hayati önem taşıyan işlemi çok avantajlı konuma getirmektedir [31]. Standartlarda [32 ve 33] 28 gün %100 bağıl nemde kür yapılması istenilen betonun bu işlemle mevcut suyunu kaybetmeyerek hidrasyon süreci sorunsuz sağlanmış olacaktır.

Mukavemet Artışları; Betonun GFRP kutu profil içerisine yerleştirmesi ile oluşan Hibrit malzemede iki bileşenin birlikte davranması sonucunda profildeki lokal kırılmaların azalması yada yok olması ile birlikte ayrıca çekme kuvvetlerini GFRP profilinin karşılaması sonucu basınç ve eğilme dayanımında çeşitli oranlarda artışlar beklenmektedir.

Rijitlik Artışları; Kutu kesitli GFRP profillerin önemli eksikliklerinden birisi rijitliğinin iyi olmamasıdır. Bu problemin, GFRP profil içerisinin beton ile doldurulması sonucunda profil ile betonun birlikte hareket etmesiyle azalması veya tamamen ortadan kaybolması beklenmektedir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada plastik haldeki betonun GFRP kutu profiller içerisine yerleştirilmesiyle oluşturulan Hibrit yapı elemanlarının bileşen malzemelerine göre mekanik performansındaki gelişimler araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle GFRP profillerin fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmiş, sonrasında farklı dayanımlarda üretilen betonlar ile imal edilen Hibrit malzemenin basınç ve eğilme davranışları incelenmiştir. Hibrit malzemenin bileşenleri olan Beton ve GFRP profillere göre

gösterdiği gelişimler belirlenmiş, profil lif oranları ve beton aderansında iyileştirmeler yapılarak sonuçlara etkileri araştırılmıştır.

Araştırma konusu ile ilgili genel girişin yapıldığı Bölüm 1'i takiben Bölüm 2'de yapı sektöründe kullanılan Kompozit ve Hibrit malzemeler hakkında genel bir değerlendirme yapılmış, Fiber takviyeli plastiklerin üretim yöntemleri ve özellikle Profil çekme yöntemi detaylı şekilde analiz edilmiştir. Bu yöntemin getirdiği avantajlar irdelenmiş ve yapılarda kullanılan FRP profil çeşitleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca Hibrit yapı malzemelerinin kullanım alanları ile bu konuda yapılan akademik araştırmalar incelenmiştir. GFRP profillerin beton ile birlikte kullanıldığı örnekler irdelenmiş, değerlendirilmiş ve bu çalışmaya uygun şekilde özetlenmiştir. Ayrıca bu çalışmanın mevcut çalışmalardan farklılıkları Bölüm 2'de belirtilmiştir.

Bölüm 3'te deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleri hakkında bilgiler verilerek, test metotları açıklanmıştır. Öncelikle GFRP profil türleri ve beton özellikleri belirtilerek, testler ile ilgili deney matrisi verilmiş, profil lif oranlarının belirlenmesi, basınç ve eğilme deney metotları açıklanmıştır. Bununla birlikte kurulan deney düzenekleri ile deney verilerinin elde edilişi, yapılan testlerin aşamaları ve malzeme dayanımlarının hesaplama yöntemleri açıklanmıştır.

Bölüm 4'te, kullanılan GFRP profillerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Profillere Birim ağırlık, Özgül ağırlık, boyuna-enine Çekme ve Poisson oranı deneyleri yapılarak belirtilen özellikler tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra GFRP profillerin lif oranları deneysel olarak belirlenerek sayısal analizlerle karşılaştırılarak verilmiştir.

Bölüm 5'te ise yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve farklı malzeme türlerine ait sonuçlar verilmiştir. GFRP profil keçe lif oranlarının artırılması sonucunda Hibrit malzeme mekanik davranışındaki gelişmeler incelenmiş ve karşılaştırılmalı analizler yapılmıştır. Basınç deneylerinde farklı boyutlardaki küp numuneler üretilerek Hibrit malzemedeki dayanım artışları araştırılmış, eğilme testlerinde içerisi boş GFRP profil ve Yalın betona göre Hibrit kirişlerin eğilme

performansı değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra tasarlanan Hibrit malzeme ve GFRP profil için teorik hesaplamalar yapılarak deneysel sonuçlar ile uyumu incelenmiş, Hibrit kirişlerin maliyet analizleri yapılarak birim dayanım maliyeleri tespit edilmiştir.

Son olarak Bölüm 6'da, yapılan deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve GFRP profil ile betonun birlikte kullanımıyla ortaya çıkan Hibrit malzemenin getirdiği avantajlar sunulmuş, gelecek çalışmalar için öneriler ve çözüm yolları belirtilmiştir.

BÖLÜM 2. KOMPOZİT VE HİBRİT YAPI MALZEMELERİ

Kompozit malzemelerin oluşumunda çok sayıda farklı malzeme kullanılabilirdiğinden dolayı gruplandırılmasında kesin sınırlar belirlenmesi zor olmakla birlikte, yapısında kullanılan malzemelere göre genel kabul gören bir sınıflama yapmak mümkündür. Buna göre kompozit malzemeler dört gruba ayrılabilir:

- Taneli kompozitler
- Tabakalı kompozitler
- Taneciklerle güçlendirilmiş kompozitler
- Lifli kompozitler

2.1. Taneli Kompozitler

Matris içinde milimetre ve üzerindeki boyutlarda tanelerin yer aldığı bir kompozit malzeme türüdür. Çeşitli kaynaklardan elde edilen parçaların, bunları bağlayıcı nitelikteki bir malzeme içinde dağılı olarak yer aldıkları malzeme grubudur. Bu kompozit türünde taneler takviye elemanı denilen dağılı fazı, bağlayıcı ise matris denilen sürekli fazı oluşturmaktadır. Bu gruba en iyi örnek olarak kum, çakıl ve çimentodan oluşan beton ve yine beton agregalarının bitümlle bağlanması sonucu elde edilen asfalt gösterilebilir [3].

2.2. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler, farklı mukavemetlere sahip iki veya daha fazla katmandan oluşan levha şeklindeki malzemelerdir. Diğer bir deyişle, aynı cins veya başka cinsten parçaların lehim, tutkal gibi yapıştırıcı kullanarak birbirine eklenmesiyle istenilen şekil veya boyutlarda elde edilen yeni malzemelerdir. Genel olarak tabakalı kompozitler bölme amaçlı, ısı ve ses yalıtımı istenen yerler için ideal bir yapıya

sahiptirler. Farklı elyaf yönlerine sahip tabakaların bileşimi ile yüksek mukavemet değerleri elde edilebilen, ısıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçaklarda kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler.

2.3. Taneciklerle Güçlendirilmiş Kompozitler

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile oluşan izotrop yapıli kompozitlerdir. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlı olmakla birlikte en yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlamakta, metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların ise sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Taneciklerle güçlendirilmiş kompozit malzemelerin yapı alanında kullanımları sınırlıdır.

2.4. Lifli Kompozitler

Genellikle basınç dayanımına oranla çekme, eğilme, çarpma dayanımları düşük düzeyde kalan veya zayıf yapıli, kırılğan malzemenin kırılğanlığın giderilmesi gibi amaçlarla matris malzemenin lifler ile donatılması ile üretilen kompozitlerdir [3]. Bu kompozitlerde ince liflerin matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlamaktadır. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Bu nedenle elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Betonarme, kerpiç ve fiber malzemelerle güçlendirilmiş polimer matrisli kompozitler örnek olarak verilebilir. Lif takviyeli kompozitler, kullanılan lifin cinsine göre cam, karbon, aramid, boron, sürekli silikon gibi çeşitli sınıflara ayrılmaktadırlar.

2.5. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi

Genel olarak kompozit malzeme ayrı iki veya daha çok malzemeyi fiziksel olarak karıştırmak yoluyla elde edilen ve kendisini oluşturan malzemelerin her birinden farklı özelliklere sahip çok bileşenli malzeme olarak tanımlanabilmektedir [3]. Bu bağlamda aslında kompozit malzemeler binlerce yıldır insanların farkında olarak ya da olmayarak, sorunların çözümü için kullandıkları malzemelerdir. Fakat bu yapay malzemeler üzerindeki araştırmalar son yüz yıl içerisinde büyük bir gelişme göstermiştir. Bu büyük gelişmeye, homojen malzemelerden kalan genel bilgi birikimi, analitik ve tasarım yapabilme becerilerinin katkısı büyük olmuştur.

Kompozit malzemenin tarihi incelendiğinde, Orta Doğuda, fazladan eğilme dayanımı sağlamak amacıyla ok yayları üzerine farklı lif yönleri oluşturacak şekilde konulan malzemeler, kerpiç yapılar ile MÖ. 2800'lü yıllara ait olduğu tespit edilen lamine edilmiş çeşitli tahta parçalarının Mısır'da bulunması ve buna ek olarak birçok yapıda kaya-çakıl gibi malzemeleri birbirine bağlamak için kireç, kum ve kil karışımından elde edilen bağlayıcı ile yapılmış kompozit malzemeler tespit edilmiştir [34].

Bu tip bağlayıcılar yavaş sertleşmesi ve kolay şekil verilebilir olması nedeniyle en çok kullanılan yapı malzemeleri olmuş ve sürekli araştırma konusu olmuştur. John Smeaton 1756 yılında içerisinde kireç, kalsiyum oksit, aluminat ve silikat bulunan bir karışımı Eddystone Fenerinin yapımında kullanmış ve bu gelişmeden kısa bir süre sonra, 1796'da James Paker kil ve kireç taşının karışımı ile elde edilen Roma Çimentosunun patentini almıştır [35]. Böylece 19. yüzyılın sonlarına doğru yapı malzemeleri için çok büyük bir icat kabul edilen çimento keşfedilmiştir. Joseph Aspdin 1824 yılında, günümüzde de yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli çimento yapımının ilk adımını atmıştır. Aspdin'in çimentosu, kireç ocağında yakılmış kil ve tebeşirin toz haline getirilmesi ile oluşmakta, kullanılan temel malzemeleri çok daha yüksek sıcaklıklara kadar yakan Isaac Johnson, 1845 yılında yeni bulduğu üretim yöntemi ile daha yüksek mukavemete sahip çimentoyu keşfetmiştir. Isaac Johnson bu yeni üretim yöntemini Portland şehri yakınlarında bulduğu için, bu yeni ürüne Portland ismini vermiş ve bu icat günümüzde de beton karışımlarında en çok kullanılan çimentolardan biri olmuştur.

Yaygın olarak kullanılmaya başlanan beton, tek başına dökme demir gibi basınç mukavemeti çok yüksek fakat çekme mukavemetinin düşük olması nedeniyle, yeni yapı tasarımları için problem olmuştur. Bu sorunu gidermek amacıyla çeliğin yüksek çekme mukavemetini betonun basınç mukavemeti ile birleştirmenin yolları aranmış ve sonunda çelik çubuklarının beton içerisine katılmasıyla aranan yüksek basınç ve çekme mukavemetine sahip, betonarme denilen yeni bir kompozit yapı malzemesi bulunmuştur.

Yeni nesil kompozitler ise yine bu yüzyılın başından itibaren, hem homojen malzemelerin hem de kompozit üretiminin geliştirilmesi üzerinde geniş çaplı araştırmalar yapılmakta ve yapılan bu araştırmalar genellikle organik maddeler olan ve yaygın olarak plastik diye tanımlanan süper polimerler üzerine kaymıştır. Bu malzemeler özellikle II. Dünya Savaşından sonra hızlı bir yükseliş içerisinde olmuştur [35].

Modern kompozit malzemelerin üretimi II. Dünya Savaşında başlamış ve askeri kullanım amaçları için geliştirilmiştir. Bu malzemeler binalardan köprülere mobilyalardan tenis raketlerine, kayaklara, optik lenslere, lazer ayna destekleme sehmasına kadar değişik alanlarda tercih edilmektedir. Özellikle, sivil ve askeri uçaklarda son çeyrek asırdır ileri kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. FRP kullanılan sivil yolcu uçağı [36]

Plastik malzemelerin birçok üstün özelliğe sahip olmasının yanında sertlik ve dayanıklılık özelliklerinin düşük olması plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına neden olmuş ve bu tür eksikliklerin giderilmesi amacıyla polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir [37 ve 38]. Liflerle donatılı

sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren kullanılmaya başlanılmıştır. Ülkemizde "fiberglas" diye tanınan bu malzeme, 1960'lı yılların başından itibaren sıvı depoları, çatı levhaları, küçük boyda deniz teknelerinin yapımı gibi alanlarda kullanılmıştır [3]. Günümüz endüstrisinde lifli polimer kompozitleri savunma sanayisinden sivil tasarımlara kadar pek çok alanda görmek mümkündür (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. FRP malzeme kullanılmış askeri araç ve bot [34]

FRP kompozitler hem mevcut yapıların tamir ve onarımlarında hem de yeni yapılarda yaklaşık 50 yılı aşan bir süreçtir sınırlı düzeyde kullanılmaktadır [40]. Fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin yapılarda yapı malzemesi ve köprülerde ekonomik ve yapısal açıdan kullanımı son 20 yılı aşan bir süreçte gerçekleşmiştir. FRP'ler inşaat alt yapısında geleneksel yapı malzemeleri olan beton, çelik ve ahşap malzemelere alternatif olma yönünde geniş bir uygulama alanına sahiptir [41].

2.6. Fiber Takviyeli Plastik Kompozitlerin Üretimi

Yeni nesil kompozit malzemeler olarak bilinen Fiber Takviyeli Plastik Kompozitlerin yaygınlaşmasının temel sebepleri arasında üstün mekanik performansının yanında son yıllarda bu malzemelerin üretim teknikleri üzerinde artan teknolojik gelişimler de gösterilebilir. Bu süreçte polyester reçineler ile kullanılan tek yöntem, el yatırması metodu iken bugün takviyeli plastiklerin üretimi için işçilik süresini ve karıştırma hatalarını azaltan, ürün kalitesi ile üretim verimini artıran bir çok üretim yöntemi mevcuttur [42].

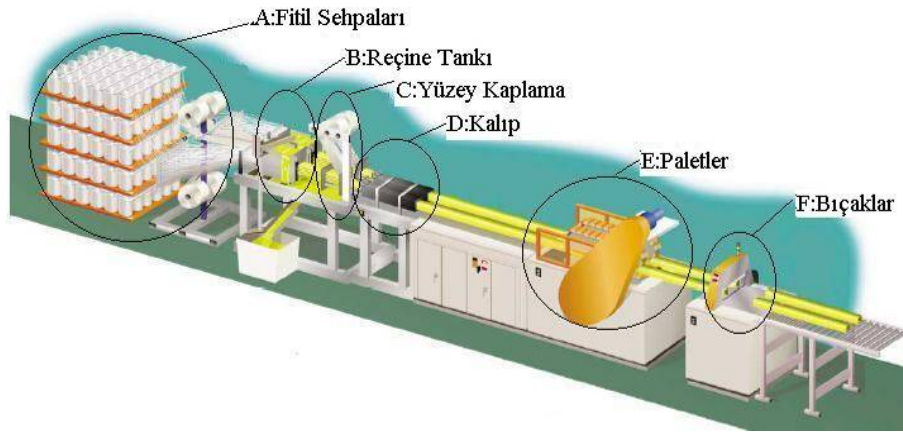
Birçok üretim yöntemine sahip FRP kompozitlerin imal edilmiş yöntemleri şu şekildedir:

1. Elle Yatırma (Hand Lay-Up)
2. Püskürtme (Spray-Up)
3. Reçine Transfer Kalıplama (Rtm) / Reçine Enjeksiyonu
4. Hazır Kalıplama (Compression Molding)
5. Islak Sistem Pres Kalıplama
6. Vakum Bonding (Vakum Bagging)
7. Otoklav (Autoclave Bonding)
8. Preslenebilir Takviyeli Termoplastik (Gmt)
9. Elyaf Sarma (Filament Winding)
10. Profil Çekme (Pultrüzyon) Metodu

Bu yöntemler arasında inşaat sektöründe taşıyıcı yapı elemanı olarak kullanılabilen, çelik profil kesitlerine benzer profiller üretilen Pultrüzyon metodudur.

2.6.1. Pultrüzyon (profil çekme) metodu

Diğer kompozit üretim yöntemleriyle üretilen kompozitlerin taşıyıcı olarak kullanılan elemanların karşılaması gereken kuvvetlere karşı yetersiz kalması özellikle inşaat sektöründe taşıyıcı eleman olarak kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu sorunu çözebilmek amacıyla profil tipindeki malzemeleri ekonomik bir şekilde üretmek için Pultrüzyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem 1950 ve 1980'lerin ortalarına kadar dikkat çekici bir süreç geçirmiş ve gelişmiştir [43]. Günümüzdeki modern haline kavuşan Pultrüzyon makinesinin çalışma prensibi Şekil 2.3'de ve örnek makine Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Pultruziyon yöntemi konfigürasyonu [44].



Şekil 2.4. Pultruziyon makinesi [45].

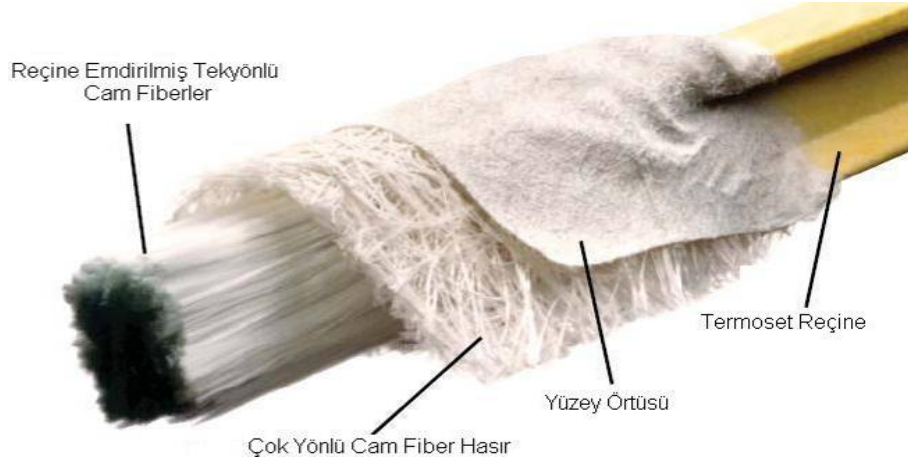
Pultruziyon yönteminde, elyaf takviyesi olarak kullanılan sürekli elyaflara ek olarak dokunmuş fitil, keçe ya da bunların kombinasyonlarının bir veya birkaçı birlikte kullanılmaktadır. Fitol sehpaları elyaf, fitil ve keçelerin sarılı olduğu bobinlerin bulunduğu kısım olup, Şekil 2.5’de de görüldüğü gibi, makine üzerinde olmayıp makineden ayrı bir bölümden oluşmaktadır. Buradaki elyaf bobinlerinin sayısı, önceden mekanik özellikleri belirlenen ve üretmek istenilen malzemeye göre değişiklik göstermektedirler.



Şekil 2.5. Fital sehpaları ve keçe örneği [46].

Pultruzyon makinesi üzerindeki ilk bölüm reçine tankıdır ve matris malzemesi olarak kullanılan reçinenin konulduğu yerdir. Takviye malzemesi olarak kullanılan cam elyaflar önce termoset reçine tankının bulunduğu bu bölümden geçerek reçineye bulanırlar. Reçine emdirilmiş cam elyaf lifleri reçine tankından hemen sonra yer alan ön kalıba girerek, içlerindeki hava ve fazla reçinenin süzülmesi sağlanır. Ayrıca, reçinenin cam takviye malzemesine en yüksek düzeyde penetrasyonu sağlanmış olur. Ön kalıptan çıkan malzeme, esas kalıba girmeden önce, yüzey kaplama işlemi denilen, atmosfer ve diğer dış etmenlerden korunması için yüzeyi karışık yönlü elyaf lifleri ile kaplanır. Bu yöntemde, elyaf hacim oranı yaklaşık %75'e kadar varan kompozit üretimi gerçekleştirilir [34].

GFRP malzemesinin pultruzyon işlemi sırasında boyuna ve enine liflerin reçineyle birleştirilmesiyle profil şekline dönüşme aşamalarının birlikte ifade edildiği profil detayı Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Örnek GFRP profil detayı [47]

Pultruzyon yöntemi ile üretilen malzemeler, önceleri elektrik sektöründe kullanılmaya başlanmasına rağmen korozyon dayanımının dikkate alınmasıyla birlikte inşaat, otomotiv ve havacılık alanlarında kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. En hızlı gelişim gösteren sektörlerden birisi korozyona dayanıklı malzeme üretimi ve bunların uygulamalarıdır. Bu profiller hafif ve kimyasallara karşı dayanım gibi özellikleri nedeniyle arıtma tesislerinde, kimyasal üretim ve diğer bazı endüstriyel tesislerde sıkça kullanılmaktadır.

Pultruzyon yöntemi ile üretilmiş profiller aksel yük altındaki performansı ve büyük boyutlu üretilmesi nedeniyle köprü gövdelerinde tercih edilmektedir. Ayrıca yaya üstgeçitlerinde ve taşıt köprü platformlarında sağladığı avantajlar nedeniyle ürün tasarımlarında pultruzyon yöntemi kullanılmaktadır. Bunların dışında, altyapı sektöründe pultruzyon yöntemiyle üretilen profiller için, her geçen gün daha çok kullanım alanı keşfedilmektedir.

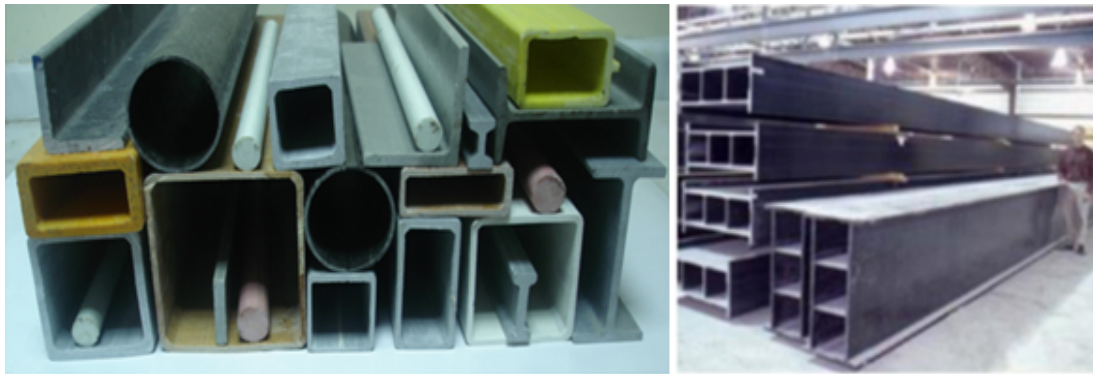
Bu profillerin geleneksel yapı malzemelerinin alternatifi olma yönündeki gelişimi sürmektedir. Tablo 2.1’de sıkça kullanılan diğer yapı malzemeleri ile birlikte GFRP profillerin bazı özellikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2.1. GFRP profiller ile diğer malzemelerin karşılaştırılması [48]

	GFRP Profiller	Çelik	Alüminyum	Ahşap
Korozyon Dayanımı	Yüksek	Düşük	Orta	Düşük
Dayanım	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük
Ağırlık	Düşük	Yüksek	Düşük	Orta
Elektriksel İletkenlik	Düşük	Yüksek	Yüksek	Düşük
Isıl İletkenlik	Çok Düşük	Yüksek	Yüksek	Düşük
İmalat	Kolay	Kolay	Orta	Kolay
Çevresel Etki	Düşük	Yüksek	Yüksek	Düşük

2.6.2. GFRP profil çeşitleri

Pultruzyon metodu özellikle inşaat sektöründe hem ana hem de tamamlayıcı malzeme olarak kullanılan profil türündeki ürünlerin yapımında kullanılmaktadır. Pultruzyon işleminde üniform kesite sahip kompozit malzemenin hem katı hem de içi boş profillerini üretmek mümkündür [49]. Profil çekme metodu ile üretilen kutu, boru, 'I', 'T', 'L', ve 'U' profillerinin yanı sıra sabit şekle sahip olmayan profillerin üretimi de yapılabilmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Pultruzyon metoduyla üretilmiş GFRP profil örnekleri

2.6.3. Pultruzyon yönteminin avantajları

FRP profillerin üretilmesinde kullanılan Pultruzyon tekniği sahip olduğu birçok avantaj sebebiyle tercih edilmektedir. Bu üretim yönteminin sağladığı avantajlar şu şekilde özetlenebilir [47]:

- Karmaşık geometriye sahip şekiller bile kolaylıkla üretilebilir.
- Üretim kolaylığından dolayı gün geçtikçe düşen maliyetleriyle metaller ile bir yarış halindedirler.
- Farklı mekanik özellikler elde etmek için farklı elyaf katmanları ve kombinasyonları ile FRP'ler üretilebilir.
- Hacimsel bazda polimer üretimi için metallerden daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar.
- Ekonomik olması ve birçok pazar tarafından kullanılması sayesinde hızlı ilerleme gösteren kompozit üretim yöntemidir,
- Pultruzyon, yönlendirilmiş elyaf kullanılan bir prosestir. Elyafın büyük bir kısmı optimum çekme dayanımı elde edecek şekilde boyuna yerleştirilirken bir kısım elyaf ise istenen ürün özelliklerini sağlayacak şekilde farklı yönde düzenlenebilir.
- Düşük işçilik gerektiren büyük ölçüde otomatikleştirilmiş bir prosestir.
- Pultruzyon yönteminde, ekipman yatırım masraflarının diğer yüksek hacimde üretim yapılan yöntemlerle kıyaslandığında düşük olmaktadır.

2.6.4. Pultruzyon yönteminin dezavantajları

Sahip olduğu birçok üstün özelliklerden dolayı FRP profillerin üretilmesinde sıkça kullanılan Pultruzyon tekniğinin bazı yetersizlikleri de bulunmakta ve aşağıda verilen şekilde özetlenebilmektedir [47]:

- Pultruzyon işleminde elyafın büyük bölümü çekme dayanımı sağlayacak yönde yerleştirildiğinden genellikle çapraz yöndeki mukavemeti düşüktür.
- Malzemenin kalitesi, üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır. Fakat bu yöntemde standartlaşmış bir kalite yok denebilir.

- Kompozitler, kırılğan malzeme oldukları için, kolaylıkla zarar görürler, onarımları yeni problemler yaratabilmektedir.

2.7. FRP Kompozitlerin Yapılarda Kullanımı

İnşaat mühendisliği endüstrisi teknik problemlerde daha verimli ve ekonomik çözümler elde etmek amacıyla yapı malzemesi ve tasarımını geliştirmek için sürekli çaba göstermektedir. Bu çalışmaların son örneklerinden birisi FRP kompozitlerin yapılarda taşıyıcı olarak kullanılmasıdır. FRP kompozitler yapılarda öncelikle yapı elemanlarını güçlendirme amaçlı başlamış, sonraları kullanım alanları genişleyerek mevcut yapı malzemelerinin alternatifini olma yönünde hızla ilerlemektedir. Geçmiş dönemlerde yapı dışındaki diğer alanlarda yoğun şekilde kullanılan bu malzemeler son yıllarda pultrüzyon metodu ile üretilerek taşıyıcı yapı elemanı olarak tercih edilmektedir. Özellikle hava taşıtları ve uzay endüstrisinde 50 yılı aşan mükemmel performansı FRP kompozitlerin inşaat sektörüne güvenilir şekilde girmesini sağlamıştır [50].

Fiber takviyeli polimer kompozitlerin yapı sektöründe ilk kullanım alanlarından birisi inşaat alt yapısındadır. Çubuk ve kiriş elemanların güçlendirilmesinden, kolonların sismik iyileştirme için sarılması gibi kullanım şekilleri mevcuttur. Ayrıca duvarlar, kirişler, levhalar, kompozit güverte köprülerinin kuvvetlendirilmesi hatta FRP kompozitlerin geleneksel yapı malzemeleri ile birlikte kullanıldığı Hibrit tasarımlar ile tamamen kompozit profillerden oluşmuş sistemlerinde bulunduğu geniş bir uygulama alanına sahiptir [51].

Bazı kompozit köprülerde olduğu gibi tamamen FRP malzemelerden üretilmiş yapılar olmasıyla birlikte, özellikle güçlendirme amaçlı geleneksel yapı malzemeleriyle FRP'lerin birlikte kullanıldığı çok sayıda örnek bulunmaktadır. FRP malzemelerin kendi birleşenleri olan matris ve fiberler de kalıtsal iyi bir uyuma sahiptirler ve birçok örnekte olduğu gibi malzemelerdeki üstün özellikler geleneksel yapı malzemeleri ile direk yer değiştirebilmektedir. Ahşap, tuğla, betonarme, çelik ve metal gibi geleneksel yapı malzemeleriyle birlikte kullanılan FRP'ler arasında uyumlu bir birliktelik görülmektedir [52].

Günümüzde FRP kompozitler en çok laminant, kumaş veya profil halinde ve CFRP ya da GFRP olarak yapı teknolojisinde tercih edilmektedir. İnşaat endüstrisinde FRP kompozitlerin yapılarda kullanım alanları şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Güçlendirme veya onarım işlerinde (Kumaş yada laminant halinde)
- Tamamen FRP profillerden imal edilmiş yapılar
- Hibrit (Beton veya Çelikle birlikte)
- Tamamlayıcı elemanlar (Korkuluk, Kaplama v.b...)

FRP kompozitlerin yapılarda kullanım alanlarının başında güçlendirme amaçlı kullanılması gelmektedir. Özellikle yapıların deprem gibi dinamik etkiler veya durabilite sorunlarından kaynaklı, taşıma kapasitelerindeki kayıpları telafi etmek amacıyla güçlendirmesi gerekebilmektedir. Uygulanan birçok güçlendirme metotlarının önemli bir seçeneği kolon, kiriş ya da duvarları FRP kumaş ve laminantlar ile güçlendirme amaçlı sarılması veya yapıştırılmasıdır. Ülkemizde 1999 Marmara depremi sonrasında FRP malzemeler ile güçlendirme çalışmaları artmıştır. Hasar görmüş ya da görmesi muhtemel yapıların güçlendirmesinin yanında tarihi değeri olan yapılar ve ahşap taşıyıcı elamanlar ile inşa edilmiş yapılarda çoğunlukla CFRP kumaşlar kullanılarak yapıların onarım ve güçlendirmeleri yapılmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. FRP ile betonarme ve ahşap yapı güçlendirilmesi

Yapıların güçlendirmesinde kullanılan FRP kumaş veya laminantlara alternatif olarak, özellikle pultruzyon üretim tekniğinin gelişmesiyle birlikte çeşitli kesitlerde profil olarak imal edilen FRP kompozitlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bölüm 1’de belirtilen, başlangıçta köprü kirişleri zaman içerisinde ise daha kapsamlı yapılarda kullanılmış örnekler mevcuttur. Çok çeşitli kesit şekillerine sahip olarak üretilen profiller, yüksek çekme dayanımı ile ön plana çıkmakta, korozyon direnci ile kullanıcıların dikkatini çekmektedir. Köprü ve konutların yanı sıra FRP kompozit profiller kimyasal tesisler, deniz yapıları, kule ve silolar gibi farklı kombinasyonlarda değerlendirilmektedir.

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin Pultruzyon yöntemi ile üretilmesiyle inşaat sektöründe birincil (taşıyıcı) eleman olarak kullanılmasının yolları açılmıştır. FRP’ler arasında günümüzde en çok kullanılan GFRP’nin taşıyıcı eleman olarak ilk kullanım şekillerinden biri fazla yüke maruz kalmayan küçük iskelelerdir (Şekil 2.9).



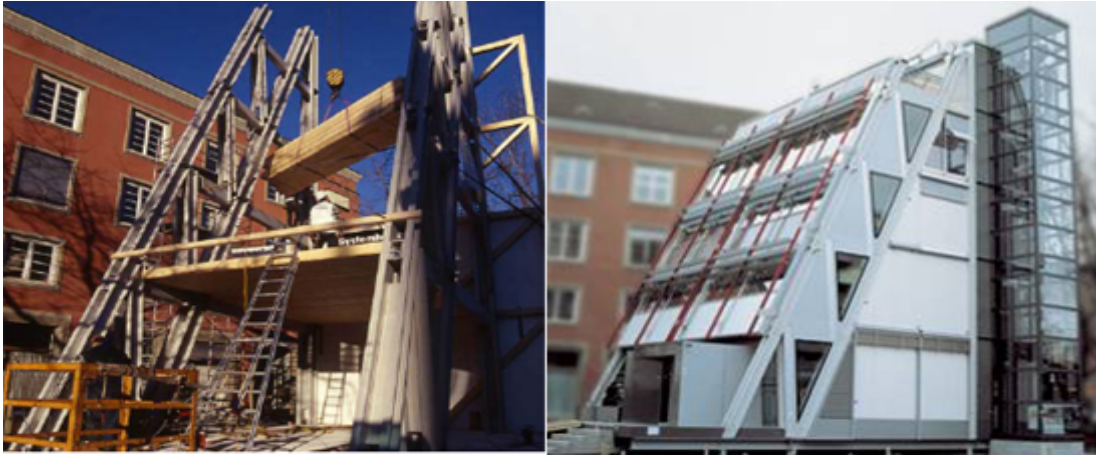
Şekil 2.9. GFRP vapur iskelesi [47]

GFRP’ler üzerinde yapılan çalışmaların sonucunda daha iyi tanınmaya başlanmış ve Copenhagen’de bulunan Lindevang Metro İstasyonu, 60 m uzunluğunda ve 7,5 m genişliğinde GFRP profiller kullanılarak imal edilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. GFRP Metro istasyonu [53]

GFRP malzemesinin hafif, dayanıklı ve sağlamlık gibi özelliklere sahip olması, yapılarda kullanımı için temel teşkil etmiştir. Bu durum göz önünde bulundurularak Şekil 2.11’de görüldüğü gibi 5 katlı, 15 m yüksekliğinde ve 10x12 m taban alanına sahip gözlem evi, İsviçre’nin Basel şehrinde yapılmıştır.



Şekil 2.11. GFRP profillerden imal edilmiş çok katlı yapı [54]

Bu çalışmalarla birlikte GFRP profiller ile yapılmış kule örnekleri (Şekil 2.12), yaya ya da araçlar için tasarlanmış köprüler (Şekil 2.13), su veya zemin yapılarında uygulanmış dünyadan çok sayıda örnekler mevcuttur (Şekil 2.14).



Şekil 2.12. GFRP profillerden imal edilmiş kuleler [44]



Şekil 2.13. GFRP profillerden imal edilmiş taşıt ve yaya köprüleri



Şekil 2.14. Zemin uygulamalarında GFRP palpaşlar

GFRP malzemelerin üstün özelliklerini dikkate alan yerli üreticiler tarafından Türkiye’de balkon çıkıntıları ve korkuluklar gibi küçük çaplı bazı uygulamaların yanı sıra 2 katlı konut yapımı da gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Türkiye’de GFRP profiller ile imal edilmiş konutlar [55]

GFRP profillerin kullanıldığı birçok yapısal örnekle birlikte, GFRP profillerin beton gibi geleneksel yapı malzemesiyle beraber kullanıldığı çok sayıda hibrit uygulamalar da mevcuttur. Amerika’da, taşıyıcı kirişleri GFRP profilden imal edilmiş üst kısmı beton malzemeden yapılmış taşıt köprüsü Şekil 2.16’da gösterilmiştir. Ayrıca yine Hibrit olarak inşa edilen ağır taşıtların rahatlıkla geçiş yapabildikleri köprüde, taşıyıcı GFRP kirişlerin üzerinde beton kullanılmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.16. GFRP kirişler ve beton ile imal edilmiş taşıt köprüsü [56]



Şekil 2.17. GFRP kirişler ve beton ile imal edilmiş ağır taşıt köprüsü [57]

Yeni nesil kompozit malzemelerin yapı sektöründe uygulamaları ile birlikte akademik düzeyde çalışmalarda aynı paralelde gelişme göstermiştir. FRP'lerin yapılarda kullanımı ile ilgili ilk akademik çalışmalar 1980 yılından 1990'lara kadar beton yapıların güçlendirme ve onarım işleri konusunda Birleşik devletler, Japonya, Kanada ve Avrupa'da yapılmış, araştırmaların ayrıntılı raporu Iyer and Sen [58] ve Nanni [59] tarafından hazırlanmıştır. Ayrıca 1993'te yılda iki kez düzenlenen beton yapıların FRP'ler ile güçlendirilmesi konulu uluslar arası sempozyum başlatılmıştır. Bunun yanı sıra FRPRCS (Fiber-Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures) olarak bilinen sempozyumlar Vancouver 1993, Ghent 1995, Sapporo 1997, Baltimore 1999, Cambridge 2001, Singapore 2003, Kansas City 2005, Patras 2007, Sydney 2009 ve Westin Harbor Island 2011'de düzenlenmiştir. Bu süreçte uluslar arası araştırmalar betonda FRP kullanımı konusunda dikkat çekici bir biçimde artış göstermiştir. Yapılarda FRP profillerin kullanımı ile ilgili çalışmaların toplanıp basılması 1980'lerden beri American Society of Civil Engineers (ASCE) tarafından yapılmış, şimdiki dağıtımı ise Structural Plastics Research Council (SPRC) ve ASCE'nin düzenlediği malzeme kongreleri tarafından yapılmaktadır. Kongreler yine ASCE'nin sponsorluğunda Denver 1990, Atlanta 1992, San Diego 1994 ve Cincinnati 1999'da yapılmıştır. Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu 1997 yılında Journal of Composites for Construction dergisini kurmuşlar ve bugün FRP malzemelerin gelişim ve araştırmaları ile ilgili temel uluslar arası arşive sahiptirler. 2003'te ise Hong Kong'da International Institute for FRP in Construction (IIFC) kurulmuştur. Bugüne kadar dünya çapında binlerce araştırma ve FRP malzemelerin

yapı mühendislik projesinde kullanımı rapor edilmiştir. 1990 yılından 2000 yılına kadar, bu alanda yapılan gelişmelerin gözden geçirildiği yayınlar ACI (American Concrete Institute) 1996 [60], Hollaway and Head 2001 [61], Teng ve arkadaşları 2000 [62], Bakis ve arkadaşları 2002 [63], Hollaway 2003 [64], Van Den Einde ve arkadaşları 2003 [65] ve Tajlsten 2004'de [66] detaylı şekilde verilmiştir [40].

2.8. Hibrit Yapı Malzemeleri

Birçok malzemede olduğu gibi yapı endüstrisinde kullanılan yapı malzemelerinin de avantajları ile birlikte bazı eksik veya yetersizlikleri bulunabilmektedir. Tasarımcılar bu tür eksikleri azaltmak ya da tamamen gidermek amacıyla yeni malzeme tasarımları oluşturma yoluna gitmişlerdir. Fakat her yönüyle mükemmel ve ekonomik bir malzeme elde etmek mümkün olmadığından dolayı, araştırmacılar artan istekler doğrultusunda kompozit malzemelerden sonra Hibrit malzemeler yani geleneksel malzemeler ile yeni nesil kompozit malzemelerin beraber kullanımını sağlayacak tasarımlar üzerine yoğunlaşmışlardır [6].

Betonun 1850'li yıllara dayanan bir geçmişe sahip olması ve en çok tercih edilen yapı malzemelerinin başında gelmesindeki en büyük etkenler; ekonomik ve kolay şekil verilebilir olmasının yanında basınç dayanımının yüksek olması gibi birçok avantajları kullanıcıya sunmasıdır. Bunlarla birlikte çekme dayanımı, ağırlık, geçirimsizlik ve durabilite gibi zayıf yönleri de bulunabilmektedir. Bu tür nedenlerle beton malzemesi genellikle yalın halde kullanılmamaktadır. En bilinen şekliyle betonarme sistemlerde olduğu gibi çelik donatılarla birlikte kullanımı, en çok uygulanan biçimidir.

Betonarme sistemlerde kullanılan kirişlerde, tarafsız eksenin altında kalan bölgedeki betonun çok verimli olmadığı uzun süredir bilinmektedir. Betonun çekme dayanımı çok zayıf olmasından dolayı çekme etkilerine karşı çelik donatıların kullanımı ve donatıları zararlı çevresel etkilerden korumak amacıyla beton ve çelik malzemeler birlikte kullanılmaktadır. Fakat bu işlevin tam sağlanamaması ve çekme gerilmeleri etkisiyle oluşan çatlakların yol açtığı etkenler, çelik donatıların zamanla deforme olmasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan cam ya da karbon fiberlerin vinilester veya

epoksi matris ile birlikte kullanılmasıyla ortaya çıkan kompozitler özellikle bazı maddelerin hücumuna karşı mükemmel işleve sahiptirler. Ayrıca yüksek lif oranına sahip kompozitler yüksek dayanım, rijitlik ve minimum bakımla mükemmel durabiliteye sahiptir. Böylece yüksek basınç dayanımına sahip betonun basınç bölgesinde, yüksek çekme dayanımına sahip polimer kompozitlerin ise çekme bölgesinde kullanılmasıyla ortaya çıkan Hibrit kirişler, bu iki malzemenin en iyi özellikleri kullanılarak oluşturulmaktadır [6].

Betonun çelik donatılar ile kullanımının yanı sıra son dönemlerde çelik malzemedan farklı malzemeler ile birlikte uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Bu gelişim süreci içerisinde yapı teknolojisi alanında, yeni nesil Hibrit malzeme tasarımlarından önemli bir türünü, uzun bir geçmişe sahip olan beton ile son dönemlerin popüler malzemesi FRP kompozit profillerin birlikte yapı malzemesi olarak kullanılması oluşturmaktadır.

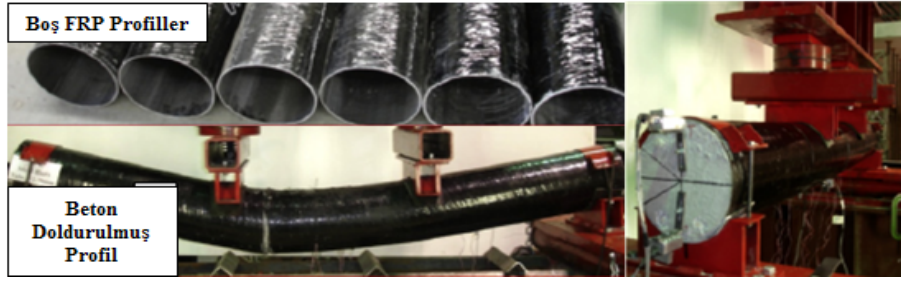
2.8.1. Betonun FRP profiller ile birlikte kullanımı

Yapılarda FRP'lerin son yıllarda gündeme gelen diğer bir uygulama alanı, özellikle beton ve çelik gibi geleneksel yapı malzemeleriyle birlikte Hibrit olarak kullanılmasıdır. Yapılan uygulamalarda beton taze halde iken FRP profil içerisinde yada üzerinde kullanılmakta, FRP kompozit profil genelde çekme bölgesinde ve kalıp işlevi görecektir şekilde tasarlanmaktadır. FRP'ler Hibrit tasarımlarda beton için kalıp görevi üstlenmekte, çekme gerilmelerini karşılamakta ve betonu dış etkilerden korumaktadır. Bu gibi avantajlarla araştırmacıların ilgisini çekmekte olan Hibrit tasarımlar kimi zaman Çelik-Beton-GFRP-CFRP gibi birçok malzemeyi bir arada kullanma olanağı da sunmaktadır. Hibrit tasarımlarda kullanılan farklı kesit şekillerine sahip FRP profillerin daire kesitli olanları (Boru şeklinde), bu alanda en çok tercih edilen kısmı oluşturmaktadır. Özellikle zemin uygulamaları, kazık temeller, kolonlar ve köprü ayakları olarak en çok tercih edilen Hibrit malzeme türüdür.

Betonun taze halde iken daire veya I kesitli çelik profiller ile birlikte kullanımı bilinen bir yöntem olmasının yanında zamanla ortaya çıkan problemler ve FRP

profillerin ortaya çıkması alternatif kullanımların yolunu açmıştır. Tüm çelik profil kesitlerinde üretilebilen FRP profiller çok sayıda avantajı kullanıcıya sunmuştur. Betonla doldurulmuş çelik borular inşaat sektöründe yoğun şekilde kullanılmasına rağmen korozyon etkileri ile taşıma kapasitelerini kaybetmeleri nedeniyle, FRP kompozitler kullanılmaya başlanmıştır [67].

Çeliğe kıyasla korozyona uğramayan FRP daire kesitli boru profillerin içerisine taze halde beton doldurulmasıyla oluşturulan Hibrit malzemeler ile ilgili yapılmış çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Beton doldurulmuş fiber takviyeli plastik boru (CFFT) kazıklar ve bu kazıkların birleştirilmesi ile ilgili ilk çalışmalar Florida'da, 1995 yılında Mirmiran ve Shahawy'nin yaptığı çelik boruların korozyon problemi sonucu ortaya çıkmıştır [69]. Bu tarihten sonra 1996 yılında Carbrera, CFFT kolonlar üzerinde moment-eğrilik analiz çalışmaları yapmıştır [70]. Bu analiz çalışmalarında tekrarlı gerilme-şekil değiştirme testleri ile silindir numunelere yükleme boşaltma etkisinde aksenal kuvvet uygulamıştır. Çalışma sonucunda GFRP ve CFRP borularda süneklik artışları elde etmiştir. Seible ve arkadaşları [71] yaptıkları deneysel çalışmalarında karbon CFFT kolonların sismik yük altında davranışını inceleyerek, %40 oranında küçültülmüş, 3.7 m yüksekliğinde konsol, 0.6 m çapında ve 1.7 m mesnet açıklığında dairesel köprü kolonunu test edip, süneklik artışları elde etmişlerdir. Davol ve arkadaşları [72] ise 2001 yılında lamine edilmiş farklı fiber yönlerine sahip numuneler üzerinde yaptıkları testlerde, boru elamanlarda yüksek basınç deformasyonuna ulaşmışlardır. Fan ve arkadaşları [73] cam ya da karbon lifli CFFT boru elamanların betonarme kolonların dışında kullanılmasının sismik performansa etkilerini incelemişler ve test sonrasında boru elamanların dayanımında artış olmaz iken deformasyon oranında büyük artışların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yuan ve arkadaşları [74] 2002 yılında, $\pm 45^\circ$ oranında yönlendirilmiş fiberli Hibrit GFRP/CFRP boru tasarımında %21 den 2 kata kadar basınç dayanımında artışlar elde etmişlerdir [75]. Bunun yanı sıra Şekil 2.19 ve 2.20'de görüldüğü gibi sonraki yıllarda CFFT boru elamanların beton ile doldurulması ile ilgili birçok akademik araştırma ve çalışma yapılmıştır.

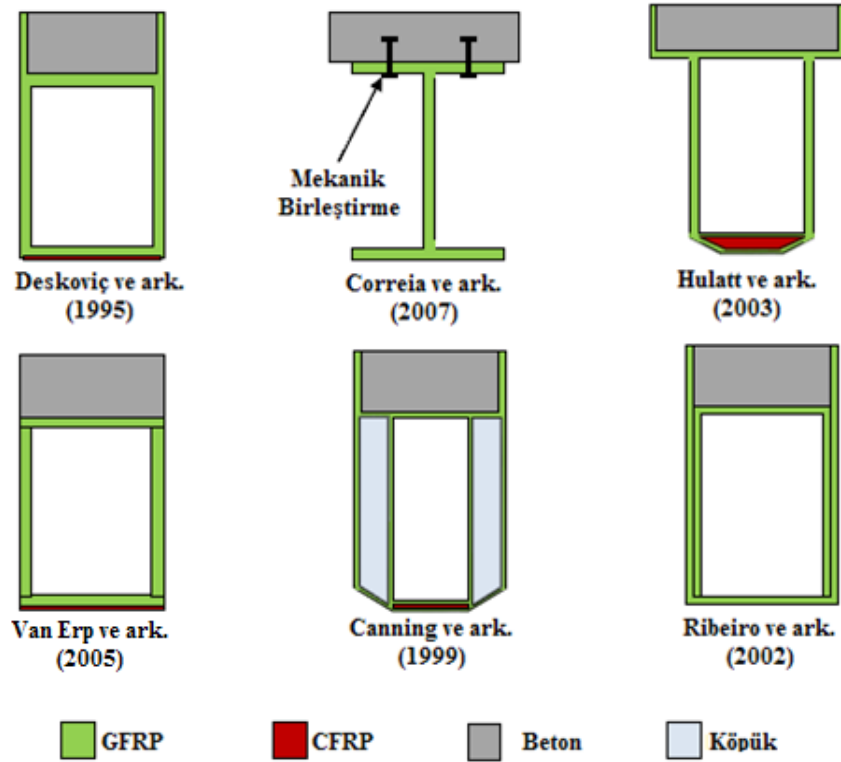


Şekil 2.19. İçerisi beton doldurulmuş FRP boru testleri [27]



Şekil 2.20. CFFT boru elemanlarının kullanım şekilleri [76]

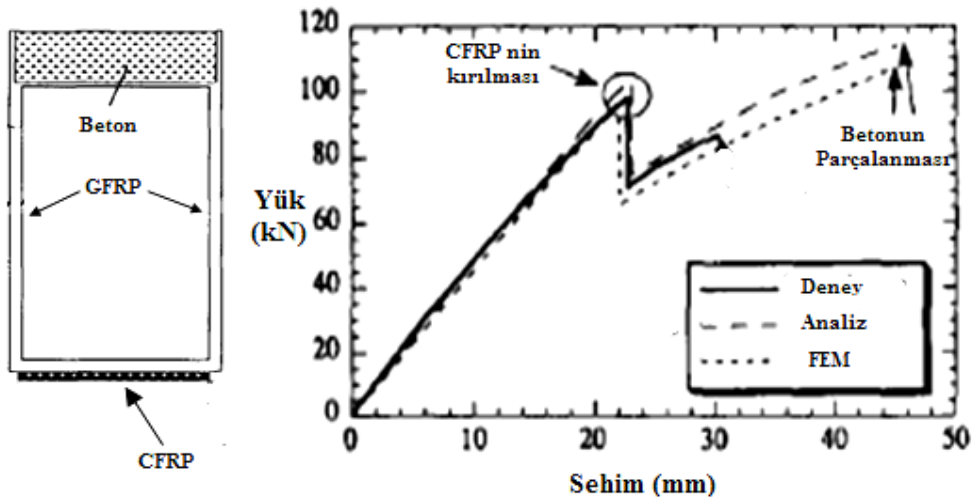
Betonla FRP profillerin birlikte kullanıldığı ilk uygulamalar daire kesitli boru elemanlarda zemin ve kazık temel uygulamalarında başlamış, daha sonraları genişleyerek kutu, I ve farklı kesitlerdeki profillerde uygulanmıştır. Çok farklı kombinasyonlarda üretim yapılabilen Hibrit yapı malzemelerinin, Şekil 2.18’de farklı kesitlere sahip profillerde GFRP, CFRP, strafor ve betonun birlikte kullanıldığı Hibrit tasarımlar verilmiştir. Genellikle basınç bölgesinde betonun, çekme bölgesinde ise GFRP profillerin kullanıldığı tasarımların bazılarında CFRP laminantlar ya da kumaşlar kullanılmıştır.



Şekil 2.18. Çeşitli Hibrit kiriş kesitleri [68]

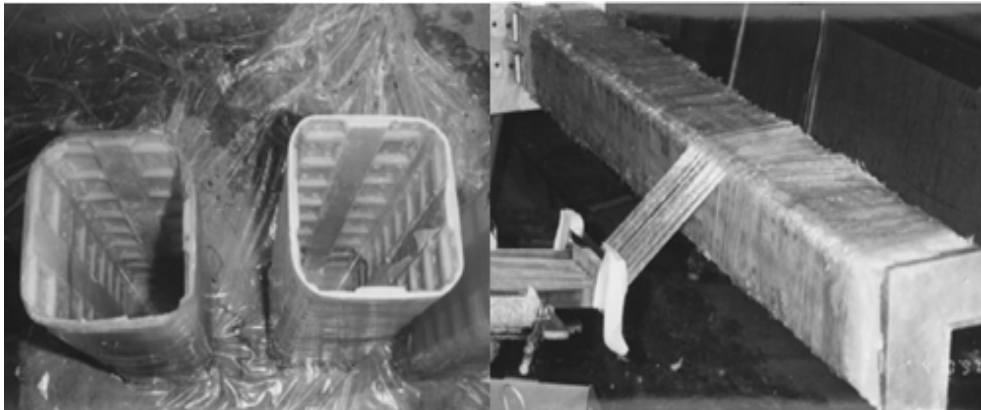
2.8.2. Konuyla ilgili yapılmış çalışmalar

Deskoviç ve arkadaşları [77]; Yaptıkları çalışmada, pultrüzyon yöntemi ile üretilen profiller üzerinde basınç bölgesinde beton, çekme bölgesinde ise CFRP lamine elamanlar bulunan GFRP kutu kirişlerin mekanik davranışını incelemiştir. Sonradan yapılacak birçok çalışmaya öncülük eden çalışmalarında, tasarlanan yeni kirişlerde uygun maliyet, yüksek rijitlik, dayanım ve süneklik gibi karakteristik özellikleri araştırmışlardır. Sonlu elamanlar tekniği kullanarak büyük boyutlu numuneler üzerinde eğilme test serileri oluşturup, analitik sonuçları doğrulamışlardır. Yapılan eğilme deneyleri ile analiz çalışmaları arasında iyi bir uyum yakalayan araştırmacılar, FRP-Beton Hibrit yapı elemanlarının kullanılmasını önermişlerdir. Hibrit FRP-Beton kiriş tasarımlarının ilklerinden birini temsil eden çalışmalarında, tasarlanan kiriş kesiti ve örnek yük-sehim grafiği Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



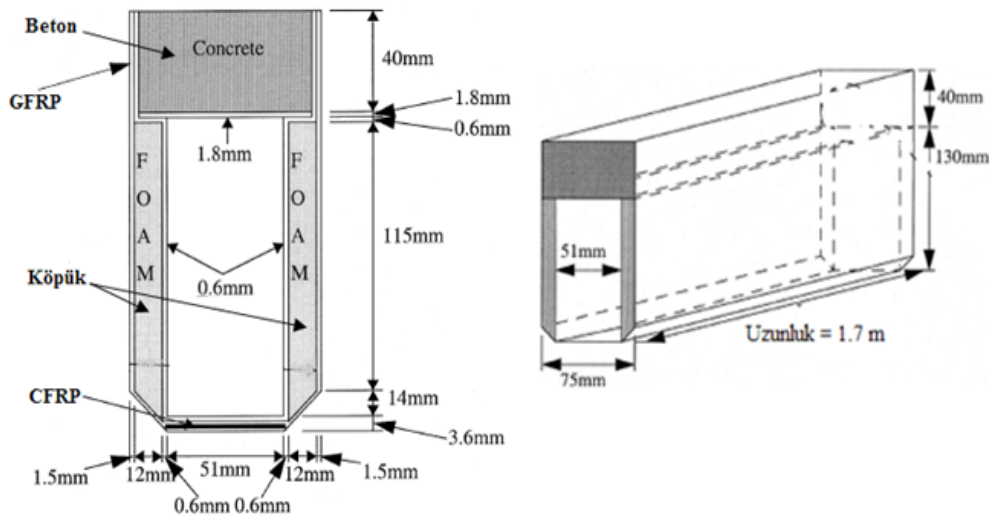
Şekil 2.21. Deskoviç tarafından tasarlanan Hibrit kirişin kesit ve yük-sehim grafiği [77]

Mirmiran ve arkadaşları [78] oluşturdukları Hibrit kolonda içerisi beton ile doldurulmuş FRP profillerden oluşan malzeme tipini tasarlayıp üreterek numuneler üzerinde basınç ve eğilme testleri yapmışlardır (Şekil 2.22). Ürettikleri toplam 16 adet kısa kolona aksel yük ve 5 adet kiriş numuneye ise dört noktalı eğilme deneyi yapmışlardır. Dış kısımda kullanılan FRP profilin kalıp gibi davranmasını, içerisindeki betonu korumasıyla birlikte eğilme ve kayma güçlendirmesi amacıyla boyuna ve enine rijitlik artırıcı uygulamalar yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda mükemmel kesme performansı sağlanmış, bununla birlikte Hibrit kolonlar basınç bölgesinde betonarme kolonlarda %5 donatıya denk güçlü moment kapasitesi gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca Hibrit kirişlerde ani ve gevrek kırılma olmadığını, büyük oranda deplasmanlar oluştuğunu vurgulamışlardır.



Şekil 2.22. Mirmiran tarafından tasarlanan Hibrit kiriş kesitleri ve güçlendirilmesi

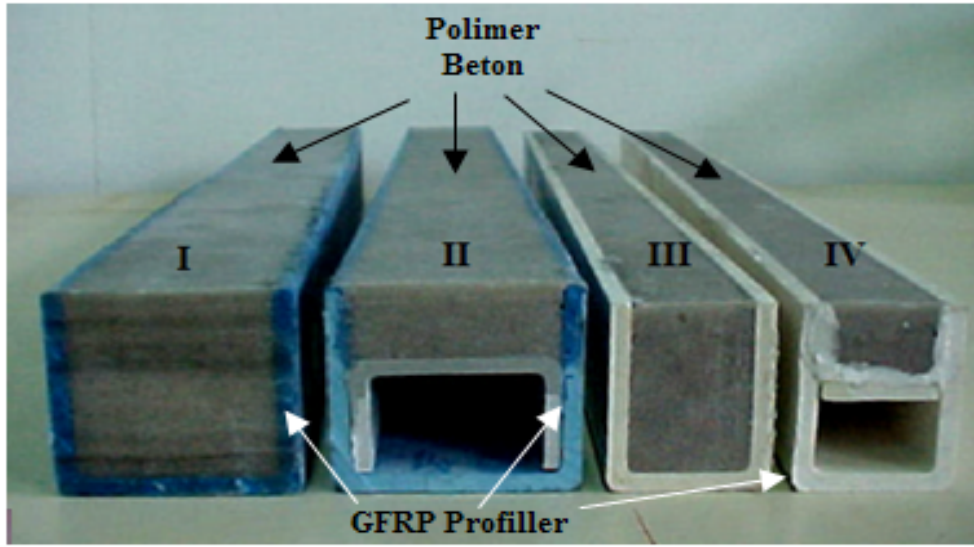
Canning ve arkadaşları [23] polimer kompozit ve betonun en iyi özelliklerinin birleştirilmesini esas alarak oluşturulan iki bileşenli kiriş tasarlamışlardır (Şekil 2.23). Çekme ve basınç gerilmelerinin dışında kayma etkisiyle oluşabilecek deformasyonlarda, bileşen iki malzeme arasındaki kayma gerilmesi transferinde altı farklı birleştirme tekniği kullanmışlar ve daha verimli kayma transferi gerçekleşmesi amacıyla bu birleştirmeleri geliştirmeye çalışmışlardır. Bu altı metot birbirinden bağımsız olarak tasarlanmış ve betonun sürekli kapalı şekilde tutulmasını hedeflemişlerdir. Ayrıca tasarladıkları kiriş sisteminde %75'lere varan hafiflik elde etmişler ve köprü maliyetlerinde %50'ye yakın tasarruf sağlanabileceğini ifade etmişlerdir. Kiriş kesit tercihlerinde daha özgürce tasarımların yapılabileceğini, oluşturulan kompozitin beton için sürekli kalıp vazifesi göreceğini, polimer kompozitlerin korozyon özellikleri ve çevresel etkilere karşı davranışlarından dolayı malzemede durabilitenin artacağını ifade etmişlerdir. Çalışmada geleneksel malzeme ve yapım yöntemleri ile kıyasladığında deneyimin az olmasından dolayı çok iyi denetimin sağlanması gerektiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.23. Canning tarafından tasarlanan Hibrit kiriş [23]

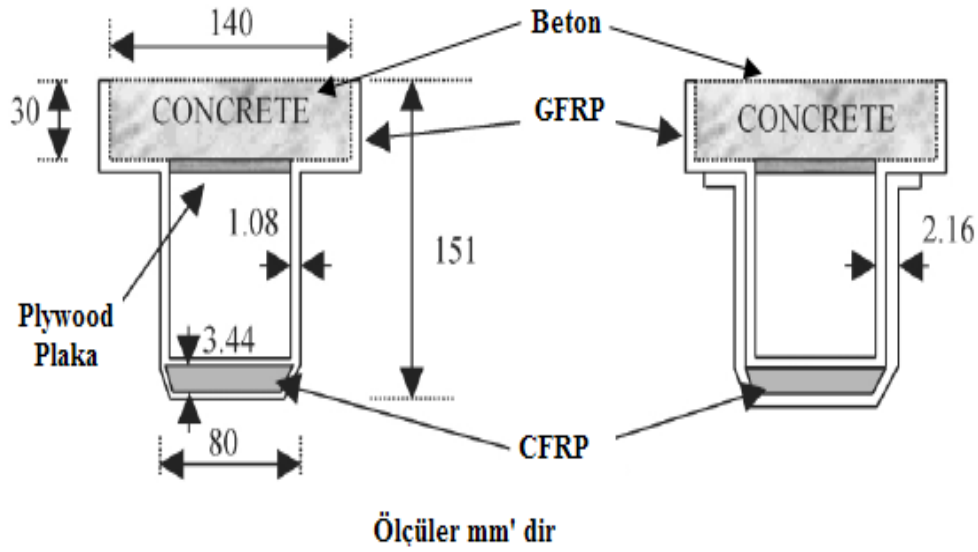
Ribeiro ve arkadaşları [24]; Pultruzyon metodu ile üretilen farklı kesitlere sahip GFRP profiller ile polimer beton kullanarak Hibrit kirişler oluşturmuşlar ve statik eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla GFRP profilleri çekme bölgesinde,

polimer betonu ise basınç bölgesinde kullanıp profilleri polimer beton ile doldurmuşlardır. Dört farklı kesite sahip Hibrit tasarım geliştirerek (Şekil 2.24), Kirişlerin eğilme davranışlarını 4 noktalı eğilme testleri ile gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçları tahmin etmek amacıyla sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda bu iki malzemenin birleştirmesi ile oluşan birlikteliğin malzeme dayanımını artırdığını ifade etmişlerdir. Nümerik model ile yük-deplasman grafiklerinde deneysel verilere yakın değerler elde etmişlerdir.



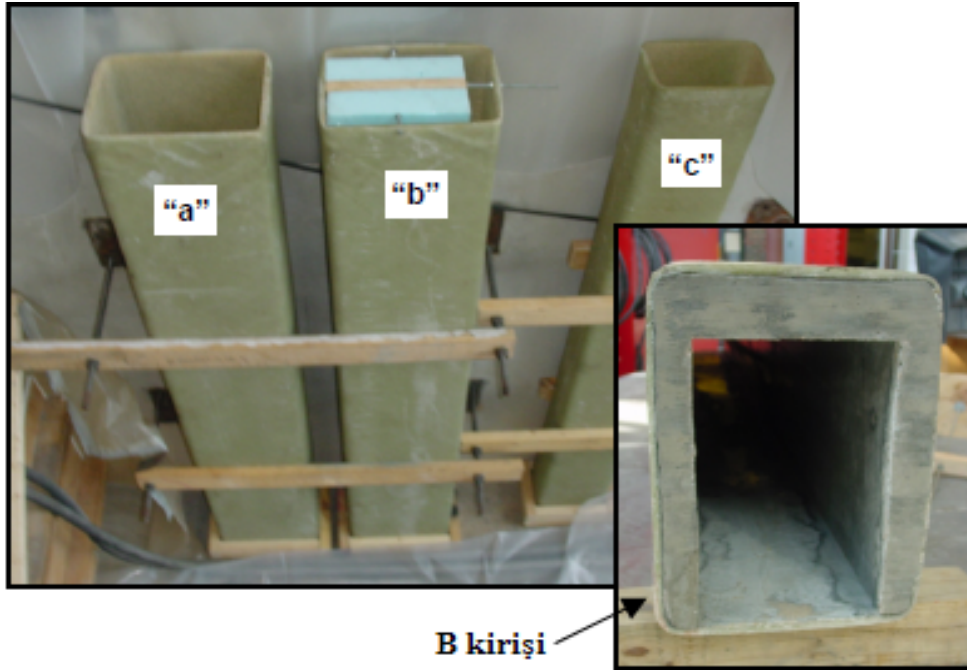
Şekil 2.24. GFRP ve polimer betondan oluşturulmuş Hibrit kirişler [24].

Hulatt ve arkadaşları [79]; Yaptıkları çalışmada yüksek basınç dayanımına sahip betonu üst kısımda, yüksek çekme dayanımı ve rijitliğe sahip polimer kompoziti ise tarafsız eksenin alt kısmında kullanarak iki katlı kiriş tasarlamış ve analiz etmişlerdir. Oluşturdukları T kesitli tasarımda bileşen malzemelerin en iyi özelliklerinden faydalanarak ve yük altındaki davranışını incelemişlerdir. Hazırladıkları toplam dokuz adet 1,5 m açıklığındaki kirişlerin en alt kısmında CFRP, aynı zamanda kalıp görevi üstlenen diğer kısımlarda ise GFRP profiller kullanmışlardır (Şekil 2.25). Yaptıkları deneyler sonrasında kırılma yükünün %20'lik kısmında burkulma kırılmalarının olduğunu, artan yük ile birlikte betonda kırılma ve deformasyonların arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında Hibrit kirişlerin uzun dönem sünme ve yorulma testlerini de gerçekleştirmişler, betonda meydana gelen rijitlik azalmasına rağmen FRP kompozitlerde negatif bir durum olmadığını ifade etmişlerdir.



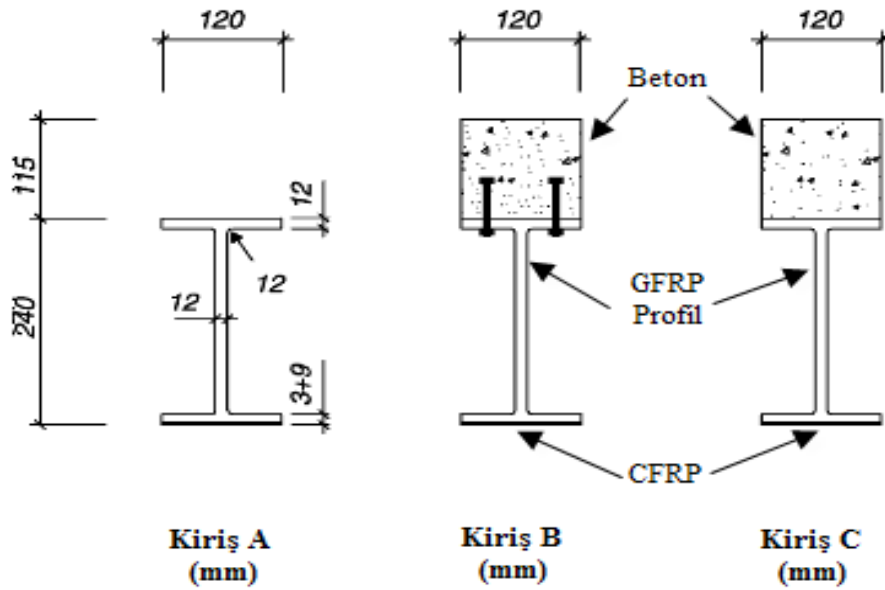
Şekil 2.25. Hulatt tarafından tasarlanan Hibrit kirişin kesit özellikleri [79]

Fam ve arkadaşları [80] içerisine beton doldurarak hazırladıkları 15 adet GFRP profil elemanlara eğilme, aksenal basınç ve bileşik eğilme kuvvetleri uygulamışlardır. Araştırmacıların hazırladıkları Hibrit Beton-GFRP profil elamanların görünüşü ve kesit özellikleri Şekil 2.26'da verilmiştir. Hibrit malzemenin ağırlığını azaltmak için iç boru çapıyla ilgili çalışma yapmışlar, ayrıca fiber yönü, FRP boru et kalınlığı, iç boşluk çapı ve beton basınç dayanımının Hibrit malzemeye etkilerini incelemek amacıyla parametrik ve analitik çalışma yapmışlardır. Beş farklı elaman kullanarak yaptıkları çalışmada; 4 adet numuneye kiriş eğilme testi, 3 adet aksenal basınç altında ve 8 adet numunenin ise bileşik eğilme ve basınç etkisi altındaki davranışını test etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda içerisi kısmen beton ile doldurulmuş kiriş numunelerin içerisi tamamen beton doldurulmuş numunelere yakın rijitliğe sahip olduklarını, fakat eğilme dayanımının düşük olduğunu, tamamen doldurulmuş numunelerde GFRP profillerin çekme bölgesinde kırılmalar gerçekleşirken, kısmen dolu kiriş numunelerde ise içten beton kenarında lokal kırılmaların olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.26. Fam tarafından tasarlanmış Hibrit kirişler [80]

Nordina ve Taljstena [81] çalışmalarında Hibrit kiriş için I kesitli GFRP profil üzerine basınç bölgesinde dikdörtgen kesitli beton blok kullanmışlar, alt çekme bölgesinde ise CFRP elemanlar ile kirişi takviye etmişlerdir (Şekil 2.27). Beton ile kompozit kiriş arasındaki etkileşimi iki farklı epoksi ile yapıştırarak yardımcı çelik elemanlar ile birleştirmişlerdir. Şahit olarak basınç bölgesinde beton kullanılmayan numuneyi test etmişler, GFRP, Beton ve CFRP elemanların kombine kullanılması ile betonun yüksek basınç dayanımından, karbon elemanların yüksek çekme dayanımından GFRP'lerin ise ekonomik olmasından faydalanmak istemişlerdir. Beton ile GFRP profil birleşiminde mekanik birleştirme ve epoksi ile yapıştırma yöntemini kullanarak karşılaştırmalar yapmışlardır. Çalışma sonucunda özellikle hafifliği nedeniyle GFRP'nin mevcut yapı malzemelerine mükemmel bir alternatif olduğunu belirtmişler, yaptıkları analitik çalışma ile deneysel sonuçları karşılaştırarak yakın veriler elde etmişlerdir.

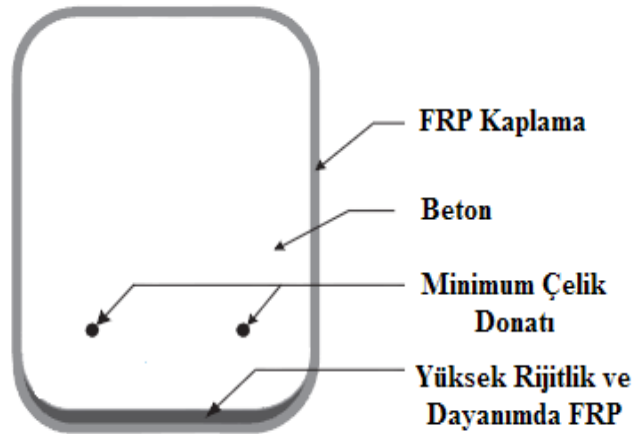


Şekil 2.27. GFRP I profilden oluşturulmuş Hibrit kirişler [81];

Ferreira ve arkadaşları [82] Ribeiro ve arkadaşlarının [24] çalışmalarına ek olarak geliştirilen Hibrit kompozit kirişleri analiz edip, nümerik çalışma yapmışlardır. Normal beton yerine polimer beton kullanılan Hibrit kirişlerde, kompozit malzemenin kesme ve çekme dayanımını incelemişler ve nümerik modeller üretmişlerdir. Pultrüzyonla üretilmiş %60-65 civarında fiber oranına sahip GFRP profillerden oluşturulmuş U kesite sahip kiriş numuneler kullanmışlardır. Deneylerde 600 mm uzunluğundaki test numuneleri için önce dört kesitle başlanılmış daha sonra en iyi eğilme dayanımını gösteren üç kesit tipi tercih edilmiştir. İki tip kesitte profil içerisi tamamen polimer beton ile doldurulmuş, diğerlerinde ise kirişin basınç bölgesi betonla doldurulmuştur. Tüm numuneler öncelikle normal hava koşullarında yedi gün ve sonrasında 80 °C derecede 3 saat bekletmişler, 510 mm mesnet açıklığında dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirmişlerdir. Malzeme birleşim yüzeylerinde iyileştirme çalışmaları yaparak üç yeni küçük boyutlu Hibrit kiriş üretmiş ve test etmişlerdir. Özellikle GFRP profil ile epoksi arasında yapışma yüzeyi ile ilgili iyileştirmeler yapmışlar ve kirişlerin eğilme davranışlarında büyük ölçüde gelişmeler elde etmişlerdir. Deney yaptıkları kiriş sistemi ile ilgili nümerik model üretmişler ve nümerik çalışmalar ile deneysel sonuçlar arasında çok yakın benzerlikler elde etmişlerdir. Deney sonuçlarında sonlu eleman modeli, GFRP boş profil, polimer beton ve Hibrit kiriş grafiklerini karşılaştırmalı vermişlerdir. Sonuç olarak

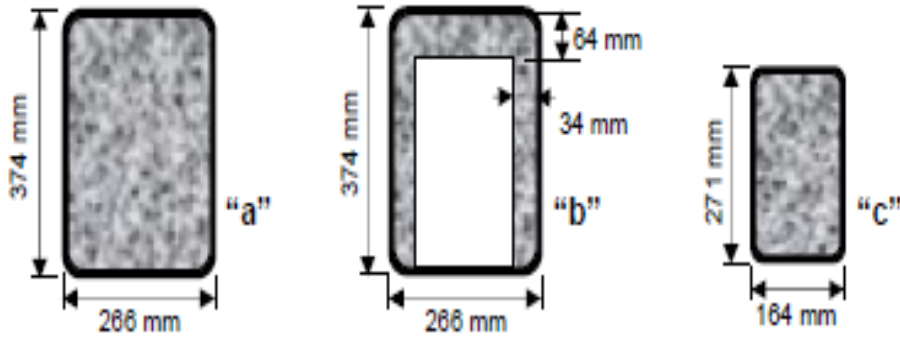
malzemeler arasındaki ara yüzey iyileştirmeleri sonucunda yüksek eğilme performansı elde etmişlerdir.

Wenlxiao ve Zhishen [83] tasarladıkları FRP-Beton kirişler üzerinde eğilme deneyleri gerçekleştirerek, eğilme performansını değerlendirmişlerdir. Hazırladıkları Hibrit kiriş sistemlerinde kiriş içerisine çekme bölgesinde minimum oranda çelik donatılar yerleştirmiş ve köşesi pahlı 150-200 mm kesitli dikdörtgen numuneler kullanmışlardır (Şekil 2.28). Kullandıkları FRP malzemesinde fiber türü olarak cam fiber ve yüksek karbon liflerini (CFRP/GFRP) tercih etmişler, ayrıca analitik ve parametrik model üzerinde çalışmışlardır. Test numunelerinin eğilme davranışını analiz etmek amacıyla şekil değiştirme, denge ve uyumuna dayanan prensiple tekrarlı analitik yöntem kullanmışlar. Hibrit FRP-Beton kiriş sisteminde kullandıkları farklı FRP kompozit ve oranlarında süneklik, taşıma kapasitesi ve rijitlik ile ilgili test sonuçları elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda tasarladıkları kiriş sistemini analitik model ile deneyleri doğrulamışlardır. Önerdikleri Hibrit sistem için Euler-Bernouli kiriş teorisinin kullanılabilceğini belirtmişler ve yük taşıma kapasitesi, rijitlik, süneklik ile ilgili tasarımın geliştirilerek daha iyi sonuçların elde edilebileceğini vurgulamışlardır. Ayrıca kiriş rijitliğinin artırılması amacıyla yüksek Elastisite modülüne sahip karbon fiberli tabakaların gerekli olduğunu belirtmişlerdir.

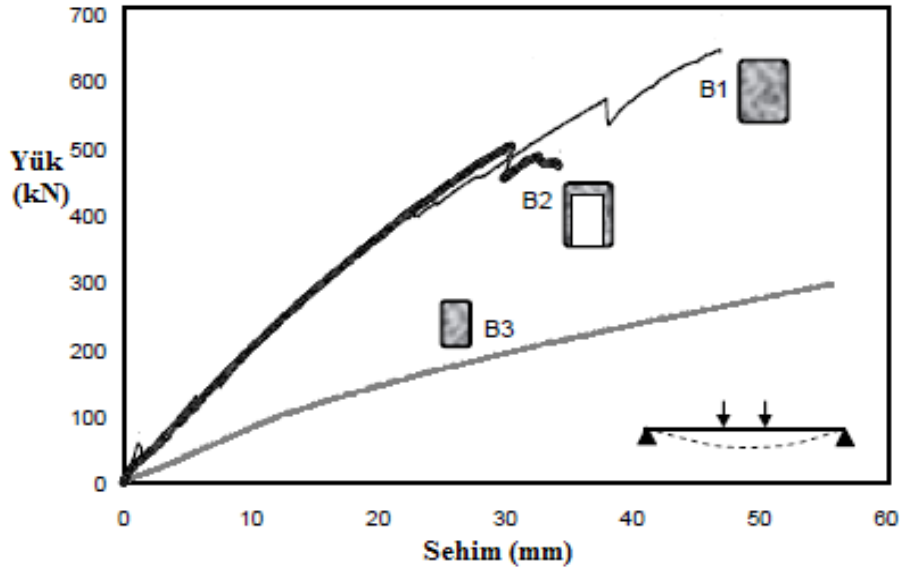


Şekil 2.28. Wenlxiao tarafından tasarlanan Hibrit kirişin kesit ve özellikleri [83]

Fam ve arkadaşları [26] dikdörtgen kesitli GFRP profiller içerisine beton doldurarak hazırladıkları Hibrit yapı elemanları ile çeşitli testler gerçekleştirmişlerdir. Üç kiriş ve beş adet kısa kolona eksen merkezli ve eksantrik yükleme yapmışlardır. Kiriş deneylerinde tamamen ve kısmen beton doldurulmuş profiller kullanarak numune ağırlığını azaltmışlardır. Deneylerde kullandıkları GFRP profillerin kesit ölçüleri Şekil 2.29’da görüldüğü gibi 271x164 mm ve 374x266 mm arasında değişmekte ve GFRP elemanlarda cam fiber oranı %60 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca profil içerisinde kullanılan beton ile profil arasındaki aderansı artırmak amaçlı epoksi ile profil iç yüzeyine silika kumu yapıştırmışlardır. Kısa kolon testlerinde ise tamamen beton doldurulmuş numuneler 680 mm uzunluğunda olmak üzere, eksantrik oranları 0.0, 0.092, 0.184 ve 0.236 olmak üzere deneyler yapmışlardır. Deney numuneleri tasarımında farklı iki boyutlu kullandıkları GFRP elemanlar ile benzer şekilde tasarlanmış beton doldurulmuş çelik elemanlar arasında karşılaştırmalar yapmışlardır. Yaptıkları pratik ve uygulanabilir sistem aynı özelliklerde yapılan fakat FRP elemanların yerine çelik kullanılan çalışmalarda eğilme dayanımına benzer değerleri elde etmişlerdir. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen yük-sehim grafiği Şekil 2.30’da verilmiştir.



Şekil 2.29. Fam tarafından tasarlanmış kiriş kesitleri [26]



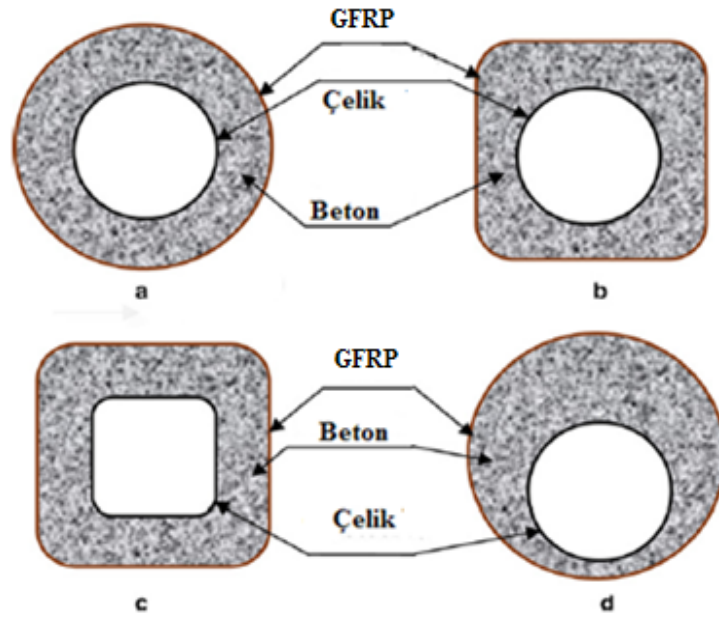
Şekil 2.30. Fam tarafından tasarlanmış Hibrit kirişlerin yük-sehim grafikleri [26]

Araştırmacıların yaptıkları testler sonucunda elde ettikleri sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Oluşturulan sistemin büyük kolaylıklar sağladığını, GFRP profillerin sürekli kalıp görevini üstlendiğini,
- Beton ve GFRP ile oluşturulan Hibrit kirişlerin yük–deplasman davranışında iyileşmeler elde etmişler, içi kısmen boş kirişler tam dolu kirişlere göre %22 daha az dayanım göstermesine rağmen % 56 daha hafif olduğunu,
- Tamamen beton dolu GFRP elemanlardan oluşturulan kirişlerde, basınç bölgesinde beton kenarında kırılmaların olduğunu, çekme bölgesinde GFRP'nin kopmasıyla ve boş bölgede iç burkulma kırılmaların olduğunu tespit ederek, GFRP profilin basınç kenarında ise dış burkulmaların gerçekleştiğini
- GFRP kirişlerin basınç bölgesinde kesit derinliğinin %20–30 civarındaki çatlamadan sonra tüm yüklemeye esnasında stabil davrandığını belirterek, ayrıca deney numunelerinde genelde lineer şekil değiştirmenin gerçekleştiğini,

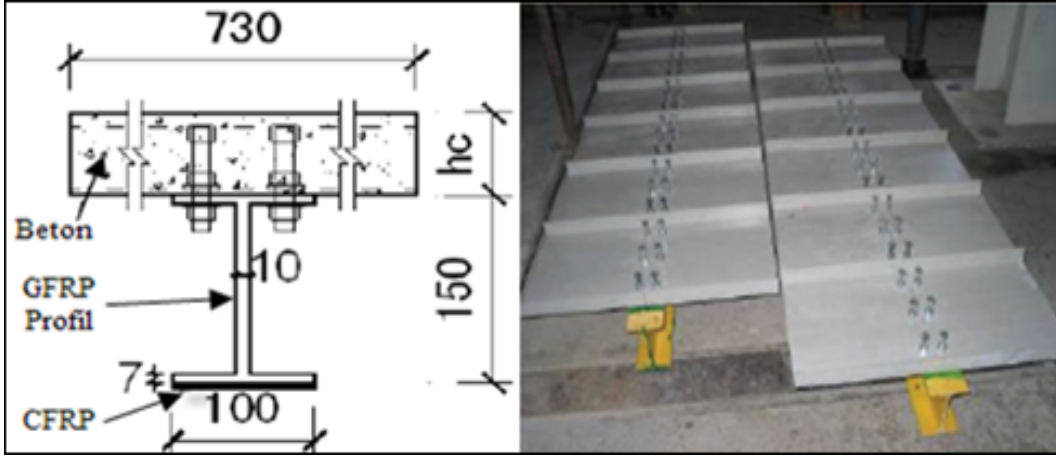
- Beton-GFRP profiller ile oluşturulan Hibrit yapının benzer özelliklerdeki Beton-Çelik elemanların eğilme dayanımı ile karşılaştırıldığında yük-deplasman davranışının tamamen farklı olduğunu belirtmişlerdir. Beton-Çelik kirişte çeliğin Elastisite modülünün GFRP'den fazla olmasından dolayı ilk aşamalarda daha rijit davrandığını, çelik akma sınırına geldiğinde plastik davranış gözlemlendiğini fakat GFRP'de bu halin gözlemlenmediğini,
- GFRP Hibrit kirişlerde beton ve FRP kesit alanlarına göre güçlendirme oranının artması, eğilme dayanımında %41'lere varan artışlara sebep olduğunu,
- Beton doldurulmuş GFRP elemanlarda eğilme dayanımının aynı özellikteki içerisi beton doldurulmuş çelik elemanlarla kıyaslandığında, çeliğin Elastisite modülünün yüksek olmasından dolayı rijitliği GFRP'ye göre yüksek çıktığını ve çeliğin akma anında plastik şekil değiştirme olduğunu bunun tersine GFRP kirişlerde bu davranışın olmadığını,
- Plastik kıvamda yerleştirilen betonun etkisiyle GFRP profillerin bazı bölgelerinde şişmelerin olabileceğini ve Hibrit GFRP kolonlarda deneyler esnasında, tam kesitte yükleme yapıldığında özellikle malzeme köşelerinden gevrek kırılmaların olduğunu ifade etmişlerdir.

Teng ve arkadaşları [84] Hibrit çift katlı yüzeye sahip GFRP-Beton-Çelik boru kolonların basınç ve eğilme yükü karşısındaki davranışını incelemişlerdir. Kullanılan Hibrit tasarımlarda GFRP ve çelik malzemeler daire ve kare kesitli olarak kullanılmış (Şekil 2.31), iç kısmı çelikten, dış kısmı ise GFRP malzemedan oluşturmuşlardır. Çelik ve FRP malzeme arasına beton doldurulmuş şekilde hazırlanarak basınç ve dört noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Üç bileşenli bu yeni Hibrit kolon tasarımı ilk hallerinde olmayan çeşitli avantajlara sahip olmuşlardır. Bu avantajlar süneklik, korozyon ve yangın dayanıklılığı olarak ön plana çıkarmışlardır. Ayrıca test sonuçları GFRP boru elemanların Hibrit tasarıma eklenmesinin hem betonu korumak hem de ekstra kesme dayanımı sağlamak gibi bazı yapısal katkılar sağladığını belirtmişlerdir.



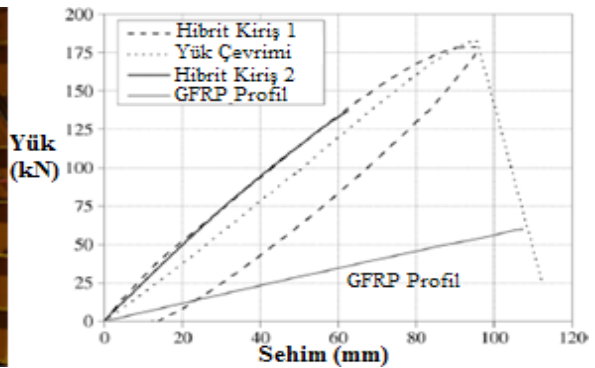
Şekil 2.31. Teng tarafından tasarlanmış GFRP, Çelik ve Betondan oluşturulmuş Hibrit elemanlar [84]

Tianhong ve arkadaşları [25] I kesitli FRP profiller üzerinde beton kullanarak oluşturulan (Şekil 2.32) Hibrit sistem üzerinde çeşitli testler yapmışlardır. E şeklinde tasarlanan sistemde profiller sürekli kalıp görevi üstlenerek tasarımı daha kullanışlı hale getirmiştir. Üç adet FRP-Beton Hibrit kiriş ve bir adet yalın haldeki FRP profili test etmişlerdir. Hibrit kiriş alt bölgesinde CFRP kumaş ile güçlendirme yapılmasının beton ve GFRP eleman yüksekliğinin malzeme performansına etkileri karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Ayrıca ilgili testler esnasında I profildeki esas deformasyon ile kayma çatlakları ayrıntılı şekilde analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda tasarlanıp üretilen Hibrit kirişlerin kalıcı kalıp olarak kullanılabilirliğini, hibrit kirişin eğilme rijitliğinin beton levhanın kalınlığı ile ilişkili olduğunu ve en alt bölgede kullanılan CFRP lamine elemanların rijitliğe çok katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Kayma gerilmelerinden kaynaklı deformasyonların malzeme performansını etkilediğini ve kayma dayanımının beton levha kalınlığı ile doğru orantılı olarak arttığını ifade etmişlerdir.



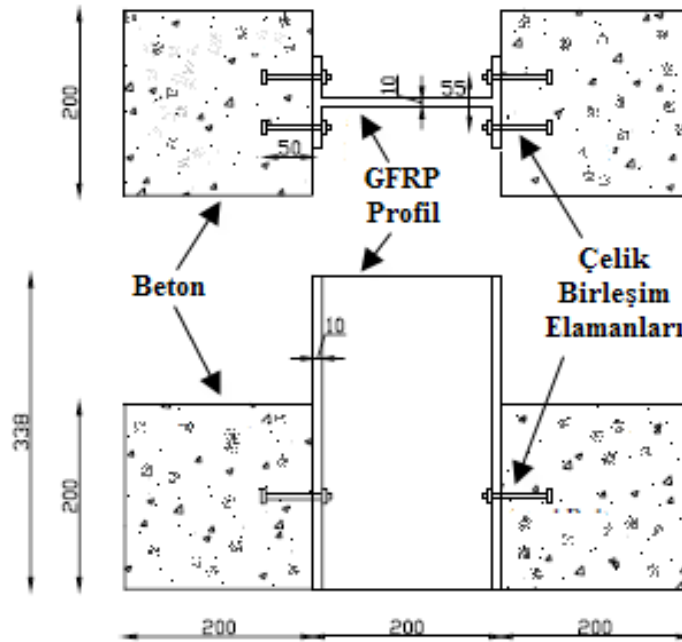
Şekil 2.32. GFRP I profilden oluşturulmuş Hibrit kirişler

Correia ve arkadaşları [85] 2009 yılında yaptıkları çalışmada Beton ve I GFRP profil arasında farklı birleştirme sistemiyle oluşturulan 6 adet Hibrit kirişe (Şekil 2.33) eğilme deneyleri yapmışlardır. Profil ve beton birleştirmeleri için epoksi ya da çelik elemanlar kullanmışlar, farklı açıklık ve yüklemelerde Hibrit kirişlerin eğilme performansını değerlendirip, nümerik analiz çalışmalarını ile desteklemişlerdir. Deneysel programda çeşitli konfigürasyonda oluşturulan hibrit kirişlerde, beton ve GFRP profil ara yüzeyinde oluşan gerilmeleri nümerik analizlerle değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, deneysel ve nümerik araştırma sonuçlarına göre yeni ya da mevcut yapılarda iyileştirme için önerdikleri GFRP-Beton hibrit sistemin yeterli davranışı sergilediğini ve yapılaraya katkı sağlayacağını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.33. Beton ile I kesitli GFRP profilden oluşturulmuş Hibrit kiriş testi [85];

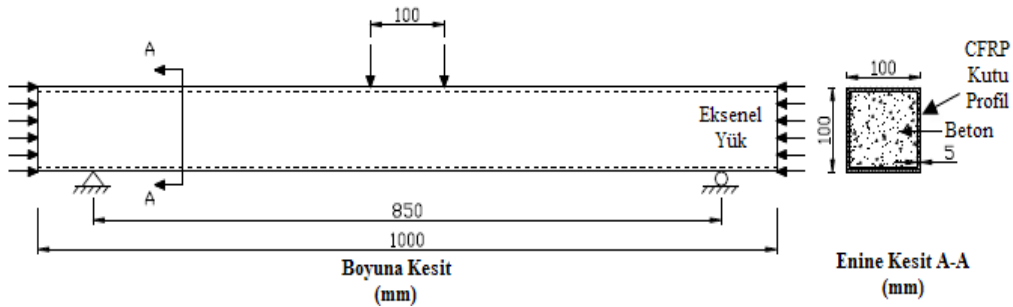
Correia ve arkadaşları [86], 2007 yılında tasarladıkları GFRP ve Beton Hibrit kirişler (Şekil 2.34) üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. GFRP I profiller ile beton arasındaki kesme kuvvetlerine karşı daha etkili birleşmeyi sağlamak amacıyla birleştirme elemanı olarak paslanmaz çelik kullanarak kayma davranışını incelemişlerdir. 4 m ve 1.8 m açıklıklı üretilen GFRP ve Beton Hibrit kirişlere eğilme testleri yapmışlar ve eğilme etkisi altında kirişlerin davranışını incelemişlerdir. Özellikle I kesitli GFRP profiller ile tasarladıkları Hibrit kirişleri karşılaştırarak tasarımın getirdiği yapısal avantajları belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda hibrit kirişlerin makul rijitliği ile birlikte yüksek dayanım ve hafifliği sayesinde onarım, güçlendirme ya da yeni yapılarda kullanılabileceğini önermişlerdir. Yalın haldeki GFRP I profillere göre oluşturulan Hibrit kirişlerde rijitlik ve dayanım artışları gözlemlemişlerdir. Ayrıca kullandıkları analiz metodu ile GFRP Hibrit kirişlerin kopma dayanımı ve sehim davranışında iyi tahminler elde edildiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.34. Joao R. Correia tarafından tasarlanan Hibrit kiriş kesitleri [86];

Bishnu ve Matsumoto [87] karbon fiber takviyeli kompozit kutu profiller üzerinde deneysel çalışmalar yaparak, sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır. CFRP kutu profillerin bir kısmını boş, kalan kısmını ise beton ile doldurup aksenal ve enine yük

uygulayarak eğilme deneyleri yapmışlar ve kirişlerin kesme deformasyonunu incelemişlerdir. Boş profile göre dolu profillerin kesme deformasyonunun yaklaşık %60 oranında arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca beton doldurulmuş profillerde CFRP ile beton ara yüzeyi etkileşiminde mükemmel birleşim tahmini yapmak amacıyla farklı analiz ve birleştirme tasarımları yapmışlardır. Çalışmalarında bir adet boş kiriş ve 4 adet beton doldurulmuş CFRP kirişler üzerinde Şekil 2.35’de görüldüğü gibi dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirmişlerdir. Beton dolu kirişlerin 3 tanesine eğilme yükü ile beraber aksenal yük etki ettirmişlerdir. Çalışmalarında deneylerden elde edilen grafikler ve sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan grafikleri karşılaştırmalı olarak ifade etmişlerdir. Çalışma sonucunda boş kutu CFRP profiller için Euler–Bernoulli kiriş teorisinin uygun olmayacağını, CFRP ve betonun birlikte kullanılmasının hibrit kirişin rijitliğini artırdığını hatta yalın duruma göre yaklaşık iki kata yakın rijitlik artışı olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın Hibrit FRP kiriş ve kolon tasarımlarına katkı sağlayacağını vurgulamışlardır.



Şekil 2.35. Bishnu tarafından tasarlanan CFRP ve Beton Hibrit kiriş [87]

Belirtilen çalışmaların dışında FRP profiller ile Betonun birlikte kullanıldığı Hibrit tasarımlar hakkında ilk çalışmalar 1981 yılında Fardis ve Khalili [88] tarafından başlatılmıştır. Çalışmalarında FRP profil içerisinde rijitlik ve basınç dayanımını artırması için beton kullanarak, pozitif sonuçlar elde etmişlerdir. FRP-Beton Hibrit sistemin eğilme elemanı olarak kullanma düşüncesini ise ilk olarak Hillman ve Murray [89] tarafından ortaya konulmuş, oluşturdukları sistemde kullandıkları FRP profilin kalıp, hafiflik ve dayanım açısından avantajlar sağladığını belirtmişler ve geleneksel levha sistemlere göre %50’den fazla hafiflik elde etmişlerdir. Ayrıca Hall ve Mottram [22] Hibrit zemin döşeme sistemleri üzerine araştırma yapmışlar. Bu

amaçla T kesitli GFRP profil üzerinde beton kullanarak hem kalıcı kalıp oluşturmuşlar hem de malzeme dayanımını artırmışlar. FRP profil içerisine beton doldurularak oluşturulan Hibrit sistemler konusunda yapılan çalışmalarda; Hibrit sistemin tek eksenli yük altındaki davranışı Mirmiran ve arkadaşları 1997 [90, 91], eğilme davranışını yine Mirmiran ve arkadaşları 1999 yılında [92, 93 ve 94] çalışmalar yapmışlardır. Hibrit kirişin kayma davranışını Ahmad ve arkadaşları 2008 [95], malzeme yorulmasını yine Ahmad ve arkadaşları 2008 [96, 97 ve 98], tekrarlı yükler altındaki davranışını Shao ve arkadaşları 2005 [99 ve 100], uzun dönem sünme ve büzülme etkilerini Naguib ve arkadaşları 2002 [101], darbe yükleri altındaki etkilerini Zheng 2007 [102], donma ve çözülme etkilerini ise Fam ve arkadaşları 2008 yıllarında [102] araştırmışlardır [103].

Beton ile FRP profillerin Hibrit olarak birlikte kullanılması ile ilgili çalışmalar hızla artan bir ivme izlemiş ve önümüzdeki süreçte de araştırmacılar tarafından yoğun şekilde ilgi görmeye devam edecektir. Özellikle GFRP ve CFRP profiller içerisine plastik halde yerleştirilen beton ile ilgili literatürde yapılan çalışmaların büyük kısmı daire kesitli boru eleman olarak kolon, temel kazıkları ve zemin güçlendirmeleri gibi tasarımlarda kullanılmaktadır. I kesitli FRP profiller ile betonun Hibrit birleşimi ise genelde köprü kirişlerinde alt çekme bölgesinde FRP kompozit profil, basınç bölgesinde ise betonun kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Dikdörtgen ve kare kesitli kutu kesitli profiller ile betonun birlikte kullanıldığı tasarımlar üzerine yapılan araştırmalar diğer tasarımlara nazaran araştırmacılardan daha az ilgi görmüştür.

Literatürde yapılmış çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada kare kesitli kutu GFRP profil ile betonun birleştirilmesi ile oluşturulan Hibrit yapı elemanlarının basınç ve eğilme davranışı incelenmiş, ilk deneyler sonrasında ortaya çıkan problemler giderilerek iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Üç farklı kesit büyüklüğüne sahip profiller kullanılarak ilgili testler yapılmıştır. Öncelikle içerisi boş haldeki GFRP profiller ile testler gerçekleştirilerek, içerisi beton doldurulmuş Hibrit elemanlar ve yalın haldeki beton numunelerle karşılaştırma yapılarak elde edilen avantajlar tespit edilmiştir. Hibrit tasarımda ortaya çıkan avantajların bir kısmı deneysel olarak tespit edilmiş diğer kısmı ise deneyler sonrası malzemelerin kırılma tiplerine göre belirlenmiştir.

GFRP kutu profillerde üç farklı kesit özelliklerine sahip (45-74-100 mm kesitli) numuneler kullanılmış, numune türleri için beton özellikleri değiştirilerek farklı beton dayanım sınıflarında ve özellikteki betonlarla çalışma yapılmıştır. Farklı miktarlarda fiber oranına sahip profillerin malzeme davranışına etkileri de çalışma kapsamında mevcuttur. Bunun yanı sıra Beton ve GFRP profiller arasındaki aderansı geliştirmek için profil iç yüzeyine kum yapıştırılarak, malzeme mekanik davranışında gelişmeler elde edilmiştir. Farklı kesit özelliklerinin, kompozit profil lif oranlarının, aderansı artırılmış iç yüzeyi kumlu profillerin, beton basınç dayanımı ve özelliklerinin Hibrit yapı malzemesinin basınç ve eğilme davranışına etkileri detaylı şekilde araştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında aynı kesit ve uzunluğa sahip betonarme kirişler üretilerek farklı özellikteki Hibrit kirişlerin eğilme davranışları arasında karşılaştırma deneyleri de çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOT

Hibrit malzemeyi oluşturan GFRP kutu profiller ve betonun kendilerine özgü bir çok üstün özelliklere sahip olmalarının yanında bazı eksik yönleri de bulunmaktadır. Beton ile GFRP kutu profillerin beraber kullanımıyla ortaya çıkacak yeni malzeme, mevcut eksikliklerin ortadan kalkması veya azaltılması bu çalışmanın temel amaçları arasında yer almaktadır. Özel olarak hazırlanan malzemeler ve test yöntemleri uygulanarak oluşturulan Hibrit yapı malzemesinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler tanıtılmış, deney düzenekleri, ekipmanlar ve test yöntemleri açıklanmıştır.

3.1. Deneyslerde Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Beton karışım malzemeleri

Bu çalışma kapsamında üretilen farklı dayanım sınıflarındaki betonlar için kullanılan çimento TS EN 197-1 [104] standardına uygun olarak üretilmiş, Nuh Çimento Sanayi A.Ş. firmasının ürettiği CEM I 42.5 R çimentosudur. Bu çimentoya ait kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Beton numunelerin üretiminde içilebilir nitelikte olan Adapazarı Büyük Şehir Belediyesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Ayrıca beton üretiminde çimento ve su ile birlikte yeterli işlenebilirliği elde etmek amacı ile yüksek dayanımlı betonlarda düşük su çimento oranından dolayı süper akışkanlaştırıcı yeni nesil katkı kullanılmıştır.

Tablo 3.1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri [105]

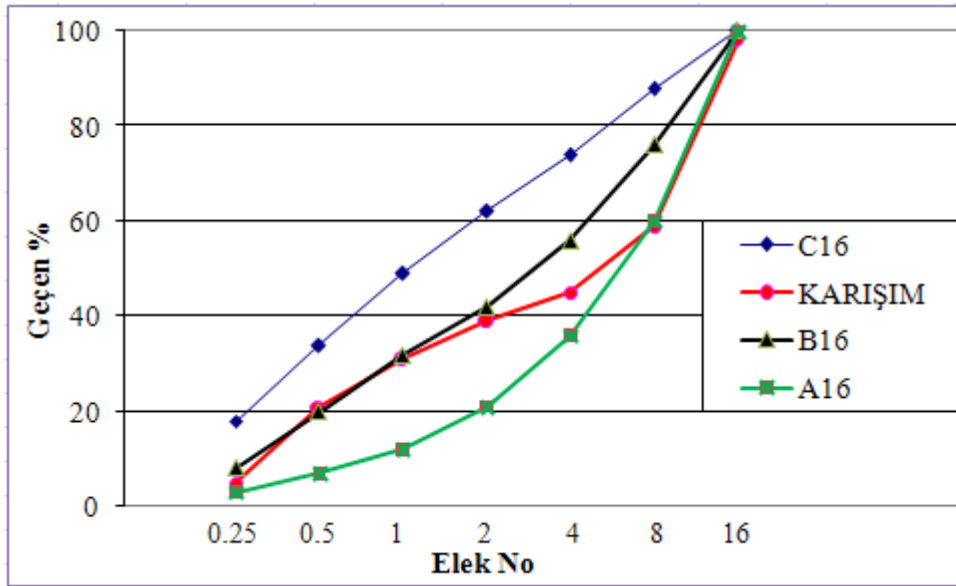
Fiziksel Özellikler			
	Çimento	Standard	Birim
Priz Başlangıcı	170	min. 60	dakika
Priz Sonu	206	-	dakika
Özgül Ağırlık	3.15	-	g/cm ³
Hacim Genleşmesi	1.10	max. 10	cm
Özgül Yüzey (Blaine)	3562	-	cm ² /g
Litre Ağırlığı	1018	-	g/l
2 Günlük Basınç Dayanımı	26.9	min. 20	MPa
28 Günlük Basınç Dayanım	59.5	min./max. 42.5/62.5	MPa
Kimyasal Özellikler			
	Çimento	Standard	Birim
SO₃	2.73	max. 4	%
MgO	1.14	-	%
Kızdırma Kaybı	2.64	max. 5	%
Çözünmeyen Kalıntı	0.57	max. 5	%
Cl⁻	0.01>	max. 0.1	%
Toplam Alkali Na₂O + 0.658 K₂O	0.69	-	%
Serbest Kireç	1.14	-	%

Deneylerde kullanılan betonlarda, GFRP profil kesitlerinin küçük olmasından dolayı, taze betonun kolay yerleştirilebilmesi amacıyla agrega olarak kum (0-4 mm) ve I nolu mıcır (4-12 mm) agregası kullanılmıştır. Belirtilen agregaların karışım oranlarını tespit etmek için standartlara uygun [106] şekilde granülometri deneyleri yapılarak, Tablo 3.2’de verilen değerlere uygun agrega karışımları kullanılmıştır.

Tablo 3.2. Agrega elek analiz değerleri

Elek Boyutları	Kum Geçen yüzde (%)	Mıdır Geçen yüzde (%)	Karışım Oranları	TSE (A-B)
16	100	96.2	98	100
8	100	22.6	59	60-76
4	94	1.5	45	36-56
2	78	4.4	39	30-42
1	54	10.6	31	12-32
0.5	32	11.2	21	8-20
0.25	7	3.2	5	3-8
Tepside kalan	3	0	0	0

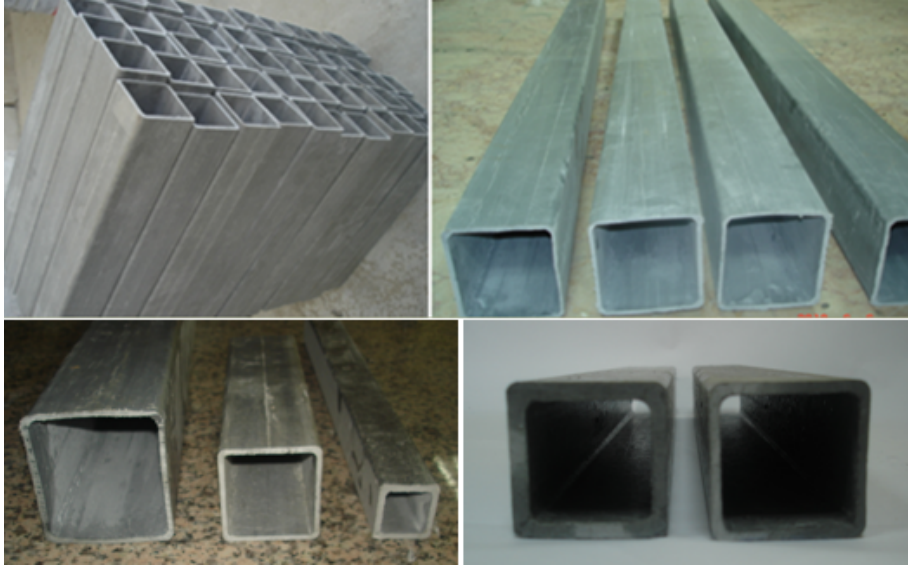
Elek analizi sonucunda maksimum doluluğu elde etmek amacı ile A ve B eğrisi arasında kalan aralığa uygun olarak (Şekil 3.1), %53 oranında I nolu mıcır ve %47 oranında kum kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Beton karışımında kullanılan agrega granülometrisi

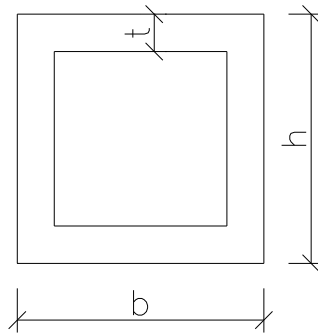
3.1.2. GFRP kutu profiller

Testlerde kullanılan GFRP kutu profiller, ülkemizde faaliyet gösteren Esa Kimya Metal Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'nin ürettiği profillerdir. Polimer matris ve cam lifi takviyesi ile istenilen şekil ve ebatlarda üretilen bu profiller (Şekil 3.2), üstün mekanik özelliklerinin yanında ağırlığına oranla yüksek dayanım, su ve atmosferik etkilere dayanıklılık, mükemmel elektriksel yalıtkanlık, anti mikrobik, burulma ve sıkıştırma gibi zorlanmalarda şekillerini ve boyutlarını koruyabilme gibi özelliklere sahiptirler.



Şekil 3.2. Testlerde kullanılan GFRP profil örnekleri

GFRP profiller ile yapılan çalışmalarda, üç farklı kesit tipi kullanılmıştır. Kullanılan profillere ait boyut ve kesit özellikleri Şekil 3.3 ve Tablo 3.3'te verilmiştir.

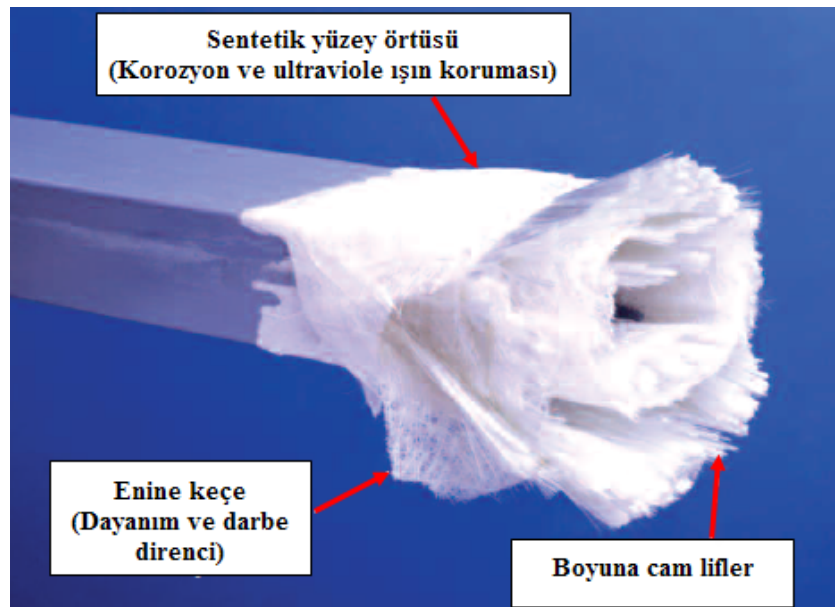


Şekil 3.3. GFRP profil kesiti

Tablo 3.3. Testlerde kullanılan GFRP profil boyutları

Profil Tipi	Et Kalınlığı (t) mm	Kesit (h-b) mm	Boy (l) mm
Kutu Profil	4	45x45	500
Kutu Profil	4	74x74	500
Kutu Profil	4	100x100	1500

İçten dışa doğru çekme dayanımını sağlayan boyuna cam lifler, rijitlik ve darbe dayanımını artıran enine keçe ile dış etkilere karşı, özellikle korozyon direncini artıran örtü içersine enjekte edilen matris malzemesinden meydana gelen GFRP profillerin oluşumu Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. GFRP kutu profil detayı [107]

3.2. Deneysel Çalışmalar

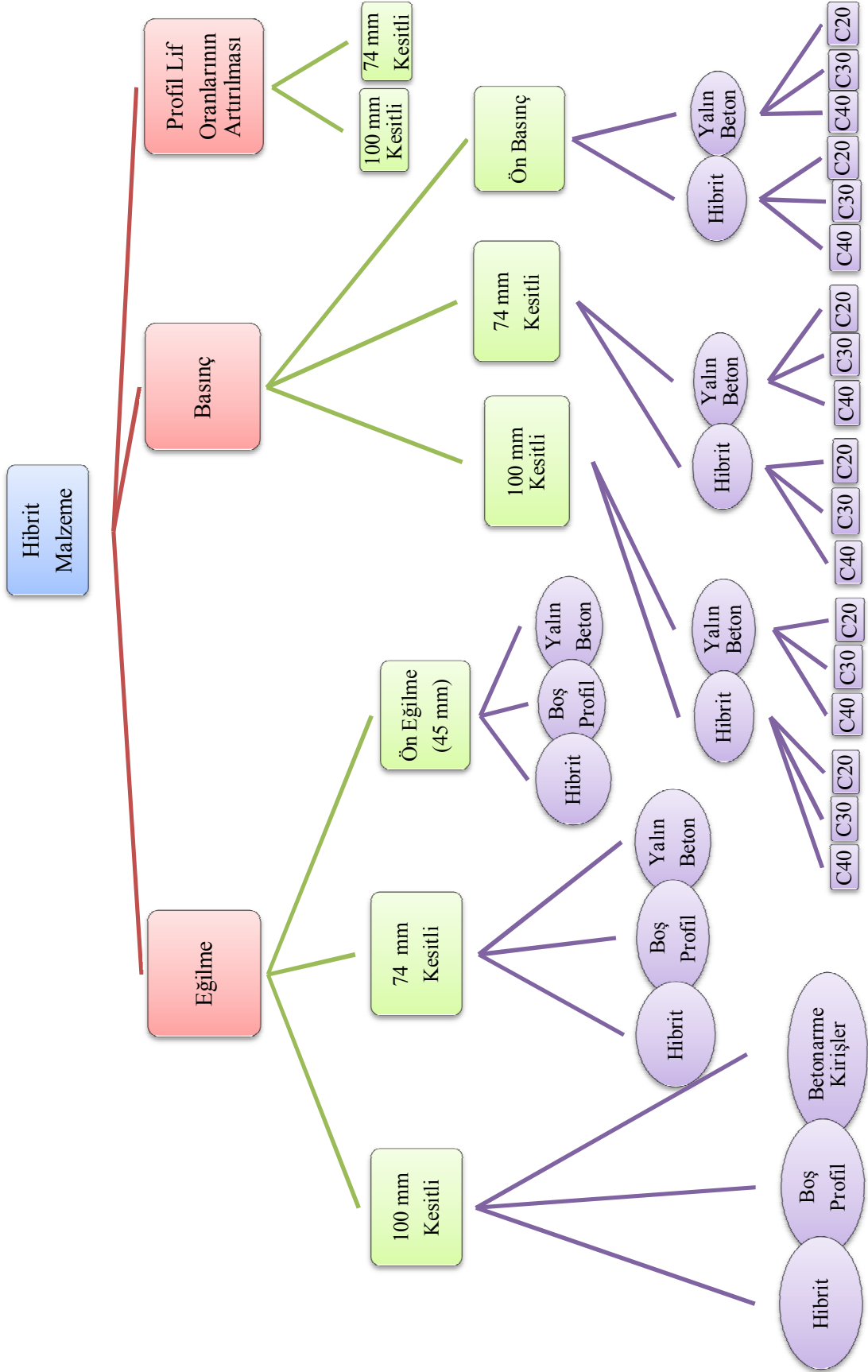
Malzeme özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar; Profil özelliklerinin belirlenip geliştirilmesi, Basınç ve Eğilme testleri olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Çalışma değişkenleri ise numunelerin kesit özellikleri, profil lif oranları, profil iç yüzey özellikleri ve beton basınç dayanımlarıdır. Ayrıca her deney türü için Hibrit numune test sonuçları aynı boyutlara sahip boş GFRP profil ve Beton numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında deneyler ve sonuçlarının anlatımında kullanılan içerisi beton doldurulmuş GFRP profiller için “Hibrit”, aynı kesitlerde üretilmiş sadece betondan üretilmiş numuneler için “Yalın Beton” ve yalnızca GFRP profilden oluşan deney numuneleri için ise “Boş Profil” ifadeleri kullanılmıştır. Şekil 3.5’te deneylerde kullanılan farklı kesitlere sahip Hibrit ve boş GFRP profil örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.5. Test numune kesitleri

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen test gruplarını ve özelliklerinin açıklandığı deney matrisi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler

3.2.1. Profil lif oranlarının artırılması

GFRP profilin mekanik davranışını belirleyen esas unsur, sahip olduğu boyuna ve yanal (keçe) liflerdir. Dolayısıyla profil içerisindeki lif oranının malzeme davranışına etkilerini incelemek amacıyla bilinmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda farklı lif oranına sahip GFRP profiller kullanılmış ve bu profiller içerisindeki fiber oranlarının belirlenmesi amacıyla reçine yakma metodu uygulanarak, tüm kesit içerisindeki lif oranları tespit edilmiştir. Profiller üzerinde yapılan çalışmalarda keçe miktarı artırılarak mekanik davranışına etkilerini tespit etmek amacı ile artırılan lif oranları belirlenmiştir. Böylece çalışma kapsamında 45x45, 74x74 ve 100x100 mm kesitli GFRP kutu profilleri oluşturan cam lifler ve matris malzemesinin ağırlıkça ve hacimce oranları standartlara [108] uygun şekilde belirlenmiştir.

3.2.2. Basınç deneyleri

Basınç deneylerinde C20, C30 ve C40 olmak üzere üç dayanım sınıfında betonlar üretilmiş, plastik halde iken bir kısmı GFRP profil kesit ölçülerinde hazırlanan küp kalıplara, kalan kısmı GFRP profiller içerisine doldurulmuştur. Böylece, sadece betondan oluşturulmuş küp numuneler ile GFRP profil içerisine aynı özellikteki betonun doldurulmasıyla elde edilen Hibrit küp numunelere eksenel basınç testi yapılarak, basınç dayanımları tespit edilmiştir.

Kum ve I nolu mıcır karışım oranları (%53 I nolu mıcır ve %47 kum) belirlendikten sonra C20, C30 ve C40 olmak üzere üç beton basınç dayanım sınıfında beton karışım oranları belirlenmiş [109] ve Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Beton karışım oranları

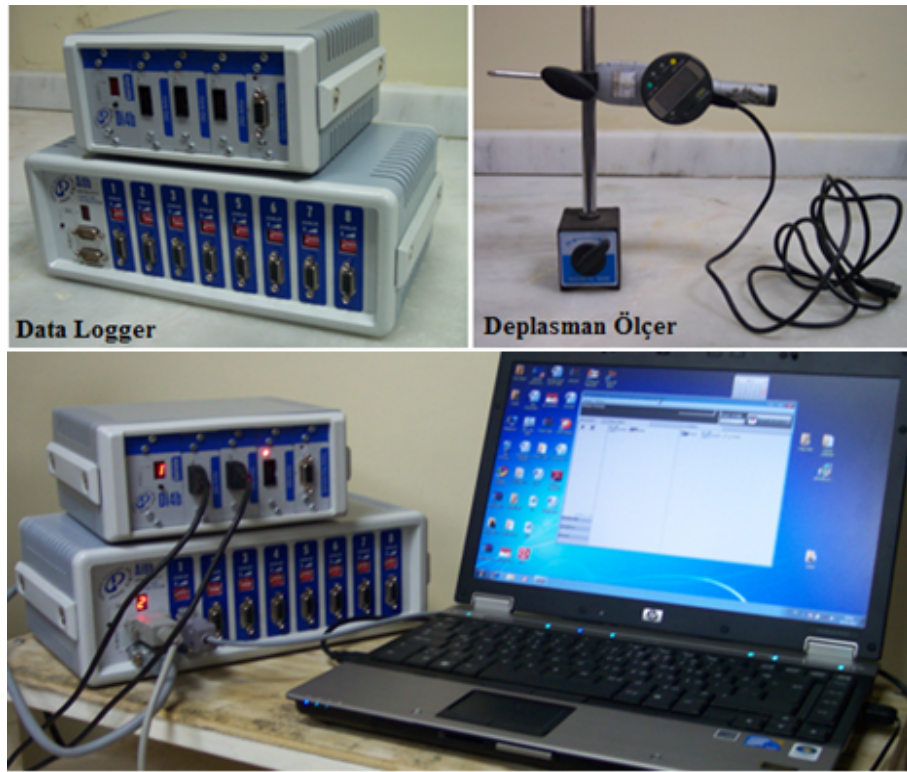
Malzeme (dm ³)	Beton Sınıfları		
	C20/25	C30/37	C40/50
I nolu mıcır	379	381	382
Kum	336	338	339
Çimento	105	111	119
Su	170	158	146
S. Akışkanlaştırıcı	-	2	4
Hava	10	10	10
Toplam	1000	1000	1000

Belirtilen oranlarda malzeme karışımı yapılarak taze beton üretilmiş, bir kısmı kalıplara kalan kısmı ise GFRP kutu profiller içerisine yerleştirilmiştir. Prizi gerçekleşen betonlar 24 saat sonra muhafaza edilmek üzere kür havuzuna yerleştirilmiştir [32 ve 33]. Gerekli kür koşullarında 28 gün boyunca bekletilen Hibrit ve Yalın beton küp numuneler daha sonra kür havuzundan çıkarılarak basınç testleri için normal nem koşullarına ulaşması sağlanmıştır. GFRP profillerin uzunluğu nedeniyle kiriş şeklinde üretilen Hibrit numuneler kür işlemi bitiminde beton kesici makine ile küp boyutlarına gelecek şekilde kesilmiştir (Şekil 3.7).



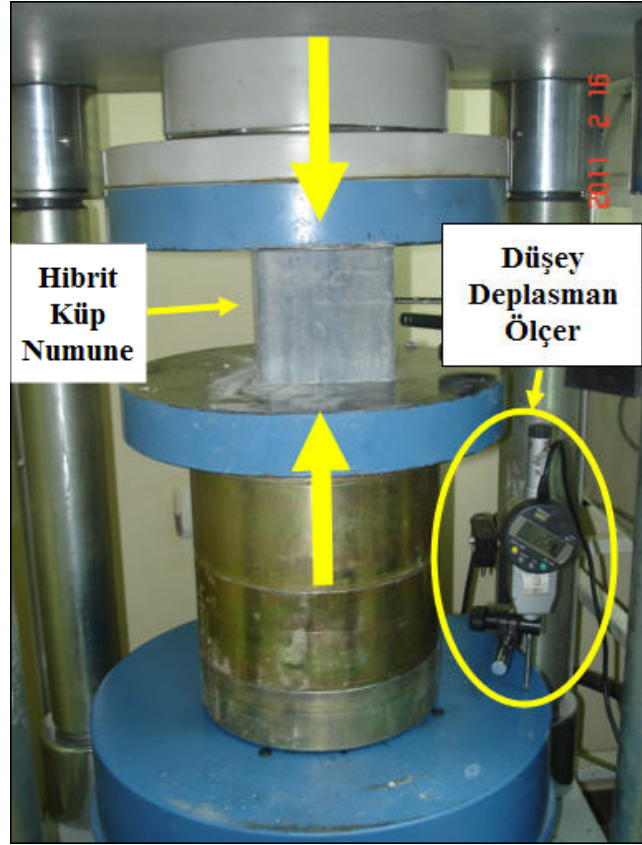
Şekil 3.7. Hibrit ve Yalın beton basınç numuneleri

Basınç numuneleri üretildikten sonra basınç deney düzeneği hazırlanmış, bu amaçla basınç deneylerinde 300 ton kapasiteli, bilgisayar donanımlı basınç presi kullanılmıştır. Ayrıca basınç presi ile birlikte masa üstü bilgisayar, dijital deplasman ölçer ve data logger kullanılarak malzemede meydana gelen deformasyonlar kayıt altına alınmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan veri toplayıcı data logger 4 ve 8 olmak üzere toplam 12 kanala sahip, ± 10 volt aralığında ölçüm yapabilen, saniyede 8 veri kaydedebilen özelliklere sahiptir. Dijital deplasman ölçer ise 0-50 mm aralığında ölçüm yapabilen, 0.01 mm hassasiyete sahip bilgisayara veri aktarabilen özelliktedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Basınç test ekipmanları

Testler esnasında deplasman ölçer basınç presi sütununa tutturularak, hazırlanan numunelere basınç presinde ilgili standartlara [110 - 112] uygun şekil ve sabit hızda aksenal yük uygulanarak basınç testleri yapılmıştır. Şekil 3.9’da basınç deneyleri için kurulan düzenek görülmektedir.

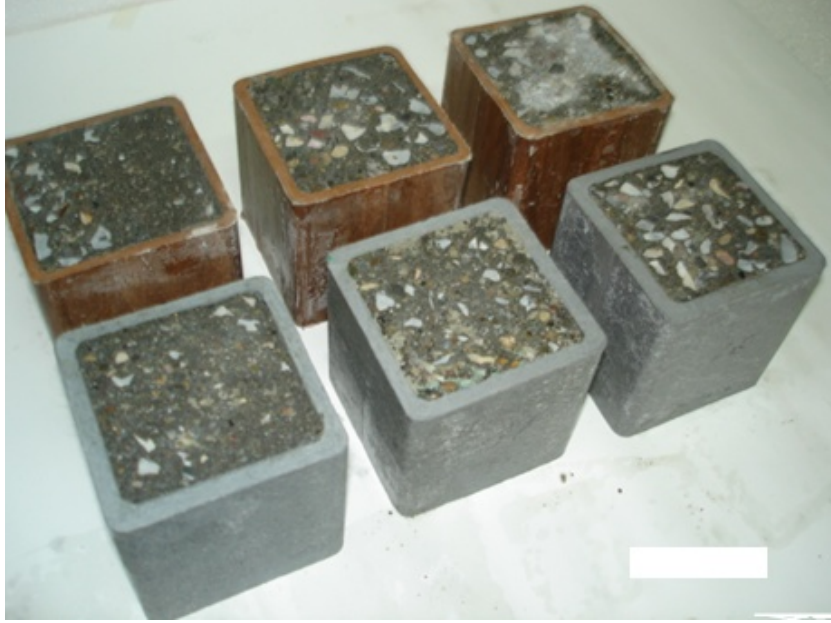


Şekil 3.9. Basınç deney düzeneği

Deneysel yük değerleri basınç presinden, aksel deplasman değerleri ise deplasman ölçerden alınarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney sonrası elde edilen veriler kullanılarak Excel programında Gerilme–Birim deformasyon grafikleri çizilmiş ve Hibrit numune sonuçları ile Yalın beton numune sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca Hibrit ve Yalın beton numunelerin basınç dayanımı ile birlikte Birim Ağırlıkları hesaplanıp, grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

3.2.2.1. Basınç ön deneyleri

Basınç testlerinin ilk kısmında, Hibrit yapı malzemesini oluşturmak için 6 mm et kalınlığına sahip 74x74 mm kesitli GFRP kutu profillerden, üç dayanım sınıfında 3'er adet Yalın beton ve Hibrit küp numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Basınç ön deneylerinde kullanılan Hibrit numuneler

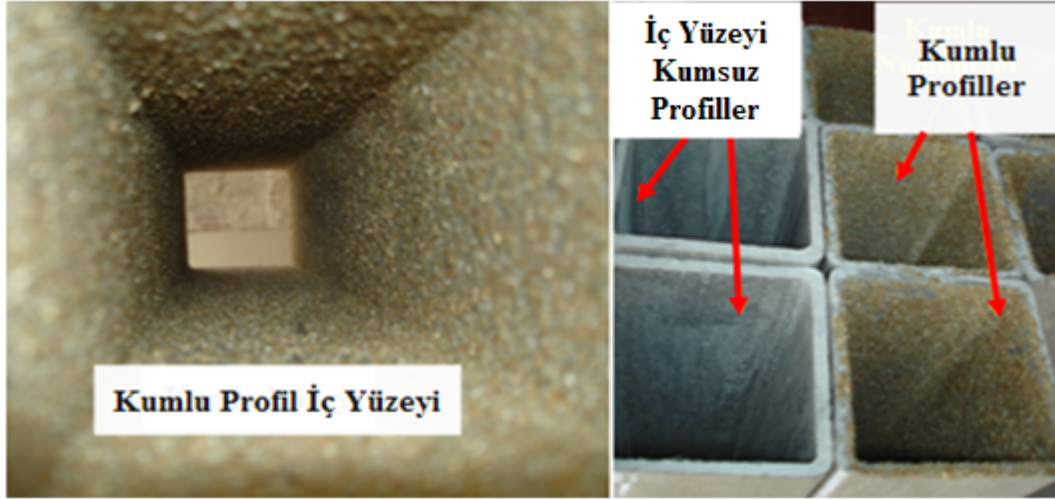
Basınç ön deneyleri neticesinde basınç küp numunelerin köşe noktalarından kırılmaların olduğu ve beton ile GFRP profiller arasındaki aderansın yetersiz olduğu tespit edilmiştir.

3.2.2.2. Numune özelliklerinin geliştirildiği basınç deneyleri

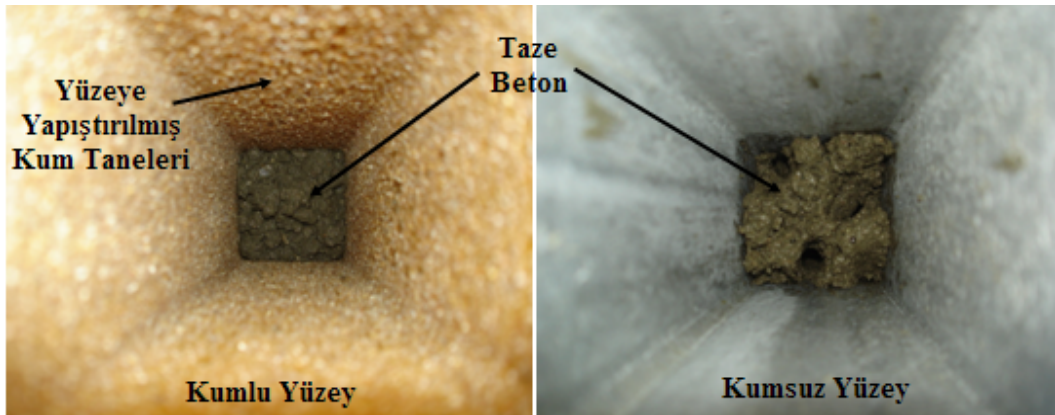
Basınç ön deneyleri neticesinde elde edilen deney sonuçları ve yük altındaki numune davranışı dikkate alınarak, ortaya çıkan problemlere çözüm bulunması amacıyla GFRP profil özelliklerinin ve beton ile etkileşiminin geliştirilmesi düşünülerek yeni numuneler üretilmiştir. Bu amaçla ön deneyler sonrası elde edilen pozitif sonuçlar sonrasında daha detaylı ve sistematik çalışma yapılması planlanmış, ön deney numunelerindeki kırılma tipleri incelenerek iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Belirtilen malzeme kusurlarını azaltmak amacıyla GFRP profillerin mekanik olarak güçlendirilmesi ve betonla aderansının artırılması konuları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda yan lif yani keçe oranının artırılması planlanmış ve keçe miktarı %13-17 arasındaki oranlarda üretici firma tarafından artırılmıştır.

Profil iç yüzeylerine 1 mm tane büyüklüğüne sahip kum taneleri yapıştırılmış GFRP kutu profiller ile kumsuz standart profiller Şekil 3.11’de görülmektedir. Kumlu ve kumsuz profillerin taze beton ile doldurulması işlemi ise Şekil 3.12’te görülmektedir.



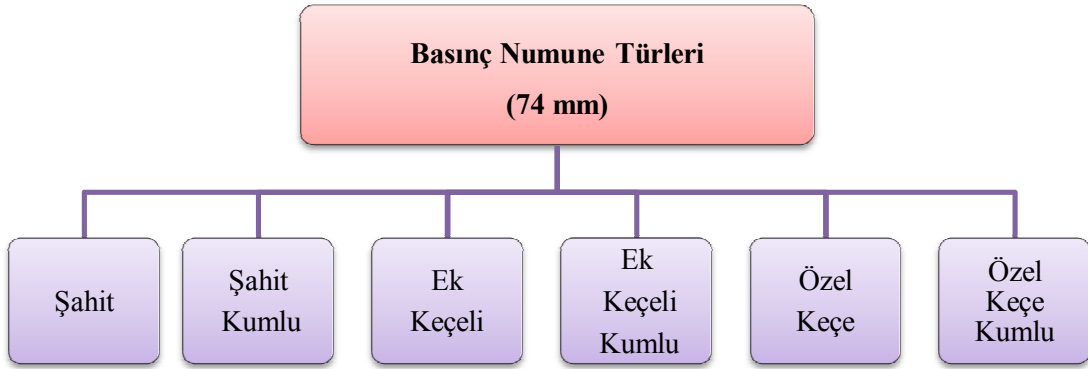
Şekil 3.11. İç yüzeyine kum yapıştırılmış kumlu ve kumsuz GFRP kutu profiller



Şekil 3.12. İçersi betonla doldurulan GFRP profiller

GFRP profil iç yüzeyi ile beton aderansını artırmak amacıyla üretim aşamasında profil iç yüzeylerine epoksi kullanılarak 1 mm tane çapında kum taneleri üretici firma tarafından yapıştırılmıştır. Böylece 74x74 mm kesitli profiller ile yapılacak deneysel çalışmalar için toplam 6 farklı GFRP kutu profil çeşitliliğine ulaşılmıştır (Şekil 3.13).

Mevcut özellik ve koşullarda üretilen GFRP profillere “Şahit”, keçe miktarı %13-17 oranında artırılan profillere “Ek Keçeli”, betonla aderansı artırmak ve daha pürüzlü yüzeyler elde etmek amacıyla iç yüzeyine kum taneleri yapıştırılmış numuneler “Kumlu” olarak ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra standart keçe yerine keçe lifleri dokuma şeklinde imal edilen profiller kullanılarak üretilmiş profiller ise “Özel Keçeli” olarak isimlendirilmiştir.



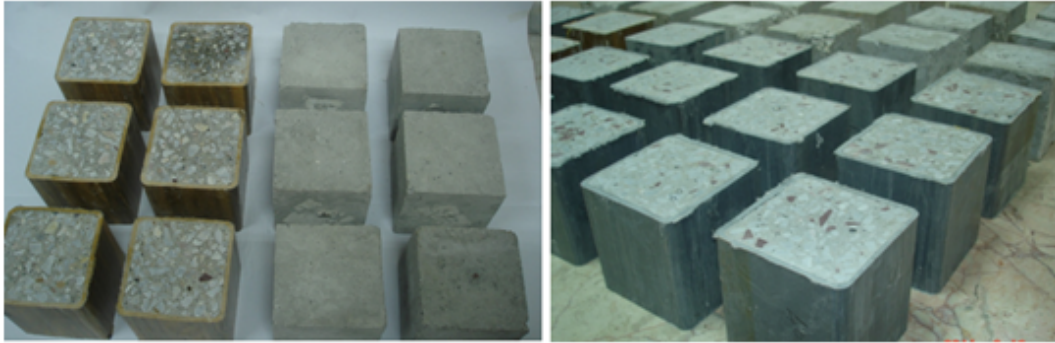
Şekil 3.13. Farklı özelliklerdeki GFRP profil türleri (74 mm)

Her basınç dayanım sınıfı ve her numune türü için 5 adet küp numune hazırlanarak, 74x74 mm kesitli Hibrit ve Yalın beton numuneler basınç testine tabi tutulmuştur. Farklı dayanım sınıflarındaki küp Yalın beton ve Hibrit numuneler Şekil 3.14’te görülmektedir.



Şekil 3.14. Yalın beton ve Hibrit basınç numuneleri (74 mm)

Basınç testlerinde 100x100 mm'lik küp numunelerle yapılan deneylerde diğer deneylerde olduğu gibi farklı dayanım sınıflarında Yalın beton ve Hibrit numuneler kullanılmış (Şekil 3.15), basınç deneylerinde bilgisayar donanımlı özel düzenek kurularak düşey deformasyonlar ölçülmüş ve Gerilme-Birim Deformasyon grafikleri çizilmiştir.

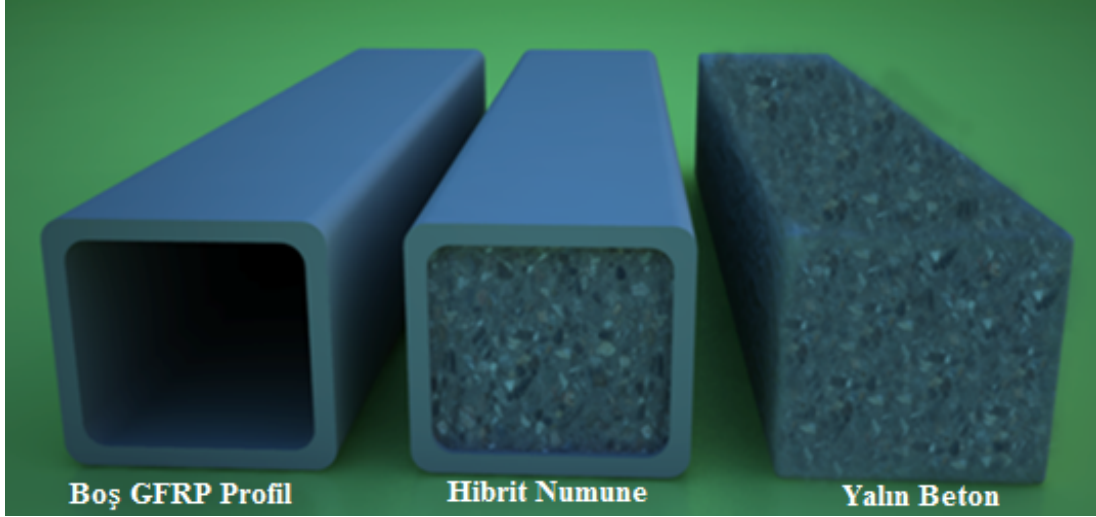


Şekil 3.15. Farklı özellikteki basınç numuneleri (100 mm)

3.2.3. Eğilme deneyleri

Eğilme deneylerinde basınç deneylerine benzer şekilde plastik kıvamdaki betonun bir kısmıyla Yalın beton, kalan kısmıyla ise Hibrit kirişler üretilmiştir. Kiriş şeklinde üretilen Hibrit, Yalın beton ve Boş Profil olmak üzere üç farklı kombinasyonda, farklı kesit büyüklüğünde, farklı lif oranında, içerisi kumlu-kumsuz olmak üzere çeşitli numuneler hazırlanmıştır.

Başlangıçta 45x45 mm kesitli numuneler ile ön deneyler gerçekleştirilmiş, devamında ise 74x74 mm ve 100x100 mm kesitli numuneler ile detaylı ve sistematik eğilme testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16'da GFRP Profil, Hibrit ve Yalın beton kiriş olmak üzere 3 numune türüne ait numuneler görülmektedir.



Şekil 3.16. Eğilme deneyi numune türleri

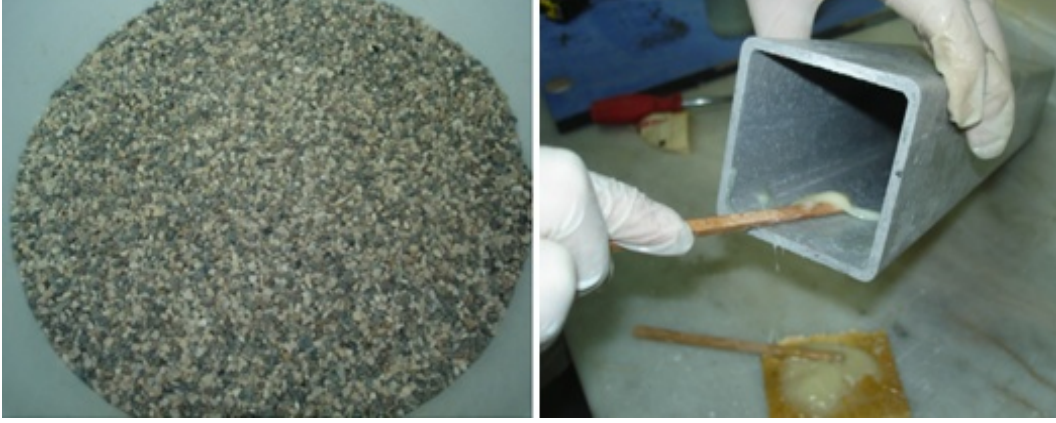
Eğilme testlerinde ön deneylerden kazanılan deneyimler sonucunda keçe oranının ve profil ile beton aderansının artırılması kararlaştırılmıştır. Bu kapsamda keçe miktarı üretici firma tarafından artırılmış ve GFRP profil iç yüzeyleri 1 mm çaplı kum taneleri yapıştırılmıştır.

Bunun yanı sıra eğilme numunelerinde üretici firmanın gerçekleştirdiği iyileştirmelere ek olarak laboratuarda cam lifli keçe sargısı ve epoksi temin edilerek kumlama ve keçe miktarını artırma çalışmaları yapılarak numuneler üretilmiştir. GRRP profil dış yüzeyine keçe yapıştırılması ve profil iç yüzeyinin kumlanması işlemlerinde diğer tüm işlemlerde olduğu gibi iki bileşenli epoksi kullanılmıştır. Sertleştirici ve yapıştırıcı bileşenlerden eşit miktarda katılarak homojen olacak biçimde karışım yapılmış, hazırlanan karışım hem profil iç yüzeyini kumlamada hem de profillere ek keçe sarılmasında uygulanmıştır. Şekil 3.17’de epoksi bileşen malzemeleri setleştirici ve yapıştırıcı ile birlikte bu iki bileşenle yapılan karışım görülmektedir.

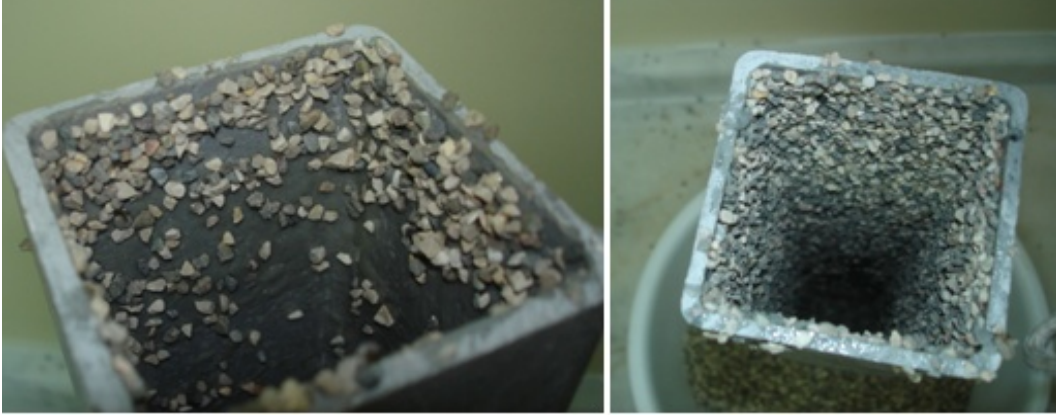


Şekil 3.17. Epoksi bileşenleri ve hazırlanması

Laboratuar çalışmasında Beton ve GFRP kutu profil iç yüzey aderansının artırılması için 1 mm çaplı kum ile yapılan çalışmalara ilave olarak 2 mm tane çapına sahip kum kullanılmıştır (Şekil 3.18 ve Şekil 3.19). Bu uygulamada 2 mm çaplı kum taneleri öncelikle yıkanarak toz ve kil kalıntılarından temizlenmiş, etüvde kurutulmuş ve elek setinde istenilen çaplarda elenerek hazırlanmıştır. Önceden karışımı yapılarak hazırlanan epoksi profil içerisine ince bir tabaka halinde sürülerek yapıştırmaya hazır hale getirilmiş ve GFRP profil içerisinden kum taneleri sarsılarak geçirilmiş böylece iç yüzeye yapışması sağlanmıştır.



Şekil 3.18. Hazırlanan Kum ve profil iç yüzeyine epoksi sürülmesi

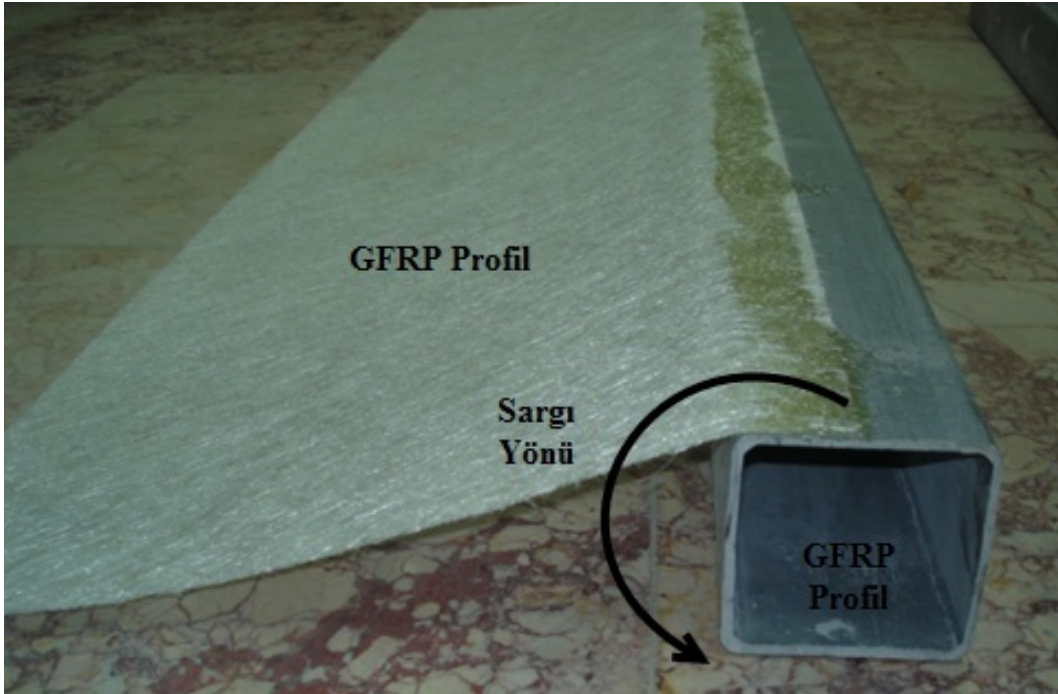


Şekil 3.19. Profil iç yüzeyinin kumlanması

Laboratuarda cam lifli keçenin (Şekil 3.20) profil dış yüzeyine sarılması işleminde hazırlanan epoksi profil boyutlarında kesilen keçeye aynı zamanda profil dış yüzeyine sürülmüştür. GFRP profiller düz satırlı kompozit ahşaplar konularak metal işkenceler ile sıkıştırılıp preslenmiş ve 24 saat kurumaya bırakılarak, bu işlem 4 yüzey içinde tekrar edilmiş, böylece profillerin dış yüzeyine 1 kat yanıl keçe ilave edilmiştir (Şekil 3.21).

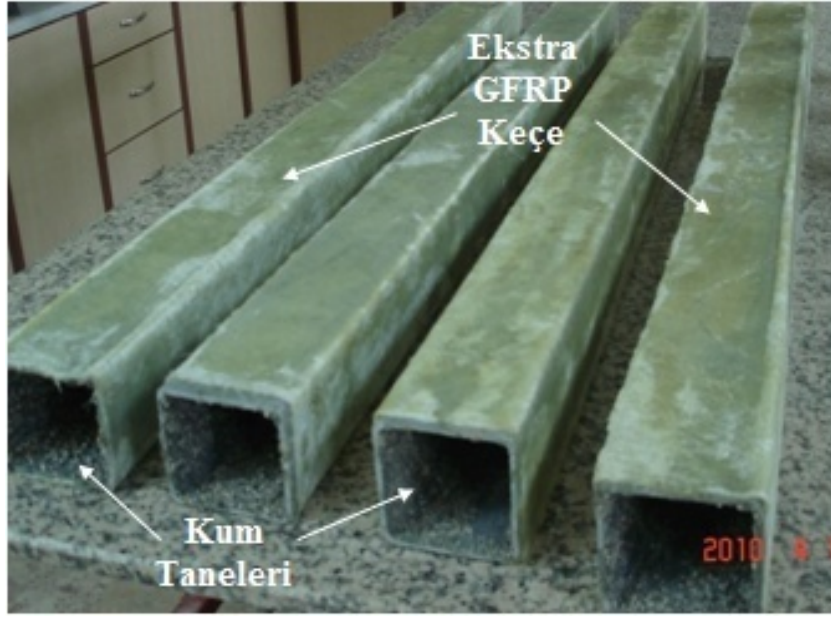


Şekil 3.20. Cam lifli keçe sargısı



Şekil 3.21. GFRP profillerde ekstra keçe sarılması

Çalışmalarda kullanılan GFRP profillerin bir grubunun sadece keçe sargısı artırılmış, bir grubunun içerisi kumlanmış, bir grubunun ise hem keçe sargısı artırılmış hem de içerisi kumlanmıştır. Şekil 3.22’de cam lifli ek keçe sarılmış ve iç yüzeyine kumlanmış GFRP profiller görülmektedir.



Şekil 3.22. Ek keçeli ve kumlu profiller

Hibrit eğilme numunelerinin hazırlanmasında; profil uzunluğunun 1/3'lük kısımlarında şişlenerek yerleştirilen taze beton doldurulduktan sonra düzleştirilmiş ve prizini alıncaya kadar normal hava koşullarında bekletilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. GFRP profillerin taze beton ile doldurulması

Taze betonun profil içerisine yerleştirilmesi esnasında yapılan çalışmalarda ortaya çıkan problemler ve kazanılan deneyimler neticesinde, deneylerde kullanılan

profillerin uzunluğu arttıkça profil içerisine taze betonun yerleştirilmesinde zorlukların ortaya çıkmıştır.

Bu nedenle kendi ağırlığı ile döküldüğü kalıba yerleşebilen ve vibratör kullanılmasına gerek duyulmaksızın en sık donatılı bölgelerde, en dar kesitlerde bile hava boşluğunu dışarı atarak sıkışan, ayrışma ve terleme gibi problemler oluşturmayan, kohezyonunu koruyan, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türü olan [114] Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu amaçla uygun karışım oranları belirlenerek KYB üretilmiş ve profiller içerisine betonun kendi ağırlığı ile birlikte sıkıştırma yapmadan yerleştirilmiştir. Su çimento oranı 0,45 olacak şekilde karışımı yapılan KYB'nin 1 m³'ü için kullanılan karışım oranları Tablo 3.5'te görülmektedir.

Tablo 3.5. Kendiliğinden Yerleşen Betonda kullanılan malzeme miktarları [114].

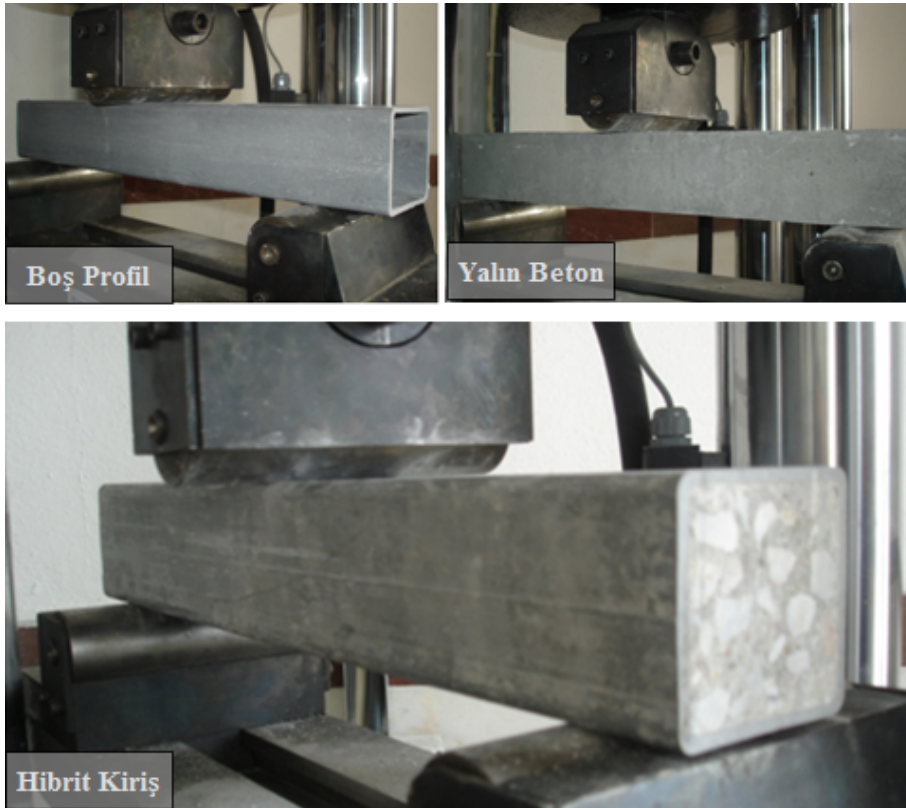
Kullanılan Malzemeler	Karışım Miktarları (kg/m³)
I nolu micir	1067
Kum	947
Çimento	350
Su	160
Uçucu Kül	30
Süper Akışkanlaştırıcı	5.25

KYB üretildikten sonra gerekli akıcılığın elde edildiğinin belirlenmesi amacıyla slump testi yapılmış, bu amaçla beton şişleme yapılmaksızın slump hunisine doldurulduktan sonra, huni yukarıya çekilerek betonun kendiliğinden yayılması sağlanmıştır. Ölçümler neticesinde birbirine dik iki noktadan alınan ölçüm değerinin ortalaması 650 mm olduğu ve dolayısıyla betonun gerekli davranışı sağladığı belirlenmiştir. Şekil 3.24'de KYB ile yapılan slump çökme deneyi ile GFRP profil içerisine doldurulmuş hali görülmektedir.



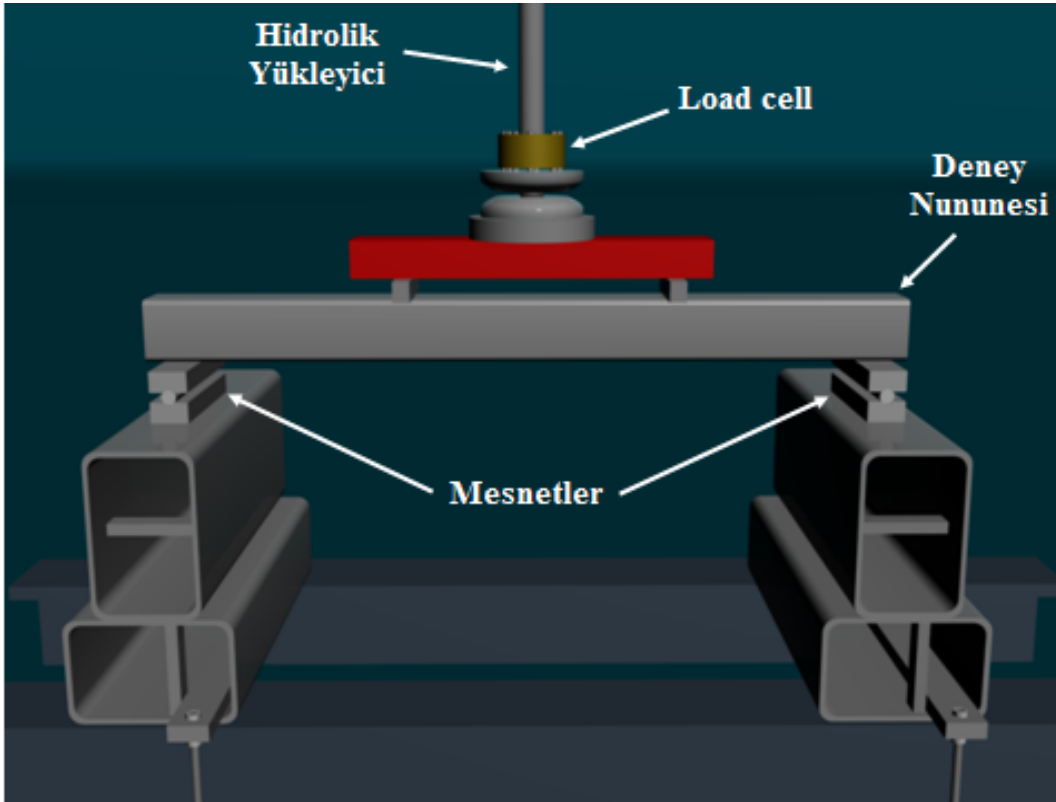
Şekil 3.24. Kendiliğinden Yerleşen Beton uygulaması

Eğilme numuneleri hazırlandıktan sonra ön deney numuneleri olan 45 mm ve 74 mm kesitli 500 mm uzunluğundaki kiriş deneylerinde 3 noktalı ve bilgisayar donanımlı eğilme düzeneği kullanılmıştır. Şekil 3.25'te boş profil, Yalın beton ve Hibrit kirişlerin eğilme testi görülmektedir.

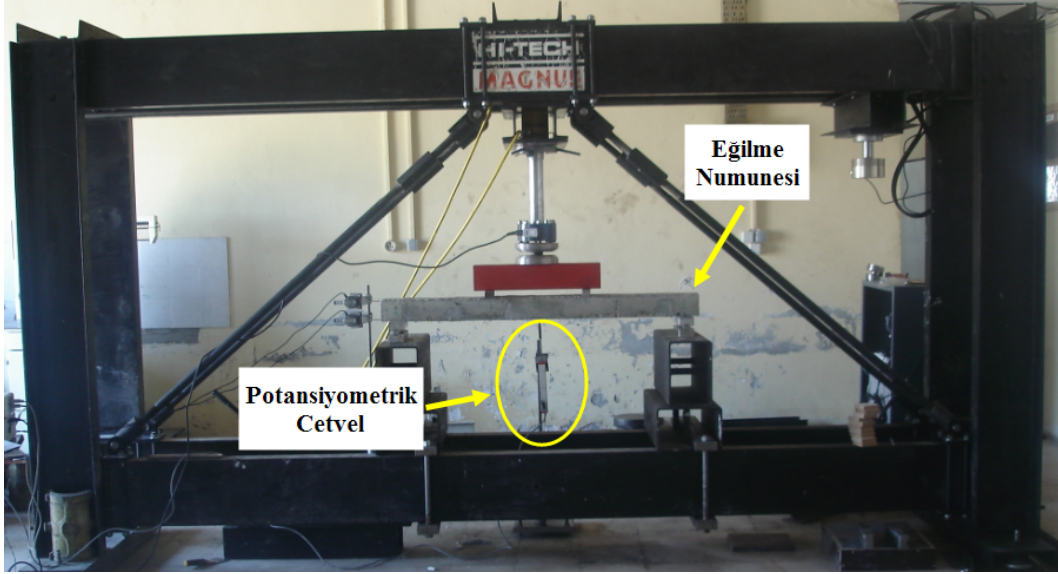


Şekil 3.25. Kirişlerin üç noktalı eğilme deney düzeneği

Uzunluđu 1500 mm olan Hibrit kiriř testlerinde özel eđilme test dűzeneđi kurulmuřtur (řekil 3.26). Bu dűzenekte 20 ton kapasiteli eđilme erevesi (řekil 3.27) kullanılarak gerekli testler yapılmıřtır. Hibrit kiriř deneyleri için tasarlanan eđilme dűzeneđinde 20 ton kapasiteli Load cell, 150 mm'ye kadar lűm yapabilen 0.01 mm hassasiyetli Potansiyometrik cetvel, yine 20 tona kadar yűkleme yapabilen hidrolik yűkleyici, özel űretilen mesnetler ile 12 kanallı data logger ve masa űstű bilgisayar kullanılmıřtır.



řekil 3.26. Eđilme deney dűzeneđi



Şekil 3.27. Eğilme çerçevesi

Eğilme deneyleri sonunda yük-sehim grafikleri oluşturulduktan sonra numunelere ait maksimum yükteki gerilme değerleri hesaplanarak, eğilme dayanımları Formül 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{P.L}{4}}{\frac{I}{y}} \quad (3.9)$$

σ : Eğilme Dayanımı (N/mm²)

M : Moment (Nmm)

W : Mukavemet Momenti (mm³)

P : Max. Yük (N)

L : Mesnet Açıklığı (mm)

I : Atalet Momenti (mm⁴)

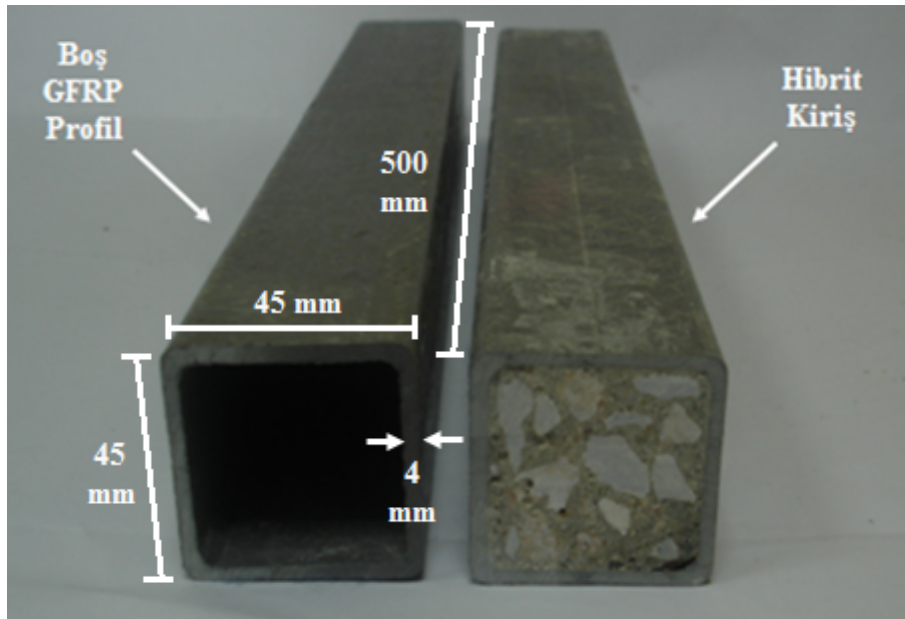
y : Tarafsız eksen uzaklığı (mm)

Tüm gruplarda yapılan eğilme deneyleri sonuçları analiz edilerek, numunelere ait eğilme dayanımları hesaplanmış ve yük-sehim grafikleri çizilmiştir. Ayrıca bir malzemenin plastik deformasyonu esnasında absorbe ettiği enerji olarak tanımlanan

ve yük-sehim grafiğinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilen kırılma tokluğu değerleri, tüm eğilme deneyleri için hesaplanarak benzer gruptaki numune sonuçları karşılaştırılmıştır.

3.2.3.1. Eğilme ön deneyleri

Eğilme ön deneylerinde 4 mm et kalınlığına sahip 45x45 mm kesitli kutu profiller kullanılarak, 3 dayanım sınıfında 3'er adet Hibrit ve Yalın beton numune ile Boş GFRP profiller kullanılmıştır. Numunelerin uzunluğu 500 mm ve mesnet açıklığı 400 mm olarak hazırlanmış, bilgisayar donanımlı deney düzeneğinde yük ve sehim değerleri elde edilerek karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3.28'de eğilme ön deneylerinde kullanılan numuneler görülmektedir.

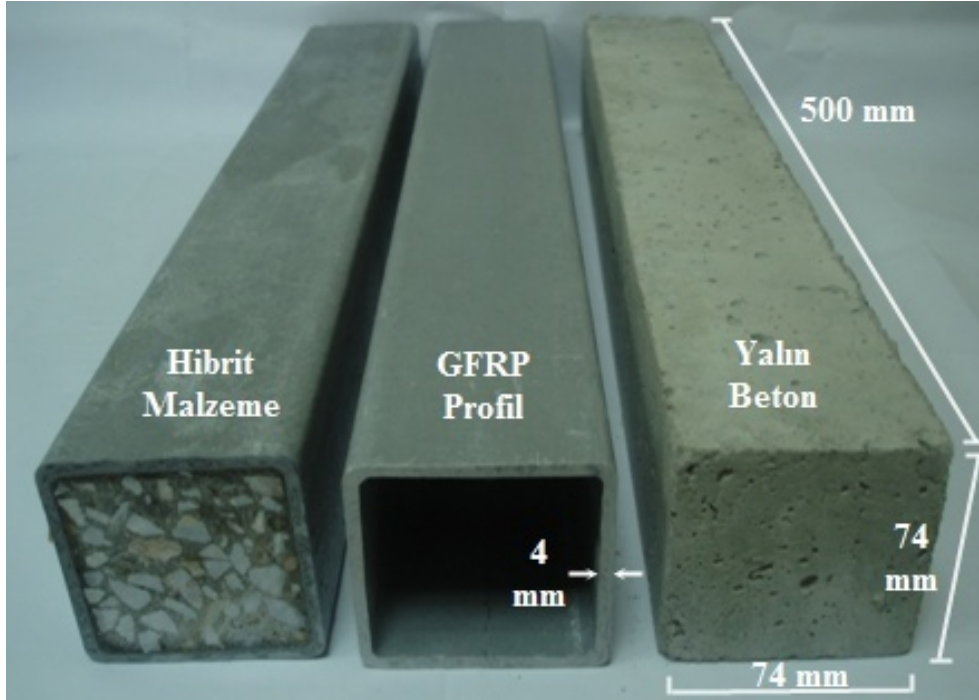


Şekil 3.28. Eğilme ön deney numuneleri

3.2.3.2. 74 mm kesitli numunelerin eğilme deneyleri

Ön deneyler neticesinde, beton basınç dayanımının malzemenin eğilme davranışında çok etkili olmadığına, dolayısıyla eğilme deneylerinde tek basınç dayanım sınıfında numunelerin üretilmesine karar verilmiştir. Ayrıca ön deneyler sonucunda GFRP profillerin keçe lif oranını artırarak mekanik olarak güçlendirilmesi ve beton ile

aderansı artırma çalışmaları yapılmıştır. Basınç numunelerinde belirtilen (Şekil 3.13) numune türlerinin yanı sıra ek sargılı profiller kullanılarak eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.29’da 500 mm boyutlu Hibrit, Boş GFRP profil ve Yalın beton kiriş numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.29. Eğilme numune tür ve boyutları

Boyutları 74x74x500 mm ebatlarında ve et kalınlığı 4 mm olan numunelere 400 mm mesnet açıklığında 3 noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Böylece yapılan deneyler sonrasında 74 mm kesitli numunelerin yük-sehim grafikleri çizilmiş, eğilme dayanımları ve kırılma tokluk değerleri hesaplanarak karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.

3.2.3.3. 100 mm kesitli numunelerin eğilme deneyleri

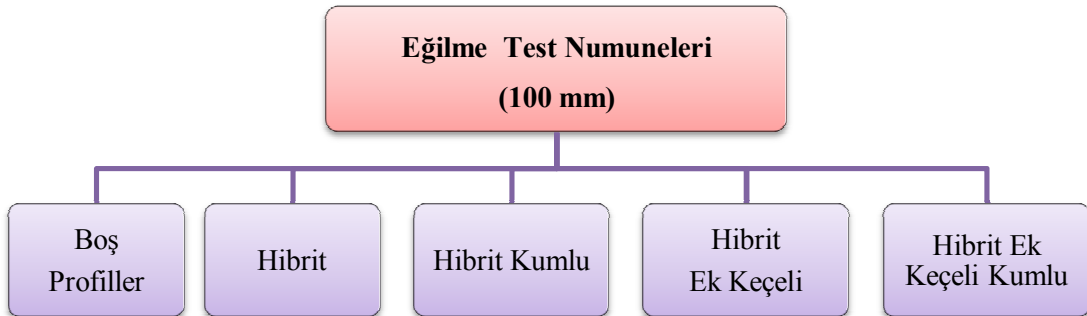
Bu deney grubunda 1500 mm uzunluğunda, 4 mm et kalınlığında ve 100 mm kesitli kutu profiller kullanılarak üretilen numuneler üzerinde eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca standart 100x100 mm’lik kutu profillere ilave olarak

laboratuarda bu profillerin içi kumlanmış ve keçe miktarı artırılmış profiller de bu test grubunda kullanılmıştır (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. Hibrit kirişler

Belirtilen şekillerde 100 mm kesitli ve 1500 mm uzunluğunda üretilen kiriş numunelerden Şekil 3.31’de belirtilen kombinasyonlarda numune tipleri elde edilmiş ve eğilme davranışını daha iyi tespit etmek amacıyla dört noktalı eğilme testleri yapılmıştır.



Şekil 3.31. Eğilme numune türleri (100 mm)

BÖLÜM 4. GFRP ÖZELİKLERİNİN BELİRLENMESİ

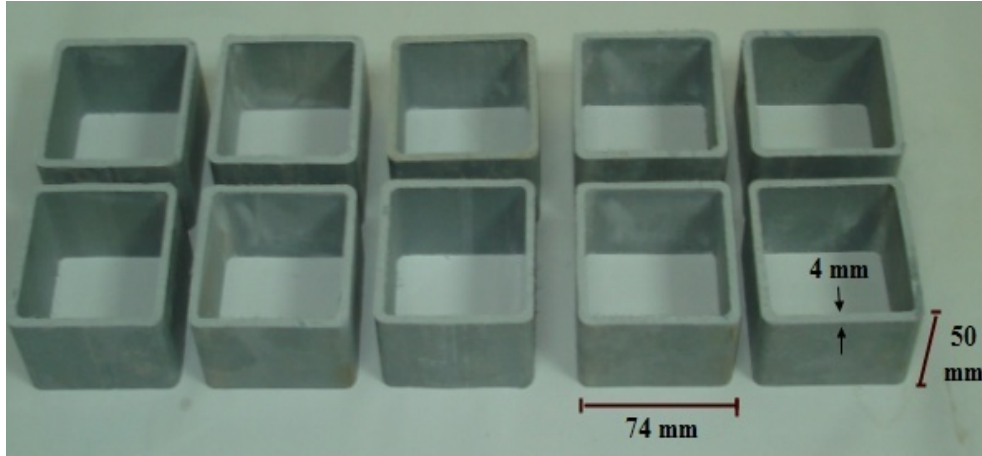
Hibrit yapı elemanlarının bileşenleri olan Beton ve GFRP'nin fiziksel ve mekanik özelliklerinin teorik hesaplamalarda kullanılmak üzere bilinmesi gerekmektedir. Uzun bir geçmişe sahip ve kullanıcılar tarafından özellikleri çok iyi bilinen betonun tersine GFRP malzemeler yeterince tanınmamakta ve inşaat endüstrisi tarafından iyi bilinmemektedir. Dolayısıyla çalışmanın bu bölümünde GFRP profillerin fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmiş ve teorik hesaplamalarla uyumu incelenmiştir. GFRP kompozit profil özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda, deneysel olarak belirlenen Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık, Çekme özellikleri ve Poisson Oranı değerleri aynı zamanda nümerik analizler ile hesaplanarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca GFRP profil özelliklerin bilinmesi ile Hibrit yapı elemanlarının teorik hesaplamalarında kullanılan fiziksel ve mekanik veriler de elde edilmiş olacaktır.

4.1. Deneysel Çalışmalar

4.1.1. Birim ağırlık

GFRP malzemenin Birim Ağırlığını deneysel olarak belirlemek amacıyla Şekil 4.1'de verilen profilin tüm kesit özelliklerini yansıtan, 4 mm et kalınlıklı, 74x74 mm kesitli ve 50 mm uzunluğundaki deney numuneleri kesilmiştir.

Hazırlanan 10 adet deney numunelerinin, önce dijital kumpasla boyutları ölçülerek hacmi, sonrasında ise hassas terazide tartılarak ağırlığı bulunmuştur. Hacim ve ağırlıkları bulunan her deney numunesi için Formül 4.1. kullanılarak Birim Ağırlık hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 4.1. GFRP kutu profillerden kesilmiş Birim Ağırlık numuneleri

$$\Delta = \frac{M}{V} \quad (4.1)$$

Δ : Birim Ağırlık (g/cm^3)

M : Ağırlık (gr)

V : Hacim (cm^3)

Böylece her bir numunenin Birim Ağırlık değerleri bulunarak Tablo 4.1’de belirtilmiş ve ortalama Birim Ağırlık değeri hesaplanmıştır.

Tablo 4.1. Birim Ağırlık deneyi sonuçları

Deney No	Ağırlık (gr)	Hacim (cm^3)	Birim Ağırlık (gr/cm^3)
1	101.5	57.6	1.762
2	100.0	56.8	1.761
3	101.0	56.9	1.775
4	99.0	56.7	1.746
5	100.5	57.8	1.739
6	99.0	57.6	1.719
7	99.5	58.2	1.710
8	99.5	57.7	1.724
9	100.0	58.4	1.712
10	99.5	57.3	1.736
Ortalama	99.95	57.5	1.738

Yapılan testler sonucunda GFRP malzemelerin Birim Ağırlık değerleri incelendiğinde Birim Ağırlık değeri 1.738 g/cm^3 olarak bulunmuştur.

4.1.2. Özgül ağırlık

Hibrit malzeme tasarımda kullanılacak GFRP profillerin Özgül Ağırlık değerini belirlemek amacı ile kullanılan, verileri otomatik kaydetme ve hesaplama yapabilen Arşimet terazisi yardımıyla Özgül Ağırlıkları belirlenmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Özgül Ağırlık deneyinde kullanılan Arşimet terazisi

Özgül ağırlık deneyinde Arşimet prensibinden faydalanılarak, öncelikle deney numunelerini taşıyacak kap havada ve suda tartılıp değerler kaydedilmiş, sonrasında kap içerisine yerleştirilen numuneler kapla birlikte havada ve su içerisinde tartılıp elde edilen veriler kaydedilmiştir.

Arşimet terazisinde havada ve su içerisinde tartma işlemi sonrasında elde edilen değerler Formül 4.2. kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmış ve her numuneye ait Özgül Ağırlık değerleri hesaplanmıştır.

$$\delta = \frac{Wh}{Wh - W_s} \quad (4.2)$$

Burada ;

δ : Özgül Ağırlık

Wh : Malzemenin havadaki ağırlığı (gr)

W_s : Malzemenin su içindeki ağırlığı (gr)

Hazırlanan toplam 10 adet GFRP numunelerin havadaki ve su içersindeki ağırlığı ile tüm numuneler için Özgül Ağırlık deneyi sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Özgül Ağırlık deneyi sonuçları

Deney No	Havadaki Ağırlık (gr)	Su İçindeki Ağırlık (gr)	Özgül Ağırlık
1	101.5	45.00	1.796
2	100.5	45.35	1.822
3	101.5	45.20	1.803
4	99.5	44.90	1.822
5	100.5	45.45	1.826
6	99.5	45.25	1.834
7	99.5	45.40	1.839
8	99.5	45.30	1.836
9	101.0	45.25	1.812
10	100.0	45.40	1.832
Ortalama	100.3	45.25	1.822

Yapılan testler sonucunda GFRP malzemesinin Özgül Ağırlık değeri 1.822 olarak bulunmuştur.

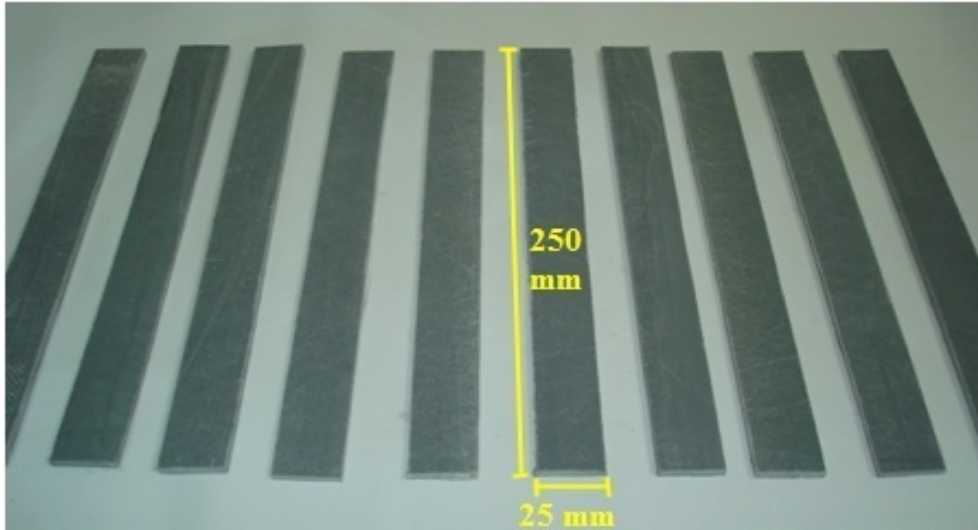
4.1.3. Malzeme çekme özelliklerinin belirlenmesi

GFRP malzemenin çekme özelliklerini ve Elastisite Modülünü belirlemek amacı ile çekme deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla GFRP profiller ilgili standartlar [111, 112, ve 113] ve deney şartlarına uygun şekilde numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere hidrolik yükleyiciye sahip çekme makinesinde sabit hızlarda çekme

kuvveti uygulanmıştır. Gerekli veriler kaydedilerek GFRP malzemesinin çekme davranışı, Elastisite Modülü, Çekme ve Kopma dayanımları hesaplanmıştır.

Lifli yapıya sahip olan GFRP malzeme ortotropik yapıya sahip olduğu için farklı yönlerdeki kuvvetlere karşı farklı dayanımlar göstermektedir. GFRP profillerin çekme özelliklerini belirlemek için hem lif doğrultusuna paralel hem de lif doğrultusuna dik çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

GFRP profillerinden lif doğrultusuna paralel çekme deneyi için standartlara uygun şekilde 25x250x4 mm boyutlarında deney parçaları kesilerek çekme numuneleri hazırlanmıştır. Profillerin kesme işlemi sırasında liflerin kesilen çekme numunelerine paralel olmasına özen gösterilerek hazırlanan numuneler Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



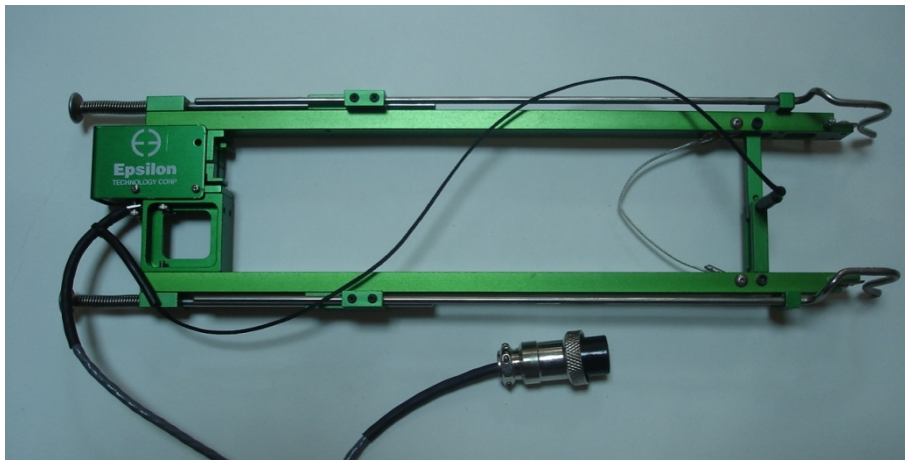
Şekil 4.3. Lif doğrultusundaki çekme test numuneleri

Çekme deneylerinde 40 ton çekme kapasitesine sahip, hidrolik yüklemeli ve bilgisayar donanımlı çekme makinesi kullanılmıştır. Hem manüel hem de otomatik yükleme yapabilme, deney grafiklerini çizibilme ve deney sonuçlarını rapor şeklinde sunabilme düzeneğine sahiptir. Çekme testlerinin gerçekleştirildiği çekme makinesi ve bilgisayar donanımı Şekil 4.4'te görülmektedir.



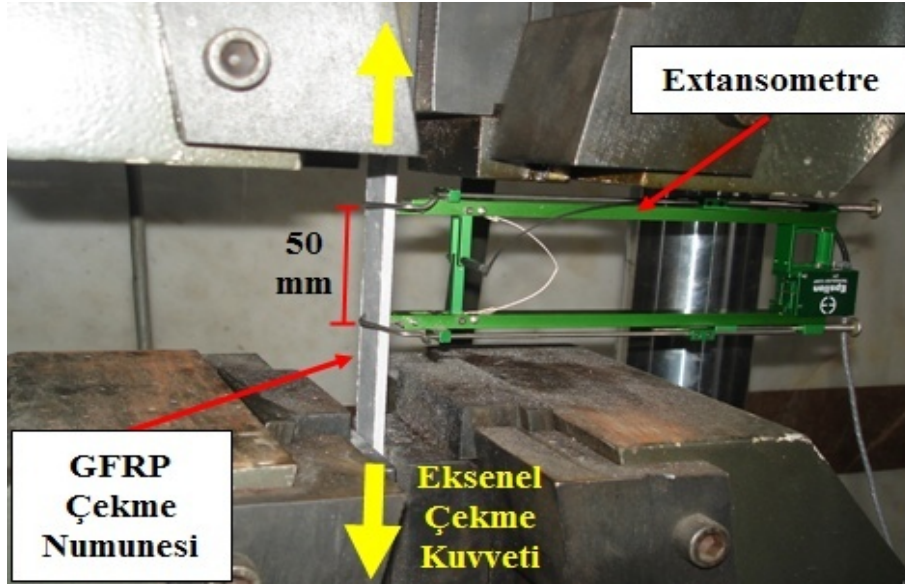
Şekil 4.4. Çekme makinesi ve donanımı

Ayrıca çekme deneyleri esnasında, deney numunelerindeki boy değişimini hassas olarak ölçebilmek için Extansometre (Şekil 4.5) kullanılmıştır. Çekme deney parçaları üzerine monte edilebilen, 0.01 mm hassasiyetle ölçüm yapabilme, her uzama ya da kısalmayı bilgisayar ortamına iletebilme özelliğine sahip Extansometre 50 mm'lik uzunluktaki boy değişimini ölçebilmektedir.



Şekil 4.5. Extansometre cihazı

Hazırlanan numuneler çekme makinesi çenelerine tam dik olmalarına dikkat edilerek yerleştirilmiş ve bilgisayara bağlanan Extansometre deney numunesinin 50 mm'lik orta bölgesine takılmıştır. Çekme makinesinin yükleme hızı maksimum 2 mm/dakika olacak şekilde çekme testleri yapılmıştır. Makine çenelerine tutturulmuş çekme numuneleri ve Extansometre düzeneği Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Çekme testleri deney düzeneği

Lif doğrultusuna paralel çekme deneyi için toplam 10 adet (25x250x4 mm boyutlu) ve lif doğrultusuna dik çekme deney numune boyutlarındaki yetersizlik nedeniyle toplam 5 adet (4x90 mm boyutlu) numune hazırlanmış ve her numuneye çekme kuvveti uygulanarak elde edilen veriler bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Çekme deneyinden elde edilen sonuçları değerlendirmek için her deneyde kayıtlar text formatında kayıt edilmiş ve daha sonra bu kayıtlar Excel formatında işlenerek sonuçlar bulunmuştur.

Deneyler sonrasında verilerin işlenmesi sonucunda Formül 4.3-4.4-4.5 kullanılarak Elastisite Modülleri, Çekme gerilmeleri ve Birim deformasyonları hesaplanmıştır.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.5)$$

Burada;

E = Elastisite Modülü (N/mm²)

σ = Gerilme (N/mm²)

ε = Şekil Değişirme Oranı

P = Maksimum Çekme Kuvveti (N)

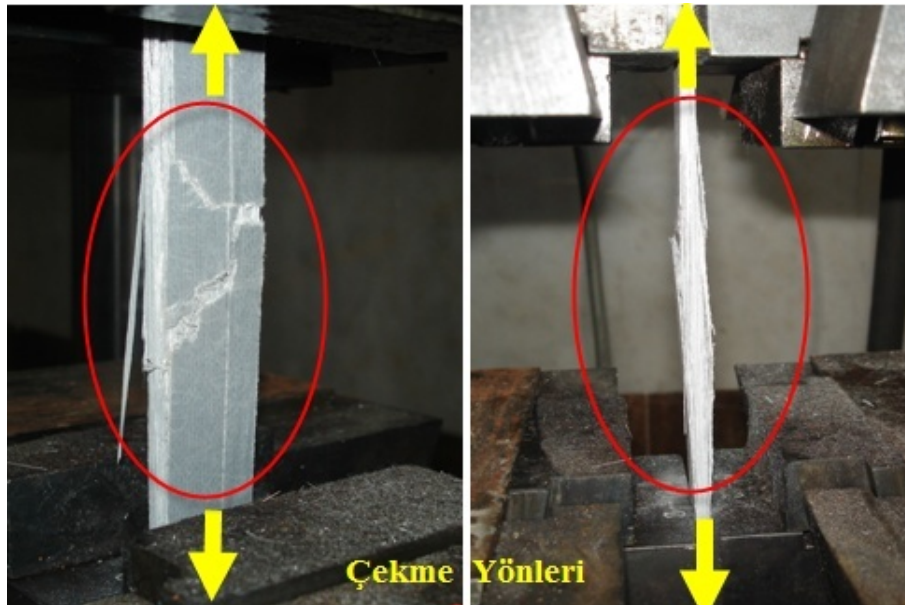
A = Kesit Alanı (mm²)

Δl = Boy Değişimi (mm)

l = İlk Boy (mm)

4.1.3.1. Liflere paralel çekme deneyi sonuçları

Yükleme esnasında deney numunesi koparılıncaya kadar çekme kuvveti devam etmiş ve deneyler sonrasında numunelerin kopma şekilleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Çekme testi sonucunda deforme olmuş deney numunesi

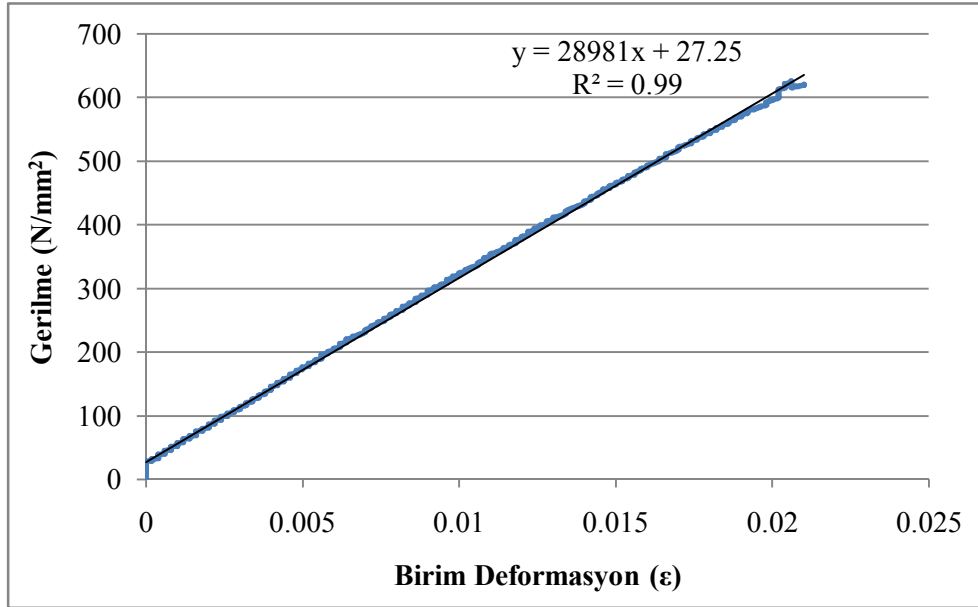
Lif doğrultusuna paralel çekme deneyinden elde edilen numunelerin uzama miktarları, maksimum çekme kuvvetleri, Elastisite modülleri ve Korelasyon değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Lif doğrultusuna paralel çekme deneyi sonuçları

	Kesit Alanı (mm²)	Uzama (mm)	Birim Def.	Çekme Kuvveti (N)	Çekme Gerilmesi (N/mm²)	E Mod. (N/mm²)	R²
1	98.1	1.05	0.021	60837.3	620.45	28981.3	0.99
2	99.3	0.85	0.017	50223.6	505.78	29751.5	0.99
3	102.2	0.88	0.0176	53324.7	521.77	29645.9	0.99
4	100.7	0.94	0.0188	58075.2	576.71	30676.3	0.99
5	101.1	0.99	0.0198	55385.4	547.83	27668.1	0.99
6	100.5	0.92	0.0184	57005.9	567.22	30827.3	0.99
7	97.34	0.92	0.0184	55897.4	574.25	31209.2	0.99
8	99.18	1.01	0.0202	53784.6	542.29	26846.2	0.99
9	99.13	0.98	0.0196	60411.8	609.42	31092.9	0.99
10	102.4	1.02	0.0204	55642.3	543.38	26636.4	0.99
Ort.	100	0.96	0.0191	56058.8	560.91	29333.5	0.99

Deney sonuçlarında hesaplanan ortalama değerler incelendiğinde lif doğrultusuna paralel numunelerin Elastisite modülü (E) 29333 N/mm² ve Çekme Dayanımı ise yaklaşık 561 N/mm² olarak bulunmuştur.

Her numune için Gerilme-Birim Deformasyon grafikleri oluşturulup, grafikler üzerinde eğrinin denklemi eklenerek Elastisite Modüllerinin elde edildiği grafikler çizilmiştir. Ayrıca Gerilme-Birim Deformasyon grafiklerinde eğilim çizgileri ile birlikte Korelasyon katsayısı ve denklemi de belirtilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen, örnek grafik Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Lif doğrultusuna paralel numuneye ait çekme deney grafiği

Lif doğrultusuna paralel çekme deneyi sonuçları incelendiğinde deneylerin güvenilirliği açısından önemli olan korelasyon değerleri tüm grafiklerde 0.99 değerinden daha yüksek çıkmakta ve bu veriler deneylerin güvenilir olduğunu ifade etmektedir.

4.1.3.2. Liflere dik çekme deneyi sonuçları

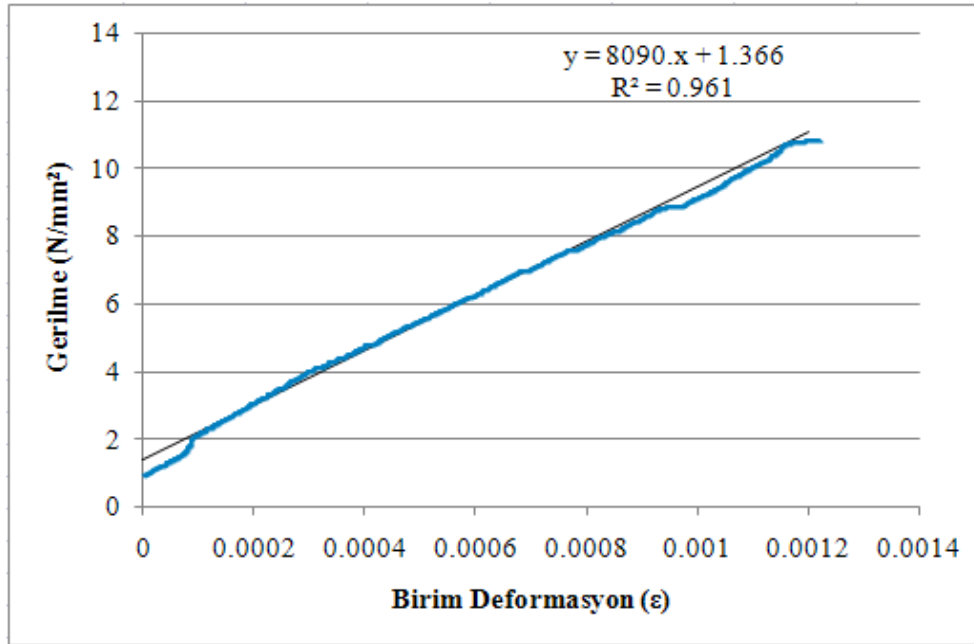
Liflere dik çekme deneyleri sonrasında elde edilen veriler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Lif doğrultusuna dik çekme deneyi sonuçları

No	Kesit Alanı (mm ²)	Uzama (mm)	Birim Def.	Çekme Kuvveti (N)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastik Modül (N/mm ²)	R ²
1	100.12	0.12	0.00133	1080	10.78	8090	0.96
2	98.28	0.14	0.00156	989	10.06	6469	0.94
3	101.25	0.13	0.00144	1024	10.11	7002	0.92
4	100.3	0.15	0.00167	1108	11.04	6628	0.93
5	97.7	0.11	0.00122	932	9.53	7805	0.9
Ort.	99.53	0.13	0.0014	1026.6	10.31	7199	0.93

Yapılan deneylerin ortalama sonuçlarına bakıldığında lif doğrultusuna dik yönde numunelerin Elastisite Modülü 7199 N/mm^2 ve Çekme dayanımı 10.31 N/mm^2 olarak bulunmuştur. Lif doğrultusuna dik çekme deneyi sonuçları incelendiğinde Gerilme-Birim deformasyon grafiklerindeki korelasyon değerleri tüm numunelerde 0,90 değerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

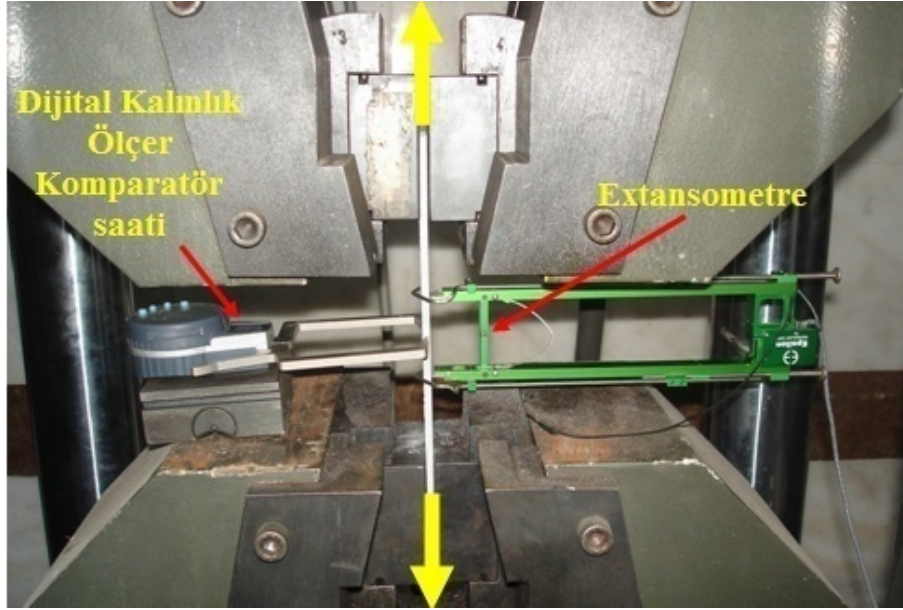
Lif doğrultusuna dik çekme deneylerini temsil eden Gerilme–Birim deformasyon grafiği Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Lif doğrultusuna dik numuneye ait çekme deneyi grafiği

4.1.4. Poisson oranı

GFRP malzemesinin Poisson oranını tespit etmek amacıyla lif doğrultusuna paralel çekme deneyinde kullanılan numuneler üzerinde ölçüm yapılmıştır. Çekme makinesi çeneleri arasına sıkıştırılan deney numunelerinin bir tarafına Ekstansometre diğer tarafına ise dijital komparatör saati yerleştirilerek, Şekil 4.10’da gösterildiği gibi hazırlanmış ve belirli aralıklarla deformasyon okumaları yapılmıştır.



Şekil 4.10. Poisson Oranı deney düzeneği

Çekme kuvveti uygulamaya başladıktan sonra numune boyundaki uzama ve enindeki daralma değerleri ölçülmüş ve yükleme başlaması ile birlikte her 500 kgf çekme kuvvetinde gerekli ölçümler yapılmış, veriler kopma gerçekleşinceye kadar kayıt altına alınmıştır. Kaydedilen bu verilerle yanal boy değişimi Formül 4.6, aksenal boy değişimi Formül 4.7 kullanılarak bulunmuş, Poisson Oranı değeri Formül 4.8. kullanılarak hesaplanmıştır

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{L_y} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{L_x} \quad (4.7)$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (4.8)$$

Burada;

ε_y : Boyuna Birim Deformasyon

Δy : Boy Deformasyonu (mm)

L_y : İlk Boy Uzunluğu (mm)

ε_x : Enine Birim Deformasyon

- Δ_x : En Deformasyonu (mm)
 L_x : İlk En Uzunluğu (mm)
 ν : Poisson Oranı

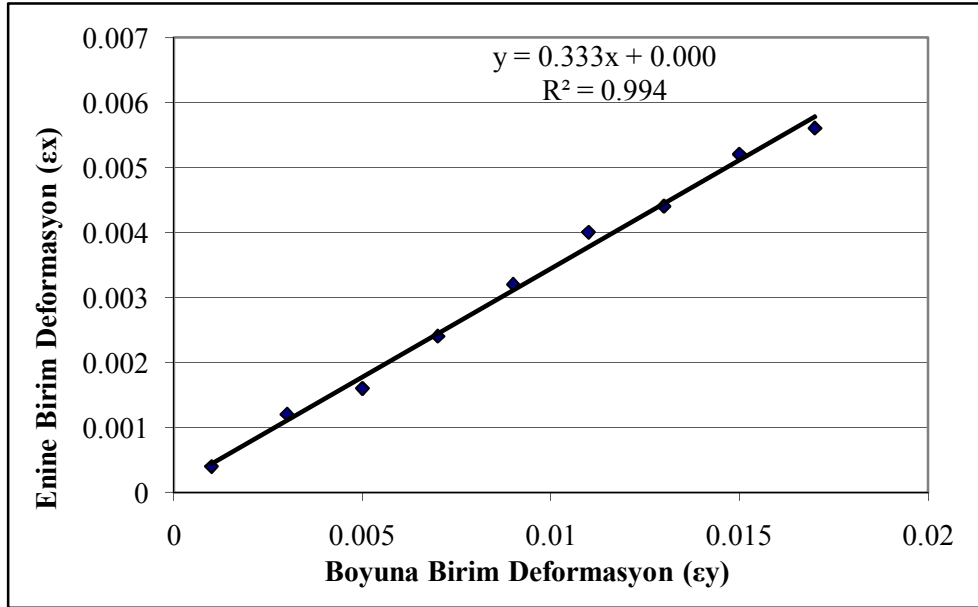
Toplam 10 adet numune üzerinde gerçekleştirilen Poisson oranı deneylerinde, tüm okumalar elastik bölgede alınmış ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen GFRP numunelerine ait Poisson oranı değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Poisson Oranı deney sonuçları

Numune No	Poisson Oranı
1	0.33
2	0.34
3	0.35
4	0.36
5	0.32
6	0.33
7	0.34
8	0.35
9	0.36
10	0.33
Ortalama	0.34

Poisson Oranı deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde tüm numunelerin ortalaması 0.34 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.11'de ifade edilen örnek grafikte belirtildiği gibi aynı yüklerdeki Enine birim deformasyon - Boyuna birim deformasyon eğrisinin denklemi Poisson oranını ifade etmektedir. Korelasyon değeri (R^2) 0.994 çıkmış ve deney verilerinin birbirine yüksek orandaki uyumunu ifade etmektedir.



Şekil 4.11. Poisson Oranı örnek deney grafiği

4.1.4. GFRP lif oranlarının belirlenmesi

Mekanik davranış bir cisme karşı uygulanan dış yüklere karşı gösterdiği tepki olarak adlandırılmaktadır. Mekanik özelliklerin temeli, atomlar arası bağ kuvvetleri olmasına rağmen içyapıya ve çevre şartlarına büyük oranda bağlıdır. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri sistemden sisteme değişmekle beraber, kompozit malzeme özelliklerini etkileyen en önemli değişkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir [110];

- Takviye eleman türü ve özelliği
- Takviye elemanın hacim oranı
- Lif geometrisi ve doğrultusu
- Matris türü ve özelliği
- Matris hacim oranı
- Uygulanan üretim tekniği

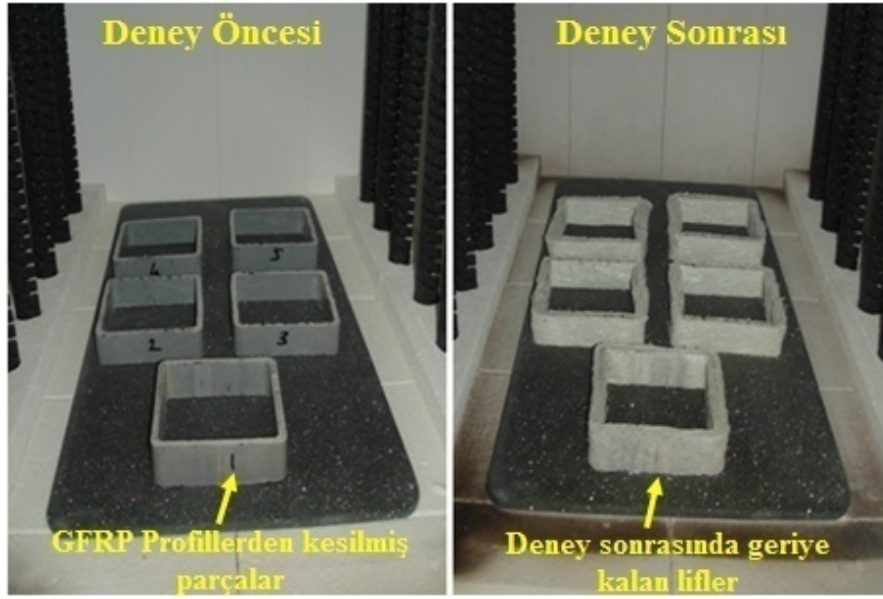
GFRP kutu profillerin mekanik davranışına etki eden fiber ve matris oranlarının belirlenmesi amacıyla profillerden elde edilen numunelere Reçine yakma metodu [108] uygulanmıştır. Reçine Yakma Metodu, Fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber ve matris oranlarının bulunması için yüksek ısı altındaki fırında yakılarak uygulanan bir metottur.

Reçine yakma metodunda, 1400 °C'ye kadar ısı uygulanabilen ve otomatik zaman ayarlayıcılı fırın kullanılmıştır (Şekil 4.12). Her kesit tipi için GFRP profillerden 2 cm genişliğinde parçalar kesilerek hazırlanan numuneler, fırın içerisinde 600 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile bekletilmiştir. Bu süre içerisinde matrisi tamamen yanarak ayrılmış ve sadece lifleri kalmıştır. Numuneler fırından çıkarıldıktan sonra keçe ve orta bölgedeki fiber ağırlıkları belirlenmiştir.



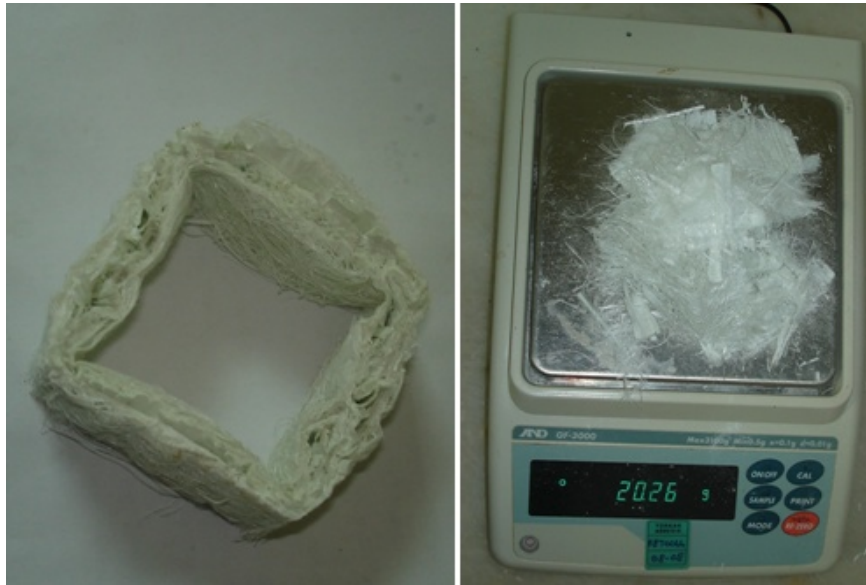
Şekil 4.12. Reçine yakma işleminde kullanılan fırın ve numuneler

Böylece Reçine yakma metodu ile bulunan sonuçlar kullanılarak malzemedeki ağırlıkça ve hacimce fiber-matris oranları bulunmuştur. Şekil 4.13'te GFRP profil parçalarının yüksek dereceli fırında reçine yakma işlemi öncesi ve sonrasındaki durumları görülmektedir.



Şekil 4.13. Profil lif oranlarının belirlenmesi

Reçine yakma işlemi sonrası Şekil 4.14’te görüldüğü gibi matris malzemesinin yanması sonucu GFRP profillerden geriye kalan cam lifler hassas terazide tartılmıştır.



Şekil 4.14. Reçine yakma sonrası geriye kalan cam lifler ve tartılması

Bu çalışmada her bir numunenin ilk ağırlığından, reçine yakma deneyi sonucu belirlenen keçe ve orta bölgedeki toplam fiber ağırlıkları çıkarılarak toplam matris ağırlıkları bulunmuş ve Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Ağırlıkça lif ve matris oranları

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	42.42	23.45	5.21	13.76
	%	100	55.28	12.28	32.44
2	Ağırlık (gr)	39.13	21.97	4.50	12.66
	%	100	56.15	11.50	32.35
3	Ağırlık (gr)	39.45	22.20	4.54	12.71
	%	100	56.27	11.50	32.23
4	Ağırlık (gr)	39.36	21.83	4.82	12.71
	%	100	55.46	12.24	32.30
5	Ağırlık (gr)	40.70	22.96	4.59	13.15
	%	100	56.41	11.27	32.32
Ort. Ağırlık (gr)		40.21	22.48	4.73	13.00
Ağırlıkça Ortalama (%)		100	55.91	11.76	32.31

Deneylerde kullanılan GFRP kutu profillerden kesilerek hazırlanan parçalar üzerinde gerçekleştirilen fiber oranı belirleme test sonuçları ile elde edilen, malzemeye ait tüm tabakadaki ağırlıkça fiber ve matris oranları değerlerine göre ağırlıkça boyuna fiber oranı %55.91 ve keçedeki toplam fiber oranı ise %11.76’ dır.

Ağırlıkça elde edilen fiber ve matris oranlarını hacimce oranlara dönüştürmek için elde edilen değerler fiber yoğunluğuna (2.56) ve matris yoğunluğuna (1.24) bölerek her bir numuneye ait tüm tabakadaki hacimce yüzde oranları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. Hacimce lif ve matris oranları

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Hacim (cm ³)	22.29	9.16	2.04	11.10
	%	100	41.09	9.15	49.80
2	Hacim (cm ³)	20.55	8.58	1.76	10.21
	%	100	41.75	8.56	49.68
3	Hacim (cm ³)	20.70	8.67	1.77	10.25
	%	100	41.88	8.55	49.52
4	Hacim (cm ³)	20.66	8.53	1.88	10.25
	%	100	41.29	9.10	49.61
5	Hacim (cm ³)	21.37	8.97	1.79	10.60
	%	100	41.97	8.38	49.60
Hacim Ort. (cm ³)		21.114	8.782	1.848	10.482
Hacimce Ortalama (%)		100	41.59	8.76	49.64

Reçine Yakma deneyleri sonucunda Ağırlık ve Hacimsel olarak lif oranları belirlenmiştir. Buna göre GFRP malzemenin hacimce Boyuna Fiber oranı %41.59, hacimce Keçedeki (yanal sargı) fiber oranı %8.76 ve Matris miktarı ise hacimce %49.64 olarak bulunmuştur.

Deneyler sonucunda bulunan ve nümerik çalışmalarda kullanılan GFRP malzemenin fiber-matris hacim yüzdeleri özet olarak Tablo 4.8’de, GFRP Profilleri oluşturan E cam lifi ve matris malzemesinin Elastisite Modülleri, Poisson Oranları, Kayma Modülleri ile Özgül ağırlık değerleri ise Tablo 4.9’da verilmiştir [115].

Tablo 4.8. GFRP profil lif oranı sonuçları

	Boyuna Lifler	Enine Lifler (Keçe)	Matris Malzemesi
Fiber Hacim Yüzdesi (%)	41.59	8.76	49.64
Tabaka Kalınlığı (mm)	2.55	0.95	-

Tablo 4.9. GFRP profil bileşen özellikleri [115].

Malzeme	Elastisite Modülü (N/mm ²)	Kayma Modülü (N/mm ²)	Poisson Oranı	Özgül Ağırlık
E - Cam	72000	29000	0.25	2.56
Epoksi	3500	1600	0.35	1.24

4.2. Mekanik Özelliklerin Nümerik Olarak Belirlenmesi

Malzeme mekanik özelliklerinin deneysel olarak tespitinin yanında büyük kolaylıklar sağlayan nümerik çalışmalarla da belirlenebilmektedir. Bu amaçla malzeme mekanik özelliklerin nümerik tespitinde uygulanan Mikro ve Makro mekanik analizlerle malzemeye ait fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmiştir. Bu yöntemlerde kompozit malzemeyi oluşturan fiber ve matris oranları, kullanılan fiber ve matrisin özellikleri ile profile ait kesit tipinin bilinmesi gerekmektedir.

4.2.1. Mikro mekanik analiz

Mikro mekanik analiz kompozit malzemedeki elemanların ayrı ayrı ele alınarak yapılan inceleme olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda kompozit malzemenin Özgül Ağırlığı, liflere paralel yöndeki Elastisite Modülü, liflere dik yöndeki Elastisite Modülü, Kayma Modülü ve Poisson Oranı değerinin teorik hesabı mikro mekanik analizle bulunmuştur.

4.2.2.1. Özgül ağırlık

GFRP malzemenin deneysel olarak bulunan Özgül Ağırlığın yanı sıra teorik hesaplamalar ile Özgül Ağırlığı tespit edilebilmektedir. Bu amaçla GFRP lif oranlarının belirlenmesi kısmında bulunan profil lif ve matris oranları kullanılmış ve Formül 4.9. ile teorik Özgül Ağırlık değeri bulunmuştur.

$$\gamma_{kompozit} = \gamma_m \times V_m + \gamma_f \times V_f \quad (4.9)$$

Burada

γ_c = Kompozit Malzeme Özgöl Ağırlığı

γ_m = Matrisin Özgöl Ağırlığı

γ_f = Fiberin Özgöl Ağırlığı

V_m = Matris Hacmi

V_f = Fiber Hacmi

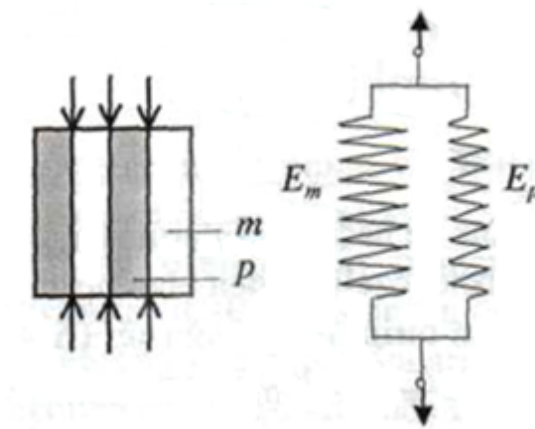
$$\gamma_{kompozit} = [(\gamma_m \times V_m) + (\gamma_f \times (V_{keçe} + V_{boyuna}))]$$

$$\gamma_{kompozit} = [1.24 \times 0.4964] + [2.56 \times 0.5035] \Rightarrow \gamma_c = 1.904$$

Böylece GFRP malzemenin teorik Özgöl Ağırlık değeri 1.904 olarak hesaplanmıştır.

4.2.2.2. Liflere paralel yöndeki Elastisite modülü (Voigt modeli)

Voigt modelinde (Şekil 4.15) malzemenin paralel bağlı yay cismi şeklinde kabul edilmekte ve Paralel fazlı model diye adlandırılan bu davranışta her iki fazın gerilme karşısında aynı şekilde elastik deformasyon yaptığı öngörülmektedir [3]. Bu modeli kullanabilmek için, bağlayıcı malzeme olan matrisin Elastisite Modülü, fiberlerin Elastisite Modülünden küçük olması gerekmektedir ($E_f < E_m$).



Şekil 4.15. Voigt paralel fazlı model [3]

Kompozit malzemenin Elastisite Modülü için E_k , matrisin Elastisite Modülü için E_m ve fiberlerin Elastisite Modülü için E_f ifadesi kullanılarak, hacim oranlarında ise fiber hacmine V_f , matris hacmi için $1-V_f$ kullanılmıştır. Böylece Formül 4.10'da belirtilen ifadeler kullanılarak GFRP kompozit profiller için Elastisite Modülü değeri teorik olarak bulunabilmektedir.

$$E_k = E_m \cdot (1 - V_f) + E_f \cdot V_f \quad (4.10)$$

Kompoziti oluşturan bileşenler lifler ile matrisin Elastisite Modülü ve yüzde hacim oranları GFRP Profil Lif Oranları kısmında bulunduğu gibi ayrıca aşağıda verilmiştir.

$$E_m = 3500N / mm^2$$

$$E_f = 72000N / mm^2$$

$$V_m = 0.4964$$

$$V_f = 0.5035$$

$$V_m = 0.4964$$

$$E_k = E_m \cdot (1 - V_f) + E_f \cdot V_f$$

$$E_k = (3500 \times 0.4964) + (72000 \times 0.5035)$$

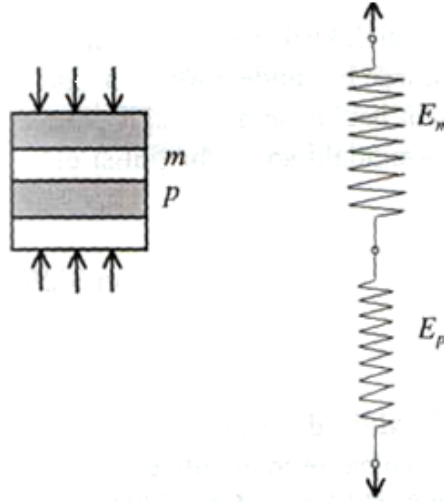
$$E_k = 37998N / mm^2$$

Yapılan hesaplamalar sonucu kompozit malzemenin teorik Elastisite Modülü 37998 N/mm² olarak bulunmuştur.

4.2.2.3. Liflere dik yöndeki Elastisite modülü (Reussel modeli)

Kompozit özelliklerini bileşenlerinin özellik ve hacim oranlarına göre ele alan temel modellerden ikincisi, Seri Fazlı Model diye adlandırılan Reussel Modelidir (Şekil 4.16). Bu model kompoziti oluşturan fazların, kompoziti etkileyen kuvvete bağlı olarak bünyede meydana gelen gerilme altında farklı şekil değişiklikleri göstereceği kabulüne dayanmaktadır. Bu durumda fazlardaki gerilme aynı değerde olmakta, bu

ön kabul nedeniyle Eş Gerilmeli Model diye adlandırılmaktadır. Bu modelin, kompozit malzemenin E Modülü için uygulanması halinde, kompozitin yük altındaki genişlemesi ihmal edilerek, tüm kesitte aynı gerilmenin var olduğu kabul edilmektedir [3].



Şekil 4.16. Voigt seri fazlı model [3]

Bu modeli kullanabilmek için, Voigt Modelinde olduğu gibi bağlayıcı malzeme olan matrisin Elastisite Modülü, fiberlerin Elastisite Modülünden küçük olması gerekmektedir.

Böylece Reussel modelinden hareketle, GFRP kompozit profillerin liflere dik yöndeki Elastisite Modülü Formül 4.11'de belirtilen hesaplamalar ile teorik olarak bulunabilmektedir.

$$\frac{1}{E_y} = \frac{1-V_f}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \Rightarrow E_y = \frac{E_f \times E_m}{E_f \times V_m + E_m \times V_f} \quad (4.11)$$

$$E_y = \frac{72000 \times 3500}{72000 \times 0,4964 + 3500 \times 0,5035} \Rightarrow E_y = 6719 \text{ N/mm}^2$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda GFRP kompozit malzemenin liflere dik yöndeki teorik Elastisite Modülü 6719 N/mm² olarak bulunmuştur.

4.2.2.4. Kayma modülü ve Poisson oranı hesabı

Kompozit malzemelerin Kayma Modülü (G_{xy}) ve Poisson Oranı (ν_{xy}), kompozitteki liflerin ve matris elemanının hacmi ile doğru orantılı olmakla birlikte kompozit malzeme bileşenleri matris ve cam liflerin Kayma Modülü ile Poisson Oranı değerlerinin bilinmesi gereklidir. Aşağıda kompozit malzemenin Kayma Modülünü bulmak için gerekli Formül 4.12 ile matris ve cam liflerin Kayma Modülü değerleri verilmiştir. Ayrıca kompozit malzemenin Poisson Oranını belirlemek için kullanılan matris ve cam liflerin Poisson Oranları ile kompozit malzeme Poisson Oranı Formül 4.13'de verilmiştir.

$$G_f = 29000 N / mm^2$$

$$G_m = 1600 N / mm^2$$

$$G_{xy} = \frac{G_f \times G_m}{V_f \times G_m + (1 - V_f) \times G_f} \quad (4.12)$$

$$G_{xy} = \frac{29000 \times 1600}{(0,5035 \times 1600) + (0,4964 \times 29000)} \Rightarrow G_{xy} = 3052 N / mm^2$$

$$\nu_f = 0.25$$

$$\nu_m = 0.35$$

$$\nu_{xy} = \nu_f \times V_f + \nu_m \times (1 - V_f) \quad (4.13)$$

$$\nu_{xy} = 0.25 \times 0.5035 + 0.35 \times 0.4964 \Rightarrow \nu_{xy} \cong 0.30$$

Hesaplamalar sonucunda Kompozit malzemenin teorik Kayma Modülü (G_{xy}) 3052 N/mm² ve teorik Poisson Oranı (ν_{xy}) ise 0.30 olarak bulunmuştur.

4.2.2.5. Dış keçe kısmının mekanik özellikleri

Dağınık ve süreksiz liflerle oluşturulmuş kompozitlerin mekanik özelliklerini bulmak için tek başlarına Voigt ya da Reussel modeli yetersiz kalabilmektedir. GFRP profillerin en dış kısmında boyuna liflerden farklı olarak rastgele yönlendirilmiş keçe lifler bulunmakta ve bu kısımlar için Elastisite Modülü, Kayma Modülü ve Poisson Oranı değerlerinin ayrıca hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla iki model birleştirilerek oluşturulmuş, Formül 4.14 ile malzemenin Elastisite Modülünü, Formül 4.15 ile Kayma Modülünü ve Formül 4.16 kullanılarak ise Poisson Oranı değeri dış keçe kısmı için hesaplanabilir.

$$E_x = E_m \times (1 - V_f) + E_f \times V_f$$

$$E_x = 3500 \times 0.763 + 72000 \times 0.237 \Rightarrow E_x = 19735 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{1 - V_f}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \Rightarrow E_y = \frac{E_f \times E_m}{E_f \times V_m + E_m \times V_f}$$

$$E_y = \frac{72000 \times 3500}{72000 \times 0.763 + 3500 \times 0.237} \Rightarrow E_y = 4519 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{xy} = \frac{3}{8} E_x + \frac{5}{8} E_y \quad (4.14)$$

$$E_{xy} = \frac{3}{8} \times 19735 + \frac{5}{8} \times 4519 \Rightarrow E_{xy} = 10225 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{xy} = \frac{1}{8} E_x + \frac{1}{4} E_y \quad (4.15)$$

$$G_{xy} = \frac{1}{8} \times 19735 + \frac{1}{4} \times 4519 \Rightarrow G_{xy} = 3597 \text{ N/mm}^2$$

$$v_{xy} = \frac{E_{xy}}{2 \times G_{xy}} - 1 \quad (4.16)$$

$$v_{xy} = \frac{10225}{2 \times 3597} - 1 \Rightarrow v_{xy} = 0.42$$

4.2.3. Makro mekanik analiz

Makro mekanik, kompozitteki elemanların bir bütün olarak ele alıp tek bir malzeme gibi incelenmesi olarak ifade edilebilir. Makro mekanik hesaplarda kullanılan temel veriler mikro mekanik analiz ile hesaplanan veriler olup Makro mekanik hesaplamalar, matris yöntemi ile çözülmektedir.

İlk olarak bir cisme temel olarak etki eden iki çekme ve bir kesme kuvvetinin etki ettiği düşüncesiyle oluşturulan 3*3'lük bir matris kullanılmış, oluşturulan matrisin çözümünde Formül 4.17'de matris için gerekli Q değerleri, Formül 4.18'de ise belirtilen matris denklemi verilmiştir.

$$\sum Q_{11} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{E_x}{1 - \nu_{xy} * \nu_{yx}} \right)_k * t_k \quad (4.17)$$

$$\sum Q_{11} = 118.271N / mm^2$$

$$\sum Q_{22} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{E_y}{1 - \nu_{xy} * \nu_{yx}} \right)_k * t_k$$

$$\sum Q_{22} = 30.622kN / mm^2$$

$$\sum Q_{12} = \sum Q_{21} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{E_y * \nu_{xy}}{1 - \nu_{xy} * \nu_{yx}} \right)_k * t_k$$

$$\sum Q_{12} = \sum Q_{21} = 11.851 kN / mm^2$$

$$\sum Q_{33} = \sum_{k=1}^N (G_{xy})_k * t_k$$

$$\sum Q_{33} = 11.2kN / mm^2$$

$$A = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \sum Q_{11} & \sum Q_{12} & 0 \\ \sum Q_{21} & \sum Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sum Q_{33} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \text{ veya } \bar{\sigma} = \bar{Q}\bar{\varepsilon} \quad (4.18)$$

Formül 4.17 kullanılarak bulunan değerler, A matrisinde (Formül 4.18) yerine konulmuş ve Formül 4.19'da oluşan matrisin tersi alınmıştır.

$$A = \begin{vmatrix} 118.271 & 11.851 & 0 \\ 11.851 & 30.622 & 0 \\ 0 & 0 & 11.2 \end{vmatrix}$$

$$\bar{A} = \frac{1}{\det A} \times Ek(A) \quad (4.19)$$

$$\det(A) = 38990.25$$

$$Ek(A) = \begin{vmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{vmatrix}$$

$$A_{11} = 342.96$$

$$A_{12} = -132.73$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{21} = -132.73$$

$$A_{22} = 1324.63$$

$$A_{23} = 0$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = 0$$

$$A_{33} = 3481.25$$

$$Ek(A) = \begin{vmatrix} 342.96 & -132.73 & 0 \\ -132.73 & 1324.63 & 0 \\ 0 & 0 & 3481.25 \end{vmatrix}$$

$$\det(A) = 38990.25 \Rightarrow$$

$$\frac{1}{\det(A)} = \frac{1}{38990.25}$$

$$\bar{A} = \frac{1}{\det A} \times Ek(A)$$

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} \frac{342.96}{38990.25} & -\frac{132.73}{38990.25} & 0 \\ \frac{132.73}{38990.25} & \frac{1324.63}{38990.25} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3481.25}{38990.25} \end{vmatrix}$$

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} 0.008796 & -0.0034 & 0 \\ -0.0034 & 0.033973 & 0 \\ 0 & 0 & 0.089285 \end{vmatrix}$$

$$\bar{A} = S = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.008796 & -0.0034 & 0 \\ -0.0034 & 0.033973 & 0 \\ 0 & 0 & 0.089285 \end{vmatrix}$$

veya $\bar{\varepsilon} = \bar{S} \cdot \bar{\sigma}$

Makro mekanik analiz sonucunda, kompozit malzemenin Boyuna Elastik Modülü, Enine Elastik Modülü, Kayma Modülü ve Poisson Oranı değerleri Formül 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23 kullanarak hesaplanmıştır.

Boyuna Elastik Modülü (E_x) ;

$$E_x = \frac{1}{S_{11} \times \sum t} \Rightarrow E_x = 32.482 \text{ kN/mm}^2 = 32482 \text{ N/mm}^2 \quad (4.20)$$

Enine Elastik Modülü (E_y) ;

$$E_y = \frac{1}{S_{22} \times \sum t} \Rightarrow E_y = 8.41kN / mm^2 = 8410N / mm^2 \quad (4.21)$$

Kayma Modülü (G_{xy}) ;

$$G_{xy} = \frac{1}{S_{33} \times \sum t} \Rightarrow G_{xy} = 3.20kN / mm^2 = 3200N / mm^2 \quad (4.22)$$

Poisson Oranı (ν) ;

$$\nu = -(S_{12} \times E_x \times \sum t) \Rightarrow \nu = -(-0.0034 \times 32.482 \times 3.5) \Rightarrow \nu = 0.38 \quad (4.23)$$

4.3. Deneysel ve Teorik Çalışma Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan çalışmalarda pultruzyon metodu ile üretilmiş GFRP profillerinin mekanik özellikleri testler ile belirlenmiş, daha sonra 4.2. Mekanik Özelliklerin Nümerik Olarak Belirlenmesi kısmında belirtildiği gibi nümerik olarak hesaplanmıştır. Bu kısımda nümerik hesaplamalar ile deneysel çalışmalar arasında karşılaştırmalar yapılarak deneysel sonuçların nümerik hesaplamalar ile ne kadar yaklaşımla belirlenebileceği incelenmiştir. Tablo 4.10'da yapılan deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının karşılaştırması ve yüzde olarak yaklaşım değerleri verilmiştir.

Tablo 4.10. Nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

	Nümerik Hesap	Deneysel Sonuçlar	Karşılaştırma (%)
Birim Ağırlık (g/cm^3)	-	1.738	-
Özgül Ağırlık (γ)	1.904	1.822	95,7
Elastisite Modülü (E_x) (N/mm^2)	32482	29333	90
Elastisite Modülü ($E_{y,z}$) (N/mm^2)	8410	7199	86
Poisson Oranı	0.38	0.34	90
Kayma Modülü (N/mm^2)	3200	-	-

Deneysel ve sayısal çalışma sonuçların karşılaştırıldığında Özgül ağırlığın nümerik hesap sonucu ile deneysel çalışmalar sonucu arasında %95,7'lik bir uyum vardır. Lif doğrultusuna paralel (Ex) yöndeki Elastisite modülünde nümerik hesap ile deneysel çalışmalar sonucu arasında %90, Lif doğrultusuna dik (Ey,z) yöndeki Elastisite modülünde ise bu oran yine %86 civarındadır. Poisson oranında ise nümerik hesap ile deneysel sonuç arasında %90'lık yakınlık vardır.

Böylece yapılan sayısal analizlerle, GFRP malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel sonuçlara çok yakınlıkla bulunabilmektedir. Malzeme lif oranları ve özelliklerinin bilinmesi, belirtilen karakteristiklerin hesaplanabileceğini göstermekte birlikte bu çalışmada kullanılan Hibrit sistemin teorik hesaplamalarında kullanılmıştır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde deneysel çalışma sonuçları değerlendirilip, sonuçlar grafiksel olarak ifade edilmiş, malzeme kırılma tipleri incelenmiş ve yorumlanmıştır. Ayrıca kırış eğilme davranışı ile ilgili teorik çalışma yapılarak, deneylerden elde edilen grafiklerle karşılaştırılmış ve Hibrit malzemenin maliyet analizi yapılmıştır.

5.1. Basınç Deneyi Sonuçları

GFRP profiller içerisine beton doldurarak oluşturulan Hibrit ve aynı boyutlara sahip Yalın beton küp numuneler basınç presinde test edilmiştir. C20, C30 ve C40 olmak üzere üç dayanım sınıfında hazırlanan numunelerin test sonuçları grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Basınç deney sonuçları Basınç Ön deneyleri, 74x74 mm ve 100x100 mm kesitli basınç deneyleri olmak üzere 3 grupta değerlendirilerek verilmiştir.

5.1.1. Basınç ön deney sonuçları

Bu grupta yapılan testlerde üç dayanım sınıfında, et kalınlığı 6 mm ve 74x74 kesitli GFRP kutu profiller kullanılmıştır. Her beton sınıfında 3'er adet Yalın beton ve Hibrit numune basınç test sonuçları ile birlikte Birim ağırlık değerleri verilmiştir. Basınç ön deneylerinde beton basınç dayanım sınıfının Hibrit malzeme dayanımına etkilerini tespit etmeye yönelik yapılan çalışma neticesinde elde edilen test sonuçları C20, C30 ve C40 dayanım sınıfındaki numuneler için sırasıyla Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de görülmektedir.

Tablo 5.1. Basınç ön deney sonuçları (C20)

Yalın Beton			
Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm³)
1	140300	25.62	2.40
2	138200	25.24	2.39
3	122900	24.67	2.37
Ortalama	137867	25.18	2.39
Hibrit			
Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm³)
1	224800	41.05	2.21
2	202800	37.03	2.22
3	215700	39.39	2.23
Ortalama	214433	39.16	2.22

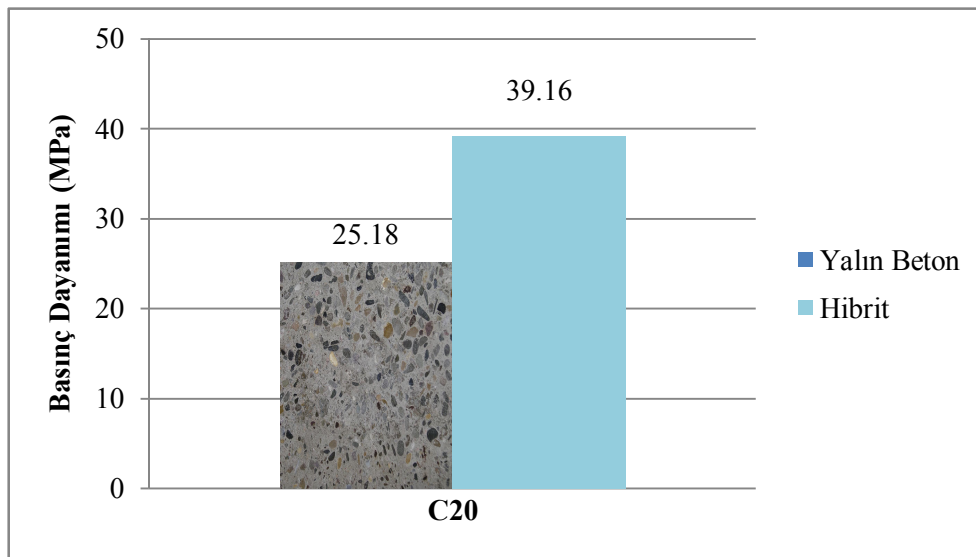
Tablo 5.2. Basınç ön deney sonuçları (C30)

Yalın Beton			
Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm³)
1	186400	34.04	2.32
2	174400	31.85	2.34
3	192500	35.15	2.30
Ortalama	184433	33.68	2.32
Hibrit			
Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm³)
1	281700	51.44	2.21
2	240200	43.86	2.26
3	266100	48.59	2.22
Ortalama	262666	47.97	2.23

Tablo 5.3. Basınç ön deney sonuçları (C40)

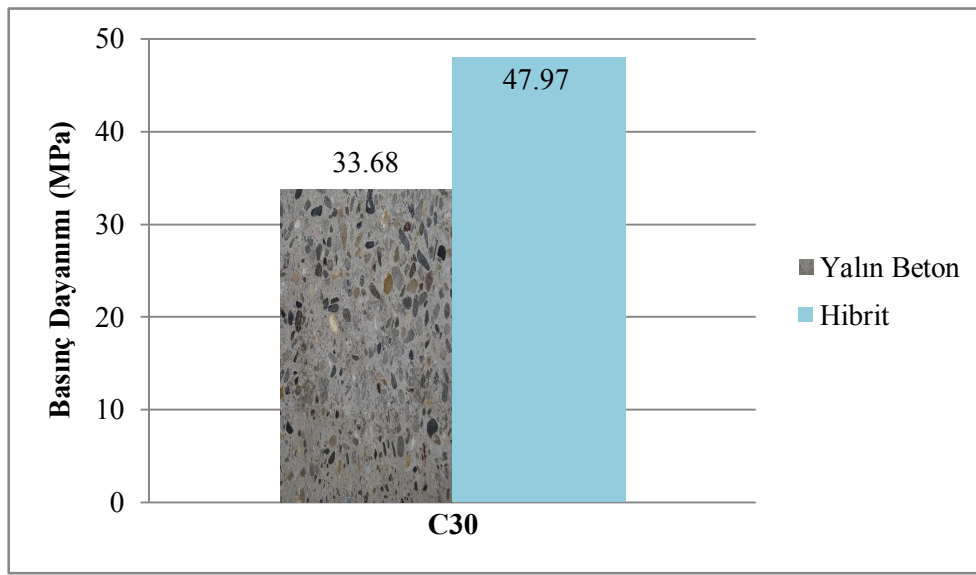
Yalın Beton			
Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
1	226800	41.42	2.34
2	224700	41.03	2.37
3	247800	45.25	2.39
Ortalama	233100	42.57	2.37
Hibrit			
Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
1	326300	59.59	2.24
2	296300	54.11	2.26
3	304800	55.66	2.25
Ortalama	309133	56.45	2.25

Basınç ön deneyleri sonucunda elde edilen verilerin ortalamaları alınarak yapılan hesaplamada, her dayanım sınıfındaki basınç dayanımları karşılaştırmalı grafik halinde verilmiştir. C20 basınç dayanım sınıfında üretilen numunelerin Basınç dayanım sonuçları Şekil 5.1, C30 sınıfındakiler Şekil 5.2 ve C40 dayanım sınıfı sonuçları Şekil 5.3'de verilmiştir.



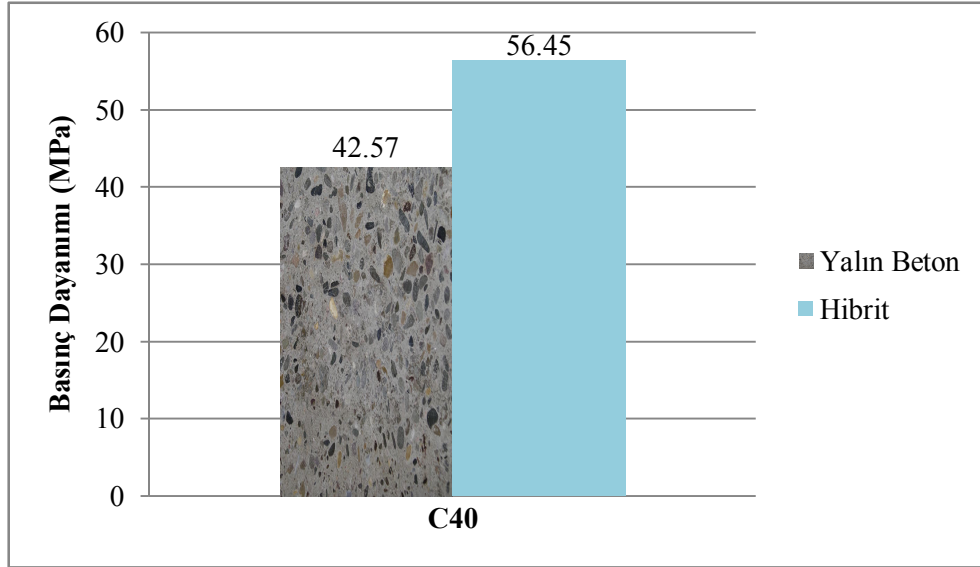
Şekil 5.1. Basınç ön deney sonuçlarının karşılaştırılması (C20)

C20 beton sınıfındaki Yalın betonların basınç dayanımı 25.18 MPa, Hibrit numunelerin basınç dayanımı ise 39.16 MPa çıkmıştır. Hibrit numunelerin basınç dayanımı Yalın betonlara göre %56 oranında artmıştır (Şekil 5.1). Ayrıca Yalın betonların Birim Ağırlığı 2.39 gr/cm³ iken Hibrit numunelerin Birim Ağırlığı 2.22 gr/cm³ olarak hesaplanmış, dolayısıyla Hibrit numunelerin Yalın betonlara göre %7 daha hafif olduğu tespit edilmiştir. Böylece Hibrit tasarımda, GFRP profil betonu korumasıyla birlikte kalıp kullanmadan aynı zamanda malzeme hafiflemiş ve büyük oranda basınç dayanım artışı sağlanmıştır.



Şekil 5.2. Basınç ön deney sonuçlarının karşılaştırılması (C30)

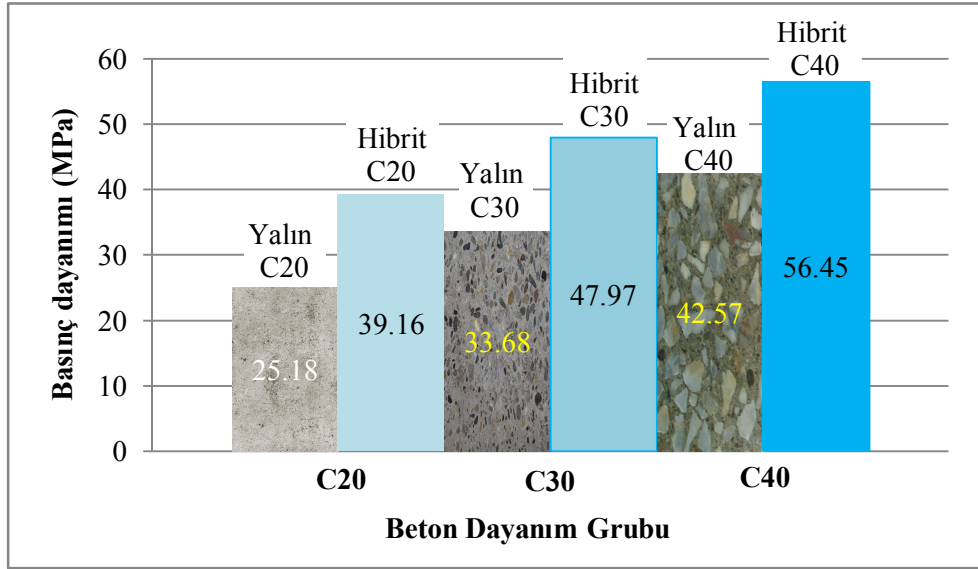
C30 beton sınıfındaki elde edilen sonuçlara göre Yalın betonların basınç dayanım ortalaması 33.68 MPa, Hibrit numunelerin basınç dayanım ortalaması ise 47.97 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.2). Bu sonuçlara göre Hibrit numunelerin basınç dayanımı Yalın betonların basınç dayanımına göre %42 oranında artış göstermiştir. Yalın betonların Birim Ağırlığı 2.32 gr/cm³ iken Hibrit numunelerin Birim Ağırlığı 2.23 gr/cm³ olarak bulunmuş, böylece Birim ağırlık değerlerinde Hibrit numunelerin aynı hacimdeki Yalın beton numunelerden %4 oranında daha hafif olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.3. Basınç ön deney sonuçlarının karşılaştırılması (C40)

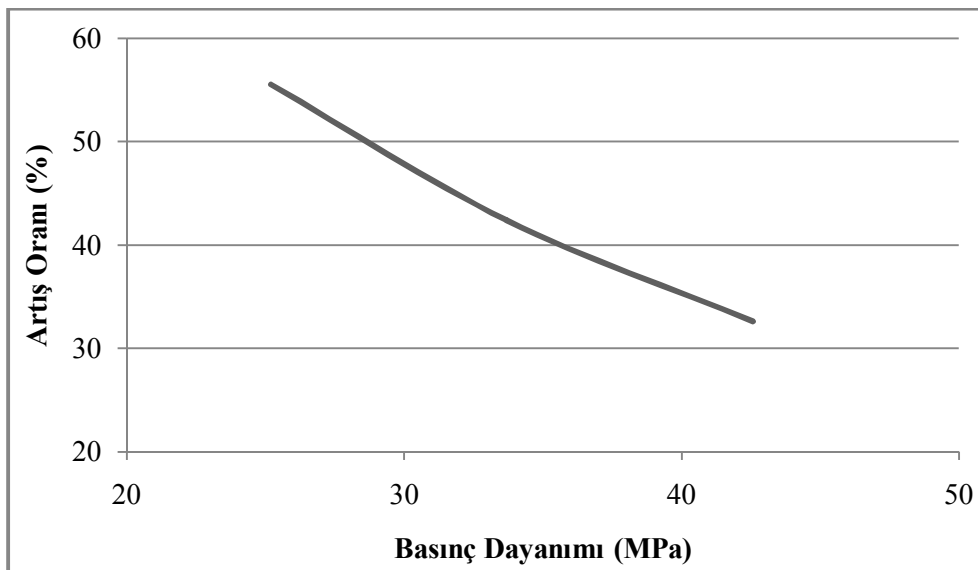
C40 beton sınıfındaki Yalın beton ile Hibrit numuneler ile yapılan çalışmalarda Yalın betonların basınç dayanımı 42.57 MPa, Hibrit numunelerin basınç dayanımı ise 56.45 MPa olarak bulunmuştur. Hibrit numunelerin basınç dayanımı Yalın betonların basınç dayanımına göre %33 oranında yüksek çıkmıştır (Şekil 5.3). Ayrıca C40 beton sınıfındaki Hibrit numuneler dayanım artışıyla birlikte Yalın betonların Birim Ağırlığı 2.37 gr/cm^3 iken Hibrit numunelerin 2.25 gr/cm^3 olarak hesaplanmış ve Hibrit numunelerin Yalın betonlara göre %7 daha hafif olduğu tespit edilmiştir.

Beton dayanımındaki değişimin Yalın beton ve Hibrit numunelerdeki etkisini incelemek amacıyla hazırlanan grafik Şekil 5.4'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her dayanım sınıfındaki Hibrit numune basınç dayanım değerleri bir üst dayanım grubundaki Yalın beton basınç dayanım sınıfından daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4. Basınç ön deneylerinde Yalın beton ve Hibrit numunelerin basınç dayanımları

Farklı dayanım sınıfındaki sonuçlar incelendiğinde basınç dayanım sınıfı arttıkça Hibrit ve Yalın beton küp numuneler arasındaki dayanım farkının azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.5). Buna göre basınç dayanımı 20 MPa olan numunelerde Yalın beton numunelere göre Hibrit numunelerin artış oranı %56 iken dayanım sınıfı artışı ile oran düşerek 40 MPa dayanımda %33 olmaktadır. Bu sonuç; basınç dayanımı arttıkça Hibrit yapı bileşenlerinden betonun etkisinin de arttığını, düşük dayanımlarda ise GFRP profilin etkin olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.5. Basınç ön deneylerinde Hibrit numunelerdeki basınç dayanımı artış oranları

Basınç ön deneylerinde kullanılan GFRP profil et kalınlıkları 6 mm ve kesit boyutları 74 mm'dir. Toplam numune kesit alanı 54.56 cm^2 ve kesitteki profil alanı ise 16.32 cm^2 olup, toplam kesitte profil oranı %29.8'dir. Yalın beton numunelere göre Hibrit malzeme tasarımında (Farklı beton dayanım sınıflarında) %33-56 arasında basınç dayanım artışı gerçekleşirken, bu artışa tüm kesitte %29.8 oranında kullanılan GFRP profil ile ulaşılmıştır.

Basınç ön deneyleri sonucunda Hibrit numunelerin kırılma şekilleri incelenmiş ve birçok numunenin basınç deneyi sonrasında köşe noktalarından deforme oldukları tespit edilmiştir (Şekil 5.6). Böylece köşe noktalarının profil üretimi esnasında ek keçe ilavesi ile daha iyi sonuçlar elde edileceği düşünülerek çalışmaların devamında profillerin bu kısımları ile ilgili iyileştirmeler yapılmıştır.



Şekil 5.6. Basınç deneyi sonrası deforme olmuş Hibrit küp numuneleri

5.1.2. GFRP profil özelliklerinin geliştirildiği basınç deneyi sonuçları

5.1.2.1. GFRP profil lif oranları

GFRP görüntü özelliklerinin geliştirilmesi çalışmalarında üretici firma tarafından keçe lif oranları artırılan ve iç yüzeylerine kum taneleri yapıştırılan profiller ile belirtilen özelliklerin laboratuarda geliştirilmesiyle farklı profil türleri elde edilmiş ve lif oranları tespit edilmiştir.

74 mm kesitli GFRP profil özelliklerinin geliştirilmeden önceki mevcut halini ifade eden profillere ait lif oranı değerleri (Tablo 5.4), profil iç yüzeylerinin kumlanmasıyla oluşturulan Kumlu GFRP profillerin lif oranı değerleri (Tablo 5.5), yine Reçine yakma metoduyla tespit edilmiş 6 adet deney numunesine ait keçesi artırılmış Ek Keçeli GFRP profillerin boyuna ve keçe lif oranı değerleri (Tablo 5.6), iç yüzeylerine üretici firma tarafından 1 mm çaplı kumların yapıştırılmasıyla elde edilen Ek Keçeli numunelere ait lif oranları (Tablo 5.7) testler sonucunda belirlenmiştir. Ayrıca dokuma lifli keçe kullanılan ve Özel keçeli olarak isimlendirilen numunelerin boyuna ve yanal keçe lif oranı değerleri (Tablo 5.8), Özel keçeli GFRP profillerin iç yüzeylerine kum yapıştırılmasıyla oluşturulan numunelerin boyuna ve keçe lif oranı değerleri (Tablo 5.9) ve laboratuvar ortamında mevcut GFRP profil dışına 1 kat cam lifli keçe sarılması ile oluşturulan Ek Sargılı profillerin lif oranları da (Tablo 5.10) tespit edilmiştir.

Tablo 5.4. GFRP profil lif oranları (74 mm)

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	20.85	9.11	3.09	8.65
	%	100	43.69	14.82	41.49
2	Ağırlık (gr)	22.30	10.66	3.32	8.32
	%	100	47.80	14.89	37.31
3	Ağırlık (gr)	21.22	10.21	3.14	7.87
	%	100	48.11	14.80	37.09
4	Ağırlık (gr)	20.97	10.32	3.25	7.4
	%	100	49.21	15.50	35.29
5	Ağırlık (gr)	20.39	10.25	2.89	7.25
	%	100	50.27	14.17	35.56
6	Ağırlık (gr)	20.36	10.13	3.05	7.18
	%	100	49.75	14.98	35.27
Ağırlıkça Ort. (%)		100	48.14	14.86	37.0
Hacimce Ort. (%)		100	34.8	10.74	54.5

Tablo 5.5. Kumlu GFRP profil lif oranları (74 mm)

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	24.51	12.07	3.12	9.78
	%	100	49.24	12.73	38.03
2	Ağırlık (gr)	25.74	12.72	3.24	9.78
	%	100	49.42	12.59	37.99
3	Ağırlık (gr)	24.18	11.91	2.92	9.35
	%	100	49.26	12.07	38.67
4	Ağırlık (gr)	25.79	12.7	3.01	10.08
	%	100	49.24	11.67	39.09
5	Ağırlık (gr)	24.51	12.06	2.93	9.52
	%	100	49.2	11.95	38.85
6	Ağırlık (gr)	24.19	12.06	2.59	9.54
	%	100	49.86	10.71	39.43
Ağırlıkça Ort. (%)		100	49.37	11.95	38.68
Hacimce Ort. (%)		100	42.13	10.21	33.27

Tablo 5.6. Ek keçeli GFRP profil lif oranları (74 mm)

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	18.7	9.13	3.02	6.46
	%	100	48.82	16.15	35.03
2	Ağırlık (gr)	19.21	9.37	3.38	6.46
	%	100	48.78	17.6	33.62
3	Ağırlık (gr)	18.99	9.02	3.57	6.4
	%	100	47.5	18.8	33.7
4	Ağırlık (gr)	19.25	9.38	3.2	6.67
	%	100	48.73	16.62	34.65
5	Ağırlık (gr)	19.21	9.41	3.33	6.47
	%	100	48.98	17.33	33.69
6	Ağırlık (gr)	18.46	8.9	3.26	6.3
	%	100	48.21	17.66	34.13
Ağırlıkça Ort. (%)		100	48.50	17.36	34.14
Hacimce Ort. (%)		100	31.64	11.32	22.21

Tablo 5.7. Ek keçeli kumlu GFRP profil lif oranları (74 mm)

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	22.45	9.74	3.7	9.83
	%	100	43.39	16.48	40.13
2	Ağırlık (gr)	24.59	10.75	4.01	9.83
	%	100	43.71	16.31	39.98
3	Ağırlık (gr)	22.14	9.4	3.91	8.83
	%	100	42.46	17.66	39.88
4	Ağırlık (gr)	22.62	9.53	4.04	9.05
	%	100	42.13	17.86	40.01
5	Ağırlık (gr)	23.92	10.53	4.03	9.36
	%	100	44.02	16.85	39.13
6	Ağırlık (gr)	24.04	10.48	4.16	9.4
	%	100	42.95	17.3	39.75
Ağırlıkça Ort. (%)		100	43.11	17.08	39.81
Hacimce Ort. (%)		100	34.63	13.67	32.27

Tablo 5.8. Özel Keçeli GFRP profil lif oranları (74 mm)

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	19.85	9.12	3.47	6.79
	%	100	45.94	17.48	36.58
2	Ağırlık (gr)	19.79	9.40	3.6	6.79
	%	100	47.5	18.19	34.31
3	Ağırlık (gr)	19.9	9.73	3.36	6.81
	%	100	48.89	16.88	34.23
4	Ağırlık (gr)	19.99	9.87	3.14	6.98
	%	100	49.37	15.71	34.92
5	Ağırlık (gr)	20.12	10.10	3.28	6.74
	%	100	50.20	16.3	33.5
6	Ağırlık (gr)	19.57	9.74	3.16	6.67
	%	100	49.77	16.15	34.08
Ağırlıkça Ort. (%)		100	48.61	16.79	34.60
Hacimce Ort. (%)		100	33.22	11.47	23.37

Tablo 5.9. Özel Keçeli Kumlu GFRP profil lif oranları (74 mm)

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	21.41	10.21	3.66	8.43
	%	100	47.69	17.09	35.22
2	Ağırlık (gr)	23.41	11.22	3.76	8.43
	%	100	47.93	16.06	36.01
3	Ağırlık (gr)	22.39	11.24	3.75	7.4
	%	100	50.20	16.75	33.05
4	Ağırlık (gr)	22.95	10.66	3.06	9.23
	%	100	46.45	13.33	40.22
5	Ağırlık (gr)	21.94	10.95	3.83	7.16
	%	100	49.91	17.45	32.64
6	Ağırlık (gr)	22.23	10.61	3.47	8.15
	%	100	47.73	15.61	36.66
Ağırlıkça Ort. (%)		100	48.32	16.05	35.63
Hacimce Ort. (%)		100	37.19	12.34	27.97

Tablo 5.10. Ek sargılı GFRP profil lif oranları (74 mm)

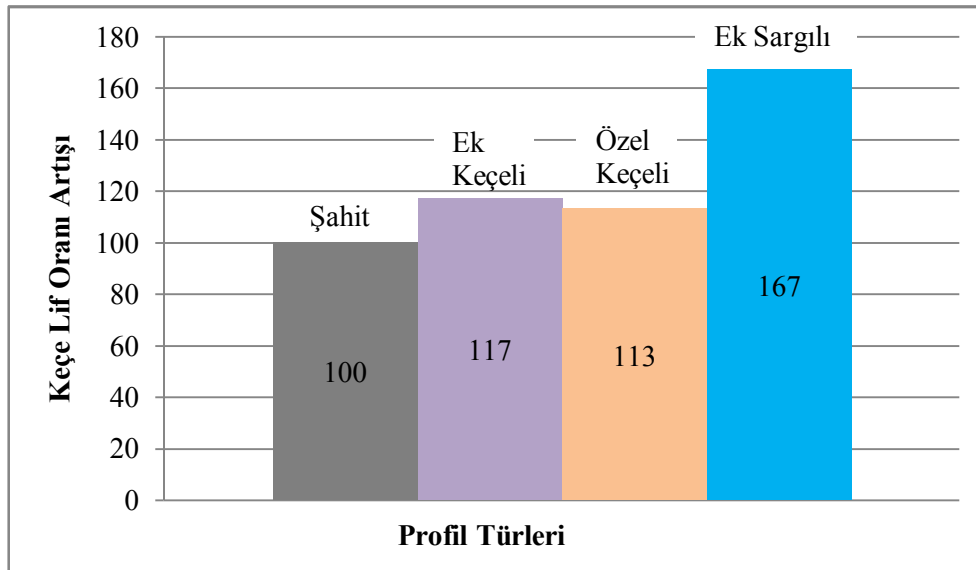
Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	39.11	16.63	7.05	15.43
	%	100	42.52	18.03	39.45
2	Ağırlık (gr)	40.2	16.27	6.84	17.09
	%	100	40.47	17.01	42.51
3	Ağırlık (gr)	38.7	15.85	7.25	15.6
	%	100	40.96	18.73	40.31
4	Ağırlık (gr)	39.65	16.74	7.31	15.6
	%	100	42.22	18.44	39.34
5	Ağırlık (gr)	40.04	16.71	7.16	16.17
	%	100	41.73	17.88	40.38
6	Ağırlık (gr)	39.73	16.36	7.17	16.2
	%	100	41.18	18.05	40.78
Ağırlıkça Ort. (%)		100	41.51	18.02	40.46
Hacimce Ort. (%)		100	27.44	11.63	60.93

GFRP profillerin ağırlıkça boyuna lif oranı %48.14, keçe lif oranı ise ağırlıkça %14.86, hacimce lif oranları boyuna %34.8, keçe lif oranı %10.74 bulunmuştur. Kumlu GFRP numunelerin ağırlıkça boyuna lif oranı %49.37, ağırlıkça keçe lif oranı %11.95, aynı numunelerin hacimce lif oranları değerlendirildiğinde, boyuna lif oranı hacimce %42.13, keçe lif oranı hacimce %10.21 olarak bulunmuştur.

Keçesi Artırılmış Ek Keçeli profillerin ağırlıkça boyuna lif oranı %48.50, keçe ağırlıkça lif oranı %17.36, Hacimsel değerlendirmede boyuna lif oranı hacimce %31.64 ve keçe lif oranı hacimce %11,32'dir. Ek Keçeli Kumlu numunelerin ağırlıkça boyuna lif oranı %43.11, keçe lif oranı ağırlıkça %17.08, aynı numunelerin hacimce lif oranları değerlendirildiğinde, hacimce boyuna lif oranı %34.63 ve keçe lif oranı hacimce %13.67'dir.

Özel keçeli GFRP profillerin ağırlıkça boyuna lif oranı %48.61, ağırlıkça keçe lif oranı %16.79, hacimce boyuna lif oranı %33.22 ve keçe lif oranı hacimce %11.47 olarak tespit edilmiştir. Özel keçeli Kumlu GFRP profillerin ağırlıkça boyuna lif oranı %48.32, ağırlıkça keçe lif oranı %16.05, hacimce boyuna lif oranı %37.19 ve keçe lif oranı hacimce %12.34'dür.

Fabrika üretiminin yanında laboratuarda yanal keçe miktarı 1 kat artırılan GFRP profillerin ağırlıkça boyuna lif oranı %41.51, keçe lif oranı ağırlıkça %18,02, boyuna lif oranı hacimce %27.44 ve hacimce keçe lif oranı %11,63 bulunmuştur. Böylece 74 mm kesitli profillerin keçe lif oranları çeşitli oranlarda artırılmış, tüm kesitteki miktarı Reçine yakma yöntemi ile belirlenmiş ve artan keçe miktarları tespit edilerek Şekil 5.7'de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 5.7. Profil keçe miktarları artış oranları (74 mm)

Böylece GFRP profil lif oranı (Şahit) 100 birim kabul edilerek yapılan karşılaştırmada bu profile göre Ek keçeli profilde %17 ve Özel keçeli profilde ise %13 oranında keçe lif miktarının arttığı tespit edilmiştir. Laboratuarda epoksi ile profil dış yüzeyine yapıştırılan 1 kat keçe sargısı ile bu artış oranı % 67'ye ulaşmıştır.

5.1.2.2. 74 mm kesitli numunelerin basınç deney sonuçları

Çalışmaların bu bölümünde 4-74-74 mm boyutlu GFRP kutu profiller kullanılarak hazırlanmış numunelerin basınç test sonuçları verilmiştir. Her numune grubu için 5 adet numune kullanılarak yapılan deneylerde ilk olarak üç dayanım sınıfında, 74x74 mm boyutlu küp Yalın beton sonuçları Tablo 5.11, GFRP profil özellikleri geliştirilerek yapılan testlerde lif oranı artırılmamış profiller kullanılarak üretilen Hibrit numune sonuçları Tablo 5.12, profil iç yüzeylerinin kumlanması ile beton aderansının artırıldığı ve Hibrit Kumlu olarak ifade edilen küp numunelerin sonuçları Tablo 5.13'te verilmiştir. Bunun yanı sıra GFRP profil keçe miktarının artırılmasıyla oluşturulan numunelerin sonuçları Tablo 5.14, Hibrit Ek Keçeli profil iç yüzeylerinin kumlanmasıyla oluşturulan numunelerin sonuçları Tablo 5.15, fabrika üretimi sırasında özel keçe sargısı kullanılarak oluşturulan numunelerin sonuçları Tablo 5.16, Hibrit Özel Keçeli numunelerin iç yüzeylerinin kumlanmasıyla oluşturulan numunelerin basınç test sonuçları Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.11. Yalın beton numune basınç test sonuçları (74 mm)

	C20		C30		C40	
	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	186100	31	207700	34	280900	46
2	170900	28	227000	37	275000	45
3	184000	30	223500	37	271400	45
4	190400	31	210400	35	280500	46
5	172400	28	231100	38	307300	49
Ort.	180760	29.7	198833	36.2	257983	46.2

Tablo 5.12. Hibrit basınç test sonuçları (74 mm)

	C20		C30		C40	
	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	190400	35	229200	42	267100	49
2	208300	38	211400	39	277800	51
3	228700	42	231900	42	260600	48
4	197100	36	250400	46	292100	53
5	181300	33	225700	41	289300	53
Ort.	201160	36.7	211467	42.0	260250	50.7

Tablo 5.13. Hibrit Kumlu basınç test sonuçları (74 mm)

	C20		C30		C40	
	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	217100	40	229600	41.9	280400	51.2
2	188000	34	227400	41.5	263500	48.1
3	225000	41	238700	43.6	270500	49.4
4	218690	40	220750	40.3	296300	54.1
5	196780	36	230240	42.0	302500	55.2
Ort.	209114	38.2	229338	41.9	282640	52

Tablo 5.14. Hibrit Ek Keçeli basınç test sonuçları (74 mm)

	C20		C30		C40	
	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	213200	39	268900	49	277400	51
2	223500	41	256600	47	267100	49
3	188000	34	217300	40	314800	57
4	229300	42	256500	47	265700	49
5	220200	40	238000	43	301000	55
Ort.	208767	39.2	208500	45.2	256383	52.1

Tablo 5.15. Hibrit Ek Keçeli+Kumlu basınç test sonuçları (74 mm)

	C20		C30		C40	
	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	214400	39	240100	44	303600	55
2	231700	42	245600	45	302800	55
3	193700	35	250900	46	262400	48
4	220900	40	247600	45	283000	52
5	219600	40	270800	49	299300	55
Ort.	203683	39.5	224383	45.8	290220	53.0

Tablo 5.16. Hibrit Özel Keçeli basınç test sonuçları (74 mm)

	C20		C30		C40	
	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	227900	42	243300	44.4	303570	55.4
2	214700	39	233700	42.7	296500	54.1
3	220570	40	260400	47.6	283040	51.7
4	218900	40	247800	45.3	279400	51.0
5	203400	37	253800	46.3	295680	54.0
Ort.	217094	39.6	247800	45.3	291638	53.3

Tablo 5.17. Hibrit Özel Keçeli Kumlu basınç test sonuçları (74 mm)

	C20		C30		C40	
	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	207600	38	257300	47.0	304770	55.7
2	213500	39	242780	44.3	274900	50.2
3	194500	36	238930	43.6	290390	53.0
4	220550	40	243600	44.5	280350	51.2
5	203390	37	248300	45.3	294030	53.7
Ort.	207908	38.0	246182	45.0	288888	52.8

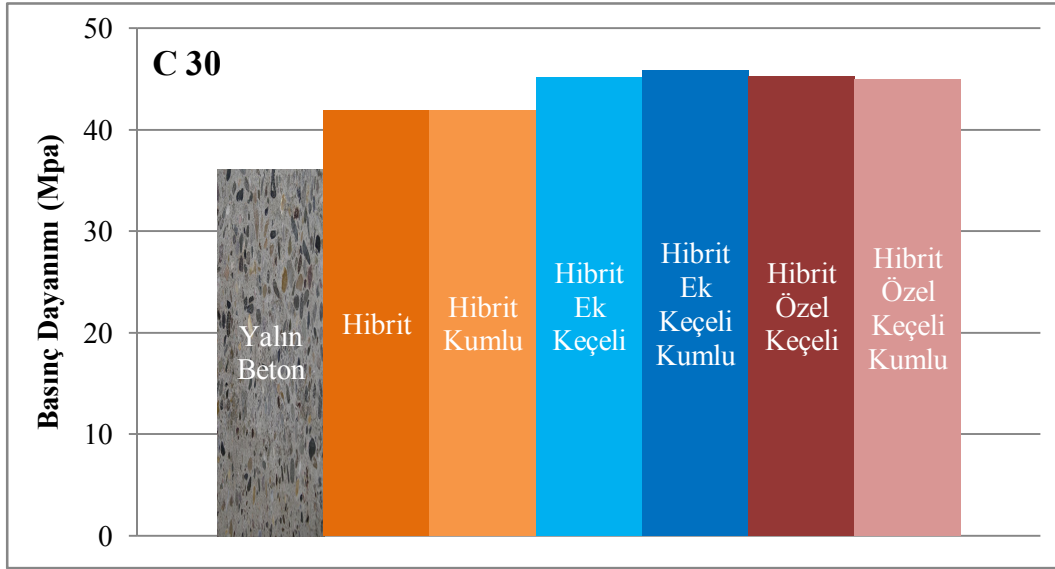
Yalın betonların C20 dayanım sınıfında ortalama basınç dayanımı 29.7 MPa, C30 dayanım sınıfında 36.2 MPa ve C40 dayanım sınıfında ise 46.2 MPa bulunmuştur. Hibrit numunelerin basınç dayanımları C20 dayanım sınıfında 36.7 MPa, C30 dayanım sınıfında 42.0 MPa ve C40 dayanım sınıfında 50.7 MPa, Hibrit Kumlu numunelerin C20 dayanım sınıfındaki basınç dayanımı 38.2 MPa, C30 dayanım sınıfında 41.9 MPa ve C40 dayanım sınıfında 52.0 MPa olarak bulunmuştur. Hibrit Ek Keçeli numunelerin C20 dayanım sınıfında 39.2 MPa, C30 dayanım sınıfında 45.2 MPa ve C40 dayanım sınıfında ise 52.1 MPa olarak bulunmuştur. Hibrit Ek

Keçeli+Kumlu numunelerin basınç dayanımı C20'den başlayarak 39.5 MPa, C30 dayanım sınıfında 45.8 MPa ve C40 dayanım sınıfında 53.0 MPa olarak bulunmuştur. Hibrit Özel Keçeli numunelerin C20 dayanım sınıfındaki basınç dayanımı 39.6 MPa, C30 dayanım sınıfında 45.3 MPa ve C40 dayanım sınıfında 53.3 MPa, Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunelerin C20 dayanım sınıfındaki basınç dayanımı 38.0 MPa, C30 dayanım sınıfında 45.0 MPa ve C40 dayanım sınıfında 52.8 MPa olarak tespit edilmiştir.

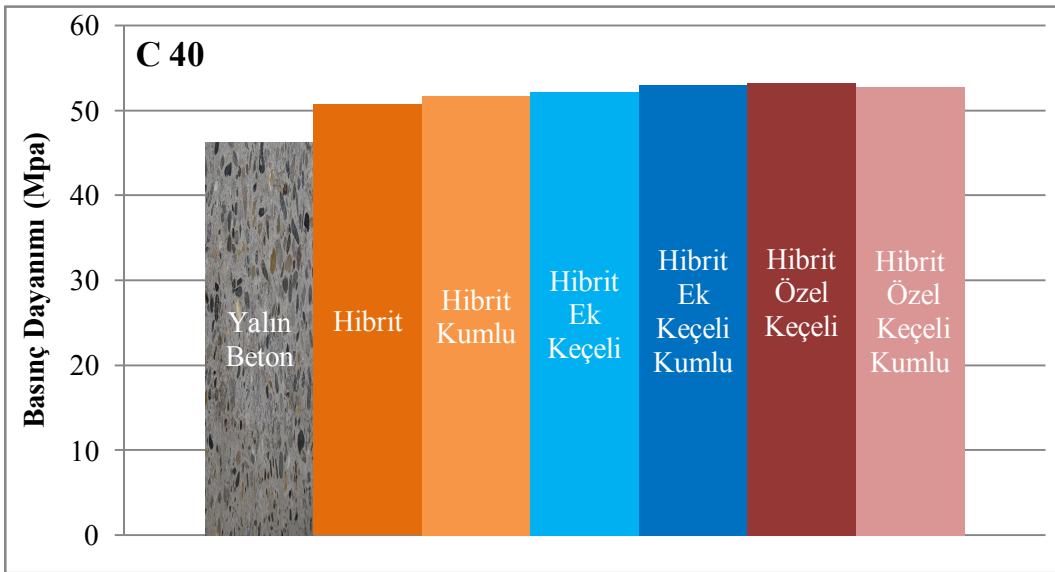
GFRP profillerde kullanılan keçe miktarının artırılması sonucu, GFRP profillere göre Özel keçelide (Kumlu ve Kumsuz) %13 ve Ek Keçelide (Kumlu ve Kumsuz) ise %17 oranında keçe miktarı artırılmış ve basınç dayanımına etkileri değerlendirilmiştir. Profil keçe miktarının artırılması ve iç yüzey kumlanmasıyla artan beton aderansının basınç dayanımına etkilerini belirlemek amacıyla yapılan testler sonucunda Yalın betondan başlamak üzere tüm numune türlerinin birlikte değerlendirildiği karşılaştırma grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10).



Şekil 5.8. GFRP profil özelliklerinin basınç dayanımına etkileri (C20)



Şekil 5.9. GFRP profil özelliklerinin basınç dayanımına etkileri (C30)



Şekil 5.10. GFRP profil özelliklerinin basınç dayanımına etkileri (C40)

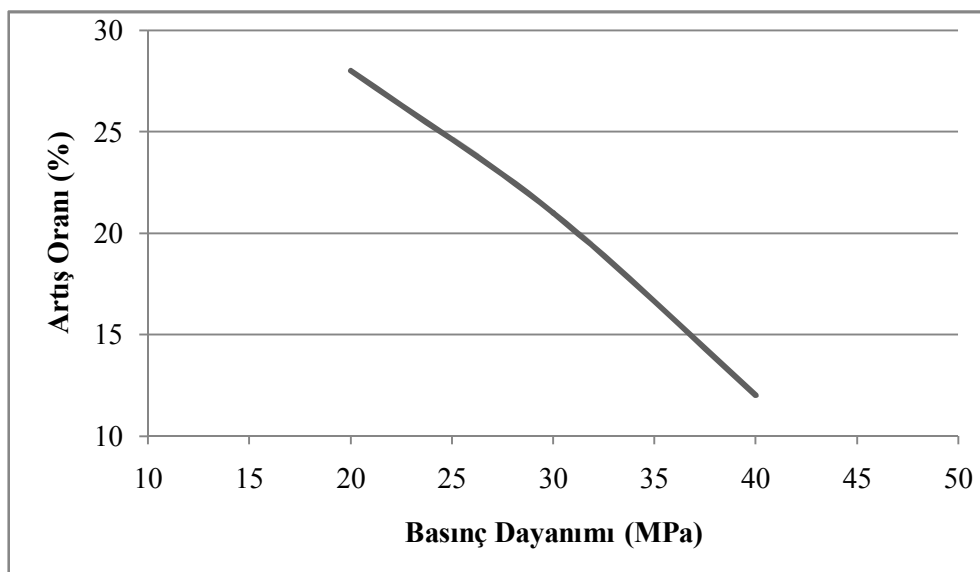
C20 grubundaki sonuçlarda Yalın beton basınç dayanımına göre Hibrit Şahit numune %23.6, Hibrit Şahit Kumlu %28.6, Hibrit Ek Keçeli %32, Hibrit Ek Keçeli Kumlu %32.9, Hibrit Özel Keçeli %33.3 ve Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunelerin ise %28 oranında basınç dayanımı artmıştır. Hibrit Şahit numuneye göre keçe miktarları artırılan diğer Hibrit numunelerin basınç dayanımlarında büyük artışlar olmadığı tespit edilmiştir.

C30 dayanım sınıfında Yalın beton basınç dayanımına göre Hibrit Şahit numune %16, Hibrit Şahit Kumlu %15.7, Hibrit Ek Keçeli %24.9, Hibrit Ek Keçeli Kumlu %26.5, Hibrit Özel Keçeli %25 ve Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunelerin ise %24.3 oranında basınç dayanımı artmıştır.

C40 dayanım sınıfı sonuçlarında Yalın beton basınç dayanımına göre Hibrit Şahit numune %9, Hibrit Şahit Kumlu %11.8, Hibrit Ek Keçeli %12, Hibrit Ek Keçeli Kumlu %14, Hibrit Özel Keçeli %14.6 ve Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunelerin ise %13.5 oranında basınç dayanımı artmıştır.

74 mm kesitli numuneler ile yapılan tüm dayanım sınıflarındaki basınç deney sonuçları incelendiğinde; Yalın betona göre Hibrit numune dayanımında önemli ölçüde dayanım artışları olurken, farklı Hibrit numuneler arasında küçük farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla profil keçe miktarı artmasının malzeme basınç dayanımını kayda değer oranda etkilemediği, böylece sonraki deney gruplarında aynı keçe oranına sahip profiller üzerinde basınç deneyleri yapılmıştır.

Bunun yanı sıra farklı dayanım sınıfındaki numuneler incelendiğinde ön deneylerde olduğu gibi basınç dayanım sınıfı arttıkça Hibrit ve Yalın beton küp numuneler arasındaki dayanım farkının azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.11).

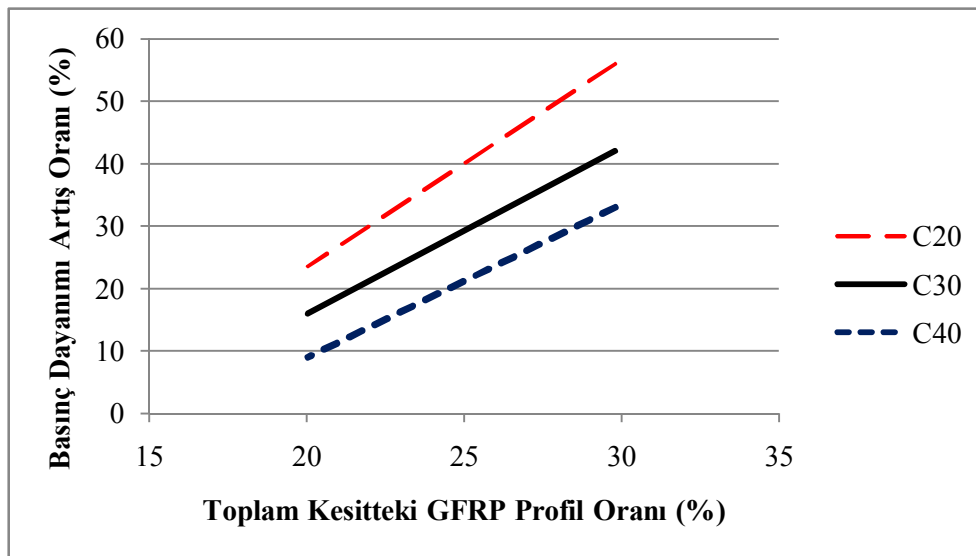


Şekil 5.11. 74 mm kesitli Hibrit numunelerdeki basınç dayanımı artış oranları

Buna göre basınç dayanımı 20 MPa olan numunelerde Yalın betona göre Hibrit numunelerin artış oranı yaklaşık %28'den başlamakta dayanım sınıfı arttıkça artış oranı düşmekle birlikte 30 MPa dayanımda %21 ve 40 MPa dayanımda ise %12 oranında artış olduğu belirlenmiştir.

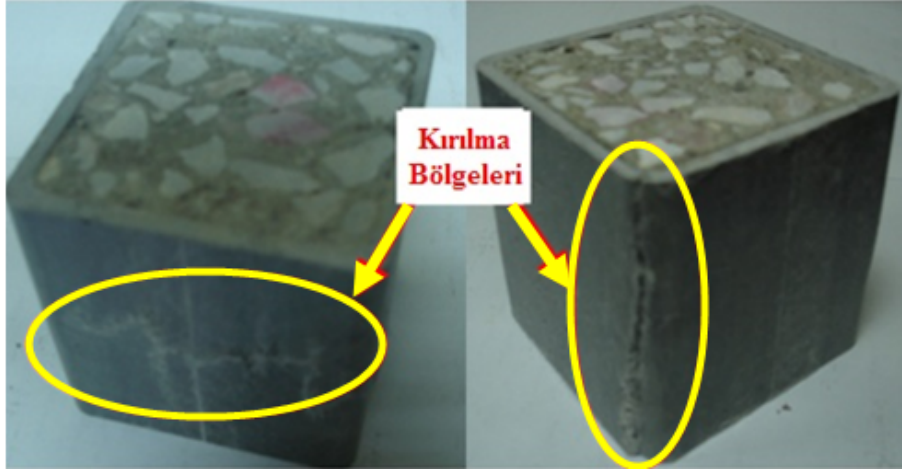
Bu gruptaki Hibrit numunelerin toplam kesitinde temsil edilen GFRP profil oranının belirlenmesinde, profil et kalınlıkları 4 mm ve kesit boyutları 74 mm olan numunelerde, toplam numune kesit alanı 54.56 cm² ve kesitteki profil alanı ise 11.2 cm² olup, toplam kesitte profil oranı %20.5'tir. Yalın beton numunelere göre Hibrit malzeme tasarımında (Farklı beton dayanım sınıflarında) %9-23 arasında basınç dayanım artışı gerçekleşirken, bu artışa tüm kesitte %20.04 oranında kullanılan GFRP profil ile ulaşılmıştır.

74 mm kesitli numune sonuçları incelendiğinde, ön basınç deneylerinde 6 mm bu gruptaki numunelerde ise 4 mm kesitli GFRP profiller kullanılmış, farklı dayanım sınıflarında toplam kesitte temsil edilen GFRP profil oranına göre Yalın beton ile Hibrit numunelerdeki dayanım artış oranını ifade eden grafik Şekil 5.12'de verilmiştir. Buna göre her üç beton dayanım sınıfında toplam kesitteki profil oranı arttıkça dayanım artış oranının da artmakta olduğu görülmektedir. Ayrıca diğer deney sonuçlarında olduğu gibi yine en fazla artış oranları düşük dayanımlarda olmakla birlikte dayanım sınıfı arttıkça artış miktarı azalmaktadır.



Şekil 5.12. Toplam kesitteki profil oranına göre basınç dayanımı artış oranları

Bu deney grubunda yapılan deneyler sonrasında Hibrit basınç numunesinin kırılma şeklini ve bölgelerini gösteren, deforme olmuş basınç küp numunesinin deney sonrası hali Şekil 5.13’de görülmektedir. GFRP profillerin genellikle köşe noktalarından veya kenar yüzeyde kayma çatlakları ile deforme olduğu ve içerisindeki betonunda kırıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.13. Prestre kırılmış Hibrit basınç numuneleri

5.1.3. 100 mm kesitli numunelerin basınç deneyi sonuçları

Bu bölümde üç basınç dayanım sınıfında hazırlanan, 100x100 mm kesitli Hibrit ve Yalın beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç deneyi sonuçları verilmiştir. Test yapılan numunelerin Gerilme–Birim Deformasyon grafikleri, Basınç dayanım tabloları verilmiş ve aynı türdeki numuneler ile grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

5.1.3.1. Basınç deneyi sonuçları (C20)

C20 basınç dayanım sınıfında üretilen 100 mm boyutlu küp Yalın beton (Tablo 5.18) ve Hibrit küp numunelerin (Tablo 5.19) Birim ağırlık ve Basınç dayanımları tespit edilmiştir.

Tablo 5.18. C20 Yalın beton basınç deneyi sonuçları (100 mm)

Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
1	211700	21.17	2.34
2	213100	21.31	2.28
3	206800	20.68	2.29
4	229300	22.93	2.32
5	214900	21.49	2.31
Ortalama	215200	21.52	2.31

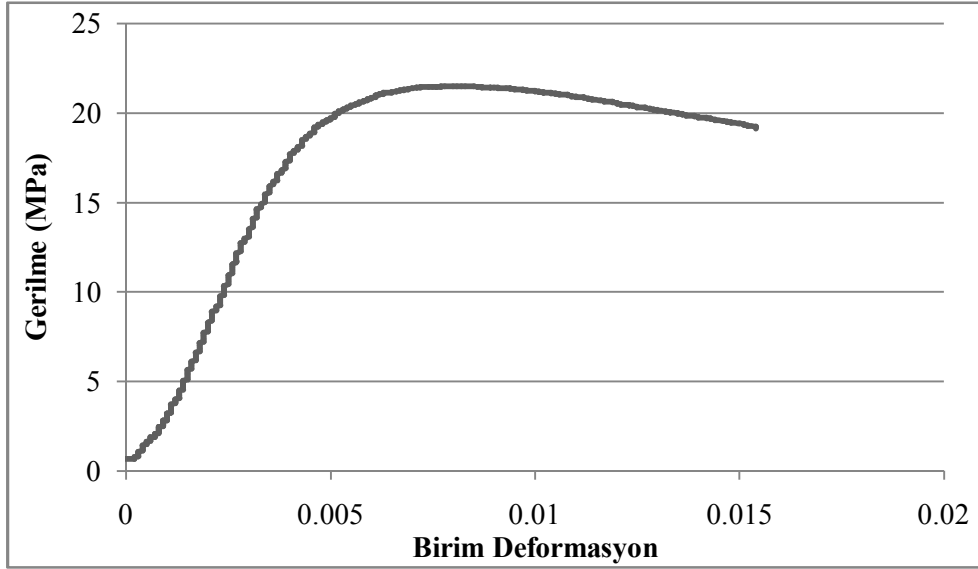
C20 Yalın beton numunelerin ortalama kırılma yük değeri 215200 N, basınç dayanımı 21.52 Mpa ve Birim ağırlık değeri ise 2.31 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Tablo 5.19. Hibrit Basınç deneyi sonuçları (C20).

Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
1	357400	35.74	2.23
2	385700	38.57	2.21
3	356700	35.67	2.24
4	383800	38.38	2.22
5	384400	38.44	2.21
Ortalama	373600	37.36	2.22

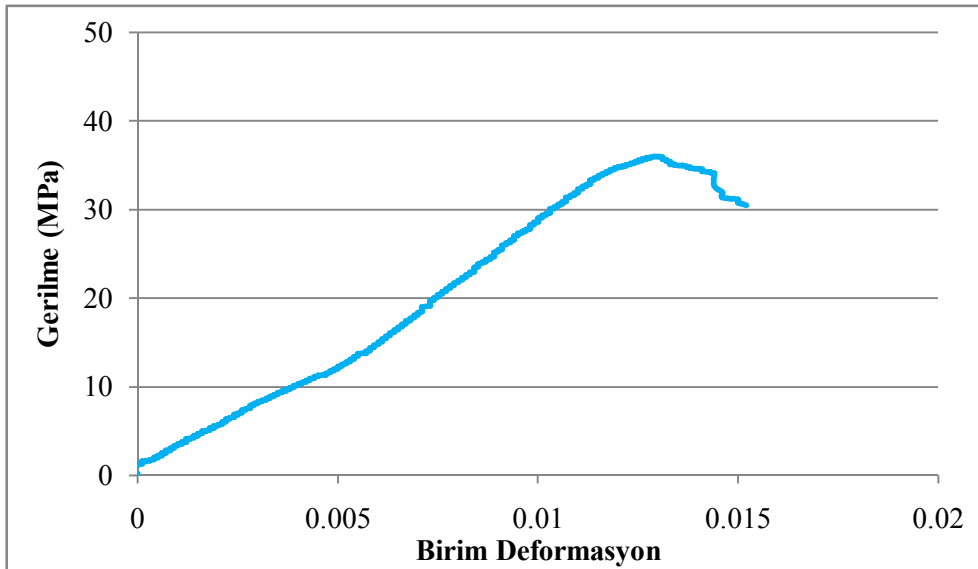
Buna göre C20 Hibrit numunelerin ortalama kırılma yük değeri 373600 N, basınç dayanımı 37.36 Mpa ve Birim ağırlık değeri ise 2.22 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

C20 dayanım sınıfında ve Yalın beton grubunda üretilen 5 adet basınç numunesini temsil eden örnek numuneye ait Gerilme–Birim Deformasyon grafiğı Şekil 5.14, Hibrit küp numuneleri temsil eden numunenin Gerilme–Birim Deformasyon grafiğı Şekil 5.15’de verilmiştir. Diğer numunelere ait Gerilme–Birim Deformasyon grafikleri ise Ekler kısmında verilmiştir.



Şekil 5.14. C20 Yalın beton Gerilme-Birim Deformasyon grafiği

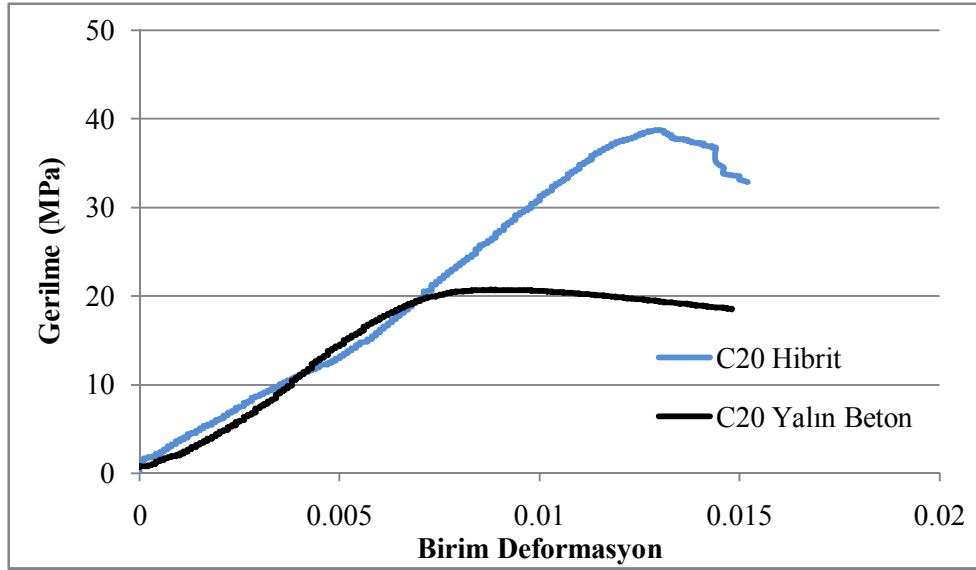
C20 basınç dayanım sınıfında 100 mm'lik küp numuneler ile yapılan deneyler neticesinde Yalın beton numune Gerilme-Birim Deformasyon grafikleri incelendiğinde 20 MPa gerilme değerine kadar lineer bir davranış gösterdiği ve kırılma anında %1.6 birim deformasyona sahip oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 5.15. C20 Hibrit numunelerin Gerilme-Birim Deformasyon grafiği

Hibrit küp numunelerin Gerilme-Birim Deformasyon grafikleri incelendiğinde ortalama basınç dayanımı yaklaşık 37 MPa ve kırılma anında yaklaşık %1.3 birim

deformasyona sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre Yalın betonların basınç dayanımı aynı kesit özelliklerine sahip Hibrit numunelerin basınç dayanımına göre %74 oranında arttığı tespit edilmiştir. Şekil 5.16'da C20 beton sınıfında Hibrit ve Yalın beton numuneleri temsil eden Gerilme–Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 5.16. C20 Hibrit ve Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılması

Yalın beton küp numunelerin birim deformasyonu % 1.6 çıkarken Hibrit numunelerde ise bu değer %1.3 civarındadır. Yine Hibrit numuneler betonu koruma, kalıcı kalıp ve yalıtım işlevi görmesiyle birlikte Yalın betonlarda Birim Ağırlık değeri 2.31 gr/cm^3 iken bu Hibrit numunelerde 2.22 gr/cm^3 'tür. Böylece Hibrit malzemenin basınç dayanımı artarken aynı zamanda %4 oranında hafiflemektedir.

5.1.3.2. Basınç deneyi sonuçları (C30)

100 mm kesit boyutlarına sahip ikinci numune türü ise C30 basınç dayanım sınıfında hazırlanmıştır. Bu sınıfta üretilen Yalın beton (Tablo 5.20) ve Hibrit numunelerin (Tablo 5.21) Birim ağırlık ve Basınç dayanımları belirlenmiştir.

Tablo 5.20. Yalın beton basınç deneyi sonuçları (C30)

Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
1	280800	28.08	2.31
2	325000	32.5	2.35
3	299800	29.95	2.32
4	302800	30.28	2.29
5	323100	32.31	2.32
Ortalama	306200	30.62	2.32

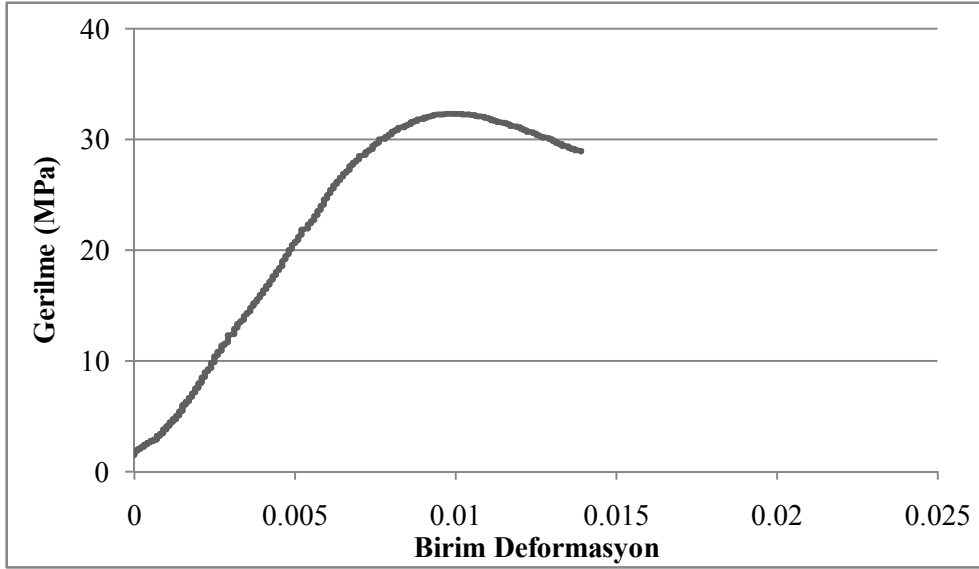
Yalın beton numune sonuçlarının ortalama değeri alınarak gerekli sonuçlar bulunmuştur. Buna göre Yalın beton numunelerin ortalama kırılma yük değeri 306200 N, basınç dayanımı 30.62 Mpa ve Birim Ağırlık değeri ise 2.32 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Tablo 5.21. Hibrit basınç deneyi sonuçları (C30)

Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
1	436800	43.68	2.24
2	476600	47.66	2.21
3	428600	42.86	2.24
4	491400	49.14	2.23
5	488200	48.82	2.23
Ortalama	464300	46.43	2.23

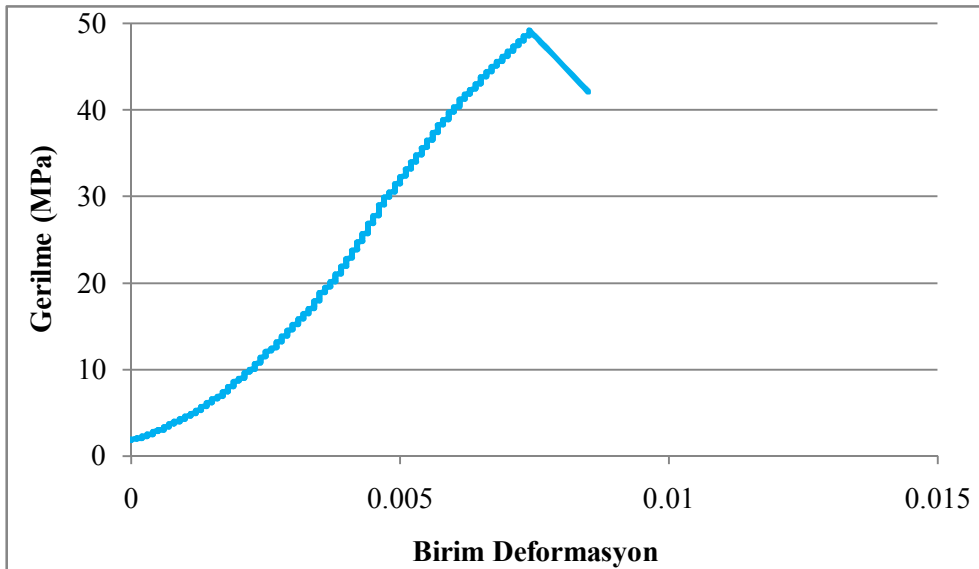
Buna göre Hibrit numunelerin ortalama kırılma yük değeri 464300 N, Basınç dayanımı 46.43 Mpa ve Birim ağırlık değeri 2.23 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

C30 Yalın beton küp numunelerine ait örnek Gerilme–Birim Deformasyon grafiğı Şekil 5.17, Hibrit küp numuneleri temsil eden Gerilme–Birim Deformasyon grafiğı Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.17. Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiği (C30)

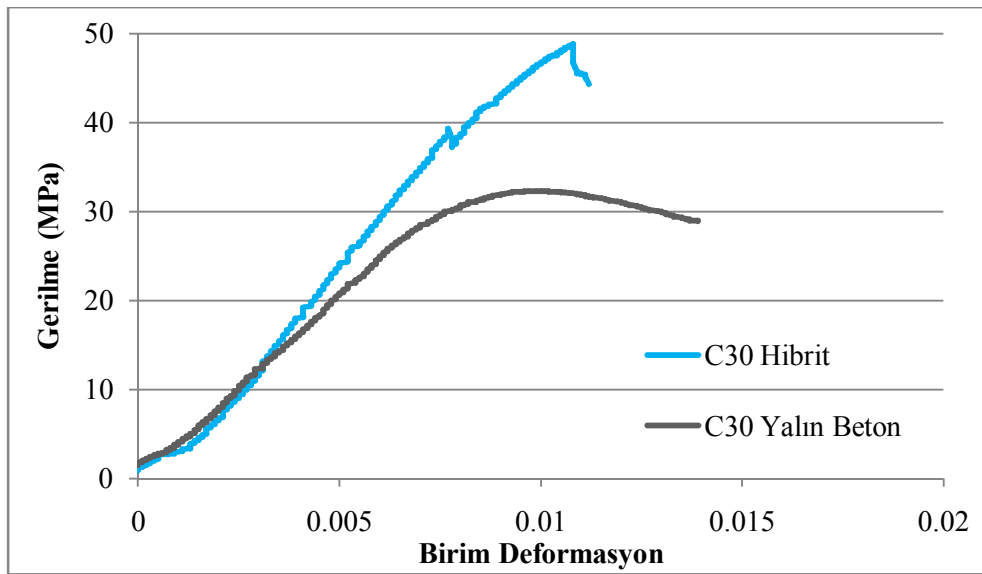
C30 basınç dayanım sınıfında Hibrit küp numuneler ile yapılan deneyler neticesinde Gerilme-Birim Deformasyon grafikleri incelendiğinde kırılma anında yaklaşık %1.8 birim deformasyona sahip oldukları ve maksimum yüke kadar lineer davrandığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.18. Hibrit Gerilme–Birim Deformasyon grafiği (C30)

Hibrit küp numunelerin (C30) ile Gerilme–Birim Deformasyon grafikleri incelendiğinde kırılma anında yaklaşık %1.0 birim deformasyon yaparken, ani olarak kırıldıkları belirlenmiştir.

C30 beton sınıfında Hibrit ve Yalın beton numuneleri temsil eden Gerilme-Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılmıştır (Şekil 5.19). Yalın beton küp numunelerin birim deformasyonu %1.5 çıkarken Hibrit numunelerde ise bu değer %1.0 civarında olup dayanım arttıkça malzeme gevrekleşmiştir. Bu sonuçlara göre Yalın betonların basınç dayanımına göre aynı kesit özelliklerine sahip Hibrit numunelerin basınç dayanımı %52 oranında artmıştır. Yalın betonlarda Birim Ağırlık değeri 2.32 gr/cm^3 iken, Hibrit numunelerde bu değer 2.23 gr/cm^3 olarak bulunmuş ve böylece malzemenin basınç dayanımı artarken yine %4 oranında hafiflemektedir.



Şekil 5.19. Hibrit ve Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılması (C30)

5.1.3.3. Basınç deneyi sonuçları (C40)

C40 basınç dayanım sınıfında üretilen Yalın beton numunelerin Birim ağırlık ve Basınç dayanımları Tablo 5.22, Hibrit numunelerin Birim ağırlık ve Basınç dayanımları Tablo 5.23'te verilmiştir.

Tablo 5.22. Yalın beton basınç deneyi sonuçları (C40)

Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
1	388100	38.81	2.38
2	449000	44.90	2.36
3	450000	45.00	2.34
4	458300	45.83	2.35
5	389900	38.99	2.35
Ortalama	427100	42.71	2.36

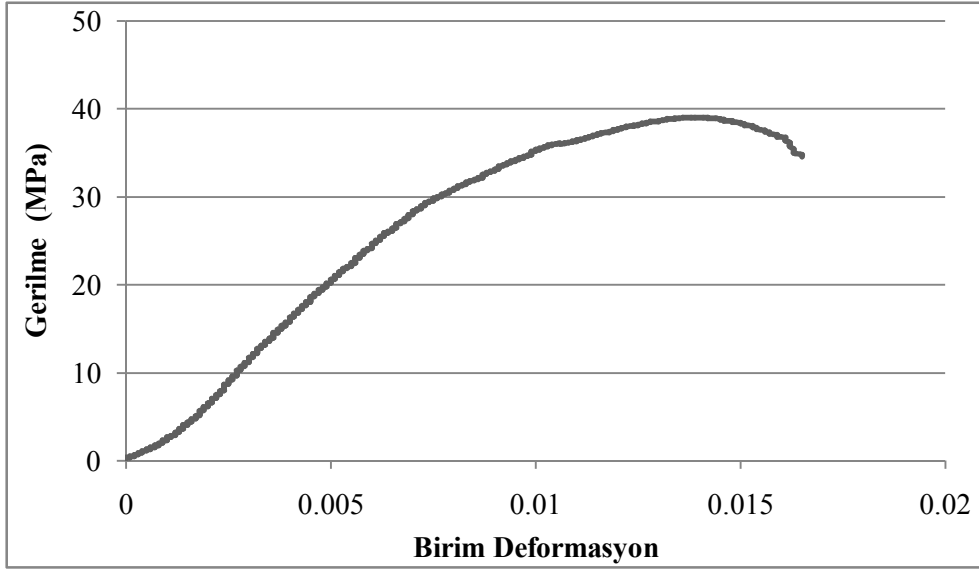
Yalın beton numune sonuçlara göre Yalın beton numunelerin ortalama kırılma yük değeri 427100 N, basınç dayanımı 42.71 Mpa ve Birim ağırlık değeri ise 2.36 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Tablo 5.23. Hibrit basınç deneyi sonuçları (C40)

Numune	Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
1	519900	51.99	2.26
2	521200	52.12	2.25
3	515500	51.55	2.25
4	476000	47.60	2.26
5	520500	52.05	2.28
Ortalama	510600	51.06	2.26

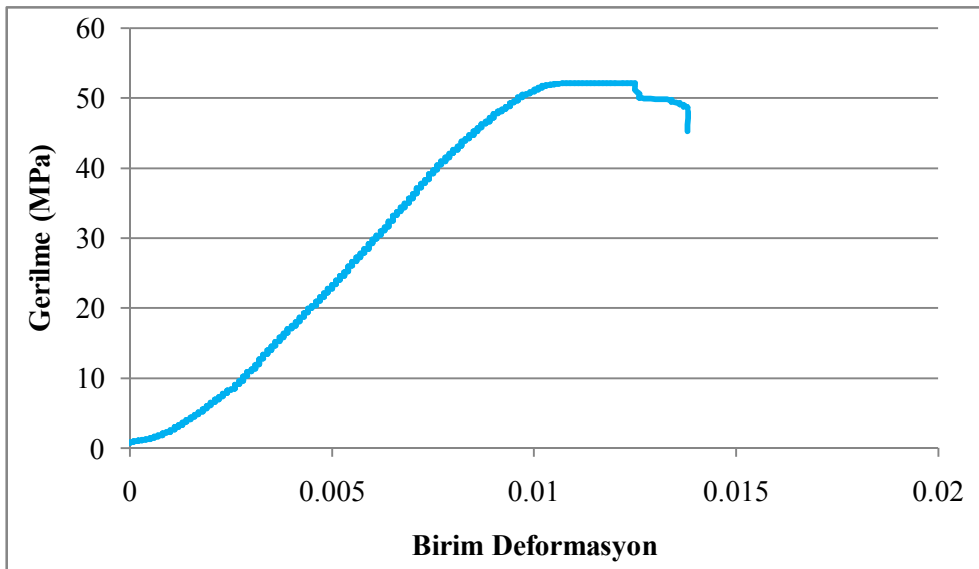
Hibrit küp numune sonuçlarına göre kırılma yük değeri 510600 N, basınç dayanımı 51.06 Mpa ve Birim ağırlık değeri ise 2.26 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

C40 Yalın beton küp numunelere ait örnek Gerilme–Birim Deformasyon grafiğı Şekil 5.20’da, Hibrit küp numunelere ait örnek Gerilme–Birim Deformasyon grafiğı Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.20. Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiği (C40)

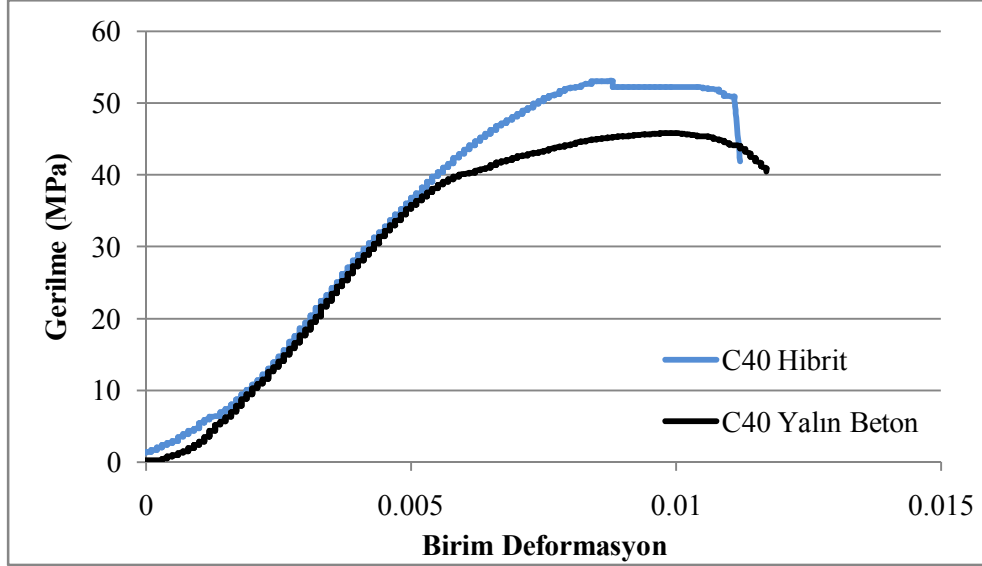
C40 basınç dayanım sınıfında Yalın beton numunelerin Gerilme–Birim Deformasyon grafikleri incelendiğinde, basınç dayanımı yaklaşık 43 MPa iken kırılma anında %1.2 birim deformasyona sahip oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 5.21. Hibrit Gerilme–Birim Deformasyon grafiği (C40)

Hibrit küp numunelerin basınç dayanımı 51 MPa iken kırılma anında %1.4 birim deformasyona sahip oldukları tespit edilmiştir. C40 beton sınıfında Hibrit ve Yalın

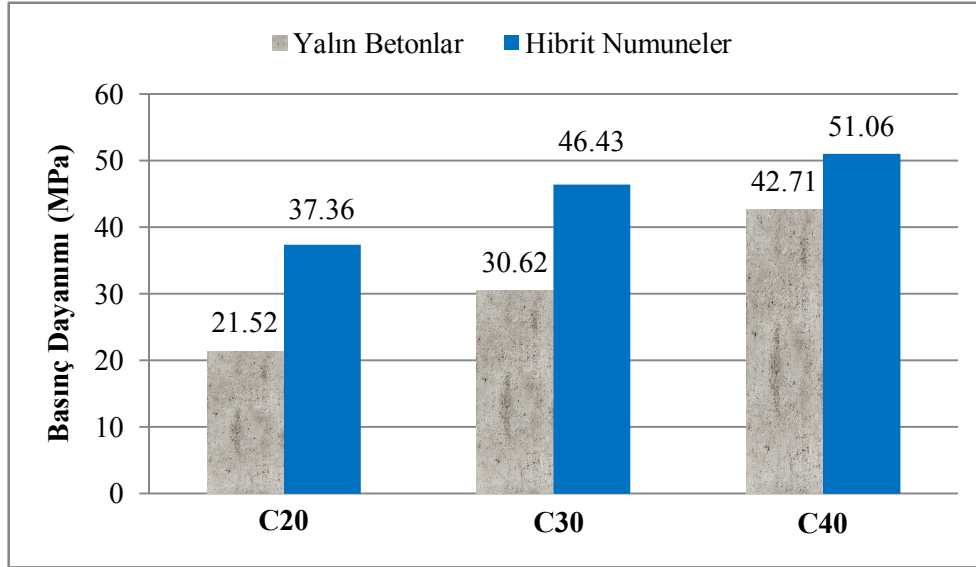
beton numuneleri temsil eden Gerilme–Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.22. Hibrit ve Yalın beton Gerilme–Birim Deformasyon grafiklerinin karşılaştırılması (C40)

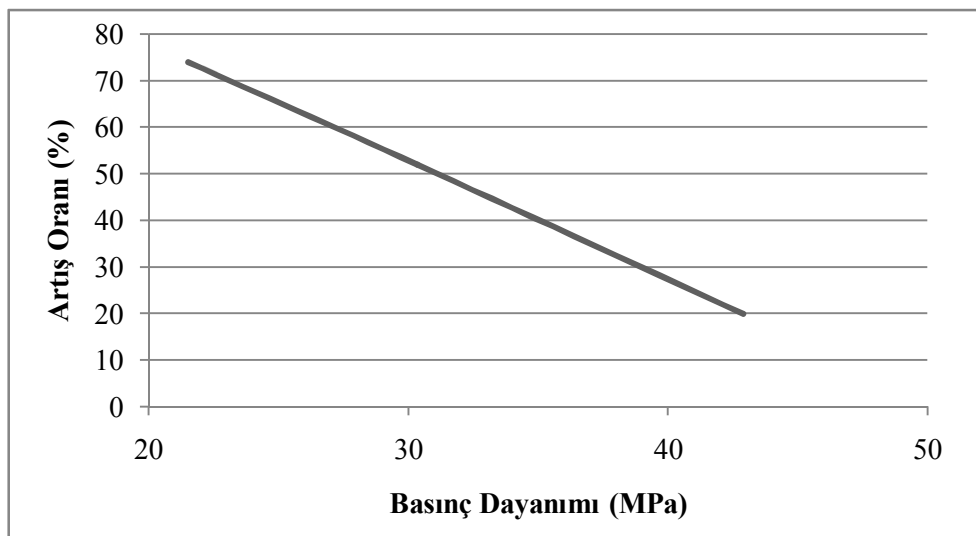
Bu sonuçlara göre Yalın betonların basınç dayanımına göre aynı kesit özelliklerine sahip Hibrit numunelerin basınç dayanımını %20 oranında artmıştır. Yalın betonlarda Birim Ağırlık değeri 2.36 gr/cm^3 iken bu değer Hibrit numunelerde 2.26 gr/cm^3 olarak bulunmuş ve böylece malzemenin basınç dayanımı %20 oranında artarken malzeme %5 oranında hafiflemiştir.

Şekil 5.23'de tüm dayanım sınıfında hazırlanan Hibrit ve Yalın beton küp numunelerin basınç dayanım artışını ifade eden grafik görülmektedir. Her basınç dayanım türünde Hibrit numuneler bulunduğu sınıfın bir üst dayanım sınıfındaki Yalın beton basınç dayanımlarından dahi yüksek değerlere ulaştığı ilgili grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 5.23. Beton basınç dayanımlarının karşılaştırılması (100 mm)

Tüm basınç dayanımı sınıfındaki numuneler incelendiğinde basınç dayanım sınıfı arttıkça Hibrit ve Yalın beton küp numuneler arasındaki dayanım farkının azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.24). Buna göre basınç dayanımı ortalama 22 MPa olan numunelerde Yalın beton numunelere göre Hibrit numunelerin artış oranı %74'lerden başlamakta dayanım sınıfı büyüdükçe artış oranı düşmekte ve 43 MPa dayanımda %20 artış oranına düşmektedir. Bu beton basınç dayanımı arttıkça Hibrit numunelerdeki kompozit profil etkisinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 5.24. Basınç dayanım artış oranları (100 mm)

Bu gruptaki basınç deneylerinde Hibrit numunelerin toplam kesitinde temsil edilen GFRP profil oranının belirlenmesinde, profil et kalınlıkları 3.85 mm ve kesit boyutları 100 mm olan numunelerde, toplam numune kesit alanı 100 cm^2 ve kesitteki profil alanı ise 14.80 cm^2 olup, toplam kesitte profil oranı %14.8'dir. Yalın beton numunelere göre Hibrit malzeme tasarımında (Farklı beton dayanım sınıflarında) %20-74 arasında basınç dayanım artışı gerçekleşirken, bu artışa tüm kesitte %14.8 oranında kullanılan GFRP profil ile ulaşılmıştır.

Şekil 5.25'de 100 mm'lik Hibrit küp basınç numunelerine ait basınç deneyi sonrasında deforme olmuş numune görülmektedir. GFRP profiller yine köşe noktaları ve keçe liflerinin kopması sonucu deforme olmaktadır.



Şekil 5.25. Basınç deneyi sonrası deforme olmuş Hibrit numune

5.2. Eğilme Deneyi Sonuçları

Eğilme deneylerinde Yalın beton, boş GFRP profil ve Hibrit olmak üzere üç farklı kombinasyonda numuneler test edilmiştir. $45 \times 45 \text{ mm}$, $74 \times 74 \text{ mm}$ kesitli ve 500 mm uzunluğundaki kiriş numunelere 3 noktalı, $100 \times 100 \text{ mm}$ kesitli ve 1500 mm uzunluğundaki kirişlere 4 noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Deneyler sonrasında her deneye ait yük-sehim grafikleri ile birlikte eğilme yükü, eğilme dayanımı ve kırılma tokluk değerleri hesaplanarak tablolar halinde verilmiştir.

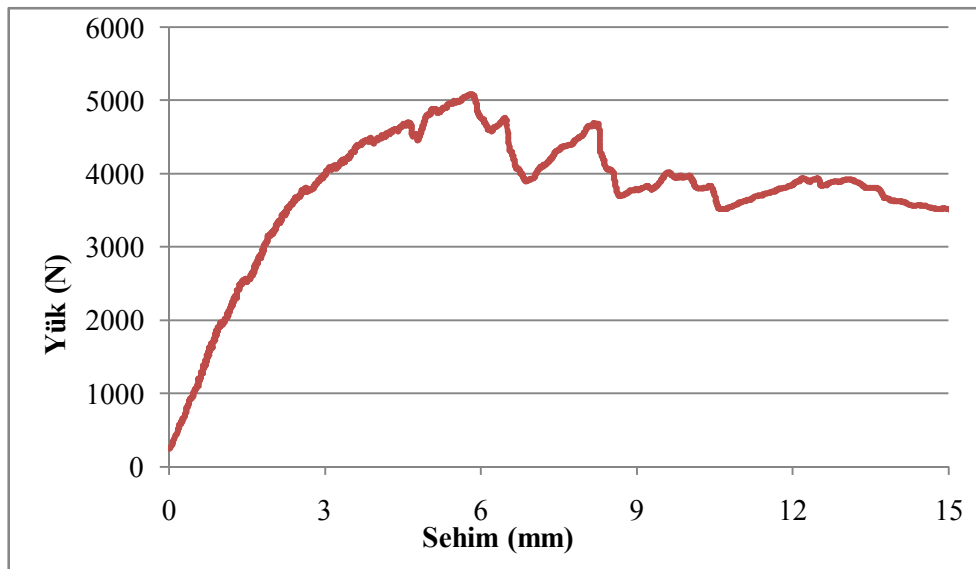
5.2.1. Eğilme ön deney sonuçları

Bu bölümde üç basınç dayanım sınıfında hazırlanan, 45x45 mm kesitli Yalın beton, boş GFRP profil ve Hibrit kirişler üzerinde gerçekleştirilen üç noktalı eğilme deneyi sonuçları verilmiştir. Tablo 5.24'te 500 mm uzunluğunda, 400 mm mesnet açıklığında boş GFRP profiller ile gerçekleştirilmiş eğilme deneyi sonuçları görülmektedir.

Tablo 5.24. Boş profiller eğilme ön deney sonuçları

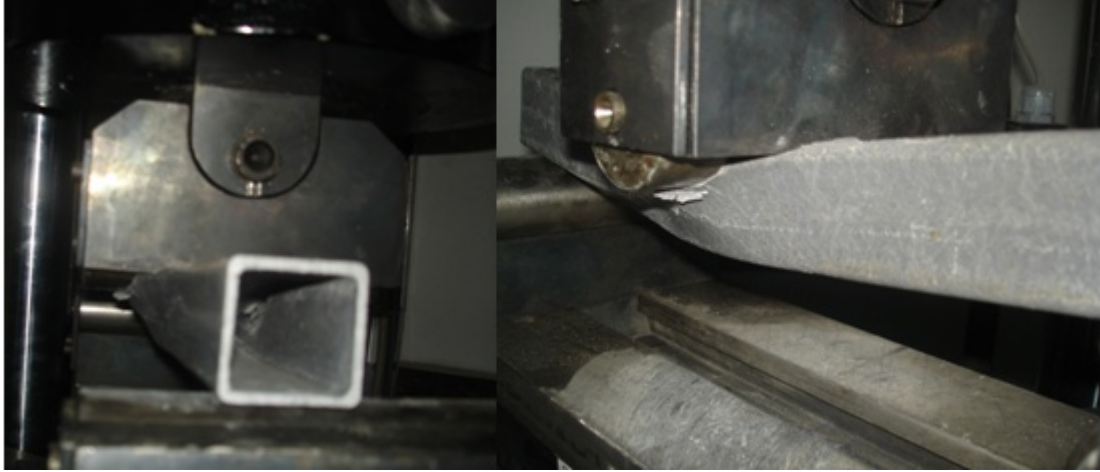
Numune No	Eğilme Yüğü (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Kırılma Tokluğu (Nmm)
Boş Profil 1	5283	64.1	56603
Boş Profil 2	5108	61.9	54592
Boş Profil 3	5087	61.7	57527
Ortalama	5159	62.6	56241

Boş profillerin ortalama eğilme yüğü 5159 N, eğilme dayanımı 62.6 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 56241 Nmm bulunmuştur. Şekil 5.26'da eğilme ön deneyleri sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuş boş GFRP profilleri temsil eden örnek numuneye ait yük-sehim grafiğı görülmektedir.



Şekil 5.26. Boş profil eğilme ön deney grafiğı

Boş GFRP profillere ait eğilme grafikleri incelendiğinde, malzemenin tüm numunelerde yaklaşık 4000 N yük değerine kadar lineer davranış gösterdiği sonraki aşamalarda artan yük ile beraber profilde lokal kırılmaların gerçekleştiği fakat ani kopmaların olmadığı belirlenmiştir. Bu bölgesel kırılmaların özellikle köşe ve keçe liflerinden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.27).



Şekil 5.27. Boş profillerde ön eğilme deneyi

5.2.1.1. Eğilme ön deney sonuçları (C20)

C20 basınç dayanım sınıfında 3'er adet üretilen Yalın beton numune sonuçları Tablo 5.25, Hibrit numune test sonuçları Tablo 5.26'da verilmiştir.

Tablo 5.25. Yalın beton ön deney sonuçları (C20)

Numune No	Eğilme Yüğü (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
Yalın Beton 1	1212	7.98	460.8
Yalın Beton 2	1070	7.05	381.6
Yalın Beton 3	1036	6.82	470.9
Ortalama	1036	7.28	437.7

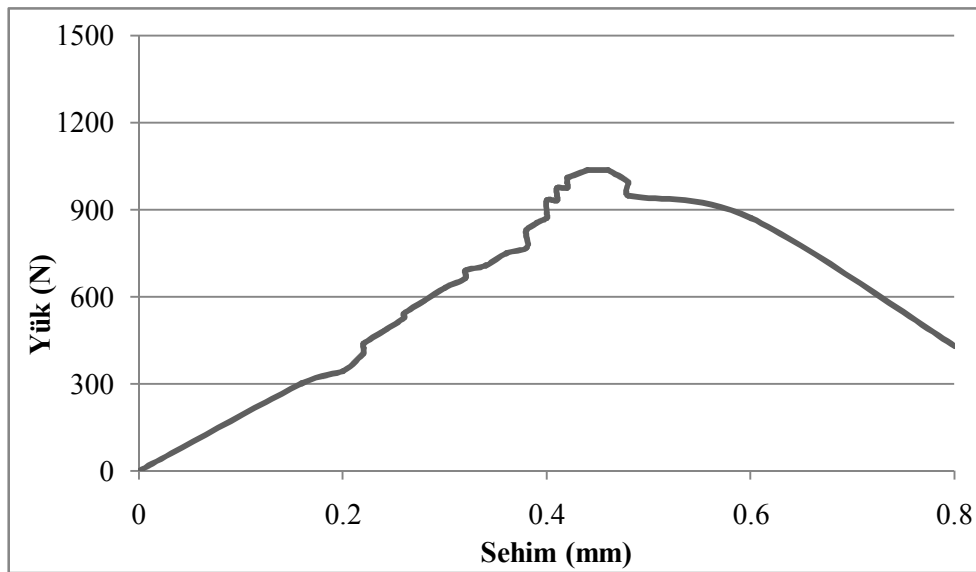
C20 beton sınıfında Yalın beton numuneler ile gerçekleştirilen eğilme ön deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 1036 N, eğilme dayanımı 7.28 N/mm^2 ve kırılma tokluğu 437.7 Nmm bulunmuştur.

Tablo 5.26. Hibrit eğilme ön deney sonuçları (C20)

Numune No	Eğilme Yükü (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm^2)	Kırılma Tokluğu (Nmm)
Hibrit 1	8741	57.55	78907
Hibrit 2	9060	59.65	75136
Hibrit 3	8972	59.07	106111
Ortalama	8924	58.76	86718

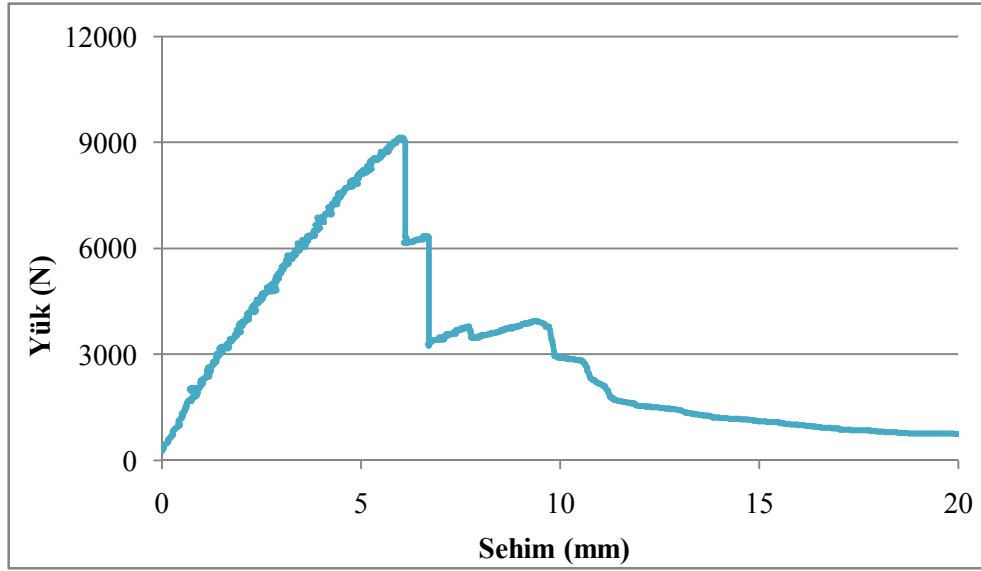
C20 beton sınıfında Hibrit numuneler ile gerçekleştirilen eğilme ön deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 8924 N, eğilme dayanımı 58.76 N/mm^2 ve kırılma tokluğu 86718 Nmm bulunmuştur.

Eğilme ön deneyleri sonrasında elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan, Yalın beton numunelere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.28 ve Hibrit numunelere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.29'da görülmektedir.



Şekil 5.28. Yalın beton eğilme ön deney grafiği (C20)

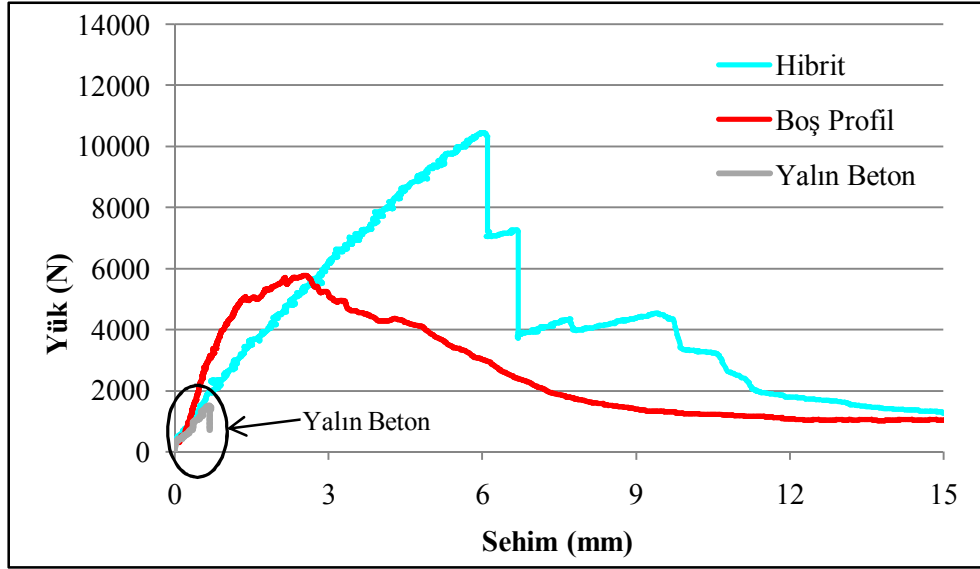
Yalın beton numunelerinde yalnızca beton kullanıldığından küçük yük değerlerinde kırılmış ve çok az sehim yapmıştır. Tüm numunelerde sehim miktarı 1 mm'nin ve kırılma yükleri ise 1200 N'nun altında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.29. Hibrit eğilme ön deney grafiği (C20)

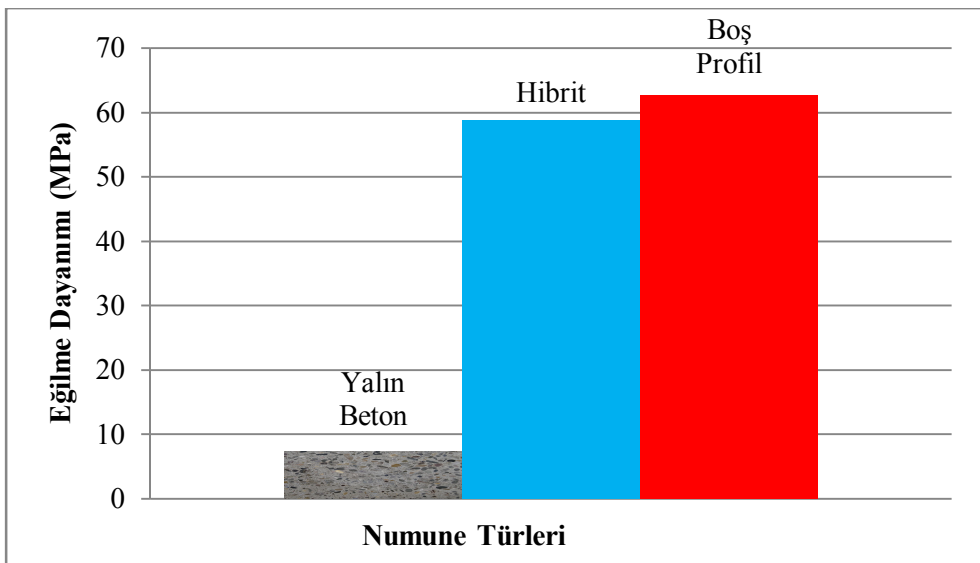
Hibrit malzemenin yük-sehim grafikleri incelendiğinde tüm numunelerde 9000 N'luk yük değerine kadar lineer davranış gösterdiği anlaşılmaktadır. Lineer olarak artan yük ani kırılma ile ciddi yük kayıpları olmasına rağmen tamamen kopmayıp sehim artışları devam etmiştir. Boş GFRP profillerdekine benzer şekilde profilde lokal kırılmalar gerçekleşmekte ve Hibrit kirişin kırılma tokluk değerini artırmaktadır. Ayrıca profildeki lokal kırılmaların genellikle köşe ve keçe liflerinden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

C20 beton sınıfında yapılan eğilme ön deneyleri sonucunda boş GFRP kutu profiller, Yalın beton ve Hibrit kirişleri temsil eden örnek yük-sehim grafikleri karşılaştırılarak Şekil 5.30'da verilmiştir.



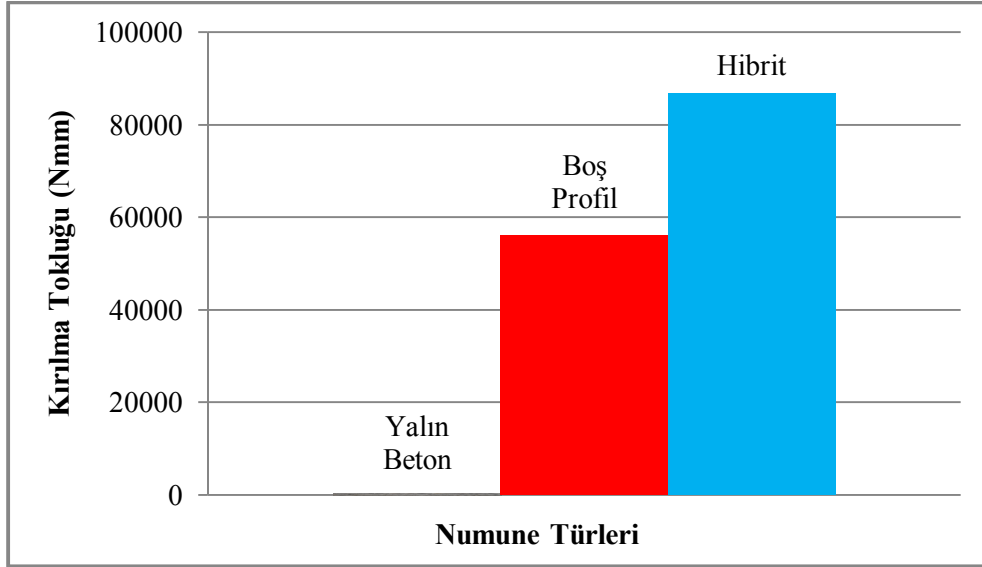
Şekil 5.30. Hibrit eğilme ön deney grafiklerinin karşılaştırılması (C20)

Hibrit malzemede bileşenleri boş profil ve Yalın betona kıyasla basınç sonuçlarında olduğu gibi performans artışları ortaya çıktığı görülmektedir. Aynı numune grubunda numunelerin yük-sehim değerleri karşılaştırılmış ve buna göre Hibrit numunenin eğilme yükü Yalın betona göre yaklaşık 8 kat, boş profile göre ise %51 oranında artmıştır. Eğilme dayanımı karşılaştırılmasında (Şekil 5.31) Hibrit numunenin eğilme dayanımı Yalın betona göre yine yaklaşık 8 kat artmıştır. İçerisi boş kutu kesitli profilin azalan kesitiyle birlikte eğilme dayanımı hesaplamalarında birim alandaki eğilme dayanımı artmış ve Hibrit numuneye göre %6 oranında fazla çıkmıştır.



Şekil 5.31. Eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (C20)

Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılmasında (Şekil 5.32) Hibrit numunenin kırılma tokluğu boş GFRP profile göre %54 oranında, Yalın betona göre 200 kat yüksek çıkmıştır.



Şekil 5.32. Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılması (C20)

5.2.1.2. Eğilme ön deney sonuçları (C30)

C30 dayanım sınıfında üretilen Yalın beton numunelerin sonuçları Tablo 5.27, Hibrit numune sonuçları Tablo 5.28'de verilmiştir.

Tablo 5.27. Yalın beton ön deney sonuçları (C30)

Numune No	Eğilme Yüğü (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
Yalın Beton 1	1133	7.46	375.5
Yalın Beton 2	1003	6.60	350.3
Yalın Beton 3	1167	7.68	417.9
Ortalama	1101	7.25	381.2

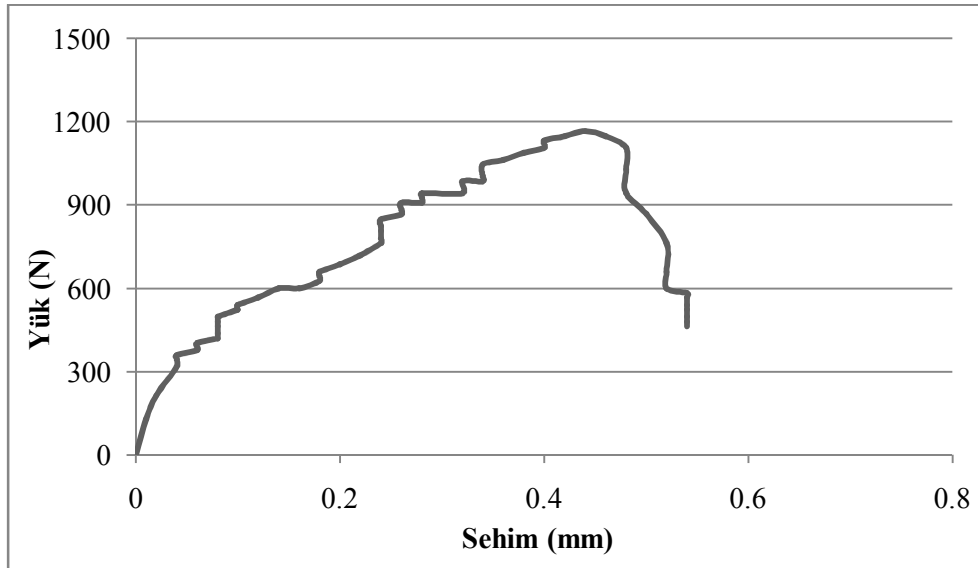
C30 beton sınıfında Yalın betonların ortalama eğilme yükü 1101 N, eğilme dayanımı 7.25 N/mm² ve kırılma tokluğu 381.2 Nmm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.28. Hibrit ön deney sonuçları (C30)

Numune No	Eğilme Yüğü (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
Hibrit 1	10035	66.07	109381
Hibrit 2	9282	61.12	107721
Hibrit 3	8604	56.65	67463
Ortalama	9307	61.28	94855

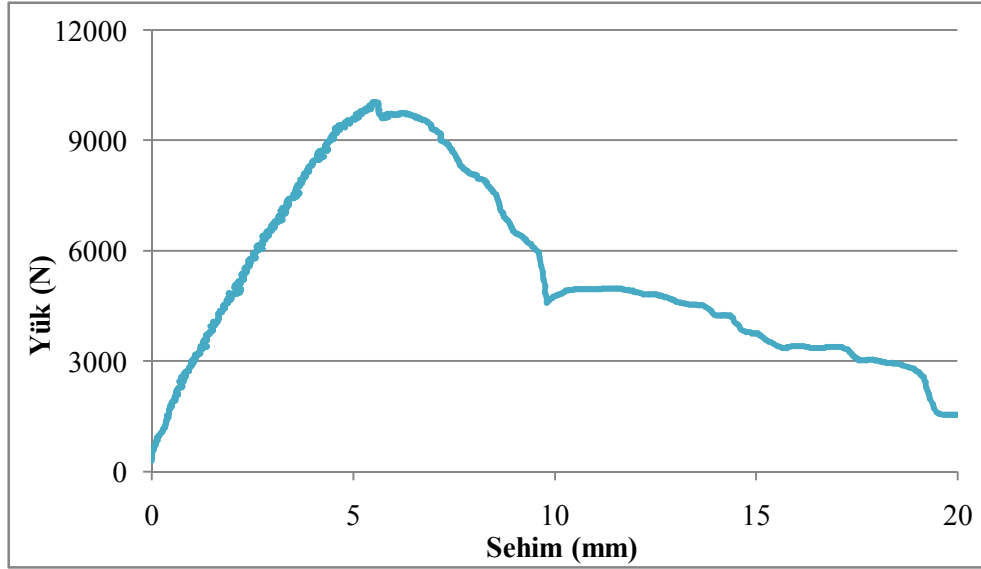
Hibrit numunelerin ortalama eğilme yüğü 9307 N, eğilme dayanımı 61.28 N/mm² ve kırılma tokluğu 194855 Nmm olarak hesaplanmıştır.

Yalın beton numuneleri temsil eden numuneye ait yük-sehim grafiğı Şekil 5.33'te, Hibrit numunelere ait örnek yük-sehim grafiğı Şekil 5.34'te görölmektedir.



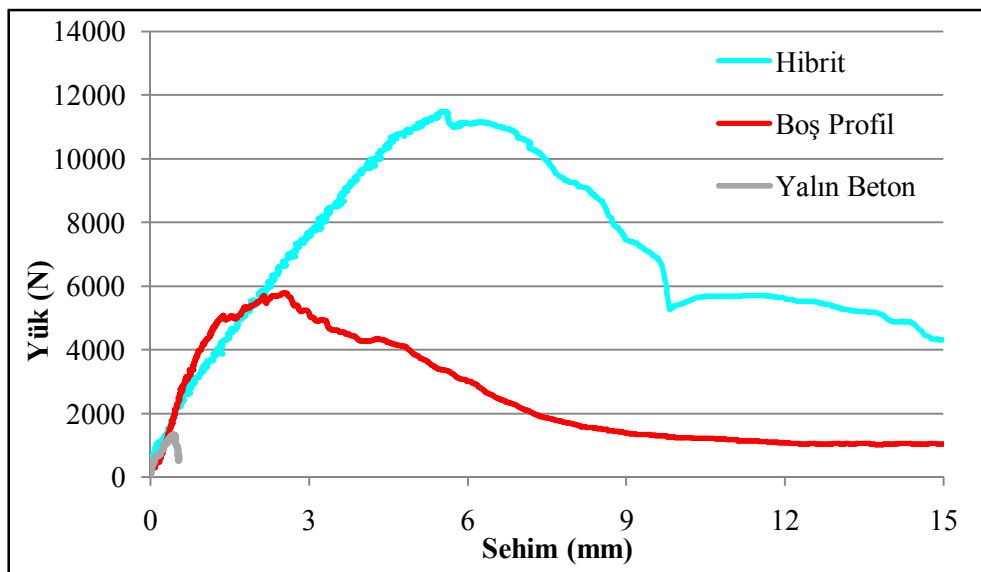
Şekil 5.33. Yalın beton eğilme ön deney grafiğı (C30)

Yalın beton eğilme grafikleri incelendiğinde diğler deneylerde olduğı gibi yalnızca beton kullanıldığı için çekme gerilmeleri düşük olan beton küçük değerlerde ani kırılmış ve çok az sehim yapmıştır. Tüm numunelerde sehim miktarı 0.6 mm'nin ve kırılma yükleri ise yine 1200 N'nun altında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.34. Hibrit eğilme ön deney grafiği (C30)

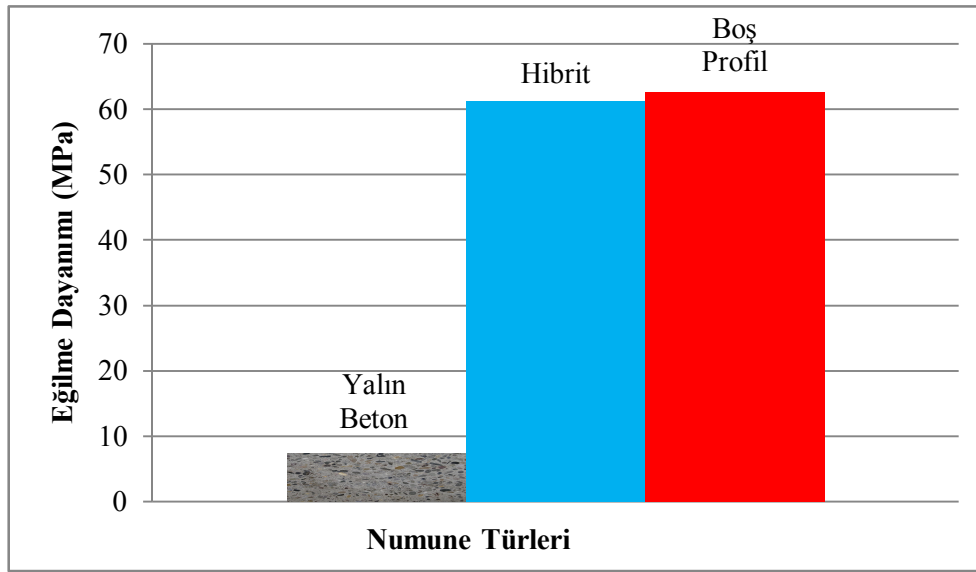
Hibrit numunelerin yaklaşık 9000 N'luk yük değerine kadar lineer davranış gösterdiği, lineer olarak artan yük ani kırılma ile yük kayıpları göstermesine rağmen tamamen kopmayıp sehim miktarının arttığı görülmektedir. Hibrit kirişlerdeki deformasyonlar lokal kırılmalar şeklinde gerçekleşmekte ve lokal kırılmaların genellikle köşe ve keçe liflerinden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. C30 beton sınıfındaki boş GFRP profiller, Yalın beton ve Hibrit kirişleri temsil eden yük-sehim grafikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.35).



Şekil 5.35. Hibrit eğilme ön deney grafiklerinin karşılaştırılması (C30)

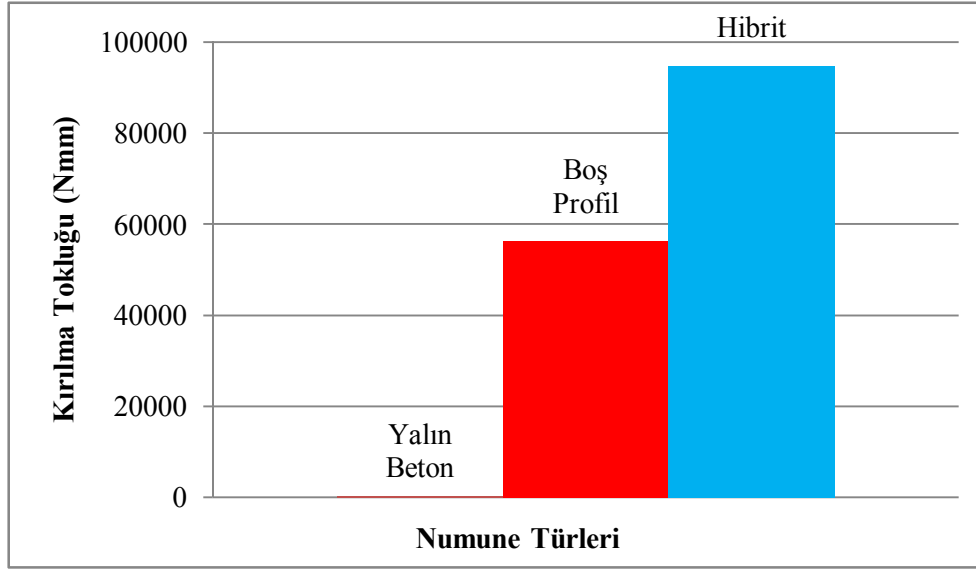
Hibrit kirişlerin karşılaştırma grafiği incelendiğinde, Hibrit malzeme tasarımının kendi bileşenleri olan boş profil ve Yalın betona kıyasla eğilme yükü açısından çok büyük artışlar ortaya çıkardığı görülmektedir. Buna göre Hibrit numunenin eğilme yükü Yalın betona göre yaklaşık 8.5 kat, boş profile göre ise %58 oranında artmıştır.

Eğilme dayanımı karşılaştırılmasında ise Hibrit numunenin eğilme dayanımı Yalın betona göre yine yaklaşık 8.5 kat artmıştır. İçerisi boş kutu kesitli profilin küçülen kesit alanı ile birlikte atalet momentinin artması nedeniyle maksimum eğilme yükünde birim alana gelen eğilme gerilmesi artarak eğilme dayanımını artırmış ve Hibrit numuneye göre %2 oranında fazla çıkmıştır (Şekil 5.36). Çekme özellikleri iyi olan GFRP malzeme profil olarak üretildiğinden tam dolu kesitli Hibrit malzemenin eğilme dayanım değerine yakın bir değere sahiptir.



Şekil 5.36. Eğilme Dayanım değerlerinin karşılaştırılması (C30)

Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılmasında (Şekil 5.37) ise Hibrit numunenin Kırılma tokluğu boş GFRP profile göre %69 oranında, Yalın betona göre ise yaklaşık 250 kat yüksek çıkmıştır.



Şekil 5.37. Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılması (C30)

5.2.1.3. Eğilme ön deney sonuçları (C40)

C40 dayanım sınıfında Yalın beton numunelere ait sonuçlar Tablo 5.29, Hibrit numune sonuçları Tablo 5.30'da verilmiştir.

Tablo 5.29. Yalın beton ön deney sonuçları (C40)

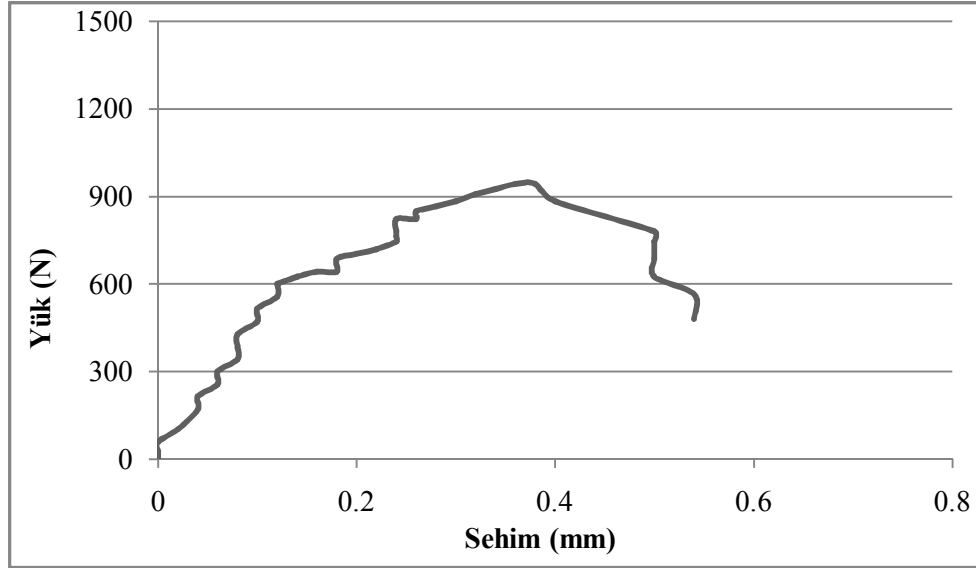
Numune No	Eğilme Yüğü (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
Yalın Beton 1	1007	6.63	297
Yalın Beton 2	1020	6.72	300
Yalın Beton 3	943	6.21	366
Ortalama	990	6.52	321

C40 beton sınıfındaki Yalın beton numunelerin ortalama eğilme yüğü 990 N, eğilme dayanımı 6.52 N/mm² ve kırılma tokluğu 321 Nmm olarak hesaplanmıştır. Hibrit numunelerin ortalama eğilme yüğü 10300 N, eğilme dayanımı 67.82 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 77111 Nmm olarak bulunmuştur.

Tablo 5.30. Hibrit ön deney sonuçları (C40)

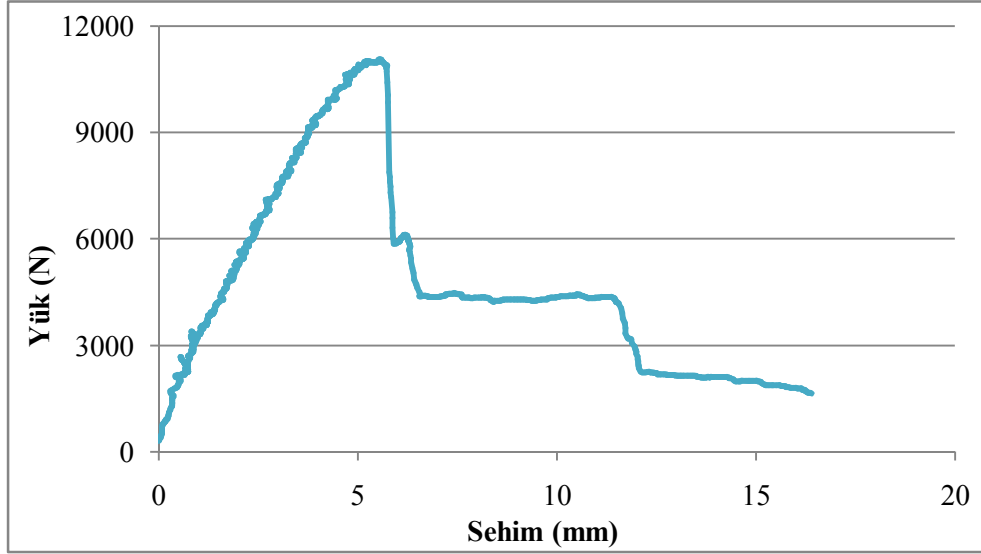
Numune No	Eğilme Yüğü (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
Hibrit 1	10186	67.07	72497
Hibrit 2	10936	72.01	76430
Hibrit 3	9778	64.38	82408
Ortalama	10300	67.82	77111

Yalın beton numunelere ait örnek yük-sehim grafiğı Şekil 5.38'de, Hibrit numunelere ait örnek yük-sehim grafiğı Şekil 5.39'da görölmektedir.



Şekil 5.38. Yalın beton eğilme ön deney grafiğı (C40)

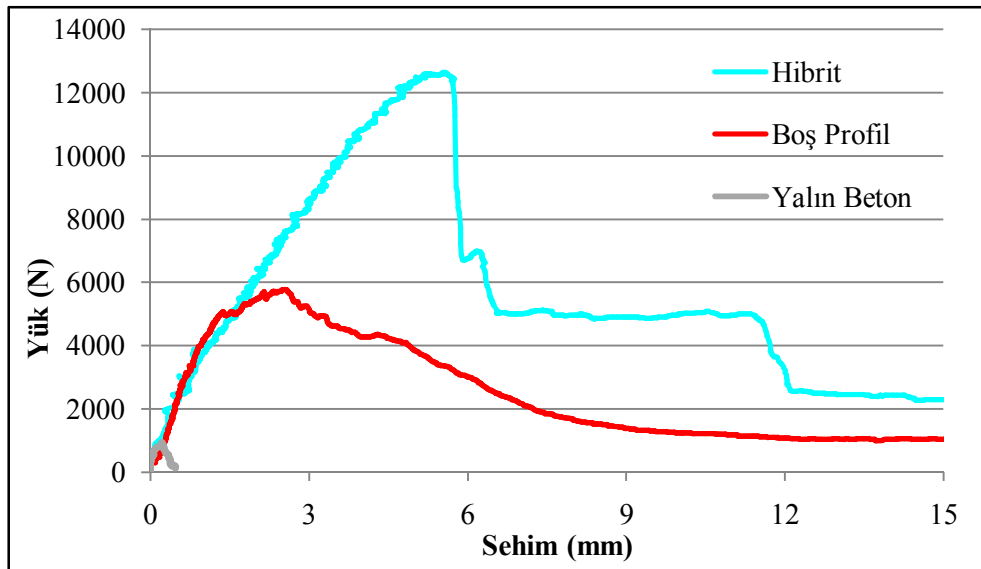
Yalın betonun eğilme grafikleri incelendiğinde çekme gerilmeleri düşük olan beton küçük değerlerde ani kırılmış ve çok az sehim yapmıştır. Tüm numunelerde sehim miktarı 0.8 mm'nin ve kırılma yükleri ise yine 1200 N'nun altında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.39. Hibrit eğilme ön deney grafiği (C40)

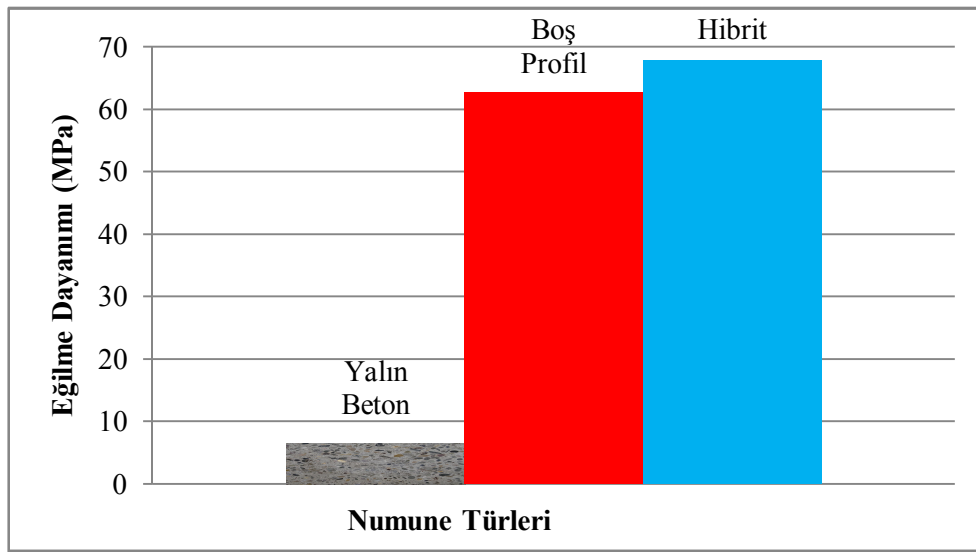
Tüm numunelerin yük-sehim grafiklerinde yaklaşık 10000 N'luk yük değerine kadar lineer davranış gösterdiği, lineer olarak artan yük ani kırılma ile kayda değer yük kayıpları olmasına rağmen tamamen kopmayıp sehim miktarının arttığı görülmektedir.

C40 beton sınıfındaki boş GFRP profilleri, Yalın betonları ve Hibrit kirişleri temsil eden yük-sehim grafikleri karşılaştırılarak Şekil 5.40'da verilmiştir.



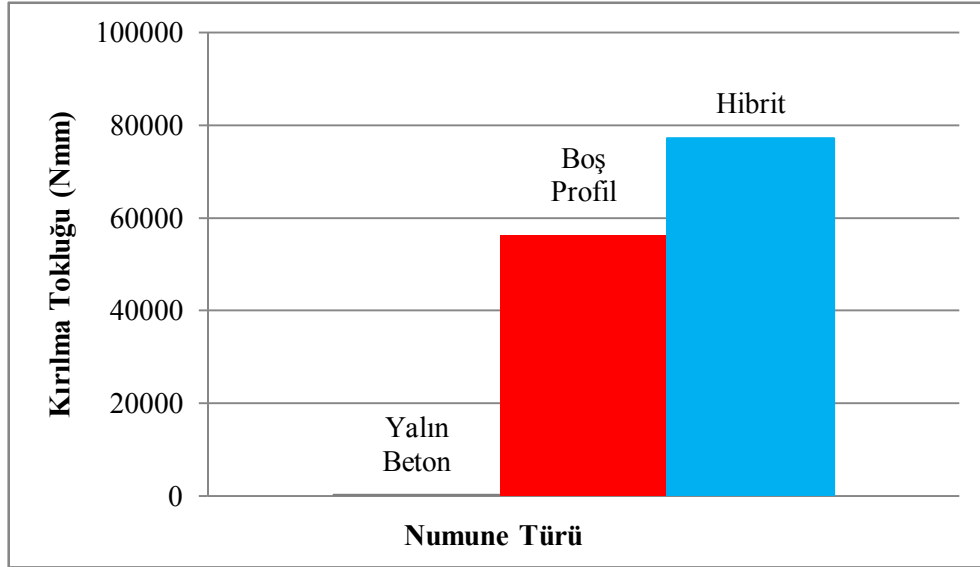
Şekil 5.40. Hibrit eğilme ön deney grafiklerinin karşılaştırılması (C40)

Karşılaştırma grafiği incelendiğinde Hibrit malzemenin boş profil ve Yalın betona kıyasla eğilme yükü açısından çok büyük artışlar ortaya çıkardığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre Hibrit numunenin eğilme yükü Yalın betona göre yaklaşık 10 kat, boş profile göre ise %75 oranında artmıştır. Eğilme dayanımı karşılaştırılmasında ise Hibrit numunenin eğilme dayanımı Yalın betona göre yine yaklaşık 10 kat artmıştır. Diğer dayanım sınıflarında çok yakın değerlerde çıkan Hibrit ve boş profil eğilme dayanım değerleri bu grupta Hibrit numune boş profile göre %8 oranında fazla dayanım göstermiştir (Şekil 5.41).



Şekil 5.41. Eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (C40)

C40 dayanım sınıfındaki kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılmasında Hibrit numunenin kırılma tokluğu boş GFRP profile göre %37 oranında, Yalın betona göre yaklaşık 240 kat yüksek çıkmıştır (Şekil 5.42).



Şekil 5.42. Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılması (C40)

Ön eğilme deneyleri neticesinde farklı dayanım sınıflarında aynı tür numune gruplarının eğilme davranışı incelendiğinde, beton basınç dayanım sınıflarının çok etkin olmadığı tespit edilmiş ve ileriki eğilme deney gruplarında tek dayanım sınıfında beton kullanılmıştır.

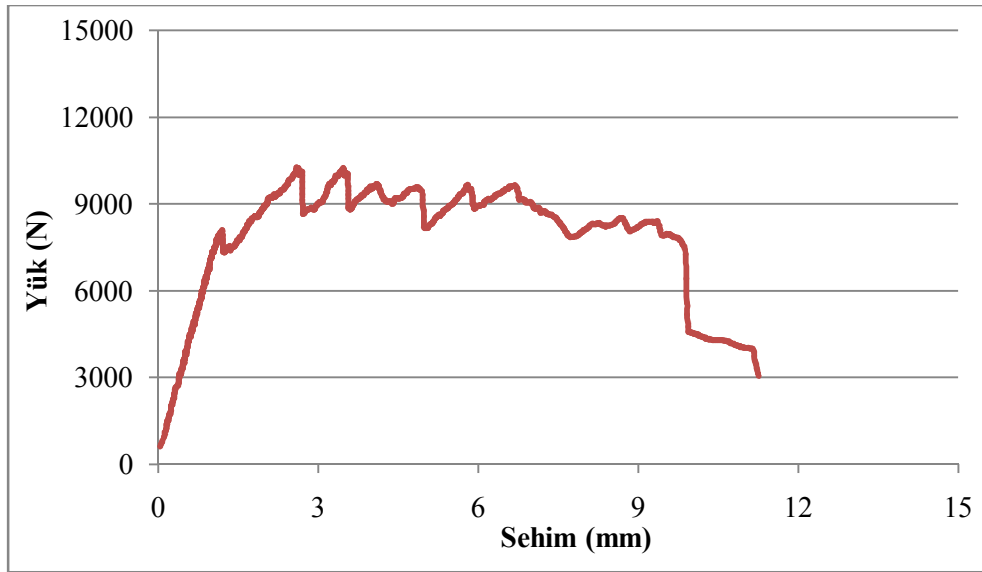
5.2.2. 74 mm kesitli numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Bu bölümde tek basınç dayanım sınıfında hazırlanan 74-74-4 mm kesitli, 400 mm mesnet açıklığında ve 500 mm uzunluğundaki Hibrit, Yalın beton ve boş GFRP profiller üzerinde gerçekleştirilen eğilme deney sonuçları verilmiştir. Her deneye ait yük-sehim grafikleri ile birlikte eğilme yükü, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri de tablolar halinde verilmiştir. İlk olarak boş GFRP kutu profillere ait deney sonuçları Tablo 5.31’de görülmüştür.

Tablo 5.31. Boş GFRP profil deney sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	12488	50.35	93347
2	11674	47.07	90670
3	11556	46.59	85897
4	10869	43.82	86743
5	10198	41.10	75598
Ortalama	11357	45.79	86451

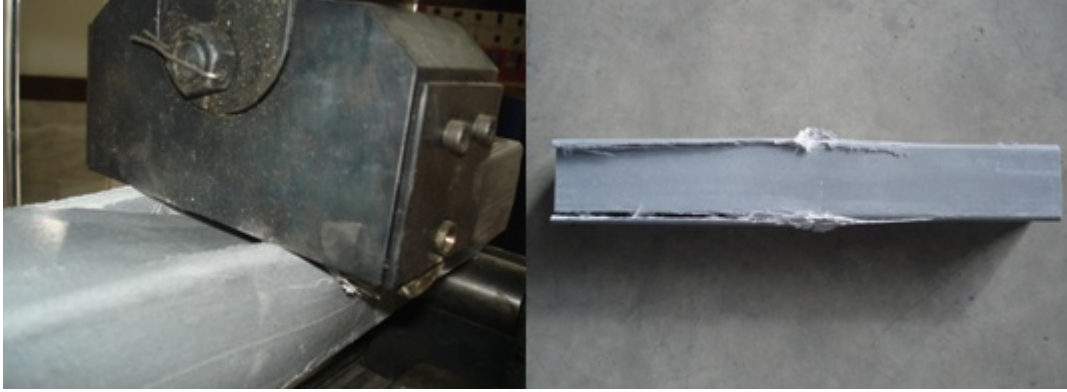
Boş GFRP profillerin ortalama eğilme yükü 11357 N, eğilme dayanımı 45.79 N/mm² ve kırılma tokluğu 86451 Nmm bulunmuştur. Eğilme deneyleri sonrasında elde edilen veriler kullanılarak boş profillere ait örnek yük-sehim grafiği oluşturularak Şekil 5.43'de verilmiştir.



Şekil 5.43. Boş GFRP profil eğilme deney grafiği (74 mm)

Grafikler incelendiğinde boş GFRP profillerin 8000 N yük değerine kadar lineer davranış gösterdiği, sonraki aşamalarda artan yük ile beraber profilde lokal kırılmaların gerçekleştiği fakat ani kopmaların olmadığı belirlenmiştir. Bu bölgesel

lokal kırılmaların diğer numune türlerinde olduğu gibi özellikle profil köşeleri ve keçe liflerinden olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.44).



Şekil 5.44. Boş GFRP profillerin Eğilme deneyi sonrası deforme olmuş hali

5.2.2.1. Standart 74 mm kesitli numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Bu deney grubunda tek basınç dayanım sınıfında üretilen Yalın beton numune sonuçları Tablo 5.32’de, Yalın beton ve boş GFRP profiller ile karşılaştırma yapmak amacıyla iyileştirme yapılmamış standart profillerden üretilen Hibrit numune sonuçları Tablo 5.33’de verilmiştir.

Tablo 5.32. Yalın beton eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	3965	5.87	1594
2	4225	6.25	1349
3	3850	5.70	1480
4	4498	6.65	1364
5	4665	6.91	1629
Ortalama	4241	6.28	1483

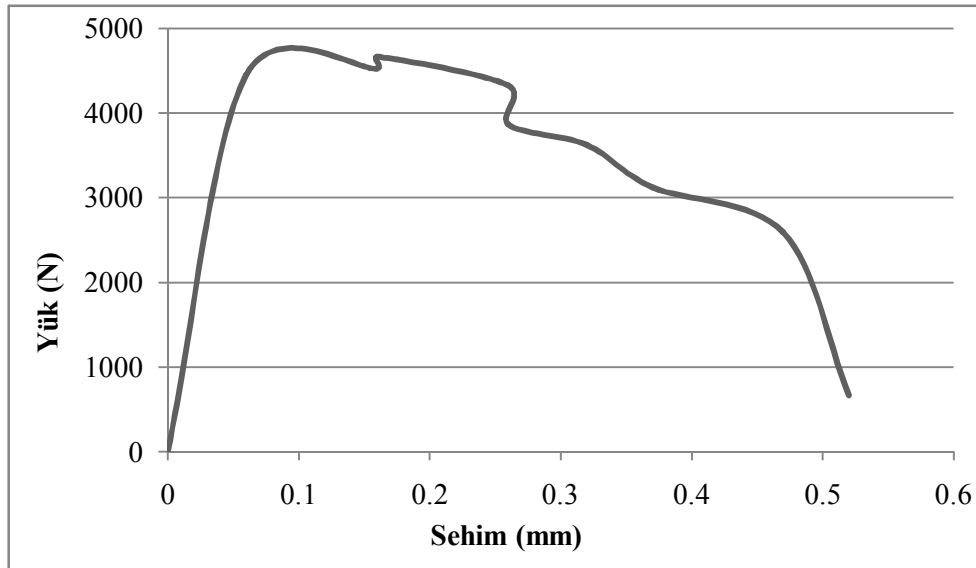
Yalın beton numuneler ile gerçekleştirilen üç noktalı eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 4241 N, eğilme dayanımı 6.28 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 1483 Nmm bulunmuştur.

Tablo 5.33. Hibrit Standart numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	16808	24.96	140250
2	19051	28.20	108250
3	16814	24.88	17450
4	17805	26.35	151800
5	18540	27.44	156120
Ortalama	17823	26.38	145374

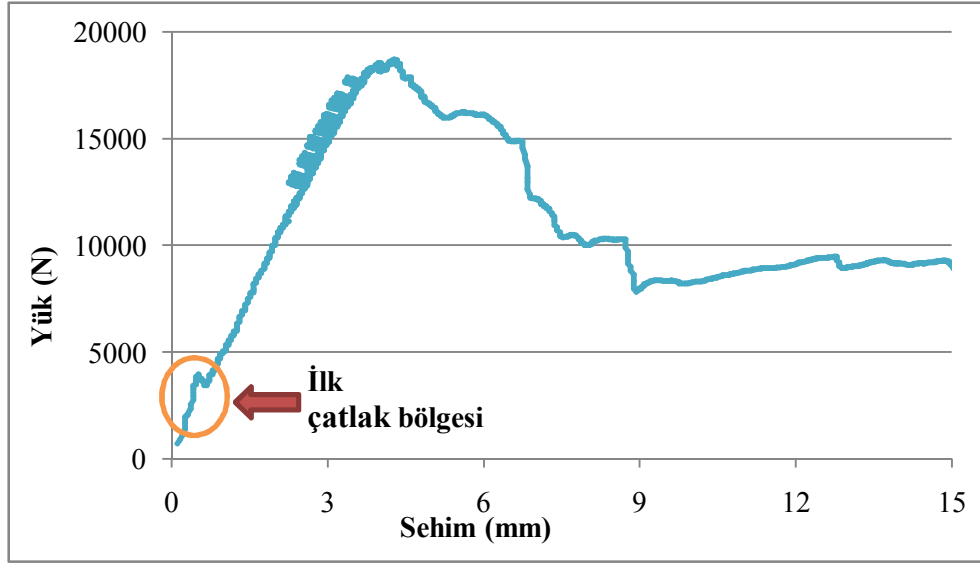
Hibrit Standart numunelerin ortalama eğilme yükü 17823 N, eğilme dayanımı 26.38 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 145374 Nmm bulunmuştur.

Yalın beton numunelere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.45, Hibrit Standart numunelere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.46'da görülmektedir.



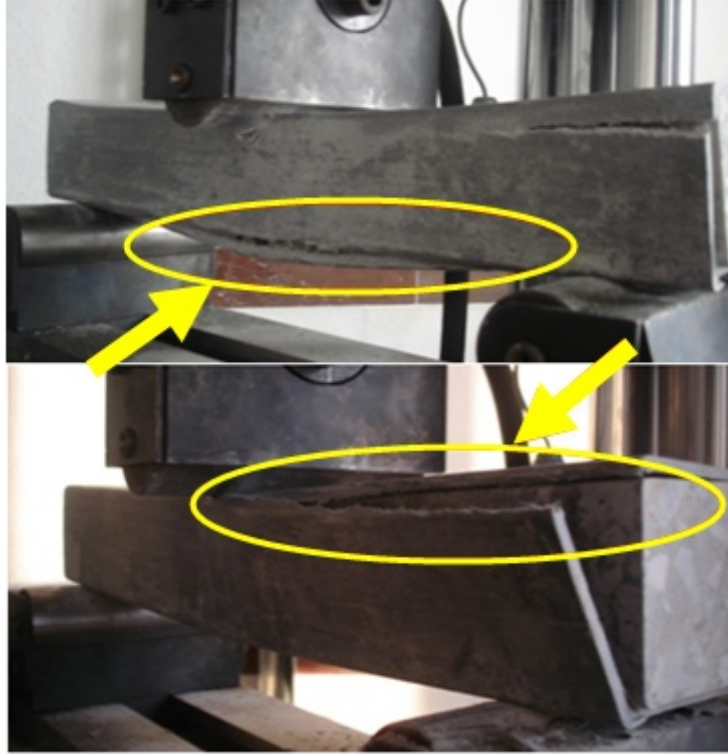
Şekil 5.45. Yalın beton numunenin eğilme grafiği (74 mm)

Yalın beton numunelerde çekme dayanımı düşük olan betonun düşük yük değerlerinde ani kırıldığı ve çok az sehim yaptığı belirlenmiştir. Tüm numunelerde sehim miktarı 0.6 mm ve kırılma yükleri 5000 N'nun altında gerçekleşmiştir.



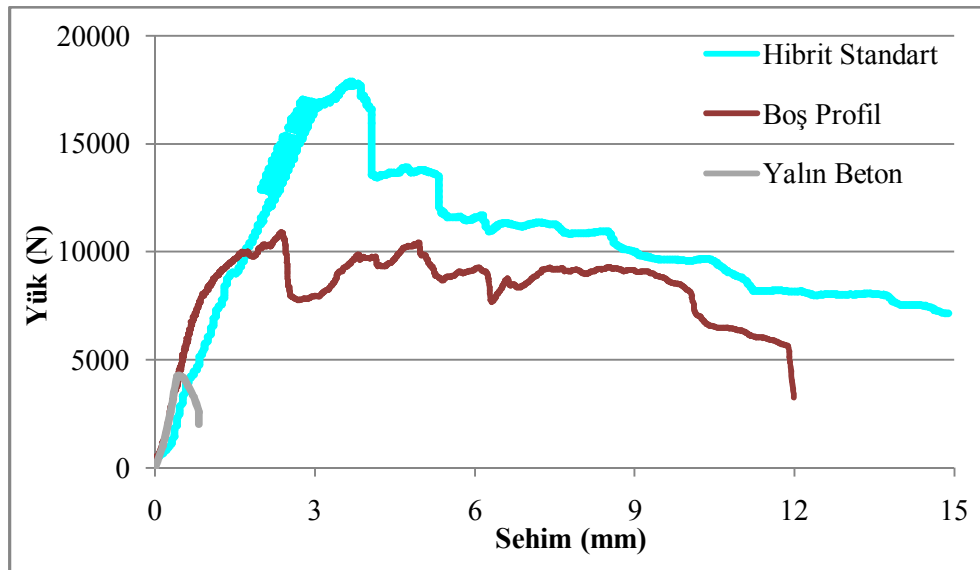
Şekil 5.46. Hibrit Standart numunenin yük-sehim grafiği (74 mm)

Hibrit Standart numunelerin yük-sehim grafikleri incelendiğinde tüm numunelerde en az 15000 N'luk eğilme yüküne kadar lineer davranış gösterdiği daha sonraki yüklerde profildeki kırılmalar ile birlikte yük değerinin düştüğü tespit edilmiştir. Numunelerin ortalama sehim miktarı 15 mm olup, grafiklerde eğrinin kalınlaşan bölümlerinde numunelerin kırılmaya karşı direndiği, yine tüm numunelerde en büyük yük değerine ulaşıncaya kadar malzemenin lineer davrandığı tespit edilmiştir. Ayrıca Hibrit malzemeyi oluşturan GFRP profil içerisindeki betonun ilk çatlak bölgesi tüm numunelerin yük-sehim grafiklerinde belirgin şekilde görülmekte ve betonun ilk kırıldığı yükten sonrada Hibrit malzeme tekrar lineer olarak eğilme dayanımını artırmıştır. Yalın beton yük-sehim grafiklerinde 5000 N'nun altında ve 1 mm'lik sehim değerini yapmadan kırılırken aynı şekilde Hibrit malzeme içerisindeki betonlarda yine 1 mm sehime ulaşmadan tüm numunelerde 5000 N'un altındaki değerlerde ilk çatlak oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 5.47'de Hibrit Standart numunelere ait eğilme deneyi sonrası deforme olmuş numuneler gösterilmiştir. Kırılma davranışı incelendiğinde diğer numune türlerinde olduğu gibi malzemenin en zayıf yönü olan köşe ve keçe lifi yetersizliğinden boyuna kırılmalar gerçekleşmiştir.



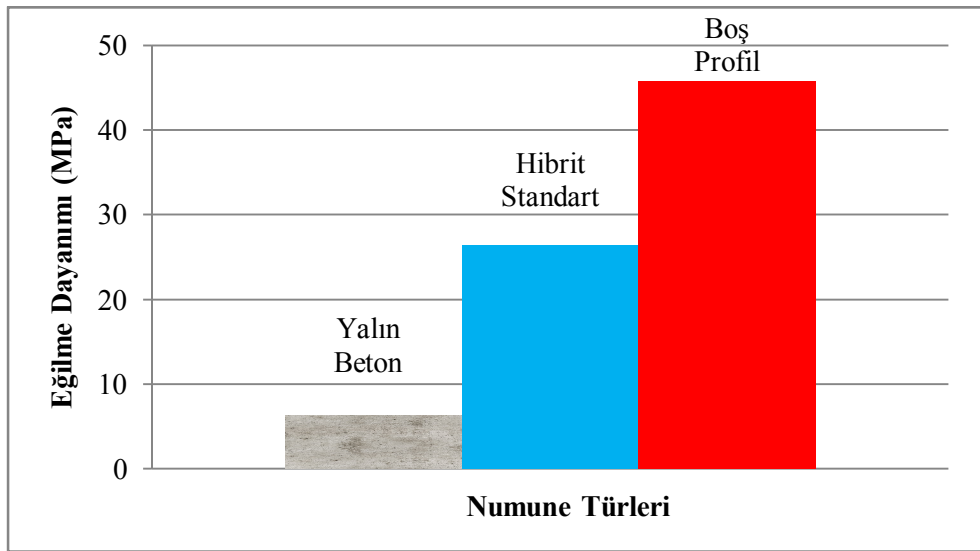
Şekil 5.47. Hibrit numunelerin eğilme deneyi sonrası deforme olması

Testler sonrasında boş GFRP profil, Yalın beton ve Hibrit Standart kirişleri temsil eden yük-sehim grafikleri aynı grafik üzerinde değerlendirilmiştir (Şekil 5.48).

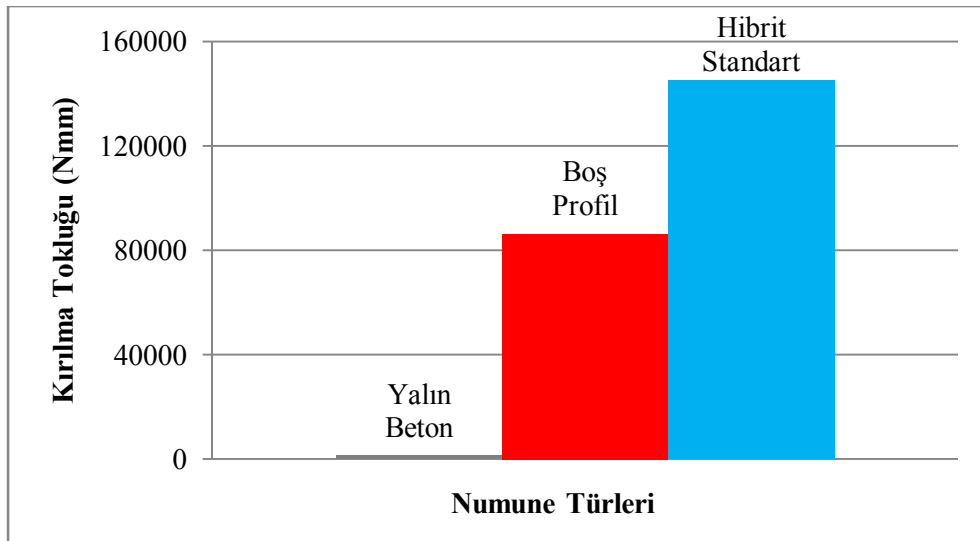


Şekil 5.48. Yük-sehim grafikleri karşılaştırılması (74 mm)

Şekil 5.48 incelendiğinde Hibrit Standart kirişlerde eğilme yükünün boş profil ve Yalın betona kıyasla arttığı görülmektedir. Buna göre Hibrit numunenin eğilme yükü Yalın betona göre yaklaşık 4 kat, boş profile göre ise %56 oranında artmıştır. Eğilme dayanımı karşılaştırılmasında ise Hibrit Standart numunenin eğilme dayanımı Yalın betona göre yine yaklaşık 4 kat artmıştır. İçersi boş kutu kesitli profilin tam dolu kesitli numunelere göre azalan kesiti nedeniyle eğilme dayanımı artmış ve Hibrit numuneye göre %73.5 oranında fazla çıkmıştır (Şekil 5.49). Kırılma tokluk değerlerinin karşılaştırılmasında Hibrit numunenin kırılma tokluğu boş GFRP boş profile göre %68 oranında yüksek çıkmıştır (Şekil 5.50).

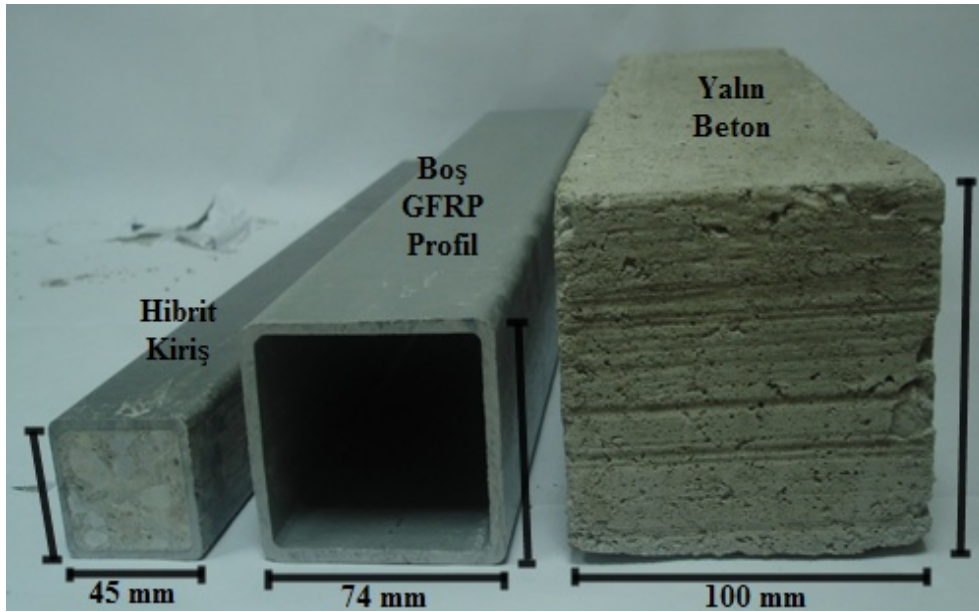


Şekil 5.49. Eğilme dayanımı artış oranları (74 mm)



Şekil 5.50. Kırılma tokluğu artış oranları (74 mm)

Ayrıca Hibrit tasarımın eğilme davranışını yorumlayabilmek için yapılan deneyde 100x100 mm kesitli Yalın beton kiriş numune, 74x74 mm kesitli boş kutu profil ve 45 mm kesitli Hibrit numuneye eğilme deneyi yapılmıştır. 400 mm mesnet açıklığında yapılan üç noktalı eğilme deneyi sonucunda eğilme yükleri yaklaşık aynı değerlerde çıkmıştır. Yalın beton 11080 N, Boş profil 11600 N ve Hibrit kiriş ise 10250 N maksimum yüke ulaşmıştır. Şekil 5.51’de gösterilen numune türleri, hafiflik ve kesit açısından büyük farklar bulunmasına rağmen yaklaşık eşit eğilme yükünde kırılmışlardır.



Şekil 5.51. Eşit eğilme yüküne sahip numuneler

5.2.2.2. Profil özelliklerinin geliştirildiği eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

Eğilme deneylerinin bu kısmında ön deneylerde numunelerin kırılma biçimleri incelenmesi sonucu, keçe miktarının yetersizliği ve beton ile GFRP profil arasındaki aderans zayıflığı nedeniyle profil özellikleri geliştirilmiştir. Fabrika üretimi esnasında iç yüzeyleri kumlanan ve keçe miktarı artırılan, 74-74-4 mm boyutlara sahip kutu GFRP profiller kullanılarak hazırlanmış eğilme kirişleri test edilmiştir. Boş profil, Yalın beton ve Hibrit kirişler olmak üzere, farklı özellikteki GFRP profil türleri kullanılarak 500 mm uzunluğunda, 400 mm mesnet açıklığında üç noktalı eğilme testleri yapılmıştır.

Standart GFRP profiller kullanılarak oluşturulan Hibrit kirişlere ait sonuçlar Tablo 5.34, GFRP profillerin iç yüzeylerinin kumlanmasıyla oluşturulan Hibrit Kumlu kiriş test sonuçları Tablo 5.35’de verilmiştir.

Tablo 5.34. Hibrit kiriş numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

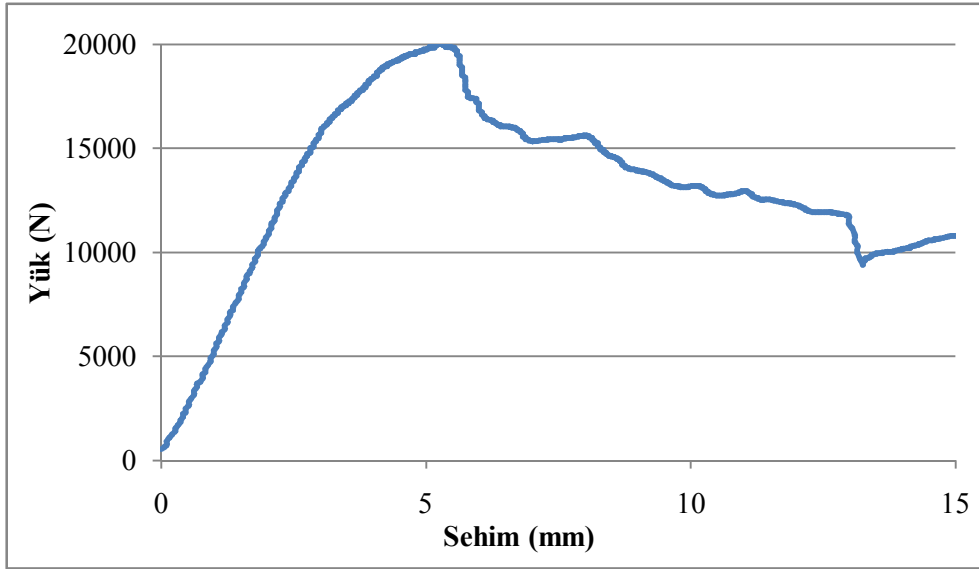
Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	18746	27.74	157460
2	18756	27.76	167510
3	16137	23.88	181800
4	18933	28.02	211150
5	20575	30.46	239922
Ortalama	18629	27.57	191568

Tablo 5.35. Hibrit kumlu numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	23219	34.36	225220
2	23211	34.35	187240
3	21000	31.08	177050
4	24645	36.47	175420
5	22165	32.80	177130
Ortalama	22848	33.81	188412

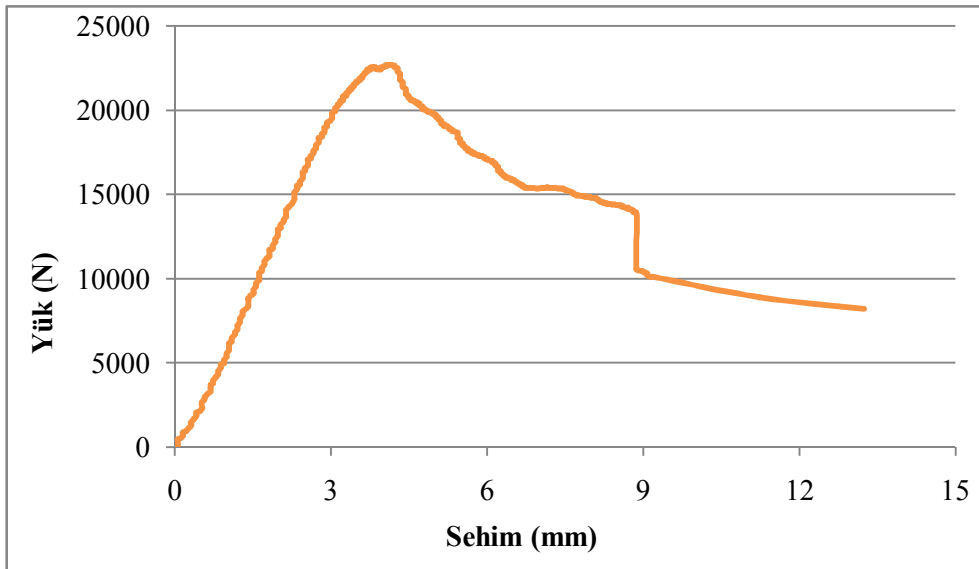
Hibrit numunelerin ortalama eğilme yükü 18629 N, eğilme dayanımı 27.57 N/mm² ve kırılma tokluğu 191568 Nmm bulunmuştur. Hibrit Kumlu numunelerin ortalama eğilme yükü 22848 N, eğilme dayanımı 33.81 N/mm² ve kırılma tokluğu 188412 Nmm bulunmuştur.

Hibrit numunelere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.52, Hibrit Kumlu numunelere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.53’te görülmektedir.



Şekil 5.52. Hibrit kiriş numunenin eğilme grafiği (74 mm)

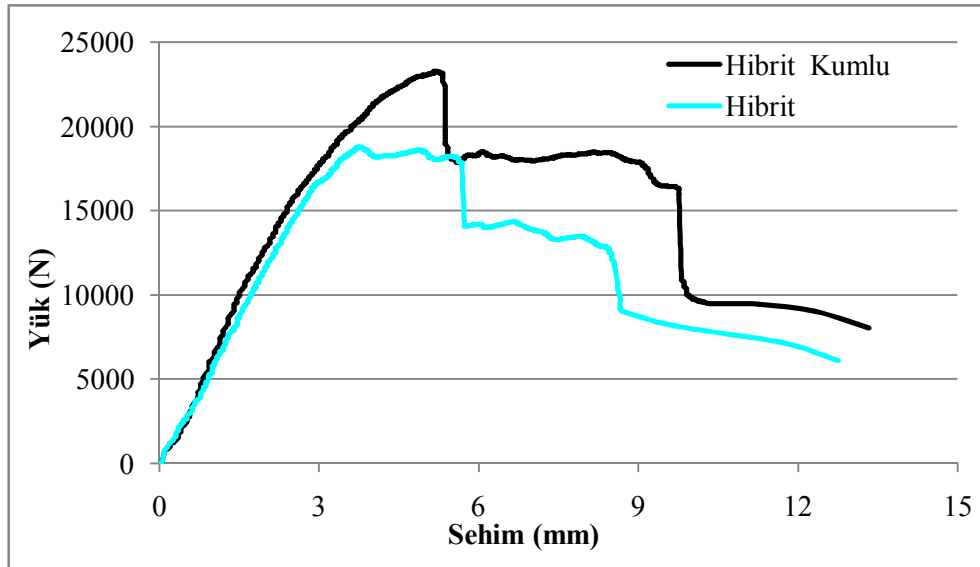
Hibrit numunelerin yük-sehim grafikleri incelendiğinde 15000 N ve üzerindeki eğilme yüküne kadar lineer davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Doğrusal davranış bozulduktan sonra profil içerisindeki beton farklı bölgelerden kırılmaktadır.



Şekil 5.53. Hibrit Kumlu numunenin eğilme grafiği (74 mm)

Hibrit Kumlu numunelerin 20000 N ve üzerindeki eğilme yüküne kadar yine lineer davranış gösterdiği ve kırılma gerçekleşikten sonrada yük taşımaya devam ettiği tespit edilmiştir.

Hibrit ve Hibrit Kumlu numuneleri temsil eden yük-sehim grafikleri Şekil 5.54'te karşılaştırılmıştır. Aynı özelliklere sahip fakat GFRP profil iç yüzeyinin 1 mm tane çapındaki kum tanelerinin yapıştırılmasıyla oluşturulan Hibrit Şahit Kumlu numuneleri temsil eden grafik, Hibrit Şahit numunenin grafiğine göre hem rijitlik hem de eğilme dayanımı açısından yüksek değerde çıkmıştır. Profil içersinde kullanılan kumlu yüzey beton ile aderansı artırarak malzeme davranışını olumlu yönde etkilemiştir.



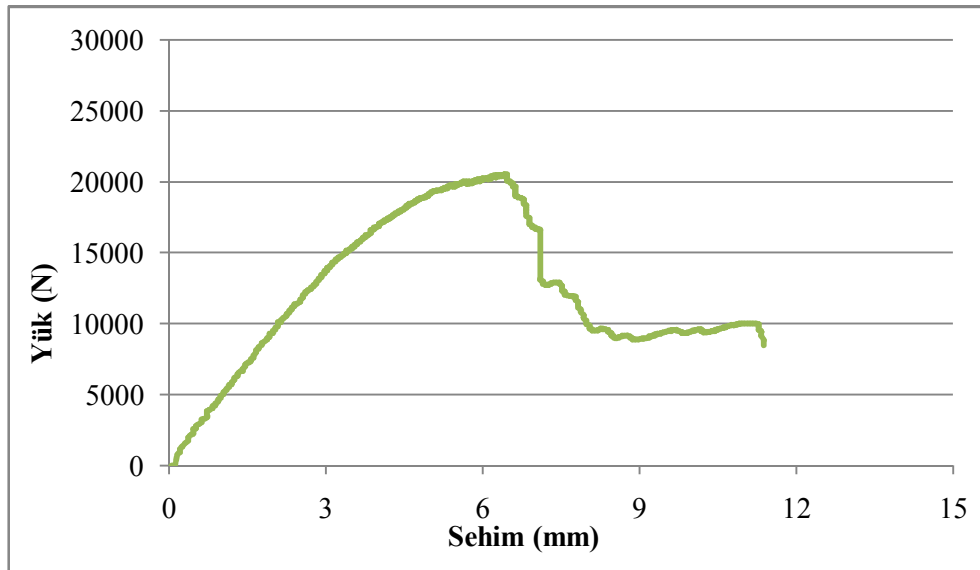
Şekil 5.54. Hibrit ve Hibrit Kumlu numune grafiklerinin karşılaştırılması (74 mm)

Kullanılan mevcut GFRP profillerin keçe miktarının artırılmasıyla üretilen Ek Keçeli profillerin beton ile doldurulmasıyla elde edilen Hibrit Ek Keçeli kiriş numune sonuçları Tablo 5.36'da verilmiştir.

Tablo 5.36. Hibrit Ek Keçeli numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	25525	37.78	188790
2	20266	29.99	290270
3	25692	38.02	187160
4	24299	35.96	191710
5	20454	30.29	163260
Ortalama	23247	34.41	204238

Hibrit Ek Keçeli numunelerin eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 23247 N, eğilme dayanımı 34.41 N/mm² ve kırılma tokluğu 204238 Nmm bulunmuştur. Hibrit Ek Keçeli numuneleri temsil eden örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.55’de verilmiştir.



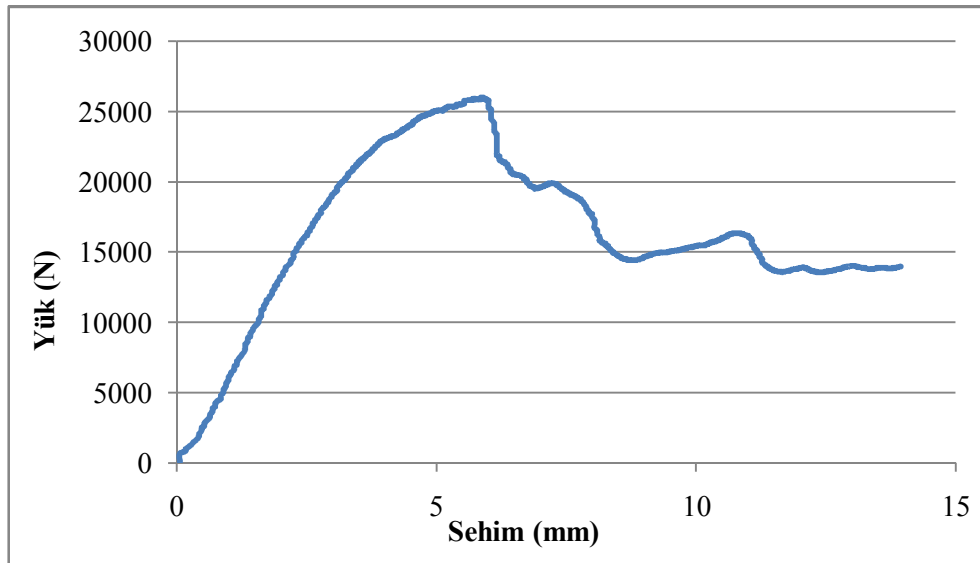
Şekil 5.55. Hibrit Ek Keçeli numunenin eğilme grafiği (74 mm)

Hibrit Ek Keçeli numunelerde kullanılan GFRP profillerin iç yüzeylerinin kumlanmasıyla oluşturulan Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunelerin sonuçları Tablo 5.37’de verilmiştir.

Tablo 5.37. Hibrit Ek Keçeli ve Kumlu kiriş numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	28281	41.86	212180
2	25554	37.82	303360
3	25046	37.07	245280
4	28694	42.47	305420
5	25825	38.22	217100
Ortalama	26680	39.49	256687

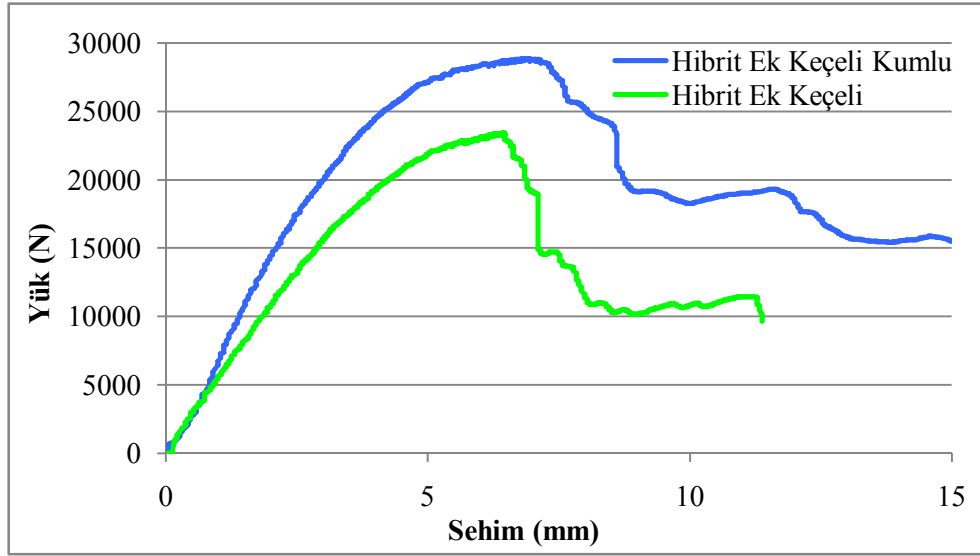
Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunelerin eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 26680 N, eğilme dayanımı 39.49 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 256687 Nmm bulunmuştur. Hibrit Ek Keçeli Kumlu numuneleri temsil eden örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.56'da verilmiştir.



Şekil 5.56. Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunenin eğilme grafiği (74 mm)

Hibrit Ek Keçeli ve Hibrit Ek Keçeli Kumlu numuneleri temsil eden yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılmıştır (Şekil 5.57). Profil iç yüzeyinin 1 mm tane çapındaki kum tanelerinin yapıştırılmasıyla oluşturulan Hibrit Ek Keçeli Kumlu numuneleri temsil eden grafik Hibrit Ek Keçeli numunenin grafiğine göre rijitlik, sehim, enerji

yutma kapasitesi ve eğilme dayanımı açısından büyük oranda yüksek çıkmıştır. Profil içerisinde kullanılan kumlu yüzey beton ile aderansı artırarak malzeme eğilme davranışını olumlu yönde etkilemiştir.



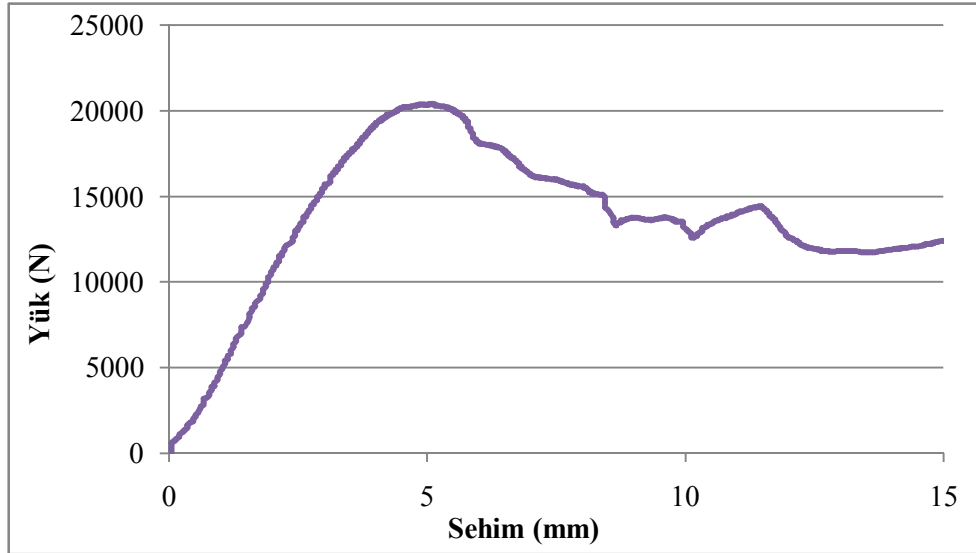
Şekil 5.57. Hibrit Ek Keçeli ve Hibrit Ek Keçeli+Kumlu grafiklerinin karşılaştırılması (74 mm)

Profil özelliklerinin geliştirildiği çalışmalarda mevcut keçe ile birlikte dokuma liflerden oluşan sargının da kullanıldığı, Özel Keçe olarak adlandırılan liflerden oluşan GFRP profiller ile Hibrit malzeme üretilmiştir. Bu şekilde Hibrit Özel Keçeli numunelerin eğilme test sonuçları Tablo 5.38’de verilmiştir.

Tablo 5.38. Hibrit Özel Keçeli numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	20973	31.04	188300
2	19747	29.23	188980
3	22386	33.13	216140
4	23936	35.14	212340
5	20160	30.12	247616
Ortalama	21440	31.73	210675

Hibrit Özel Keçeli numunelerin ortalama eğilme yükü 21440 N, eğilme dayanımı 31.73 N/mm^2 ve kırılma tokluğu 210675 Nmm bulunmuştur. Hibrit Özel Keçeli numunelere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.58'de verilmiştir.



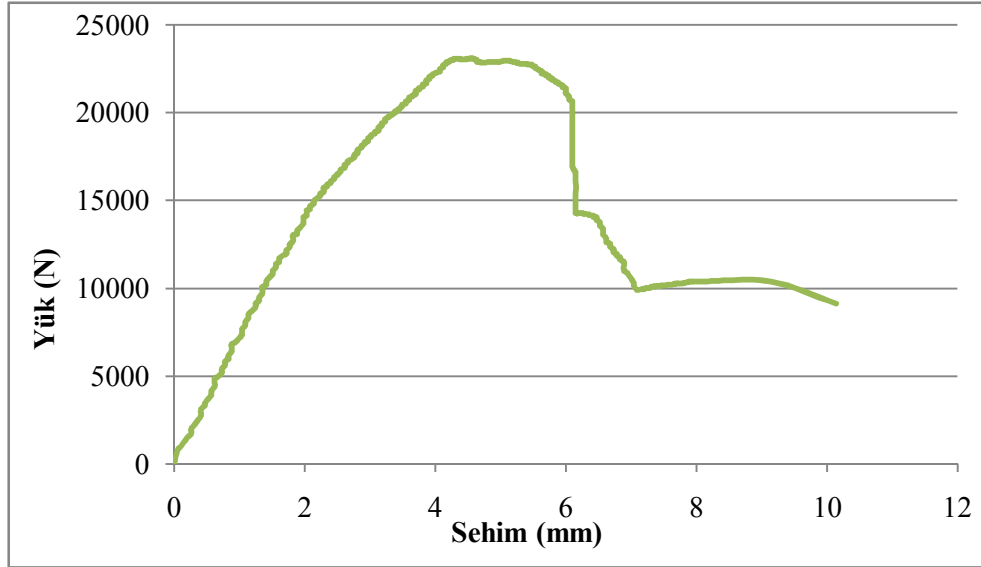
Şekil 5.58. Hibrit Özel Keçeli numunenin eğilme grafiği (74 mm)

Hibrit Özel Keçeli numunelerde kullanılan GFRP profillerin iç yüzeylerinin kumlanmasıyla oluşturulan Hibrit Özel Keçeli+Kumlu numunelere ait eğilme test sonuçları Tablo 5.39'da verilmiştir.

Tablo 5.39. Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunelerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

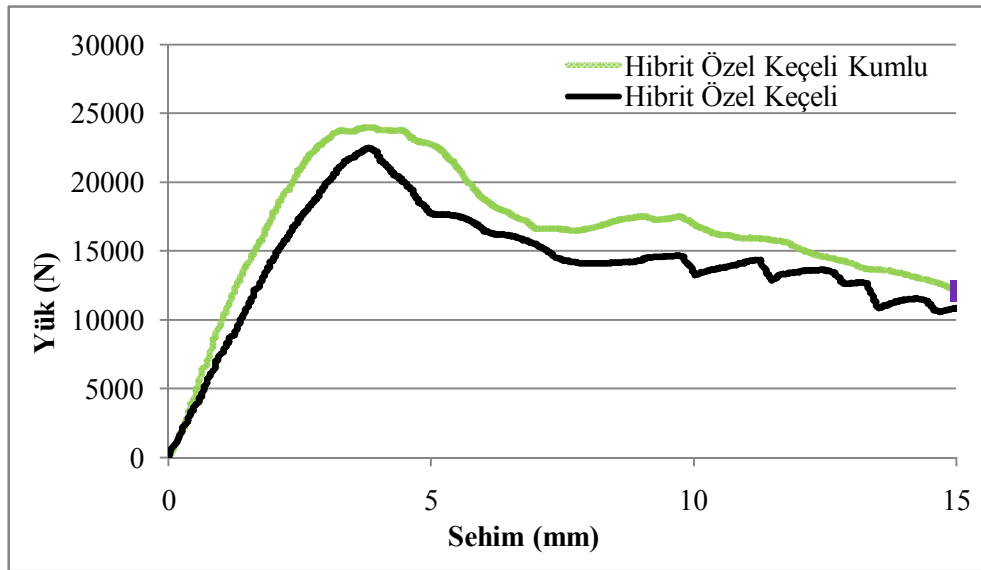
Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm^2)	Tokluk (Nmm)
1	24005	35.53	213280
2	24916	36.92	211860
3	26428	39.11	223730
4	19260	28.50	209020
5	23002	33.98	174290
Ortalama	23522	34.81	206436

Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunelerin ortalama eğilme yükü 23522 N, eğilme dayanımı 34.81 N/mm^2 ve kırılma tokluğu ise 198115 Nmm bulunmuştur. Hibrit Özel Keçeli+Kumlu numunelerin ait örnek grafiği Şekil 5.59'de verilmiştir.



Şekil 5.59. Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunenin eğilme grafiği (74 mm)

Hibrit Özel Keçeli ve Hibrit Özel Keçeli+Kumlu numuneleri temsil eden yük-sehim grafikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.60.). GFRP profil iç yüzeyinin kumlanması ile Hibrit Özel Keçeli Kumlu numuneleri temsil eden grafik Hibrit Özel Keçeli numunenin grafiğine göre hem rijitlik hem de eğilme dayanımı açısından yüksek değerlerde çıkmıştır. Dolayısıyla profil ile beton aderansının artırılması tüm numunelerde olduğu gibi eğilme davranışını olumlu yönde etkilemiştir.



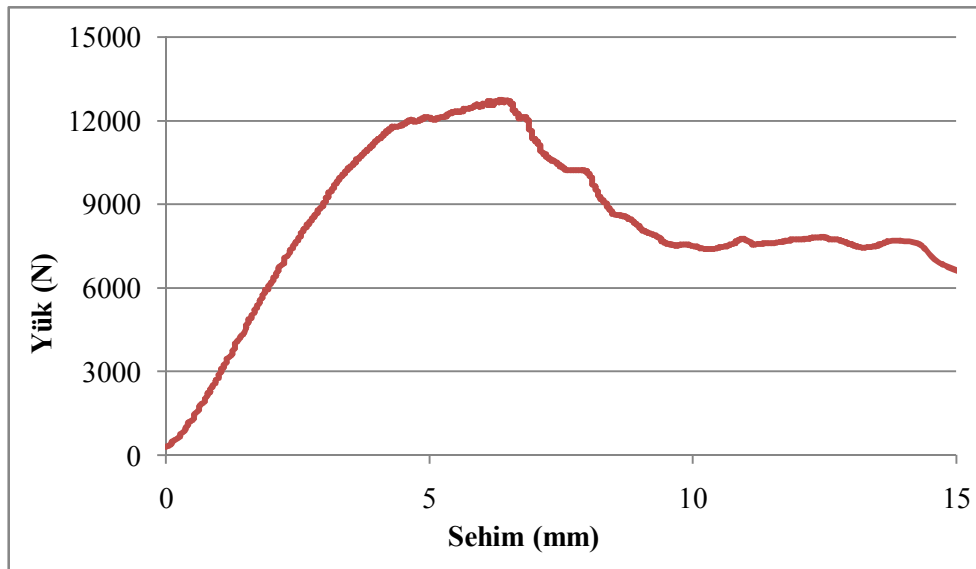
Şekil 5.60. Hibrit Özel Keçeli ve Hibrit Özel Keçeli Kumlu grafiklerinin karşılaştırılması (74 mm)

GFRP Profil özelliklerinin geliştirildiği 74x74 mm kesitli profillere ek olarak laboratuarda profil dış yüzeyine 1 kat cam lifli keçe sarılarak Ek sargılı profiller üretilmiştir. Bu Ek sargılı boş GFRP profillerin eğilme test sonuçları Tablo 5.40'da verilmiştir.

Tablo 5.40. Ek sargılı boş GFRP profillerin eğilme test sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	13188	53.15	98125
2	13460	54.24	106340
3	13430	54.12	109590
4	12444	50.15	92560
5	11812	47.62	121416
Ortalama	12867	51.86	105606

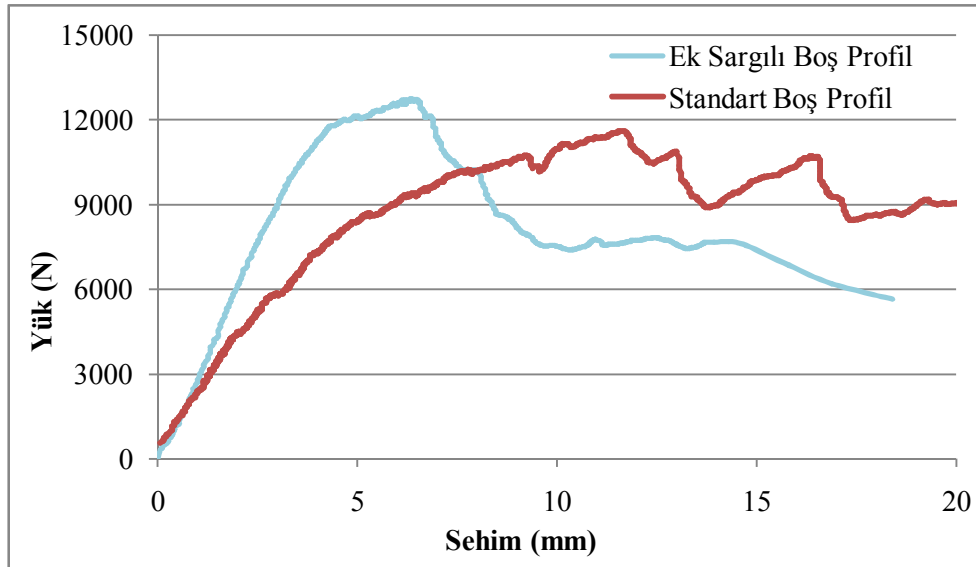
Ek sargılı boş GFRP profillerin eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 12867 N, eğilme dayanımı 51.86 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 105606 Nmm bulunmuştur. Ek sargılı boş GFRP profillere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.61'de verilmiştir.



Şekil 5.61. Ek sargılı boş GFRP profilin eğilme grafiği (74 mm)

Ek Sargılı boş profillere ait eğilme deneyi grafikleri incelendiğinde tüm numunelerde 12000 N yük değerine kadar lineer davranış gösterdiği, sonraki aşamalarda artan yük ile beraber profilde lokal kırılmaların gerçekleştiği fakat ani kopmaların olmadığı gözlenmiştir. Bu bölgesel kırılmalar sehim miktarını artırmakla birlikte özellikle yine köşe ve keçe liflerinden deforme olduğu tespit edilmiştir.

Keçe miktarının artırılması ile oluşturulan Ek Sargılı boş profiller ile mevcut boş standart profillere ait yük-sehim grafikleri, artan keçe miktarının eğilme davranışına etkisini incelemek amacıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 5.62). Lif oranlarının belirlenmesi kısmında tespit edilen standart boş profile göre %67 oranında keçe miktarı artırılan Ek sargılı profillerin hem rijitliğini ve eğilme dayanımını artırmıştır.



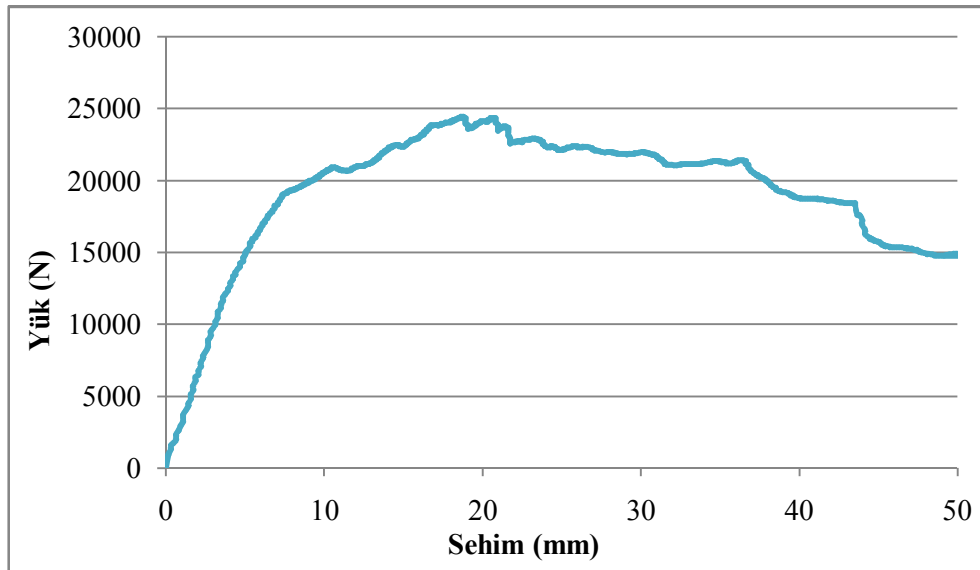
Şekil 5.62. Ek sargılı ve standart boş profillerin karşılaştırılması (74 mm)

Ayrıca Ek Sargılı boş GFRP profiller kullanılarak Hibrit Ek Sargılı kirişler oluşturulmuş ve eğilme testleri yapılmış ve Tablo 5.41’de Hibrit Ek Sargılı kirişlerin eğilme test sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.41. Hibrit Ek Sargılı kirişlerin eğilme deneyi sonuçları (74 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	27859	41.23	889230
2	28140	41.65	1030400
3	29003	42.92	737660
4	26597	39.36	765480
5	24192	35.81	894096
Ortalama	27158	40.19	863373

Hibrit Ek Sargılı kiriş numunelerin eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 27158 N, eğilme dayanımı 40.19 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 863373 Nmm bulunmuştur. Hibrit Ek Sargılı kiriş numunelere ait örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.63'te verilmiştir.

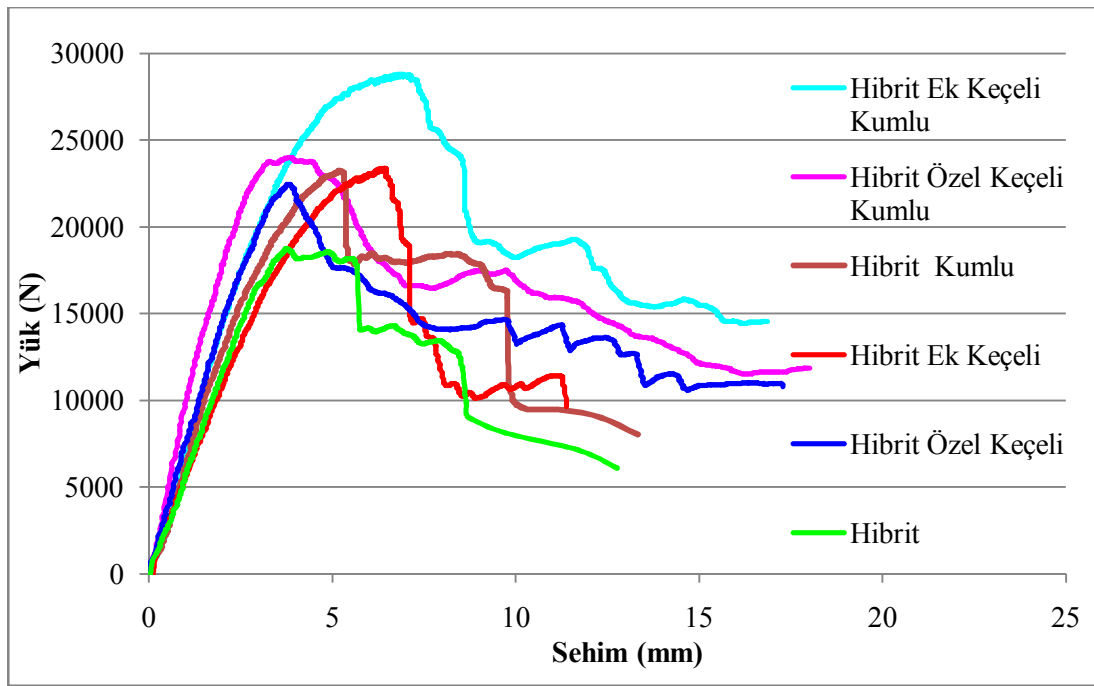


Şekil 5.63. Hibrit Ek Sargılı numune eğilme grafiği (74 mm)

Hibrit Ek Sargılı numunelerin yük-sehim grafikleri incelendiğinde tüm numunelerde 20000 N yük değerine kadar lineer davranış gösterdiği ve sehim miktarının 50 mm'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir.

Farklı kombinasyonlarda hazırlanan 74x74 mm kesitli numuneler ile gerçekleştirilen eğilme testleri sonucunda profil özellikleri geliştirerek yapılan deneylerde her numune grubunu temsil eden grafik seçilerek karşılaştırılmıştır. Şekil 5.64'te GFRP profil özelliklerinin geliştirildiği Hibrit numune grafiklerinin karşılaştırılması görülmektedir.

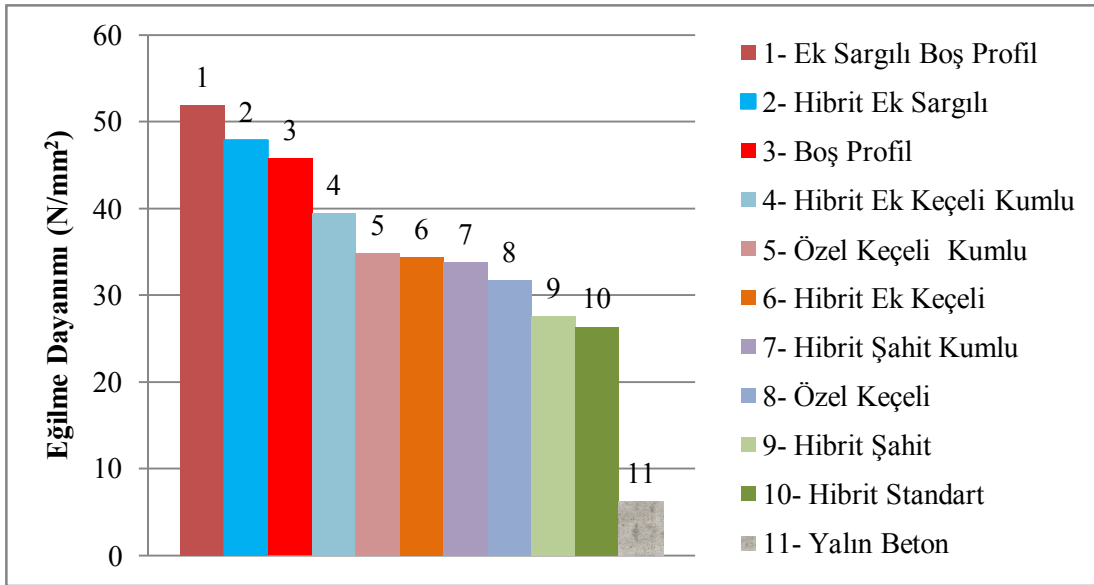
Grafik incelendiğinde yapılan iyileştirmelerle elde edilen Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunenin hem eğilme dayanımı hem de kırılma tokluğu açısından diğer numunelere göre en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Keçe miktarı artırılan profil türleri ile oluşturulan Hibrit numunelerin eğilme dayanımlarının arttığı, beton ile aderansı artırılan geliştirilen numunelerde ise özellikle rijitliğin arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.64. Geliştirilen Hibrit numunelerin karşılaştırılması (74 mm)

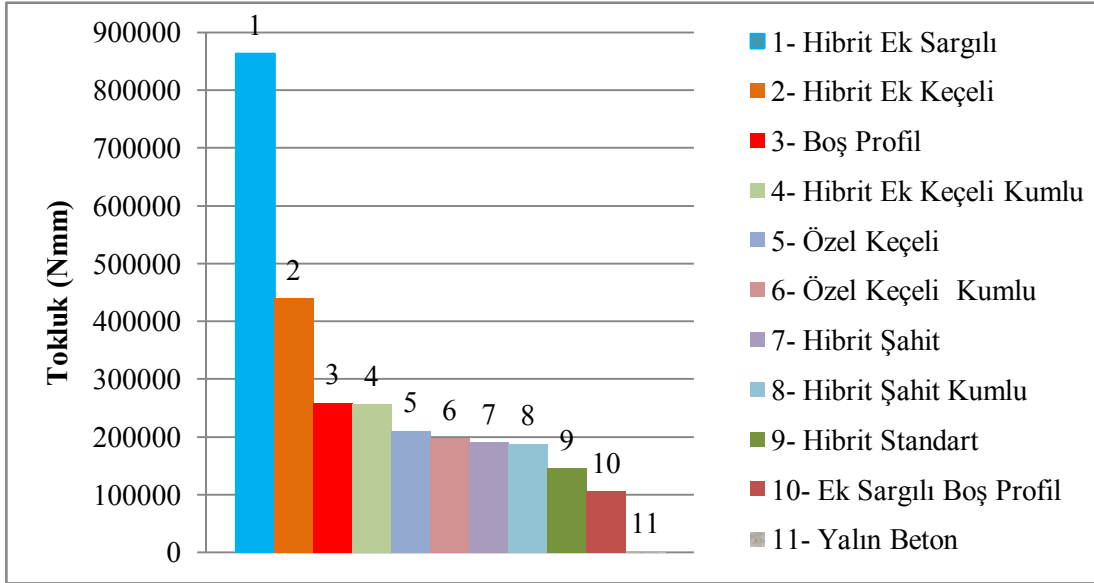
GFRP profillerde meydana gelen bölgesel kırılmaları azaltmak, Kayma dayanımı artırmak amacı ile profil keçe miktarı artırılmış ve yapılan eğilme deneyleri neticesinde standart profile göre Ek Keçeli profilin keçe miktarı %17, Özel Keçelinin %13 ve Ek Sargılı profilin ise %67 oranında arttığı tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 5.7).

Buna göre eğilme dayanımlarının karşılaştırılmasında (Şekil 5.65) Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunenin eğilme dayanımı Yalın beton numuneye göre yaklaşık 6.3 kat, Hibrit Standart numuneye göre %50 oranında artmıştır. Keçe miktarı %17 oranında artan Hibrit Ek Keçeli numune Hibrit numuneye göre eğilme dayanımı %25 oranında, %13 oranında keçe miktarı artırılan Özel Keçeli numunenin %15 oranında eğilme dayanımı artmıştır. Eğilme dayanımı eğilme yükü en büyük değere sahip olmamasına rağmen azalan kesit ile birlikte atalet momentinden dolayı en fazla boş Ek Sargılı profillerde çıkmıştır. Test sonuçları profil iç yüzey kumlanmasının beton ile aderansı iyileştirerek malzeme rijitliğini artırdığını, yan keçe miktarının artırılmasının ise kirişlerin eğilme dayanımını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.



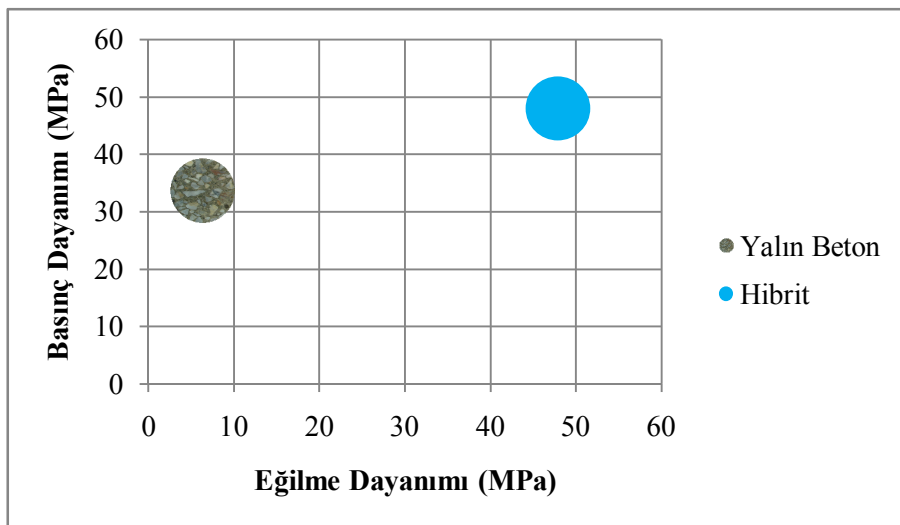
Şekil 5.65. Eğilme dayanımlarının karşılaştırılması (74 mm)

Eğilme testleri sonrasında kırılma toklukları değerlendirildiğinde Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunenin kırılma tokluk değeri tüm numuneler içerisinde en yüksek değerde çıkmıştır (Şekil 5.66). Hem iç yüzeyi kumlanan hem de profil dışına ek keçe sarılan ve standart profile göre keçe oranı %67 artan Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunenin kırılma tokluğu değeri Hibrit Şahit numuneye göre 4.5 kat, boş profillere göre 3.3 kat ve Yalın betona göre 583 kat daha fazla çıkmıştır.



Şekil 5.66. Kırılma tokluğu değerlerinin karşılaştırılması (74 mm)

Basınç ve eğilme dayanımlarını artırmaya yönelik yapılan çalışmalarda neticesinde Hibrit malzemenin gerek basınç dayanımı gerekse eğilme dayanımında önemli ölçüde artışlar sağlamıştır. Şekil 5.67’de 74 mm kesitli numuneler ile gerçekleştirilen basınç ve eğilme test sonuçlarına göre oluşturulmuş, Yalın beton ve Hibrit numunelerin basınç ve eğilme dayanım karşılaştırılması görülmektedir. Yalın betona göre Hibrit malzemenin basınç dayanımı 33 MPa değerinden 48 MPa’ya, eğilme dayanımı 7 MPa’dan yine yaklaşık 48 MPa’lık eğilme dayanımına ulaşmıştır.



Şekil 5.67. Yalın beton ve Hibrit numunelerin basınç ve eğilme dayanım karşılaştırılması (74 mm)

5.2.3. 100 mm kesitli numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Bu gruptaki GFRP kutu profillerin lif oranlarının belirlenmesi sonucunda, toplam 6 adet numune üzerinde gerçekleştirilen fiber oranı test sonuçları Tablo 5.42’de verilmiştir.

Tablo 5.42. Standart 100 mm kesitli GFRP profil lif oranları

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	43.72	16.68	8.45	18.11
	%	100	38.15	19.33	41.42
2	Ağırlık (gr)	43.28	16.76	8.52	18.23
	%	100	38.72	19.69	42.12
3	Ağırlık (gr)	43.22	16.92	7.87	18.31
	%	100	39.15	18.21	42.36
4	Ağırlık (gr)	43.16	17.28	8.47	18.17
	%	100	40.04	19.62	42.10
5	Ağırlık (gr)	42.78	16.84	8.35	17.34
	%	100	39.36	19.52	40.53
6	Ağırlık (gr)	43.21	16.93	8.08	18.02
	%	100	39.18	18.70	41.70
Ağırlıkça Ort. (%)		100	39.10	19.18	41.71
Hacimce Ort. (%)		100	26.76	13.12	60.12

Böylece 100x100 mm kesitli profillerin ağırlıkça boyuna lif oranı %39.10 ve keçe lif oranı ağırlıkça %19,18 olarak bulunmuştur. Aynı numunelerin boyuna hacimce lif oranı %26.76 ve keçe lif oranı hacimce %13,12 olarak bulunmuştur.

Bunun yanı sıra laboratuarda mevcut GFRP profil dışına keçe sarılması ile oluşturulan ek keçeli 100 mm kesitli profillerin lif oranları Reçine yakma metodu ile bulunmuştur (Tablo 5.43).

Tablo 5.43. Ek Sargılı GFRP profil lif oranları (100 mm)

Numune No		Toplam	Boyuna Fiber	Keçedeki Fiber	Matris
1	Ağırlık (gr)	56.12	17.12	11.25	26.14
	%	100	30.51	20.05	46.58
2	Ağırlık (gr)	55.8	17.79	11.37	27.04
	%	100	31.88	20.38	48.46
3	Ağırlık (gr)	54.52	18.32	11.15	26.41
	%	100	33.60	20.45	48.44
4	Ağırlık (gr)	54.36	17.04	10.85	26.07
	%	100	31.35	19.96	47.96
5	Ağırlık (gr)	54.78	17.33	11.04	26.49
	%	100	31.64	20.15	48.36
6	Ağırlık (gr)	55.45	18.03	10.42	27.14
	%	100	32.52	18.79	48.94
Ağırlıkça Ort. (%)		100	31.91	19.96	48.12
Hacimce Ort. (%)		100	21.83	13.65	64.52

Ek sargılı 100x100 mm kesitli numunelerin ağırlıkça boyuna lif oranı %31.91 ve keçe lif oranı ise ağırlıkça %19.96 olarak bulunmuştur. Aynı numunelerin hacimce fiber oranları değerlendirildiğinde, boyuna hacimce lif oranı %21.83 ve keçe lif oranı ise hacimce %13,65 bulunmuştur.

Bu veriler sonucunda 100x100 mm kesitli profillerde artan keçe miktarı tespit edilmiştir. Standart ve Ek sargılı 100 mm kesitli profillerin mevcut keçe miktarı hesaplanarak yapılan değerlendirmede, birim kesitteki keçe ağırlığına göre Ek Sarılı profillerde %50 oranında keçe miktarının arttığı tespit edilmiştir. Böylece basınç ve eğilme deneylerinde kullanılan GFRP profil oranları tespit edilmiştir. Profillerde farklı oranlarda kullanılan lif miktarlarının Hibrit numunelerin eğilme mukavemetini nasıl etkilediği belirlenmiş ve detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Bu bölümde 4-100-100 mm kesit ölçülerine sahip, 1500 mm uzunluğunda ve 1350 mm mesnet açıklığındaki boş GFRP profiller ve farklı özellikteki Hibrit kirişler üzerinde gerçekleştirilen eğilme test sonuçları verilmiştir. Bu numunelerde diğer numune gruplarında olduğu gibi bazı profillerin keçe miktarı artırılmış ve aynı zamanda iç yüzeyi kumlanmıştır. Her deney grubuna ait yük-sehim grafikleri oluşturulmuş, eğilme yükü, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri tablolar

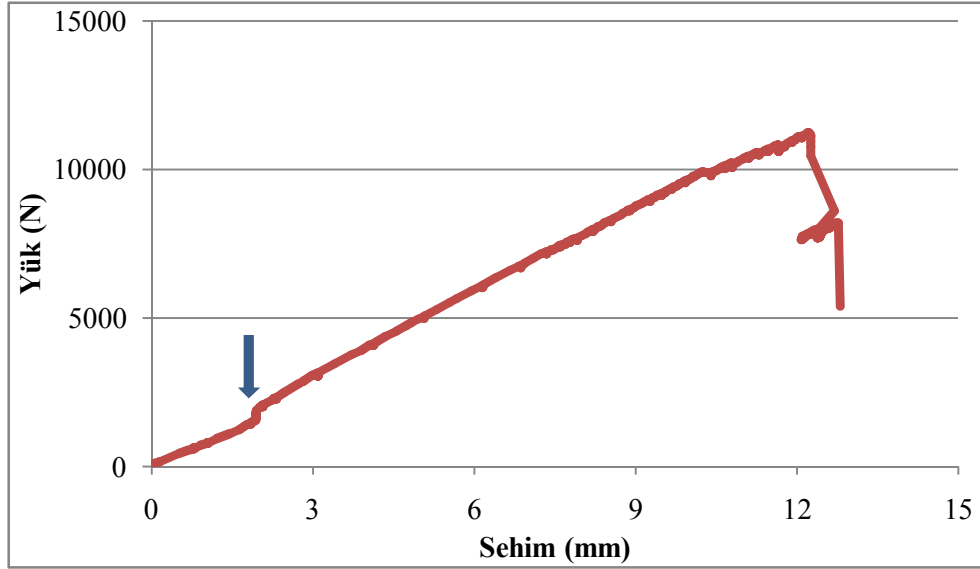
halinde verilmiş ve karşılaştırılmıştır. İlk deney grubu olarak boş GFRP kutu profillere ait deney sonuçları değerlendirilerek Tablo 5.44'te verilmiştir.

Tablo 5.44. Boş GFRP profillerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	11205	15.13	61477
2	14253	19.24	95882
3	12379	16.71	75092
4	10938	14.77	95138
5	11182	15.10	77317
Ortalama	11991	16.19	80981

100x100 mm kesitli GFRP profillerin eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 11991 N, eğilme dayanımı 16.19 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 80981 Nmm olarak bulunmuştur. Boş GFRP profilleri temsil eden örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.72'de verilmiştir.

Boş profillere ait eğilme deneyi grafikleri (Şekil 5.68) incelendiğinde tüm numunelerde 10000 N'luk yük değerine kadar lineer davranış gösterdiği, artan yük ile beraber profilde lokal kırılmaların gerçekleştiği ve ani yük düşüşlerinin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca profillerde 2000 N'luk yük değerinde profilde ilk lokal kırılmanın olduğu ve grafikteki lineer kısımdaki küçük ani değişimlerin deney esnasında oluşan kısmi kırılmalardan kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Grafikte lineer devam eden eğirinin bozulduğu ve okla gösterilen kısımda, boş profil üstten gelen kuvvet etkisiyle yükleme noktası çevresinde profil kesitindeki üst bileşen kısmının kenarlardan kırılması sonucu oluşmakta fakat profil kesitindeki düşey kenarlar yük taşımaya başlayınca tekrar lineer davrandığı tespit edilmiştir.



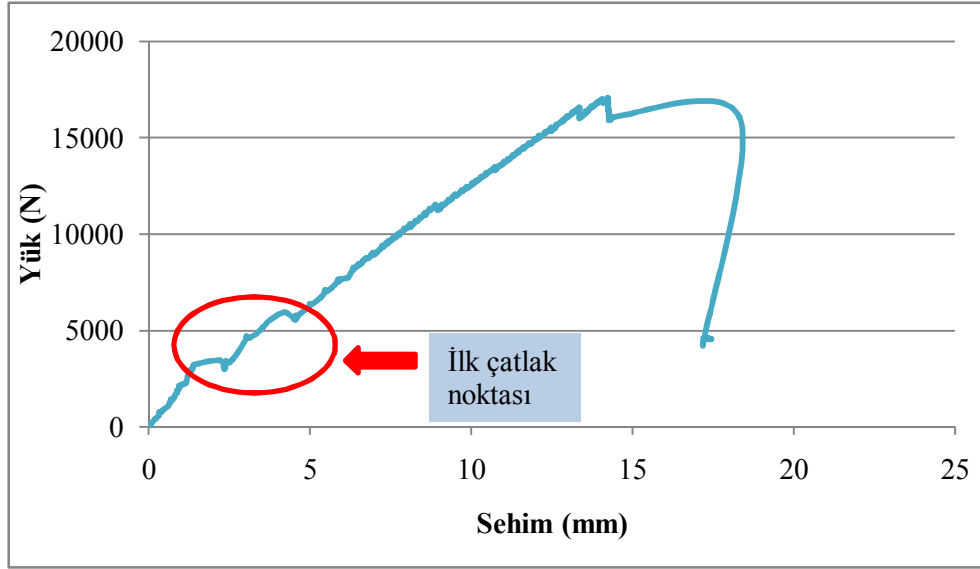
Şekil 5.68. Boş GFRP profil eğilme deney grafiği (100 mm)

Boş GFRP profillerin içerisi Kendiliğinden Yerleşen Beton ile doldurularak Hibrit kiriş numuneler üretilmiş, eğilme testleri yapılarak, test sonuçları Tablo 5.45'de verilmiştir.

Tablo 5.45. Hibrit profillerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	16904	22.82	169270
2	16230	21.91	249610
3	16787	22.66	220990
4	16834	22.73	203080
5	15929	21.50	138270
Ortalama	16537	22.32	196244

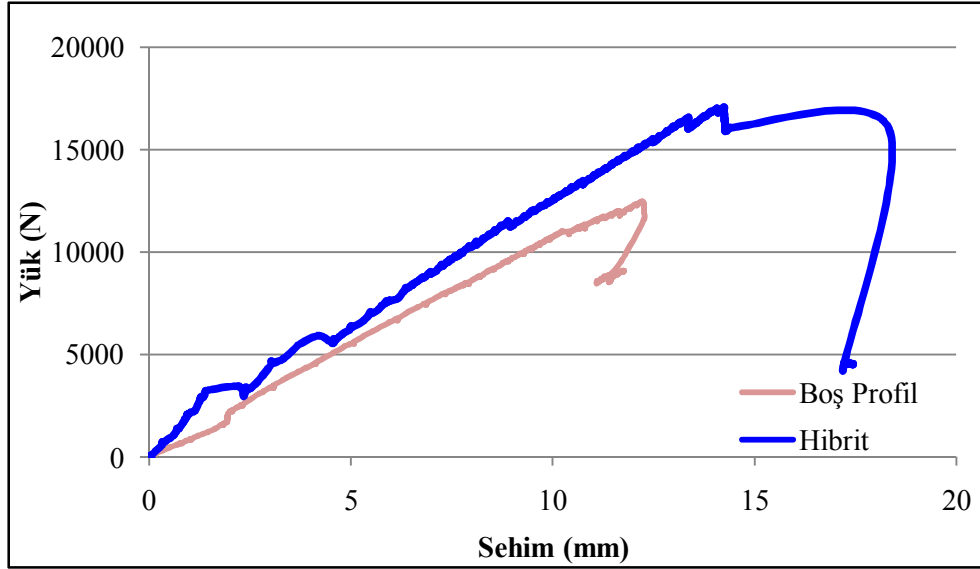
Hibrit kiriş numunelerin eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 16537 N, eğilme dayanımı 22.32 N/mm² ve kırılma tokluğu 196244 Nmm olarak bulunmuştur. Hibrit kirişleri temsil eden örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.69'da verilmiştir.



Şekil 5.69. Hibrit kirişin eğilme deney grafiği (100 mm)

Hibrit kirişlere ait eğilme grafikleri incelendiğinde tüm numunelerde 5000 N'luk yük değerinin altında profil içersindeki betonda kırılmaların başladığı, artan yük ile beraber 15000 N'a kadar doğrusal bir davranış gösterdiği, profil içersindeki betonda yaklaşık 5000 N'luk yük değerinde ilk kırılmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Boş GFRP profillerin KYB ile doldurulmasıyla üretilen Hibrit kirişlere ait yük-sehim grafikleri, Hibrit yapının eğilme davranışına etkisini incelemek amacıyla karşılaştırılmıştır. Aynı test grubundaki diğer test numunelerine ait yük-sehim grafikleri Ekler kısmında verilmiş, boş GFRP profiller ve Hibrit kirişleri temsil eden örnek grafikler Şekil 5.70'te karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde Hibrit kirişlerin eğilme dayanımı, sehim miktarı ve rijitliği önemli oranda artış gösterdiği tespit edilmiştir.



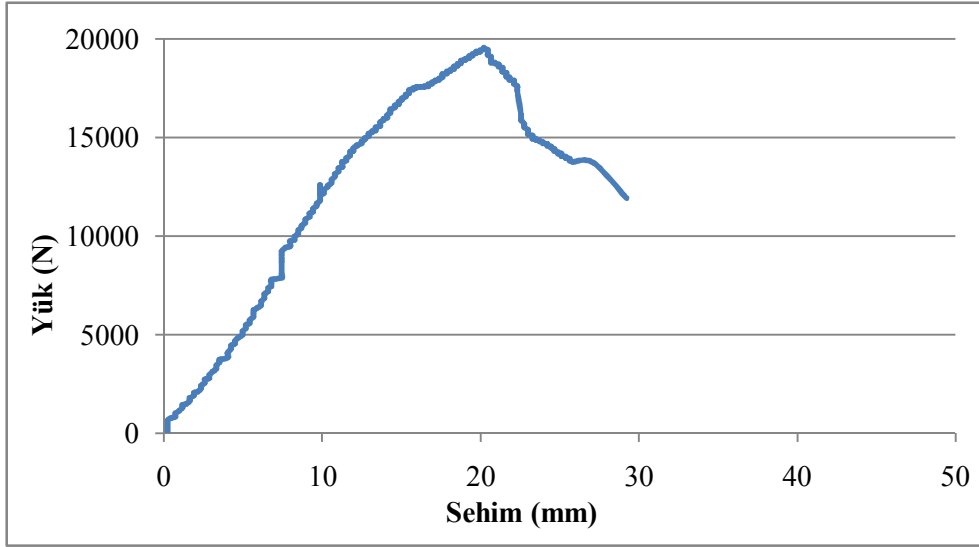
Şekil 5.70. Boş profil ve Hibrit kirişin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması (100 mm)

GFRP kutu profiller ile beton arasında ara yüzey oluşumunu engellemek ve aderansı artırmaya yönelik profil iç yüzeylerinin kumlanmasıyla oluşturulan Hibrit Kumlu numunelerin eğilme test sonuçları Tablo 5.46'da verilmiştir.

Tablo 5.46. Hibrit Kumlu numunelerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (Nmm)
1	17982	24.28	293050
2	18324	24.74	465087
3	19328	26.09	427150
4	16556	22.35	289140
5	18084	24.41	474580
Ortalama	18055	24.37	389801

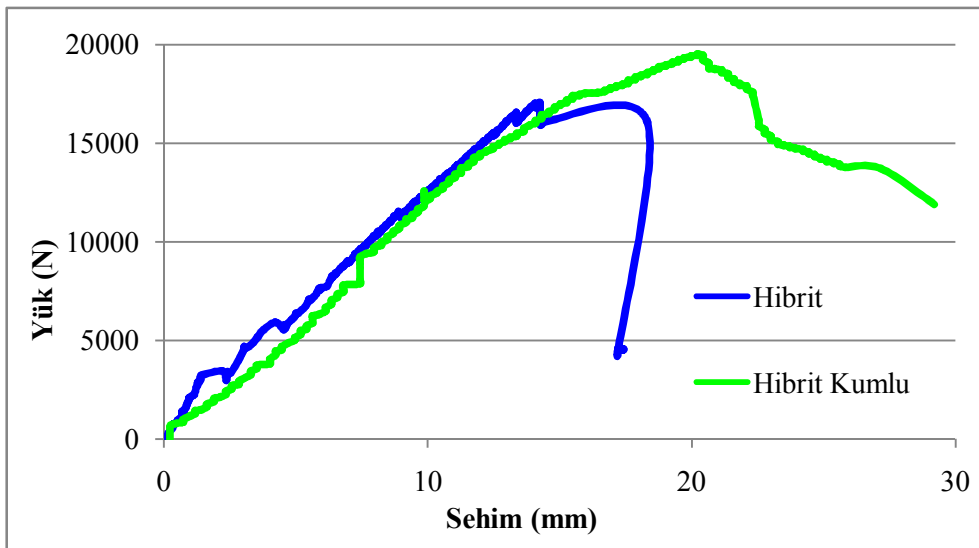
Hibrit Kumlu numunelerin eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 18055 N, eğilme dayanımı 24.37 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 398801 Nmm olarak bulunmuştur. Hibrit Kumlu kirişleri temsil eden örnek yük-sehim grafiği ise Şekil 5.71'de verilmiştir.



Şekil 5.71. Hibrit Kumlu kirişin eğilme deney grafiği (100 mm)

Hibrit Kumlu kirişlere ait eğilme deneyi grafikleri incelendiğinde eğilme dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Beton aderansın artırılmasının malzemede eğilme davranışına etkisini incelemek amacıyla Hibrit ve Hibrit Kumlu kirişlere ait yük-sehim grafikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.72). Hibrit ve Hibrit Kumlu kirişleri temsil eden grafikler seçilerek verilmiş ve Hibrit Kumlu kirişlerin eğilme dayanımının, sehim miktarının dolayısıyla kırılma tokluğunun arttığı tespit edilmiştir.



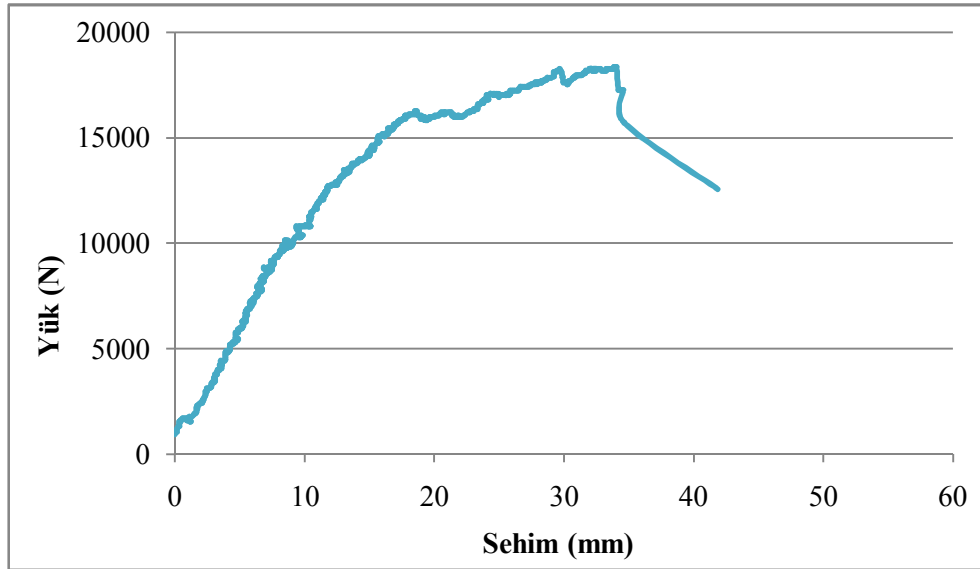
Şekil 5.72. Hibrit ve Hibrit Kumlu kirişin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması (100 mm)

100 mm kesitli Hibrit kirişlerde kullanılan GFRP profillerin keçe miktarı %50 oranında artırıldığı tespit edilmiş, bu şekilde hazırlanan Hibrit Ek Keçeli numunelerle eğilme testleri yapılmış ve değerlendirilmiştir (Tablo 5.47).

Tablo 5.47. Hibrit Ek Keçeli numunelerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)

Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (N.mm)
1	19093	25.78	506750
2	19190	25.91	364360
3	18332	24.75	586930
4	17578	23.73	469120
5	18478	24.95	272370
Ortalama	18534	25.02	439906

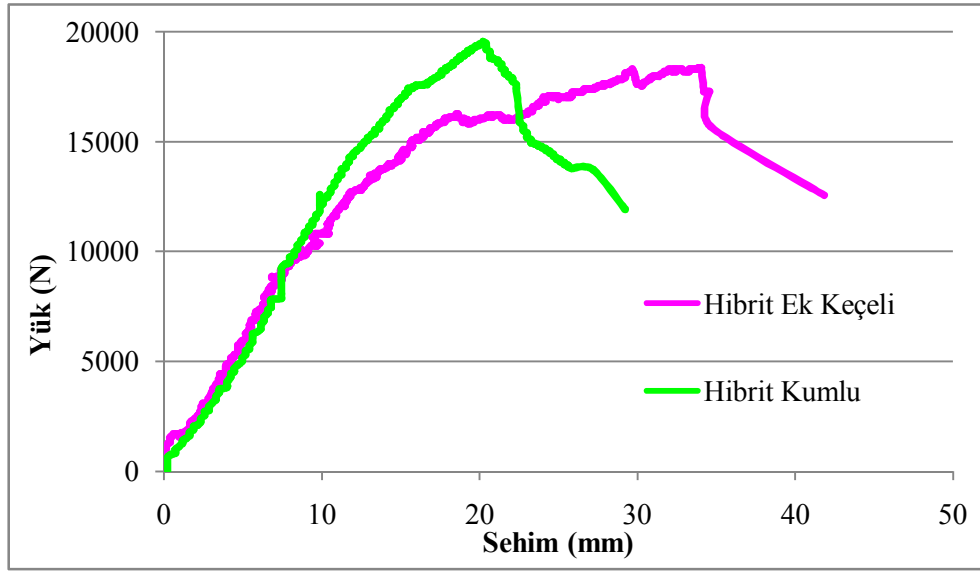
Hibrit Ek Keçeli numunelerin ortalama eğilme yükü 18534 N, eğilme dayanımı 25.02 N/mm² ve kırılma tokluğu ise 439906 Nmm olarak bulunmuştur. Hibrit Ek Keçeli kirişleri temsil eden örnek yük-sehim grafiği Şekil 5.73'te verilmiştir.



Şekil 5.73. Hibrit Ek Keçeli kirişin eğilme deney grafiği (100 mm)

Hibrit kirişlere ait eğilme deneyi grafikleri incelendiğinde tüm numunelerde 15000 N'luk yük değerine kadar kısmi kırılmalar ile birlikte doğrusal bir davranış sergilediği tespit edilmiştir.

GFRP profillerde keçe miktarının artırılması ya da kumlamanın etkisini incelemek amacıyla Hibrit Kumlu ve Hibrit Ek Keçeli kirişlere ait yük-sehim grafikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.74).



Şekil 5.78. Hibrit Kumlu ve Hibrit Ek Keçeli numune grafiklerinin karşılaştırılması (100 mm)

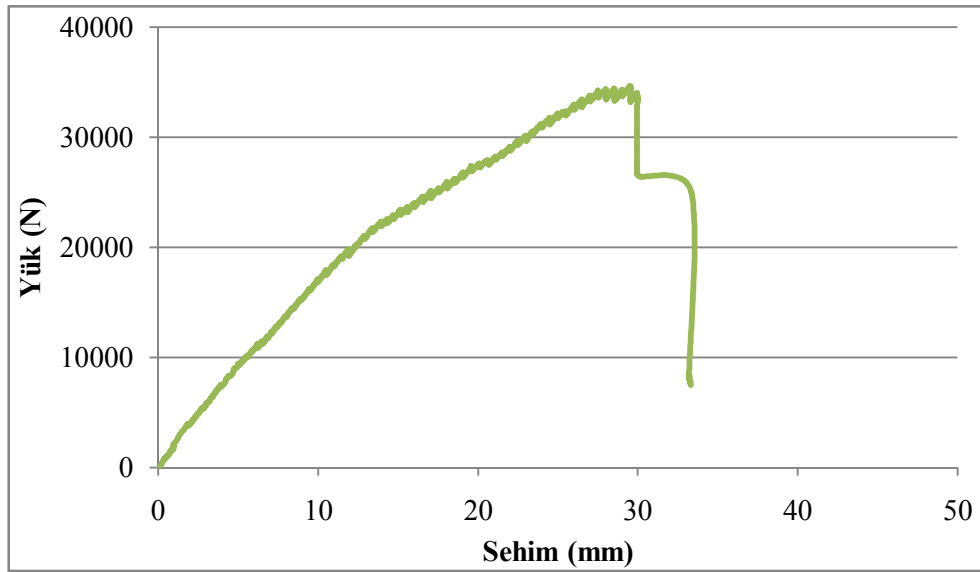
Hibrit Kumlu numuneye ait yük-sehim grafiği incelendiğinde Hibrit Ek Keçeli numuneye göre rijitliğinin arttığı, Hibrit Ek Keçeli numunede ise yük değerini kaybetmeden ek keçe lifler sehim miktarını dolayısıyla kırılma tokluğunu artırmıştır.

Hibrit kirişlerde keçe miktarının artırılması veya iç yüzeyin kumlanmasının eğilme performansını arttırdığı tespit edilmiş ve bu amaçla hem kumlu hem de ek keçeli numuneler hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunelerle eğilme testleri yapılarak test sonuçları değerlendirilmiştir (Tablo 5.48).

Tablo 5.48. Hibrit Ek Keçeli ve Kumlu numunelerin eğilme deneyi sonuçları (100 mm)

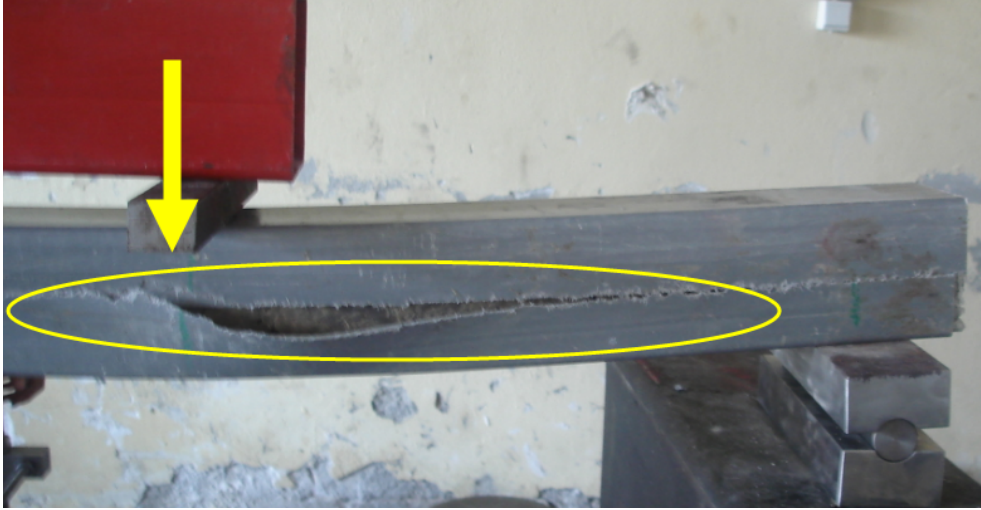
Numune No	Max. Yük (N)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Tokluk (N.mm)
1	34377	46.41	689270
2	35129	47.42	884990
3	34416	46.46	636910
4	38989	52.64	946240
5	34500	46.58	918300
Ortalama	35482	47.90	815142

Hibrit Ek Keçeli ve Kumlu numunelerin eğilme deneyleri sonucunda ortalama eğilme yükü 35482 N, eğilme dayanımı 47.90 N/mm² ve kırılma tokluğu 815142 Nmm olarak bulunmuştur. Hibrit Ek Keçeli+Kumlu kirişleri temsil eden örnek yük-sehim grafiği ise Şekil 5.75'de verilmiştir.



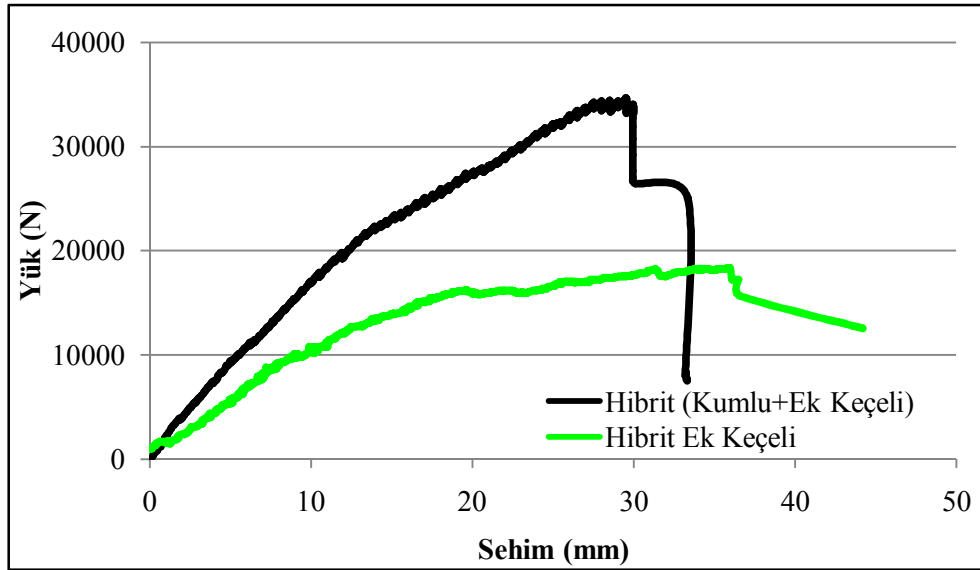
Şekil 5.75. Hibrit Kumlu ve Ek Keçeli kirişin eğilme deney grafiği (100 mm)

Hibrit Ek Keçeli ve Kumlu kirişlere ait eğilme deneyi grafikleri incelendiğinde tüm numunelerde 35000 N'luk yük değerine kadar lineer bir davranış sergilemiş ve ani kırılmaların olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 5.76'da Hibrit Ek Keçeli ve Kumlu kirişin kırılma hali görülmektedir.



Şekil 5.76. Eğilme deneylerinde GFRP profillerin kırılma biçimleri

Hibrit Ek Keçeli örnek numune ile Hibrit Ek Keçeli+Kumlu kirişlere ait yük-sehim grafikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.77).

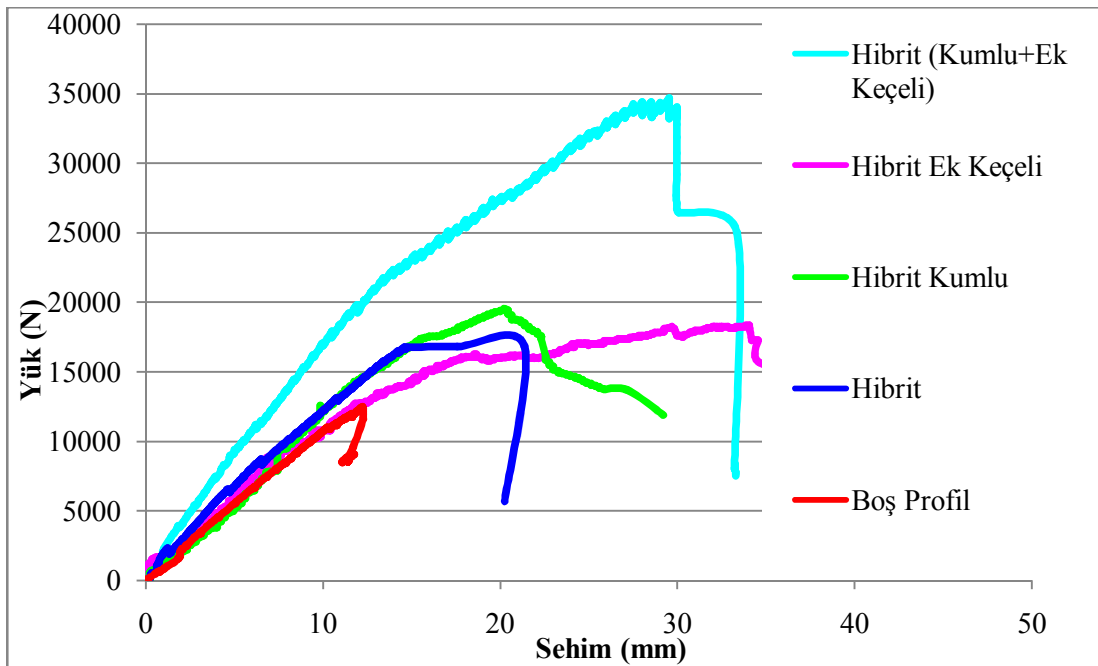


Şekil 5.77. Hibrit Ek Keçeli ve Hibrit Ek Keçeli+Kumlu numune grafiklerinin karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde Hibrit Ek Keçeli+Kumlu kirişlerin eğilme dayanımı Hibrit Ek Keçeli numuneye göre yaklaşık %90 oranında, ayrıca profil içerisinde kumlanarak beton ile aderansın geliştirilmeyle rijitliğinin de arttığı tespit edilmiştir. Böylece GFRP profillerin hem keçe miktarının artırılarak kesme davranışının iyileştirilmesi

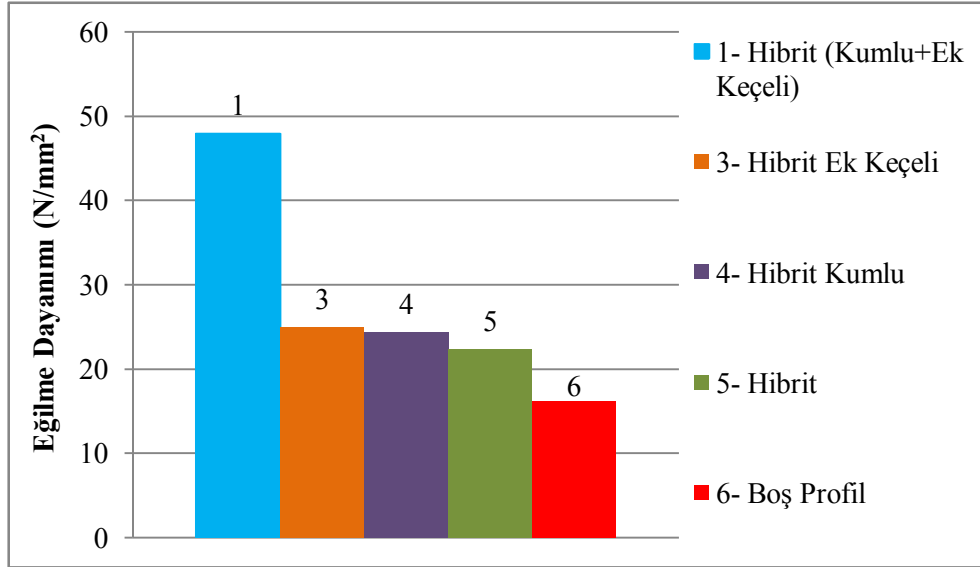
hem de beton ile aderansının aynı anda artırılmasının, malzeme davranışına çok büyük katkı yaptığı tespit edilmiştir.

100x100 mm kesitli kirişler ile yapılan deneyler sonrasında her numune grubunu temsil eden grafikler tek grafik üzerinde gösterilerek karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 5.78). Grafikte boş profillerden başlamak üzere malzemede yapılan her iyileştirme çalışması sonrasında eğilme dayanımı artmış, Hibrit Ek Keçeli+Kumlu kirişler büyük bir performans sergilemiştir.



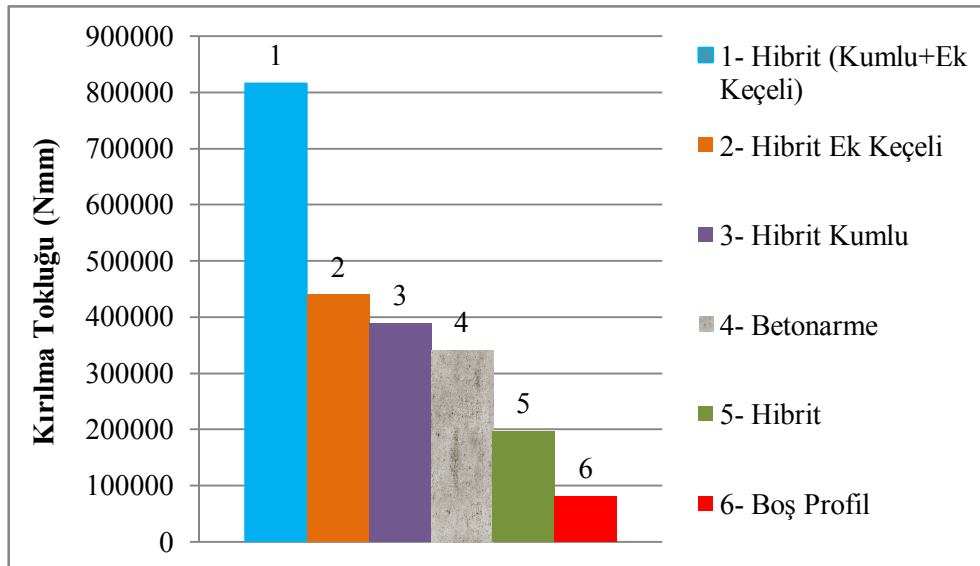
Şekil 5.78. 100 mm kesitli kiriş grafiklerinin karşılaştırılması

Belirtilen numune türlerinin eğilme dayanımlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 5.79'da görülmektedir. Böylece Hibrit Ek Keçeli+Kumlu numunenin eğilme dayanımı aynı boyutlardaki boş profillere göre yaklaşık 2.8 kat ve Hibrit standart numunelere göre 2 kat arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.79. Eğilme dayanımlarının karşılaştırılması (100 mm)

Şekil 5.80'de farklı numune türlerinin kırılma tokluk değerleri hesaplanarak, karşılaştırılmıştır. Hibrit Ek Keçeli+Kumlu numunenin kırılma tokluk değeri yine aynı boyutlardaki boş GFRP profillere göre yaklaşık 10 kat ve Hibrit standart numunelere göre ise 4 kat arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.80. Kırılma tokluklarının karşılaştırılması (100 mm)

5.2.4. Teori

Kirişler ile ilgili Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorisi olmak üzere iki tür teori mevcuttur. Euler-Bernoulli kiriş teorisi düzgün izotropik bir kirişin elastikliğinin basitleştirilmiş bir ifadesi sayılmakta ve bu teori ile kirişlerin yük taşıma ve çökme karakteristikleri hesaplanmaktadır. Timoshenko kiriş teorisi ise kirişteki kayma ve dönmenin oluşturduğu eylemsizlik moment faktörlerinin Euler-Bernoulli teorisine ilave edilmiş, aslında bir bakıma daha geliştirilmiş halidir. Euler-Bernoulli teorisi ince kiriş teorisi olarak bilinmekte ve küçük kirişler için tercih edilmektedir. Hibrit kirişlerin teorik hesaplamasında Euler-Bernoulli teorisi kullanılmıştır.

Teorik çalışmalarda ilk olarak boş GFRP kutu profillerin eğilme davranışı incelenmiştir. Bölüm 4'te belirlenen GFRP malzemenin mekanik özellikleri ve teorik hesaplamalarda kullanılması gerekli veriler şu şekildedir:

GFRP Elastisite Modülü (E_x)	: 29280 N/mm ²
GFRP Elastisite Modülü (E_y)	: 7199 N/mm ²
GFRP Kayma Modülü (G)	: 3200 N/mm ²

Teorik analizler için gerekli, eğilme testlerinde kullanılan 4 mm et kalınlıklı 45x45, 74x74 ve 100x100 mm kesitli GFRP profillerin Atalet momentleri ve kesit alanları hesaplanarak Tablo 5.49'da verilmiştir.

Tablo 5.49. GFRP profil kesit özellikleri

Kesit (mm)	Atalet Momenti (I) (mm ⁴)	Kesit Alanı (A) (mm ²)
45x45	185539	656
74x74	917653	1120
100x100	2363392	1536

Bulunan malzeme özellikleri kullanarak boş GFRP kutu profilin Eğilme ve Kayma rijitlik değerleri Formül 5.1 ve Formül 5.2 ile hesaplanmıştır.

$$D = EI \quad (5.1)$$

$$F = GA \quad (5.2)$$

Burada;

D malzeme Eğilme rijitliğini ve F ise Kayma rijitliğini ifade etmektedir.

GFRP boş kutu profillerden oluşan kirişlerin sehim miktarı Formül 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır [116]. Toplam sehim miktarları, Kayma ve eğilme kuvvetleri ile oluşan sehimlerin toplamı ile elde edilmiştir.

$$\delta_{sehım} = \delta_{eğilme} + \delta_{kayma} \quad (5.3)$$

$$\delta_{sehım} = \frac{k_1 PL^3}{D} + \frac{k_2 PL}{F} \quad (5.4)$$

Burada;

δ : Kiriş orta noktasındaki sehım miktarı (mm)

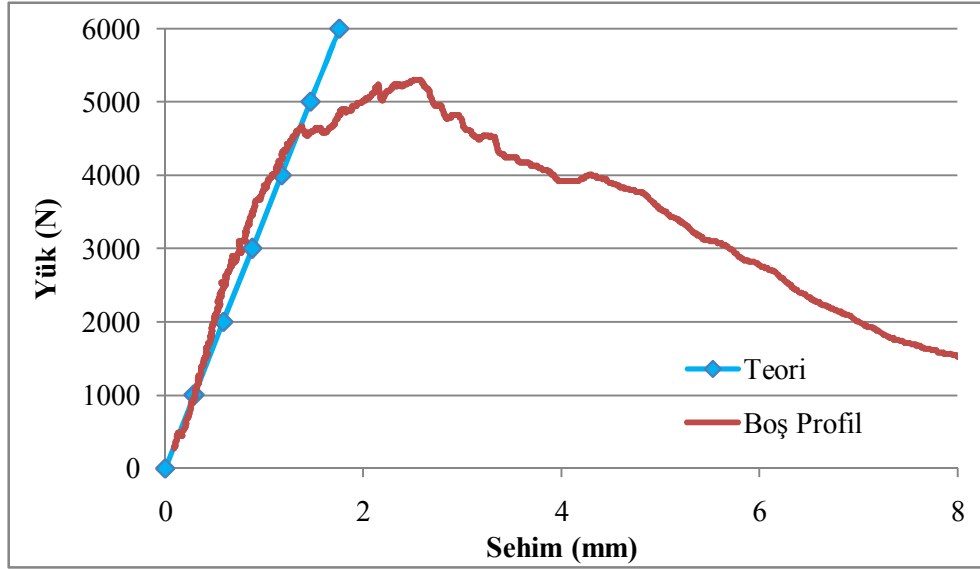
P : Eğilme yükü (N)

L : Mesnetler arası mesafe (mm)

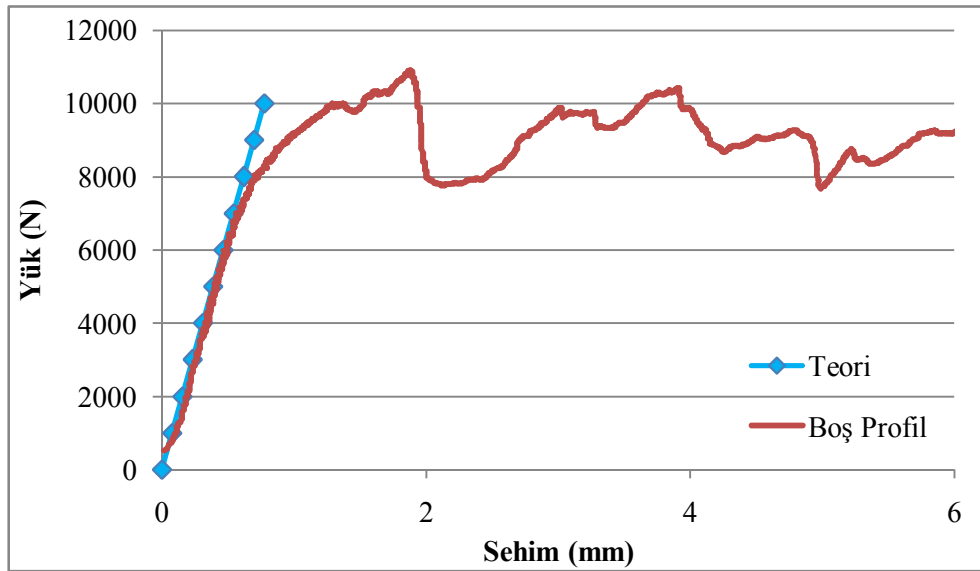
k_1 : Sabit sayı (1/48)

k_2 : Sabit sayı (1/4)

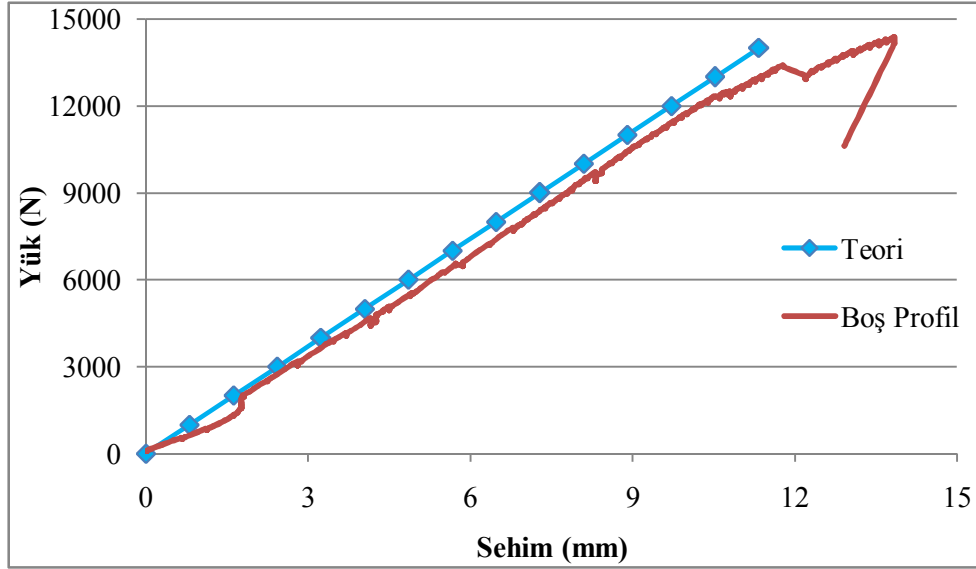
Boş GFRP kutu profillerin teorik yük-sehım grafikleri oluşturularak, eğilme testleri sonrasında elde edilen yük-sehım grafikleri ile karşılaştırılmıştır. 45x45 mm kesitli boş profillerin karşılaştırma grafiği Şekil 5.81, 74x74 mm kesitli boş profillerin Şekil 5.82 ve 100x100 mm kesitli boş profillerin karşılaştırma grafiği ise Şekil 5.83'te verilmiştir.



Şekil 5.81. 45 mm kesitli GFRP profilin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması



Şekil 5.82. 74 mm kesitli GFRP profilin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması



Şekil 5.83. 100 mm kesitli GFRP profilin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması

GFRP boş profillere ait karşılaştırma grafikleri incelendiğinde teorik hesaplamalar ile elde edilen yük-sehim değerlerinin deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmektedir. Teorik hesaplamalarda malzeme kusurları ihmal edildiğinden dolayı rijitliğin büyük çıktığı ancak artan yük değerlerinde 100x100 mm kesitli numunelerde %9'u geçmeyen farklılıkların ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

Hibrit numuneler ile yapılan teorik hesaplamalarda kirişin lineer davrandığı kabul edilerek kirişi oluşturan GFRP profil ile betonun mükemmel şekilde birleştirildiği varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Kiriş orta noktasındaki toplam sehim, eğilme ve kesme kuvvetlerinden oluşan sehimlerin toplanmasıyla bulunmuştur. Hibrit kirişler için gerekli betonun dönüşüm katsayısı Formül 5.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\alpha_b = \frac{E_b}{E_{GFRP}} = \frac{4700\sqrt{f_{bb}}}{29280} = 0.75 \quad (5.5)$$

Burada;

α_b : Dönüşüm Katsayısı

E_b : Betonun Elastisite Modülü (MPa)

E_{GFRP} : GFRP Malzemenin Elastisite Modülü(MPa)

f_{bb} : Beton Basınç Dayanımı (MPa)

Hibrit kirişin Atalet momenti (I_{hibrit}) Formül 5.6'da GFRP profilin Atalet momenti (I_{GFRP}) ve Dönüşüm katsayısı (α_b) kullanılarak hesaplanmış, Eğilme Rijitliği ($EI_{eğilme}$) Formül 5.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_{hibrit} = \alpha_b I_b + I_{GFRP} = 6840848 \text{ mm}^4 \quad (5.6)$$

$$EI_{eğilme} = E_{GFRP} \times I_{hibrit} = 2.10^{11} \quad (5.7)$$

Hibrit kirişlerin eğilme kuvvetinden kaynaklanan sehimi miktarı Formül 5.8 ve kayma kuvvetlerinin etkisiyle oluşan sehimi Formül 5.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Kiriş orta noktasında gerçekleşen toplam sehimi miktarı Formül 5.10 kullanılarak tespit edilmiştir.

$$\delta_{eğilme} = \frac{PL^2a}{48EI_{eğilme}} \left(3 - \frac{4a^2}{L^2}\right) \quad (5.8)$$

$\delta_{eğilme}$: Eğilme Sehimi (mm)

P : Eğilme yükü (N)

a : Mesnet ve yük arasındaki mesafe (mm)

L : Mesnetler arası mesafe (mm)

$$\delta_{kayma} = \frac{kPL}{G_{GFRP}A} \quad (5.9)$$

δ_{kayma} : Kayma Sehimi (mm)

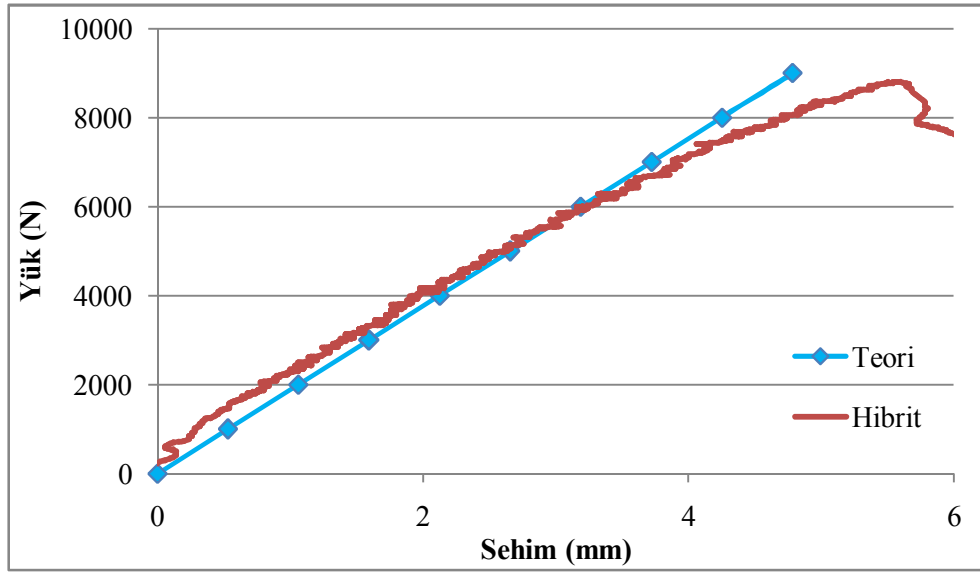
k : Sabit sayı (2)

G_{GFRP} : GFRP profil Kayma Modülü (MPa)

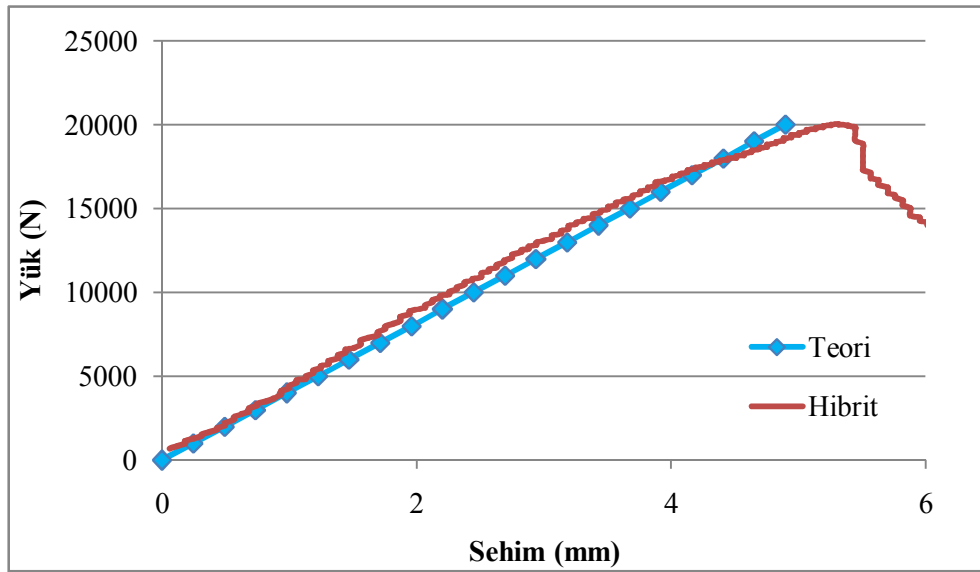
A : GFRP profil Kesit alanı (mm²)

$$\delta_{teori} = \delta_{kayma} + \delta_{eğilme} \quad (5.10)$$

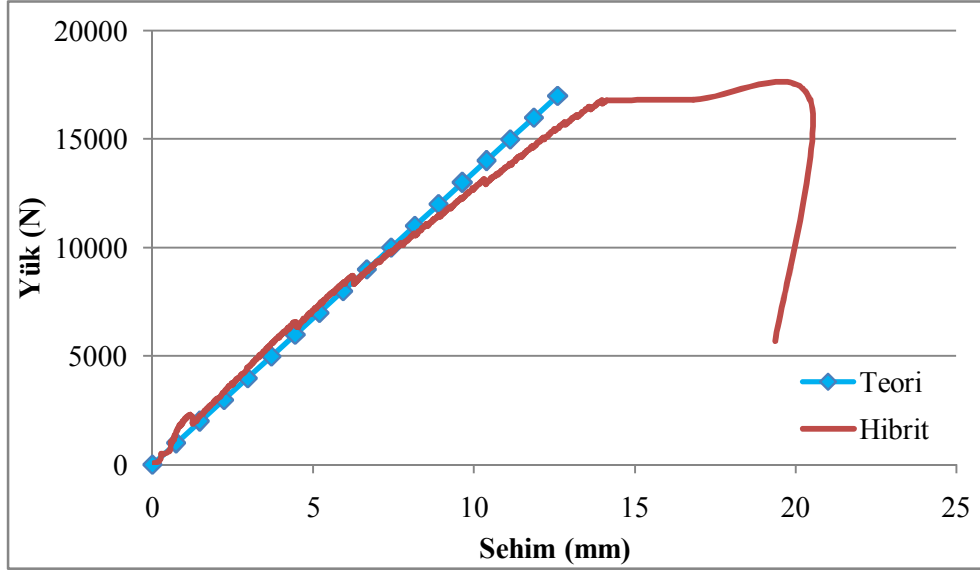
Hibrit kirişler için yapılan lineer analizler sonucunda kayma ve eğilme olmak üzere toplam sehim miktarları hesaplanarak, teorik yük-sehim grafikleri oluşturulmuş ve testler sonucunda elde edilen Hibrit kirişlerin yük-sehim grafikleri ile karşılaştırılmıştır. 45x45 mm kesitli Hibrit kirişin grafikleri Şekil 5.84, 74x74 mm kesitli Hibrit kirişin Şekil 5.85 ve 100x100 mm kesitli Hibrit kirişin karşılaştırma grafiği Şekil 5.86'da verilmiştir.



Şekil 5.84. 45 mm kesitli Hibrit numunelerin teorik ve deney grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.85. 74 mm kesitli Hibrit numunelerin teorik ve deney grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.86. 100 mm kesitli Hibrit numunelerin teorik ve deney grafiklerin karşılaştırılması

Hibrit kirişlere ait teorik ve deneysel verilerle oluşturulmuş yük-sehim grafikleri incelendiğinde, teorik hesaplamalar ile deneysel verilerin lineer elastik bölgelerinde uzaklaştığı yüklerde dahi %7'yi geçmeyen farklıklar tespit edilmiştir. Dolayısıyla test sonuçları ile teorik hesaplamalar arasında yakın bir uyum sağlanabileceği tespit edilmiştir.

5.3.5. Maliyet Analizi

Beton ve GFRP kutu profiller kullanılarak üretilen Hibrit malzemenin maliyeti hesaplanmıştır. Bu amaçla Hibrit kirişleri oluşturan boyuna lif, keçe lifi ve betonun güncel fiyatları elde edilerek gerekli hesaplamalar yapılmış, standart Hibrit ve geliştirilen Hibrit kirişler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Hibrit malzemeyi oluşturan malzemelerin güncel piyasa fiyatları üretici firmalardan temin edilerek Tablo 5.50'de verilmiştir.

Tablo 5.50. Malzeme fiyatları

Malzeme	Maliyet	Birim
GFRP Profil	3.5	€/kg
Keçe Cam Lifler	4	€/kg
Boyuna Cam Lifler	1.2	€/kg
Beton	40	€/m ³

Büyük kesitli Hibrit kirişler 100x100 mm kesitli ve 1500 mm uzunluğunda üretilmiştir. Bir Hibrit kirişi oluşturan GFRP profil 4009 gr ağırlığa sahip olup 14 €'ya, Hibrit malzeme içerisinde kullanılan beton 12696 cm³ hacme sahip olup, 0.5 €'ya mal olmaktadır. Böylece bir Hibrit kirişin toplam malzeme maliyeti 14 €'dur. Bunun yanı sıra yapılan hesaplamalar sonucunda standart Hibrit kirişlerde GFRP profil iç yüzeyinin kumlanması ve profil dış yüzeyine fazladan keçe sarılması işlemleri ile üretilen geliştirilmiş Hibrit kirişin toplam maliyeti ise 33.2 €'ya mal olmaktadır.

Kiriş eğilme testleri neticesinde hem keçesi hem de beton ile aderansı artırılarak üretilen geliştirilmiş (Kumlu+Ek Keçeli) Hibrit numuneler standart Hibrit kirişlere göre yaklaşık 2.4 kat maliyeti artmasıyla birlikte eğilme dayanımı standart Hibrit kirişlerin 2 katından fazla çıkmıştır.

Birim dayanım maliyet değerlendirilmesinde yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 5.51'de verilmiştir. Buna göre kiriş birim kesit değerlerinde 0.332 €/cm² maliyetle geliştirilmiş Hibrit kiriş en fazla maliyete sahip olduğutespit edilmiştir. Eğilme dayanım maliyetinde standart Hibrit kirişler 1.59 Mpa/€'luk değerle diğer kirişlere göre daha ekonomik maliyete sahipken, geliştirilmiş Hibrit kiriş 1.44 Mpa/€ dayanım maliyetine üretilebilmektedir. Kirişlerin enerji sönümlene potansiyelini ifade eden kırılma tokluğu maliyetlerinde standart Hibrit kirişin 7.1x10⁵ Nmm/€ ile en verimli maliyete sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.51. Malzeme birim dayanım maliyetleri

	Standart Hibrit Kiriş	Geliştirilmiş Hibrit Kiriş
Birim Maliyet (€/cm²)	0.140	0.332
Eğilme Dayanım Maliyeti (Mpa/€)	1.59	1.44
Kırılma Tokluğu Maliyeti (Nmm/€)	7.1x10 ⁵	4.1x10 ⁵

Maliyet analiz hesaplamaları genel olarak değerlendirildiğinde, Hibrit malzemenin tasarımından kaynaklanan betonu kimyasal ve çevresel etkenlere karşı koruması, beton kür avantajı, su geçirimsizliği, korozyon direnci ve hafifliği gibi avantajların ekonomik getirisinin üretim maliyeti hesaplanmasında kullanılmadığı dikkate alınmalıdır.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kare kesitli GFRP kutu profil ve betonun birleştirilmesi ile oluşturulan Hibrit yapı elemanlarının basınç ve eğilme davranışı incelendiği bu çalışmada, üç farklı kesit (45-74-100 mm kesitli) özelliklerine sahip profiller kullanılmıştır. Boş GFRP profiller, Yalın beton ve Hibrit numuneler ile basınç ve eğilme testleri gerçekleştirilerek, malzeme davranışları tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra Beton ve GFRP profiller arasındaki aderansı artırmak için profil iç yüzeyine kum yapıştırılarak ve GFRP profil lif oranlarını artırarak malzeme mekanik davranışında gelişmeler elde edilmiştir. Farklı kesit özellikleri, kompozit profil lif oranları, GFRP profil iç yüzeyi, beton basınç dayanımı ve özelliklerinin Hibrit yapı elemanlarının basınç ve eğilme davranışına etkileri araştırılmıştır.

GFRP malzeme özellikleri deneysel olarak belirlenmiş, elde edilen sonuçlarla nümerik analizler arasında yüksek oranda uyum yakalanmıştır. Böylece Nümerik analizlerle GFRP malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel sonuçlara yakınlıkla bulunabileceği tespit edilmiştir. Hibrit malzeme ile yapılan teorik çalışmalarda, Hibrit yapı elemanlarının eğilme davranışı yine büyük bir yakınlıkla hesaplanabileceği ortaya konulmuştur.

Çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Testler sonucunda kullanılan GFRP malzemenin Birim Ağırlığı 1.74 g/cm^3 , Özgül Ağırlığı 1.82, lif doğrultusuna paralel Elastisite Modülü 29333 N/mm^2 , Lif doğrultusuna dik Elastisite Modülü 7199 N/mm^2 ve Poisson Oranı 0.34 olarak bulunmuştur. Nümerik çalışmalarda bulunan Özgül Ağırlığın nümerik hesap sonucu ile deneysel çalışmalar sonucu arasında %96'lık, lif doğrultusuna paralel yöndeki Elastisite modülünde %90, Lif doğrultusuna dik yöndeki Elastisite modülünde %86, Poisson Oranında %90'lık yakınlık elde

edilmiştir. Böylece yapılan sayısal analizlerle, GFRP malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel sonuçlara çok yakınlıkla bulunabileceği ortaya çıkmıştır.

- Basınç ön deneylerinde C20 beton sınıfındaki Yalın beton ile Hibrit numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmasında, Hibrit numunelerin basınç dayanımı Yalın betonlara göre %56 oranında artmıştır. Bu durum C30 beton sınıfında %42 oranında ve C40 beton sınıfında %33 oranında yüksek çıkmıştır. Ayrıca üç beton sınıfında Hibrit numunelerin dayanım artışları ile birlikte Yalın betonlardan %4-7 oranında daha hafif oldukları tespit edilmiştir.
- GFRP profil özelliklerinin geliştirildiği 74 mm kesitli basınç deneyi sonuçlarında; C20 dayanım sınıfında Yalın beton basınç dayanımına göre Hibrit numune %24, Hibrit kumlu %29, Hibrit ek keçeli %32, Hibrit ek keçeli kumlu %33, Hibrit özel keçeli %33 ve Hibrit özel keçeli+kumlu numunelerin %28 oranında basınç dayanımı artmıştır. C30 dayanım sınıfında Yalın betona göre Hibrit %16, Hibrit kumlu %16, Hibrit ek keçeli %25, Hibrit ek keçeli+kumlu %27, Hibrit Özel keçeli %25 ve Hibrit özel keçeli+kumlu numunelerin %24 oranında basınç dayanımı artmıştır. C40 dayanım sınıfında Yalın betona göre Hibrit %9, Hibrit kumlu %11.8, Hibrit ek keçeli %12, Hibrit ek keçeli+kumlu %14, Hibrit özel keçeli %15 ve Hibrit özel keçeli kumlu numunelerin %14 oranında basınç dayanımı artmıştır.
- 74x74 mm kesitli küp numunelerle yapılan basınç test sonuçlarına göre basınç dayanım sınıfı arttıkça Hibrit ve Yalın beton küp numuneler arasındaki dayanım farkının azaldığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımı 20 MPa olan numunelerde Yalın betona göre Hibrit numunelerin artış oranı yaklaşık %28 iken dayanım sınıfı arttıkça artış oranı düşmekle birlikte, 30 MPa basınç dayanımında %21 oranında artış ve 40 MPa dayanımında ise %12 oranında artış olduğu belirlenmiştir.

- Tüm dayanım sınıflarında Hibrit malzeme kesitindeki profil oranı arttıkça dayanım artış oranının da artmakta olduğu, en fazla artış oranlarının düşük dayanımlarda olduğu, dayanım sınıfı arttıkça artış miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- 100x100 mm kesitli numunelerin basınç testlerinde, C20 dayanım sınıfındaki Hibrit numunelerin basınç dayanımının aynı kesit özelliklerine sahip Yalın betonların basınç dayanımına göre %74 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu artış C30 dayanım sınıfında %52, C40 beton sınıfında ise %20 oranında gerçekleşmiştir.
- 100x100 mm kesitli numunelerde yine basınç dayanım sınıfı arttıkça Hibrit ve Yalın beton küp numuneler arasındaki dayanım farkının azaldığı tespit edilmiştir. Yalın beton numunelere göre Hibrit numunelerin artış oranı %74 iken dayanım sınıfı büyüdükçe artış oranı düşmekte ve 43 MPa dayanımda %20 artış oranına düşmektedir. Bu beton basınç dayanımı arttıkça Hibrit numunelerdeki Profil etkisinin azaldığını göstermektedir. Ayrıca Hibrit numuneler dayanım artışlarının yanında Yalın betonlara göre yaklaşık %5 oranında daha hafiftirler.
- Eğilme test sonuçlarına göre, 45x45 mm kesitli ön deney numuneleri ile gerçekleştirilen C20 dayanım sınıfındaki Hibrit numunelerin eğilme yükü boş profile göre %51 oranında artmıştır. Hibrit numunenin eğilme dayanımı Yalın betona göre yaklaşık 8 kat, kırılma tokluğu boş GFRP profile göre %54 oranında ve Yalın betona göre 200 kat yüksek çıkmıştır. C30 dayanım sınıfında Hibrit numunenin eğilme yükü boş profile göre %58 oranında, eğilme dayanımı yaklaşık 9 kat artmıştır. Kırılma tokluğu boş GFRP profile göre %69, Yalın betona göre yaklaşık 250 kat yüksek çıkmıştır. C40 dayanım sınıfında Hibrit numunenin eğilme yükü Boş profile göre %75 oranında, eğilme dayanımı Yalın betona göre yaklaşık 10 kat artmıştır. Hibrit numunenin kırılma tokluğu boş GFRP profile göre %37 oranında, Yalın betona göre yaklaşık 240 kat yüksek çıkmıştır. Ön eğilme deneyleri

neticesinde malzeme eğilme davranışında beton basınç dayanım sınıflarının etkin olmadığı tespit edilmiştir.

- 74x74 mm kesitli eğilme testlerinde Hibrit numunenin eğilme yükü boş profile göre %56 oranında, Hibrit numunenin eğilme dayanımı Yalın betona göre yaklaşık 4 kat artmıştır. Profil lif oranlarının artırılması ile Hibrit ek keçeli+kumlu numunenin eğilme dayanımı Yalın beton numuneye göre yaklaşık 6 kat, Hibrit numuneye göre %50 oranında artmıştır. Keçe miktarı %17 oranında artan Hibrit ek keçeli numune Hibrit numuneye göre eğilme dayanımı %25 oranında , %13 oranında keçe miktarı artırılan Özel keçeli numunenin ise %15 oranında eğilme dayanımı artmıştır. Hem iç yüzeyi kumlanan hem de profil dışına ek keçe sarılan ve Şahit profile göre keçe oranı %67 artan Hibrit ek keçeli+kumlu numunenin kırılma tokluğu Hibrit numuneye göre 5 kat, Boş profillere göre 3 kat ve Yalın betona göre 583 kat fazla çıkmıştır.
- 100x100 mm kesitli ve 1500 mm uzunluğundaki kirişler ile yapılan eğilme deneylerinde Hibrit ek keçeli numunenin eğilme dayanımı aynı boyutlardaki, boş GFRP profillere göre 3 kat ve Hibrit numuneye göre 2 kat arttığı belirlenmiştir. Hibrit ek keçeli numunenin kırılma tokluk boş profillere göre yaklaşık 10 kat ve Hibrit standart numunelere göre 4 kat arttığı belirlenmiştir.
- Laboratuarda GFRP kutu profiller dış yüzeyine keçe lifi sarılarak yapılan profil özelliklerinin geliştirildiği işlemlerin fabrika üretimi esnasında kurulan özel düzeneklerle yapılması, malzeme dayanımındaki artış oranlarını daha da geliştireceği düşünülmektedir. Bununla birlikte bu çalışma kapsamında mevcut profiller ile yapılan tüm testler sonucunda GFRP kutu profillerin boyuna liflerden deforme olmayıp enine keçe liflerden kopması, boyuna lif oranının azaltılarak enine keçe lif oranının artırılmasının hem ekonomik açıdan hem de dayanım açısından pozitif sonuçların elde edileceğini göstermektedir.

- Kiriş teorilerinin kullanıldığı teorik çalışmalarda boş GFRP profile ait teorik yük-sehim grafikleri ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Farklı kesit boyutlarındaki boş GFRP kirişlere ait teorik hesaplamalar ile deneysel verilerin birbirinden en fazla uzaklaştığı yüksek değerdeki yüklerde en fazla %9'luk farklıklar tespit edilmiştir. Hibrit kirişlere ait teorik ve deneysel yük-sehim grafiklerinde ise teorik hesaplamalar ile deneysel verilerin birbirinden en fazla uzaklaştığı yüksek değerdeki yüklerde dahi %7'yi geçmeyen farklıklar bulunduğu, dolayısıyla deneysel sonuçların yakınlıkla tahmin edilebileceği ortaya çıkmıştır. Buna göre Hibrit yapı elemanının geliştirmesine yönelik çalışmalarda deneysel metotlara göre kolaylıkla hesaplanabilen nümerik analizlerle ön çalışma yapılabileceğini göstermiştir.
- Malzeme maliyet değerlendirmesinde; eğilme dayanım maliyetinde standart Hibrit kiriş 1.59 Mpa/€ ve geliştirilmiş Hibrit kiriş 1.44 Mpa/€ dayanım maliyetine üretilmektedir. Kırılma tokluğunda Hibrit kiriş 7.1×10^5 Nmm/€ ve geliştirilmiş Hibrit kiriş 7.1×10^5 Nmm/€'ya mal olmaktadır. Sonuç olarak Hibrit kirişlerin üretim maliyeti süreç içerisinde düşmeye devam etmekte olup, bununla birlikte Hibrit sistemdeki profillerin betonu çevresel etkenlere karşı koruması, su geçirimsizliği, beton küür avantajı, yalıtkanlığı, korozyon direnci ve hafifliği gibi olumlu yönlerinin ekonomik getirisinin hesaplanmadığı dikkate alınmalıdır.
- GFRP profiller birçok üstün özeliğinin yanı sıra diğer temel yapı malzemelerine göre özellikle hafifliği, korozyon direnci ve yüksek çekme dayanımı ile ön plana çıkmaktadır. Dolayısıyla bu malzemelerin inşaat endüstrisinde alternatif bir malzeme olarak kullanılması birçok yapı malzemesi problemine çözüm olabilecektir.
- Geleneksel yapı malzemeleri ve yeni nesil kompozitlerin birleşimi ile meydana gelen Hibrit yapı sistemleri, mevcut yapı malzemelerinin yetersiz yönlerini iyileştirmekte, yeni nesil malzemeler ise daha kullanılabilir duruma gelmektedir. Bu birleşimin bir örneği olan Beton–GFRP kutu profil birleşimi

ile oluşturulan Hibrit yapı elemanı bileşenlerine göre daha üstün özelliklerine sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

- Hibrit sistemde GFRP kutu profiller kalıp görevini üstlenmesinden dolayı, plastik kıvamdaki betona şekil verecek ikinci bir kalıp elemanına ihtiyaç duyulmamakta, dolayısıyla zamandan ve kalıp masraflarından büyük oranda avantaj sağlamaktadır.
- Hibrit yapı elemanında iki malzemenin birlikte hareket etmesi ile hem içi boş GFRP profile hem de yalın betona göre yüksek dayanım göstermekte, böylece aynı dayanıma sahip fakat daha küçük kesitli elemanlar üretilebilmektedir. GFRP profillerde eğilme yükü altında meydana gelen lokal kırılmalar, içerisine beton doldurularak oluşturulan Hibrit sistemde azalmakta ve eğilme dayanımı artmaktadır.
- Hibrit sistemde betonu koruyan GFRP profil, dışarıdan gelen su ve nemin geçişine izin vermeyerek, su içerisinde bulunan minerallerin betona zarar vermesini de engelleyecektir. GFRP'lerin iyi yalıtkan malzeme olmasından dolayı ısı geçişlerinden kaynaklanan enerji sarfiyatı ve ısıl gerilmelerden kaynaklı problemler azalacaktır. Ayrıca GFRP kutu profil içerisine yerleştirilen plastik kıvamdaki betonun suyunu ve nemini kaybetmesine izin vermeyerek, kür işlemine büyük katkı sağlayacaktır.
- GFRP kutu profiller ve beton kullanılarak oluşturulan Hibrit sistemlerde profil uzunluğu arttıkça plastik kıvamdaki betonun profil içerisine yerleştirilip sıkıştırılması zorlaşmaktadır. Bu nedenle uzun Hibrit kirişlerde KYB kullanılarak betonun kendi ağırlığıyla yerleşmesi sağlanarak, bu problem çözülebilmektedir.
- GFRP kutu profiller ve beton birleşimi ile oluşturulan Hibrit sistemler müstakil kolon veya kiriş olarak özellikle deniz yapıları ya da deniz suyu etkisine maruz kalan yapılarda ortaya çıkan durabilite ve korozyon problemlerine çözüm olabilecek potansiyele sahiptir. Bunun yanı sıra

kimyasal üretim yapan tesisler, köprü kirişleri ve rıhtımlar gibi yapılarda da GFRP-Beton Hibrit yapı elemanlarını kullanmak mümkündür.

- Yapılan bu çalışmaya ilave olarak; GFRP kutu profil-Beton Hibrit yapı elemanlarının ısı ve yangın dayanımı üzerinde çalışmalar yapılabilir. Hibrit kirişlerde tarafsız eksenin altında kalan alt çekme bölgesindeki beton içerisine yerleştirilen minimum boyuna çelik donatılar ile eğilme performansı geliştirilebilir. Yalın betona göre yüksek basınç dayanımına sahip Hibrit kolonlarda artan dayanımla birlikte küçülen kesitler neticesinde narinlikte artacağından, farklı boyut ve kesite sahip numuneler üzerinde burkulma analiz çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.innovativeglobal.net/files/HCbrochure.pdf> (22.07.2010).
- [2] CALLISTER, W.D., Materials Science and Engineering, Second edition, John Wiley and Sons Inc., Singapore, 1990.
- [3] ERSOY, H. Y., Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2010.
- [4] ERİÇ, M., Yapı Fiziği ve Malzemesi, Literatür Yayıncılık Dağıtım Ltd. Şti., İstanbul 1994.
- [5] http://mae.ucdavis.edu/vlasaponara/Fiberline_Kolding.pdf (25.02.2010)
- [6] CRIPPS, A., Fiber Reinforced Polymer Composites In Construction, Construction Industry Research & Information Association (CIRIA), February, 2002.
- [7] HOLLAWAY, L.C., Advance Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure, Elsevier Science, First edition, July 2001.
- [8] EMMONS, P. H., VAYSBURG, A. M. and THOMAS, J., Strengthening of Concrete Structures, Part II, Advanced Composites, ACI Concrete International, Vol. 20, No. 4, pp. 56-60, 1998.
- [9] HADI, M.N.S., Behaviour of FRP Wrapped Normal Strength Concrete Columns Under Eccentric Loading, Composite Structures, 72 503–511, 2006.
- [10] TENG, J.G., CHEN, JF, SMITH, ST., LAM, L. FRP Strengthened RC Structures, John Wiley, 2002.
- [11] CLARKE, JL., Strengthening Concrete Structures With Fibre Composites, Struct Build;156(1):49–50, 2003.
- [12] KOKSAL, H.O. DORAN, A. and TURGAY, T., A Practical Approach For Modeling FRP Wrapped Concrete Columns, Construction and Building Materials, 23(3), 1429–1437, 2009.
- [13] WEIJIAN, Y. and HUNG, H., Experimental Study On The Flexural Behavior of Beams Strengthened With CFRP Laminates, Proc. of the International Conference on FRP, Composites in Civil Engineering, Hong Kong, China, pp. 399-405. 12-15 December 2001.

- [14] BANK, L.C., Application of FRP Composites to Bridges in the USA, Proceedings of the International Colloquium on Application of FRP to Bridges, Tokyo, Japan. 2006.
- [15] MIRMIRAN, A. and SHAHAWY, Behavior of Concrete Columns Confined By Fiber Composites. J. Struct. Eng. 123: 583-590, 1997.
- [16] FAM, A.Z. and RIZKALLA, S.H., Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular FRP Tubes. ACI Structural Journal. 98(4):251-461. 2001.
- [17] BECQUE, J., PATNAIK, A. K. and RIZKALLA, S. H., Analytical Models for Concrete Confined With FRP Tubes, J. Compos. Constr., 7-1,31-38, 2003.
- [18] YU T., WONG, Y.L., TENG, J.G., DONG, S.L. and LAM, E.S.S., Flexural Behavior of Hybrid FRP-Concrete-Steel Double-Skin Tubular Members, Journal of Composites For Construction, ASCE pp. 443-452/ September/October 2006.
- [19] HONG, W.K., KIM, H.C. and YOON, S.H., Experiment Of Compressive Strength Enhancement of Circular Concrete Column Confined By Carbon Tubes. KCI Concrete Journal 14:4. 19-144. 2002.
- [20] SCHAUMANN, E., Hybrid FRP-Lightweight Concrete Sandwich System For Engineering Structures, PhD thesis, 2008.
- [21] KELLER, T., SCHAUMANN, E. and VALLÉE, T., Flexural Behavior of A Hybrid FRP and Lightweight Concrete Sandwich Bridge Deck, Composites Part A;38(3): 879-889. 2007.
- [22] HALL, J. and MOTTRAM, J., Combined FRP Reinforcement And Permanent Formwork For Concrete Members, J Composites Construct;2(2):78-86, 1998.
- [23] CANNING, L., HOLLAWAY, L. and THORNE, A.M., An Investigation Of The Composite Action Of An FRP/Concrete Prismatic Beam, Construction and Building Materials, 13 417-426, 1999.
- [24] RIBEIRO, M.C.S., TAVARES, C.M.L., ANTÓNIO, J.M.F., MARQUES, A.O.T., Static Flexural Performance of GFRP-Polymer Concrete Hybrid Beams, Key Engineering Materials, Volumes 230-232, Advanced Materials Forum I, pages 148-151, 2002.
- [25] TIANHONG, L., PENG, F. and LIEPING, Y. "Experimental Study On FRP-Concrete Hybrid Beams, Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006), Miami, Florida, USA, December 13-15 2006.

- [26] FAM, A., SCHNERCH, D. and RIZKALLA, S., Rectangular Filament-Wound Glass Fiber Reinforced Polymer Tubes Filled with Concrete under Flexural Axial Loading: Experimental Investigation, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 1, ASCE, 2005.
- [27] HAMDY, M.M. and RADHOUANE, M., Flexural Strength and Behavior Of Steel and FRP-Reinforced Concrete-Filled FRP Tube Beams, *Engineering Structures* 32, 3789–3800, 2010.
- [28] MIRMIRAN, A., SHAHAWY, M. and SAMAAAN, M., Strength and Ductility of Hybrid FRP-Concrete Beam-Columns, 1 Member, ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 10, ASCE, October, 1999.
- [29] AYDIN, F., SARIBIYIK, M. ve İPEK, M., CTP Profil ile Betonun Hibrit Kullanımının Basınç ve Eğilme Özelliklerine Etkisi. 12th International Materials Symposium (IMPS), Denizli, Turkey. 2008.
- [30] AYDIN, F. and SARIBIYIK, M., Compressive and Flexural Behavior of Hybrid Use of GFRP Profile with Concrete. 2. International Symposium on Sustainable Development (ISSD 2010), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina 2010.
- [31] AYDIN, F. ve SARIBIYIK, M., GFRP Kutu Profiller ile Betonun Hibrit Kullanımının Beton Kürüne Etkilerinin İncelenmesi, *e-Journal of New World Sciences Academy*, Volume: 6, Number: 4, Article Number: 1A0211, 2011.
- [32] TS 1247, Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında). Türk Standartları Enstitüsü, 1984.
- [33] TS 3323, Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması, Hızlandırılmış Kürü ve Basınç Dayanım Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, 1979.
- [34] ŞAHİN, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Yayın Evi, Ankara, 2000.
- [35] HOLMES, M. and JUST, D.J., GRP in Structural Engineering, Applied Science Publishers Ltd., New York, 1983.
- [36] REINFORCED Plastics, November/December, pp. 16-21, (www.reinforcedplastics.com), 2009.
- [37] MALLICK, P.K., Composite Engineering Handbook, Marcel Dekker, New York, 10-11, 1997.
- [38] EUROCOMP, Structural Design of Polymer Composites, Design Code and Handbook, Edited by Clarke J. L., Chapman and Hall, London, 10-11, 1996.
- [34] http://www.thermwood.com/header/cnc_routers_by_application.htm (17.10.2009).

- [40] BANK, L.C., Composites for Construction Structural Design with FRP Materials, Wiley, New Jersey, 2006.
- [41] HOTA, V.S. G., VIJAY, P.V. and NARENDRA, T., Reinforced Concrete Design with FRP Composites, CRC Press 2007.
- [42] CTP Teknolojisi, Cam Elyafı Takviyeli Reçine Sistemleri, Cam Elyaf Sanayi A.Ş., İstanbul, 1984.
- [43] Composites Manufacturing, An Official Magazine of The American Composites Manufacturers Association, (<http://www.acmanet.org>), March 2008.
- [44] www.strongwell.com (2009).
- [45] PULSTAR Brochure, Pultrusion Machinery, Equipment & Services, 2011.
- [46] www.cmmagazine.org, Composites Manufacturing, an official magazine of the American composites manufacturers association, February 2005 and June 2007.
- [47] SARIBIYIK, M., ELMAS, M., ÖZDEMİR, S., ÜNAL, H., ÇAĞLAR, N. ve AYDIN, F., TÜBİTAK sonuç raporu, Sera Tasarımında Pultrüzyon Metoduyla Üretilen Cam Fiber Takviyeli Plastiklerin Kullanılması, Sakarya, Şubat 2008.
- [48] http://www.superiorfibers.com/upload/SFLLC_FRP_Comparison_Chart.pdf (12.02.2011).
- [49] HALLIWELL, S.M., Polymer Composites in Construction, BRE Centre for Composites in Construction, London, 2000.
- [50] AYMAN, M., Composites: Construction Materials For The New Era, Advance Polymer Composites for Structural Applications in Construction (ACIC), pp.45-58, 2004.
- [51] KARBHARI, V.M., Durability of Advanced Polymer Composites in the Civil Infrastructure, Advance Polymer Composites for Structural Applications in Construction (ACIC), pp.31-38, 2004.
- [52] HALLIWELL, S.M. and REYNOLDS, T., Effective Use of Fibre Reinforced Polymer Materials in Construction, BRE Centre for Composites in Construction, London, 2004.
- [53] <http://www.fiberline.com/structures/case-stories-other-structures/lindevang-metro-station-copenhagen/lindevang-metro-station-copenhagen>. (18.4.2011)
- [54] Sika Brochure, Sika Services AG, Corporate Construction, <http://www.sika.com>, (2011).

- [55] <http://www.insomak.com/tr/> (2009).
- [56] Bridge Components Brochure, Fiber Reinforced Polymer Composites, R.J. Watson, Inc. Bridge & Structural Engineered Systems, 2011.
- [57] HYBRID CONCRETE / FRP BRIDGES, Construction Innovation Forum, (www.CIF.org), 2010.
- [58] IYER, L. and SEN, R., Advanced Composites For Civil Engineering Structures, ASCE, Reston V.A., 1991.
- [59] NANNI, A., Fiber Reinforced Plastic (FRP) for Concrete Structures: Properties and Applications, Elsevier Science. New York, 1993
- [60] ACI, State-Of-Art Report On Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement For Concrete Structures, ACI 440R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1996.
- [61] HOLLAWAY, L.C. and HEAD, P.R. Advance Polymer Composites and Polymers In The Civil Infrastructure, Elsevier, London, 2001.
- [62] TENG, J.G., CHEN, J.F., SMITH, S.T. and LAM, L., FRP Strengthened RC Structures, Wiley, New York, 2000.
- [63] BAKIS, C.E., BANK, L.C., BROWN, V.L. COSENZA, E., DAVALOS, J.F, LESKO, J.J. MACHIDA, A., RIZKALLA, S.H. and TRIANTAFILLIOU, T.C., Fiber Reinforced polymer Composites for construction, state-of-the-art-review, journal of Composites for construction, Vol. 6, No.2, pp 73-87, 2002.
- [64] HOLLAWAY, L., The Evolution Of The Way Forward For Advanced Polymer Composites In The Civil Infrastructure, Construction and Building Materials, Vol.17, pp. 365-378, 2003.
- [65] VAN DEN EINDE, L., ZHAO, L. and SEIBLE, F., Use of FRP Composites in Civil Structure Applications, Journal of Construction and Building Materials, Elsevier, Vol. 17, pp 389-403, 2003.
- [66] TAJLSTEN, B., FRP Strengthening of Existing Concrete Structures: Design Guideline, 3. Ed, Lulea University of Technology, Lulea , Sweden. 2004.
- [67] HYUNG-JOONG, J., SEUNGSIK, L.,B, SOON-JONG, Y., JU-KYUNG, P. and KWANG-YEOUL, S., Development Of Hybrid FRP-Concrete Composite Compression Members, Advanced Materials Research Vols. 26-28, pp 329-332, 2007.
- [68] LEO, B., Design of A Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Bridge, University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy. Second Lieutenant (Singapore Armed Forces), School of Aerospace, Civil&Mechanical Engineering, Final Thesis Report 2009.

- [69] MIRMIRAN, A. and SHAHAWY, M., A Novel FRP-Concrete Composite Construction for the Infrastructure. Proc., 13th Structures Congress, ASCE, New York, 1663–1666, 1995.
- [70] CABRERA, S., Shear Strength and Seismic Performance of Concrete Filled FRP Tubes. MS thesis, Univ. of Central Florida, Orlando, Fla, 1996.
- [71] SEIBLE, F., BURGUEÑO, R., ABDALLAH, M.G. and NUISMER, R., Development of Advanced Composite Carbon Shell Systems for Concrete Columns in Seismic Zones, Proc., 11th World Conf. on Earthquake Engineering, Pergamon-Elsevier Science, Paper No. 1375, Oxford, U.K, 1996.
- [72] DAVOL, A., BURGUEÑO, R., and SEIBLE, F., Flexural Behavior of Circular Concrete Filled FRP Shells, J. Struct. Eng. 127, 810–817, 2001.
- [73] FAN, L., ZHOU, W. and XUE, Y., Preliminary Study of Seismic Performance of FRP Tube Confined Concrete Short Columns. Proc., 1st Chinese National Conf. of Application Technology of FRP Materials in Civil Engineering, National Diagnosis and Rehabilitation of Industrial Building Research Center, Beijing, 113–117, 2000.
- [74] YUAN, H., XUE, Y., LI, X., and ZHANG, M., Study On A Novel Hybrid GFRP/CFRP Composite Beam. Proc., 2nd Chinese National Conference of Application Technology of FRP Materials in Civil Engineering, Tsinghua University Publication, Beijing, 296–305, 2002.
- [75] SHAO, Y. and MIRMIRAN, A., Experimental Investigation of Cyclic Behavior of Concrete-Filled Fiber Reinforced Polymer Tubes, Journal of Composites for Construction, ASCE, 263-273, May/June 2005.
- [76] <http://www.lancastercomposite.com/> (2011).
- [77] DESKOVIC, N. and THANASIS, C., Triantafillou and Urs Meier, Innovative Design of FRP Combined with Concrete: Short-Term Behavior, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 7, pp. 1069-1078, 1995.
- [78] MIRMIRAN, A., SAMAAAN, M., CABRERA S. and SHAHAWY M., Design, manufacture and testing of a new hybrid column Construction and Building Materials, Vol. 12, No. 1, pp. 39-49, 1998.
- [79] HULATT, J. and HOLLAWAY, L., Thorne The use of advanced polymer composites to form an economic structural unit, Construction and Building Materials 17, 55–68, 2003.
- [80] FAM, A., SCHNERCH, D. and RIZKALLA, S., Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6), pp. 685-694, Singapore, 2003.

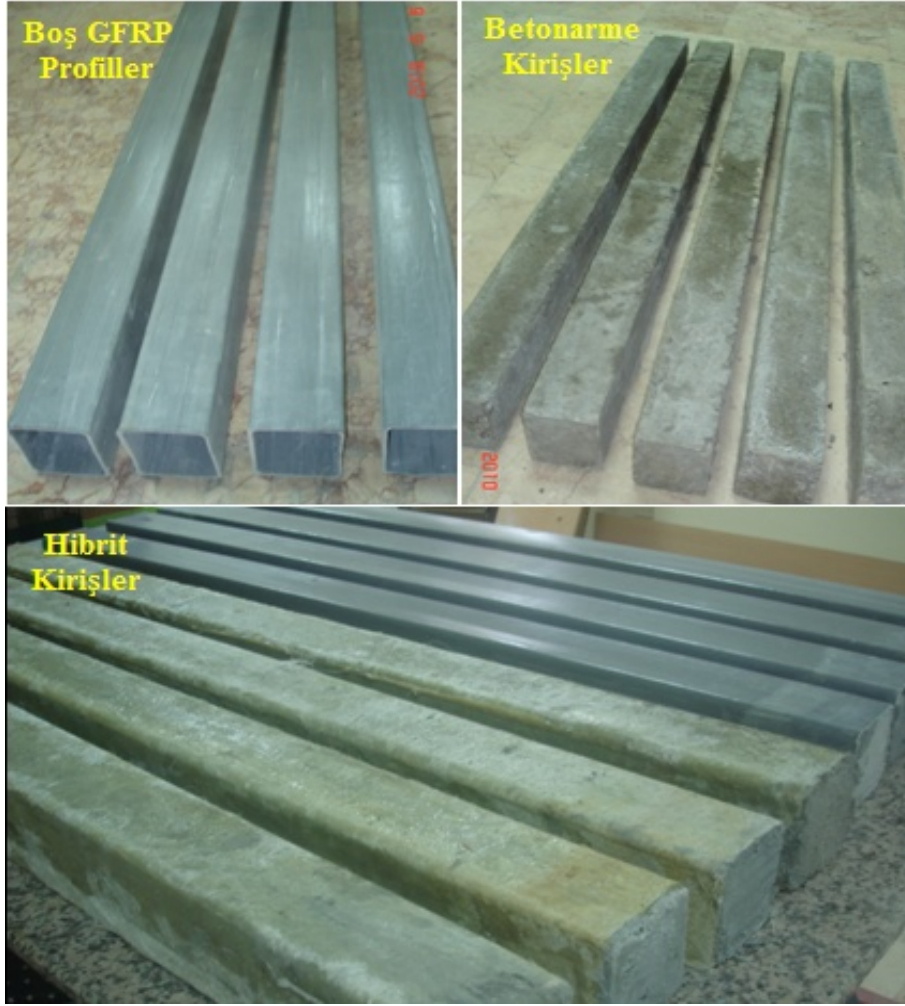
- [81] NORDIN, H. and TALJSTENA, B., Testing of Hybrid FRP Composite Beams in Bending, *Composites: Part B* 35 27–33, 2003.
- [82] MENDES FERREIRA, A. J., RIBEIRO, M.C.S. and TORRES MARQUES, A., Analysis Of Hybrid Beams Composed Of GFRP Profiles And Polymer Concrete, *International Journal of Mechanics and Materials in Design 1*: 143–155, Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands. 2004.
- [83] WENLXIAO, L. and ZHISHEN, W., Flexural performance of newly developed hybrid FRP concrete beams, *FRP Composites in Civil Engineering, Australia, CICE 2004*; 819-826, 2004.
- [84] TENG, J.G., YU, T. and WONG, Y.L., Behavior of Hybrid FRP-Concrete-Steel Double-Skin Tubular Columns, *FRP Composites in Civil Engineering, Australia, CICE 2004*; 811-818, 2004.
- [85] JOÃO, R. CORREIA, FERNANDO, A. BRANCO, JOÃO G. FERREIRA, Flexural Behaviour of Multi-Span GFRP-Concrete Hybrid Beams, *Engineering Structures* 31, 1369-1381, 2009.
- [86] JOAO, R. CORREIA, FERNANDO, A. BRANCO, JOAO G. FERREIRA, Flexural behaviour of GFRP–concrete hybrid beams with interconnection slip, *Composite Structures* 77, 66–78, 2007.
- [87] BISHNU P.G., RASAD GAUTAM VE TAKASHI M., Composite Structures Shear deformation and interface behaviour of concrete-filled CFRP box beams, *Composite Structures* 89, 20–27, 2009.
- [88] FARDIS, M.N. and KHALILI, H., Concrete Encased Fiber Glass Reinforced Plastic, *ACI* , Vol. 78, No. 6, pp. 440-446, 1981.
- [89] HILLMAN, J.R. and MURRAY, T.M., Innovative Floor Systems For Framed Buildings, *Mixed Structures, Including New Materials. Proceedings of IABSE symposium, Brussels. Belgium, Vol. 60, IABSE, Zurich. pp. 672-675, 1990.*
- [90] MIRMIRAN, A. and SHAHAWY, M., Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 5, pp. 583-590, 1997.
- [91] FAM, A. and RIZKALLA, S., Behavior of Axially Loaded Concrete-Filled Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes. *ACI Structural Journal, ACI*, Vol. 98, No. 3, pp. 280-289, 2001.
- [92] MIRMIRAN, A., SHAHAWY, M. and SAMAAAN M., Strength and Ductility of Hybrid FRP-Concrete Beam-Columns, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 10, pp. 1085-1093. 1999.

- [93] MIRMIRAN, A., SHAHAWY, M., EL KHOURY, C. and NAGUIB, W., Large Beam-Column Tests on Concrete-Filled Composite Tubes., *ACI Structural Journal*, ACI, Vol. 97, No. 2, pp. 268-276. 2000.
- [94] FAM, A. and RIZKALLA, S., Flexural Behavior of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Circular Tubes, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 6, No. 2, pp. 123-132. 2002.
- [95] AHMAD, I., ZHU, Z. and MIRMIRAN, A., Behavior of Short and Deep Beams Made of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 12, No. 1, pp. 102-110. 2008.
- [96] AHMAD, I., ZHU, Z. and MIRMIRAN, A., Fatigue Behavior of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 12, No. 4, pp. 478-487, 2008.
- [97] HELMI, K., FAM, A., MUFTI, A., and HALL, J., Effects of Driving Forces and Bending Fatigue on Structural Performance of a Novel Concrete-Filled Fibre-Reinforced-Polymer Tube Flexural Pile, *Canadian Journal of Civil Engineering*, NRCC, Vol. 33, No. 6, pp. 683-691, 2006.
- [98] HELMI, AHMAD I., ZHU, Z. and MIRMIRAN A., Fatigue Behavior of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 12, No. 4, pp. 478-487. 2008.
- [99] SHAO, Y. and MIRMIRAN, A., Experimental Investigation of Cyclic Behavior of Concrete-Filled FRP Tubes, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 9, No. 3, pp. 263-273, 2005.
- [100] ZHU, Z., AHMAD, I. and MIRMIRAN, A., Seismic Performance of Concrete-Filled FRP Tube Columns for Bridge Substructure, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 3, pp. 359-370, 2006.
- [101] NAGUIB, W. and MIRMIRAN, A., Time-Dependent Behavior of FRP-Confined Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, ACI, Vol. 99, No. 2, pp. 142-148, 2002.
- [102] ZHENG NAGUIB, W. and MIRMIRAN, A., Time-Dependent Behavior of FRP-Confined Concrete Columns, *ACI Structural Journal*, ACI, Vol. 99, No. 2, pp. 142-148, 2007.
- [103] FAM, A., KONG, A., GREEN, M., Effects of Freezing and Thawing Cycles and Sustained Loading on Compressive Strength of Precast Concrete Composite Piles, *PCI Journal*, PCI, Vol. 53, No. 1, pp. 109-120, 2008.
- [103] YILEI, S., Seismic Performance of Hybrid Fiber Reinforced Polymer-Concrete Pier Columns, Florida International University, PhD thesis, 2009.

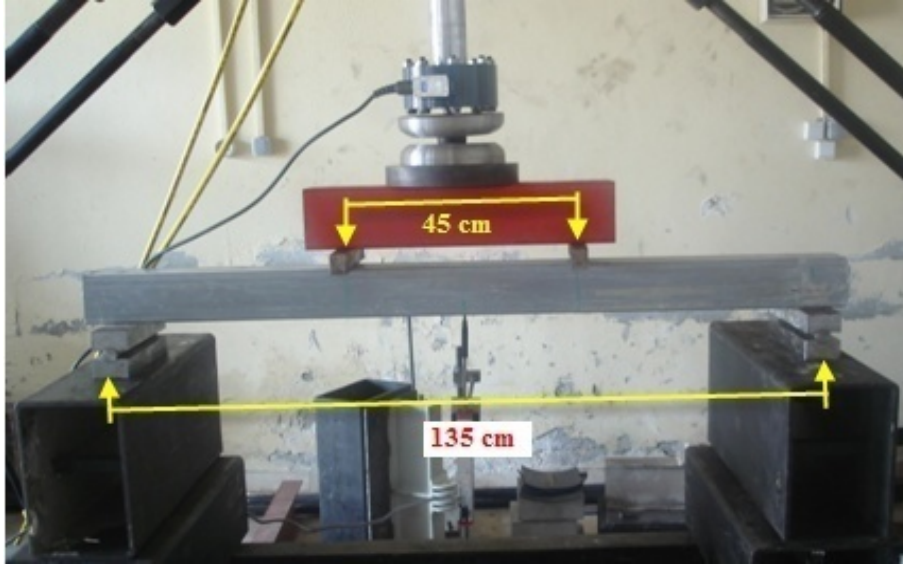
- [104] TSE 197, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 2007.
- [105] <http://www.nuhcimento.com.tr/tr/home/urunler.asp> (03.06.2009)
- [106] TSE 706 EN 12620, Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, 2003.
- [107] <http://www.acmanet.org/pic/articles/2002%20July%20CF.pdf> (24.06.2011)
- [108] ASTM D 3171–09, Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, ASTM (American Society for Testing and Materials), 2009.
- [109] TSE 802, Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, 2009.
- [110] CUMHUR, A., Pultrüzyon Metodu İle Üretilmiş CTP Profillerle Sera Modellemesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [111] ASTM D 3039 M-08, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM (American Society for Testing and Materials), 2007.
- [112] TS EN ISO 527-4 Plâstikler – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm 4: İzotropik ve Ortotropik Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler İçin Deney Şartları, Türk Standartları Enstitüsü, 2007.
- [113] TS EN ISO 527-5, Plâstikler – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm 5: Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler İçin Deney Şartları, Türk Standartları Enstitüsü, 2010.
- [114] UYSAL, M., Mineral Katkılar Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özelliklerinin ve Dayanıklılığının İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ağustos 2010.
- [115] SARIBIYIK, M., Analysis of a Bonded Connector for Pultruded GRP Structural Elements, PhD thesis, Newcastle, İngiltere, 2000.
- [116] CLARKE, J.L., Structural Design of Polymer Composites: Eurocomp Design Code and Background Document, Halcrow Polymerics Ltd., May 1 1996.

EKLER

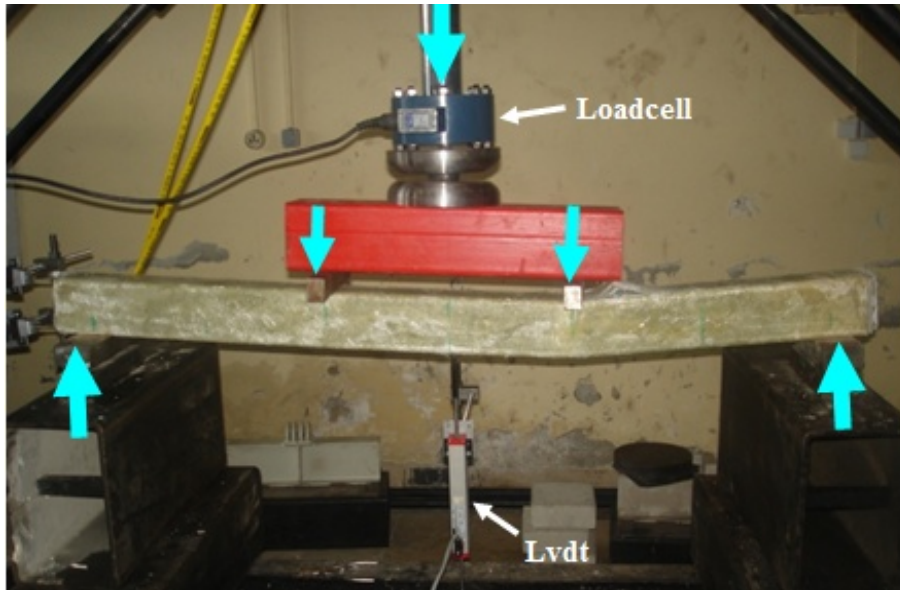
Ek A Deney Numunelerine Ait Ek Şekiller



Şekil A.1. Eğilme Deney kirişleri (100 mm)

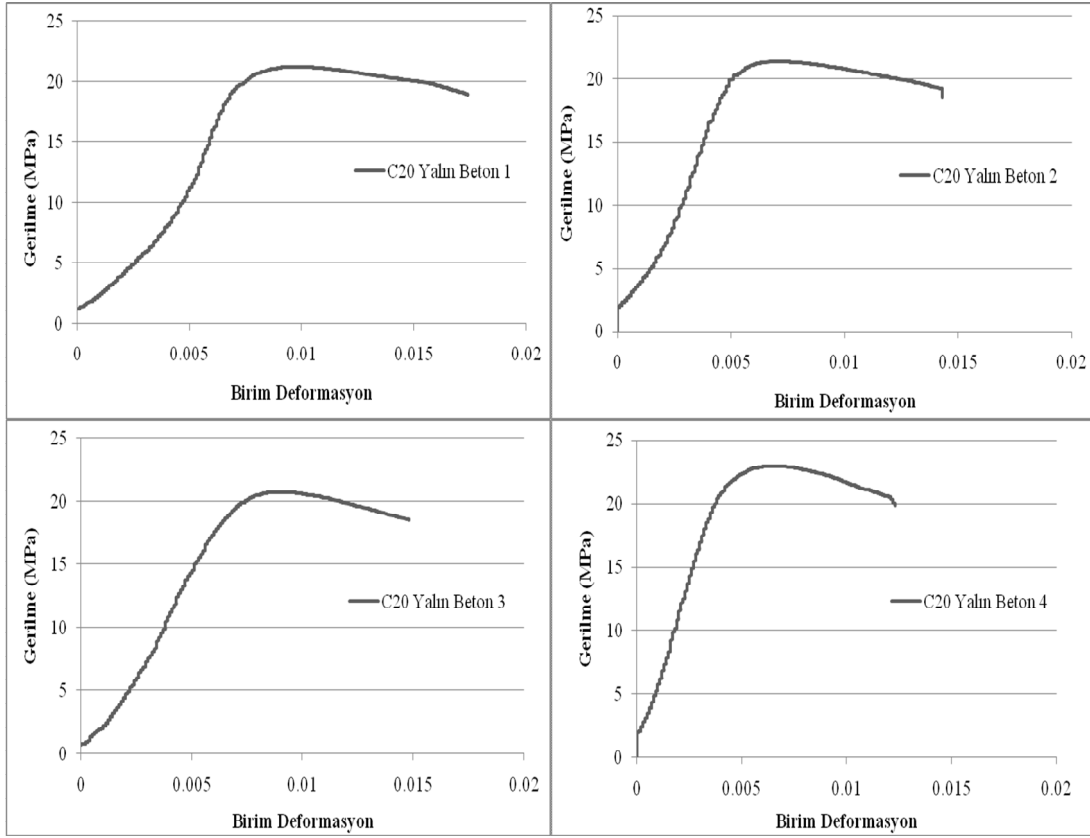


Şekil A.2. Hibrit numunenin eğilme deneyi (100 mm)

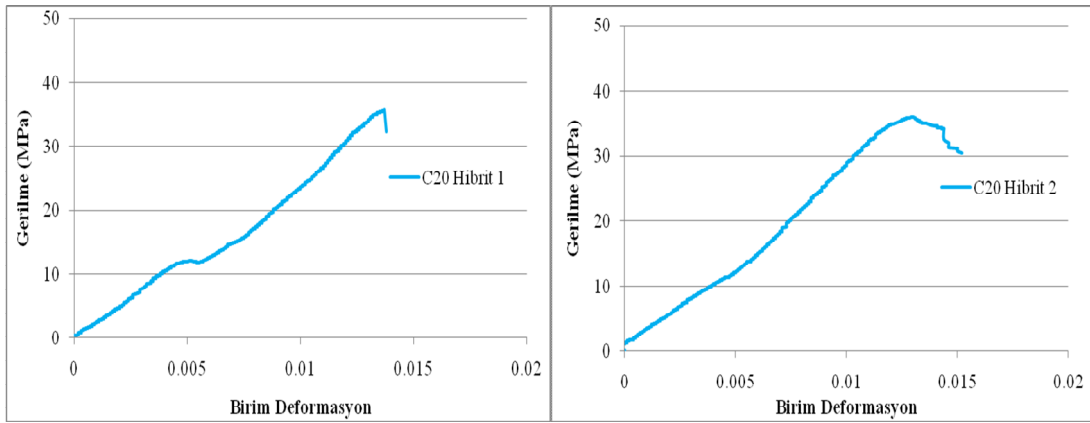


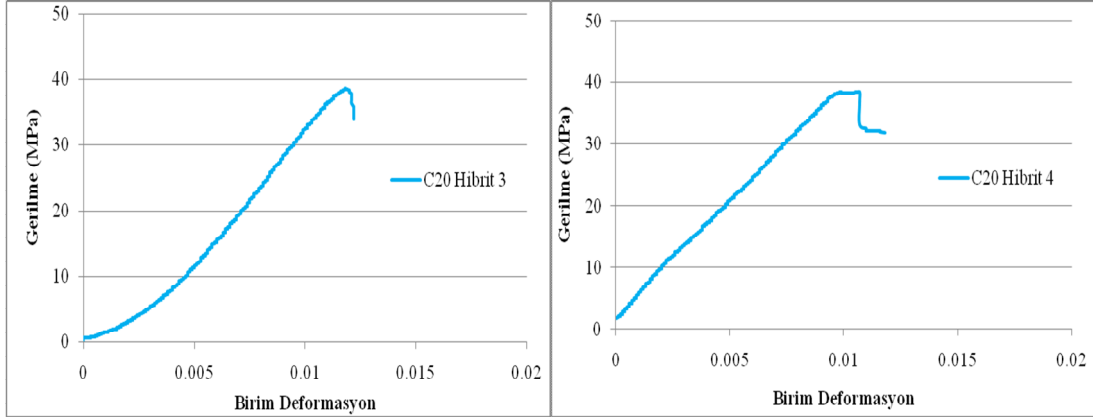
Şekil A.3. Hibrit Ek Keçeli numunenin eğilme deneyi (100 mm)

Ek B Deney Numunelerine Ait Ek Grafikler

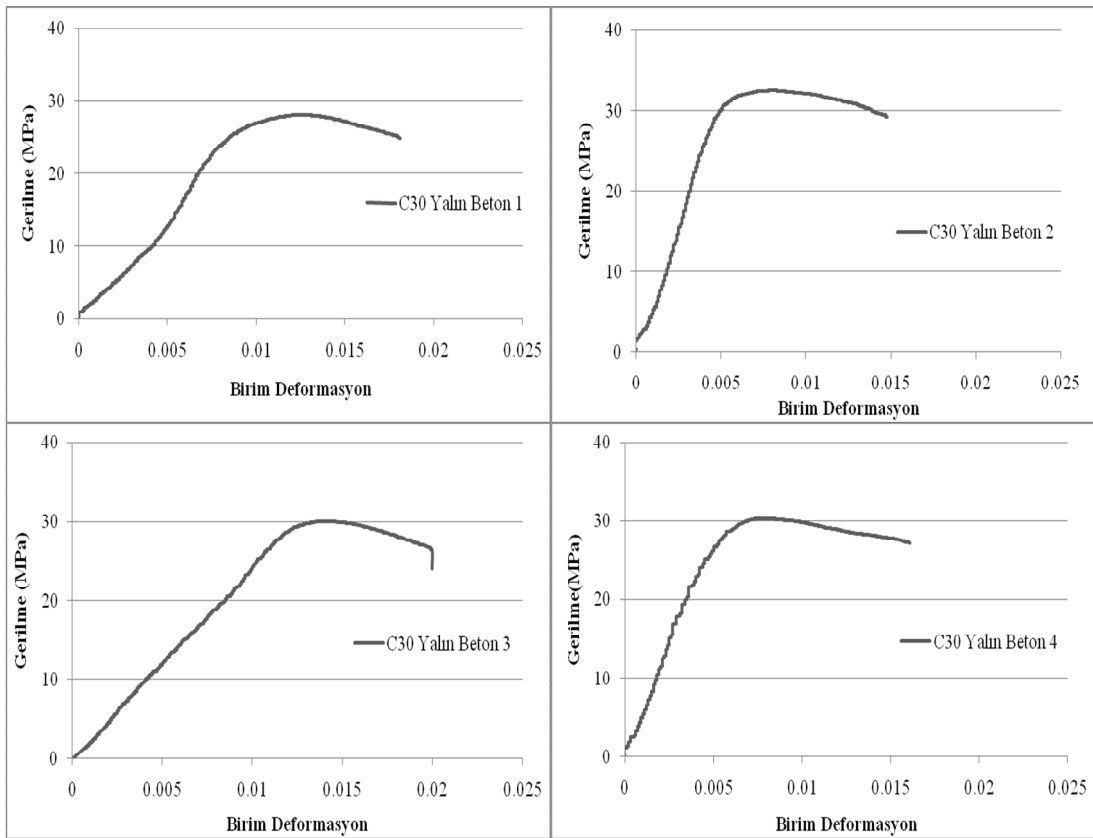


Şekil B.1. C20 Yalın beton basınç grafikleri

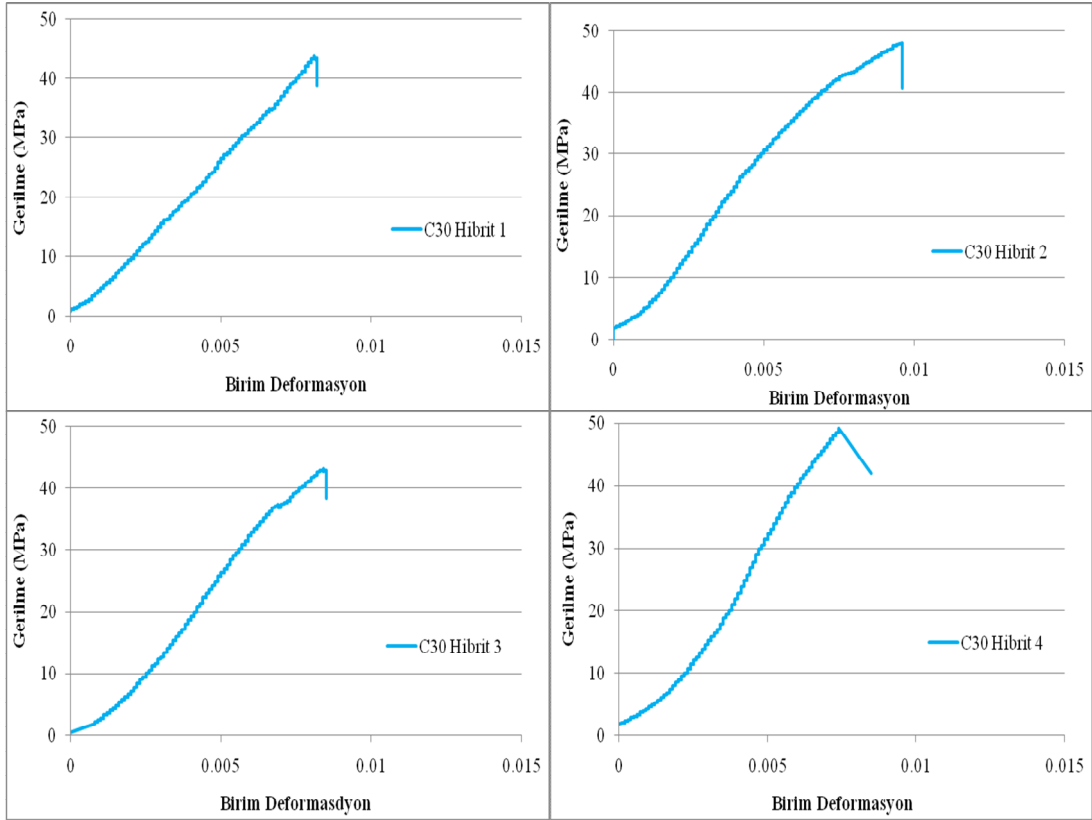




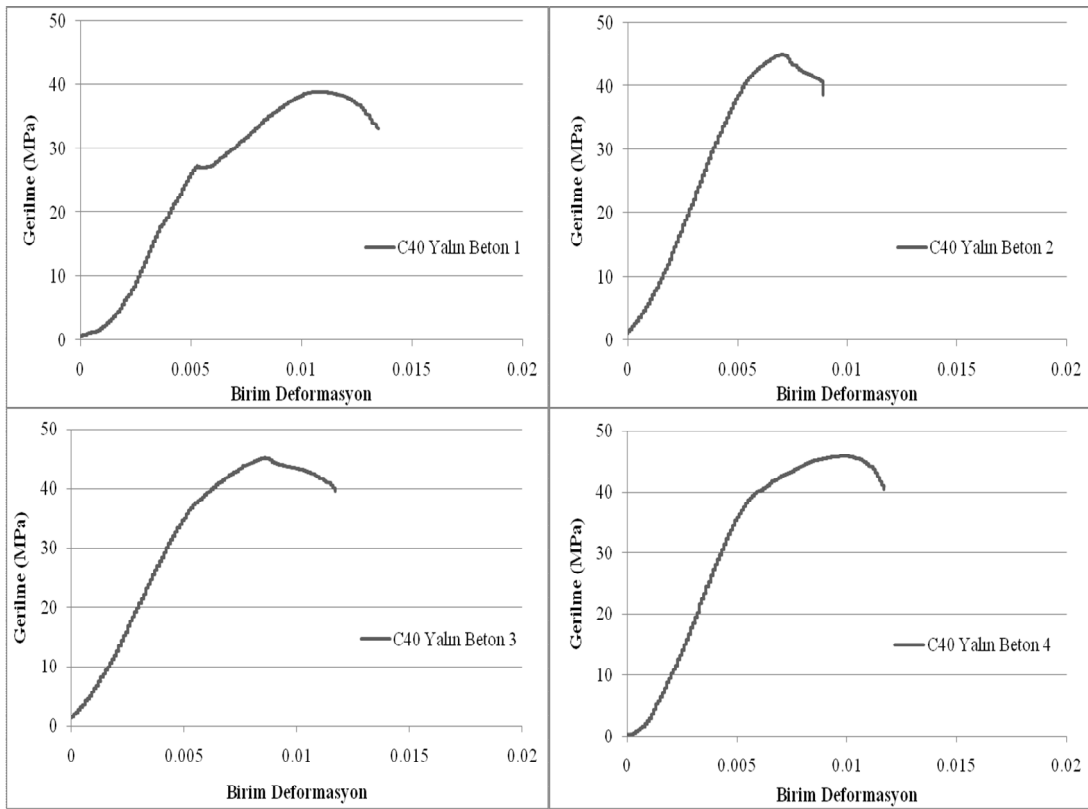
Şekil B.2. C20 Hibrit numunelerin basınç grafikleri



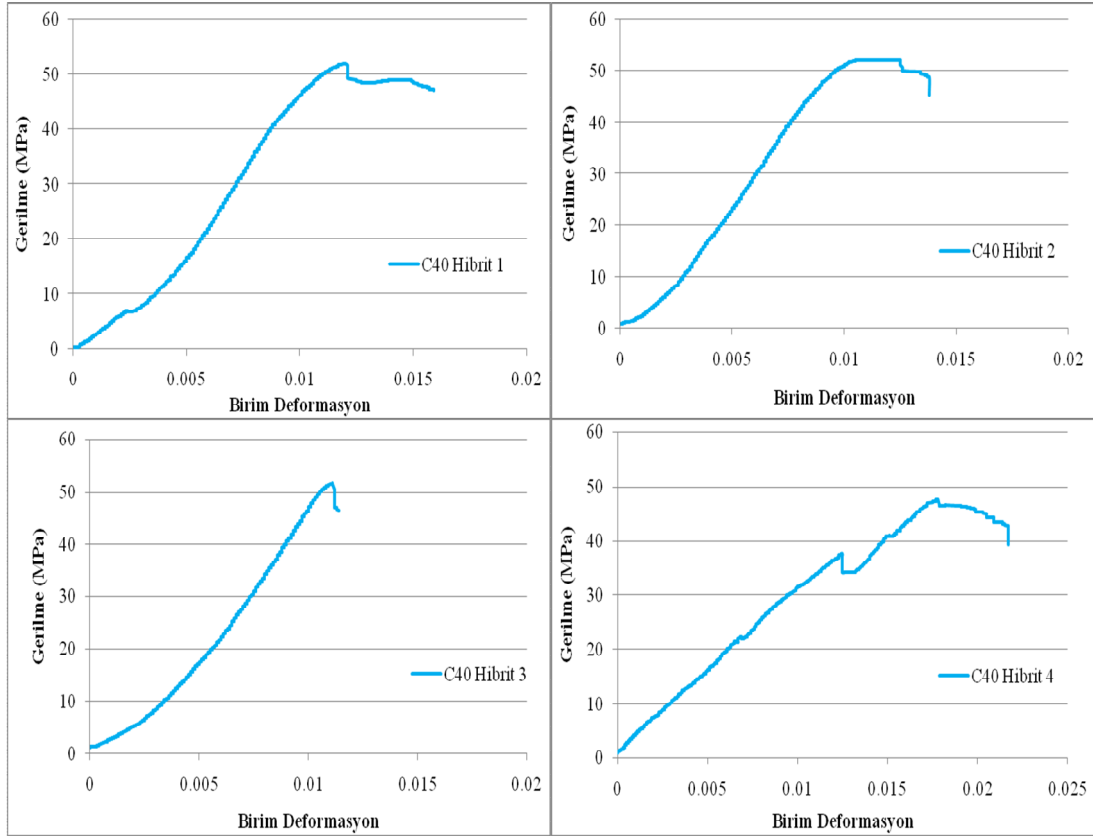
Şekil B.3. Yalın Beton basınç grafikleri (C30)



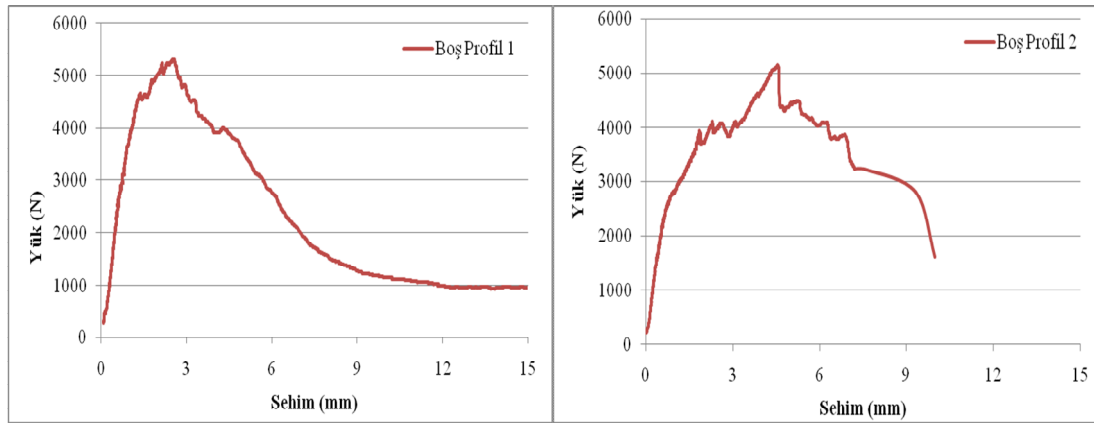
Şekil B.4. Hibrit basınç grafikleri (C30)



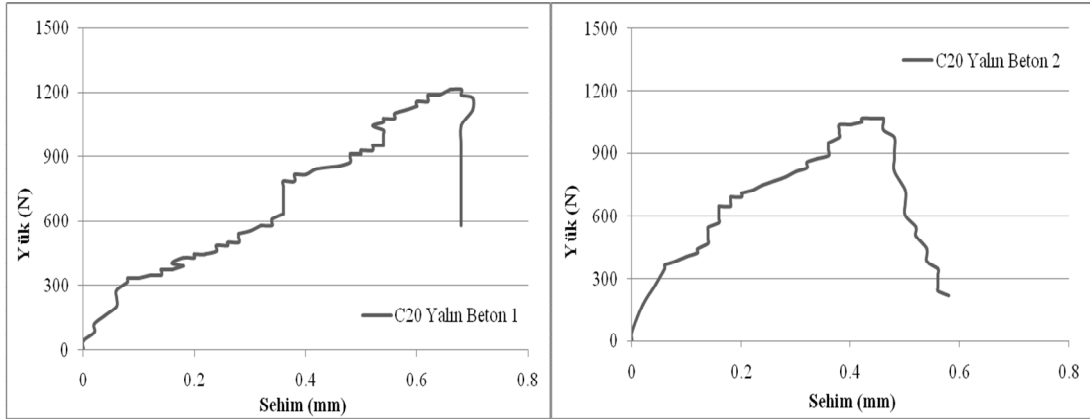
Şekil B.5. Yalın Beton basınç grafikleri (C40)



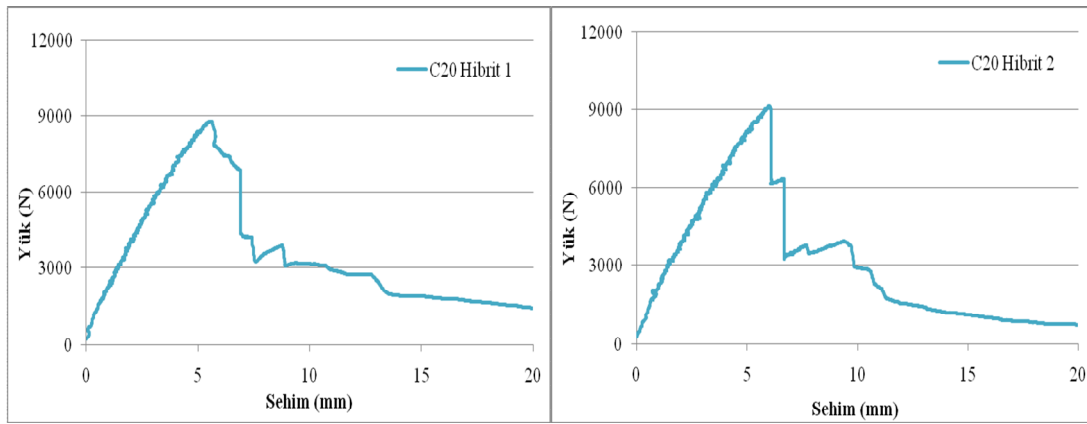
Şekil B.6. Hibrit basınç grafikleri (C40)



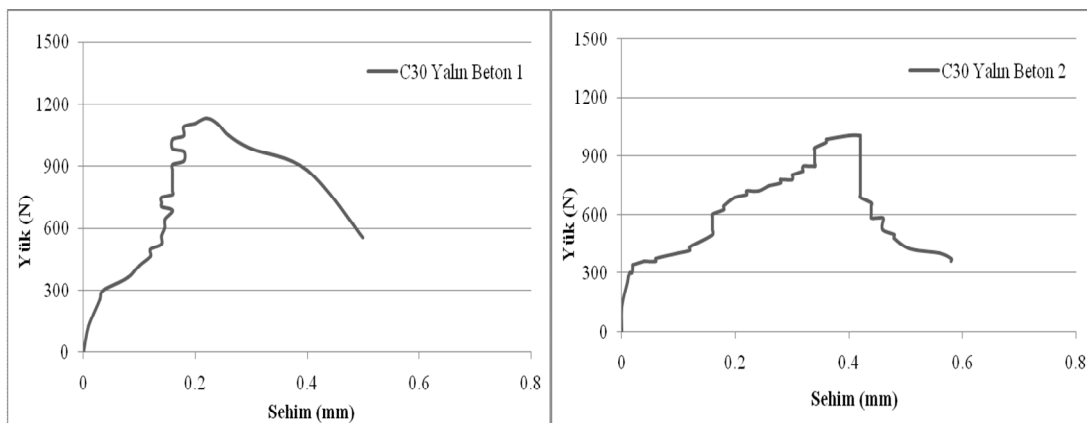
Şekil B.7. Boş profiller ön deney eğilme grafikleri



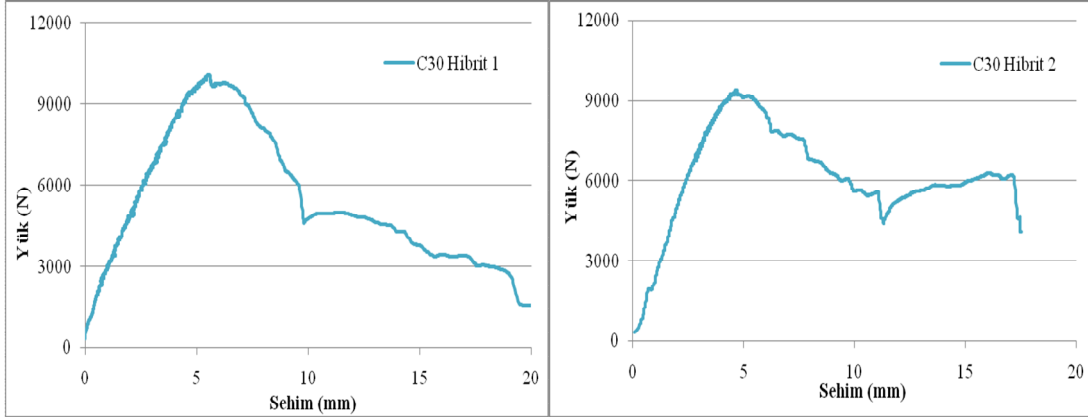
Şekil B.8. Yalın Beton ön deney eğilme grafikleri (C20)



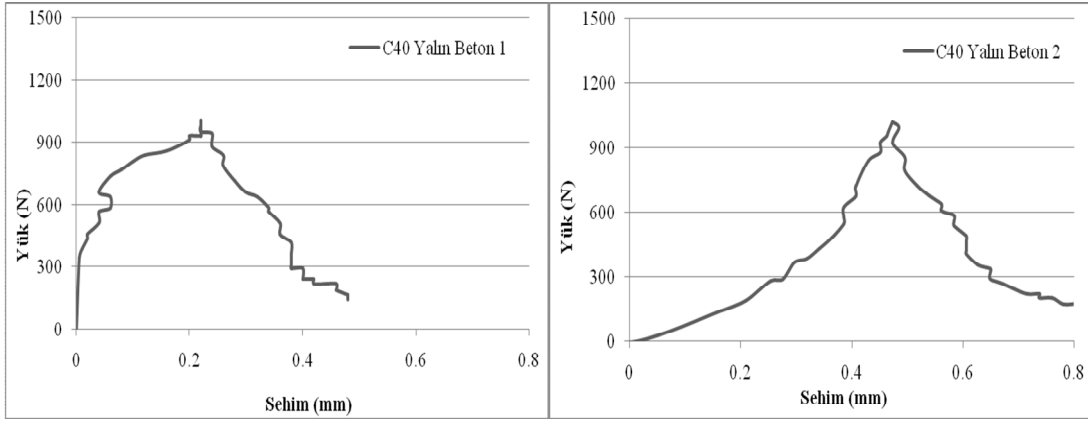
Şekil B.9. Hibrit ön deney eğilme grafikleri (C20)



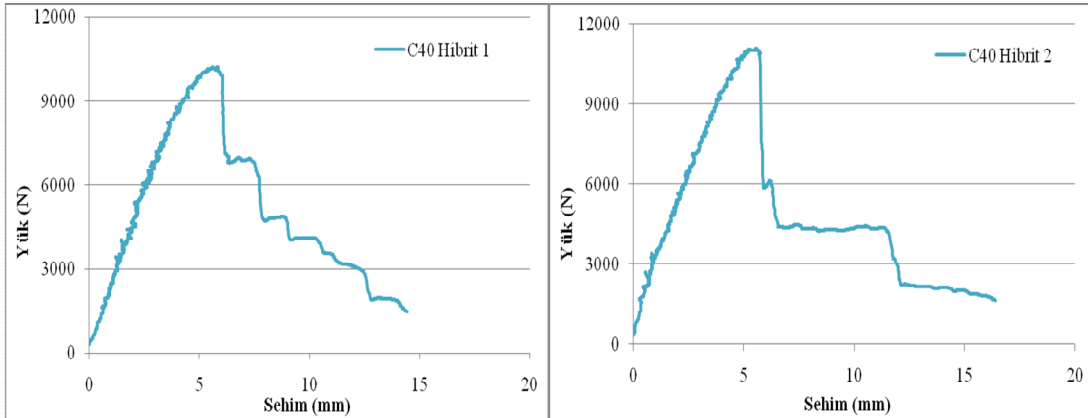
Şekil B.10. Yalın Beton ön deney eğilme grafikleri (C30)



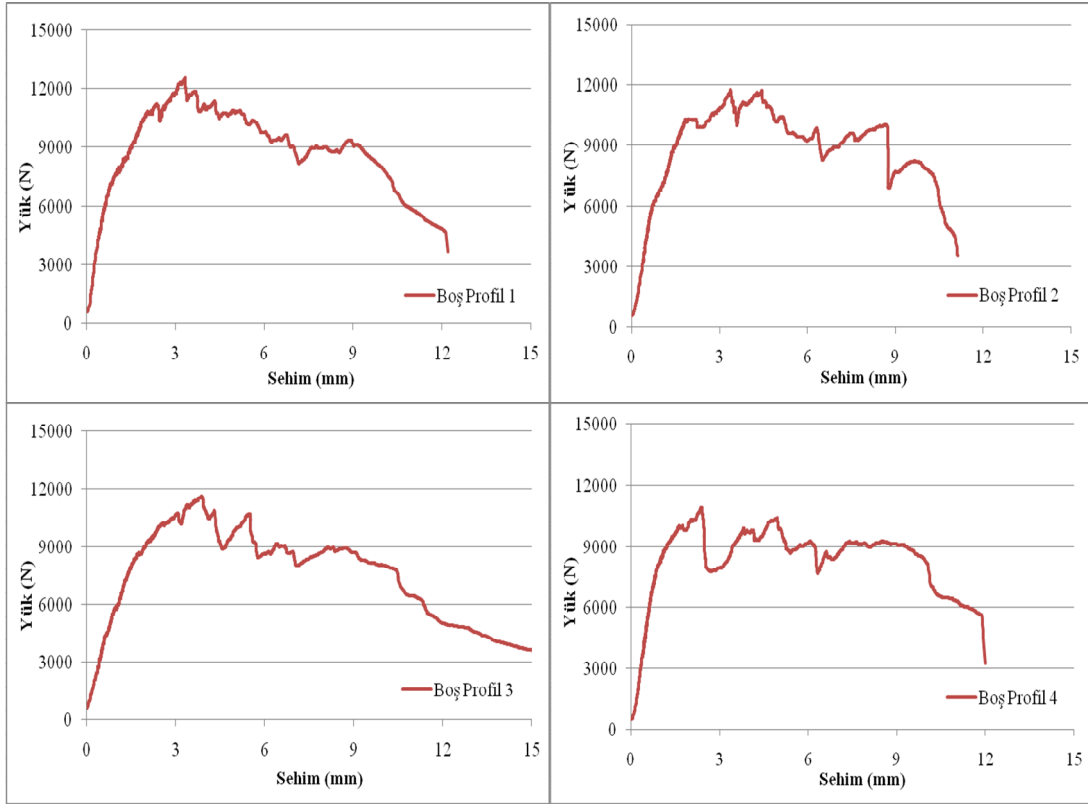
Şekil B.11. Hibrit ön deney eğilme grafikleri (C30)



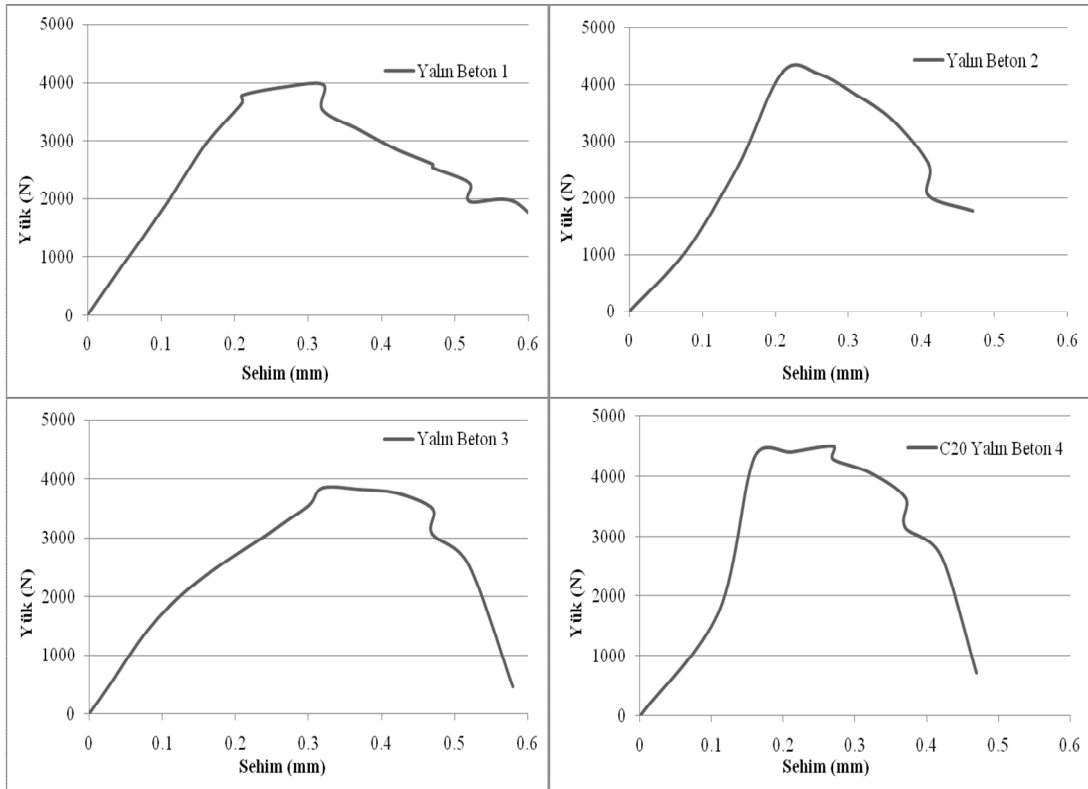
Şekil B.12. Yalın Beton ön deney eğilme grafikleri (C40)



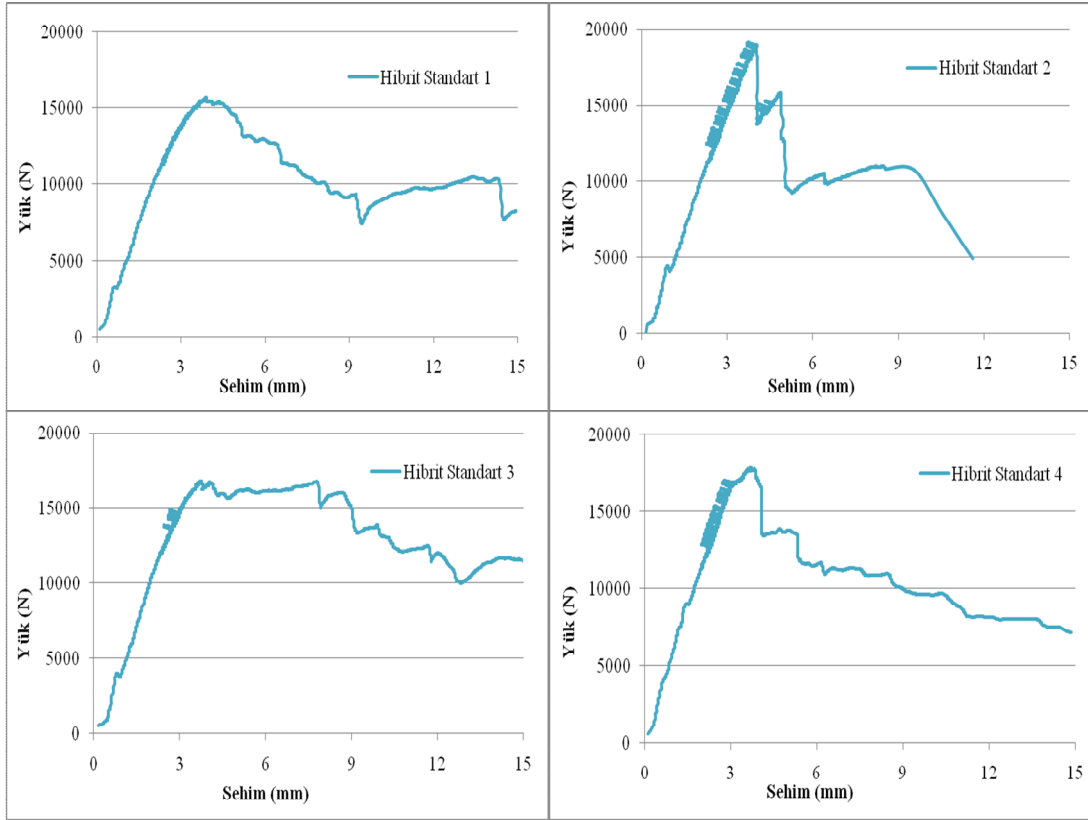
Şekil B.13. Hibrit ön deney eğilme grafikleri (C40)



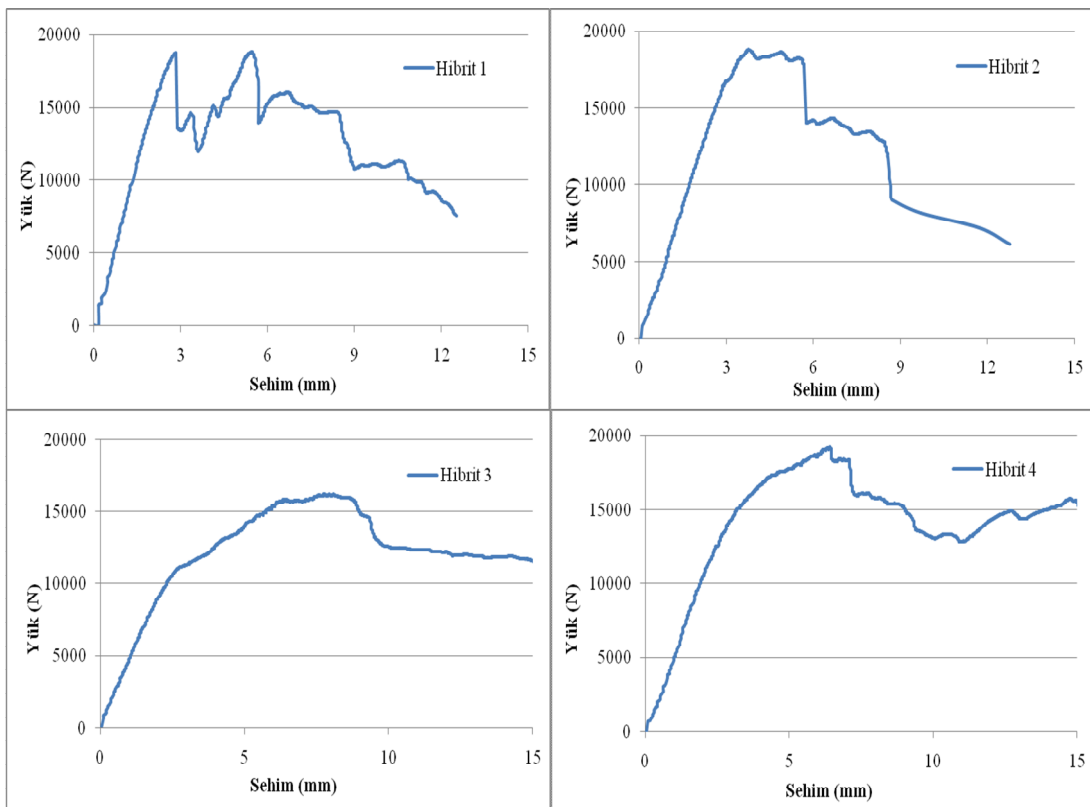
Şekil B.14. Boş GFRP profil eğilme deneyi grafikleri (74 mm)



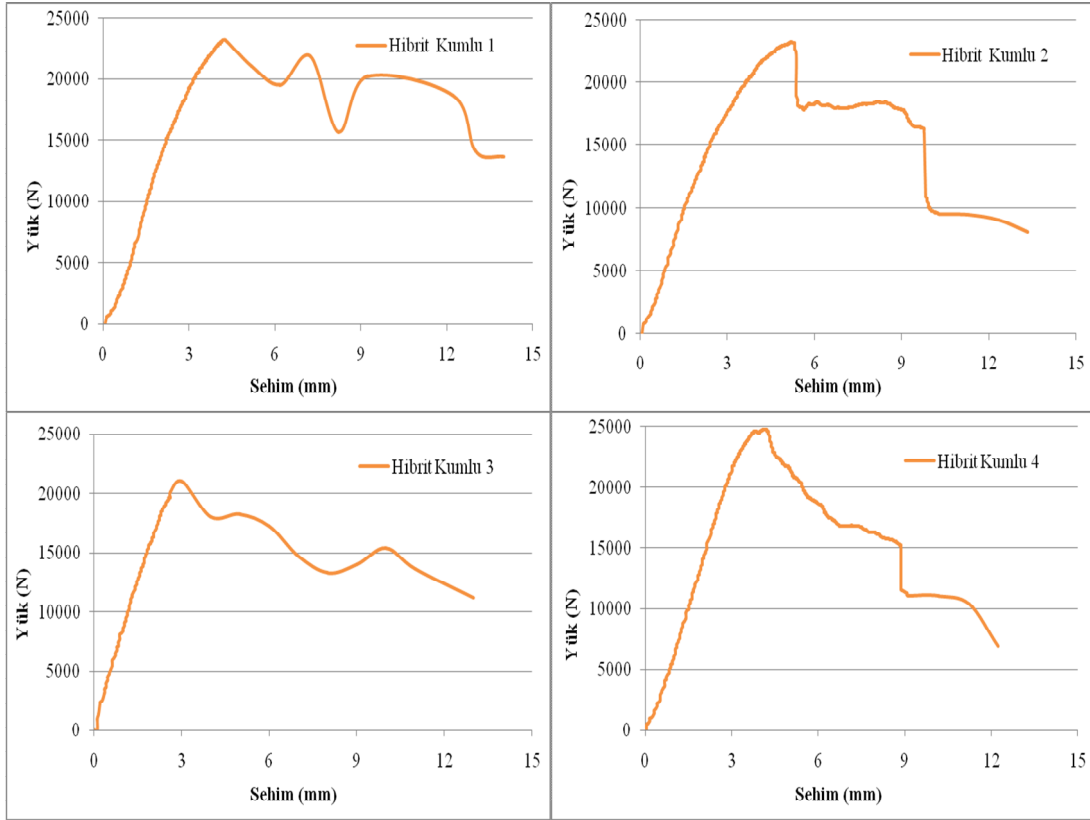
Şekil B.15. Yalın Beton eğilme grafikleri (74 mm)



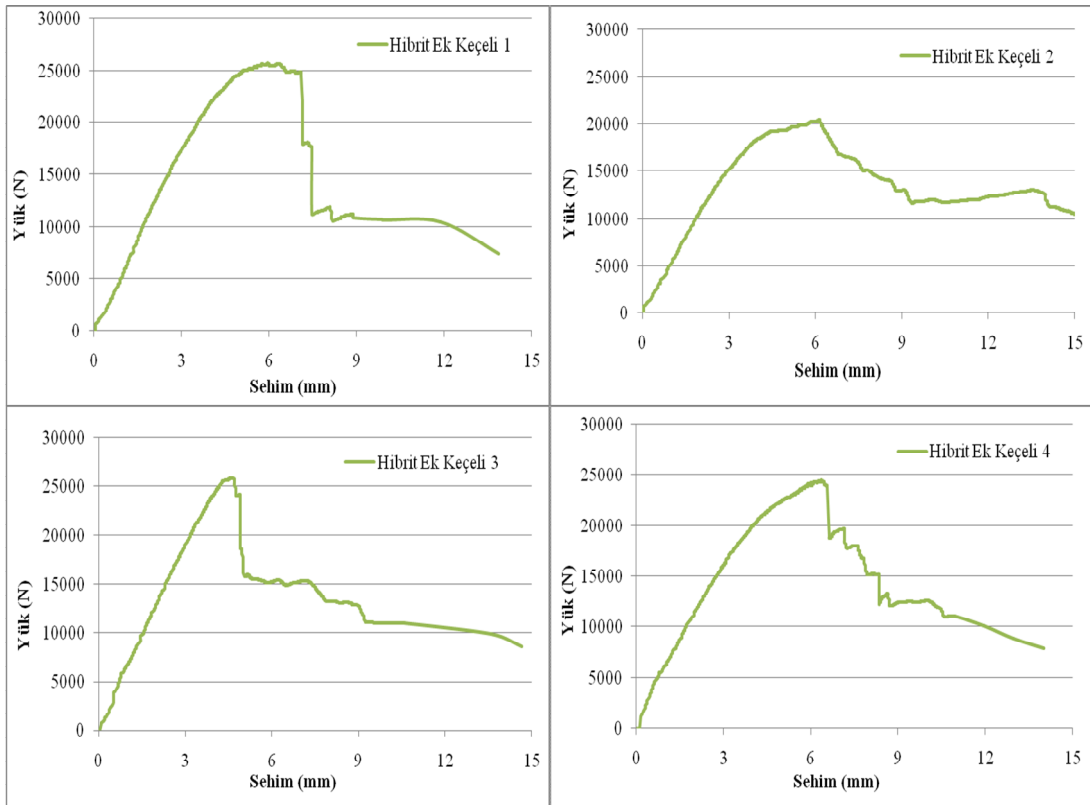
Şekil B.16. Hibrit Standart yük-sehim grafikleri (74 mm)



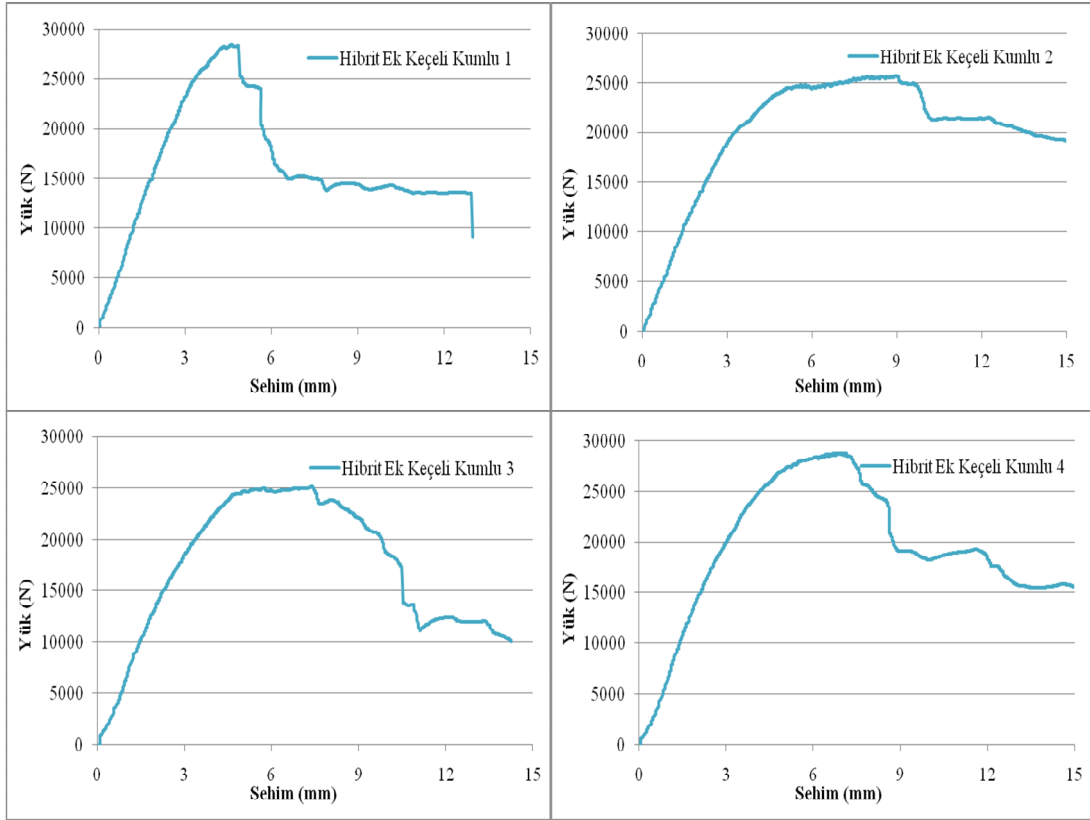
Şekil B.17. Hibrit kiriş numunelerinin eğilme grafikleri (74 mm)



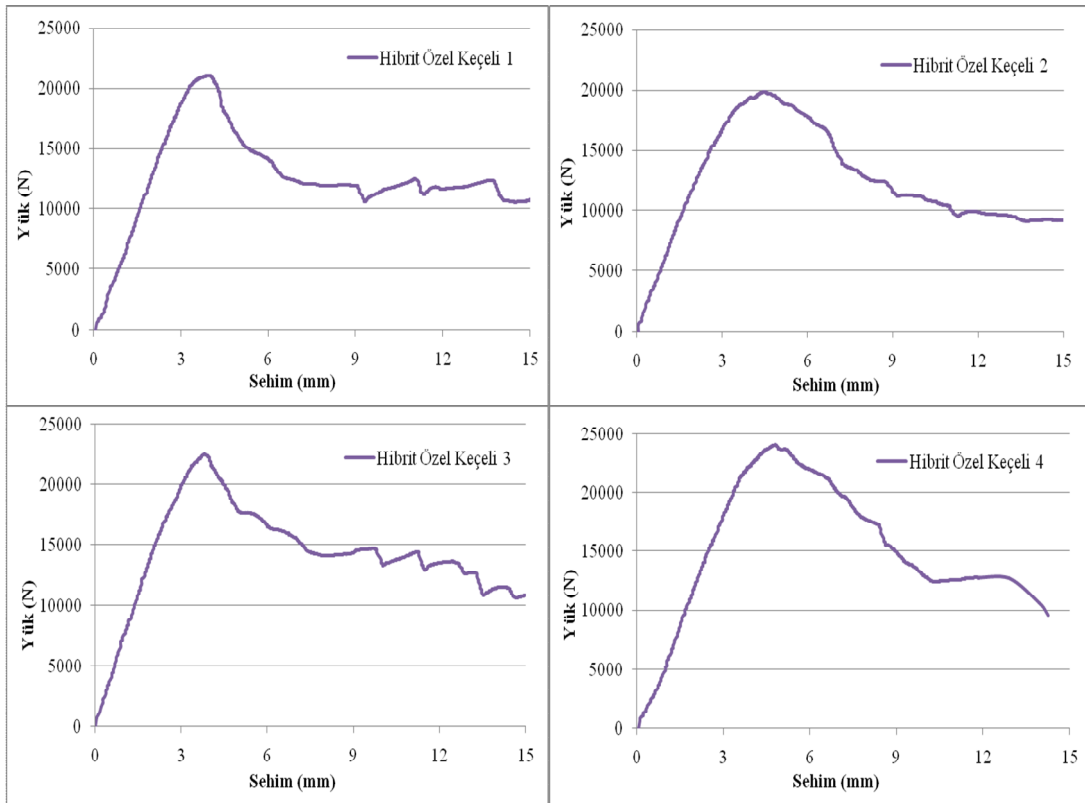
Şekil B.18. Hibrit Kumlu numunelerinin eğilme grafikleri (74 mm)



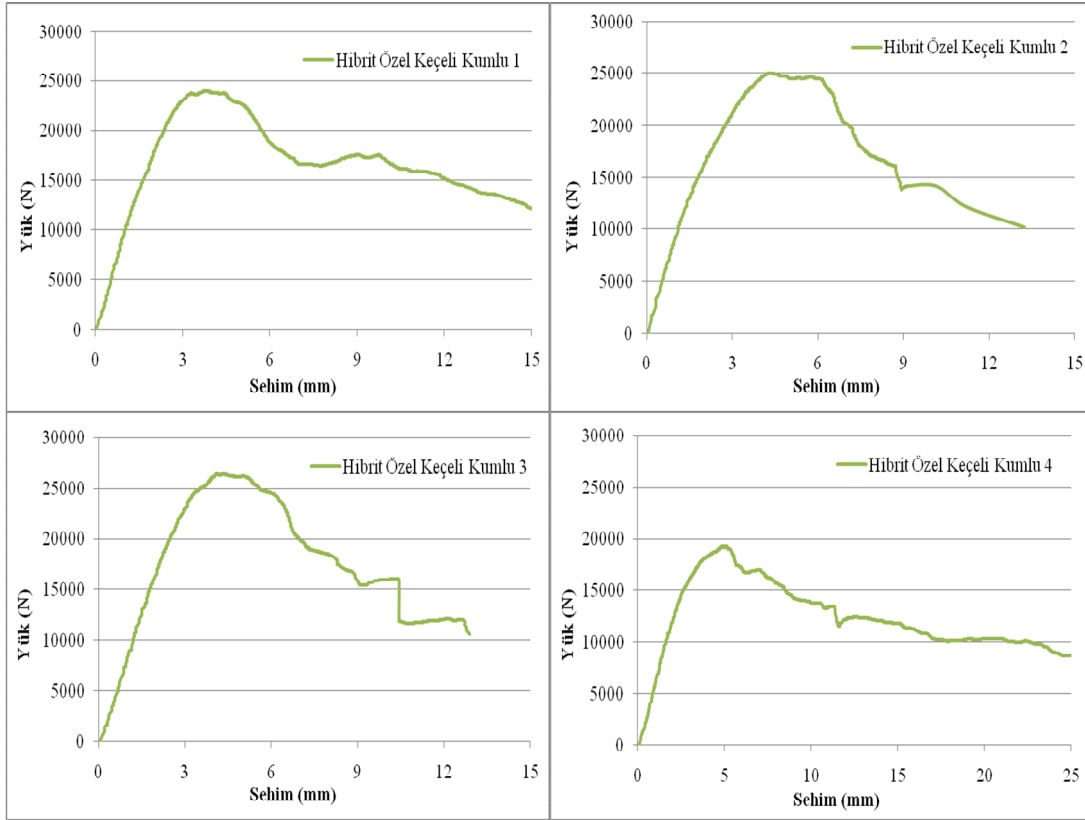
Şekil B.19. Hibrit Ek Keçeli numunelerinin eğilme grafikleri (74 mm)



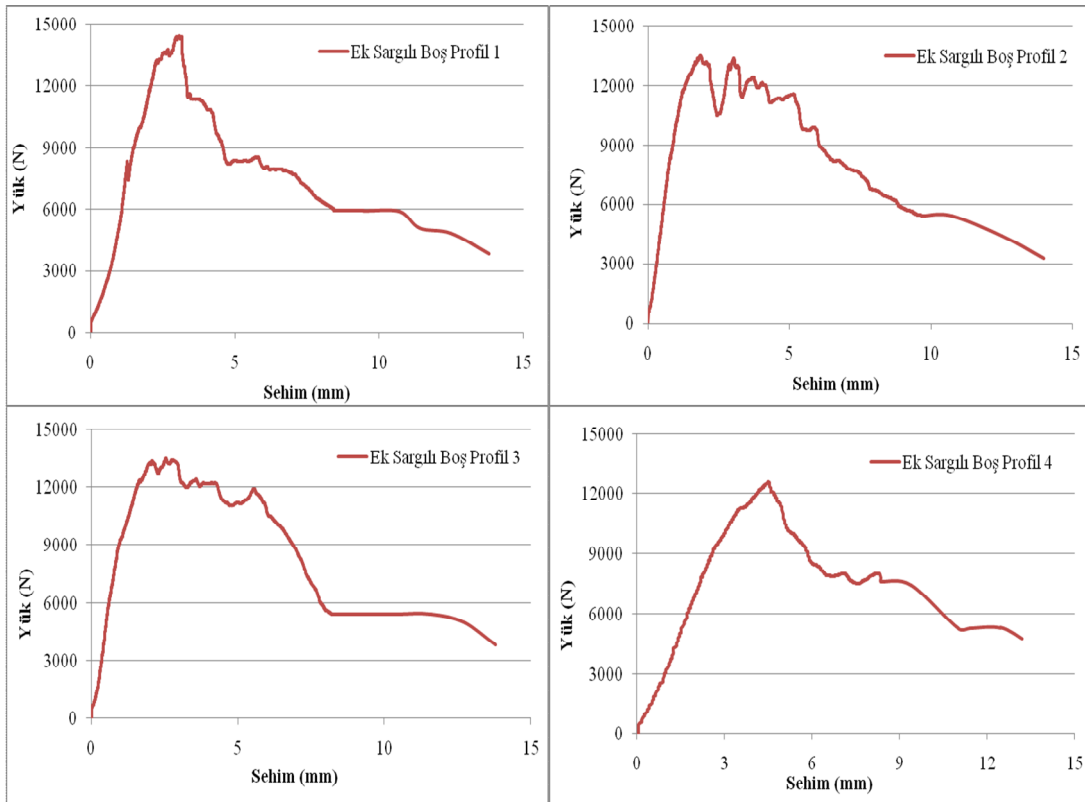
Şekil B.20. Hibrit Ek Keçeli Kumlu numunelerinin eğilme grafikleri (74 mm)



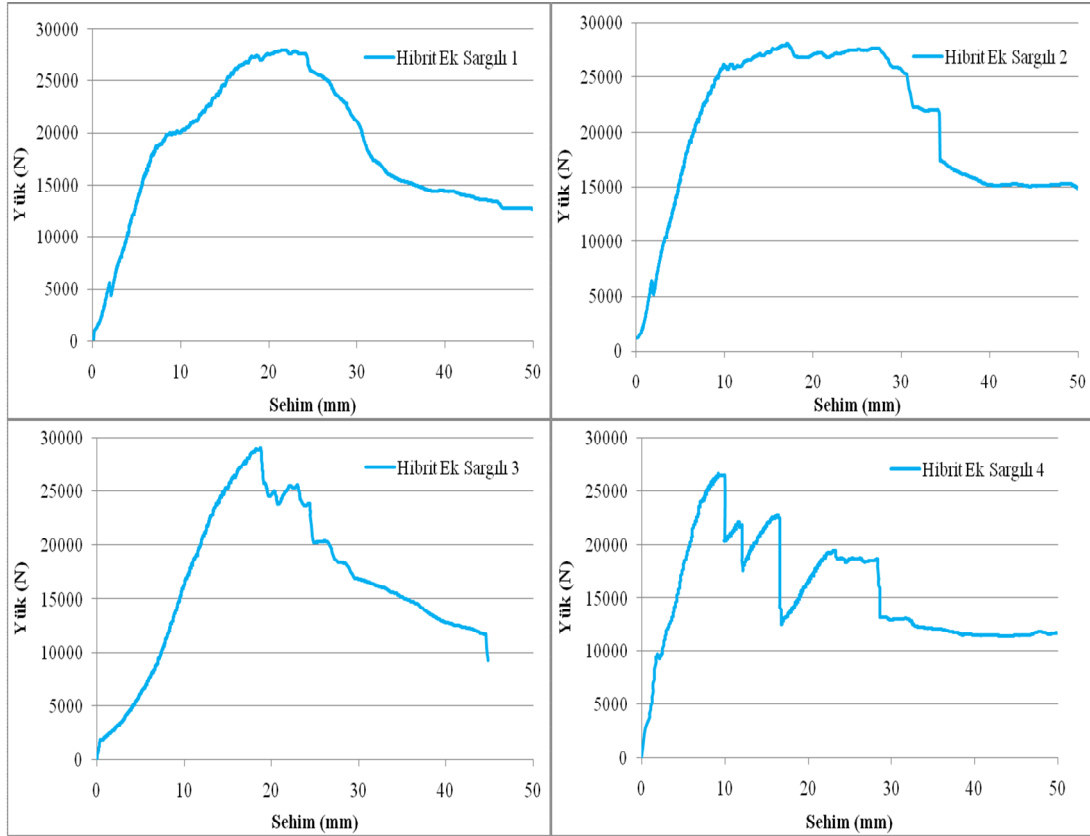
Şekil B.21. Hibrit Özel Keçeli numunelerinin eğilme grafikleri (74 mm)



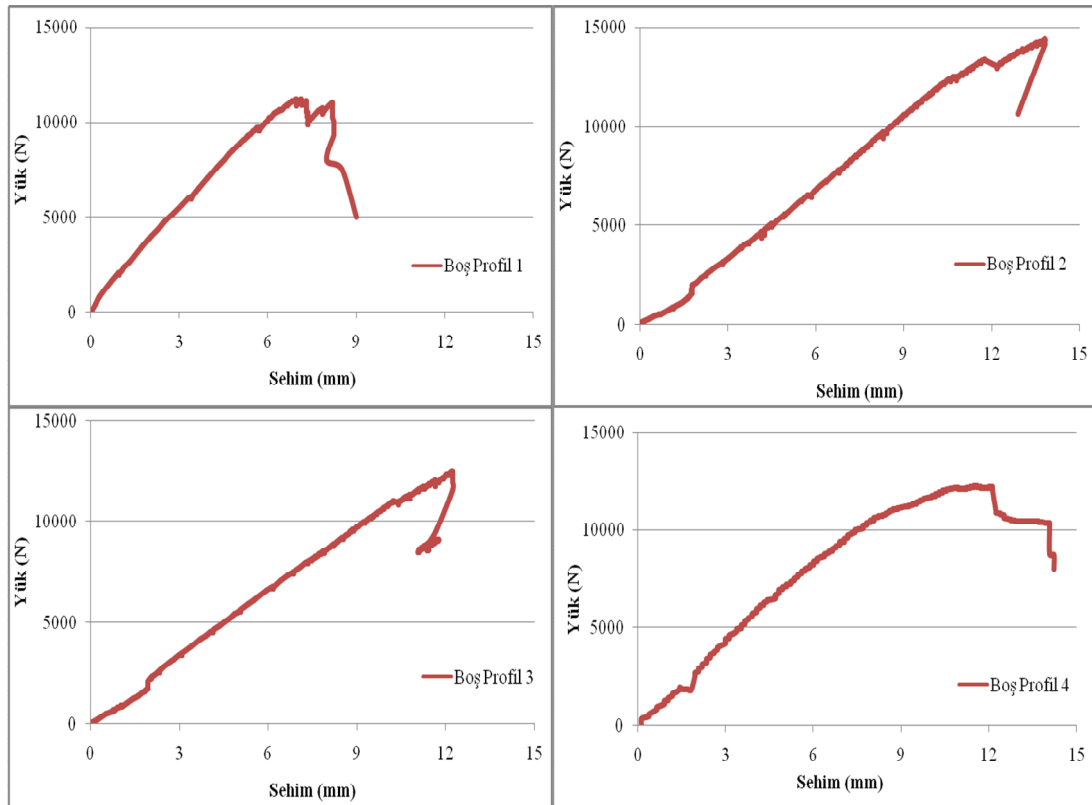
Şekil B.22. Hibrit Özel Keçeli Kumlu numunelerinin eğilme grafikleri (74 mm)



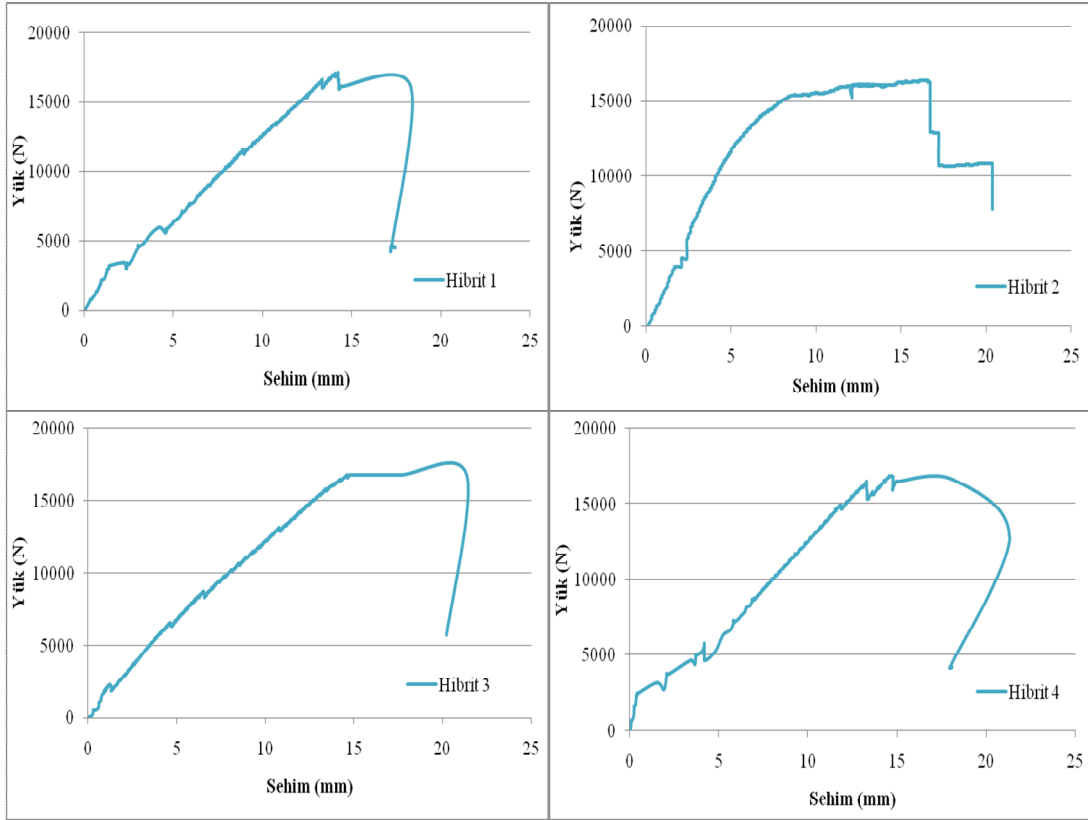
Şekil B.23. Ek sargılı Boş GFRP profillerin eğilme grafikleri (74 mm)



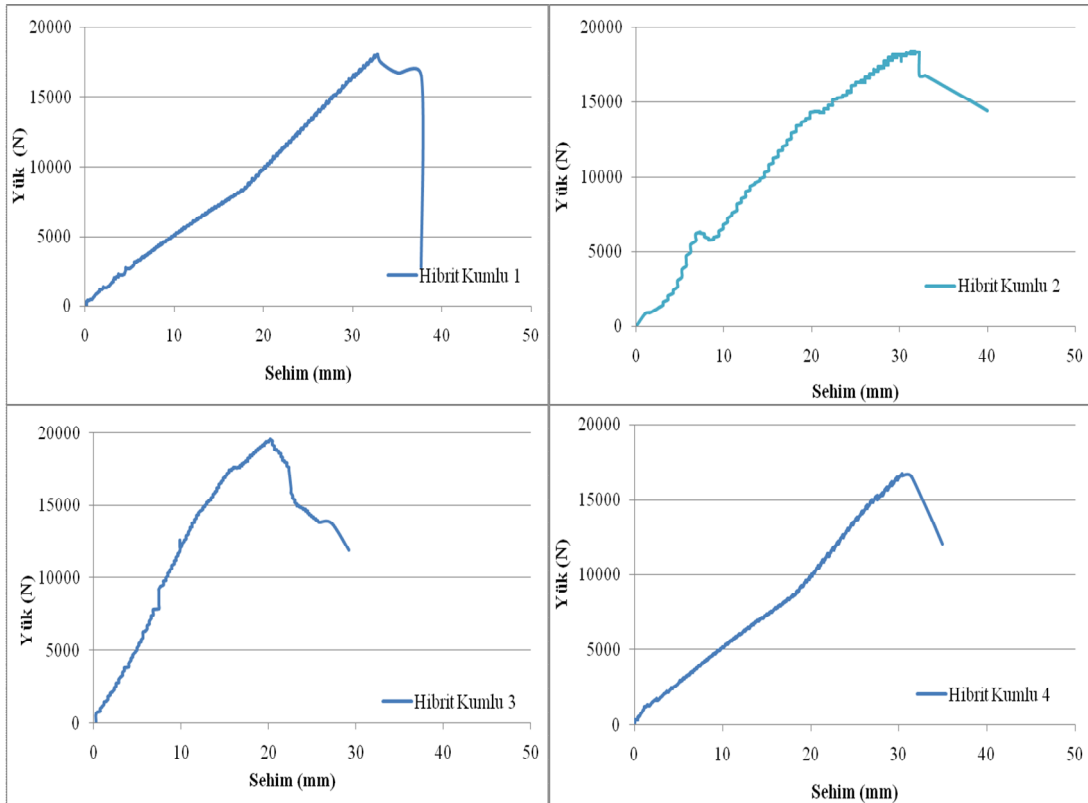
Şekil B.24. Hibrit Ek Sargılı numunelerin eğilme grafikleri (74 mm)



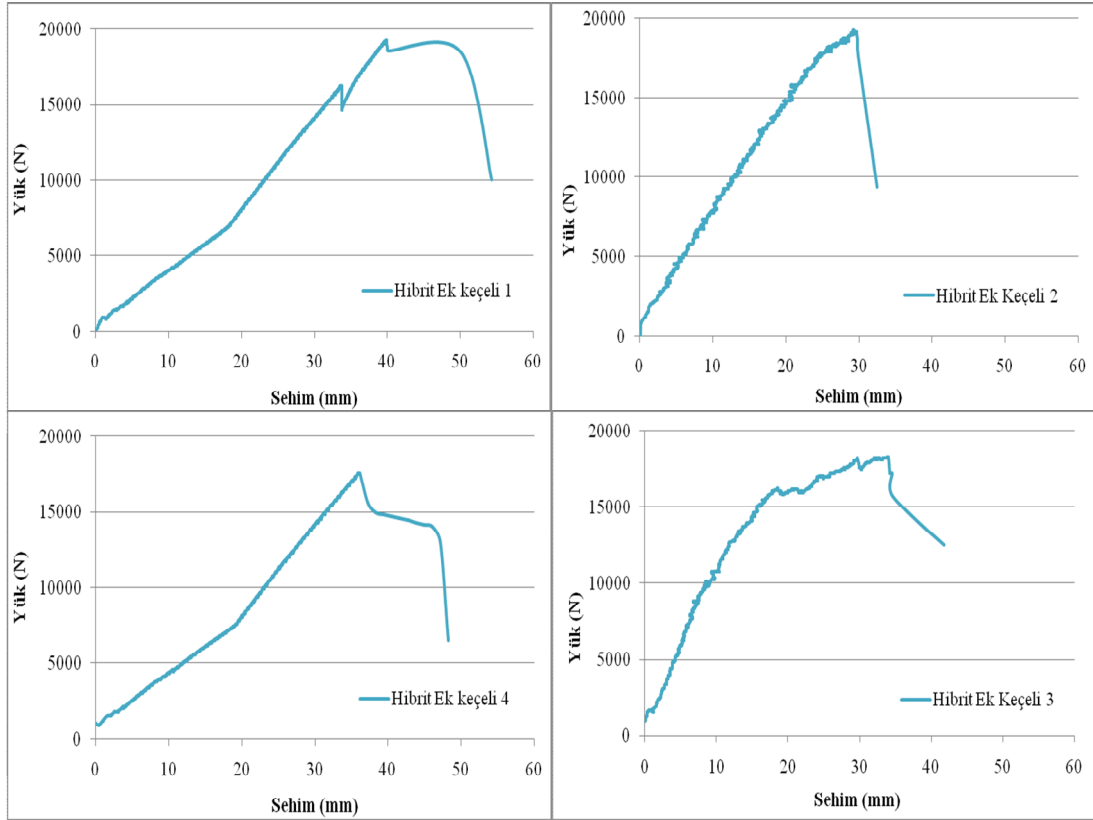
Şekil B.25. Boş GFRP profillerin eğilme deneyi grafikleri (100 mm)



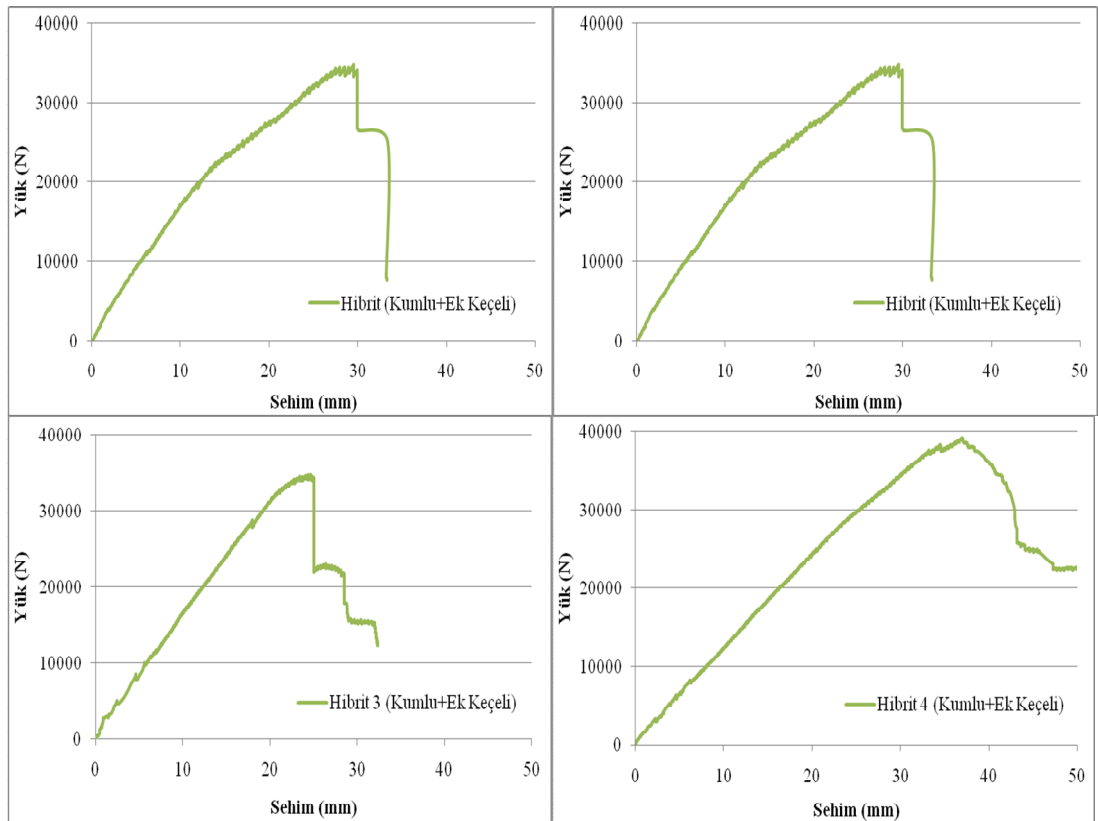
Şekil B.26. Hibrit kirişlerin eğilme deneyi grafikleri (100 mm)



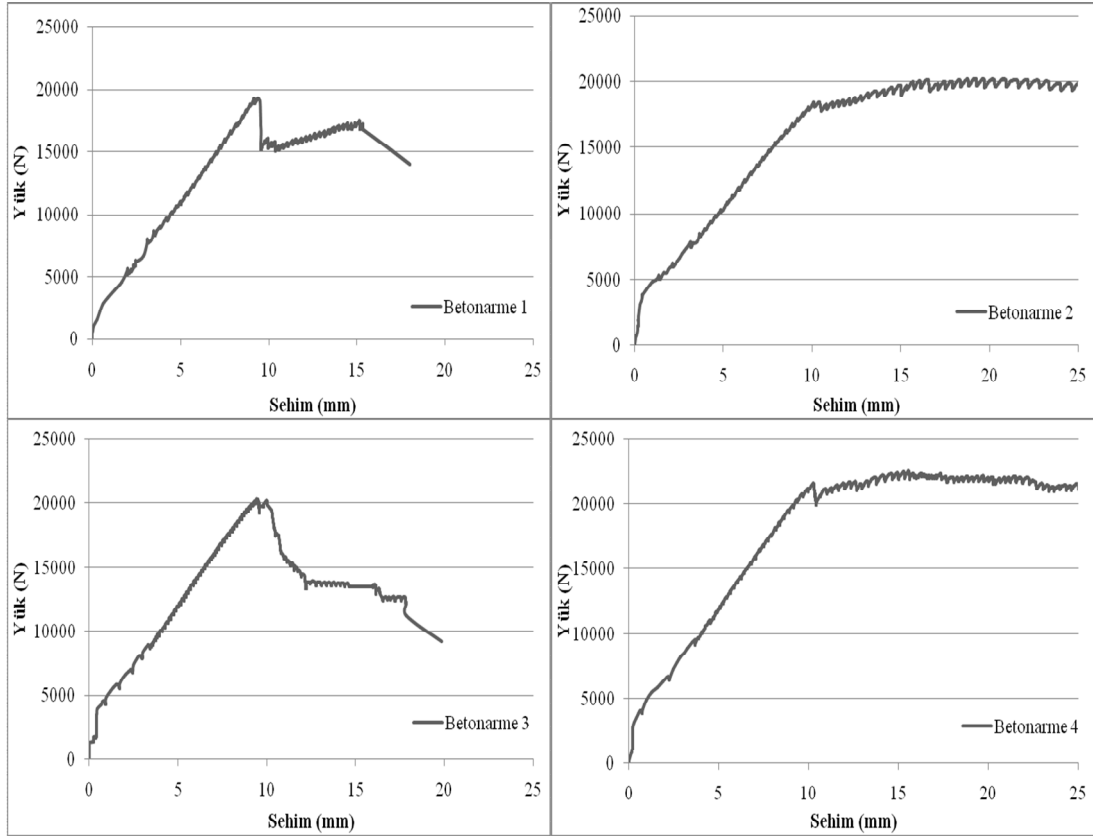
Şekil B.27. Hibrit Kumu kirişlerin eğilme deneyi grafikleri (100 mm)



Şekil B.28. Hibrit Fazla Keçeli kirişletin eğilme deneyi grafikleri (100 mm)



Şekil B.29. Hibrit Ek Keçeli ve Kumlu kirişletin eğilme deneyi grafikleri (100 mm)



Şekil B.30. Betonaarme kirişlerin eğilme deneyi grafikleri (100 mm)

ÖZGEÇMİŞ

Ferhat AYDIN, 07.01.1979 da Sivas' ta doğdu. İlk ve orta eğitimini tamamladıktan sonra 1997 yılında Sivas Cumhuriyet Anadolu Lisesinden mezun oldu. 1998 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümünü 2002 yılında bitirdi. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitime başladı ve 2005 yılında mezun oldu. 2006 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemesi Bilim Dalında Doktora eğitimine başladı. 2003–2011 yılları arasında Sakarya Üniversitesinde Araştırma görevlisi olarak çalıştı. Bu süre içerisinde ulusal birçok projede görev almasının yanı sıra yayımlanmış ulusal ve uluslar arası yayınları mevcuttur.