

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN
MEKANİK DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Fatih ÖZALP

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI MÜHENDİSLİĞİ

AĞUSTOS 2006

**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN MEKANİK
DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Fatih ÖZALP
(501031183)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Ağustos 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ağustos 2006**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. M. Ali TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA (İTÜ)
Doç.Dr. Nabi YÜZER (YTÜ)**

AĞUSTOS 2006

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması esnasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR' e,

Deneyisel çalışmalarımda verdikleri destek ve yardımlar için İSTON A.Ş.'de bulunan tüm çalışma arkadaşlarıma, özellikle kalite laboratuvarı çalışanlarına,

Yine çalışmalarım süresince her anımda yanımda olan İSTON A.Ş. Kalite Güvence Kontrol ve Ar-Ge Müdürü Dr. Ali Necip KOCATÜRK' e,

teşekkür ederim.

Ağustos 2006

Fatih ÖZALP

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1. Normal Betonlar	4
2.2. Özel Betonlar	4
2.2.1. Yüksek Dayanımlı Betonlar	5
2.2.1. Çok Yüksek Dayanımlı Betonlar	5
2.2.2.1. Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar (MDF)	5
2.2.2.2. Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler (DSP)	6
2.2.2.3. Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton (SIFCON)	6
2.2.2.4. Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB)	7
2.3. Çelik lif, Isıl İşlem, Akışkanlaştırıcı ve Silis Dumanının Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	16
2.3.1. Lifin Betonda Kullanımı	16
2.3.1.1. Lifin Beton Özelliklerine Etkisi	18
2.3.1.1.1. Lif Miktarı, Lif Narinliği ve Lif Dağılımının Etkisi	18
2.3.1.1.2. Lif- Matris Aderansının Etkisi	19
2.3.1.1.3. Lifin Çekme gerilmesi	20
2.3.1.2. Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı	20
2.3.1.3. Karma Lifli Çimento Esaslı Kompozitler	21
2.3.2. Isıl İşlemin Beton Özelliklerine Etkisi	24
2.3.3. Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkileri	26
2.3.4. Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması	29
3.1.1. Çimento	29
3.1.2. Agrega	30
3.1.3. Silis Dumanı	31

3.1.4. Çelik Lifler	31
3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı	32
3.2. Beton Karışımları	32
3.3. Beton Üretimde İzlenen Sıra	32
3.4. Numune Boyutları ve Şekilleri	33
3.5. Kür Programı	33
3.6. Numune Kodlarının Belirlenmesi	34
3.7. Birim Ağırlık Deneyi	34
3.8. Sertleşmiş Beton Deneyleri	35
3.8.1. Küp Basınç Deneyi	35
3.8.2. Silindir Basınç Deneyi	35
3.8.3. Yarmada Çekme Deneyi	36
3.8.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneyleri	36
3.8.4.1. RILEM Kırılma Enerjilerinin Hesaplanması	37
3.8.4.2. RILEM Enerji Deneyinden Net Eğilme Dayanımı Hesaplanması	38
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ	43
4.1. Farklı Tipte Lif İçeren Normal Su Kürü İşlemi Uygulanmış Karışımların Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi	44
4.1.1. Çelik Lif Kullanımının Betona Etkisinin Değerlendirilmesi	44
4.1.1.1 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	44
4.1.1.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	44
4.1.1.3. Silindir Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	46
4.1.1.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	47
4.2. Farklı 3 Kür İşlemi Uygulanmış Değişik Tipte Lif İçeren Beton Karışımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi	49
4.2.1. Çelik Lif Kullanımının Betona Etkisinin Değerlendirilmesi	50
4.2.1.1 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	50
4.2.1.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	50
4.2.1.3. Silindir Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	52
4.2.1.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	53
4.2.2. Isıl İşlem Etkisinin Değerlendirilmesi	54
4.2.2.1 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	54

4.2.2.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	55
4.2.2.3. Silindir Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	57
4.2.2.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	58
4.3. Farklı 2 Kür İşlemine Tabi Tutulmuş Değişik Tipte Lif İçeren Beton Numunelerinin Küp Basınç Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	59
5. GENEL SONUÇLAR	64
5.1. Genel Sonuçlar	64
5.2. İleri Çalışmalar İçin Öneriler	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	71

KISALTMALAR

UYPB	: Ultra Yüksek Performanslı Beton
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
YPB	: Yüksek Performanslı Beton
RPB	: Reaktif Pudra Betonu-Reactive Powder Concrete
DSP	: Densified Small Particles-Yoğunlaştırılmış küçük parçacıklar
MDF	: Macro Defect Free-Büyük boşluklardan arındırılmış
SIFCON	: Slurry Infiltrated Fiber CONcrete- Çimento hamuru enjekte edilmiş lifli beton
S/B	: Su/Bağlayıcı
NDB	: Normal Dayanımlı Beton
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
TS	: Türk Standartları
MPa	: Mega Paskal
GPa	: Giga Paskal
PÇ	: Portland Çimentosu
SD	: Silis Dumanı
RILEM	: Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Tipik RPB bileşimleri (Ağırlıkça).....	9
Tablo 2.2 Normal beton, yüksek dayanımlı beton, UYPB' nin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	11
Tablo 2.3 RPB ile yüksek dayanımlı betonun fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	11
Tablo 3.1 Silis kumlarının elek analizi sonuçları.....	31
Tablo 3.2 Kullanılan liflerin teknik özellikleri.....	32
Tablo 3.3 Üretilen karışımlarda kullanılan lif türleri ve oranları.....	34
Tablo 3.4 Taze beton bileşimi ve özellikleri	35
Tablo 3.5 Sertleşmiş beton özellikleri.....	42
Tablo 4.1 Üretilen numunelerde kullanılan lif oranları ve ısıtım işlem türü.....	43
Tablo 4.2 Sertleşmiş beton özellikleri, Avar [36]	49
Tablo 4.3 Sertleşmiş beton özellikleri, Doğru [37].....	49
Tablo 4.4 Karışımlardaki malzeme bileşenleri (İSTON).....	60
Tablo 4.5 Küp basınç dayanımları (İSTON).....	62

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	1
Şekil 2.1 : Homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler.....	6
Şekil 2.2 : Normal harç ve tel donatılı RPB 200'ün eğilme davranışı.....	8
Şekil 2.3 : Normal harç, ÇTDB, ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun eğilme davranışı.....	12
Şekil 2.4 : Bağlı yoğunluk-su/bağlayıcı ilişkisi	14
Şekil 2.5 : Reaktif pudra betonlarında bağlı yoğunluk-dayanım ilişkisi.....	15
Şekil 2.6 : Farklı narinliğe (L/d) sahip çelik liflerle donatılmış betonların özgül kırılma enerjisinin (G_F), tel içeriği (V_f) ile değişimi.....	18
Şekil 2.7 : Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi.....	23
Şekil 2.8 : RPB'nin tekrarlı yükler altındaki davranışı.....	24
Şekil 3.1 : Numune boyutları ve şekilleri	33
Şekil 3.2 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.....	36
Şekil 3.3 : Veri toplama sistemi.....	37
Şekil 3.4 : Örnek bir yük-sehim eğrisi.....	38
Şekil 3.5 : Lif içermeyen su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	39
Şekil 3.6 : Hacimce % 3 oranında 6/16 ol lif içeren su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	39
Şekil 3.7 : Hacimce % 3 oranında zp305 lif içeren su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	40
Şekil 3.8 : Hacimce % 3 oranında zp305x lif içeren su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	40
Şekil 3.9 : Hacimce % 1.5 oranında 6/16 ol ve % 1.5 oranında zp305 içeren karma lifli su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	41
Şekil 3.10 : Hacimce % 1.5 oranında 6/16 ol ve % 1.5 oranında zp305x içeren karma lifli su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	41
Şekil 3.11 : Normal su kürü görmüş harç ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun eğilme davranışı karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.1 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait küp basınç dayanımı diyagramı.....	44
Şekil 4.2 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait silindir basınç dayanımı diyagramı.....	45
Şekil 4.3 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait elastisite modülü değerleri diyagramı.....	46

Şekil 4.4	: Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait silindir yarma dayanımı diyagramı.....	46
Şekil 4.5	: Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait kırılma enerjisi değerleri diyagramı.....	47
Şekil 4.6	: Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait net eğilme dayanımı değerleri diyagramı.....	48
Şekil 4.7	: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait küp basınç dayanımı diyagramı.....	50
Şekil 4.8	: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait silindir basınç dayanımı diyagramı.....	51
Şekil 4.9	: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait elastisite modülü diyagramı.....	52
Şekil 4.10	: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait silindir yarmada çekme dayanımı diyagramı.....	52
Şekil 4.11	: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait kırılma enerjileri diyagramı.....	53
Şekil 4.12	: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait net eğilme dayanımı diyagramı.....	54
Şekil 4.13	: Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıtma işlemi beton küp basınç dayanımına etkisi.....	55
Şekil 4.14	: Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıtma işlemin beton silindir basınç dayanımına etkisi.....	56
Şekil 4.15	: Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıtma işlemin beton elastisite modülüne etkisi.....	57
Şekil 4.16	: Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıtma işlemin betonun yarmada çekme dayanımına etkisi.....	57
Şekil 4.17	: Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıtma işlemin betonun kırılma enerjisine etkisi.....	58
Şekil 4.18	: Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıtma işlemin betonun net eğilme dayanımına etkisi.....	58
Şekil 4.19	: Uygulanan farklı ısıtma işlemlerin numunelerin basınç dayanımına etkisi.....	62

SEMBOL LİSTESİ

V_f	: Çelik lif hacmi
l_f	: Lif uzunluğu
d_f	: Lif çapı
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrate
d_0	: Kalıp alınması aşamasındaki beton yoğunluğu
d_s	: Sıkıştırılmış olduğu varsayılan taneli karışımın katı yoğunluğu
L/d	: Narinlik
G_F	: Özgül kırılma enerjisi
d_{maks}	: Maksimum tane boyutu
f_c	: Silindir basınç dayanımı
f_t	: Yarmada çekme dayanımı
P_{maks}	: 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_{etkin}	: Etkin kesit alanı
f_{fnet}	: Net eğilme dayanımı
I	: Mesnetler arası uzaklık
B	: Numune kesitinin genişliği
D	: Numune kesitinin yüksekliği
a_0	: Çatlak derinliği

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞI

ÖZET

Son on iki yıl boyunca, bazı araştırmacılar tarafından basınç dayanımı 200 MPa'ı aşan Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler (YPÇTDBlar) geliştirildi. Bu yüksek performanslı kompozitler üstün eğilme dayanımı ve yüksek süneklik sağlar. YPÇTDB'ler üstün darbe direnci özelliklerine sahip olduklarından uygulama alanları şöyle sıralanabilir; i) askeri yapılar, ii) depreme karşı stratejik yapılar, iii) betonarme yapıların güçlendirilmesi. Bunlar, küçük ve orta boy prefabrike elemanlar için de kullanılırlar.

Dayanım bakımından yüksek dayanımlı/yüksek performanslı betonlar şu şekilde sınıflandırılabilir; a) basınç dayanımı 60 MPa' a kadar olan normal dayanımlı betonlar, b) basınç dayanımları 60-90 MPa arasında olan yüksek dayanımlı betonlar, c) basınç dayanımları 90-130 MPa arasında olan çok yüksek dayanımlı betonlar, d) basınç dayanımları 200-800 MPa arasında olan reaktif pudra betonları, e) basınç dayanımları 55 MPa'dan büyük olan yüksek performanslı hafif betonlar.

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 yerdediştirilmesi, birebir hacim esasına göre yapıldı. Süperakışkanlaştırıcı, yaklaşık olarak aynı işlenebilirliğin sağlanabilmesi için, karışımlarda değişik miktarlarda kullanıldı.

Bütün numuneler, 48 saat sonra kalıptan çıkarıldı, sonra normal su kürü rejimi uygulandı. Bu kür rejimi, numunelerin 20°C'de kirece doymun kür havuzunda deney tarihine kadar tutulmasını öngörür.

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

eğrilerinin maksimum yük sonrası kısmında süneklik bakımından önemli etkileri vardır.

Yalın betonla karşılaştırıldığında, çelik tel donatılı kompozitlerin net eğilme dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve özellikle kırılma enerjisi ve süneklikleri önemli derecede geliştirildi. Yüksek dayanımlı çelik tel içeren betonların kırılma enerjisinde yalın betonunkine kıyasla 119 kata varan artış olurken, normal dayanımlı çelik lif içeren betonların kırılma enerjisinde yalın betonunkine kıyasla 79 kat artış oldu.

MECHANICAL BEHAVIOUR OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE

SUMMARY

Within the past twelve years, High Performance steel Fiber Reinforced Cementitious composites (HPFRCCs) which have compressive strength over 200 MPa have been developed by several researches. These high performance concretes allow remarkable flexural strength and very high ductility. Since 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. From the strength point of view, classification of high strength/high performance concretes can be made as; a) normal strength concrete up to grade 60 MPa, b) high strength concrete, grades 60-90 MPa, c) very high strength concrete, grades 90-130 MPa, d) reactive powder concrete, grades 200-800 MPa, and e) high performance lightweight concrete, greater than 55 MPa.

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 the mechanical and fracture properties of the composites. The short ones without hooked ends were straight high strength steel fibers coated with brass, 6 mm in length and 0.16 mm in diameter. The tensile strength of normal and high strengths of steel fibers were 1150 MPa and 2250 MPa, respectively, but their aspect ratios were the same ($l/d=55$) in the mixtures. The volume fraction of each steel fiber was variable, but the total volume fraction of fibers were kept constant at 3%. The mixture proportions of the matrix were as follows; cement: silica fume: water: silicious sand (0.5-2 mm): silicious powder (0-0.5 mm): superplasticizer = 1: 0.250: 0.114: 0.325: 0.493: 0.120. Water-binder ratio was kept constant at 0.17. Partial replacement of aggregate by steel fiber was based on one to one volume basis. A superplasticizer was used for all mixtures, the amount being varied to maintain approximately the same workability. All specimens were demolded after 48 hours, then the normal water regime was used. This curing regime involved standard water curing in a water tank saturated with lime at 20°C prior to testing.

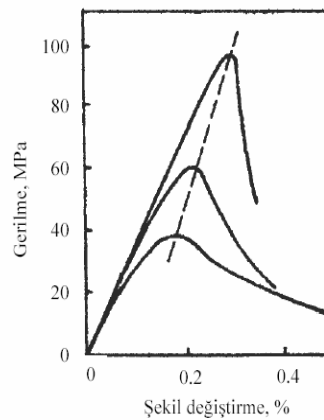
It can be concluded that the compressive strengths, elastic moduli, net bending strengths, splitting tensile strengths and fracture energies of high performance concretes with and/or without hybrid steel fibers were compared those of plain concrete. Short fibers function as a bridge to eliminate the 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 79 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 119 times.

1.GİRİŞ

Yapı malzemesi olarak beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin kullanılmasıyla üretilen kompozit bir malzemedir. Üretiminin kolaylığı, istenilen şeklin verilebilmesi, donatı için pasif bir ortam sağlaması, yüksek basınç dayanımı ve ekonomik olması nedeniyle beton; günümüzde vazgeçilmez bir yapı malzemesi konumundadır. Hem betonarme hem de çelik yapı sistemlerinde betonun kullanılmadığı alan sınırlıdır. Beton teknolojisi ise bu yoğun talep karşısında sürekli bir gelişim içerisinde. 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15-25 MPa civarında iken 1970'li yıllarda yüksek katlı yapılarda kolon yüklerinin temele taşınabilmesi için 40-50 MPa beton basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Zaman içerisinde dayanımları artan bu betonlara yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman yapısı vb. uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [1]. Ancak son yıllarda betonda yüksek performans, sadece yüksek dayanımla değil betonun durabilite ve süneklik özelliklerindeki dayanımla birlikte değerlendirilmesi olarak ortaya çıkmıştır. Dayanımı artırılmış beton veya bilinen adıyla yüksek dayanımlı beton geçirimsiz olması sebebiyle durabilitesi de yüksek betondur. Bu betonda dayanım arttıkça ortaya çıkan önemli bir problem ise gevrekliktir. Şekil 1.1 bu durumu göstermektedir.



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

Yüksek dayanımlı betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Şekil 1.1. elastisite modülündeki bağıl artışın basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğunu da göstermektedir[2]. Böylece, betonda meydana gelen gevreklik problemini çözmek ve betonun çekme dayanımını artırmak amaçlı YDB' lerden farklı olarak yüksek dayanım, yüksek durabilite özelliklerinin dışında yüksek süneklik özeliğine sahip betonlara gereksinim duyulmuştur.

Ultra yüksek performanslı betonlar yüksek dayanım, yüksek durabilite ve yüksek süneklik özellikleriyle tanımlanabilen malzemelerdir. Normal betondan farklı olarak yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar, ince agrega, silis dumanı ve çelik lif kullanımıyla elde edilirler. Yüksek dayanımlı betonlardan ayrılmalarını sağlayan en önemli etken ise sünek davranış göstermeleridir. Bu süneklik özelliği sayesinde geleneksel betonlara göre çok yüksek enerji yutma kapasitesine sahiptirler. Karışımda maksimum doluluk oranına ulaşmak ve tane optimizasyonunu sağlamak amacıyla dayanımı çok yüksek silis kumu ve pudrası kullanılır. Süperakışkanlaştırıcıların kullanılması ile betonda işlenebilme için gerekli su miktarı minimize edilmiş ve boşluklar azaltılmış olur. Çelik liflerin ilavesi ise mikro düzeyde çatlak kontrolü ve süneklik için gereklidir. Son olarak bu yolla üretilmiş betonlara ısıtma işlemi uygulanarak silis dumanının aktivite edilmesi sağlanır. Bütün bu işlemlerden sonra agrega-çimento hamuru temas yüzeyi güçlendirilerek geçirimsiz bir beton elde edilir.

Ultra yüksek performanslı betonlarla ilgili ilk çalışmalar P. Richard ve M. Cheyrezy [3] tarafından yapılmıştır. Silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı katkı, ince agrega ve çelik lif ilavesiyle üretilen betonlara farklı sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulanarak basınç dayanımları 200 MPa' dan 800 MPa' a ulaşabilecek betonların elde edilebileceğini göstermişlerdir. Yine çelik lif donatılı betonların yalın olanlara göre çok daha yüksek sünekliğe, dolayısıyla enerji yutma kapasitesine sahip olduklarını ayrıca numunelerin üretilmesi esnasında uygulanacak 50 MPa'lık bir basınç ile hem yoğunluğun arttığını hem de numune kalıbının belirli noktasına açılmış küçük delikler sayesinde kalıbın dış yüzeyine sarılmış filtre görevi üstlenen süzgeçten fazla suyun dışarı atıldığını ve böylelikle de dayanımın arttığını göstermişlerdir.

Bonneau ve arkadaşları [4], 300 defa donma-çözünme çevrimine tabii tutulan reaktif pudra betonunun (RPC) dayanıklılığında azalmaya rastlamamışlardır. Cheyrezy ve arkadaşları [5], reaktif pudra betonuna civalı porozimetri deneyi uygulayarak porozitenin %9'u geçmediğini gözlemlemişlerdir. Roux ve arkadaşları [6] ise, RPC 200'ün (reaktif pudra betonu 200) geleneksel betona göre 50 kat daha düşük bir yayılım katsayısı ve çok düşük su emme değerine sahip olduğunu böylelikle de çok daha yoğun ve geçirimsiz bir malzeme olduğunu tespit etmişlerdir.

Ayrıca, çalışmada tane optimizasyonunu sağlamak ve karışımı büyük boşluklarından arındırmak amaçlı en büyük tane boyutu 2 mm olan silis kumu, su/ bağlayıcı oranını minimize ederek basınç dayanımını artırmak amaçlı süperakışkanlaştırıcı ve yine çimento taneleri arası boşlukları doldurmak ve yüksek sıcaklıklarda puzolanik özelliklerinden yararlanmak amaçlı silis dumanı kullanılmıştır.

Bu çalışmada ultra yüksek performanslı çelik tel donatılı betonların mekanik davranışı incelenmiştir. Mezo ve makro lifler, tekil ve değişik kombinasyonlarıyla toplam % 3' lük bir hacimde UYPB' lerin üretiminde kullanılmıştır. Bu şekilde biri referans (çelik lif içermeyen) olmak üzere altı farklı üretim gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Beton, çimento, su, agrega ve bazen de katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup şekil verilebilen, zamanla katılaşp sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir[7].

150 yılı aşkın bir süredir beton insanoğlunun beklenti ve ihtiyaçları doğrultusunda sürekli bir değişim ve gelişim göstermiştir. Bu süreç içerisinde farklı beklentilere yönelik birçok beton sınıfı ve çeşidi ortaya çıkmıştır. Ancak, betonları en genel şekliyle iki sınıfa ayırmak mümkündür.

1. Normal Betonlar

2. Özel Betonlar

2.1. Normal Betonlar

Normal betonlar üretiminin kolay olması, ucuz hammadde ve işgücü temini ile ekonomik olarak üretilebilen betonlardır. Basınç dayanımları 20 MPa ile 50 MPa arasındadır. Yol, bina, köprü ve tünel gibi bir çok yapıda kullanılırlar. Bu betonları yüksek performanslı betonlardan ayıran temel özellik ise çekme dayanımlarının çok düşük olmasıdır. Yapı sektöründe ekonominin önemi göz önünde tutulduğunda bu betonların uygulamada her zaman bir yeri olacağı kolaylıkla söylenebilir.

2.2. Özel Betonlar

Özel betonlar; normal betonların fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerinde amaca uygun olarak iyileştirme yapılması ile elde edilmiş betonlardır. Bunlara yüksek dayanımlı betonlar, mineral katkılı betonlar, geciktiricili veya hızlandırıcılı betonlar, kendiliğinden yerleşen beton ve harçlar, hafif beton, polipropilen ve çelik tel takviyeli betonlar, püskürtme beton örnek olarak verilebilir.

2.2.1. Yüksek Dayanımlı Betonlar

Erken yüksek dayanım ve 28 günde çok yüksek basınç dayanımı göstermesi, yüksek dayanımlı betonun ana özellikleridir. Basınç dayanımının yanı sıra durabilitesi de yüksek olan bu tip betonlar, özellikle uzun servis ömrü gerektiren yapılarda tercih edilir. Yüksek dayanımlı beton tasarımı, su/çimento oranını minimize edilerek yapılır. Yüksek dayanımlı betonun tasarımında hedef, betonu oluşturan malzemeler arasında oluşabilecek boşlukları en aza indirmektedir. Düşük su/çimento oranı sayesinde düşük porozite ve yüksek durabilite elde edilmektedir. Yüksek dayanımlı beton, coğrafi, iklimsel ve kimyasal çevrenin zorlayıcı olduğu durumlarda; yüksek dayanımın ve yapının toplam ağırlığının önem kazandığı yapılarda tercih edilmektedir. Genel olarak; bayındırlık işlerinde, köprü viyadük vb. yüksek dayanım gerektiren bina ve zeminlerde, yol yapımında özellikle de trafiğe çabuk açılması amacıyla, yer altı çalışmalarında, prefabrikasyonlarda, sürekli su ile temas halindeki yapılarda; baraj, liman vb. zorlu çevre şartlarına maruz kalan yapılarda kullanılmaktadır[8].

2.2.2. Çok Yüksek Dayanımlı Betonlar

Son yıllarda yapılan çalışmalarla birlikte her geçen gün bir öncekinden daha yüksek performans özelliklerine sahip betonlar geliştirilmiştir. Bu betonları yeni çimento esaslı kompozitler olarak adlandırabiliriz. Bunlardan başlıcaları büyük boşluklarından arındırılmış (MDF), homojen dağılılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP), çimento bulamacı enjekte edilmiş lif donatılı beton (SİFCON) ve ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonlardır (UYPB).

2.2.2.1 Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar (MDF)

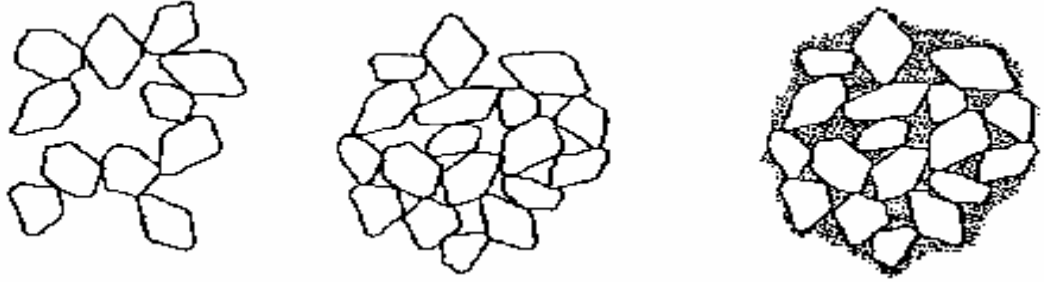
MDF polimer hamurların üretiminde ana fikir çimento hamurunun yoğunluğunun dolayısıyla dayanımının artırılmasıdır. MDF üretiminde kullanılan suda çözünebilen bir polimer olan hidroksipropilmetil selüloz veya hidrolize polivinilasetat, çimento hamuru süspansiyonu içerisinde dağılır ve buradaki çimento tanelerinin hareketini kolaylaştırır. Yerleşme ve sertleşme sırasında, çimento hidrate olurken, polimer dehidrate olur. Sertleşmiş malzemede polimer, çimento tanelerine sağlam bir şekilde bağlanır ve sonuçta malzemenin porozitesi yaklaşık olarak hacmin %1' i kadar olur.

MDF hamurları kalıplanabilir, püskürtülebilir veya plastikler gibi haddelenebilir. Bu hamurlar özellikle alüminli çimentolarla karıştırıldıklarında çok yüksek çekme

dayanımına (150 MPa veya daha büyük) sahip olurlar. MDF hamurlarına kum, metalik pudra ve lif ilavesiyle aşınmaya karşı dayanımı ve tokluğu artırılmış kompozit malzemeler elde edilir[9].

2.2.2.2. Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler (DSP)

Çimento malzemelerin bu yeni sınıfı Danimarka’ da ki Aalborg Portland çimento fabrikası tarafından üretilmiştir. Şekil 2.1’ de gösterildiği gibi DSP bağlayıcılar çimento taneleri arasında kalan boşluklarda homojen olarak dağıtılan ultra incelikteki silis dumanını içerirler. Mümkün olan en yoğun dizilişi elde etmek için, karıştırma ve döküm sırasında çimento ve silis dumanının topaklanmasını önlemek için süperakışkanlaştırıcılar kullanılır. Bu DSP esaslı kompozitler Densit adı altında söz konusu firma tarafından uygulayıcılara sunulmaktadır. 16 mm’lik kırılmış granit agregasına sahip normal DSP’nin basınç dayanımı yaklaşık 130 MPa’ dır. Eğer kalsine olmuş boksit gibi dayanımı yüksek agregalar kullanılırsa basınç dayanımı 270 MPa’ a kadar ulaşabilir. DSP esaslı malzemeler çok gevrek olup normal Portland çimentosu hamurundan daha gevrektr[2].



Çimento Hamuru

Süperakışkanlaştırıcı çimento hamuru

DSP hamuru

Şekil 2.1 : Homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler

2.2.2.3. Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton (SIFCON)

SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete); çimento, silis dumanı, çok ince kum, süperakışkanlaştırıcı ve sudan oluşan bir bulamacın önceden kalıplara konmuş çelik liflerin içine enjekte edilmesiyle sağlanır. Matris harcı, liflerin arasına rahatça girebilecek şekilde tasarlanarak dayanım ve durabiliteyi düşüren boşlukların oluşması önlenir. Çelik lif takviyeli betonlarda genel olarak lif oranı hacimce % 2

iken SIFCON' da bu oran hacimce % 20' lere kadar ulaşabilir. Böylece, SIFCON çelik tel ilaveli betonlardan çok daha yüksek bir sünekliğe sahiptir.

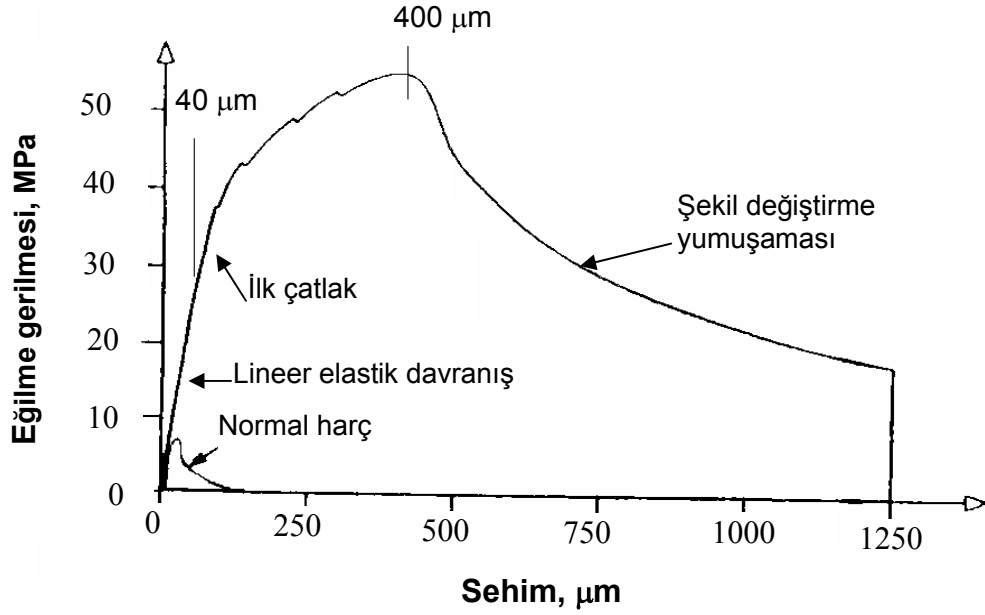
SIFCON, betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi, patlayıcı malzemelerin saklanması, nükleer atıkların depolanması, prekast ürünlerde, sıcaklığa dayanıklılık gerektiren uygulamalarda ve stratejik yapılarda kullanılabilir[10].

2.2.2.4. Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB)

Ultra-Yüksek-Performanslı Beton (UYPB), 150 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımı ve üstün durabilite özellikleriyle çimento esaslı kompozitlerin yeni bir tipidir. Beton özelliklerin iyileştirilmesi için temel ilke, agrega-matris ara yüzeyinde iyi bir yapışma ve mümkün olan en yoğun matrisin elde edilmesidir. Kendiliğinden yerleşen UYPB ile basınç dayanımı 155 MPa olan bir silindir, sıcak kür veya başka hiçbir özel işlem yapılmadan üretilebilir[11].

Reaktif pudra betonunda en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında şekil değiştirme sertleşmesi sergilenmektedir. Bu da yüksek performansın tipik bir göstergesidir.

Şekil 2.2, normal bir harcın ve RPB 200'ün (basınç dayanımı 200 MPa) basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Reaktif pudra betonunun büyük bir Şekil değiştirme sertleşmesi sergilediği görülmektedir. Eğilme dayanımı ilk çatlama gerilmenin iki katı kadar yüksektir. Maksimum gerilmedeki deplasman ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha büyüktür[12].



Şekil 2.2 : Normal harç ve tel donatılı RPB 200'ün eğilme davranışı.

1930'lu yıllar boyunca Eugene Freyssinet [13], betonun dayanımının artırılması için taze betona sertleşme sürecinde basınç uygulanmasının üstünlük sağladığını göstermiştir.

1960'lı yıllar boyunca 650 MPa basınç değerine sıcak kür ve basınç sayesinde ulaşılmıştır[14].

Betonun sıcak kür edilmesi, bileşenleri ve karışımıyla ilişkili belirli sayıda temel ilkelerin uygulanmasıyla ultra yüksek performanslı reaktif pudra betonu (RPB) elde edilir.

RPB araştırma programı, aşağıdaki ilkelerin uygulanmasıyla yürütülmüştür[3].

- Kaba agregaların çıkartılması ile homojenliğin artırılması,
- Sertleşme süreci ve öncesinde basınç uygulanması ve taneli karışımın optimize edilmesi ile sıkışmış yoğunluğun artırılması,
- Sıcak kür etkisiyle hızlı sertleşme ve mikro yapının iyileştirilmesi,
- Küçük boyutta çelik tellerin katılmasıyla sünekliğin artırılması,
- Karıştırma ve döküm işlemlerinin bilinen tekniklerle mümkün olanın en iyisinin yapılması.

İlk üç ilkenin uygulanması ile çok yüksek basınç dayanımlı bir matris üretilmesine rağmen süneklik normal betonlardan daha iyi değildir. Tellerin katılması ile çekme dayanımı artarken süneklik de istenilen seviyeye gelmiş olur[3].

RPB 200 betonların üretim aşamasında ön basınç tekniği kullanılmaz ve bu betonların üretimi geleneksel yüksek performanslı betonların üretimi ile benzerlik gösterir. RPB 200; çimento, ince kum, silis dumanı, çelik lif ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak üretilir ve üretim sonrasında betona 90°C’de ısıtma işlemi uygulanır[3].

RPB 200 ve RPB 800 ’ün bazı tipik bileşenleri Tablo 2 de verilmiştir[3].

Tablo 2.1: Tipik RPB bileşenleri (Ağırlıkça)

	RPB 200		RPB 800	
	Lifsiz	Lifli	Silisli Agregalar	Çelik Agregalar
Portland Çimentosu	1	1	1	1
Silis Dumanı	0,23	0,23	0,23	0,23
Kum 150-600 μm	1,1	1,1	0,5	-
Kırılmış Kuvars $d_{50}=10 \mu\text{m}$	0,39	0,39	0,39	0,39
Süper Akışkanlaştırıcı (Polyacrylate)	0,019	0,019	0,019	0,019
Çelik Tel L = 12 mm	-	0,175	-	-
Çelik Tel L = 3 mm	-	-	0,63	0,63
Çelik agregalar < 800 μm	-	-	-	1,49
Toplam Su	0,17	0,19	0,19	0,19
Sıkıştırma Basıncı	-	-	50 MPa	50 MPa
Uygulanan Kür Sıcaklığı	20-90°C	20-90°C	250-400°C	250-400°C

RPB 200 ve RPB 800 betonlara uygulanan işlemler ve bunların mekanik sonuçlara etkisi aşağıda gösterilmiştir.

RPB 200

- Ön sertleşme basıncı Yok
- Sıcak kür 20 °C - 90 °C
- Basınç dayanımı 170 MPa - 230 MPa
- Eğilme dayanımı 30 MPa - 60 MPa
- Kırılma enerjisi 20000 J. m⁻² - 40000 J. m⁻²
- Son deformasyon 5000 x 10⁻⁶ m.m⁻¹ - 7000 x 10⁻⁶ m.m⁻¹
- Elastisite modülü 50 GPa - 60 GPa arasında değişmektedir.

90 °C sıcaklık kürde ve aynı karışıma sahip 75 örnek serisinde basınç gerilmesi 7,5 MPa standart sapma ile 210 MPa'a ulaşılmıştır.

RPB 800

- Ön sertleşme basıncı 50 MPa
- Sıcak kür 250 °C - 400 °C
- Basınç dayanımı
Kuartz kum kullanılması ile 490 MPa - 680 MPa
Çelik agrega kullanılması ile 650 MPa - 810 MPa
- Eğilme dayanımı 45 MPa - 141 MPa
- Kırılma enerjisi 1200 J. m⁻² - 20000 J. m⁻²
- Son deformasyon 5000 x 10⁻⁶ m.m⁻¹ - 7000 x 10⁻⁶ m.m⁻¹
- Elastisite modülü 65 GPa - 75 GPa arasında değişmektedir.

Normal ve yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırıldıklarında UYPB' lerin mekanik özelliklerinin diğer betonlardan çok üstün olduğu Tablo 2.2' de görülmektedir. Tablo 2.3' de ise UYPB ile Normal dayanımlı betonun fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

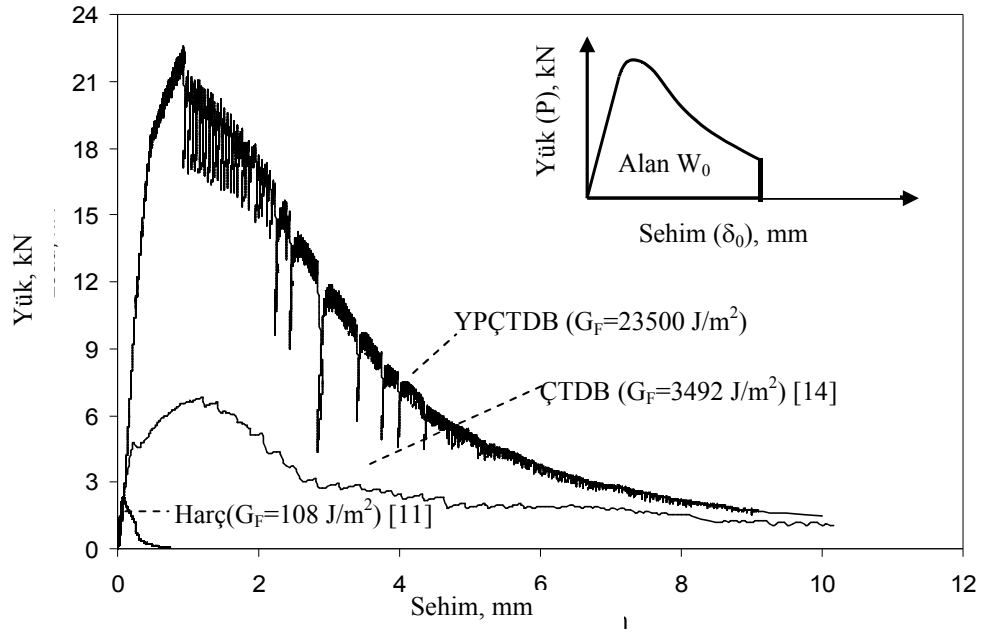
Tablo 2.2: Normal beton, yüksek dayanımlı beton, UYPB’ nin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması[9].

Mekanik Özellik	Normal Beton	YDB	UYPB
Basınç Dayanımı (MPa)	20-50	60-80	200-800
Eğilme Dayanımı (MPa)	4-8	6-10	15-140
Kırılma Enerjisi (J/m ²)	130	140	1000-40000
Çekme Şekil Değ. Kapasitesi (10 ⁻⁶)	100-150	100-150	2000-8000
Elastisite Modülü (GPa)	20-30	35-40	60-75

Tablo 2.3: RPB ile yüksek dayanımlı betonun fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması[12].

Özellik	Normal betona göre
Aşınma Kapasitesi	2.5 kat az
Su Emmesi	7 kat az
Korozyon Hızı	8 kat az
Klorür İyonu Difüzyonu	25 kat az

Tablo 2.2. incelendiğinde UYPB’ lerin en önemli özelliğinin yüksek enerji yutma kapasitesi olduğu görülür. Karışıma eklenen çelik lifler sayesinde malzeme çok daha sünek bir davranış sergilemekte ve bunun sonucu olarak ta daha fazla enerji yutarak kırılmaktadır. Şekil 2.3’ de UYPB, ÇTDB ve Normal harcın kırılması karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzerine UYPB normal harca göre daha uzun sürede ve çok daha büyük şekil değiştirme yaparak kırılmakta, böylelikle normal harca göre çok daha fazla enerji yutmaktadır.



Şekil 2.3 : Normal harç, ÇTDB, ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun eğilme davranışı[12].

RPB araştırmalarında aşağıdaki bulgular ve sonuçlar ortaya konulmuştur[3].

1. Homojenlikle ilgili problemler aşağıdaki uygulamalarla RPB’ de azaltılmıştır.

- Kaba agreganın çıkartılarak yerine ince kum (Maks. 600 μm) konması.
- Agregam/matris oranının düşürülmesi.

1.1. Agregam boyut etkisi

Normal beton agregaları sert bir yapıya sahiptir. Basınç kuvvetinin uygulanması, çimento hamuru-agrega ara yüzeyinde kesme ve çekme gerilmelerine böylelikle de çimento hamurunda çatlakların oluşmasına neden olur. Bu çatlakların boyutu çekme veya kesme gerilmeleri altındaki şekil değiştirmesiyle ilgilidir. Küresel boşluklar durumunda çevresel çatlak boyu boşluğun çapıyla doğru orantılıdır. RPB için kaba agregam boyutundaki (örneğin 20 mm yerine 400 μm) yaklaşık 50 katlık bir azalma ile mikro çatlaklarda büyük bir düşüş elde edilir. Betonda genel olarak çatlak aşağıda belirtilen nedenlerle oluşur.

- Mekanik etkenler (dış yükler),
- Kimyasal etkenler (kendiliğinden oluşan büzülme),
- Isıl-mekanik etkenler (sıcak kür etkisi altında çimento hamuru ve agregası arasında farklı genleşme)

1.2. Sınırlandırılmış kum içeriğinin etkisi

Yukarıda söz edilen etkiler, agregası boyutlarıyla ilgilidir ve kütle etkileri olarak tanımlanabilir. Kum içeriğinin azaltılması daha büyük bir etkiyi temsil eder.

Normal bir betonda agregalar (kum, çakıl) sıkı taneli iskelet elemanları olup hacimsel açıdan büyük bileşenlerdir. Bunun anlamı çimento hamuru büzülmesinin küçük bir oranı taneli iskelet tarafından engellenir ve sonuçta boşluklar artar.

Bu RPB' de ise pastanın hacmi sıkıştırılmamış kum içeriğinden en az % 20 daha fazladır. Böylece agregalar sıkı bir iskelet oluşturmazlar. Ancak, sürekli matris içerisinde sıkı bir diziliş oluştururlar. Çimento hamuru büzülmesi her agregası parçası tarafından bölgesel olarak engellenir.

2. Taneli karışımın optimizasyonu

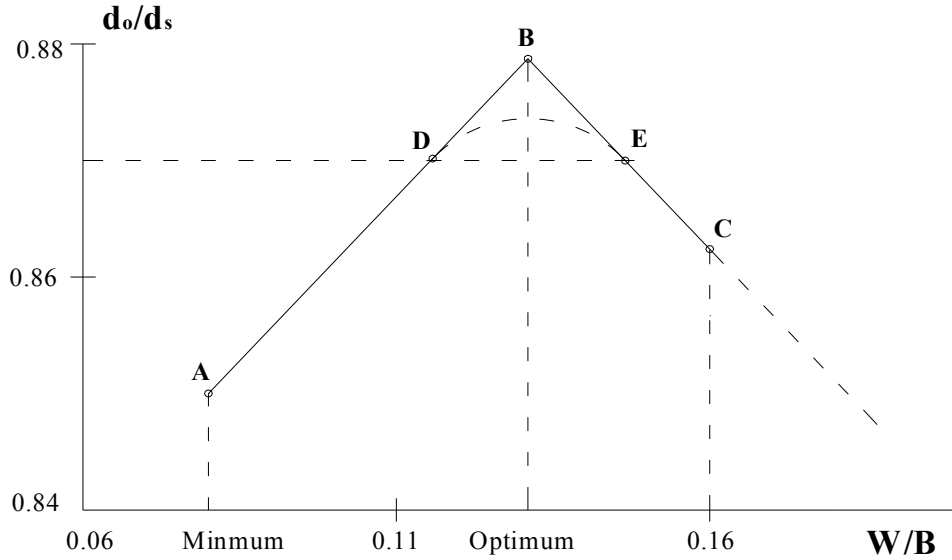
Taneli karışımın optimizasyonu paket modeller kullanılarak başarılabılır[3].

RPB'nin karışım dizaynı için aşağıdaki prensipler temel alınarak deneysel bir metot hazırlanmıştır[3].

- Karışımına giren tane sınıfları sayısı, her sınıf kendi içerisinde sıkı bir yapı oluşturacak şekilde elde edilmiştir.
- Agregalar ard arda gelen iki tane sınıfı için ortalama çap d_{50} arasında yüksek bir oran (>13) seçilerek sınıflara ayrılmıştır.
- Süperakışkanlaştırıcı/çimento için optimum oran reolojik analizler yardımıyla belirlenmiştir.
- İnce pudralar tane boyutu en küçük olanlardan seçilmiştir.

Karışımın kalitesini belirleyen ana parametre su ihtiyacıdır. Bu akışkanlaştırmak için pudraya eklenmesi gereken minimum su oranı şeklinde tanımlanır. En sıkı yapılı karışım için minimum su/bağlayıcı oranı 0,08' dir. Bağlayıcı, çimento ve silis dumanını içerir. Taneli karışımın optimizasyonu ile su ihtiyacı arasındaki bağıntının

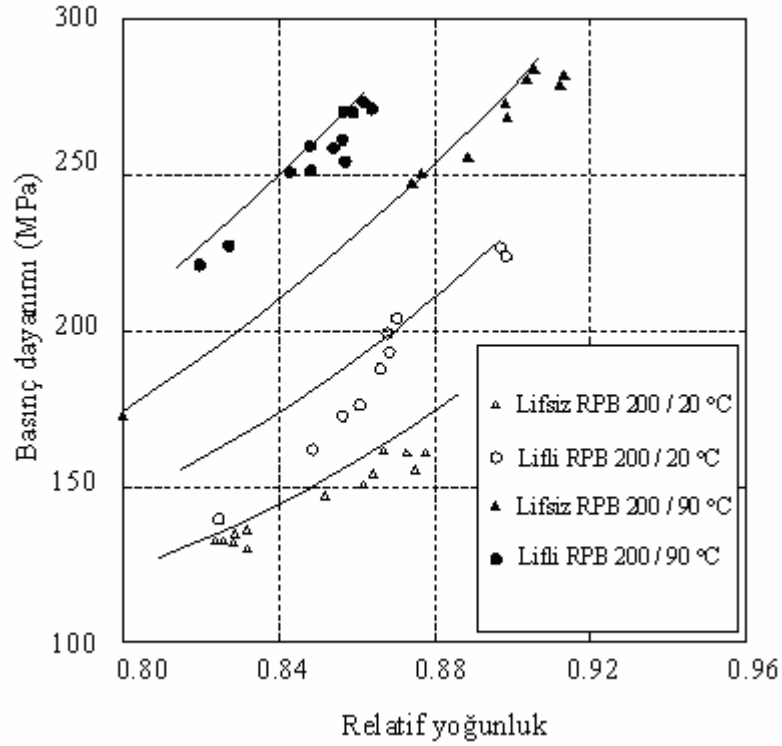
tanımlanabilmesi için (d_0/d_s) bağıl yoğunluk parametresi kullanılır. Burada d_0 , kalıp alınması esnasındaki beton yoğunluğunu, d_s ise sıkıştırılmış olduğu farz edilen taneli karışımın katı yoğunluğunu göstermektedir. Aşağıda Şekil 2.4’ de bağıl yoğunluk ile su/bağlayıcı arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Bağıl yoğunluk-su/bağlayıcı ilişkisi

Şekilde A noktası su/bağlayıcı oranının minimum olduğu noktayı ve bu noktaya karşılık gelen bağıl yoğunluk değerini göstermektedir. Su/bağlayıcı oranı optimum bir değere kadar arttıkça bağıl yoğunluğunda buna bağlı olarak arttığı ancak su/bağlayıcı oranının bu optimum değeri geçtikten sonra bağıl yoğunluğun yeniden düşmeye başladığı görülmektedir. Bu durumun temel nedeni başlangıçta ilave edilen suyun beton içindeki hava boşlukları ile yer değiştirmesidir. B noktasında hava boşluklarının tamamı su ile dolmuş durumdadır. Bu noktadan sonra ilave edilecek su malzeme hacmini artıracak ve bağıl yoğunluğun düşmesine sebep olacaktır. Şekilde görüldüğü üzere aynı bağıl yoğunluk değerini sağlayan iki nokta mevcuttur. D ve E noktaları optimum sonucu veren noktalar olup E noktası hava içeriğinin az olması ve daha fazla su bulundurması nedeniyle D noktasına göre daha iyi mekanik özellik verir.

Bağıl yoğunluk ile basınç dayanımı arasındaki ilişki ise Şekil 2.5’ de aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Reaktif pudra betonlarında bağıl yoğunluk-dayanım ilişkisi

Bağıl yoğunluğun artması ile betonun basınç dayanımı artmaktadır. Yine 90° C olarak uygulanacak bir ısıtıl işlemin aynı bağıl yoğunlukta, beton basınç mukavemetini önemli ölçüde artıracak şekilde görülmektedir[3].

3. Mineral içeriği açısından kuvars; çok sert bir malzeme olması, mükemmel hamur/agrega ara yüzeyi, hazır bulunabilmesi ve ucuz fiyatıyla üstünlük sağlar. Büyük çimento taneleri (80-100 μm) ile girişimi engellemek için maksimum 600 μm , minimum 150 μm tane boyutlu agregalar kullanılmaktadır[3].

4. Çimentonun seçimi süperakışkanlaştırıcıdan ayrılmalıdır. Kimyasal içeriği bakımından çimentoların C_3A içeriği düşük olanlar daha iyi sonuçlar verir. Tane boyutu için yüksek bir Blain inceliğine sahip çimento fazla su ihtiyacı olması nedeniyle uygun değildir. Reolojik özellikler ve mekanik performans açısından en iyi çimento yüksek silis modüllü çimentodur[3].

Bununla birlikte bu tip çimento çok yavaş sertleşme sakıncasına sahiptir. Bu sakınca, çimentonun belirli uygulamalarda kullanımını engeller. Geleneksel hızlı sertleşen yüksek performanslı çimento yüksek su ihtiyacına karşın çok iyi mekanik performansı için tercih edilir.

5. En etkili süperakışkanlaştırıcılar polycrylate-içerikli dağıtıcı katkılardır. Ancak, geciktirici özellik sergilemesi pratik uygulamalar için bir problemdir. Geleneksel süperakışkanlaştırıcılar daha zayıf sonuçlar vermesine rağmen çimento ile uyumluluğundan dolayı düşük s/ç oranları için RPB' de kullanılır[3].

6. RPC üretiminde kullanılan silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek boşlukları doldururlar ve çimentonun birincil hidratasyonundan oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile puzolanik reaksiyona girerek C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrate) oluştururlar. Sonuç olarak malzeme daha yoğun ve dolayısıyla daha mukavemetli bir malzeme haline dönüşür[3].

7. Basınç dayanımı yoğunlukla artmaktadır. Yoğunluğu arttırmanın etkili bir yolu ise taze betona basınç uygulamaktır. Bu basınç uygulamasının yöntem ve uygulama süresine göre hava kabarcıklarının azalması, fazla suyun dışarı atılması gibi yararlı etkileri vardır[3].

8. Numuneye 90°C de ısıtıl işlem uygulamak, oluşan hidratların mikro yapısını modifiye ederken puzolonik reaksiyonu yeteri kadar hızlandırır. Daha yüksek sıcaklıklarla ısıtıl işlem lifli RPB' lere uygulanabilir[3].

9. RPB matrislerinin davranışı kırılma enerjileri 30 J/m^2 yi geçmeyen lineer elastik bir davranıştır. RPB' nin sünekliğini arttırmak için lif eklenmesi gereklidir. Düz çelik teller 13 mm uzunluğunda ve 0.15 mm çapındadır. Teller karışıma hacimce %1,5-3 oranında eklenir. Ekonomik optimum oran %2 veya 155 kg/m^3 tür. 250°C ve üstünde ısıtıl işlem görmüş RPB' ların da mekanik performansın artışı (basınç ve çekme dayanımı) daha kısa (3 mm den az) ve düzensiz şekilli liflerle elde edilir. Bu durumda kırılma enerjileri düşerken basınç dayanımları artar[3].

2.3 Çelik lif, Isıl İşlem, Akışkanlaştırıcı ve Silis Dumanının Beton Özellikleri Üzerine Etkisi

2.3.1 Lifin Betonda Kullanımı

Agrega, çimento, su gibi temel bileşenlerin içerisine mineral ve kimyasal katkıların yanısıra değişik miktarlarda liflerin katılmasıyla elde edilen güçlendirilmiş kompozit malzemeye lifli beton denilmektedir. Bu betonlarda kullanılan liflerin betonun darbe dayanımını, çekme dayanımını, deformasyon kapasitesini ve tokluğunu artırdığı bilinmektedir. Betonun bu özelliklerindeki performans artışı beton bileşimi, lif

miktarı ve özellikleri başta olmak üzere birçok parametreye bağlıdır. Değişik kompozisyonlu bileşimler oluşturularak istenen özelliklere sahip beton türleri geliştirilebilir. Mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirilmiş bu kompozitlerle yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip beton yapılar yapılabilir[15].

İnşaatta en fazla kullanılan malzeme olan betonun basınç dayanımının yüksek olmasına karşın çekme dayanımı düşüktür. Bu eksikliği gidermek için bilindiği gibi betonun içinde çekme gerilmelerinin bulunduğu bölgeye çelik çubuklar konarak kiriş, döşeme ve kolon gibi çekme gerilmeleri doğabilen elemanların yapımında beton kullanılmaktadır. Fakat bu çözüm kesit içerisinde çekme gerilmesinin belli bir bölgede bulunmasıyla mümkün olmakta veya çubukların kesitin her yerinde yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu kısıtlamaları ortadan kaldırmak ve betonu daha yüksek çekme dayanımına sahip bir malzeme yapabilmek için ilk çalışmalar 1963’de Romualdi ve Mandel tarafından başlatılmıştır. Bunlar, betonun çekme bölgesinde birbirine paralel olarak yerleştirilmiş ince teller bulunan kirişler üzerinde deneyler yaparak kirişin eğilme dayanımının arttığını ve kırılma yüküne çok yaklaşıncaya kadar çatlakların fazla büyümediğini gözlemişlerdir[16].

Betona katılan lifler değişik malzemelerden (çelik, plastik, cam, saman vb.) üretilirler. Betonda en sık kullanılan lif çeşidi çelik tellerdir. Düşük karbonlu çelikten üretilen teller genellikle

- Soğukta çekilmiş tellerin kesilmesiyle,
- Çelik plakaların kesilmesiyle,
- Sıcak çekme yöntemiyle,

olmak üzere üç farklı şekilde elde edilirler.

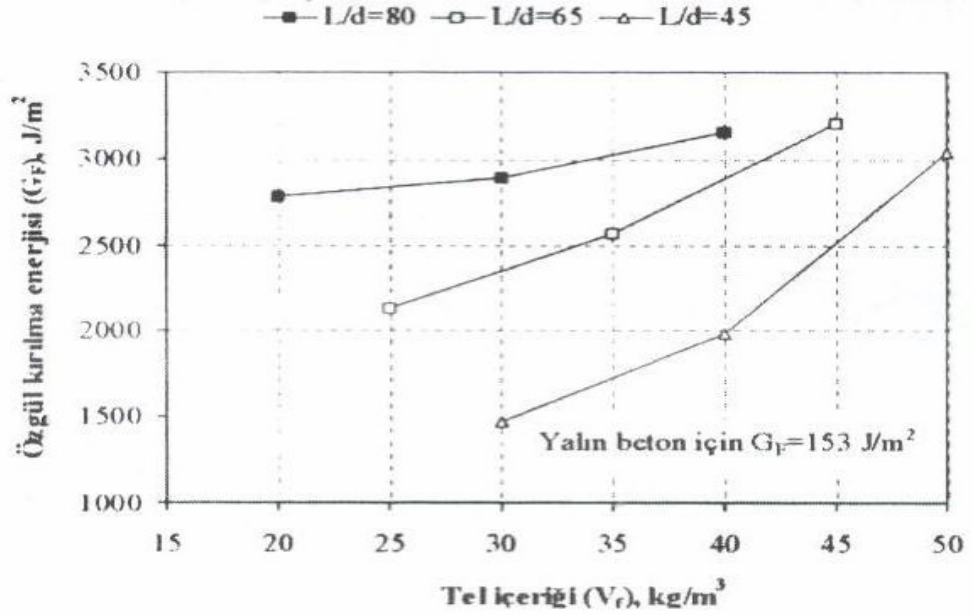
Çelik liflerin tipleri arasındaki fark ve bunların beton içerisindeki işlevleri açık olarak anlaşılamaz. Bütün çelik lifleri aynı kabul edip, tiplerinden bağımsız olarak hareket etmekte hatalı bir yaklaşımdır. Lifleri tanımlayan en önemli öge, onların mekanik özellikleri ile biçimsel özellikleridir. Bunu aşağıdaki üç maddeyle özetleyebiliriz.

1. Uzunluk/Çap oranı (Narinlik)
2. Geometrik yapı
3. Lifin çekme gerilmesi

2.3.1.1. Lifin Beton Özelliklerine Etkisi

2.3.1.1.1. Lif Miktarı, Lif Narinliği ve Lif Dağılımının Etkisi

Lifli beton konusunda yapılan çalışmalarda; beton bileşimine giren parametrelerin içerisinde beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörlerin narinlik ile lif miktarı olduğu belirtilmektedir[17].



Şekil 2.6 : Farklı narinliğe (L/d) sahip çelik liflerle donatılmış betonların özgül kırılma enerjisinin (G_F), tel içeriği (V_F) ile değişimi[2].

Narinlik, çelik telin geometrik özelliklerini tanımlamak için kullanılan sayısal bir parametredir. Bu oran, dairesel kesitli teller için tel boyunun tel çapına oranı (L/d) ve dairesel olmayan kesitler içinse eşdeğer lif çapına oranıdır. Genellikle kullanılan tellerin narinliği 20 ile 100 arasında boyları ise 6.4 mm ile 76 mm arasında değişmektedir[18].

Lifin narinliği ve karışımdaki miktarının beton özelliklerine etkisi üzerine birçok araştırma yapılmıştır.

Soroushian ve Bayasi [19], yaptıkları çalışmada karışıma eklenen liflerin özellikle de narinliğin büyük olması durumunda taze betonun işlenebilmesini azalttığını göstermişlerdir.

Shah ve Rangan [20], kullanılan çelik tellerin dozajı, narinliği ve karışım içerisindeki doğrultuları gibi faktörlerin betonun basınç ve eğilme dayanımına etkisini

araştırdıkları çalışmada eğilme dayanımının çelik tel miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığını ve çelik telin narinlik oranı ile tellerin çatlak doğrusunda göre yönlerinin çatlak sonrası dayanımda çok önemli etkileri olduğunu görmüşlerdir.

Lange-Kornbak [21], ÇTDB' ların kırılma enerjilerinin kullanılan çelik boyunun karesi ile doğru orantılı ve tel çapının karekökü ile ters orantılı olduğunu ifade ettiler.

Chang ve Chai [22]. çelik tel narinliği arttıkça ilk çatlak yükü değerinin arttığını ve matris içerisinde rastgele dağılı bulunan lifler arasındaki mesafenin 8 mm' den az olduğunda ÇTDB' nun ilk çatlak yükünde büyük artış gözlemlendiğini ifade ettiler.

2.3.1.1.2. Lif- Matris Aderansının Etkisi

Lifin beton içerisinde yararlı olabilmesi için matris ile aderanslarının iyi olması gerekir. Liflerin betonla aderansını etkileyen en önemli parametre liflerin geometrik yapılarıdır.

TS 10153' e göre çelik sınıf ve tipleri şu şekilde verilmektedir.

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller

B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller

Tip1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller

Tip2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller

Tip3: Ay biçimi dalgalı teller

C Sınıfı: Sonu kancalı teller

Tip1: İki ucu kancalı teller

Tip2: Tek ucu kancalı teller

Yapılan birçok araştırma göstermiştir ki lif geometrisinin ÇTDB' ların mekanik özellikleri üzerine çok önemli etkileri vardır.

Ramakrishnan ve diğ. [23], iki ucu kancalı ve düz çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, tokluk indisi ve enerji yutma kapasitelerini araştırdılar. İki ucu kancalı çelik tel donatılı betonların bahsedilen özellikler üzerinde en iyi performansı gösterdiğini ve ilk çatlak yükünü %90 ve eğilme dayanımını %129 artırdığını ifade ettiler. Düz çelik tellerin ise daha az iyileştirme yaptığını belirttiler.

P.Soroushian ve Z.Bayasi [19], lif tiplerinin beton özellikleri üzerine yaptığı etkileri belirtmek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarda doğru, uçları kancalı, zigzaglı ve birleştirilmiş lif tiplerinin beton karışımına katılmasıyla etkin olan lif tipi belirlenmiştir. Yapılan deneylerde, hacimce %2 oranında ve narinliği 60 olan uçları kancalı liflerle üretilen betonun eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesinin, diğer liflere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

2.3.1.1.3. Lifin Çekme gerilmesi

Farklı özellikleri ve kullanım alanları olan birçok lif çeşidi vardır. Bunlar en genel şekliyle;

- Doğal lifler (Bitkisel lifler, Hayvansal lifler, Madensel lifler)
- Yapay lifler (Cam yünü, Polimer lifler)

olarak sınıflandırılabilir. Metal liflerin çekme dayanımı genel olarak 1100 N/mm² civarında iken polipropilen liflerde bu değer 600 N/mm² mertebesinde. Kullanılacak malzemeden beklenen özelliklere göre lif seçimi yapılmalıdır.

Çelik lif takviyeli betonlar üzerlerinde büyük miktarda hareketli yüklerin bulunduğu fabrika, ambar, hangar, iskele, rıhtım, kamyon park alanları, köprü kaplamaları, yol kaplama ve tamirleri, spor kompleksleri gibi döşeme betonlarında kullanıldığı gibi tünel ve maden astarlama, beton borular, prefabrike yapılar, deniz ve su yapıları, ateş fırınları, çelik yapıların paslanma ve yangına karşı korunmasında kullanılmaktadır. Ayrıca, bu tip betonlar askeri amaçlı olarak sığınak, sığınak kapıları, tank park alanları, güvenlik kabinleri olarak da kullanılmaktadır[24].

2.3.1.2. Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı

Genel olarak ÇTDB' ların mekanik davranışını iki parametre belirler; eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu. Tokluk, göçme anına kadar yutulan toplam enerjiyi ifade eder. ÇTDB' ları normal betonlardan ayıran en önemli özellik süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki farklılıklardır. Matriste ilk çatlak oluşumundan sonra yükler çelik teller tarafından taşınır. Çelik tellerin kendi çekme dayanımları ve çekme şekil değiştirme kapasiteleri yüksek olduğundan matrisin daha fazla yük taşımasını sağlarlar. Çelik tellerin bu etkisi ile gevrek olan matris, elastik ve daha fazla şekil değiştirebilen bir yapıya dönüşür, buna bağlı olarak matris daha sünek bir davranış gösterir. İlk çatlak yükünden sonra, çelik teller tarafından taşınan yüklerin etkisi ile

matris içerisindeki çelik teller şekil değiştirmeye başlar ve yükün artması ile teller matristen genellikle sıyrılma eğilimi gösterirler. ÇTDB' ların maksimum yüke (tepe yüküne) ulaştıktan sonra göçmeye kadar olan süreci göçme bölgesindeki çelik tellerin matristen tamamen sıyrılmasıyla son bulur. Ancak, bu davranış çekme dayanımı 1100 N/mm² olan geleneksel çelik lif içeren su/ çimento oranı düşük, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda farklı olmaktadır. Matris dayanımı yüksek olan ÇTDB' larda çelik teller matristen sıyrılmadan kopma eğilimi gösterirler, bu sonuç yüksek çekme dayanımına sahip çelik tel üretimini gündeme getirmiştir ve bugün çekme dayanımı 2000 N/mm²' yi aşan çelik lifler üretilmektedir[25].

Craig [26], çelik tel donatılı betonların mekanik özelliklerini araştırdığı bir çalışmada şu sonuçları elde etmiştir.

- Lif kullanımı betonun eğilme momenti kapasitesini artırmaktadır,
- Sünmeyi artırmaktadır,
- Malzemenin çekme gerilme mukavemetini artırmaktadır,
- Çatlakları kontrol altına alabilmektedir,
- Rijitliği artırmaktadır,
- Elemanın yapısal bütünlüğünü koruyarak normal betonarme ile yapılmış kirişteki kırılma yüklerini aşmasını sağlamaktadır.

Mizukoshi ve arkadaşları [27], çelik tel donatılı betonlar üzerine yaptıkları bir araştırmada betona hacimce % 1 oranında ilave edilecek çelik lifin betonların yorulma yaşını artırmak için yeterli olabileceği sonucuna varmışlardır.

2.3.1.3 Karma Lifli Çimento Esaslı Kompozitler

Karma Lifli Çimento Esaslı Kompozit, tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine birden fazla tip ve boyutta lif kullanılarak üretilen yeni çimento esaslı kompozit malzemedir. Karma lifli kompozit üretiminde amaç yük altında oluşan çatlakların mikro düzeyden başlayarak kontrol edilebilmesidir. Bu amaç doğrultusunda mikro, mezo ve makro düzeydeki çatlakların kontrolü için yine mikro, mezo ve makro düzeyde lifler kullanılmaktadır. Mikro çatlak, uzunluğu numune veya yapının boyutlarına göre çok küçük olan çatlak, makro çatlak ise uzunluğu bir numune veya yapının boyutlarına göre fazla küçük olmayan çatlaktır. Yüksek dayanımlı makro

lifler (çelik) büyük çatlakları, zayıf mikro lifler (polipropilen vb.) ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol eder.

a) Mikro lifler;

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

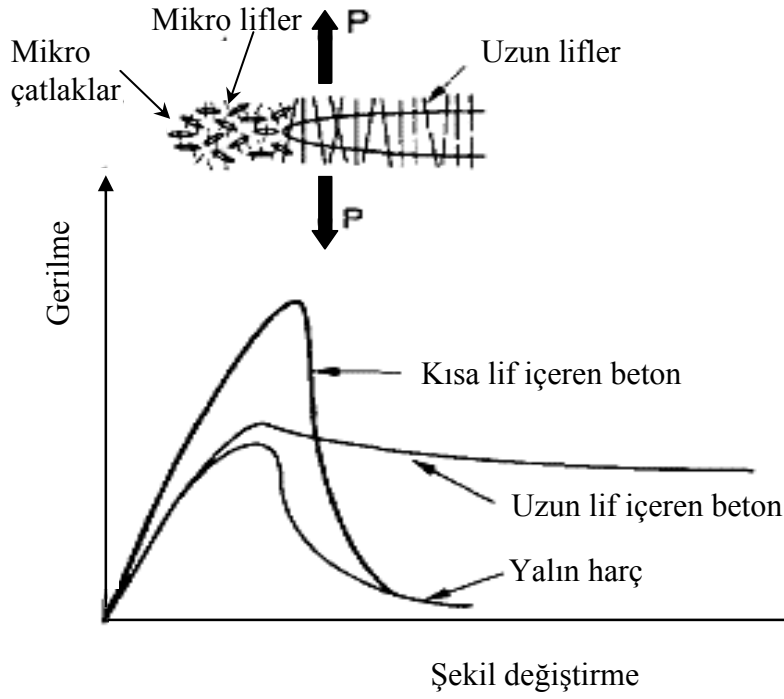
b) Makro lifler;

- Makro düzeydeki çatlakları kontrol ederler,
- Maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirirler,
- Elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını arttırırlar.

Matristeki çatlaklar mikro düzeyde başlar. Büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamazlar. Büyük boyutlu lifler ancak çatlaklar gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olur. Buna karşın; mikro lifler, çatlaklar mikro düzeyde iken arada köprü görevi görerek çatlakları durdururlar. Mikro lifler matrisin hemen hemen her bölgesine dağılabilecek kadar küçük oldukları için makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki küçük çatlakların başlamasını ve gelişimini kontrol edebilirler[12].

Betterman ve diğ. [28], polivinilalkol (PVA) lifler kullanarak yaptıkları çalışmada çekme gerilmesi altında lifler arası uzaklığın azalmasıyla ilk tepe yükünün arttığını göstermişlerdir.

Mikro lifler mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar. Şekil 2.7' de mikro ve makro düzeydeki liflerin yine mikro ve makro düzeydeki çatlaklar arasında köprü oluşturması gösterilmektedir[12].



Şekil 2.7 : Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi [28].

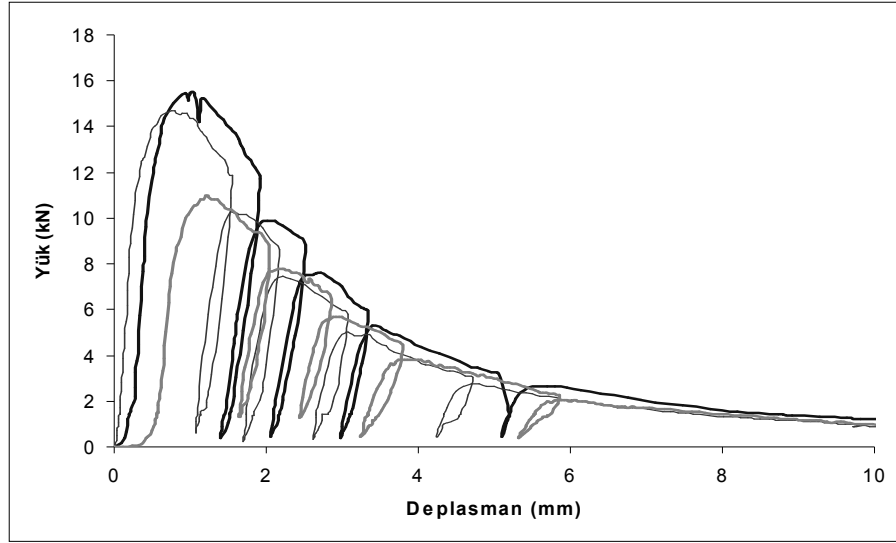
Şekil 2.7'dekine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik teller) harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirmektedir. Bundan dolayı betonda kırılma enerjisinin artırılmasında uzun çelik tellerin narinliğinin de önemli katkısı vardır[29].

Son yıllarda çekme dayanımı 2000 MPa' ı aşan çok yüksek dayanımlı çelik lifler üretilmektedir. Yüksek dayanımlı bu liflerin kullanılmasının sağladığı üstünlük şu şekilde açıklanabilir: Betonun dayanımı arttıkça, lif ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda liflerin betondan sıyrılmaları güçleşir ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma oluşur. Böylece, yüksek dayanımlı betonda, yüksek dayanımlı lifler kullanılması ile tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilebilir.

Karma lifli betonlar hasarlı binaların güçlendirilmesinde, kesiti küçük taşıyıcı elemanların yapımında, zımbalamaya karşı kolon başlarının güçlendirilmesinde, zararlı radyoaktif ve endüstriyel atıkların çatlaksız ve durabilitesi yüksek elemanlarda saklanması, sünek davranış gerektiren taşıyıcı yapı elemanlarının bileşim bölgelerinde, prekast çatı kaplama elemanı yapımında, çarpma ve aşınmaya karşı dayanım gerektiren bölgelerde kullanılabilir[29].

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi tekrarlı yükler altındaki RPB' de tepe noktası aşıldıktan sonra da yüklemeye boşaltma eğrilerinin eğimleri başlangıçtaki eğime paraleldir. Böyle

bir davranış bu tür ultra yüksek performanslı betonlar için tipiktir[29].



Şekil 2.8 : RPC'nin tekrarlı yükler altındaki davranışı [29].

2.3.2 Isıl İşlemin Beton Özelliklerine Etkisi

Optimum bileşim ve uygun üretim yöntemi iyi malzeme elde edebilmek için yeterli olmaz, üretim sonrası koşullarda en az üretim ve malzeme bileşimi kadar önemlidir. Üretim sonrası koşullar malzemenin erken ve ileri yaşlardaki mukavemet ve durabilite özelliklerini etkiler. İyi bir kür, malzemenin döküm sonrasındaki özelliklerini korumasının yanında özelliklerin iyileştirilmesi için de önemlidir.

Tüm malzemeler gibi betonda çok yüksek sıcaklıktan olumsuz biçimde etkilenir. Yüksek sıcaklıklara varmayan ısıl işlemin betona önemli yararları vardır.

- Çimento hamuru iç yapısı, uygulanan sıcaklıkla daha kararlı hale gelir. Zamanla beton iç yapısında oluşabilecek değişiklikler minimize edilmiş olur, dolayısıyla beton daha az rötre yapar.
- Artan sıcaklıkla birlikte çimento hidratasyonu hızlanır ve beton daha erken mukavemet kazanır.
- Silis dumanının kullanıldığı betonlarda yüksek sıcaklık silis dumanının pozolanik aktivitesine etkide bulunur. Silis çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek mukavemeti serbest kireçten çok daha yüksek C-S-H oluşturur.

- Yüksek sıcaklıkta silisli agrega ile serbest kirecin azaltılması daha kararlı bir iç yapıya neden olur, böylece betonun durabilitesi artar.

Betona ısı işlem birkaç yöntemle uygulanır[9].

1. Betona konulacak agrega veya suyun ısıtılması,
2. Betonun kalıba konduktan sonra ısıtılması.
 - Etüvde ısıtma: Numunelerin suya doymuş bir şekilde su buharı altında tutulması
 - Buhar kürü: Numunelere özel odalarda atmosfer basıncında buhar kürü verilmesi
 - Elektrik akımı ile kür: Beton içerisine elektrik ileten çelik çubuk veya levhalar konularak bunlara elektrik verilmesi
 - Yüksek buhar kürü: Taze betona otoklavda 8-10 atmosfer basınç altında yüksek sıcaklık uygulanması

Çelik lif takviyeli betonlara kür verilmesinin betona etkileri üzerine birtakım araştırmalar yapılmıştır.

Purkiss [30], Lifli betonların lif içermeyen betonlara göre yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını incelemek amacıyla değişik lif yüzdelerinde çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bu karışımları 300°C- 800°C arasında değişen sıcaklıklarda deneye tabi tutmuş ve lifli betonların lif şekli ve miktarından bağımsız olarak 600°C' nin altındaki sıcaklıklarda dayanımlarının normal betondan daha yüksek olduğunu görmüştür. Fakat genel olarak 800°C lik bir sıcaklıkta tüm karışımların dayanımları azalmaktadır.

Dugat ve arkadaşları [6] ise, UYPB'lerin mekanik özelliklerini araştırdıkları bir çalışmada uygulanan ısı işlemle çimentonun hidratasyonunun hızlandığını ve silisin aktif hale geldiğini böylelikle UYPB' nin mekanik özelliklerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Bonneau ve arkadaşları [4] ise, yaptıkları çalışmada UYPB' a 90°C' de ısı işlem uygulanmasının betonun mekanik özelliklerini artırdığı gibi durabilitesine de olumlu etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir.

2.3.3 Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkileri

Gelişen beton teknolojisiyle birlikte betonun dayanım ve durabilite özellikleride her geçen gün iyileşmektedir. Bu iyileşmedeki önemli faktörlerden birisi de betonun vazgeçilmez bir parçası olarak düşünülen beton katkılarıdır. Betondan istenilen özelliklere göre tasarlanmış birçok katkı tipi mevcuttur. Bunlar en bilinen şekilleriyle su azaltıcı katkılar, yüksek oranda su azaltıcılar, priz hızlandırıcılar, hava sürükleyiciler, geçirimsizlik katkıları vb. olarak sınıflandırabilir.

Katkılar her ne kadar betonun vazgeçilmez bir parçası olsa da betonda kullanım oranları belirli üst limitler dahilinde olmaktadır. Limitin üzerinde kullanılan katkılar betonda çok uzun süre sonunda dahi priz almama gibi sorunlara neden olmaktadır. Genel olarak betonlarda izin verilen katkı miktarıyla ilgili üst limit katkı/bağlayıcı oranının % 5' i geçmemesidir.

Çok yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesindeki en önemli etken düşük su/çimento oranıdır. Su/çimento oranı ne kadar düşüğe betonun işlenebilmesi de o kadar zordur. Normal akışkanlaştırıcılar ve süperakışkanlaştırıcılardan sonra yeni kuşak katkıları olan hiperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile katkısız betona oranla % 60 oranına varan su azalma sağlanabilmektedir. Böylelikle sadece çimentonun hidratasyonu için gerekli su kullanılarak yeterli işlenebilmeye sahip beton üretmek mümkün olabilir.

Yeni nesil hiperakışkanlaştırıcıların etki mekanizmaları çok farklıdır. Geleneksel melamin ve naftalin sülfonatlar gibi süperakışkanlaştırıcılar, çimento taneleri tarafından emilerek, beton karıştırma işleminin erken aşamasında tanelerin yüzeylerini kuşatırlar ve yüzeylerin negatif yükünü artırarak bu taneleri negatif itme ile dağıtırlar. Yeni nesil hiperakışkanlaştırıcılarda bu dağıtma etkisinin yanında akışkanlaştırıcı moleküllerin sahip oldukları uzun kenarlı zincirler çimento tanelerinin birbirlerine olan uzaklığını koruma yeteneğini artırır. Buna sterik etki denmektedir[9].

Su azaltıcı katkı maddeleriyle ilgili dikkat edilmesi gereken bir husus kuru karışıma, karışım suyunun % 60-70' i verildikten sonra katkının verilmesidir. Su verilmeden katkının kullanılması durumunda katkı karışım içerisinde emilecek ve uniform dağılmayacaktır[31].

Akışkanlaştırıcı katkı maddeleriyle ilgili tedarikçi firmanın katkı özelliklerini, kullanım oranlarını, kullanılacak çimentonun tipi ve miktarlarını gösteren teknik föyü olsa dahi bu malzemelerin kaynağı veya kullanım oranları sürekli değiştiğinden bir genelleme yapmak doğru değildir. Her defasında kullanım oranları ve diğer parametrelerin (priz süresi vb.) çalışma öncesinde deneylerle belirlenmesi gerekir.

2.3.4 Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi

Silis dumanı [SD], silisyum ve ferrosilisyum alaşımları üretimi sırasında yüksek saflıkta kuvarsın kömürle birlikte elektrik ark fırınlarında indirgenmesinden oluşur ve kütlege en az % 85 amorf silisyum dioksit içeren çok ince küresel taneciklerden ibarettir[32].

Aşağıda yüzey alanlarının karşılaştırması, taneciklerin inceliği konusunda daha iyi bir fikir verebilir.

Silis dumanı 20000 m²/kg

Uçucu kül 400-700 m²/kg

Portland çimentosu 300-400 m²/kg

Silis dumanı, sahip olduğu yüzey alanının büyüklüğünden dolayı, betonda su ihtiyacını artırır. Su ihtiyacını kontrol altında tutmak için su azaltıcı ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılmalıdır. SD' nin rengi açık griden koyu griye değişen tonlardadır. Akışkanlaştırılmış, yoğunlaştırılmış ve çimentoyla harmanlanmış çeşitleri mevcuttur. Ancak yoğunlaştırılmış silis dumanının verimliliği ile ilgili çelişkiler mevcuttur. Bazı araştırmacılar yoğunlaştırılmış SD partiküllerinin karışım içerisindeki dağılımının yoğunlaştırılmamışlar kadar etkili olamayacağı, dolayısıyla aynı oranda verim alınamayacağı düşüncesindedirler[9].

Silis dumanı hazır betonlarda ve harçlarda, refrakter endüstrisinde,deniz yapılarında,baraj, tünel, köprü ve yollarda, endüstriyel zeminlerde, shotcrete uygulamalarında, beton borularda ve prefabrike endüstrisinde kullanılır[33]. Silis dumanının betona sağladığı yararlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir[34].

- Yüksek performanslı betonların basınç dayanımlarını önemli ölçüde artırır.
- Betona mükemmel aşınma ve sürtünme mukavemeti kazandırarak çok yoğun trafik bölgelerindeki yüzeylerin kalıcılığını ciddi olarak artırır.

- Geçirimsizliđi 100 kata kadar artırarak, özellikle kimyasal maddelere maruz kalan alanlar için idealdir.
- Sülfat ve klordan kaynaklanan korozyon etkisini önemli düzeyde azaltır.
- Shotcrete uygulamalarında yapışmayı artırarak rebound (geri tepme) oranını %50 azaltır.

Silis Dumanının betonun mikro yapısına iki şekilde etkisi vardır. Bunlardan birincisi çimento ve diğer agrega tanelerinden çok daha küçük boyutlarda olması sebebiyle çok küçük boşlukları bile doldurarak yoğun ve yüksek dayanımlı bir matris oluşmasını sağlamasıdır.

De Larrad, küçük çimento taneleriyle taze betonun yoğunluğunu artırmaya çalıştığı bir çalışmada silis dumanı kullanılması durumunda su ile dolacak çimento taneleri arası boşluğun küçük silis dumanı partikülleriyle olduğunu göstermiştir[9].

Silis dumanının ikinci önemli etkisi ise portland çimentosunun içerisindeki kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek mukavemeti daha yüksek C-S-H oluşturur. Sonuçta malzeme daha yoğun ve daha mukavemetli olur. Silis dumanının bu özelliğine puzolanik özellik denir.

Ezeldin ve Balaguru betonda, çimento yerine % 20 oranına kadar SD kullanımının betonun çelikle olan aderansını artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca SD, çimento hamurundaki gözeneklerin azalmasını sağlamakta, yapışma özelliğini artırmakta ve daha geçirimsiz bir yapı sağlamaktadır. SD, betonun kuruma hızını ve difüzyon katsayısını da azaltmaktadır. Hem filler hem de puzolan rolü üstlenen SD tanecikleri çimento hamuru ve agregayı yoğun bir yapıya kavuşturmaktadır. SD, fazla su moleküllerini absorbe ettiği için çimento hamuru agrega arasındaki aderansı kuvvetlendirmekte ve donatının korozyonunu sınırlamaktadır[35].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde beton üretiminde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri, yapılmış olan taze ve sertleşmiş beton deneyleri ile bunlardan elde edilen sonuçlar verilmektedir.

3.1 Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

3.1.1 Çimento

Kullanılan çimento CEM I PÇ 42.5 R olup Nuh Çimento fabrikasının üretimidir. Fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıda verilmektedir.

Fiziksel Özellikler

Blaine Özgül Yüzeyi (m ² /kg)	:	335
90 mikronluk elekte kalan (%)	:	0,0
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	:	3,20
Su/çimento (ağırlıkça %)	:	30
Priz başlangıcı	:	3 saat
Priz sonu	:	4 saat 6 dakika
Le Chatelier (toplam, mm)	:	1,33

Mekanik Özellikler

		<u>7 günlük</u>	<u>28 günlük</u>
Basınç Dayanımı (N/mm ²)	:	40,3	56,5
Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	:	7,2	7,8

Kimyasal Özellikler

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

Fe ₂ O ₃	:	% 3,90
MgO	:	% 1,00
K ₂ O	:	% 0,30
Cl	:	% 0,008
Na ₂ O	:	% 0,20
TiO ₂	:	% 0,31
SO ₃	:	% 2,82
Kızdırma kaybı	:	% 2,10

3.1.2 Agrega

Üretimlerde Siltaş firmasından sağlanan iki tip silis kumu kullanıldı.

Silis Kumu : Tane boyu 500 µm ile 2 mm arasında olan

Silis Pudrası : Tane boyutu 0-500 µm arasında olan

Fiziksel Özellikler

	<u>Silis Kumu</u>	<u>Silis Unu</u>
Yoğunluk (gr/cm ³) :	2,61	2,59

Kimyasal Özellikler

		<u>Silis Kumu</u>	<u>Silis Unu</u>
		%	%
CaO	:	0,37	0,97
SiO ₂	:	97,69	99,62
Al ₂ O ₃	:	0,63	1,82
Fe ₂ O ₃	:	0,61	0,50
MgO	:	0,04	0,03
K ₂ O	:	0,01	0,13
Cl	:	0,0182	0,0087
Na ₂ O	:	0,08	0,01
TiO ₂	:	0,43	0,32
SO ₃	:	0,20	0,22

Tablo 3.1: Silis kumlarının elek analizi sonuçları

Elek Göz Boyutu, mm	Elekten geçen, (%)	Elekten geçen, (%)
	Silis Kumu	Silis Pudrası
0,125	-	2
0,250	-	52
0,500	1	100
1	5	100
2	83	100

3.1.3 Silis Dumanı

Silis dumanı olarak Elkem firmasının 968-U kodlu yoğunlaştırılmamış silis dumanı kullanıldı.

Fiziksel Özellikler

Yoğunluk (kg/dm³) : 2,5

Kimyasal Özellikler

<u>Bileşen</u>	<u>%</u>
CaO	: 1,11
SiO ₂	: 84,44
Al ₂ O ₃	: 0,30
Fe ₂ O ₃	: 0,22
MgO	: 1,55
K ₂ O	: 0,76
Cl	: 0,0282
Na ₂ O	: 0,62
TiO ₂	: 0,05
SO ₃	: 2,99

3.1.4 Çelik Lif

Bu çalışmada Beksa Çelik ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. üretimi olan üç tip çelik lif kullanılmıştır. Bu çelik liflerin iki tanesi 3 cm uzunluğunda 0.55 mm çapında sonu kancalı, iki ucu kıvrılmış, suda çözülebilen bir tutkalla birbirine yapıştırılmış ve

soğuk çekilmiş tellerdir. Diğeri ise boyu 6mm çapı 0,15 mm kısa kesilmiş liflerdir. Tablo 3.2’ de çalışmada kullanılan tellerin özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.2: Kullanılan liflerin teknik özellikleri

Lif Adı	Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
OL 6/16	Mezo	6	0,16	37,5	2250	7,17
ZP 305	Makro	30	0,55	55	1100	7,85
ZP 305X	Makro	30	0,55	55	2250	7,85

3.1.5 Kimyasal Katkı Malzemesi

Bu çalışmada kimyasal katkı malzemesi olarak Chryso firmasına ait yeni nesil süperakışkanlaştırıcılardan Optima 200 kullanıldı. Bu hiperakışkanlaştırıcının tercih edilmesinin nedeni yüksek oranda su azaltırken beton işlenebilirliğini en üst seviyede tutması, betonun priz süresince herhangi gecikmeye neden olmaması ve üretim sonrası nihai performansının yüksek olmasıdır.

3.2 Beton Karışımları

Bu çalışmada üretilen betonların hepsinde çimento dozajı 1000 kg/m³’de, su/bağlayıcı oranı 0,17’de , su/çimento oranı 0,21’de ve agrega miktarları aynı hacimde sabit tutulmuştur. Bu şekilde çelik lif içermeyen bir referans betonu ve toplam % 3’lük hacimde olmak şartıyla değişik üç çelik lifin çeşitli kombinasyonlarda kullanılmasıyla toplam 6 adet karışım dökülmüştür.

3.3 Beton Üretiminde İzlenen Sıra

Bu çalışmada üretilen betonların üretimi sırasındaki izlenen yol aşağıdaki gibidir.

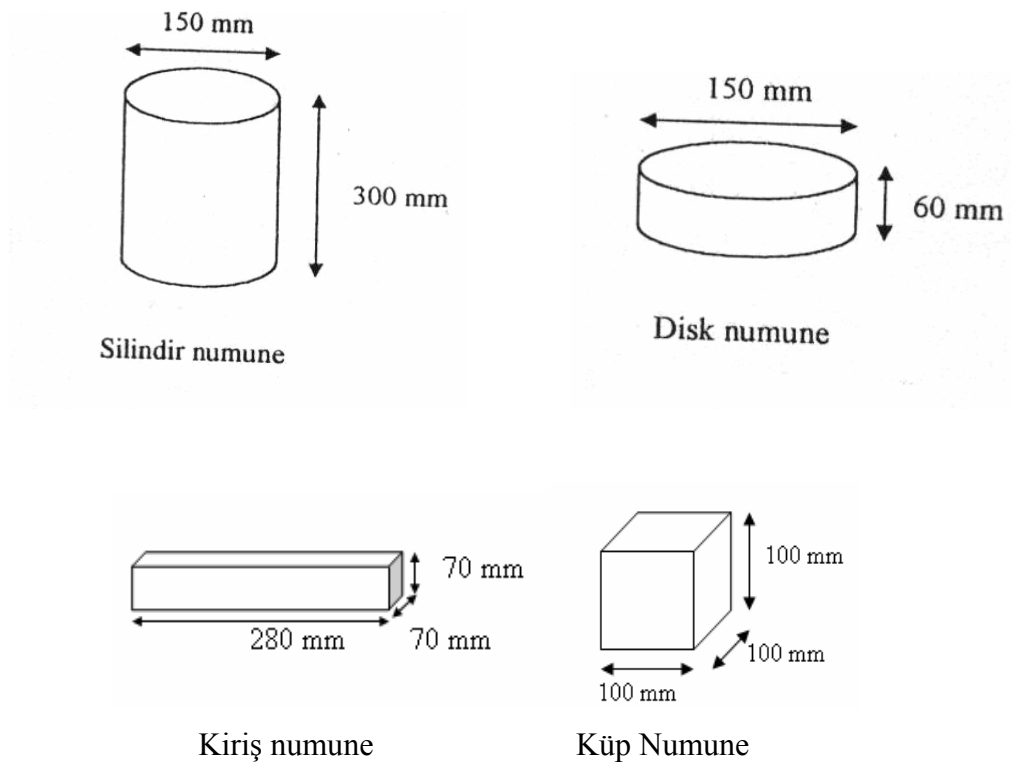
- Agregaların etüvde içinde hiç su kalmayacak şekilde tamamen kurutulması,
- Çimento, silis dumanı ve agregaların kuru olarak karıştırılması,
- Karışım suyunun %70’ nin betona katılması ve karışımın 2 dakika süreyle karıştırılması,
- Karışım suyunun kalan miktarı ve katkının ilave edilmesi,

- Çelik liflerin ilave edilmesi,
- Taze beton birim ağırlığının yapılması,
- Betonun kalıplara alınması ve vibrasyonun yapılması.

Numuneler üretildikten iki gün sonra kalıptan çıkarıldı. Kalıptan çıkarılan numuneler deney gününe kadar 20°C’ de su kürüne tabi tutuldular.

3.4 Numune Boyutları ve Şekilleri

Her bir karışımdan 8 adet prizma, 6 adet küp, 4 adet silindir ve 10 adet disk olmak üzere 28 adet numune üretildi.



Şekil 3.1 : Numune boyutları ve şekilleri

3.5 Kür Programı

Tüm numuneler kalıptan çıkma evresinden sonra 20±2°C’ de su kürü ortamına alındı ve deney gününe kadar bu ortamda saklandı.

3.6 Numune Kodlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada toplam lif hacmi %3 olmak üzere, çelik lifleri, tekil olarak içeren 3 çeşit karışım, OL 6/16 liflerini ZP 305 ve ZP 305X lifleriyle karma olarak içeren 2 çeşit karışım ve lif içermeyen bir adet de karşılaştırma karışımı olmak üzere 6 farklı karışım mevcuttur.

Üretilen karışımlarda kodlama yapılırken bileşimdeki lifin cinsi, kodun ilk kısmı olarak kullanıldı. Karma lif kullanılan karışımlarda ise her iki lifin kodu birlikte yazıldı. Buna ek olarak karışımlara üretim sonrasında uygulanan sıcak kürü göstermek amacıyla kodun son kısmı oluşturuldu.

Örneğin RSN kodlu numunede R 6 mm uzunluğunda 0,15 mm çapındaki kısa kesilmiş lifi, S ZP 305 isimli çelik lifi, N ise bu numuneye normal su kürü uygulandığını göstermektedir. Tablo 3.3’ de karışım kodları, türleri ve oranları verilmektedir.

Tablo 3.3: Üretilen karışımlarda kullanılan lif türleri ve oranları

Karışım Kodu	OL 6/16	ZP305	ZP305X	TOPLAM
PN	0	0	0	0
RN	3	0	0	3
SN	0	3	0	3
TN	0	0	3	3
RSN	1,5	1,5	0	3
RTN	1,5	0	1,5	3

3.7 Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen malzeme kalıplara yerleştirilmeden önce silindir şeklinde hacmi ve ağırlıkça darası bilinen bir kaba vibrasyon uygulanarak dolduruldu ve taze betonun birim ağırlığı bulundu. Yapılan birim ağırlık deneyinden karışımdaki malzemelerin gerçek bileşimi Tablo 3.4’ de verilmiştir.

Tablo 3.4: Taze beton bileşimi ve özellikleri

Karışım Kodu	P	R	S	T	RS	RT
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

Standart küp basınç deneyleri 30. günde, diğer sertleşmiş beton deneyleri ise 60. günde yapıldı.

3.8.1 Küp Basınç Deneyi

100x100x100 mm' lik küp numuneleri üzerinde 30. günde 5000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak basınç deneyleri yapıldı.

3.8.2 Silindir Basınç Deneyi

Silindir basınç deneyleri 100 mm çaplı 200 mm yükseklikteki silindir numuneler üzerinde 3000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak yapıldı. Her 25 kN'luk yüke karşılık gelen düşey yer değiştirme değeri okunarak, elde edilen grafiklerden elastisite modülü hesaplanmaktadır.

Numunelere uygulanan kür işlemi ve karışımda kullanılan liflerin elastisite modülüne etkisi bu deneylerle araştırılmaktadır. Elastisite modülü hesaplanırken en büyük yükün %5' i ile % 45'i arasında kalan bölgedeki gerilme şekil değiştirme değerleri kullanılmaktadır.

3.8.3 Yarmada Çekme Deneyi

Yarma deneyleri çapı 150 mm ve yüksekliği 60 mm'lik disk numuneler üzerinde yapıldı. Numunelere çizgisel yük uygulanarak yarmada kırılma kuvvetleri elde edildi. Aşağıdaki bağıntı yardımı ile yarma-çekme dayanımları bulundu. Yük numunelere aktarılırken alttan ve üstten 4 mm kalınlıklı ince ahşap çubuklar kullanıldı. Yarmada çekme dayanımı aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplandı.

$$f_t = (2P_{\max})/\pi DL$$

f_t = Yarmada çekme dayanımı (N/mm²)

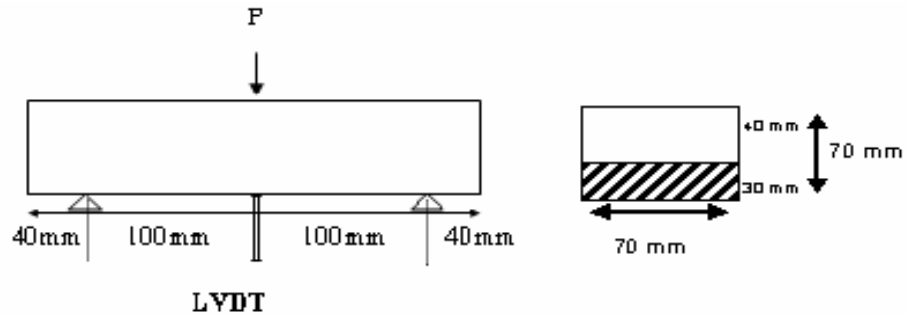
$P_{\max}$ = Maksimum yük (N)

D = Silindirin çapı (mm)

L = Silindirin yüksekliği

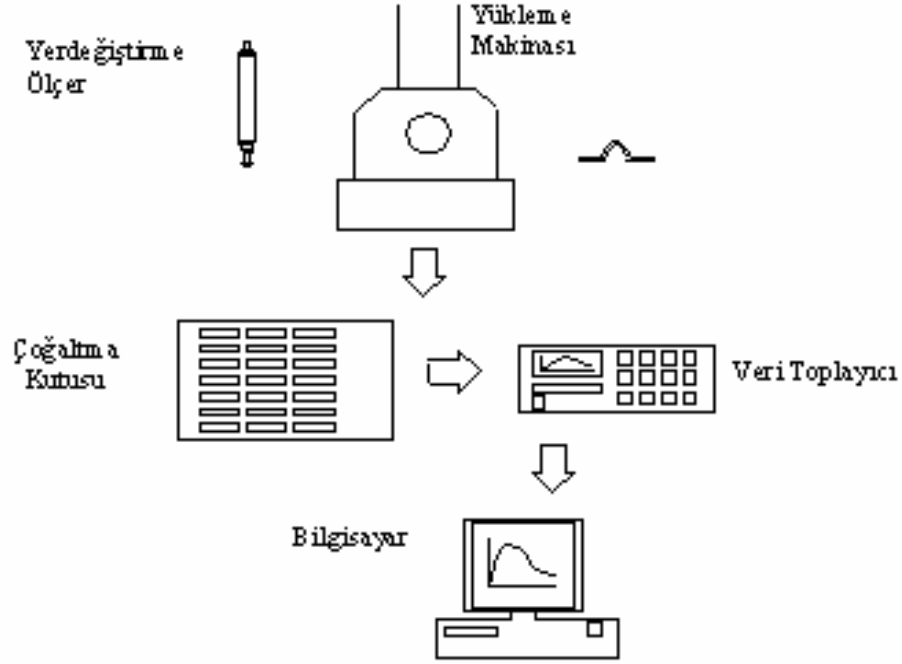
3.8.4 RILEM Kırılma Enerjisi Deneyleri

Kiriş numunelerinin eğilme dayanımı ve kırılma enerjisini bulmak amaçlı İ.T.Ü Yapı Malzemesi laboratuvarında bulunan Instron 550R marka yükleme makinesi kullanıldı. Numunelerin ortasına kırılmanın kontrollü olabilmesi amaçlı 30 mm lik çentikler açıldı ve böylelikle numune etkin kesit alanı 40x70 mm olarak seçildi. Yapılan deneylerle farklı cins çelik liflerin kullanımının betonun eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesine etkileri araştırıldı. Deneylerin yapılması esnasında kullanılan deney düzeneği aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni

Deney esnasında oluşan sehimi belirlemek amaçlı 1 adet LVDT alıcı numune alt yüzeyine yerleştirildi. Numuneler üzerine uygulanan yük değerleri ve bunlara karşılık gelen sehim sonuçları alıcılardan bilgisayara aktarılmak suretiyle toplandı ve bu sonuçlardan Yük-Sehim grafiklerine geçildi. Şekil 3.3’de veri toplama sistemi gösterilmektedir.

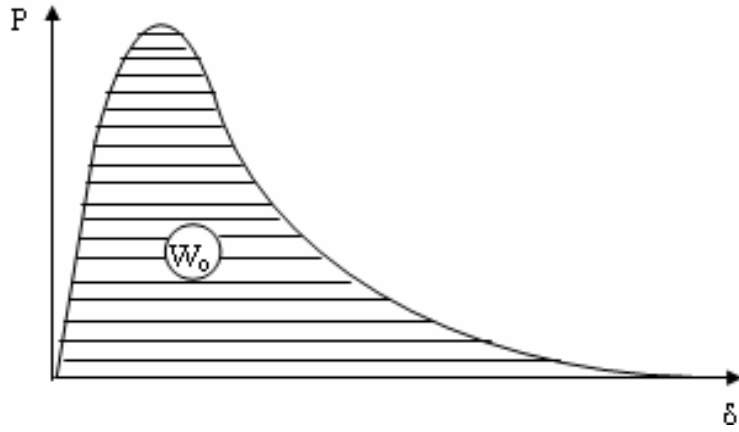


Şekil 3.3 : Veri toplama sistemi

3.8.4.1 RILEM Kırılma Enerjilerinin Hesaplanması

Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanarak kırılma süresince harcanan enerji değerine geçilir. Gevrek malzemelerde şekil değıştirme miktarı küçük olduğundan bu tür malzemelerin enerji yutma kapasitesi yüksek sehim yapabilen sünek malzemelere karşın düşüktür. Bu çalışmada kullanılan çelik lifler betona yüksek süneklik özelliği kazandırır ve böylece, numunelerin kırılma enerjileri normal betona göre daha yüksek olacaktır.

Şekil 3.4’de örnek bir yük-sehim eğrisi görölmektedir. Aşağıda eğri yardımıyla enerjinin nasıl hesaplandığı açıklanmaktadır.



Şekil 3.4 : Örnek bir yük-sehim eğrisi

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

W_o = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan (N/m),

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg),

g = Yerçekim ivmesi (9.81 m/sn²),

δ_o = Kirişin göçme esnasındaki deformasyonu,

A_{lig} = Etkin kesit alanı (m²).

3.8.4.2 RILEM Enerji Deneyinden Net Eğilme Dayanımının Hesaplanması

Aşağıdaki bağıntı kullanılarak eğilme dayanımları hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = (3PL)/2BD^2,$$

F_{net} = Net eğilme dayanımı,

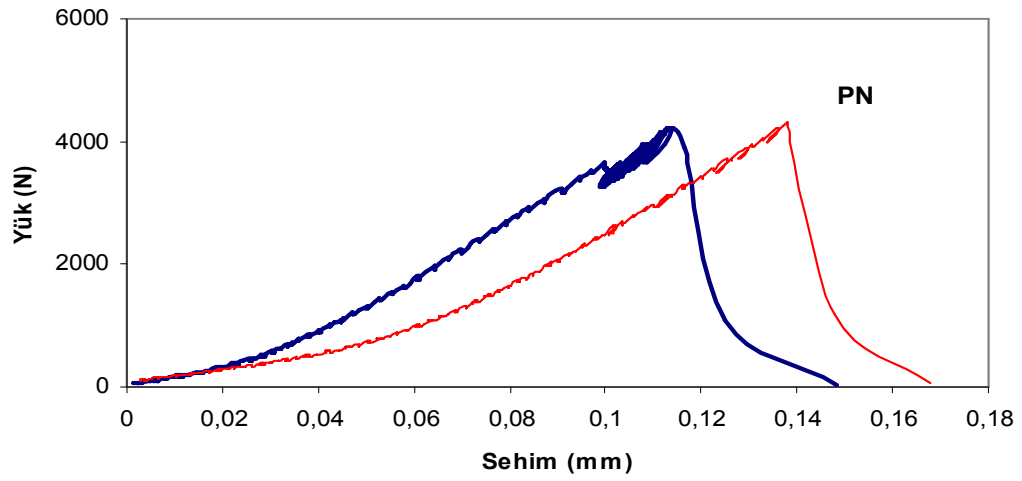
P = Kırılma yükü (N),

L = Mesnetler arası uzaklık (mm),

B = Numune kesitinin genişliği (mm),

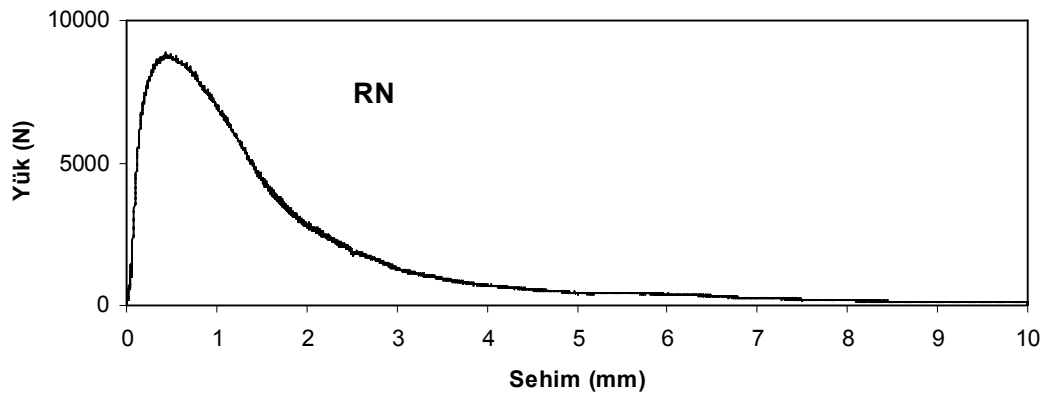
D = Numune kesitinin yüksekliği (mm).

Şekil 3.5' de içerisinde herhangi lif içermeyen karşılaştırma amaçlı üretilmiş betonun yük-sehim eğrisi gösterilmektedir.

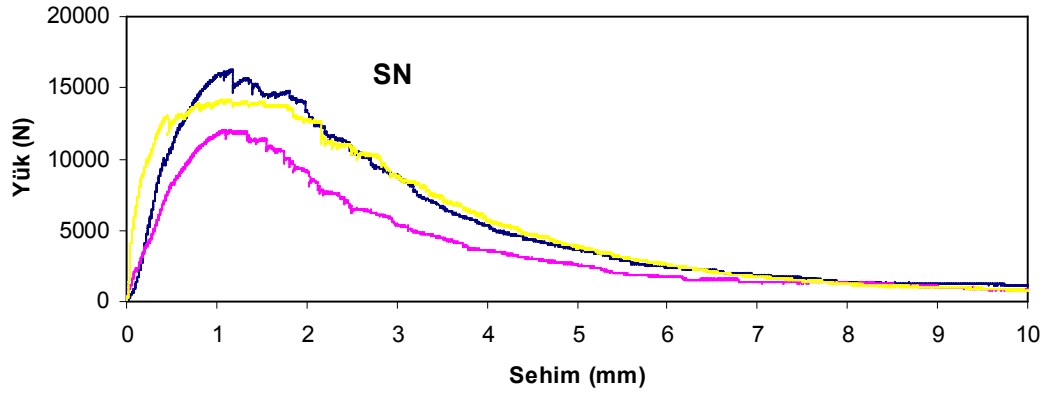


Şekil 3.5 : Lif içermeyen su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri

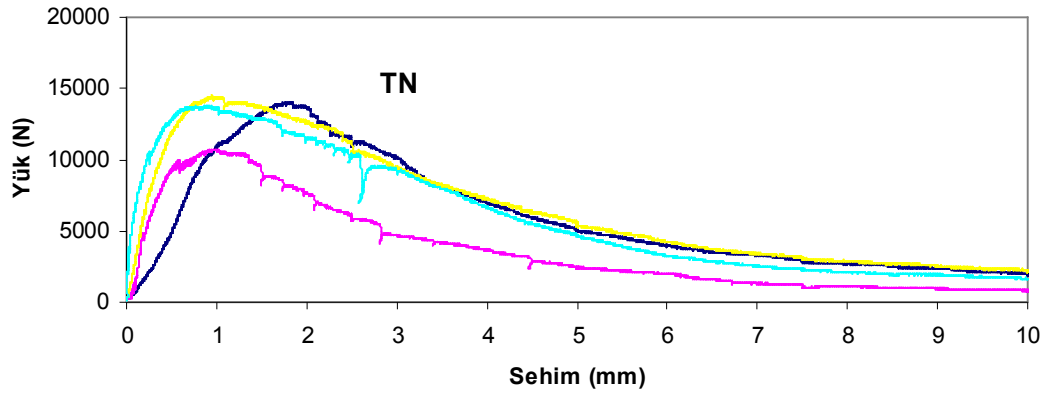
Sonra sırasıyla Şekil 3.6 hacimce % 3 oranında kullanılan 6/16 OL lif içeren karışımı, Şekil 3.7 hacimce % 3 oranında kullanılan ZP305 lif içeren karışımı, Şekil 3.8 ise hacimce % 3 oranında kullanılan ZP305X lif içeren karışımı göstermektedir.



Şekil 3.6 : Hacimce % 3 oranında 6/16 OL lif içeren su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri

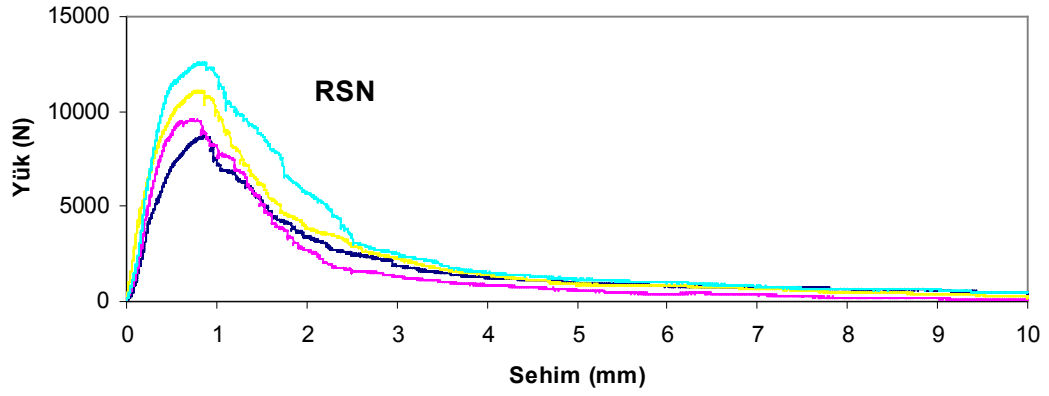


Şekil 3.7 : Hacimce % 3 oranında ZP305 lif içeren su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri

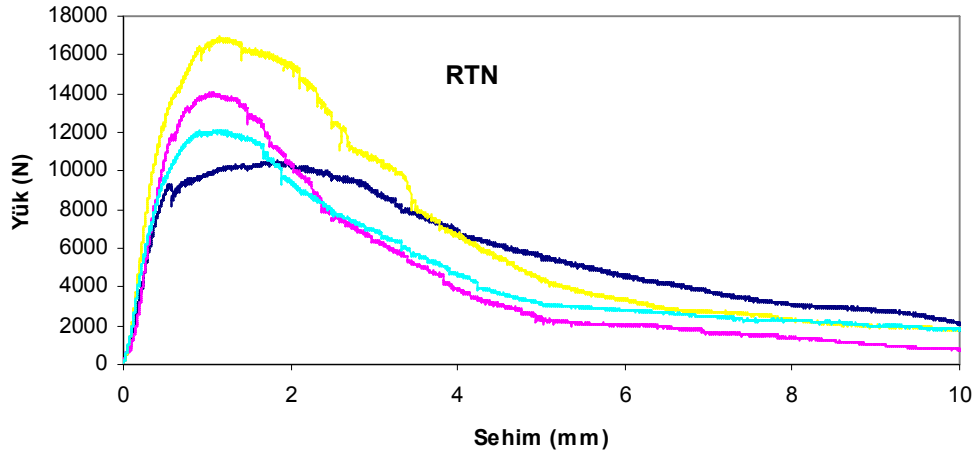


Şekil 3.8 : Hacimce % 3 oranında ZP305X lif içeren su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri

Şekil 3.9' da hacimce % 1,5 oranında 6/16 OL lif ve yine hacimce %1,5 oranında ZP305' ten oluşan karma lif, Şekil 3.10' da ise hacimce % 1,5 oranında 6/16 OL lif ve hacimce %1,5 oranında ZP305X' den oluşan karma lif karışımı gösterilmektedir.

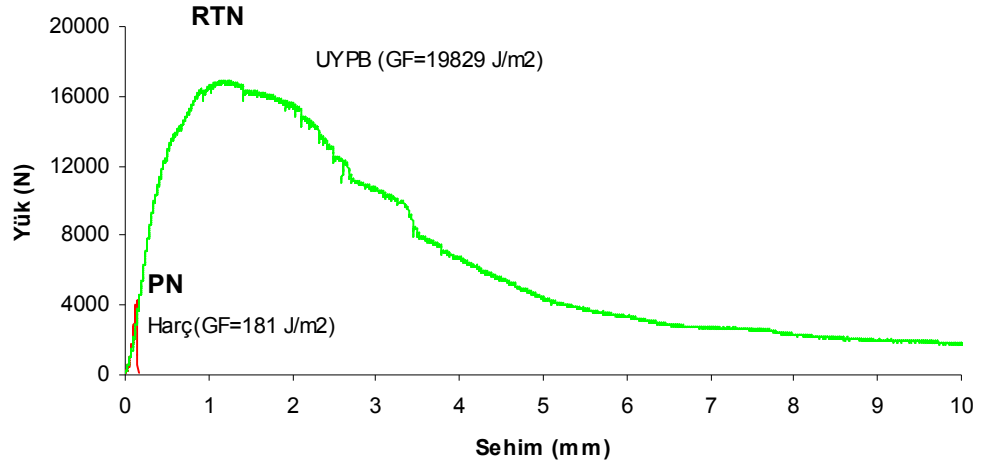


Şekil 3.9 : Hacimce % 1,5 oranında 6/16 OL ve % 1,5 oranında ZP305 içeren karma lifli su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri



Şekil 3.10 : Hacimce % 1,5 oranında 6/16 OL ve % 1,5 oranında ZP305X içeren karma lifli su kürü görmüş numunelere ait yük-sehim eğrileri

Şekil 3.11’ de görüldüğü gibi betonda çelik lif kullanımı beton sünekliğini önemli ölçüde artırmakta ve betonun tokluk değerini yükseltmektedir. Şekilde lif kullanılmaksızın kırılma anında 181 J/m^2 enerji ile kırılan normal su kürü uygulanmış betona lif eklenmesiyle bu değer 19829 J/m^2 ’lık bir değere eriştiği görülmektedir. Bu değer ilk değer yaklaşık 110 katı mertebesindedir.



Şekil 4.11 : Normal su kürü görmüş harç ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun eğilme davranışı karşılaştırılması

Tablo 3.5: Sertleşmiş beton özellikleri

Karışım Kodu	PN	RN	SN	TN	RSN	RTN
Küp Basınç Dayanımı (MPa)	87,3	116,3	122	112,3	112,7	133
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	131,2	146,7	113,4	130	143,7	133,1
Elastisite Modülü (MPa)	44100	45400	41600	45900	44600	48100
Yarma Çekme Dayanımı (MPa)	8,7	12,4	13,5	15,6	15	15,1
Kırılma Enerjisi (N/m)	181	6043	14254	21617	8067	19829
Net Eğilme Dayanımı (MPa)	10,2	23,8	35,2	37,7	28,1	38,5

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmanın temel amacı ultra yüksek performanslı betonların mekanik davranışlarının iki önemli parametreye bağımlı olarak incelenmesidir. Bunlardan birincisi fiziksel ve mekanik özellikleri farklı liflerin betonda kullanımı parametresi, ikincisi ise üretim aşamasından sonra üretilen numunelere farklı kür işlemi uygulanması parametresidir.

Tablo 4.1: Üretilen numunelerde kullanılan lif oranları ve ısıtım işlem türü

Numune Kodu			OL 6/16	ZP305	ZP305X	TOPLAM
Normal Kür	90°C' de Buhar Kürü Avar [36]	200°C' de Sıcak Kür Doğru [37]				
PN	PV	PZ	0	0	0	0
RN	RV	RZ	3	0	0	3
SN	SV	SZ	0	3	0	3
TN	TV	TZ	0	0	3	3
RSN	RSV	RSZ	1,5	1,5	0	3
RTN	RTV	RTZ	1,5	0	1,5	3

Sonuçların değerlendirilmesi esnasında Tablo 4.1' de verilen karışım kodları, o karışımın içermiş olduğu lif türü ve o karışıma uygulanan kür işleminin anlaşılması açısından yararlı olacaktır.

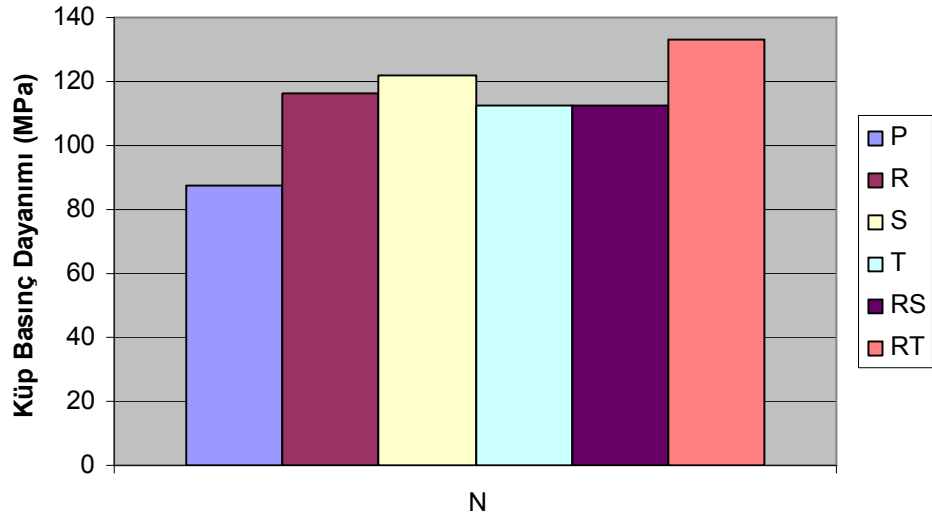
Sunulan bu çalışmada normal su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, yarma dayanımı ve kırılma enerjisi değerleri gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın ileriki bölümlerinde ise aynı bileşime sahip betonlarda farklı kür koşulları uygulanması, Avar [36] ve Doğru [37]' nun deney sonuçlarıyla karşılaştırıldı. Aynı karışımlarda Avar, 90°C' de buhar kürü işlemi görmüş numunelerin, Doğru ise 200°C' de sıcak kür görmüş numunelerin mekanik özelliklerini incelemiştir.

4.1 Farklı Tipte Lif İçeren Normal Su Kürü İşlemi Uygulanmış Karışımların Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

4.1.1 Çelik Lif Kullanımının Betona Etkisinin Değerlendirilmesi

4.1.1.1 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Küp Basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 3.5’ de ki sertleşmiş beton özellikleri tablosunda verildi. Bu tablodan elde edilen sonuçlar Şekil 4.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait küp basınç dayanımı diyagramı

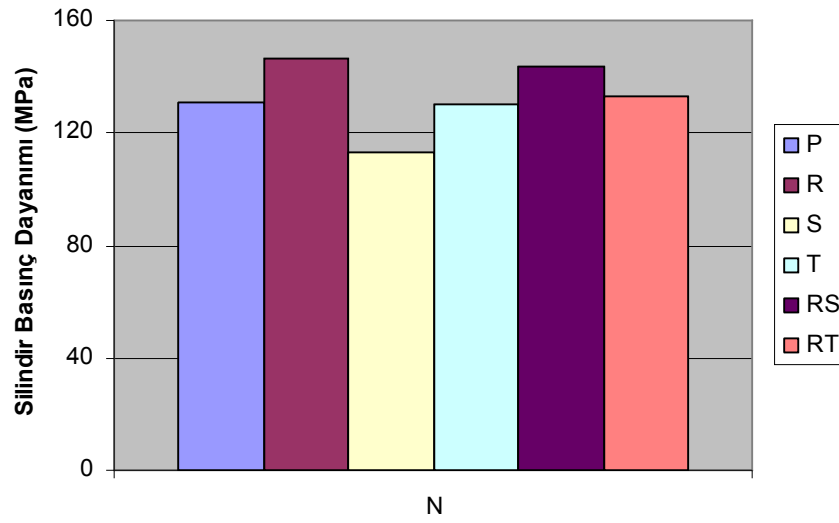
Şekil 4.1 incelendiğinde lif içermeyen yalın betonu gösteren P kodlu karışımın basınç dayanımının diğer tüm karışımlardan belirgin şekilde daha düşük olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, betonda çelik lif kullanımının basınç dayanımı üzerine olumlu etkileri olduğu sonucuna varılabilir. Deneylerde en yüksek küp basınç dayanımı içerisinde 6/16 OL ile ZP305X tipi lifi birlikte bulunduran RT kodlu karışımda gerçekleşmiştir. RT kodlu karışımda, lif içermeyen P kodlu karışıma göre küp basınç dayanımında % 52’lik artış gerçekleşmiştir.

4.1.1.2 Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’ de verilmektedir. Grafik incelendiğinde dikkat çeken husus içerisinde 6/16 OL çelik lif bulundurmeyen S ve T kodlu karışımların silindir basınç dayanımının yalın betona yakın değerler göstermesidir.

Buna karşın, 6/16 OL lif içeren R, RS ve RT kodlu numunelerde silindir basınç dayanımının diğer karışımlardan bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. Bu farkın en belirgin olarak ortaya çıktığı karışım ise yalnızca 6/16 OL lif içeren R karışımıdır.

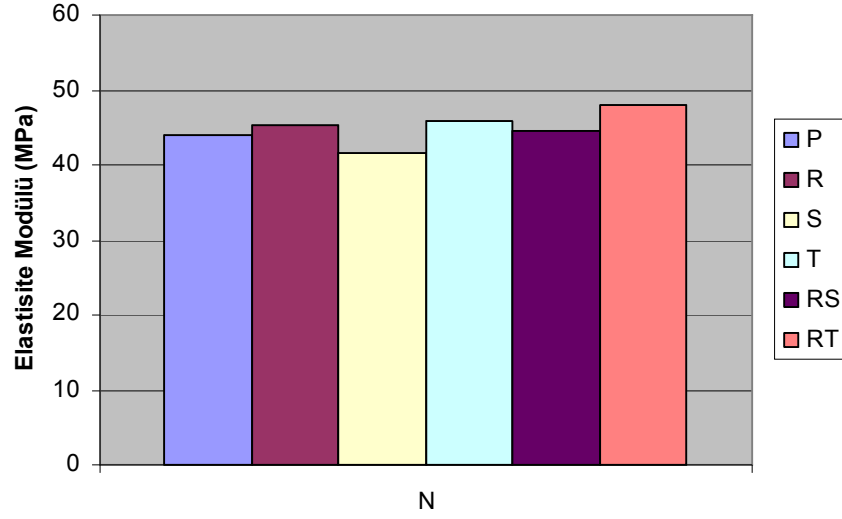
Bütün bu sonuçlar ışığında betonda kısa kesilmiş çelik liflerin kullanımının beton basınç mukavemetini artırdığı ancak uzun kesilmiş makro liflerin böyle bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılabilir. İçerisinde sadece 6/16 OL lif içeren R kodlu karışımda, lif içermeyen P kodlu karışıma göre % 12’lik artış gerçekleşmiştir.



Şekil 4.2 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait silindir basınç dayanımı diyagramı

Silindir basınç dayanımı deneyleri yapılırken betona ait tespit edilen bir başka mekanik özellik ise betonun elastisite modülüdür. Şekil 4.3’ de aynı kür şartlarında bekleyen 6 farklı beton karışımına ait elastisite modülü değerleri verilmektedir.

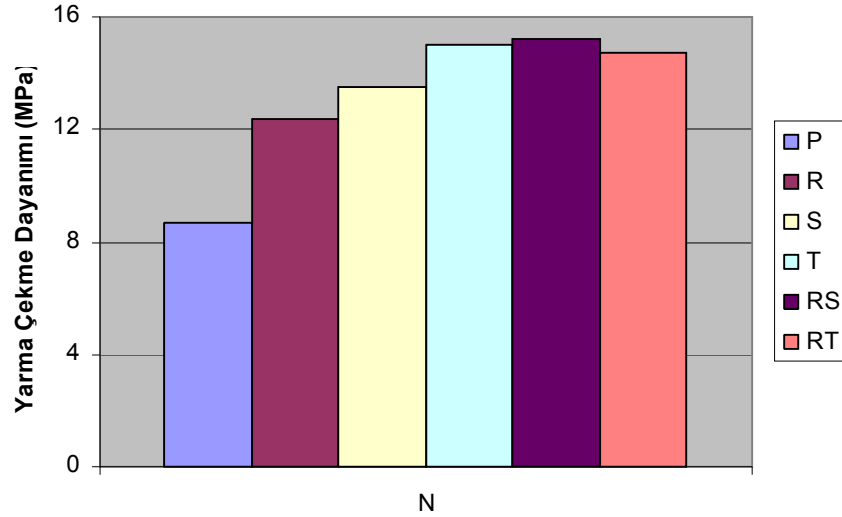
Şekil 4.3 incelendiğinde T ve RT kodlu ZP305X tipi lif içeren numunelerin diğer karışımlara oranla daha yüksek elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. Ancak elde edilen farklar çok fazla değildir. Elde edilen sonuçlardan, çelik lif donatılı betonlarda çelik lif türünün elastisite modülünü etkilemediği sonucuna varılabilir.



Şekil 4.3 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait elastisite modülü değerleri diyagramı

4.1.1.3 Silindir Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Silindir yarma deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.5’ de ki sertleşmiş beton özellikleri tablosunda verildi. Bu sonuçlar Şekil 4.4’ de aşağıda gösterilmiştir.

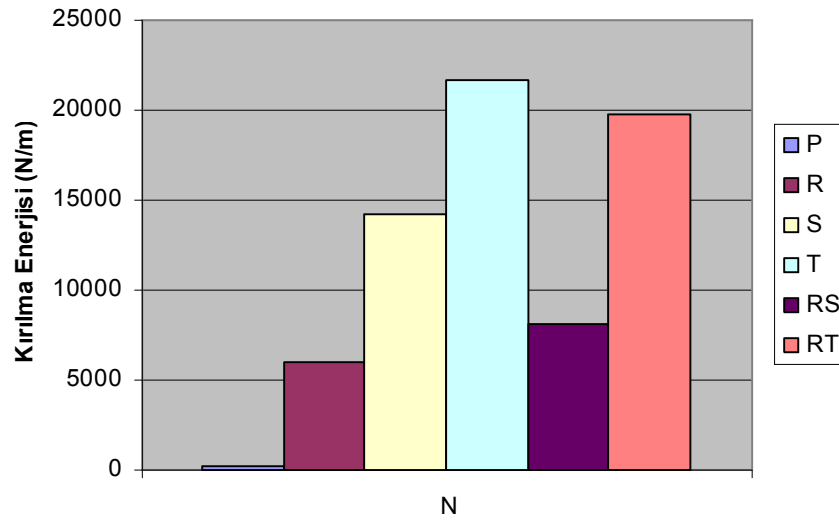


Şekil 4.4 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait silindir yarma dayanımı diyagramı

Şekil 4.4 incelendiğinde çelik lif kullanılan tüm karışımların lif içermeyen P kodlu yalın beton karışımına göre daha yüksek bir yarmada çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Yine grafikten özellikle içerisinde makro lif adı verilen boyutları numune boyutlarına göre küçümsenmeyecek oranda olan ZP305 ve ZP305X tipi lif içeren S, T, RS ve RT kodlu numunelerin yarma dayanımının yalnızca 6/16 OL tipi kısa kesilmiş çelik lif bulunduran R kodlu numuneden daha yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır. Böylece, çelik lif kullanımının beton yarma dayanımını artırdığını, ancak kullanılacak makro liflerin yarma dayanımını daha belirgin biçimde artırdığı görülmektedir. İçerisinde yalnızca ZP305 X tipi lif içeren T kodlu karışımda, lif içermeyen P kodlu karışıma göre yarma dayanımında % 79'luk artış gerçekleşmiştir.

4.1.1.4 RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

RILEM Kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 4.5' de verilmiştir.

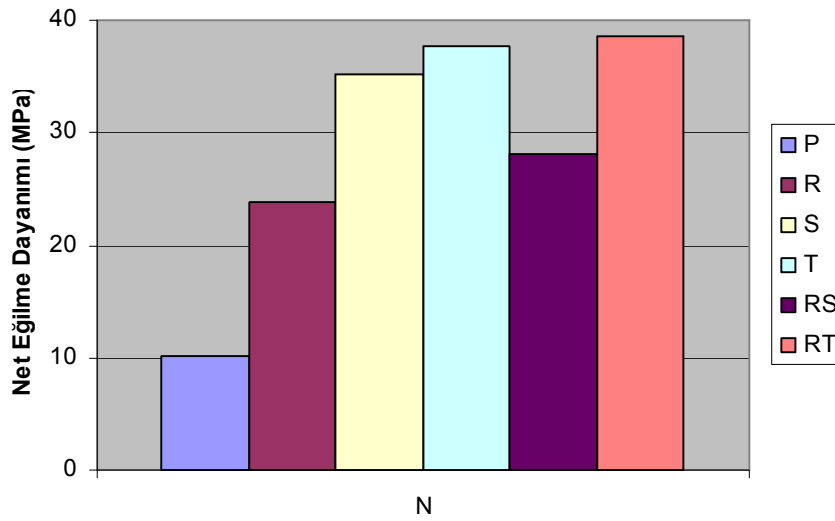


Şekil 4.5 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait kırılma enerjisi değerleri diyagramı

Kırılma enerjisine ait diyagram incelendiğinde belirgin sonuçlar elde edilmektedir. Lif kullanılmayan P kodlu karışımdaki numunelerin kırılma enerjisi değerleri çelik lif içeren diğer tüm karışımlardan oldukça küçüktür. Kırılma enerjileri arasındaki bu oran 6/16 OL çelik lif içeren kırılma enerjisi düşük R karışımında 34 iken ZP305X

tipi lif içeren karışımda 110 değerine ulaşmaktadır. Diyagramdan elde edilen önemli bir başka veri ise kırılma enerjisi değerlerinin çelik tel kopma mukavemeti 2250 MPa olan ZP305X tipi lif içeren T ve RT kodlu karışımlarda çok daha yüksek değerler almasıdır. Çelik tel kopma mukavemeti yine 2250 MPa olan ve yalnızca 6/16 OL lif içeren karışımlarda kırılma enerjisi değeri ZP305 ve ZP305X gibi makro lif içeren karışımlardaki kadar yüksek değildir. Yine ikisi de makro lif olmasına karşın çelik tel kopma mukavemeti 1100 MPa olan ZP305 tipi lif içeren karışımların ZP305X tipi lif içerenlerden daha düşük kırılma enerjisine sahip olduğu görülmektedir. Tüm bu sonuçlardan hareketle çelik lif kullanımının, beton kırılma enerjisini betona kazandırdığı yüksek süneklik özelliği nedeniyle tokluğu artırdığı, ancak bu artışın çelik tel kopma mukavemeti yüksek makro lif kullanımıyla en üst seviyeye çıktığını söylenebilir. Çelik lif kullanımı ile kırılma anında yutulan enerji en fazla 120 kat olarak ZP305 X tipi lif içeren T kodlu karışımda gerçekleşmiştir.

Kırılma enerjisi deneylerinden hesaplanan net eğilme dayanımına ilişkin sonuçlar ise aşağıda Şekil 4.6' da verilmiştir.



Şekil 4.6 : Su kürü görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait net eğilme dayanımı değerleri diyagramı

Bu diyagramda da kırılma enerjisine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Lif içermeyen P kodlu yalın beton numunesinin eğilme dayanımı çelik lif içeren tüm numunelerden daha küçük bir değer gösterirken eğilme dayanımının en yüksek olduğu karışımlar T ve RT kodlu yüksek kopma mukavemetli ZP305X tipi makro lif

içeren karışımlar olarak elde edilmektedir. Kırılma enerjisiyle oldukça benzerlik gösteren bu sonuçlardan betonun kırılma enerjisiyle net eğilme dayanımı arasında doğru orantılı ve yüksek değerli bir korelasyon olduğu sonucuna ulaşılabilir. Net eğilme dayanımları lif içeren karışımlarda yalın betona göre 2,3 ile – 3,8 kat artmıştır.

4.2 Farklı 3 Kür İşlemi Uygulanmış Değişik Tipte Lif İçeren Beton Karışımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde su kürü uygulanmış numunelere ait incelenen beton mekanik özellikleri farklı iki tip kür işlemine tabi tutulan numunelerin mekanik özellikleri ile birlikte değerlendirilmiş ve sonuçlar grafikler yardımıyla irdelenmiştir.

Ancak sonuçlara geçmeden önce çalışmanın net olarak anlaşılabilmesi bakımından Avar [36] ve Doğru [37]' ya ait sertleşmiş beton özellikleri sonuçları Tablo 4.2 ve 4.3 'de aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.2: Sertleşmiş beton özellikleri, Avar [36]

Karışım Kodu	PV	RV	SV	TV	RSV	RTV
Küp Basınç Dayanımı (MPa)	113	156	147,7	143	139	163,7
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	136,3	175,1	133,8	149,8	144,3	149,4
Elastisite Modülü (MPa)	44100	45100	38500	45100	42800	41300
Yarma Çekme Dayanımı (MPa)	9,4	15,5	16,0	17,0	15,4	17,6
Kırılma Enerjisi (N/m)	201	6778	14079	24821	10343	20140
Net Eğilme Dayanımı (MPa)	12,8	25,4	37,4	44,9	35,7	45,8

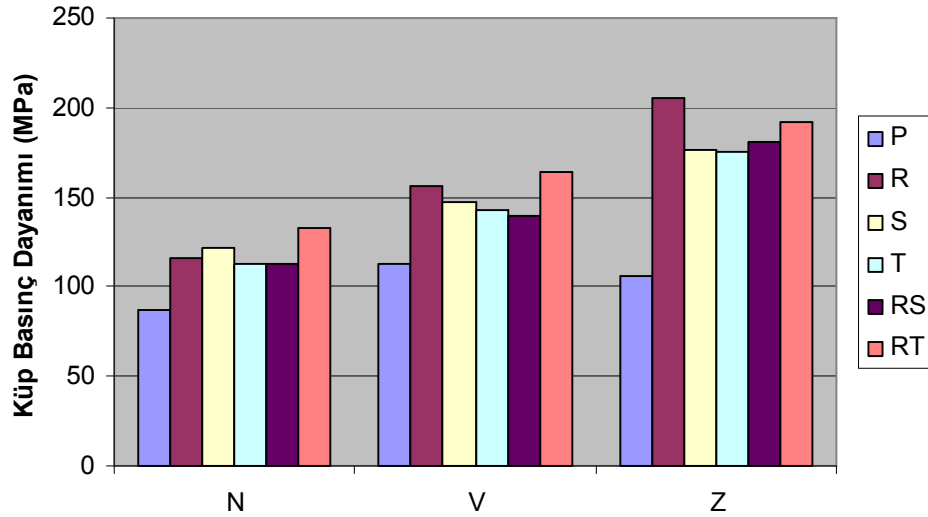
Tablo 4.3: Sertleşmiş beton özellikleri, Doğru [37]

Karışım Kodu	PZ	RZ	SZ	TZ	RSZ	RTZ
Küp Basınç Dayanımı (MPa)	106	205,3	176,3	175,7	180,7	192,3
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	145,2	177	136	156,4	163,4	168,2
Elastisite Modülü (MPa)	41500	45600	38800	41300	34800	43900
Yarma Çekme Dayanımı (MPa)	6,2	16,0	16,4	16,7	16,9	17,3
Kırılma Enerjisi (N/m)	179	5421	17212	30169	11336	20235
Net Eğilme Dayanımı (MPa)	8,6	23,2	41,1	42	36,6	46,8

4.2.1 Çelik Lif Kullanımının Betona Etkisinin Değerlendirilmesi

4.2.1.1 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Küp Basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri sertleşmiş beton özellikleri tablolarında verildi. Bu tablolardan elde edilen sonuçlar Şekil 4.7’ de gösterilmektedir.

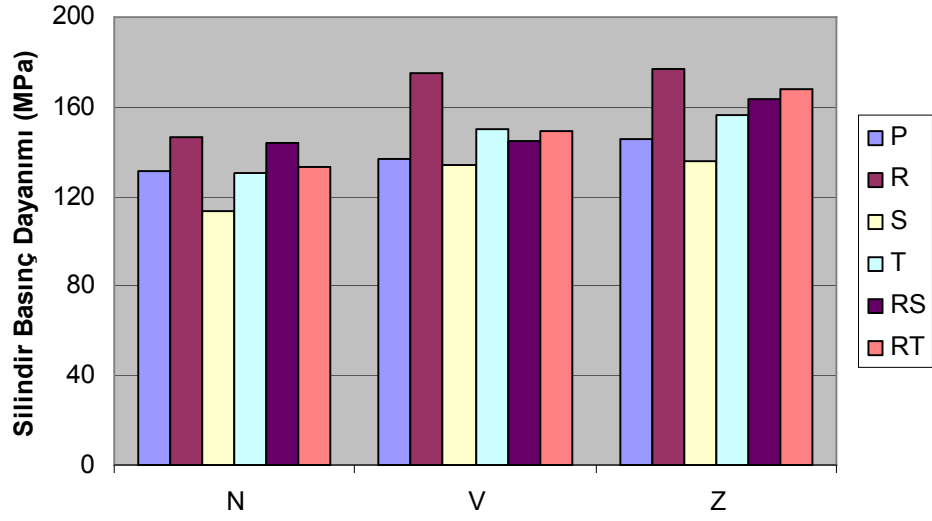


Şekil 4.7 : Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait küp basınç dayanımı diyagramı

Şekil 4.7’ de görüleceği üzere hiç lif içermeyen P kodlu karışımda basınç dayanımı değerleri lif içeren diğer tüm karışımlardan belirgin şekilde düşüktür. Buradan betonda lif kullanımının basınç dayanımı üzerine olumlu bir etkisi olduğu söylenebilir. Yine grafik dikkatle incelendiğinde R ve RT kodları ile gösterilen ve içerisinde 6/16 OL lif içeren karışımların basınç dayanımının diğer karışımlardan bir miktar daha yüksek olduğu görülür. Bu gözlemden boyutları nedeniyle betonda daha sık lif dağılımı oluşturan 6/16 OL liflerin mikro çatlak oluşumunu engellediği ve böylece betonun basınç dayanımını artırdığı sonucuna varılabilir.

4.2.1.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

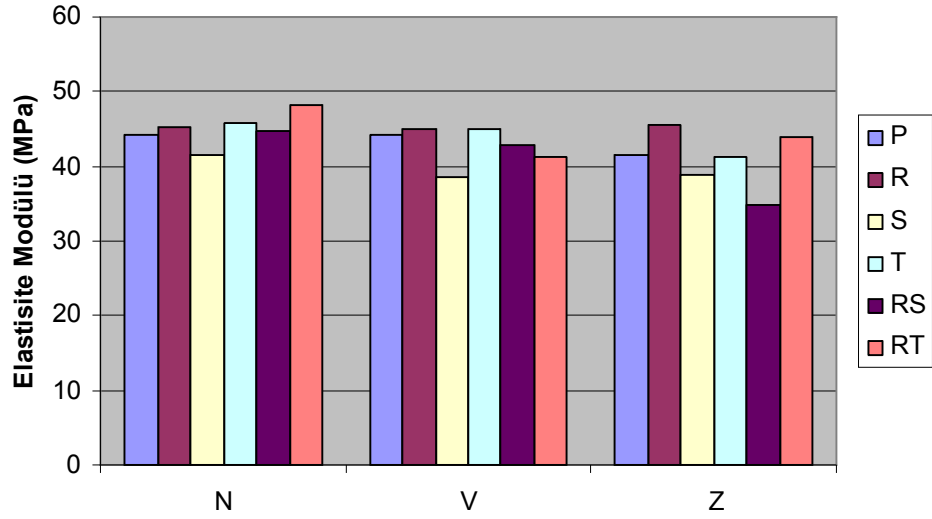
Deneylerden elde edilen sonuçlar çubuk diyagram şeklinde Şekil 4.8’ de aşağıda verilmiştir. Burada küp basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde yine içerisinde yalnızca 6/16 OL içeren R kodlu numunenin diğer tüm betonlardan daha yüksek basınç dayanıma ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar ışığında betonda kısa kesilmiş çelik liflerin kullanımının beton basınç mukavemetini artırdığı sonucuna varılabilir.



Şekil 4.8 : Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait silindir basınç dayanımı diyagramı

Burada küp basınç dayanımı sonuçlarından farklı ve çarpıcı olarak ortaya çıkan bir diğer sonuç ise içerisinde 6/16 OL lif bulunmayan yalnızca ZP305 ve ZP305X lif bulunduran S ve T kodlu karışımların basınç dayanımının yalın betona yakın olmasıdır. Bu gözlemden betonda kullanılan makro düzeydeki liflerin betonun basınç dayanımına etkisinin önemsiz olduğu anlaşılmaktadır. Silindir basınç deneyi yapılırken her 25 kN'luk yüke karşılık gelen düşey yer değiştirme değeri okunarak, elde edilen grafiklerden elastisite modülü hesaplanmaktadır. Aşağıda Şekil 4.9' da hesaplanan elastisite modülü değerleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

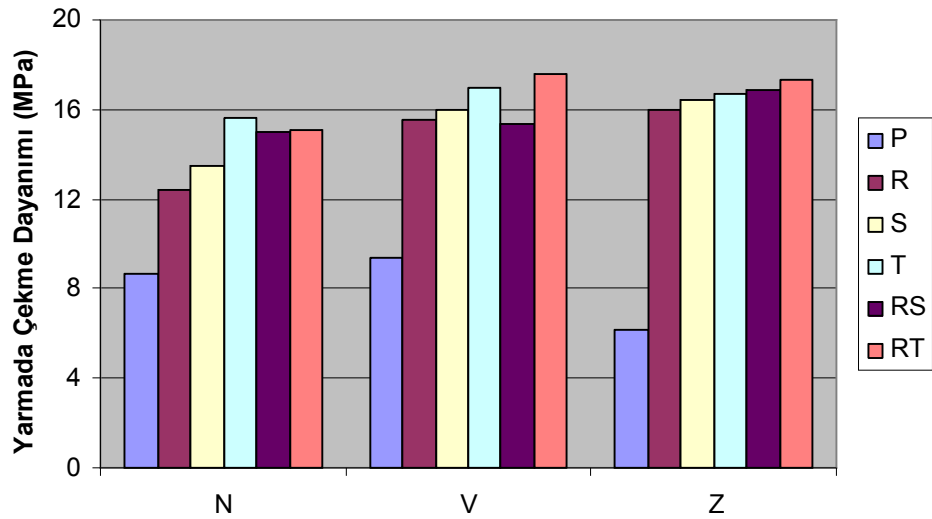
Şekil 4.9' da farklı tipte çelik lif içeren ve lif içermeyen beton karışımlarına ait elastisite modülü değerleri görülmektedir. Bu değerlerin çoğu birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle yapılan deneylerden betonda farklı lif kullanımının elastisite modülü üzerine belirgin bir etkisinin olmadığı sonucuna varılır.



Şekil 4.9 : Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait elastisite modülü diyagramı

4.2.1.3. Silindir Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Silindir yarma deneylerinden elde edilen sonuçlar sertleşmiş beton özellikleri tablolarında verilmektedir. Bu sonuçlar Şekil 4.10’ da gösterilmektedir.

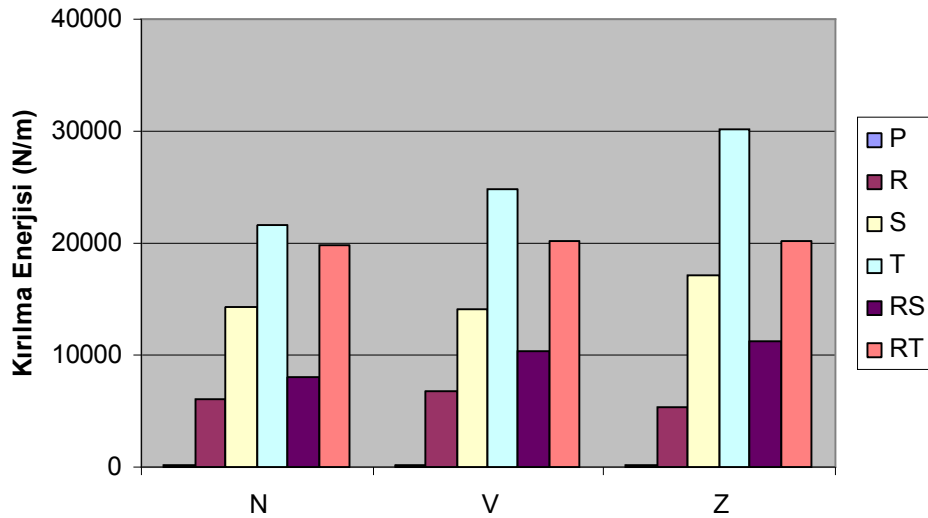


Şekil 4.10: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait silindir yarmada çekme dayanımı diyagramı

Şekil 4.10’ da görüldüğü üzere betonda lif kullanımı hangi tip ve çeşitte lif kullanılırsa kullanılsın yalın betona göre betonun yarmada çekme dayanımını belirli ölçüde artırmaktadır. Yine şekile bakıldığında T ve RT kodlu içerisinde kopma mukavemeti 2250 MPa olan ZP305X türü lif içeren karışımların diğer karışımlardan daha yüksek yarmada çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Son olarak şekilden çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise tüm deneylerde makro lif içeren karışımların mikro lif içerenlere göre daha yüksek yarmada çekme dayanımına sahip olmasıdır. Bütün bu sonuçlardan betonda lif kullanımının yarma dayanımı artırdığı, yüksek dayanımlı makro lif kullanımıyla bu artışın daha fazla olduğu görülmektedir.

4.2.1.4 RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

RILEM kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen grafikler incelendiğinde lif içeren betonların lif içermeyen yalın betonlardan çok daha yüksek şekil değiştirme yeteneği ve böylece çok daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip oldukları görülmektedir.

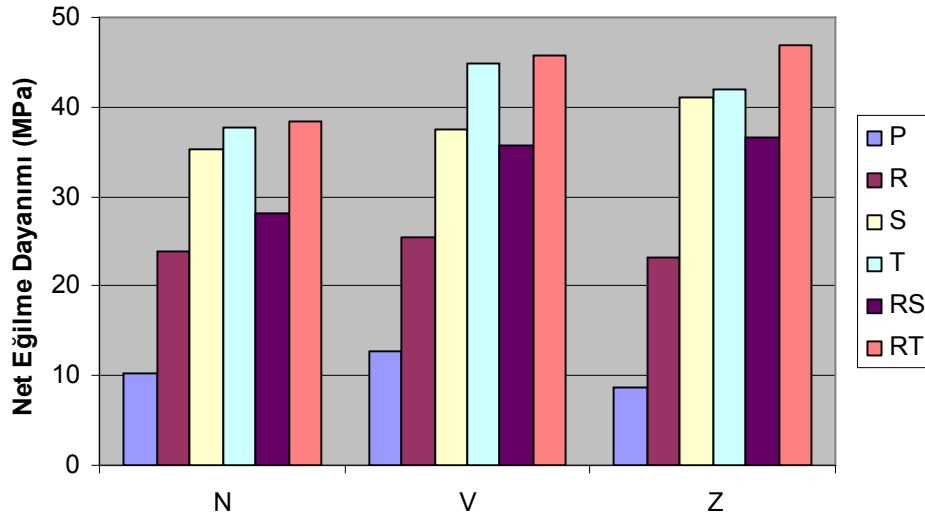


Şekil 4.11: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait kırılma enerjileri diyagramı

Tüm bu sonuçlardan ve daha önce paragraf 3.8.4’ de verilen grafiklerden betonda lif kullanımının betonun kırılma enerjisini önemli ölçüde artırdığı sonucuna varılır. Sertleşmiş beton özellikleri tabloları incelendiğinde yarmada çekme dayanımında gözlemlenen duruma benzer yaklaşımlar burada da mevcuttur. Betonda kullanılan tüm çelik lifler betonun enerji yutma kapasitesi değerini artırırken artışın en belirgin

şekilde kendini gösterdiği karışım içerisinde kopma mukavemeti yüksek makro liflerin bulunduğu beton karışımlarıdır. Yapılan deneylerde de kırılma enerjisinin en yüksek olduğu karışımlar T ve RT kodlu içerisinde ZP305X tipi çelik lif bulunduran karışımlardır.

RILEM enerji deneylerinden elde edilen bir diğer sonuç ise net eğilme dayanımı değerleridir. Bu değerler Şekil 4.12’ de verilmektedir.



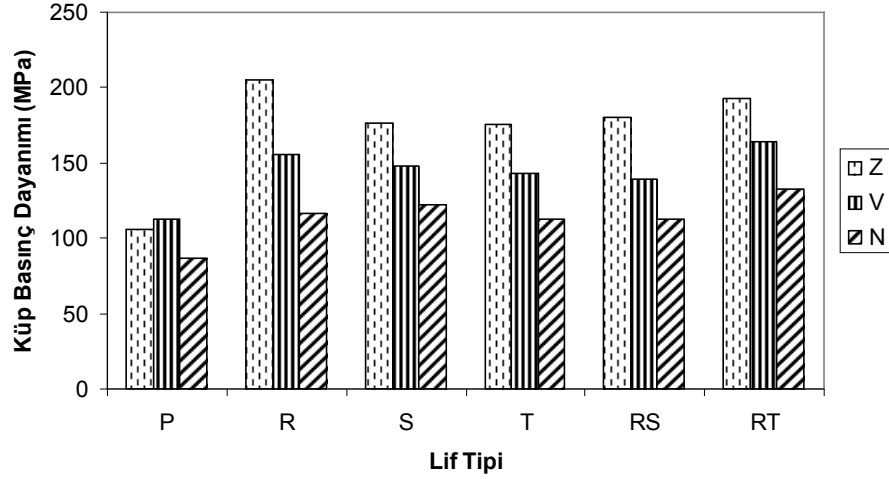
Şekil 4.12: Farklı kür işlemi görmüş farklı tipte lif içeren numunelere ait net eğilme dayanımı diyagramı

Şekil 4.12’ de görüldüğü üzere betonda çelik lif kullanımı eğilme dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu artışın en belirgin olduğu karışımlar farklı kür işlemi uygulamalarında T ve RT kodlu ZP305X tipi lif içerenlerdir.

4.2.2 Isıl İşlem Etkisinin Değerlendirilmesi

4.2.2.1 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Küp Basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri sertleşmiş beton özellikleri tablolarında verilmektedir. Numunelere uygulanan ısıtıl işlemin numunelerin küp basınç dayanımına etkisi Şekil 4.13’ de aşağıda verilmiştir.

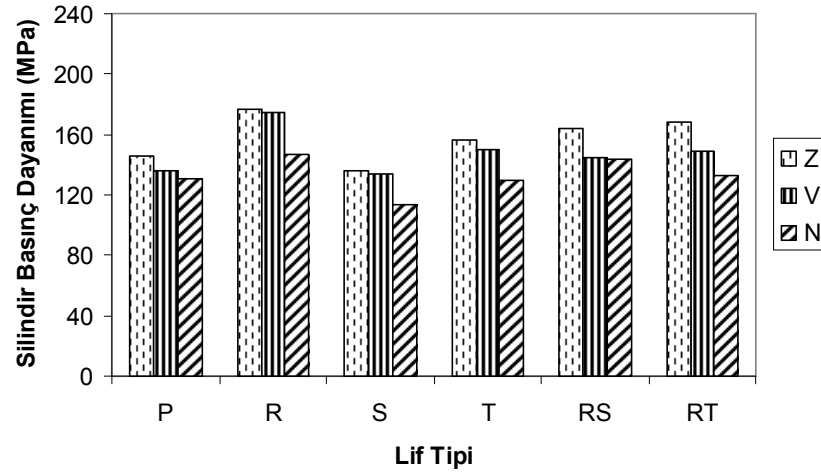


Şekil 4.13 : Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıt işlemin beton küp basınç dayanımına etkisi (Z= Etüv kürü, V= Buhar kürü, N= Normal su kürü)

Şekil 4.13’ de aynı çeşit ve oranda lif içeren numunelere uygulanan 3 farklı kür işlemi gösterilmektedir. Yüksek sıcaklıkta sıcak kür işleminin beton basınç mukavemetine olan belirgin etkisi grafikten görülmektedir. İçerisinde lif içeren tüm numunelerde uygulanan ısıt işlemin sıcaklık değeri arttıkça betonun basınç mukavemetinde de belirgin bir artışın olduğu anlaşılmaktadır. Bu noktadan hareketle çelik lif içeren betonlarda yüksek sıcaklıklarda uygulanacak kür işleminin beton basınç mukavemetini önemli ölçüde artırdığı sonucuna varılmaktadır. Şekil 4.13’ de belirtilenlere tek örnek P kodlu karışımdır. P kodlu karışım içerisinde lif içermeyen yalın betondur. Bu karışımda uygulanan yüksek sıcaklıktaki kür nedeniyle beton içerisinde mikro çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların betonun basınç mukavemetini bir miktar düşürmüş olduğu görülmektedir.

4.2.2.2 Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

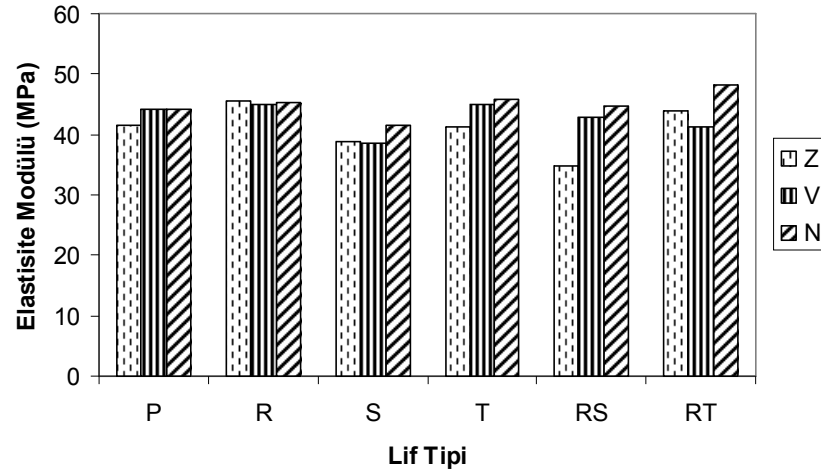
Silindir Basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri sertleşmiş beton özellikleri tablolarında verildi. Numunelere uygulanan ısıt işlemin numunelerin silindir basınç dayanımına etkisi Şekil 4.14’ de verilmektedir.



Şekil 4.14 : Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıt işlemin beton silindir basınç dayanımına etkisi (Z= Etuv kuru, V= Buhar kuru, N= Normal su kuru)

Şekil 4.14’ de Şekil 4.13’ deki küp basınç dayanımı değerleri diyagramına benzer bir grafik elde edilmiştir. Bu şekilde de çelik lif içeren betonlarda uygulanacak kür işleminde betonun basınç mukavemeti değerinin arttığı görülmektedir. Burada tek fark P kodlu yalın beton numuneleri yüksek sıcaklıktan zarar görmemiş ve mukavemeti bir miktar artmıştır. Yine farklı ısıt işlemlerin betonun elastisite modülü üzerine etkileri Şekil 4.15’ de gösterilmektedir.

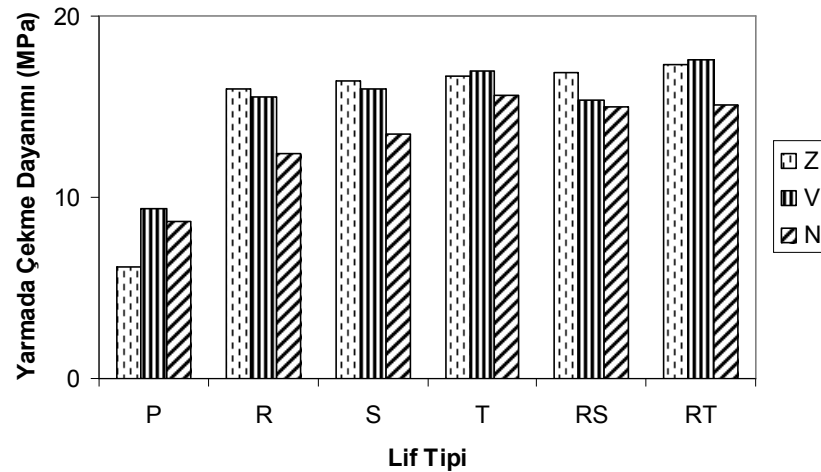
Şekil 4.15’ de uygulanan farklı sıcaklıklardaki ısıt işlemlerin betonun elastisite modülü üzerine etkileri gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde farklı tipte küre tabi tutulan numunelerin elastisite modülü değerlerinin birbirine çok yakın seyrettiği anlaşılmaktadır. Böylece, uygulanan ısıt işlemin beton elastisite modülü üzerine belirgin bir etkisi olmamıştır.



Şekil 4.15 : Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıt işlemin beton elastisite modülüne etkisi (Z= Etüv kürü, V= Buhar kürü, N= Normal su kürü)

4.2.2.3 Silindir Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Farklı ısıt işlem görmüş numunelerin yarmada çekme dayanımı Şekil 4.16' da verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere betona uygulanan yüksek sıcaklıktaki ısıt işlem betonun yarmada çekme dayanımını bir miktar artırmaktadır. Yarma-çekme dayanımları çelik lif içeren tüm betonlarda ısıt işlemle birlikte %15-%30 oranında bir artış göstermektedir.

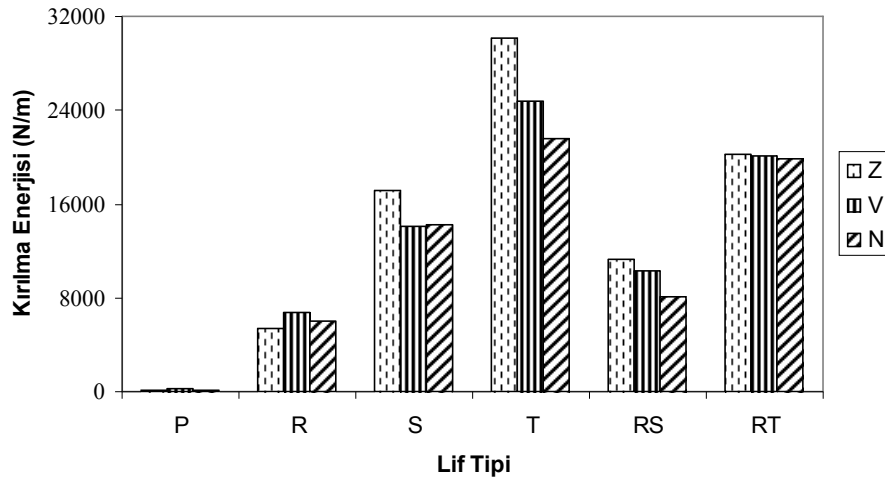


Şekil 4.16 : Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıt işlemin betonun yarmada çekme dayanımına etkisi (Z= Etüv kürü, V= Buhar kürü, N= Normal su kürü)

4.2.2.4 RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların

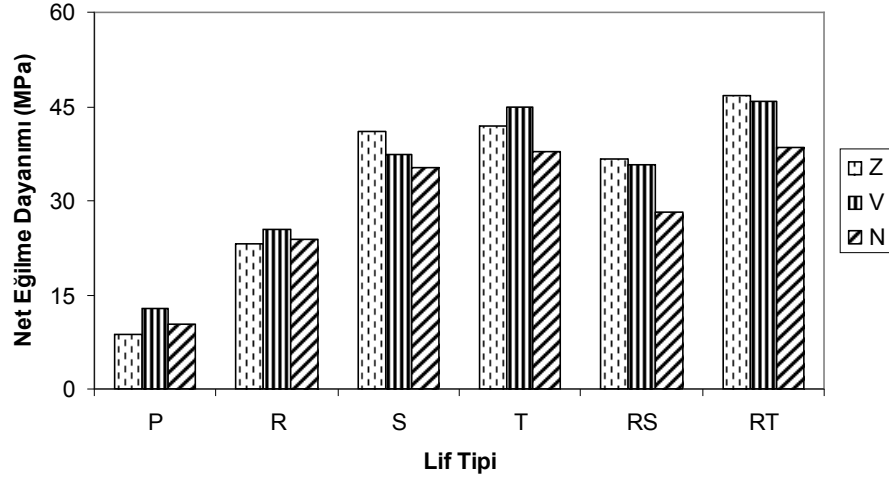
Değerlendirilmesi

Şekil 4.17’ de normal su kürü, 90°C’ de buhar kürü ve 200°C’ de sıcak kür uygulanan numunelerin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde 90°C’ de kür uygulanan numunelere göre 200°C’ de sıcak kür uygulanmasıyla kırılma enerjilerindeki en yüksek artış %21 değeri ile T kodlu karışımda gerçekleşmiştir. Sıcaklığın yükselmesiyle silis dumanının puzolanik özelliği ortaya çıkmış, serbest kireç bağlanmış ve böylece daha kararlı bir iç yapıya ulaşılmıştır. Yüksek sıcaklıkta kür gören numunelerde matris dayanımının artmasıyla daha yüksek lif-matris aderansı oluşmaktadır. Burada elde edilen bir diğer sonuç ise sıcak kür ile güçlenen lif-matris aderansında kopma mukavemeti yüksek çelik lif kullanımı, kırılma enerjisinde meydana gelen artış oranını arttırmaktadır.



Şekil 4.17 : Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıtılmanın betonun kırılma enerjisine etkisi (Z= Etüv kürü, V= Buhar kürü, N= Normal su kürü)

Yüksek sıcaklıkta ısıtılmanın karışımların eğilme davranışı üzerindeki etkileri Şekil 4.18’ de verilmiştir. Şekil incelendiğinde herhangi bir sıcaklıkta uygulanan ısıtılmanın betonun net eğilme dayanımını artıracak görülmektedir. Ancak, bu artışın belli bir sıcaklık değerine (90°C) kadar daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Uygulanan ısıtılmanın net eğilme dayanımını %10 ile % 30 oranında artırdığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.18 : Aynı tipte lif içeren numunelere uygulanan üç farklı ısıl işlemin betonun net eğilme dayanımına etkisi (Z= Etüv kürü, V= Buhar kürü, N= Normal su kürü)

4.3 Farklı İki Kür İşlemine Tabi Tutulmuş Değişik Tipte Lif İçeren Beton Numunelerinin Küp Basınç Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde ultra yüksek performanslı betonların üretimine ilişkin olarak İSTON A.Ş' de gerçekleştirilen deneyler, bu deneylerde kullanılan malzeme bileşimleri ve uygulanan iki farklı ısıl işlem sonucu elde edilen küp basınç dayanımları sunulmaktadır.

Tablo 4.4: Karışımlardaki malzeme bileşenleri (İSTON)

	Karışım Kodu	1	2	3
Karışımdaki Bileşenler	Çimento (PÇ42,5) (Kg/m³)	1000	1000	1000
	İnce Silis Kumu (Kg/m³)	340	340	340
	İri Silis Kumu (Kg/m³)	227	227	227
	Silis Dumanı (Kg/m³)	250	250	250
	Katkı (Optima 200) (Kg/m³)	125	125	125
	Su (Kg/m³)	120	120	120
	OL Tel -Beksa (Kg/m³)	500	500	500
	Dramix (3 cm) (Kg/m³)	240	143	70
	Dramix (6 cm) Kg/m³	97	50	-

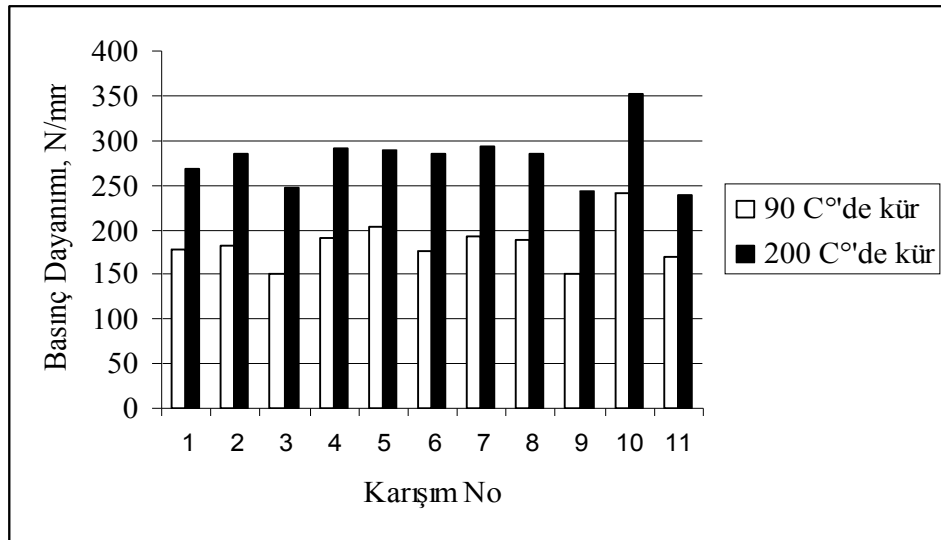
	Karışım Kodu	4	5	6
Karışımdaki Bileşenler	Çimento (PÇ42,5) (Kg/m³)	1000	1000	1000
	İnce Silis Kumu (Kg/m³)	340	340	340
	İri Silis Kumu (Kg/m³)	227	227	227
	Silis Dumanı (Kg/m³)	250	250	250
	Katkı (Optima 200) (Kg/m³)	125	125	125
	Su (Kg/m³)	120	120	120
	OL Tel -Beksa (Kg/m³)	400	400	400
	Dramix (3 cm) (Kg/m³)	240	143	70
	Dramix (6 cm) Kg/m³	50	-	97

	Karışım Kodu	7	8	9
Karışımındaki Bileşenler	Çimento (PÇ42,5) (Kg/m³)	1000	1000	1000
	İnce Silis Kumu (Kg/m³)	340	340	340
	İri Silis Kumu (Kg/m³)	227	227	227
	Silis Dumanı (Kg/m³)	250	250	250
	Katkı (Optima 200) (Kg/m³)	125	125	125
	Su (Kg/m³)	120	120	120
	OL Tel -Beksa (Kg/m³)	300	300	300
	Dramix (3 cm) (Kg/m³)	240	143	70
	Dramix (6 cm) Kg/m³	-	97	50

	Karışım Kodu	10	11
Karışımındaki Bileşenler	Çimento (PÇ42,5) (Kg/m³)	1000	1000
	İnce Silis Kumu (Kg/m³)	340	340
	İri Silis Kumu (Kg/m³)	227	227
	Silis Dumanı (Kg/m³)	250	250
	Katkı (Optima 200) (Kg/m³)	125	125
	Su (Kg/m³)	120	120
	OL Tel -Beksa (Kg/m³)	600	300
	Dramix (3 cm) (Kg/m³)	143	100
	Dramix (6 cm) Kg/m³	97	-

Tablo 4.5: K p basınç dayanımları (İSTON)

Karışım	90 C° ' de Buhar K�r�		200 C° ' de Etüv K�r�	
	K�p Basınç Dayanımı (Ort.) (N/mm ²)	K�p Basınç Dayanımı(Maks.) (N/mm ²)	K�p Basınç Dayanımı (Ort.) (N/mm ²)	K�p Basınç Dayanımı(Maks.) (N/mm ²)
I	177	187	268	280
II	183	192	285	306
III	151	160	248	259
IV	191	199	291	311
V	204	210	288	299
VI	176	186	285	309
VII	193	196	293	303
VIII	188	222	284	305
IX	151	200	243	270
X	240	252	352	364
XI	169	182	238	256

**Şekil 4.19 :** Uygulanan farklı ısıl işlemlerin numunelerin basınç dayanımına etkisi

Betona ısıtıl işlem uygulanmasıyla çimento hidratasyonu hızlanır ve beton daha erken dayanım kazanır. Yüksek sıcaklıklarda silis aktif hale geçerek çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girer ve mukavemeti serbest kireçten daha yüksek C-S-H oluşturur.

Şekil 4.18' de karışım kodları verilen betonlara 200°C' de ısıtıl kür uygulanması betonun mikroyapısını iyileştirmekte ve basınç dayanımı değerlerinin 90°C ısıtıl işlem görmüş numunelere göre % 65' lere varan oranlarda artmasını sağlamıştır.

5. GENEL SONUÇLAR

5.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Betona hacimce % 3 oranında çelik lif ilave edilmesi, başta betonun kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı olmak üzere, basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımlarını arttırmıştır.
- Lif içermeyen P kodlu karışıma ait numuneler gevrek bir davranış gösterirken, lif kullanımı ile betonda sünek davranış sağlanmış ve numuneler çok daha yüksek miktarda enerji yutarak kontrollü olarak kırılmıştır. Böylece, çelik lif eklenmesi ile betonun en büyük problemi olan gevreklik sorunu ortadan kaldırılmıştır.
- Betona çelik lif eklenmesi beton küp basınç dayanımını arttırmaktadır. Bu artışlar en fazla kısa kesilmiş çelik lif içeren numunelerde görülmektedir. Narinliği yüksek ZP305 tipi lif kullanılan S karışımında ise, lifsiz betona göre silindirik basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir.
- Betona çelik lif eklenmesi ile kırılma anında yutulan enerji miktarı önemli ölçüde artarken, bu artış oranı eklenen çelik lifin tipine göre değişmektedir. Kırılma enerjisindeki en büyük artış, çelik tel kopma mukavemeti yüksek uzun liflerin kullanıldığı numunelerde, en az artış ise yalnızca kısa kesilmiş çelik liflerin kullanıldığı numunelerde görülmüştür. Narinliği yüksek lif kullanılan numunelerin yük-sehim grafiğinin alçalan kısmındaki eğim, kısa kesilmiş narinliği daha düşük lif kullanılan numunelerden daha azdır. Böylece, yük-sehim grafiğinin altındaki alan uzun lif kullanımıyla artmakta ve buna bağlı olarak kırılma anında yutulan enerji miktarı da uzun lif kullanılan karışımlarda artmaktadır. Normal su kürü gören numunelerde çelik lif kullanımı ile kırılma anında yutulan enerji 33-120 kat artarken, 90°C’ de buhar kürü görmüş numunelerde 34-123 kat artmış, 200°C’ de sıcak kür görmüş numunelerde ise bu artış 32-118 kat olarak gerçekleşmiştir.
- Normal su kürü uygulanan numunelerle karşılaştırıldığında, betona 90°C’ de uygulanan buhar kürü ve 200 °C’ de uygulanan sıcak kür, betonun mekanik

özelliklerinde genel olarak belirgin bir artışa neden olmaktadır. Bu artış, karışımlarda kullanılan silis dumanı ve silis kumlarındaki silisin yüksek sıcaklık ile aktif hale geçmesi ve çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan serbest kireci bağlamasıyla açıklanabilir. Böylece, iç yapısı kararlı daha sıkı bir matris elde edilmekte ve lif-matris aderansı artmaktadır.

- Normal su kürü uygulanan numunelerin küp basınç dayanımı çelik lif içeren karışımlarda, lif içermeyen P kodlu karışıma göre % 28-53 oranında artmış olup , en büyük değer 133 MPa olarak RTN kodlu karışımdan elde edilmiştir. Benzer olarak, buhar kürü gören karışımlarda %25-%48 ve sıcak kür gören karışımlarda %66-%94 arasında bir artış gerçekleşmiştir. Böylece, betonda çelik lif kullanımının beton küp basınç dayanımını arttırdığı, sıcak kür verilmesi ile de bu artışın daha belirgin hale geldiği görülmektedir.
- Çelik lif kullanımının net eğilme dayanımlarındaki etkisi oldukça belirgindir. Normal su kürü uygulanan numunelerin net eğilme dayanımları lif içeren karışımlarda yalın betona göre 2,3-3,8 kat artarken, bu oran 90°C buhar kürü için 2-3,6 kat, 200 °C’ de sıcak kür görmüş numuneler içinse 2,7-5,4 kat artış olarak gerçekleşmiştir. Her üç kür durumu içinde en büyük artışlar RT numunelerinden elde edilmiştir. Normal su kürlü RTN numunelerinin net eğilme dayanımı 38,5 MPa, buhar kürlü RTV numunelerinin 45.8 MPa, sıcak kür görmüş RTZ numunelerinin ise 46.8 MPa dır.
- Lif kullanımı ile yarmada çekme dayanımlarını oldukça artırmıştır. Normal su kürü gören numunelerde artış %43-%79 arasında gerçekleşirken, buhar kürü gören numunelerde %64-%87 arasında bir artış, sıcak kür gören numunelerde ise %148-%179 arasında bir artış gerçekleşmiştir. Burada dikkat çeken bir husus yüksek sıcaklık kürü ile lif içermeyen numunelerin yarmada-çekme dayanımlarının düşmesidir. Bu durumun yüksek sıcaklık nedeniyle beton içerisinde oluşan mikro çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Betonda çelik lif kullanımı, çatlak oluşumu ve gelişimini engellediğinden lif kullanılan karışımlarda yarmada-çekme dayanımlarında artış gözlenmektedir.
- Elastisite modülü değerleri, lif tipinden ve uygulanan kür işleminden önemli derecede etkilenmemiştir.
- Net eğilme dayanımlarından elde edilen sonuçların, yarmada-çekme dayanımlarından elde edilen sonuçlara paralel olduğu görülmektedir.

- Kısa kesilmiş OL 6/16 liflerin numunelerin kırılma enerjileri, yarmada çekme dayanımları ve net eğilme dayanımları üzerinde olumlu bir etkisi olmakla beraber bu etki basınç dayanımlarında daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.
- Yüksek dayanımlı mezo 6/16 OL ve makro ZP305X liflerin bir arada kullanılması kırılma enerjileri, net eğilme dayanımları ve yarmada-çekme dayanımlarını önemli derecede artırmıştır. En yüksek kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımları bu numunelerden elde edilmiştir.
- Çalışmanın İSTON A.Ş' de gerçekleştirilen kısmında ise, betona 90° C' de uygulanan yüksek sıcaklık kürü yerine, 200°C' de ısıt kür uygulanmasıyla numunelerin küp basınç dayanımlarında % 65' e varan oranlarda artış gözlenmektedir.

5.2. İleri Çalışmalar İçin Öneriler

Bu bölümde, çalışmanın devamı niteliğinde araştırılması gereken konular verilmiştir.

- Betonda iri agrega yerine tane boyutu sınırlandırılmış ince agrega kullanımı ile betonda oluşabilecek büyük kusurlar ortadan kaldırılmış ve mikro yapı iyileştirilmiştir. Silis dumanı gibi çok ince taneli malzemelerin kullanılmasıyla hem daha boşluksuz yapı elde edilmiş hem de betona sertleşme sürecinde verilen sıcak kür ile çimentonun ikincil hidratasyonundan oluşan serbest kireç bağlanarak daha kararlı bir iç yapıya ulaşılmıştır. Su/bağlayıcı oranında kullanılan hiperakışkanlaştırıcı ile geleneksel betonlara göre oldukça düşürülmesine bağlı olarak geçirimsizliğinde düşük olması beklenmektedir. Bütün bu veriler ışığında üretilen betonların çevre etkilerine dayanımları olarak adlandırılan durabilite özelliklerinin de oldukça yüksek olacağı düşünülmektedir. Bu betonlara donma-çözünme, aşınma, klor difüzyonu ve su emme gibi durabilite deneylerinin yapılması önerilmektedir.
- Betonda kullanılan çimentonun sülfat içeriğinin yüksek olması, betonda mikro çatlakların ve boşlukların olması ve yapı elemanının sürekli veya tekrarlı su teması durumlarında gecikmiş etrenjit oluştuğu, sıcak kür işleminin ise bu oluşumu hızlandırdığı düşünülmektedir. Bütün bu nedenlerle, üretilen betonlarda gecikmiş etrenjit oluşumu incelenmelidir.
- Yüksek performanslı betonlarda, su/bağlayıcı oranının düşmesiyle karşılaşılan önemli problemlerden birisi otojen rötredir. Su/çimento oranı düşük ve

ince malzeme miktarı fazla bu betonlarda, çimento hamuru hidratasyon için gerekli suyu, mikro boşluklardaki iç sudan karşılamaktadır. Boşluk suyunun azalması ile betonda büzülme oluşur. Erken yaşlarda çatlak oluşumuna neden olan bu büzülme otojen rötre olarak tanımlanır. Üretilen betonlarda otojen rötrenin meydana gelip gelmediği incelenmelidir.

- Bu çalışmada çelik lif kullanımı ve betona yüksek sıcak kür verilmesi neticesinde kırılma enerjilerinde büyük artışlar sağlanmıştır. Aynı şekilde kullanım alanlarının daha iyi belirlenebilmesi amacıyla üretilen bu betonların darbe dayanımlarının da incelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Aitcin, P.C.**, 2000. Cement of Yesterday And Today Concrete of Tomorrow, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, 1349-1359
- [2] **Taşdemir, M. A., Bayramov, F. ,** Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ Dergisi*, Aralık 2002, Cilt.1, Sayı.2, pp.125-144.
- [3] **Richard, P., and Cheyrezy, M.**, 1995. Composition of Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1501-1511.
- [4] **Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. and Aitcin, P.C.**, 1997. Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes, *ACI Materials Journal* / July- August, **94**, 286-290
- [5] **Cheyrezy, M., Maret, V. and Frouin, L.**, 1995. Microstructural Analysis of RPC, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1491-1500.
- [6] **Dugat, J., Roux, N. and Bernier, G.**, 1996. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, *Materials and Structures*, **29**, 233-240.
- [7] [http:// www.lafarge-beton.com.tr](http://www.lafarge-beton.com.tr)
- [8] <http://www.lafarge-beton.com.tr/ekmelhome.nsf/proday!OpenPage&Click>
- [9] **Özyurt, N.**, 2000, Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [10] **Balaguru, P.N., Shah, S.P.**, 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, Inc., pp.413-419
- [12] **Taşdemir M.A., Kocatürk, A.N., Haberveren, S. ve Aslan, G.**, 2005. Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar*, 16-17-18 Kasım, pp.447-457.
- [13] **Freyssinet, E.**, 1936 Cement and Concrete Manufacture., Vol. 9, pp. 71.

- [14] **Roy D. M., Gouda G.D.**, 1983 Very High Strength Cement Pastes Prepared by Hot Pressing and Other High Pressure Techniques. *Cement and Concrete Res.*, Vol. 3 (6), pp. 807-820.
- [15] **TS 10513**, 1992. Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [16] **Romualdi, J.P., Mandel, J.A.**, 1964. Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closed Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement. *ACI Proceedings* 61, pp.667-670.
- [17] **Swamy, R.N.**, 1975. Fiber Reinforcement of Cement and Concrete. *RILEM, Materials and structures*, Vol.8, No. 45, pp.235-253.
- [18] **ACI Committee544**, 1993. Guide for Specifying, mixing, placing and finishing steel fibre reinforced concrete. (ACI544.3R-93), *ACI Materials Journal*, **90(1)**, 94-101.
- [19] **Bayasi, Z. and Soroushian P.**, 1991. Fiber Type Effects on The Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, 129-134.
- [20] **Shah, S.P., and Rangan, B.V.**, 1971. Fiber Reinforced Concrete Properties, *ACI Materials Journal*, **68(2)**, 126-135
- [21] **Lange-Kornbak, D.,and Karihaloo, B.L.**, 1998. Design of Fibre-Reinforced DSP Mixes for Minumum Brittleness, *Advanced Cement based Materials*, **7**, 89-101
- [22] **Chang, D.I., and Chai, W.K.**, 1995. Flexural Fracture and Fatigue Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Structures, *Nuclear Engineering and Design*, **156**, 201-207.
- [23] **Ramakrishnan, V., Wu, G.Y., and Hosalli, G.**, 1989. Flexural Fatigue Strength, Endurance Limit, and Impact Strength of Fiber Reinforced Concretes, *Transportation Research Record*, **No.1226**, pp.69-77
- [24] **Ceylan, C.**, 1999. Lifli geçirimli beton yol üst yapısının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25] **Köksal, F.**, 2004. Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışı ve optimum tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [26] **Craig, R.J.**, 1984. Structural Application of Reinforced Fibrous Concrete, *Concrete International*, December. Vol.6, pp.16-21
- [27] **Mizukoshi, M., Shimauchi, H., Kaguma., H., Matsui, S.**, 1994. Properties of Flexural Fatigue of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Transaction of The Japan Concrete Enstitute*, Japan, Vol.16.
- [28] **Betterman, L.R., Ouyang, C. And Shah, S.P.**, 1995. Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*, 2, pp.53 – 61.
- [29] **Güvensoy, G.**, 2004. Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Kırılma Parametreleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [30] **Purkiss, J.A.**, 1984. Steel Fibre Reinforced Concrete of Elevated Temperatures. *Int. Journal of Cem. Composites and Lightweight Concrete*, August, Vol. 6, No.3, pp.179-183.
- [31] [http:// www.degussa-cc.com.tr/DCCTurkey/Tr/Products/Category_01/](http://www.degussa-cc.com.tr/DCCTurkey/Tr/Products/Category_01/)
- [32] <http://www.antepcimento.com/urunler.asp>
- [33] <http://www.teknoyapi.com>
- [34] <http://www.beksa.com.tr/celiktel2.pdf>
- [35] **Ezeldin, A., Balaguru, P.**, 1989. Bond Behavior Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 86 , 515-524
- [36] **Avar, D.**, 2006. Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [37] **Doğru, D.**, 2006. Yüksek Performanslı Karma Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışına 200°C Sıcaklıkta Kür Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

ÖZGEÇMİŞ

Fatih ÖZALP, 1979 yılında Kayseri’ de doğdu. 1996 yılında Kadıköy Kazım İşmen Lisesi’ nden mezun oldu.1997-1998 öğretim yılında İ.T.Ü İngilizce Hazırlık Bölümünü tamamladıktan sonra İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2003’ te mezun oldu. Yüksek lisans öğrenimine aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalında başladı. Ağustos 2002 ‘den bu yana İSTON A.ř.’ de (İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları Sanayi ve Ticaret Anonim şirketi) çalışmaktadır.