

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI ÇELİK TEL DONATILI
BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA 200°C
SICAKLIKTA KÜR ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Delal Doğru**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

AĞUSTOS 2006

**YÜKSEK PERFORMANSLI ÇELİK TEL DONATILI
BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA 200°C
SICAKLIKTA KÜR ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Delal DOĞRU
501041025**

**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,

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

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

Çalışmalarım süresince her anımda yanımda olan arkadaşlarım Ali Emre Ormancı ve Dilek Avar'a,

Gösterdikleri ilgi ve destekleri için aileme,

teşekkür ederim.

Ağustos, 2006

Delal DOĞRU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1. Normal Betonlar	3
2.2. Özel Betonlar	3
2.2.1. Yüksek dayanımlı betonlar (YDB)	4
2.2.2. Çok yüksek dayanımlı betonlar (ÇYDB)	5
2.2.2.1. Yoğunlaştırılmış çimento ve ultra ince tane esaslı malzemeler (DSP)	5
2.2.2.2. Büyük boşluklarından arındırılmış polimer hamurlar (MDF)	6
2.2.2.3. Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON)	6
2.2.2.4. Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler	7
2.2.2.5. Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemeler (UYDÇK)	8
2.3. Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörler	14
2.3.1. Mikroyapının iyileştirilmesinin beton özelliklerine etkisi	14
2.3.1.1. Silis dumanının puzolanik özeliğinin mikroyapıya etkisi	14
2.3.1.2. Silis dumanının boşluk doldurma özeliğinin mikroyapıya etkisi	16
2.3.1.3. Isıl işlem uygulanmasının mikroyapıya etkisi	18
2.3.2. Bağıl yoğunluğun arttırılmasının beton özelliklerine etkisi	22
2.3.2.1. Granülometrinin bağıl yoğunluğa etkisi	22
2.3.2.2. Su/Bağlayıcı oranının bağıl yoğunluğa etkisi	23
2.3.2.3. Silis dumanının bağıl yoğunluğa etkisi	25
2.3.2.4. Basınç uygulanmasının bağıl yoğunluğa etkisi	25
2.3.3. Çelik liflerin beton özelliklerine etkisi	26
2.3.3.1. Lif malzemesinin etkisi	29
2.3.3.2. Çelik lif miktarı, çelik lif narinliği, çelik lif geometrisinin etkisi	30
2.3.3.3. Çelik lif dayanımının etkisi	36

2.3.4. Kimyasal katkıların beton özelliklerine etkisi	37
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması	39
3.1.1. Çimento	39
3.1.2. Silis dumanı	40
3.1.3. İnce silis kumu	41
3.1.4. İri silis kumu	41
3.1.5. Çelik lifler	42
3.1.5.1. OL 6/16	42
3.1.5.2. Dramix ZP 305	42
3.1.5.3. Dramix ZP 305X	42
3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı	43
3.2. Beton Karışımları	43
3.3. Üretimde İzlenen Sıra	43
3.4. Numune Boyutları ve Şekilleri	44
3.5. Yüksek Sıcaklıkta Kür Programı	44
3.6. Numune Kodlarının Belirlenmesi	45
3.7. Taze Beton Deneyleri	46
3.8. Sertleşmiş Beton Deneyleri	46
3.8.1. Silindir basınç deneyi	46
3.8.2. Küp basınç deneyi	47
3.8.3. Yarmada çekme deneyi	47
3.8.4. RILEM kırılma enerjisi deneyleri	47
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELEME VE DEĞERLENDİRİLMESİ	52
4.1. Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	52
4.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	53
4.3. Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	54
4.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	56
4.4.1. Kırılma enerjilerinin değerlendirilmesi	57
4.4.2. Net eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi	61
4.5. Deney Sonuçlarının 90°C'de Buhar Kürü Uygulanan Bir Çalışma ile Kıyaslanması	62
5. GENEL SONUÇLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER	66
5.1. Genel Sonuçlar	66
5.2. İleri Çalışmalar	68
KAYNAKLAR	69
EKLER	73
ÖZGEÇMİŞ	88

KISALTMALAR

RPB	: Reaktif Pudra Betonu
DSP	: Densified Small Particles-Yoğunlaştırılmış çimento ve ultra ince tane
MDF	: Macro Defect Free-Büyük boşluklardan arındırılmış
SIFCON	: Slurry Infiltrated Fiber CONcrete- Çimento hamuru enjekte edilmiş lifli beton
s/b	: Su/Bağlayıcı
s/ç	: Su/Çimento
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrate
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
YPB	: Yüksek Performanslı Beton
ÇYDB	: Çok Yüksek Dayanımlı Beton
UYDÇK	: Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit
TS	: Türk Standartları
MPa	: Mega Pascal
GPa	: Giga Pascal
PÇ	: Portland Çimentosu
SD	: Silis Dumanı
LVDT	: Lineer Voltage Direct Transducer
RILEM	: Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions
DEF	: Delayed Ettringite Formation-Gecikmiş Etrenjit Oluşumu

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. MDF çimentosu ve normal Portland çimentosu hamurlarının mekanik ve kırılma özellikleri.....	6
Tablo 2.2. RPB 200'ün tipik bileşimi.....	9
Tablo 2.3. RPB 200'ün mekanik özellikleri.....	10
Tablo 2.4. RPB 800'ün tipik bileşimi.....	11
Tablo 2.5. RPB 800'ün mekanik özellikleri	11
Tablo 2.6. Tek eksenli basınç, tek eksenli çekme ve burulma hallerinde basınç dayanımı-en yüksek gerilmedeki şekil değiştirme ilişkisi ...	13
Tablo 2.7. Alaşım türüne göre silis dumanındaki SiO ₂ miktarı.....	15
Tablo 2.8. Silis dumanının özgül yüzeyinin çimento ve puzolanik malzemelerle karşılaştırılması.....	17
Tablo 2.9. Çalışmada kullanılan lif türlerinin geometrileri.....	35
Tablo 3.1. Üretilen betonların kodları ve karışımlardaki lif yüzdeleri.....	45
Tablo 3.2. Taze beton özellikleri.....	46
Tablo 3.3. Sertleşmiş beton özellikleri.....	51
Tablo A.1. Küp numunelerden elde edilen küp basınç dayanımları.....	74
Tablo B.1. Silindir numunelerden elde edilen silindir basınç dayanımları.....	75
Tablo C.1. Silindir numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri.....	76
Tablo D.1. Disk numunelerden elde edilen yarmada çekme dayanımları.....	77
Tablo E.1. Prizma numunelerden elde edilen net eğilme dayanımları	78
Tablo F.1. Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjileri	79

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi	8
Şekil 2.2 : Normal harç ve lif donatılı RPB 200'ün eğilme davranışı.....	10
Şekil 2.3 : Tek eksenli basınç altında RPB 200'ün gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	12
Şekil 2.4 : Tek eksenli basınç altında RPB 800'ün gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	12
Şekil 2.5 : Çekme şekil değiştirme kapasitesi-basınç dayanımı ilişkisi.....	13
Şekil 2.6 : Karbon siyahı ve silis dumanı kullanılan çimento hamurlarının dayanımlarının karşılaştırılması.....	16
Şekil 2.7 : Silis dumanının ve karbon siyahının puzolanik ve boşlukları doldurma etkisi.....	17
Şekil 2.8 : Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerde yük sehim eğrisi.....	19
Şekil 2.9 : Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerde kırılma enerjisi çelik lif hacim oranı ilişkisi.....	19
Şekil 2.10 : Puzolanik oran-ısıtma kür sıcaklığı.....	20
Şekil 2.11 : Uygulanan kür işlemlerinin basınç dayanımına etkisi.....	21
Şekil 2.12 : Normal dayanımlı beton ile RPB'nin granülometri eğrileri.....	22
Şekil 2.13 : Teorik maksimum tane yoğunluğu.....	23
Şekil 2.14 : Bağlı yoğunluk-su/bağlayıcı (S/B) ilişkisi.....	23
Şekil 2.15 : RPB'nin basınç dayanımı-bağlı yoğunluk ilişkisi.....	24
Şekil 2.16 : Gevrek matrisli lifli donatılı kompozitin gerilme-şekil değiştirme eğrisi: (a) düşük lif oranı; (b) yeterli lif oranı; (c) yüksek lif oranı.....	27
Şekil 2.17 : Lif miktarının yük sehim eğrisine etkisi.....	31
Şekil 2.18 : Farklı narinliğe (l/d) sahip çelik tellerle donatılmış betonların özgül kırılma enerjisinin (G_F) tel içeriği (V_F) ile değişimi.....	32
Şekil 2.19 : Çelik lif tipleri ve kesitleri.....	35
Şekil 2.20 : Farklı tipteki çelik tellerle üretilmiş beton kirişlerin yük-sehim eğrileri.....	37
Şekil 3.1 : Numune boyutları ve şekilleri.....	44
Şekil 3.2 : Yüksek sıcaklıkta kür programı.....	45
Şekil 3.3 : RILEM kırılma enerjisi deneyi.....	48
Şekil 3.4 : RILEM kırılma enerjisi veri toplama sistemi.....	48
Şekil 3.5 : Örnek bir yük-sehim eğrisi.....	49
Şekil 4.1 : Küp basınç dayanımları ortalama değerleri.....	52
Şekil 4.2 : Silindir basınç dayanımları ortalama değerleri.....	54
Şekil 4.3 : Elastisite modülleri ortalama değerleri.....	54
Şekil 4.4 : Yarmada çekme dayanımları ortalama değerleri.....	55
Şekil 4.5 : RILEM kırılma enerjisi ortalama değerleri.....	56

Şekil 4.6	: Normal kür koşullarında çelik lif içeren ve içermeyen numunelerin yük sehim diyagramları.....	57
Şekil 4.7	: Yüksek sıcaklık küründe çeliklif içeren ve içermeyen numunlerin yük sehim diyagramları.....	59
Şekil 4.8	: Lifsiz numunelerde kür etkisi.....	59
Şekil 4.9	: OL teli kullanılan numunelerde kür etkisi.....	59
Şekil 4.10	: ZP 305 teli kullanılan numunelerde kür etkisi.....	60
Şekil 4.11	: ZP 305X teli kullanılan numunelerde kür etkisi.....	60
Şekil 4.12	: ZP 305 ve OL telinin karma kullanıldığı numunelerde kür etkisi.....	60
Şekil 4.13	: ZP 305X ve OL telinin karma kullanıldığı numunlerde kür etkisi.....	61
Şekil 4.14	: Net eğilme dayanımları ortalama değerleri.....	61
Şekil 4.15	: Küp basınç dayanımları ortalama değerleri.....	63
Şekil 4.16	: Silindir basınç dayanımları ortalama değerleri.....	63
Şekil 4.17	: Elastisite modülleri ortalama değerleri.....	64
Şekil 4.18	: Yarmada çekme dayanımları ortalama değerleri.....	64
Şekil 4.19	: Net eğilme dayanımları ortalama değerleri.....	65
Şekil 4.20	: RILEM kırılma enerjisi ortalama değerleri.....	65
Şekil G.1	: MC numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	80
Şekil G.2	: OC numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	80
Şekil G.3	: ZC numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	80
Şekil G.4	: XC numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	81
Şekil G.5	: OZC numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	81
Şekil G.6	: OXC numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	81
Şekil G.7	: MN numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	82
Şekil G.8	: ON numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	82
Şekil G.9	: ZN numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	82
Şekil G.10	: XN numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	83
Şekil G.11	: OZN numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	83
Şekil G.12	: OXN numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	83
Şekil H.1	: Silindir basınç deney düzeneği.....	84
Şekil H.2	: Yarmada çekme deney düzeneği.....	84
Şekil H.3	: Normal kür uygulanan lifsiz numune.....	85
Şekil H.4	: Yarmada çekme deneyi uygulanmış lifli numune.....	85
Şekil H.5	: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış MC ve MN numuneleri.....	86
Şekil H.6	: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış OC ve ON numuneleri.....	86
Şekil H.7	: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış ZC ve ZN numuneleri.....	86
Şekil H.8	: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış XC ve XN numuneleri.....	87
Şekil H.9	: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış OZC ve OZN numuneleri.....	87
Şekil H.10	: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış OXC ve OXN numuneleri.....	87

SEMBOL LİSTESİ

V_f	: Çelik lif hacmi
d_0	: Kalıp alınması aşamasındaki beton yoğunluğu
d_s	: Sıkıştırılmış olduğu varsayılan taneli karışımın katı yoğunluğu
l/d	: Narinlik
G_F	: Özgöl kırılma enerjisi
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_{fnet}	: Net eğilme dayanımı
L	: Mesnetler arası uzaklık
B	: Numune kesitinin genişliği
D	: Numune kesitinin yüksekliği
a_0	: Çatlak derinliği
P	: Sıyrılma yükü
Δ	: Kayma
ϵ	: Şekil değiştirme

YÜKSEK PERFORMANSLI ÇELİK TEL DONATILI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA 200°C SICAKLIKTAKİ KÜR ETKİSİ

ÖZET

Yüksek performanslı yalın betonlarla karşılaştırıldığında, yüksek performanslı lifli betonların tane dizilişi daha sıkıdır ve bu durum güçlü çimento esaslı hidrate ürünlerin varlığından kaynaklanmaktadır. Reaktif Pudra Betonları (RPB'ler) çok ince kum, çimento, silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı ve kısa kesilmiş çelik lifler kullanılarak üretilirler. Çok düşük poroziteleri bu betonlara önemli dürabilite ve geçirimsizlik özellikleri kazandırarak, bu betonların endüstriyel atıkların depolanması için uygun malzemeler olmalarını sağlar. Bu özelliklere şu şekilde ulaşılmaktadır; i) bütün tanelerin dağılımının yoğun bir matris elde etmek için optimum biçimde ayarlanması, ii) maksimum tane çapının azaltılarak betonun homojenliğinin sağlanması, iii) betondaki su miktarının azaltılması, iv) inceliği yüksek silis dumanının pozolonik özelliklerinin etkili şekilde kullanılması, v) tüm bileşenlerin optimum birleşimi, vi) süneklik için kısa kesilmiş çelik tel kullanılması, vii) çok yüksek dayanıma ulaşmak için basınç altında sertleştirmek ve sıcaklığın artırılması.

Yüksek performanslı çelik tel donatılı çimento esaslı kompozitler mükemmel darbe dayanımı özellikleri ile, i) askeri yapılarda, ii) depreme karşı stratejik yapılarda, iii) betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılırlar. Ayrıca küçük ve orta büyüklükte prefabrika elemanlarda kullanılmaktadırlar.

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.

Tüm numunler, 48 saat sonra kalıptan çıkarılarak, 2 farklı kür rejimi uygulandı. Birinci kür rejimi, numunelerin 20°C'de kirece doygun kür havuzunda deney tarihine kadar tutulmasını içeren standart su kürü idi. İkinci kür rejiminde ise numunelere 200°C'de yüksek sıcaklık kürü ve daha sonra deney gününe kadar birinci kür rejimi uygulandı. Yüksek sıcaklık kürü sırasında numuneler, nemin buharlaşmasını önleyen

koruyucu iki tabaka ile sarıldı. Birinci sargı malzemesi yüksek sıcaklığa dayanıklı plastik bir tabaka, ikincisi ise aliminyum folyo idi.

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 kesilmiş çelik liflerin mikro çatlakların engellenmesinde köprü görevi görerek, kompozitin çekme dayanımını arttırdığı ve bu liflerin makro çatlaklar oluşuktan sonra sıyrıldıkları sonucuna varıldı. Bu nedenle, kısa kesilmiş çelik liflerin, kirişin yük-sehim eğrisinin, maksimum yük sonrası inen kısmında etkileri azdır. Uzun liflerin mikroçatlakları önlenmesinde önemli etkileri yoktur, fakat uzun liflerin kirişlerin yük-sehim eğrilerinin maksimum yük sonrası kısmında süneklik bakımından çok büyük 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 166 kata varan artış olurken, normal dayanımlı çelik lif içeren betonların kırılma enerjilerinde yalın betonunkine kıyasla 94 kat artış oldu. Böylece, kür koşuluna bağlı olarak, karma lifli betonlar yalın betonlara göre artırılmış tokluk ve sünekliğe sahip bir davranış sergilemiştir.

EFFECT OF CURING CONDITION AT 200°C ON MECHANICAL BEHAVIOR OF HIGH PERFORMANCE STEEL FIBER REINFORCED CONCRETES

SUMMARY

The microstructure of high performance fiber reinforced concrete has a more compact particle arrangement and is enhanced by a presence of the strongest cementitious hydrates as compared to high performance plain concrete. Reactive Powder Concretes (RPCs) are produced by using very fine sand, cement, silica fume, superplasticizers, and short cut steel fibers. Their very low porosity gives them important durability and transport properties and makes them potentially suitable materials for storage of industrial wastes. These features are achieved by i) precise gradation of all particles in the mixture to yield a matrix with optimum density, ii) reducing the maximum size of particles for the homogeneity of the concrete, iii) reducing the amount of water in the concrete, iv) extensive use of the pozzolanic properties of highly refined silica fume, v) optimum composition of all components, vi) the use of short cut steel fibers for ductility, vii) hardening under pressure and increased temperature, in order to reach very high strengths.

Since High Performance Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCCs) have excellent impact resistance properties, they can be employed for; i) military structures, ii) strategic structures against earthquake, and iii) retrofitting of reinforced concrete structures. They are also used for small or medium size prefabricated elements.

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): superplacticizer = 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 high temperature

curing for 3 days at 200°C further the same water curing until testing day. During this high temperature curing regime, specimens were wrapped by using two protective layers against evaporation of moisture from the specimens. The first wrapping material was a high temperature resistant plastic sheet and the second one was an aluminum foil.

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 94 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 166 times. Thus, depending on the high temperature curing , hybrid steel fiber concretes showed a behaviour of enhanced toughness and ductility when compared to plain concretes.

1. GİRİŞ

Günümüzde özel yapılarda sıkça kullanılan yüksek performanslı betonların dayanımları 50 MPa ila 120 MPa arasında değişmektedir. Dayanımdaki bu artış yeni kuşak süperakışkanlaştırıcı katkı, silis dumanı gibi ultra incelikte mineral katkı ve çok düşük su/çimento oranı ile sağlanmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlarda normal dayanımlı betonlara göre çimento dozajı yüksek, en büyük agrega çapı ise düşüktür [1].

Son teknoloji ürünü olan reaktif pudra betonları, ultra yüksek dayanımlı-performanslı çimento esaslı kompozit malzemeler olarak nitelendirilmektedir. Reaktif pudra betonlarının üretiminde boşluksuz ve homojen bir yapı elde etmek için iri agrega kullanılmamakta, ince malzemelerin tane çapı dağılımları optimize edilmektedir. Sıcak kür işlemleri ve hidratasyon sırasında ve öncesinde uygulanan basınç ile çok yüksek dayanımlı betonlar elde edilmektedir. Reaktif pudra betonu; hamur fazı yoğun, yüksek miktarda silis dumanı ve düşük miktarda su içeren harç olarak nitelendirilebilir [1].

Yüksek dayanımlı betonların en büyük problemi gevrekliktir. Reaktif pudra betonlarında, betona kısa kesilmiş çelik lif katılması ile yüksek dayanımın yanı sıra yüksek süneklik de elde edilebilir. Bu betonlarda, lif içeriğine ve lif narinliğine bağlı olarak çok yüksek kırılma enerjisine ve yüksek sünekliğe (şekil değiştirme yeteneği) erişilmektedir. Süneklikle birlikte darbe dayanımının ve enerji yutma kapasitesinin artması askeri yapılar, endüstriyel zeminler, ağır trafiğin söz konusu olduğu özel durumlarda reaktif pudra betonlarını cazip hale getirmektedir [2].

Taşıyıcı yapı malzemeleri tasarlanırken dayanımın yanı sıra süneklik, uzun süreli performans, üretim kolaylığı, çevre ile uyumluluk ve ekonomi de önem kazanmaktadır. Özellikle zaman içerisinde ekonomik olmayı da sağlayan uzun süreli performans kavramı, dürabilite ile yakından ilgilidir. Betonda dürabilite; su/çimento oranı ve agrega ile çimento hamuru arasındaki temas yüzeyi özelliklerine bağlıdır. Düşük su/çimento oranı ve yoğun tane dizilişi ile reaktif pudra betonları yüksek

dayanımın yanı sıra üstün fiziksel özelliklere sahiptirler ve geçirimsizlikleri çok düşüktür [3]. Bonneau ve arkadaşları [1], 300 donma-çözünme çevrimine tabii tutulan reaktif pudra betonunun dayanıklılığında azalmaya rastlamamışlardır. Yapılan testler sonucunda reaktif pudra betonlarında klor iyonu geçirimsizliği, normal dayanımlı betona göre %600, yüksek dayanımlı betona göre ise %50 - %100 daha az bulunmuştur. Cheyrezy ve diğerleri [4], reaktif pudra betonuna civalı porozimetri deneyi uygulayarak 3,75nm ile 100µm arasındaki boşluk çapının %9'u geçmediğini gözlemlemişlerdir. Roux ve arkadaşları [5] ise, RPB 200'ün (reaktif pudra betonunun, basınç dayanımı 200MPa) hava geçirimsizliği ve su emme kapasitesinin normal dayanımlı betona göre çok düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durum reaktif pudra betonu ile olumsuz çevre koşullarına dayanıklı, uzun ömürlü yapılar inşaa edilebileceğinin bir göstergesidir.

Sunulan bu çalışmada; ince agrega, silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı ile düz ve kancalı uçlu çelik lifler kullanılmıştır. Karışımlarda süperakışkanlaştırıcının varlığı ile su/bağlayıcı oranını 0,17 mertebesinde tutmak mümkün olmuştur. Karışımında su miktarı düşük, bağlayıcı miktarı yüksek tutularak yoğunluğun artırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemelere üretim sonrasında uygulanan yüksek sıcaklıkta kür etkisini araştırmaktır. Ayrıca, üretimde kullanılan farklı lif tiplerinin ve bu liflerin karma kullanılmasının, betonun mekanik davranışına etkileri araştırılmıştır.

Bu amaç doğrultusunda 6 ayrı karışım ile üretim yapıldı. Bu karışımlarda lif hacimleri %3'te sabit tutularak, normal dayanımlı düz lif, normal dayanımlı kancalı uçlu çelik lif ve yüksek dayanımlı kancalı uçlu çelik lif olmak üzere 3 tip lif kullanıldı. Uygun kür koşullarında bekletilen numunelere silindir basınç deneyleri, küp basınç deneyleri, disk yarma deneyleri ve RILEM kırılma enerjisi deneyleri uygulandı. Deneyler sonucunda numunelerin basınç, çekme, eğilme davranışları incelendi ve lif tipine bağlı olarak oluşan değişimler araştırıldı.

Isıl işlem etkisini araştırmak için aynı özellikteki numunelerin bir bölümüne yüksek sıcaklık kürü uygulanırken, bir bölümü de standart kür koşullarında bekletildi.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Beton; çimento, agrega, su ve gerekiyorsa kimyasal katkının belirli esaslara göre hesaplanan oranlarda karıştırılması ile üretilen, uygun kür koşullarında saklanarak, sınıfı basınç dayanımına bağlı olarak ifade edilen kompozit bir malzemedir [6].

Mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından betonlar genel olarak iki sınıfa ayrılabilir.

1. Normal Betonlar

2. Özel Betonlar

2.1. Normal Betonlar

Normal betonlar, basınç dayanımları 20MPa-60MPa, kırılma enerjileri 100 J/m²-120 J/m² civarında olan, agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilen ekonomik malzemelerdir [3].

Normal betonların kırılma enerjileri, ultra yüksek dayanımlı betonların %0,3'ü, basınç dayanımları ise % 8'i civarındadır. Bu sebeple çok özel yapılarda normal betonlar yerini ultra yüksek dayanımlı betonlara bırakmaktadır. Normal betonlar bina, yol, sanat yapıları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İlerleyen beton teknolojisine rağmen normal betonlar günümüzde en çok kullanılan beton türüdür [3].

2.2. Özel Betonlar

Özel beton, üretim süreci ve özellikleri normal betonlardan farklı olan betonlara verilen genel addır. Üretim sürecinin farklı olması üretim tekniğinin geliştirilmesinin yanı sıra, belirli özellikte beton üretimine de olanak sağlar [7]. Özel betonlar, fiziksel ve mekanik özellikleri belirli ihtiyaç doğrultusunda iyileştirilmiş normal, hafif veya ağır betonlardır [6].

2.2.1. Yüksek dayanımlı betonlar (YDB)

Yüksek dayanımlı beton, yüksek kalitede agrega ve çimento ile silis dumanı kullanılarak üretilen, su/çimento oranı düşürülerek ($\sim 0,20$) süperakışkanlaştırıcı katkı ile yüksek işlenebilirlik ve pompalanabilirlik elde edilebilen özel bir beton türüdür. Yüksek dayanımlı betonlarda basınç dayanımı yaklaşık olarak 100N/mm^2 mertebelerine kadar çıkabilmektedir [8].

ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programı, Yüksek Performanslı Betonun aşağıdaki gibi tanımlamaktadır:

Çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı $> 17,5$ MPa,

Çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı > 35 MPa,

Çok yüksek dayanımlı beton: 28 günlük basınç dayanımı > 70 MPa,

Dürabilite çarpanı $> 80\%$ (donma – çözülmenin 300 tekrarından sonra),

Su/bağlayıcı oranı $< 0,35$ [9].

Yüksek dayanımlı betonlarda dayanım, çimento hamurunun boşluk yapısına, agreganın özelliklerine, agrega-çimento hamuru geçiş bölgesine bağlıdır. Çimento hamuru ve ara yüzey geçiş bölgesinin özellikleri, su/çimento oranı düşürülerek ve maksimum agrega çapı küçültülerek iyileştirilebilir. Ancak bu iki yaklaşımda da belirli bir üst sınır vardır. Bu sınırı aşmak için betonda çimento hidratasyonu sonucu oluşan ve $1-2$ MPa mertebesinde düşük dayanıma sahip Ca(OH)_2 (Kalsiyum Hidroksit) kristallerinin, silis dumanının puzolanik etkisi ile bağlayıcı C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrate) jellerine dönüşmesi gerekir. Özellikle agrega-çimento hamuru arayüzeyindeki C-S-H fazının oluşması ile arayüzey iyileştirilerek aderans artırılır. Dolayısıyla dürabilitesi ve dayanımı yüksek olan beton elde edilmiş olur [8].

Yüksek dayanımlı betonlarda, normal dayanımlı betonlara göre gerilme–şekil değiştirme diyagramının doğrusal bölümü daha uzundur. Bu durum, agrega-çimento hamuru arayüzeyinin kuvvetli olmasının, dolayısıyla mikro çatlakların fazla olmamasının bir nedenidir. YDB'lerde maksimum gerilmedeki şekil değiştirme, normal dayanımlı betona göre daha fazladır. Buna karşılık, gerilme – şekil değiştirme diyagramının alçalan kısmının eğimi, normal betona göre daha diktir. Bu durum,

yüksek dayanımlı betonların normal dayanımlı olanlara kıyasla daha gevrek olduğunun bir göstergesidir [8].

Yüksek dayanımlı betonlarda yapı kesitlerinin küçülmesi, ölü yükün azalması ile uzun açıklıkların geçilmesini ve yapılarda kullanılabilir alanın artmasını sağlar. Yapı kütlelerinin azalması, depreme dayanıklı binaların ekonomik tasarımı için önem teşkil eder [32]. Yüksek dayanımlı beton kullanımı ile %68 kesit azalması gerçekleştirilebilir [10].

Yüksek dayanımlı betonların en önemli kusurları gevrek kırılma, otojen rötre ve yangına karşı dayanıksızlıktır. Günümüzde bu kusurlar çeşitli önlemlerle giderilerek yüksek performanslı betonlar üretilmektedir [9].

2.2.2. Çok yüksek dayanımlı betonlar (ÇYDB)

1930’larda Eugéne Freyssinet yerleştirme sırasında betona basınç uygulanmasının beton dayanımını arttıracaklarını belirtmiştir. 1960’larda ise beton ve harç numuneleri üzerine doygun atmosfer koşullarında sıcak kür ve basınç uygulanmıştır [11]. Uzun süren çalışmalar sonucunda, yüksek dayanımlı ileri çimento esaslı malzemeler elde edilmiştir. Bu malzemeler; Yoğunlaştırılmış Çimento ve Ultra İnce Tane Esaslı Malzemeler, Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar, Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Betonlar, Karma Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit Malzemeler, Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemeler’dir.

2.2.2.1. Yoğunlaştırılmış çimento ve ultra ince tane esaslı malzemeler (DSP)

Bu malzemeler yüksek süperakışkanlaştırıcı ve silis dumanı içeriğine sahip olup, yüksek sertlikli agreganın (granit, kalsine boksit) kullanılması ile üretilirler [11]. DSP malzemeler 150 – 400 MPa arasında değişen basınç dayanımına sahiptirler [12]. Silis dumanı çimento taneleri arasındaki boşluklarda homojen olarak dağılarak çok yoğun bir yapı meydana getirir ve bu yoğun yapıda meydana gelebilecek topraklanmaları önlemek amacıyla süperakışkanlaştırıcılar kullanılır [13]. Tane çaplarının birbirine oranının 30 olduğu iki malzemenin birleştirilmesi ile optimum tane dizilişi elde edilerek, boşluk miktarı minimuma indirilebilir [6].

2.2.2.2. Büyük boşluklarından arındırılmış polimer hamurlar (MDF)

MDF çimentolu malzemeler Portland veya yüksek alüminli çimentoların yüksek moleküler kütleli suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Burada polimerin görevi düşük su/katı oranında karışımın viskozitesini arttırmak, çimento tanelerinin topaklanmasını önlemektir [13]. Sertleşmiş malzemede polimer, çimento tanelerine sağlam bir şekilde bağlanarak, malzemenin porozitesini hacminin %1'ine kadar düşürür [6].

MDF çimento hamurları çok özel üretim koşullarında elde edilmektedir. Bu hamurlar yüksek kayma mikseri ile karıştırılmakta ve yerleştirmenin iyi yapılabilmesi için karışım birçok kez hadde işlemine tabi tutulmaktadır. Ayrıca, MDF'nin suya karşı duyarlı olması, malzemenin sünme miktarını artırır. MDF çimento hamurları çok gevrek – kırılğan malzemelerdir. Sünekliği arttırmak için kullanılacak çelik teller viskozitesi yüksek olan MDF hamurunda yerleştirme problemine sebep olmaktadır [12].

Yüksek dayanımlı MDF ile normal Portland çimentosunun mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1: MDF çimentosu ve normal portland çimentosu hamurlarının mekanik ve kırılma özellikleri [13].

Mekanik özellik	Normal çimento hamuru	MDF çimento
Eğilme dayanımı (MPa)	10	40-150
Elastisite modülü (GPa)	20	35-50
Basınç dayanımı (MPa)	40	100-300
Kırılma enerjisi (J/m^2)	20	40-200

2.2.2.3. Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON)

Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton (SIFCON), çok yüksek dayanımlı betonların özel bir çeşidi olup, kullanılan lif hacmi %20'ye kadar ulaşmaktadır. Lif oranının yüksek olması yerleştirme problemlerine neden olacağından, SIFCON'un üretiminde özel bir teknik geliştirilmiştir. SIFCON, çelik liflerin hazırlanan kalıba yerleştirilmesinden sonra, akıcı harç bulamacının liflerin içine enjekte edilmesi ile üretilir.

Kullanılan lif hacmi; lif narinlik oranına, lif geometrisine, yerleştirme tekniğine bağlı olarak değişir. SIFCON matrisi bileşimini; çimento-uçucu kül, çimento-silis dumanı,

çimento-kum-uçucu kül veya çimento-kum-silis dumanı oluşturmaktadır, iri taneli agrega bileşimde kullanılmaz. Karışımlarda bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılacaksa çimento miktarının %20'si kadar, silis dumanı kullanılacaksa çimento miktarının %10'u kadar katılmaları tavsiye edilir. SIFCON'un üretiminde lifin harc içerisinde yönelme doğrultusu büyük önem taşır.

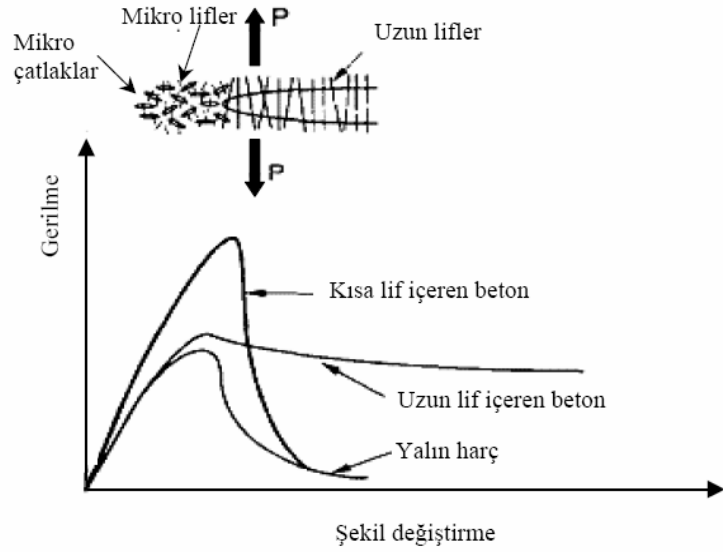
SIFCON köprülerin ve kaldırımların onarılmasında, patlayıcı malzeme saklanan, yangına karşı koruma gerektiren yerlerin inşaatında, prekast ürünlerde kullanılmaktadır [14].

2.2.2.4. Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler

Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler betonda farklı tip ve boyutta lif kullanılması ile üretilir ve burada amaç çatlakların mikro düzeyden itibaren kontrol edilmesidir. Mikro, mezo ve makro düzeyde çelik teller kullanılarak mikro, mezo ve makro düzeydeki çatlaklar kontrol altına alınmaktadır. Mikro lifler mikro çatlakların, makro lifler makro çatlakların oluşumunu ve gelişimini kontrol eder.

Mikro lifler, çatlakları makro düzeye gelmeden durdurarak, elastik bölgedeki davranışı iyileştirir. Makro lifler ise, makro düzeydeki çatlakları kontrol ederek, maksimum yük sonrası davranışı iyileştirirler. Dolayısı ile malzemenin çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve sünekliği artar.

Farklı lif boyutlarının lif köprülenmesine etkisi Şekil 2.1'de görülmektedir. Mikro lifler mikro çatlakları köprü görevi görerek durdururken, lifler arası mesafe büyük olduğu için, makro lifler çatlak başlangıcında etkili olmayıp, maksimum yük sonrası davranışı iyileştirirler. Bu durumda mikro lifler çimento hamurunun, makro lifler ise betonun güçlenmesinde etkili rol oynarlar [15].



Şekil 2.1: Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi [15].

2.2.2.5. Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemeler (UYDÇK)

Reaktif Pudra Betonları yüksek kırılma enerjisine, çok düşük geçirimsliliğe ve yüksek basınç dayanımına sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir [13]. Basınç dayanımları 200 MPa ile 800 MPa arasında değişen bu malzemelerde, 25–150 MPa arasında çekme dayanımına ve 40000J/m^2 kırılma enerjisine ulaşılmıştır [11]. Bu özelliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir.

1. Bütün tanelerin dağılımının yoğun bir matris elde etmek için optimum biçimde ayarlanması,
2. Agrega tanelerinin en büyük boyutunu azaltarak betonun homojenliğinin sağlanması,
3. Betondaki su miktarının azaltılması,
4. Çok ince bir malzeme olan silis dumanının puzolanik özeliğinden yararlanılması,
5. Beton bileşenlerinin optimum bileşimi,
6. Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,
7. Sıkıştırma ve yüksek sıcaklıkta ısıtma uygulanması [3].

İri agrega ve matris arasındaki geçiş bölgesi mikro çatlakların kaynağını oluşturur. Bu durum, hamur ile agreganın mekanik ve fiziksel özelliklerinin farklı olması ile ortaya çıkar. Dolayısıyla yüksek performans/dayanım elde etmek için beton

homojenliği büyük önem taşır [16]. Homojen bir yapıya sahip RPB’de bu özeliğe aşığıdaki etmenler sayesinde erişilmiştir.

- İri agregaların elimine edilmesi ve yerine ince kumun kullanılması (en fazla 600µm) ,
- Çimento hamurunun mekanik özelliklerinin geliştirilmesi,
- Agregası/çimento oranının azaltılması,

RPB’de en büyük agrega boyutunun yaklaşık 50 kat azaltılması, dış yüklerden oluşan mekanik çatlıkların, otojen rötre sonucu oluşan kimyasal çatlıkların, ısıl işlem sonucu çimento hamuru ile agregaların genleşme farkından kaynaklanan termo-mekanik çatlıkların boyutlarında büyük bir azalma oluşturur [11].

Yakın geçmişte, ultra yüksek dayanımlı beton olarak RPB 200 ve RPB 800 olmak üzere, bileşimleri birbirinin benzeri, fakat kür koşullarının etkisi ile dayanımları birbirinden farklı 2 tip reaktif pudra betonu üretilmiştir.

RPB 200 Portland çimentosu, silis dumanı, kum (ortalama dane çapı 250µm), su ve çelik lif kullanılarak üretilen, basınç dayanımı 200 MPa olan ultra yüksek dayanımlı betondur [17]. RPB 200 betonuna ait örnek karışım değeri Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2: RPB 200’ün tipik bileşimi [17].

Portland Çimentosu Tip V	955 kg/m ³
İnce Kum (150-400 mikron)	1051 kg/m ³
Silis Dumanı (18 m ² /g)	229 kg/m ³
Silika (35m ² /g)	10 kg/m ³
Süper akışkanlaştırıcı	13 kg/m ³
Çelik tel	191 kg/m ³
Toplam su	153 kg/m ³

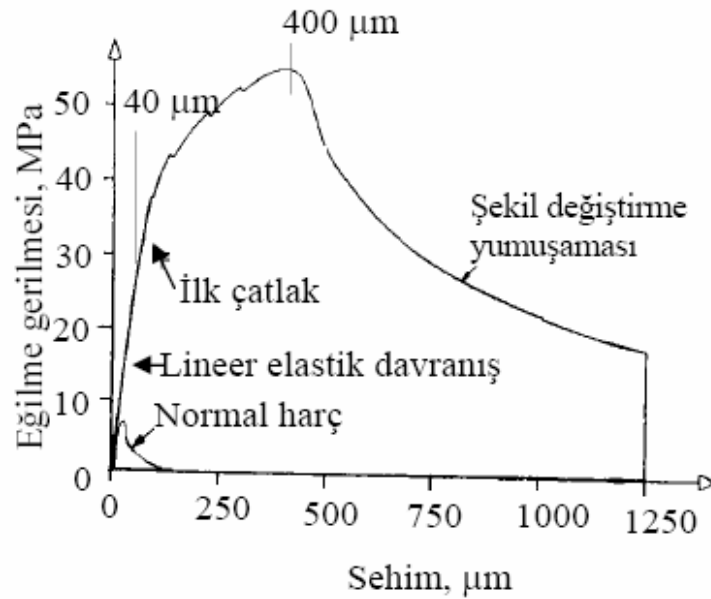
RPB 200’ün üretiminde 12,5 mm uzunluğunda ve 180 mikron çapında düz ve pürüzsüz yüzeyli çelik lifler kullanılmıştır. Su/çimento oranı çok düşük olmasına rağmen süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile normal beton gibi karıştırılabilir, yerleştirilebilir, vibrasyona tabi tutulabilir [17]. RPB 200’ün mekanik özellikleri Tablo 2.3’de özetlenmiştir.

Tablo 2.3: RPB 200'ün mekanik özellikleri [17].

Basınç dayanımı	170 MPa – 230 MPa
Eğilme dayanımı	30 MPa – 60 MPa
Kırılma enerjisi	20 000 J/m ² – 40 000 J/m ²
Nihai çekme şekil değiştirmesi	5000x10 ⁻⁶ – 7000x10 ⁻⁶
Elastisite modülü	54 GPa – 60 GPa

28 gün normal koşullar altında kür edilmiş betonlarda en düşük 170 MPa basınç dayanımı elde edilirken, normal kür koşullarına ek olarak 2 gün 80- 90°C sıcaklıkta kür edilen betonlarda 230 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisindeki değişim kullanılan lif yüzdesi ile değişmektedir [17].

Kırılma enerjisi, “gerilme-açıklığın ortasındaki sehim” eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Şekil 2.2, normal bir harç ile RPB 200'ün basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi RPB 200 ilk çatlak yükünün iki katı mertebesinde eğilme dayanımına sahiptir, bu durum yüksek performanslı lif donatılı betonlarda şekil değiştirme sertleşmesi ile açıklanabilir. Maksimum gerilmedeki deplasman ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha fazladır. Ölçülen kırılma enerjisi RPB 200 için 30000 J/m² iken normal harç için 110 J/m²'dir [17].



Şekil 2.2: Normal harç ve lif donatılı RPB 200'ün eğilme davranışını [17].

RPB 800'e ait bileşim miktarları ve mekanik özellikler Tablo 2.4 ve Tablo 2.5'de verilmektedir. Bu tip reaktif pudra betonu sadece küçük ve orta büyüklükteki prefabrike elemanlarda kullanılmaktadır. Beton bileşenleri RPB 200 ile aynı olup, RPB 200'deki çelik lifler, uzunluğu 3mm'den küçük paslanmaz mikroçelik lifler ile değiştirilmiştir. Ayrıca RPB 800'de yüksek dayanım elde etmek için, kür sıcaklığı artırılırken, aynı zamanda kür boyunca basınç uygulanmıştır [17].

Tablo 2.4: RPB 800'ün tipik bileşimi [17].

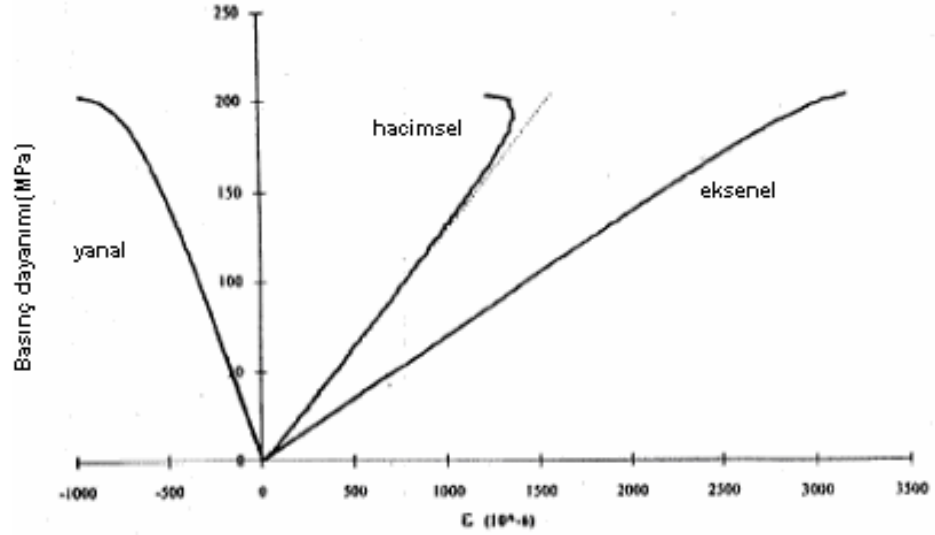
Portland Çimentosu Tip V	1000 kg/m ³
İnce Kum (150-400 mikron)	500 kg/m ³
Öğütülmüş kuvars (4 mikron)	390 kg/m ³
Silis Dumanı (18 m ² /g)	230 kg/m ³
Süper akışkanlaştırıcı	18 kg/m ³
Çelik tel	630 kg/m ³
Toplam su	180 kg/m ³

Tablo 2.5: RPB 800'ün mekanik özellikleri [17].

Basınç dayanımı	490 MPa – 680 MPa
Eğilme dayanımı	45 MPa – 141 MPa
Kırılma enerjisi	1200 J/m ² – 2000 J/m ²
Elastisite modülü	65 GPa – 75 GPa

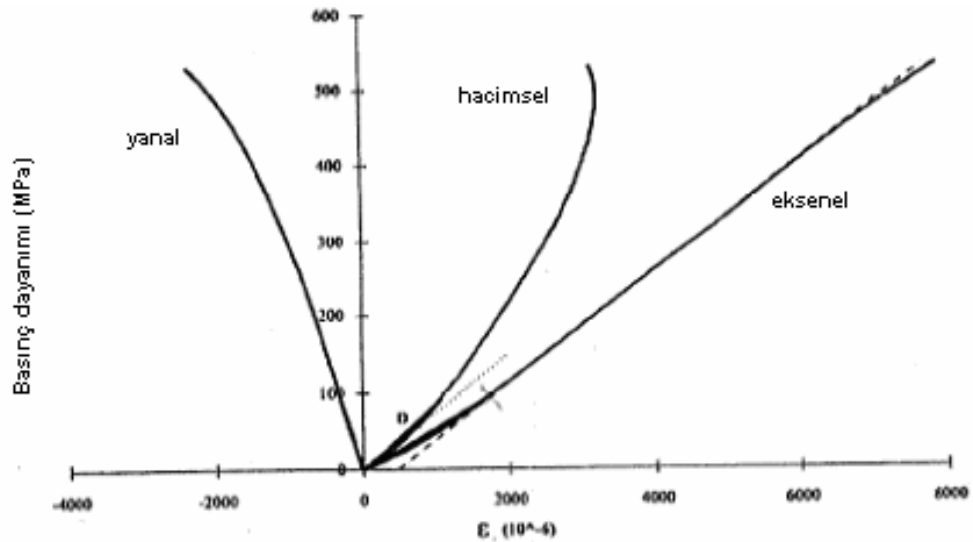
Betona yerleştirme aşamasında basınç uygulanması hava kabarcıklarının ve suyun betondan atılmasına, dolayısıyla malzemenin yoğunluğunun %5 ~ %6 oranında artmasına sebep olur. RPB 800'e uygulanan yüksek sıcaklık kürü, serbest suyun tamamını ve bağlanmış suyun da bir kısmını betondan uzaklaştırır ve amorf yapıdaki hidratasyon ürünleri kristal yapıya dönüşür [18].

RPB 200 ve RPB 800 eksenel basınç altında farklı davranış gösterir. RPB 200'e ait gerilme-şekli değiştirme eğrisi Şekil 2.3'de verilmiştir. RPB 200 eğrisinin lineer elastik kısmından elde edilen elastisite modülü 64 GPa ve Poisson oranı 0,22'dir. Beton dayanımının %60'ına kadar elastik davranış gözlenmektedir [18].



Şekil 2.3: Tek eksenli basınç altında RPB 200'ün gerilme-şekil değiştirme eğrisi [18]

RPB 800'e ait gerilme-şekli değiştirme eğrisi Şekil 2.4'de verilmiştir. RPB 800 lineer elastik davranış göstermekle birlikte, düşük yükler altında pekleşen elastik davranış sergilemektedir. Elastisite modülü 32 GPa'dan 71 GPa'a kadar artar. Beton dayanımının %5'i ile %10'una ulaştıktan sonra lineer elastik davranış gösterir ve bu sınıra kadar Poisson oranında 0,19'dan 0,28'e kadar artış gözlenir. Beton dayanımının yaklaşık olarak %85'ine ulaşıldığında, elastisite modülünde azalmaya yol açan hasar meydana gelir. İlk çatlaktan sonra malzemenin pekleşen bir davranış sergilemesi yüksek performansın bir ölçüsü sayılmaktadır [18].

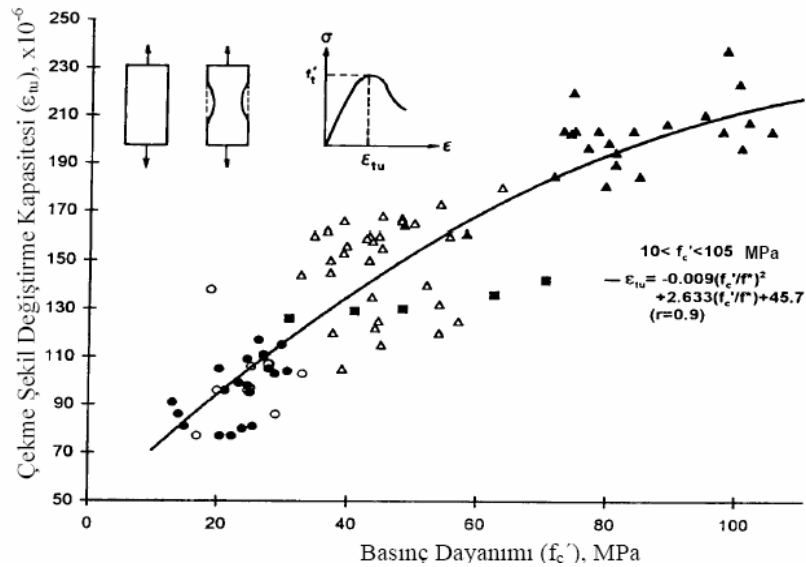


Şekil 2.4: Tek eksenli basınç altında RPB 800'ün gerilme-şekil değiştirme eğrisi [18]

Reaktif Pudra Betonları'nda farklı yükleme şartları altında (basınç, çekme, eğilme, burulma halleri) dayanımının artması ile birlikte tepe noktasındaki şekil değiştirmenin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum Tablo 2.6'da özetlenmektedir. Çekme şekil değiştirme kapasitesi, bir malzemenin çatlamaksızın deformasyon yapabilme yeteneği olarak tanımlanmış olup, servis yükleri altında çatlama riskini azaltmak için esas teşkil eder. Şekil 2.5'te çekme şekil değiştirme kapasitesinin, basınç dayanımının artması ile arttığı gözlemlenmektedir [3].

Tablo 2.6: Tek eksenli basınç, tek eksenli çekme, eğilme ve burulma hallerinde basınç dayanımı – en yüksek gerilmedeki şekil değiştirme ilişkisi [3].

Yükleme durumu	Şekil değiştirme kapasitesi (10^{-6}) - basınç dayanımı (MPa) ilişkisi	Basınç dayanımı aralığı (MPa)	Korelasyon katsayısı
Tek eksenli basınç	$\varepsilon_{cu} = -0,009(f'_c / f^*)^2 + 2,633(f'_c / f^*) + 45,7$	6-110	0,75
Tek eksenli çekme	$\varepsilon_{tu} = -0,067(f'_c / f^*)^2 + 29,9(f'_c / f^*) + 1053$	10-105	0,90
Eğilme	$\varepsilon_{fu} = -0,0007(f'_c / f^*)^2 + 1,825(f'_c / f^*) + 67,7$	5-85	0,84
Burulma	$f_{su} = -0,0005(f'_c / f^*)^2 + 1,05(f'_c / f^*) + 245,6$	37-110	0,97



Şekil 2.5: Çekme şekil değiştirme kapasitesi – basınç dayanımı ilişkisi [3].

Boşluksuz yapısı ile üstün fiziksel özelliklere sahip bu betonlar öngermeli elemanlarda, bina kolonlarında, endüstriyel zeminlerde, ince döşemelerde, köprülerde, sismik birleşim noktalarında, aşınmaya, darbeye ve patlamaya dayanıklı yerlerde, yangın ve güvenlik kapılarında, sığınaklarda, atık depolarında, öngermeli ankrajlarda kullanılmaktadır [10].

2.3. Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörler

2.3.1. Mikroyapının iyileştirilmesinin beton özelliklerine etkisi

Çimento taneleri ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halka olarak tanımlanır. Bunun nedenleri şöyle özetlenebilir:

- Taze betonun terlemesinden dolayı iri agrega taneleri altında toplanan su, hamur ile agrega arayüzey bölgesindeki su/çimento oranının yükselmesine ve bu yüzeyde sürekli fazdakinden daha yüksek porozitenin oluşmasına neden olur,
- Çeper etkisinden dolayı iri agrega yüzeyi boyunca katı taneler daha gevşek bir düzen içinde yer alır, sonuç olarak hamurun boşluk oranı artar,
- Çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 kristalleri arayüzey bölgesinde daha fazladır. Bu kristallerin çimento hamurundaki başlıca bağlayıcı madde olan ve hidrasyon sonucu meydana gelen (C-S-H) jellerine oranla bağlayıcı özellikleri oldukça azdır. Kristal tanelerinin boyunun büyümesi, toplam yüzeyin küçülmesi ile birlikte van der Waals kuvvetlerinin de zayıflamasına neden olur [19].

Betonun dayanım ve dayanıklılığı büyük ölçüde matrise ve matris - agrega arayüzey özelliklerine bağlıdır. Matrisin boşluksuz bir yapıya sahip olması ve arayüzey bölgesinin aderansının kuvvetli olması mikroyapının iyileştirilmesi ile gerçekleşir. Bu durum düşük su/çimento oranı, silis dumanı kullanımı ve ısıtma işlemi uygulanarak gerçekleştirilebilir.

2.3.1.1. Silis dumanının puzolanik özeliğinin mikroyapıya etkisi

Silis dumanı, yüksek saflıktaki kuvarsitin, silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımları üretmek amacıyla elektrik ark fırınlarında kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu oluşan çok ince taneli tozdur. Silis dumanındaki SiO_2 miktarı, alaşımdaki silisyum içeriğine bağlıdır. Alaşım türüne göre silis dumanındaki SiO_2 miktarları Tablo 2.7’de özetlenmiştir [19].

Tablo 2.7: Alaşım türüne göre silis dumanındaki SiO₂ miktarları [19].

Alaşım türü	Silis dumanındaki SiO ₂ (%)
%50 Ferrosilisyum	61 - 84
%75 Ferrosilisyum	84 - 91
Metal silisyum	87 - 98

Pratikte kullanılan silis dumanları genellikle %75 ve fazla oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmektedir [19].

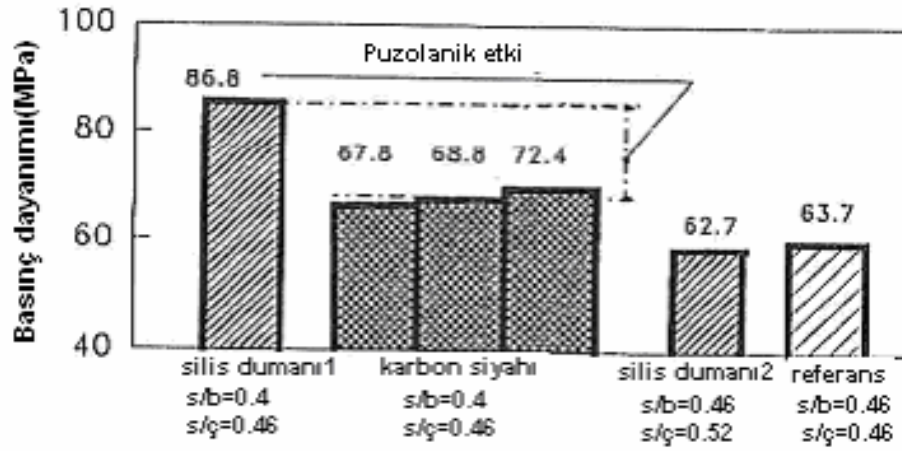
Silis dumanının başlıca özellikleri:

- Yüksek SiO₂ içeriği,
- Amorf yapısı,
- 0,1-0,2µ tane büyüklüğü ve
- Küresel tane şeklidir [6].

Silis dumanı gibi ultra incelikteki tanelerin kullanımı, yoğunluğun artırılması, dolayısıyla boşlukların azaltılması, taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için önemlidir [13]. Silis dumanı çimento hamurunda arayüzeyde biriken Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek, bağlayıcılık özelliğine sahip C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrate) jellerini meydana getirir. Bu pozolanik jel normal olarak oluşan (C-S-H) jellerinin boşluklarında oluşmakta ve jelin yoğunluğunu arttırmaktadır. Silis dumanının bu özelliğine pozolanik özellik denir. Beton karışımındaki SD/Ca(OH)₂ oranı Ca(OH)₂ tüketim miktarını ve tüketim süresini etkilemektedir. Ayrıca silis dumanlarında düşük alkali ve yüksek silis miktarları pozolanik aktiviteyi arttırmaktadır [19].

Goldman ve Bentur [20] yaptıkları deneysel çalışmalarda, bağlayıcı malzeme olarak kullanılan silis dumanı ve karbon siyahının beton dayanımına olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda aynı su/çimento (s/ç = 0,46) oranına sahip karbon siyahı kullanılan ve kullanılmayan çimento hamurlarının dayanımlarının aynı olduğu tespit edilmiş, buna karşılık silis dumanı kullanılan çimento hamuru ile kullanılmayan çimento hamuru arasında büyük oranda dayanım farkı gözlenmiştir. Bu durumun silis dumanının pozolanik özellik göstermesinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.6'da özetlenmiştir. Silis dumanı kullanılarak üretilen diğer bileşimde ise, dayanımın referans hamura

göre daha düşük olmasını, su/çimento oranının yüksek olmasından ($s/\ç = 0,52$) kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.6: Karbon siyahı ve silis dumanı kullanılan çimento hamurlarının dayanımlarının karşılaştırılması [20].

Temiz ve Karakeçi [21] yaptıkları deneysel çalışmada, hidrasyon ürünü olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in silis dumanı ve uçucu kül kullanılması ile tüketildiğini ve bağlayıcı C-S-H jelinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Puzolanik katkı içermeyen numunelerde iri portlandit kristalleri ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) oluşurken, silis dumanı ve uçucu kül içeren numunelerde ise bu kristallerin miktarı zamana bağlı olarak azalmıştır.

Puzolanik aktivite ile birlikte arayüzey bölgesindeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerinin küçülmesi bölgedeki gözenekliliğin azalmasına, hamurun içyapısının daha homojen bir hale gelmesine ve beton mukavemetinin artmasına neden olur [19].

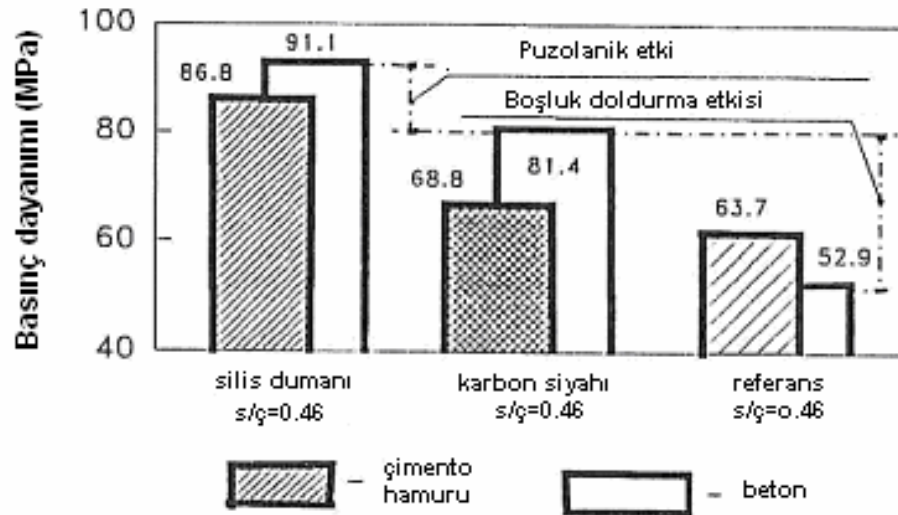
2.3.1.2. Silis dumanının boşluk doldurma özeliğinin mikroyapıya etkisi

Çok ince tane yapısına sahip olan silis dumanının özgül yüzeyi oldukça büyüktür. Tipik bir silis dumanı örneğinde tane çapının $1\mu\text{m}$ 'den küçük ve ortalama tane boyutunun $0,1\mu\text{m}$ civarında olduğu gözlenmiştir. Silis dumanının özgül yüzeyinin diğer puzolanik malzemeler ve çimento ile karşılaştırılması Tablo 2.8'de verilmektedir [19]. Silis dumanının özgül yüzeyinin yaklaşık olarak çimentonun 50 katı olduğu görülmektedir. Çok ince tane yapısına sahip silis dumanı çimento ile agrega arayüzeyindeki boşlukları doldurarak yüksek dayanımlı bir matris oluşturur.

Tablo 2.8: Silis dumanının özgül yüzeyinin çimento ve puzolanik malzemelerle karşılaştırılması [19].

Malzeme	Metod	Özgül yüzey (m ² /kg)
Portland çimentosu	Blaine	300 - 400
Uçucu kül	Blaine	400 - 700
Granüle Y.F cürufu	Blaine	350 - 600
Silis dumanı	Azot	13 000 - 20 000

Bentur ve Goldman [20], çalışmalarında boşluk doldurma özeliğinin beton dayanımına etkisini araştırmak için bağlayıcı malzeme olarak karbon siyahı ve silis dumanı kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda aynı su/çimento ($s/\ç = 0,46$) oranına sahip karbon siyahı kullanılan ve kullanılmayan çimento hamurlarının dayanımlarının yaklaşık olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık aynı su/çimento oranına sahip karbon siyahı kullanılan betonların dayanımının, kullanılmayanlara göre çok daha fazla olduğu ve bu dayanım artımının tane inceliği arttıkça arttığı görülmüştür. Bu durum, karbon siyahının çimento hamuru ile agrega arayüzündeki boşlukları doldurarak, aradaki bağı güçlendirmesinden kaynaklanmaktadır. Aynı çalışmayı bağlayıcı malzeme olarak silis dumanı kullanarak yapmışlar ve silis dumanının boşluk doldurma etkisinin puzolanik özeliğe göre beton dayanımını arttırmada daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Deney sonuçları Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Silis dumanının ve karbon siyahının puzolanik ve boşlukları doldurma etkisi [20].

Bağlayıcı malzeme olarak karbon siyahı ve silis dumanı kullanılan betonlarda beton dayanımının, çimento hamuru dayanımından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum silis dumanı ve karbon siyahının geçiş bölgesindeki boşlukları doldurarak agrega ile matrisin kenetlendiği sıkı bir yapı oluşturmamasından ve dolayısı ile agreganın da beton dayanımına katkıda bulunmasından kaynaklanmaktadır. Normal betonlarda ise agrega ile matris arayüzeyinin kusurlu yapısından dolayı beton dayanımı matris dayanımından daha düşüktür [20].

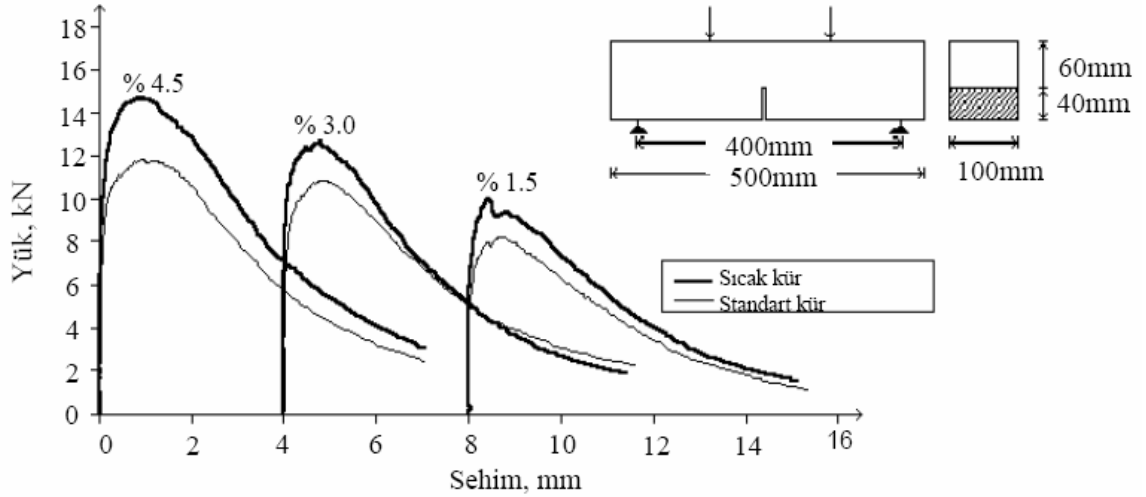
2.3.1.3. Isıl işlem uygulanmasının mikroyapıya etkisi

Yüksek performanslı betonlarda ısı işlem uygulaması, silis dumanı ile birlikte agrega- matris arayüzeyini kuvvetlendiren C-S-H jelinin oluşmasında etkili olarak, mikroyapının iyileştirilmesinde aktif rol oynar. Betona ısı işlem uygulanması malzemenin birçok özeliğini değiştirebilir. Betona ısı işlem uygulanmasının nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

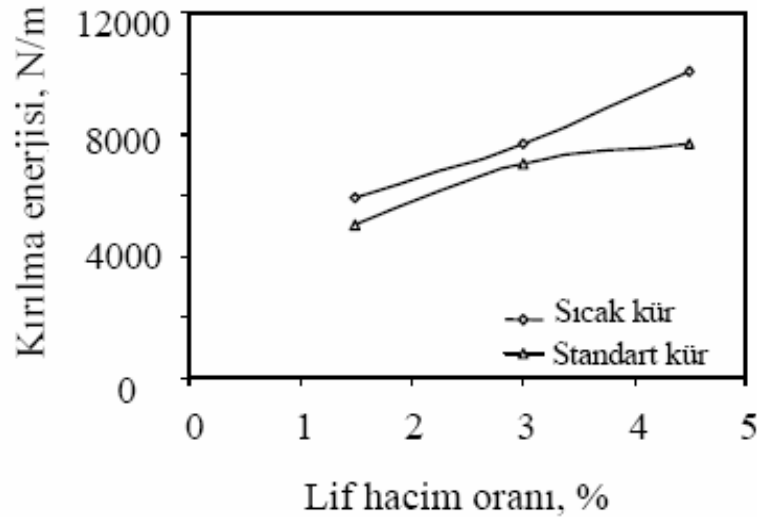
1. Çimento hidratasyonu yüksek sıcaklıklarda hızlanır, beton daha erken dayanım kazanır.
2. Isıl işlemlerle birlikte çimento hamurunun içyapısı kararlı hale gelir ve sonuç olarak beton daha az rötre yapar.
3. Silisli agrega içerisindeki kuvars yüksek sıcaklıkta aktive olarak betonda serbest halde bulunan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girer ve bağlayıcı özeliği yüksek olan Kalsiyum Silikat Hidrate'yi (C-S-H) oluşturur.
4. Serbest kireç miktarının azaltılması ile mikro yapı iyileşir, dolayısıyla ısı işlem betonun durabilitesini olumlu yönde etkiler [22].

Özyurt [6], sıcak su kürünün yüksek performanslı çelik lif takviyeli betonların mekanik özelliklerine etkisini araştırmak üzere yaptığı çalışmada iki farklı kür rejimi uygulamıştır. Normal kür uygulanan numuneler 28 gün boyunca sürekli olarak 20°C' de kirece doymuş su içine bekletilmiştir. Sıcak su kürü uygulanan numuneler ise ilk 7 gün 20°C' de kirece doymuş su içinde tutulmuş ardından 2 gün 90°C sıcaklıkta kirece doymuş su içerisinde bekletilmiş ve daha sonra tekrar 20°C' de kirece doymuş su içine alınarak burada 13 gün daha bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ısı işlem uygulamasının numunelerin kırılma enerjisini %10-%30, net eğilme dayanımlarını %20-%40 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. Numunelerin silindir basınç

dayanımlarında belirgin bir değişiklik olmamıştır. Net eğilme dayanımı ve kırılma enerjisindeki artış silis dumanı veya ince öğütülmüş silis kumundaki kuvarsın ısıtılma işlemiyle aktif hale gelmesiyle mikro yapının iyileşmesine bağlanmıştır. Aktif hale gelen kuvars kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek çimento ile agrega arayüzeyinin aderansını güçlendirmiştir. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9 sıcak kür rejiminin açıklık ortasındaki yük-sehim eğrisine ve kırılma enerjisine etkisini göstermektedir.



Şekil 2.8: Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerinde yük-sehim eğrisi [6].

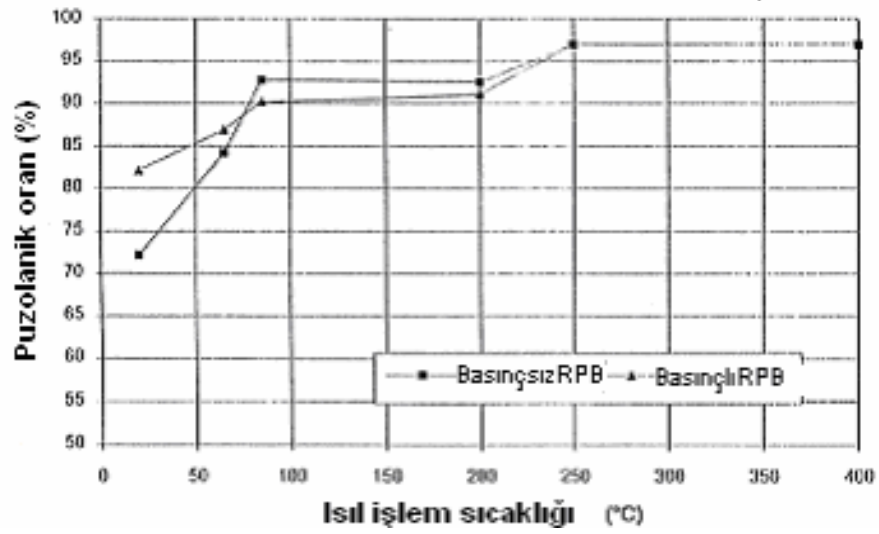


Şekil 2.9: Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerinde kırılma enerjisi çelik lif hacim oranı ilişkisi [6].

Cheyrezy, Maret ve Frouin [4], sıcaklık kürünün RPB'nin mikro yapısına etkilerini araştırmışlardır. 20°C, 90°C, 200°C, 250°C' de kür edilmiş, yerleştirme sırasında basınç uygulanmış veya uygulanmamış numuneler üzerine yaptıkları deneyler

sonucunda yüksek sıcaklığın bağlanmış su yüzdesini arttırdığını, hatta 400°C’ de beton içinde serbest suyun kalmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, betona yerleştirilmesi sırasında basınç uygulanmasının bağlanmış su oranına katkısının kayda değer olmadığını saptamışlardır. Betona zarar veren zararlı maddelerin serbest su ile taşındığı göz önüne alınırsa, serbest suyun bağlanması betonun durabilitesinin artırılması için büyük önem teşkil eder.

Puzolanik oranın kür koşullarına bağlı olarak gelişimi Şekil 2.10’da verilmektedir. Puzolanik reaksiyonun kür sıcaklığı ile önemli ölçüde arttığı, fakat uygulanan basıncın reaksiyona etkisinin az olduğu saptanmıştır [4].



Şekil 2.10: Puzolanik oran – ısıl kür sıcaklığı [4].

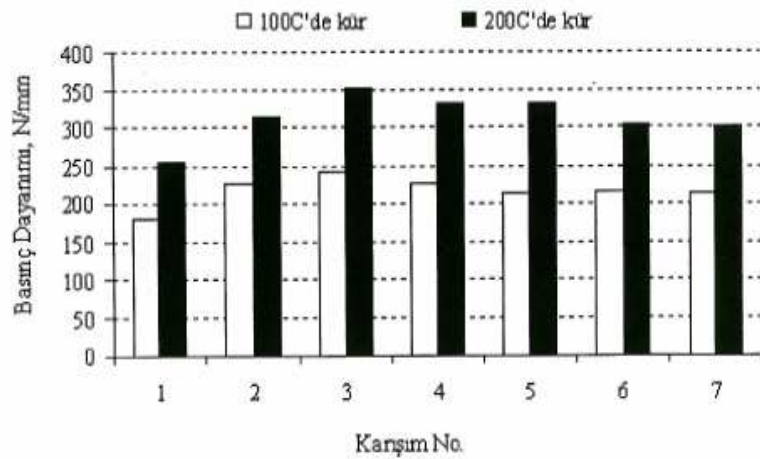
Ayrıca çalışmalarında 20°C’ de kür edilen betonlarda Ca(OH)_2 mevcut olup, 200°C ve üstü sıcaklıklarda Ca(OH)_2 ’ye rastlanmamaktadır. X ışını difraksiyonu deneylerinden elde edilen verilere göre sadece 250°C ve 400°C sıcaklıklarda zonolit oluşumu gözlemlenmiştir. Bu deneysel çalışmalar ışığında uygulanan ısıl kürün betonda serbest su miktarını azalttığı ve 250°C’ nin üzerindeki sıcaklıklarda zonolit oluşumunu tetiklediği yargısına varılabilir [4].

Reda ve diğerleri [23], betonda ısıl kür işleminin mikroyapıya etkisini araştırmak için 2 farklı kür rejimi uygulamışlardır. Birinci kür rejiminde numuneler 50 °C sıcak suda, ikinci kür rejimin de ise 200 °C etüvde ısıl işleme tabii tutulmuşlardır. Çalışmalarda yüksek oranda çimento ve çimentonun %30’u mertebesinde de silis dumanı, agrega olarak silis unu, kalsine boksit ve kireç taşı kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre kür sıcaklığının 200°C’ye çıkarılması 7 günlük basınç dayanımını

%33, 28 günlük basınç dayanımını ise %27 oranında artırmıştır. Reda ve diğerleri, silisli malzeme bakımından zengin olan numunelere ısıtılma işleminin uygulanmasının pozolanik reaksiyonla birlikte basınç dayanımını artırdığını savunmuşlardır. X ışını difraksiyonu ile elde edilen bilgiler doğrultusunda sadece iri agrega olarak kireç taşı kullanılan ve 50°C’de ısıtılma işlemi gören numunelerde Ca(OH)_2 kristallerine rastlanırken, 200°C’de ısıtılma işlemi görmüş numunelerde ise bu kristallerin ortadan kalkarak C-S-H jellerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Kocatürk ve arkadaşları [24] yaptıkları çalışmalarda, silis içeriği yüksek silis dumanı kullanarak, su/bağlayıcı oranını minimum düzeye indirerek (yaklaşık 0,15), etkili bir hiperakışkanlaştırıcı kullanarak ve çelik tel miktarını yüksek tutarak reaktif pudra betonu üretimini amaçlamışlardır. Numuneler yüksek ısı kürüne tabi tutularak sıcaklığın yüksek dayanım elde etmedeki rolü araştırılmıştır. Deneysel çalışmada kısa kesilmiş yüksek dayanımlı tel, narinliği 55 ve narinliği 80 olan kancalı uçlu çelik tel olmak üzere 3 tip lif kullanılmıştır. RPB’lerin üretimindeki karışım oranları şöyledir: çimento: silis unu: kum: silis dumanı: süperakışkanlaştırıcı: su: renklendirici: kısa kesilmiş yüksek dayanımlı tel: kancalı uçlu çelik tel (narinlik: 55): kancalı uçlu çelik tel (narinlik: 80) = 1: 0,34: 0,227: 0,25: 0,125: 0,12: 0,03: 0,6: 0,143: 0,097’dir.

Şekil 2.11’de bileşimleri yukarıda verilmiş olan numunelerin küp basınç dayanımları gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, kür sıcaklığının beton dayanımına etkisinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. 200°C kür uygulanan kompozit malzemede basınç dayanımının yaklaşık 350 MPa değerine ulaşması ince toz malzemelerin pozolanik reaksiyona girdiğinin göstergesidir [24].



Şekil 2.11: Uygulanan kür işleminin basınç dayanımına etkisi [24].

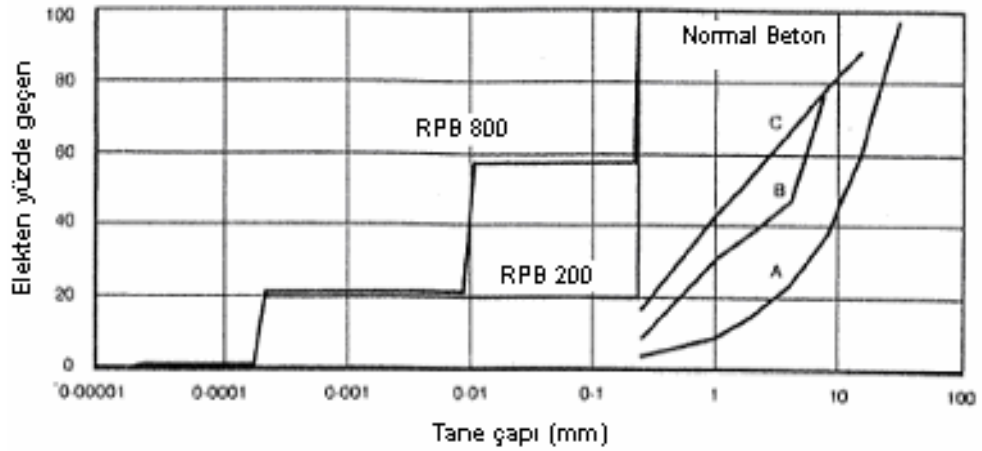
2.3.2. Bağlı yoğunluğun arttırılmasının beton özelliklerine etkisi

Ultra yüksek dayanımlı betonlarda bağlı yoğunluğun arttırılması yüksek dayanım ve yüksek performans için zorunlu koşuldur. Bağlı yoğunluğun yüksek olması boşluk oranı az, geçirimsiz ve dayanımı yüksek, kusurları azaltılmış beton demektir. Reaktif pudra betonlarında bağlı yoğunluk, granülometrinin hassas biçimde ayarlanması, su/çimento oranının düşürülmesi, silis dumanının boşluk doldurma özeliğinden faydalanılarak arttırılmaktadır.

2.3.2.1. Granülometrinin bağlı yoğunluğa etkisi

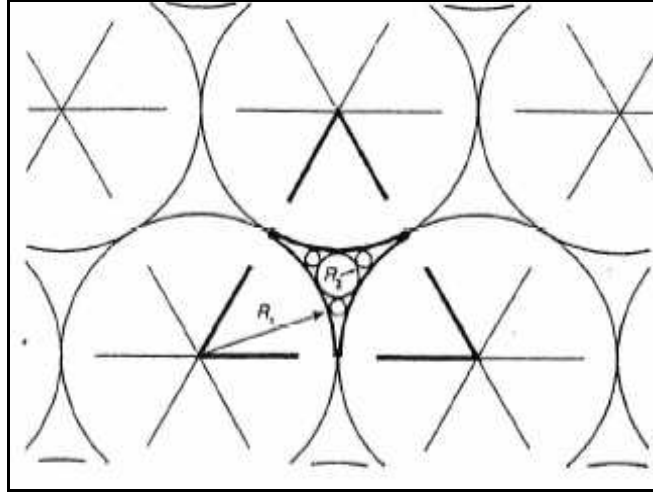
Reaktif pudra betonlarının içyapısına yönelik olarak maksimum yoğunluğu sağlamak için, karışımdaki tüm tanelerin boyut dağılımı hassas biçimde optimize edilmelidir. Bunun için, RPB'nin granülometri eğrisi süreksiz olmalıdır [3].

Şekil 2.12 RPB ve normal dayanımlı (A,B,C eğrileri) betonların granülometri eğrilerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi RPB'nin granülometri eğrisi süreksizdir [25].



Şekil 2.12: Normal beton ile RPB'nin granülometri eğrileri [25].

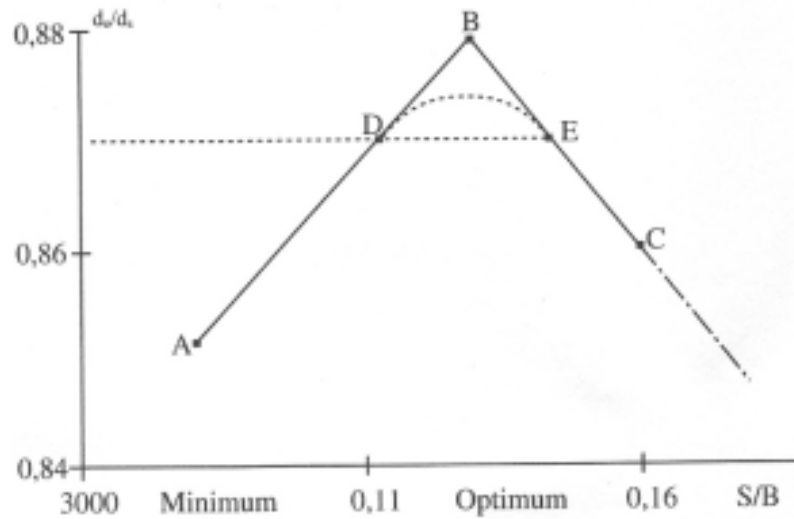
Teorik çalışmalar sonucunda, reaktif pudra betonunda kullanılan agregaların birbirine teğet tane çapları oranı 7 olduğunda maksimum bağlı yoğunluğa erişildiği tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 2.13'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Teorik maksimum tane yoğunluğu [25]

2.3.2.2. Su/Bağlayıcı oranının bağıl yoğunluğa etkisi

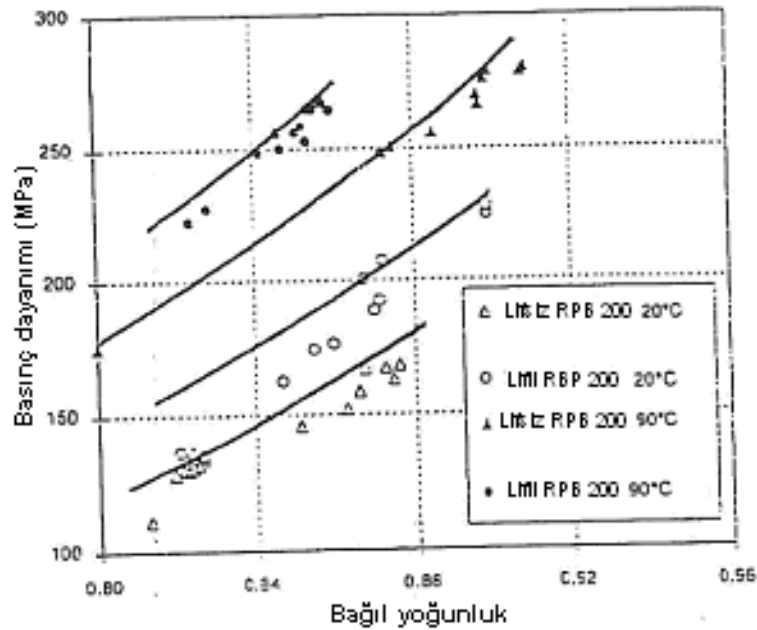
Reaktif pudra betonlarında su/çimento oranı çok düşük olup, 0,15 mertebesinde dir. Su/çimento oranının düşük olması tüm çimento tanelerinin hidrate olmasını engeller. Hidrate olmamış çimento taneleri RPB’de kullanılan agrega boyutuna yakın olduğundan beton dayanımına katkıda bulunurlar. Su/çimento oranının azalması ile çimento hamurundaki ortalama boşluk çapı küçülür, toplam boşluk miktarı azalır [3].



Şekil 2.14: Bağıl yoğunluk-su/bağlayıcı (s/b) ilişkisi [11].

Reaktif Pudra Betonunda maksimum yoğunluğu elde etmek için Şekil 2.14’te gösterildiği gibi optimum su/bağlayıcı oranı belirlenmelidir. Optimum su içeriği bağıl yoğunluk parametresi (d_0/d_s) ile elde edilir. d_s sıkıştırılmış olduğu varsayılan taneli karışımın katı yoğunluğunu, d_0 ise kalıp alınması aşamasındaki beton yoğunluğunu göstermektedir. A noktası su/bağlayıcı oranının minimum olduğu

değerdeki bağıl yoğunluğu göstermektedir. Su/bağlayıcı oranı arttıkça ilave su, boşluklardaki hava ile yer değiştirir. B noktasında malzemedeki hava boşluklarının tamamı su ile dolmuş durumdadır. Bu noktadan sonra su miktarının artması ile malzeme hacmi de artacağından bağıl yoğunluk düşmektedir. Şekil 2.14'ten görüldüğü gibi aynı bağıl yoğunluğu sağlayan iki farklı su/bağlayıcı oranı mevcuttur. E ve D noktası optimum sonuçlar veren noktalar olup, E noktası D noktasına göre daha iyi bir mekanik performansa sahiptir. Çünkü E noktasında, numune daha az hava, ancak hidrasyon sonrası kısmen katı fazla entegre olacak olan daha fazla su içermektedir. Ayrıca E noktasında su/çimento oranının fazla olması nedeniyle işlenebilirlik artmakta ve daha iyi reolojik özellikler elde edilmektedir. Bağıl yoğunluk karışımın granülometrisine, su içeriğine ve vibrasyon özelliklerine bağlı olarak değişir. Bağıl yoğunluğun basınç dayanımına etkisi Şekil 2.15'de gösterilmektedir [11].



Şekil 2.15: RPB'nin basınç dayanımı - bağıl yoğunluk ilişkisi [11].

Long ve diğerleri [26], ince malzeme olarak uçucu kül ve silis dumanı kullandıkları karışımlarda, su/çimento oranının 0,22'den 0,14'e düşmesi ile bağıl yoğunluğun %12,5 arttığını gözlemlemişlerdir. Su miktarının azalması taneler arası mesafeyi kısaltarak, çimento hamurunun porozitesini düşürür. Böylece karışımın bağıl yoğunluğu artar.

2.3.2.3. Silis dumanının bağıl yoğunluğa etkisi

Long ve diğerleri [26], ultra incelikteki malzemelerin bağıl yoğunluğa olan etkilerini inceledikleri çalışmada silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Tüm hamurlarda su/bağlayıcı oranı 0,22'dir. Bağlayıcı olarak çimento, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının ortalama çapları sırasıyla 5,8µm, 6,5µm, 0,2µm olarak verilmektedir. Yapılan çalışmada çimento hamurunun bağıl yoğunluğunun ince malzeme miktarı arttıkça arttığı ve silis dumanının bağıl yoğunluğu arttırmada en etkili malzeme olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki nedenlere bağlanabilir:

1. Taze çimento hamurunda çimento taneleri arası boşluklar su ve hava ile doludur. Karışıma eklenen ultra incelikteki malzemeler, boşluklardaki suyun yerini alarak çimento hamurundaki boşlukları azaltırlar,
2. Silis dumanının ortalama tane çapı, yüksek fırın cürufu ve uçucu külden daha küçük olduğundan boşlukları doldurma etkisi daha fazladır,
3. Silis dumanının özgül ağırlığı yüksek fırın cürufu ve uçucu külün özgül ağırlıklarından daha az olduğu için, aynı ağırlıkta hacmi daha fazladır.

Ultra incelikteki malzemeler boşluksuz bir yapı sağlayarak bağıl yoğunluğu dolayısıyla beton dayanımını arttıırırlar.

2.3.2.4. Basınç uygulanmasının bağıl yoğunluğa etkisi

Betona basınç uygulanması bağıl yoğunluğu arttırmada etkili bir yöntemdir. Bu yöntem uygulama süresi ve metoduna bağlı olarak farklı sonuçlar doğurmaktadır. Taze betona kısa bir süre basınç uygulanması ile boşluklarda hapsolmuş havanın azalması veya tamamen yok olması sağlanır. Taze betona birkaç dakika basınç uygulanması ile fazla suyun kalıp boşluklarından atılması sağlanır. Bu durumun oluşması için kalıplar tamamen su geçirimsiz olmamalı, su ile birlikte ince malzemenin de dışarıya çıkmaması için, kalıp boşlukları küçük olmalıdır. Düşük su/bağlayıcı oranına sahip reaktif pudra betonuna basınç uygulanması ile karışım suyunun bir kısmı dışarıya atılarak, bağıl yoğunluk %2 oranında artar. Priz sırasında betona uzun süreli basınç uygulanması rötre sonucu artan poroziteyi (6-12 saat) ortadan kaldırır. Hapsolmuş havanın ve suyun boşluklardan atılması ve rötre sonucu

oluşan boşlukların ortadan kalkması ile bağıl yoğunluk %6 oranında artmaktadır [11].

Bonneau ve diğerleri [1], basınç uygulanmasının, RPB'nin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, basınç uygulanan numunelerde, diğer numunelere göre daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu durum basınç uygulanmasının boşluk suyunu betondan uzaklaştırarak, bağıl yoğunluğu arttırmasına bağlanmıştır.

Reda ve diğerleri [23], basınç uygulanması ile beton dayanımında ve betonun bağıl yoğunluğunda meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Bu amaçla yapılan çalışmada, 40MPa basınç uygulanan numunelerde dayanımda %33 oranında artış meydana gelmiştir. Bu durum su/çimento oranının düşmesi ve matris bağıl yoğunluğunun artması ile açıklanmıştır. Ayrıca porozitenin düşmesi kalsiyum hidroksit kristallerinin olduğu boşlukları kısıtlayarak daha homojen bir yapı sağlayacaktır.

2.3.3. Çelik liflerin beton özelliklerine etkisi

Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitler çok gevrek malzemeler olup, yüksek performansın elde edilebilmesi için sünekliğin, dolayısıyla kırılma enerjisinin artırılması gerekir. Bu sebeple gevrek bir malzeme olan betona çelik lif ilavesi ile normal betona kıyasla daha sünek ve çekme dayanımı daha yüksek olan üstün nitelikli malzemeler üretilebilir.

Çelik lif içeren kompozit malzemeler matris ve lif özelliklerine bağlı olarak 2 sınıfta toplanabilir:

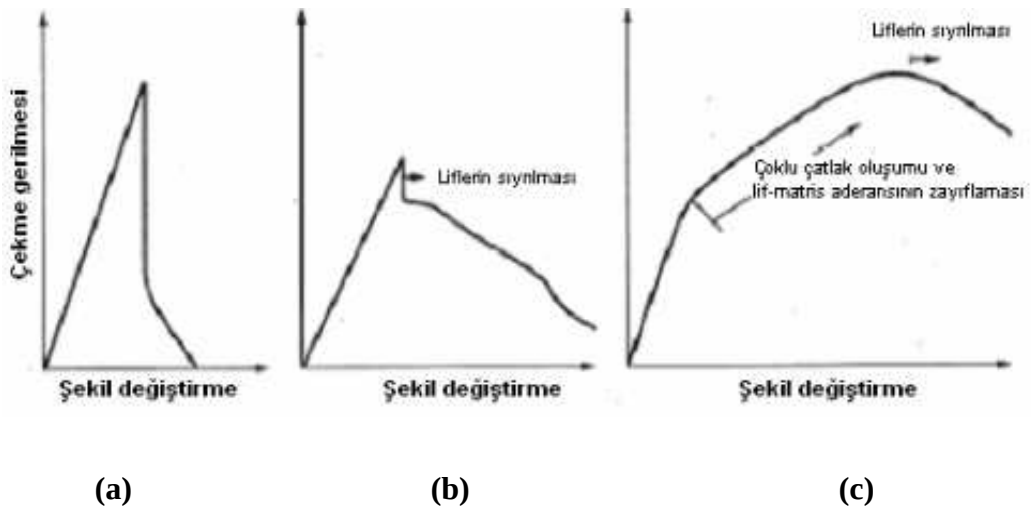
- Sünek matris – güçlü, gevrek lif: Bu tip kompozit malzemeye örnek olarak camyünü (epoksi matris + cam lifi) verilebilir. Yüksek dayanımlı lifler, yüksek hacim oranında (%40'a kadar) sünek matris içerisinde kullanılırlar. Liflerin yüzey alanının büyük olması lif ile matris arasında mükemmel bir bağ oluşturur. Sonuç olarak liflere göre daha sünek, matrise göre dayanımı daha yüksek malzeme oluşur. Sünek matrisin göçme şekil değiştirmesinin, liflerin şekil değiştirmesinden daha büyük olması liflerin tüm potansiyel enerjilerinin kullanılmasını sağlar.
- Güçlü lif - gevrek matris: Güçlü lifleri zayıf – gevrek matris içinde kullanmanın ana amacı matrisin sünekliğini arttırmaktır. Bu tip kompozitlerde genel olarak lif

oranı düşüktür ($< \%1$) ve beton dayanımını fazla miktarda değiştirmez. Matrisin şekil değiştirme kapasitesi, lifin şekil değiştirme kapasitesinden, daha düşük olduğu için lif mevcut kapasitesine ulaşmadan, matris devre dışı kalır. Yüksek lif oranı ($> \%5$) kullanılan kompozit malzemelerde, çekme dayanımı da önemli ölçüde artar. Matris çatladıktan sonra kompozitin davranışı aşağıdaki gibi gelişebilir:

1. Matris çatladıktan hemen sonra kompozit göçer. Bu göçme tipine çok düşük lif oranlarında rastlanır. Bu davranışa ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.16a'da gösterilmektedir.

2. Matrisin çatlamasından sonra, yük taşıma kapasitesi düşer, fakat kompozitin yüke direnci en yüksek gerilmeden düşük olmakla birlikte devam etmektedir. Matrisin çatlaması ile yük kompozitten liflere aktarılır. Deformasyonun artmasıyla lifler matristen sıyrılmaya başlar ve bu olayı takiben yük taşıma kapasitesi de zamanla azalır. Bu tip kompozitlerde dayanımda artış gözlemlenmezken sünekliğin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır. Bu davranışa ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.16b'de gösterilmektedir.

3. Lif hacminin yüksek olması durumunda, matrisin çatlamasından sonra lifler artan yükleri taşımaya devam ederler. Matrisin dayanıma katkısının ortadan kalkmasıyla gerilme – şekil değiştirme eğrisinin eğimi azalır. Çatlama sonrasındaki davranışa lif oranı ve matris ile lifin aderansı etkili olacaktır. Yükün artmasıyla çatlak miktarı artar ve taşıma kapasitesi liflerin matrinden sıyrılmaya başlamaları ile düşer. Bu tip göçmede lif ile matris özelliklerinin optimum kullanımı gerçekleşir. Bu davranışa ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.16c'de gösterilmektedir [14].



Şekil 2.16: Gevrek matrisli lif donatılı kompozitin gerilme şekil değiştirme eğrisi: (a) düşük lif oranı; (b) yeterli lif oranı; (c) yüksek lif oranı [14].

Betonda çekme dayanımını ve tokluğu etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar i) çelik lif miktarı, narinlik oranı, çelik lifin şekli, ve dayanımı, ii) ayrıca yalın betonun özellikleri olarak özetlenebilir. Yapılan araştırmalara göre:

1. Uçları kancalı liflerin düz olanlara göre daha fazla sıyrılma kuvveti yükü verdikleri,
2. Sıyrılma yükünün matris dayanımının artması ile arttığı,
3. Lifin plastik deformasyonu gerçekleştiği takdirde, çelik telin kalitesinin sıyrılma davranışını etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca matrisin dayanımı da yük taşıma kapasitesini ve kırılma enerjisini etkilemektedir [27].

Matrisin dayanıma ve enerji yutma kapasitesine katkısı iki şekilde olur.

1. Lif ile matrisin aderansı: Silis dumanı içeren kompozit malzemede lif ile matris arasındaki bağ çok daha güçlü olacağından liflerin etkin kullanımı söz konusu olacaktır [14].

Chan ve Chu [28], RPB’de silis dumanının lif ile matris aderansına olan etkisini incelemişlerdir. Bileşimlerde silis dumanını çimentonun %0, %10, %20, %30 ve %40’ı oranında kullanmışlar, diğer beton bileşenlerini sabit tutmuşlardır. Çalışmalar silis dumanının çimentonun %20’si ile %30’u arasında kullanıldığında, lif ile matris arasındaki bağ kuvvetinin ve lif sıyrılma enerjisinin optimum değere ulaştığını göstermektedir. %30 silis dumanı kullanılması ile sıyrılma enerjisi %100 artarken, sıyrılma yükü %14 oranında artmıştır. %40 silis dumanı kullanılan betonda ise sıyrılma yükünde artış gözlemlenmezken sıyrılma enerjisi normal betona göre %70 artış göstermiştir. Bu davranış silis dumanının lifin sıyrılma enerjisini lifin sıyrılma yükünden çok daha fazla etkilediği göstermektedir. Ayrıca silis dumanı oranı yüksek olan betonlarda lifin sıyrılma yüzeyinde yüksek oranda ince malzemeye rastlanmıştır. Sürtünmeyi ve aderansı kuvvetlendiren bu malzemeler dolayısıyla sıyrılma enerjisi silis dumanı yüksek olan betonlarda fazla çıkmıştır.

Eren ve Çelik [29], silis dumanı ve çelik lifin birlikte kullanımının yüksek dayanımlı beton özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çelik lif kullanımı ile narinlik oranı ve lif yüzdesine bağlı olarak beton basınç dayanımında %13 - %40 oranında azalma gözlemlenmiştir. Silis dumanı ve lifin birlikte kullanılması ile basınç dayanımı silis dumanı ve lif kullanılmayan sade betona göre artmıştır.

Gutiérrez ve diğerleri [30], silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun harcın dayanımını arttırdığını, uçucu kül kullanılmasının ise harç dayanımını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Karışımlarda çelik lif kullanılması ile basınç dayanımı %6,6 oranında düşmüştür. Ancak silis dumanı kullanılması ile lifin olumsuz etkisinin ortadan kalktığı ve normal harca göre basınç dayanımının %30 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu durum silis dumanının, çelik lif – matris aderansını güçlendirmesi ile basınç dayanımını arttırmasına bağlanmaktadır.

Fırat [31], silis dumanı ve çelik lifin birlikte kullanılmasının basınç dayanımına etkisini incelemiştir. Silis dumanı kullanılarak lif ile matris aderansının kuvvetlendirildiği 28 günlük betonlarda basınç dayanımının %62, 90 günlük betonlarda %66 arttığı hesaplanmıştır. Ayrıca, bu betonlarda betonun enerji yutma kapasitesi silis dumanı artışına bağlı olarak düzenli biçimde artmıştır. Bu durum silis dumanının lif matris aderansını güçlendirmesine, çelik liflerin artan aderans ile daha etkin hale gelerek betonun sünekliğini arttırmasına ve silis dumanının basıncı arttırıcı özeliğine bağlanmaktadır.

2. Matrisin gevrekliği: Normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı betona göre daha az gevrek olup, liflerin eklenmesi kompoziti daha sünek hale getirir. Yüksek dayanımlı betonda ise sünek kırılmanın meydana gelmesi için lif oranının artması gerekir. Normal dayanımlı betonda kancalı uçlu liflerden 60 kg/m^3 kullanmak gerekirken, yüksek dayanımlı betonda aynı sünek davranışı elde etmek için bu miktarı 120 kg/m^3 'e çıkarmak gerekmektedir [14].

2.3.3.1. Lif malzemesinin etkisi

Kompozit malzemenin genel özellikleri, kullanılan lif malzemesinin çeşidine göre değişmektedir. Lifler üretildikleri malzemelere göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler:

1. Metalik lifler: Karbon çeliği veya paslanmaz çelikten üretilirler, elastisite modülleri ve dayanımları yüksektir. Sünek davranış gösterirler.
2. Karbon lifler: Elastisite modülleri çelik lifler kadar yüksek olup, hafiftirler.
3. Mineral lifler: Tipik örneği cam lifidir. Elastisite modülleri ve çekme dayanımları yüksek olup gevrek davranış gösterirler. Fakat bazı türleri yüksek alkaliniteye sahip

çimento esaslı matrislerde dayanımlarını kaybederler. Bu sebeple, alkali dayanımlı cam lifler üretilmektedir.

4. Polimer lifler (akrilik, aramid, karbon, naylon, polyester, polietilen, polipropilen) : Aramid hariç yüksek çekme dayanımına sahip olup, elastisite modülleri kısmen düşüktür.

5. Doğal lifler (selüloz vb.): Bu tip lifler göreceli olarak güçlü olup, bağ karakteristikleri metalik ve mineral lifler kadar iyi değildir [14].

2.3.3.2. Çelik lif miktarı, çelik lif narinliği, çelik lif geometrisinin etkisi

i) Çelik lif miktarı

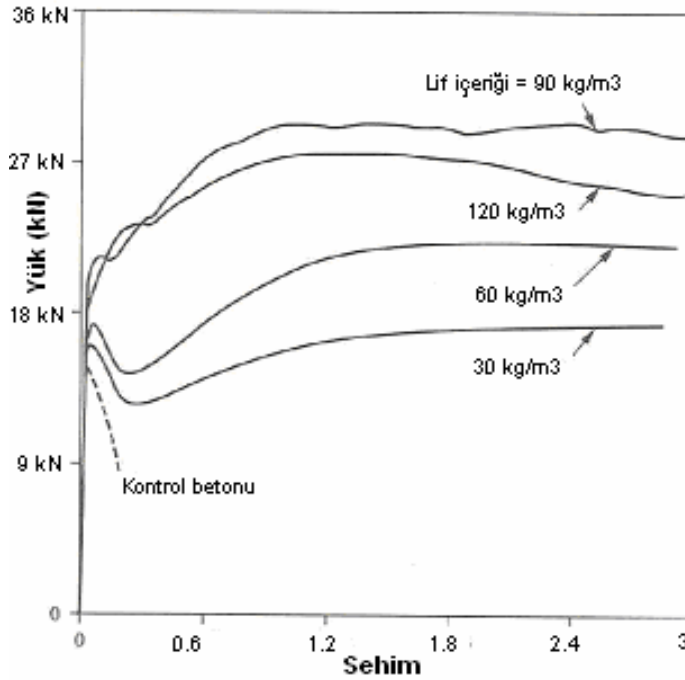
Üretimde kullanılan lif içeriği de optimum bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Lif içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma ve yerleştirme problemleri ortaya çıkar ve lifler karışım içerisinde topaklanır. Bu topaklanmalar matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Karışımında iri taneli agrega kullanılmaması, lif narinlik oranının optimum bir değerde olması, liflerin karışıma kuru katılması ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması ile liflerin matris içerisinde homojen dağılması sağlanabilir [6].

Dugat ve arkadaşları [18], farklı lif içeriklerinin kırılma enerjisine olan etkilerini araştırmak üzere, lif boyutları $D= 0,15$ mm, $L= 13$ mm, lif içeriği %0, %2, %2,5 ve %4 olan karışımların kırılma enerjilerini karşılaştırmışlar ve optimum lif içeriğinin %2 ~ %3 arasında olduğunu saptamışlardır. Çalışma sonucunda yüksek oranlarda kullanılan lifin kırılma enerjisini düşürdüğü ortaya çıkmıştır.

Özyurt [6], deneysel çalışmalarında lif içeriği %1,5, %3, %4,5 olan karışımlarda $D= 0,15$, $L= 6$ mm olan lifler kullanmış ve lif oranının %3'ü geçmesi durumunda kırılma enerjisinin arttığını fakat artış hızının azaldığını gözlemlemiştir.

Şekil 2.17'de lif miktarının yük-sehim eğrileri üzerine etkisi görülmektedir. Lif kullanılmayan kontrol betonu ile 30 kg/m^3 lif kullanılan kompozit malzemenin enerji yutma kapasiteleri arasındaki fark, lif oranının artması ile oluşan farktan çok daha fazladır. Lif hacim oranı 30 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 olan kompozitlerde ilk çatlaktan sonra maksimum eğilme gerilmesinde düşüş görülmektedir. Bu durum, lif miktarının artması ile azalır. Fakat lif içeriğinin 90 kg/m^3 ve 120 kg/m^3 olduğu durumlarda ilk çatlak sonrasında da yük artışı devam eder ve bu durum malzemenin eğilme

dayanımını artırır. Yüksek oranda lif içeren bu tip kompozitlerde yerleştirme tekniği büyük önem taşır [14].



Şekil 2.17: Lif miktarının yük-sehim eğrisine etkisi [14].

Silis dumanı içeren kompozit malzemeler hariç lif oranının %2'den az olması eğilme dayanımını fazla arttırmaz. Fakat her durumda eğilme dayanımındaki artış basınç dayanımı ve yarma – çekme dayanımı artışından daha fazladır [14].

Özyurt [6], deneysel çalışmasında %1,5 oranında çelik tel içeren numunelerin basınç dayanımlarının, lif içermeyen numunelere göre daha düşük olduğunu saptamıştır. Bu durum az miktarda kullanılan liflerin betonda kusur etkisi yaratarak dayanımı düşürmesinden kaynaklanmaktadır. Deney sonuçları, çelik tel miktarının artmasının basınç dayanımını ve elastisite modülünü fazla etkilemediğini göstermektedir.

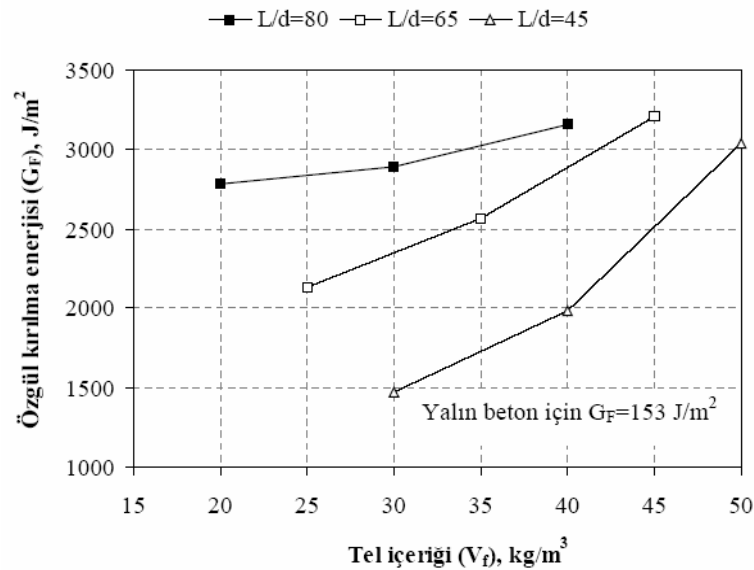
Taşdemir ve arkadaşları [2], lif hacminin ve lif narinliğinin beton özelliklerine etkisini araştırdıkları çalışmada bileşenleri sabit tutarak lif narinliklerini ve lif hacmini değiştirmişlerdir. Lif narinlikleri 55, 65 ve 80 olarak belirlenmiş ve her tip liften %0,26, %0,45 ve %0,64 oranında kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre $l/d=65$ kullanılan betonlarda lif hacminin %0,26'dan %0,45'e çıkarılması basınç dayanımını %30 arttırmıştır. Buna karşılık $l/d=55$ ve $l/d=80$ kullanılan betonlarda lif hacmindeki artış basınç dayanımını fazla etkilememiştir. Bu çalışmada lif kullanılmasıyla basınç dayanımında meydana gelen değişimde, lif miktarı yanında

diğer parametrelerinde etken olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak çelik lif eklenmesi basınç dayanımında fazla bir artış sağlamazken, göçme kırılması sırasında sünekliği artırıcı bir etkiye sahiptir. Buna karşılık lif oranı arttıkça eğilme dayanımı ve kırılma enerjisinin arttığı gözlemlenmiştir.

Wafa ve Ashour [32] çalışmalarında, $l/d = 75$ olan çengel uçlu çelik lif kullanmışlar ve çelik lif hacmi arttıkça betonun yarma - çekme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Karışıma %1,5 oranında çelik lif eklenmesi yarma – çekme dayanımını 1,6 kat arttırmıştır. Karışıma % 1,5 hacim oranında çelik lif eklenmesi ile basınç dayanımında % 4,6 oranında artış gözlemlenmiştir.

ii) Çelik lif narinliği

Lif narinliği ve lif miktarındaki artış özgül kırılma enerjisini artırır. Bu durum kırılma sırasında liflerin betondan sıyrılması, çok sayıda lifin ise çatlak köprülenmesinde aktif rol oynaması ile açıklanır. Böylece kırılma çok sayıda çatlak oluşuktan sonra gerçekleşir. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi lif narinliği ve lif miktarı istenilen performansa göre seçilebilir [3].



Şekil 2.18: Farklı narinliğe (l/d) sahip çelik tellerle donatılmış betonların özgül kırılma enerjisinin (G_F) tel içeriği (V_F) ile değişimi [3].

Düz liflerin performansının belirlenmesinde narinliğinin etkisi büyüktür. Beton iyi karıştırıldığı takdirde narinlik arttıkça süneklik artar. Narinlik, deforme olmuş liflerde, düz liflere oranla az olmakla beraber kompozit malzemenin sünekliğini olumlu yönde etkiler [14].

Ekincioglu [33] karma lif kullanımının betonun mekanik özelliklerine olan etkisini araştırdığı çalışmada 3 farklı tip lif kullanmıştır. Toplam lif oranını %3 mertebesinde sabit tutarak farklı lif tiplerini farklı oranlarda karıştırmıştır. Çalışmada kullanılan lif tipleri ZP 305 (L: 30mm, L/D: 55), RC 65/60 (L: 60mm, L/D: 65), OL 6/16 (L: 6mm, L/D: 37,5) olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda basınç dayanımlarının en çok mezo ve makro liflerin birlikte kullanıldığı numunelerde arttığı, tek tip lif kullanılan numunelerde ise belirgin bir artışın olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca iki farklı tipte makro lifin kullanılmasının da dayanım artışına fazla etkisi olmamıştır. Bu durumda karma lif kullanılması ile farklı boyuttaki liflerin, farklı çatlama safhalarında devreye girerek, çatlakların ilerlemesini durdurduğu sonucuna varılabilir. Deney sonuçlarına göre çelik lif içermeyen, beton numunesinin kırılma enerjisi 95 N/m, %3 oranında RC 65/60 içeren numuneninki 15579 N/m ve %3 OL 6/16 lif kullanılan numuneninki 5120 N/m bulunmuştur. RC 65/60 lif içeren numunenin kırılma enerjisinin normal betonun 164 katı mertebesinde olması dikkat çekicidir. Burada en az artış %3 OL 6/16 lif kullanılan numunede gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışmada %3 oranında 6mm'lik lif içeren numunelerde ilk çatlaktan sonra yükün azalmaya başladığı, en uzun lif olan RC 65/60'ın %3 oranında kullanıldığı numunelerde ise yükün ilk çatlak yükünün iki katına kadar arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla sonuçlar uzun liflerin maksimum yük sonrası davranışı iyileştirerek sünekliği artırdığını doğrulamaktadır. Kısa lifler çatlak boyunun artması ile betondan sıyrılırken, uzun lifler çatlakları köprülemeye devam etmektedir, bu durum beklenildiği gibi kırılma enerjisinde artış meydana getirmektedir.

Taşdemir ve arkadaşlarının [2] deneysel çalışmalarına göre, aynı lif hacminde lif narinliği arttıkça eğilme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Lif hacminin %0'dan %0,64'e çıkarılması $l/d = 55$ kullanılan betonlarda eğilme dayanımında %33'lük bir artışa neden olurken, $l/d = 65$ ve $l/d = 80$ kullanılan betonlarda eğilme dayanımı sırası ile %56,5 ve %100 oranlarında artmıştır. Bu durum matris çatladıktan sonra yüklerin lif ile matris arasındaki bağ göçene kadar lifler tarafından taşınması ile açıklanabilir. Lif narinliği bağ kuvvetini dolayısıyla eğilme dayanımını büyük ölçüde etkiler. Yarma – çekme testi sonrasında $l/d = 65$ kullanılan betonlarda liflerin sıyrıldığı, $l/d = 80$ kullanılan betonlarda ise liflerin kırıldığı gözlemlenmiştir. Bu davranış $l/d = 65$ olan liflerin kesit alanlarının $l/d = 80$ olan liflere göre daha fazla olması, dolayısıyla daha az çekme gerilmesine maruz kalması ile açıklanabilir.

Fırat [31], deneysel çalışmasında ZC 6/15, ZC 50/50 ve ZC 30/50 lif tipi kullanarak beton basınç dayanımlarında bir miktar artış (%5 - %8) elde etmiş, narinliği yüksek olan ZC 50/50 tipi lif kullanılan numunelerde ise basınç dayanımının düştüğünü gözlemlemiştir. ZC 6/15 tipi lif kullanılan betonların basınç dayanımlarındaki artış ZC 30/50 lif tipi kullanılan betonlara göre daha fazladır. Bu durumun ZC 30/50 lif tipinin narinliğinin fazla olması nedeniyle işlenebilirliği olumsuz etkilemesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

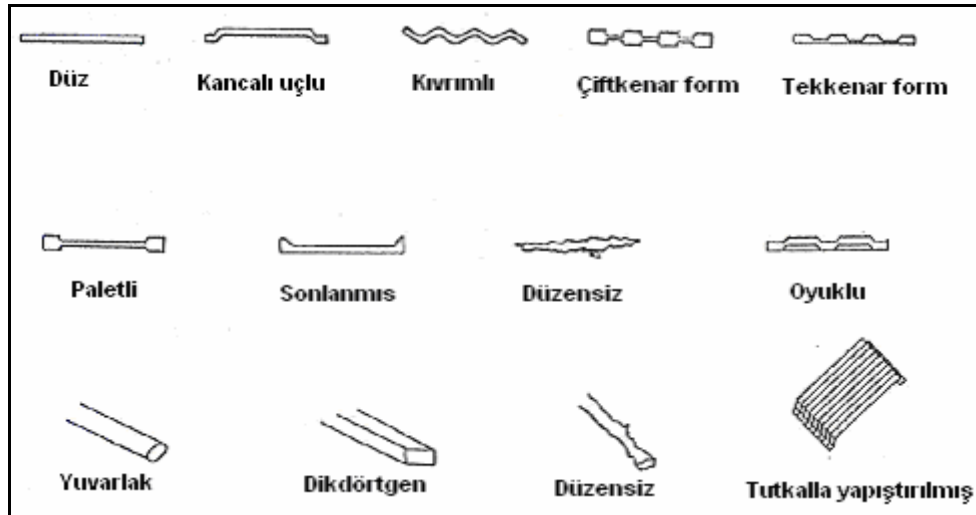
Kullanılan çelik tellerin maliyeti uygulama açısından önemli bir faktördür. Narinlik ve çelik lifin türü maliyeti önemli ölçüde etkiler. Bu sebeple ekonomik bir karışım elde etmek için karışımda kullanılan çelik lif hacminin azaltılması gerekir. Bayromov'un yaptığı çalışmada [34] narinlikleri farklı çelik teller kullanılarak maksimum süneklik, minimum maliyet hedeflenmiştir. Dolayısıyla maliyeti minimuma indirmek için lif hacmi azaltılmış fakat yeterli sünekliğin sağlanmasına özen gösterilmiştir. Sayısal optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada minimum maliyet ve maksimum sünekliği veren optimum tel içeriği $46,1 \text{ kg/m}^3$, narinlik ise 75,87 olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan lif narinlikleri sınırlı olduğu için sünekliğin maksimum olacağı $l/d=80$ için minimum maliyet lif hacmi $44,3 \text{ kg/m}^3$ kullanıldığında elde edilmiştir. $l/d=55$ ve $l/d=65$ için maksimum süneklik ve minimum maliyet veren optimum çelik lif hacimleri sırasıyla, $45,5 \text{ kg/m}^3$, $44,1 \text{ kg/m}^3$ olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, betonun işlenebilirliğinin de optimizasyonda göz önüne alınması gerektiği anlaşılmaktadır.

iii) Çelik lif geometrisi

Lif ile matris arasındaki bağa etki eden faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Deforme olmuş, ucu kancalı ve kıvrımlı liflerin matris ile lif arasındaki bağa mekanik katkısı,
- Lif ile matris arasındaki fiziksel ve kimyasal aderans,
- Matris eklenmeden önce lifin lif ile kenetlenmesi (SIFCON),
- Matris ile lif arasında sürtünme [35].

Çelik lif geometrisi betonun göçme sonrası davranışına etki eden en önemli faktördür. Çelik lif tipleri ve kesitleri Şekil 2.19'da verilmektedir.



Şekil 2.19: Çelik lif tipleri ve kesitleri [36].

Soroushian ve Bayasi [36] lif türünün işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve kırılma enerjisi üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında uçları kancalı, düz yuvarlak, kıvrımlı yuvarlak, kıvrımlı dikdörtgen ve uçları kancalı-tutkalla birleştirilmiş olmak üzere 5 çeşit lif kullanmış ve betondaki lif oranını %2’de sabit tutmuşlardır. Çelik liflerin geometrileri ile ilgili bilgiler Tablo 2.9’da özetlenmektedir.

Tablo 2.9: Çalışmada kullanılan lif türlerinin geometrileri [36].

Lif tipi	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Narinlik
düz-yuvarlak	50,8	0,889	57
kıvrımlı-yuvarlak	50,8	0,889	57
kıvrımlı-dikdörtgen	50,8	0,889	57
çengelli-birleştirilmiş	30,5	0,5	60
çengelli-tek	30,5	0,5	60
düz-yuvarlak	60,0	0,889	72
çengelli-birleştirilmiş	59,9	0,8	75

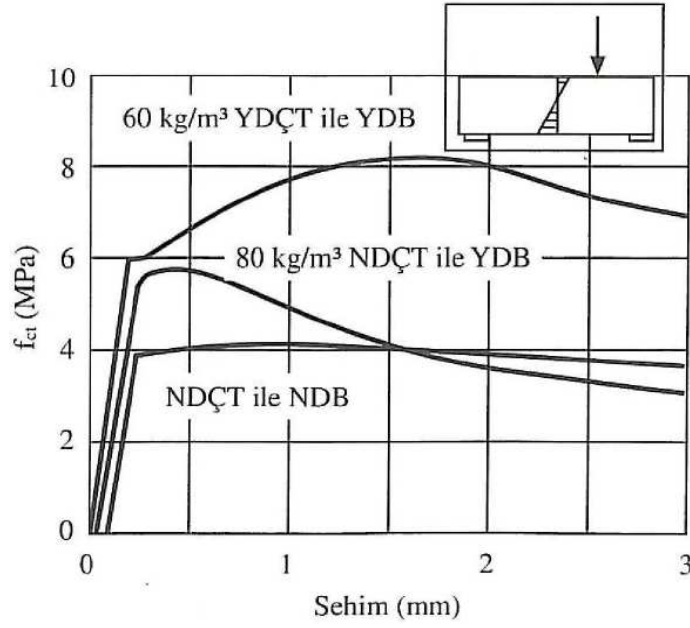
Deney sonuçları narinlik arttıkça işlenebilirliğin azaldığını fakat lif türünün işlenebilirliğe etkisinin dikkate alınmayacak kadar az olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalarda uçları kancalı liflerin enerji yutma kapasitesinin düz ve kıvrımlı olan liflere oranla daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durum en yüksek basınç gerilmesi şekil değiştirmesinin, uçları kancalı liflerde diğer liflere göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Naaman ve Najm [35] farklı tür çelik liflerin aderans-kayma mekanizmasını incelemişler ve çalışmalarında düz lif, çengelli lif, deforme olmuş lif olmak üzere 3

farklı tip lif kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda, mekanik katkının etkisi ile uçları çengelli lifler ve deforme olmuş lifler (yüzeysel işlem görmüş) düz liflere göre daha yüksek sıyrılma dayanımı göstermişlerdir. Yüksek kayma değerlerinde, deforme lifler sıyrılmaya karşı direnç gösterirken kancalı uçlu liflerin kanca uçlarında açılma gözlemlenmiştir. Bu durum kancalı uçlu liflerde sıyrılmanın daha kolay gerçekleşmesine neden olmuştur. Düz liflerde ise sıyrılma hızı çengelli liflere göre çok daha fazladır. Tüm liflerde başlangıç P/Δ (sıyrılma yükü/kayma) oranının aynı olması, mekanik katkının etkisinin yüksek kayma değerlerinde ortaya çıktığını ve lif türünün çatlama dayanımına katkısının olmadığını göstermektedir. Deney sonuçlarına göre, kancalı uçlu liflerde en yüksek sıyrılma yükü ve bu yükte gerçekleşen kayma miktarı düz liflere göre daha fazla bulunmuştur. Bu durum kancalı uçlu liflerin enerji yutma kapasitelerinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

2.3.3.3. Çelik lif dayanımının etkisi

Yüksek dayanımlı betonun mekanik davranışına çelik lif dayanımının etkisi Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Çalışmada i) 60 kg/m³ yüksek dayanımlı çelik lif (lif kopma dayanımı 2000 MPa) içeren YDB’nin ii) 80 kg/m³ normal dayanımlı çelik lif (çekme-kopma dayanımı 1200 MPa) içeren YDB’nin iii) Normal dayanımlı çelik lif (çekme-kopma dayanımı 1200 MPa) içeren normal dayanımlı betonun mekanik davranışı incelenmektedir. Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı bakımından en iyi sonuçlar, yüksek dayanımlı betonda yüksek dayanımlı çelik lif kullanılması ile elde edilmiştir [9]. Bu durum lif ile matrisin aderansının yüksek olması sonucunda, çelik liflerin kapasitelerine ulaşarak yüksek performans elde edilmesi ile açıklanabilir. Lif hacmi fazla olmasına rağmen, yüksek dayanımlı betonda normal dayanımlı çelik lif kullanılması sonucunda, maksimum yük sonrası davranış istenilen performans düzeyinin altında kalmaktadır. Bu durum, yüksek dayanımlı betonda aderansın kuvvetli olması ve çelik lifin dayanımının yetersiz kalması ile betondan koparak ayrılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.20: Farklı tipteki çelik tellerle üretilmiş beton kirişlerin yük-sehim eğrileri [9].

2.3.4. Kimyasal katkıların beton özelliklerine etkisi

Kimyasal katkıları, taze veya sertleşmiş beton veya harç özelliklerini değiştiren, betonun nihai özelliklerine zararlı etki oluşturmeyen malzemelerdir [37]. Katkı maddeleri betona karıştırma sırasında veya karıştırma işleminden hemen önce verilir ve genellikle miktar olarak %5'ten az kullanılır [6].

Beton katkı maddeleri hızlandırıcı katkıları, akıcı kıvam için katkıları, hava sürükleyici katkıları, betonun kimyasallara dayanımını arttıran katkıları, priz hızlandırıcı veya priz geciktirici katkıları olmak üzere sınıflandırılabilirler [37].

Özellikle yüksek dayanımlı betonlarda su/çimento oranı çok düşük olduğundan işlenebilme problemlerini ortadan kaldırmak için süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri sayesinde karışım suyu büyük oranda azaltılarak dayanım ve dayanıklılığı yüksek betonlar üretilmektedir [37].

Akışkanlaştırıcı katkıların etki mekanizması katkının çimento taneleri tarafından adsorbe edilmesi ile başlar. Adsorbe edilen katkı çimento yüzeyini kuşatır ve (–) yükü yüklenen çimento taneleri birbirlerini itmeye başlarlar. Bu şekilde tanelerin birbiri ile topaklanması önlenirken, tanelerin birbiri üzerinde kaymaları kolaylaşır. Sonuç olarak betonun iç sürtünmesi azalır. Bu durum, düşük su/çimento oranlarında dahi betondan istenilen işlenebilirliğin elde edilmesini sağlar [37]. Son dönemde

geliştirilen hiperakışkanlaştırıcılar çimento taneleri arasındaki mesafenin belli bir değerde kalmasını sağlarlar. Bu etki sterik etki olarak adlandırılır [6].

Aynı işlenebilme veya aynı mukavemet değeri, farklı katkı türleri için farklı katkı yüzdelerinde gerçekleşmektedir, bu durumda betona istenilen özeliği verecek en ekonomik katkının seçilmesi önem kazanmaktadır [37].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde üretimde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri ve yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri ile bu deneylerden elde edilen sonuçlar verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

3.1.1. Çimento

Kullanılan çimento PÇ 42,5 olup Nuh çimento fabrikasının üretimidir. Fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir.

Fiziksel Özellikler:

Blaine özgül yüzeyi (mm^2/g)	: 335
32 mikronluk elekte kalan (%)	: 17
90 mikronluk elekte kalan (%)	: 0,0
200 mikronluk elekte kalan (%)	: 0,0
Özgül ağırlık (gr/cm^3)	: 3,20
Le Chatelier iğnelerinin toplam açılması	: 1,33
Priz Başlangıcı	: 3 saat
Priz Sonu	: 4 saat 6 dakika

Mekanik Özellikler:

	<u>2 günlük</u>	<u>28 günlük</u>
Basınç Mukavemetleri (N/mm^2):	26,8	59,8

Kimyasal Özellikler:

CaO	: %64,92
SiO ₂	: %20,81
Al ₂ O ₃	: %4,24

Fe₂O₃ : %3,90
MgO : %1,00
Toplam alkali : %0,56
Cl : %0,008
SO₃ : %20,81
Kızdırma Kaybı : %2,10

Minerolojik Bileşim:

C₃S : %58
C₂S : %15
C₃A : %4,3
C₄AF : %11,9

3.1.2. Silis dumanı

Üretimlerde Elkem Microsilica firmasından sağlanan silis dumanı kullanıldı.

Fiziksel Özellikler

Yoğunluk (gr/cm³): 250-450

Kimyasal Özellikler:

CaO : %0,50
SiO₂ : %96
Al₂O₃ : %0,70
Fe₂O₃ : %0,25
MgO : %0,60
K₂O : %0,85
Cl : %0,10
Na₂O : %0,25
SO₃ : %0,5
Kızdırma Kaybı : %1,50

3.1.3. İnce silis kumu

Üretimlerde en büyük tane çapı 500µm ve özgül ağırlığı 2,6 gr/cm³ olan silis kumu kullanıldı.

Fiziksel Özellikler:

Yoğunluk (gr/cm³) : 2,6

İnce Silis Kumu Tane Çapı Dağılımı

Elek Göz Boyutu	Silis Kumu (%)
16 mm	100
8 mm	100
4 mm	100
2 mm	100
1 mm	100
0.5 mm	100
0.25 mm	88
0.125 mm	2

3.1.4. İri silis kumu

Üretimlerde en büyük tane çapı 2mm ve özgül ağırlığı 2,61 gr/cm³ olan silis kumu kullanıldı.

Fiziksel Özellikler:

Yoğunluk (gr/cm³) : 2,61

İri Silis Kumu Tane Çapı Dağılımı

Elek Göz Boyutu	İri Silis Kumu (%)
16 mm	100
8 mm	100
4 mm	100
2 mm	96

1 mm	26
0.5 mm	1
0.25 mm	0
0.125 mm	0

3.1.5. Çelik lifler

Çalışmada Beksa üretimi OL 6/16, ZP 305, ZP 305X olmak üzere 3 tip çelik lif kullanıldı.

3.1.5.1. OL 6/16

Üstü pirinç kaplı, sarı renkli kısa kesilmiş çelik tellerdir. OL 6/16'nın özellikleri aşağıda verilmektedir.

Boy	: 6 mm
Çap	: 0,16 mm
Narinlik(l/d)	: 37,5
Özgül Ağırlık	: 7,85 gr/cm ³
Çekme Dayanımı	: 2250 N/mm ²

3.1.5.2. Dramix ZP 305

TS 10513 standardına uygun iki ucu kancalı, birbirine tutkalla birleştirilmiş soğuk çekilmiş çelik liflerdir. Dramix ZP 305'in özellikleri aşağıda verilmektedir.

Boy	: 30 mm
Çap	: 0,55 mm
Narinlik(l/d)	: 55
Özgül Ağırlık	: 7,85 gr/cm ³
Çekme Dayanımı	: min 1100 N/mm ²

3.1.5.3. Dramix ZP 305X

TS 10513 standardına uygun iki ucu kancalı, birbirine tutkalla birleştirilmiş soğuk çekilmiş çelik liflerdir. Dramix ZP 305X'in özellikleri aşağıda verilmektedir.

Boy	: 30 mm
Çap	: 0,55 mm
Narinlik(l/d)	: 55
Özgöl Ağırlık	: 7,85 gr/cm ³
Çekme Dayanımı	: min 2250 N/mm ²

3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak, Chryso firmasından sağlanan yeni nesil bir süperakışkanlaştırıcı olan Optima 200 kullanılmıştır. Çalışmada Optima 200 kullanılmasının sebebi yüksek oranda su ihtiyacını azaltarak, betonda kolay işlenebilmeyi sağlaması ve erken yüksek mukavemet elde edilebilmesidir. Özellikle kendiliğinden yerleşen beton, prefabrike beton ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için üretilmiştir..

Özgöl ağırlığı 1,1 kg/m³ olan bu katkı maddesi karışımlarda çimento ağırlığının yaklaşık olarak % 2,4 oranında kullanıldı.

3.2. Beton Karışımları

Bu çalışmada 5 adet lifli ve 1 adet lifsiz olmak üzere 6 adet beton üretimi yapılmıştır. Lifli betonlarda lif hacmi %3'te sabit tutularak, betonlarda kullanılan lif çeşitleri değiştirilmiştir. Bütün bileşimlerde nominal çimento dozajı 1000 kg/m³'te sabit tutuldu. Silis dumanı çimento ağırlığının %25'i oranında kullanıldı, su/çimento oranı %21'de ve su/bağlayıcı oranı %17'de sabit tutuldu. Bütün bileşimlerde hava boşluğu oranı %1 olarak öngörüldü.

3.3. Üretimde İzlenen Sıra

- Çimento, agregalar, silis dumanının kuru karıştırılması,
- Karışım suyunun bir kısmının eklenmesi,
- Lifin tamamının karıştırılması,
- Karışım suyunun kalan kısmının ve süperakışkanlaştırıcının eklenmesi,
- Gerçek birim ağırlık deneyinin yapılması,

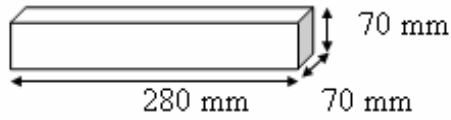
- Betonun kalıplara alınması ve vibrasyonu.

Numuneler üretimden 1 gün sonra kalıplardan çıkarılarak daha önceden belirlenen kür ortamlarına alındılar.

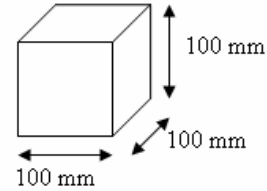
3.4. Numune Boyutları ve Şekilleri

Her bir karışımdan 8 adet prizma, 10 adet disk, 4 adet silindir, 6 adet küp olmak üzere 28 adet numune üretildi. Numune boyut ve şekilleri Şekil 3.1’de görülmektedir.

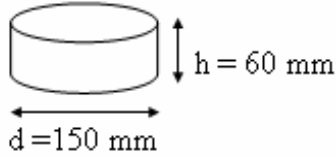
Prizma: 70x70x280mm



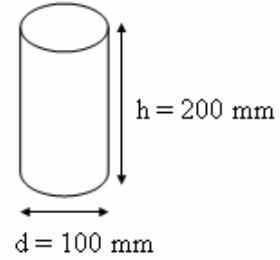
Küp: 100x100x100mm



Disk: $\Phi = 150\text{mm}$, $h = 60\text{mm}$



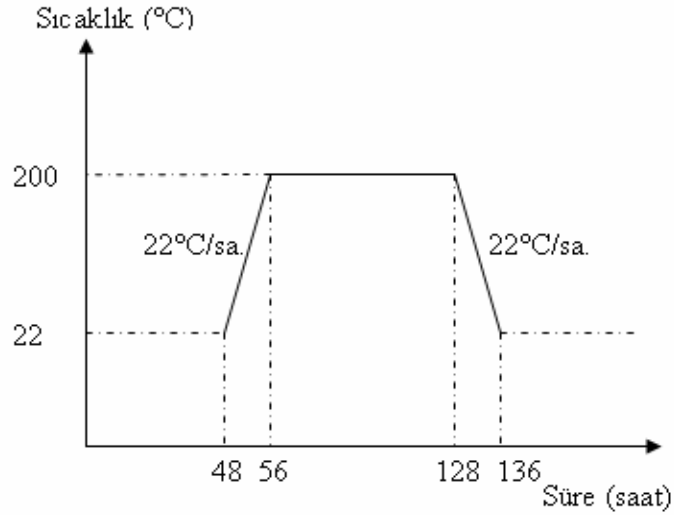
Silindir: $\Phi = 100\text{mm}$, $h = 200\text{mm}$



Şekil 3.1: Numune boyut ve şekilleri

3.5. Yüksek Sıcaklıkta Kür Programı

Üretilen numuneler iki bölüme ayrıldı. İlk bölümdeki numuneler kalıp alındıktan sonra 28 gün boyunca sürekli olarak $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ’de kirece doymun su içerisinde bekletildi. Yüksek sıcaklıkta kür uygulanan numunelere ise kalıp alındıktan sonra 3 gün $200^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ’deki etüvde kür uygulandı. Numuneler 20°C ’den 200°C sıcaklığa $22^{\circ}\text{C}/\text{sa}$. sıcaklık artış hızı ile 8 saatlik bir süre içinde ısıtıldı. Bu sıcaklıktan 20°C ’ye $22^{\circ}\text{C}/\text{sa}$. Sıcaklık artış hızı ile 8 saatlik bir sürede soğutuldu. Şekil 3.2’de yüksek sıcaklıkta kür programı görülmektedir.



Şekil 3.2: Yüksek sıcaklıkta kür programı

3.6. Numune Kodlarının Belirlenmesi

Numune kodları belirlenirken kullanılan liflerin cinsi ve kür koşulları esas alındı. Çalışmada 28 günlük standart kür programı uygulanan numuneler N ile, 3 günlük yüksek sıcaklıkta kür programı uygulanan numuneler ise C ile kodlandırıldı. Numune kodlarında ilk harf lif tipini, ikinci harf ise kür koşullarını göstermektedir. MN kodu ise numunenin lifsiz olarak üretildiğini ve üretim sonrasında 28 günlük normal kür uygulandığını göstermektedir. Numune kodları ve lif yüzdeleri Tablo 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1: Üretilen betonların kodları ve karışımlardaki lif yüzdeleri

Numune Kodu		OL 6/16	ZP305	ZP305X	TOPLAM
Normal Kür	200°C’de Sıcak Kür				
MN	MC	-	-	-	-
ON	OC	3	-	-	3
ZN	ZC	-	3	-	3
XN	XC	-	-	3	3
OZN	OZC	1,5	1,5	-	3
OXN	OXC	1,5	-	1,5	3

3.7. Taze Beton Deneyleri

- **Birim Ağırlık Deneyi**

Üretilen malzeme hacmi bilinen bir silindir kap içerisine vibrasyon uygulanarak yerleştirildi ve taze betonun ağırlığı bulundu. Taze beton özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Üretilen betonların kendiliğinden yayılabilen kıvamda oldukları gözlenmiştir.

Tablo 3.2: 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

3.8. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.8.1. Silindir basınç deneyi

Basınç deneyleri $\Phi = 100$ ve $h = 200$ mm’lik silindir numuneler üzerinde, 5000 kN kapasiteli yükleme makinası kullanılarak yapıldı. Her 20 kN’luk yüke karşı gelen düşey yer değiştirme değeri okundu, elde edilen grafiklerden elastisite modülleri hesaplandı. Ayrıca numunelerin kırılma yükleri kesit alanına bölünerek basınç dayanımları hesaplandı.

Bu deneyler sonucunda, ısıtma işlem uygulamasının, lif tipinin ve lif dayanımının elastisite modülüne ve silindir basınç dayanımına etkileri araştırıldı. Elastisite modülleri hesaplanırken en büyük yükün %5’i ile %45’i arasında kalan bölgedeki gerilme şekil değiştirme değerleri kullanıldı. Gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinden faydalanılarak elde edilen silindir basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 3.3’de verilmektedir.

3.8.2. K p basıncı deneyi

Basıncı deneyleri 100 x100 x 100mm’lik küp numuneler üzerinde 5000 kN kapasiteli yükleme makinası kullanılarak yapıldı. Bu deneyler sonucunda numunelerin kırılma yükleri kesit alanına bölünerek k p basıncı dayanımları hesaplandı.

3.8.3. Yarmada  ekme deneyi

Yarmada  ekme deneyleri $\Phi = 150$ ve $h = 60$ mm’lik disk numuneler üzerinde yapıldı. Numunelere  izgisel yük uygulanarak, yarma kuvvetleri bulundu ve bu kuvvetlerden yarmada çekme dayanımlarına geçildi. Yük numunelere alttan ve üstten 4 mm kalınlıklı ince çubuklar vasıtası ile aktarıldı. Yarmada  ekme dayanımları denklem 3.1. kullanılarak hesaplandı.

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

f_t : Yarmada  ekme dayanımı (N/mm²)

$P_{\max}$: Maksimum yük (N)

D : Silindirin  apı (mm)

L : Silindirin y ksekl i (mm)

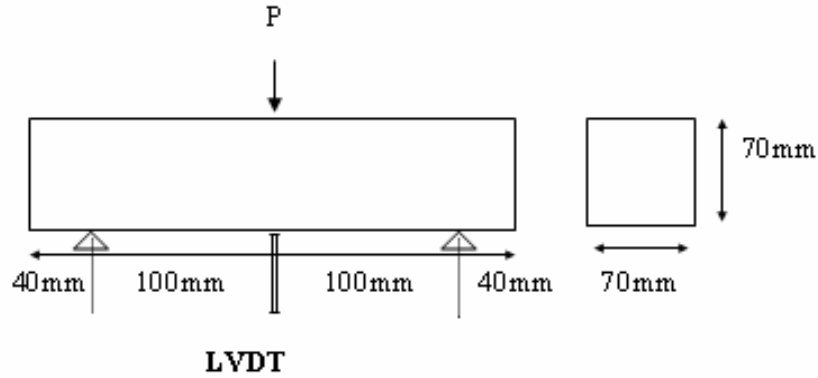
Yarmada  ekme deneylerinden elde edilen yarmada çekme dayanımı değerleri Tablo 3.3’de görülmektedir.

3.8.4. RILEM kırılma enerjisi deneyleri

Kırılma deneyleri, İ.T.  Yapı Malzemeleri laboratuvarında MTS marka yer değiştirme kontrollü yükleme makinası kullanılarak yapıldı. Kiriş numunelerine 3 noktadan yüklemeli eğilme uygulanarak, numunelerin yük sehim eğrileri elde edildi. Bu eğrilerden faydalanılarak kiriş numunelerinin eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi hesaplandı. Yapılan deneyler sonucunda  elik lif tipinin ve k r koşullarının malzemenin eğilme dayanımına ve kırılma enerjisine etkileri incelendi.

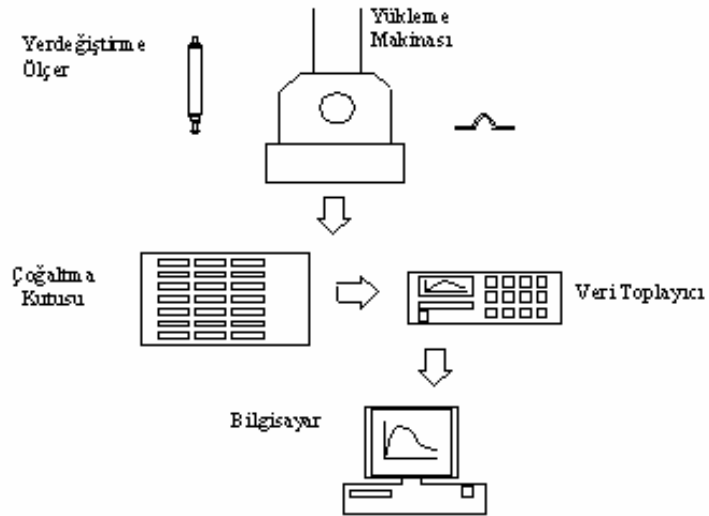
Deneyin yapılışı: 70x70x280 mm. boyutundaki prizmatik numunelerin etkin kesit alanı 40 x 70 mm olarak seçildi. 3 cm’lik çentik açıklığın tam ortasından elmas testere ile açıldı. Eğilme deney düzeni ve alıcıların numune üzerindeki konumları Şekil 3.3’de gösterilmektedir.

Deneyden önce numunenin alt yüzeyine sehimi ölçmek için 1 tane LVDT alıcı yerleştirildi.



Şekil 3.3: RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni

Numuneler üzerine uygulanan yükler ve bu yüklere karşılık gelen sehim değerleri alıcılardan bilgisayara aktarılmak üzere toplanarak, bu değerlerden yük – sehim grafiklerine geçildi. Veri toplama sistemi Şekil 3.4’te gösterilmektedir.



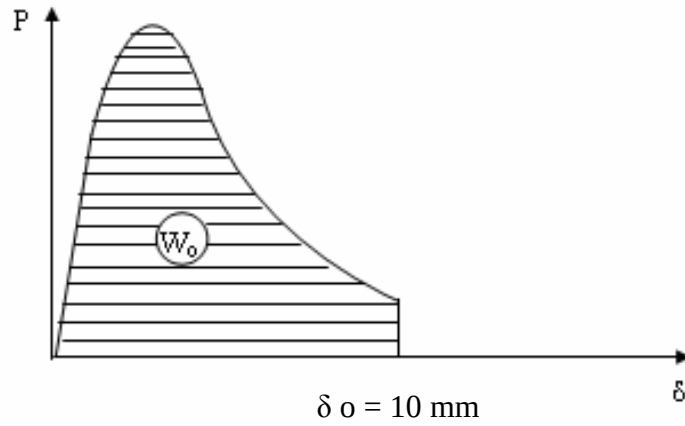
Şekil 3.4 : RILEM kırılma enerjisi veri toplama sistemi

- **RILEM kırılma enerjisi deneylerinden kırılma enerjisinin hesaplanması**

Kırılma enerjisi yük-sehim eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu alan numunenin kırılma süresince harcanan enerji olup, gevrek malzemelerde bu değer küçüktür. Bu durum gevrek malzemelerde ölçülen sehim değerinin az olmasından kaynaklanmaktadır. Sünek malzemelerde ise şekil değiştirme kapasitesine bağlı olarak sehim değeri artacağından kırılma enerjisi

artacaktır. Çalışmada kullanılan çelik liflerin gevrekliği çok yüksek olan malzemeye süneklik kazandırarak kırılma sırasında ani göçmeyi engellediği görülmüştür.

Şekil 3.5’de örnek bir yük-sehim eğrisi görülmektedir. Çalışmada tüm numuneler için yük-sehim eğrileri çizilerek; sıcak kürün, lif dayanımının ve lif tipinin kırılma enerjisine etkileri araştırılmıştır. Şekil 3.5’de örnek bir yük-sehim eğrisi üzerinde kırılma enerjisinin nasıl hesaplanacağı gösterilmiştir. Kırılma enerjilerinin hesaplanmasında Denklem 3.2 kullanılmıştır.



Şekil 3.5 : Örnek bir yük-sehim eğrisi

$$G_f = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (3.2)$$

G_f : Kırılma enerjisi (N/m)

W_o : Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan (Nm)

m : Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g : Yer çekimi ivmesi (9.81 m/sn^2)

δ_o : Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)

A_{lig} : Etkin kesit alanı (m^2)

• **RILEM Kırılma enerjisi deneylerinden net eğilme dayanımlarının hesaplanması**

Net eğilme dayanımları Denklem 3.3’e göre hesaplanmıştır.

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

F_{fnet} : Net eğilme dayanımı

- P : Kırılma yükü (N)
- L : Mesnetler arası uzaklık (mm)
- B : Numune kesitinin genişliği (mm)
- D : Numune kesitinin yüksekliği (mm)

RILEM kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen net eğilme dayanımı değerleri Tablo 3.3’de görülmektedir.

Tablo 3.3: Sertleşmiş beton özellikleri

Karışım Kodu	MN	MC	ON	OC	ZN	ZC	XN	XC	OZN	OZC	OXN	OXC
Küp Basınç Dayanımı (MPa)	87,3	106,0	116,3	205,3	122,0	176,3	112,3	175,7	112,7	180,7	133,0	192,3
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	131,2	145,2	146,7	177,0	113,4	136,0	130,0	156,4	143,7	163,4	133,1	168,2
Elastisite Modülü (MPa)	44100	41500	45400	45600	41600	38800	45900	41300	44600	44100	48100	43900
Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	8,7	6,2	12,4	16,0	13,5	15,4	15,6	16,7	15,0	16,9	15,1	17,3
Kırılma Enerjisi (N/m)	181	179	6043	5421	14254	17212	21617	30169	8067	11336	19829	20235
Net Eğilme Dayanımı (MPa)	11,4	8,6	23,8	23,2	35,2	41,1	37,7	42,0	28,1	36,6	38,5	46,8

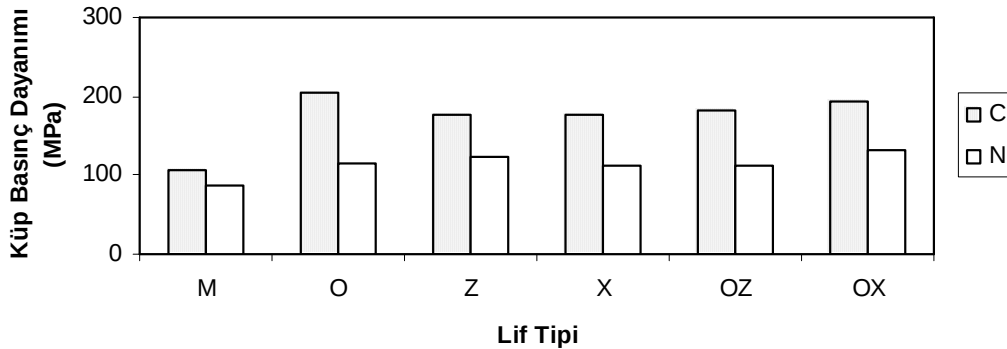
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELEME VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Küp basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri, her numune için EK A'da verilmiştir. Bu değerlerin ortalaması Tablo 3.3 ve Şekil 4.1.'de özetlenmektedir. Deney sonuçlarına göre betona 200°C gibi yüksek sıcaklık kürü uygulanmasının tüm numunelerde küp basınç dayanımlarını arttırdığı, bu artışın en az %22 ile lif kullanılmayan yalın betonda, en fazla %77 ile kısa tellerin kullanıldığı O numunelerinde meydana geldiği görülmüştür.

Normal kür uygulanan lifsiz numunelerde basınç dayanımı 87,3 MPa iken, lif kullanılması ile en yüksek olarak OXN numunesinde %52 artış ile 133 MPa, en düşük olarak da XN numunesinde %28 artış ile 112,3 MPa değerlerine ulaşmıştır.

200°C'de kür uygulanan numunelerde çelik tel kullanılmasıyla beton basınç dayanımındaki artışın en fazla % 94 ile OC numunesinde meydana geldiği görülmektedir. Bu durum kısa kesilmiş çelik tellerin mikro çatlak oluşumunu geciktirmesi sonucu beton dayanımının artması ile açıklanabilir. 200°C'de kür görmüş numunelerde basınç dayanımlarındaki en az artış, uzun liflerin kullanıldığı ZC ve XC numunelerinde gözlenmiştir.



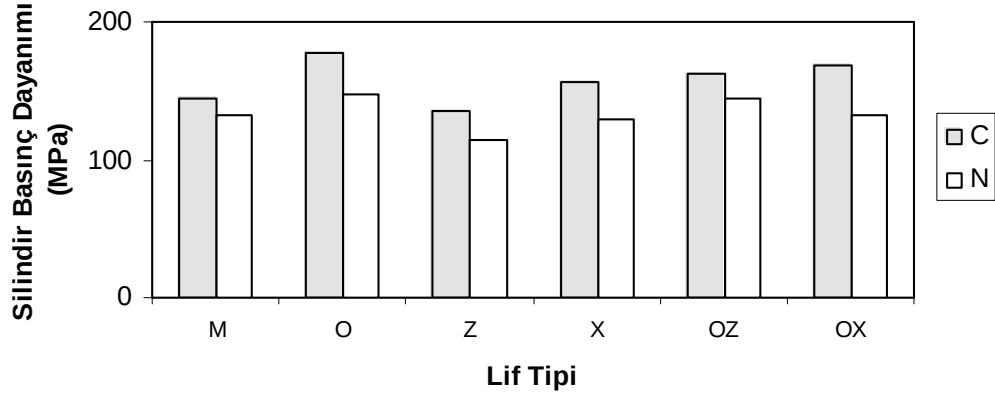
Şekil 4.1: Küp basınç dayanımları ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, N= 20°C su kürü)

4.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri her numune için EK B ve EK C’de verilmiştir. Bu değerlerin ortalaması Tablo 3.3, Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.’de özetlenmektedir. Deney sonuçlarına göre, 200°C sıcaklıkta kür uygulamasının numunelerin basınç dayanımlarını arttırdığı gözlenmektedir. Lif geometrisi ve lif dayanımı numunelerin silindir basınç dayanımlarında belirgin bir değişikliğe neden olmamıştır.

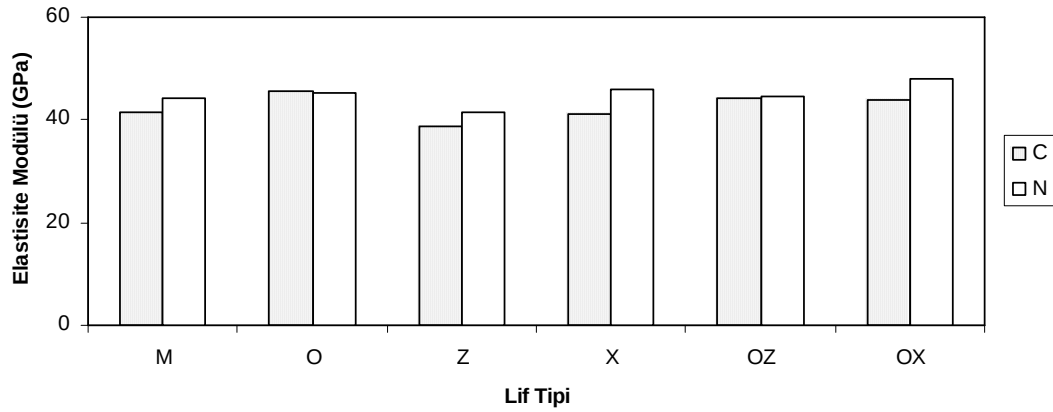
Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre, normal kür uygulanan numunelerde lif kullanılmasının silindir basınç dayanımlarını fazla etkilemediği görülmektedir. Çelik lif içermeyen ve normal kür koşullarında bekletilen MN numunesinde basınç dayanımı 131,2 MPa iken %3 OL tel kullanılan ON numunesinde basınç dayanımı %12 artarak 146,7 MPa’a ulaşmıştır. Normal kür uygulanan numunelerde en düşük basınç dayanımı 113,4 MPa ile %3 ZP 305 teli kullanılan ZN numunesinde gözlemlenmiştir. Normal kür koşullarında bekletilen numunelerde, kullanılan lif çeşidinin silindir basınç dayanımlarını belirgin bir biçimde etkilemediği gözlemlenmiştir.

200°C sıcaklık kürü uygulanan numunelerde ise en yüksek silindir basınç dayanımı 177 MPa ile OC numunesinde gözlemlenmiştir. Lif kullanılmayan yalın betonun basınç dayanımı 145,2 MPa olup, kısa kesilmiş çelik tel kullanılması dayanımı %22 arttırmıştır. Karma lif kullanılan OXC numunesinde ise, basınç dayanımı yalın betona göre %16 artarak 168,2 MPa’a ulaşmıştır. Betonda karma lif kullanılması, farklı boyutlardaki liflerin farklı boyutlardaki çatlaklarda etkin olması sebebiyle basınç dayanımını olumlu etkilemektedirler. ZC numunesinde ise beton dayanımı en düşük değerini alarak %6 azalmıştır. 200°C sıcaklık kürü uygulanan numunelerde, en yüksek sonuçlar OL teli kullanılan numunede elde edilirken basınç dayanımının lif çeşidine bağlı olarak fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Normal kür uygulanan numunelerde lif kullanılmasının silindir basınç dayanımını fazla etkilemediği, yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde ise lif kullanılması ile basınç dayanımlarının genel olarak arttırdığı görülmektedir. Bu durum sıcaklık kürü etkisi ile silis dumanının puzolonik özeliğinin aktif hale gelerek, lif-matris aderansını güçlendirmesi sonucunda dayanımın artması ile açıklanabilir.



Şekil 4.2: Silindir basınç dayanımları ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, N= 20°C su kürü)

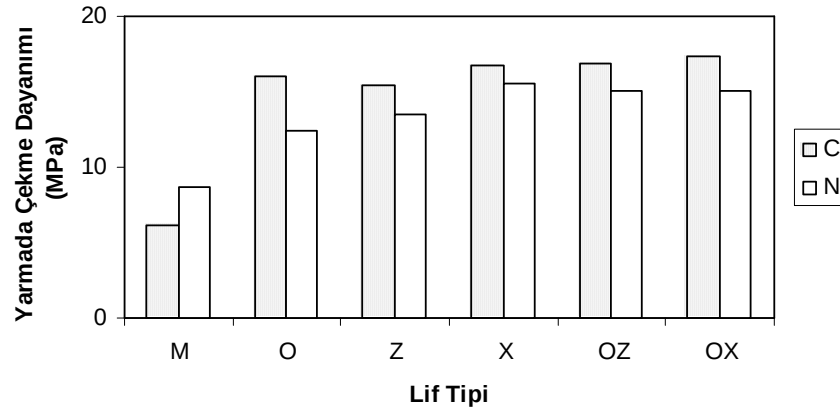
Silindir basınç deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerleri her numune için EKC’de verilmiştir. Bu değerlerin ortalaması Tablo 3.3’de, bu değerlerin lif tipine ve kür durumuna göre değişimi Şekil 4.3.’de özetlenmektedir. Deney sonuçlarına göre 200°C’de kür uygulanmasının ve lif tipinin elastisite modülü değerlerine belirli bir etkisi görülmemiştir.



Şekil 4.3: Elastisite modülleri ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, N= 20°C su kürü)

4.3. Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Yarmada çekme deneylerinden elde edilen yarmada çekme dayanımları her bir numune için EK D’de verilmiştir. Bu değerlerin ortalamasından bulunan yarmada çekme dayanımları Tablo 3.3’de ve yarmada çekme dayanımlarının lif tipine göre değişimi Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4: Yarmada çekme dayanımları ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, N= 20°C su kürü)

Çelik lif kullanılmayan yalın betonda yüksek sıcaklıkta kür etkisi yarmada çekme dayanımını düşürmüştür. Bu durumun yüksek sıcaklık etkisi ile betonda kılcal çatlakların oluşmasından meydana geldiği düşünülmektedir. Bu çatlaklar basınç etkisi ile kapandığından basınç dayanımında etkin olmayıp, çekme dayanımlarını olumsuz etkilemektedirler. Dolayısıyla mikroçatlaklarını ilerlemesini engelleyen kısa liflerin, yüksek sıcaklıkta kür görmüş numunelerde, çekme dayanımına etkilerinin daha fazla olması beklenilmektedir. Yüksek sıcaklıkta kür uygulanan numunelerde lif kullanılması çatlak köprülenmesini sağlayarak, numunelerin yarmada-çekme dayanımlarını 6,2 MPa'dan 17,3 MPa'a kadar yükseltmiştir. Yarmada-çekme dayanımının en fazla karma liflerin kullanıldığı OXC numunesinde lifsiz numuneye göre 1,8 kat arttığı, en az ise ZC numunesinde lifsiz numuneye göre 1,5 kat arttığı görülmektedir. Karma lif kullanılan numunelerde çekme dayanımının yüksek olması, kısa liflerin mikroçatlakları engellemesi ile ilk çatlak yükünü arttırmaları, uzun liflerin de çatlak ilerledikten sonra da kompozit dayanımına katkıda bulunmaya devam etmeleri ile açıklanabilir. X numunesinin çekme dayanımının Z numunesine göre %8 daha fazla olduğu görülmektedir, bu durum lif geometrisi aynı olmasına rağmen, X numunesinde lif dayanımının daha fazla olması ile açıklanabilir.

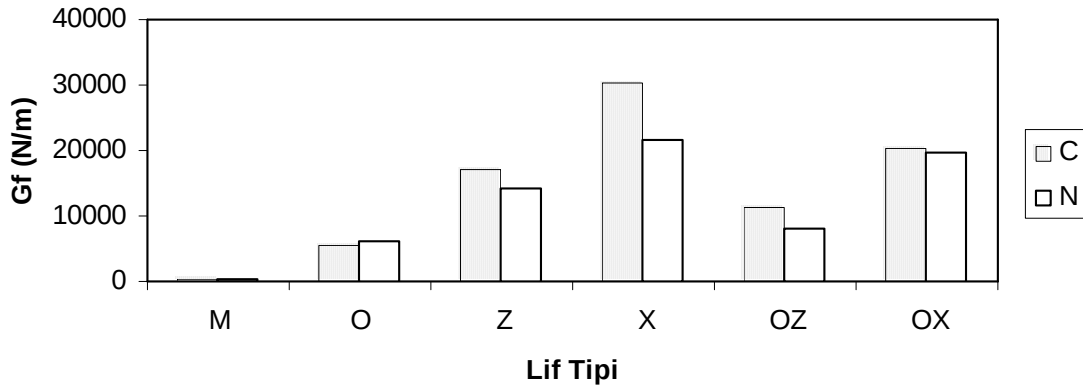
Normal kür koşullarında lif eklenmesi ile numunelerin yarmada-çekme dayanımlarında en az artış %42 ile ON numunesinde, en fazla artış ise %79 ile XN numunesinde meydana gelmiştir.

Yüksek sıcaklıkta kür uygulanması, numunelerin yarmada çekme dayanımlarını lif tipine bağlı olarak %12 ile %29 arasında arttırmıştır. Yüksek sıcaklıkta kür uygulanan lifli numunelerde, lif matris aderansı normal kür uygulanan numunelere

göre daha kuvvetlidir. Bu durum silis dumanının puzolonik özeliğinin yüksek sıcaklıkta daha aktif hale gelmesi ile açıklanabilir. Dolayısıyla lif matris aderansı daha güçlü bir yapıda, liflerin sıyrılma yükü yüksek olacağından, 200°C sıcaklık kürü uygulanan numunelerde lif kullanılması ile yarmada çekme dayanımlarında meydana gelen artış, normal kür uygulanan numunelere göre daha fazladır.

4.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

RILEM kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen sonuçlara göre betona çelik lif eklenmesi kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı değerlerini büyük ölçüde arttırmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar çok gevrek malzemeler olup, çelik lif eklenmesi betonun maksimum yük sonrası davranışını iyileştirerek daha sünek bir yapı oluşmasını sağlar. Beton tarafından yutulan enerjinin artması ile ani göçme kırılmaları engellenir. RILEM kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen kırılma enerjisi değerleri her bir numune için EK F’de verilmiştir. Bu değerlerin ortalamasından bulunan kırılma enerjileri Tablo 3.3’de ve kırılma enerjilerinin lif tipine göre değişimi Şekil 4.5.’de özetlenmektedir. Her numuneden elde edilen yük-sehim grafikleri EK G’de verilmiştir.

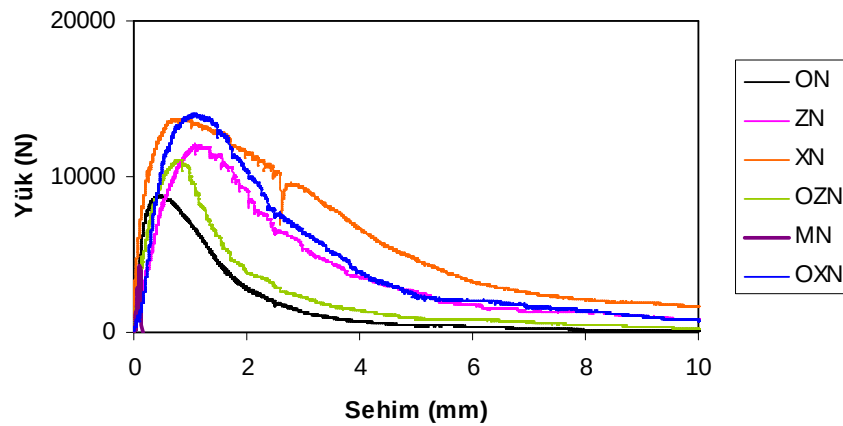


Şekil 4.5: RILEM kırılma enerjisi ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, N= 20°C su kürü)

4.4.1. Kırılma enerjilerinin değerlendirilmesi

Numunelerin kırılma enerjileri 3 noktalı eğilme deneyleri sonucunda elde edilen yük-sehim eğrileri altında kalan alan hesaplanarak bulundu. Kırılma enerjisi grafikleri incelendiğinde 200°C sıcaklık kürü uygulanmasının, lif dayanımının ve lif narinliğinin, numunelerin kırılma enerjilerini büyük ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Maksimum kırılma yükü ile malzemenin bu yükten sonraki davranışı kırılma enerjisini büyük ölçüde etkilemektedir. Kısa kesilmiş çelik tel olan OL 6/16'nın betonda kullanılması, mikro çatlakların oluşumunu engelleyerek ilk çatlak yükünün artmasını sağlamıştır. Fakat ilk çatlaktan sonra kısa tellerin matristen sıyrılmaya başlaması ile kompozitin taşıdığı yük azalmıştır. Buna karşın, uzun lif kullanılan numunelerde ilk çatlaktan sonra da kompozitin taşıdığı yük artmaya devam etmiş, böylece kırılma enerjisinde büyük artışlar meydana gelmiştir. Bu sebeple kısa kesilmiş çelik lif kullanılan betonların kırılma enerjilerindeki artış, uzun lif kullanılan betonlara göre daha azdır.

Normal kür uygulanan numunelerde lif tipinin kırılma enerjisine etkisi Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Normal kür koşullarında lifsiz betonda kırılma enerjisi 181 N/m iken, XN numunesinde bu değer 118 kat artarak 21617 N/m değerine ulaşmıştır. Kırılma enerjisi en düşük olarak ON numunesinde lifsiz betona göre 32,4 kat artarak 6043N/m değerine ulaşmıştır. Uzun lifler maksimum yük sonrası davranışı iyileştirerek kırılma enerjisini büyük oranda arttırmışlardır. Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi X numunesinin sıyrılma direnci maksimum yükten sonra da, diğer numunelere kıyasla çok daha fazladır.

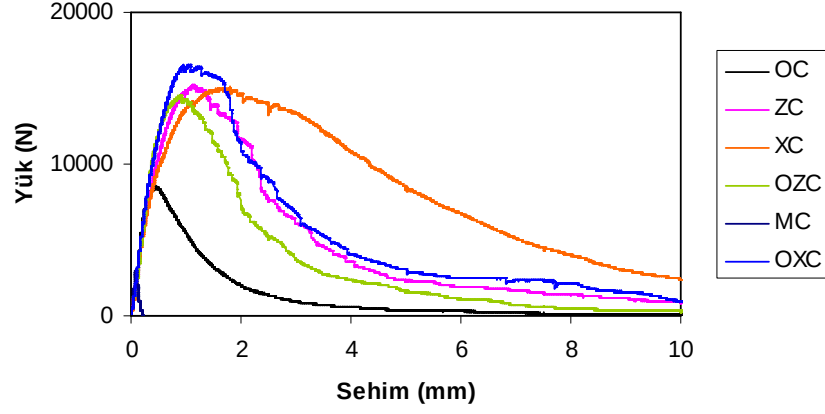


Şekil 4.6: Normal kür koşullarında çelik lif içeren ve içermeyen numunelerin yük-sehim diyagramları

200°C sıcaklıkta kür uygulanan numunelerde, lif tipinin kırılma enerjisine etkisi Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, yüksek sıcaklık küründe X numunesinin kırılma enerjisi Z numunesine göre %75, normal sıcaklık küründe ise %48 artış göstermiştir. Bu numunelerde kullanılan çelik tellerin geometrisinin aynı olmasına rağmen, kırılma enerjileri arasındaki fark, X numunelerinde kullanılan telin yüksek dayanımlı olmasından kaynaklanmaktadır.

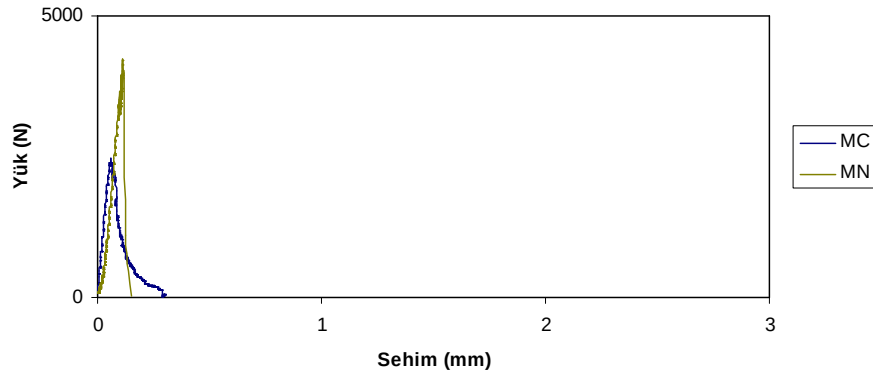
Yüksek sıcaklıkta kür uygulanan numunelerde en yüksek kırılma enerjisi değeri 30169 N/m ile XC numunesinde görülmektedir. Bu değeri sırası ile OXC, ZC, OZC, OC ve MC numunelerinin kırılma enerjileri izlemektedir. OXC numunesinin kırılma enerjisi lifsiz MC numunesinin kırılma enerjisinin 113 katına çıkarak 20235 N/m’ye, ZC numunesinin kırılma enerjisi ise lifsiz MC numunesinin kırılma enerjisinin 96 katına çıkarak 17212 N/m’ye ulaşmaktadır. Kırılma enerjisindeki en az artış OC numunesinde görülmekte, bu numunenin kırılma enerjisi lifsiz MC numunesinin kırılma enerjisinin 30 katına çıkarak 5421 N/m’ye ulaşmaktadır.

OX numunelerinde maksimum kırılma yükü, X numunelerine göre fazla olmasına rağmen, kırılma enerjileri X numunelerine göre daha düşüktür. Yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde OX numuneleri ile X numunelerinin kırılma enerjileri arasındaki fark %49, normal kür uygulanan numunelerde ise bu fark %9’dur. Bu durum maksimum yükten sonra yük sehim eğrisinin eğiminin, OX numunelerinde, X numunelerine göre daha hızlı düşmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum büyük çatlakların köprülenmesini sağlayarak enerji yutma kapasitesini arttıran uzun tellerin, kısa kesilmiş çelik teller ile yerdeğiştirmesi sonucunda malzemenin sünekliğinin artması ile açıklanabilir. EK H’de RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış numunelerin kırılma şekilleri görülmektedir. Numuneler incelendiğinde, lifsiz MC ve MN numunelerinin enerji yutmadan ani olarak göçtüğü görülmektedir. OL teli kullanılan OC ve ON numunelerinde ise liflerin sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Uzun liflerin kullanıldığı numunelerde lifler matrsten sıyrılarak ayrılmışlardır. Uzun liflerin kanca uçlarında açılma meydana gelmiştir. Kırılma şekilleri incelendiğinde, lifli numunelerde çoklu çatlak oluşumu ile sünek göçme görülmüştür.

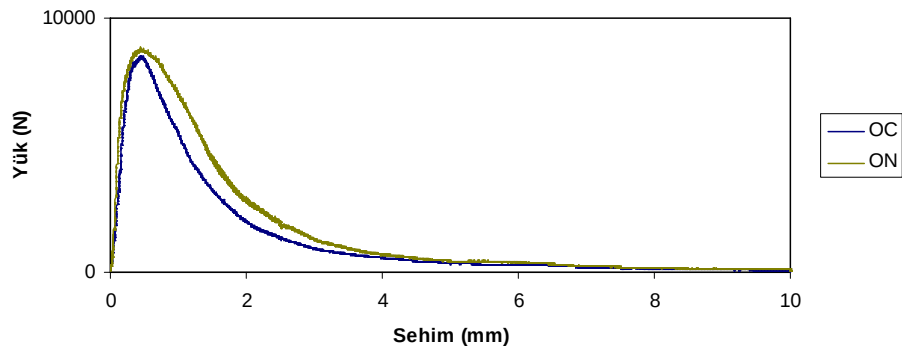


Şekil 4.7: Yüksek sıcaklık küründe çelik lif içeren ve içermeyen numunelerin yük-sehim diyagramları

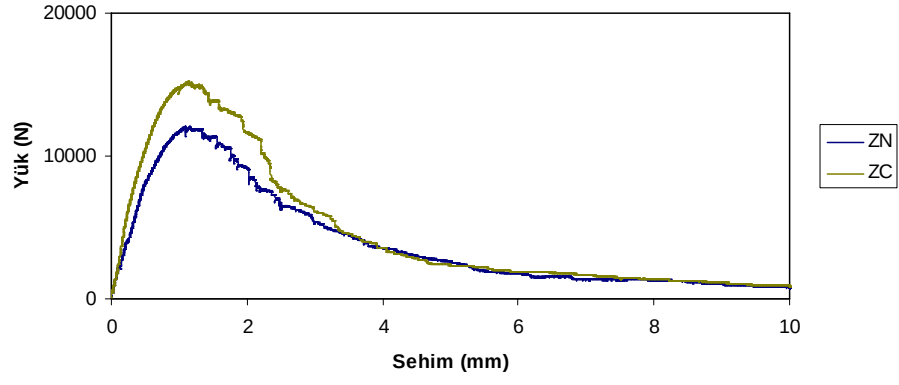
Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13’de yüksek sıcaklık kürünün kırılma enerjisine etkisi her lif tipi için ayrı ayrı gösterilmiştir. Genel olarak, sıcaklık kürünün maksimum kırılma yükünü dolayısıyla kırılma enerjisini arttırdığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıkta kür uygulanması, kırılma enerjilerini Z numunelerinde %20, X numunelerinde %39, OZ numunelerinde %40 arttırmıştır.



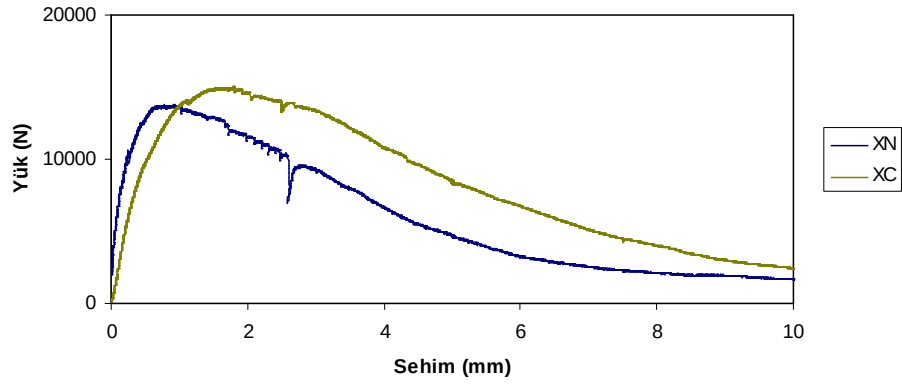
Şekil 4.8: Lifsiz numunelerde kür etkisi



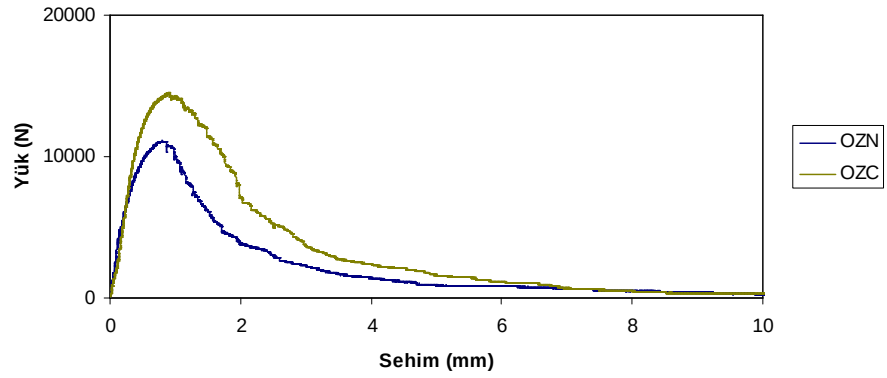
Şekil 4.9: OL teli kullanılan numunelerde kür etkisi



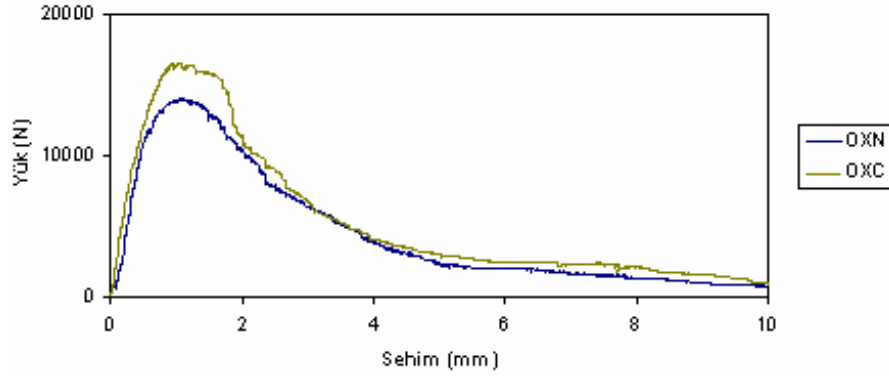
Şekil 4.10: ZP 305 teli kullanılan numunelerde kür etkisi



Şekil 4.11: ZP 305X teli kullanılan numunelerde kür etkisi



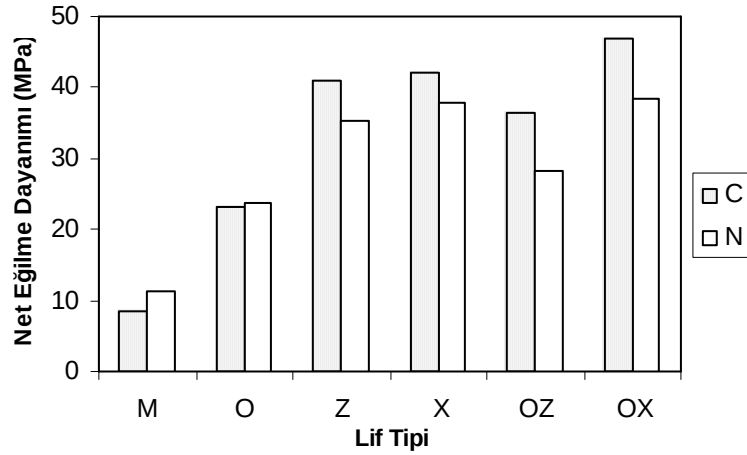
Şekil 4.12: ZP 305 ve OL telinin karma kullanıldığı numunelerde kür etkisi



Şekil 4.13: ZP 305X ve OL telinin karma kullanıldığı numunelerde kür etkisi

4.4.2. Net eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi

Numunelerin net eğilme dayanımları 3 noktalı eğilme deneyleri sonucunda elde edilen maksimum kırılma yükü değerlerinden faydalanılarak hesaplanmıştır. Net eğilme dayanımları her bir numune için EK E'de, bu değerlerin ortalamasından bulunan değerler Tablo 3.3'de sertleşmiş beton özellikleri tablosu ile net eğilme dayanımlarının lif tipine göre değişimi Şekil 4.14.'de özetlenmektedir.



Şekil 4.14: Net eğilme dayanımları ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, N= 20°C su kürü)

Deney sonuçlarına göre numunelerde lif kullanılmasının net eğilme dayanımlarını büyük ölçüde arttırdığı gözlenmektedir. Net eğilme dayanımlarında en büyük artış karma lif kullanılan OX numunelerinde, en az artış ise sadece kısa kesilmiş çelik tel kullanılan O numunelerinde görülmektedir. OL teli kullanılan numunelerde, ilk çatlaktan sonra liflerin matristen sıyrılmaya başlaması dayanımı düşürür. Narinlik oranı yüksek çelik tel kullanılan numunelerde ise, yükün ilk çatlaktan sonra da artmaya devam etmesi net eğilme dayanımının büyük oranda artmasını sağlar. Bu

sebeple Z ve X numunelerinde, O numunelerine göre daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımının OX numunelerinde görülmesi kısa kesilmiş çelik tellerin ilk çatlak dayanımını, ilk çatlaktan sonrada uzun liflerin devreye girerek maksimum kırılma yükünü arttırması ile açıklanabilir.

200°C’de sıcaklık kürü uygulanan numunelerde çelik tel kullanılması net eğilme dayanımlarında 2 ila 4 kat arasında bir artış sağlamıştır. Normal kür uygulanan numunelerde ise çelik tel kullanılması ile net eğilme dayanımları en fazla 3,3 en az 2,1 katına çıkmıştır. Yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde eğilme dayanımlarında daha yüksek artışlar elde edilmesinin sebebi, lif matris aderansının yüksek olması ile açıklanabilir. Lif matris aderansı yüksek betonlarda, liflerin sıyrılma yükleri artar. Bu durum numunenin eğilme altında maksimum kırılma yükünün, dolayısıyla eğilme direncinin artmasını sağlar.

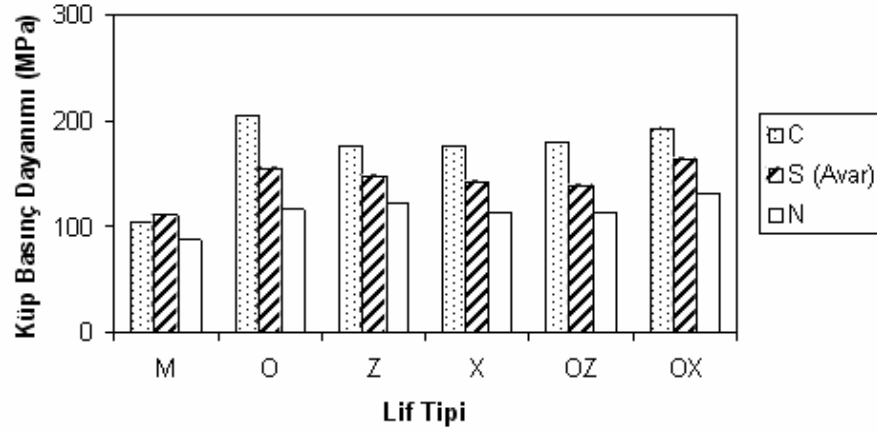
Yüksek sıcaklıkta kür etkisi numunelerin eğilme altındaki maksimum yükünü, dolayısıyla eğilme dayanımını arttırmıştır. Sadece lifsiz numunelerde yüksek sıcaklık kürünün net eğilme dayanımını düşürdüğü görülmektedir. Bu durum çok yüksek sıcaklık etkisi ile beton içerisinde çatlakların meydana gelmesi ile açıklanabilir. Basınç etkisi altında bu çatlaklar kapandığından basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkisi görülmemekte ancak, eğilme etkisinde çatlakların etrafında oluşan gerilme yığılmaları ile dayanım %16 oranında düşmektedir.

Net eğilme dayanımlarından elde edilen sonuçların yarmada çekme dayanımlarından elde edilen sonuçlara yakın olduğu görülmektedir.

4.5. Deney Sonuçlarının 90°C’de Buhar Kürü Uygulanan Bir Çalışma ile Kıyaslanması

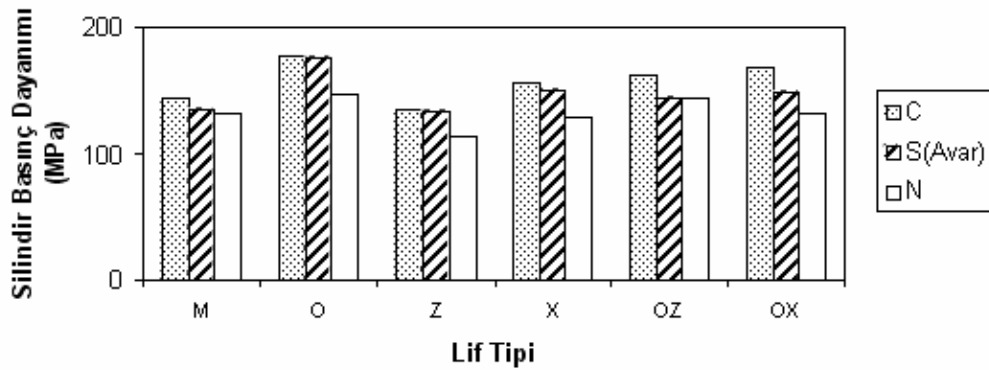
Avar [39], aynı numune bileşimlerini kullanarak yaptığı çalışmasında, 90°C’de buhar kürünün karma lifli betonların mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Avar numunelere kalıptan çıkarıldıktan sonra 3 gün boyunca 90°C’de buhar kürü uygulamış, daha sonra numuneleri 20°C’de kür havuzunda bekletmiştir. 90°C’de buhar kürü ile 200°C’de sıcaklık kürü uygulanan numunelerin küp basınç dayanımları Şekil 4.15’de gösterilmektedir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, 200°C’de sıcaklık kürü uygulanan lifli numunelerde küp basınç dayanımlarının

90°C’de buhar kürü uygulanan numunelere göre en az %18 ile OX numunelerinde, en fazla %32 ile O numunelerinde arttığı gözlenmektedir.



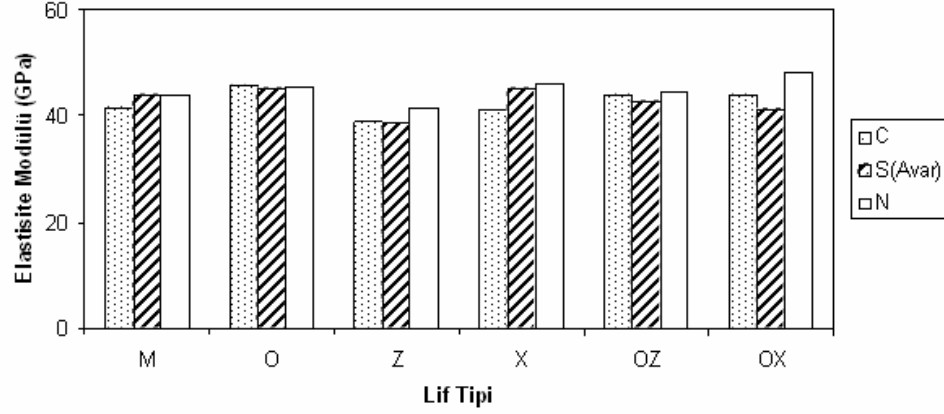
Şekil 4.15: Küp basınç dayanımları ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, S= 90°C sıcaklıkta buhar kürü, N= 20°C su kürü)

90°C’de buhar kürü ile 200°C’de sıcaklık kürü uygulanan numunelerin silindir basınç dayanımları Şekil 4.16’da gösterilmektedir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, 200°C’de sıcaklık kürü uygulanan numunelerde silindir basınç dayanımlarının 90°C’de buhar kürü uygulanan numunelere göre arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.16: Silindir basınç dayanımları ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, S= 90°C sıcaklıkta buhar kürü, N= 20°C su kürü)

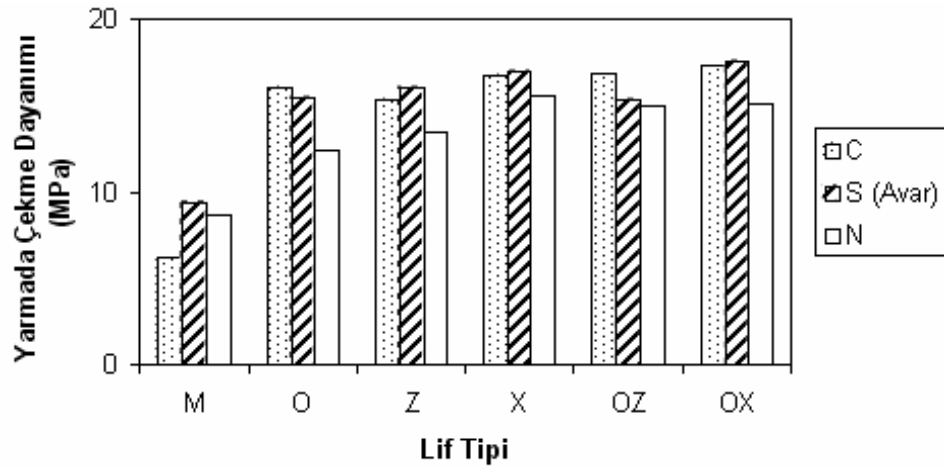
90°C’de buhar kürü ile 200°C’de yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerin elastisite modüllerinin karşılaştırılması Şekil 4.17’de gösterilmektedir. Sıcaklık kürlerinin elastisite modüllerinde belirgin bir değişiklik meydana getirmediği görülmektedir.



Şekil 4.17: Elastisite modülü değerleri

(C= 200°C sıcaklıkta kür, S= 90°C sıcaklıkta buhar kürü, N= 20°C su kürü)

90°C’de buhar kürü ile 200°C’de sıcaklık kürü uygulanan numunelerin yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması Şekil 4.18’de gösterilmektedir. Standart kür ile karşılaştırıldığında her iki sıcaklık küründe de yarmada çekme dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. 90°C’de buhar kürü ile 200°C’de sıcaklık kürü uygulanan numunelerin yarmada çekme dayanımlarının yakın olduğu görülmektedir. Lif kullanılmayan yalın betonda 90°C buhar küründe daha yüksek yarmada çekme dayanımları elde edilmiştir. Bu durum 200°C yüksek sıcaklık küründe numunede oluştuğu düşünülen mikro çatlakların betonun dayanımını düşürmesinden kaynaklanmaktadır.

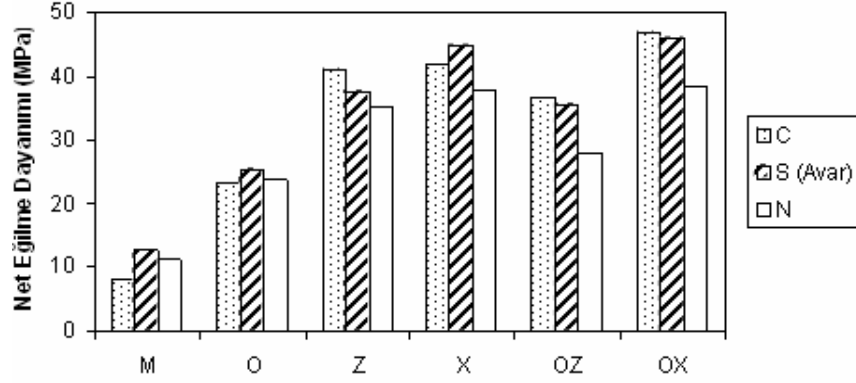


Şekil 4.18: Yarmada çekme dayanımları ortalama değerleri

(C= 200°C sıcaklıkta kür, S= 90°C sıcaklıkta buhar kürü, N= 20°C su kürü)

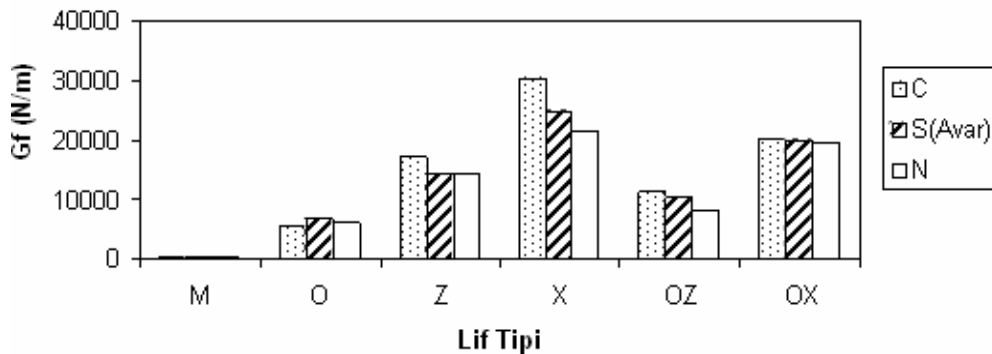
90°C’de buhar kürü ile 200°C sıcaklık kürü uygulanan numunelerin net eğilme dayanımlarının karşılaştırılması Şekil 4.19’da gösterilmektedir. 90°C’de buhar kürü ile 200°C’de sıcaklık kürü uygulanan numunelerin net eğilme dayanımlarının yakın

olduğu görülmektedir. Lif kullanılmayan yalın betonda yüksek sıcaklıkta kür, yarmada çekme dayanımlarında olduğu gibi net eğilme dayanımlarında da düşüşe sebep olmuştur.



Şekil 4.19: Net eğilme dayanımları ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, S= 90°C sıcaklıkta buhar kürü, N= 20°C su kürü)

90°C’de buhar kürü ile 200°C’de sıcaklık kürü uygulanan numunelerin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması Şekil 4.20’de gösterilmektedir. Yüksek sıcaklıkta kür uygulanması ile 90°C’de buhar kürü uygulanmasına göre kırılma enerjilerinde en fazla artış %21 ile X numunelerinde görülmüştür. Silis dumanının puzolonik özeliğinin etkisi sıcaklığın yükselmesi ile artmaktadır. Dolayısıyla yüksek sıcaklıkta kür görmüş numunelerde, buhar kürü görmüş numunelere göre daha yüksek lif-matris aderansı oluşmaktadır. Yüksek dayanımlı tellerin yüksek dayanımlı matriste daha iyi performans göstermesi ile X numunelerinin kırılma enerjilerinde meydana gelen artış diğer numunelere göre daha fazladır.



Şekil 4.20: RILEM kırılma enerjileri ortalama değerleri
(C= 200°C sıcaklıkta kür, S= 90°C sıcaklıkta buhar kürü, N= 20°C su kürü)

5. GENEL SONUÇLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

5.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- Betona çelik tel eklenmesi ve yüksek sıcaklıkta kür uygulanması, başta kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı olmak üzere, basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımlarında artışlar sağlamıştır. Bu artışlar karışımda kullanılan lif tipine göre değişmektedir.
- Yüksek sıcaklık kürü uygulanması ile dayanımlarda meydana gelen artışın, ince malzemesi yüksek olan betonda, yüksek sıcaklığın betonun mikro yapısını geliştirmesi ve bu gelişimin ince malzemede bulunan silisin yüksek sıcaklıkta aktif hale gelmesi ile oluştuğu düşünülmektedir.
- Yüksek sıcaklık etkisi ile mikro yapının gelişmesi, lif-matris aderansını arttırarak, liflerin matris içerisinde aktif olarak çalışmasını sağlar. Artan lif-matris aderansı ile betonun basınç dayanımında, çekme dayanımında, net eğilme dayanımında ve kırılma enerjilerinde büyük artışlar sağlanır.
- Yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde betona çelik tel eklenmesi ile küp basınç dayanımları en az %66, en fazla %94 oranında artmıştır. Normal kür uygulanan numunelerde ise çelik tel eklenmesi küp basınç dayanımını en az %29, en fazla %52 oranında arttırmıştır. Betona yüksek sıcaklık kürü uygulanması ile küp basınç dayanımlarında %21 ile %76 arasında artışlar elde edilmiştir.
- Yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde betona çelik tel eklenmesi ile silindir basınç dayanımları en az %7, en fazla %22 oranında artmıştır. Normal kür uygulanan numunelerde ise çelik tel eklenmesi silindir basınç dayanımını %12'ye kadar arttırmıştır. Betona yüksek sıcaklık kürü uygulanması ile silindir basınç dayanımlarında %11 ile %26 arasında artışlar elde edilmiştir.

- Betona elik lif eklenmesi ile genel olarak basıncı dayanımı artmaktadır, bu artışlar en fazla kısa kesilmiş elik lif kullanılan numunelerde görülmektedir. Narınlığı yüksek lif kullanılan Z numunesinde, lıfsız betona göre silindir basıncı dayanımlarının düştüğü görülmektedir.
- elik lif kullanılmasının ve yüksek sıcaklık kürünün numunelerin elastisite modülü değerlerine belirli bir etkisi görülmemiştir.
- Yüksek sıcaklık kürü uygulanan lıfsız numunelerde yarmada-çekme dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Bu durumun yüksek sıcaklık kürü etkisiyle beton içinde oluşan mikro çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Betonda lif kullanılması ile çatlak gelişimi engellendiğinden, yüksek sıcaklıkta kr uygulanan lifli numunelerde yarmada çekme dayanımlarında artış gözlenmektedir.
- Yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde betona elik lif eklenmesi ile yarmada çekme dayanımları en az 2,5 katına, en fazla 2,8 katına çıkmıştır. Normal kr uygulanan numunelerde ise elik lif eklenmesi yarmada çekme dayanımlarını en az %42, en fazla %79 oranında arttırmıştır.
- Yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde betona elik lif eklenmesi ile kırılma enerjilerinde en az 29 kat, en fazla 167 kat artış görülmüştür. Normal kr uygulanan numunelerde ise elik lif eklenmesi kırılma enerjilerini en az 32, en fazla 118 kat arttırmıştır. Betona yüksek sıcaklık kürü uygulanması ile kırılma enerjisinde en fazla artış %39 ile X numunelerinde görülmüştür.
- Betona elik lif eklenmesi ile kırılma enerjisinde meydana gelen artışlar elik lif tipine göre değişmektedir. Kırılma enerjisindeki en büyük artış yüksek dayanımlı elik liflerin kullanıldığı numunelerde, en az artış da kısa kesilmiş elik liflerin kullanıldığı numunelerde görülmüştür. Uzun lif kullanılan numunelerin yük-sehim eğrilerinin alçalan kısmının eğimi, kısa lif kullanılan numunelere göre daha azdır.
- Yüksek sıcaklık etkisi ile artan lif-matris aderansı nedeniyle ilk çatlaktan sonra da betonun şekildeğiştirmeye devam etmesi maksimum kırılma yükünü, dolayısıyla kırılma enerjilerini büyük oranda arttırmıştır.
- 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen maksimum kırılma yükünün dolayısıyla net eğilme dayanımlarının en büyük değeri, kısa lifler ile yüksek dayanımlı uzun liflerin karma olarak kullanıldığı numunelerde görülmüştür.

- Yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerde betona çelik lif eklenmesi ile net eğilme dayanımları en az 1,7 kat, en fazla 4,4 kat artmıştır. Normal kür uygulanan numunelerde ise çelik lif eklenmesi net eğilme dayanımları en az 2,1 katına, en fazla 3,4 katına çıkmıştır. Betona yüksek sıcaklık kürü uygulanması ile net eğilme dayanımında en fazla artış %30 ile OZ numunelerinde görülmüştür.
- Çelik lif kullanılması ile numunelerin net eğilme dayanımlarında, basınç ve yarmada çekme dayanımlarına göre daha büyük artışlar sağlanmıştır.
- Net eğilme dayanımlarından elde edilen sonuçların, yarmada çekme dayanımlarından elde edilen sonuçlara paralel olduğu görülmektedir.

5.2. İleri Çalışmalar

Yüksek performanslı betonlarda görülen en büyük sorunlardan biri otojen rötredir. Su/çimento oranı çok düşük, ince malzeme miktarı çok yüksek olan bu betonlarda, çimento hamuru hidrasyon için gerekli suyu, mikro boşluklardaki iç sudan elde etmektedir. Boşluk suyunun azalması ile mevcut boşluklar incelerek, menisklerin çapları küçülür. Bu durum çeperlere etkiyen çekme kuvvetlerinin etkisi ile betonda büzülmeye neden olur. Bu büzülme otojen rötire olarak tanımlanır. Otojen rötire inceliğin artması ve su/çimento oranının düşmesi ile artmaktadır. Erken yaşlarda çatlak oluşumuna sebep olan otojen rötrenin, üretilen betonlarda oluşumu araştırılmalıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıkta kür sebebiyle beton içerisinde olası termomekanik çatlakların meydana gelip gelmediği incelenmeli, geçirimsizlik deneyleri yapılmalıdır. Gecikmiş etrenjit oluşumunun (DEF) yüksek performanslı betonlarda meydana gelebileceği düşünülmektedir. DEF'in, çimento içinde geç çözünen sülfatların aşırı miktarlarda bulunması, betonda mikro çatlakların ve boşlukların olması, yapı elemanının sürekli veya tekrarlı olarak su ile temasının bulunması durumlarının aynı zamanda görülmesi ile oluştuğu düşünülmektedir [38]. Isıl işlem uygulanmasının ise DEF oluşumunu tetiklediği düşünülmektedir. Dolayısıyla, üretilen betonlarda DEF oluşumu araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. and Aitcin, P.,** 1997. Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes, *ACI Materials Journal*, **94**, 286-290.
- [2] **Bayramov, F., Aydemir T., İlki A. and Taşdemir M.A.,** 2004. An Optimum Design for Steel Fiber Reinforced Concretes Under Cycling Loading.
- [3] **Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F.,** 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ Dergisi*, **1**, 125-144.
- [4] **Cheyrezy, M., Maret, V. and Frouin, L.,** 1995. Microstructural Analysis of RPC, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1491-1500.
- [5] **Roux, N., Andrade, C. and Sanjuan, M.A.,** 1996. Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes, *Journal of Materials In Civil Engineering*, **8**, 1-7.
- [6] **Özyurt, N.,** 2000. Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Akman, M.S.,** 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul.
- [8] **Kocataşkın, F.,** 1991. Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi, *2.Ulusal Beton Kongresi*, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası, (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), sf. 211-226.
- [9] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar, A.Ş. ve Yerlikaya, M.,** 2005. Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı, *6. Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü, İstanbul, 16-18 Kasım, 33-43.
- [10] **Kmita, A.,** 2000. A New Generation of Concrete in Civil Engineering, *Journal of Materials Processing Technology*, **106**, 80-86.
- [11] **Richard, P. and Cheyrezy, M.,** 1995. Composition of Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1501-1511.
- [12] **Rossi, P.,** 2000. Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes, *Fifth RILEM Symposium on Fiber –Reinforced Concretes*, Lyon, France, 13-15 September.

- [13] **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.
- [14] **Balaguru, P.N. and Shah, S.P.,** 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, Inc, Singapore.
- [15] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N. ve Yerlikaya, M.,** Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler.
- [16] **Ma, J. and Schneider, H.,** 2002. Properties of Ultra High Performance Concrete, *LACER*, **7**, 25-32.
- [17] **Richard, P. and Cheyrezy, M.H.,** Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, Reactive Powder Concrete, BOUYGUES Corporation, France.
- [18] **Dugat, J., Roux, N. and Bernier, G.,** 1996. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, *Materials and Structures*, **29**, 233-240.
- [19] **Yeğinoğlu, A.,** 2005, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB/AR-GE Enstitüsü, Ankara.
- [20] **Goldman, A. and Bentur, A.,** 1993. The Influence of Strength Microfillers on Enhancement of Concrete Strength, *Cement and Concrete Research*, **23**, 962-972.
- [21] **Temiz, H. and Karakeçi, A.Y.,** 2002. An Investigation on Microstructure of Cement Paste Containing Fly Ash and Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, **32**, 1131-1132.
- [22] **Postacıoğlu, B.,** 1986. Beton, **1**, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [23] **Reda, M.M., Shrive, N.G., Gillott, J.E.,** 1999. Microstructural Investigation of Innovative UHPC, *Cement and Concrete Research*, **29**, 323-329.
- [24] **Kocatürk, N.A., Haberveren, S., Aslan, E.G. ve Taşdemir, M.A.,** 2005. Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, *6. Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü, İstanbul, 16-18 Kasım, 447-457.

- [25] **Walraven, J.**, 1999. The Evolution of Concrete, *Structural Concrete*, **P1**, 3-11.
- [26] **Long, G., Wang X. and Xie Y.**, 2002. Very- High Performance Concrete with Ultrafine Powders, *Cement and Concrete Research*, **32**, 601-605.
- [27] **Özyurt, N., İlki, A., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A.**, 2002. Mechanical Behavior of High Strength Steel Fiber Reinforced Concretes with Various Steel Fiber Contents, in *5th International Congress on Advances in Civil Engineering*, I.T.U, Istanbul, 25-27 September, **2**, 885-894.
- [28] **Chan, Y. and Chu, S.**, 2004. Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, **34**, 1167-1172.
- [29] **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.
- [30] **Gutiérrez, R.M., Diaz, L.N. and Delvasto, S.**, 2005. Effect of Pozzolons on The Performance of Fiber-Reinforced Mortars, *Cement and Concrete Composites*, **27**, 593-598.
- [31] **Fırat, M.T.**, 1996. Silis dumanı içeren yüksek mukavemetli betonların enerji yutma kapasitelerinin artırılmasında çelik lif kullanımının etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] **Wafa, F.F. and Ashour, S.A.**, 1992. Mechanical Properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, **89**, 449-455.
- [33] **Ekincioglu, Ö.**, 2003. Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı- bir optimum tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **Bayramov, F.**, 2004. Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [35] **Naaman, E.A. and Najm, H.**, 1991. Bond-Slip Mechanism of Steel Fibers in Concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, 135-145.
- [36] **Bayasi, Z. and Soroushian P.**, 1991. Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, 129-134.

- [37] **Uyan, M. ve Yıldırım, H.**, 1991. Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği, *2.Ulusal Beton Kongresi*, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası, (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), 262-279.
- [38] **Akman, M.S.**, 2003. Gecikmiş Etrenjit Oluşumu, *5.Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü, İstanbul, 1-3 Ekim, 9-15.
- [39] **Avar, D.**, 2006. Karma lifli betonların mekanik davranışına buhar kürü etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EKLER

EK A : K p Basıncı Dayanımları**Tablo A.1:** K p numunelerden elde edilen k p basıncı dayanımları

Numune Kodu	K�p Basıncı Dayanımı (MPa)	Ortalama
MN-1	101,0	87,3
MN-2	74,0	
MN-3	87,0	
MC-1	104,0	106,0
MC-2	108,0	
MC-3	99,0	
ON-1	119,0	116,3
ON-2	109,0	
ON-3	121,0	
OC-1	224,0	205,3
OC-2	210,0	
OC-3	182,0	
ZN-1	126,0	122,0
ZN-2	115,0	
ZN-3	125,0	
ZC-1	182,0	176,3
ZC-2	182,0	
ZC-3	165,0	
XN-1	107,0	112,3
XN-2	116,0	
XN-3	114,0	
XC-1	177,0	175,7
XC-2	168,0	
XC-3	182,0	
OZN-1	110,0	112,7
OZN-2	107,0	
OZN-3	121,0	
OZC-1	191,0	180,7
OZC-2	177,0	
OZC-3	174,0	

EK B: Silindir Basınç Dayanımları**Tablo B.1:** Silindir numunelerden elde edilen silindir basınç dayanımları

Numune Kodu	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama
MN-1	124,8	131,2
MN-2	137,6	
MC-1	145,2	145,2
ON-1	144,5	146,7
ON-2	149,0	
OC-1	175,1	177,0
OC-2	178,9	
ZN-1	115,3	113,4
ZN-2	111,5	
ZC-1	136,9	136,0
ZC-2	135,0	
XN-1	122,3	130,0
XN-2	137,6	
XC-1	161,1	156,4
XC-2	151,6	
OZN-1	144,6	143,7
OZN-2	142,7	
OZC-1	171,3	163,4
OZC-2	155,4	
OXN-1	138,9	133,2
OXN-2	127,4	
OXC-1	154,8	168,2
OXC-2	181,5	

EK C: Elastisite Modülü Değerleri**Tablo C.1:** Silindir numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri

Numune Kodu	Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama
MN-1	44,2	44,1
MN-2	44,0	
MC-1	41,5	41,5
ON-1	45,7	
ON-2	45,0	45,4
OC-1	38,2	
OC-2	45,6	45,6
ZN-1	41,6	
ZN-2	49,7	41,6
ZC-1	38,8	
ZC-2	34,7	38,8
XN-1	51,4	
XN-2	45,9	45,9
XC-1	41,3	
XC-2	35,3	41,3
OZN-1	68,4	
OZN-2	44,6	44,6
OZC-1	44,1	
OZC-2	25,5	44,1
OXN-1	48,1	
OXN-2	51,0	48,1
OXC-1	43,2	
OXC-2	44,7	43,9

EK D: Yarmada Çekme Dayanımları**Tablo D.1:** Disk numunelerden elde edilen 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	
MC-1	5,1	6,2
MC-2	4,5	
MC-3	5,6	
MC-4	6,4	
MC-5	6,5	
ON-1	11,1	12,4
ON-2	13,8	
OC-1	16,0	16,0
OC-2	15,9	
ZN-1	12,7	13,5
ZN-2	14,3	
ZN-3	12,6	
ZN-4	13,7	
ZN-5	10,3	
ZC-1	15,2	15,4
ZC-2	17,5	
ZC-3	13,4	
ZC-4	10,8	
ZC-5	12,4	
XN-1	14,8	15,6
XN-2	15,1	
XN-3	15,8	
XN-4	16,6	
XN-5	17,3	
XC-1	18,5	16,7
XC-2	15,7	
XC-3	14,6	
XC-4	17,4	
XC-5	15,1	
OZN-1	15,8	15,0
OZN-2	14,7	
OZN-3	14,1	
OZN-4	11,7	
OZN-5	15,4	
OZC-1	18,0	16,9
OZC-2	18,0	
OZC-3	14,7	
OZC-4	13,0	
OZC-5	10,5	
OXN-1	15,0	15,1
OXN-2	14,3	
OXN-3	16,4	
OXN-4	14,7	
OXN-5	12,7	
OXC-1	17,5	17,3
OXC-2	19,0	
OXC-3	16,1	
OXC-4	16,8	
OXC-5	17,6	

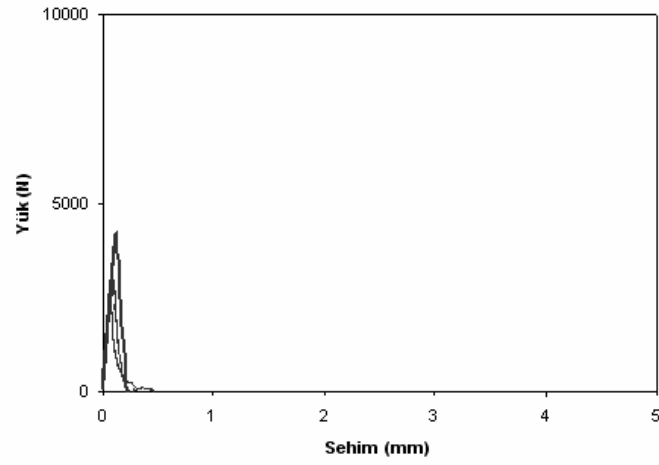
EK E: Net Eğilme Dayanımları**Tablo E.1: Prizma numunelerden elde edilen net eğilme dayanımları**

Numune Kodu	Eğilme Dayanımları (N/mm ²)	Ortalama
MN-1	11,3	11,4
MN-2	11,5	
MC-1	11,3	8,6
MC-2	6,6	
MC-3	7,9	
ON-1	23,8	23,8
OC-1	23,1	23,2
OC-2	21,9	
OC-3	22,8	
ZN-1	43,6	35,2
ZN-2	32,4	
ZN-3	38,0	
ZC-1	41,9	41,1
ZC-2	51,6	
ZC-3	40,8	
ZC-4	40,5	
XN-1	37,6	37,7
XN-2	28,7	
XN-3	38,8	
XN-4	36,8	
XC-1	42,0	42,0
XC-2	40,3	
XC-3	41,1	
XC-4	40,2	
OZN-1	23,4	28,1
OZN-2	25,7	
OZN-3	29,8	
OZN-4	33,7	
OZC-1	39,0	36,6
OZC-2	29,4	
OZC-3	31,7	
OZC-4	46,2	
OXN-1	28,1	38,5
OXN-2	37,7	
OXN-3	45,3	
OXN-4	32,4	
OXC-1	49,2	46,8
OXC-2	31,0	
OXC-3	36,3	
OXC-4	44,3	

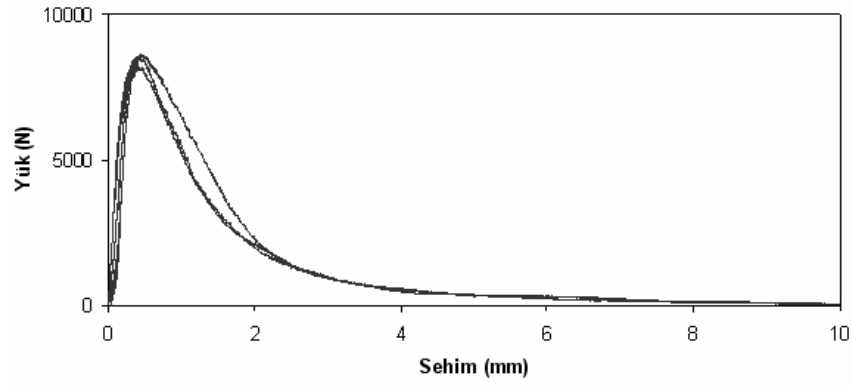
EK F: Kırılma Enerjisi Değerleri**Tablo F.1:** Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjileri

Numune Kodu	Kırılma Enerjileri (N/mm ²)	Ortalama
MN-1	181	181
MN-2	181	
MC-1	261	179
MC-2	174	
MC-3	186	
ON-1	6043	6043
OC-1	5421	5421
OC-2	4574	
OC-3	4826	
ZN-1	19979	14254
ZN-2	14254	
ZN-3	20298	
ZC-1	17498	17212
ZC-2	14861	
ZC-3	16926	
ZC-4	13635	
XN-1	21434	21617
XN-2	13359	
XN-3	23791	
XN-4	21800	
XC-1	30518	30169
XC-2	29820	
XC-3	25409	
XC-4	20044	
OZN-1	7223	8067
OZN-2	6234	
OZN-3	8518	
OZN-4	10293	
OZC-1	12772	11336
OZC-2	9223	
OZC-3	9308	
OZC-4	14042	
OXN-1	21184	19829
OXN-2	16383	
OXN-3	24124	
OXN-4	17625	
OXC-1	21084	20235
OXC-2	14086	
OXC-3	14646	
OXC-4	19387	

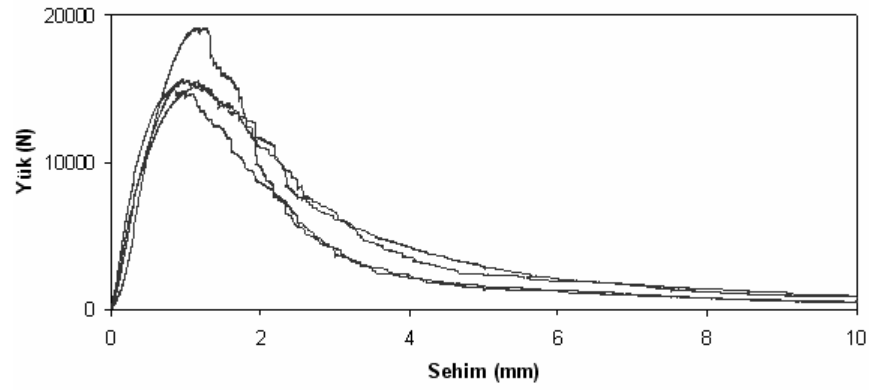
EK G: RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Yük-Sehim Grafikleri



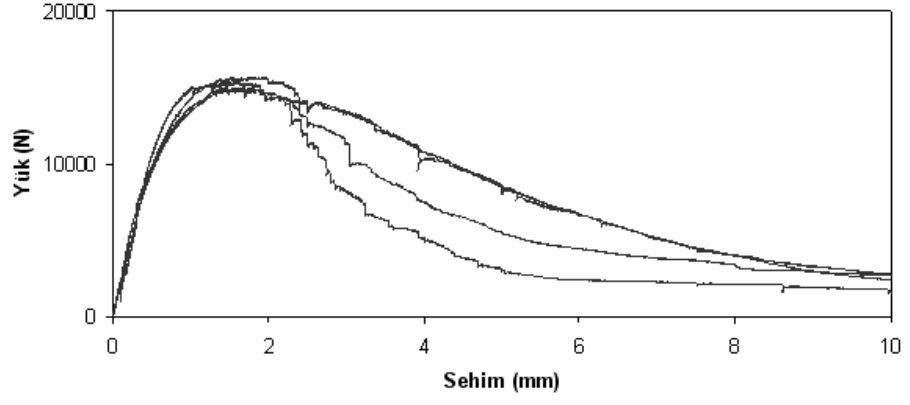
Şekil G.1: MC numunelerine ait yük-sehim grafikleri



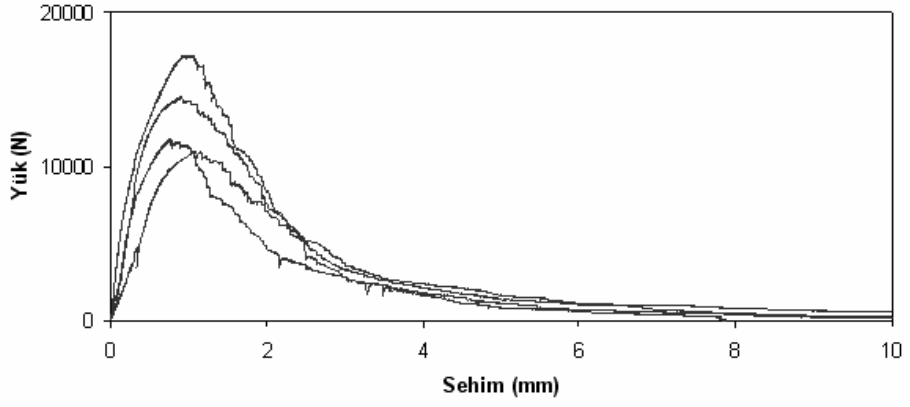
Şekil G.2: OC numunelerine ait yük-sehim grafikleri



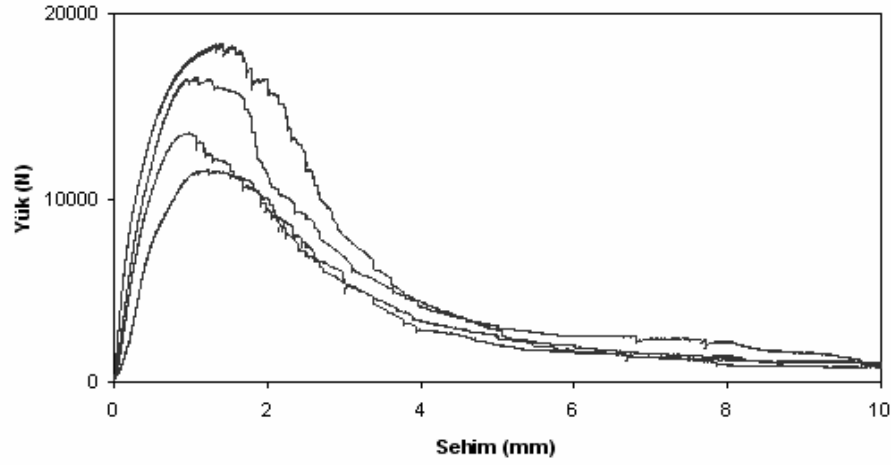
Şekil G.3: ZC numunelerine ait yük-sehim grafikleri



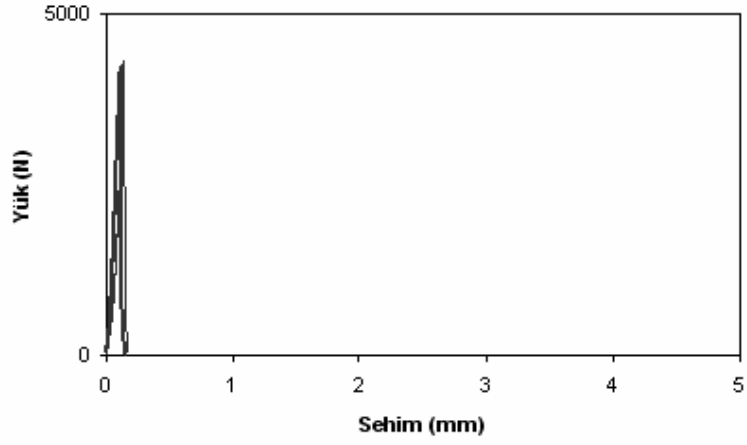
Şekil G.4: XC numunelerine ait yük-sehim grafikleri



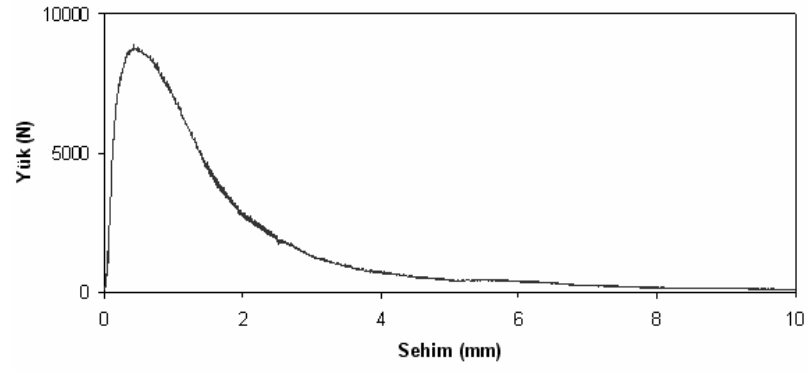
Şekil G.5: OZC numunelerine ait yük-sehim grafikleri



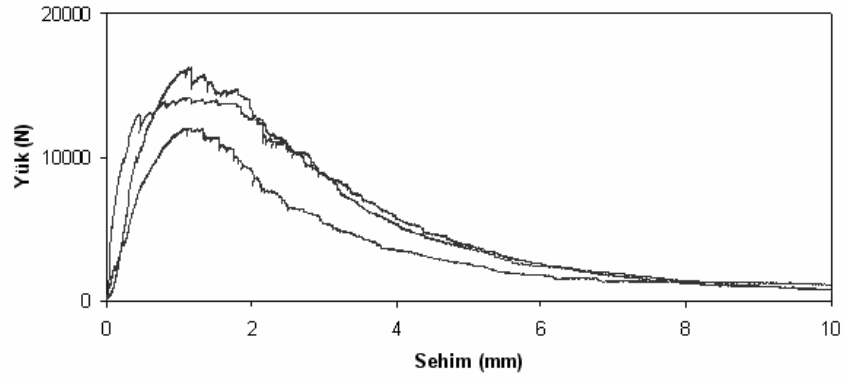
Şekil G.6: OXC numunelerine ait yük-sehim grafikleri



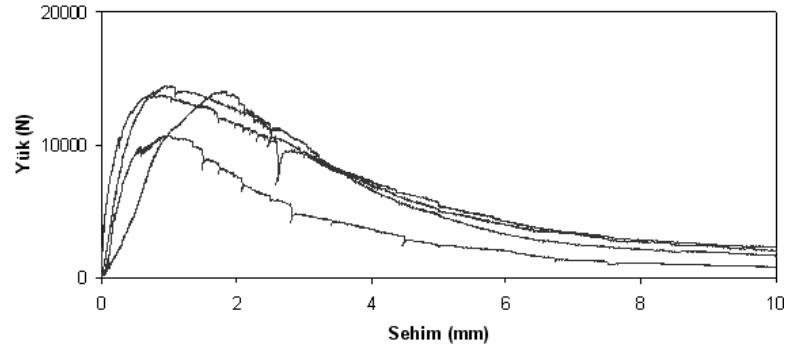
Şekil G.7: MN numunelerine ait yük-sehim grafikleri



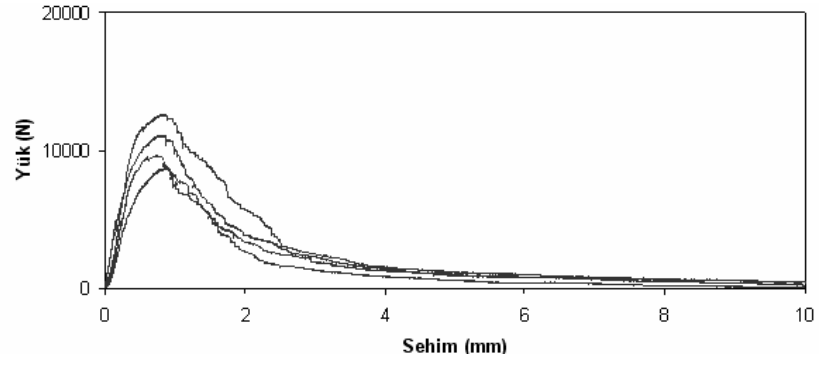
Şekil G.8: ON numunelerine ait yük-sehim grafikleri



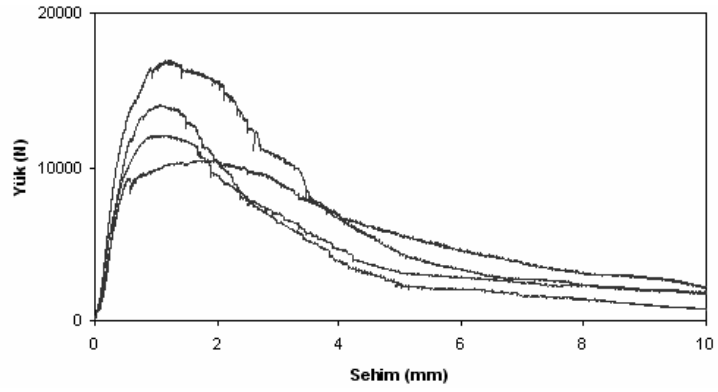
Şekil G.9: ZN numunelerine ait yük-sehim grafikleri



Şekil G.10: XN numunelerine ait yük-sehim grafikleri



Şekil G.11: OZN numunelerine ait yük-sehim grafikleri



Şekil G.12: OXN numunelerine ait yük-sehim grafikleri

EK H: Yapılan Deneylere Ait Fotoğraflar



Şekil H.1: Silindir basınç deney düzeneği



Şekil H.2: Yarmada çekme deney düzeneği



Şekil H.3: Normal kür uygulanan lifsiz numune



Şekil H.4: Yarmada çekme deneyi uygulanmış lifli numune



Şekil H.5: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış MC ve MN numuneleri



Şekil H.6: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış OC ve ON numuneleri



Şekil H.7: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış ZC ve ZN numuneleri



Şekil H.8: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış XC ve XN numuneleri



Şekil H.9: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış OZC ve OZN numuneleri



Şekil H.10: RILEM kırılma enerjisi deneyi uygulanmış OXC ve OXN numuneleri

ÖZGEÇMİŞ

Delal DOĞRU, 1982 yılında Tekirdağ'ın Çorlu ilçesinde doğdu. İlkokul eğitimini Çorlu Uncular Süleyman Peker İlkokulu'nda, ortaokul ve lise eğitimini İzmir Bornova Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2000 yılında İ.T.Ü İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 2000 yılında başladığı lisans öğrenimini 2004 yılında tamamladı. Aynı yıl İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.