

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



KARMA LİFLİ BETONLARIN
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENGİN GÜNGÖR

BALIKESİR, HAZİRAN 2013

KABUL VE ONAY SAYFASI

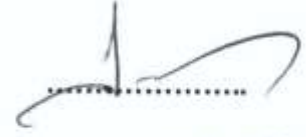
Engin GÜNGÖR tarafından "KARMA LİFLİ BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İRDELENMESİ" adlı tez çalışmasının son sınavı 24/06/2013 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Fehmi ÇIVİCİ



Yrd. Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ



Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu onamıştır.

Prof. Dr. Hilmi NAMLI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

Bu tez çalışması Bilimsel Araştırma Projesi tarafından 2012/ 73 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

**KARMA LİFLİ BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL İRDELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENGİN GÜNGÖR
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ, FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. FEHMİ ÇİVİCİ)
BALIKESİR, HAZİRAN 2013**

Beton, dünyada tüm yapılarda çok yaygın olarak kullanılan taşıyıcı bir malzemedir. Betonun yapılarda bu denli kullanılmasının ana nedeni basınç dayanımının çok yüksek olmasıdır. Yüksek yapılar, baraj, yol, köprü, tünel gibi özellikli yapılarda betonun basınç dayanımı daha yüksek olması amaçlanır. Son yıllarda akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanılmasıyla basınç dayanımı yüksek betonlar üretilmiştir. Ancak artan basınç dayanımıyla birlikte beton süneklik bakımından daha zayıf olmuştur. Betonun bu zayıf özelliğini iyileştirmek için günümüzde lifler kullanılmaktadır. Uygulamada en çok çelik, cam ve polipropilen lifler tercih edilir.

Bu çalışmada polipropilen ve çelik lifler üzerine çalışılmıştır. Farklı geometrideki liflerin, farklı kullanım oranlarda betona katılmasıyla lifli beton numunelerinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı lifleri birlikte kullanılarak karma (hibrit) lifli betonlar üzerinde de deneyler yapılmıştır. Polipropilen lifli, çelik lifli ve karma lifli betonların yalın betona göre basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve tokluk değerleri karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: polipropilen lif, çelik lif, karma lif, eğilme dayanımı, tokluk

ABSTRACT

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HYBRID FIBER CONCRETE'S PROPERTIES

M.SC. THESIS

ENGİN GÜNGÖR

**BALIKESİR UNIVERSITY, INSTITUTE OF SCIENCE
TECHNOLOGY**

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. FEHMİ ÇİVİCİ)

BALIKESİR, JUNE 2013

Concrete is a carrier material that widely used in structures all over the world. The main reason of using concrete so much is, it's compressive strength is very high. About high buildings, dams, roads, bridges, tunnels, intended to be have more higher compressive strength of concrete structures. In recent years, high compressive strength of concrete produced with the use of plasticizing additives. But, with the increasing pressure resistance of concrete has been weaker than in terms of ductility. Fibers that are used today in order to improve the weak feature of the concrete. In practice, most of steel, glass, polypropylene fibers are preferred.

In this study polypropylene and steel fibers were studied. Fibers with different geometries, different dosages of user participation fibrous concrete, the mechanical properties of concrete samples were examined. With the use of different fibers experiments were conducted about mixed (hybrid) fiber reinforced concrete. Polypropylene and steel fiber concrete were compared with plain concrete about compressive strength, flexural strength and toughness values .

KEYWORDS: polypropylene fiber, steel fiber, hybrid fiber, bending strength, toughness

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ ve KISALTMALAR	viii
ÖNSÖZ	xi
1.GİRİŞ	1
1.1 Beton ve Özellikleri.....	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3.LİFLER VE LİFLİ BETONLAR	10
3.1 Polipropilen Lifler.....	11
3.1.1 Polipropilen Lifli Betonun Teknik Özellikleri.....	12
3.1.2 Polipropilen Liflerin Kullanım Alanları.....	13
3.1.3 Polipropilen Liflerin Betona Katılışı ve Kullanım Oranları.....	14
3.2 Çelik Lifler.....	15
3.2.1 Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Liflerin Sınıflandırılması.....	16
3.2.2 Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları	19
3.2.3 Çelik Liflerin Beton İçindeki Davranışı	20
3.2.4 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Yük Altındaki Davranışı.....	20
3.2.5 Çelik Lif Takviyeli Betonların Mekanik Özellikleri	23
3.2.5.1 Basınç Etkisindeki Davranış.....	23
3.2.5.2 Eğilme Etkisindeki Davranış.....	24
3.2.5.3 İşlenebilirlik.....	25
3.2.5.4 Enerji Yutma Kapasitesi(Tokluk).....	25
3.2.5.5 Dayanım.....	26
3.2.5.6 Rötne.....	26
3.2.5.7 Dayanıklılık.....	26
3.3 Karma Lifli Betonlar	27
4.LİFLİ BETONUN ÖZELLİKLERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER ... 34	
4.1 Lif Özelliklerinin Kompozitin Özelliklerine Etkisi	34
4.1.1 Lif Geometrisinin Etkisi.....	34
4.1.2 Lif Boyunun Etkisi	35
4.1.3 Lif Narinlik Oranı ve Lif Yüzdesinin Etkileri	36
4.1.4 Lif Tipinin Etkisi	38
4.2 Lifli Betonda Matris Etkisi	38
4.2.1 Homojen Çatlamamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim.....	39
4.2.2 Çatlamış Matris İle Lif arasındaki Etkileşim	40

5. MALZEME VE METOD	41
5.1 Kullanılan Malzemeler	41
5.1.1 Agregata	41
5.1.2 Çimento	42
5.1.3 Beton Katkı Maddesi	44
5.1.4 Çelik Lif	44
5.1.5 Polipropilen Lif	45
5.1.6 Su	45
5.2 Metod	46
5.2.1 Kabul Edilen Esaslar	46
5.2.2 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme ve Saklama	46
5.2.3 Numune Kodlarının Verilmesi.....	48
6- DENEY YÖNTEMLERİ VE SONUÇLARI	50
6.1 Deney Yöntemleri	50
6.1.1 Basınç Dayanımı Tayini	50
6.1.2 Eğilme Dayanımı Tayini	50
6.1.3 Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk) Tayini	51
6.1.3.1 TS1015 Yöntemi	51
6.1.3.2 JSCE SF4 Yöntemi.....	55
6.2 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	58
6.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	58
6.2.2 Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	59
6.2.2.1 Lif Oranı Açısından Karşılaştırma.....	61
6.2.2.2 Lif Narinliği Açısından Karşılaştırma	63
6.2.2.3 Karma Lifli Numunelerin Lifli Beton Numuneleri ile Karşılaştırılması..	65
6.2.3 Tokluk Sonuçlarının Değerlendirilmesi	67
6.2.3.1 Lif Oranı açısından Karşılaştırma	68
6.2.3.2 Lif Narinliği Açısından Karşılaştırma	70
6.2.3.3 Karma Lifli Numunelerin Lifli Beton Numuneleri ile Karşılaştırılması.	72
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	74
7.1 Sonuç	74
7.2 Öneriler.....	76
8.KAYNAKÇA	77
9.EKLER	85
9.1 Ek A: Beton Numunelerinin Eğilme Deneyi Sonuçları	86
9.2 Ek B: Deney Resimleri.....	98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Düz, Pürüzsüz Yüzeyle Teller	17
Şekil 3.2: Üzerinde Girintiler (Çentikler) Açılmamış Teller	17
Şekil 3.3: Uzunluğu Boyunca Dalgalı (Kıvrımlı) Teller.....	17
Şekil 3.4: Ay Biçimi Dalgalı Teller.....	18
Şekil 3.5: İki Ucu Kıvrılmış Teller.....	18
Şekil 3.6: Bir Ucu Kıvrılmış Teller.....	18
Şekil 3.7: Lifli Betonun Yük-Sehim Eğrisi.....	21
Şekil 3.8: Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton ile Lifsiz Betonun Yük-Deplasman Davranışlarının Karşılaştırılması	22
Şekil 3.9: Çatlak Köprülenmesine Farklı Tel Boyutlarının Etkisi	28
Şekil 3.10: Karma Lifli Betonarme Kirişlerin Eğilme Gerilmesi-Sehim Eğrileri.....	30
Şekil 3.11: Farklı Tip ve Miktarlarda Lif İçeren Betonlarda Eğilme Dayanımı-Sehim İlişkileri	31
Şekil 4.1: Lif Geometrisinin Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	35
Şekil 4.2: Lif boyunun Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	36
Şekil 4.3: Lif Yüzdesinin Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkileri.....	37
Şekil 5.1: Beton Karışımlarında Kullanılan Agregaların Granülometri Eğrileri.....	42
Şekil 6.1: Tokluk İndekslerinin Hesaplanması için Yük-Sehim Eğrisi.....	52
Şekil 6.2: Üçte Bir Noktalarından Yüklemeli Eğilme Deneyi Test Düzenegi.....	55
Şekil 6.3: Yük Sehim Eğrisi (Açıklık/150).....	56
Şekil 6.4: Tüm Seri Numunelerin Yük Sehim Eğrileri.....	59
Şekil 6.5.a: Farklı Dozajlarda Kullanılmış Mikrodonatılı Beton Numunelerinin Yük Sehim Eğrileri.....	61
b: Farklı Lif Oranlarıyla RC 65/35 BN Lifli Beton Numunelerinin Yük Sehim Eğrileri.....	62

c: Farklı Lif Oranıyla RC 65/35 BN Lifli Beton Numunelerinin Yük Sehim Eğrileri.....	63
Şekil 6.6.a: Ağırlıkça Aynı Lif Oranında Farklı Narinlik ve Boylardaki Lifli Beton Numunelerinin Yük Sehim Eğrileri.....	64
b: Aynı Lif Oranıyla Farklı Narinlik ve Boydaki Lifli Beton Numunelerinin Yük Sehim Eğrileri.....	64
Şekil 6.7.a: Karma Lifli ve Lifli Beton Numunelerinin Yük Sehim Eğrilerinin Karşılaştırılması.....	65
b: Karma Lifli ve Lifli Beton Numunelerinin Yük Sehim Eğrilerinin Karşılaştırılması.....	66
c: Karma Lifli ve Lifli Beton Numunelerinin Yük Sehim Eğrilerinin Karşılaştırılması.....	66
Şekil 6.8.a: Farklı Lif Oranındaki Mikrodonatılı Betonların Numunelerinin Tokluk Değerleri	69
b: Farklı Lif Oranındaki RC 65/35 BN Lifli Beton Numunelerinin Tokluk Değerleri.....	69
c: Farklı Lif Oranındaki RC 80/60 BN Lifli Beton Numunelerinin Tokluk Değerleri.....	70
Şekil 6.9.a: Aynı Lif Oranındaki Farklı Lifli Beton Numunelerinin Tokluk Değerlerinin Karşılaştırılması.....	71
b: Aynı Lif Oranındaki Farklı Lifli Beton Numunelerinin Tokluk Değerlerinin Karşılaştırılması.....	71
Şekil 6.10.a: Karma Lifli ve Lifli Beton Numunelerinin Tokluklarının Karşılaştırılması.....	72
b: Karma Lifli ve Lifli Beton Numunelerinin Tokluklarının Karşılaştırılması.....	73
c: Karma Lifli ve Lifli Beton Numunelerinin Tokluklarının Karşılaştırılması.....	73

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Polipropilen Lif kullanım Dozajları.....	15
Tablo 3.2: Liflerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri.....	23
Tablo 5.1: Kullanılan Agregaların Önemli Özellikleri.....	41
Tablo 5.2: Çimentonun Kimyasal Özellikleri	43
Tablo 5.3: Çimentonun Fiziksel Özellikleri	43
Tablo 5.4: Deneyde Kullanılan Hiperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesinin Özellikleri	44
Tablo 5.5: Çelik Liflerin Özellikleri.....	45
Tablo 5.6: Polipropilen Lifin Özellikleri... ..	45
Tablo 5.7: 1 m ³ Betonda Bulunan Gerçek Malzeme Miktarları.....	49
Tablo 6.1: Kalıcı Dayanım Faktörlerinin Sınıflandırılması.....	53
Tablo 6.2: Küp Numunelerin Basınç Dayanımları.....	58
Tablo 6.3: Beton Numunelerinin Eğilme Dayanımları.....	60
Tablo 6.4: Numunelerin Şekil Değiştirme İndisleri.....	67
Tablo 6.5: Numunelerin Tokluk Değerleri	68

SEMBOL LİSTESİ ve KISALTMALAR

MPa	: Megapascal
kg/m³	: Kg /metreküp
C30	: Beton sınıfı 30 MPa(N/mm ²)
mm	: Milimetre
°C	: Santigrad derece
l/d	: Lif Narinlik Oranı
V_f	: Lif Hacmi
Kg	: Kilogram
N/mm²	: Newton/milimetrekaire
P_{max}	: En büyük yük değeri
σ	: Gerilme N/mm ²
ε	: Şekil Değiştirme, mm
(l/dc)	: Eşdeğer çap
SO₃	: Sodyum Trioksit
Cl	: Klorür
SiO₂	: Silisyum Oksit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
Fe₂O₃	: Demir Tri Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
kg/l	: Kilogram/litre
μ	: Lif Çapı
F_c	: Basınç dayanımı, MPa
F	: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A_c	: Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm ²
E_{cj}	: j günlük betonun elastisite modülü
f_{ckj}	: j günlük betonun karakteristik dayanımı
f_{cf}	: Eğilme dayanımı, MPa
l	: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm
b	: Numunenin eni, mm
h	: Numunenin yüksekliği, mm
I_5	: I_5 Tokluk İndisi
I_{10}	: I_{10} Tokluk indisi
I_{20}	: I_{20} Tokluk İndisi
$R_{5,10}$: Artık mukavemet faktörü
F_u	: Kopma modülü
$\bar{\sigma}_b$: Eğilme tokluğu faktörü, katsayısı (kgf/cm ²) (N/mm ²)
T_b	: Eğilme tokluğu (kgf.cm), (J)
δ_{tb}	: 1/150 açıklığının deplasmanı (l^5)(cm), (mm)
KN mm	: Kilo Newton milimetre
PÇ 42,5	: Portland Çimentosu
ACI	: American Concrete Institute
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Betonlar
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
RPC	: Reaktif Pudra Beton
SIFKON	: Yüksek Oranda Çelik Lif İçeren Çimento Bulmacı
M13	: Polipropilen Lif 13 mm
KSD	: Kullanılabilirlik Sınır Durumu
TSD	: Taşıma Gücü Sınır Durumu
ABBY	: Almanya Beton Birliği Yöntemi
JSCE	: Japan Society of Civil Engineers
C-S-H	: Mikron boyutunda C-S-H jeli

- SF1** : Steel Fiber 1
- PP** : Polipropilen Lif
- NDB** : Normal dayanımlı
- KLYDB** : Karma Lifli Yüksek Dayanımlı Beton
- Y** : Yalın Beton
- LBÇM20** : Lifli Beton Mikro Donatılı 20kg/m³
- LBÇM40** : Lifli Beton Mikro Donatılı 40kg/m³
- LBÇ6520** : Lifli Beton RC 65/60 Z, 20kg/m³
- LBÇ6540** : Lifli Beton RC 65/60 Z, 40kg/m³
- LBÇ8020** : Lifli Beton RC 80/60 Z, 20kg/m³
- LBÇ8040** : Lifli Beton RC 80/60 Z, 40kg/m³
- LBP600** : Polipropilen Lifli Beton Doumix 13, 600gr/m³
- HBÇMP** : Hibrit Beton Mikro Donatı-20kg/m³, Polipropilen-500 gr/m³
- HBÇ65P** : Hibrit Beton RC 65/60 Z-20kg/m³, Polipropilen- 500 gr/m³
- HBÇ80P** : Hibrit Beton RC 80/60 Z -20kg/m³, Polipropilen 500 gr/m³
- Ç** : Çimento
- KTT** : Kıрма Taş Tozu

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez programımın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön vererek yardım ve bilgi konusunda bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, sayın Yrd.Doç.Dr. Fehmi ÇİVİCİ'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez ve laboratuvar çalışmalarında pratik önermeleriyle yardımcı olan değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Altuğ Yavaş, Arş. Gör. Tamer BİROL, Arş. Gör. Erkan TÖRE, laboratuvarındaki yardımlarından dolayı Cihan POLAT ve öğrenci arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarına destekte bulunan Beksa Çelik Kord San. ve Tic, deney numunesi hazırlamamda yardımlarından dolayı Kafkas Beton San. T.A.Ş. firmasına ve çalışanlarına ayrıca deney hazırlamasında yardımlarından dolayı Selahattin GÜNGÖR'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez ve laboratuvar çalışmalarımı maddi olarak destekleyen Bilimsel Araştırma Fonuna teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sabır ve anlayışlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

1.GİRİŞ

1.1 Beton ve Özellikleri

Beton, çakıl kum gibi "agrega" denilen maddelerin bir bağlayıcı madde ve su ile birleştirilmesinden meydana gelen inşaat yapıtaşıdır. Bağlayıcı madde de genellikle çimentodur. Beton günümüzde özellikle ülkemizde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Ekonomik, dayanımlı ve uzun süre kullanılabilme özelliğinden dolayı tercih edilir. Gerek modern tasarımları uygulamada gerekse istenilen sağlamlığa ulaşma açısından vazgeçilmez bir malzemedir. Günümüzde başta çok katlı yapılar olmak üzere baraj, su yapıları, tünel, köprü gibi çeşitli yapılarda ana eleman olarak kullanılmaktadır. Dünya ortalaması yıllık kişi başına üretilen beton 1 ton civarındadır [1].

1824 yılında Joseph Aspdin tarafından Portland çimentosunun patenti alınmasıyla beton yapıların önü açılmıştır. 1801 yılında Francois Coignet betonun çekmedeki zayıflığından bahseden ilk makalesi yayımlanmıştır. Beton ile çeliğin kullanılmasıyla ilk betonarme yapı 1852 yılında Francois Coignet tarafından yapılmıştır. Beton ve çeliğin eğilme halinde bir arada kullanılması fikrini ortaya ilk atan kişi ABD'li T. Hyatt olmuştur. Hyatt, 1850'lerden itibaren betonarme üzerinde sürdürdüğü çalışmalarını 1877 yılında yayımlamış, Avrupa'da bu alanda yapılan birçok çalışmanın sonuçlarının yayınlanması izlemiştir [2].

Betonun çeşitli yapılarda başlıca kullanılma nedeni sertleştikten sonraki basınç dayanımıdır. Çok katlı yapıların yapılmasından dolayı beton dayanımının artırılması düşünülmüş ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Betonun sıkılaştırmanın yerleştirme sırasında betonun dayanımı arttırdığını kanıtlamış ve böylece yapılarda kullanılan betonların dayanımı artırılabilmiştir. Özellikle süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanılmasıyla yoğun malzemeli beton malzemesinin akışkanlık problemi giderilmiş ve daha yüksek dayanımlı betonlar elde edilmiştir. Yüksek dayanımlı beton elde edilerek basınç dayanımları 200-800 MPa, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında değişen yüksek performanslı betonlar elde edilmiştir [3].

Modern inşaat mühendisliğinde sınıflandırma için sadece basınç dayanımı yeterli olmamaktadır. Sınıflandırma dayanımıyla birlikte dayanıklılık (durabilite) kriterinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir çünkü betonun basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen çok düşük bir çekme mukavemetine ve orta seviyede bir kesme dayanımına sahiptir. Betonun kesme dayanımı basınç dayanımının %35-%80'i, çekme dayanımı ise basınç dayanımının %10'u civarındadır. Gevrek (kırılgan) bir malzeme olan betonun süneklik özelliği zayıftır. Çeşitli koşullara bağlı olarak büzülme ve sünme meydana gelmektedir [2].

Çekme dayanımı düşük olan betonlarda, özellikle dinamik yükler, çatlak oluşumuna ve pek çok çatlağın yayılmasına neden olur. Oluşan çatlaklar tekrarlı yükler altında daha büyük çatlaklara dönüşür ve ani kırılmalar görülebilir. Betonun süneklik özelliğindeki zayıflıkları iyileştirmek için uygulamada çelik donatılar ve lifler kullanılmaktadır. Ancak çelik donatılar mikro çatlaklara müdahale edemez ve makro çatlaklarda etkili olurlar. Bu da betonun çatlama dayanımı ve tokluk özelliklerini iyileştirme için en iyi yöntemin lifler olduğunu göstermektedir.

Betonda takviye amacı ile kullanılan, değişik şekil ve büyüklükte olan lifler genel olarak cam, çelik, polipropilen ve organik polimerlerden üretilmektedir. ACI 544 [4]' e göre lifin tanımı, lifin boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesi ile elde edilen "boy/çap" (aspect, ratio) oranı olarak kabul edilmektedir. Bu orana kısaca "Narinlik Oranı" da denilmektedir. Eşdeğer lif çapı ise; alanı lifin kesit alanına eşit bir dairenin çapı olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada aynı su/çimento oranlarına sahip farklı liflerle, farklı oranlarda, farklı lif narinliğindeki lifli betonlar üzerindeki mekanik özellikler incelenmiş ve karma lifli betonlar ile de karşılaştırılmıştır. Tüm numunelerde PÇ 42,5 cins çimento, ince taneli agrega (0-5mm), I nolu kırmataş (4-11.2mm), II nolu kırmataş(11.2-22.4mm) kullanılmıştır. Ayrıca yoğun malzemeleri akışkan kıvama getirmek için hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Deneyleerde mikro donatılı çelik lifler (l=13 mm), 2 ucu kancalı narinlikleri RC 65/35 BN ve RC 80/60 BN olan 2 çeşit çelik lif ve 13 mm uzunluğunda polipropilen lif kullanılmıştır. Her çeşit numune için basınç dayanımı karşılaştırmaları yapılmıştır. Farklı çeşitte lifli betonların eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitelerine bağlı olarak maksimum süneklik elde edilmesi amaçlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Gencel [5], narinlikleri farklı olan ZP 30/0,5 ve ZP 80/0,75 lifli betonların mekanik özelliklerini şahit betonla karşılaştırmıştır. İki farklı lif tipini de sırasıyla 0, 15, 30, 45, 60 kg/m³ oranlarında betona ilave ederek hem lif narinliğinin hem de lif kullanım oranının lifli betonda basınç ve eğilme dayanımındaki etkilerini incelemiştir.

Altun ve diğ. [6] yaptığı çalışmada, Dramix RC-80/0.60-BN tipi çelik lif katkı C30 sınıfı silindir beton numuneler; 0 kg/m³, 30 kg/m³, 60 kg/m³ dozajlarında her gruptan 6 adet olmak üzere toplam 18 adet üretilmiş ve çelik lif katkısının, betonun mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, 0 kg/m³, 30 kg/m³, 60 kg/m³ dozajlarında çelik lif katılarak 300x300x2000 mm boyutlarında toplam 9 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Betonarme kirişlerde basit eğilme oluşacak şekilde deney yapılarak çelik lif katkısının betonarme kiriş mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda; katkısız ve değişik dozajlarda çelik lif katkı beton silindir numunelerin ve betonarme kirişlerin genel mekanik özellikleri değişimi verilmiştir.

Ünal ve diğ. [7] yaptıkları deneysel çalışmada; çelik lif katkı betonlarda farklı lif tipi ve miktarının, basınç ve eğilme altındaki betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda narinlik oranları 60 ve 80 olan iki farklı lif tipinde ve 0 (kontrol), 15, 30, 45 ve 60 kg/m³ olarak 5 farklı lif içeriğinde olmak üzere toplam 10 farklı seri üretmişlerdir. Sonuç olarak betona ilave edilen çelik liflerin, betonun basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme yeteneğini ve eğilme dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir.

Yıldırım [8], yaptığı bir çalışmada lif takviyeli betonların performans özellikleri üzerinde durmuştur. Çalışmada, %0.5, %0.75 ve %1 olmak üzere 3 farklı hacimsel çelik lif katkı oranı almış; diğer lifleri ise %0,1 hacimsel katkı oranı ile kullanmıştır. Numuneler üzerinde kıvam, birim ağırlık, özgül ağırlık, boşluk oranı, su

emme, basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı, tokluk gibi özellikleri saptamaya çalışmıştır. Çelik liflerin uzun oldukları için eğilme dayanımlarının çok fazla geliştikleri ve lif yüzdesi arttıkça arttıklarını, çelik lifli betonların kırılma esnasında birbirinden ayrılmadığını ve dağılmadıklarını belirtmiştir. Çelik liflerin sadece toklukları değil, toklukla ilgili diğer tüm özellikleri de olumlu etkilediğini ifade etmiştir. Çelik liflerin kancalı oluşları sebebiyle, özellikle büzülmeyi azaltmakta olduklarını, polipropilen lifin ise şişmeyi arttırdığını belirtmiştir.

Yıldırım [9], diğer bir çalışmada hafif ve yarı hafif betonlarda çelik lif kullanımının betonun özelliklerine etkisini araştırmıştır. Lifli beton malzemelerde matriks fonksiyonu lifleri bir arada tutmak, onları korumak ve liflere veya liflerden gerilme transferini sağladığını ve lifin betonun basınç mukavemetine etkisi oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Yarı hafif ve hafif betonlarda çelik tel oranının artmasının bu betonların basınç, yarma ve eğilme dayanımlarını arttırdığını belirtmiştir.

Nili ve Afroughsabet [10] çalışmalarında su/çimento oranları 0,36 ve 0,46 olan çelik lif katkılı betonların darbe dayanımı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada çelik lifler %0, %0.5, % 1 olmak üzere üç ayrı hacim oranında betona ilave etmişlerdir. Lifler 60 mm genişliğinde ve 80 mm boyunda kullanılmıştır. Karışımda, silis dumanı çimento ağırlığının %8'i olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarında çelik liflerin özellikle beton yarma, çekme ve eğilme dayanımlarında göstermiş oldukları performansa dikkat çekmişlerdir. Çalışmalarının sonucu olarak betonun darbe dayanımı ve süneklik gibi özelliklerinde önemli ölçüde artış görüldüğü belirtmişlerdir.

Yığiter [11], lifli yüksek performanslı betonların enerji yutma kapasiteleri ve deformasyon özelliklerini araştırmıştır. Betonda farklı en büyük agrega tane çapları, farklı lif geometrileri ve farklı lif dozajları kullanımının gerilme deformasyon davranışlarına etkilerini incelemiştir. Lifler, eğilme dayanımlarında kontrol numunelerine göre 7. günde etkin artışlar sağlarken, 28. gündeki dayanımlarda etkileri daha azdır. Tahmin edildiği gibi eğilme dayanımındaki en büyük gelişmeyi maksimum lif dozajı olan 120 kg/m³ sağlamıştır. Yarma deneyinde de lifler beklenen sonucu yaratmış ve lif dozajı arttıkça yarma dayanımları arttırdığını belirtmiştir.

Taşdemir ve Bayramov [12] çalışmalarında; yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışını incelemişlerdir. Sunulan çalışmada yüksek dayanımlı betonlar (YDB) çimentoyu, geleneksel çelik lif donatılı betonları (ÇTDB), karma lif donatılı betonları, reaktif pudra betonları (RPC) gibi ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitleri, yüksek oranda çelik lif içeren çimento bulamacı (SIFKON), kendiliğinden yerleşen betonu, sentetik lif donatılı betonları, erken yaşlardaki rötresi düşük yüksek dayanımlı yarı hafif betonu ve yangına dayanıklı polipropilen lif donatılı yüksek dayanımlı betonu gözden geçirmişlerdir. Çelik liflerin, beton gibi yarı gevrek bir malzemede sünekliliği arttırmak için giderek daha fazla kabul görmekte olduğunu belirtmişlerdir.

Ünal [13] yaptığı çalışmada; polipropilen ve çelik lif içerikli beton yolların mekanik özelliklerini araştırmıştır. Su/çimento oranı 0.47 sabit tutularak betonlara 20 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 oranlarında RC65/60 BN tipi iki ucu kancalı çelik lif, ve 300 gr/m^3 ve 600 g/m^3 oranlarında M13 tipi polipropilen lif katılmasıyla 5 grup ayrı ve karma betonlar üretmiştir. Polipropilen lif içeren numunelerde kontrol grubu gibi ani gevrek kırılma gözlemiştir.

Tabak [14], çelik lif görünüm oranının (l/d) ve lif hacminin (V_f), betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmeye çalışmıştır. Bu amaç çerçevesinde görünüm oranı 45, 65 ve 80 olan üç farklı çelik lifi, % 0, % 1 ve % 1.5 oranlarında kullanılarak 10 farklı kompozisyonda betonlar üretmiştir. Üretilen betonlardan hazırlanan muhtelif boyuttaki örnekler üzerinde tek eksenli basınç, yarmada çekme, dört noktadan yüklemeli eğilme deneyleri, ultrases hızı ölçümleri ve darbe deneyleri yapmıştır. Betonda çelik lif kullanımı, betonun eğilme dayanımını; % 3 ile % 81 arasında değişen değerlerde arttırmış. Özellikle lif görünüm oranı ve lif hacmi arttıkça liflerin eğilme dayanımına etkisi kayda değer oranda artmış olduğunu gösterilmiştir.

Yaprak ve diğ. [15] tarafından sunulan çalışmada, farklı türdeki liflerin betonda belirli oranlarda birlikte kullanımı ile daha olumlu ve çok yönlü bir iyileştirmeyi amaçlamıştır. Uçucu kül ve çelik lif ile üretilen betona 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 kg/m^3 cam lif katılarak, betonun basınç ve çekme dayanımındaki değişimler

incelenmiştir. Cam liflerin, basınç ve çekme dayanımına olumlu yönde etkide bulunduğu saptanmıştır.

Yalçın ve diğ. [16] yaptıkları çalışmada; çelik lif donatılı betonların (ÇLDB) performans sınıflarını belirlemek için performansa dayalı tasarım parametrelerinden olan eşdeğer eğilme-çekme dayanımı Kullanılabilirlik Sınır Durumu'na (KSD) ve Taşıma Gücü Sınır Durumu'na (TSD) göre belirlemeyi amaçlamıştır. Bu amaçla yalın ve çelik lifli tüm karışımlarda su/çimento oranı 0.55 alınmış ve sabit tutulmuştur. Beton üretimlerinde 80, 65 ve 55 olmak üzere üç farklı narinlikteki (L/d) uçları kancalı çelik lifler, her bir narinlikte üç farklı hacim oranlarında kullanılmıştır. ÇLDB'ler üzerinde basınç, elastisite modülü, yarmada çekme ve kiriş eğilme deneyleri yapılmıştır. ÇLDB'nin yarma çekme ve eğilme dayanımının arttığı ve lif narinliği büyük olan betonlarda bu artışların daha fazla olduğu belirlenmiştir. Belirli bir çelik lif narinliği için çelik lif hacmi arttıkça, KSD ve TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımları belirgin bir biçimde artmıştır.

Yiğiter ve Türkel [17] yaptıkları çalışma kapsamında; betonda kullanılan liflerin boyutu ve dozajı gibi değişkenlerin taze beton özelliklerine ve sertleşmiş betonun mekanik davranışlarına etkileri araştırılmak üzere deneysel bir program yürütmüşlerdir. Deneysel çalışmalarda üretilen betonlarda değişken olarak iki farklı boyutta çelik lif (I: l=30 mm d=0.55 mm, II: l=60 mm d=0.75 mm), üç farklı lif dozajı (40, 80, 120 kg/m³) seçilmiştir. Üretilen betonlar, taze haldeki özellikleri saptandıktan sonra 7. ve 28. günlerde serbest basınç ve orta noktadan tekil yüklemeli eğilme deneyleri ile test edilmiştir. Elde edilen deney verileri ile karışımların nihai dayanımları, elastisite modülleri, enerji yutabilme kapasiteleri bulunmuş ve çelik lif içermeyen kontrol örnekleri ile karşılaştırılmıştır.

Altun ve diğ. [18] yaptıkları çalışmasında; çelik lif katkılı üç adet 2000 mm boyunda, 250x350 mm kesitli betonarme kiriş ile çelik lif katkısız üç adet 2000 mm boyunda, 250x350 mm kesitli betonarme kiriş eleman imal etmişlerdir. Betonarme kirişler, 28 gün uygun kür şartlarında bekletildikten sonra iki noktadan yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda çelik lif katkılı ve çelik lif katkısız betonarme kirişlerin taşıma gücü özellikleri elde edilerek sunulmuştur. Tüm deney

numunelerinin enerji yutma kapasiteleri belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Berbergil [19] yaptığı deneysel çalışmaların sonucunda; kendiliğinden yerleşen betonda artan çelik lif oranının sertleşmiş beton deneylerinde betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünü önemli derecede etkilemediği görülürken, eğilme dayanımını önemli derecede arttırdığı ve ultrases hızlarında bir düşüş eğilimi olduğu gözlenmiştir. Lifsiz betona 60 kg/m^3 çelik lif katılmasıyla betonun eğilme dayanımında %130'lara varan artışlar gözlenmiştir.

Karahan [20] uçucu küllü katkılı betonlar ile polipropilen lif ve çelik lif ile güçlendirilmiş normal ve uçucu kül katkılı betonların özellikleri araştırmıştır. 19 mm uzunluğundaki polipropilen lif hacimce %0.05, %0.10 ve %0.20 oranlarında ve 35 mm uzunluğunda ve 0.55 mm çapındaki çelik lif ise hacimce %0.25, %0.50, %1.00 ve %1.50 oranlarında normal ve %15 ve %30 uçucu kül katkılı betonlara ilave edilmiştir. Betonlar üzerinde işlenebilme, basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı, tokluk, yarmada çekme dayanımı deneyleri yürütülmüştür. Polipropilen lifin ve artan lif oranlarında özellikle %0.05 oranından sonra betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine pek bir etkisi görülmemiştir. Çelik lifin özellikle lif hacmi değişimine bağlı olarak betonun eğilme dayanımı, tokluk, yarmada çekme dayanımı, aşınma ve rötre gibi özelliklerini önemli ölçüde olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir.

Altun ve Aktaş [21] yaptıkları çalışmada; farklı dayanımlı hafif betonlara çelik teller 0, 30 ve 60 kg/m^3 dozajlarında katılarak prizmatik hafif beton kiriş numuneler imal etmişlerdir. Çelik tel katkısız hafif betondan imal kiriş numunelerde kontrol amaçlı üretilmiştir. Prizmatik numuneler 28 gün sonunda kapalı çevrim sehim kontrollü yükleme çerçevesinde ASTM C 1018 standardına uygun olarak eğilme deneyi ile kırılmıştır. Deney ile prizmatik numunelerde yük-sehim eğrileri elde edilmiş, eğilme dayanımları, tokluk indeksi ve eğilme toklukları hesaplanmıştır. Deney sonucunda, çelik tellerin farklı dayanımlara sahip hafif beton gruplarının eğilme dayanımını, tokluk indeksini ve eğilme tokluğunu önemli derece geliştirdiği, enerji yutma kapasitelerinde ise artış sağladığı görülmüştür.

Çivici [22] yaptığı bir çalışmada; iki eksenli eğilme altında, donatısız ve çelik lifli beton plak numunelerin davranışları her bir numunenin deneylerinden elde edilen yük-sehim diyagramları aracılığıyla karşılaştırılmıştır. Numuneler üç grup halinde dökülmüşlerdir. Bunlar donatısız, rastgele dağılmış ve lif katmanlıdır. Ayrıca prizmatik kirişler üzerinde de eğilme dayanımı ve tokluk özellikleri incelenmiştir. Beton malzemesi özelliklerini karşılaştırmak amacıyla, bilgisayar programı ile deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çivici [23] başka bir çalışmada ise; lifli betonun enerji yutabilme kapasitesi olan tokluğu ASTM C 1018 ve JSCE-SF4 'e göre kiriş testlerinden hesaplanarak karşılaştırmıştır. Betona lif ilave edilmesi ile tokluğun önemli derecede geliştiği, bununla birlikte enerji yutma kapasitesindeki artış dikkat çekicidir. Bu bağlamda çelik lif donatılı elemanlarda çelik lif içeriği optimum düzeyde değiştirilerek istenen çözümler elde edilebilir. Böylece üretilecek sünek davranış ile şok yüklemelere ve deprem sırasında oluşabilecek yüklere karşı kararlı bir davranış elde edilebilir.

Özcan [24] yaptığı çalışmada; çelik lif katkılı üç adet 2000 mm boyunda, 250x350 mm en kesitli betonarme kiriş ile çelik lif katkısız üç adet 2000 mm boyunda, 250x300 mm en kesitli betonarme kiriş elemanlar imal edilmiştir. Betonarme kirişler, 28 gün boyunca uygun kür şartlarında bekletildikten sonra iki noktadan statik yükleme deneyine tabii tutulmuştur. Deneyler sonucunda çelik lif katkılı ve çelik lif katkısız betonarme kirişlerin taşıma gücü özellikleri verilen beton sınıfı için elde edilerek tezde sunulmuştur. Yapılan tüm numunelerde basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

Alkan [1] yaptığı çalışmada; polipropilen lif içermeyen bir seri ile 12mm, 25mm, 38mm, 51mm, boyutlarında polipropilen lif içeren dört seri olmak üzere toplam beş seri beton üretilmiştir. Lif yüzdeleri hacimsel olarak %0,5'de sabit tutulmuştur. Yarmada çekme deneyi için 150mm çapında 60mm yüksekliğinde, elastisite modülü ve standart basınç deneyleri için 100mm çapında ve 200mm yüksekliğinde silindirler üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada basınç dayanımları, yarma çekme dayanımları, net eğilme dayanımları, kırılma enerji ve süneklikleri karşılaştırılmıştır.

Aral [3] yaptığı çalışmada; çelik liflerin mekanik özellikleri ve kompozitlerin özelliklerini incelemek için kancalı ve/veya kancasız 3 farklı çelik lif kullanılmıştır. Her çelik lifin hacmi değişken olup toplam lif hacim oranı %2 olarak sabit tutulmuştur. Farklı lif içeren toplam lifli ve lifsiz 12 beton karışımı üretilmiştir. Tüm karışımlarda polipropilen lif hacim oranı %0,5 de sabit tutulmuştur. Çelik lif içeren betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, yarmada çekme dayanımları, kırılma enerjileri, net eğilme dayanımları ve karakteristik boyları çelik lif içermeyen betonla karşılaştırıldı. En yüksek süneklik, kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımı çelik lifli betonlardan elde etmiştir. Karma lif içeren numunelerden elde edilen kırılma enerjisi değerleri ise orta seviyede olmuştur.

3. LİFLER VE LİFLİ BETONLAR

Bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy/çap oranının en az 10 olması ($l/d > 10$), lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm 'den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm^2 'den daha küçük olması gibi sınırlamalar getirilmektedir. Lif boyunun, lifin kesit alanı kadar alanı olan bir dairenin çapı olarak tanımlanan "eşdeğer lif çapına" bölünmesiyle bulunan lif narinlik oranının, beton malzemede, boyları 0.60 ile 7.62 cm arasında değişen lifler için tipik değeri 30 ile 150 arasında verilmektedir [4].

Farklı özellikleri ve kullanım alanları bakımından birçok lif türü vardır. Bu lifleri değişik biçimlerde sınıflandırmak mümkündür. Lifler, genel olarak şöyle sınıflandırılabilir [25].

Lifler;

A.Doğal Lifler

1.Hayvansal Lifler

2.Bitkisel Lifler

3.Mineral Lifler

B.Sentetik Lifler

1.Polimer Lifler

2.Metalik Lifler

3.Seramik Lifler

Betonun mekanik özelliklerini güçlendirmek için lif katılarak elde edilen kompozitlere lif takviyeli kompozitler denilir. Lif takviyeli kompozitleri oluşturmada kullanıldığı bilinen en eski doğal lifler; saman ve at yelesidir. Eski devirde mimar ve mühendisler yapılarını zamanın tahrip edici etkilerine karşı korumak için saman, hayvan kılları vb. doğal lifleri kullanarak mikro donatı tekniğini uyguladılar. Ülkemizde bulunan en eski uygulamaya Troia Kazıları sırasında rastlanmıştır ve MÖ 2500 yıllarına ait olduğu saptanmıştır. O bölgede yaşayan insanlar pişmiş tuğla ile yapılan örme duvar üzerindeki sıvalarda saman çöpü ve keçi kılı kullanarak mikro donatı teknolojisinin ilk örnekleri gerçekleştirilmiştir. Bilinen en eski lif takviyesi kerpiç duvarların sıvasında kullanılan saman takviyeli kildir [26]. Bazı kaynaklara göre saman takviyeli kil harcı kullanımı, günümüzden 4500 yıl öncesine dayanmaktadır.

Eski çağlardan beri kullanılan kerpiç malzemesinde, kil hamuru ile birlikte bitkisel liflerin (genellikle saman), bazı sıva uygulamalarında da keten ve kenevir liflerinin ve atkuyruğu, kuş tüyü gibi hayvansal liflerin kullanıldığı da bilinmektedir [27].

Sentetik lifler daha çok yapı alanında kullanılan liflerdir. Polimer ve metalik lifler uygulamada en çok karşılaşılan sentetik lif türleridir. Metalik lifler başta mühendislik uygulamaları olmak üzere, birçok alanda sıkça kullanılırlar. Metallerin önemli özelliklerinden bir tanesi plastik şekil değiştirebilme yeteneğidir. Böylece, çok basit şekillerden başlayarak, çok karmaşık şekil ve formlarda üretim yapabilmesine olanak sağlar. Uçak gövdesinden, büyük petrol ve gaz borularına ve hatta günlük hayatta kullandığımız pek çok basit alete kadar metallerin kullanımına rastlanır. Lif formundaki metaller uzun zamandır kullanılmaktadır. Çelik lifler, betona katılan metalik liflerin en yaygın olanıdır. Polimer lifler çok geniş uygulama alanları ve çeşitleri olan bir lif türüdür. Bu sentetik polimer liflerin çoğu, çok düzenli ve kopya edilebilir özelliklere sahip olmakla birlikte, düşük elastisite modülüne sahip olduklarından, tekstil sektöründe kullanımları kısıtlı olmaktadır. Sentetik polimerik liflerin başlıcaları; polipropilen, naylon, polietilen, aramid ve perlondur. Polipropilen lifler, aynı zamanda çimento esaslı malzemelerin takviyesinde de kullanılabilir [28]. Bu çalışmada polipropilen, çelik ve karma lifli betonlardan bahsedilecektir.

3.1 Polipropilen Lif

Polipropilen lif, insanlık tarihi kadar eski olan doğal mikro donatı saman ve hayvan kılları kullanımının günümüz teknolojisine uyumlaştırılmış halidir. Başta inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan organik bir malzemedir [20]. Tüm dünyada çimento ve alçı gibi inorganik kökenli inorganik bağlayıcılar ile bitüm gibi organik bağlayıcıları mikro donatılandırmak ve durabilite özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Polipropilen lifler çok çeşitli ebatlarda üretilirler. Hammaddesi % 100 polipropilendir [29]. Lif donatılı beton uygulamaları çok eski yıllara dayanmasına rağmen, 1960'lı yıllardan itibaren büyük bir ivme kazanmıştır. Özellikle Amerikan Ordu Mühendisleri Birliği (US Army Corp. Of Engineers) geleneksel silahlara karşı betonu güçlendirmek amacı ile yaptığı çalışmalar sonucunda betonda lif kullanımına yönelik deneysel ve teorik veriler elde edilmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar ışığında ASTM, bir standard hazırlayarak ‘Püskürtme Sıva ve Lif donatılı Beton uygulamaları’ adında 1116-C [30] kodu ile yayımlamıştır.

Sentetik liflerin gelişimi endüstriye çok faydalı olmuştur. Polipropilen liflerin betona katılması 1960’larda askeri araştırmalarda bu ürünlerin betonu sertleştirdiği, sınırlı çatlaklara izin vererek darbe ve aşınmalara karşı direnç sağladığını ispatlamasıyla başlamıştır [31]. Polipropilen lifleri kullanımında ilave işçilik gerektirmeyen, kolay uygulanabilen, betonun ve sıvanın kalitesini artırmak için kullanılan çürümeyen bir üründür. Polipropilen lif betonun içinde üç boyutlu bir mikro donatı ağ oluşturarak, betonda doğal olarak varlığı kabullenilen eksiklik ve zaafı azaltıp betonun bazı özelliklerini iyileştirebilirler. Polipropilen lifleri hasır demir, metal elyaf ve kümes filesi gibi alternatif donatı sistemleri ile karşılaştırıldığında en hafif mikro donatı sistemidir. Bu nedenle yapıya diğer donatı sistemleri kadar ölü donatı ağırlığı vermezler [20].

3.1.1 Polipropilen Lifli Betonun Teknik Özellikleri

Beton veya sıvada polipropilen lifli betonun en önemli etkisi, sermeden sonraki ilk birkaç saat içinde plastik büzülmeden dolayı oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır. Sertleşme prizlenmenin ilk safhasında beton mukavemetinin oluşma hızı, büzülmeden dolayı meydana gelen iç çekme gerilmelerinin oluşum hızından daha yavaştır. Bu plastik büzülme esas itibarıyla su ve çimento arasında başlayan kimyasal reaksiyon ve buharlaşmanın tabii bir sonucudur [32].

Polipropilen liflerin başlıca etkileri:

- Betondaki rötre ve büzülme çatlaklarını azaltır.
- Betonu üç boyutlu donatılandırır.
- Segregasyonu azaltır.
- Betonu sünek hale getirir ve geçirgenliğini azaltır.
- Betonun darbeye karşı dayanımını artırır.
- Betonun basınç ve eğilme dayanımını artırır.
- Asit ve bazlardan etkilenmez, donatının korozyonunu ve paslanmasını geciktirir.
- Betonun dağılmasını ve parçalanmasını önler. Yapılar depremde az hasar görür ve çökme riski azalır.

- Betonun tutunganlığı artar, kayar kalıplarda betonun şişmesini önler.
- Yorulma dayanımını kazandırır ve beton hizmet ömrünü artırır.
- Aşındırıcı kimyasallara karşı dayanımı artırır.
- Yüzey aşınmasını, ufalanmasını ve pullanmasını engeller.
- Etkileri betonun plastiklik safhasında geçerlidir ve bir nevi katkı malzemesi görevi görürler.
- Betona çok iyi şekilde yapışırlar [33].

Polipropilen lifler çelik liflere nazaran betonun mekanik mukavemetlerini arttırmada çok etkili olmaz. Az da olsa betona enerji yutma özelliği kazandırır ve özellikle de plastik rötrede çok etkili olur. Çok güçlü olmayan büzülmelelere karşı polipropilen lifler tercih edilmektedir. Polipropilen liflerin fonksiyonu betonun yumuşak, plastik safhasıyla sınırlı iken, çelik liflerin mukavemet arttırıcı etkisi beton prizini alıp sertleştikten sonra da belirgin şekilde devam eder [32].

3.1.2 Polipropilen Lifli Betonların Kullanım Alanları

Saha Betonları ve Şap Uygulamaları: Polipropilen liflerin en yaygın tercih edildiği uygulama alanıdır. Plastik büzülme, plastik çökme ve rötreye çatlaklarını engellenmesi açısından en ekonomik ve pratik yöntemdir. Bunu yanı sıra yüzey aşınma direnci kazandırır. Pullanma, ufalanma ortadan kalkar. Minimum incelikte şap dökümüne izin verir. Ayrıca taşıyıcı olarak kullanılmayan hasır donatının yerine tali donatı sistemi olarak kullanılır.

Yapısal Taşıyıcı Betonarme Sistemler: Prefabrik ve geleneksel yapıların kolon ve kiriş gibi iskelet sistemlerinde polipropilen lifler etriye sistemi ile paralel çalışarak deprem gibi ani ve şiddetli darbe yüklerine karşı yapının enerji yutma kapasitesini bir miktar artırır. Bu sayede dağılma, ufalanma gibi etkiler ortadan kalkar.

Tamir ve Yapıştırma Harçları: İnşaat hatalarının ortadan kaldırılması için yaygın olarak kullanılan tamir harç ve dolgularında polipropilen lif kullanıldığında elde edilecek kompozit malzemenin tutunganlığı artacak ve büzülme problemleri ortadan kalkacaktır. Tarihi yapıların yenilenmesi için hazırlanan özel karışım harçlarda polipropilen lifler keten, saman, keçi kılı v.b. yerine kullanılabilir. Mantolama amaçlı polistren levha sistemlerinin yapıştırılmasında da polipropilen lifler aderansı artırır.

Prefabrik Elemanlar: Betonarme boru, prekast cephe giydirmeye elemanları, harpuşta, denizlik ve sveler ile prefabrikasyon yapı elemanlarında ortaya çıkan kalıptan çıkarma sırasında oluşan kırılmaları, yüzey kalitesindeki bozulmaları, çökme problemlerini ve kr nedeniyle oluşan termal çatlamaları polipropilen liflerin kullanımıyla önlemek mümkündür.

Bitümlü Karışımlar: Polipropilen lifler bitümlü karışımlarda ve asfalt uygulamalarında modifikasyon amaçlı olarak karışımların düşük sıcaklıklarda kırılmasını ortadan kaldırmak için kullanılırlar.

Püskürtme Beton: Püskürtme beton uygulamalarında en büyük maliyet faktörü olan geri düşme, polipropilen liflerin kullanımı ile %5 düzeyine çekilebilmektedir. Polipropilen lifler betonun yüzeye tutunma kabiliyetini arttırırken, yüzeyden geri sekme ve sıçrama kontrolü sağlar. Homojen ve sürekli malzeme akımını temin ederek operatöre uygulama kolaylığı verir. şev, düşey ve baş üstü uygulamalarında bel vermeyi ve saçılmayı azaltır [33].

3.1.3 Polipropilen Liflerin Betona Katılışı ve Kullanım Oranları

ASTM C 1116 [30] standardına göre %100 saf polipropilen ham maddesi kullanılarak üretilen lifler hacimce %0.1=1 litre varlığı 1 m³ beton için yeterlidir. Polipropilen maddesinin yoğunluğu 0.9 kg/litre olduğundan tavsiye edilen lif miktarı en az 0.9 kg/litre olmalıdır. Bu oranları %0.05 ila %2 arasında ve hatta %5'e kadar çıkabilir. Portland çimento lu agregalarına göre uygulamalar betonlar ve harçlar olmak üzere iki gruptur. İçerdiği zel katkıları sayesinde beton içerisinde toplanmadan beton santralinde, transmikserde, betoniyerde, şap pompasında, püskürtme makinesinde, mekanik karıştırma işleminin olduğu her tür makine de kolayca katılabilir. Polipropilen lifler su emmez, bu nedenle beton ve harçların su/çimento oranını etkilemediğinden yeni bir karışım dizaynı ya da karışım oranlarında bir değişiklik gerektirmez. Beş dakika yüksek devirde karıştırıldıktan sonra, polipropilen demetleri çözülür ve binlerce elyaf lif, betonun her tarafına homojen bir şekilde dağılır. Polipropilen lifli betonu yerleştirmek kolay ve ekonomiktir. Fazla karıştırmanın liflerin performansına bir mahsuru yoktur. Yüksek aşınma direnci ve mikro donatı yoğunluğu gereken yerlerde polipropilen lif dozajı hacimce % 0.2 ye kadar artırılabilir.

Polipropilen sıva ve harç betonu için ton başına 2 kg ilave edilir. Özel amaçlı yapıştırıcılar, tamir harçları, derz dolguları için bu oran 5 kg düzeyine kadar çıkarılır. Kuru karışıma ilave edilecek polipropilen lifler homojen ve topaklanmadan kolaylıkla dağılır. Lif miktarı ve uzunluğu ihtiyaca göre değişim gösterebilir. Polipropilen lifler genel olarak iki farklı yapıda üretilip kullanılmaktadır. Bunlar literatürde “monofilament” denilen ince uzun yapıda çap/boy oranı 1/60 civarında olan lifler ve yine literatürde “staple fiber” olarak anılan ve elyaf görünümlü, iplik kalınlığında çok ince ve kısa olan parçaların bir araya gelmesiyle oluşan lifler olarak isimlendirilirler. Polipropilen liflerin “monofilament” olarak bilinenlerinin boyları 4–8 cm arasında değişmektedir. Bunlar daha sert yapıdadır ve beton içinde homojen olarak kolayca dağılabilmektedirler. Polipropilen liflerin “staple fiber” olarak bilinen elyafımsı türünde ise lifler kümelenmiş halde bir grup olarak bulunurlar ve kareye yakın bir şekilleri vardır. Boyutlar 1-3 cm arasındadır. Bunlar betona karışım suyu ile birlikte verilebilirler [29]. Polipropilen lifler için tavsiye edilen kullanım dozajları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Polipropilen lif kullanım dozajları [20]

Polipropilen	İç Mekan	Dış Mekan	Ağır Hizmet
Elyaf Tipi	M	F	F
Minimum Dozaj (gr/m ³)	600	900	1800
Full Etki (gr/m ³)	1200	2700	3600
Uzunluk (mm)	6-9-12-15	6-9-12-15-19-25	6-9-12-15-19-25

3.2 Çelik Lif

Çelik lif donatılı beton, agrega, çimento ve su gibi temel beton bileşenlerine, mineral ve/veya kimyasal katkıların yanı sıra çelik lif katılmasıyla elde edilen kompozit bir malzemedir. Çelik lifler yalnız betonların ve betonarme elemanların performanslarının iyileştirilmesi için kullanılır [20].

Liflerle donatılı betonlarla ilgili ilk çalışmalar J. Lambot'nun 1847 yılındaki patentlerine dayanmaktadır. Lambot' nun ilk betonarme uygulamaları olarak da değerlendirilen çalışmaları sürekli teller ve tel kafes donatılıydılar. 1874 yılında liflerle donatılı betonla ilgili ilk patent A.Berard tarafından California' da alınmıştır. 1900'lerden sonra çeşitli teller kullanılarak düşük çekme mukavemetine ve kırılğan bir yapıya sahip beton gibi malzemelerin çeşitli özellikleri iyileştirilmiştir [4]. Basit bir çimento, agrega ve su karışımı olan beton, II Dünya Savası yıllarına kadar büyük bir değişim göstermemiştir. 1960'lı yılların başında Amerikan Silahlı Kuvvetleri Mühendisleri Birliği betonda oluşan çökme ve büzülme çatlamlarına yönelik bir araştırma programı başlatmıştır. Betonda yapısal olmayan çökme ve büzülme çatlaklarının azaltılması için kullanılan geleneksel yöntemler, yüzeyin bir sıvı kür malzemesi ya da bir örtü kullanılarak kapatılmasını kapsamaktadır, ancak bu önlemler çatlakların kılcal olmasını sağlıyor, yine de betona yük bindiğinde çatlakların genişlemesini önlemiyordu. Araştırma programının sonunda "plastik büzülme çatlaklarının, betonun tasarlandığı mukavemet değerine ulaşıncaya kadar maruz kaldığı dinamik iç gerilmelerden kaynaklandığı" sonucuna ulaşılmıştır [31]. Lifler çelik tellerle birlikte 20. yüzyılın ortalarına doğru beton katkı maddelerinin en popülerleri oldular. 1950'lerde çelik lif katkı maddesi olarak kullanıldı. Ancak bunlar çatlamaı azaltıp dayanım arttırırken paslanma ve kirlenmeye de neden oldu.

Çelik lif donatılı betonların, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı ve çatlak dayanımı sonrası yük taşıma kapasiteleri normal betonlara oranla belirgin iyileşmeler göstermektedir [20]. Çelik lif donatılı betonları karakterize eden en önemli özellikleri, tokluk ve dinamik yüklere dayanımıdır. Başka bir deyişle, betonun enerji yutma kapasitesindeki büyük artıştır. Basınç ve eğilme-çekme gerilmeleri çelik liflerin rolünden ziyade beton kalitesine, tokluk ise çelik liflerin performansına bağlıdır [34].

3.2.1 Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Liflerin Sınıflandırılması

Betonun takviyesinde kullanılan çelik lifler ACI 544'e [4] göre lif boyunun eşdeğer tel çapına bölünmesiyle elde edilen boy/çap oranı olarak kabul edilmektedir. Bu oran aynı zamanda lifin narinliğinin anlamına da gelmektedir. Çelik lif teçhizatlı

beton imalinde kullanılan bu çelik lifler, düşük karbonlu çelikten soğuk çekme işlemi ile imal edilmelidirler.

Çelik lifler TS 10513'te [35] tiplerine göre şu şekilde sınıflandırılır:

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyle lifler (Şekil 3.1)

B Sınıfı: Bütün uzunluğunca deforme olmuş lifler:

-Üzerinde girintiler (çentikler) açılmamış lifler (Şekil 3.2)

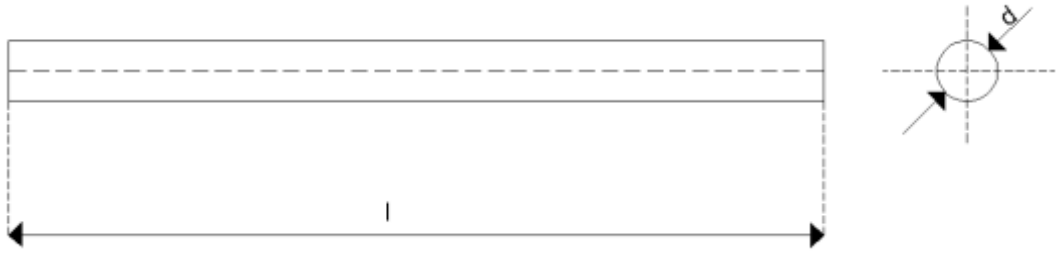
-Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) lifler (Şekil 3.3)

-Ay biçimi dalgalı lifler (Şekil 3.4)

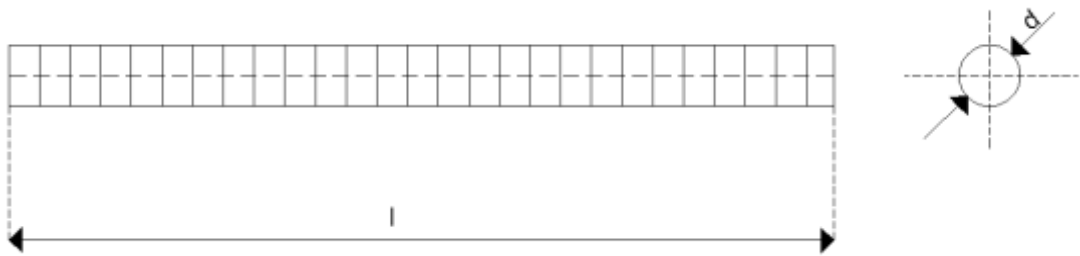
C Sınıfı: Sonu kancalı lifler:

-İki ucu kıvrılmış lifler (Şekil 3.5)

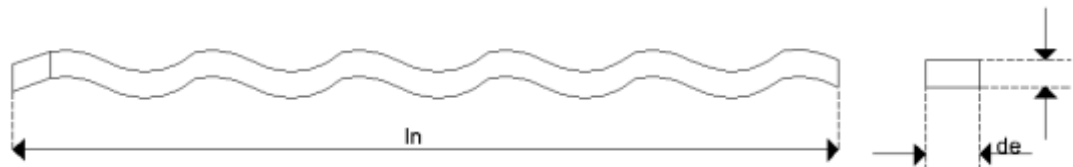
-Bir ucu kıvrılmış lifler (Şekil 3.6)



Şekil 3.1: Düz, pürüzsüz yüzeyle lifler



Şekil 3.2: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmamış lifler



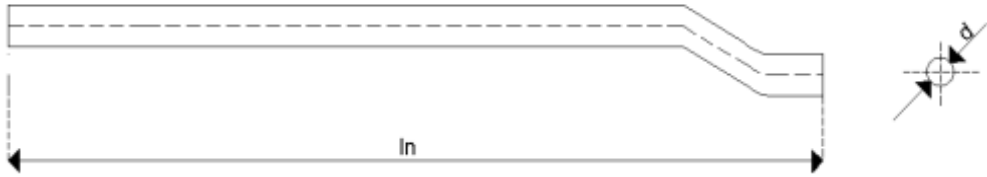
Şekil 3.3: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) lifler



Şekil 3.4: Ay biçimi dalgalı lifler



Şekil 3.5: İki ucu kıvrılmış lifler



Şekil 3.6: Bir ucu kıvrılmış lifler

1970'li yıllarda sadece düz çelik lifler kullanılırken sonraları üreticiler uçları çengelli, kıvrımlı, yüzey pürüzlülüğü artırılmış, özel deformasyonlar verilmiş ve daha değişik geometrilere çelik lifler üretmişlerdir. Ancak araştırmalar göstermiştir ki, betonun özellikleri içerisindeki en büyük iyileştirmeyi düz çelik lifler ve ucu çengelli lifler sağlamaktadır. Uygulamada genellikle özel olarak bükülmüş kanca uçlu lifler kullanılır. Lif uçlarındaki bükülmeler, betona olan ankrajı kuvvetlendirir. Çelik lifler betonarme elemanları her doğrultuda takviye etmektedir. Özel tutkal ile yapıştırılmış demetler halinde bulunan lifler, beton karıştırma makinelerinde basit ve hızlı bir şekilde dağılmaktadırlar [32].

Çelik lifli betonları daha ekonomik hale getirmek için değişik üretim metotları denenmiş ve sonuçta dairesel kesitli olmayan (yarım daire, dikdörtgen ve düzensiz en kesitli gibi) çeşitli tipte lifler de üretilmiştir. Lifli beton uygulamalarında

genellikle yüzeyi kaplanmamış çelik lifler kullanılır. Bu liflerin tek sakıncası, özellikle yerleştirme işleminde vibratör kullanılmıyorsa açıkta kalan liflerin paslanarak yüzeyde kırmızı pas lekeleri meydana getirmesidir. Bu nedenle aşırı paslanmanın olabileceği ortamlarda ya da estetiğin göz önünde bulundurulduğu durumlarda galvanizlenmiş liflerin kullanılması daha uygundur. Isıya dayanıklı ve su ile doğrudan temas eden betonlarda ise paslanmaz çelik liflerin kullanılması tavsiye edilir. Bu liflerin teknik özellikleri diğerleri ile aynı olup, sadece korozyona karşı dirençlidirler [36].

3.2.2 Çelik Lif Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Çelik lif içeren betonlar normal betonlara oranla sağladıkları belirgin avantajlardan dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Bu kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir:

Tünellerin püskürtme beton kaplamalarında; çekme donatısı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilir. Kaplama kalınlığı, düz ve hasırlı olan beton kaplama kalınlıklarına oranla daha az olmaktadır. Kırılmaya karşı yüksek enerji yutma kapasitesinden dolayı daha büyük bir süneklik sağlar.

Yol kaplamalarında; havaalanı ve karayolu gibi yol kaplamalarında aşınma ve çekme dayanımının yüksek olmasından dolayı dayanımı ve dayanıklılığı yüksek beton elde edilir. Ayrıca plak kalınlığının daha az olmasına imkan verir.

Endüstri yapılarında; dayanıklılığı ve çarpma rijitliği yüksek olan endüstri yapılarının inşasına imkan verir. Ayrıca yük taşıma kapasitelerinin yüksek olması, çatlak kontrolü sağlaması, dinamik ve ani yüklemelere karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca ambar ve hangar zeminlerinde, iskele ve rıhtım kaplamaları gibi kullanım alanları da bulunmaktadır.

Su yapılarında; baraj, kanal, dinlendirme havuzu, dolu savak v.b. hidrolik yapıların plaklarının yerine kullanılabilir. Ayrıca aşınma direnci yüksek olduğundan kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak da kullanılabilir.

Şevlerin stabilizasyonu ve istinat duvarı yapımında; yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımında kullanılmaktadır.

Kabuk yapılarda; kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkan verdiğinden, ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır.

Depreme dayanıklı yapılarda; sünekliğin yüksek olması istenen yapılarda kullanılabilir. elik lif donatılı betonların sünekliği normal betonlara oranla yüksek olduğundan çarpma ve titreşim gibi dinamik yük etkilerine karşı daha dayanıklıdır [20].

3.2.3 elik Liflerin Beton İçindeki Davranışı

Lifsiz betonlarda çatlak yayılımı, ilk çatlak oluşumu için gerekli enerjinin yarısı kadar bir enerjiyle olurken, lifli betonlarda çatlak yayılımı için gerekli olan enerji ilk çatlak enerjisinden daha fazladır. Nihai yüke ulaşılp beton kırıldıktan sonra da lifler kırılan parçaları bir arada tutmaya devam eder. Hatta nihai yükten bir miktar daha fazlasını taşımaya devam eder [4].

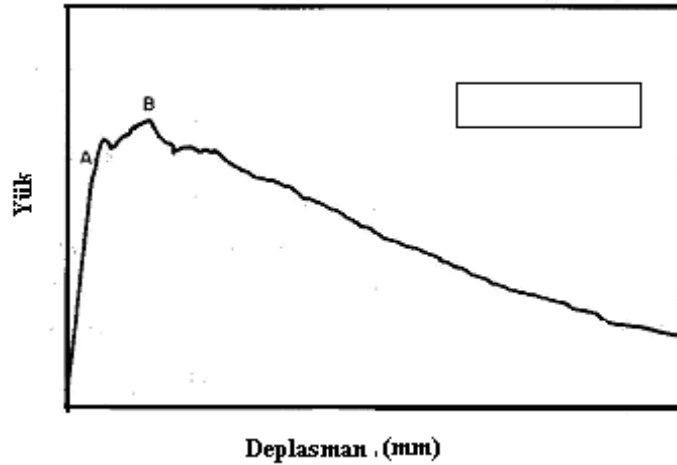
Lifsiz betonda kırılma sonrası yükün azalma hızı çok yüksek olup betonun yapabileceği maksimum deformasyon da çok azdır. elik liflerle güçlendirilmiş betonlarda ise maksimum gerilmeden sonra yükün davranışı lifsiz betona göre oldukça değişiktir. Maksimum gerilmeden sonra yükte hafif bir düşüş meydana gelir. Daha sonra meydana gelen gerilmenin bir kısmının lifler üzerinden taşınması nedeniyle betonun gerilme-deformasyon davranışında geleneksel betona göre farklılıklar yaşanır. elik lifli betonda yük tedrici olarak azalır. Dolayısıyla liflerin matristen ayrılması ve uzaması nedeniyle emilen enerji ya da başka bir deyişle meydana gelen deformasyon işi oldukça büyüktür [37].

Statik hesaplamalarda, homojen bir malzeme olarak elik lifler eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmemelidir. elik lifleri betonun yapısını değiştiren ve onu plastik davranışa zorlayan bir malzeme olarak görebiliriz [38].

3.2.4 elik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Yük Altındaki Davranışı

Şekil 3.7' de elik lifler ile takviye edilmiş bir betona ait yük- sehim eğrisi görülmektedir. Şekildeki eğriden de anlaşılacağı üzere elik liflerle güçlendirilmiş

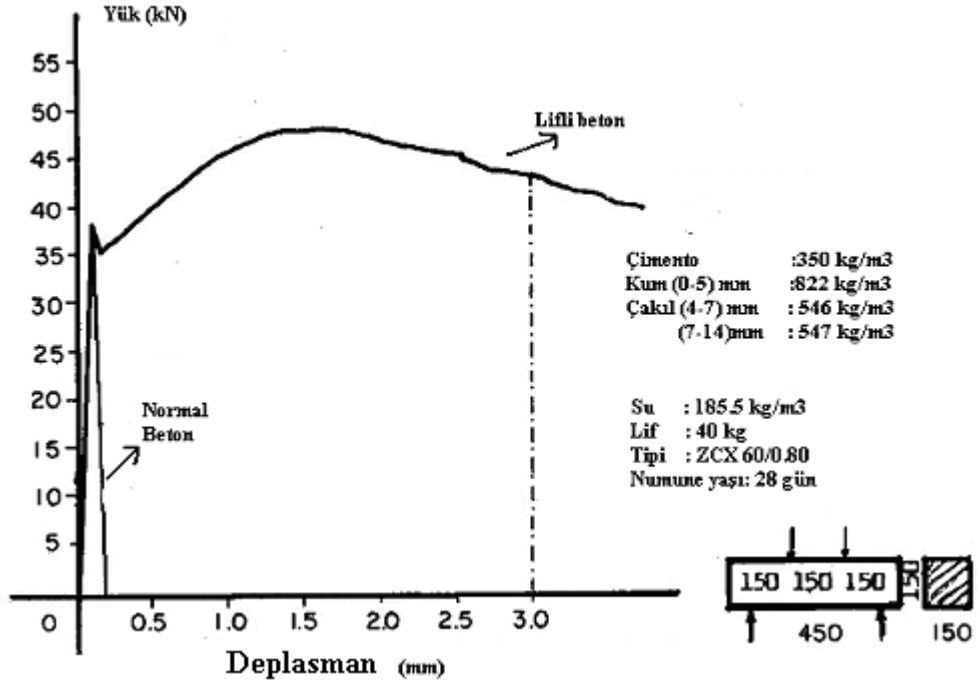
beton yüklendiği zaman yük – sehım eğrisi orijinden A noktasına kadar aşağı yukarı doğrusaldır. A noktasından sonra eğri doğrusallıktan önemli derecede sapar ve maksimum yükün bulunduğu B noktasına erişir. A noktası veya bu noktaya uygun düşen gerilme “ilk çatlama kuvveti”, “elastik limit” veya “orantılılık limiti” olarak adlandırılır. Gerilme B’ye eriştiğinde maksimum mukavemet olarak tanımlanır. İlk çatlak dayanımı, maksimum mukavemet ve yükün B noktasından sonraki azalma hızı önemli ölçüde betonda kullanılan liflerin miktarına, uzunluk / çap oranına, liflerin beton içerisindeki yönelimine ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Şekil 3.7’ den de görüleceği üzere çelik lifli betonda yükün P_{max} ’ dan sonraki azalma hızı çok düşüktür. Bu 3-4 mm deformasyona kadar P_{max} ’ in % 70-80’i kadardır [38,39].



Şekil 3. 7: Lifli betonun yük-sehım eğrisi [38]

Olayı daha iyi açıklamak istersek Şekil 3.8 incelendiğinde görüleceği üzere lifsiz betonun maksimum yükte kırılma sonrası gösterdiği yükün azalma hızı çok yüksek olup yapabileceği maksimum deformasyon da çok düşüktür [12]. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonda ise maksimum yükten sonra gerilmenin daha da arttığı görülecektir. Bu kullanılan çelik liflerin çekme dayanımının betonunkinden daha yüksek olması ile ilgilidir. Beton maksimum yükte kırıldıktan sonra kısa bir aralıkta ani olarak düşer, bu düşme matrisin dağılması ile ilgilidir. Bu düşmeden sonra matris üzerinden boşalan gerilme çelik lifler tarafından taşınır. Yani matristen çelik liflere

bir gerilme transfer söz konusudur. Çelik liflerin çekme dayanımlarının yüksek olması sonucu gerilme taşıma kapasiteleri daha fazla olup, yük altında sünek bir davranış gösterirler. Bu nedenle beton P_{max} 'dan sonra şekilden de görüleceği üzere belli bir deformasyon değerine kadar maksimum yükten daha fazla yük taşır.



Şekil 3.8: Çelik liflerle güçlendirilmiş beton ile lifsiz betonun yük-sehim davranışlarının karşılaştırılması [39].

Lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre çok yavaştır. Dolayısıyla liflerin matristen ayrılması ve uzamaları nedeniyle emilen enerji ya da başka bir deyişle meydana gelen deformasyon işi çelik lifli betonlarda oldukça büyüktür. Bu durum normal ve lifli betonlara ait yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanlar karşılaştırılarak da görülebilir.

3.2.5 Çelik Lif Takviyeli Betonların Mekanik Özellikleri

Çelik lifli betonların özellikle enerji yutma kapasiteleri, darbe ve yorulma dirençleri yüksektir. Bu lifler betondaki çatlakların genişlemesini durdurarak, çatlakta köprü oluşturur ve yükün bir kısmını çatlağa dik doğrultuda iletir. Lif takviye betonların bazı özelliklerde matris malzemesini özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir [1,3,5]

Tablo 3.2 : Liflerin betonun mekanik özelliklerine etkileri

Mekanik Özellikler	Artış (%)
Tokluk (Toughness)	100-1200
Darbe Dayanımı (İmpact Resistance)	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı (First Crack Resistance)	25-100
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	25-100
Nihai Eğilme Dayanımı (Ultimate Flexural Strength)	50-100
Yorulma Dayanımı (Fatigue Endurance)	50-100
Deformasyon Kapasitesi (Strain Capacity)	50-100
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	±25
Kavitasyon ve Erozyon Dayanımı (Cavitation and Erosion Resistance)	300
Elastisite Modülü (Modulus of Elasticity)	±25

3.2.5.1 Basınç Etkisindeki Davranış

Beton gevrek bir malzeme olduğu için basit mukavemet değerleri arasında en yüksek olanı basınç, en düşük olanı çekmedir. Basınç dayanımı betonun tüm pozitif nitelikleriyle paralellik gösterir. Yüksek basınç dayanımlı bir beton doludur, serttir,

su geçirmez, dış etkilere dayanır, aşınmaz. Çelik liflerin, betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çelik liflerin basınç dayanımı açısından önemli bir artışa neden olmadığı söylenebilir. Çelik lifler tarafından sağlanan dayanım artışı % 25'i nadiren geçer. Çeşitli lif tiplerinin artan kullanımıyla birlikte kompozite katılan lif miktarı genelde 60 kg/m^3 olur veya hacimce % 0.75'i geçmez. Bu miktarda katılan liflerin dayanıma etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Eğer katılan lif miktarı 120 kg/m^3 'ü geçerse her ne kadar çok dikkate değer olmasa da bir miktar artış beklenebilir [29].

Normal dayanımlı betonlar yüksek dayanımlı betonlardan daha az gevrektiler ve lif ilavesiyle daha da sünek davranış gösterir. Silis dumanı veya uçucu kül eklenmesi de gevrekliği biraz arttırır. Böylece yüksek dayanımlı betonları sünek hale getirmek için normal dayanımlı betonlara göre daha fazla çelik lif ilave etmek gerekmektedir. Çelik lif takviyeli kompozitler kullanılarak yapılan yapıların dizayn ve analizinde, bunların basınç altında nasıl davranacaklarını anlayabilmek için basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının bilinmesi gerekir. Bu davranış deneysel olarak saptanabileceği gibi ampirik formüllerle de tahmin edilebilir [1].

3.2.5.2 Eğilme Etkisindeki Davranış

Bütün durumlarda eğilme dayanımındaki artış, basınç ve yarmada çekme dayanımından fazladır. Lif miktarı ve narinliği bu artışta önemli rol oynar. Uzun lifler numune boyunca daha iyi yönlenecek daha fazla dayanım artışına neden olur. Belli lif tipinde daha yüksek narinlik oranına sahip olan lifler, dayanımı daha çok arttırır. Eğilme dayanımını etkileyen başlıca faktörler; lif tipi, lif geometrisi, lif miktarı, matrisin yapısı ve numunenin boyutudur [3].

Eğer lif miktarı azsa çatlaklar arasında köprü kurulması yeterli miktarda karşılanamayacağından çatlak oluşturmadan önce matris tarafından karşılanan yükün küçük bir kısmı karşılanabilir. Yüksek dayanımlı betonlara çelik lif eklenmesi hem ilk çatlak dayanımında hem de maksimum dayanımda artışa neden olmuştur. Yük-sehim eğrisinin maksimum yükten sonraki kısmı lif ilavesiyle değişmiştir. Bu eğrinin artış gösteren kısmı çok az değişikliğe uğramış, azalan kısmı ise daha az dik iniş

göstermiştir. Bu da bize malzemenin tokluğunun arttığını ve daha sünek bir davranış gösterdiğini belirtir. Lif ilavesi eğilme kapasitesini artırmıştır. Lifler yüklemenin her safhasında; ilk çatlaktan kırılmaya kadar sehime karşı gösterilen dirençte etkili olmuştur. Kısa lifler eğilme rijitliğini artırmada daha etkilidir. Çelik lifler çatakların sayısını ve boyutunun azaltmaktadır [29].

3.2.5.3 İşlenebilirlik

Beton içerisine çelik liflerin katılmasıyla işlenebilirlik özelliklerinde bazı değişiklikler gözlenir. Şimdiye kadar yapılan tüm çalışmalarda betona katılan çelik lif ilavesinin işlenebilirlikte önemli derecede azalmalara yol açtığını tespit edilmiştir. Bu azalma üzerindeki en önemli iki faktör, karışımdaki lif hacmi ve narinlik diye tanımlanan lifin uzunluk/çap oranıdır. Yine çalışmalar göstermiştir ki çelik lif ile güçlendirilmiş betonların işlenebilirliğinin ölçümünde slump yönteminin pek kullanılmadığını ve en uygun yöntemlerin ters çevrilmiş koni ve vebe yöntemleri olduğunu göstermektedir. Çelik lif miktarının beton içerisinde artması ile işlenebilirlikte azalmalar meydana gelmektedir. Ayrıca narinlik oranının artması da yani çelik lif performansının artması ile de işlenebilirlik zorlaşmaktadır. Çelik lif tipi ve geometrik şekli işlenebilirliği olumlu ya da olumsuz etkileyebilmektedir [19].

3.2.5.4 Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk)

Çelik lif donatılı betonların karakterize eden en önemli özelliklerden biri, onun tokluğudur, başka bir deyişle, enerji yutma kapasitesidir. Tokluk, beton içindeki çelik liflerin rolüne bağlıdır ve lifli betonların işlevselliği değerlendirilirken esas alınan bir parametredir. Bu özellik çelik lifli betonun lif miktarı, narinlik oranı, lif boyu, lif geometrisi ile yükleme hızı ve numune boyutları gibi faktörlerden etkilenir. Bu sözünü ettiğimiz, enerji yutma kapasitesinin ölçümü yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile bulunur. Betondaki lif içeriğinin artması, lif boyunun ve narinlik oranının büyümesi ile betonun tokluğu da artmaktadır [3].

3.2.5.5 Dayanım

Homojen dağılmış lif donatıya bağlı olarak etkili bir çatlak kontrolü, artan darbe, yorulma ve aşınma dayanımı sağlar. Tokluktan sonra çelik liflerin önemli derecede performans artışı sağladığı özellik betonların darbe dayanımlarıdır. Çelik lifler darbe aşınmasının neden olduğu mikro kırılma çatlaklarını kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını azaltmaktadır. Ayrıca çelik lifler beton kaplamaların yüzeylerinin pullanmasını önleyici etki yapmaktadır [29].

3.2.5.6 Rötire

Rötire hacimsel büzülme anlamına gelir. Betonda termik, plastik, kuruma ve karbonatlaşma olarak dört farklı rötire oluşumunun betonda değişik priz süreçlerinde farklı nedenlerle meydana gelen çatlakların artarak ve büyüyerek çoğalmasından kaynaklanır. Bu nedenle priz süreci ve daha sonraki süreçte ortaya çıkan çekme gerilmelerini beton matrisinde alabilecek ve gerilmeyi çatlak olmayan bölgelere aktarıp dağıtacak liflere ihtiyaç vardır. Kritik yapılarda ve güçlü büzülmelerin olabileceği yerlerde çelik lifler kullanılmaktadır. Lif miktarının, narinlik oranının ve lif uzunluğunun artması ile rötirede azalmalar meydana gelmektedir [3].

3.2.5.7 Dayanıklılık

Tutkallı demetler halinde bulunan çelik liflerin karışım esnasında tek tek tanelere ayrılamamasından çelik lifli betonlarda boşluk oranının artması sorunu vardır. Bu şekilde boşluklu betonlar geçirgenliği de olumsuz etkilemektedir. Geçirgenliğin artması da çelik lifin korozyona uğramasına ya da kimyasal reaksiyonlar sonucu bozulmaları arttırabilecektir. Lifli betonlarda iyi bir karışım, iyi yerleştirme, iyi bir sıkıştırma ve iyi bir bakım sonucu çelik lifli betonlarda dayanıklılık sorunu önlenebilecektir. Donma çözülme olayı fiziksel bir faktördür. Islanarak doygun hale gelen ve donma çözülme devirleri etkisi altında kalan tüm betonlar kısa sürede hasar görmektedir. Donma çözülme tekrarları karşısında, betondaki iç gerilmelerden dolayı, beton yüzeyindeki agregalar gevşeyip kopmakta, betonun içerisinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar zamanla daha büyük çatlaklara

dönüşmektedir. Şiddetli ortamda çok sayıda donma çözülme olayı, en iyi betonlarda bile kısa sürede büyük hasar meydana getirebilmektedir.

Çelik liflerin betonların donma-çözülme direncine etkisi önemli düzeyde değildir. Buna karşılık çelik lifler mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geciktirir. Buna bağlı olarak donma-çözülme esnasında betonun göçme ve hasar görmesini yavaşlatır. Göçme modundaki bu iyileşme çelik lifin çatlak köprüleme etkisine ve çatlak tutma becerisine bağlı olmaktadır. Dolayısıyla çelik lif donatılı betonların donma-çözülme etkisinde kütle kaybı normal betonlardakine benzer olmaktadır. Çelik lifler genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kavitasyon dirençlerini ise artırmaktadır [29].

3.3 Karma Lifli Betonlar

Beton karmaşık bir malzeme olup, çoklu faz içeren bir yapıdadır. Mikron boyutunda C-S-H jeli, milimetre boyutunda kum ve santimetre boyutunda iri agrega içeren bu malzemenin tek tip ve boyda lif kullanımıyla tüm fazlarında bir iyileşme beklenmesi mümkün değildir [19]. Betonun bu özelliği nedeniyle ve lif üretimindeki gelişmeler sayesinde farklı özellik ve boyutlarda liflerin üretilebilmesi buna eklendiğinde, bu liflerin kullanım alanlarında bir çeşitlilik meydana gelmiştir. Bu kullanım alanlarından birisi de karma lifli betonlardır [40].

Karma lifli beton, tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine betonun değişik özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla birden fazla tip ve boyutta lifin birlikte kullanılmasıyla elde edilen yeni çimento esaslı kompozit bir malzemedir [41]. Bu malzemenin üretimindeki amaç yük altında oluşan çatlakların mikro düzeyden başlayarak kontrol edilebilmesidir. Uzunluğu numune veya yapının boyutlarına göre çok küçük olan çatlaklara mikro, çok fazla küçük olmayanlara da makro çatlak denir. Bu şekildeki mikro, mezo ve makro çatlakların kontrolü için ise mikro, mezo ve makro boyuttaki liflerin kullanımı söz konusudur.

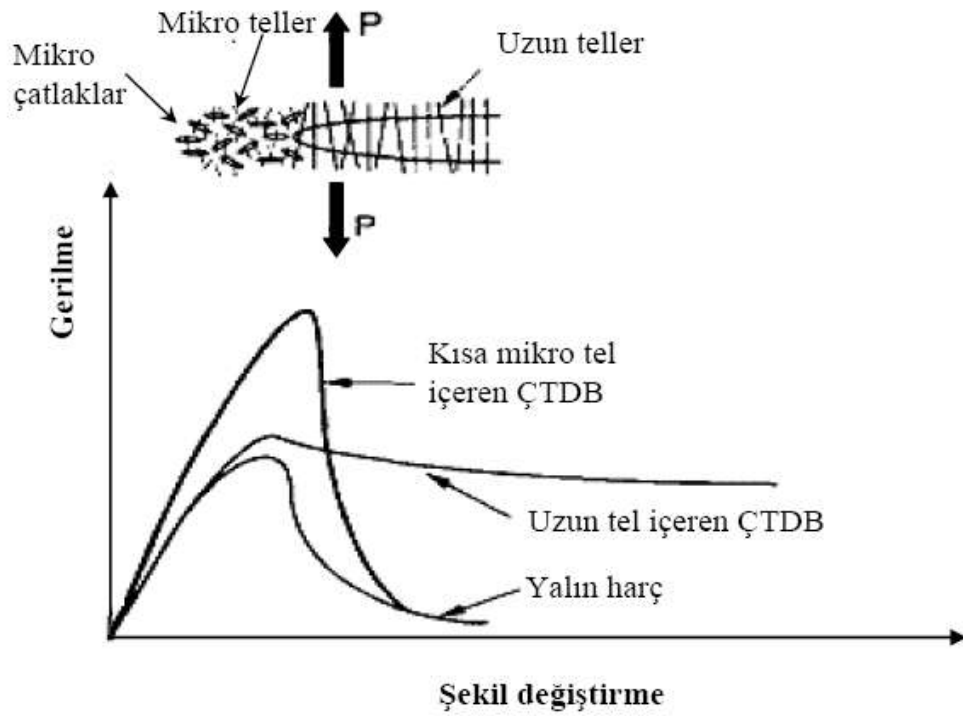
Mikro lifler;

- Boyutları nedeniyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluştururlar,
- Çatlakları makro düzeye gelmeden durdururlar,
- Elastik bölgedeki davranışı iyileştirirler.

Makro lifler ise;

- Elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını artırır,
- Makro düzeydeki çatlakları kontrol ederler,
- Maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirirler [41].

Matristeki çatlaklar mikro düzeyde başlar. Makro lifler, aralarındaki mesafenin fazla olması nedeniyle, mikro çatlaklar üzerinde etkili olamazlar. Bu liflerin etkili olabilmesi için, çatlakların gelişerek makro düzeye gelmiş olması gerekmektedir [42]. Oysa mikro lifler, çatlaklar mikro düzeydeyken arada köprü görevi görerek çatlakları durdururlar. Mikro lifler matrisin hemen hemen her bölgesine yayılabilecek kadar küçük boyutta olduklarından, makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki küçük çatlakların başlamasını ve gelişimini kontrol edebilirler. Çatlaklar açıldıktan sonra küçük boyutları nedeniyle matristen sıyrılırlar. Bu nedenle, tepe yükü sonrasındaki davranışta pek etkili değildirler. Tepe yükü sonrası davranışta ise makro lifler etkilidir. Farklı tel boyutlarının, çatlak köprülenmesindeki etkisi Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9: Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi [42].

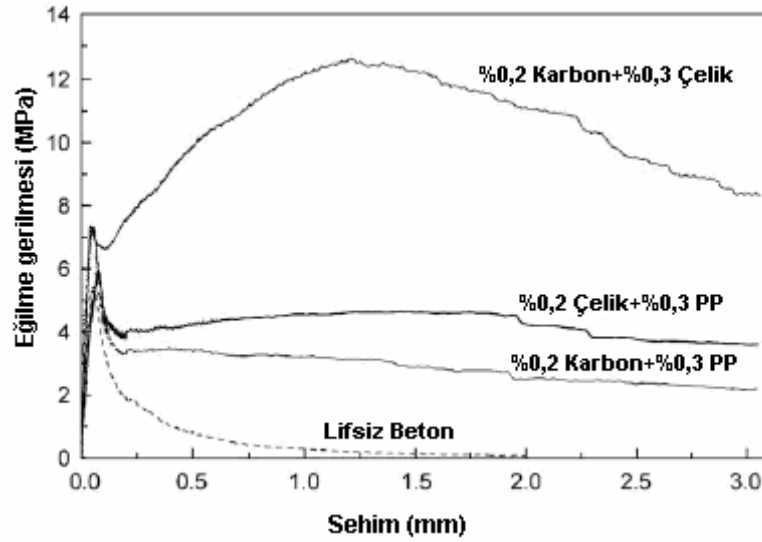
Karma lifli betonların kullanım alanlarına bakıldığında;

1. Hasarlı binaların güçlendirilmesinde,
2. Kesiti küçük taşıyıcı elemanların inşasında,
3. Zımbalamaya karşı kolon başlarının güçlendirilmesinde,
4. Zararlı radyoaktif ve endüstriyel atıkların çatlaksız ve durabilitesi yüksek elemanlarda saklanması,
5. Sünek davranış gerektiren yapı taşıyıcı elemanları bileşim bölgelerinde,
6. Prekast çatı kaplama elemanı yapımında,
7. Çarpma ve aşınmaya karşı dayanım gerektiren bölgelerde kullanılabilir [41].

Karma lifli betonlarla ilgili yapılmış çalışmalar incelendiğinde Ekincioglu [26] tarafından üretilen ve dayanım, süneklik ve tokluğun artırılması amacıyla çelik ve polipropilen liflerin bir arada kullanıldığı karma lifli betonlarda, polipropilen lif hacmi %0,05 olarak, çelik lif hacmi ise %3 olarak sabit tutulmuştur. Kullanılan çelik lifler düz şekilli kısa kesilmiş çelik lifler ve iki çeşit kanca uçlu çelik lifler olmak üzere üç çeşittir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında; betona hacimce %3 oranında çelik lif eklenmesi başta kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı olmak üzere, basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımlarında da artışa neden olmuştur. Yüksek performanslı betonlarda önemli bir sorun olan gevreklik, çelik liflerin kullanılmasıyla ortadan kalkmıştır. Kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı makro lif içeriğindeki artışla artmakta, mezo lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. En yüksek kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı değerleri narinliği ve boyu en büyük lif ile üretilen numuneden elde edilirken, en düşük değerler narinliği ve boyu en küçük lifi yüksek oranda içeren numunelerden elde edilmiştir. Boyut ve narinlikleri farklı olan çelik liflerin kullanılması, betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde farklı oranlarda katkıda bulunmaktadır.

Yao ve arkadaşları [43] tarafından yapılan çalışmada, üç farklı tip karma lifli betonun basınç, yarmada çekme ve eğilme özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Kullanılan lif hacim oranı %0,5 olarak sabit tutulmuş, polipropilen ve karbon, karbon ve çelik, çelik ve polipropilen lifleri içeren üç farklı tipte karma lifli beton üretilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için, her bir lif çeşidini tekil

olarak içeren ve lif içermeyen numuneler de üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında; liflerin karma formda kullanılması kompozitin performansını, tekil lif kullanılması durumuna göre iyileştirmektedir. Bu çalışmada elde edilen eğilme gerilmesi-sehim grafiğine bakıldığında (Şekil 3.10), üretilen ve deneye tabi tutulan üç tip karma lifli betonun içinde en büyük dayanımı ve eğilme tokluğunu veren numunenin karbon ve çelik liflerin bir arada kullanıldığı numune olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise çelik ve karbon liflerin birbirine yakın elastisite modüllerine sahip olması ve aralarındaki pozitif etkileşimdir.



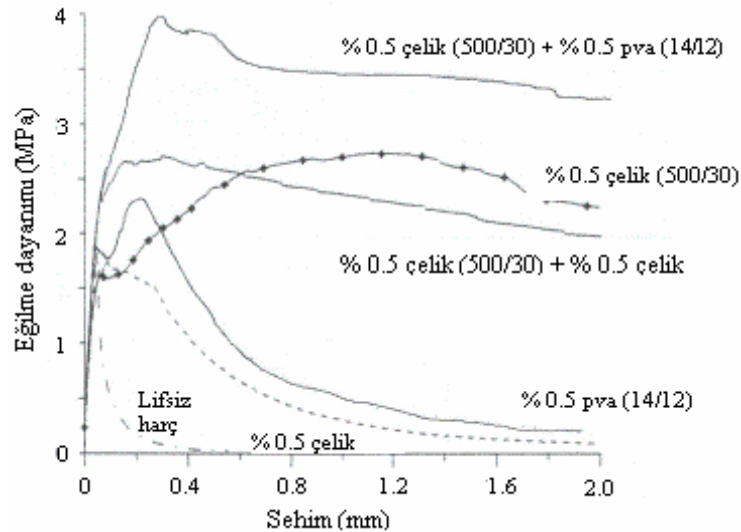
Şekil 3.10: Karma lifli betonarme kirişlerin eğilme gerilmesi-sehim eğrileri [43].

Qian ve Stroeven [44], yaptıkları çalışmada üç tip çelik lif ile polipropilen lifi bir arada kullanmışlardır. Lif oranı beton hacminin %0'ı ile %0,95'i arasında değişmektedir. Çelik liflerden kancalı olanlar 0,3 mm çapında, 40 mm (SF1) ve 30 mm (SF2) olmak üzere iki boyda, düz olanlar ise 0,1 mm çapında ve 6 mm (SF3) uzunluğunda kullanılmıştır. Polipropilen liflerin (PP) boyu 12 mm, çapı ise 0,018 mm'dir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara bakıldığında; SF1 ve PP liflerinin birlikte kullanıldığı karma lifli betonlarda, küçük şekil değiştirmelerde yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış olduğu görülmüştür. SF3 liflerinin bu artıştaki etkisi azdır. SF1 lifleri büyük şekil değiştirmeler sırasındaki enerji yutma kapasitesi açısından en etkili lifler olup, bu lifleri SF3 ve PP lifleri takip etmektedir. Küçük şekil değiştirmeler sırasında SF1 ve PP lifleri arasında yük taşıma kapasitesi ve

kırılma tokluğu bakımından olumlu bir etkileşim vardır. Ancak bu etki, şekil değiştirmeler arttıkça kaybolmaktadır. Küçük şekil değiştirmelerde, toplam lif hacminin artmasıyla beraber, PP liflerin yayılmasından dolayı bu liflerin etkisi azalmaktadır. Üç tip çelik lif içinden en iyisi SF1 lifleridir. Bunun nedeni, SF1 liflerinin kancalı ve yüksek narinliğe sahip olmalarıdır.

Qian ve Stroeven [45] yaptıkları bir başka çalışmada, lif boyunun, lif içeriğinin ve uçucu kül içeriğinin karma lifli betondaki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda; uçucu kül gibi ince malzemelerin ultra incelikteki polipropilen liflerin kullanıldığı karma lifli betonların üretiminde kullanılması, lif dağılımı için gereklidir. Farklı boyutta çelik liflerin kullanılması, betonun farklı mekanik özelliklerine, farklı derecelerde etki etmektedir. Kısa liflerin betona eklenmesi, basınç dayanımına oldukça önemli bir katkıda bulunurken, yarmada çekme dayanımını çok az etkilemektedir.

Lawler ve arkadaşları [46], polivinil alkol lifler ile çelik lifleri birarada kullanarak yaptıkları çalışmada, betonun kırılma sürecini izlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda elde edilen eğilme dayanımı-sehim ilişkileri (Şekil 3.11) birlikte incelendiğinde, karma lifli betonların birçok küçük boyutlu çatlak oluşturmak suretiyle, daha fazla enerji yutarak kırıldıkları görülmektedir.



Şekil 3.11: Farklı tip ve miktarlarda lif içeren betonlarda eğilme dayanımı-sehim ilişkileri [46].

Karma lifli betonlarla ilgili yapılan bir başka çalışmada, Komlos ve arkadaşları [47], polipropilen ve çelik lifleri kullanarak, toplam lif hacmi %1 olacak şekilde üç farklı karışım hazırlamışlardır. Polipropilen lif hacmi %0.2, %0.3 ve %0.5 olarak değiştirken, çelik lif hacmi sırasıyla %0.8, %0.7 ve %0.5 olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde, optimum lif içeriğinin, kullanılan karışımın kompozisyonundan ve üretim işlemlerinden etkilendiği görülmüştür. Malzemenin statik ve dinamik yükleme altındaki çatlak sonrası davranışı, lif dağılımına ve numunenin kritik kesitindeki lif sayısına bağlıdır. Ayrıca, polipropilen lif oranındaki artışla beraber, kırılma ve darbe enerjilerinde, tokluk ve süneklik değerlerinde artış görülürken, basınç dayanım değerlerinde bir düşme olmuştur.

Kim ve arkadaşlarının [48] karma lifli betonlarda çatlak ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yaptıkları çalışmada, 30 mm lik çelik liflere, 6 ve 12 mm lik çelik ve polipropilen lifler ayrı ayrı eklenmiştir. Bu çalışmada deneyler, ısı çatlamlarının önemli olduğu erken yaşlarda yani 2, 3 ve 5 günlük numunelerde yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre; mikro, makro ve karma lifli beton numunelerinden elde edilen yük sehim eğrileri incelendiğinde, tek başına mikro lif kullanımı ilk çatlak dayanımını artırmaktadır. Tek başına makro lif kullanımı betonun kırılma tokluğunu iyileştirmektedir. Liflerin uygun tip ve hacimde kombinasyonu ile elde edilen karma lifli betonlarda ise daha yüksek performansın ve daha yüksek çatlak dayanımının elde edilmesi mümkündür. Ayrıca, şekil değiştirme enerjisi salınım oranlarının hesaplanması ve değerlendirilmesi sonucu, betonda sıcaklık etkisiyle oluşan gerilmeler nedeniyle ortaya çıkan çatlakların, karma lif kullanımı ile kontrol edilebileceği görülmüştür. Bir başka sonuç ise optimum lif hacim oranının lif tipine bağlı olduğu ve bu oranın çelik liflerde %0.1-2.5 aralığında bir değer alırken, polipropilen liflerde %0.3'tür. Polipropilen liflerin hacim oranı %0.3 değerini aştığında, betonun mekanik özelliklerinde bir düşüş görülmüştür.

Banthia ve Nandakumar [49], lif tipinin ve kombinasyonlarının, çatlak genişlemesine karşı dayanıma etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, iki tip çelik ve iki tip polipropilen lifin çeşitli kombinasyonlarını kullanmışlardır. Çelik lifler kıvrımlı ve sonları yassılaştırılmış liflerden oluşmakta iken, polipropilen lifler ise monofilament ve lif topluluğu şeklindedir. Kıvrımlı ve sonları yassılaştırılmış lifleri

içeren betonların davranışlarının birbirinden oldukça farklı olduğu görülmüştür. Kıvrımlı çelik lifleri içeren betonların yük-CMOD eğrilerinde bir sertleşme bölgesi görülürken, diğerinde tepe noktasına kadar artış, daha sonra ani düşüş görülmüştür. Bu her iki tip çelik life, düşük oranlarda dahi olsa polipropilen lif eklenmesi, performansı artırmakta, çatlak oluşum ve gelişimine daha fazla direnç sağlamaktadır. Bu konuda monofilament şeklindeki polipropilen liflerin daha etkili olduğu görülmüştür.

Sato ve arkadaşları [50], uzun ve kısa çelik liflerin bir arada kullanıldığı karma lifli betonların basınç ve çekme dayanımlarının belirlenmesi için çeşitli deneyler yapmışlardır. Kısa lif olarak 6,13 ve 20 mm uzunluğundaki düz lifler, uzun lif olarak ise 30 mm uzunluğunda kancalı lifler kullanılmıştır. Kısa lif yüzdesi %0 ile %6 arasında, uzun lif yüzdesi ise %0 ile %2 arasında değişmektedir. Lif yüzdesinin artmasıyla beraber kompozitlerin basınç ve çekme dayanımlarının arttığı ve bu dayanım değerlerinin lifin narinlik oranı ile hacim yüzdesinin bir fonksiyonu olduğu, yapılan çalışmalardan görülmüştür. Ayrıca, uzun lif miktarının artmasının süneklik için kısa liflerden daha iyi olduğu ve uzun lif miktarının, çekme gerilmesi-çatlak açılımı eğrisinde yumuşama rejiminin şeklini büyük ölçüde etkilediği sonuçları da bu çalışmadan elde edilmiştir.

Banthia ve arkadaşları [51], makro ve mikro çelik liflerin birarada kullanımını araştırdıkları çalışmalarında, 40 kg/m^3 sabit dozajında, üç tip makro çelik lif ile %1 ve %2 dozaj oranlarında mikro lifi kullanarak karma lifli betonlar üretmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, bu kompozitlerin sadece basınçta değil eğilme sırasında da büyük dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip oldukları görülmüştür. Çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere, mikro ve makro çelik liflerin karma kombinasyonları ile çok yüksek performanslı çimento esaslı kompozitler üretmenin mümkün olduğu da gösterilmiştir.

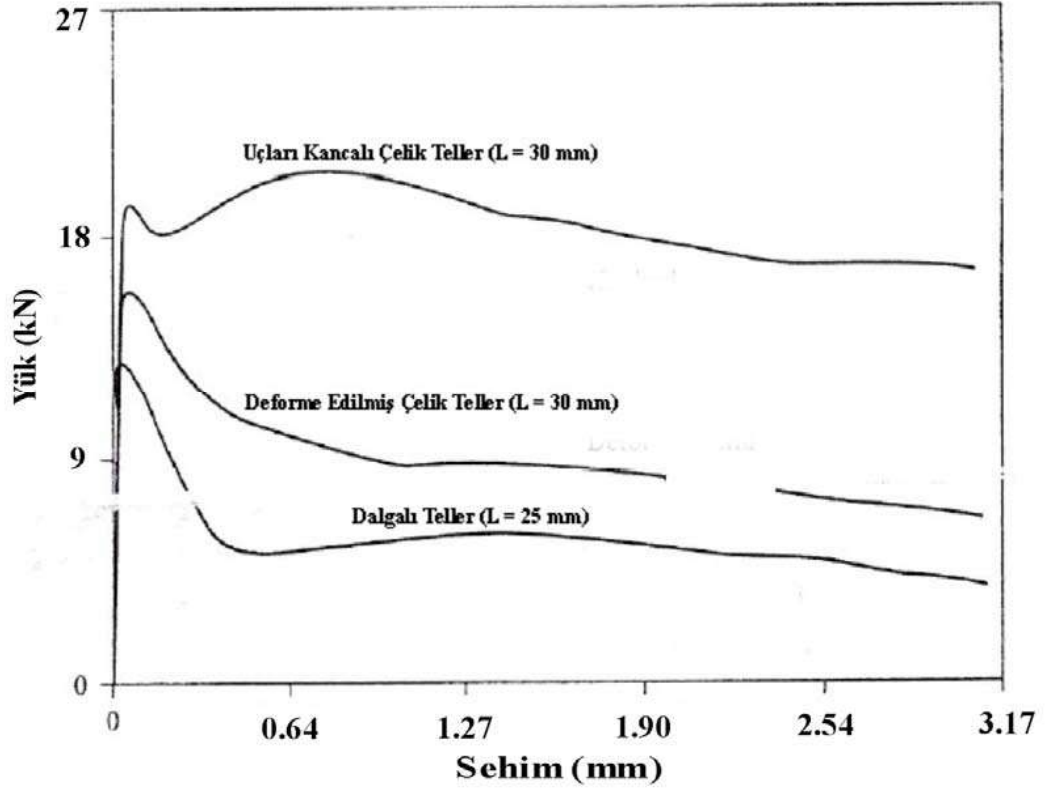
4.LİFLİ BETONUN ÖZELLİKLERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER

4.1 Lif Özelliklerinin Kompozitin Özelliklerine Etkisi

Lif takviyeli kompozitlerin performansı; kullanılan liflerin geometrisi, boyu, karışımda kullanılan yüzdesi, narinlik adı verilen boy/çap oranı, hangi maddeden üretildiği ve üretim teknikleri gibi özelliklere bağlıdır. Bu yüzden lif takviyeli kompozitler üretilirken bu özelliklerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

4.1.1 Lif Geometrisinin Etkisi

Günümüzde artık, geleneksel düz yuvarlak kesitli, çekme liflerden kesilmiş lifler yerine çok çeşitli tiplerde lifler üretilmektedir. Özellikle çelik lifler pek çok değişik şekillerde üretilmektedir. Çelik liflerin farklı geometrilerde üretilmesindeki amaç matris ve lif arasındaki mekanik bağı kuvvetlendirerek liflerin etkinliğini artırmaktır. Taze beton karışımında liflerin topaklanması ve liflerin varlığından dolayı işlenebilirliğin azalması, özellikle yüksek oranda lif içeren karışımlarda sorun yaratır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, suda eriyebilen ya da mekanik etkiler ile kopabilen bir yapıştırıcı ile 10-30 adet lifin birbirine yapıştırılması yoluna gidilmiştir. Böylece işlenebilirlik artar ve liflerin topaklanması önlenir. Farklı lif geometrine betonların yük sehim eğrileri şekil 4.1'de gösterilmiştir.

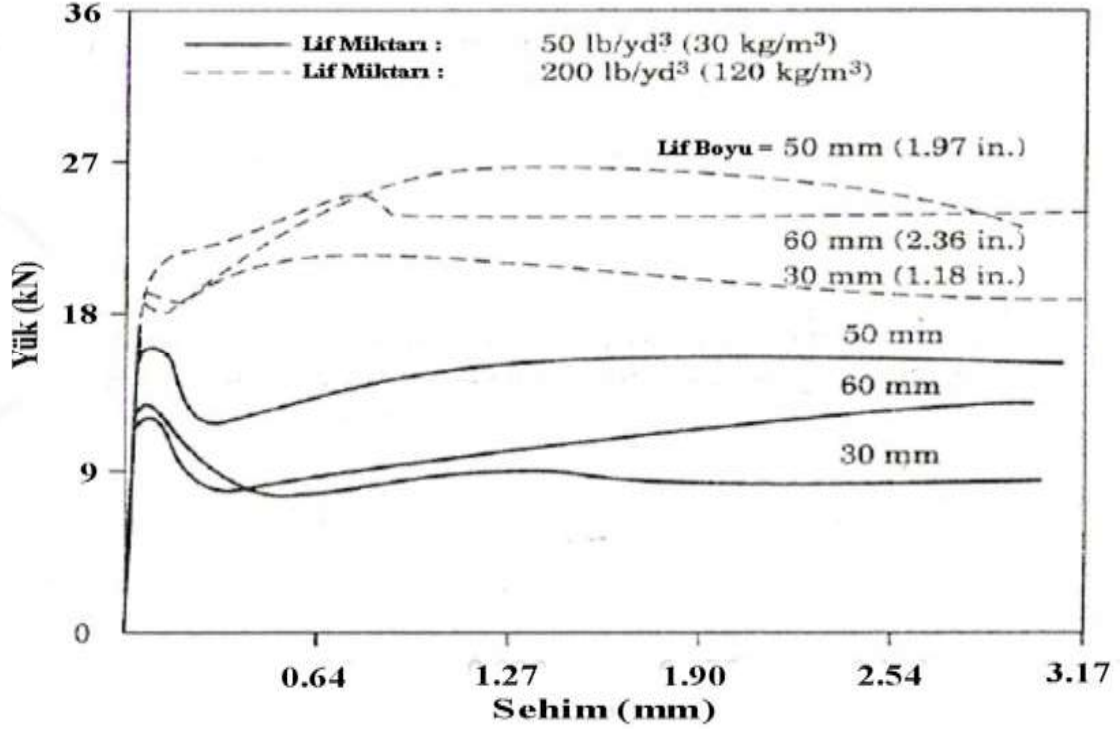


Şekil 4.1: Lif geometrisinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi [52].

4.1.2 Lif Boyunun Etkisi

Kompozitin özelliklerini geliştirmekte lifin şekli kadar boyu da önemlidir. Çimento esaslı kompozitlerde uygulanan, lif yüzdesi sabit tutularak fakat lif boyu uzun seçilerek yapılan deneylerde çekme dayanımında sağlanan artışın fazla olmadığı gözlenmiştir. Bunun sebebi büyük olasılıkla, mikro çatlak bölgesindeki matris kırılmasının önlenemediği olgusuna dayanmaktadır. Uzun lifler mikro çatlaklar bölgesinden uzakta iseler oluşan mikro çatlakları önleyemezler; ancak mikro çatlaklar makro çatlaklara dönüşürse uzun lifler işlev görmeye başlar ve kompozitin tokluğunu artırır. Buna karşılık kısa lifler mikro çatlaklar arasında köprü görevi görürler; bunlar aynı hacimsel yüzde kullanıldıkları durumlarda dahi birbirine daha yakın mesafede olacaklardır. Kısa lifler çekme dayanımını çok artırır. Buna karşılık aynı narinlik oranında kısa liflerin sıyırılması, makro çatlaklar oluşmaya başladıktan sonra kolaylaşır ve böylece $\sigma - \epsilon$ eğrisinde maksimum

değerinden sonraki davranışı süneklik göstermez [5]. Şekil 4.2’de farklı lif boyunun eğilme dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Lif boyunun eğilme dayanımı üzerindeki etkisi [52].

4.1.3 Lif Narinlik Oranı ve Lif Yüzdesinin Etkileri

Lif narinlik oranı ve karışıma katılan lif miktarı betonun işlenebilirliğini dolayısıyla da mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Narinlik oranı, lifleri tanımlayan en önemli parametrelerden biridir. Lif uzunluğunun yuvarlak kesitli lifler için çapa (l/d), yuvarlak olmayanlar içinse eşdeğer çapa (l/d_c) bölünmesiyle bulunur. Bu oran 40 ila 1000 arasında değişir ama genelde 300’ den daha düşüktür [52]. Karışıma eklenen liflerin narinlik oranlarının büyük olması durumunda taze betonun işlenebilirliğini azalttığını belirtmişlerdir. Lif içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma ve yerleştirme problemleri ortaya çıkar ve lifler karışım içerisinde topaklanır. Bu topaklanmalar matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Karışımda iri taneli agrega kullanılmaması, lif narinlik oranının optimum bir

değerde olması, liflerin karışıma kuru katılması ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması ile liflerin matris içerisinde homojen dağılması sağlanabilir [15].

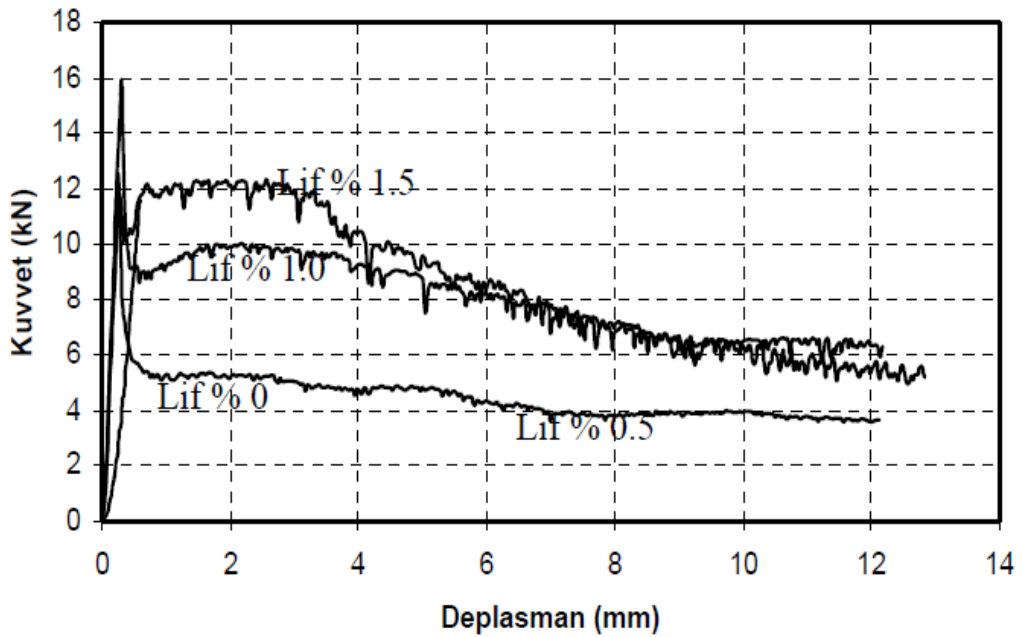
Lifler teorik olarak betona ne kadar çok katılabilirse kompozitin özelliklerini de o kadar çok artırabilirler, çünkü daha fazla lif çatlakların büyümesine karşı daha fazla direnç demektir. Lifler sayesinde tek çatlağın yayılması yerine düzensiz çoklu çatlaklar oluşur. Uygulamalarda yerleştirme problemlerinden dolayı kompozite hacimce %3'ten daha fazla oranda lif katılmasına pek rastlanmaz, genelde de bu oran %1-2 civarında tutulur. Fakat son yıllarda yeni yöntemlerle bu oranın yükseltilebilmesi mümkün olmuştur. Örneğin ekstrüzyon yöntemi adı verilen yöntemle %7-8 civarında lif katılması mümkünken SIFCON üretiminde bu oran %4 ila 20 arasında mümkün olabilmektedir [28]. Genel olarak lifli betonları lif miktarına göre şu şekilde değerlendirilir.

%0.1-%1: Düşük lif yüzdeli

%1 - %3 : Normal lif yüzdeli

%3-%12 : Yüksek lif yüzdeli

Şekil 4.3' de farklı lif yüzdesine sahip lifli betonların eğilme dayanımı üzerindeki etkileri gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Lif yüzdesinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri [53].

4.1.4 Lif Tipinin Etkisi

TS 10513 'de [35] lif özellikleri ile ilgili 16 °C'nin üzerindeki ortamda 3.18 mm.lik bir iç çap çevresinde eğilme etkisinde liflerin % 90'nının kırılmaksızın 90° eğilme kabiliyeti gösterebilmesi şartı aranır. Bu özellikler betonda kullanılan liflerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir mukavemet ile davranabilmesine imkân sağlayacağı vurgulanmaktadır. Ayrıca beton bileşimine katılan liflerin çeşidi ne olursa olsun liflerin homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonrada bozulmaması gerekmektedir. Lifler, sertleşen betonun her yanına üniform olarak dağılmalıdır. Ayrıca beton yerleştirildikten sonra liflerin dönmemesi ve belirli bölgelerde toplanmalarını istenir. Genellikle cam ve çelik lifli beton karışımında topaklanma, bir yönde dizilme görülmektedir. Bu durumun liflerin beton karışımına kuru olarak katılması halinde en aza indirilebileceği söylenmektedir [3]. Liflerin bu özellikleri TS 10515 [54] (Çelik Tel Takviyeli Betonların Eğilme Deney Metodu) standartına uygun deneyin yapılması için şart koyulmuştur.

4.2 Lifli Betonda Matris Etkisi

Lifli beton literatüründe matris olarak tanımlanan yapı lifin etrafını saran malzemelerdir. Kısacası, çimento hamuru matris diye tanımlanır. Lifli beton kompozitlerinde matrisin fonksiyonu lifleri bir arada tutmak, liflerin gerilme transferini sağlamaktır. Matris ve lif arasındaki etkileşim çimento esaslı lifli kompozit malzemelerin performansını etkileyen temel özelliktir. Bu etkileşimi anlayabilmek için lif katkısını ve kompozit davranışını belirlemeye gerek vardır. Çok sayıda araştırmacı bu etkileşim üzerinde çalışmıştır. Çeşitli faktörler bununla ilgilidir. Matris ve lif arasındaki etkileşimi etkileyen temel özellikler şu şekildedir:

-Matrisin niteliği,

-Matrisin elastisite modülüne göre lif elastisite modülünün karşılaştırılması

-Yükleme hızı,

Bu parametreler arasında var olan etkileşimleri karşılayan, kullanılabilir teorik modeller sınırlıdır. Lifli betonların üretiminde, şimdiye kadar yapılan çalışmaların çoğunda portland ya da katkıli portland çimentosu kullanılmıştır.

Matrisin nitelikli olmasını sağlamak üzere lifli beton karışımlarının su/çimento oranları 0.55 den küçük olacak şekilde karışımlar hazırlanarak betonun çimento dozajı minimum 300 kg/m^3 tutulmuştur. Yine bu amaçla yapılan çalışmalarda matrisi güçlendirmek amacı ile betonda silika kullanılmaktadır [55].

4.2.1 Homojen Çatlamamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim

Bu tip etkileşim yüklemelerin başlangıcında hemen hemen tüm kompozitlerde görülür. Bununla birlikte çoğu zaman matris, servis ömrü süresinde çatlayabilir. Çatlamamış matris ile lif etkileşimi bu yüzden pratik uygulamalarda sınırlayıcı bir durumdur. Bu etkileşimin sonucu, kompozitin tüm davranışını anlamak olasıdır. Ayrıca, çatlaklar kompozit içinde geliştiğinde dahi, yapının tüm özelliklerini etkiler [28]. Yüklenmemiş durumda, matris ve lifin her ikisinde de gerilmeler sıfır kabul edilir. Kompozite çekme veya basınç gerilmelerinin uygulanması veya kompoziti sıcaklık değişimlerine maruz bırakmak birbiriyle uyumlu gelişen gerilme ve şekil değiştirmeler oluşturur. Çimento matrisinde, çimentonun hidratasyonu gerilmeleri hem matris hem de lifte düşürür. Matrise yük uygulandığı zaman, yükün bir kısmı liflere yüzeyi boyunca etkir. Lif ve matris arasındaki elastisite modülü farklarından dolayı lif yüzeyi boyunca kayma gerilmeleri gelişir. Bu kayma gerilmesi uygulanan yükün bir kısmının liflere iletilmesine yardımcı olur. Eğer lif matristen daha sağlam bir yapıdaysa lifteki ve etrafındaki deformasyon daha küçük olur. Bu tip durum çelik ve mineral liflerle ortaya çıkar. Eğer lifin elastisite modülü matrisinkinden daha küçük ise lif çevresindeki deformasyon daha fazla olur. Bu durum polimer veya bazı doğal lifler içeren kompozitlerde meydana gelir.

Pratikte lifler en azından iki doğrultuda rastgele dağılır. Lif takviyeli kompozitlerde lifler üç doğrultuda da rastgele dağılır. Ayrıca çelik liflerin çoğu ve polimer liflerin bazıları yüzeylerinden veya uçlarından deforme edilmişlerdir. Hemen hemen tüm durumlarda lifler arasında olan etkileşim problemi daha da karmaşık bir hale sokar. Bu yüzden, pratik uygulamalarda kullanılan matematiksel modeller hala gelişim aşamasındadır. Kompozit davranışına bağlı olarak lifler kompozitin hem dayanımına hem de elastisite modülüne etkir. İçerik ve katkısı; lif tipi, lif yüzdesi ve matrisin özelliklerine bağlıdır. Örneğin %10 çelik lif içeren bir kompozitten beş kat

daha fazla bir dayanım elde edilir, eğer lif yüzdesi % 2'nin altında ise ihmal edilebilecek kadar az bir artış elde edilir [3].

4.2.2 Çatlamış Matris İle Lif Arasındaki Etkileşim

Çekme gerilmelerine maruz bırakılan lif takviyeli kompozitlerde gerilmeler belli bir değere ulaşıncaya matris çatlaklar. Matris çatlayınca lifler çatlak boyunca matrisin bir tarafından diğer tarafa yükü taşır. Pratikte çeşitli lifler çatlaklar arasında köprü kurarak yükü çatlak boyunca iletir. Eğer lifler yeterli yükü çatlak boyunca iletirse birçok çatlak numune boyunca bu şekilde tutulur. Yüklemenin bu aşaması çoklu çatlama safhası olarak tanımlanır. Çoğu uygulamada bu çoklu çatlama safhası servis yükleri altında meydana gelir. Yük-kayma değişimi, liflerin tipinin ve dağılımının etkisi, tek liflerin sıyrılma dayanımının nasıl hesaplanacağı ve rastgele dağılmış liflerin etkileşimi ile ilgili pek çok araştırmalar yapılmıştır böylece çok sayıda lifin davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Tek ve çok sayıda lifin sıyrılmasını belirtmek için çeşitli deneysel teknikler kullanılmıştır [28].

5. MALZEME VE METOD

5.1 Kullanılan Malzemeler

5.1.1 Agregalar

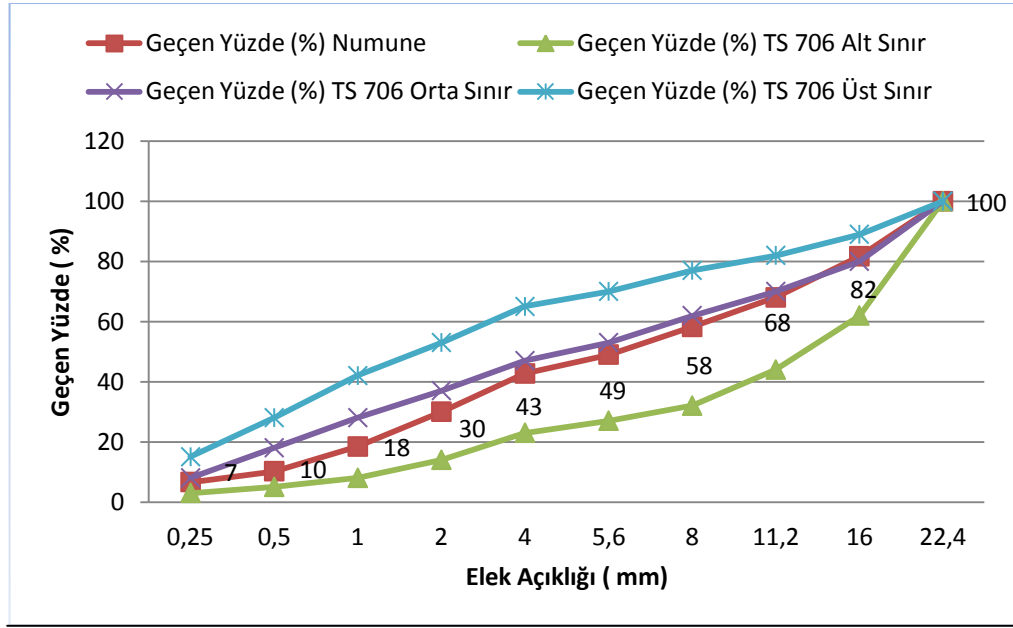
Deneylerde kullanılan agregalar Burhaniye’de faaliyet gösteren bir hazır beton tesisinden elde edilmiş olup, Tablo 5.1’de agregaların fiziksel özellikleri verilmiştir. 0-3 mm (doğal kum), 0-5 mm (kırmataş tozu), 4-11.2 mm ve 11.2-22.4 mm’lik (kırmataş) kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 22.4 mm’dir. TS 802 [56]’e göre karışım hesabı yapılmıştır. TS EN 933-1:2012 [57]’e göre elek analizleri, TS EN 1097-6 [58]’a göre yoğunluk sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 5.1: Kullanılan agregaların önemli özellikleri.

Agrega Cinsi	Yoğunluk (kg/m ³)	Su Emme (%)
0-3 mm (doğal kum)	2,627	1,182
0-5 mm (kırmataş tozu)	2,629	1,004
4-11.2 mm (kırmataş)	2,658	0,604
11.2-22.4 mm (kırmataş)	2,687	0,301

Granülometri bileşimi, agregalar içinde boyutları belirli limitler içinde kalan tanelerin ne olduğunu açıklar. Bu amaçla, kullanılmadan önce agreganın granülometrik bileşiminin elek analizi deneyi ile saptanıp, belirli sınırlar içinde kalıp kalmadığı kontrol edilmelidir. Bir agregalar tanesinin geçebileceği en küçük eleğin delik çapı ve kenar uzunluğu o tanenin çapı olarak adlandırılır. Karışımda kullanılacak agregaların granülometrisi, başka bir deyişle tane boyutu dağılımı, işlenebilir bir beton için gerekli olan çimento hamuru ihtiyacının belirlenmesi açısından önemli bir karakteristiktir.

Elek analizi sonuçları ile çizilen granülometri eğrisinde numunelerin granülometri eğrisi TS 706 EN 12620+A1 'da yer alan orta sınır olan B32 eğrisine çok yakın bir davranış göstermiştir. Elek analizi sonuçlarıyla şekil 5.1'de granülometri eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 5.1: Beton karışımlarında kullanılan agregaların granülometri eğrileri

5.1.2 Çimento

Beton karışımlarında PKÇ 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. TS EN 197-1'e [60] göre çimento fabrikası laboratuvarında yapılan deney sonuçlarına göre çimento özelliklerinin belirtilen standart değerlere uygun olduğu görülmüştür. Çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2: Çimentonun kimyasal özellikleri

Bileşik Adı	% (Elde Edilen Değerler)	% (TS EN 197-1) Max
Kızdırma Kaybı	2,83	5,00
Çözünmeyen Kalıntı	0,26	1,50
SO ₃	2,74	3,50
Cl ⁻	0,01	0,10
SiO ₂	19,30	
Al ₂ O ₃	3,96	
Fe ₂ O ₃	3,34	
CaO	62,95	
MgO	2,89	5,00
Serbest CaO	1,24	

PKÇ 42.5 R çimentosundaki PKÇ, Portland Kompoze 42.5 N/mm² dayanıma sahip olduğunu ve R harfi de erken dayanımı yüksek çimentoyu ifade etmektedir. Çimentonun fiziksel özellikleri Tablo 5.3'de de verilmiştir.

Tablo 5.3: Çimentonun fiziksel özellikleri

Özellikler	Mevcut Değerler	TS EN 197-1 'e göre En az	TS EN 197-1 'e göre En çok
Priz Başlama Süresi (dakika)	170	70	
Priz sonu (dakika)	208		
Hacim Genleşme mm	1,00		10
Blaine Özgül Yüzey	3386		
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,11		
7 günlük basınç day. (MPa)	37,31		
28 gün. bas. day. (MPa)	53,3	42,5	62,5

5.1.3 Beton Katkı Maddesi

Hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri

Beton numune üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi, modifiye edilmiş polikarboksilik eter esaslıdır. Amber renklidir. 1.011 kg/l yoğunluğunda, sıvı, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan, mükemmel yüzey görünümü elde etmek için, hazır beton ve prekast endüstrisi için geliştirilmiş, yüksek oranda su ihtiyacını azaltan TS EN 934-2 'ye [61] göre yüksek oranda su azaltıcı /hiper akışkanlaştırıcı katkı ve sertleşmeyi hızlandırıcı katkı sınıfına uygun, hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesidir.

Tablo 5.4: Deneyde kullanılan hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesi özellikleri

Özellik	Hiperakışkanlaştırıcı
Yoğunluk (g/cm ³)	1.011
Klor (%)	< 0.1
Renk	Amber
Homojenite	Homojen
Kimyasal İçerik	Polikarboksilik Eter Esaslı
Dozaj	0,7-0,9

5.1.4 Çelik Liflerin Özellikleri

Bu çalışmada pilye şeklinde iki ucu bükülü birleştirilmiş RC 65/35 BN ve RC 80/60 BN çelik lifleri kullanılmıştır. Mikro donatı olarak adlandırılan başka çelik lif ise 13 mm boyutundadır. RC 65/35 BN çelik lifindeki karakterler; 65 Performans sınıfında, 35 mm boyunda, iki ucu kancalı, tutkalla yapıştırılmış ve düşük karbonlu parlak çelik lif anlamına gelmektedir. Çelik liflerin en belirgin özelliği çekme sırasında kopmadan direnç göstermeleridir. Ayrıca beton içerisinde homojen olarak dağılmayı kolaylaştırmak amacıyla özel bir tutkalla (su içerisinde kolayca çözünebilen) birleştirilmiştir. Bu liflerin özellikleri Tablo 5.5'de verilmiştir [32].

Tablo 5.5: Çelik liflerin özellikleri

Özellikler	RC 65/35 BN	RC 80/60 BN	Mikro Donatı
Tel Boyu (mm)	35	60	13
Lif Çapı (mm)	0,55	0,75	0,20
Narinlik Oranı (l/d)	64	80	65
Performans Sınıfı	65	80	Mikro donatı
Çekme Dayanımı (MPa)	1100	1050	>2850
Kilogramdaki lif sayısı (adet)	14500	4600	

5.1.5. Polipropilen Lif

Bu deneysel çalışmada 13 mm uzunluğunda M 13 adlı polipropilen lifler kullanılmıştır. Denejde kullanılan polipropilen lif özellikleri Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6: Polipropilen liflerin özellikleri

Lif Özellikleri	M13
Lif Uzunluğu (mm)	13
Lif Çapı (μ)	22
Lif sayısı (milyon/kg)	224
Elastisite Modulu (N/mm^2)	3500-3900
Çekme Mukavemeti (N/mm^2)	400
Su Tutma Kapasitesi (%)	0
Azami Çalışma Sıcaklığı (C°)	145

5.1.6 Su

Beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları standardı olan TS EN 1008'de [62] belirtilmiş olan su içilebiliyor ise, karma suyu olarak kullanılmaya da uygundur hükmü vardır. Beton yapımında kullanılan karma suyu, kür suyu ve yıkama suyu olmak üzere üç amaçla kullanıldığımız su, şehir şebekesinden akan içme suyundan temin edilmiştir. Kullanılan suyun PH değeri 7' dir.

5.2 Metod

5.2.1 Kabul Edilen Esaslar

TS 10514'e [63] göre liflerin betona karıştırılma ve kontrol kuralları:

- Çimento miktarı en az 320 kg/m^3 olmalıdır.
- Kum (0 mm-4 mm) miktarı, toplam agregâ kütlesinin %40-%45'i olmalıdır (750 kg/m^3 - 850 kg/m^3).
- En büyük dane büyüklüğü, doğal agregâ için, 28 mm, kırma taş için 32 mm olmalıdır. 14 mm' den büyük agregâ oranı, %15-%20 ile sınırlanmalıdır.
- Betonun karakteristik basınç dayanımı en az 20 N/mm^2 olmalıdır.
- Su çimento oranı en çok 0,55 olmalıdır.
- Betona işlerlik sağlaması amacı ile akışkanlık verici katkıları kullanılabilir.
- Betona katılan çelik lifler TS 10513'e [35] uygun olmalıdır.

Üretilen betonların 28 günlük karakteristik küp basınç dayanımlarının 37 MPa'dan az olmaması hedeflenmiştir (silindirik basınç dayanımı 30 MPa). Lifli betonların üretiminde maksimum agregâ tane boyutu 22,4 mm olarak seçilmiştir. Agregâlar, karışım hesaplarında suya doymun kuru yüzey olarak kabul edilmiştir. Bütün beton bileşimlerinde çimento dozajı 359 kg/m^3 olarak sabit alınmıştır. Karışıma lif katılması halinde, işlenebilmeyi kolaylaştırmak ve yerleştirme esnasındaki zorlukları aza indirmek amacıyla % 1-2 oranında katkı kullanılarak etkin su/çimento oranı 0,46 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde karışıma katılacak çelik lif miktarı da işlenebilme özelliği dikkate alınarak 0 kg/m^3 - 40 kg/m^3 arasında seçilmiştir. Seçilen polipropilen lif miktarı ise 600 gr/m^3 olarak seçilmiştir. Ayrıca her çeşit çelik liften 20 kg/m^3 ve sentetik liflerden 500 gr/m^3 kullanılarak karma (hibrid) lifli beton numuneler elde edilmiştir. Yalın beton numune ile birlikte toplamda 11 farklı seride küp ve kiriş numune üretilmiştir.

5.2.2 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme ve Saklama

Homojen bir beton karışımı elde etmek için temel ilkelere TS 1247 [64], TS 1248 [65]'e dikkat edilmelidir:

- Kritik lif miktarı aşılmamalıdır.

-Lifli beton karışımını kolaylaştırmak ve gerekli olduğunda kullanılan lif miktarını arttırmak için ince agrega kullanılmalıdır.

-Taze betonda; homojen tel dağılımı, gözle kontrol edilmeli, birbirine yapışık teller ve lifler halinde betona karıştırılan tel demetler veya lifler beton içinde tamamen dağılıp, ayrılincaya kadar beton karışımı devam etmeli ve uniform dağılım göz ile fark edilmelidir [63].

Önce kuru karışım olarak agregalar transmiksere koyulmalıdır. Çimento ilave edildikten sonra ve 20°C deki karışım suyunun % 90 ilave edilmiştir. Daha sonra lifler transmiksere 20kg/dak-30kg/dak. hızı ile konulmuş bu arada mikser tamburu en yüksek hız ile çevrilmiştir. Yüksek su/çimento oranından kaçınmak için çimento ağırlığının %1-2 oranında hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ile karışım suyunun kalan %10 luk kısmı eklenmiştir. Bütün lifler karıştırıldıktan sonra mikser bir müddet durdurulmuş ve lif dağılımı gözle kontrol edilmiştir. Homojen karışımın elde edilmediği karışımlarda istenilen sonuca kadar mikserle karıştırılmaya devam edilmiştir. Betonların üretimi, 76 lt. kapasiteli mini betoniyerde karıştırılarak elde edilmiştir. Transmiksere üretilen numune mikser kapasitesinin % 80'ni aşmaması gerektiği için betoniyerin hacminin yetersiz olmasından dolayı her bir seri numune için 150×150×550 mm.'lik prizma ve 150 mm lik küp numuneler için 2 karışım yapılmıştır.

Yerleştirme sırasında kullanılan vibrasyon liflerin dönmesine ve belirli yönlerde dizilmelerine neden olmaktadır. Bu durum lifin narinlik oranıyla beraber vibrasyon tipi ve kalıp boyutuna bağlıdır. Bu sebeple lifli betonların yerleştirilmesinde dış vibrasyon tercih edilmelidir. Kalıplar düzgün yüzeyli metal kalıplar olmalarından dolayı betonun kalıba yapışmasını önlemek için kalıpların yüzeyleri yağlanmıştır. Taze beton kalıba tam doldurulduktan sonra boşluk kalmaması için elle şişleme çubuğuyla boşluklar doldurulmuş ve yüzeyi mala ve spatula ile düzeltilmiştir.

Kalıplara yerleştirilen betonlar, sıcaklığı 20±2 °C ve nispi (bağlı) rutubeti %60±5 arasında değişen laboratuvar ortamında 24 saat kalıp içinde bekletildikten sonra kalıptan çıkartılarak içerisinde 20 °C su bulunan kür havuzuna yerleştirilmiştir. 28 gün kür havuzunda kalan numuneler çıkarılmış ve deneyler için hazır hale gelmiştir.

5.2.3 Numune Kodlarının Verilmesi

Bu çalışmada 11 farklı beton numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Her bir katkı ile bir tanesi lifsiz şahit numune olmak üzere toplam 4 farklı lifle karışım hazırlanmıştır. Yalın ve lifli beton numuneleri 3'er adet küp ve 3'er adet kiriş numune hazırlanmıştır. Karma lifli betonlar ise 2'şer adet küp ve 2'şer adet kiriş numune olarak hazırlanmıştır. Çelik liflerle hazırlanan karışımlara sırasıyla 20 kg/m³, 40 kg/m³ çelik lif ilave edilmiştir. Polipropilen lif ise 600 gr/m³ oranında karışıma eklenmiştir. Ayrıca hibrit lifli beton numuneler de her çelik lif tipinden 20 kg/m³ ve sentetik liflerden 500 gr/m³ eklenerek karışım elde edilmiştir. Numunelerin kodlanması yapılırken ilk karakter karışımın lifsiz, lifli ya da karma lifli olduğunu, ikinci karakter lif çeşidini, üçüncü karakter lif performans sınıfını, dördüncü karakter karışımın 1 m³'ünde kaç kilogram lif kullanıldığını ifade etmektedir. Hibrit lifli betonlarda da önce çelik lif sonra da polipropilen lif özelliği kodlanmıştır. Buna göre;

Y :Yalın Beton

LÇM20 : Lifli Beton Mikro Donatılı 20kg/m³

LÇM40 : Lifli Beton Mikro Donatılı 40kg/m³

LÇ6520 : Lifli Beton RC 65/35 BN, 20kg/m³

LÇ6540 : Lifli Beton RC 65/35 BN, 40kg/m³

LÇ8020 : Lifli Beton RC 80/60 BN, 20kg/m³

LÇ8040 : Lifli Beton RC 80/60 BN, 40kg/m³

LP600: Polipropilen Lifli Beton Doumix 13, 600gr/m³

HÇMP : Hibrit Beton Mikro Donatı-20kg/m³, Polipropilen-500 gr/m³

HÇ65P : Hibrit Beton RC 65/35 BN-20kg/m³, Polipropilen- 500 gr/m³

HÇ80P : Hibrit Beton RC 80/60 BN -20kg/m³, Polipropilen 500 gr/m³

Ç: Çimento

1 m³ betonda bulunan gerçek malzeme miktarları Tablo 5.7'de verilmektedir. Çizelgede KTT; Kırma Tas Tozu, KT; Kırma Tas, Ç; çimento, Lif M; Lif Miktarı, olarak belirtilmiştir.

Tablo 5.7: 1 m³ Betonda bulunan gerçek malzeme miktarları

Beton Türü	Ç (kg)	Su (kg)	Katkı (kg)	Lif M. (kg)	Kum Agrega 0-5 mm	KT2 4-11,2 mm	KT1 11,2-22,4 mm
Y	359	165	3,59	-	755,96	670,68	475,33
LÇM20	359	165	3,59	20	755,96	670,68	475,33
LÇM40	359	165	3,59	40	755,96	670,68	475,33
LÇ6520	359	165	3,59	20	755,96	670,68	475,33
LÇ6540	359	165	3,59	40	755,96	670,68	475,33
LÇ8020	359	165	3,59	20	755,96	670,68	475,33
LÇ8040	359	165	3,59	40	755,96	670,68	475,33
LP600	359	165	3,59	0,6	755,96	670,68	475,33
HÇMP	359	165	3,59	20Ç-0,5P	755,96	670,68	475,33
HÇ65P	359	165	3,59	20Ç-0,5P	755,96	670,68	475,33
HÇ80P	359	165	3,59	20Ç-0,5P	755,96	670,68	475,33

6. DENEY YÖNTEMLERİ VE SONUÇLARI

6.1 Deney Yöntemleri

6.1.1 Basınç Dayanımı Tayini

Her bir karışımın basınç dayanımının tayini için 150×150×150 mm'lik küp numuneler üretilmiştir. Numunelerin zamanla göstereceği dayanım artışları için 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Numuneler, TS EN 12390-4'e [66] basınç dayanımı-deney makinalarının özellikleri standardına uygun, TS EN 12390-3 [67] deney numunelerinde basınç dayanımının tayini standardına uygun olarak deneye tabi tutulmuşlardır. Makine otomatik yükleme sistemi ile küp numuneler 530 kg/sn yükleme hızı ile yüklenmiştir.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (6.1)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük(kuvvet), N

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm²

6.1.2 Eğilme Dayanımı Tayini

Betonun eğilme dayanımı tayini TS EN 12390-5 [68] ve TS 10515 [54] standartlarına göre bu deney metodunda açıklığın 1/3 noktalarında yüklenmiş lif donatılı beton kirişlerde basit kiriş metodu ile yapılmıştır. Eğilme dayanımları tayini için 150×150×550 mm'lik kiriş numuneleri üretilmiştir. Numunelerin zamanla göstereceği dayanım artışları için 28 günlük dayanımları ölçülmüştür. 550 mm uzunluğundaki kiriş numune 500 mm açıklığındaki mesnetler üzerine yerleştirilmiş ve üçte bir noktalarından tekil yük uygulanmıştır. 30 ton basınç kapasiteli preste, yük sehim 0,05-0,10 mm/min aralığında belirtilen son sehime kadar arttırılarak yüklenmiştir. Eğilme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_{cf} = \frac{F \times L}{b \times h^2} \quad (6.2)$$

Burada;

f_{cf} : Eğilme dayanımı, MPa

F: En büyük yük(kuvvet), N

L: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm

b: Numunenin eni, mm

h : Numunenin yüksekliği, mm

6.1.3 Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk) Tayini

Lifli betonların tokluk düzeylerini belirlenmesi için farklı deney yöntemleri ve şartnameler bulunmaktadır. Bu çalışmada TS 10515 [54] ve JSCE SF4 [69] yönteminden bahsedilecektir.

6.1.3.1 TS 10515 Yöntemi

Bu metod belirli sehime kadar malzeme davranışlarını tanımlayan tokluk indislerinin belirlenmesini içermektedir. Tokluk indisleri, çelik tel donatılı betonun belirli bir sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanının ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alana oranı olarak ifade edilmektedir. TS 10515 [54] 'de kullanılan terimler:

İlk çatlak: Yük sehim eğrisinde ilk doğrusal olmayan (nonlinear) olmaya başladığı nokta (beton matris içinde çatlama başlar).

İlk çatlak sehim: Yük sehim eğrisi üzerinde ilk çatlak meydana geldiği andaki sehim değeridir.

İlk çatlak tokluğu: İlk çatlaktaki yük sehim eğrisi altında kalan enerjiye eşittir.

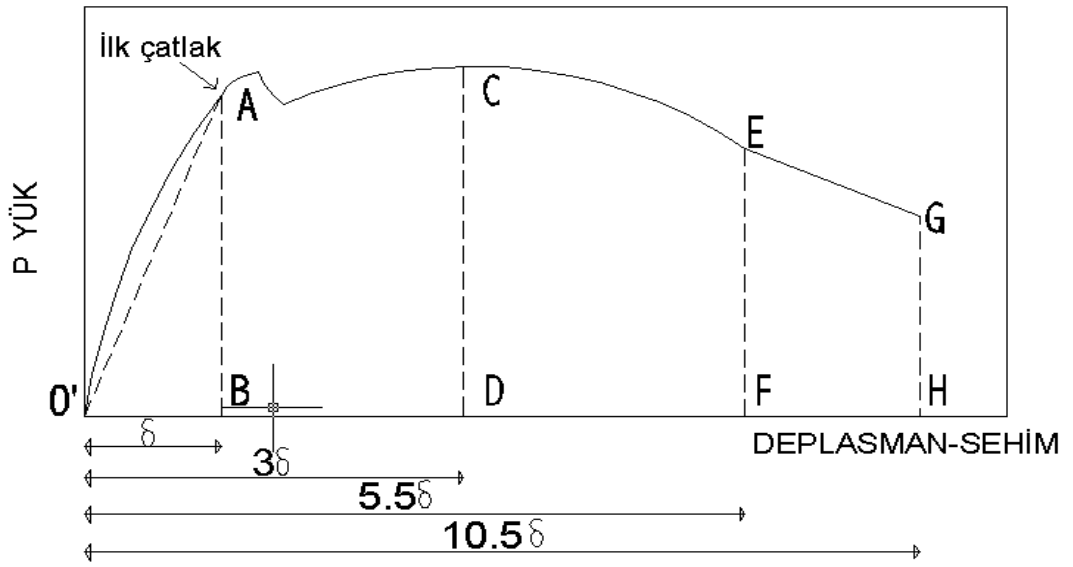
Tokluk: Belirtilen yer değiştirmeye göre yük-yerdeğiştirme eğrisi altında kalan alan, enerjidir.

Tokluk indeksi: Belirtilen sehim değerinde meydana gelen yük sehim eğrisi altında kalan alanın ilk çatlaktaki sehim bölgesine bölerek elde edilen numaralardır.

I_5 Tokluk indeksi: İlk çatlak sehiminin 3 katı sehime kadar yük sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altında kalan alana oranıdır.

I_{10} Tokluk indeksi: İlk çatlak sehiminin 5,5 katı sehime kadar yük sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altında kalan alana oranıdır.

I_{20} Tokluk indeksi : İlk çatlak sehimin 10.5 katı sehimine kadar yük sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altında kalan alana oranıdır. İlk çatlak dayanımı ve tokluk indeksinin hesaplanması için yük sehim eğrisi şekil 6.1 de gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Tokluk indekslerinin hesaplanması için yük-sehim eğrisi

Tanımlanan bu tokluk indekslerinin hesaplanması şekildeki alanlara göre aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

$$I_5 = \frac{O'ACD}{O'AB} \quad (6.3)$$

$$I_{10} = \frac{O'AEF}{O'AB} \quad (6.4)$$

$$I_{20} = \frac{O'AGH}{O'AB} \quad (6.5)$$

Artık mukavemet faktörü $R_{5,10}$: 10 değerinin hesaplanması için elde edilen sayıdır ($I_{10}-I_5$). Artık mukavemet faktörü $R_{10,20}$: 20 değerinin hesaplanması için elde edilen sayıdır ($I_{20}-I_{10}$). Tam elasto-plastik bir malzeme için, yani ilk çatlaktan sonra elasto-plastik davranış durumunda I_j tokluk indeksi j değerine eşit olur. Bu durumda I_5, I_{10} ve $I_{10,20}$ tokluk indekslerindeki 5, 10 ve 20 değerleri ilk çatlığa kadar olan lineer elastik kısma ve ondan sonra tam plastik sehimlere uygun gelmektedir. Tokluk indisi değerinin düşük olması, çatlama sonrası dayanımdaki hasarın büyük ve enerji yutma yeteneğinin ise az olduğunu ifade etmektedir. Yüksek tokluk indislerinin elde edilebilmesi için çelik telin tipi, içeriği, narinliği ve matris parametrelerinin uygun seçilmesi gereklidir. Çatlama sonrasındaki farklı aşamalarda hasarın derecesi kalıcı dayanım faktörleri ile de gösterilebilir. TS 10515'e [54]'e göre artık mukavemet faktörü aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{5,10} = 20(I_{10}-I_5) \quad (6.6)$$

$$R_{10,20} = 10(I_{20}-I_{10}) \quad (6.7)$$

Kiriş deneyinden elde edilen yük sehim eğrisinde, ilk çatlak oluştuktan sonra malzemenin yük sehim eğrisi tam plastik davranış göstermesi durumunda $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}=100$, yumuşama eğilimi göstermesi durumunda ise $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}<100$ olmaktadır. Yalın betonda ise kalıcı dayanım faktörlerine göre Tablo 6.1'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

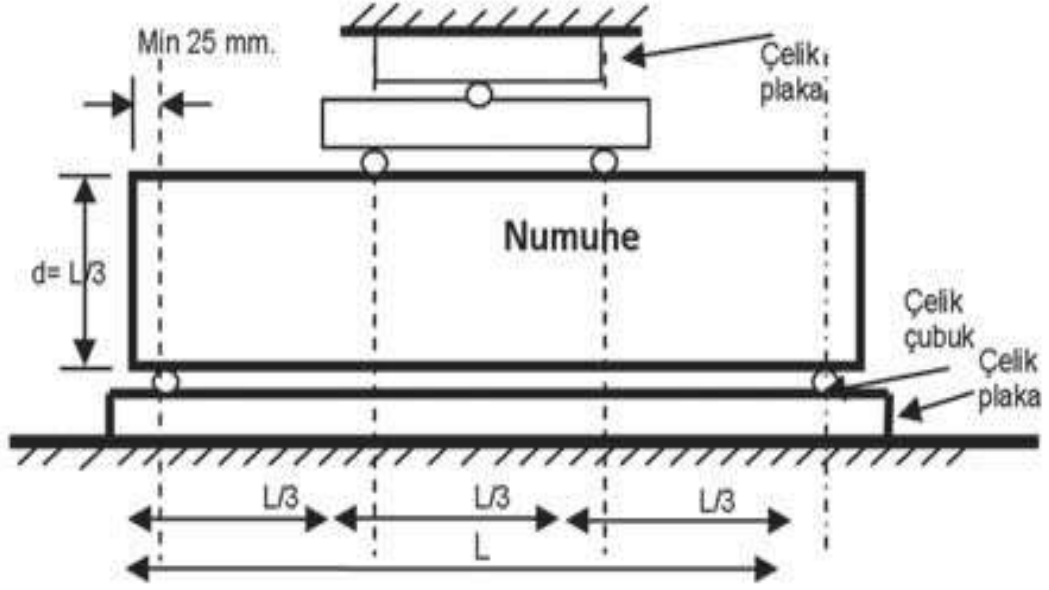
Tablo 6.1: Kalıcı dayanım faktörlerinin sınıflandırılması

Sınıf	Değerlendirme	Kalıcı Dayanım faktörü
1	Zayıf	<40
2	orta	40-60
3	iyi	60-80
4	mükemmel	80-100

Kirişler 3 noktalı eğilme deneyinde, TS 12390-5 [68]'e göre test edilmiştir. Yük yerdeğiştirme X-Y koordinatları ile ifade edilir. İlk somut nokta yük sehim eğrisi üzerinde bir çatlama başlangıcına tekabül eden çatlağa ilk çatlak denir. Diğer tüm ölçmeler bu çatlak anındaki yük sehim grafiği değeri kullanılarak ölçülür. Kalıntı mukavemet faktörü doğrudan tokluk indekslerinden elde edilebilir, yük üzerindeki belirli bir sehim aralığında ortalama sonrası ilk çatlağın belirli bir yüzdesi olarak karakterize edilir. Bu test metodu ile belirlenen tokluk indeksleri ve artık mukavemet faktörleri statik yük eğilme altında fiber takviyeli betonda çatlak davranışını yansıtmaktadır. Tokluk indekslerinin değerleri ve kalıntı dayanım faktörleri ve ilk çatlak dayanımı çeşitli lifli betonların karıştırma performanslarını karşılaştırılmasında ya da araştırma ve gelişme için kullanılabilir. Bunlar yapıda beton kalitesini denetlemek, yapıyla birlikte uyumunu doğrulamak ya da hizmet beton kalitesini değerlendirmek için kullanılır.

Yükleme ve numune destek sistemi eksantriklik veya moment olmadan numune üzerinde üç noktalı yüklemeye olmalıdır. Elektronik dönüştürücüler veya elektronik sehim ölçer gibi cihazlar oturma veya desteklerde numunenin büküm nedeniyle herhangi bir etkiyi özel olarak orta net sehim belirlenmesini sağlayabilecek bir şekilde olmalıdır. Yük ve sehim elektronik sonuçları direkt xy elektronik grafik çiziciyle yük ve net orta açıklıklı sehim arasındaki ilişki bu dönüştürücü ile kaydedilir. Dijital olarak yük en azından her saniye ve eğilme kapasitesine sahip bir veri toplama sistemi ile uygulanır. Test örneklerinin uzunluğu derinlikten en az 3 kat 50mm daha büyük ve 350 mm'den az olamaz.

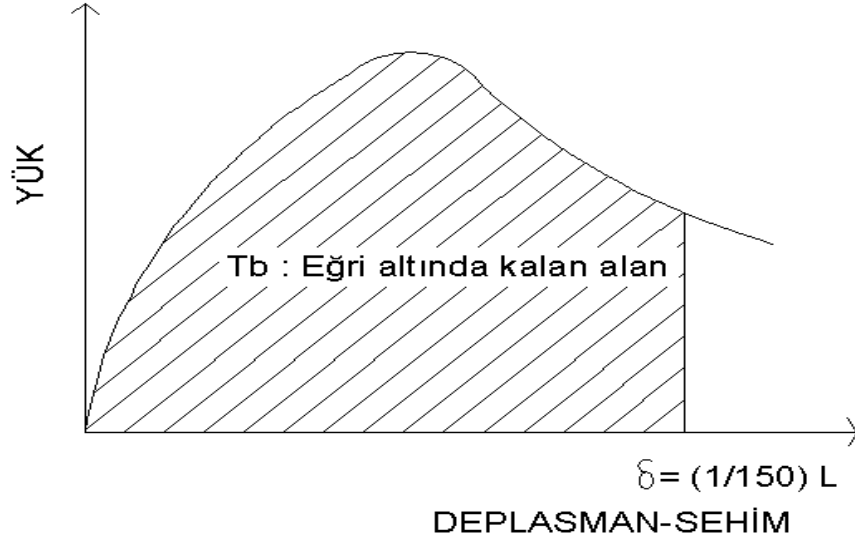
Taze ve sertleşmiş betondan en az 3 örnek test etmek için hazırlanır. Numunenin orta açıklığı ölçüm cihazlarının sehim yeri burulma etkisini en aza indirir ve orta açıklıkta net saptırma belirlemek için gerekli cihazların sayısını azaltır. Yük sehim eğrisinde ilk bölümü boyunca konkav ise doğrusal yük sehim eğrisinin bu bölümü ile çakışan bir cetvel yerleştirilerek ve eğrinin ilk keskin bir artış gösterdiği noktayı belirleyerek ilk çatlak belirlenebilir. Yük sehim eğrisi çekme veya basınç gerilmesi düz beton için gerilme şekil değiştirme gibidir; ilk bölümü boyunca hafifçe dış bükeydir. Elektronik veya mekanik titreşim nedeniyle yük sehim eğrisi dalgalanmalar söz konusu olup kesin bir değişiklikte karşılaştırılmamalı.



Şekil 6.2: Üçte bir noktalarından yüklemeli eğilme deneyi test düzeneği

6.1.3.2 JSCE SF4

JSCE SF4 [69] yöntemi, çelik tel donatılı betonlarda eğilme tokluğunun hesaplanmasını içermektedir. Eğilme dayanımını maksimum yüke göre tanımlamakta ve kopma modülü (f_u) olarak adlandırmaktadır. Yöntem, tokluğu deplasmanın kiriş açıklığı/150 mm'e kadar ortalama yükten elde edilen bir eşdeğer eğilme dayanımını olarak tanımlamaktadır. Tipik yük sehim eğrisi ve eğrinin önemli noktaları şekilde verilmiştir. Bu metotta yük sehim eğrisi, üçte bir noktalarından yüklenen kiriş deney metodu ile kiriş numunelerin kapalı çevrim kontrollü (sehim kontrollü) yükleme cihazı ile kirişin orta noktasındaki sehimin, kiriş açıklığı/150mm sehimine kadar ölçülmesiyle elde edilmektedir.



Şekil 6.3: Yük sehım eğrisi(Açıklık/150)

JSCE SF4'e göre eğilme dayanımı ve tokluğunun belirlenmesinde kullanılan numuneler lif boyutuna göre belirlenir. Eğer çelik lif uzunluğu 40 mm aşarsa, beton numune genişliği ve yüksekliği 15 cm olmalıdır. Eğer çelik lif uzunluğu 40mm'e eşit ya da daha küçükse numune genişliği 10 cm olmalıdır. Numune boyu ise; en az beton numunenin yüksekliğinin 3 katından 8 cm büyük olmalıdır. Bir numunenin yük sehım eğrisini ölçmek için kullanılan ölçüm aletleri elektriksel lineer (doğrusal) diferansiyel transformatör (dönüştürücü) kullanılmalıdır (belli bir doğrulukla çökme ölçme yeteneğine sahip olacaktır). 3 noktalı yükleme aparatı belirtilen ufak bir miktar deplasman kadar çökmeyi sınırlamaktır. Eğilme aparatı numune altında ve üstünde; bir dizi uzunlamasına dönen silindirlerle destek olarak kullanılabilir. Test numunesinin açıklığı numune boyunun 3 katı kadar olmalıdır. Numuneye sürekli olarak yük darbesi etkisi olmadan uygulanacaktır. Numune desteklerinin genişliklerinin ortasına ve üst yükleme aparatının aralığın üçüncü noktalarıyla temasa geçmesiyle yerleştirilecektir. Maksimum deplasman çatlak oluştuğunda sehımda 3 basamaklı dijital olarak belirtilmelidir. Eğilme mukavemeti, artık eğilme dayanımı, eğilme tokluğu ve eşdeğer eğilme mukavemeti değerleri 4 numunenin örneğinden az olmamak şartıyla ortalaması alınmalıdır.

Eğilme mukavemeti denklem 6.2 ile hesaplanır. Eğilme tokluğu, eğilme tokluğu faktörü olarak ifade edilir. Şekildeki gibi eğilme tokluğu 3 basamaklı dijital

olarak yük sehimi eğrisi altında kalan alan, yerdeğiştirmenin numune açıklığına 1/150' sine kadar hesaplanıp belirlenir. Eğilme tokluğu katsayısı aşağıdaki denklemlerle ölçülür ve 3 basamaklı olarak hesaplanır.

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{1}{b_h^2} \quad (6.8)$$

$\bar{\sigma}_b$ = eğilme tokluğu faktörü, katsayısı (kgf/cm²) (N/mm²)

T_b = eğilme tokluğu (kgf.cm), (J)

δ_{tb} = 1/150 açıklığının deplasmanı (l⁵) (cm), (mm)

TS10515[54]'de tokluk indisleri ilk çatlak yüküne bağılı olarak belirlenmektedir. Ancak ilk çatlak yükü tepe yüküne yakın olmasına rağmen belirlenmesi oldukça güç olmaktadır. Öte yandan numunenin ilk çatlağının tam olarak başlama zamanını belirlenmesi oldukça güçtür hatta bazen imkansızdır. JSCE SF4 yöntemi ise ilk çatlağına göre değil, numune açıklığının 150 de biri mesafede ölçülen sehimi hesaplandığından daha kolay ve daha iyi sonuç verir. Tokluk değerlerini belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin hepsinde tokluk yük sehimi eğrisi altında kalan alan yardımıyla hesaplanmaktadır. Ancak tokluğun numune boyutu, yükleme düzeni (üç veya dört noktadan yükleme) ve yükleme hızı gibi parametrelere bağılı olmakta ve ilk çatlak deplasyonunu bu parametrelerden etkilenmektedir. TS10515'e göre tokluk indisleri hesaplanırken ilk çatlak yükünün tespit edilmesinin gerekmesi ve kullanılan yükleme makinelerinin farklı özellikleri sorun yaratmakta, JSCE SF4'e göre hesaplanan eğilme tokluk faktörleri ise yük sehimi eğrisinde maksimum yük eğrisinde maksimum yük değerinden sonraki şekil değıştirme yumuşaması bölgesini tanımlamaya yeterince uygun olmamaktadır. JSCE SF4 yöntemi sadece tek sehimi tokluğu ile elde edilen bilgiler, TS10515'de en az 4 tane eğilme tokluk değerleri karşısında yetersiz görünüyor. TS10515 yöntemi 4 farklı deplasman ölçümü ile tokluk açısından daha doğru bir yöntemdir.

6.2 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

6.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Lifli betonun matrisi bir bütün halinde kalarak kırılmadan sonra dağılmamıştır. Kırılma esnasında, matrisin dağılma miktarının; lif miktarı ve uzunluğuna bağlı olduğu anlaşılmıştır. Lif miktarı ve uzunluğu arttıkça, çatlakların oluşum hızı ve büyümesi yavaşlayarak, dağılma gecikmiştir. Lifsiz betonda çatlaklar oluştuğundan sonra bu çatlakların hemen büyüyerek gevrek kırılmaya yol açtığı görülmüştür. Küp numunelerinin basınç dayanımı sonuçları Tablo 6.2' de verilmiştir.

Tablo 6.2: Küp numunelerin basınç dayanımı

Beton Türü	1.Numune Basınç Day. (MPa)	2.Numune Basınç Day. (MPa)	3.Numune Basınç Day. (MPa)	Ortalama Basınç Day. (MPa)
Y	61.76	61.67	60.96	60.96
LÇM20	55.42	56.83	58.50	56.92
LÇM40	69.21	64.86	66.92	67.00
LÇ6520	60.53	71.04	68.77	66.78
LÇ6540	57.16	60.07	66.94	61.39
LÇ8020	56.05	60.85	57.90	58.27
LÇ8040	60.08	57.44	61.27	59.59
LP600	53.86	54.52	55.96	56.40
HÇMP	54.15	55.95		55.05
HÇ65P	55.96	53.92		54.94
HÇ80P	58.88	62.03		60.46

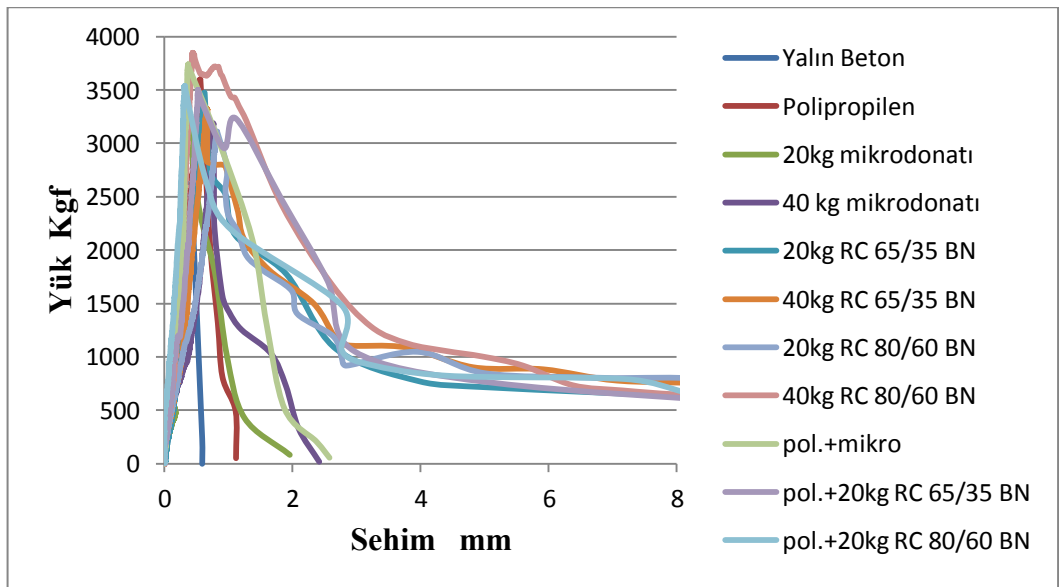
Gözlemlenen basınç dayanım sonuçlarının yalın beton numunesine göre değişimleri;

- LÇM20 (20kg/m³ mikro donatılı beton numunesinde) % 6,6 azalma
- LÇM40 (40kg/m³ mikro donatılı beton numunesinde) % 10 artış
- LÇ6520 (20kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numunesinde) % 9,5 artış
- LÇ6540 (40kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numunesinde) % 1 artış
- LÇ8020 (20kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numunesinde) % 4,4 azalma
- LÇ8040 (40kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numunesinde) % 2,5 azalma
- LP600 (polipropilen lifli beton numunesinde) % 7,5 azalma
- HÇMP(Karma Lif=polipropilen+mikrodonatı) % 10 azalma
- HÇ65P(Karma Lif =polipropilen+RC 65/35 BN) % 10 azalma
- HÇ80P(Karma Lif =polipropilen+RC 80/60 BN) % 1 azalma ile sonuçlanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre lifli beton numunelerin basınç dayanımı lifsiz beton numunelerine karşı pek bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır. Bazı lifli beton numuneleri yalın beton numunelerine göre basınç dayanımı artmıştır. Liflerin beton numunesinde boşluk yaratması, işlenebilirlik probleminin olması ve liflerin beton numunelerinde farklı ve düzensiz dağılımdan dolayı bazı numunelerde basınç dayanımı azalmıştır. Bu da liflerin basınç dayanımında kesin bir iyileşme yapmadığını gözlenmiştir.

6.2.2 Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Günümüzde gelişen beton teknolojisinde, dayanıklılık kadar dayanım da önem kazanmaktadır. Son 25 yılda kaydedilen ilerleme sonucu lifli betonların kullanım alanları hızla artmıştır. Özellikle prefabrike yapı elemanları üretiminde, titreşim etkisinde kalan saha elemanlarında kullanılması ile beton içerisinde oluşan çatlakların ilerlemesi lifler sayesinde önlenmektedir. Bu da dayanımı ve durabiliteyi arttırmaktadır. Bu açıdan, genellikle eğilme dayanımının önemli olduğu yapı elemanları üretiminde kullanılan lif tipinin betonun eğilme dayanımını ne şekilde değiştirdiğini incelemek bu çalışmanın esas amacını oluşturmaktadır. Lifsiz ve tüm lifli betonların 28. günlerdeki eğilme dayanımları artmaktadır. Tüm seri numunelerden elde edilen yük sehimi eğrileri Şekil 6.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Tüm seri numunelerden elde edilen yük sehimi eğrileri

Eğilme dayanımları TS10515'e göre yapılan eğilme deneyi sonucu elde edilmiştir. Beton numunelerinin maksimum F yüküne göre eğilme dayanımı sonuçları bulunmuştur (bkz denklem 6.2). Her lifli beton numune sınıfından 3 adet numune, her karma lifli beton numune sınıfından 2 adet numune deneye tabii tutulduğu için deney sonucunda karşılaştırma yapılırken aynı tür numunelerin ortalama eğilme dayanımları dikkate alınmıştır. Numunelerin eğilme dayanımı karşılaştırılmaları yalın beton numunelerine göre yüzde olarak yapılmıştır. Tüm numunelerinin eğilme dayanım sonuçları Tablo 6.3'de gösterilmiştir.

Tablo 6.3: Beton numunelerinin eğilme dayanımları

Beton Türü	1.Numune Eğilme Dayanımı (MPa)	2.Numune Eğilme Dayanımı (MPa)	3.Numune Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Day. (MPa)
Y	3.842	4.283	4.525	4.217
LÇM20	5.281	5.005	5.139	5.142
LÇM40	4.514	5.545	5.077	5.045
LÇ6520	5.015	5.051	5.408	5.158
LÇ6540	4.823	4.746	5.350	4.973
LÇ8020	4.517	5.098	3.621	4.412
LÇ8040	5.519	5.407	5.316	5.414
LP600	5.235	4.405	4.638	4.759
HÇMP	5.083	5.055		5.047
HÇ65P	4.990	4.799		4.895
HÇ80P	5.004	5.436		5.220

Gözlemlenen eğilme dayanımları sonuçlarının yalın beton numunesine göre değişimleri;

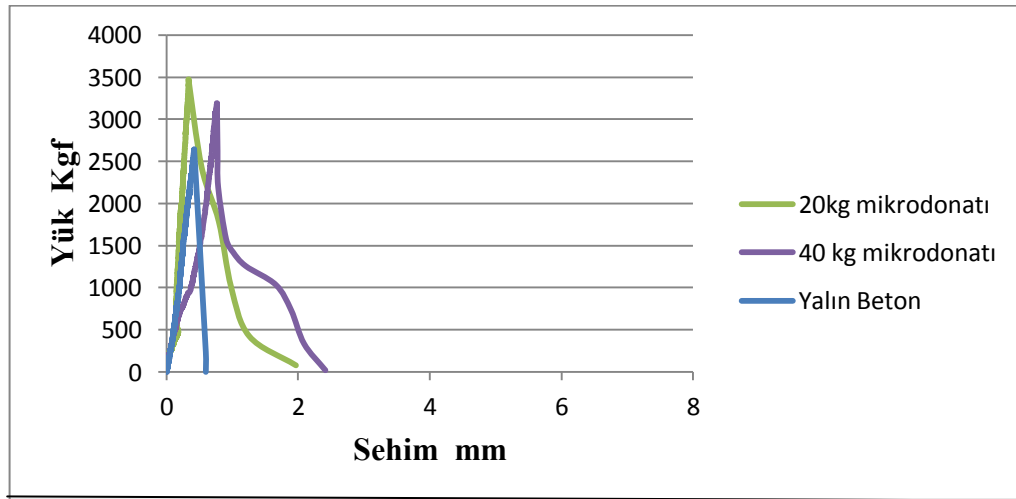
- LÇM20 (20kg/m³ mikro donatılı beton numunesinde) % 22 artış
- LÇM40 (40kg/m³ mikro donatılı beton numunesinde) % 20 artış
- LÇ6520 (20kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numunesinde) % 23 artış
- LÇ6540 (40kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numunesinde) % 18 artış
- LÇ8020 (20kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numunesinde) % 5 artış
- LÇ8040 (40kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numunesinde) % 28 artış
- LP600 (polipropilen lifli beton numunesinde) % 13 artış
- HÇMP(Karma Lif= polipropilen+mikrodonatı) % 20 artış

- HÇ65P(Karma Lif = polipropilen+RC 65/35 BN) % 16 artış
- HÇ80P(Karma Lif = polipropilen+RC 80/60 BN) % 24 artış ile sonuçlanmıştır.

6.2.2.1 Lifli Beton Numunelerinin Eğilme Dayanımı Lif Oranı Açısından Karşılaştırılması

1-Mikro Donatılı Beton Numunelerinde ;

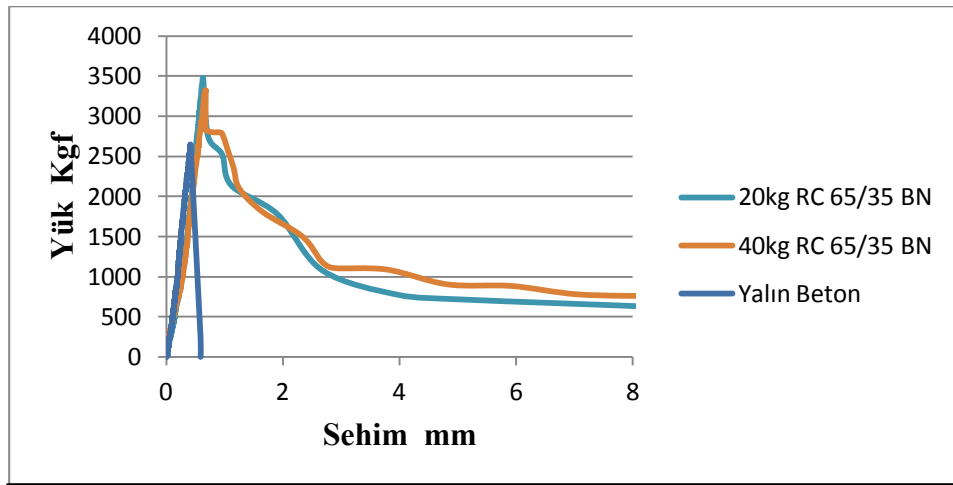
Yalın beton numunelerinin eğilme dayanımı 4.217 MPa iken, 20kg/m³ mikro donatı beton numunelerinin eğilme dayanımı 5.142 MPa olmaktadır. Aynı lif türünün 40kg/m³ oranında kullandığımızda numunelerin eğilme dayanımı 5.045 MPa olmaktadır. Mikrodonatılı beton numunelerinin 20kg/m³ lif dozajındaki örneklerinde eğilme dayanımındaki artış %22 iken, 40kg/m³ lif dozajında ise % 20 artış elde edilmiştir. Mikrodonatılı beton numunelerin 20kg/m³ lif oranında kullanımında; 40kg/m³ lif oranındakine göre beklenenin aksine eğilme dayanımı açısından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni; mikrodonatılı beton numunesinde lif oranı artırıldığında boşluk oranının artması sebebiyle matris-lif arasındaki aderansın azalması ve işlenebilirliğin azalması sonucu numunenin elastik performansını düşürdüğü düşünülmektedir. Şekil 6.5.a' da farklı dozajlarda kullanılan mikro donatılı beton ve yalın beton numunelerinin yük sehim eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 6.5.a: Farklı dozajlarda kullanılmış mikrodonatılı beton numunelerinin yük sehim eğrileri

2-RC 65/35 BN Çelik Lifli Beton Numunelerinde;

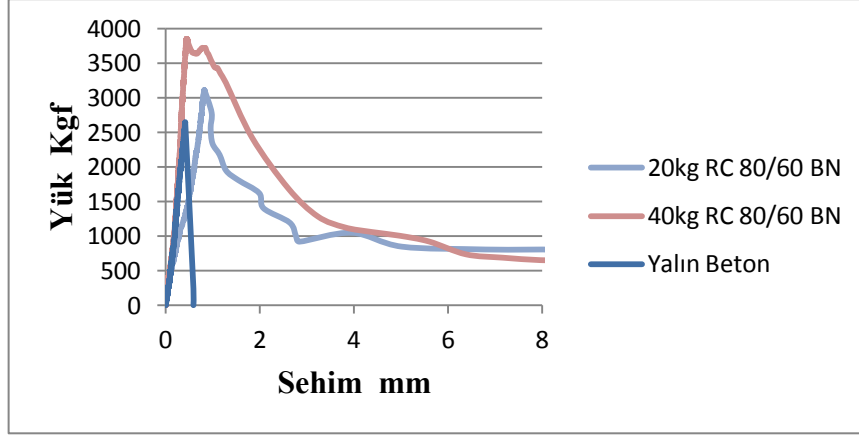
Yalın beton numunelerinin eğilme dayanımı 4.217 MPa iken RC 65/35 BN çelik lifli beton numunelerinin 20kg/m³ oranında kullanımında 5.158 MPa, aynı lif tipinin 40kg/m³ oranındaki lifli beton numunelerinden elde edilen eğilme dayanımı 4.973 MPa'dır. RC 35/60 BN lif tipi 20kg/m³ lif oranı kullanımıyla eğilme dayanımı yalın beton numunelerine göre %23 artarken, aynı lif 40kg/m³ dozajında kullanıldığında eğilme dayanımı % 18 artış göstermektedir. Şekil 6.5b'de farklı oranlarda kullanılan RC 65/35 BN tipi çelik lifli betonların ve yalın beton numunelerinin yük sehim eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 6.5.b: Farklı lif oranıyla RC 65/35 BN lifli beton numunelerinin yük sehim eğrileri

3-RC 80/60 BN Çelik Lifli Betonda;

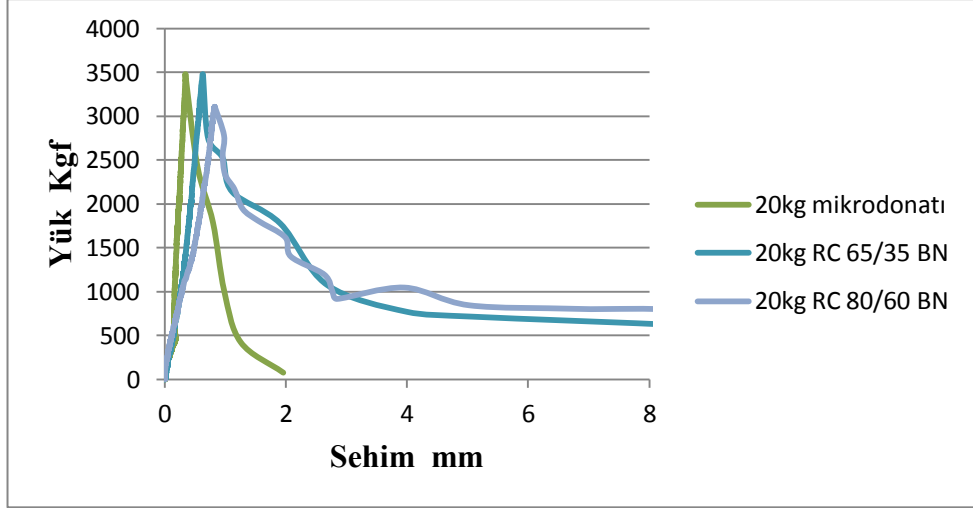
Yalın betonun numunelerinin eğilme dayanımı 4.217 MPa iken RC 80/60 BN lifli beton numunelerinin 20kg/m³ oranında kullanımında eğilme dayanımı 4.412 MPa, 40kg/m³ dozajında kullanımında 5.414 MPa'dır. RC 80/60 BN lif tipi 20kg/m³ lif dozajı kullanımıyla elde edilen numunelerin eğilme dayanımı yalın beton numunelerine göre %5 artış gösterirken 40kg/m³ dozajında kullanıldığında eğilme dayanımı % 28 artış göstermiştir. Bu lif tipinde lif hacminin artmasının eğilme dayanımında artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Farklı lif hacim oranlı RC 80/60 BN lifli beton ve yalın beton numunelerinin yük sehim eğrileri şekil 6.5.c' de gösterilmiştir.



Şekil 6.5.c: Farklı lif oranıyla RC 80/60 BN lifli ve yalın beton numunelerinin yük sehim eğrileri

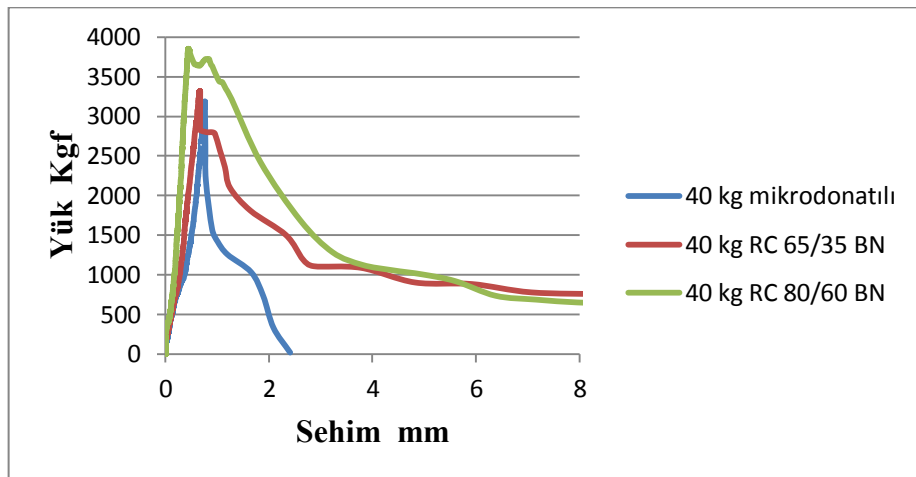
6.2.2.2 Lifli Beton Numunelerinin Eğilme Dayanımı Lif Narinliği Açısından Karşılaştırılması

1-Farklı Liflerin 20kg/m^3 Lif Oranında Kullanılan Lifli Beton Numunelerinde; Yalın beton numunelerinin eğilme dayanımı 4.217 MPa iken farklı liflerin 20kg/m^3 dozajında kullanıldığı lifli beton numunelerindeki eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında; mikrodonatılı beton numunelerinde 5.142 MPa , RC 65/35 BN lifli beton numunelerinde 5.158 MPa , RC 80/60 BN lifli beton numunelerinde 4.412 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Yalın beton numunelerine göre eğilme dayanımlarındaki artış oranı numunelerdeki lif narinliklerin küçükten büyüğe doğru bir şekilde sıralanmasına göre %22, %23 ve %5'tir. En iyi performansı RC 65/35 BN çelik lifli beton numunelerinin gösterdiği görülmüştür. Şekil 6.6a' da farklı narinliklerdeki 20kg/m^3 dozajında kullanılan lifli beton numunelerinin yük sehim eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 6.6.a: Ağırlıkça aynı lif oranında, farklı narinlik ve boylardaki lifli beton numunelerinin yük sehim eğrileri

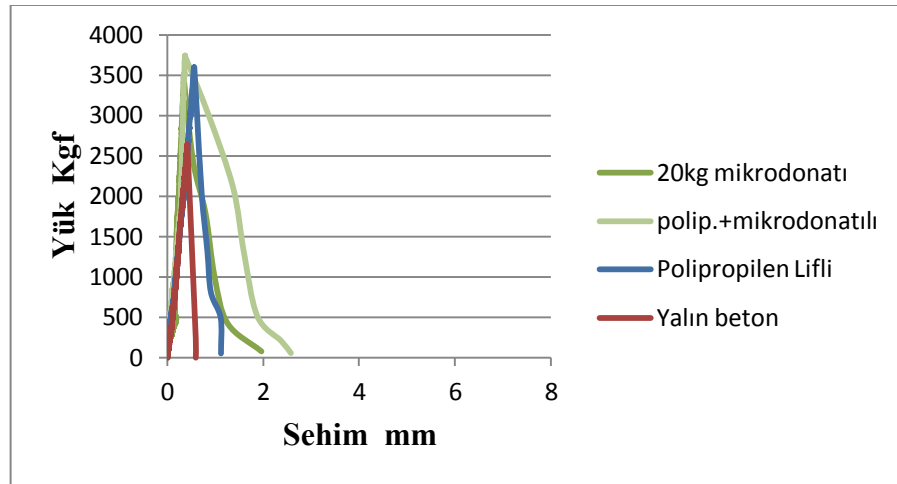
2-Farklı Liflerin 40kg/m^3 Lif Oranında Kullanılan Lifli Beton Numunelerinde;
 Farklı liflerin ağırlıkça 40kg/m^3 dozajında kullanıldığında mikrodonatılı beton numunelerinde eğilme mukavemeti 5.045 MPa , RC 65/35 BN lifli beton numunelerinde 4.973 MPa , RC 80/60 BN lifli beton numunelerinde 5.414 MPa olduğunu görülmüştür. Yalın beton numunelere göre eğilme dayanımlarındaki artış oranı numunelerde kullanılan lif narinliklerin küçükten büyüğe doğru bir şekilde sıralanmasına göre %20, %18 ve %28'tir. Şekil 6.6b.'de farklı narinliklerdeki 40kg/m^3 dozajında lifli beton numunelerinin yük sehim eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 6.6.b: Aynı lif oranıyla farklı narinlik ve boydaki lifli beton numunelerinin yük sehim eğrileri

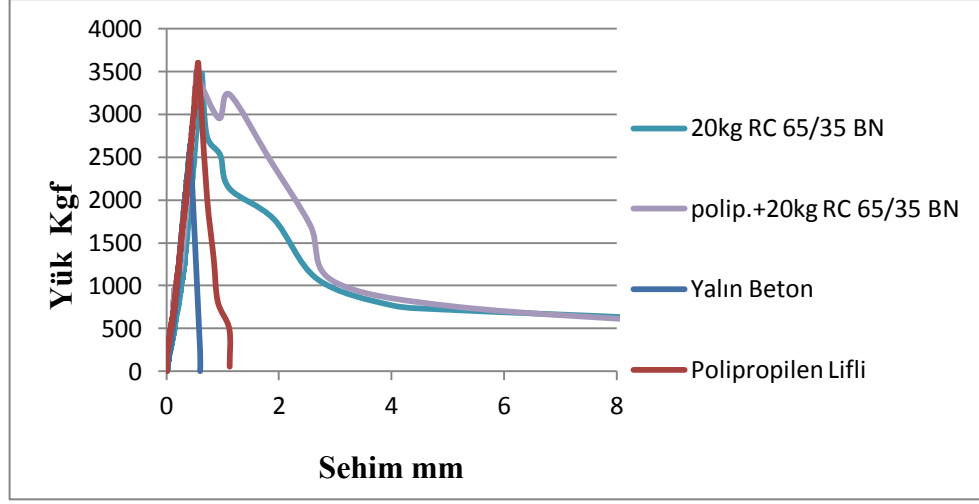
6.2.2.3 Karma Lifli Beton Numunelerinin Lifli Beton Numuneleriyle Eğilme Dayanımlarının Karşılaştırılması

1-Yalın beton numunelerinin eğilme dayanımı 4.217 MPa iken; polipropilen lifli beton numunelerinin eğilme dayanımı 4.759 MPa, ağırlıkça 20kg/m³ dozajında mikrodonatılı lifli beton numunelerinde eğilme dayanımı 5.142 MPa, 20kg/m³ mikro donatı ile 500 gr/ m³ polipropilen liflerin birlikte betona ilave edilmesiyle oluşan karma lifli beton numunelerinde ise 5.047 MPa'dır. Yalın beton numunelerine göre eğilme dayanımlarındaki artış oranı polipropilen, mikro donatılı ve karma lifli beton numunelerinin sırasıyla %13, %22 ve %20'tir. Eğilme dayanımı açısından en iyi performansın mikrodonatılı beton numunelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.7a'da karma lifli (Polip.+mikrodonatılı) ve lifli beton numunelerinin yük sehım eğrileri karşılaştırma için birlikte gösterilmiştir.



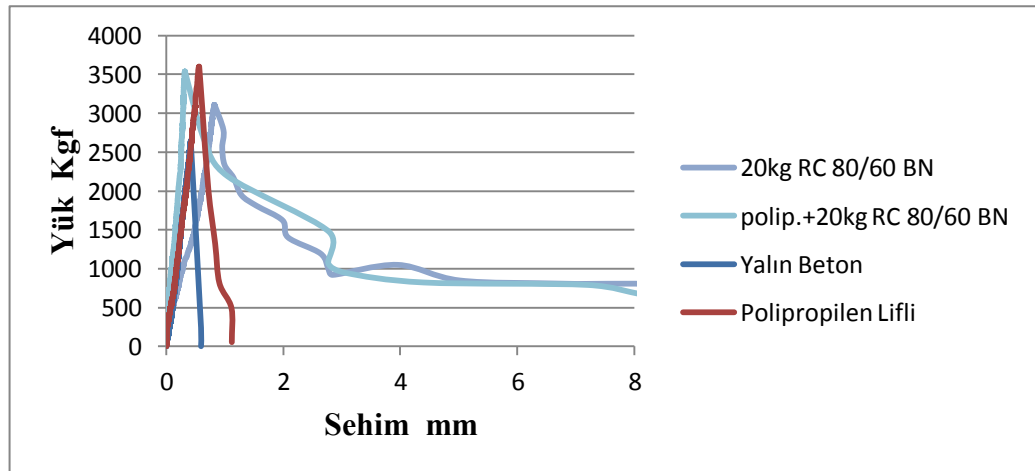
Şekil 6.7.a : Karma lifli ve lifli beton numunelerinin yük sehım eğrilerinin karşılaştırılması

2-Yalın beton numunelerinin eğilme dayanımı 4.217 MPa iken polipropilen lifli beton numunelerinin 4.759 MPa, RC 65/35 BN liflerin 20kg/m³ dozajında kullanıldığı lifli beton numunelerinin 5.158 MPa, 20kg/m³ RC 65/35 BN lif ile 500 gr/m³ polipropilen lifli betonların birlikte kullanılmasıyla elde edilen karma lifli beton numunelerinde ise 4.895 MPa'dır. Yalın beton numunelerinde göre eğilme dayanımlarındaki artış oranı polipropilen, RC 65/35 BN lifli ve karma lifli beton numunesi olarak sırasıyla %13, %23 ve %16'tir. En iyi performansı RC 35/60 BN lifli beton numunelerinin gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.7b' de karma liflerin lifli ve lifli beton numunelerinin yük sehım eğrileri birlikte gösterilmiştir.



Şekil 6.7.b: Karma lifli ve lifli beton numunelerinin yük sehim eğrilerinin karşılaştırılması

3- Polipropilen lifli beton numunelerinde eğilme dayanımı 4.759 MPa, RC 80/60 BN liflerin 20kg/m³ dozajında kullanımındaki beton numunelerin eğilme dayanımı 4.412 MPa, 20kg/m³ RC 80/60 BN lifi ile 500 gr/ m³ polipropilen lifli betonların birlikte kullanımı ile oluşan karma lifli beton numunelerindeki eğilme dayanımı ise 5.220 MPa'dır. Yalın beton numunelerine göre eğilme dayanımlarındaki artış oranı polipropilen, RC 80/60 BN lifli ve karma lifli beton numuneleri olarak sırasıyla %13, %5 ve %24'tir. En iyi performansı karma lifli beton numunelerinin gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.7c' de karma lifli ve lifli beton numunelerin yük sehim eğrileri karşılaştırma açısından birlikte gösterilmiştir.



Şekil 6.7.c: Karma lifli ve lifli beton numunelerinin yük sehim eğrilerinin karşılaştırılması

6.2.3 Tokluk Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneylerde elde edilen yük sehım grafiği altında kalan alan TS10515' e göre hesaplanmış ve tokluk indisleri bulunmuştur. Tablo 6.4' de tokluk indisleri TS 10515' göre olması gereken tokluk indisleri sınır değerleri arasında yer almıştır.

Tablo 6.4: Numunelerin şekil değiştirme indisleri

Beton Türü	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	TS 10515'de verilen kriterler		
				I ₅	I ₁₀	I ₂₀
Y	1	1	1	1	1	1
LÇM20	3.944	5.308	-	1-6	1-12	1-25
LÇM40	3.284	3.723	-	1-6	1-12	1-25
LÇ6520	3.677	5.306	7.347	1-6	1-12	1-25
LÇ6540	4.098	5.883	8.375	1-6	1-12	1-25
LÇ8020	3.891	5.500	8.207	1-6	1-12	1-25
LÇ8040	3.669	5.154	8.692	1-6	1-12	1-25
LP600	2.524	-	-	1-6	1-12	1-25
HÇMP	3.994	-	-	1-6	1-12	1-25
HÇ65P	5.733	8.903	12.104	1-6	1-12	1-25
HÇ80P	4.052	6.101	9.264	1-6	1-12	1-25

Numunelerdeki tokluk değerleri yük-sehım eğrisinde altındaki alan sehımın 8mm olduğu noktaya kadar hesaplanmıştır. Her numune sınıfından 3 adet numune hazırlanmış tokluk karşılaştırmaları her numune sınıfının ortalama tokluk değeri değerlendirilmiştir. Tüm numunelerin tokluk değerleri Tablo 6.5'de verilmiştir.

Tablo 6.5: Numunelerin tokluk değerleri

Beton Türü	1.Numune Tokluk (KN mm)	2.Numune Tokluk (KN mm)	3.Numune Tokluk (KN mm)	Ortalama Tokluk (KN mm)
Y	7.266	10.826	10.542	9.544
LÇM20	24.389	21.417	25.556	23.787
LÇM40	14.886	33.980	27.301	25.389
LÇ6520	89.829	87.515	94.467	90.603
LÇ6540	96.566	83.199	99.537	93.101
LÇ8020	90.711	85.883	98.900	91.831
LÇ8040	89.171	118.179	122.995	110.115
LP	9.326	10.169	13.062	10.852
HÇMP	38.011	42.766		40.388
HÇ65P	102.960	95.408		99.948
HÇ80P	97.948	107.461		102.704

Gözlemlenen tokluk değerleri sonuçlarının yalın beton numunesine göre değişimleri;

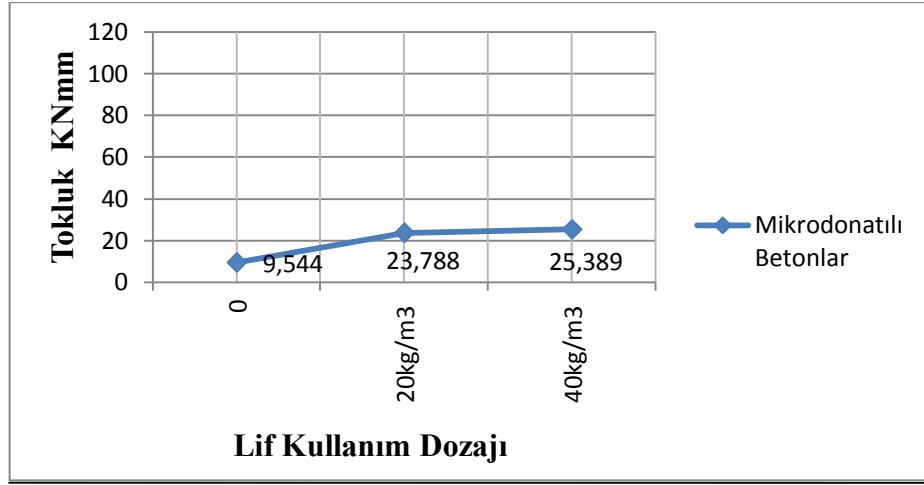
- LÇM20 (20kg/m³ mikro donatılı beton numunesinde) % 149 artış
- LÇM40 (40kg/m³ mikro donatılı beton numunesinde) % 166 artış
- LÇ6520 (20kg/m³ RC 35/60 lifli beton numunesinde) % 849 artış
- LÇ6540 (40kg/m³ RC 35/60 lifli beton numunesinde) % 875 artış
- LÇ8020 (20kg/m³ RC 80/60 lifli beton numunesinde) % 862 artış
- L8Ç040 (40kg/m³ RC 80/60 lifli beton numunesinde) % 1053 artış
- LP600 (polipropilen lifli beton numunesinde) % 14 artış
- HÇMP(Karma Lif=polipropilen+mikrodonatı) % 324 artış
- HÇ65P(Karma Lif =polipropilen+RC 35/60) % 947 artış
- HÇ80P(Karma Lif =polipropilen+RC 80/60)% 976 artış ile sonuçlanmıştır.

6.2.3.1 Lifli Beton Numunelerinin Tokluklarının Lif Oranı Açısından Karşılaştırılması

1-Mikro Donatılı Beton Numunelerinde :

Yalın beton numunesinin tokluk değeri 9.544 KNmm iken 20kg/m³ mikro donatı beton numunesinin tokluk değeri 23.787 KNmm olmaktadır. Aynı lif türünün 40kg/m³ oranında kullandığımızda numunenin tokluk değeri 25.389KNmm olmaktadır. Bu da mikrodonatılı beton numunelerinin 40kg/m³ lif dozajının 20kg/m³ lif dozajına göre daha iyi enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

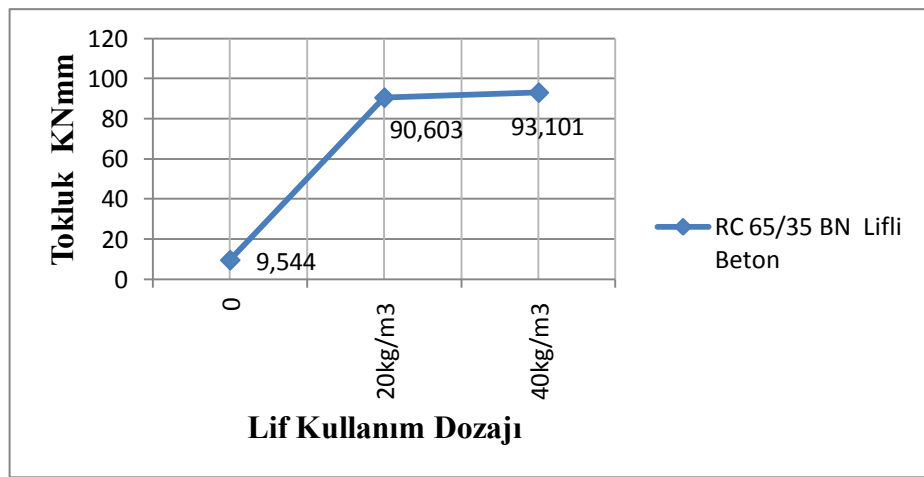
Şekil 6.8a' da mikrodonatılı beton numunelerinin farklı lif oranında kullanımında elde edilen tokluk değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.8.a: Farklı lif oranındaki mikrodonatılı beton numunelerinin tokluk değerleri

2-RC 65/35 BN Çelik Lifli Beton Numunelerde

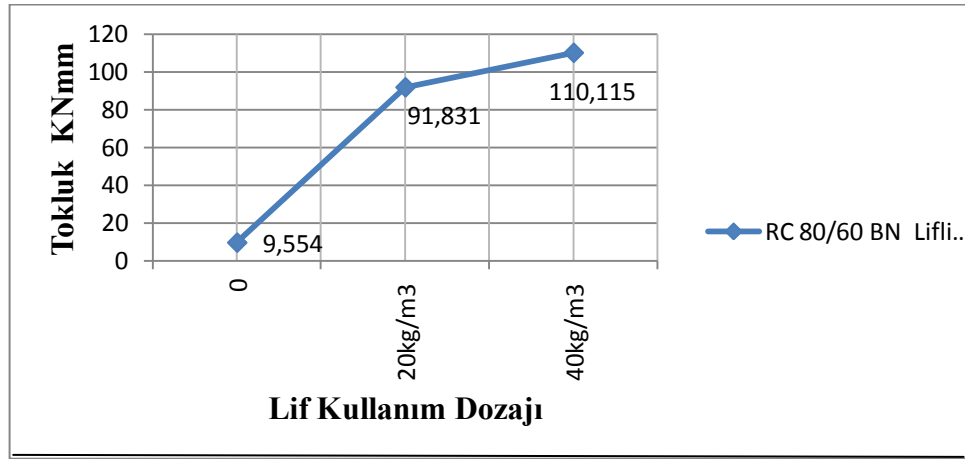
Yalın beton numunesinin tokluk değeri 9.544 KNmm iken 20kg/m³ RC 35 /60 BN lifli beton numunesinin 90.603KNmm, aynı lif tipinin 40kg/m³ oranında kullanımında elde edilen örneğinin tokluk değeri 93.101 MPa'dır. Bu da artan lif hacminin tokluk değerini de arttırdığını Şekil 6.8.b'deki gibi göstermektedir.



Şekil 6.8.b: Farklı lif oranındaki RC 65/35 BN lifli beton numunelerinin tokluk değerleri

3-RC 80/60 BN Çelik Lifli Beton Numunelerinde

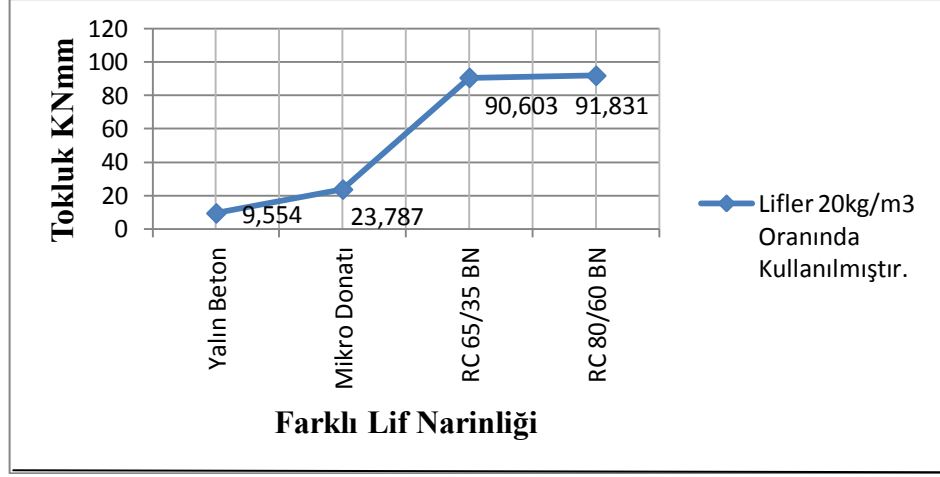
Yalın beton numunesinin tokluk değeri 9.544 KNmm iken RC 80/60 BN lifli beton numunelerinde 20kg/m^3 lif oranında kullanımında tokluk değeri 91.831KN mm, aynı lif tipinin 40kg/m^3 kullanımındaki örneğinde elde edilen tokluk değeri 110.115 KNmm'dir. RC 80/60 BN lifli beton numunesinin 20kg/m^3 lif dozajı kullanımıyla tokluk değeri yalın betonunkine göre %862 artarken iken aynı lif 40kg/m^3 dozajında kullanıldığında tokluk değeri % 1053 artış göstermiştir. Bu lif tipinin kullanımındaki numunelerde lif hacminin artmasıyla şekil 6.8.c'de gösterildiği gibi tokluk değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8.c: Farklı lif oranındaki RC 80/60 BN lifli beton numune tokluk değerleri

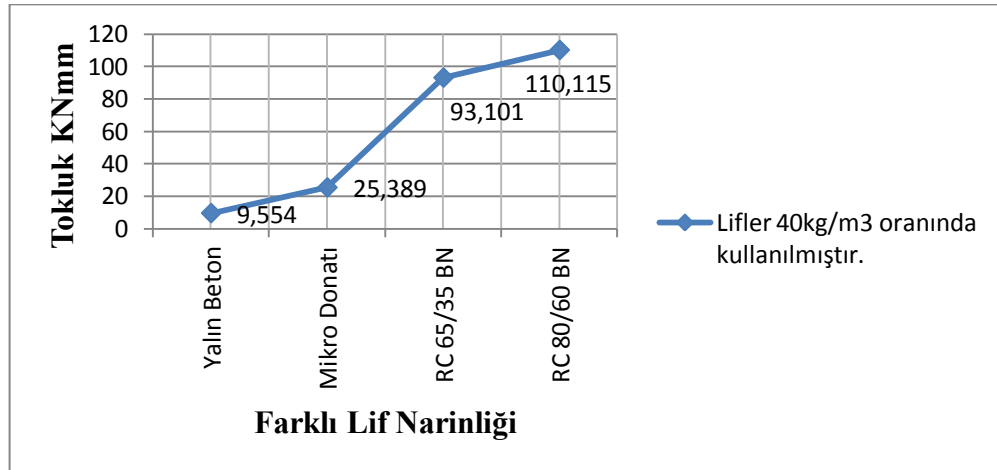
6.2.3.2 Lifli Beton Numunelerinin Tokluklarının Lif Narinliği Açısından Karşılaştırılması

1-Yalın beton numunelerin tokluk değeri 9.544KN mm iken farklı liflerin 20kg/m^3 dozajında kullanıldığında mikrodonatılı beton numunelerinde 23.787 KN mm, RC 65/35 BN lifli beton numunelerinde 90.603 KN mm, RC 80/60 BN lifli betonlarda 91.831 KN mm olduğunu görülmüştür. Lifli beton numunelerinin yalın beton numunesine göre tokluk değerlerindeki artış oranı numunelerdeki lif narinliklerin küçükten büyüğe doğru bir şekilde sıralanmasıyla % 149, % 849 ve %862'tir. 20kg/m^3 lif dozajındaki liflerin artan narinlikleriyle tokluk değerlerinin de arttığı şekil 6.9.a'da gösterilmektedir.



Şekil 6.9.a : Aynı lif oranındaki farklı lifli beton numunelerin tokluk değerlerinin karşılaştırılması

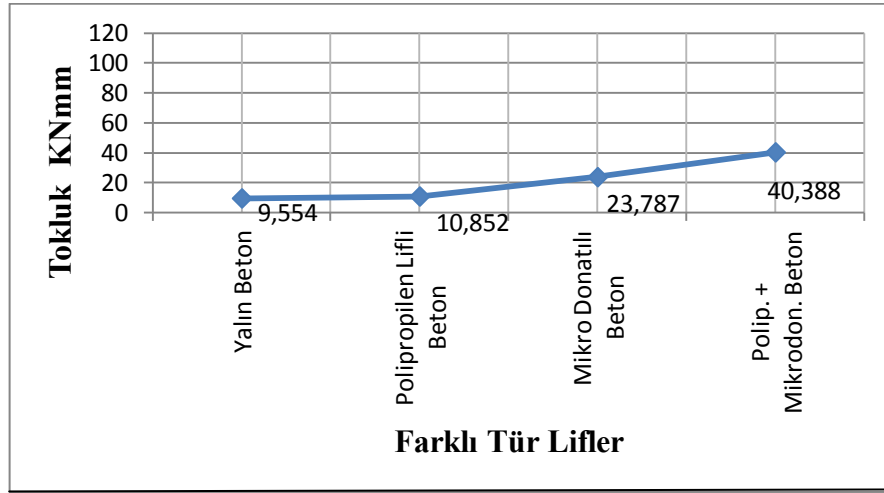
2-Farklı liflerin 40kg/m^3 dozajında kullanıldığında mikrodonatılı beton numunelerinde tokluk değeri 25.389KN mm , RC 65/35 BN lifli beton numunelerinde 93.101 KN mm , RC 80/60 BN lifli beton numunelerinde 110.115 KN mm olduğunu görülmüştür. Lifli beton numunelerinin yalın beton numunesine göre tokluk değerlerindeki artış oranı narinliklerin küçükten büyüğe doğru bir şekilde sıralanmasıyla %166, %875 ve %1053'tür. 40kg/m^3 lif dozajındaki lifli beton numunelerinin, artan lif narinlikleriyle tokluk değerlerinin de arttığı şekil 6.9.b'de gösterilmektedir.



Şekil 6.9.b: Aynı lif oranındaki farklı lifli beton numunelerinin tokluk değerleri

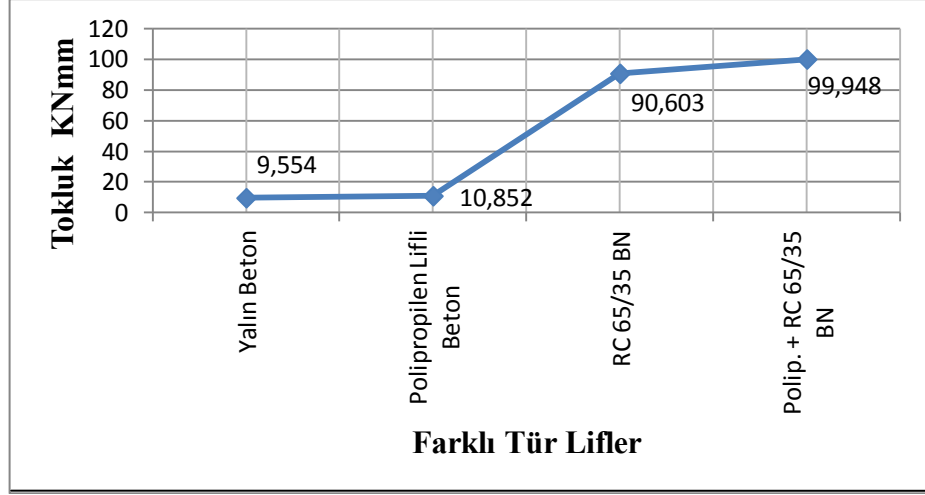
6.2.3.3 Karma Lifli Beton Numunelerinin Lifli Beton Numuneleriyle Tokluklarının Karşılaştırılması

1-Yalın beton numunelerinin tokluk değeri 9.544 KNmm iken polipropilen lifli beton numunelerinin tokluk değeri 10.852 KNmm, 20kg/m³ dozajında mikrodonatılı beton numunesinin 23.787 KNmm, 20kg/m³ mikro donatı ile 500 gr/m³ polipropilen lifli betonların birlikte kullanılmasıyla elde edilen karma lifli beton numunelerinin ise 40.388 KNmm. Yalın beton numunesine göre tokluk değerindeki artış oranı polipropilen, mikro donatılı ve karma lifli beton numuneleri olarak sırasıyla %14, %149 ve %324'tür. Tokluk açısından en iyi performansın Şekil 6.10.a'daki gösterildiği gibi karma lifli beton numunelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



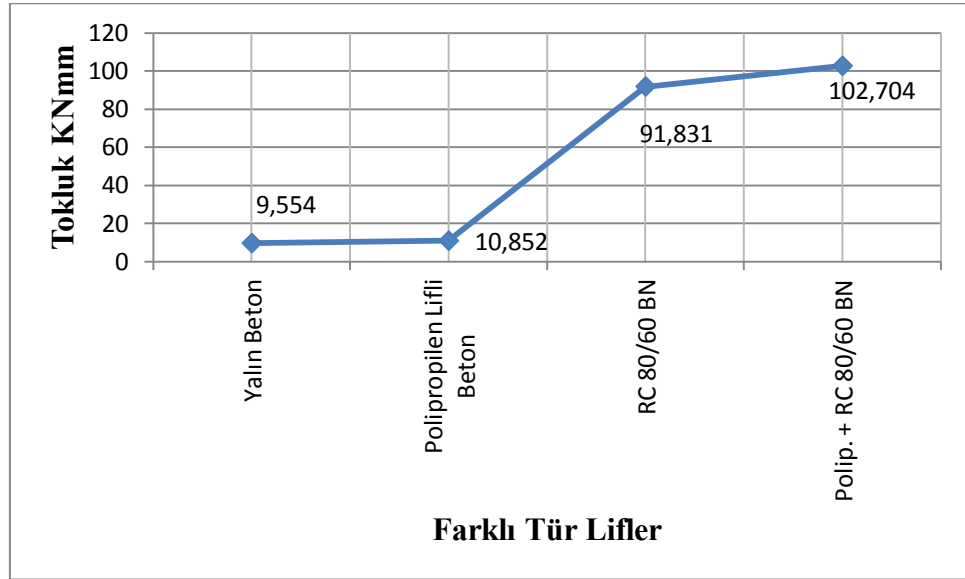
Şekil 6.10.a: Karma lifli ve lifli beton numunelerinin tokluklarının karşılaştırılması

2-Yalın beton numunesinin tokluk değeri 9.544 KNmm iken iken polipropilen lifli beton numunesinin tokluk değeri 10.852 KNmm, RC 65/35 BN liflerin 20kg/m³ dozajında kullanıldığı beton numunelerinde tokluk değeri 90.603 KN mm, 20kg/m³ RC 65/35 BN ile 500 gr/m³ polipropilen liflerin birlikte kullanıldığı karma lifli beton numunelerinde tokluk değeri ise 99.948 KNmm 'dır. Yalın beton numunesine göre tokluk değerlerindeki artış oranı polipropilen, RC 65/60 BN lifli ve karma lifli beton numuneleri olarak sırasıyla %14, % 849 ve %947'tir. Tokluk açısından en iyi performansı karma lifli beton numunelerinin olduğu şekil 6.10.b gösterildiği gibi gözlemlenmiştir.



Şekil 6.10.b: Karma lifli ve lifli beton numuneleri tokluklarının karşılaştırılması

3-Yalın beton numunelerinin tokluk değeri 9.544 KN mm iken, polipropilen lifli beton numunelerinin tokluk değeri 10.852 KN mm, RC 80/60 BN liflerin 20kg/m^3 dozajında kullanıldığı beton numunelerdeki tokluk değeri 91.831 KN mm, 20kg/m^3 RC 80/60 BN lifleri ile 500 gr/m^3 polipropilen lifli betonların birlikte katılmasıyla oluşan karma lifli beton numunelerinde ise 102.704 KN mm dir. Tokluk açısından en iyi performans şekil 6.10.c'deki gibi karma lifli beton numunelerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.10.c: Karma lifli ve lifli beton numuneleri tokluklarının karşılaştırılması

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Sonuç

Sabit su/çimento oranında farklı narinlikte, farklı hacim oranlarında olan farklı lifler kullanılarak elde edilen lifli beton ve karma lifli beton numunelerinin mekanik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Normal betona lif ilave etmek suretiyle beton numunelerinin şekil değiştirme, basınç ve eğilme dayanımı ve tokluk gibi beton numunelerinin mekanik özelliklerini karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Liflerin beton basınç dayanımı üzerine önemli bir katkısı olmadığı saptanmıştır. Hatta polipropilen lifli, RC 80/60 BN çelik lifli ve karma lifli beton numunelerinde artan lif hacimleri ile beton basınç dayanımlarında azalma eğiliminde oldukları görülmüştür. Bu durum, liflerin beton içerisinde homojen dağılmamasının ve artan lif oranı ile birlikte topaklaşma sonucunda betonda boşluk oluşmasının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir. Lifli betonların basınç dayanımına olan etkisi hakkında bir genelleme yapılamamıştır.

Liflerin basınç dayanımlarına olduğu gibi betonun elastisite modüllerine de pek bir katkısının olmadığı saptanmıştır. Bazı beton numunelerinde az da olsa artış olsa da genelde azalma görülmüştür. Özellikle karma lifli beton numunelerde elastik modülünde azalma gözlemlenmiştir.

Genel olarak tüm lifli beton numunelerinde eğilme dayanımı yalın beton numunelerinkine göre artış göstermiştir. Polipropilen liflerin kullanıldığı numunelerde eğilme dayanımı az bir artış göstermesine rağmen çelik lifli ve karma lifli beton numunelerinde artış oranı daha fazladır. Eğilme dayanımındaki en iyi iyileşmeyi karma lifli beton numuneler göstermiştir. Çelik lifli betonlarda genel bir artış olmakla birlikte eğilme dayanımındaki iyileşmeyi düzenli bir şekilde sınıflandırmak oldukça güçtür. 20 kg/m³ lif dozajında kullanılan Mikro donatılı ve RC 65/35 BN çelik lifli beton numunelerdeki eğilme dayanımı 40kg/m³ lif dozajında

kullanılanlardan daha iyi bir performans göstermiştir. RC 80/60 BN lifli beton numunelerde ise eğilme dayanımı artan lif oranıyla belirgin artış göstermiştir. Ancak tüm numunelerde artan lif oranının eğilme dayanımında belirgin bir artış göstermediği anlaşılmıştır.

Lifli beton numunelerinde lif narinliği ve lif boyunun artmasının eğilme dayanımı üzerinde düzenli olarak etkili olmadığını gözlemlenmiştir. Uzun lifli beton numunelerde eğilme dayanımı artışında iyi bir performans göstermişken mikro donatılı beton numunelerde eğilme dayanımı da aynı performansı göstermiştir. Bunun nedeni de kısa liflerin ilk çatlak dayanımı ve maksimum çatlak yükünü diğer liflere göre daha çok arttırmasıdır. Kısacası lif narinliğinin artmasıyla eğilme dayanımında belirgin bir artış olmadığı gözlemlenmiştir. Karma lifli beton numunelerinin eğilme dayanımları genel olarak lifli beton numunelerine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımındaki en iyi performansı 40 kg/m^3 lif oranıyla RC 80/60 BN lifli beton numunelerinde daha sonra ise karma lifli olan Polip.+ RC 80/60 BN lifli beton numunelerinde gözlemlenmiştir.

Eğilme dayanımı sonuçlarının normal beton numunelerine göre genel bir artış göstermesine rağmen, ilk çatlamadan sonra liflerin betonun bir anda kırılmasını engellediği ve kısa süre de olsa dayandığı gözlemlenmiştir. Bu gözlem sonucunda, yük-deplasman eğrisinin altındaki alanın, yani lifli beton numunelerinin tokluğunun normal beton numunelerine göre daha fazla olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Enerji yutma kapasiteleri bakımından uzun lifin kısa life göre daha fazla enerji absorbe etme yeteneğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çelik lifli betonlarda en büyük tokluk artışı lif narinliği en büyük olan RC 80/60 BN tipi lifli beton numune elde etmiştir.

Tokluk indekslerinin TS 10515’de lifli betonda I_5 , I_{10} ve I_{20} için elastik şekil değiştirme indekslerinin değerlendirme kriterlerinde belirtilen aralıklar arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Çelik lifler ile güçlendirilmiş normal betonlarda lif miktarının artışı ile tokluk yani enerji yutabilme yeteneğini arttırdığını göstermiştir. Çelik liflerin 40 kg/m^3 lif oranı olan betonların tokluk değerlerinin 20 kg/m^3 lif oranına göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Lifli betonlarda artan lif hacminin tokluğu da arttırdığı ve en iyi performansın karma lifli beton numunelerde olduğu gözlemlenmiştir.

Karma lifli betonlarda liflerin birlikte kullanılmasının lifli betonlara göre toklukta daha etkili olduğu görülmüştür. Enerji yutma kapasitesi, farklı lif katkısı ile katkısız numuneye göre oran olarak % 14 ile % 1053 arasında artmış, sünek davranışı olumlu yönde etkilenmiştir. Çelik lif katkısının 40 kg/m^3 olduğu RC 80/60 BN çelik lif tipli beton numuneleri ve karma lifli beton numuneleri enerji yutma kapasitesi açısından iyi sonuçlar vermiştir.

7.2 Öneriler

- 1-Deney esnasında liflerin kopmadığı betondan sıyrıldığı görülmüştür. Beton matrisini liflere daha çok aderans sağlayıcı bazı çalışmalar yürütebilir. Böylece daha büyük eğilme dayanımı ve tokluk kapasitesine ulaşılabilir.
- 2-Liflerin betona farklı doğrultu ve yönlerde eklendiğinde mekaniksel özellikler üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- 3-Çatlak kontrolünü maksimum düzeye getirebilmek için farklı boyuttaki birçok lifleri birlikte kullanarak daha iyi mekaniksel davranış elde etmek için araştırmalar yapılabilir.
- 4- Literatürde kullanılmamış başka metal lifler betona katılarak lifli betonun mekanik özellikleri incelenebilir.
- 5- Bölgesel (local) olarak liflendirilmiş bir kompozitin (örneğin temel kolon birleşiminde sadece kolon betonunu liflendirmek ya da kirişlerin sadece kesme bölgesinin liflendirilmesi) betonun mekanik özellikleri incelenebilir.

8. KAYNAKÇA

- [1] Alkan, G., “Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul, (2004).
- [2] Doğangün, A., *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*, İstanbul: Birsen, 67-68, (2009).
- [3] Aral, M., “Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı- Bir Optimum Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul, (2006).
- [4] ACI Commitee 544,” *State of The Art-Report On The Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete*” Concrete International March, (2010).
- [5] Gencil, O., “Farklı Lif Tipi ve Miktarının Beton Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, Afyon, (2006).
- [6] Altun, F., Yılmaz, C., Durmuş, A., Arı, K., “Çelik Lif Katkılı Ve Katkısız Betonarme Kirişlerin Basit Eğilme Ve Patlama Yükleme İle Davranışlarının İncelenmesi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 22(1-2), 112-120, (2006).
- [7] Ünal, O., Uygunoğlu, T., Gençel, O., Çelik Liflerin Beton Basınç ve Eğilme Özelliklerine Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 13, Sayı 1, Sayfa 25-30, Denizli, (2007).
- [8] Yıldırım,S.T.,“Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, Elazığ, 193s, (2002).

[9] Yıldırım, M.A., “Hafif ve Yarı Hafif Betonlarda Çelik Lif Kullanımının Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul, 64s., (1994).

[10] Nili, M., and Afroughsabet ,V., “Combined Effect of Silica Fume and Steel Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete”, *International Journal of Impact Engineering* 37, 879-886, (2010).

[11] Yiğiter, H., “Yüksek Performanslı Betonların Süneklik Özelliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, , 207s, İzmir, (2002).

[12] Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı. *İTÜ Dergisi/d Mühendislik* 1(2), 1-11, (2002).

[13] Ünal, B., “Çelik Tel ve Polipropilen Lif İçerikli Beton Yolların Mekaniksel Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, 71s., Kayseri (2003).

[14] Tabak, V., “Çelik Lifli Betonda Lif ve Lif Boy/Çap Oranlarının Değişiminin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi”,Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, 134s., İzmir, (2004).

[15] Yaprak H., Şimşek O. ve Öneş A. , Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi, *Politeknik Dergisi*,7(4), 353-358, (2004).

[16] Yalçın M., Taşdemir C. ve Taşdemir M. A., Çelik lif donatılı betonların performans sınıflarının belirlenmesi, *İtü Dergisi*,8(6), 97-108, (2009).

[17] Yiğiter H., Türkel S., “Çelik Lif Kullanımının Yüksek Performanslı Betonların Süneklik Özelliğine Etkisi”, *D.E.Ü. Müh. Fak. İnş. Müh. Böl. Kaynaklar Kamp.* 35160 Buca İzmir.

[18] Altun F., Özcan D. M., Vekli M. ve Haktanır T., “Çelik Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Taşıma Gücünün Deneysel İncelenmesi”*ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, , Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, (2002).

[19] Berbergil V. “Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Çelik Lif Kullanımının İşlenebilirliğe Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 55s, İstanbul, (2006).

[20] Karahan O., “ Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri”, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, (2006).

[21] Altun F., Aktaş B. “Çelik Tel Katkılı Hafif Betonun Eğilme Tokluğunun İncelenmesi”, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(2), (2011).

[22] Çivici F., “İki Eksenli Eğilme Altında Lifli Betonların Davranışı”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 151s., Balıkesir, (2002).

[23] Çivici F., “Çelik Lif Donatılı Betonların Eğilme Tokluğu”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*,12(2),183-188, (2006).

[24] Özcan D. M., “Betonarme Kiriş Elemanlarda Çelik Lif Katkısının Taşıma Gücüne Etkisinin Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, (2003).

[25] Bunsell, A.R., Fiber Reinforcement for Composite Materials, Vol:2 *Composite Materials Series*, Elsevier Science, The Netherlands, (1988).

[26] Ekincioglu, Ö., “Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı-Bir Optimum Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul, (2003).

[27] İpek, G., “Beton Büz Üretiminde Farklı Liflerin Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, (2007).

[28] Kurt G., “Lif İçeriği ve Su Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışa Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2006).

[29]. Bahadır F., “ Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 64s., Eskişehir, (2010).

[30] ASTM 1116-C 10a Standart Specification for Fiber-Reinforced Concrete, (2010).

[31] Erbaş, M., , “Lif Donatılı Betonlar”, *Hazır Beton Dergisi*, Ocak-Şubat, 68-78, (1999).

[32] BEKAERT, 1998. Duomix Hakkında Genel Bilgier Klavuzu. Bekaert, Belgium. Beksa Firması, Çelik Tel Takv.Bet.Özl., Beksa Broşürleri Basımevi, İzmit, (1998).

[33] Aktürk M., “Polipropilen Lif Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Performans Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 132s, Konya, (2007).

[34] YERLİKAYA, M., Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları. *Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 302-304, (2003).

[35] TS 10513 Çelik Teller, Beton Takviyesinde Kullanılan, (1982).

[36]. Gül, R., “Çelik Liflerin Hafif Betonların Dayanımları Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 112s, Erzurum,(2001).

[37] Yazıcı Ş., Sezer G. İ., “Çelik Lifli Betonların Darbe Direncine Agrega Maksimum Boyutunun ve Kökeninin Etkisi”, *Tubitak Araştırma Projesi, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43s, İzmir, (2007).

[38] Durmaz B., “Bölgesel Basınca Maruz Lifli Betonlarda Yatak Mukavemeti”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 61s, Elazığ, (2007).

[39] T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, MLZ-878, *Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton*, Ankara, (1994).

[40] Özyurt, N., Karma Lifli Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışı, Doktora Tez Önerisi, İTÜ İnşaat Fakültesi, (2002).

- [41] Taşdemir M.A., Kocatürk, A.N., Haberveren, S. ve Aslan, G., Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar*, 16-18, 447- 457, İstanbul, (2005).
- [42] Betterman, L.R., Ouyang, C. And Shah, S.P., Fiber-Matrix Interactionbin Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*,b2, 53–61, (1995).
- [43] Yao, W., Li, J. And Wu, K., Mechanical Properties of Hybrid Fiber- Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction, *Cement and Concrete Research*, 2157, 1-4, (2002).
- [44] Qian, C., Stroven, P., Fracture properties of concrete reinforced with steel polypropylene hybrid fibers, *Cement and Concrete Composites*, 22, 343-351, (2000).
- [45] Qian, C., Stroven, P., Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 63-69, (2000).
- [46] Lawler, J.S., Wilhelm, T., Zampini, D., Shah, S.P., Fracture process of Hybrid Fiber- Reinforced Mortar, *Materials and Structures Journal*, 36, 197-208, (2002).
- [47] Komlos, K., Babal, B. and Nürnbergerova, T., Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Under Repeated Loading, *Nuclear Engineering and Design*, 156, 195-200, (1995).
- [48] Kim, N.W., Saeki, N. and Horiguchi, T., Crack and Strength Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Early Ages, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 21, (1999).
- [49] Banthia, N. and Nandakumar, N., Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites, *Cement and Concrete Composites*, 25, 3-9, (2003).

- [50] Sato, Y., Van Mier, J.G.M. and Walraven, J.C., Mechanical Characteristics of Multi-Modal Fiber Reinforced Cement Based Composites, *Fifth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 13-15 September, (2000).
- [51] Bantia, N., Yan, N., Bindiganalive, V., Development and Application of High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, *Fifth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 13-15 September, (2000).
- [52]. Balaguru, P. B. and Shah, S. P., Fiber-Reinforced Cement Composites, *McGraw-Hill, Inc.*, (1992).
- [53]. Tekdemir, F., “Çelik Lif Katkılı Betonlara Sıcaklık Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Anabilim Dalı, 55s, Kayseri, (2007).
- [54] TS 10515, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu, (1992)
- [55] Elmacı, Ö, “Farklı Oranlardaki Lifli Betonlarda Saklama Koşullarının Beton Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, AKÜ, Afyon, (2005).
- [56] TS 802 Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, (2009).
- [57] TS EN 933-1 Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu, (2012).
- [58] TS EN 1097-6/ A1 Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Sun Emme Oranının Tayini, (2007).
- [59] TS 706 EN 12620+A1- Beton Agregaları, (2009).

[60] TS EN 197-1 Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri, (2012).

[61] TS EN 934-2 Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet İçin- Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları- Tarifler, Gereker, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, (2011).

[62] TS EN 1008 Beton- Karma Suyu- Numune Alma, Deneyle ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, (2003).

[63] TS 10514 Beton Çelik Tel Takviyeli- Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, (1992).

[64] TS 1247 Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında), (2005).

[65] TS 1248 Betonun Hazırlanması, Dökümü ve Bakım Kuralları- Anormal Hava Koşullarında, (2012).

[66] TS EN 12390-4 Beton- Sertleşmiş Beton Deneyle- Bölüm 4: Basınç Dayanımı- Deneyle Makinelerinin Özellikleri, (2002).

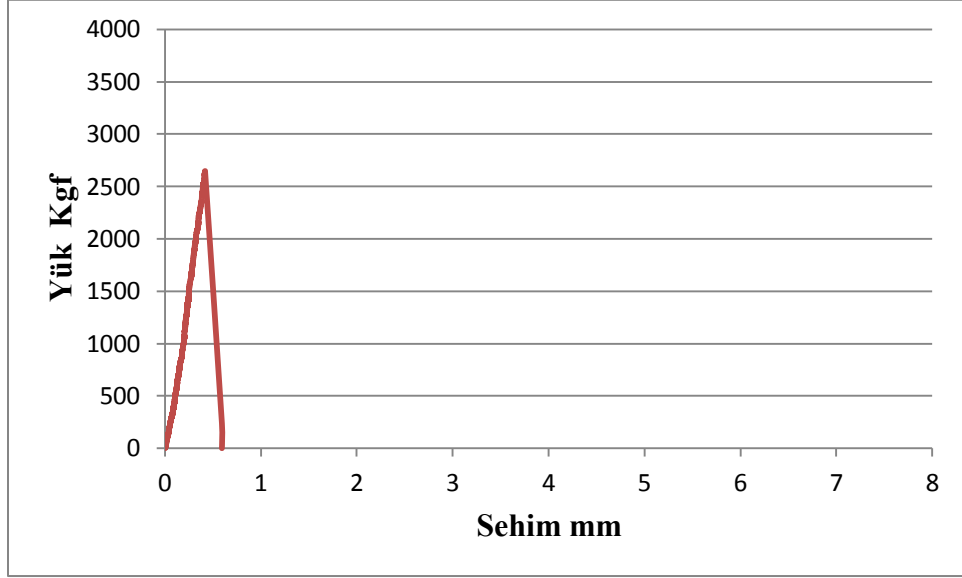
[67] TS EN 12390-3 Beton- Sertleşmiş Beton Deneyle- Bölüm 3: Deneyle Numunelerin Basınç Dayanımı Tayini, (2010).

[68] TS EN 12390-5 Beton- Sertleşmiş Beton Deneyle- Bölüm 5: Deneyle Numunelerin Eğilme Dayanımı Tayini, (2010).

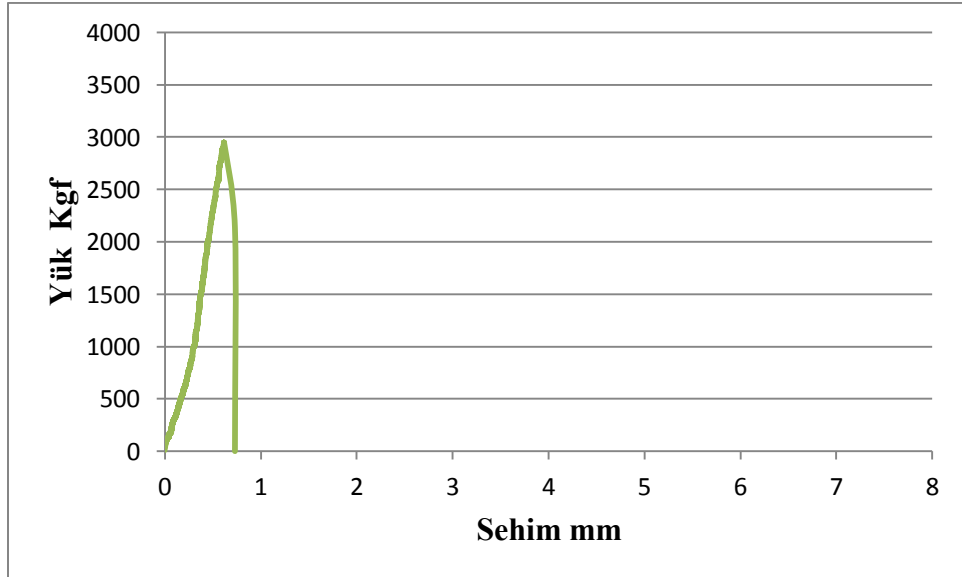
[69] JSCE-SF4 Japon Anonymous, JSCE SF-4, Standards For Tests Methods of Fiber Reinforced Concrete, Japan Concrete Institute, 45-51, (1984).

EKLER

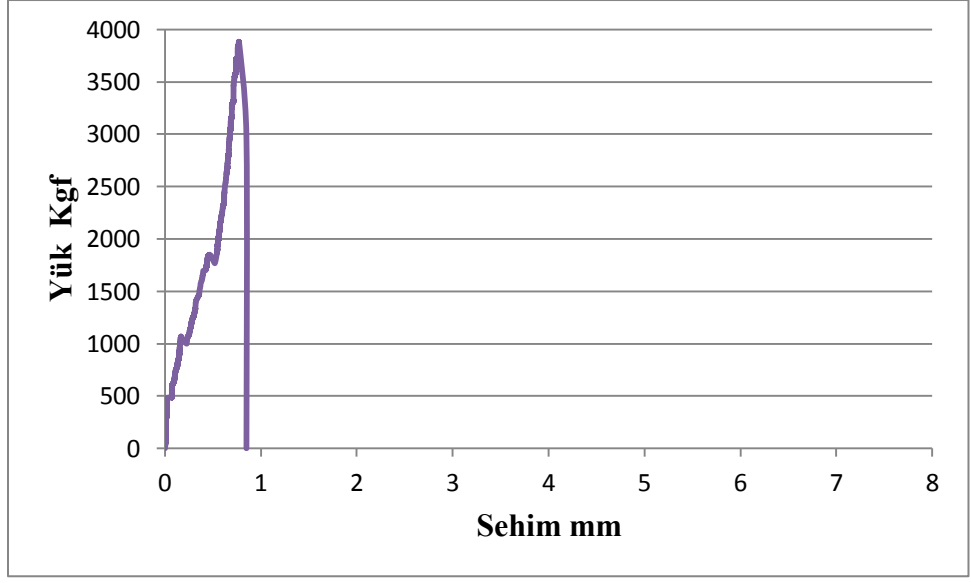
9.1 EK A: Beton Numunelerinin Eğilme Deneyi Sonuçları



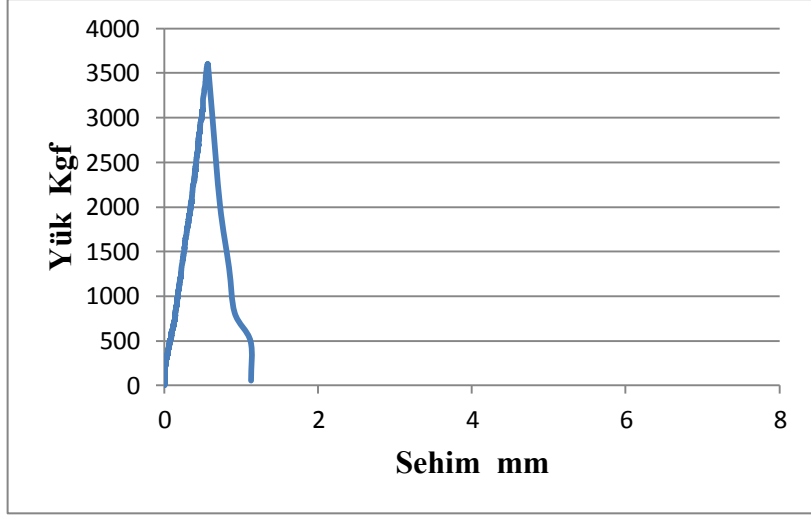
Şekil 1a: Yalın beton numune no 1 yük sehim eğrisi



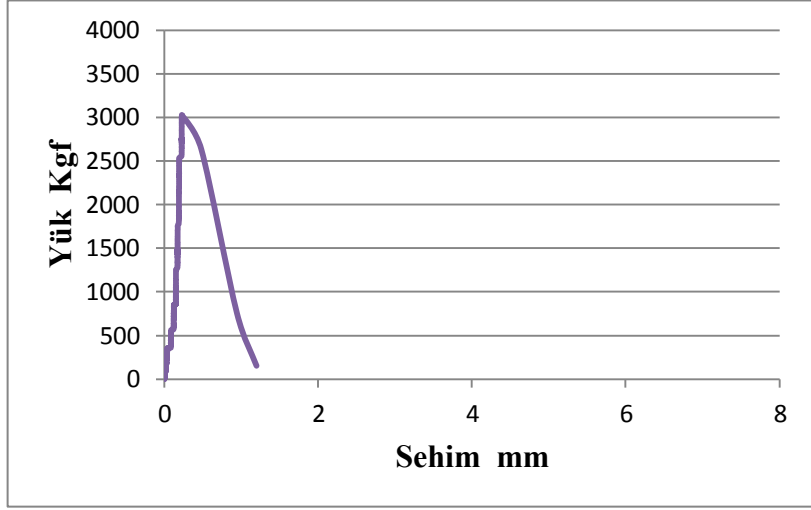
Şekil 1b: Yalın beton numune no 2 yük sehim eğrisi



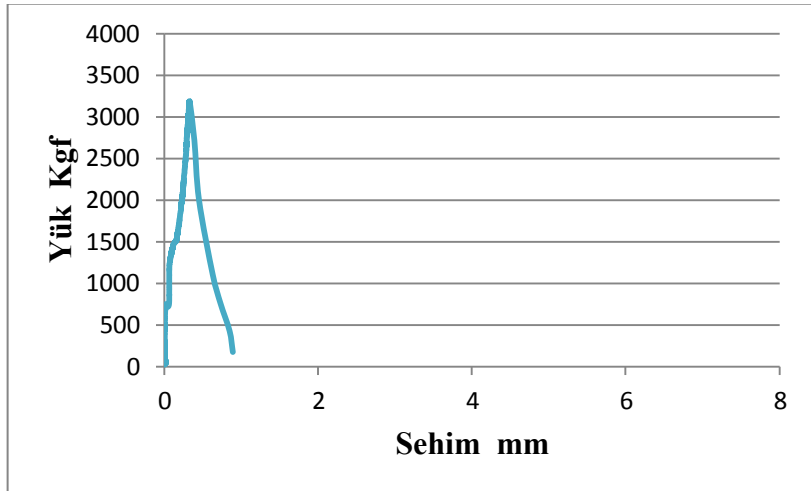
Şekil 1c: Yalın beton numune no 3 yük sehim eğrisi



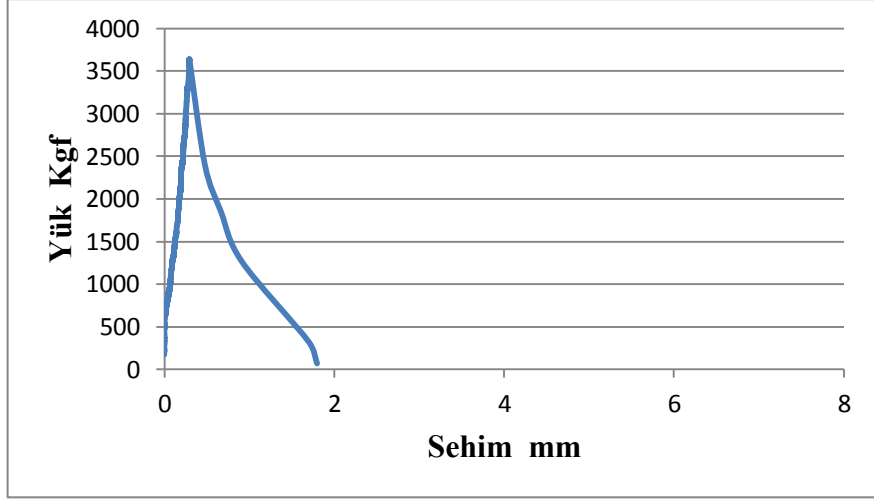
Şekil 2a: Polipropilen lifli beton numune no 1 yük sehim eğrisi



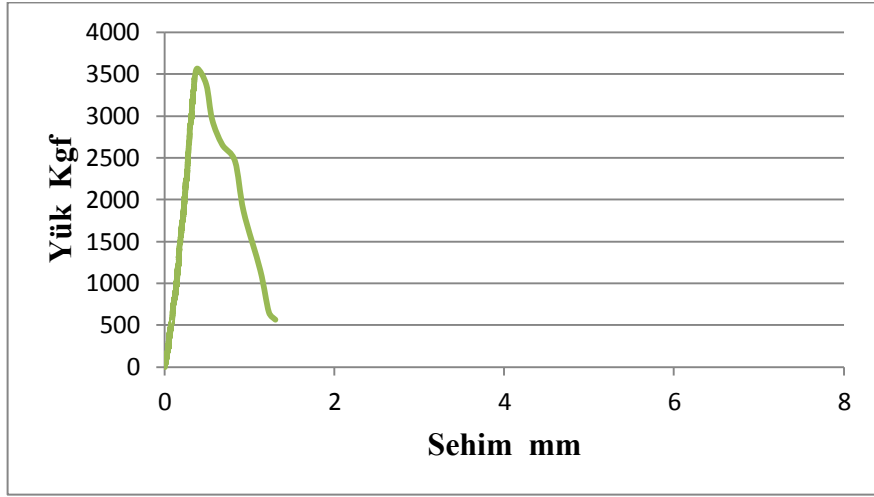
Şekil 2b: Polipropilen lifli beton numune no 2 yük sehim eğrisi



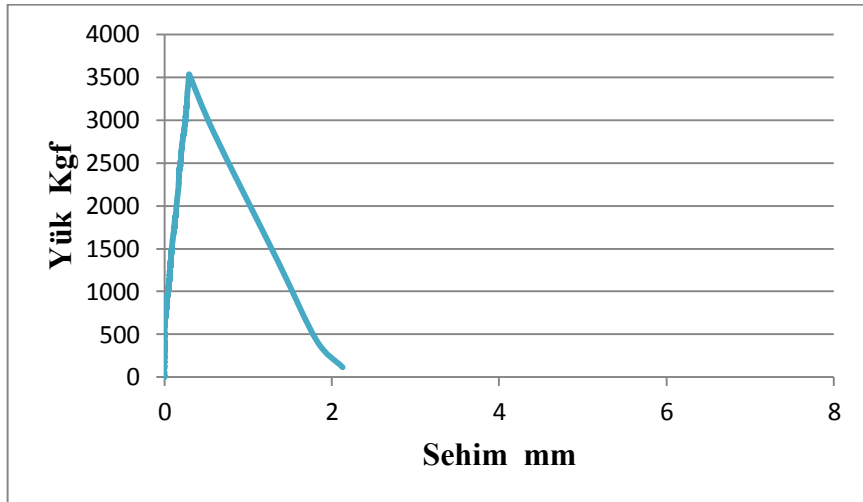
Şekil 2c: Polipropilen lifli beton numune no 3 yük sehim eğrisi



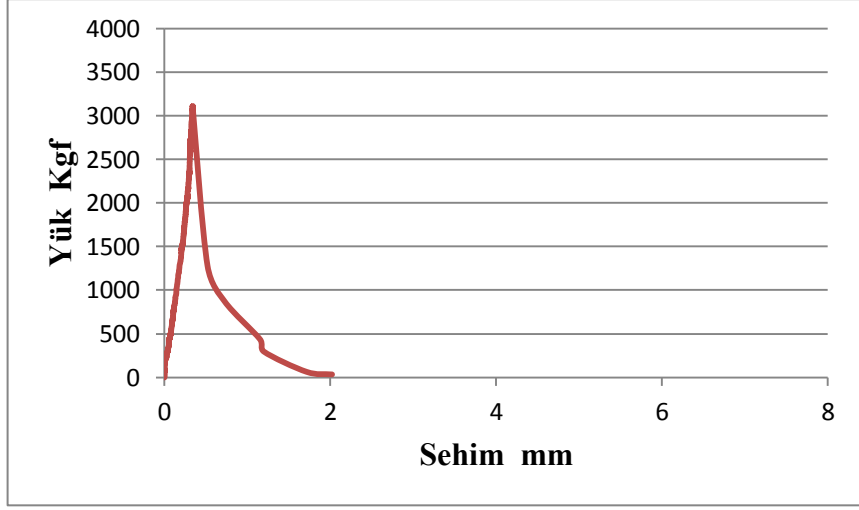
Şekil 3a: 20 kg/m³ mikrodonatılı beton numune no 1 yük sehim eğrisi



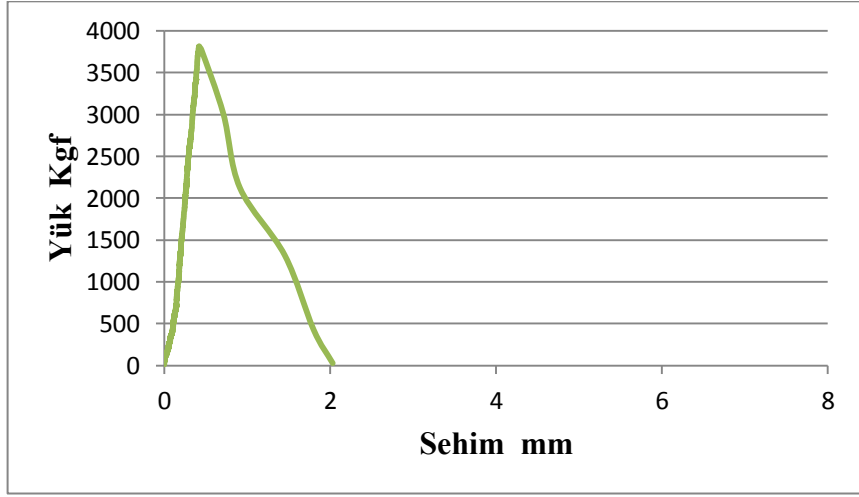
Şekil 3b: 20 kg/m³ mikrodonatılı beton numune no 2 yük sehim eğrisi



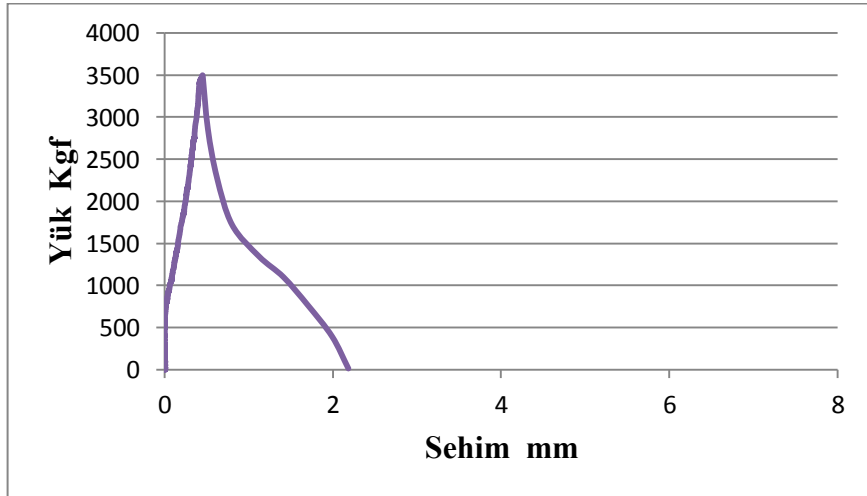
Şekil 3c: 20 kg/m³ mikro donatılı beton numune no 3 yük sehim eğrisi



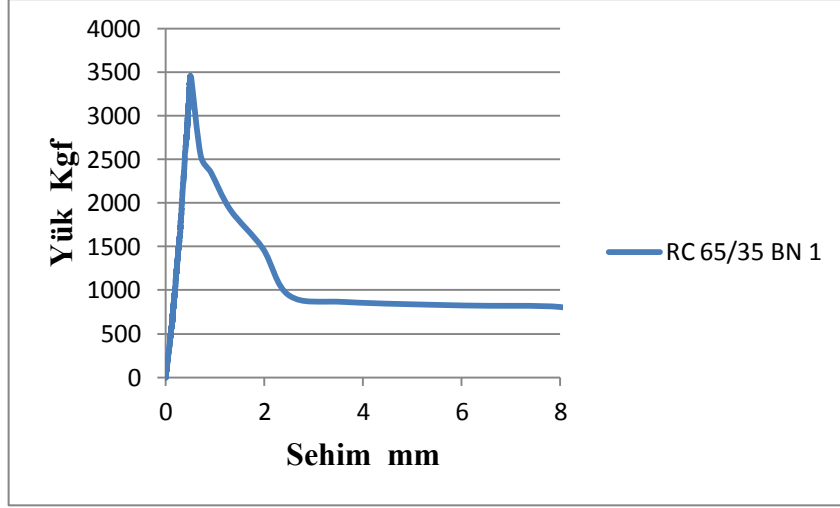
Şekil 4a: 40 kg/m³ mikro donatılı beton numune no 1 yük sehim eğrisi



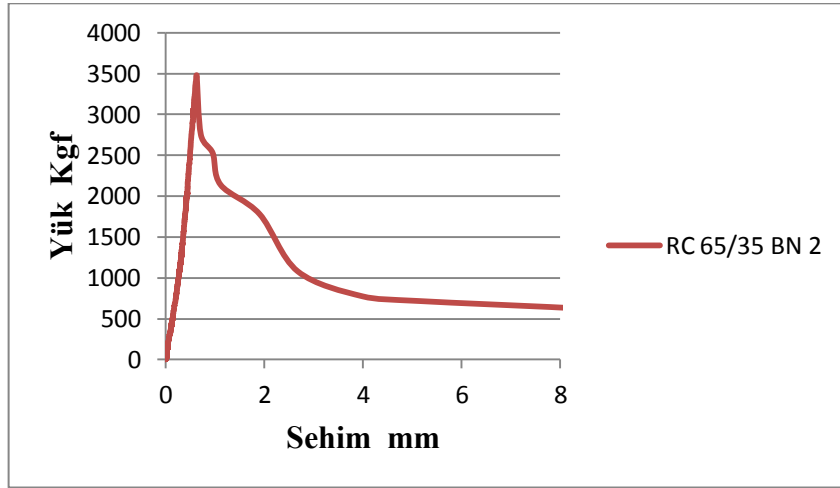
Şekil 4b: 40 kg/m³ mikro donatılı beton numune no 2 yük sehim eğrisi



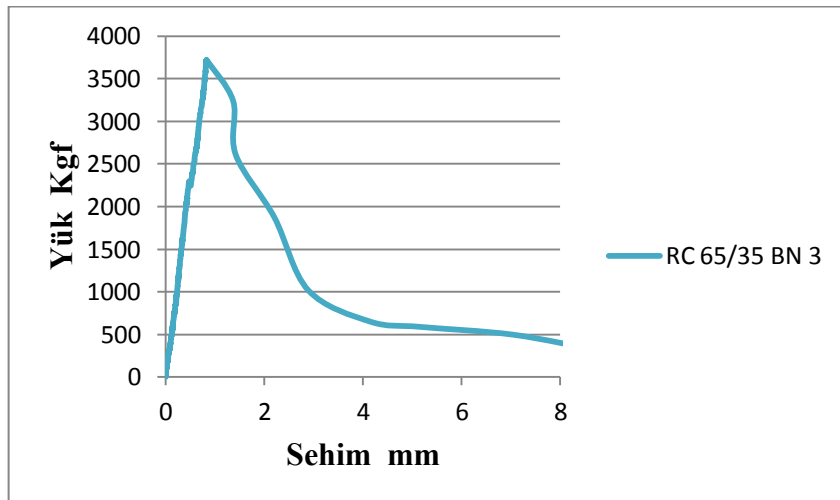
Şekil 4c: 40 kg/m³ mikro donatılı beton numune no 3 yük sehim eğrisi



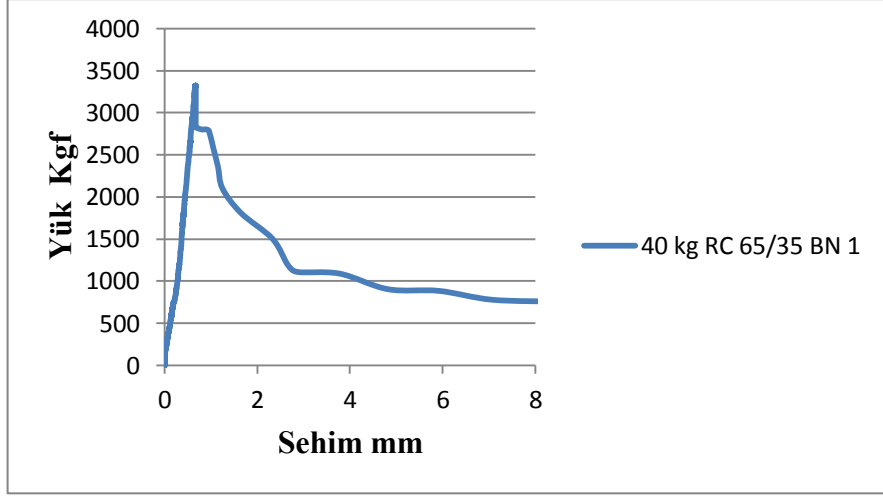
Şekil 5a: 20 kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numune no 1 yük sehim eğrisi



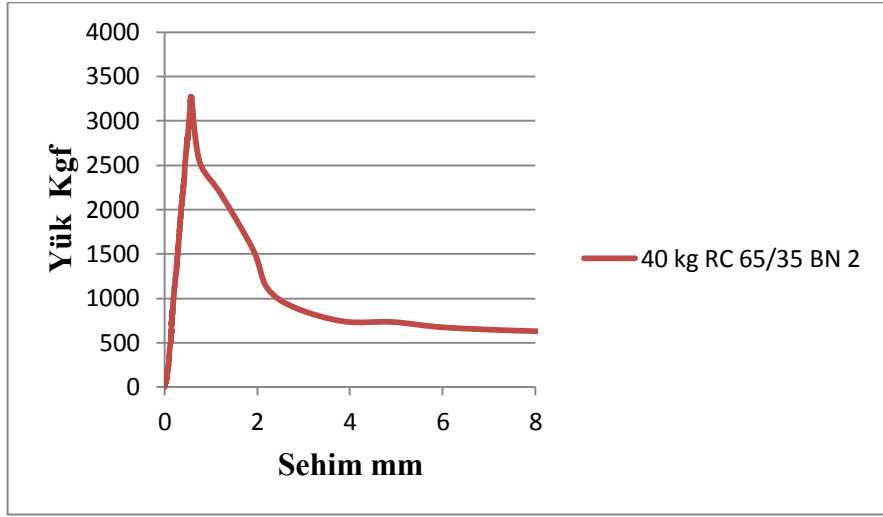
Şekil 5b: 20 kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numune no 2 yük sehim eğrisi



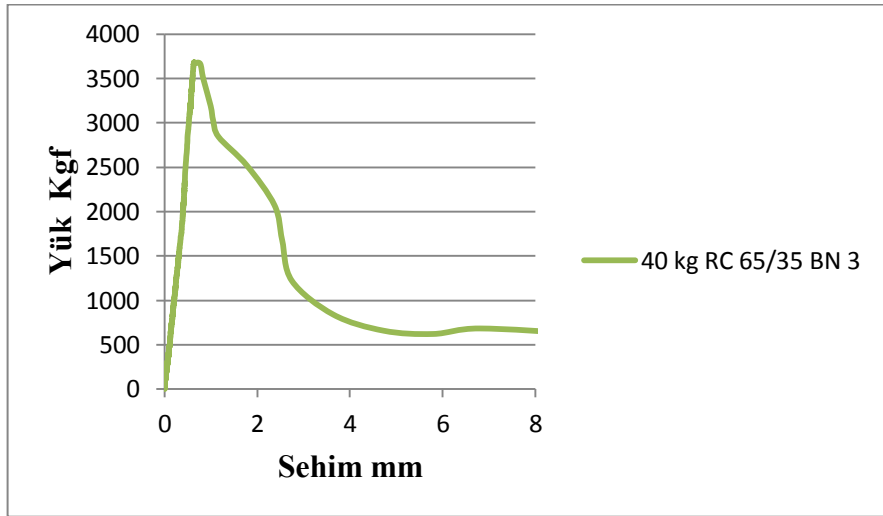
Şekil 5c: 20 kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numune no 3 yük sehim eğrisi



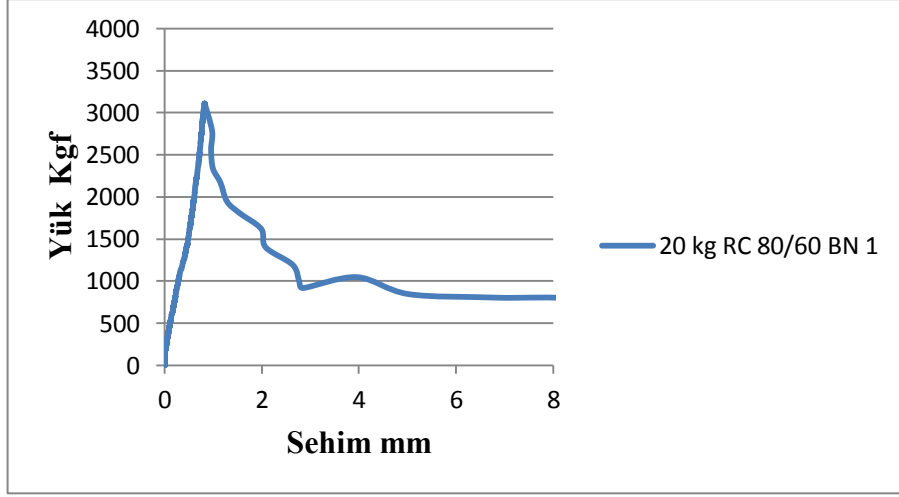
Şekil 6a: 40 kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numune no yük sehim eğrisi



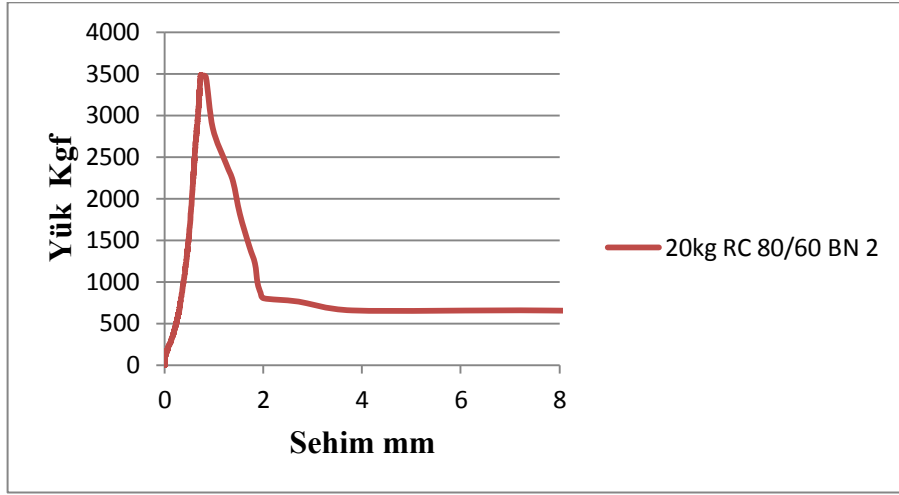
Şekil 6b: 40 kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numune no 2 yük sehim eğrisi



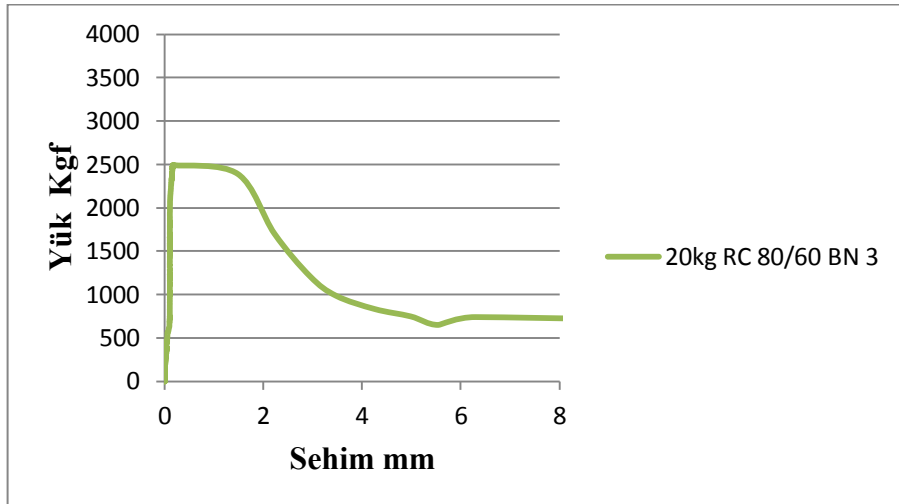
Şekil 6c: 40 kg/m³ RC 65/35 BN lifli beton numune no 3 yük sehim eğrisi



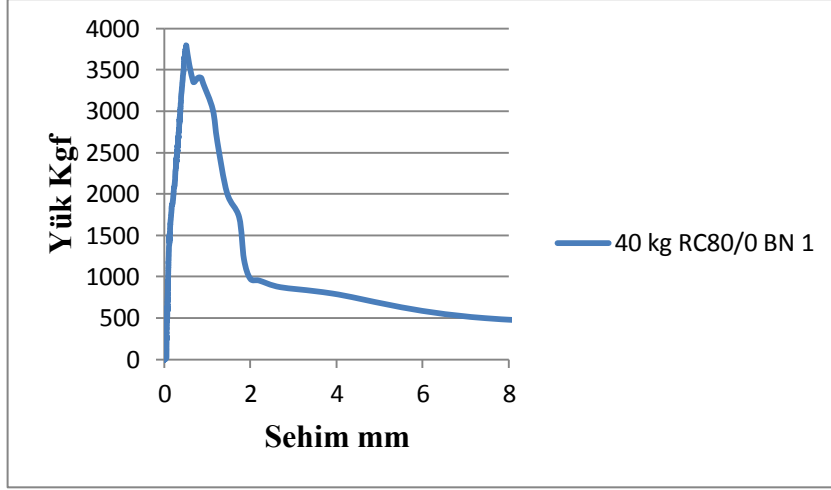
Şekil 7a: 20 kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numune no 1 yük sehim eğrisi



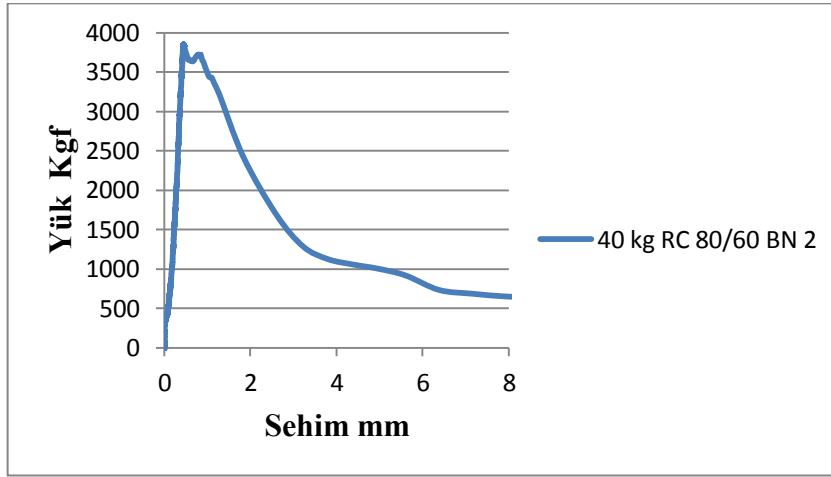
Şekil 7b: 20 kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numune no 2 yük sehim eğrisi



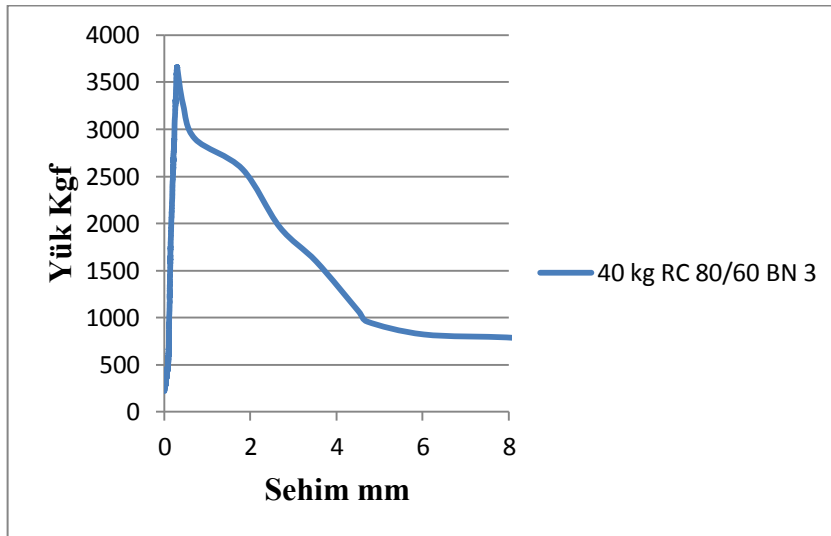
Şekil 7c: 20 kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numune no 3 yük sehim eğrisi



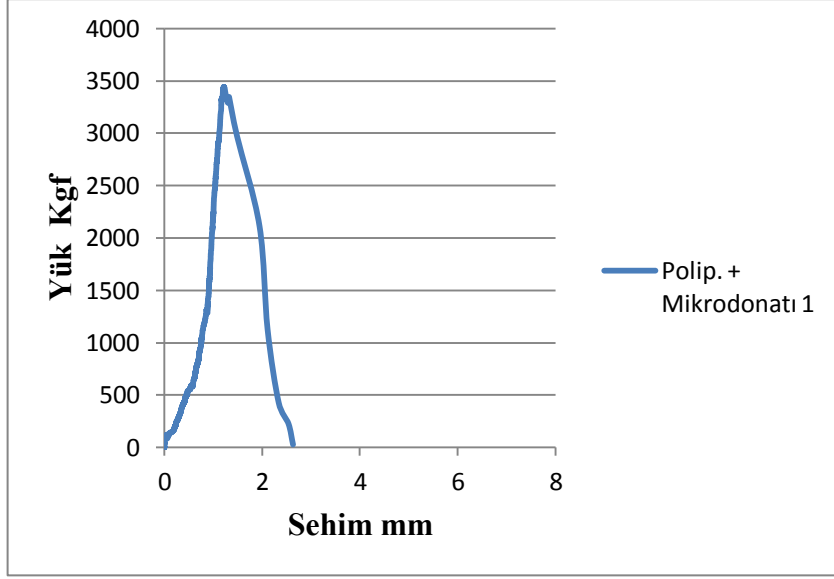
Şekil 8a: 40 kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numune no 1 yük sehim eğrisi



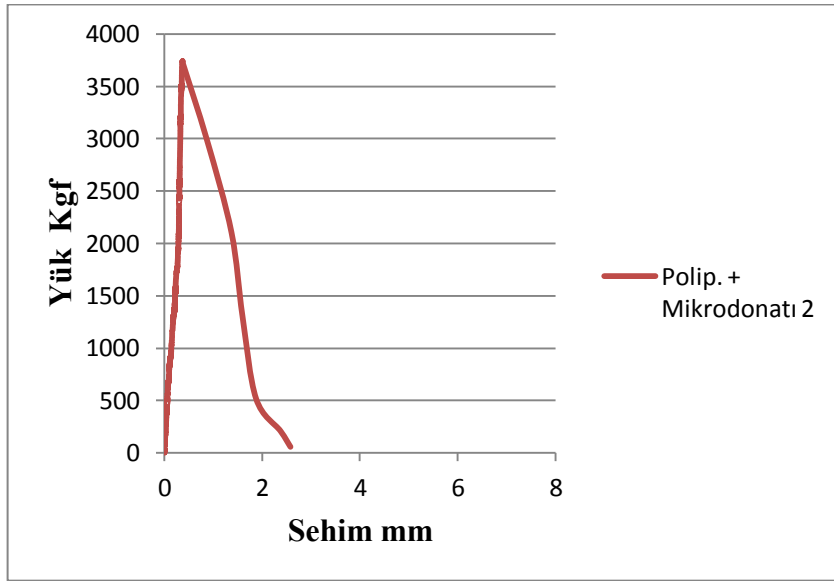
Şekil 8b: 40 kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numune no 2 yük sehim eğrisi



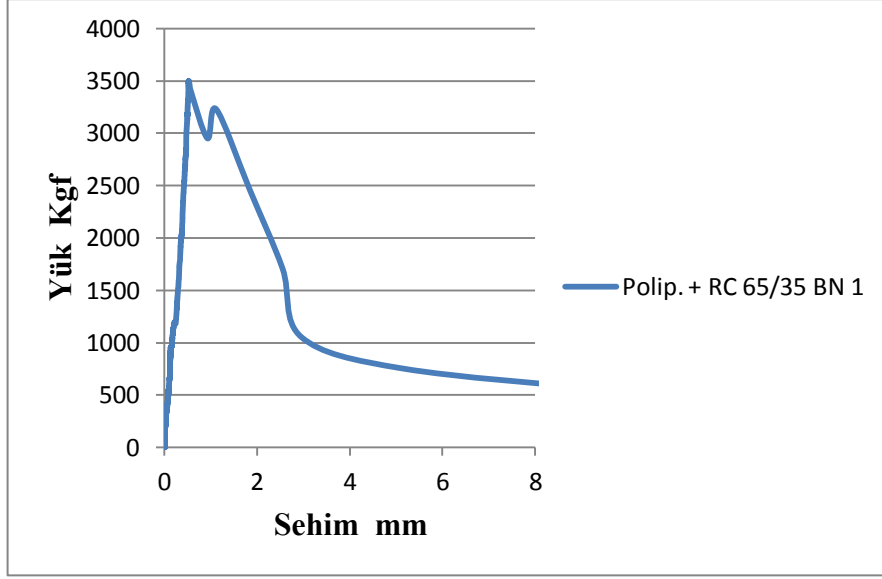
Şekil 8c: 40 kg/m³ RC 80/60 BN lifli beton numune no 3 yük sehim eğrisi



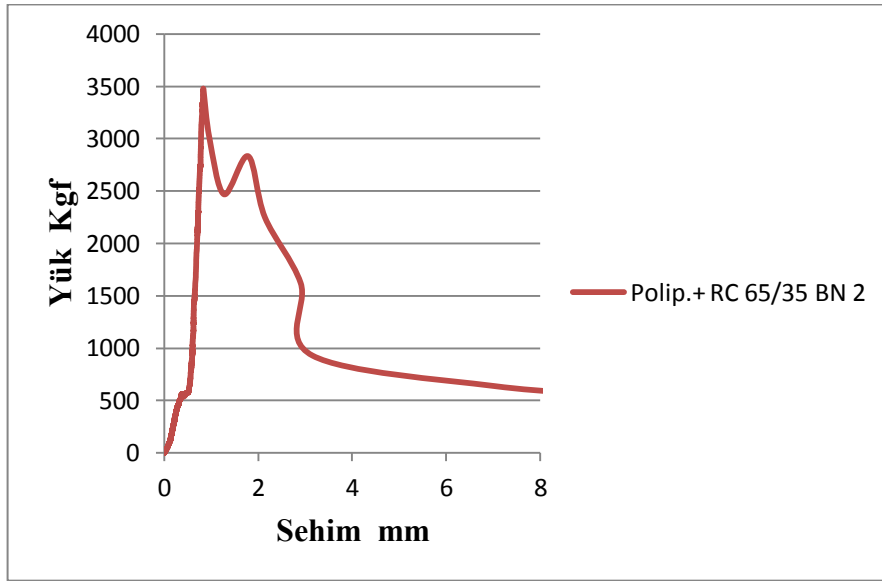
Şekil 9a: Polip. + Mikrodonatılı karma lifli beton numune no: 1 yük sehim eğrisi



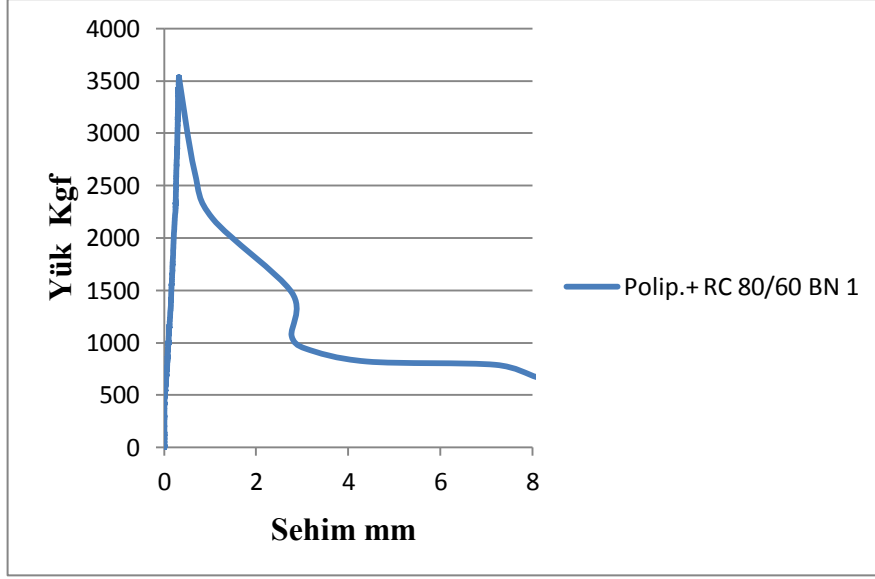
Şekil 9b: Polip. + Mikrodonatılı karma lifli beton numune no 2 yük sehim eğrisi



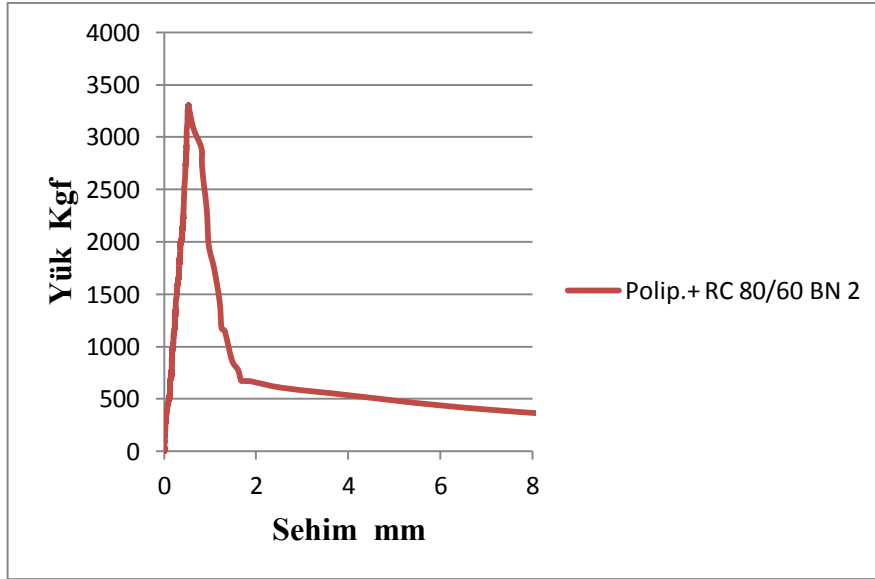
Şekil 10a: Polip. + RC 65/35 BN karma lifli beton numune no 1 yük sehim eğrisi



Şekil 10b.: Polip. + RC 65/35 BN karma lifli beton numune no 2 yük sehim eğrisi



Şekil 11a: Polip. + RC 80/60 BN karma lifli beton numune no 1 yük sehim eğrisi



Şekil 11b: Polip. + RC 80/60 BN karma lifli beton numune no 2 yük sehim eğrisi

9.2 EK B: Deney resimleri



Resim9.1: Deneyde kullanılan betoniyer ve ince Agrega



Resim 9.2: 1 nolu Kırmataş (4-11.2 mm)



Resim 9.3: Kırmetaş (11.2 mm- 22.4 mm)



Resim9.4: Lifli Beton Numune Örneği



Resim9.5: Beton Numunelerinin Kalıplara dökülmesi



Resim 9.6: Kalıplara Dökülmüş Deney Numuneleri



Resim 9.7: Basınç Deneyi –Basınç Cihazı



Resim 9.8: Eğilme Deneyi Deney Düzeneği



Resim 9.10: Deney Sonrası Kırılmış Numune Örnekleri