

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARMA LİFLİ BETONLARIN MEKANİK
DAVRANIŞINA BUHAR KÜRÜ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Dilek AVAR**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

AĞUSTOS 2006

**KARMA LİFLİ BETONLARIN MEKANİK
DAVRANIŞINA BUHAR KÜRÜ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Dilek AVAR
501041028**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Ağustos 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Ağustos 2006**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)
Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA**

AĞUSTOS 2006

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yanımda olan sayın hocam Prof. Dr. M. Ali Taşdemir'e,

Deneysel çalışmalarımda verdikleri destek ve yardımlar için İSTON Kalite Kontrol Müdürü İnş.Yük.Müh. Necip Kocatürk'e ve İSTON çalışanlarına,

Çalışmalarımda gösterdikleri ilgi ve yardımları dolayısıyla Ar. Gör. Nilüfer Özyurt'a ve Ar. Gör. Cengiz Şengül'e, deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısıyla İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanları ile,

Çalışmalarım süresince her anımda yanımda olan arkadaşlarım Delal Doğru, Selim Tüysüz ve Ali Emre Ormancı'ya,

Gösterdikleri ilgi ve destekleri için başta babam Selahattin AVAR ve annem Sevim AVAR olmak üzere, aileme,

teşekkür ederim.

Ağustos, 2006

Dilek AVAR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	3
1.2. Çalışmanın Ana Hatları	3
2. YÜKSEK PERFORMANSLI ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR	5
2.1. Homojenliğin Artırılması	7
2.2. Tane Dağılımlarının Optimizasyonu ve Su Miktarının Azaltılması	7
2.3. Lif Kullanımı	9
2.3.1. Lifler hakkında genel bilgi	10
2.3.2. Lif çeşitleri	11
2.3.2.1. Metalik lifler	11
2.3.2.2. Polimerik lifler	12
2.3.2.3. Mineral Lifler	12
2.3.2.4. Doğal olarak oluşan lifler	12
2.3.3. Lif özelliklerinin kompozit özelliklerine etkisi	13
2.3.3.1. Lif geometrisi	13
2.3.3.2. Liflerin narınlık oranı	15
2.3.3.3. Lifin hacimsel yüzdesi	16
2.3.3.4. Liflerin çekme dayanımı	18
2.3.4. Karma lifli betonlar	19
2.4. Silis Dumanı Kullanımı	27
2.4.1. Silis dumanı kullanımının taze beton özelliklerine etkisi	29
2.4.2. Silis dumanı kullanımının sertleşmiş beton özelliklerine etkisi	30
2.4.3. Silis dumanı kullanımının rpb üzerindeki etkileri	30
2.5. Basınç Uygulanması	33
2.6. Sıcaklık Kürü Uygulanması	33
2.7. Süperakışkanlaştırıcı Katkı Kullanımı	37
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	38
3.1.1. Çimento	38

3.1.2. Silis dumanı	39
3.1.3. Kumlar	39
3.1.4. Çelik lifler	40
3.1.4.1. OL 6/16	40
3.1.4.2. Dramix ZP305	40
3.1.4.3. Dramix ZP305X	41
3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı	41
3.2. Beton Üretimi	41
3.2.1. Üretimde izlenen sıra	42
3.2.2. Numune kodlarının belirlenmesi	42
3.2.3. Numune boyutları ve şekilleri	43
3.2.4. Isıl işlem programı	43
3.3. Taze Beton Deneyleri	44
3.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri	45
3.4.1. Silindir basınç deneyi	45
3.4.2. Küp basınç deneyi	45
3.4.3. Yarmada çekme deneyi	45
3.4.4. RILEM kırılma enerjisi deneyleri	46
3.4.4.1. Kırılma enerjilerinin hesaplanması	47
3.4.4.2. Net eğilme dayanımlarının hesaplanması	48
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	50
4.1. Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	50
4.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	51
4.2.1. Silindir basınç dayanımlarının değerlendirilmesi	51
4.2.2. Elastisite modüllerinin değerlendirilmesi	52
4.3. Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	52
4.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinin Değerlendirilmesi	54
4.4.1. RILEM kırılma enerjilerinin değerlendirilmesi	54
4.4.2. Net eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi	59
4.5. Deney Sonuçlarının Yüksek Sıcaklıkta Kür Uygulanarak Yapılan Bir Çalışmayla Karşılaştırılması	60
5. GENEL SONUÇLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER	65
5.1. Genel Sonuçlar	65
5.2. İleri Çalışmalar İçin Öneriler	66
KAYNAKLAR	68
EKLER	72
ÖZGEÇMİŞ	89

KISALTMALAR

YPB	: Yüksek Performanslı Beton
RPB-RPC	: Reaktif Pudra Betonu-Reactive Powder Concrete
DSP	: Densified Small Particles-Yoğunlaştırılmış küçük parçacıklar
MDF	: Macro Defect Free-Büyük boşluklardan arındırılmış
SIFCON	: Slurry Infiltrated Fiber CONcrete- Çimento hamuru enjekte edilmiş lifli beton
S/B	: Su/Bağlayıcı
NDB	: Normal Dayanımlı Beton
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
KLYDB	: Karma Lifli Yüksek Dayanımlı Beton
TS	: Türk Standartları
YDÇT	: Yüksek Dayanımlı Çelik Tel
NDÇT	: Normal Dayanımlı Çelik Tel
MPa	: Mega Pascal
GPa	: Giga Pascal
PP	: Polipropilen
PÇ	: Portland Çimentosu
SD	: Silis Dumanı
ÖUK	: Öğütülmüş Uçucu Kül
ÖYFC	: Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
LVDT	: Lineer Voltage Direct Transducer
RILEM	: Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1.1 Kullanılan liflerin özellikleri.....	4
Tablo 1.2 Üretilen numunelerde kullanılan lif oranları	4
Tablo 2.1 Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonlarının (RPB) mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	6
Tablo 2.2 Çeşitli lif tiplerinin kullanım alanları.....	13
Tablo 2.3 Farklı çelik lif tipi örnekleri.....	14
Tablo 2.4 Numune özellikleri.....	19
Tablo 2.5 RPC200 ve RPC800’de kullanılan malzemeler ve miktarları.....	36
Tablo 3.1 Kullanılan çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri...	38
Tablo 3.2 Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	39
Tablo 3.3 Kullanılan kumların elek analizleri.....	39
Tablo 3.4 Kullanılan kumların fiziksel özellikleri.....	40
Tablo 3.5 OL 6/16 liflerinin özellikleri.....	40
Tablo 3.6 Dramix ZP 305 liflerinin özellikleri.....	40
Tablo 3.7 Dramix ZP 305 X liflerinin özellikleri.....	41
Tablo 3.8 Kullanılan süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri.....	41
Tablo 3.9 Numune kodları ve lif yüzdeleri.....	43
Tablo 3.10 Taze beton özellikleri.....	44
Tablo 3.11 Sertleşmiş beton özellikleri.....	49
Tablo A.1 Küp basınç dayanımları.....	73
Tablo B.1 Silindir basınç dayanımları.....	74
Tablo B.2 Elastisite modülleri.....	75
Tablo C.1 Yarmada çekme dayanımları.....	76
Tablo D.1 Kırılma enerjileri.....	83
Tablo D.2 Net eğilme dayanımları.....	84

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	1
Şekil 2.1 : Betonların evrimi kapsamında basınç dayanımı-su/çimento oranı ilişkisi	5
Şekil 2.2 : RPC200 ve RPC800 betonlarına ait örnek granülometri eğrileri..	7
Şekil 2.3 : Teorik maksimum tane yoğunluğu	8
Şekil 2.4 : Bağlı yoğunluk-su/bağlayıcı (S/B) ilişkisi.....	8
Şekil 2.5 : Reaktif pudra betonlarında dayanım-bağlı yoğunluk ilişkisi.....	9
Şekil 2.6 : Liflerin gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi aktarması.....	11
Şekil 2.7 : Farklı narinliğe (L/d) sahip çelik tellerle donatılmış betonların özgül kırılma enerjisinin (G_F), tel içeriği (V_f) ile değişimi.....	15
Şekil 2.8 : Lif doğrultusunda ve tersi yönde malzeme özellikleri.....	16
Şekil 2.9 : Farklı oranlarda lif içeren kompozitler için tipik yük-sehim eğrileri.....	17
Şekil 2.10 : Farklı tipteki çelik liflerle üretilmiş beton kirişlerin yük-sehim eğrileri.....	18
Şekil 2.11 : Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi.....	20
Şekil 2.12 : Karma çelik tel donatılı betonda çelik tel narinliğinin (L/d) ve içeriğinin(x_i), kırılma enerjisine (G_F) etkisi	22
Şekil 2.13 : Karma lifli betonarme kirişlerin eğilme gerilmesi-sehim eğrileri.	23
Şekil 2.14 : Farklı tip ve miktarlarda lif içeren betonlarda çatlak genişliği haritaları.....	24
Şekil 2.15 : Farklı tip ve miktarlarda lif içeren betonlarda eğilme dayanımı-sehim ilişkisi.....	24
Şekil 2.16 : Normal dayanımlı (NDB), yüksek dayanımlı (YDB) ve karma lifli yüksek dayanımlı (KLYDB) betonların basınç kuvveti altında gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	25
Şekil 2.17 : Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi.....	28
Şekil 2.18 : Silis dumanının puzolanik ve boşlukları doldurma etkisi.....	29
Şekil 2.19 : İnce malzemelerin ikili kombinasyonlarının bağlı yoğunluğa etkileri.....	31
Şekil 2.20 : İnce malzemelerin üçlü kombinasyonlarının bağlı yoğunluğa etkileri.....	32
Şekil 2.21 : Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerde yük-sehim eğrisi.....	34
Şekil 2.22 : Kür koşullarının ve lif hacminin kırılma enerjisine etkileri.....	35
Şekil 2.23 : Kür koşullarının ve lif hacminin net eğilme dayanımına etkileri.....	35
Şekil 3.1 : Üretilen numunelerin şekil ve boyutları.....	43
Şekil 3.2 : Isıl işlem programı.....	44
Şekil 3.3 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.....	46

Şekil 3.4	: Veri toplama sistemi.....	46
Şekil 3.5	: Örnek bir yük-sehim eğrisi.....	47
Şekil 4.1	: Küp basınç dayanımlarının lif tipi ve kür durumuna göre değişimi	50
Şekil 4.2	: Silindir basınç dayanımlarının lif tipi ve kür durumuna göre değişimi	51
Şekil 4.3	: Elastisite modüllerinin lif tipi ve kür durumuna göre değişimi...	52
Şekil 4.4	: Yarmada çekme dayanımlarının lif tipi ve kür durumuna göre değişimi	53
Şekil 4.5	: Normal kür uygulanan numunelerin ortalama yük-sehim eğrileri.....	54
Şekil 4.6	: Isıl kür uygulanan numunelerin ortalama yük-sehim eğrileri.....	54
Şekil 4.7	: Kırılma enerjilerinin (G_F) lif tipi ve kür durumuna göre değişimi.....	55
Şekil 4.8	: Normal kürlü ve ısıl kürlü liffsiz numunelerin yük-sehim eğrileri.....	55
Şekil 4.9	: XN ve XS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	56
Şekil 4.10	: ON ve OS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	57
Şekil 4.11	: OXN ve OXS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	57
Şekil 4.12	: ZN ve ZS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	58
Şekil 4.13	: OZN ve OZS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	58
Şekil 4.14	: Net eğilme dayanımlarının lif tipi ve kür durumuna göre değişimi.....	59
Şekil 4.15	: Küp basınç dayanımları.....	61
Şekil 4.16	: Silindir basınç dayanımları.....	61
Şekil 4.17	: Elastisite modülü değerleri.....	62
Şekil 4.18	: Yarmada çekme dayanımları.....	62
Şekil 4.19	: Net eğilme dayanımları.....	63
Şekil 4.20	: Kırılma enerjileri.....	64
Şekil D.1	: MN numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	77
Şekil D.2	: MS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	77
Şekil D.3	: ON numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	78
Şekil D.4	: OS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	78
Şekil D.5	: ZN numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	79
Şekil D.6	: ZS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	79
Şekil D.7	: XN numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	80
Şekil D.8	: XS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	80
Şekil D.9	: OZN numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	81
Şekil D.10	: OZS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	81
Şekil D.11	: OXN numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	82
Şekil D.12	: OXS numunelerinin yük-sehim eğrileri.....	82
Şekil E.1	: Silindir basınç deneyi.....	85
Şekil E.2	: Yarmada çekme deneyi.....	85
Şekil E.3	: Yarmada çekme deneyi uygulanmış, liffsiz ve normal kürlü numune	86
Şekil E.4	: Yarmada çekme deneyi uygulanmış, liffsiz ve buhar kürlü numune	86
Şekil E.5	: Yarmada çekme deneyi uygulanmış lifli numune.....	86
Şekil E.6	: MN ve MS numunelerinin kırılma şekli.....	87
Şekil E.7	: ON ve OS numunelerinin kırılma şekli.....	87

Şekil E.8 : ZN ve ZS numunelerinin kırılma şekli.....	87
Şekil E.9 : XN ve XS numunelerinin kırılma şekli.....	88
Şekil E.10 : OZN ve OZS numunelerinin kırılma şekli.....	88
Şekil E.11 : OXN ve OXS numunelerinin kırılma şekli.....	88

SEMBOL LİSTESİ

V_f	: Çelik lif hacmi
l_f	: Lif uzunluğu
d_f	: Lif çapı
C-S-H	: Hidrate kalsiyum silikat
d_0	: Kalıp alınması aşamasındaki beton yoğunluğu
d_s	: Sıkıştırılmış olduğu varsayılan taneli karışımın katı yoğunluğu
L/d	: Narinlik
G_F	: Özgül kırılma enerjisi
d_{max}	: Maksimum tane boyutu
f_c	: Silindir basınç dayanımı
f_t	: Yarmada çekme dayanımı
P_{max}	: Maksimum yük
W_0	: Yük-sehim eğrisi altında kalan alan
m	: Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı
g	: Yerçekimi ivmesi
δ_0	: Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu
A_{lig}	: Etkin kesit alanı
f_{inet}	: Net eğilme dayanımı
I	: Mesnetler arası uzaklık
B	: Numune kesitinin genişliği
D	: Numune kesitinin yüksekliği
a_0	: Çatlak derinliği

KARMA LİFLİ BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA BUHAR KÜRÜ ETKİSİ

ÖZET

Yüksek dayanımlı/yüksek performanslı betonların bilinen başlıca sakıncaları; kırılmadaki gevrek davranışları, yüksek değerlerde otojen rötre ve yangına karşı dayanıksız olmalarıdır. Bu betonlarda, uygun lif kullanımıyla sünekliğin artırılması sağlanabilmektedir. Çelik liflerin narinlikleri, dayanımları ve içerikleri, betonun performansında olumlu etkilere sahiptir. Mekanik davranış açısından çelik tel donatılı betonlar (ÇTDB'ler) performanslarına göre iki gruba ayrılabilirler: i) geleneksel ÇTDB'ler ve ii) Reaktif Pudra Betonu (RPB) gibi yüksek performanslı çelik tel donatılı betonlar (YPÇTDB'ler). Geleneksel ÇTDB'ler gevrek matrisle karşılaştırıldığında sünek davranış gösterirler, fakat eğilme ve çekme dayanımları çok yüksek değildir ve özellikle bu malzemelerin basınç dayanımları çelik lif içeriğiyle fazla değişiklik göstermemektedir. Buna karşın, YPÇTDB'ler maksimum gerilme öncesinde büyük şekil değiştirme sertleşmesi gösterirler ve bunların basınç ve çekme dayanımları geleneksel ÇTDB'lere kıyasla oldukça yüksektir.

Bu çalışmada, 200 MPa'a varan yüksek basınç dayanımı, yüksek süneklik ve tokluk değerlerine olanak sağlayan optimum bir çözümün elde edilmesi için, yüksek performanslı karma lifli çimento esaslı kompozitler üretildi. Lif dayanımının ve karma lif kullanımının kompozitlerin mekanik özelliklerine ve kırılma özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, kanca uçlu olan veya olmayan üç farklı çelik lif karışımlara eklendi. Kanca uçlu olmayan kısa lifler; düz, yüksek dayanımlı, pirinç kaplı, 6 mm uzunluğunda ve 0,16 mm çapındadırlar. Kanca uçlu, normal ve yüksek dayanımlı liflerin çekme dayanımları sırasıyla 1150 MPa ve 2250 MPa olup, narinlikleri aynıdır ($l/d = 55$). Çelik lif hacmi her lif tipi için değişken olmakla birlikte, toplam lif hacmi %3 olarak sabit tutuldu. Matrisin karışım oranları şu şekildedir; çimento: silis dumanı: su: silis kumu (0,5-2 mm): silis unu (0-0,5 mm): süperakışkanlaştırıcı = 1: 0,250: 0,114: 0,325: 0,493: 0,120. Su/bağlayıcı oranı 0,17'de sabit tutuldu. Agreganın çelik lif ile kısmi yer değiştirmesi, birebir hacim esasına göre yapıldı. Süperakışkanlaştırıcı, yaklaşık olarak aynı işlenebilirliğin sağlanabilmesi için, karışımlarda değişik miktarlarda kullanıldı.

Bütün numuneler, 48 saat sonra kalıptan çıkarıldı, sonra iki farklı kür rejimi uygulandı. Birinci kür rejimi, numunelerin 20°C'de kirece doymun kür havuzunda deney tarihine kadar tutulmasını içeren standart su kürü idi. İkinci kür rejiminde ise, numunelere 3 gün boyunca 90°C'de buhar kürü ve daha sonra deney gününe kadar birinci kür rejimi uygulandı.

Karma lifli olan veya olmayan yüksek performanslı betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, net eğilme dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve kırılma enerjileri yalın betonunkilerle karşılaştırıldı. Kısa liflerin, mikro çatlakların önlenmesinde köprü görevi gördüğü ve bunun sonucunda kompozitin çekme dayanımının arttığı ve makro çatlakların oluşmasından sonra sıyrıldıkları sonucuna varıldı. Bu nedenle, kısa liflerin, kırılgan ortasından elde edilen yük-sehim eğrilerinin, maksimum yük sonrası inen kısmında etkileri azdır. Uzun liflerin, mikro çatlakların önlenmesinde önemli etkileri yoktur, fakat kırılgan ortasından elde edilen yük-sehim

eğrilerinin maksimum yük sonrası kısmında süneklik bakımından önemli etkileri vardır.

Yalın betonla karşılaştırıldığında, çelik tel donatılı kompozitlerin net eğilme dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve özellikle kırılma enerjisi ve süneklikleri önemli derecede geliştirildi. Yüksek dayanımlı çelik tel içeren betonların kırılma enerjilerinde yalın betonunkine kıyasla 137 kata varan artış olurken, normal dayanımlı çelik lif içeren betonların kırılma enerjisinde yalın betonunkine kıyasla 78 kat artış oldu. Böylece, kür koşuluna bağlı olarak, karma lifli betonlar yalın betonlara göre artırılmış tokluk ve sünekliğe sahip bir davranış sergilemiştir.

EFFECT OF STEAM CURING ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF CONCRETE WITH HYBRID FIBERS

SUMMARY

The foremost disadvantages of high strength/high performance concretes are; their brittle behaviour at fracture, high values of autogeneous shrinkage and their vulnerability to fire. In these concretes, the enhancement of the ductility can be realized by using some suitable fibers. The aspect ratio, the strength and the contents of the steel fibers have favorable effects on the performance of concrete. From the mechanical behaviour point of view, Steel Fiber Reinforced Concretes (SFRCs) can be divided into two categories based on their performances: i) conventional SFRCs, and ii) High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCCs) such as Reactive Powder Concretes (RPCs). The conventional SFRCs exhibit ductile behaviour compared to the brittle matrix, but their flexural and tensile strengths are not very high, and especially the compressive strengths of these materials do not practically change with the fiber volume fraction. The HPFRCCs, however, exhibit large strain hardening before peak stress, and their tensile and compressive strengths are very high compared to those of conventional SFRCs.

In this study, high performance cement based composites with hybrid fibers were produced to achieve an optimum solution which enables high values of compressive strength up to 200 MPa, ductility and toughness. Three different steel fibers with and/or without hooked ends were added to mixtures to investigate the effect of hybrid steel fibers and their strengths on mechanical and fracture properties of the composites. The short ones without hooked ends were straight high strength steel fibers coated with brass, 6 mm in length and 0.16 mm in diameter. The tensile strength of normal and high strengths of steel fibers were 1150 MPa and 2250 MPa, respectively, but their aspect ratios were the same ($l/d=55$) in the mixtures. The volume fraction of each steel fiber was variable, but the total volume fraction of fibers were kept constant at 3%. The mixture proportions of the matrix were as follows; cement: silica fume: water: silicious sand (0.5-2 mm): silicious powder (0-0.5 mm): superplasticizer = 1: 0.250: 0.114: 0.325: 0.493: 0.120. Water-binder ratio was kept constant at 0.17. Partial replacement of aggregate by steel fiber was based on one to one volume basis. A superplasticizer was used for all mixtures, the amount being varied to maintain approximately the same workability.

All specimens were demolded after 48 hours, then the two different curing regimes were used. The first curing regime involved standard water curing in a water tank saturated with lime at 20°C prior to testing. The second curing was steam curing for 3 days at 90°C further the same water curing until testing day.

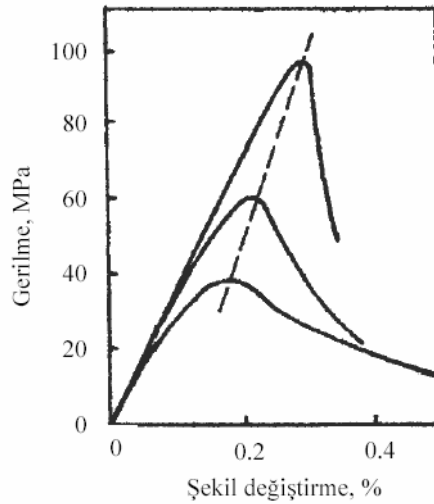
It can be concluded that the compressive strengths, elastic moduli, net bending strengths, splitting tensile strengths and fracture energies of high performance concretes with and without hybrid steel fibers were compared those of plain concrete. Short fibers functions as a bridge to eliminate the micro-cracks, as a result the tensile strength of composite increases, and they pulled out after the macrocracks are formed. Thus, the short fibers have a little effect on the post-peak response of load versus displacement at the midspan of the beam. The large fibers have no significant

effect on preventing microcracking, however, from the ductility point of view there is a substantial effect of large fibers on the post-peak response part of load versus displacement curve of the beams.

The net bending strength, splitting tensile strength and especially fracture energy and ductility of steel fiber reinforced composite mixtures were significantly enhanced compared to those of plain concrete. Fracture energy of plain concrete increased up to 78 times owing in concretes with normal strength steel fiber; while in concretes with high strength steel fibers the increase in fracture energy due to steel fibers was 137 times. Thus, depending on the steam curing, hybrid steel fiber concretes showed a behaviour of enhanced toughness and ductility when compared to plain concretes.

1.GİRİŞ

Beton; düşük maliyeti, kolay bulunabilirliği, kalıp kullanımında sağladığı özgürlük ve yüksek basınç dayanımı gibi önemli üstünlükleri sayesinde kullanımı en yaygın olan yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle basınç dayanımı bu malzemenin en önemli özeliği olup, son yıllardaki gelişmeler 250 MPa'ı aşan basınç dayanımı değerlerinin elde edilmesine olanak sağlamıştır. Ancak, betonda yüksek dayanım tek başına yeterli bir ölçüt değildir. Yüksek dayanım özellikleri yanında, dürabilite şartlarını da sağlayan yüksek performanslı beton tasarımı son yıllarda önem kazanmış ve bu konuda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Ancak, basınç dayanımındaki gelişmeler, çekme dayanımına aynı oranda yansımamış, çekme dayanımı değerleri 10-15 MPa aralığında kalmıştır. Oysa düşük çekme dayanımı dürabilite problemlerinin yanında, kullanılan donatılardan dolayı fazladan bir maliyeti de beraberinde getirmektedir. Ayrıca, yüksek basınç dayanımlarının elde edilmesiyle beraber betonun gevrekliğinin de oldukça arttığı görülmüştür [1]. Şekil 1.1'de gevreklikteki bu artış görülmektedir.



Şekil 1.1: Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi [2].

Betonda dayanım arttıkça eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta, tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve gevrek bir kırılma meydana

gelmektedir [2]. Betonda meydana gelen bu problemleri çözmek, yani betonun yüksek basınç dayanımının yanında, çekme dayanımını ve sünekliğini de artırmak için betonda lif kullanılmaktadır.

Lifli betonlar, normal veya yüksek dayanımlı betonlara lif eklenmesiyle elde edilen kompozit malzemelerdir. Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir. Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır. Üniform bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirmektedir. Bu özeliğinden dolayı lifli betonun özellikle çekme ve eğilme dayanımını artıran faktörler, darbe etkisine karşı dayanımını da artırır [3].

Son yıllarda, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton üretiminde çok önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP) ve büyük boşluklarından arındırılmış (MDF) çimento bu gelişmelerin iki örneğidir [4]. Çimento, silis dumanı ve kalsine boksit yada granit gibi ultra incelikteki tanelerle birlikte süperakışkanlaştırıcı kullanılarak elde edilen ve sıkıştırılmış taneli yapıya sahip matris içeren DSP, çimento hamurundan bile gevrek bir yapıya sahiptir. Basınç dayanımları kullanılan agregaya göre, 130 MPa'dan 270 MPa'a kadar çıkabilmektedir. MDF çimentolu malzemeler ise 150 MPa veya daha büyük çekme dayanımına sahip alüminli çimentoların yüksek moleküler kütleli, suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesiyle elde edilen kompozitlerdir. Bu kompozitlerde kullanılan polimer, çimento tanelerinin topaklanmasını önler ve düşük su/katı oranında dahi karışımın viskozitesinin artmasını sağlar. Yüksek dayanımlı betonlarda olduğu gibi bu malzemelerin de sünekliği düşük olduğundan, çelik lif kullanımı ile süneklikleri artırılabilir [5]. Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı betonlar (SIFCON) ise üretiminde kullanılan özel teknikler sayesinde, %5-%20 gibi çok yüksek oranlarda lif kullanımına olanak vermekte, böylece diğer betonlarla kıyaslandığında dayanımında, sünekliğinde ve enerji yutma kapasitesindeki büyük artışlardan dolayı oldukça önemli mühendislik özelliklerine sahip bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır [6].

İlk defa 1990'lı yılların başında Paris'te Bouygues laboratuvarlarında üretilen Reaktif Pudra Betonları(RPB), basınç dayanım değerleri 200-800 MPa, çekme dayanımları 25-150 MPa aralığında değişen malzemelerdir. Kırılma enerjileri 10000-40000 J/m² arasında değişen bu malzemeler, üstün mekanik ve fiziksel özellikleri, mükemmel süneklik ve oldukça düşük geçirimsizlik özellikleri ile yeni kuşak ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitler olarak karşımıza çıkmaktadır[4].

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, yüksek performanslı betonların mekanik davranışı, iki farklı parametre altında incelenmiştir. Bu parametrelerden ilki, mezo ve makro lif tiplerinin tekil olarak ve karma olarak kullanılmasıdır. Toplam lif hacmi %3 olarak sabit tutulmuş, mezo boyutta kısa kesilmiş çelik lif, makro boyutta ise iki çeşit kanca uçlu lif kullanılarak beş farklı karışım hazırlanmıştır. Ayrıca, karşılaştırma yapılabilmesi açısından, lif içermeyen bir karışım da üretilmiştir. İkinci parametre, betona üretimden sonra iki farklı kür uygulanmasıdır. Bir grup numuneye 20°C'de normal su kürü uygulanırken, diğer grup numunelere 90°C'de buhar kürü uygulanmıştır. Bu farklı kür rejimlerinin betonun mekanik davranışına etkileri incelenmiştir.

Ayrıca betonda minimum boşluk yapısının elde edilebilmesi için, agrega olarak en büyük tane boyutu 1 mm olan iri silis kumu ve çok küçük taneli ince silis kumu ile bağlayıcı olarak da çimento ve silis dumanı kullanılmıştır.

1.2. Çalışmanın Ana Hatları

Bu çalışmada; PÇ 42,5 cinsi çimento, çok ince taneli silis dumanı ve agrega olarak da iri silis kumu ve ince silis kumu kullanılmıştır.

Kullanılan lifler, biri normal biri yüksek dayanımlı olmak üzere iki tip kanca uçlu çelik lif ile, yüksek dayanımlı kısa kesilmiş çelik liflerden oluşmaktadır. Bu liflerin özellikleri Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1: Kullanılan liflerin özellikleri

Lif Adı	Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)
OL 6/16	Mezo	6	0,16	37,5	2250
ZP 305	Makro	30	0,55	55	1100
ZP 305X	Makro	30	0,55	55	2250

Toplam lif hacmi %3 olmak üzere, çelik lifleri, tekil olarak içeren 3 çeşit numune, OL 6/16 liflerini ZP 305 ve ZP 305X lifleriyle karma olarak içeren 2 çeşit numune ve lif içermeyen bir adet de karşılaştırma numunesi olmak üzere 6 farklı lif bileşimine sahip numune mevcuttur. Ayrıca, numunelere normal ve buhar kürü olmak üzere iki çeşit kür uygulanmıştır. Bu durum Tablo 1.2’de gösterilmiştir.

Tablo 1.2: Üretilen numunelerde kullanılan lif oranları

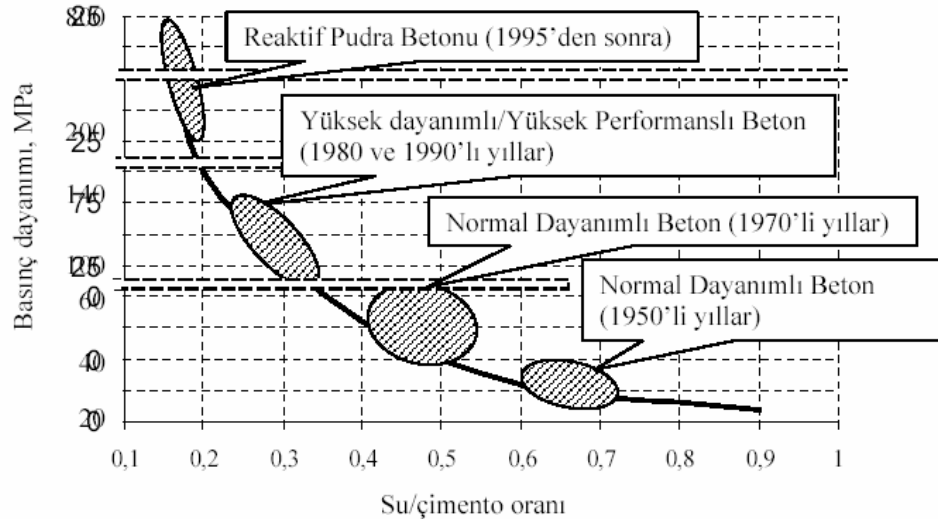
Numune Kodu		OL 6/16	ZP305	ZP305X	TOPLAM
Normal Kür	Buhar kürü				
MN	MS	0	0	0	0
ON	OS	3	0	0	3
ZN	ZS	0	3	0	3
XN	XS	0	0	3	3
OZN	OZS	1,5	1,5	0	3
OXN	OXS	1,5	0	1,5	3

Tüm karışımlarda çimento dozajı 1000 kg/m^3 olup, silis dumanı çimentonun %25’i oranında kullanılmıştır. Yine tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranı 0,17 ve su/çimento oranı 0,21’dir. Betonun kıvamı, yeni kuşak bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlanmıştır.

Üretilen karışımların herbirinden, 70x70x280 mm boyutlarında 8 adet prizma, 100x100x100 mm boyutlarında 6 adet küp, çapı 150 mm ve yüksekliği 60 mm boyutunda 10 adet disk ile çapı 100 mm ve yüksekliği 200 mm boyutunda 4 adet silindir numune alınmıştır. Bu numunelerin yarısı, standart kür koşullarına tabi tutulurken, diğer yarısı kalıptan çıktıktan sonra 3 gün boyunca 90°C ’lik sıcak buhar kürü uygulanmış, daha sonra deneylerin yapılacağı tarihe kadar 20°C ’de kireçli suda kür uygulandıktan sonra mekanik deneyler yapılmıştır.

2. YÜKSEK PERFORMANSLI ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR

Çimento esaslı malzemelerin mekanik performanslarının geliştirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Zamanla, kullanılan yöntemlerin geliştirilmesi, su/çimento oranının azaltılması ve böylece dayanımın artırılması söz konusu olmuştur. Artan dayanımla birlikte baş gösteren gevreklik problemi ise betona çelik liflerin eklenmesiyle büyük ölçüde aşılmıştır. Bu gelişmeler, son 25 yıl içinde oldukça önemli sonuçlara varılmasını sağlamıştır. Betonun zaman içindeki gelişimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Beton evrimi kapsamında basınç dayanımı-su/çimento oranı ilişkisi [7].

Yüksek performanslı beton, dürabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur. Amerika’da Stratejik Otoyol Araştırma Programına göre yüksek performanslı beton şu şekilde tanımlanmaktadır:

- i) Çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı $\geq 17,5$ MPa ; çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı ≥ 35 MPa; çok yüksek dayanımlı beton: 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa,
- ii) Dürabilite çarpanı $\geq \%80$ (donma-çözülmenin 300 tekrarından sonra)
- iii) Su/bağlayıcı oranı $\leq 0,35$ [7].

Yakın zamana kadar betonarme yapılarda kullanılan betonun dayanımı 40 MPa değerini geçemezken, ilk defa 1990'lı yılların başında Paris'te Bouygues laboratuvarlarında geliştirilen ve basınç dayanım değerleri 200-800 MPa aralığında olan Reaktif Pudra Betonları(RPB) üretilmiştir. Bu malzemeler, düşük porozite değerlerinden dolayı önemli durabilite ve düşük geçirimsizlik özelliklerine sahiptirler. Reaktif Pudra Betonlarının mekanik özelliklerinin, normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların mekanik özellikleriyle karşılaştırılması Tablo 2.1'de verilmiştir [5].

Tablo 2.1: Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonlarının(RPC) mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [5].

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPC
Basınç dayanımı (MPa)	20-60	60-115	200-800
Eğilme dayanımı (MPa)	4-8	6-10	50-140
Kırılma enerjisi (J/m ²)	100-120	100-130	10000-40000
Elastisite Modülü (GPa)	20-30	35-40	60-75

Yüksek performanslı çelik tel donatılı betonlar da en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin bir şekilde aşmakta ve bu malzemeler, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında şekil değiştirme sertleşmesi göstermektedirler [7]. Bu malzemelerin tipik bir örneği olan reaktif pudra betonlarının sahip olduğu bu dikkate değer mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için bazı temel prensipler uygulanmalıdır. Bu temel prensipler;

- İri agrega kullanımının ortadan kaldırılmasıyla, homojenliğin artırılması,
- Optimum yoğunlukta bir matris elde etmek için, tane dağılımlarının hassas biçimde ayarlanması,
- Su/bağlayıcı oranını düşürerek mekanik özelliklerin geliştirilmesi,
- Kısa kesilmiş çelik tellerin kullanılmasıyla birlikte, sünekliğin artırılması,
- Silis dumanı gibi puzolanik katkıların eklenmesi ile matris özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Beton sertleşmeden önce ve sertleşme boyunca basınç uygulanması,
- Mikro yapının iyileştirilmesi için, sertleşme sonrası sıcaklık kürü uygulanması [4,5,8].

2.1. Homojenliğin Artırılması

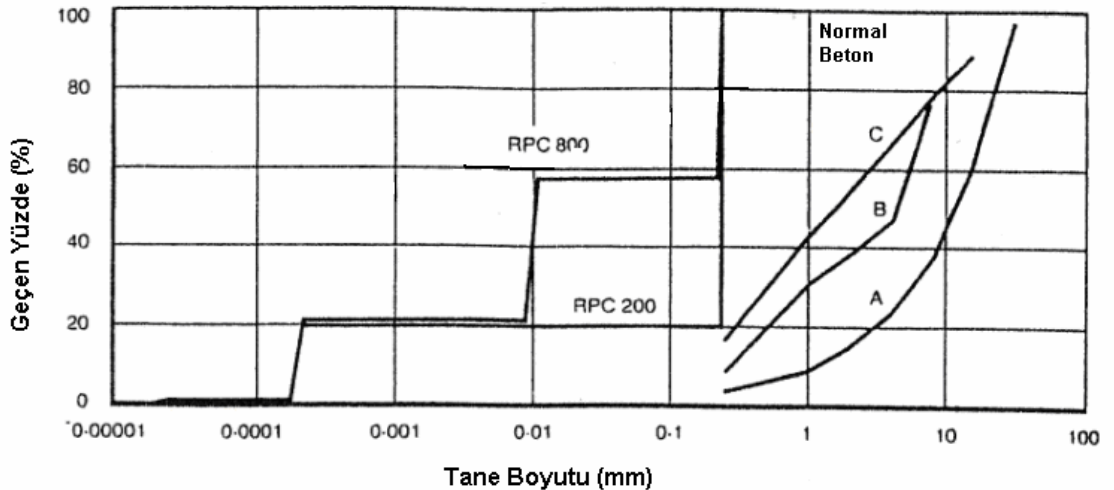
Bir malzemenin mühendislik özelliklerinden en iyi şekilde yararlanılabilmesi için o malzemenin homojen olması, yani her doğrultuda aynı özellikleri gösterebilmesi oldukça önemlidir. Çimento hamuru içine dağılı agregalardan oluşan konvansiyonel beton, heterojen bir malzemedir. Bu betonlarda kullanılan agregaların sertliği, çimento hamurununkine göre çok daha büyüktür. Bu durumun neden olduğu problemler reaktif pudra betonlarında şu şekilde önlenmiştir;

- İri agregaların yerine ince kum (maksimum 600 μ m) kullanılması,
- Çimento hamurunun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Agregam/matris oranının azaltılması [4].

Ayrıca reaktif pudra betonlarında kullanılan agregaların boyutlarının çimento tanelerinin boyutuna yakın olduğundan, hidrate olmamış çimento taneleri de matris içerisine dağılmış ince agrega gibi davranırlar ve malzemenin dayanımına katkıda bulunurlar [8].

2.2. Tane Dağılımlarının Optimizasyonu ve Su Miktarının Azaltılması

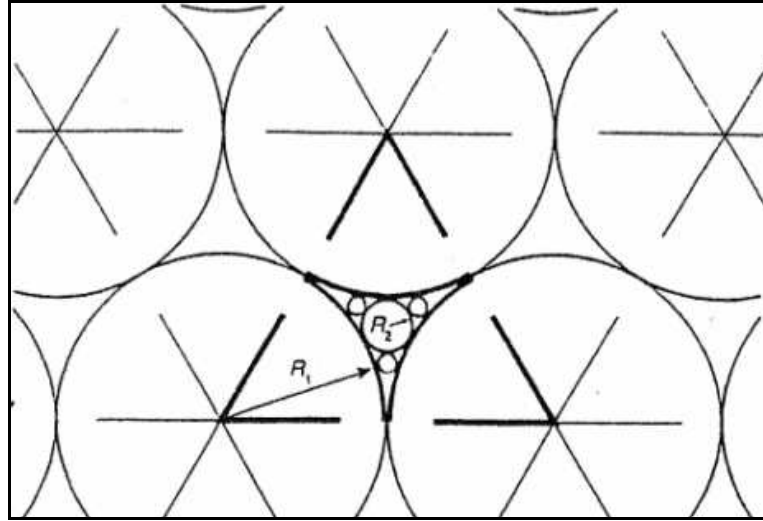
Reaktif pudra betonlarında tane dağılımının optimizasyonu, maksimum yoğunluğun elde edilmesine yönelik bir çalışmadır.



Şekil 2.2: RPC200 ve RPC800 betonlarına ait örnek granulometri eğrileri [9].

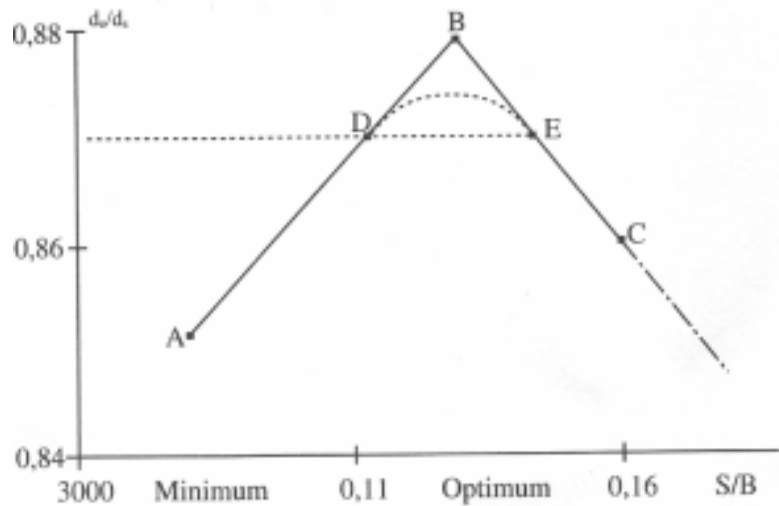
Maksimum yoğunluğun elde edilebilmesi, süreksiz bir granulometri eğrisi ile mümkün olmaktadır. RPC200 ve RPC800 betonlarına ait örnek granulometri eğrisi,

Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Bu durum, teorik hesaplamalar sonucunda, maksimum yoğunluğun, kullanılan tanelerin çapları arasındaki oranın 7 olmasıyla sağlanabilmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.3’de bu durum gösterilmiştir [9] .



Şekil 2.3: Teorik maksimum tane yoğunluğu [9].

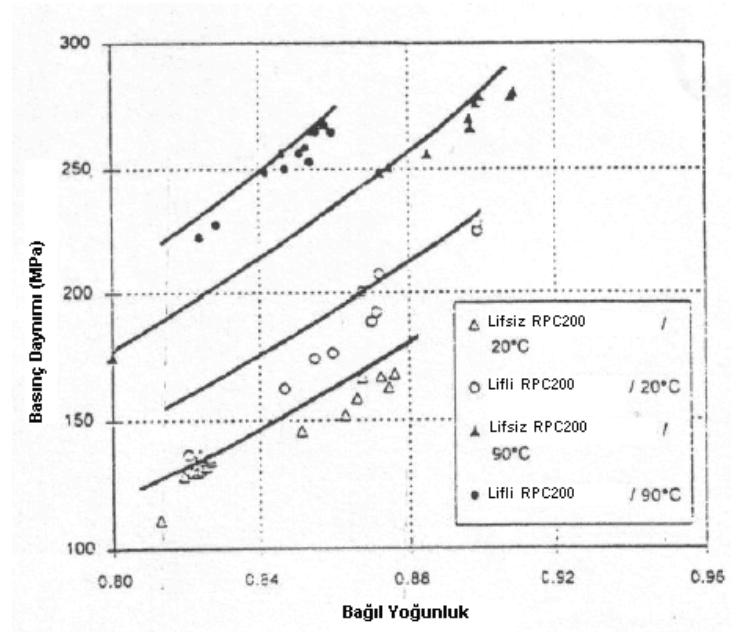
Tane dağılımlarının optimizasyonundaki diğer önemli faktör ise su ihtiyacıdır. Tane dağılımlarının optimizasyonu ile su ihtiyacı arasındaki ilişkinin anlaşılabilmesi için, bağıl yoğunluk (d_0/d_s) denen bir parametre tanımlanmaktadır. Burada d_0 , kalıp alınması aşamasındaki beton yoğunluğunu, d_s ise sıkıştırılmış olduğu varsayılan taneli karışımın katı yoğunluğunu ifade etmektedir. Bağıl yoğunluk-su/bağlayıcı arasındaki ilişki Şekil 2.4’de gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Bağıl yoğunluk- su/bağlayıcı(S/B) ilişkisi [4].

Burada A noktası, minimum S/B oranından elde edilen bağıl yoğunluğu göstermektedir. S/B oranının artmasıyla beraber, ilave su hapsolmuş hava ile yer değiştirmekte, böylece karışımın hacmi sabit kalırken ağırlığı artmakta, bu da d_0 değerini dolayısıyla da bağıl yoğunluğu artırmaktadır. B noktasına varıldığında, karışımda hapsolmuş hava kalmamıştır. Bu noktadan sonra, S/B oranını artırıldığında, ilave su karışımın hacmini artırmaya başlayacak, ve bağıl yoğunluk değeri azalmaya başlayacaktır. Şekile bakıldığında, belirli bir bağıl yoğunluk değeri için iki optimum noktanın varolduğu görülmektedir (D ve E noktaları). Bu noktalar kıyaslandığında, E noktasında, D noktasına göre daha iyi bir mekanik performans elde edilebileceği açıktır. Çünkü, E noktasında numune daha az hava ve daha çok su içermektedir. Bu suyun bir kısmı, hidrasyon sonrası katı fazla entegre olacaktır [4].

Basınç dayanımı ile bağıl yoğunluk arasındaki ilişki de Şekil 2.5’de görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi, basınç dayanımları bağıl yoğunluğun artmasıyla artmaktadır. Ayrıca, 90°C sıcak kür uygulanan numunelerde daha büyük basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 2.5: Reaktif pudra betonlarında dayanım-bağıl yoğunluk ilişkisi [4].

Bilindiği gibi betonun dayanımına etki eden en önemli etmenlerden birisi kullanılan su miktarıdır. Bu miktar azaldıkça dayanım artacaktır. Reaktif pudra betonlarında su/çimento oranı oldukça düşük olup 0,15 mertebelerindedir. İşlenebilme, yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılarla sağlanmaktadır.

2.3. Lif kullanımı

Betonda lif kullanımının başlıca yararları şu şekilde sıralanabilir; 1) Yüksek taşıma kapasitesine sahip, sünek bir beton elde edilmesi, 2) Donatı korozyonunun önlediği düzgün yüzeyli beton üretimi, 3) Etkin çatlak kontrolü, 4) Dayanıklılık, 5) Donatı işçiliğindeki önemli azalma [10].

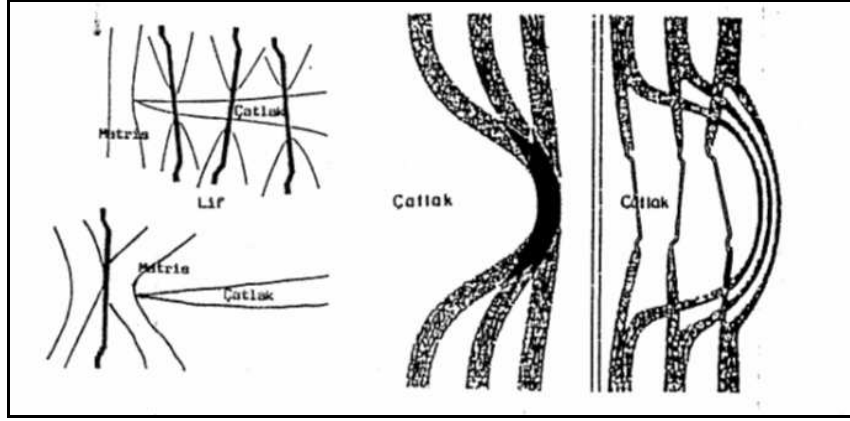
2.3.1. Lifler hakkında genel bilgi

Lif, bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan, doğal yollarla veya insan eliyle üretilebilen, dayanımları ve elastisite modülleri aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok büyük olan malzemeleri tanımlar [11].

Gevrek matrislerin ayrık liflerle güçlendirilmesinin oldukça eski bir yöntem olmasına karşın, liflerin beton içinde kullanılmaya başlanması 1960 lara dayanmaktadır [12].

Bilindiği gibi beton, heterojen bir iç yapıya sahip olup, bu nedenle kırılma süreci oldukça karmaşık ve süresizdir. Ancak bu karmaşık süreç incelendiğinde, malzemenin kırılmasına neden olan potansiyel çatlakların, kritik bağın olduğu agrega-çimento arayüzeyinde oluşan mikroçatlaklar olduğu görülmektedir. Betonun homojen olmayan yapısı, bu çatlakların oluşmasına neden olan gerilmelerin de düzgün olarak iletilmemesine ve zayıf bağ karakterine sahip bölgelerde taşıma gücünün aşılması, ani göçmelerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Betonun içerisine lif katılması yöntemi, başta süneklik olmak üzere diğer mühendislik özelliklerini de iyileştirerek, bu ani göçmelerin önüne geçilmesinde etkili ve yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır [13].

Lif donatılı betonlarda kullanılan lifler, yüksek çekme mukavemetleri sayesinde, betonda çatlakların başlangıcını, yayılmasını ve birleşmesini önlerler [14]. Yükler altında zorlanan matriste en zayıf noktalarda taşıma kapasitesinin aşılması ile çatlaklar oluşmaya başlar. Yeterli miktarda lifin kullanılması durumunda, lifler yükün tamamını alarak çatlakların önünde köprü vazifesi görürler. Lifler çatlak sonlarına bitişik olduklarından, matristeki gerilmelerin üzerlerinden geçmesini ve böylece, daha önce çatlamamış beton kesitlerinin de dayanımından yararlanılmasını sağlamaktadırlar [3]. Bu durum Şekil 2.6'da görülmektedir. Çatlakların oluştuğu bölgede bu şekilde taşıma gücü artırılarak, mühendislik özellikleri gelişmiş bir malzeme elde edilmektedir.



Şekil 2.6: Liflerin gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi aktarması [15].

2.3.2. Lif çeşitleri

Lifler, üretildikleri malzemelerin farklı özelliklerinden dolayı çok çeşitli olabilmektedir. Genel olarak lifleri şu dört sınıf altında toplamak mümkündür;

- Metalik lifler (Çelik vb.),
- Polimerik lifler (Karbon, polietilen, polipropilen vb.),
- Mineral lifler (Cam vb.),
- Doğal olarak oluşan lifler (Selüloz vb.) [13].

2.3.2.1. Metalik lifler

Lifli betonlarda kullanılan metalik liflerin en yaygın olanı çelik liflerdir. Elastisite modülleri ve dayanımları yüksek olup, sünek davranış gösteren bu lifler, karbon çeliği veya paslanmaz çelikten üretilirler. Türk standardı TS 10513/92 [16], çelik lifleri şekillerine göre şu şekilde sınıflandırmaktadır:

- A: Düz, pürüzsüz yüzeyli lifler,
- B: Bütün uzunluğunca deforme olmuş lifler,
- C: Sonu kancalı lifler.

B sınıfı lifler, deforme olma şekline göre;

- Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış lifler,
- Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) lifler,
- Ay biçimli dalgalı lifler olmak üzere üçe,

C sınıfı lifler ise sonlarındaki kancalara göre;

- İki ucu kıvrılmış lifler,
- Bir ucu kıvrılmış lifler olmak üzere iki tipe ayrılır.

TS 10513/92, çelik liflerin özellikleri ile ilgili iki önemli parametreye dikkat çekmektedir:

- i) Liflerin çekme-kopma gerilmesi ortalaması en az 345 N/mm^2 olmalı, her bir lif için çekme-kopma gerilmesi 310 N/mm^2 'den az olmamalıdır.
- ii) $16 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik ortamda, 3.18 mm'lik bir iç çap çevresinde yapılan lif eğilme deneyine tabi tutulan liflerin %90'ının kırılmaksızın 90° eğilme yapabilmesi gerekmektedir.

2.3.2.2. Polimerik lifler

Polimerik lifleri doğal ve sentetik olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür. Doğal polimerik lifler, pamuk, sisal, hint kenevirisi gibi bitkisel kökenli yada yün, deri gibi hayvansal kökenli liflerdir. Sentetik polimerik liflerin başlıcaları ise polipropilen, naylon, polietilen, aramid ve perlon'dur [11].

Çimento esaslı malzemelerin takviyesinde en yaygın olarak kullanılan polimerik lifler, polipropilen liflerdir. Çekme dayanımları yüksek olan bu liflerin, elastisite modülleri düşüktür. Bu liflerin betonda kullanım miktarları oldukça düşüktür.

2.3.2.3. Mineral lifler

En bilineni cam lifler olup, sertlik, dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmeme gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Esnek, hafif ve pahalı olmayan bu malzemeler genelde çimento hamuruna veya harç karışımlarına katılarak kullanılır. İri agregalı betonda pek kullanılmaz [11]. Mineral liflerin elastisite modülleri ve çekme dayanımları yüksek olup, gevrek davranış gösterirler.

2.3.2.4. Doğal olarak oluşan lifler

Bu liflerin en önemli özellikleri kolayca elde edilebilmeleridir. Ancak bu liflerin alkali ortamda parçalanma eğiliminde olmaları bir sorundur. Bilinen en eski doğal lifler saman ve at yelesi olup Portland çimentosuyla kullanılan diğer doğal lifler ise bambu, hindistan cevizi, sisal, şeker kamışı ve ahşap gibi liflerden oluşmaktadır [11].

Çeşitli liflerin kullanım alanları Tablo 2.2’de verilmiştir [17].

Tablo 2.2: Çeşitli lif tiplerinin kullanım alanları [17].


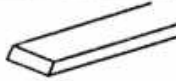




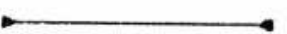




Lif Tipi	Uygulamalar
Cam	Prekast paneller, giydirmeye cephe kaplamaları, kanalizasyon boruları, ince beton çatılar ve beton blokların sıvası.
Çelik	Çatı uygulamalarında kullanılan gözenekli betonlar, kaldırımlar, köprü döşemeleri, ateşe dayanıklı elemanlar, beton borular, havalimanları, rüzgara dayanıklı yapılar, tünel kaplamaları, gemi omurgaları.
Polipropilen, naylon	Temel kazığı, öngermeli kazıklar, kaplama panelleri, yürüyüş yolları, marinaların iskele elemanları, yol yamaları, büyük çaplı sualtı borularının kaplamaları.
Asbest	Saç boru, levhalar, yangına dayanıklı malzemeler ve yalıtım malzemeleri, kanalizasyon boruları, oluklu ve düz çatı levhaları, duvar kaplamaları.
Karbon	Dalgalı şekilli çatı kaplama elemanları, tek veya çift kat ince membran yapılar, tekne omurgaları, yapı iskelesi tahtaları.
Mika	Çimento esaslı levhalarda, kısmen asbestin yerine, beton borular, tamirat malzemeleri.

2.3.3. Lif özelliklerinin kompozit özelliklerine etkisi

2.3.3.1. Lif geometrisi

Lifli betonların özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerden birisi de, lif ile matris arasındaki bağın dayanımıdır. Bu bağın güçlendirilmesine yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Çeşitli biçim ve deformasyonlarda liflerin üretilmesi de bu yöndeki çalışmaların bir sonucudur. Çelik liflerin tipik örnekleri Tablo 2.3’de verilmiştir.

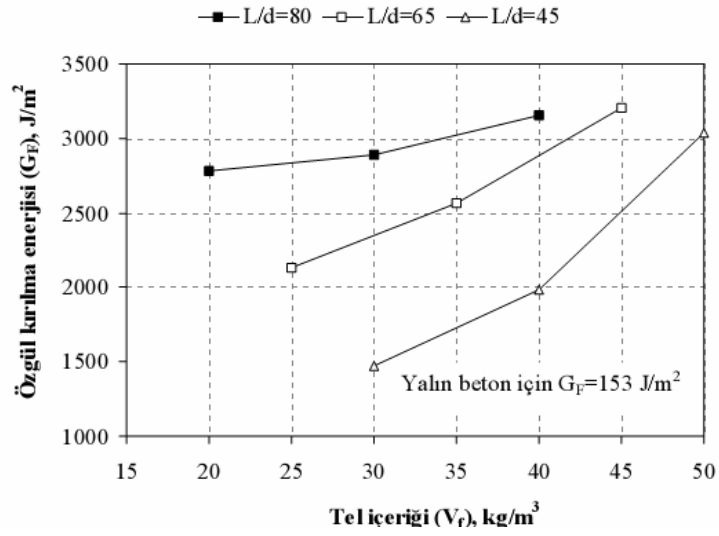
Tablo 2.3: Farklı çelik lif tipi örnekleri [18].

En kesit	Yuvarlak	
	Yassı	
	Yarı yuvarlak	
Biçim ve deformasyonlar	Düz	
	Dalgalı	
	Kancalı uçlu	
	Genişletilmiş uçlu	
	Çarpık	
	Yassı uçlu	
	Deforme edilmiş	
	Zikzak biçimli	

Soroushian ve Bayasi [19] tarafından yapılan araştırmada, lif tipinin lif donatılı betonların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanılan lif tipleri, narinlikleri 60 civarında olan, düz-yuvarlak, dalgalı-yuvarlak, dalgalı-yassı, kancalı-tekil ve kancalı-birleştirilmiş lifler ile narinliği 75 civarında olan düz-yuvarlak ve kancalı-adezifle birbirine yapıştırılmış liflerdir. Yapılan deneyler sonucunda, lif kullanımının betonun işlenebilirliğini genel olarak düşürdüğü, ancak elde edilen çökme değerlerine bakıldığında, dalgalı liflerin çökme değerlerinin düz ve kancalı liflere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Narinliğin 60 ve lif oranının %2 olması durumunda, kancalı liflerin, düz ve dalgalı liflere göre eğilme dayanımında ve enerji yutma kapasitesinde daha yüksek değerler verdiği görülmüştür. Narinliğin 75 olması durumunda da yine kancalı liflerin düz liflerden daha iyi olduğu görülmüştür. Basınç gerilmeleri altında, pik sonrası enerji yutma kapasiteleri kıyaslandığında yine en yüksek sonuçlar kancalı liflerden elde edilmiştir.

2.3.3.2. Liflerin narinliği

Lifli betonların performansının kullanılan lifle ilgili en önemli göstergesi lif narinliğidir. Bu değer, lifin boyunun (L), çapına (d) oranı olup genellikle 30-100 arasında değerler almaktadır. Narinliğin artmasıyla beraber, mekanik performans artsa da, yerleştirmede ve karıştırmada karşılaşılan problemler dolayısıyla, bu değerin 100 gibi bir değerle sınırlandırılması önerilmektedir [18,19]. Özgöl kırılma enerjisinin lif içeriğiyle ve narinlikle değişimi Şekil 2.7’de verilmektedir. Bu Şekilden de görüleceği gibi, elik tel içeriğini ve narinliğini istenilen performansa göre ayarlamak mümkündür [2].



Şekil 2.7: Farklı narinliğe (L/d) sahip elik tellerle donatılmış betonların özgöl kırılma enerjisinin (G_F), tel içeriği (V_f) ile değişimi [2].

Bayramov [18] tarafından, farklı narinlik oranlarına sahip elik lifler, farklı oranlarda kullanılmış ve elik lif donatılı betonların mekanik davranışına yönelik bazı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre:

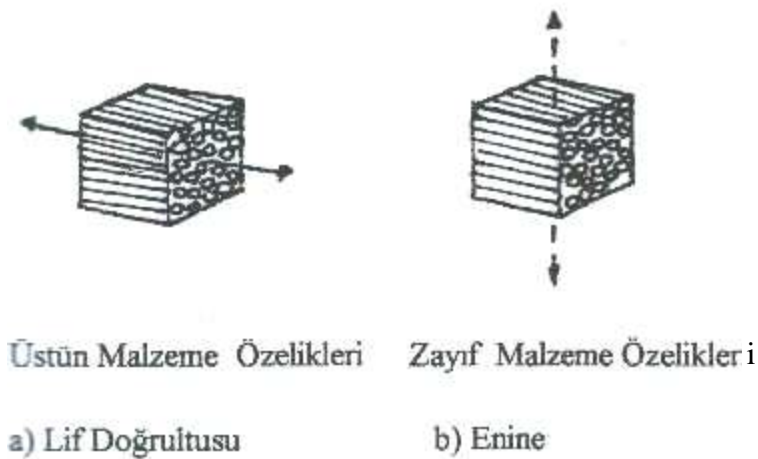
- Basınç dayanımına elik telin etkisi belirgin değildir. Narinliği 65 olan tellerle üretilen betonlarda elik tel içeriğinin etkisi belirgin olup, tel miktarı 20 kg/m³’den 50 kg/m³’ e artırıldığında, %30’luk bir basınç dayanım artışı sağlanmıştır.
- elik lifli betonların yarmada çekme dayanımı, normal betonunkinden fazla olup, elik lif miktarının artmasıyla artmaktadır. Bu artış yine narinliği 65 olan liflerde daha belirgindir. Bu liflerin matristen sıyrıldığı ancak

kırılmadığı, ancak narinliği 80 olan liflerin koparak ikiye ayrıldığı gözlemlenmiştir.

- Çelik lif miktarının artması özgül kırılma enerjisini önemli ölçüde artırmaktadır. Tel narinliğinin etkisi, çelik lif miktarının artmasıyla etkili olmakta ve bu durumda narinlikteki artış, kırılma enerjisini de artırmaktadır. 80 narinlikli ve 50 kg/m³ lif içerikli kirişlerde, 5 mm'ye kadar ölçülen özgül kırılma enerjisi, yalın betonunkinin 50 katıdır.
- Karakteristik boy ve net eğilme dayanımı da lif miktarındaki artışla artmaktadır. 80 narinlikli ve 50 kg/m³ lif içerikli kirişlerde, normal betonun iki katı eğilme dayanımı elde edilebilmiştir.

2.3.3.3. Liflerin hacimsel yüzdesi

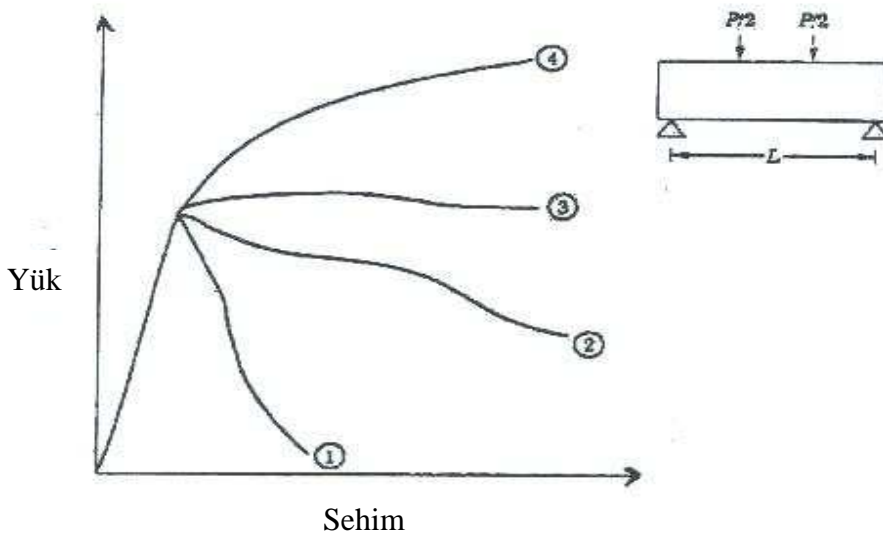
Lifli beton, kullanılacakları yapıların çeşidine göre, önemli teknik ve ekonomik faydalar sağlayabilecek bir yapı malzemesidir. Lifli betonların kullanım koşulu, homojenliğin sağlanmasına bağlıdır. Bir yapısal kompozit olan lifli beton, bütün yük doğrultularında benzer özellikler gösterebilmelidir. Hakim bir lif dağılımının olduğu lifli betonlar, uygun bir yapı malzemesi olarak düşünülemez [20]. Çünkü lifler kendi doğrultularında ve diğer doğrultuda aynı özelliklere sahip değildir. Bu durum, Şekil 2.8'de görülmektedir. Lif doğrultusunda malzemenin performansı daha yüksektir.



Şekil 2.8: Lif doğrultusunda ve tersi yönde malzeme özellikleri [6].

Kullanılan lif miktarının düşük olması (15-25 kg/m³), malzemenin homojen olma ihtimalini düşürmektedir. Bu dozajda lif kullanılan 1 m³ betonda, lif sayısı agrega sayısından düşük olmaktadır. Bu durumda lifler, agregaların yerleşimine etki

edememekte, onları bağlayamamakta ve sağlam bir matris oluşturamamaktadır [20]. Şekil 2.9'da lif oranının, taşıma kapasitesini ve kırılma davranışının karakterini nasıl etkilediğini gösteren, farklı lif oranlarında 4 tane numuneye ait yük-sehim eğrileri görülmektedir. Bu grafiklerden de görüleceği gibi, 1. ve 2. numunelerde lifler tarafından taşınan yük matrisin taşıdığı yükten daha az, 3. numunede matrisin taşıdığı yüke eşit, son numunede ise matrisin taşıdığı yükten daha fazladır. 1 numara ile gösterilen eğri en az lif içerirken lif oranının artması ile dayanım ve süneklik artmaktadır [21].

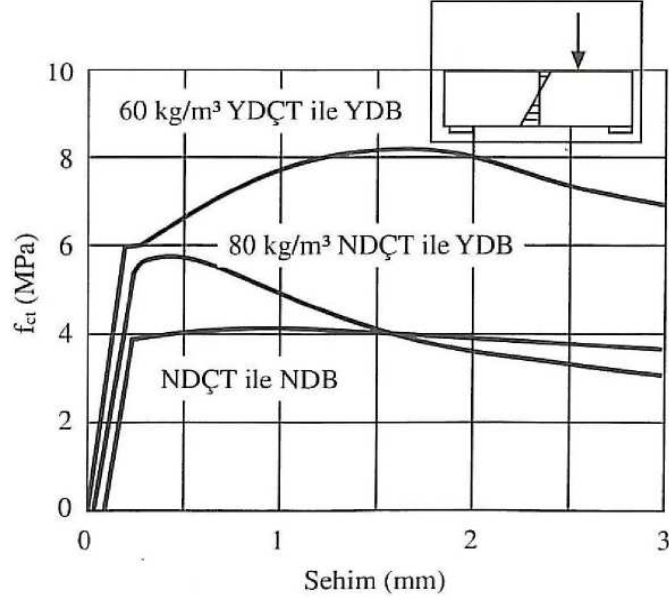


Şekil 2.9: Farklı oranlarda lif içeren kompozitler için tipik yük-sehim eğrileri [21].

Üretimde kullanılan lif içeriğinin optimum bir değer üzerine çıkması da, betonda bazı problemlere neden olmaktadır. Karıştırma ve yerleştirmede ortaya çıkacak bu problemler, liflerin karışım içerisinde topaklanmasıyla sonuçlanabilir. Liflerin bu şekilde topaklanması, matris içerisinde betonun performansını etkileyebilecek zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Bu problemlerin önüne geçilebilmesi için, karışımda iri agrega kullanılmaması, lif narinlik oranının optimum bir değerde olması, belirli sayıda lifin suda çözünebilir yapıştırıcılarla biraraya getirilmesi, liflerin karışıma kuru katılması ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması gerekli çözümler olarak ileri sürülebilir [21].

2.3.3.4. Liflerin çekme dayanımı

Genellikle, betonda kullanılan çelik liflerin dayanımının artmasıyla, beton dayanımının da artacağı düşünülmektedir. Şekil 2.10'da farklı dayanımlara sahip liflerle üretilen betonların yük-sehim eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.10: Farklı tipteki çelik liflerle üretilmiş beton kirişlerin yük-sehim eğrileri [9].

Gerçekten de normal dayanımlı betona yüksek dayanımlı lif katılması, betonun mekanik özelliklerinde bir iyileşmeye neden olmaktadır. Ancak asıl etki, çekme dayanımı 2000 MPa ve elastisite modülü 210 GPa olan yüksek dayanımlı liflerin, yüksek dayanımlı betona eklenmesiyle elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, bu betonlar sünek bir davranış göstermektedir. Bu durumun sebebi, beton dayanımının artmasıyla beraber, lifle aderansın da artması, böylece çatlak oluştuğunda liflerin betondan sıyrılmalarının güçleşmesidir. Liflerin betondan sıyrılarak değil, koparak ayrılması gerçekleşir. Böylece, yüksek dayanımlı betonda yüksek dayanımlı lif kullanılması ile tepe yükü sonrası davranışın iyileştirilmesi mümkün olmaktadır [9].

Teruzzi ve arkadaşlarının [22], lifli betonların durabilite özelliklerine yönelik yaptıkları çalışmada, üç farklı numune düşünülmüştür. Bunlara ait özellikler Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4: Numune Özellikleri [22].

ÖZELİKLER	KARIŞIM NO		
	1	2	3
Beton Sınıfı	C25/30	C25/30	C60/75
Kullanılacağı Yer	Endüstriyel zemin	Endüstriyel zemin	Prefabrike eleman
Ortam Koşulu	Korunmuş	Dış çevre	Dış çevre
d max	16	16	22
Lif Yüzdesi(%)	0,51	0,51	0,77

Mekanik deneyler sonucunda, normal dayanımlı betonlarda lif kullanımı basınç dayanımını fazla etkilemezken, yüksek dayanımlı betonlarda artırmaktadır. Her üç tip betonda da, toklukda artış görülmüştür. Bu betonlara uygulanan durabilite deneyleri sonucunda ise çelik lif kullanımının betonun performansında önemli bir azalmaya neden olmadığı belirlenmiştir. Yani, liflerin yada lif-beton arayüzeyinin, zararlı maddelerin betonun içerisine sızmasına neden olacak bir yol oluşturmadıkları ve donma dayanımını azaltacak zayıf bir bölgeye neden olmadıkları görülmüştür.

2.3.4. 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 [26]. Betonun bu özelliği nedeniyle ve lif üretimindeki gelişmeler sayesinde farklı özellik ve boyutlarda liflerin üretilebilmesi buna eklendiğinde, bu liflerin kullanım alanlarında bir çeşitlik meydana gelmiştir. Bu kullanım alanlarından birisi de karma lifli betonlardır [23].

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 [7].

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.

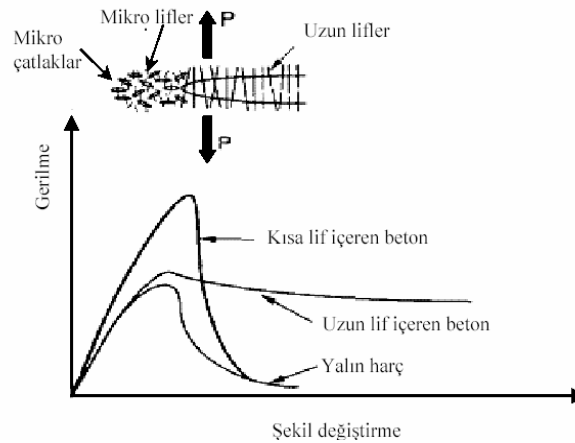
Mikro lifler;

- 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 [24].

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 [25]. 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 2.11’de gösterilmektedir.

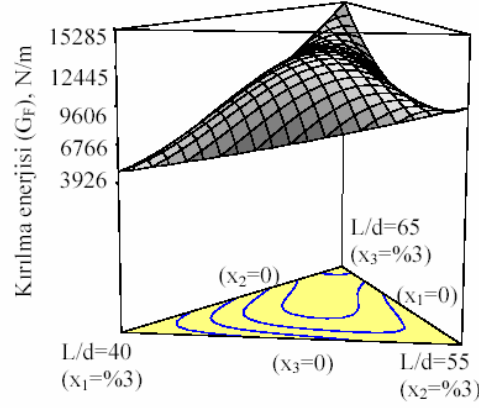


Şekil 2.11: Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi [25].

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 saklanmasında,
5. Sünek davranış gerektiren yapı taşıyıcı elemanları bileşim bölgelerinde,
6. Prekast çatı kaplama elemanı yapımında,
7. Çarpma ve aşınmaya karşı dayanım gerektiren bölgelerde kullanılabilir [24].

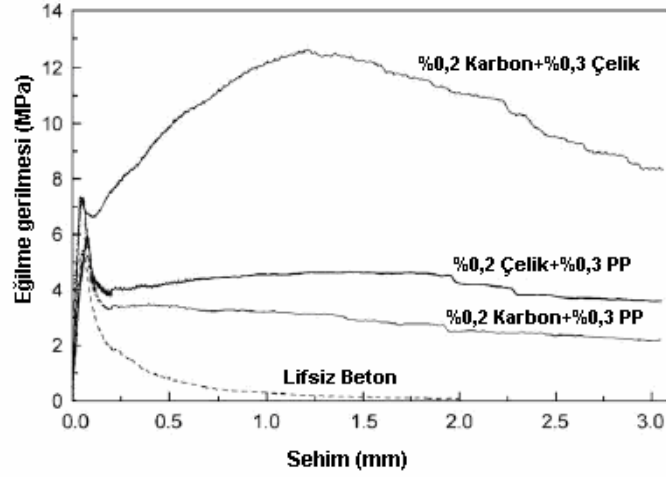
Karma lifli betonlarla ilgili yapılmış çalışmalar incelendiğinde Ekincioğlu [11] tarafından üretilen ve dayanım, süneklik ve tokluğun artırılması amacıyla çelik ve polipropilen liflerin birarada kullanıldığı karma lifli betonlarda, polipropilen lif hacmi %0,05 olarak, çelik lif hacmi ise %3 olarak sabit 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. Bu durum Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.12: Karma çelik tel donatılı betonda çelik tel narinliğinin ve içeriğinin kırılma enerjisine etkisi [11].

En yüksek ilk çatlak dayanımı ve en yüksek elastisite modülü ise bir tip mezo ve iki tip makro lifi birlikte içeren numuneden elde edilmiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımları da yine mezo ve makro lifleri birlikte içeren numunelerde görülmüştür. Betonun basınç dayanımı çelik lif eklenmesiyle artmaktadır. Bu artış en fazla, mezo ve makro lifin birlikte kullanıldığı karma lifli numunelerde olurken, iki farklı tipte makro lif kullanımının bu artışa fazla bir etkisi olmamıştır. Boyut ve narinlikleri farklı olan çelik liflerin kullanılması, betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde farklı oranlarda katkıda bulunmaktadır.

Yao ve arkadaşları [26] 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 2.13), üretilen ve deneye tabi tutulan üç tip karma lifli betonun içinde en büyük dayanımı ve eğilme tokluğunu veren numunenin karbon ve çelik liflerin birarada kullanıldığı numune olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise çelik ve karbon liflerin birbirine yakın elastisite modüllerine sahip olması ve aralarındaki pozitif etkileşimdir.



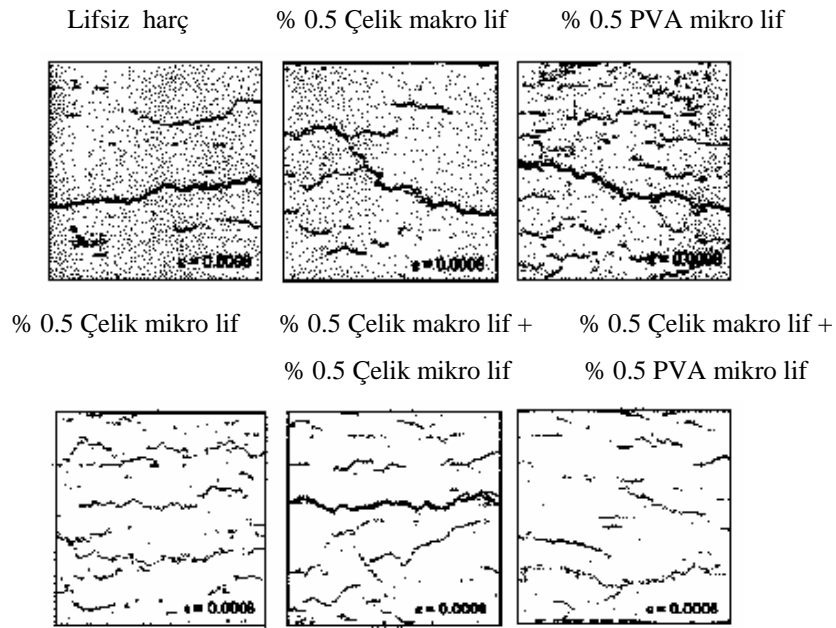
Şekil 2.13: Karma lifli betonarme kirişlerin eğilme gerilmesi-sehim eğrileri [26].

Qian ve Stroeven [27], yaptıkları çalışmada üç tip çelik lif ile polipropilen lifi birarada 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 şekildeğiştirmelerde yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış olduğu görülmüştür. SF3 liflerinin bu artıştaki etkisi azdır. SF1 lifleri büyük şekildeğiştirmeler sırasındaki enerji yutma kapasitesi açısından en etkili lifler olup, bu lifleri SF3 ve PP lifleri takip etmektedir. Küçük şekildeğiştirmeler sırasında SF1 ve PP lifleri arasında yük taşıma kapasitesi ve kırılma tokluğu bakımından olumlu bir etkileşim vardır. Ancak bu etki, şekildeğiştirmeler arttıkça kaybolmaktadır. Küçük şekildeğiştirmelerde, 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.

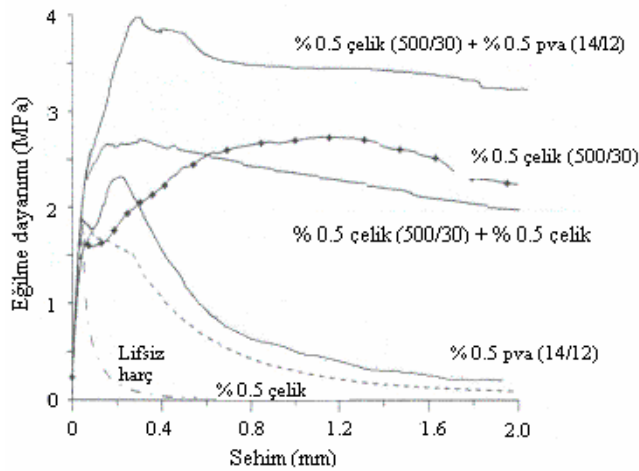
Qian ve Stroeven [28] yaptıkları bir başka çalışmada, lif boyunun, lif içeriğinin ve uçucu kül içeriğinin karma lifli betondaki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullandıkları lif çeşitleri bir önceki çalışmanın aynıdır. Bu çalışma sonucunda; uçucu kül gibi ince malzemelerin ultra incelikteki 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 [29], polivinil alkol lifler ile çelik lifleri birarada kullanarak yaptıkları çalışmada, betonun kırılma sürecini izlemiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen çatlak profili haritaları (Şekil 2.14) ve eğilme dayanımı-sehim ilişkileri (Şekil 2.15) birlikte incelendiğinde, karma lifli betonların birçok küçük boyutlu çatlak oluşturmak suretiyle, daha fazla enerji yutarak kırıldıkları görülmektedir.

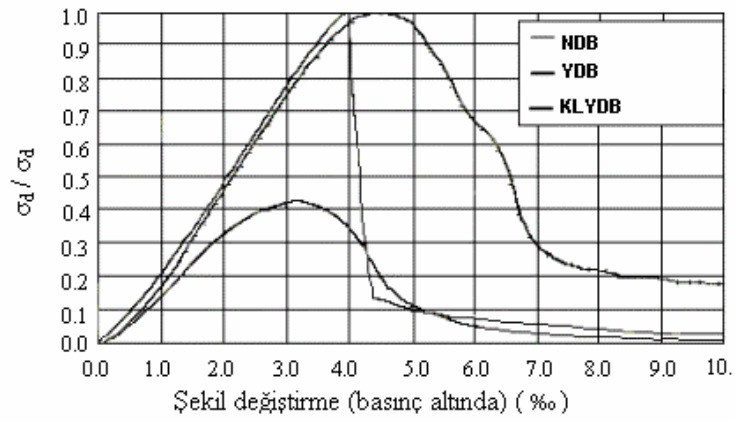


Şekil 2.14: Farklı tip ve miktarlarda lif içeren betonlarda çatlak genişliği haritaları [29].



Şekil 2.15: Farklı tip ve miktarlarda lif içeren betonlarda eğilme dayanımı-sehim ilişkileri [29].

Kützing [30], yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımı altındaki gevrek davranışını iyileştirmek amacıyla polipropilen ve çelik lifler kullanmıştır. Yüksek dayanımlı betonlara çelik lif katılmasıyla, çekme ve eğilme altındaki davranışların iyileştiği, enerji yutma kapasitesi ve deformasyon kapasitesinin arttığı bilinmektedir. Ancak, yapılan çalışmalarda liflerin basınç gerilmeleri altında belirgin etkilerinin olmadığı görülmüştür. Oysa, Kützing'in yaptığı çalışma, polipropilen ve çelik liflerin birlikte kullanılması ile betonun basınç gerilmeleri altında davranışının sünek bir hale getirilebildiğini göstermiştir. Şekil 2.16'da bu çalışmada elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramları görülmektedir.



Şekil 2.16: Normal dayanımlı (NDB), yüksek dayanımlı (YDB) ve karma lifli yüksek dayanımlı (KLYDB) betonların basınç kuvveti altında gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [30].

Karma lifli betonlarla ilgili yapılan bir başka çalışmada, Komlos ve arkadaşları [31], 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 değişirken, 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 [32] 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, ısıl çatlamların 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 [33], 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 [34], uzun ve kısa çelik liflerin birarada 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 [35], 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.

2.4. Silis Dumanı Kullanımı

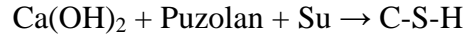
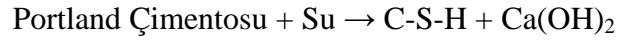
Silis dumanı (SD) silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde yan ürün olarak elde edilen, endüstriyel bir atıktır. Günümüzde oldukça yaygın bir araştırma ve uygulama alanına sahip olan bu malzemenin başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- % 85'ten %98'e varan SiO_2 içeriği,
- 0,1-0,2 μ tane büyüklüğü,
- Küresel tane şekli,
- Amorf yapısıdır [21,36].

Silis dumanının beton özellikleri üzerindeki etkisi, puzolanik etki ve boşlukları doldurma etkisi olmak üzere iki grup altında toplanabilir. Bu etkiler:

i. Puzolanik etki

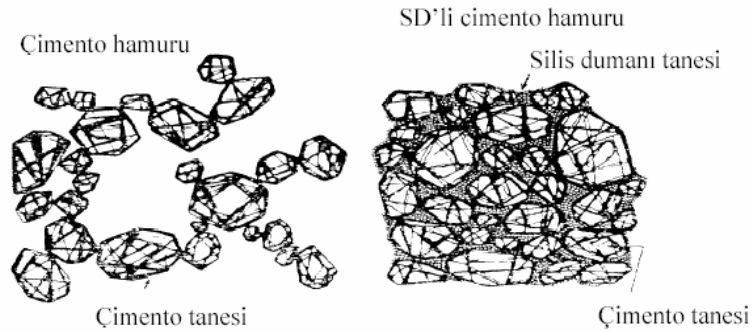
Silis dumanı gibi puzolanik malzemeler, tek başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH)_2 ile tepkimeye girerek, hidrolik bağlayıcı özeliği olan C-S-H'lerin oluşmasını sağlarlar:



Bu reaksiyonlar sonucunda, porozitenin daha fazla oldu\u011fu ve Ca(OH)_2 kristallerinin birikti\u011fi agrega-\u00e7imento hamuru aray\u00fczeyinde, aderans artarak, dayanımı ve d\u00fcrabilitesi daha y\u00fcsek olan bir yapı oluşur. Silis dumanının bu şekilde \u00e7imento hamurunda sıkı bir diziliş oluşturması özeli\u011fine puzolanik etki denir. Bu özeli\u011fi sayesinde y\u00fcsek dayanımlı yapıların uzun süreli performanslarında sağladığı üstünlükler nedeniyle, yüksek fiyatına rağmen, tercih edilen bir malzemedir [6].

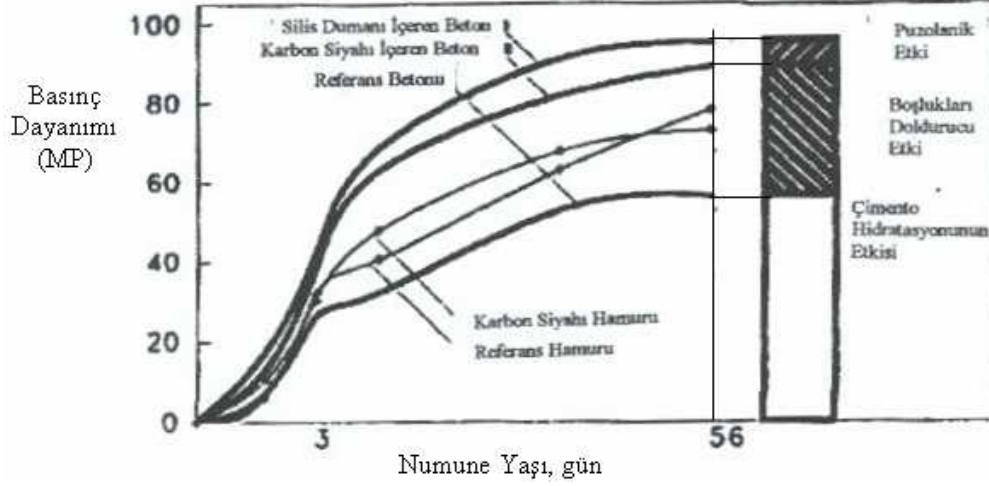
ii. Boşlukları doldurma etkisi

Boşlukları doldurma etkisi, silis dumanının çok ince taneli olmasından dolayı, \u00e7imento ile agregalar arasındaki çok ince boşlukları dahi doldurarak, yoğun ve y\u00fcsek dayanımlı bir matris oluşturmasıdır [36]. Bu malzemeler, agrega ve \u00e7imento arasındaki boşlukları azaltarak, daha homojen bir mikro yapının oluşmasını sağlarlar. Bu özeli\u011fin daha iyi anlaşılabilmesi için tane boyutları açısından değerlendirme yapmak gerekir. \u00c7imento taneleri yaklaşık 10 μm iken, SD taneleri 0,1 μm ile 0,2 μm arasındadır. Taneler arasındaki bu büyük boyut farkından dolayı, SD taneleri boşlukları rahatlıkla doldurabilmektedir [6]. Bu durum Şekil 2.17'de gör\u00fclmektedir.



Şekil 2.17: Silis dumanının \u00e7imento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi [5].

Bentur ve Goldman [37], yaptıkları çalışmada, silis dumanının puzolanik ve boşlukları doldurma etkisinin dayanımı ne kadar etkilediğini incelemiştir. Bağlayıcı özeli\u011fi bulunmayıp yalnızca boşlukları doldurma etkisi olan karbon siyahı içeren betonlar, silis dumanı içeren betonlar ve ikisini de içermeyen referans betonlar üretilmiş ve bu betonların basınç dayanımları elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 2.18'de gör\u00fclmektedir.



Şekil 2.18: Silis dumanının puzolanik ve boşlukları doldurma etkisi [37].

Bu çalışma sonucunda, dayanımlardaki farklılıklardan dolayı, boşlukları doldurma etkisinin puzolanik etki kadar önemli olduğu görülmüştür.

2.4.1. Silis dumanı katkısının taze beton özelliklerine etkisi

Çimentonun %5'i gibi az oranlarda kullanılan SD, taze betonun işlenebilirliğini çok fazla etkilememektedir. Ancak yüksek dozda SD kullanılması, hem taze betonun işlenebilirliğini ve çökmesini azaltmakta, hem de gerekli su miktarı artırmaktadır. Bu durumda, silis dumanlı betonlarda akışkanlaştırıcı veya süperakışkanlaştırıcı kullanımı kaçınılmaz olmaktadır.

SD tanelerinin yüzey alanlarının çok büyük olması, taze beton içerisindeki serbest suyun önemli ölçüde bağlanmasına ve bu suyun beton yüzeyine çıkmasının yavaşlamasına neden olurlar. Yani SD katkılı betonlarda terleme önemli miktarda azalmaktadır. Ancak terlemenin çok azalması veya hiç oluşmaması da plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini artırmaktadır. Bu durumda, beton yüzeyinin kürüne dikkat edilmesi, bu olumsuz etkiyi ortadan kaldıracaktır.

SD kullanımının betonun priz sürelerini artırdığı bilinmektedir.

SD'nin özgül ağırlığının, çimento ve agregalara göre daha düşük olması, SD katkılı betonların birim ağırlığında bir azalmaya neden olsa da, genellikle bu etki çok önemli değildir [36].

2.4.2. Silis dumanı katkısının sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

SD katkısı, betonda iri gözenekleri azaltarak daha fazla sayıda, küçük ve homojen dağılmış gözenek oluşumuna neden olmaktadır. Ancak iç yapıdaki toplam gözeneklilik değişmemektedir.

Betonun geçirgenliği, SD katkısıyla birlikte azalmaktadır. Çünkü, SD taneleri kılcal boşlukları küçülterek süreksiz hale getirmektedir. Böylece betonun durabilitesi de daha yüksek olmaktadır.

Çimento ile yerdeğiştirilen SD miktarı arttıkça, alkali-agrega reaktivitesine karşı dayanım da artmaktadır.

Su emmenin SD katkılı betonlarda, katkısızlara nazaran daha yavaş olduğu da bilinmektedir.

SD kullanımı, diğer puzolanlarda olduğu gibi yeni C-S-H jelleri oluşturarak ve agrega-hamur arayüzey bölgesini sıkılayıp, kuvvetlendirerek beton dayanımını artırır. Bunun yanında, belirli bir işlenebilirlik değerinin elde edilebilmesi için gerekli su miktarını da artırdıklarından, betonda kullanılacak optimum SD miktarı bu etkiler göz önünde bulundurularak elde edilecektir [36].

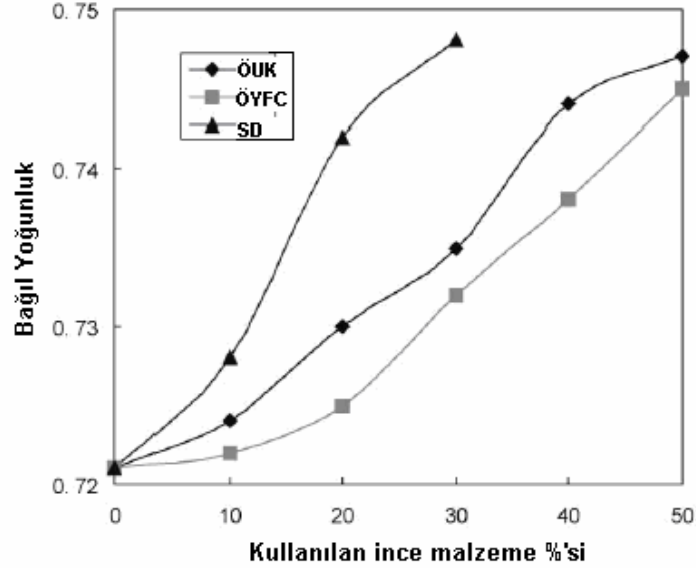
2.4.3. Silis dumanı kullanımının RPB üzerindeki etkileri

Silis dumanı kullanımının RPB üzerinde üç önemli etkisi vardır;

- Kendinden önceki sınıf malzemelerin arasındaki boşlukları doldurması,
- Silis dumanı tanelerinin mükemmel küresel yapılarından dolayı, reolojik özelliklerin geliştirilmesi,
- Birincil hidrasyon sonucunda oluşan kirecin, puzolanik reaksiyon sonucunda, bu taneler tarafından bağlanması [4].

Long ve arkadaşları [38], ultra incelikteki tanelerin kullanılmasıyla elde edilen çok yüksek dayanımlı betonları inceledikleri çalışmalarında, öğütülmüş uçucu kül (ÖÜK), öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve silis dumanını (SD), çimento ile ikili ve üçlü kombinasyon yaparak kullanmışlar ve bu tanelerin bağıl yoğunluk üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. İkili kombinasyonlara ait bağıl yoğunluk- ince malzeme miktarı eğrileri Şekil 2.19'da görülmektedir. Bu karışımların hepsinde

su/bağlayıcı oranı 0,22 dir. Eğrilerin eğiminden görüldüğü gibi, bağıl yoğunluğun artırılmasında en etkili ince malzeme, silis dumanıdır.

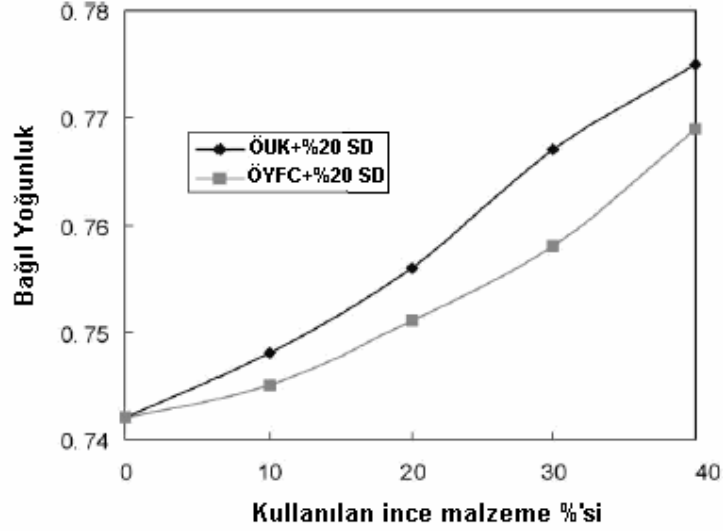


Şekil 2.19: İnce malzemelerin ikili kombinasyonlarının bağıl yoğunluğa etkileri [38].

Silis dumanının en iyi sonucu vermesinin üç sebebi olduğu düşünülmektedir:

- i) Taze çimento hamurunda, çimento taneleri arasındaki boşluklarda, su ve hava varken, SD gibi tozların eklenmesiyle, bu boşluklar bu tozlar tarafından doldurulmakta ve boşluk miktarı azalmaktadır.
- ii) SD tanelerinin ortalama çapı, ÖYFC ve ÖUK tanelerinin ortalama çapından küçüktür. Böylece boşluklar daha iyi doldurulmaktadır.
- iii) SD tanelerinin görünen yoğunluğu diğer tozlarınkinden küçük olup, aynı ağırlıktaki hacimleri daha fazladır.

Üçlü kombinasyonların kullanıldığı karışımlara ait bağıl yoğunluk- ince malzeme miktarı değişimi Şekil 2.20'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Üçlü kombinasyonlar, ikililere göre daha yüksek bağıl yoğunluk değerleri vermiş olup, bunun sebebi daha farklı tane boyutlarının birarada kullanılması dolayısıyla, boşlukları doldurma etkisinin daha etkili olmasıdır.



Şekil 2.20: İnce malzemelerin üçlü kombinasyonlarının bağıl yoğunluğa etkileri [38].

Eren ve Çelik [39], silis dumanı ve çelik lif kullanımının yüksek performanslı betonların bazı özelliklerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, üç farklı kancalı lifi, üç farklı miktarda kullanmışlardır. Bu liflerin uzunluk/çap oranları, 30/0,50; 60/0,80; 50/0,60 olarak, miktarları beton hacminin %0,5, %1,0 ve 2,0' si olarak değişmektedir. Silis dumanı %0, %5 ve % 10 olarak çimentoyla yer değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar;

- Lif çapı arttıkça yüksek dayanımlı betonların Vebe zamanı artmaktadır.
- Kullanılan bütün lif tipleri için, hapsolmuş hava miktarı azalmaktadır.
- %10 silis dumanı ile narinliği 60 olan liflerin %2 oranında kullanılması durumunda, yarmada çekme dayanımları %129,91 oranında artmaktadır.
- %10 silis dumanı ile narinliği 60 olan liflerin %1 oranında kullanılması durumunda, basınç dayanımdaki maksimum artış olan % 28,27 değeri elde edilmektedir.
- Narinliği 75 olan liflerin %2 oranında kullanıldığı ve silis dumanının kullanılmadığı numunelerde basınç dayanımında %40,69'luk bir düşüş gözlenmiştir.

2.5. Basınç Uygulanması

Yukarıda da anlatıldığı gibi, dayanım yoğunlukla birlikte artmaktadır. Yoğunluğu artırmanın en etkili yollarından birisi de, taze betona basınç uygulanmasıdır. Bu yöntemin etkileri üç başlık altında toplanabilir;

- Hapsolmuş havanın azaltılması; taze betona basınç uygulanması, hava kabarcıklarını tamamen veya önemli derecede azaltır.
- Fazla suyun uzaklaştırılması; taze betona birkaç dakika basınç uygulanması, kalıpların tamamen su geçirmez olmaması durumunda, fazla suyun kalıp boşluklarından çıkmasını sağlar. Fakat bu boşlukların, ince malzemenin çıkmasını önleyecek kadar dar olması da gereklidir. Örneğin, 7 cm çaplı bir deney numunesine 30 dakika süreyle 50 MPa'lık basınç uygulanması, betona karıştırma süresince eklenen suyun %20-25' inin uzaklaştırılmasını sağlayabilir. Bu yöntem, özellikle düşük su/çimento oranına sahip RPB' larında daha etkili sonuçlar verecektir. Bu betonlarda, bağıl yoğunlukta %2'lik bir artış elde edilebilmektedir.
- Kimyasal büzülmenin önlenmesi; uygulanan basıncın, karıştırma işleminden sonra 6-12 saat kadar devam ettirilmesi durumunda, kimyasal büzülmenin neden olduğu porozite önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Betona sertleşme boyunca basınç uygulanması, mikro çatlakların artmasına neden olabilir. Bunun nedeni, sertleşme esnasında kurulan rijid bağların kırılması ve basınç kaldırıldığında agregaların genişlemesi şeklinde açıklanabilir. Ancak bu mikro çatlaklar numune sertleştiğinde, ortadan kalkacaktır.

Bu üç etki birlikte düşünüldüğünde, bağıl yoğunlukta %6' lık bir artış sağlanmaktadır [4].

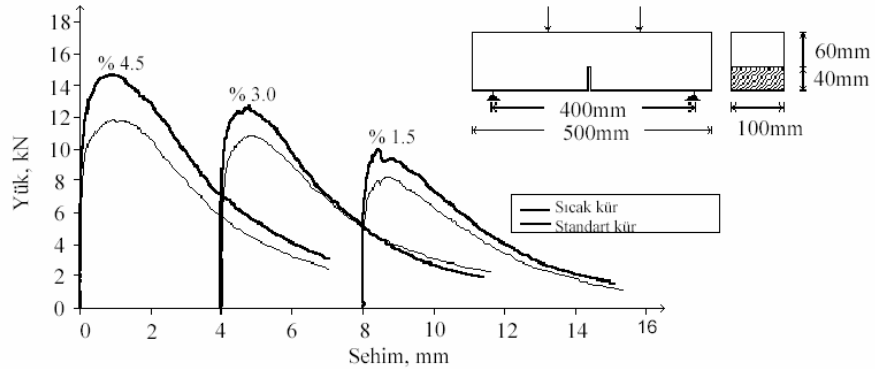
2.6. Sıcaklık Kürü Uygulanması

Reaktif pudra betonu gibi çok yüksek dayanımlı betonlar söz konusu olduğunda, sıcaklık kürü uygulanması üretimin bir parçası olup, kullanılacak agrega ve çimentonun özelliklerine göre belirlenmelidir.

Betona sıcaklık kürü uygulanmasıyla elde edilen üstünlükler şu şekilde sıralanabilir:

- 10 saat gibi kısa bir süre sonunda, 28 günlük mukavemete eşdeğer mukavemetlerin elde edilebilmesi,
- Daha kararlı bir iç yapı sayesinde, yani iç yapıda değişikliklerin olmamasından dolayı, betonun daha az rötre yapması,
- Sıcaklık kürü sayesinde, çimentonun %40-70 oranlarında silis dumanıyla yerdeğiştirilebilmesi ve bu sayede çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 'lerin bağlanmasıyla mukavemeti daha yüksek olan C-S-H'ların oluşması,
- Silis dumanı kullanılması halinde, serbest kirecin bağlanması nedeniyle iç yapının daha kararlı olması sayesinde, sıcaklık kürü uygulanan betonların kimyasal mukavemetinin ve donmaya karşı direncinin artırılması [40].

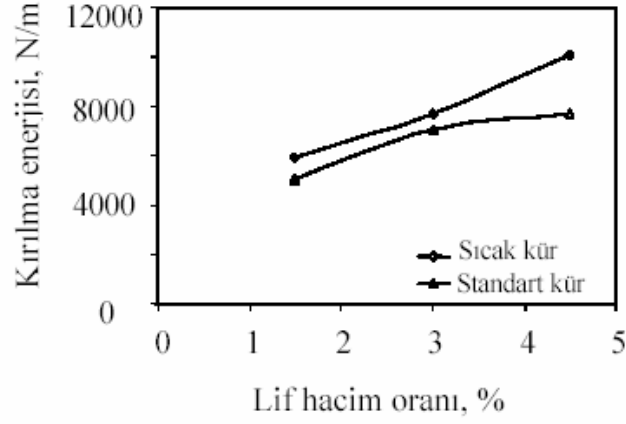
Özyurt [21], lif içeriğinin ve kür koşullarının ultra yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışına etkilerini incelediği çalışmada, %0; %1,5; %3,0 ve %4,5 oranlarında kısa kesilmiş çelik lifleri kullanmıştır. Ayrıca bu numunelerin bir bölümü standart kür koşullarında saklanırken, bir bölümüne ısı işlem uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda lif içeriğinin ve kür koşullarının etkileri Şekil 2.21'de görüldüğü gibidir.



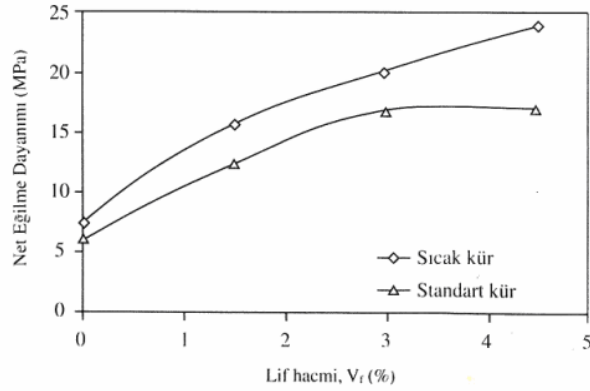
Şekil 2.21: Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerinde yük-sehim eğrisi [21].

Lif oranı arttıkça kırılma enerjisinin arttığı, lif hacim oranı %3'ü geçse bile, bu artışın azalarak devam ettiği, yine lif içeriğinin artmasıyla net eğilme dayanımının, tokluğun ve yarmada çekme dayanımlarının da arttığı görülmüştür. Basınç dayanımı da az miktarda artış göstermiştir. Numunelere ısı işlem uygulanması da betonun

mekanik özelliklerine olumlu yönde etki etmiştir. Bunun sebebi, yüksek sıcaklıkla beraber, öğütülmüş silisin aktif hale gelmesiyle malzemenin mikro yapısının gelişmesi olarak düşünülmüştür. Lif içeriğinin ve kür koşullarının, kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımlarına birleştirilmiş etkileri Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'de verilmiştir.



Şekil 2.22: Kür koşullarının ve lif hacminin kırılma enerjisine etkileri [21].



Şekil 2.23: Kür koşullarının ve lif hacminin net eğilme dayanımına etkileri [21].

Taze betona basınç uygulanmasının ve sıcaklık kürünün hidrasyon ve puzolanik reaksiyon üzerindeki etkilerinin incelendiği, Cheyrezy ve arkadaşları [41] tarafından yapılan çalışmada, ana karışımda kullanılan malzemeler ve karışım oranları çimento:1; silis dumanı:0,25; kum:1,1; su/bağlayıcı oranı: 0,12 olarak belirlenmiştir. Bazı karışımlara ise çimentonun %40 oranında kırılmış kuvars veya yaklaşık % 2 oranında çelik lifler katılarak farklı kombinasyonlar elde edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, reaktif pudra betonlarının mikro yapısı sıcaklık kürüne ve taze betona priz öncesi ve priz süresince uygulanan basınca bağlıdır. Sıcaklık arttıkça

C-S-H jellerinin mikro yapısı değişmektedir. Puzolanik reaksiyon sıcaklık artışıyla hızlanmaktadır. 200-250°C arasında ise kristal formu zonolit oluşumu görülmüştür. Ayrıca, RPB'lerin boşluk oranlarının uygulanan bu işlemlerle oldukça düşürüldüğü, boşluk çapının 3,75nm ile 100µm aralığını ve hacimce %9 oranını hiç geçmediği gözlenmiştir. Hatta basınçla birlikte, 150-200°C arasında kür uygulanan ve numunelerde bu aralıkta hiçbir boşluk oluşmamıştır.

Dugat ve arkadaşları [42], reaktif pudra betonlarının mekanik davranışını inceledikleri çalışmalarında, RPC200 ve RPC800 betonları için karışımlar hazırlamışlardır. Bu karışımlar Tablo 2.5'de gösterilmektedir.

Tablo 2.5: RPC200 ve RPC800'de kullanılan malzemeler ve miktarları [42].

MALZEMELER(kg/m³)	RPC200	RPC800
Portland çimentosu	950	980
Silis dumanı	237	225
Kırılmış kuvars	0	382
Silis kumu	997	490
13 mm çelik lif	146	0
3 mm paslanmaz çelik lif	0	617
Süperakışkanlaştırıcı	17	18
Toplam su	180	186
Su/bağlayıcı	0,15	0,14

RPC200 betonlarına, kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 gün boyunca 20°C'lik su kürü, ardından 4 gün boyunca 90°C'lik su kürü ve son olarak da 2 gün boyunca 90°C'lik kuru hava kürü uygulanmıştır. RPC800 betonlarına ise 90°C'lik kürü izleyen ve mikro yapının değişmesine neden olan 250°C kürü uygulanmıştır. Ayrıca, RPC200'lerden farklı olarak bu betonlara priz ve sertleşme boyunca basınç uygulanmıştır.

Reaktif pudra betonlarının basınç ve eğilmedeki mekanik özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada, silis dumanı, silis tozu ve süperakışkanlaştırıcıların kullanılmasıyla artan doluluk nedeniyle, RPC200 numunelerinde, 200 MPa' a varan basınç dayanımları, 66 Gpa civarında elastisite modülü ve dayanımın %60'ına varan lineer elastik limit elde edilmiştir. Ortalama eğilme dayanımları ise 32 MPa civarındadır. Süneklik, farklı lif içeriklerinde incelenmiş ve ortalama kırılma enerjisinin ölçülmesiyle birlikte, optimum lif içeriğinin %2-3 arasında olduğu, daha fazla lifin kullanıldığı durumlarda, ortalama kırılma enerjisinin düştüğü görülmüştür.

Basınç altında, RPC800 betonlarının, RPC200'lere göre farklı bir davranış gösterdiği, bu numunelere priz ve sertleşme boyunca uygulanan basıncın, düşük yükler altında bu malzemelerin şekil değiştirme sertleşmesi göstermelerine neden olduğu görülmüştür. Bu süreç boyunca, elastisite modülleri 36Gpa'dan 74 MPa' a çıkmakta, dayanımın %85'ine varıldıktan sonra sabit kalmaktadır [42].

2.7. Süperakışkanlaştırıcı Katkı Kullanımı

Betonda süperakışkanlaştırıcı kullanımı, betonun tarihsel gelişiminde önemli bir yere sahiptir ve yüksek performanslı betonların üretilmeye başlanmasında önemli bir rolü vardır. Süperakışkanlaştırıcılar, betona çok düşük dozajlarda eklenen katkılardır.

İlk defa 1960'larda kullanılmaya başlayan bu katkılar, çok düşük su/çimento oranlarında sağladıkları yüksek işlenebilirlik sayesinde, betona önemli dürabilite ve dayanım özellikleri kazandırmışlardır. Süperakışkanlaştırıcıların hidrasyon ürünleri üzerinde herhangi bir kimyasal etkileri yoktur. Ancak, çimento hamurunun ve betonun mikro yapısını etkilerler. Böylece, betonun porozite ve terlemesinde önemli azalmalar meydana gelirken, kuruma rötresi ve sünmesi de bir miktar azalmaktadır [43]. Yüksek dayanımlı betonların üretimindeki en önemli etken su/çimento oranı olup, bu oran düştükçe dayanım artmaktadır. Süperakışkanlaştırıcılar sayesinde bu oran çok düşük seviyelere çekilebilmiş ve dayanım ile birlikte dürabilitenin de artması sağlanmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde üretimde kullanılan malzemeler ve özellikleri, üretilen betonlara uygulanan deneyler ile bu deneylerin yapılışı anlatılmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Çimento

Üretimde kullanılan çimento Nuh çimento fabrikasının bir ürünü olup, yüksek dayanımlı beton üretimi için uygun bir çimento tipi olan PÇ 42,5 kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Kullanılan çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri.

ÖZELİK	DEĞERİ
Blaine özgül yüzeyi (mm ² /gr)	335
C ₃ S (%)	58
C ₂ S (%)	15
C ₃ A (%)	4,3
C ₄ AF (%)	11,9
Klorür (%)	0,008
Toplam alkali (%)	0,56
SO ₂ (%)	2,5
Kızdırma kaybı (%)	2,1
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,20
2 günlük basınç dayanımı (MPa)	26,8
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	59,8
2/28 oranı	0,45
Priz başlangıcı (dakika)	180
Priz sonu (dakika)	246

3.1.2. Silis dumanı

Bu çalışmada kullanılan silis dumanı Norveç'ten ithal edilmiş olup, Elkem firmasının U 968 tipi ürünüdür. Bu ürüne ait kimyasal ve fiziksel özelliklerin limit değerleri Tablo 3.2'de görülmektedir.

Tablo 3.2: Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer (%)
SiO ₂	96
C	1,50
Fe ₂ O ₃	0,25
Al ₂ O ₃	0,70
CaO	0,50
MgO	0,60
K ₂ O	0,85
Na ₂ O	0,25
P ₂ O ₅	0,10
SO ₃	0,50
Cl	0,10
H ₂ O	0,80
Kızdırma Kaybı	1,50
İri Parçacıklar(>45µm)	1,00
pH değeri (taze)	5,0-8,0
Yoğunluk	250-450 kg/m ³

3.1.3. Kumlar

Kullanılan kumlar, iri silis kumu ve ince silis kumu olmak üzere iki çeşittir. Bu kumlar Siltaş'tan temin edilmiş olup, elek analizleri Tablo 3.3'de ve fiziksel özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.3: Kullanılan kumların elek analizleri.

Elek göz boyutu (mm)	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125
İri Silis Kumu (Geçen %)	100	100	100	96	26	1	0	0
İnce Silis Kumu (Geçen %)	100	100	100	100	100	100	88	2

Tablo 3.4: Kullanılan kumların fiziksel özellikleri.

FİZİKSEL ÖZELİKLER	İri Silis Kumu	İnce Silis Kumu
Birim Ağırlık	Sıkı: 1608 Gevşek: 1487	1495 1355
Görünen Özgül Ağırlık (kg/m³)	2614	2598
Su Emme (%)	1,0	0,1
Çökeltme Yoluyla İnce Malzeme (%)	0,00	0,00
Yıkama Yoluyla İnce Malzeme (%)	0,12	0,35
Organik Madde	renksiz	renksiz

3.1.4. Çelik lifler

Bu çalışmada, OL6/16, Dramix ZP305 ve Dramix ZP305X olmak üzere üç farklı tipte çelik lif kullanılmıştır.

3.1.4.1. OL 6/16

Düz şekilli, kısa kesilmiş, üstü pirinç kaplanmış, sarı renkli lifler olup özellikleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5: OL6/16 liflerinin özellikleri.

Teknik Özellikler	OL6/16
Boy (mm)	: 6
Çap (mm)	: 0,16
Narinlik	: 37,5
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	: 7,85
Çekme Dayanımı (MPa)	: 2250

3.1.4.2. Dramix ZP305

İki ucu kancalı, birbirine tutkalla birleştirilmiş, standarda göre C sınıfında ve A tipinde soğuk çekilmiş çelik liflerdir. Başlıca uygulama alanları püskürtme beton ve şap betonları olan bu liflerin teknik özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6: Dramix ZP305 liflerinin özellikleri.

Teknik Özellikler	Dramix ZP305
Boy (mm)	: 30
Çap (mm)	: 0,55
Narinlik	: 55
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	: 7,85
Çekme Dayanımı (MPa)	: 1100 (min)

3.1.4.3. Dramix ZP305X

İki ucu kancalı, birbirine tutkalla birleştirilmiş, sarı renkte yüksek dayanımlı liflerdir. Bu liflere ait teknik özellikler Tablo 3.7’de görülmektedir.

Tablo 3.7: Dramix ZP305X liflerinin özellikleri.

Teknik Özellikler	Dramix ZP305X
Boy (mm)	: 30
Çap (mm)	: 0,55
Narinlik	: 55
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	: 7,85
Çekme Dayanımı (MPa)	: 2250(min)

3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı

Chryso firması tarafından üretilen ve güçlendirilmiş polikarboksilat bazlı yeni jenerasyon bir süperakışkanlaştırıcı olan Optima 200 kullanılmıştır. Bu süperakışkanlaştırıcı düşük su/çimento oranında yüksek işlenebilirlikte beton elde edilmesinde, taze betonun zaman içerisinde işlenebilirliğini korumasında ve betonun erken yüksek mukavemet kazanmasında oldukça etkilidir. Özellikle hazır betonlarda ihtiyaç duyulan reoloji koruması ve mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanımı tavsiye edilmektedir. Bu malzemeye ait teknik özellikler Tablo 3.8’de görülmektedir.

Tablo 3.8: Kullanılan süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri.

Teknik Özellikler	Optima 200
Görünüm	: Sıvı
Renk	: Açık sütlükahve
Yoğunluk (gr/cm ³)	: 1,09±0,01
pH	: 6,5±1,5
Klorür içeriği (%)	: < 0,1
Katı madde (%)	: 20±1,5
Na O eşdeğeri (%)	: < 1

3.2. Beton Üretimi

Bu çalışmada, çimento, kum, silis dumanı, su ve süperakışkanlaştırıcı miktarlarının sabit olduğu ve sadece lif tipinin değiştiği 5 farklı karışım tasarlanmıştır. Lif miktarı, hacimce %3 oranında sabit tutulmuştur. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için, aynı miktarda malzemenin kullanıldığı bir adet lifsiz beton üretilmiştir.

Tüm karışımlarda çimento dozajı 1000 kg/m^3 olup, silis dumanı çimentonun %25'i oranında kullanılmıştır. Yine tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranı 0,17 ve su/çimento oranı 0,21'dir. Betonun kıvamı, yeni kuşak bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlanmıştır.

3.2.1. Üretimde izlenen sıra

- Çimento, iri silis kumu, ince silis kumu ve silis dumanı betoniyerde kuru olarak karıştırıldı.
- Süperakışkanlaştırıcı ile karışım suyunun bir kısmı önceden karıştırılarak, betoniyere eklendi.
- Liflerin tamamı karışıma ilave edildi.
- Kalan karışım suyu eklendi.

3.2.2. Numune kodlarının belirlenmesi

Numune kodları, lif tipini ve kür durumunu gösteren iki kısaltmadan oluşmaktadır. İlk kısaltma lif tipini göstermekte olup, OL 6/16 liflerin kullanıldığı numuneler için O, ZP 305 liflerinin kullanıldığı numuneler için Z, ZP 305 X liflerinin kullanıldığı numuneler için ise X harfi kullanılmıştır. Bu liflerin karma olarak kullanıldığı numuneler için ise yine bu kısaltmalara göre, OL 6/16 ve ZP 305 liflerinin birarada kullanıldığı numunelerde OZ, OL 6/16 ve ZP 305 X numunelerinin birarada kullanıldığı numunelerde OX kısaltması kullanılmıştır.

İkinci kısaltma kür durumunu göstermekte olup, normal kür uygulanan numuneler için N ve 90°C 'de buhar kürü uygulanan numuneler için S harfi kullanılmıştır.

Örneğin XN kodlu numune, ZP 305 X liflerinin kullanıldığı normal kürlü numuneleri, XS ise ZP 305 X liflerinin kullanıldığı buhar kürlü numuneleri göstermektedir.

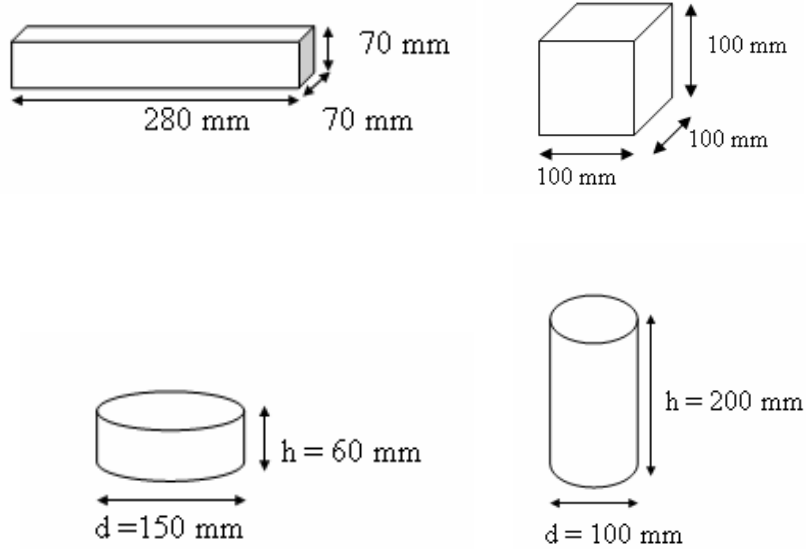
Numune kodları ve lif yüzdeleri Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9: Numune kodları ve lif yüzdeleri

Numune Kodu		OL 6/16	ZP305	ZP305X	TOPLAM
Normal Kür	Buhar Kürü				
MN	MS	0	0	0	0
ON	OS	3	0	0	3
ZN	ZS	0	3	0	3
XN	XS	0	0	3	3
OZN	OZS	1,5	1,5	0	3
OXN	OXS	1,5	0	1,5	3

3.2.3. Numune boyutları ve şekilleri

Bu çalışmada, her bir karışımdan, 70x70x280 mm boyutlarında 8 adet prizma, 100x100x100 mm boyutlarında 6 adet küp, çapı 150mm ve yüksekliği 60 mm boyutunda 10 adet disk ile çapı 100 mm ve yüksekliği 200 mm boyutunda 4 adet silindir numune üretilmiştir. Bu numuneler Şekil 3.1’de görülmektedir.

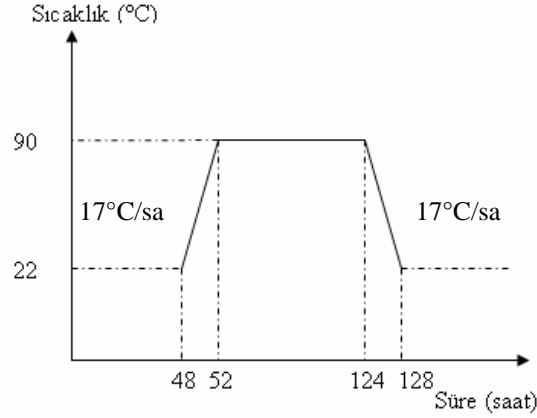


Şekil 3.1: Üretilen numunelerin şekil ve boyutları.

3.2.4. Isıl işlem programı

Üretilen numuneler iki bölüme ayrılmıştır. İlk grup, kalıptan çıkarıldıktan sonra, deneylerin yapılacağı zamana kadar $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de kirece doymuş su içerisinde bekletilmiştir. İkinci grup ise kalıptan çıkarıldıktan sonra, kullanılan malzemelerin özelliklerine uygun bir şekilde, 3 gün boyunca $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kirece doymuş su

içerisinde tutulmuştur. Numuneler 90°C sıcaklığa, 4 saatlik bir sürede ısıtılmış ve yine 3 günün sonunda, 4 saatlik bir sürede soğutulmuşlardır. Bu durumu gösteren grafik Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Isıl işlem programı.

Uygulanan bu buhar kürünün sonunda numuneler deneylerin yapılacağı zamana kadar, 20°C ± 2°C’de kirece doymuş su içerisinde bekletilmişlerdir.

3.3. Taze Beton Deneyleri

- **Birim ağırlık deneyi**

Üretilen numuneler kalıplara yerleştirilmeden önce, taze haldeyken, hacmi belirli olan bir kap içerisine vibrasyon uygulanarak yerleştirildi ve taze betonun ağırlığı bulundu. Elde edilen bu ağırlık değerinin hacime bölünmesiyle birim ağırlıklar elde edildi. Numunelere ait taze beton özellikleri Tablo 3.10’da verilmiştir.

Tablo 3.10: Taze beton özellikleri

Karışım Kodu	M	O	Z	X	OZ	OX
Çimento, kg/m ³	1000	981	983	993	981	980
Silis dumanı, kg/m ³	250	245	246	248	245	245
Su, kg/m ³	114	112	112	113	112	112
İri silis kumu, kg/m ³	325	319	320	323	319	319
İnce silis kumu, kg/m ³	493	484	485	490	484	483
Süperakışkanlaştırıcı, kg/m ³	120	118	118	119	118	118
Çelik lif, kg/m ³	0	232	232	234	232	231
Su/Çimento	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Su/Bağlayıcı	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Birim ağırlık, kg/m ³	2302	2490	2496	2520	2490	2488
Hava boşluğu (%)	5,8	4,6	4,4	3,5	4,6	4,7

3.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.4.1. Silindir basınç deneyi

Basınç deneyleri, çapı 100 mm ve yüksekliği 200 mm olan silindir numuneler üzerinde, 3000 kN kapasiteli yükleme makinası kullanılarak yapıldı. Deney yapılacak numuneler, kür havuzundan alınarak 1 gün kurumaya bırakıldı. Daha sonra uygun şekilde başlık yapılarak deneye hazırlandı.

Numune üzerine ölçüm açıklığı 139 mm olan ve tek tarafı rijit bir çerçeve yerleştirilerek, her 20 kN'luk yüke karşı gelen düşey yer değiştirme değerleri okundu. Bu şekilde elde edilen grafiklerden elastisite modülü değerleri hesaplandı.

Bu deneyler sonucunda elde edilen silindir basınç dayanımları ve elastisite modülleri Tablo 3.11'de görülmektedir.

3.4.2. Küp basınç deneyi

Küp basınç deneyleri, 30. gününü dolduran 100 x100 x 100mm'lik küp numuneler üzerinde, 3000 kN kapasiteli yükleme makinası kullanılarak yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen küp basınç dayanımları Tablo 3.11 Sertleşmiş Beton Özellikleri tablosunda görülmektedir.

3.4.3. Yarmada çekme deneyi

Yarmada çekme deneyleri, 150 mm çapında ve 60 mm yüksekliğinde disk numuneler üzerinde yapıldı. Bu deneylerde, numunelere çizgisel yük uygulanarak, yarma kuvvetleri bulundu ve bu kuvvetlerin yardımıyla da yarmada çekme dayanımları aşağıdaki formül kullanılarak elde edildi.

$$f_t = \frac{2P_{\max}}{\pi DL} \quad (3.1)$$

f_t : Yarmada çekme dayanımı (N/mm²)

P_{\max} : Maksimum yük (N)

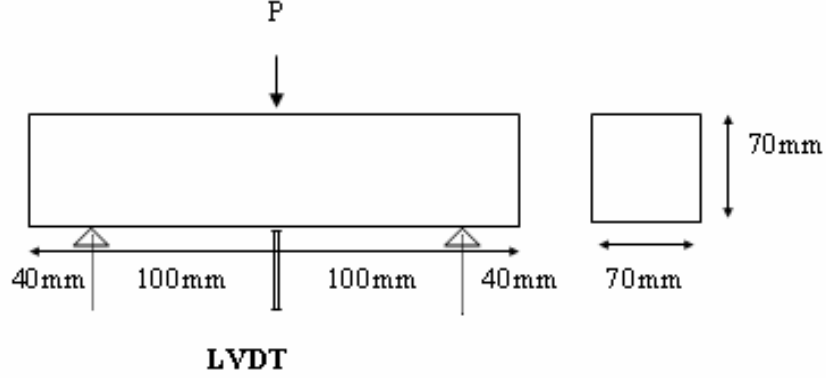
D : Silindirin çapı (mm)

L : Silindirin yüksekliği (mm)

Yarmada çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar, Tablo 3.11 Sertleşmiş Beton Özellikleri tablosunda görülmektedir.

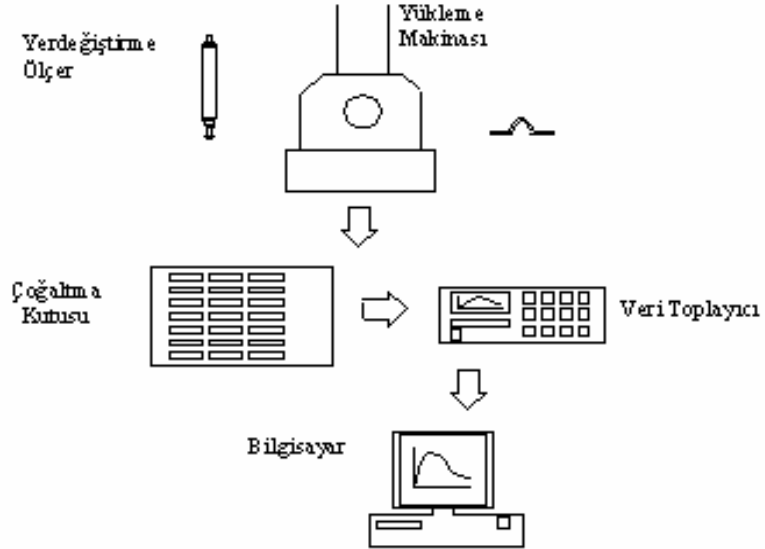
3.4.4. RILEM kırılma enerjisi deneyleri

Kiriş numunelerin ortasından tekil yük uygulanarak yapılan bu deneylerde, kontrollü bir kırılmanın sağlanması için, numunelerin ortasına kesit alanının yaklaşık %40'ı kadar bir çentik açılır. Numunenin etkin kesit alanı belirlenir. Oluşturulan 3 noktalı eğilme deney düzeneği Şekil 3.3 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3: RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.

Deneyden önce numunenin alt yüzeyine sehimi ölçmek amacıyla 1 adet LVDT alıcısı yerleştirilir. Bu deney düzeneği ile, uygulanan yükler ve bu yüklerle karşılık gelen düşey deplasmanlar alıcılardan bilgisayara aktarılarak, yük-sehim grafiklerine geçilir. Veri toplama sistemi Şekil 3.4'de gösterilmektedir.

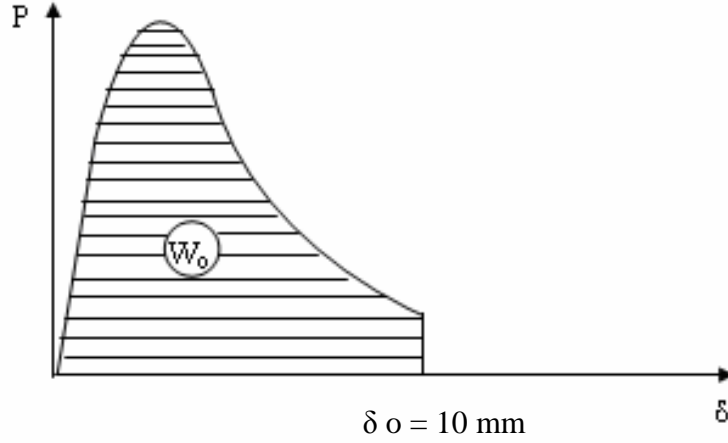


Şekil 3.4: Veri toplama sistemi.

3.4.4.1. Kırılma enerjilerinin hesaplanması

Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda, bu eğrinin altında kalan alan hesaplanarak kırılma süresince harcanan enerjiye geçilmektedir. Sünek malzemelerde şekil değiştirme kapasitesi yüksek olduğu için, kırılma anında büyük sehimlere ulaşılmakta ve harcanan enerji artmaktadır. Burada, numunelerin yük-sehim eğrileri elde edilerek kırılma enerjileri hesaplanabilmektedir. Üretilen numunelerde çelik lifler kullanıldığı için kırılma yavaş gerçekleşmekte ve sehim miktarı artmaktadır.

Şekil 3.5’de örnek bir yük-sehim eğrisi görülmekte ve kırılma enerjisinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Örnek bir yük-sehim eğrisi.

$$G_f = (W_0 + mg\delta_0) / A_{lig} \quad (3.2)$$

W_0 = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan (Nm)

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi (9.81 m/sn^2)

δ_0 = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m), çelik lifli betonlarda $\delta_0 = 10 \text{ mm}$,

A_{lig} = Etkin kesit alanı (m^2)

Bu deneylerde kullanılan $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}$ boyutundaki prizmaların etkin kesit alanı $40 \times 70 \text{ mm}$ olarak seçildi ve orta noktalarından elmas testere yardımıyla, 30 mm 'lik çentikler açıldı. Numuneler Şekil 3.3 de görülen şekilde, Instron marka yükleme makinasına yerleştirildi. Yükleme hızı, $0-1,25 \text{ mm}$ için $0,05 \text{ mm/dak}$, $1,25-2,5 \text{ mm}$

için 0,1 mm/dak ve 2,5 mm'den sonrası için de 1,25 mm/dak olarak belirlendi. Böylece her numune için yük-sehim eğrileri elde edildi ve bu eğrilerin altında kalan alanlar yardımıyla kırılma enerjileri hesaplandı. Bu değerler, Tablo 3.11 Sertleşmiş Beton Özellikleri tablosunda görülmektedir.

3.4.4.2. Net eğilme dayanımlarının hesaplanması

Numunelerin eğilme dayanımları, aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_{\text{net}} = (3PL) / 2BD^2 \quad (3.3)$$

F_{net} = Net eğilme dayanımı

P = Kırılma yükü (N)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

B = Numune kesitinin genişliği (mm)

D = Numune kesitinin yüksekliği (mm)

Numunelere ait net eğilme dayanımı değerleri, Tablo 3.11 Sertleşmiş Beton Özellikleri tablosunda görülmektedir.

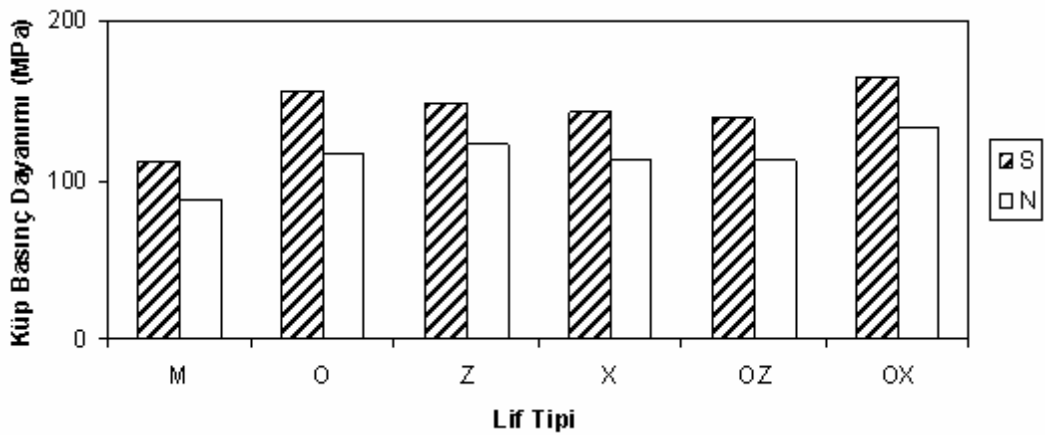
Tablo 3.11: Sertleşmiş beton özellikleri

Karışım Kodu	MN	MS	ON	OS	ZN	ZS	XN	XS	OZN	OZS	OXN	OXS
Küp Basınç Dayanımı (MPa)	87,3	111,3	116,3	156,0	122,0	147,7	112,3	143,0	112,7	139,0	133,0	163,7
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	131,2	136,3	146,7	175,1	113,4	133,8	130,0	149,8	143,7	144,3	133,1	149,4
Elastisite Modülü (MPa)	44100	44100	45400	45100	41600	38500	45900	45100	44600	42800	48100	41300
Yarma Çekme Dayanımı (MPa)	8,7	9,4	12,4	15,5	13,5	16,0	15,6	17,0	15,0	15,4	15,1	17,6
Kırılma Enerjisi (N/m)	181	201	6043	6778	14254	14079	21617	24821	8067	10343	19829	20140
Net Eğilme Dayanımı (MPa)	10,2	12,8	23,8	25,4	35,2	37,4	37,7	44,9	28,1	35,7	38,5	45,8

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Küp Basınç Deneylelerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonda çelik lif kullanımının basınç dayanımına etkisi çok belirgin değildir. Ancak, kısa kesilmiş OL 6/16 liflerinin mikro çatlak oluşumunu engelleyerek, elastik bölgedeki davranışı iyileştirmesi beklenmektedir. Küp basınç deneylerinden elde edilen değerler Tablo 3.11’de ve bu değerlerin lif tipi ve kür durumuna göre değişimleri de Şekil 4.1’de görülmektedir. Z ve X numuneleriyle kıyaslandığında, en yüksek küp basınç dayanımları, beklenildiği gibi O numunelerinden elde edilmiştir. OL 6/16 liflerinin ZP 305 ve ZP 305 X lifleriyle karma olarak kullanıldığı OZ ve OX numunelerine bakıldığında, OZ numunelerinin basınç dayanımları tekil lifli O ve Z numunelerinin değerlerinden düşük çıkmıştır. Ancak bu durum OX numunelerinde tam tersi bir etki göstermiştir. OX numunelerinden elde edilen değerler hem O numunelerinden hem de X numunelerinden fazla çıkmıştır. Bunun nedeninin, yüksek dayanımlı betonda yüksek dayanımlı mezo ve makro liflerin birarada kullanılmasının, mezo ve makro çatlakların engellenmesindeki olumlu etkisinin olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.1: Küp basınç dayanımlarının lif tipi ve kür durumuna göre değişimi
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Betona buhar kürü uygulanması, matris dayanımını artırmakta ve böylece liflerle olan aderans da önemli bir artış görülmektedir. Matrisle lifler arasındaki aderansın

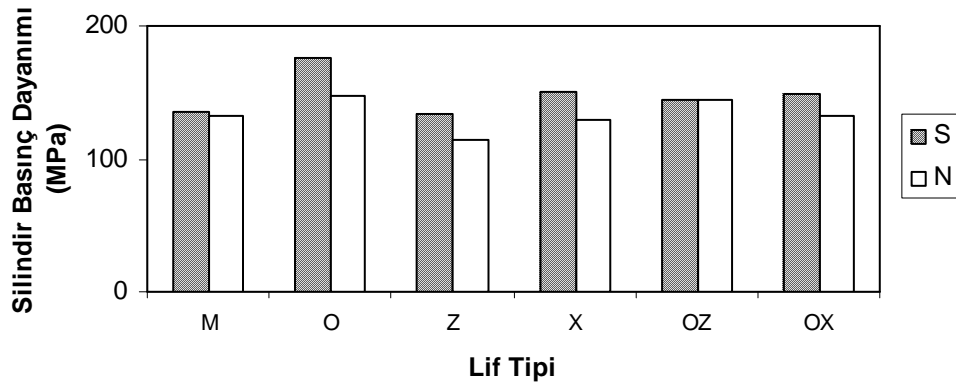
artması ise dayanımı artırmaktadır. Küp basınç deneylerinden elde edilen dayanım değerlerine bakıldığında, buhar kürü uygulanan numunelerin küp basınç dayanımları, normal kür uygulanan numunelerinkine göre %21-34 civarında artmıştır. Lifleri tekil olarak içeren O, Z ve X numuneleri incelendiğinde, O ve X numunelerinde buhar kürünün küp basınç dayanımları üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Buhar kürü uygulanmasıyla, O numunelerinin küp basınç dayanımlarında %34, X numunelerinkinde ise %28'lik bir artış gözlenmiştir. Bu artış oranı Z numunelerinde %21'dir. O ve X numunelerindeki bu belirgin artışın, bu numunelerde kullanılan liflerin yüksek dayanımlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tüm numunelere ait küp basınç dayanımları EK A, Tablo A.1'de verilmiştir.

4.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

4.2.1 Silindir basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

Silindir basınç deneylerinden elde edilen kırılma yüklerinin, numune kesit alanına bölünmesiyle hesaplanan silindir basınç dayanımları Tablo 3.11'de, dayanımların lif tipine ve kür durumuna göre değişimleri ise Şekil 4.2'de görülmektedir. Silindir basınç dayanımlarında, en büyük değerler beklenildiği gibi, O numunelerinden elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değerleri ise Z numunelerine aittir. Diğer numunelerde, lif tipi basınç dayanımını önemli derecede etkilememiştir.



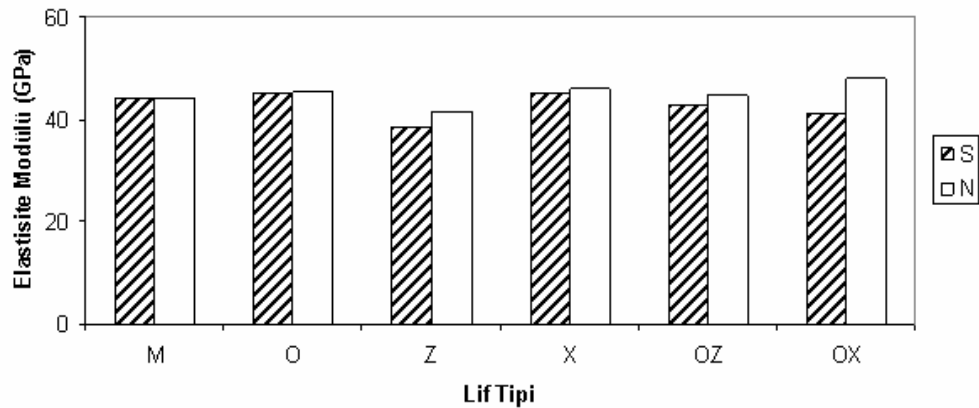
Şekil 4.2: Silindir basınç dayanımlarının lif tipi ve kür durumuna göre değişimi.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Buhar kürü uygulanması, tüm numunelerin basınç dayanımlarında bir miktar artış meydana getirmiştir. En büyük artış, %20 oranında O numunelerinde görülmektedir. ON numunelerinin ortalama dayanımı 147 MPa iken, OS numunelerinde bu değer 176 MPa'a çıkmıştır.

Tüm numunelere ait silindir basınç dayanımları EK B, Tablo B.1'de verilmiştir.

4.2.2. Elastisite modüllerinin değerlendirilmesi

Silindir basınç deneylerinden elde edilen yük-deplasman değerlerinden, gerilme-şekil değiştirme değerlerine geçilmiş ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerin eğimlerinden elde edilen elastisite modüllerinin ortalama değerleri Tablo 3.11'de ve bu değerlerin lif tipi ve kür durumuna göre değişimleri Şekil 4.3'de görülmektedir. Elastisite modülü değerlerinin, lif tipinden ve kür durumundan önemli derecede etkilenmediği görülmüştür.



Şekil 4.3: Elastisite modüllerinin lif tipi ve kür durumuna göre değişimi.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

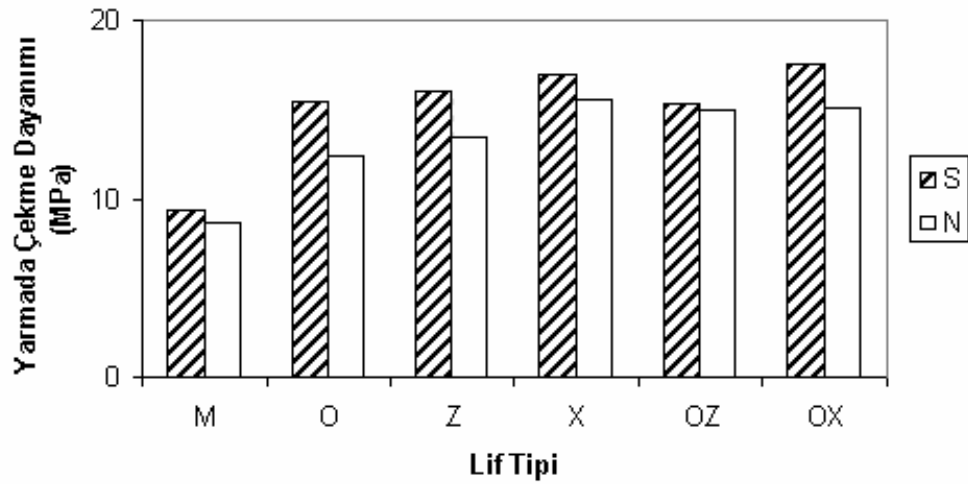
Tüm numunelere ait elastisite modülleri EK B, Tablo B.2'de verilmiştir.

4.3. Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Disk numunelere uygulanan yarmada çekme deneylerinden elde edilen kırılma yüklerinin, 3.1 denkeleminde yerine konulmasıyla hesaplanan yarmada çekme dayanımlarının ortalama sayısal değerleri Tablo 3.11'de, lif tipi ve kür durumuna göre değişimleri ise Şekil 4.4'de görülmektedir.

Betona lif katılması, yarmada çekme dayanımlarını buhar kürlülerde %64-87, normal kürlülerde ise %43-79 oranında artırmıştır.

Buhar kürü uygulanan numunelere bakıldığında, lifsiz numunelere göre en büyük artışlar, yüksek mukavemetli ve kancalı uçlu ZP 305 X liflerinin, tekil olarak ve OL 6/16 lifleriyle karma olarak kullanıldığı numunelerden elde edilmiştir. Matris dayanımının artması, yüksek mukavemetli liflerin daha yüksek kapasitede çalışmasını sağladığından, çekme dayanımlarının arttığı düşünülmektedir. O, Z ve OZ numunelerinin çekme dayanımlarındaki artış, X ve OX numunelerine göre daha azdır.



Şekil 4.4: Yarmada  ekme dayanımlarının lif tipi ve k r durumuna göre değişimi.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

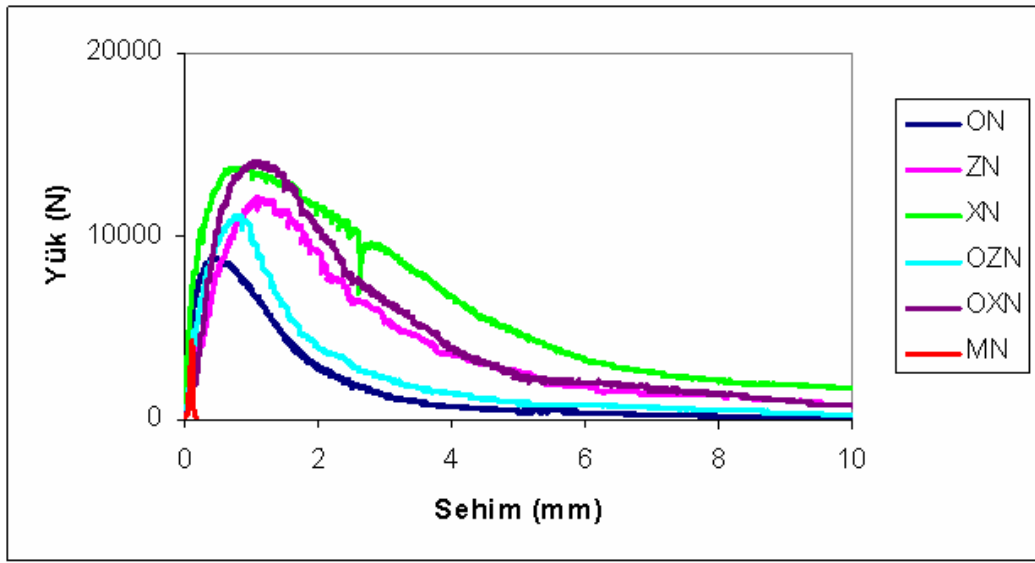
Normal kürlü numuneler incelendiğinde, yarmada çekme dayanımlarında lifsiz numunelere göre çok önemli artışlar olmasına karşın, lif tiplerine göre olan değişim çok büyük değildir. Ancak, en önemli artışlar beklenildiği gibi uzun ,kancalı ve yüksek mukavemetli liflerin kullanıldığı X ve OX numunelerinden elde edilmiştir. En düşük artışlar ise çekme dayanımında çok fazla etkili olmadığı bilinen OL 6/16 liflerinin tekil olarak kullanıldığı O numunelerinde g r lm ştir.

Tüm numunelere ait yarmada çekme dayanımları EK C, Tablo C.1'de verilmiştir.

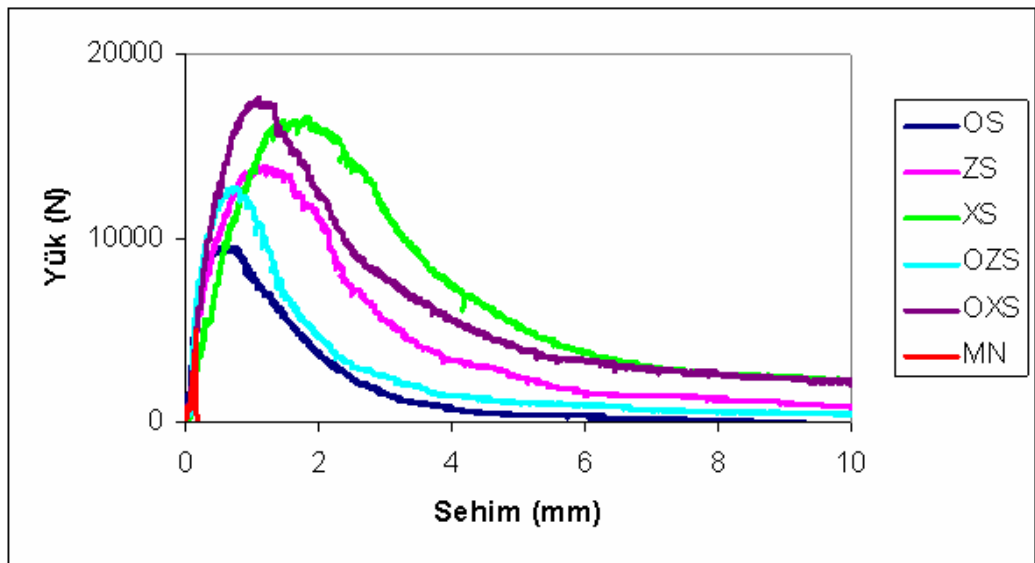
4.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinin Değerlendirilmesi

4.4.1. RILEM kırılma enerjilerinin değerlendirilmesi

Numunelerin kırılması sırasında harcanan enerji, dolayısıyla da numunelerin sünekliliği, yük-sehim eğrilerinin altında kalan alanlara bağlıdır. RILEM kırılma enerjisi deneylerinden, tüm numuneler için elde edilen yük-sehim eğrileri EK D'de verilmiştir. Bu eğrilerden, her bir numune çeşidi için ortalama bir eğri seçilerek bunların normal kür ve buhar kürü için ayrı ayrı birarada toplandığı grafikler ise Şekil.4.5 ve Şekil 4.6'da görülmektedir.

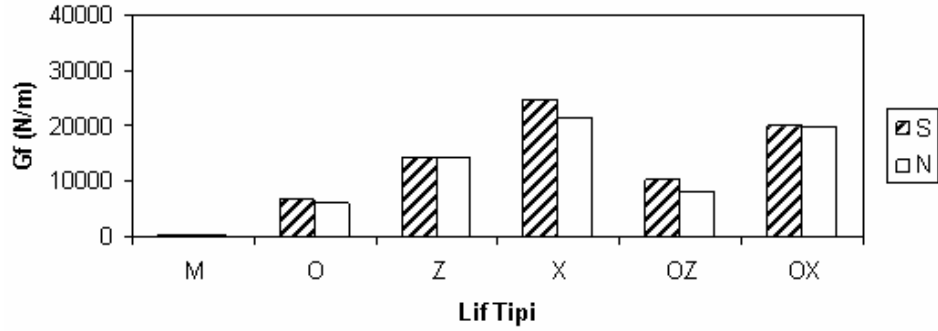


Şekil 4.5: Normal kür uygulanan numunelerin ortalama yük-sehim eğrileri.



Şekil 4.6: Buhar kürü uygulanan numunelerin ortalama yük-sehim eğrileri.

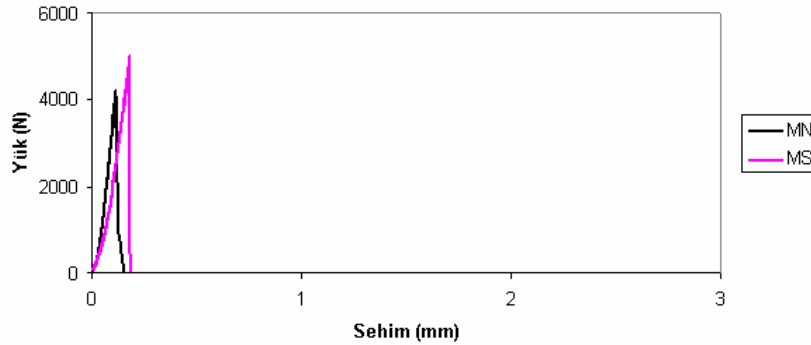
Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanan kırılma enerjilerinin ortalama sayısal değerleri Tablo 3.11’de, bu değerlerin lif tipine ve kr durumuna göre değişimi ise Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7: Kırılma enerjilerinin (G_f) lif tipi ve kr durumuna göre değişimi.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

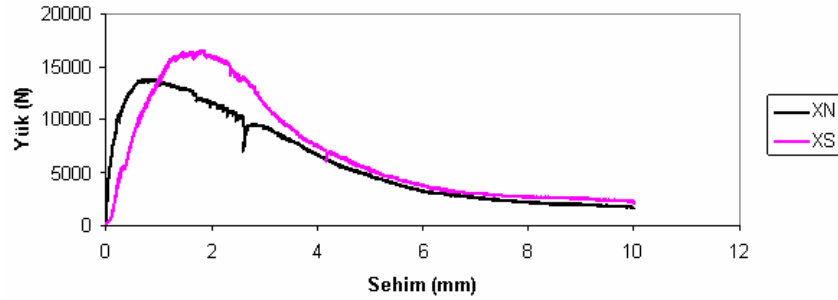
Lifsiz M numuneleriyle kıyaslandığında, bütün lif tiplerinin kırılma enerjilerinde önemli artışlar görülmektedir. Gevrek davranış gösteren M numunelerine lif eklenmesiyle, çekme gerilmeleri karşılanabilmekte ve böylece sünek bir davranış sağlanmaktadır. Lif eklenen numunelerin kırılma öncesindeki sehim kapasiteleri de oldukça yüksektir.

Lifsiz numunelere buhar kürü uygulanması, kırılma enerjilerini %11 artırmıştır. Buhar kürü uygulanan MS numunelerin ortalama kırılma enerjisi, 207 N/m’dir. Lifsiz numuneler gevrek bir davranış göstermiş ve maksimum yük sonrasında, enerji yutmadan kırılmışlardır. MN ve MS numunelerinin ortalama yük-sehim eğrilerinin bir arada gösterildiği grafikler Şekil 4.8’de görülmektedir.



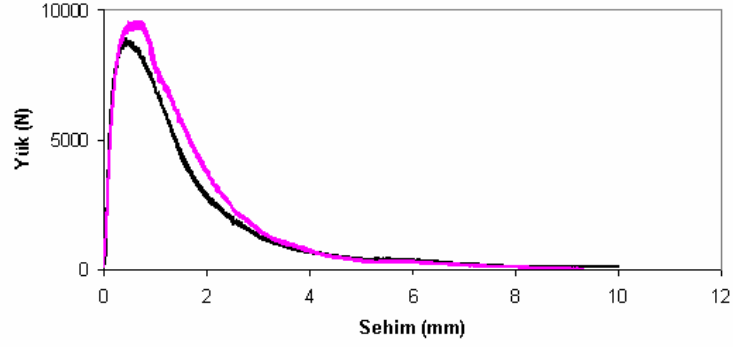
Şekil 4.8: Normal kürlü ve buhar kürlü lifsiz numunelerin yük-sehim eğrileri.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

En büyük artışlar beklenildiği gibi, 30 mm boyunda ve yüksek dayanımlı ZP 305 X liflerinin kullanıldığı X numunelerinden elde edilmiştir. Narinlikleri yüksek olan ve kancalı uçlu olan bu lifler, çatlaklar büyük boyutlara ulaştığında dahi yükü iletebilmektedirler. Ayrıca, matris dayanımının, lif dayanımının, matris-lif aderansının yüksek olması ve yeterli aderans boyu nedeniyle, bu lifler oldukça yüksek bir kapasitede çalışmakta ve böylece kırılma enerjisinde önemli artışlar görülmektedir. Bu liflerin kullanıldığı normal kürlü XN ve buhar kürlü XS numunelerin ortalama yük-sehim eğrileri Şekil 4.9’da görülmektedir. Bu numunelere buhar kürü uygulanması, kırılma enerjilerini %15 artırmıştır. Bu artışın nedeninin, 90°C kür uygulanan numunelerde, silis dumanının puzolanik etkisinin daha belirgin olmasından ve matris dayanımını artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



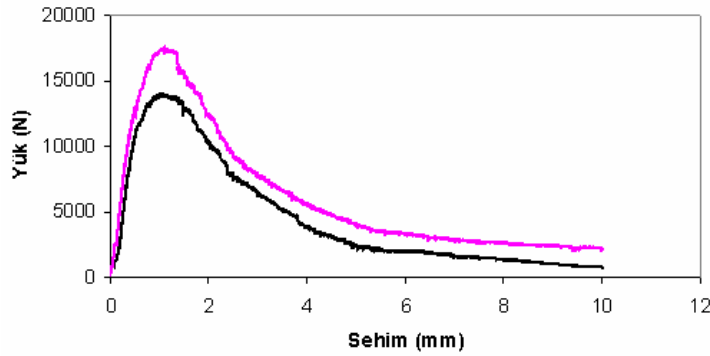
Şekil 4.9: XN ve XS numunelerinin yük-sehim eğrileri.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Kırılma enerjisinde, lifsiz numunelere göre en küçük artışlar, kısa kesilmiş, düz ve yüksek dayanımlı OL 6/16 liflerinin tekil olarak kullanıldığı O numunelerinden elde edilmiştir. Kısa kesilmiş liflerin asıl etkisi, elastik bölgedeki davranışı iyileştirmeleridir. Bu lifler, beton içinde oluşan mikro çatlakların engellenmesinde oldukça etkilidirler. Bu liflerin dayanımları yüksek olduğu halde, narinliklerinin düşük olması nedeniyle, çatlaklar büyük boyutlara ulaştığında, betondan sıyrılarak yük iletimini sağlayamadıklarından, maksimum yük sonrası davranışta etkili değildirler. Bu nedenle, kırılma enerjilerindeki en küçük artış O numunelerinde görülmüştür. Normal kürlü ON ve buhar kürlü OS numunelerinin ortalama yük-sehim eğrileri Şekil 4.10’da verilmiştir. OS numunelerinin kırılma enerjileri, ON numunelerinkine göre %12 artış göstermiştir.



Şekil 4.10: ON ve OS numunelerinin yük-sehim eğrileri.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

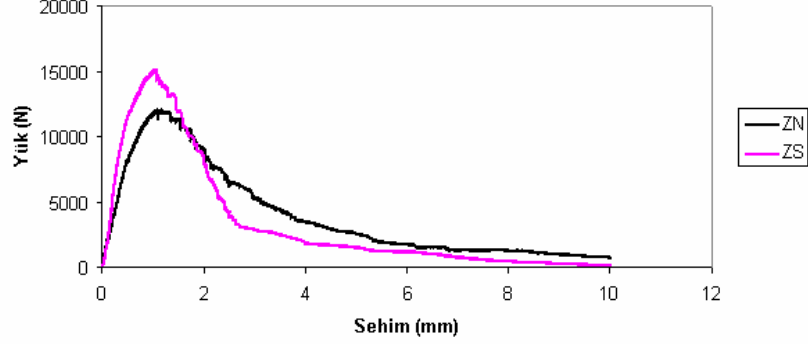
OX numunelerinden elde edilen değerlere bakıldığında, kırılma enerjisi değerleri O ve X numunelerinin arasında, X numunelerine yakın bir değer almıştır. Bu numunelerde kullanılan liflerin dayanımlarının yüksek ve birbirine eşit olması, kırılma enerjilerini olumlu etkilemiştir. Maksimum yük sonrası davranışa daha fazla etkisi olduğu bilinen ZP 305 X liflerinin kullanım yüzdesi, OX numunelerinde, X numunelerine göre daha düşüktür. Buna rağmen, OL 6/16 ve ZP 305 X liflerinin karma olarak kullanılması kırılma enerjilerini önemli derecede artırmıştır. Ayrıca, elastik bölgedeki davranışı iyileştirmesi beklenen OL 6/16 liflerinin etkisi, OX numunelerinde oldukça belirgindir. Diğer liflerin maksimum yükleriyle kıyaslandığında, en büyük değer bu numunelerden elde edilmiştir. Normal kür uygulanan OXN ve buhar kürü uygulanan OXS numunelerine ait ortalama yük-sehim eğrileri Şekil 4.11’de verilmiştir. Buhar kürü uygulanması, kırılma enerjilerini artırmıştır.



Şekil 4.11: OXN ve OXS numunelerinin yük-sehim eğrileri.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

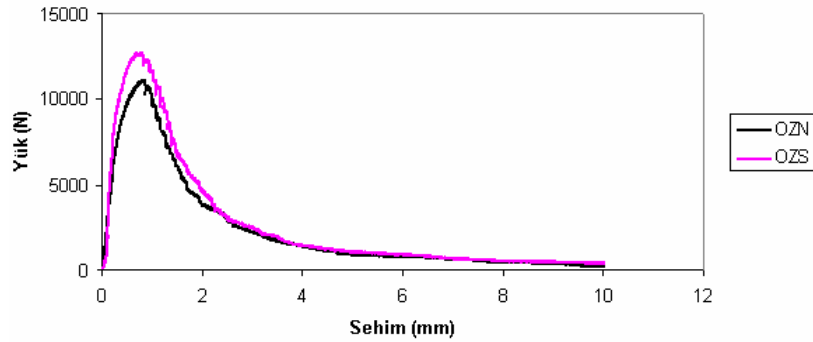
ZP 305 liflerinin tekil olarak kullanıldığı, Z numunelerinin kırılma enerjilerinde, lifsiz numunelere göre önemli artışlar olmuştur. Tekil liflerle kıyaslandığında, bu

numunelerin kırılma enerjileri beklenildiği gibi, O numunelerinden yüksek, X numunelerinden düşüktür. Normal kürlü ZN ve buhar kürlü ZS numunelerine ait ortalama yük-sehim eğrileri Şekil 4.12’de görülmektedir. Bu numunelerde, kürün etkisi belirsizdir.



Şekil 4.12: ZN ve ZS numunelerinin yük-sehim eğrileri.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

OL 6/16 ve ZP 305 liflerinin karma olarak kullanıldığı OZ numunelerine bakıldığında, kırılma enerjileri lifsiz numunelere göre önemli derecede artmıştır. O numuneleriyle kıyaslandığında, kısa liflerin %50 oranında uzun liflerle yer değiştirilmesi, beklenildiği gibi kırılma enerjisini etkilemiş ve numunelerin daha sünek bir davranış göstermesini sağlamıştır. Ancak, uzun liflerin tekil olarak kullanıldığı Z numunelerinin seviyesine ulaşamadıkları görülmüştür. Normal kürlü OZN ve buhar kürlü OZS numunelerinin ortalama yük-sehim eğrileri Şekil 4.13’de görülmektedir. Bu numunelere buhar kürü uygulanması, kırılma enerjilerini %28 oranında artırmıştır.



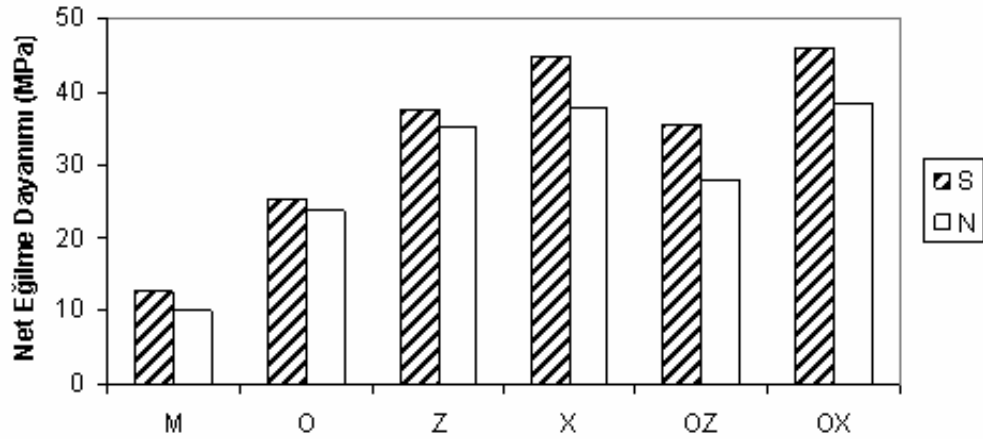
Şekil 4.13: OZN ve OZS numunelerinin yük-sehim eğrileri.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Tüm numunelere ait kırılma enerjilerinin sayısal değerleri EK D, Tablo D.1’de verilmiştir.

Kırılma enerjisi uygulanan numunelere ait fotoğraflar, EK E' de verilmiştir. Bu numuneler incelendiğinde, lifsiz M numuneleri enerji yutmadan ve gevrek bir biçimde kırılmışlardır. Kısa kesilmiş liflerin kullanıldığı O numunelerinde, liflerin matrinden sıyrılarak ayrıldığı gözlenmiştir. Bu lifler hem düz şekilli olduklarından hem de aderans boyları yetersiz kaldığından, çatlakların boyu büyüdüğünde yük iletimini sağlayamamış ve sıyrılmışlardır. Uzun ve kanca uçlu liflerin kullanıldığı Z ve X numunelerinde de liflerin büyük ölçüde matrinden sıyrılarak ayrıldığı ve liflerin kancalarının bir miktar açıldığı görülmüştür. Lifli numuneler genel olarak, sünek bir davranış sergilemiş, uzun sürede ve büyük ölçüde enerji yutarak kırılmışlardır.

4.4.2. Net eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi

Boyutları 70x70x280 mm ve etkin kesit alanı 40x70 mm olan prizmalar üzerinde uygulanan üç noktalı eğilme deneyleri sonucunda elde edilen kırılma yükleri, denklem 3.3'de yerine konularak net eğilme dayanımları, her bir numune için hesaplanmıştır. Bu dayanımların sayısal değerleri Tablo 3.11'de, lif tipi ve kür durumuna göre değişimleri ise Şekil 4.14'de görülmektedir.



Şekil 4.14: Net eğilme dayanımlarının lif tipi ve kür durumuna göre değişimi.
(S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Normal kür uygulanan lifsiz numunelerle kıyaslandığında, lif eklenmesi net eğilme dayanımlarını oldukça artırmıştır. Eğilme dayanımlarında en etkili liflerin uzun ve kancalı lifler olması beklenmektedir. Net eğilme dayanımındaki en büyük artışlar, OX numunelerinde görülmüştür. Bu numunelerin net eğilme dayanımı, lifsizlere göre 3,8 kat artarak 38,5 MPa değerine ulaşmıştır. OX numunelerinde kullanılan yüksek dayanımlı kısa kesilmiş OL 6/16 lifleri mikro çatlakların engellenmesinde oldukça etkili olmaktadır. ZP 305 X lifleri ise uzun, kancalı ve yüksek dayanımlı lifler olup,

çatlaklar büyük boyutlara ulaştığında dahi yük iletimini sağlayarak, çatlaklar arasındaki köprü vazifesini görmeye devam ederler. Bu liflerin karma olarak kullanılması net eğilme dayanımlarında en iyi sonucu vermiştir. Bu numuneleri, 3,7 kat artışla X numuneleri, 3,5 kat artışla Z numuneleri, 2,8 kat artışla OZ numuneleri ve 2,3 kat artışla O numuneleri takip etmektedir.

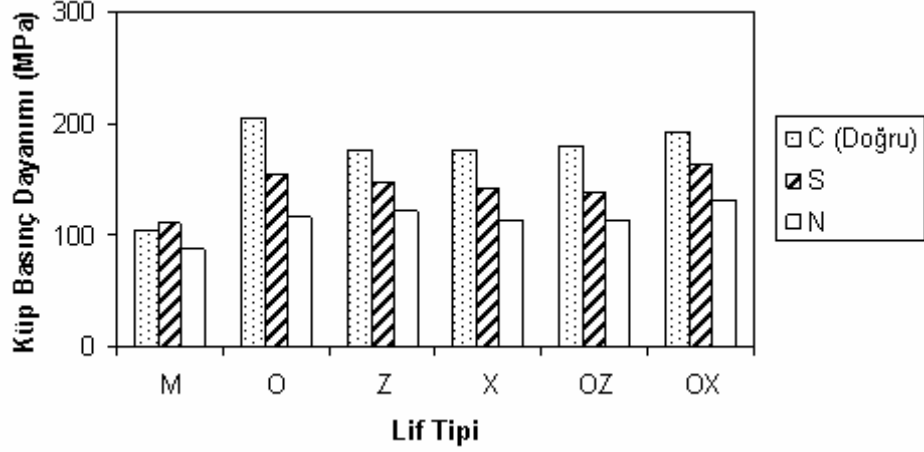
Numunelere buhar kürü uygulanması, net eğilme dayanımlarında %6-27 oranında artışlara neden olmuştur. Buhar kürü uygulanan numunelerin net eğilme dayanımlarının lif tiplerine göre değişimi, normal kür uygulanan numunelerle paralellik göstermektedir. Lifsiz numunelere göre en büyük artış OX numunelerinden elde edilmiştir. Bu numunelerin net eğilme dayanımları 3,6 kat artarak 45,8 MPa değerine ulaşmıştır. Bu numuneleri 3,5 kat artışla X numuneleri, 2,9 kat artışla Z numuneleri, 2,8 kat artışla OZ numuneleri ve 2 kat artışla O numuneleri izlemektedir.

Tüm numunelere ait net eğilme dayanımlarının sayısal değerleri EK D, Tablo D.2'de verilmiştir.

4.5. Deney Sonuçlarının Yüksek Sıcaklıkta Kür Uygulanarak Yapılan Bir Çalışmayla Karşılaştırılması

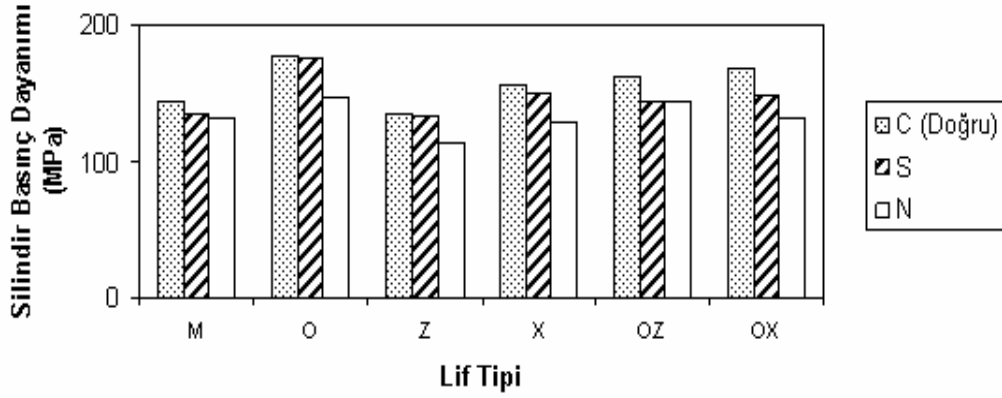
Doğru [44] tarafından aynı bileşimler kullanılarak yapılan çalışmada, numunelere kalıptan çıkarıldıktan sonra, 3 gün boyunca 200°C' de yüksek sıcaklık kürü uygulanmış ve bu kürün yüksek performanslı çelik tel donatılı betonların mekanik davranışına etkileri araştırılmıştır. 200°C' de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numuneler C ile gösterilmektedir.

Şekil 4.15'de, 90°C'de buhar kürü ve 200°C'de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin küp basınç dayanımları gösterilmektedir. Elde edilen deney sonuçlarına bakıldığında, 200°C'de yüksek sıcaklık kürü uygulanan lifli numunelerde küp basınç dayanımları, 90°C'de sıcak kür uygulanan numunelere göre en az % 18 oranında OX ve en fazla %32 oranında O numunelerinde artmıştır.



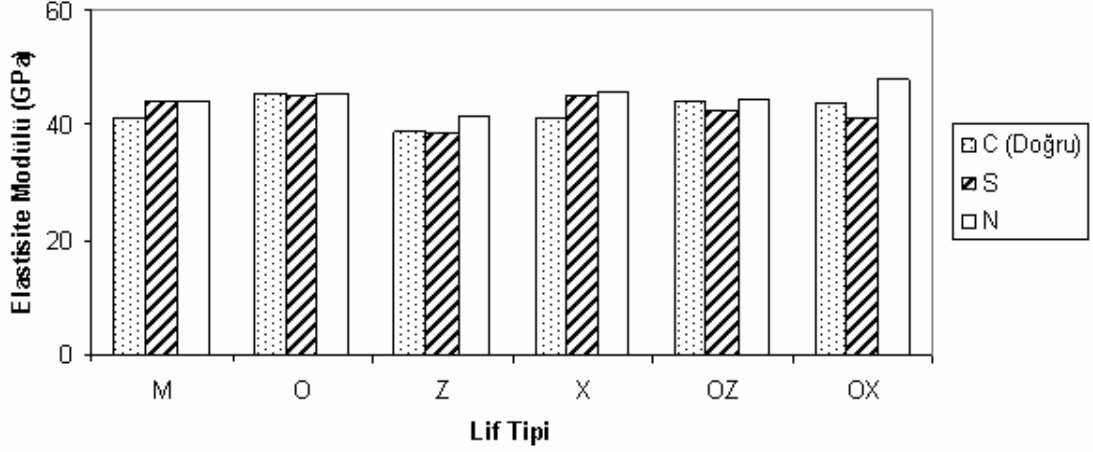
Şekil 4.15 : Küp basınç dayanımları
(C = Etüv kürü, S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Şekil 4.16'da, 90°C'de sıcaklık kürü ve 200°C'de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin silindir basınç dayanımları gösterilmektedir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, 200°C'de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde silindir basınç dayanımları, 90°C'de sıcak kür uygulanan numunelere göre daha fazla artmıştır.



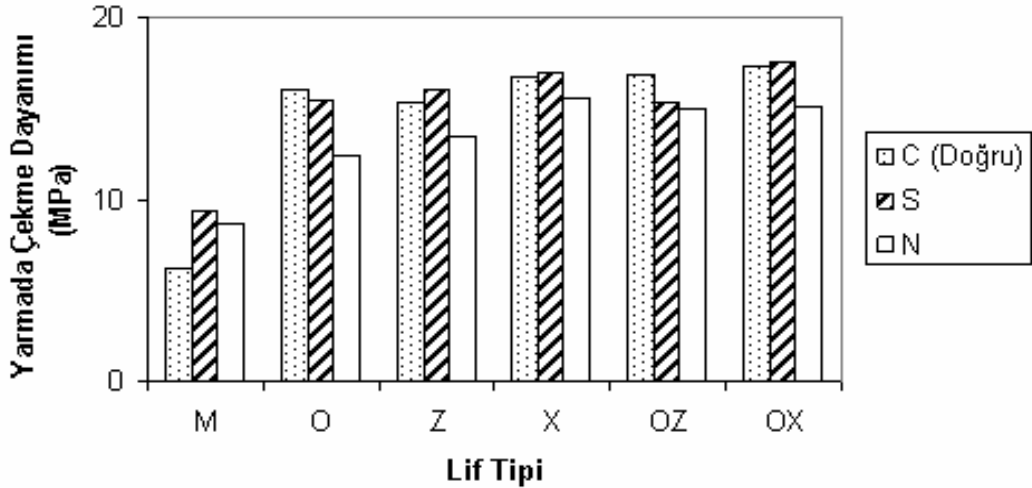
Şekil 4.16 : Silindir basınç dayanımları
(C = Etüv kürü, S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Şekil 4.17'de, 90°C'de buhar kürü ve 200°C'de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin elastisite modüllerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Sıcaklık kürlerinin elastisite modüllerinde belirgin bir değişiklik meydana getirmediği görülmektedir.



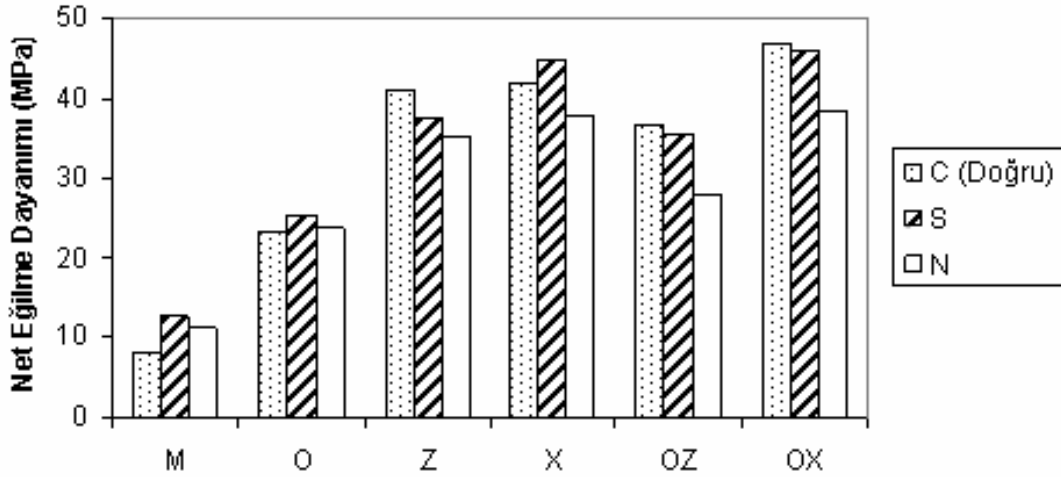
Şekil 4.17 : Elastisite modülü değerleri
(C = Etüv kürü, S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Şekil 4.18’de, 90°C’de buhar kürü ve 200°C’de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması görülmektedir. Standart kür ile kıyaslandığında, her iki sıcaklık küründe de, yarmada çekme dayanımlarının arttığı görülmektedir. 90°C’de buhar kürü ve 200°C’de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin yarmada çekme dayanımları oldukça yakındır. 90°C’de buhar kürü uygulanan lifsiz numunelerin yarmada çekme dayanımlarında daha yüksek değerler elde edilmiştir. 200°C’de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerdeki düşüşün sebebi, sıcaklık etkisiyle oluştuğu düşünülen mikro çatlakların betonun dayanımını olumsuz yönde etkilemesidir.



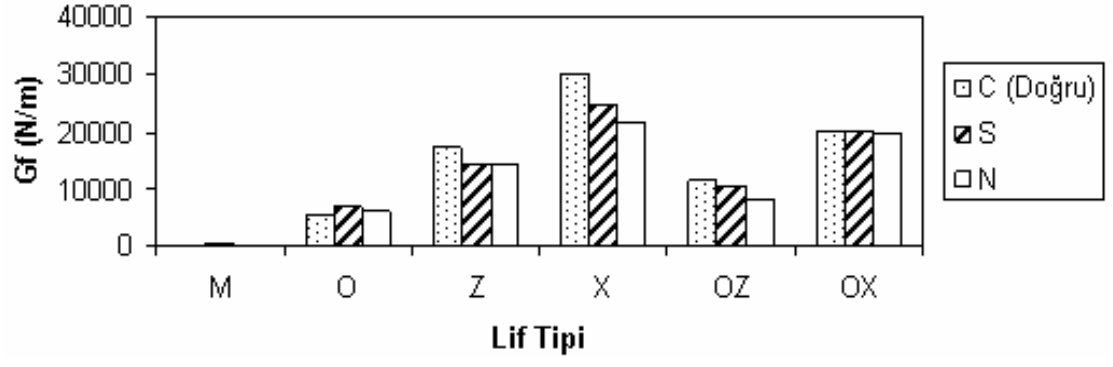
Şekil 4.18 : Yarmada çekme dayanımları
(C = Etüv kürü, S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Şekil 4.19’da, 90°C’de buhar kürü ve 200°C’de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin net eğilme dayanımları görülmektedir. 90°C’de buhar kürü ile 200°C’de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin net eğilme dayanımları birbirine yakın değerler almıştır. Lifsiz numunelere yüksek sıcaklıkta kür uygulanması, yarmada çekme dayanımlarında olduğu gibi, net eğilme dayanımlarında da düşüşe sebep olmuştur.



Şekil 4.19 : Net eğilme dayanımları
(C = Etüv kürü, S = Buhar kürü, N = Normal su kürü)

Şekil 4.20’de, 90°C’de buhar kürü ve 200°C’de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Yüksek sıcaklıkta kür uygulanan numunelerin kırılma enerjileri, 90°C’de sıcaklık kür uygulanan numunelere göre, en fazla %21 artış ile X numunelerinde görülmüştür. Sıcaklığın yükselmesiyle, beton bileşimindeki malzemelerden gelen silisin, puzolonik etkisi belirgin hale gelmektedir. Çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kirecin bu şekilde bağlanmasıyla, daha yüksek dayanımlı bir matris elde edilmektedir. Yüksek sıcaklıkta kür görmüş numunelerde, matris dayanımının artmasıyla, daha yüksek lif-matris aderansı oluşmaktadır. Yüksek dayanımlı liflerin, yüksek dayanımlı matriste daha iyi performans göstermesi nedeniyle, X numunelerinin kırılma enerjilerinde meydana gelen artış diğer numunelere göre daha fazladır.



Şekil 4.20 : Kırılma enerjileri
 (C = Etüv kuru, S = Buhar kuru, N = Normal su kuru)

5. GENEL SONUÇLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

5.1. Genel Sonuçlar

Sunulan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Standart kür uygulanan numunelerle kıyaslandığında, betona 90°C’de uygulanan buhar kürü, betonun mekanik özelliklerinde genel artışa neden olmaktadır. Bu artış, numunelerde kullanılan silis dumanının ve silis kumlarının yapısındaki silisin, yüksek sıcaklık ile aktif hale gelmesi ve çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan serbest kireci bağlamasıyla açıklanabilir. Böylece daha sıkı bir matris elde edilmekte ve lif-matris aderansı artmaktadır.
- Betona hacimce %3 oranında çelik lif eklenmesi, başta kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları olmak üzere, basınç dayanımları ile yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır.
- Lifsiz M numuneleri gevrek bir davranış gösterirken, lif kullanımı ile birlikte sünek davranış sağlanmış ve numuneler yüksek miktarda enerji yutarak, kontrollü ve uzun sürede kırılmıştır. Böylece, yüksek dayanımlı betonların en büyük problemi olan gevreklik sorunu, lif kullanımıyla ortadan kaldırılmıştır.
- Buhar kürü uygulanan numunelerin küp basınç dayanımlarında, lifsiz numunelere göre, %25-%48 oranında artış görülmüştür. En büyük dayanım 164 MPa ile OXS numunelerinden elde edilmiştir. Normal kür uygulanan numunelerin küp basınç dayanımları ise %23-%53 oranında artmış olup, en büyük değer 133 MPa ile yine OXN numunelerinden elde edilmiştir.
- Lif eklenmesi, buhar kürü uygulanan OS, XS, OZS ve OXS numunelerinin silindir basınç dayanımlarını %7-%29 oranında artırırken, ZS numunelerinin dayanımlarında bir miktar azalma görülmüştür. En büyük silindir basınç dayanımına sahip olan OS numunelerinin dayanımları, 176 MPa’dır. Normal kürlü ON, XN, OZN ve OXN numunelerinin silindir basınç dayanımları az miktarda artarken, en büyük dayanım yine ON numunelerinden elde edilmiştir. ON numunelerinin ortalama basınç dayanımı 146 MPa’dır.

- Elastisite modülü değerleri, lif tipinden ve kr durumundan önemli derecede etkilenmemiştir.
- Yarmada çekme dayanımları, hacimce %3 lif kullanılmasıyla birlikte, oldukça artmıştır. Buhar kürü uygulanan numunelerde %64-%87 oranında bir artış görülürken, normal kr uygulanan numunelerde %43-%79 oranında bir artış elde edilmiştir.
- Betona hacimce %3 oranında lif eklenmesinin en büyük etkisi, kırılma enerjilerinde görülmüştür. Buhar kürü uygulanan numunelerin kırılma enerjileri, lifsiz numunelere göre 34-123 kat artarken, normal kürlü numunelerin kırılma enerjilerinde 33-119 kat artış söz konusudur. En büyük kırılma enerjileri, XN ve XS numunelerinden elde edilmiş olup, değerleri sırasıyla, 21617 N/m ve 24821 N/m'dir.
- Lif kullanımının net eğilme dayanımlarındaki etkisi de oldukça dikkat çekicidir. Buhar kürü uygulanan numunelerin net eğilme dayanımları, 2-3,6 kat arasında artarken, normal kr uygulanan numunelerin net eğilme dayanımları, 2,3-3,8 kat arasında artmıştır. Her iki kr durumu içinde en büyük artışlar, OX numunelerinden elde edilmiştir. OXS numunelerinin net eğilme dayanımı 45,8 Mpa, OXN numunelerinin net eğilme dayanımları da 38,5 MPa'dır.
- Kırılma enerjilerinin ve net eğilme dayanımlarının artırılmasında en etkili liflerin, yüksek dayanımlı, kanca uçlu ve 30 mm boyundaki ZP 305 X lifleri olduğu görülmüştür.
- Kısa ve düz kesilmiş OL 6/16 liflerinin kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları üzerindeki etkisi az olmakla birlikte, bu lifler basınç dayanımlarında önemli artışlar meydana getirmiştir.
- Yüksek dayanımlı mezo (OL 6/16) ve makro (ZP 305 X) liflerin birarada kullanılması, kırılma enerjilerini, net eğilme dayanımlarını ve yarmada çekme dayanımlarını önemli derecede artırmıştır. Ayrıca en yüksek küp basınç dayanımları da bu numunelerden elde edilmiştir.

5.2. İleri Çalışmalar İçin Öneriler

Bu bölümde, yapılan çalışmanın devamı niteliğinde araştırılması gereken konular ele alınmıştır.

- Üretilen betonların mikro yapısının iyileştirilmesi için, iri agrega kullanımı ortadan kaldırılmış, böylece daha homojen bir yapı elde edilebilmiştir. Silis dumanı gibi çok ince taneli malzemelerin kullanılması, daha boşluksuz ve daha sıkı bir matris elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, betona sertleşme sonrası buhar kürü uygulanmasıyla, ikincil hidrasyon ürünleri büyük ölçüde bağlanarak, matris dayanımı artırılmıştır. Su/bağlayıcı oranının da oldukça düşük olması nedeniyle, geçirimsizliğin düşük olması beklenmektedir. Bu çalışmaların sonucunda, üretilen betonların durabilitesinin oldukça yüksek olacağı düşünülmektedir. Bu betonlara durabilite deneylerinin uygulanması ve mikro yapılarının incelenmesi önerilmektedir.
- Yüksek performanslı betonda, su/çimento oranının düşürülmesiyle karşılaşılan en büyük problemlerden birisi otojen rötre oluşumudur. Çimentonun hidrasyonu için gereken suyun, iç suyun absorbe edilmesiyle sağlanması, kılcal mikro boşlukların çaplarını düşürmekte, bunun sonucunda çekme kuvvetlerinin artmasıyla makro boyutta büzülme meydana gelmektedir. Gerekli önlemler alınmadığında, erken yaşlardaki çatlaklara sebep olan bu durumun incelenmesi önerilmektedir.
- Betonda kullanılan çimentonun sülfat içeriği ve niteliğinden kaynaklanan, ayrıca ısıtılma işlemi uygulanan betonlarda daha sık gözlenen bir durabilite problemi olan gecikmiş etrenjit oluşumu incelenmelidir.
- Bu çalışmada, hacimce %3 oranında lif kullanılması ve buhar kürü uygulanmasıyla oldukça yüksek kırılma enerjisi değerleri elde edilmiştir. Uygulama alanlarının daha iyi belirlenebilmesi açısından, bu numunelerin darbe dayanımlarının da incelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Van Mier, J.G.M.**, 2004. Cementitious Composites With High Tensile Strength And Ductility Through Hybrid Fibres, *Sixth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Varenna, Italy, 20-22 September.
- [2] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M.**, Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, *Beton 2004 Kongresi Bildiriler*, İstanbul,2004, 24-57.
- [3] <http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/yapi-malzemesi/beton/6.HTM>
- [4] **Richard, P. and Cheyrezy, M.**, 1995. Composition of Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1501-1511.
- [5] **Taşdemir, M.A. ,Karihaloo, B.H., Bayramov, A.N., Yerlikaya, M. ve Sönmez, R.**, 2004. Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi İçin yüksek Dayanımlı/Yüksek Performanslı Betonlar, Yüksek Performanslı Lif Donatılı Kompozitler ve Kendiliğinden Yerleşen Betonlar, *14. ERMCO Kongresi*, Helsinki, 16-18 Haziran .
- [6] **Şengül, C.**, 2002. SIFCON, *Bitirme Çalışması*, İTÜ İnşaat Fakültesi.
- [7] **Taşdemir, M. A., Bayramov, F. ,** Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ Dergisi*, Aralık 2002, **1-2**, 125-144.
- [8] **Ma, J. and Schneider, H.**, 2002. Properties of Ultra High Performance Concrete, *LACER*, **7**, 25-32.
- [9] **Walraven, J.**, 1999. The Evolution of Concrete, *Structural Concrete*, **P1**. 3-11.
- [10] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar, A.Şafak ve Yerlikaya, M.**, 2005. Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı, *6. Ulusal Beton Kongresi*, İTÜ, İstanbul, 16-18 Kasım, 33-43.
- [11] **Ekincioğlu, Ö. ,** 2003. Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarım, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] **Balaguru, P.N. and Shah, S.P.**, 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill,Inc, Singapore.
- [13] **Şengül, C.**, 2005. Kendiliğinden yerleşen çelik lif donatılı betonların mekanik davranışına su/ince malzeme oranı ile lif dayanımının etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [14] **Sahmaran, M., Yurtseven, A., Yaman, I.O.**, Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, *Building and Environment*, **40**, 1672-1677.
- [15] **Fırat, M.T.**, 1996. Silis dumanı içeren yüksek mukavemetli betonların enerji tutma kapasitelerinin artırılmasında çelik lif kullanımının etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] **TS 10513**, 1992. Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [17] http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cdb/cdb223_e.html
- [18] **Bayramov, F.**, 2004. Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] **Bayasi, Z. and Soroushian P.**, 1991. Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, 129-134.
- [20] **Vodicka, J., Spura, D., Kratky, J.**, 2004. Homogeneity of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Sixth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Varenna, Italy, 20-22 September.
- [21] **Özyurt, N.**, 2000, Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22] **Teruzzi, T., Cadoni, E., Frigeri, G., Cangiano, S., Plizzari, A.**, 2004. Durability Aspects of Steel Fibre Reinforced Concrete, *Sixth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Varenna, Italy, 20-22 September.
- [23] **Özyurt, N.**, 2002. Karma lifli yüksek performanslı betonların mekanik davranışı, *Doktora Tez Önerisi*, İTÜ İnşaat Fakültesi.
- [24] **Taşdemir M.A., Kocatürk, A.N., Haberveren, S. ve Aslan, G.**, 2005. Özel Prefabriğe Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar*, İstanbul, 16-18 Kasım, 447-457.
- [25] **Betterman, L.R., Ouyang, C. And Shah, S.P.**, 1995. Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*, **2**, 53 – 61.

- [26] **Yao, W., Li, J. And Wu, K.,** 2002. Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction, *Cement and Concrete Research*, **2157**, 1-4.
- [27] **Qian, C., Stroven, P.,** 2000. Fracture properties of concrete reinforced with steel polypropylene hybrid fibers, *Cement and Concrete Composites*, **22**, 343-351.
- [28] **Qian, C., Stroven, P.,** 2000. Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, **30**, 63-69.
- [29] **Lawler, J.S., Wilhelm, T., Zampini, D., Shah, S.P.,** 2002. Fracture process of Hybrid Fiber- Reinforced Mortar, *Materials and Structures Journal*, **36**, 197-208.
- [30] **Kützing, L.,** 1997. Use of Fiber Cocktails to Increase Ductility of High Performance Concrete, *Leipzig Annual Civil Eng. Report(LACER)*, LACER, **2**, 125-133.
- [31] **Komlos, K., Babal, B. and Nürnbergerova, T.,** 1995. Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Under Repeated Loading, *Nuclear Engineering and Design*, **156**, 195-200.
- [32] **Kim, N.W., Saeki, N. and Horiguchi, T.,** 1999. Crack and Strength Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Early Ages, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, **21**.
- [33] **Banthia, N. and Nandakumar, N.,** 2003. Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites, *Cement and Concrete Composites*, **25**, 3-9.
- [34] **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.
- [35] **Banthia, N., Yan, N., Bindiganalive, V.,** 2000. Development and Application of High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, *Fifth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 13-15 September.
- [36] **Yeğınobalı, A.,** 2005. Silis Dumani ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB/AR-GE Enstitüsü, Ankara.

- [37] **Goldman, A. and Bentur, A.**, 1993. The Influence of Strength Microfillers on Enhancement of Concrete Strength, *Cement and Concrete Research*, **23**, 962-972.
- [38] **Long, G., Wang X. and Xie Y.**, 2002. Very- High Performance Concrete with Ultrafine Powders, *Cement and Concrete Research*, **32**, 601-605.
- [39] **Eren, Ö. and Çelik, T.**, 1997. Effect of Silica Fume and Steel Fibers on Some Properties of High-Strength Concrete, *Construction and Building Materials*, **11**, 373-392.
- [40] **Postacıoğlu, B.**, 1986. Beton, Cilt 1., Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [41] **Cheyrezy, M., Maret, V. and Frouin, L.**, 1995. Microstructural Analysis of RPC, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1491-1500.
- [42] **Dugat, J., Roux, N. and Bernier, G.**, 1996. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, *Materials and Structures*, **29**, 233-240.
- [43] **Papayianni, I., Tsohos, G., Oikonomou, N., Mavria, P.** 2005. Influence of Superplasticizer Type and Mix Design Parameters on the Performance of Them In Concrete Mixtures , *Cement and Concrete Composites*, **27**, 217-222.
- [44] **Doğru, D.**, 2006, Yüksek performanslı karma çelik tel donatılı betonların mekanik davranışına 200°C sıcaklıkta kür etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

EKLER

EK A: Küp basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar

Tablo A.1: Küp basınç dayanımları.

Numune Kodu	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama
MN-1	101,0	87,3
MN-2	74,0	
MN-3	87,0	
MS1	114,0	111,3
MS-2	111,0	
MS-3	109,0	
ON-1	119,0	116,3
ON-2	109,0	
ON-3	121,0	
OS1	164,0	156,0
OS-2	149,0	
OS-3	155,0	
ZN-1	126,0	122,0
ZN-2	115,0	
ZN-3	125,0	
ZS1	149,0	147,7
ZS-2	145,0	
ZS-3	149,0	
XN-1	107,0	112,3
XN-2	116,0	
XN-3	114,0	
XS1	136,0	143,0
XS-2	149,0	
XS-3	144,0	
OZN-1	110,0	112,7
OZN-2	107,0	
OZN-3	121,0	
OZS-1	139,0	139,0
OZS-2	129,0	
OZS-3	149,0	
OXN-1	126,0	133,0
OXN-2	136,0	
OXN-3	137,0	
OXS-1	166,0	163,7
OXS-2	154,0	
OXS-3	171,0	

EK B: Silindir basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar

Tablo B.1: Silindir basınç dayanımları

Numune Kodu	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama
MN-1	124,8	131,2
MN-2	137,6	
MS-1	136,3	136,3
MS-2	90,4	
ON-1	144,5	146,7
ON-2	149,0	
OS-1	184,6	175,1
OS-2	165,5	
ZN-1	115,3	113,4
ZN-2	111,5	
ZS-1	126,8	133,8
ZS-2	140,8	
XN-1	122,3	130,0
XN-2	137,6	
XS-1	150,3	149,8
XS-2	149,3	
OZN-1	144,6	143,7
OZN-2	142,7	
OZS-1	145,9	144,3
OZS-2	142,7	
OXN-1	138,9	133,2
OXN-2	127,4	
OXS-1	148,4	149,4
OXS-2	150,3	

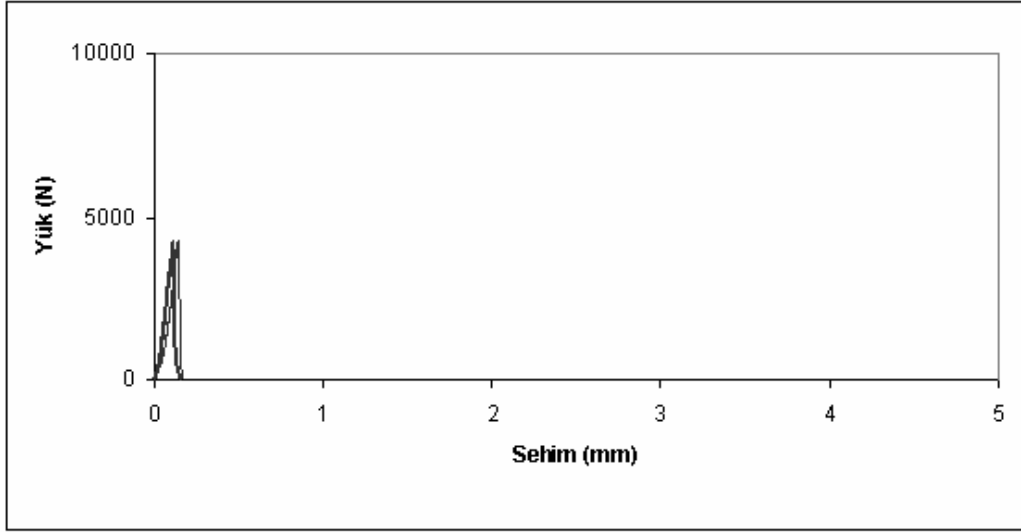
Tablo B.2: Elastisite Modülleri

Numune Kodu	Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama
MN-1	44,2	44,1
MN-2	44,0	
MS-1	42,6	44,1
MS-2	45,6	
ON-1	45,7	45,4
ON-2	45,0	
OS-1	46,8	45,1
OS-2	43,3	
ZN-1	41,6	41,6
ZN-2	49,7	
ZS-1	38,5	38,5
ZS-2	48,5	
XN-1	51,4	45,9
XN-2	45,9	
XS-1	45,7	45,1
XS-2	44,5	
OZN-1	68,4	44,6
OZN-2	44,6	
OZS-1	38,3	42,8
OZS-2	47,2	
OXN-1	48,1	48,1
OXN-2	51,0	
OXS-1	39,9	41,3
OXS-2	42,7	

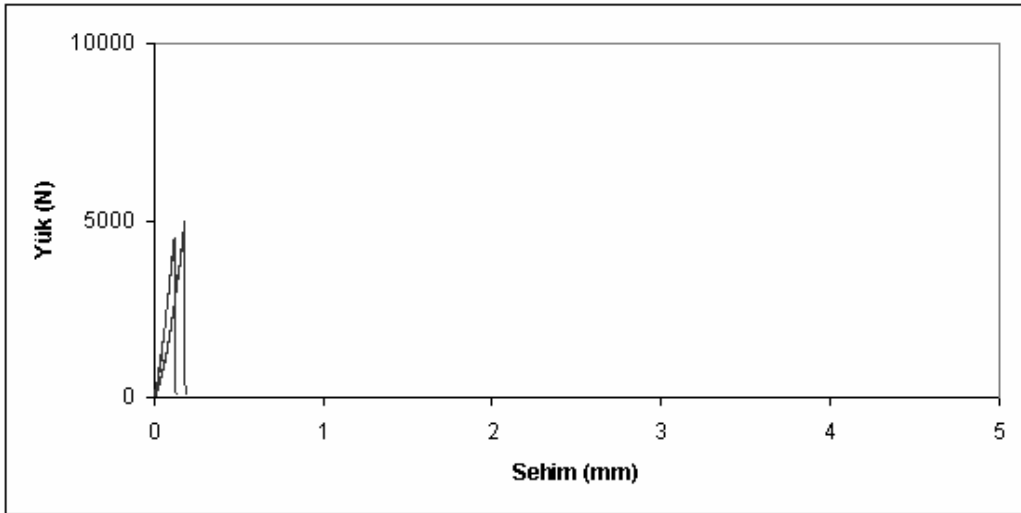
EK C: Yarmada çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar**Tablo C.1: Yarmada çekme dayanımları**

Numune Kodu	Yarmada Çekme Dayanımları (N/mm ²)	Ortalama
MN-1	9,6	8,7
MN-2	9,2	
MN-3	8,0	
MN-4	9,4	
MN-5	8,7	
MS-1	10,9	9,4
MS-2	11,3	
MS-3	9,5	
MS-4	9,2	
MS-5	8,1	
ON-1	11,1	12,4
ON-2	13,8	
OS-1	15,2	15,5
OS-2	15,8	
ZN-1	12,7	13,5
ZN-2	14,3	
ZN-3	12,6	
ZN-4	13,7	
ZN-5	10,3	
ZS-1	17,3	16,0
ZS-2	17,2	
ZS-3	11,8	
ZS-4	13,5	
ZS-5	12,6	
XN-1	14,8	15,6
XN-2	15,1	
XN-3	15,8	
XN-4	16,6	
XN-5	17,3	
XS-1	14,6	17,0
XS-2	16,6	
XS-3	16,9	
XS-4	18,7	
XS-5	17,5	
OZN-1	15,8	15,0
OZN-2	14,7	
OZN-3	14,1	
OZN-4	11,7	
OZN-5	15,4	
OZS-1	15,8	15,4
OZS-2	15,0	
OZS-3	11,6	
OZS-4	13,7	
OZS-5	12,3	
OXN-1	15,0	15,1
OXN-2	14,3	
OXN-3	16,4	
OXN-4	14,7	
OXN-5	12,7	
OXS-1	17,8	17,6
OXS-2	17,4	
OXS-3	10,8	
OXS-4	20,4	
OXS-5	13,8	

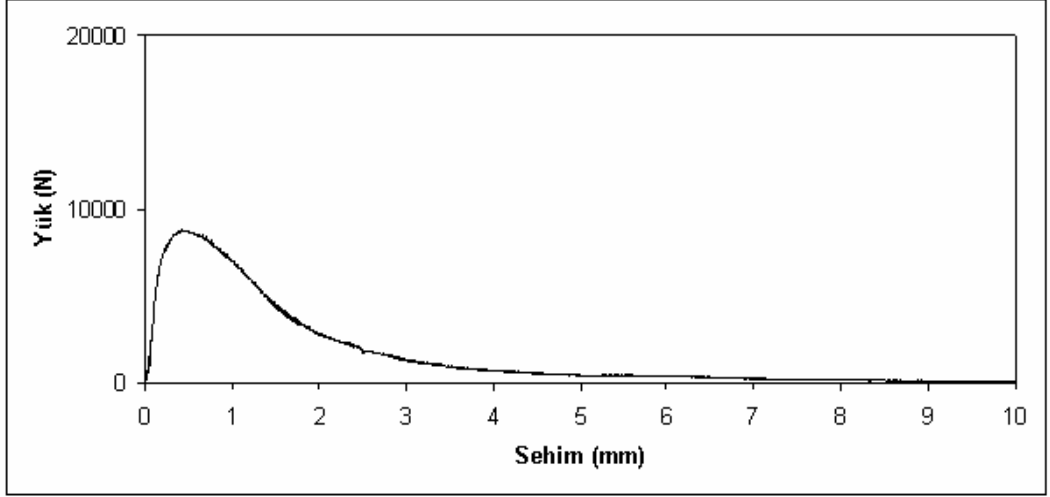
EK D: Kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen sonuçlar



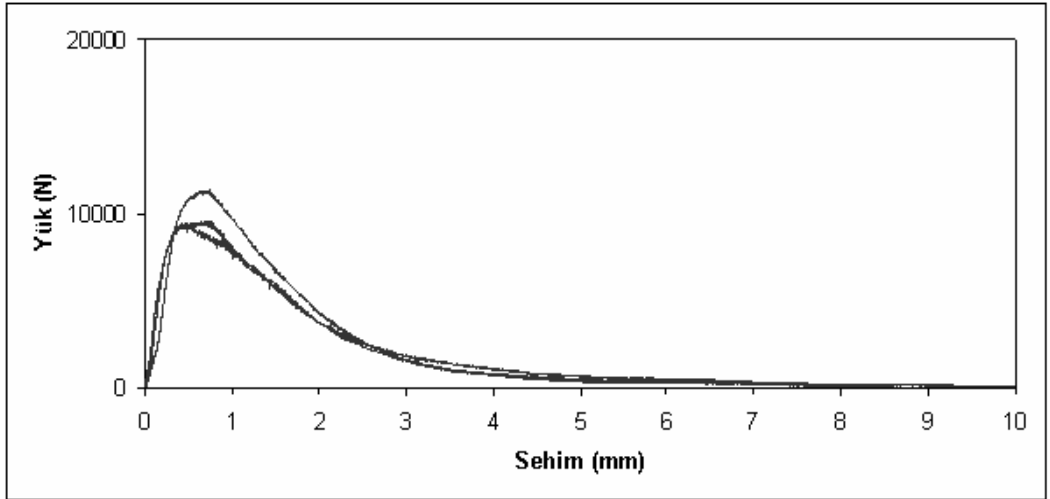
Şekil D.1: MN numunelerinin yük-sehim eğrileri



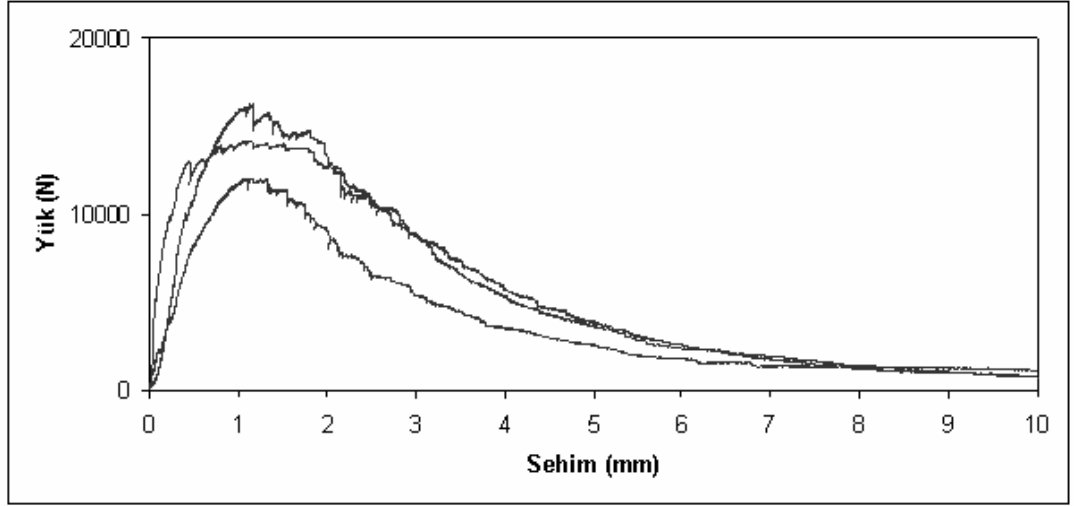
Şekil D.2: MS numunelerinin yük-sehim eğrileri



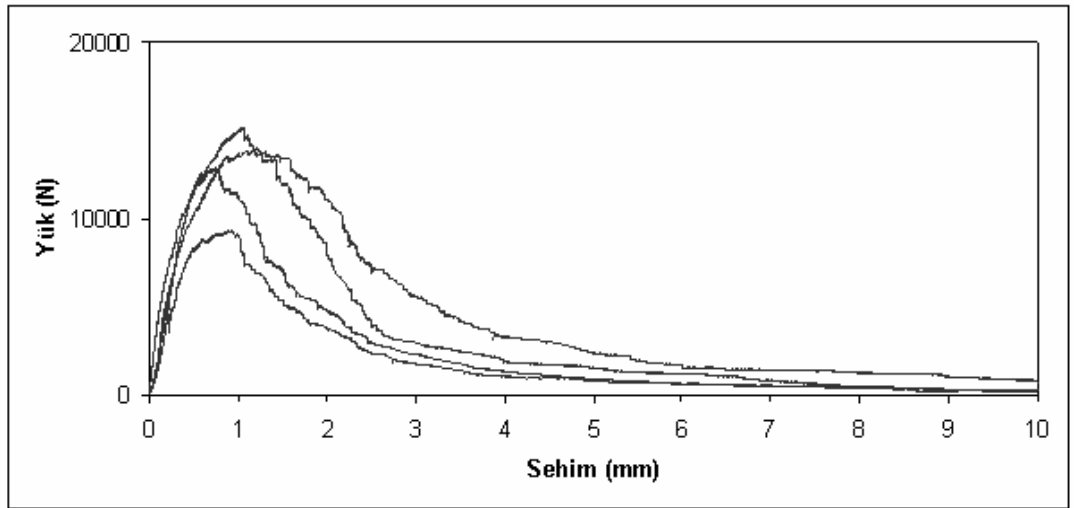
Şekil D.3: ON numunelerinin yük-sehim eğrileri



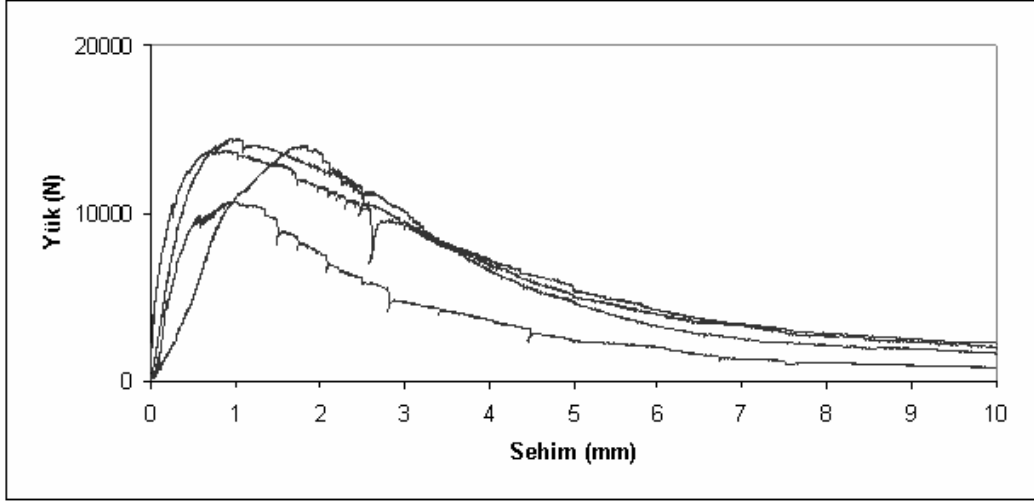
Şekil D.4: OS numunelerinin yük-sehim eğrileri



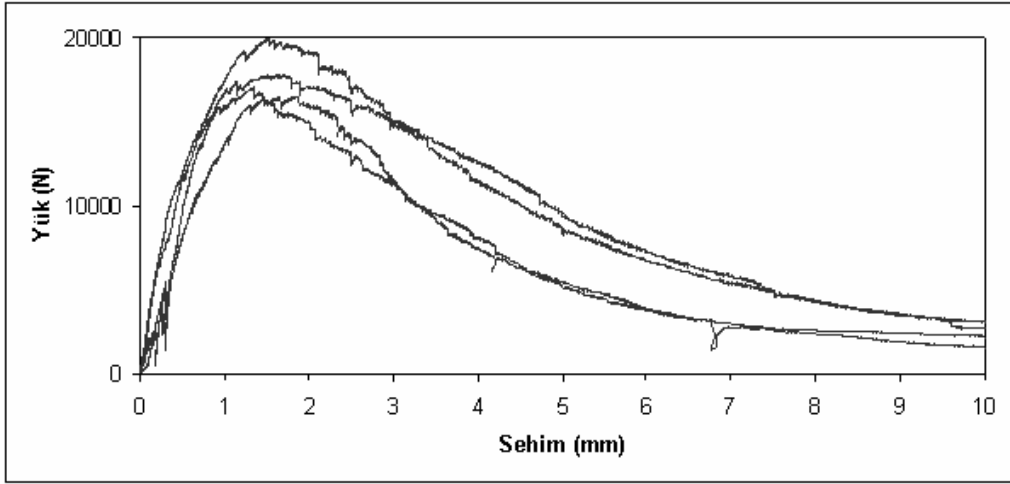
Şekil D.5: ZN numunelerinin yük-sehim eğrileri



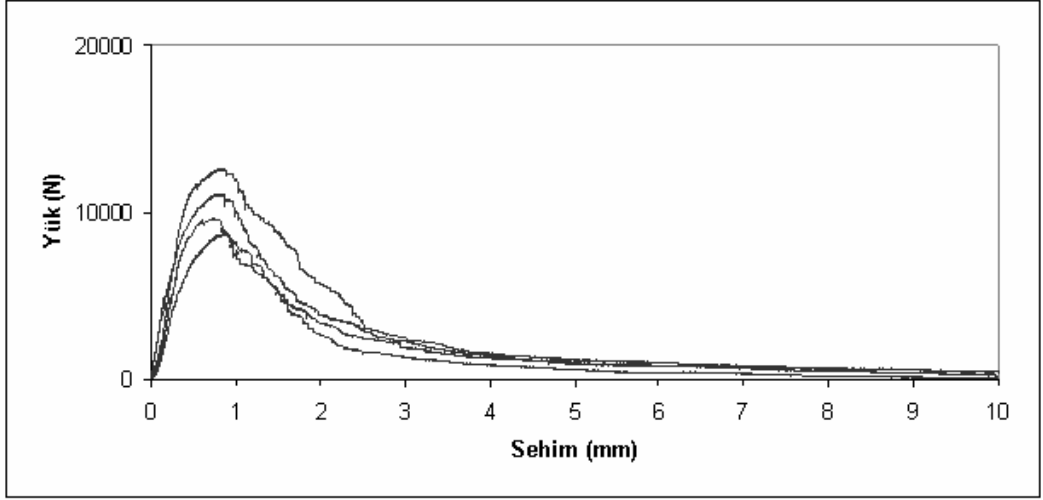
Şekil D.6: ZS numunelerinin yük-sehim eğrileri



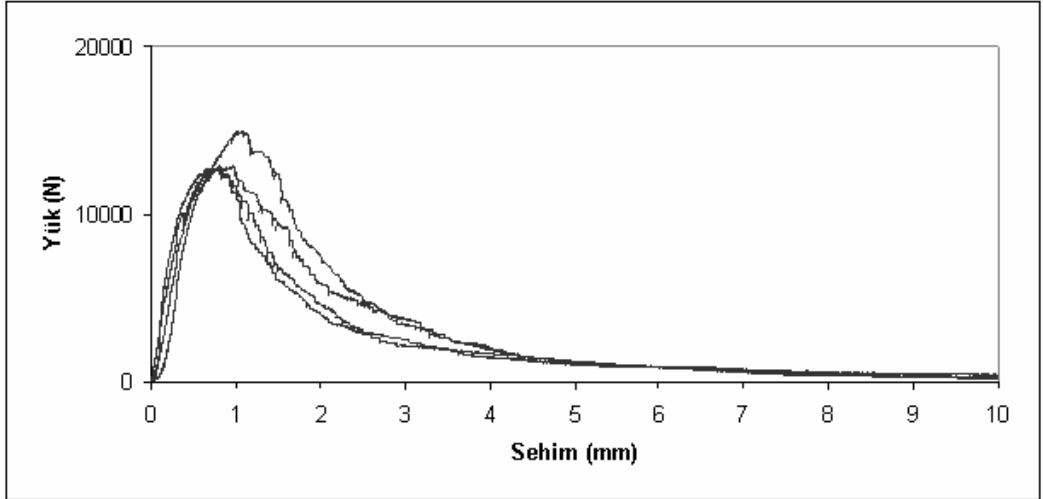
Şekil D.7: XN numunelerinin yük-sehim eğrileri



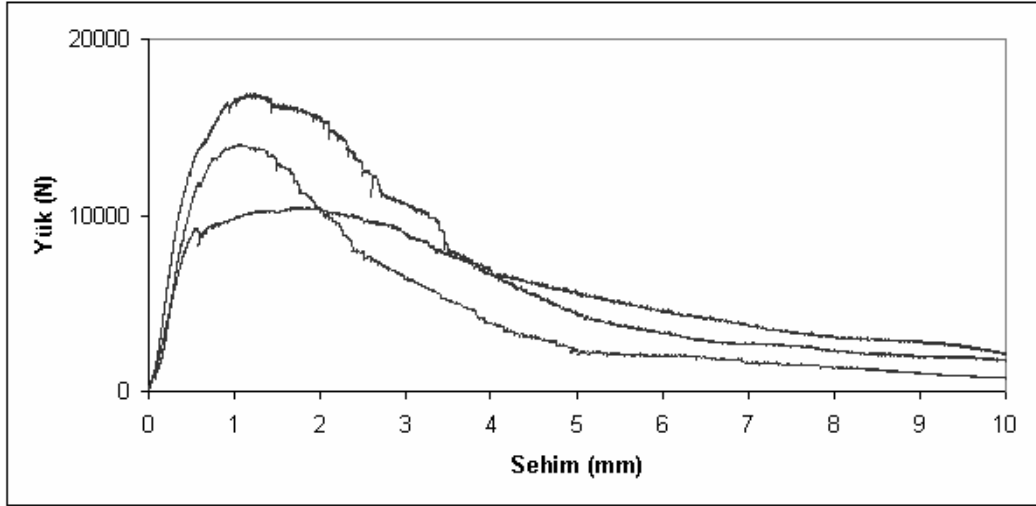
Şekil D.8: XS numunelerinin yük-sehim eğrileri



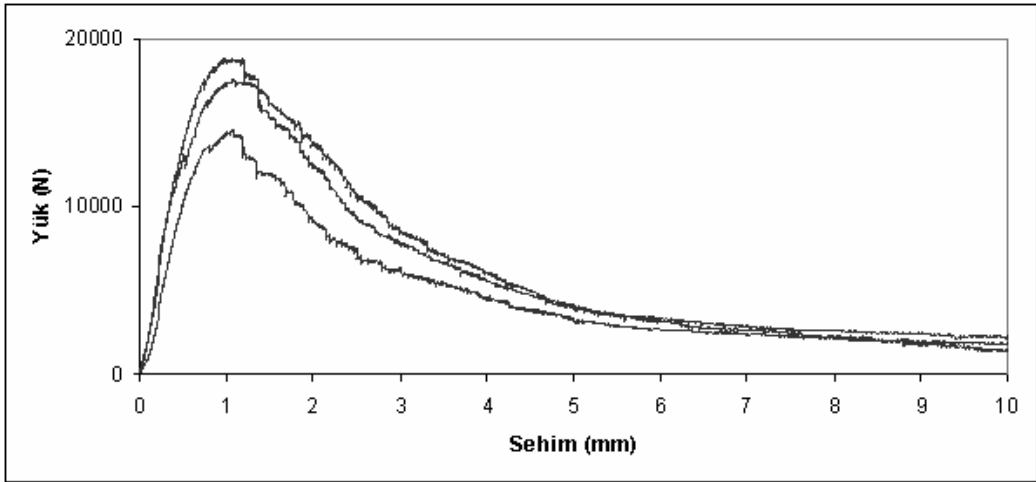
Şekil D.9: OZN numunelerinin yük-sehim eğrileri



Şekil D.10: OZS numunelerinin yük-sehim eğrileri



Şekil D.11: OXN numunelerinin yük-sehim eğrileri



Şekil D.12: OXS numunelerinin yük-sehim eğrileri

Tablo D.1: Kırılma enerjileri

Numune Kodu	Kırılma Enerjileri (N/mm²)	Ortalama
MN-1	181	181
MN-2	181	
MS-1	217	201
MS-2	186	
ON-1	6043	6043
OS-1	6713	6778
OS-2	7888	
OS-3	6844	
ZN-1	19979	14254
ZN-2	14254	
ZN-3	20298	
ZS-1	12310	14079
ZS-2	9174	
ZS-3	15848	
ZS-4	7144	
XN-1	21434	21617
XN-2	13359	
XN-3	23791	
XN-4	21800	
XS-1	32729	24821
XS-2	25143	
XS-3	35325	
XS-4	24499	
OZN-1	7223	8067
OZN-2	6234	
OZN-3	8518	
OZN-4	10293	
OZS-1	10741	10343
OZS-2	9132	
OZS-3	11706	
OZS-4	9794	
OXN-1	21184	19829
OXN-2	16383	
OXN-3	24124	
OXN-4	17625	
OXS-1	17549	20140
OXS-2	22963	
OXS-3	22208	
OXS-4	17840	

Tablo D.2: Net eğilme dayanımları

Numune Kodu	Eğilme Dayanımları (N/mm ²)	Ortalama
MN-1	11,3	11,4
MN-2	10,9	
MN-2	11,5	
MN-4	6,9	
MS-1	13,4	12,8
MS-2	12,1	
ON-1	23,8	23,8
OS-1	25,6	25,4
OS-2	30,5	
OS-3	25,2	
ZN-1	43,6	35,2
ZN-2	32,4	
ZN-3	38,0	
ZS-1	40,6	37,4
ZS-2	34,4	
ZS-3	37,3	
ZS-4	25,0	
XN-1	37,6	37,7
XN-2	28,7	
XN-3	38,8	
XN-4	36,8	
XS-1	47,7	44,9
XS-2	45,6	
XS-3	53,3	
XS-4	44,3	
OZN-1	23,4	28,1
OZN-2	25,7	
OZN-3	29,8	
OZN-4	33,7	
OZS-1	34,5	35,7
OZS-2	34,0	
OZS-3	40,2	
OZS-4	34,1	
OXN-1	28,1	38,5
OXN-2	37,7	
OXN-3	45,3	
OXN-4	32,4	
OXS-1	39,0	45,8
OXS-2	50,6	
OXS-3	47,3	
OXS-4	44,4	

EK E: Yapılan deneylere ait fotoğraflar.



Şekil E.1: Silindir basınç deneyi.



Şekil E.2: Yarmada çekme deneyi.



Şekil E.3: Yarmada çekme deneyi uygulanmış, lifsiz ve normal kürlü numune.



Şekil E.4: Yarmada çekme deneyi uygulanmış, lifsiz ve buhar kürlü numune.



Şekil E.5: Yarmada çekme deneyi uygulanmış lifli numune.



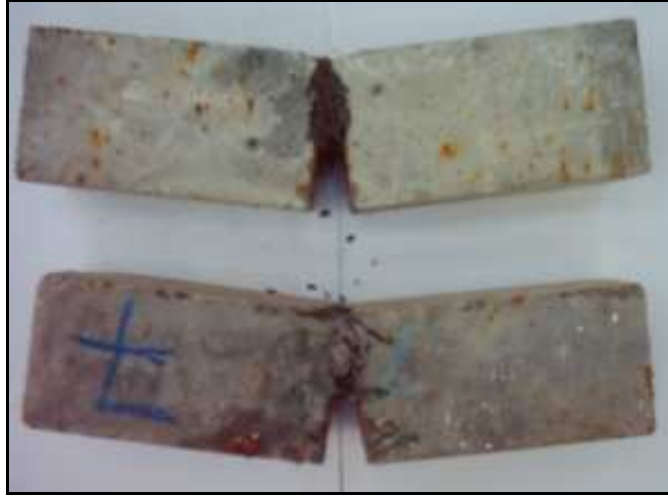
Şekil E.6: MN ve MS numunelerinin kırılma şekli.



Şekil E.7: ON ve OS numunelerinin kırılma şekli.



Şekil E.8: ZN ve ZS numunelerinin kırılma şekli.



Şekil E.9: XN ve XS numunelerinin kırılma şekli



Şekil E.10: OZN ve OZS numunelerinin kırılma şekli.



Şekil E.11: OXN ve OXS numunelerinin kırılma şekli.

ÖZGEÇMİŞ

Dilek AVAR, 1981 yılında Sivas'ta doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Sivas'ta tamamladı. 1999 yılında İ.T.Ü İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 1999-2000 öğretim yılında İ.T.Ü İngilizce Hazırlık Bölümünü tamamladıktan sonra, 2000 yılında başladığı lisans öğrenimini 2004 yılında tamamladı. Aynı yıl İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilimdalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.