İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK TEL DONATILI ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Can Arda KİREMİTÇİ

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK TEL DONATILI ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Can Arda KİREMİTÇİ
(501051023)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)

Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca bana her konuda yardımcı olan çok değerli hocam İTÜ İnşaat Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR 'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.
Yüksek Lisans çalışmam boyunca bana her konuda destek olan ve sevgisini esirgemeyen sevgili eşim Sabahat TOPUZ KİREMİTÇİ'ye; tüm eğitimim boyunca her zaman her konuda büyük desteklerini gördüğüm sevgili anneme,kardeşime ve varlığını her zaman yanımda hissettiğim babama, çalışmalarım süresince her anımda yanımda olan arkadaşlarım İnş.Y.Müh. Tolga ILICA, İnş.Y.Müh. Özgür EKİNCİOĞLU, İnş.Y.Müh. Cengiz ŞENGÜL ve bütün Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına, verdikleri destek ve gösterdikleri üstün sabır için teşekkür ederim.

Mayıs 2008 Can Arda KİREMİTÇİ

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER iii
KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET x
SUMMARY xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI 3
2.1 Çimento Esaslı Kompozitler 3
2.1.1 Normal betonlar 3
2.1.2 Yüksek dayanımlı yüksek performanslı betonlar 3
2.1.3 Yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı (SIFCON) 4
2.1.4 Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler 4
2.1.5 Reaktif pudra betonu (RPB) 5
2.1.6 Geleneksel çelik tel donatılı betonlar 11
2.1.7 Sentetik lifli yüksek performanslı betonlar 14
2.2 Çelik Liflerin Beton Özelliklerine Etkisi 15
2.2.1 Çelik tel tipi 18
2.2.2 Çelik tel içeriği 20
2.2.3 Çelik tel narinliği 21
2.2.4 Çelik telin çekme dayanımı 22
2.3 Silis Dumanınının Beton Özelliklerine Etkisi 22
2.3.1 Silis dumanının puzolanik etkisi 25
2.3.2 Silis dumanının boşluk doldurma özelliği 26
2.4 Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkisi 27
2.5 Isıl İşlemin Beton Özelliklerine Etkisi 27

3. DENEYSEL ÇALIŞMA 30
3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler 30
3.1.1 Çimento 30
3.1.2 Silis dumanı 31
3.1.3 İnce silis kumu 31
3.1.4 İri silis kumu 31
3.1.5 Kanca uçlu çelik tel 31
3.1.6 Düz çelik tel 32
3.1.7 Süperakışkanlaştırıcı 32
3.1.8 Demir tozu 32
3.2 Beton Karışımları ve Numune Kodları 33
3.3 Numune Boyutları ve Şekilleri 34
3.4 Kür Programı 34

3.5 Taze Beton Özellikleri 35
3.6 Sertleşmiş Beton Deneyleri 35
3.6.1 Silindir basınç deneyi 35
3.6.2 Üç noktalı eğilme deneyi ve kırılma enerjisinin belirlenmesi 36
3.6.3 Sertleşmiş numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar 37
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELEME VE DEĞERLENDİRMESİ 38
4.1 Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 38
4.2 Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 39
5. GENEL SONUÇLAR 42
KAYNAKLAR 44
EKLER 49
ÖZGEÇMİŞ 63

KISALTMALAR

RPB	:	Reaktif Pudra Betonu
DSP	:	Densified Small Particles - Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler
MDF	:	Macro Defect Free - Büyük Kusurlarından Arındırılmış Çimento
SIFCON	:	Slurry Infiltrated Fibered Concrete - Yüksek Oranda Çelik Tel İçeren Çimento Bulamacı
ÇTDB	:	Çelik Tel Donatılı Beton
YDB	:	Yüksek Dayanımlı Beton
YPB	:	Yüksek Performanslı Beton
UYDÇK	:	Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit
TS	:	Türk Standardı
MPa	:	Mega Pascal
GPa	:	Giga Pascal
PÇ	:	Portland Çimentosu
SD	:	Silis Dumanı
LVDT	:	Lineer Voltage Direct Transducer
RILEM	:	Réunion Internationale des laboratories d'Essais et de Rechearchers sur les Matériaux et les Constructions (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures)
ACI	:	American Concrete Institute
ACIFC	:	The Association of Concrete Industrial Flooring Contractors

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 Normal dayanımlı beton , yüksek dayanımlı beton ve reaktif pudra betonlarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. 6
Tablo 2.2 RPB 200 ve RPB 800'e ait birleşimler. 7
Tablo 2.3 RPB 200 ve RPB 800'ün mekanik özelikleri..... 7
Tablo 2.4 Sherbrook köprüsü RPB bileşimi..... 9
Tablo 2.5 RPB kullanılarak inşa edilmiş köprüler. 10
Tablo 2.6 Alaşım türüne göre silis dumanındaki SiO_2 miktarları. 23
Tablo 2.7 Tipik silis dumanı kimyasal bileşimi. 23
Tablo 2.8 Çeşitli malzemelerin incelikleri 24
Tablo 3.1 Üretimlerde kullanılan çimentonun özellikleri. 30
Tablo 3.2 Üretimlerde kullanılan silis dumanının özellikleri..... 31
Tablo 3.3 Kullanılan ince silis kumuna ait elek analizi sonuçları. 31
Tablo 3.4 Kullanılan ince silis kumuna ait elek analizi sonuçları. 31
Tablo 3.5 Kancalı uçlu çelik tellerin teknik özellikleri. 32
Tablo 3.6 Kısa tellerin teknik özellikleri. 32
Tablo 3.7 Demir tozu kimyasal bileşimi. 33
Tablo 3.8 Karışımların kodları, karışımlardaki demir tozu ve çelik lif yüzdeleri. 34
Tablo 3.9 Taze beton özellikleri. 35
Tablo 3.10 Sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlar..... 37
Tablo A-1 Silindir numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerleri 49
Tablo A-2 Silindir numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri..... 50
Tablo B-1 Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjisi değerleri..... 51
Tablo B-2 Prizma numunelerden elde eğilen eğilme dayanımı değerleri 51

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutu etkisi 5
Şekil 2.2 Normal harç ve RPB 200'ün eğilme davranışlarının karşılaştırılması ... 8
Şekil 2.3 Moment taşıma kapasitesi aynı çeşitli malzemelerden yapılmış kiriş enkesitlerinin karşılaştırılması. 8
Şekil 2.4 Sherbrook köprüsü uzay kafes yapısı. 9
Şekil 2.5 Çatlamış betonarme kirişin reaktif pudra betonuyla güçlendirilmesi. .. 10
Şekil 2.6 Kırılma enerjisinin (G_F) ve karakteristik (L_{ch}) uzunluğun lif narinliği (L/D) ve içeriği (V_f) ile değişimi. 12
Şekil 2.7 Yüksek performanlı sentetik lif katkılı betonda üretim yönteminin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi 15
Şekil 2.8 Yüksek performanslı sentetik lif katkılı ekstrüzyon yöntemi ile üretilen bir eleman. 15
Şekil 2.9 ÇTDB kirişler için tipik yük-sehim eğrisi. 18
Şekil 2.10 Çelik lif tipleri ve kesitleri. 19
Şekil 2.11 ÇTDB'da kullanılan çelik tel tipinin yük-sehim eğrisine etkisi 19
Şekil 2.12 Çelik tel donatılı betonlarda tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi ... 20
Şekil 2.13 Çelik tel donatılı betonlarda tel içeriği ve tel narinliğinin yük-sehim eğrisine etkisi. 21
Şekil 2.14 Silis dumanı tane boyu dağılımı 24
Şekil 2.15 Çimento hamurunda silis dumanının doldurma etkisi. 25
Şekil 2.16 Karbon siyahı ve silis dumanı kullanılan çimento hamurlarının dayanımlarının karşılaştırılması. 26
Şekil 2.17 Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerde yük sehim eğrisi 28
Şekil 2.18 Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerde kırılma enerjisi çelik lif hacim oranı ilişkisi. 29
Şekil 2.19 Kür işleminin basınç dayanımına etkisi. 29
Şekil 3.1 Demir tozunda tane boyut dağılımı. 33
Şekil 3.2 Numune şekilleri ve boyutları. 34
Şekil 3.3 Numunelere uygulanan kür programı. 35
Şekil 3.4 Üç noktalı eğilme deney düzeneği. 36
Şekil 3.5 Yük-Sehim eğrisinin temsili gösterimi. 37
Şekil 4.1 Silindir basınç deney sonuçları. 38
Şekil 4.2 Karışımları elastisite modülü sonuçları. 39
Şekil 4.3 Numunelerin yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması. 39
Şekil 4.4 Kırılma enerjisi sonuçları. 40
Şekil 4.5 Net eğilme dayanımı sonuçları. 40
Şekil B.1 M0 numunelerine ait yük sehim grafikleri 52
Şekil B.2 M1 numunelerine ait yük sehim grafikleri 52
Şekil B.3 M2 numunelerine ait yük sehim grafikleri 52
Şekil B.4 M3 numunelerine ait yük sehim grafikleri 53

Şekil B.5 M4 numunelerine ait yük sehim grafikleri 53
Şekil C.1 Eğilme deneyi sonrası M0 numuneleri (A)..... 54
Şekil C.2 Eğilme deneyi sonrası M0 numuneleri (B)..... 54
Şekil C.3 Eğilme deneyi sonrası M1 numuneleri (A)..... 55
Şekil C.4 Eğilme deneyi sonrası M1 numuneleri (B)..... 55
Şekil C.5 Eğilme deneyi sonrası M2 numuneleri (A)..... 56
Şekil C.6 Eğilme deneyi sonrası M2 numuneleri (B)..... 56
Şekil C.7 Eğilme deneyi sonrası M3 numuneleri (A)..... 57
Şekil C.8 Eğilme deneyi sonrası M3 numuneleri (B)..... 57
Şekil C.9 Eğilme deneyi sonrası M4 numuneleri 58
Şekil C.10 Eğilme deneyi sonrası M4 numuneleri 58
Şekil C.11 Eğilme deneyi sonrası M0 numunesi kesiti 59
Şekil C.12 Eğilme deneyi sonrası M1 numunesi kesiti 59
Şekil C.13 Eğilme deneyi sonrası M2 numunesi çatlak görüntüsü 60
Şekil C.14 Eğilme deneyi sonrası M2 numunesi çatlak detayı 60
Şekil C.15 Eğilme deneyi sonrası M3 numunesi çatlak görüntüsü 61
Şekil C.16 Eğilme deneyi sonrası M3 numunesi çatlak detayı 61
Şekil C.17 Eğilme deneyi sonrası M4 numunesi çatlak görüntüsü 62
Şekil C.18 Eğilme deneyi sonrası M4 numunesi çatlak detayı 62

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{V_f}$	:	Çelik lif hacmi
l/d	:	Narinlik
$\mathbf{G_F}$	:	Kırılma enerjisi
$\mathbf{P_{max}}$	:	Maksimum yük
$\mathbf{W_0}$	:	Yük-sehim eğrisi altında kalan alan
m	:	Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı
g	:	Yerçekimi ivmesi
$\boldsymbol{\delta_0}$	:	Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu
$\mathbf{A_{lig}}$	:	Etkin kesit alanı
$\mathbf{F_{fnet}}$	:	Net eğilme dayanımı
L	:	Mesnetler arası uzaklık
B	:	Numune kesitinin genişliği
D	:	Numune kesitinin yüksekliği
a	:	Çentik derinliği
ε	:	Şekil değiştirme
C18, ..., C100	:	Beton basınç dayanım sınıfları
L ve d	:	Çelik tel uzunluğu ve çapı (mm)
E	:	Elastisite modülü
σ	:	Gerilme

ÇELİK TEL DONATILI ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞI

ÖZET

Ultra Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler çok ince kum, çimento, silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı ve çelik lifler kullanılarak üretilirler. Bu malzemeler, mükemmel darbe dayanımları, düşük geçirimlilikleri ve durabilite özellikleri sayesinde askeri ve stratejik yapılarda, betonarme yapıların güçlendirilmesinde ve ayrıca küçük ve orta boyutlarda prefabrike eleman üretiminde kullanılabilirler.

Bu özelliklere şu şekilde ulaşılmaktadır; i) bütün tanelerin dağılımının yoğun bir matris elde etmek için optimum biçimde ayarlanması, ii) maksimum tane çapının azaltılarak betonun homojenliğinin sağlanması, iii) betondaki su miktarının azaltılması, iv) inceliği yüksek silis dumanının puzolonik özeliklerinin etkili şekilde kullanılması, v) tüm bileşenlerin optimum birleşimi, vi) süneklik için çelik tel kullanılması, vii) çok yüksek dayanıma ulaşmak için basınç altında sertleştirmek ve sıcaklığın arttırılması.

Çalışmada beş değişik karışım tasarlanmıştır. Karışımlardan biri çelik lif içermeyen yalın betondur, bir karışıma da mikrolif olarak hacimce %9 demir tozu eklenmiştir. Ayrıca, kanca uçlu olan ve olmayan iki farklı çelik lif karışımlara eklenmiştir. Bunlar, düz uçlu kısa teller olan OL 6/16 ile kanca uçlu ZP 305X tellerdir. Mezo lif olarak kullanılan düz çelik teller, 6 mm uzunluğunda ve 0,16 mm çapındadır. Makro lif olarak kullanılan kancalı uçlu uzun teller ise 30 mm uzunluğunda ve 0,55 mm çapındadır. Liflerin dayanımları 2250 Mpa'dır. Çelik tel eklenen karışımlara ayrıca demir tozu da eklenmiştir. Karışımlardaki çelik tel ve demir tozu oranları değişmekle beraber hacimce oranlarının toplamı %9 olacak şekilde düzenlenmiştir. Matrisin karışım oranları şu şekildedir; çimento: silis dumanı: su: ince silis kumu: iri silis kumu: süperakışkanlaştırıcı = 1: 0,250: 0,110: 0,393: 0,551: 0,115. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,16'da sabit tutulmuştur. Tüm numuneler, 48 saat sonra kalıptan çıkarıldıktan sonra, 3 gün boyunca 200ºC'de yüksek sıcaklık kürü uygulanmış ve sonrasında deney tarihine kadar 20ºC'de kirece doygun kür havuzunda bekletilmiştir.

Kırılma enerjisinin ve eğilme dayanımının belirlenmesi için RILEM TC 50-FMC Teknik Komitesinin önerisine göre çentikli kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Uzunluğu 500 mm, en kesiti 100x100 mm olan kiriş numuneler deneye tabi tutulmuştur. Kiriş numuneler elmas testere ile kesilerek 40 mm derinlikte bir çentik açılmış ve etkin kesit alanı 60x100mm olarak alınmıştır. Elde edilen yük-sehim eğrisinin altında kalan alan kullanılarak kırılma enerjisi, maksimum yük kullanılarak ise net eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Silindir numuneler üzerinde ise basınç deneyi yapılmıştır. Bu şekilde betonun, kırılma enerjisi, net eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi, kırılma ve mekanik parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir.

Yalın betonla karşılaştırıldığında, çelik tel donatılı kompozitlerin net eğilme dayanımları ve özellikle kırılma enerjisi ve süneklikleri önemli derecede gelişmiştir. Mikrolif ile birlikte düz çelik tel veya kancalı uçlu çelik tel içeren betonların kırılma enerjileri yalın betona kıyasla 95 ile 170 kat artarken, karma lif içeren numunelerde 230 kata varan artış olmuştur. Böylece karma lifli betonlar yalın betonlara göre arttırılmış tokluk ve sünekliğe sahip bir davranış sergilemiştir.

MECHANICAL BEHAVIOUR OF ULTRA HIGH PERFORMANCE STEEL FIBER REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITES

SUMMARY

High Performance Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites are produced by using very fine sand, cement, silica fume, superplasticizers, and steel fibers. Since these materials have excellent impact resistance, low porosity and durability, they can be used for military and strategic structures, retrofitting reinforced concrete structures and also used for production of small or medium size prefabricated elements. These features are achieved by i) precise gradation of all particles in the mixture to yield a matrix with optimum density, ii) reducing the maximum size of particles for the homogeneity of the concrete, iii) reducing the amount of water in the concrete, iv) extensive use of the pozzolanic properties of highly refined silica fume, v) optimum composition of all components, vi) the use of steel fibers for ductility, vii) hardening under pressure and increased temperature, in order to reach very high strengths.

Five different mixtures were prepared for the study. One mixture was plain concrete, one mixture contains iron powder as a microfiber with a volume fraction of 9%. Two different steel fibers, OL 6/16 and ZP305X were added to the other three mixtures. The short ones, OL 6/16, were straight fibers without hooked ends as meso fibers, 6 mm in length and 0.16 mm in diameter and long ones (ZP 305X) were with hooked ends as macro fibers, 30 mm in length and 0,55 mm in diameter. The tensile strength of both steel fibers were 2250 MPa. Also iron powder was added to these mixtures. The volume fraction of steel fibers and iron powder was variable, but the total volume fraction of these materials were kept constant at 9%. The mixture proportions of the matrix was as follows; cement: silica fume: water: siliceous sand (0.5-2 mm) : siliceous powder (0-0.5 mm) : superplasticizer = 1: 0.250 : 0.110 : 0.393 : 0.551 : 0.115. Water-binder ratio was kept constant at 0.16. All the specimens were demolded after 48 hours then, cured for 3 days at 200ºC and until the testing day they remained in a tank with lime saturated water at 20ºC.

For the determination of the fracture energy and net bending strength, three-point bending test was performed on notched beams according to the recommendation of the RILEM 50-FMC Technical Committee. Beams of 500 mm length and 100x100mm cross section were tested. The effective cross section, was reduced to 60x100mm. The area under the load-deflection curves were used to evaluate the fracture energy and maximum load for determining the net bending strength. The cylindrical and cubic specimens were used in compressive tests. Thus, the fracture and mechanical parameters like fracture energy, net bending strength, compressive strength and modulus of elasticity were obtained from the experiments.

The net bending 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 from 95 to 170 times by

using two type of fibers (straight steel fibers or hooked end steel fiber together with iron powder) and 230 times by using three type of fibers. Thus, steel fiber concretes showed a behaviour of enhanced toughness and ductility when compared to plain concrete.

1. GİRİŞ

Beton, tüm dünyada kullanılan ve kullanımı en yaygın olan yapı malzemesidir. Geleneksel anlamda bakılırsa beton; agrega, çimento ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla üretilir. Betona değişik özelikler kazandırmak için çeşitli katkı maddeleri de eklenir.

Son yıllarda beton teknolojisinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Buna bağlı olarak günümüzde küp basınç dayanımları 200-800 MPa, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında değişen ve kırılma enerjileri 30000 J/m^2' yi aşan yüksek performanslı betonlar üretilebilmektedir. Bu tür betonlar Reaktif Pudra Betonu (RPB) olarak adlandırılmakta, süneklikleri normal betonlarınkine kıyasla 300 kat daha fazla olabilmekte ve SIFCON' da ise (matrisi; ince kum, silis dumanı, su ve çimentodan oluşan hacmen %20' ye kadar çelik tel içeren beton) kırılma enerjisi normal betonunkinin 1350 katına kadar çıkmaktadır (Richard ve ve Cheyrezy, 1994; Taşdemir ve Bayramov, 2002)

Yüksek dayanımlı betonların en büyük sorunu gevrekliktir. Reaktif pudra betonlarında, betona kısa kesilmiş çelik lif katılması ile yüksek dayanımın yanı sıra yüksek süneklik de elde edilebilir. Bu betonlarda, lif içeriğine ve lif narinliğine bağlı olarak çok yüksek kırılma enerjisine ve yüksek sünekliğe (şekil değiştirme yeteneği) erişilmektedir. Süneklikle birlikte darbe dayanımının ve enerji yutma kapasitesinin artması askeri yapılar, bazı önemli prefabrike elemanlar, endüstriyel zeminler, ağır trafiğin söz konusu olduğu özel durumlarda reaktif pudra betonlarını cazip hale getirmektedir (Bayramov ve diğ., 2004b.)

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

dayanımın yanı sıra üstün fiziksel özeliklere sahiptirler ve geçirimlilikleri çok düşüktür (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Sunulan bu çalışmada; reaktif pudra betonlarının mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Karışımlarda ince agrega, silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı ile düz ve kancalı uçlu çelik lifler kullanılmıştır. Ayrıca karışımlarda su miktarı düşük, bağlayıcı miktarı yüksek tutularak yoğunluğun arttırılması hedeflenmiştir.

Çalışmada 5 ayrı karışım tasarlanmıştır. Bu karışımların lifsiz üretilen bir yalın karışım dışında tanesi dışında demir tozu ve lif miktarları toplamı hacimce %9 olacak şekilde hazırlanmıştır. Bütün bileşimlerde nominal çimento dozajı 1000 kg/m^3'te sabit tutulmuştur. Silis dumanı çimento ağırlığının %25'i oranında kullanılmış, su/çimento oranı %20'de ve su/bağlayıcı oranı %16'da sabit tutulmuştur. Ayrıca, bütün numunelere 200 ^{0}C'de ısıl işlem uygulanmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin basınç, çekme, eğilme davranışları incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Çimento Esaslı Kompozitler

2.1.1 Normal betonlar

Normal betonlar, basınç dayanımları 20MPa - 60MPa, kırılma enerjileri 100 J/m^2-120 J/m^2 civarında olan, agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilen ekonomik malzemelerdir (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Normal betonların kırılma enerjileri, ultra yüksek dayanımlı betonların %0,3'ü, basınç dayanımları ise % 8'i civarındadır. Bu sebeple çok özel yapılarda normal betonların yerini ultra yüksek dayanımlı betonlara bırakmaktadır. Normal betonlar bina, yol, sanat yapıları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İlerleyen beton teknolojisine rağmen normal betonlar günümüzde en çok kullanılan beton türüdür (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

2.1.2 Yüksek dayanımlı yüksek performanslı betonlar

ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programı, Yüksek Performanslı Betonu aşağıdaki gibi tanımlamaktadır (Taşdemir ve diğ., 2005):

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

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

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

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

Su/bağlayıcı oranı< 0,35

Yüksek dayanımlı betonlarda dayanım, çimento hamurunun boşluk yapısına, agreganın özeliklerine, agrega-çimento hamuru arayüzeyi geçiş bölgesine bağlıdır. Çimento hamuru ve ara yüzey geçiş bölgesinin özelikleri, su/çimento oranı düşürülerek ve maksimum agrega çapı küçültülerek iyileştirilebilir (Kocataşkın, 1991).

Yüksek dayanımlı betonlarda, normal dayanımlı betonlara göre gerilme–şekil değiştirme diyagramının doğrusal bölümü daha uzundur. Bu durum, agrega-çimento hamuru arayüzeyinin kuvvetli olmasının, dolayısıyla mikro çatlakların fazla olmamasının bir nedenidir. YDB'lerde maksimum gerilmedeki şekil değiştirme, normal dayanımlı betona göre daha fazladır. Buna karşılık, gerilme – şekil değiştirme diyagramının alçalan kısmının eğimi, normal betona göre daha diktir. Bu durum, yüksek dayanımlı betonların normal dayanımlı olanlara kıyasla daha gevrek olduğunun bir göstergesidir (Kocataşkın, 1991).

Yüksek dayanımlı betonların en önemli kusurları gevrek kırılma, otojen rötre ve yangına karşı dayanıksızlıktır. Günümüzde bu kusurlar çeşitli önlemlerle giderilerek yüksek performanslı betonlar üretilmektedir (Taşdemir ve diğ., 2005)

2.1.3 Yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı (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 donatılı betonlardan çok daha yüksek bir sünekliğe sahip olur.

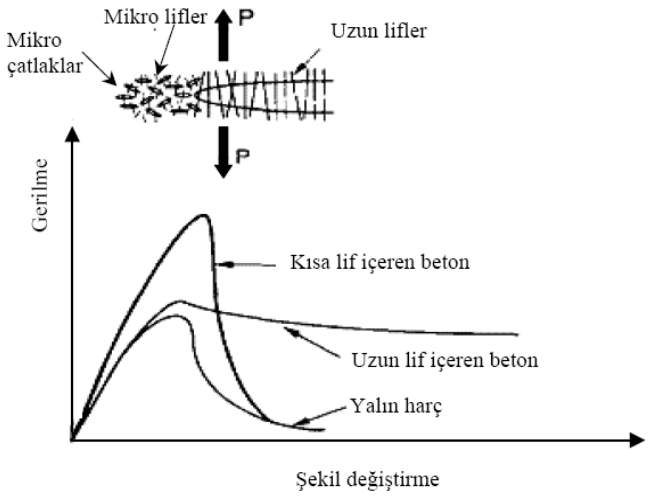
SIFCON, betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi, patlayıcı malzemelerin saklanması, nükleer atıkların depolanması, prekast ürünlerde, sıcaklığa dayanıklılık gerektiren uygulamalarda ve stratejik yapılarda kullanılabilir (Balaguru ve Shah, 1992).

2.1.4 Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler

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

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

Farklı lif boyutlarının lif köprülenmesine etkisi Şekil 2.1'de görülmektedir. Mikro lifler mikro çatlakları köprü görevi görerek durdururken, makro lifler çatlak başlangıcında etkili olmayıp, maksimum yük sonrası davranışı iyileştirirler. Bu durumda mikro lifler çimento hamurunun, makro lifler ise betonun güçlenmesinde etkili rol oynarlar (Qian ve diğ., 2000).



Şekil 2.1 Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutu etkisi (Qian ve diğ., 2000).

2.1.5 Reaktif pudra betonu (RPB)

Reaktif Pudra Betonları (RPB) yüksek kırılma enerjisine, çok düşük geçirimliliğe ve yüksek basınç dayanımına sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir (Taşdemir ve diğ., 2004). Basınç dayanımları 200 MPa ile 800 MPa arasında değişen bu malzemelerde, 25–150 MPa arasında çekme dayanımına ve 40000 J/m^2 kırılma enerjisine ulaşılmıştır (Richard ve diğ. 1995). Reaktif Pudra Betonlarının, normal dayanımlı betonlar ve yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırılması Tablo 2.1 'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı beton ve reaktif pudra betonlarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

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

RPB'larında kullanılan agregaların boyutları çimentonunkilere yakındır. Bu, hidrate olmamış çimento tanelerinin de tane iskeletine uygun olması ve malzemenin dayanımına katkıda bulunması demektir. Bu betonlarda su/bağlayıcı oranı çok düşük olup 0,15 mertebesindedir. Bu oran, çimento hamurunun boşluk oranını azaltmaya ve ortalama boşluk çapının azalmasına yardımcı olmaktadır. İşlenebilme, fazla miktarda süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile sağlanmaktadır. İstenilen dayanımlara erişmek için, hem bileşen malzemelerin özellikleri hem de bunları mikserde karıştırma sırası önemlidir (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Bu özeliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir. (Taşdemir ve Bayramov, 2002)

1. Bütün tanelerin dağılımının yoğun bir matris elde etmek için optimum biçimde ayarlanması,

2. Agrega tanelerinin en büyük boyutunu azaltarak betonun homojenliğinin sağlanması,

3. Betondaki su miktarının azaltılması,

4. Çok ince bir malzeme olan silis dumanının puzolanik özeliğinden yararlanılması,

5. Beton bileşenlerinin optimum bileşimi,

6. Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,

Reaktif pudra betonuyla ilgili ilk çalışmalar Richard ve Chezrezy tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda betonların tasarımı yapılmış ve üretimi ile mekanik özelikleri açıklanmıştır. Yapılan çalışmalarda RPB 200 ve RPB 800 olmak üzere prensipte aynı fakat üretimde ve ısıl işlemde bazı farklılıklar bulunan iki değişik malzeme üretilmiştir. Burada 200 ve 800 üretilen numunelerde ulaşılabilen ortalama basınç dayanım değerleridir. Deneylerde çentikli kiriş numuneleri kullanılmıştır. Tablo 2.2'de RPB 200 ve RPB 800'e ait örnek bir birleşim verilmektedir.

Tablo 2.2 RPB 200 ve RPB 800'e ait birleşimler (Richard ve Chezrezy, 1994).

Bileşim	RPB200	RPB800
Çimento	955 kg/m^3	1000 kg/m^3
İnce kum (150-400 mikron)	1051 kg/m^3	500 kg/m^3
Silis dumanı (18 m^2/g)	229 kg/m^3	230 kg/m^3
Silika (35 m^2/g)	10 kg/m^3	-
Öğütülmüş kuvars (4 mikron)	-	390 kg/m^3
Süperakışkanlaştırıcı	13 kg/m^3	18 kg/m^3
Çelik tel	191 kg/m^3	630 kg/m^3
Toplam Su	153 kg/m^3	180 kg/m^3

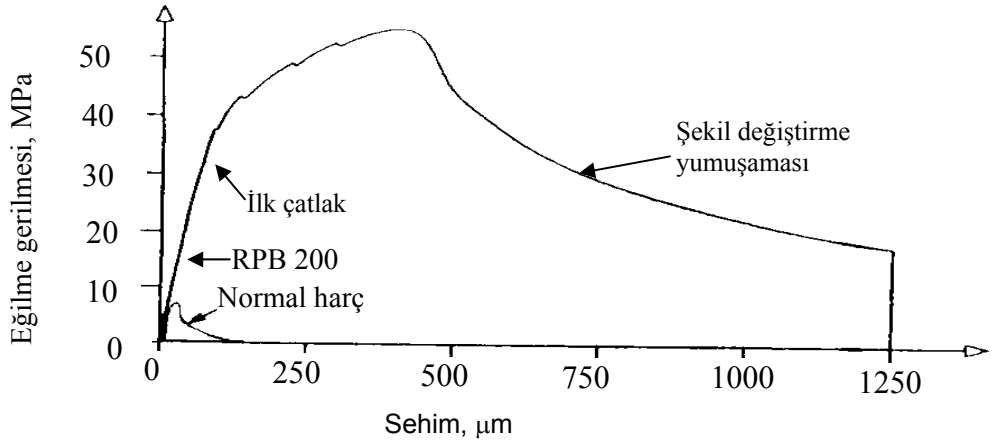
RPB 200'ün üretiminde 12,5 mm uzunluğunda ve 180 mikron çapında düz ve pürüzsüz yüzeyli çelik lifler kullanılmıştır. Su/çimento oranı çok düşük olmasına rağmen süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile normal beton gibi karıştırılabilir, yerleştirilebilir, vibrasyona tabi tutulabilir (Richard ve diğ. 1994). RPB 200 ve RPB 800'ün mekanik özelikleri Tablo 2.3'de özetlenmiştir.

Tablo 2.3 RPB 200 ve RPB 800'ün mekanik özelikleri (Richard ve Chezrezy, 1994).

	RPB 200	RPB 800
Uygulanan basınç gerilmesi (MPa)	Yok	50
Sıcak Kürü (°C)	20-90	250-400
Basınç Dayanımı (MPa)	170-230	490-810
Eğilme Dayanımı (MPa)	30-60	45-141
Kırılma Enerjisi (J/m^2)	20.000-40.000	1.200-20.000
Elastisite Modülü (GPa)	50-60	65-75

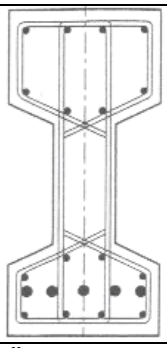
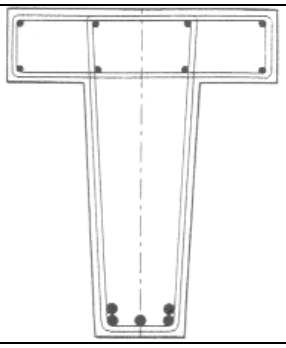
28 gün normal koşullar altında kür edilmiş betonlarda en düşük 170 MPa basınç dayanımı elde edilirken, normal kür koşullarına ek olarak 2 gün 80- 90°C sıcaklıkta kür edilen betonlarda 230 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisindeki değişim kullanılan lif yüzdesi ile değişmektedir (Richard ve Chezrezy, 1994).

Şekil 2.2, normal bir harç ile RPB 200'ün basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi RPB 200 ilk çatlak yükünün iki katı mertebesinde eğilme dayanımına sahiptir, bu durum yüksek performanslı lif donatılı betonlarda şekil değiştirme sertleşmesi ile açıklanabilir. Maksimum gerilmedeki deplasman ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha fazladır. Ölçülen kırılma enerjisi RPB 200 için 30000 J/m^2 iken normal harç için 110 J/m^2'dir (Richard ve Chezrezy 1994).



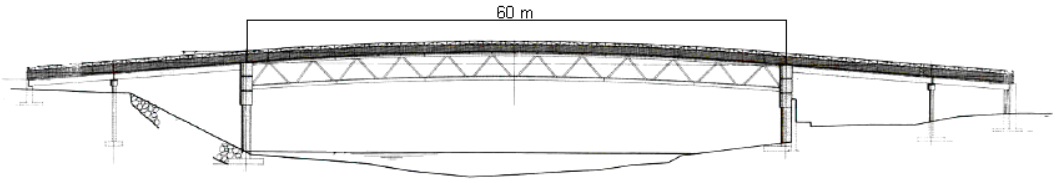
Şekil 2.2 Normal harç ve RPB 200'ün eğilme davranışlarının karşılaştırılması (Richard ve Chezrezy 1994).

RPB geleneksel beton ile çelik arasında yeralan özeliklere sahiptir. Geleneksel betondan daha pahalı olmasına karşılık çelik malzemeden daha ucuzdur. Büyük mimari özgürlüklere sahip çok narin yapıların tasarımına olanak tanır (Dugat ve diğ., 1996). Aynı moment taşıma kapasitesine sahip RPB, çelik, ön germeli beton ve betonarme malzemeden yapılmış kiriş kesitlerinin karşılaştırılması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

				
	RPB	Çelik	Öngerilmeli Beton	Betonarme
Derinlik	360 mm	360 mm	700 mm	700 mm
Ağırlık	130 kg/m	110 kg/m	470 kg/m	530 kg/m

Şekil 2.3 Moment taşıma kapasitesi aynı çeşitli malzemelerden yapılmış kiriş enkesitlerinin karşılaştırılması (Blais ve Couture, 1999).

Bu güne kadar RPB kullanılarak yapılan ilk yapı Sherbrook, Kanada'da yapılmış olan yaya/bisiklet köprüsüdür. RPB 200 betonundan yapılmış, 60 m. açıklığa sahip ve uzay kafes yapılı bu köprünün şematik bir gösterimi Şekil 2.4'te verilmektedir (Dugat ve diğ., 1996).



Şekil 2.4 Sherbrook köprüsü uzay kafes yapısı (Blais ve Couture, 1999).

Tablo 2.4'te Sherbrook köprüsünde kullanılan RPB'nun bileşimi verilmektedir. Üretimde silis dumanının puzolonik reaksiyonunun hızlandırması ve hidrat oluşumunu modifiye etmesi amacıyla 90°C'de 2 gün su buharı kürü uygulanmıştır. 24 saat sonunda kalıplar söküldüğü zaman betonun basınç dayanımı 50 MPa civarında bulunmuştur (Blais ve Couture, 1999).

Tablo 2.4 Sherbrook köprüsü RPB bileşimi (Blais ve Couture, 1999).

Bileşen	Miktar
Çimento	710 kg/m^3
Silis dumanı	230 kg/m^3
Öğütülmüş kuvars (4 mikron)	210 kg/m^3
Silis kumu	1010 kg/m^3
Çelik tel	190 kg/m^3
Süperakışkanlaştırıcı	19 lt/m^3
Toplam su	200 lt/m^3

1997'de inşa edilen Sherbrook köprüsünün kafes yapısı 150 mm çapında 2 mm kalınlığında ve 3,2 m uzunluğunda olan paslanmaz çelik tüpler içine konulan beton sıkıştırılarak basınç dayanımı 350 MPa'a ulaşan bir dayanım sağlamıştır. (Blais ve Couture, 1999)

Japonyada inşa edilen 50 m. açıklıklı Sakata-Mirai köprüsünde RPB kullanılması sayesinde köprünün ölü ağırlığı 56 tonda tutulmuştur ve % 10 daha ekonomik olarak inşa edilmiştir. Aynı köprünün öngerilmeli betonla yapılması durumunda ağırlık bunun 5 katı olacaktır. Üretilen betonun basınç dayanımı 238 MPa, eğilme dayanımı ise 45 MPa olarak ölçülmüştür. (Rebentrost ve Cavill, 2006; Tanaka ve diğ., 2002)

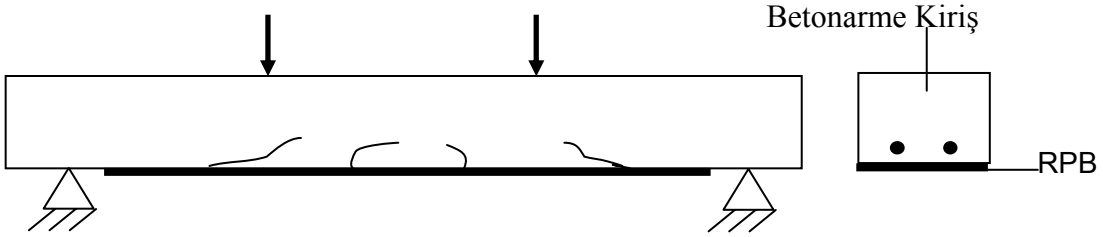
Tablo 2.5'te dünya üzerinde reaktif pudra betonu kullanılarak inşa edilmiş bazı köprülerin listesi verilmiştir.

Tablo 2.5 RPB kullanılarak inşa edilmiş köprüler.

Köprü Adı	Ülke	Türü	Açıklık	Açıklık Sayısı
Sherbrook	Kanada	Yaya	60 m.	1
Sakata - Mirai	Japonya	Yaya	50 m.	1
Sunyuda	Kore	Yaya	120 m.	1
Papatoetoe	Yeni Zelanda	Yaya	175 m.	10
Penrose	Yeni Zelanda	Yaya	205 m.	15
Shepherds Creek	Avustralya	Karayolu	15,1 m.	1
Optimised RPC	Washington, ABD	Karayolu	21,3 m.	1
Wapello Country	Iowa, ABD	Karayolu	35,6 m.	1

Reaktif Pudra Betonu stratejik yapılarda ve onarım-güçlendirme için kullanılabilmektedir. Alaee (2002), çalışmasında betonarme yapıların onarım ve güçlendirmesindei, yüksek performanslı çelik tel takviyeli çimento esaslı kompozitlerin yüksek dürabilite özeliklerine sahip olduğunu ve mevcut yapıyla uyumluluk açısından en uygun malzeme olduğunu göstermiştir.

Şekil 2.5'de görüldüğü gibi eğilme etkisinde çatlatılmış bir betonarme kirişin çekme bölgesi klasik çelik plaka yerine reaktif pudra betonundan yapılmış bir levha ile güçlendirilmiştir. Levhalar çatlamış kirişe polimer esaslı yapıştırıcılar ile yapıştırılmaktadır. Kiriş tekrar yüklendiğinde çok yüksek dayanımlara erişilmiştir (Karihaloo, 2000; Alaee ve diğ., 2001). Bu tür güçlendirme kayma bölgesinde de yapılmaktadır (Bayramov, 2004).



Şekil 2.5 Çatlamış betonarme kirişin reaktif pudra betonuyla güçlendirilmesi (Karihaloo, 2000; Alaee ve diğ., 2001).

Sonuç olarak RPB'nin üstünlükleri şu şekilde özetlenebilir (EMC, 2008)

1. Yüksek Performanslı Betonlara iyi bir alternatiftir ve yapısal olarak çelikle yarışacak bir potansiyele sahiptir.
2. Üstün dayanımı yüksek kayma kapasitesiyle birleşerek önemli ölçüde ölü yük azalmasına ve çok sayıda yapısal eleman şekline olanak verir.
3. Sünek yapısıyla çekme kuvvetlerine karşı koyabilir.

4. Daha hafif elemanlarla atalet yüklerini azaltarak, azalan kesit alanlarıyla daha büyük sehime izin vererek ve daha yüksek enerji yutmayı sağlayarak sismik performansta gelişim sağlar.
5. Düşük ve birbirine bağlı olmayan porozitesi önemli dayanıklılık ve taşıma özellikleri sağlar. Böylece nükleer malzemelerin depolanması için uygun bir malzeme olabilir.

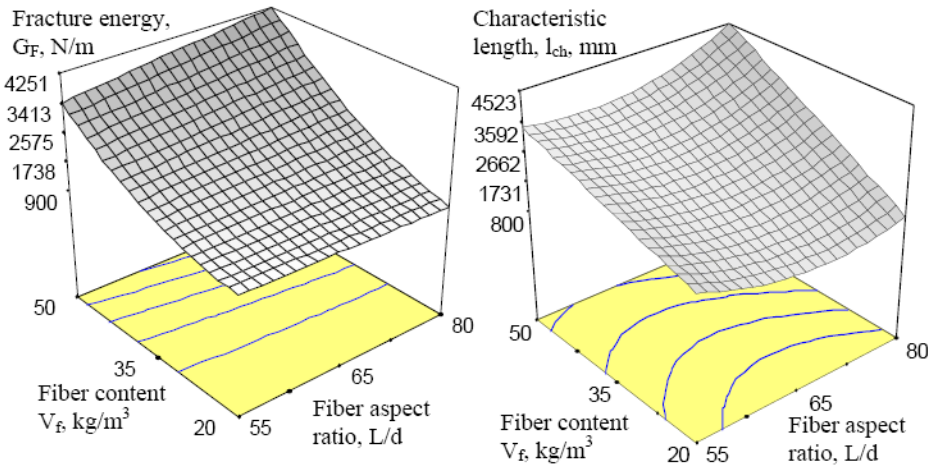
2.1.6 Geleneksel çelik tel donatılı betonlar

Çelik telleri betonda kullanmanın başlıca beş yararı vardır: a) Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton, b)Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi, c) Etkin çatlak kontrolü, d) Dayanıklılık, ve e) Donatı işçiliğinde belirgin azalma.

Çelik teller beton içinde yüzey ve kenarlar da dahil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında, hidratasyon süreci malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik teller karşı koyar; rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenir (Taşdemir ve diğ., 2004).

İstatistiksel tepki yüzey modellemesi kullanarak yapılan bir çalışmada geleneksel çelik tel donatılı betonların kırılma parametrelerine, 55 ile 80 arasında tutulan çelik tel narinliği ve 20 ile 50 kg/m^3 arasında tutulan çelik tel içeriğinin etkisi incelenmiştir (Bayramov ve diğ., 2002).

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi çelik tel içeriğinin ve narinliğinin artmasıyla kırılana kadar yutulan enerjinin arttığı ve malzemenin daha sünek davranış sergilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.6 Kırılma enerjisinin (G_F) ve karakteristik (L_{ch}) uzunluğun lif narinliği (L/D) ve içeriği (V_f) ile değişimi (Bayramov ve diğ., 2002).

Çelik tel içeren betonlar normal betonlara oranla sağladıkları üstünlüklerden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bunlar şu şekilde özetlenebilir.

a) Püskürtme beton uygulamaları; Çekme donatısı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilir. Kaplama kalınlığı, düz ve hasırlı olan beton kaplama kalınlıklarına oranla daha az olmaktadır. Ayrıca, kırılmaya karşı yüksek enerji yutma kapasitesinden dolayı daha büyük bir süneklik sağlanır. Kazıların ve temellerin desteklenmesi, kanal kaplamaları, köprü mesnetlerinin korunması, bozulan deniz yapılarının ve köprülerinin onarımı, bazı sığınakların kaplamaları gibi uygulama alanları vardır. Ayrıca yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımında da kullanılmaktadır (Köksal, 2004)

b) Yol kaplamaları; Bayramov (2004)'de açıklandığı gibi beton yol kaplamalarında ve geleneksel yolların temel döşemesinde yükleri alt temele aktaran eleman olarak kullanılmaktadır. Genellikle yol temellerinde zayıf beton veya bitümlü malzeme kullanılır. Bu tür kaplamalar yüksek trafik yoğunluğu olan yerlerde büyük ölçüde yüzey düzensizliğine neden olurlar. Bunu karşılık çelik teller, oluşan çekme gerilmelerinin bir kısmını taşır ve çatlamaya karşı koyar. Ayrıca yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollarda büyük önem taşıyan, kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı yüksek beton elde edilmesini sağlar. Bunun yanında, yol yapımında daha uzun bağlantı mesafelerinin uygulanmasına imkan verir. Yol kaplamalarında kullanılan ÇTDB'ların en belirgin üstünlüğü normal betonlara kıyasla daha yüksek sünekliğe sahip olmalarıdır. Ayrıca yüksek kırılma enerjileri ile bağlantı boyunca

çatlakları ve yüzeylerin pullanma ile dökülmelerini büyük ölçüde azaltır ve önler. Beton yollarda çelik tel kullanımı, geleneksel kaynaklı donatılı betonlara kıyasla daha ekonomiktir. Taşıma ve yerleştirme (işçilik dahil) maliyeti ÇTDB'lar da daha düşük olmaktadır. Ayrıca daha ince kaplamaya kalınlığına imkan vermesi ve donatının döşeme içerine gelişigüzel yerleştirilmesi gibi sorunların olmaması da çelik tellerin diğer üstünlüklerini göstermektedir. Yüksek trafik yoğunluğuna sahip beton yollarda çelik tel kullanımının en belirgin üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir (Bayramov ve diğ., 2004a);

1. Yüksek sünekliği sahip olması,
2. Kaplama kenar ve köşelerin kırılmaya karşı dirençlerinin iyileştirilmesi,
3. Betonun rötresinde azalma,
4. Geleneksel donatı yerleştirilmesindeki hataların ortadan kalkması,
5. Geleneksel beton yollara kıyasla yapım süresinin kısa olması,
6. Bütün doğrultularda daha yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesi,
7. Çatlak kontrolünün kolay olması ve matris kırılmasından sonra yüksek enerji yutma kapasitesi.

c) Su ve deniz yapıları; Geleneksel betonlara kıyasla, yüksek sünekliği, aşınma ve darbeye karşı direnci, deniz ortamında bozunmaya karşı direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı su yapılarında kullanılmaktadır. Özellikle dalgakıran yapımında, dolu savak, savak yatağı ve savak kapakları, dinlendirme havuzu gibi su yapılarının tamir ve bakımında, açık kanal kaplamalarında, toprak dolgu barajların sızmazlığının azaltılması için yüzeylerinin ince kaplamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca aşınma direnci yüksek olduğundan kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak kullanılabilir (Taşdemir ve diğ., 2002).

d) Zemin kaplamaları; Yük taşıma kapasitelerinin yüksek olması, çatlak kontrolü sağlaması, dinamik ve ani yüklemelere karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, ambar ve hangar zeminlerinde, iskele ve rıhtım kaplamaları gibi kullanım alanları bulunmaktadır (Köksal, 2004) .

e) Prefabrike elemanların üretimi; Yüksek dayanıma, sünekliğe ve dayanıklılığa sahip birçok prefabrike yapı elemanın üretiminde kullanılmaktadır. Bunlar, muayene

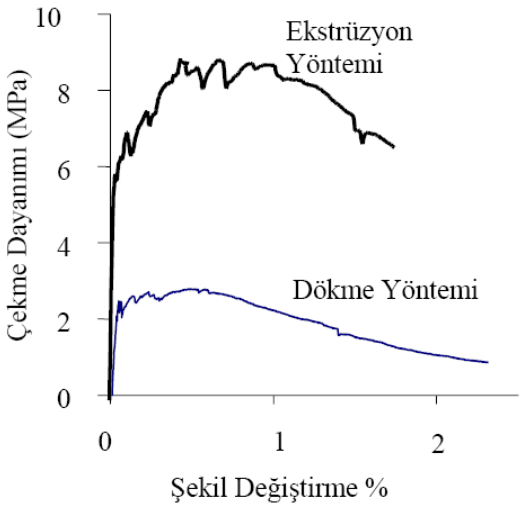
bacaları, yağ ayırıcıları, transformatör kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmanları, monoblok garajlar, demiryolu sınır taşları, su drenaj blokları, atık depolama kutuları, ev mahzenleri, kablo kanalları, yalıtılmış duvar panelleri, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları, öngerilmeli çatı olukları, otobüs durakları, yiyecek kilerleri, tren tünellerindeki saklanma yerleri, baca elemanları, birleştirilmiş kanallar ve bakım yolu, demiryolu traversleri, demiryolu taban döşemesi, refrakter prekast elemanlar, istinat duvar elemanları, temel blokları, prekast banka kasaları ve kanaletlerdir (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

f) Depreme dayanıklı stratejik yapılar; Sünekliliğin yüksek olması istenilen bu tür yapılarda kullanılabilir. Çelik tel donatılı betonların sünekliği normal betonlara oranla yüksek olduğundan çarpma ve titreşim gibi dinamik yük etkilerine karşı daha dayanıklıdırlar. Bu nedenle depreme dayanıklı her türlü yapıda kullanılabilmektedir (Köksal, 2004).

g) Güvenlik yapılarında; Sığınaklar, sığınak kapıları ve güvenlik odalarının yapımında kullanılmaktadır (Köksal, 2004).

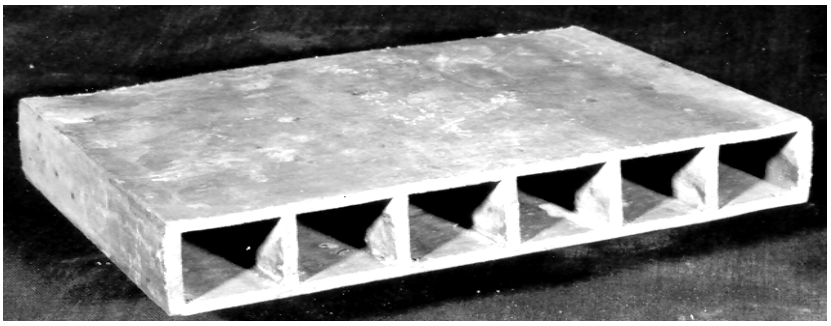
2.1.7 Sentetik lifli yüksek performanslı betonlar

Yapılan çalışmalarda, lif katkılı betonlarda yüksek performans sağlamak için kullanılan malzeme ve üretim tekniği seçiminin önemi ortaya konmuştur. Liflerin etkili bir biçimde dağıtıldığı, kuvvet uygulanan yöne doğru yönlendirildiği ve ekstrüzyon gibi özel üretim teknikleri ile lif-çimento hamuru ara yüzeyinin güçlendirildiği durumlarda yüksek performans elde edilmekte ve çok çatlaklı kırılmalar gözlenmektedir. Yapılan incelemeler sonucu, liflerin çimento hamuru içinde dağılmadığı bölgelerin büyüklüğü arttıkça, ilk çatlak gerilmesinin azaldığı görülmüştür. Bunun yanında, lif topaklanması arttıkça şekil değiştirme sertleşmesinin azaldığı ve tokluğun düştüğü anlaşılmıştır. Yüksek performanslı sentetik lif katkılı ekstrüzyon yöntemi ile üretilen malzeme ile dökme yöntemi ile üretilen malzemenin gerilme şekil değiştirme davranışları Şekil 2.7'de karşılaştırılmaktadır (Akkaya, 2000; Akkaya ve Shah, 2001).



Şekil 2.7 Yüksek performanlı sentetik lif katkılı betonda üretim yönteminin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi (Akkaya ve diğ., 2000).

Görüldüğü gibi ekstrüzyon yöntemi ile üretimde çekme dayanımı dökme yöntemine göre yaklaşık 2,5 kat artmaktadır, Bu yöntemle üretilen bir eleman Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8 Yüksek performanslı sentetik lif katkılı ekstrüzyon yöntemi ile üretilen bir eleman (Akkaya, 2000).

2.2 Çelik Liflerin Beton Özelliklerine Etkisi

Son derece gevrek malzemeler olan ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerin sünekliğinin ve dolayısıyla kırılma enerjilerinin arttırılması için çelik lif takviyesi yapmak gerekir.

Betonun çekme dayanımını ve tokluğunu etkileyen faktörler, çelik tel tipi, çelik tel narinliği, çelik tel miktarı ve çelik lif dayanımı olarak özetlenebilir, ayrıca matrisin dayanımı da yük taşıma kapasitesini ve kırılma enerjisini etkiler.

Normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı betona göre daha az gevrek olup, liflerin eklenmesi kompoziti daha sünek hale getirir. Yüksek dayanımlı betonda ise sünek kırılmanın meydana gelmesi için lif oranının artması gerekir. Normal dayanımlı betonda kancalı uçlu liflerden 60 kg/m^3 kullanmak gerekirken, yüksek dayanımlı betonda aynı sünek davranışı elde etmek için bu miktarı 120 kg/m^3'e çıkarmak gerekmektedir. Silis dumanı içeren kompozit malzemede lif ile matris arasındaki bağ çok daha güçlü olacağından liflerin etkin kullanımı söz konusu olacaktır (Balaguru ve Shah, 1992).

Eren ve Çelik (1997), silis dumanı ve çelik lifin birlikte kullanımının yüksek dayanımlı beton özeliklerine etkisini incelemişlerdir. Lifsiz betonlara narinliği 75 olan liflerden %2 katılması durumunda basınç dayanımında % 41 azalma gözlenmiştir. Aynı seri betona %10 silis dumanı ve narinliği 60 olan liflerden %1 oranında katılması durumunda ise % 29'a varan bir artış gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun harcın dayanımını arttırdığını, uçucu kül kullanılmasının ise harç dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Karışımlarda çelik lif kullanılması ile basınç dayanımı %7 oranında düşmüştür. Ancak silis dumanı kullanılması ile lifin olumsuz etkisinin ortadan kalktığı ve normal harca göre basınç dayanımının %30 oranında yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum silis dumanının, çelik lif – matris aderansını güçlendirmesi ile basınç dayanımını arttırmasına bağlanmaktadır (Gutiérez ve diğ., 2005).

Fırat (1996), silis dumanı ve çelik lifin birlikte kullanılmasının basınç dayanımına etkisini incelemiştir. Silis dumanı kullanılarak lif ile matris aderansının kuvvetlendirildiği, 28 günlük betonlarda basınç dayanımının %62, 90 günlük betonlarda %66 arttığı bulunmuştur. Ayrıca, bu betonlarda betonun enerji yutma kapasitesi silis dumanı artışına bağlı olarak düzenli biçimde artmıştır. Bu durum silis dumanının lif matris aderansını güçlendirmesine, çelik liflerin artan aderans ile daha etkin hale gelerek betonun sünekliğini arttırmasına ve silis dumanının basıncı arttırıcı özeliğine bağlanmaktadır.

Çimento esaslı matrisler çekme altında gevrek göçme davranışı gösterirler, ayrıca küçük çekme şekil değiştirme kapasitelerine sahiptirler. Çelik tellerin bu tür malzemelerin matrisine sürekli veya süreksiz şekilde ikamesi ile çekme özeliklerini

donatı ile takviye edilmemiş olan matrislere kıyasla kısmen güçlendirirler. Çekme özeliklerindeki bu iyileşme kayda değer seviye olmaktadır (Köksal, 2004)

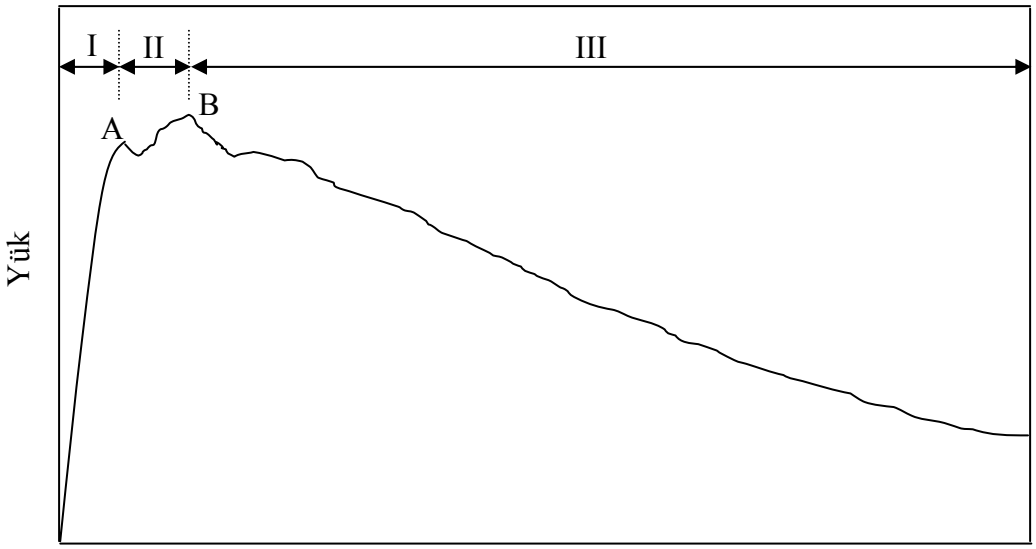
Yapılan çalışmalarda çelik tel içeren betonların yarma dayanımlarında büyük artış olduğunu ve bu artışın çelik tellerin çatlak frenleme özeliğine bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca maksimum yükün çelik tel narinliğinin ve miktarının artmasıyla arttığı belirtilmiştir (Gao ve diğ., 1997).

Çelik teller, betonlar üzerindeki en iyi iyileştirmeyi eğilme dayanımı ve eğilme tokluğunda yapmaktadır. Çelik tel donatılı betonlar yüksek eğilme rijitliğine sahiptirler ve servis yükleri altında daha az çatlak genişliğine sahip olurlar. Çelik tel kullanımı ile eğilme dayanımındaki iyileşme geleneksel olarak kullanılan donatı çubuklarının gösterdiği potansiyele karşı oldukça yetersizdir (Köksal, 2004). Şekil 2.9'da görülebilen ve eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisi üç kısımda incelenebilir:

1. Kısım: A noktasına kadar hemen hemen doğrusal bir davranış görülmektedir. Bu kısımdaki davranış tel-matris arayüz yardımıyla matristen tellere aktarılan gerilme transferini içermektedir. Bu bölgede gerilmeler, ilk çatlak dayanımı (orantılık sınırı) denilen ve matrisin çatladığı noktayı ifade eden yere kadar matris ve çelik teller tarafından taşınır.

2.Kısım: A noktası ve maksimum yükün olduğu B noktası arasında doğrusal olmayan bir geçiş bölgesi vardır. Çatlak sonrası oluşan bu bölgede gerilmeler tamamen çelik tellere aktarılır. Yükün artmasıyla çelik teller, B noktasındaki nihai eğilme dayanımına ulaşıncaya kadar doğrusal olmayan yük-sehim davranışı sergileyerek matristen sıyrılma eğilimi gösterirler. Bu nokta "tepe yükü" olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede şekil değiştirmeler belirgin biçimde yerelleşmektedir.

3.Kısım: Tepe yükü sonrası yük-sehim eğrisinin azalan kısmı tipik şekil değiştirme yumuşaması sergiler. Bu kısmın davranışı ve sehimin artmasıyla dayanımdaki ani olmayan azalma, çelik tellerin enerji yutma kapasitelerinin bir göstergesidir. Bu bölgenin davranışı ÇTDB'ları yalın betonlardan ayıran en önemli özelliktir.



Şekil 2.9 ÇTDB kirişler için tipik yük-sehim eğrisi (Köksal, 2004).

Yapılan çalışmalarda genel olarak çelik tel içeren betonların elastisite modülleri normal betonlara göre yüksek olduğu ifade edilmektedir (Banthia ve Trottier, 1995).

Tokluk, ÇTDB'ların sünekliliğinin bir ölçüsüdür ve betonların enerji yutma kapasitelerini gösteren bir parametredir. Düşük tel içeriklerinde bile tokluk belirgin şekilde iyileşir (Bayramov ve diğ., 2004a).

2.2.1 Çelik tel tipi

Çelik teller farklı şekil ve boyutlarda olup, tel özeliklerinin tipik örnekleri ve tanımlanması Şekil 2.10'daki gibi özetlenebilir. Ayrıca TS 10153'e göre çelik tel tipleri şu şekilde sınıflandırılmışlardır:

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller

B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller

Tip 1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller

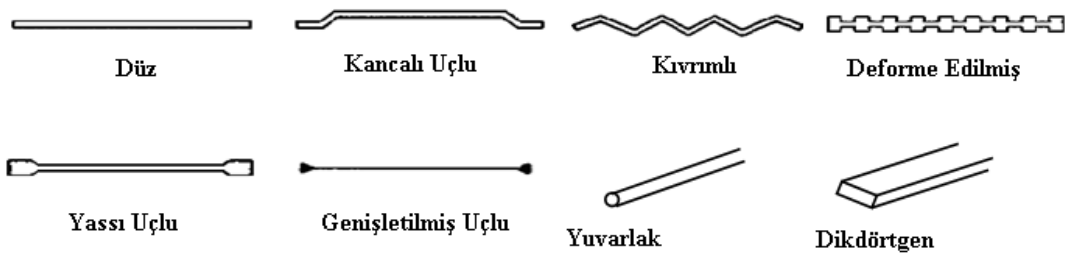
Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller

Tip 3: Ay biçimli dalgalı teller

C Sınıfı: Kancalı uçlu teller

Tip 1: İki ucu kancalı teller

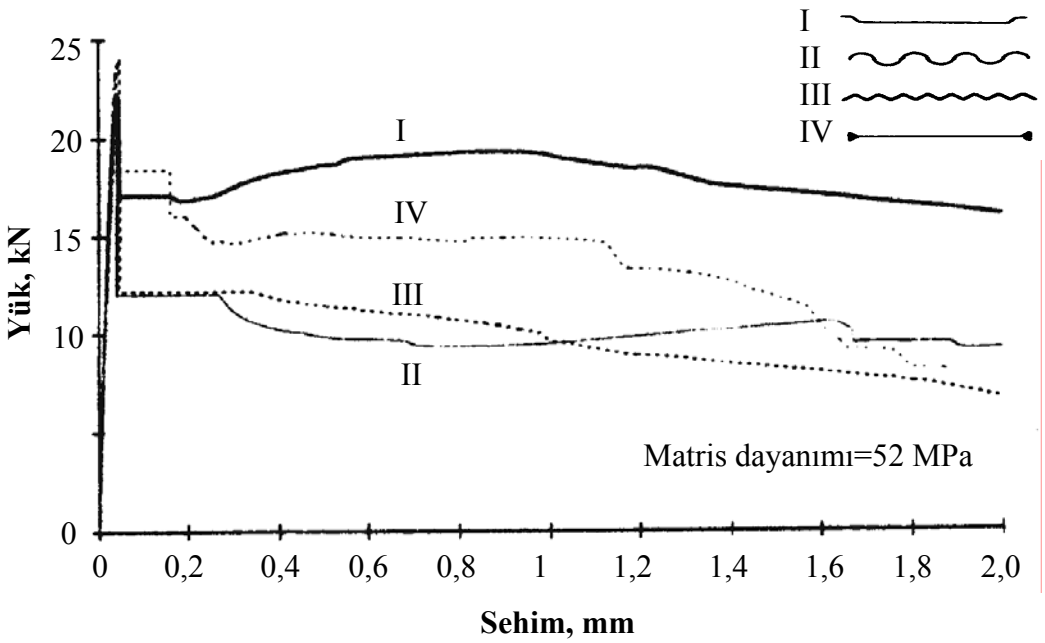
Tip 2: Tek ucu kancalı teller



Şekil 2.10 Çelik lif tipleri ve kesitleri (Bayasi ve Soroushian, 1991).

Bayasi ve Soroushian (1991), lif türünün işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve kırılma enerjisi üzerine etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçları narinlik arttıkça işlenebilirliğin azaldığını fakat lif türünün işlenebilirliğe etkisinin dikkate alınmayacak kadar az olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalarda uçları kancalı liflerin enerji yutma kapasitesinin düz ve kıvrımlı olan liflere oranla daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durum, şekil değiştirme kapasitesinin, uçları kancalı liflerde diğer liflere göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

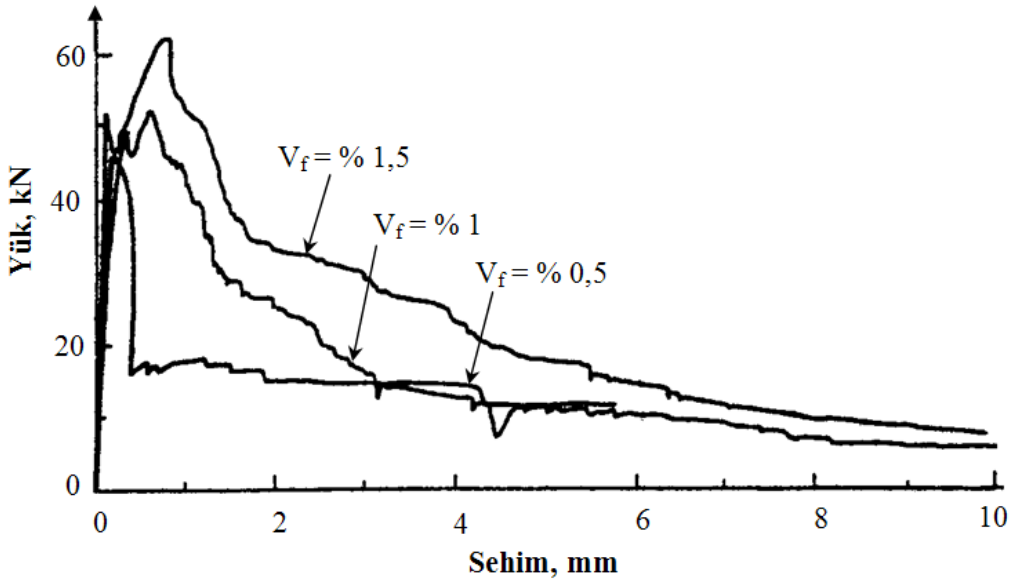
Banthia ve Trottier (1995)'in çelik tel tipinin ÇTDB'un performansına etkisinin incelendiği çalışmalarında deforme edilmiş ve farklı geometrilerde dört tip çelik tel kullanılmıştır. Matris dayanımı 52 MPa olan betonda, 2 mm'lik bir sehime kadar olan yük-sehim eğrilerinden görüldüğü gibi kancalı uçlu çelik tel (I) ile daha iyi tokluk elde edilmiştir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi daha fazla enerji yutulmuştur.



Şekil 2.11 ÇTDB'da kullanılan çelik tel tipinin yük-sehim eğrisine etkisi (Banthia ve Trottier, 1995).

2.2.2 Çelik tel içeriği

Wafa ve Ashour (1992) tarafından yapılan bir çalışmada kısa kesilmiş kancalı uçlu çelik tel içeriğinin artmasıyla yük-sehim eğrisi altında kalan alanın arttığı, dolayısıyla tokluğun arttığı görülmüştür (Şekil 2.12). Yalın betona %1,5 çelik telin eklenmesiyle basınç dayanımı %4,6, yarma çekme dayanımı ise %160'lık oranda artmıştır.



Şekil 2.12 Çelik tel donatılı betonlarda tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi (Wafa ve Ashour,1992).

Dugat ve diğerleri (1996), farklı lif içeriklerinin kırılma enerjisine olan etkilerini araştırmak üzere, lif boyutları D= 0,15 mm, L= 13mm, lif içeriği %0, %2, %2,5 ve %4 olan karışımların kırılma enerjilerini karşılaştırmışlar ve optimum lif içeriğinin %2 ~ %3 arasında olduğunu saptamışlardır. Çalışma sonucunda yüksek oranlarda kullanılan lifin kırılma enerjisini düşürdüğü ortaya çıkmıştır.

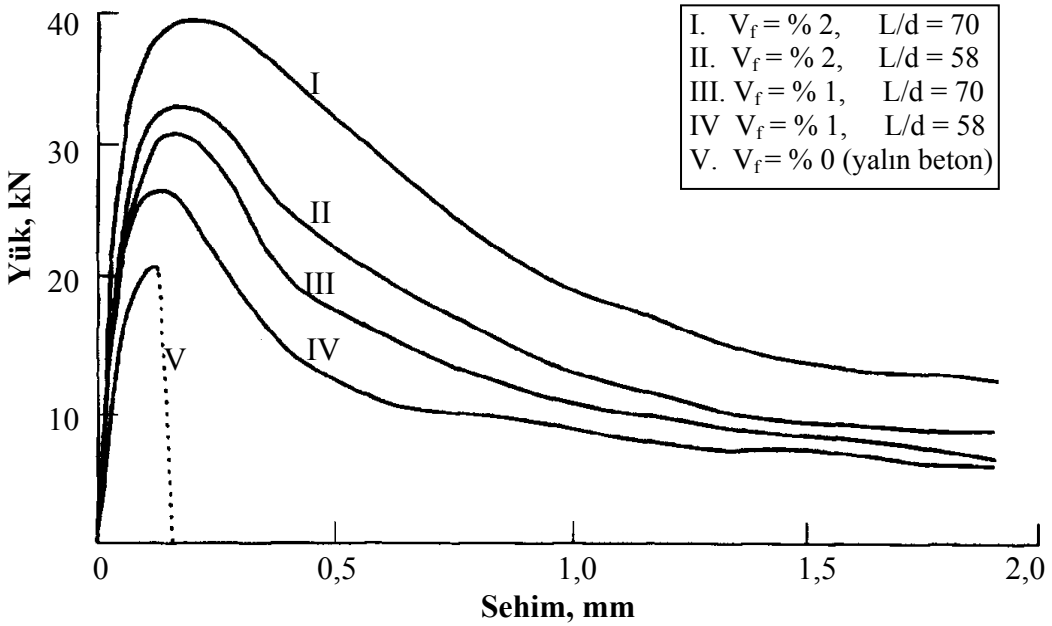
Silis dumanı içeren kompozit malzemeler hariç lif oranının %2'den az olması eğilme dayanımını fazla arttırmaz. Fakat her durumda eğilme dayanımındaki artış basınç dayanımı ve yarma – çekme dayanımı artışından daha fazladır (Balaguru ve Shah, 1992).

Kullanılan çelik tel içeriği narinliğe bağlı olarak optimum bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Çelik tel içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma ve yerleştirme problemleri ortaya çıkmakta ve çelik teller beton içerisinde topaklanmaktadır (Bayramov, 2004).

2.2.3 Çelik tel narinliği

Genelde, yüksek tel narinliğinde yüksek verimlilik elde edilse de betonun işlenebilirliğini, dolayısıyla performansını büyük ölçüde etkiler. Narinliğin artması karıştırma ve yerleştirmede sorunlar çıkarmakta, tellerin beton içinde homojen dağılmasını engelleyerek topaklanmalara yol açmakta ve matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. İşlenebilirlik problemi ile karşılaşmamak için tel narinliğinin 100, tel içeriğinin ise %2 ile sınırlandırılması önerilmektedir (Gebman, 2001).

Uygulamada, en çok kullanılan tel tipleri; yüksek çekme dayanımı ve yüksek narinliğe sahip uzun (50-60 mm) ve deforme edilmiş teller, ve yüksek sünekliğe, düşük çekme dayanımına ve düşük narinliğe sahip kısa (20-25 mm) ve dalgalı tellerdir. Uzun ve yüksek narinlikli tellerin kullanılmasıyla daha iyi çatlama-sonrası tokluk ve kalıcı dayanım elde edilmektedir. Tekil çelik telin ankraj yeteneği çelik telin uzunluğu ve çapına da bağlıdır. İyi ankraj mekanizmasına sahip uzun çelik teller olası kırılma biçimi eğilme olan elemanlarda kullanılmaktadır. Kısa teller ise çatlak yayılmasının kontrol edilmesinde, özellikle çekme halinde, uzun teller kadar verimli değildir (ACIFC, 1999).



Şekil 2.13 Çelik tel donatılı betonlarda tel içeriği ve tel narinliğinin yük-sehim eğrisine etkisi (Gao ve diğ., 1997).

Gao ve diğ. (1997)'nin yüksek dayanımlı, hafif betonlarla ilgili yaptıkları çalışmada da hem çelik telin içeriğinin hem de narinliğinin artmasıyla yük-sehim eğrisi altında kalan alanın arttığı görülmüştür. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi çelik tel içeriğinin (V_f) % 0'dan % 2'ye artmasıyla yarma çekme dayanımı 4,95 MPa'dan 8,8 MPa'a çıkarak % 78, eğilme dayanımı ise 6,2 MPa'dan 9,6 MPa'a çıkarak % 90 artmıştır. Basınç dayanımında ise az artış gözlenmiştir.

2.2.4 Çelik telin çekme dayanımı

Betonun dayanımı arttıkça, tel ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda tellerin betondan sıyrılmaları güçleşir ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma ayrılması oluşur. Böylece, yüksek dayanımlı betonda, yüksek dayanımlı teller kullanılması ile tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilebilir (Vandewalle, 1996).

Taşdemir ve diğ. (2005) yüksek dayanımlı betonun mekanik davranışına çelik lif dayanımının etkisini incelemiştir. Çalışmada, i) 60 kg/m^3 yüksek dayanımlı çelik lif (lif kopma dayanımı 2000 MPa) içeren YDB'nin, ii) 80 kg/m^3 normal dayanımlı çelik lif (çekme-kopma dayanımı 1200 MPa) içeren YDB'nin, iii) Normal dayanımlı çelik lif (çekme-kopma dayanımı 1200 MPa) içeren normal dayanımlı betonun mekanik davranışı incelenmektedir. Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı bakımından en iyi sonuçlar, yüksek dayanımlı betonda yüksek dayanımlı çelik lif kullanılması ile elde edilmiştir (Taşdemir ve diğ., 2005). Bu durum lif ile matrisin aderansının yüksek olması sonucunda, çelik liflerin kapasitelerine ulaşarak yüksek performans elde edilmesi ile açıklanabilir. Lif hacmi fazla olmasına rağmen, yüksek dayanımlı betonda normal dayanımlı çelik lif kullanılması sonucunda, maksimum yük sonrası davranış istenilen performans düzeyinin altında kalmaktadır. Bu durum, yüksek dayanımlı betonda aderansın kuvvetli olması ve çelik lifin dayanımının yetersiz kalması ile betondan koparak ayrılmasından kaynaklanmaktadır.

2.3 Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi

Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık isteyen yerlerde kullanılmaktadır. Uygulama alanları olarak yerinde dökülmüş veya prefabrike yüksek dayanımlı veya erken dayanımı yüksek beton elemanları, ağır aşınmaya maruz döşemeler ve yol kaplamaları, erozyona ve oyulmaya maruz

hidrolik yapılar, zararlı kimyasallara maruz betonlar, beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi, çelik donatının korunması, yüksek performanslı çimento şerbet ve sıvaları sayılabilir (Yeğinobali, 2002).

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimleri sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur (Yeğinobalı, 2002). Silis dumanındaki SiO_2 miktarı, alaşımdaki silisyum içeriğine bağlıdır. Alaşım türüne göre silis dumanındaki SiO_2 miktarları Tablo 2.6'de özetlenmiştir.

Tablo 2.6 Alaşım türüne göre silis dumanındaki SiO_2 miktarları (ACI, 2000).

Alaşım türü	Silis dumanındaki SiO_2 (%)
%50 Ferrosilisyum	61 – 84
%75 Ferrosilisyum	84 – 91
Metal silisyum	91 - 98

Araştırmalarda ve pratikte kullanılan silis dumanları genellikle %75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmiştir. Silis dumanının tipik kimyasal bileşimleri Tablo 2.7'de görülmektedir. (Yeğinobalı, 2002).

Tablo 2.7 Tipik silis dumanı kimyasal bileşimi (Yeğinobalı, 2002).

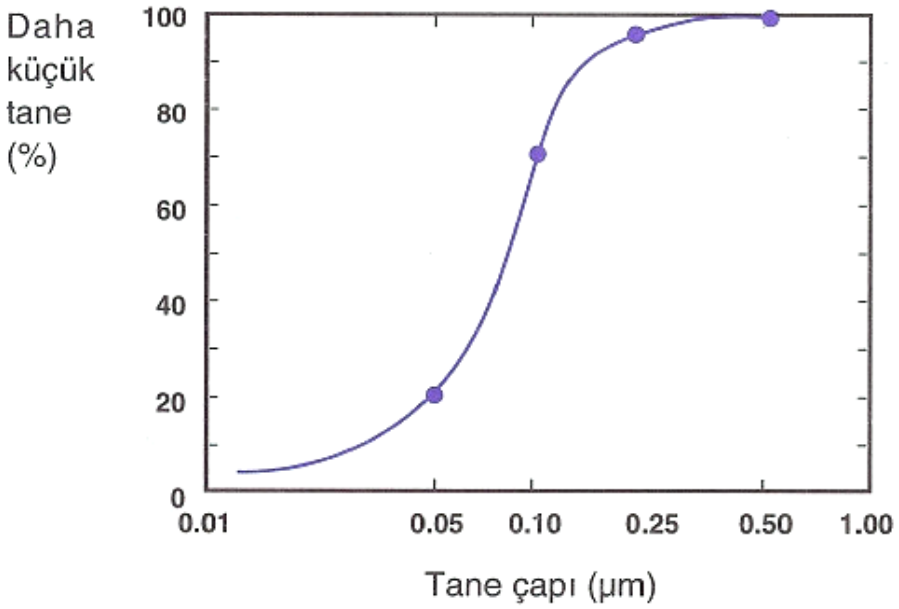
Kimyasal bileşen	Ağırlıkça yüzde
SiO2	93
Al2O3	0,4
Fe2O3	0,8
CaO	0,6
MgO	0,6
SO3	0,3
Alkali	0,96

Yaklaşık 2,20 kg/dm^3'lük bir özgül ağırlığa sahip olan silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli ve küresel taneciklerden meydana gelir. Özgül yüzeyi, taneler arasından geçen havanın geçiş hızını esas alan Blaine metodundan farklı olarak azot absorpsiyonu (BET) ile tayin edilmektedir. Yöntemde özgül yüzey, tanelerin dış yüzeyleri ile içlerindeki açık boşlukların iç yüzeylerinden oluşan alanı 1 molekül kalınlığında bir tabaka ile kaplayacak azot gazı miktarından hesaplanmaktadır. Bu yöntem, taneler arasından hava geçiş hızını esas alan Blain yönteminden farklı olduğundan elde edilen sayısal sonuçların doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir. Tablo 2.8'da görülen değerler silis dumanının inceliği konusunda fikir vermektedir (Yeğinobalı, 2002).

Tablo 2.8 Çeşitli malzemelerin incelikleri (ACI, 2000).

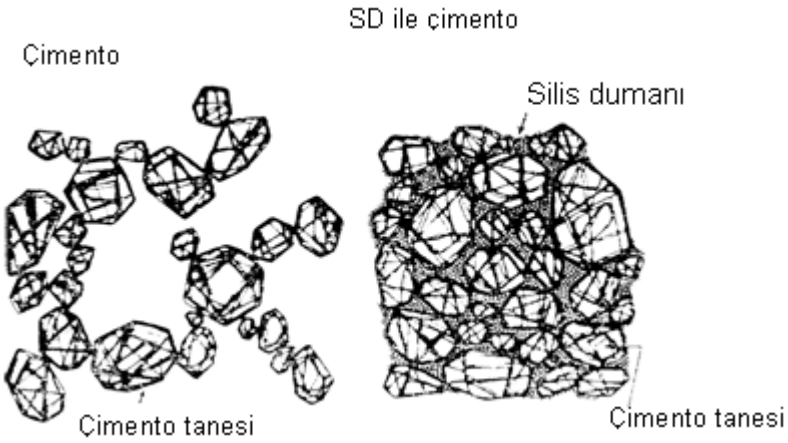
Malzeme	Yöntem	Özgül Yüzey (m^2/kg)
Portlan çimentosu	Blaine	300 – 400
Uçucu kül	Blaine	400 – 700
Granüle yüksek fırın cürufu	Blaine	350 – 600
Silis dumanı	BET	13000 - 20000

Silis dumanının tane boyut dağılımının tipik bir örneği Şekil 2.14'te verilmiştir. Görüldüğü gibi tanelerin hemen tümü 0,1 μm civarındadır. Ortalama çimento tanesinin çapı 10 μm kabul edilirse silis dumanının çimentodan 100 kere daha ince olduğu sonucuna varılabilir (Yeğinobalı, 2002)



Şekil 2.14 Silis dumanı tane boyu dağılımı (Yeğinobalı, 2002).

Hjorth (1983) tarafından belirtildiği gibi, Portland çimentosunun çok ince silis dumanı ile yer değiştirilmesi sonucu yüksek dayanımlı betonlarda mükemmel bir diziliş elde edilir. Bu olay şematik olarak Şekil 2.15'de gösterilmektedir.



Şekil 2.15 Çimento hamurunda silis dumanının doldurma etkisi (Hjorth,1983).

Silis dumanı içeren betonların özeliklerini gözönüne alarak silis dumanının iki şekilde kullanıldığını hesaba katmak gerekir: a) dürabilitenin yükseltilmesi ve hidratasyon hızının azaltılması gibi nedenlerde çimento miktarında bir miktar azaltma yaparak, çimento ile yerdeğiştiren bir malzeme olarak kullanılması, b) hem taze ve hem de sertleşmiş halde beton özeliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmasıdır (FIP,1988).

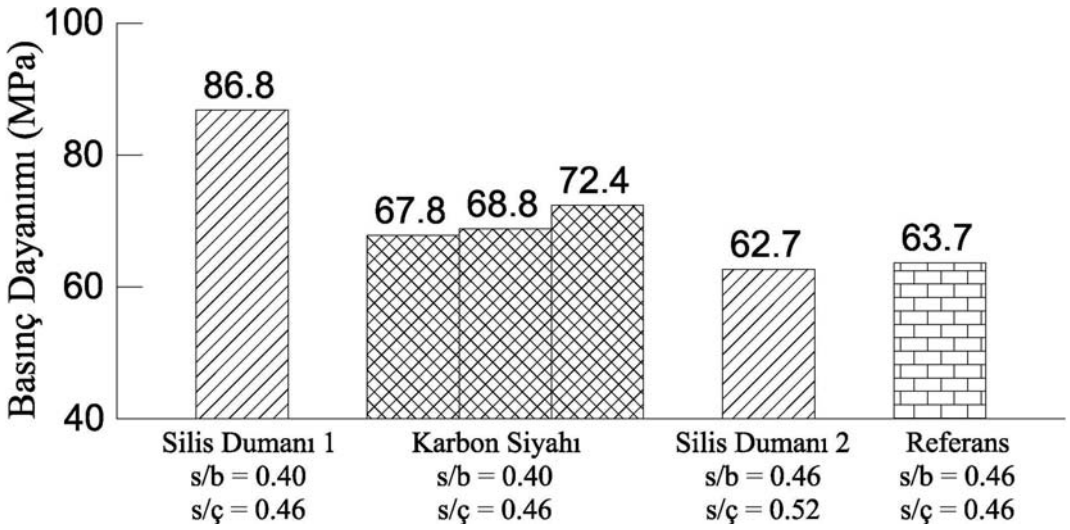
2.3.1 Silis dumanının puzolanik etkisi

Silis dumanı çimento hamurunda arayüzeyde biriken $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek, bağlayıcılık özelliğine sahip C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrate) jellerini meydana getirir. Bu puzolanik jel normal olarak oluşan (C-S-H) jellerinin boşluklarında oluşmakta ve jelin yoğunluğunu arttırmaktadır. Silis dumanının bu özeliğine puzolanik özelik denir. Beton karışımındaki $SD/Ca(OH)_2$ oranı $Ca(OH)_2$ tüketim miktarını ve tüketim süresini etkilemektedir. Ayrıca silis dumanlarında düşük alkali ve yüksek silis miktarları puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır (Yeğinobalı, 2002)

Puzolanik aktivite ile birlikte arayüzey bölgesindeki $Ca(OH)_2$ kristallerinin küçülmesi bölgedeki gözenekliliğin azalmasına, hamurun içyapısının daha homojen bir hale gelmesine ve beton mukavemetinin artmasına neden olur (Yeğinobalı, 2002).

Goldman ve Bentur (1993) yaptıkları deneysel çalışmalarda, bağlayıcı malzeme olarak kullanılan silis dumanı ve karbon siyahının beton dayanımına olan etkilerini

araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda aynı su/çimento (s/ç = 0,46) oranına sahip karbon siyahı kullanılan ve kullanılmayan çimento hamurlarının dayanımlarının aynı olduğu tespit edilmiş, buna karşılık silis dumanı kullanılan çimento hamuru ile kullanılmayan çimento hamuru arasında büyük oranda dayanım farkı gözlenmiştir. Bu durumun silis dumanının puzolanik özelik göstermesinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.16'da özetlenmiştir. Silis dumanı kullanılarak üretilen diğer bileşimde ise, dayanımın referans hamura göre daha düşük olmasını, su/çimento oranının yüksek olmasından (s/ç = 0,52) kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.16 Karbon siyahı ve silis dumanı kullanılan çimento hamurlarının dayanımlarının karşılaştırılması (Goldman ve Bentur, 1993).

Temiz ve Karakeçi (2002) yaptıkları deneysel çalışmada, hidratasyon ürünü olan $Ca(OH)_2$'in silis dumanı ve uçucu kül kullanılması ile tüketildiğini ve bağlayıcı C-S-H jelinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Puzolanik katkı içermeyen numunelerde iri portlandit kristalleri ($Ca(OH)_2$) oluşurken, silis dumanı ve uçucu kül içeren numunelerde ise bu kristallerin miktarı zamana bağlı olarak azalmıştır.

2.3.2 Silis dumanının boşluk doldurma özelliği

Çok ince tane yapısına sahip olan silis dumanının özgül yüzeyi oldukça büyüktür. Tipik bir silis dumanı örneğinde tane çapının 1μm'den küçük ve ortalama tane boyutunun 0,1μm civarında olduğu gözlenmiştir. Silis dumanı çimento ile agrega arayüzeyindeki boşlukları doldurarak yüksek dayanımlı bir matris oluşturur (Yeğinobalı, 2002).

2.4 Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkisi

Kimyasal katkılar, taze veya sertleşmiş beton veya harç özeliklerini değiştiren, betonun nihai özeliklerine zararlı etki oluşturmayan malzemelerdir. Beton katkı maddeleri hızlandırıcı katkılar, akıcı kıvam için katkılar, hava sürükleyici katkılar, betonun kimyasallara dayanımını arttıran katkılar, priz hızlandırıcı veya priz geciktirici katkılar olmak üzere sınıflandırılabilirler (Uyan ve Yıldırım, 1991).

Özellikle yüksek dayanımlı betonlarda su/çimento oranı çok düşük olduğundan işlenebilme problemlerini ortadan kaldırmak için süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri sayesinde karışım suyu büyük oranda azaltılarak dayanım ve dayanıklılığı yüksek betonlar üretilmektedir (Uyan ve Yıldırım, 1991).

Akışkanlaştırıcı katkıların etki mekanizması katkının çimento taneleri tarafından adsorbe edilmesi ile başlar. Adsorbe edilen katkı çimento yüzeyini kuşatır ve (–) yükle yüklenen çimento taneleri birbirlerini itmeye başlarlar. Bu şekilde tanelerin birbiri ile topaklanması önlenirken, tanelerin birbiri üzerinde kaymaları kolaylaşır. Sonuç olarak betonun iç sürtünmesi azalır. Bu durum, düşük su/çimento oranlarında dahi betondan istenilen işlenebilirliğin elde edilmesini sağlar (Uyan ve Yıldırım, 1991).

2.5 Isıl İşlemin Beton Özelliklerine Etkisi

Betona ısıl işlem uygulanmasının nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

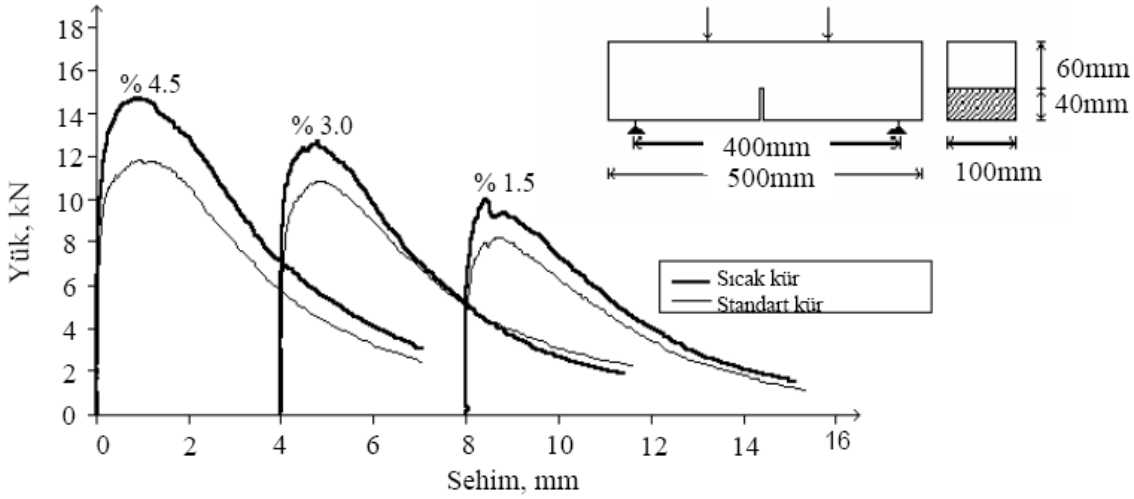
1. Çimento hidratasyonu yüksek sıcaklıklarda hızlanır, beton daha erken dayanım kazanır.

2. Isıl işlemlerle birlikte çimento hamurunun içyapısı kararlı hale gelir ve sonuç olarak beton daha az rötre yapar.

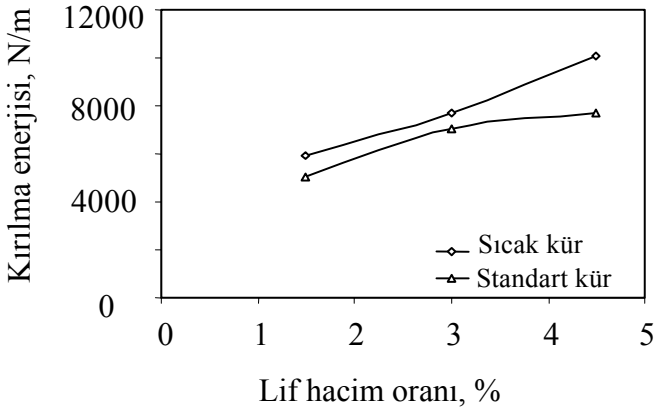
3. Silisli agrega içerisindeki kuvars yüksek sıcaklıkta aktive olarak betonda serbest halde bulunan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girer ve bağlayıcı özeliği yüksek olan Kalsiyum silikat hidrate'yi (C-S-H) oluşturur.

4. Serbest kireç miktarının azaltılması ile mikro yapı iyileşir, dolayısıyla ısıl işlem betonun durabilitesini olumlu yönde etkiler (Postacıoğlu, 1986).

Özyurt (2000) tarafından yapılan bir çalışmada, sıcak su kürünün yüksek performanslı çelik lif takviyeli betonların mekanik özeliklerine etkisini araştırmak üzere yaptığı çalışmada iki farklı kür rejimi uygulamıştır. Normal kür uygulanan numuneler 28 gün boyunca sürekli olarak 20°C' de kirece doygun su içine bekletilmiştir. Sıcak su kürü uygulanan numuneler ise ilk 7 gün 20°C' de kirece doygun su içinde tutulmuş ardından 2 gün 90°C sıcaklıkta kirece doygun su içerisinde bekletilmiş ve daha sonra tekrar 20°C' de kirece doygun su içine alınarak burada 13 gün daha bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ısıl işlem uygulamasının numunelerin kırılma enerjisini %10-%30, net eğilme dayanımlarını %20-%40 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. Numunelerin silindir basınç dayanımlarında belirgin bir değişiklik olmamıştır. Net eğilme dayanımı ve kırılma enerjisindeki artış silis dumanı veya ince öğütülmüş silis kumundaki kuvarsın ısıl işlem ile aktif hale gelmesi ile mikro yapının iyileşmesine bağlanmıştır. Aktif hale gelen kuvars kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento ile agrega arayüzeyinin aderansını güçlendirmiştir. Şekil 2.17 ve Şekil 2.18 sıcak kür rejiminin açıklık ortasındaki yük-sehim eğrisine ve kırılma enerjisine etkisini göstermektedir.

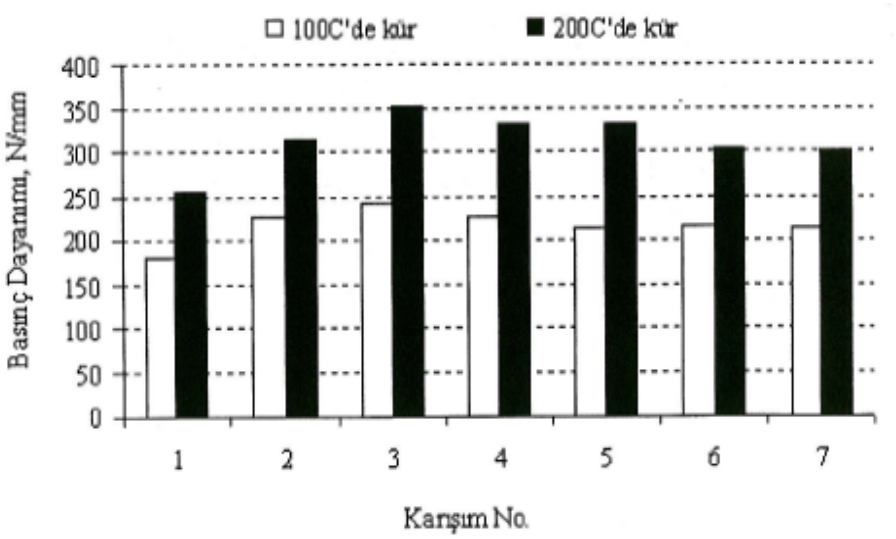


Şekil 2.17 Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerde yük sehim eğrisi (Özyurt, 2000).



Şekil 2.18 Yüksek performanslı çelik tel donatılı çentikli kiriş numunelerde kırılma enerjisi çelik lif hacim oranı ilişkisi (Özyurt, 2000).

Kocatürk ve diğerlerinin (2005) yaptıkları çalışmalarda, silis içeriği yüksek silis dumanı kullanarak, su/bağlayıcı oranını minimum düzeye indirerek (yaklaşık 0,15), etkili bir hiperakışkanlaştırıcı kullanarak ve çelik tel miktarını yüksek tutarak reaktif pudra betonu üretimini amaçlamışlardır. Numuneler yüksek ısı kürüne tabi tutularak sıcaklığın yüksek dayanım elde etmedeki rolü araştırılmıştır. Şekil 2.19'da numunelerin küp basınç dayanımları gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, kür sıcaklığının beton dayanımına etkisinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. 200°C kür uygulanan kompozit malzemede basınç dayanımının yaklaşık 350 MPa değerine ulaşması ince toz malzemelerin puzolanik reaksiyona girdiğinin göstergesidir.



Şekil 2.19 Kür işleminin basınç dayanımına etkisi (Kocatürk ve diğ., 2005).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde üretimde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özelikleri ve yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri verilmektedir.

3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Çimento

Kullanılan çimento CEM I PÇ 42.5 R olup Nuh Çimento fabrikasının üretimidir. Fiziksel ve mekanik özelikleri aşağıda verilmektedir. Çimentonun fiziksel, kimyasal mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 Üretimlerde kullanılan çimentonun özellikleri.

Fiziksel Özellikler	
Özgül yüzey (Blaine)	3445 cm^2/g
Özgül ağırlık	3,14 g/cm^3
Priz başlangıcı	161 dakika
Priz sonu	193 dakika
La Chatelier iğnelerinde toplam açılma	1 mm
Mekanik Özellikler	
Basınç dayanımı (2.gün)	27,1 MPa
Basınç dayanımı (28. gün)	58,0 MPa
Kimyasal Özellikler	
SiO_2	% 19,8
Al_2O_3	% 4,43
Fe_2O_3	% 3,20
CaO	% 63,7
MgO	% 1,08
SO_3	% 2,59
Çözünmeyen kalıntı	% 0,54
Kızdırma kaybı	% 2,77
Serbest kireç	% 1,07
Toplam alkali	% 0,50

3.1.2 Silis dumanı

Üretimlerde kullanılan silis dumanının özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 Üretimlerde kullanılan silis dumanının özellikleri.

SiO_2 oranı	% 95,06
Özgül ağırlık	2,26 g/cm³
Gevşek birim Ağırlık	0,66 g/cm³

3.1.3 İnce silis kumu

Karışımlarda en büyük tane çapı 500 μm ve özgül ağırlığı 2,62 g/cm^3 olan ince silis kumu kullanıldı. Bu kumun elek analizi sonuçları Tablo 3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.3 Kullanılan ince silis kumuna ait elek analizi sonuçları.

Elek göz boyutu (mm)	Elekten geçen (%)
2	100
1	100
0,500	100
0,250	41
0,125	1

3.1.4 İri silis kumu

Karışımlarda en büyük tane çapı 2mm ve özgül ağırlığı 2,61 g/cm^3 olan iri silis kumu kullanılmıştır. İri silis kumunun elek analizi sonuçları Tablo 3.4'de gösterilmektedir.

Tablo 3.4 Kullanılan ince silis kumuna ait elek analizi sonuçları.

Elek göz boyutu (mm)	Elekten geçen, (%)
8	100
4	100
2	100
1	84
0,500	28
0,250	7
0,125	1

3.1.5 Kanca uçlu çelik tel

TS 10513 standardına uygun iki ucu kancalı, birbirine tutkalla birleştirilmiş soğuk çekilmiş çelik liflerdir. Bu çelik teller Bekaert'in üretimi olup Dramix ZP 305X kodludur. Kanca uçlu çelik tellerin teknik özellikleri Tablo 3.5'de verilmektedir.

Tablo 3.5 Kancalı uçlu çelik tellerin teknik özellikleri.

Boy	30 mm
Çap	0,55 mm
Narinlik(l/d)	55
Özgül ağırlık	7,85 g/cm^3
Çekme dayanımı	2250 N/mm^2

3.1.6 Düz çelik tel

Üstü pirinç kaplı, sarı renkli kısa kesilmiş, düz çelik tellerdir. Bekaert'in OL 6/16 kodlu üretimi olup teknik özelikleri Tablo 3.6'da gösterilmektedir.

Tablo 3.6 Kısa tellerin teknik özellikleri.

Boy	6 mm
Çap	0,16 mm
Narinlik(l/d)	37,50
Özgül Ağırlık	7,17 g/cm^3
Çekme Dayanımı	2250 N/mm^2

3.1.7 Süperakışkanlaştırıcı

Kullanılan süperakışkanlaştırıcı Chryso'nun Fluid Optima 200 kodlu üretimi olup güçlendirilmiş polikarboksilat bazlı yeni jenerasyon bir süperakışkanlaştırıcıdır. Özgül ağırlığı 1,1 g/cm^3 olan bu katkı maddesinin %20 kadarı katı maddeden oluşmaktadır. Bütün karışımlarda çimento ağırlığının yaklaşık olarak % 1,15'i kadar kullanılmıştır.

3.1.8 Demir tozu

Karışımlarda Toz Metal firmasından elde edilmiş olan NC 100.24 kodlu demir tozu kullanılmıştır. Kullanılan demir tozunun özgül ağırlığı 7,80 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Demir tozunda eleme yapıldığında 45, 90 ve 200 mikronluk eleklerde kalan miktar sırasıyla %78, %33 ve %1 oranlarında elde edilmektedir. Demir tozunun tane boyut dağılımı Şekil 3.1'de, kimyasal bileşimi ise Tablo 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.1 Demir tozunda tane boyut dağılımı.

Tablo 3.7 Demir tozu kimyasal bileşimi.

Bileşen	%
SiO_2	0,21
Al_2O_3	0,12
Fe_2O_3	99,03
CaO	0,00
MgO	0,00
SO_3	0,28
Na_2O Eşdeğeri	0,027
Klorür (Cl^-)	0,005

3.2 Beton Karışımları ve Numune Kodları

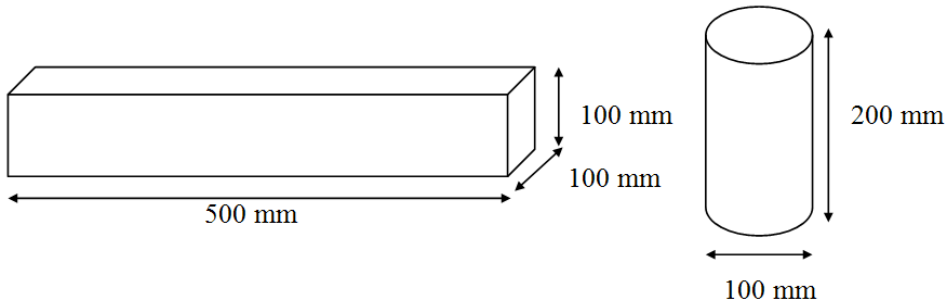
Toplam 5 karışımdan oluşan bu çalışmada 4 karışım çelik lif içermektedir içermektedir. 1 karışım ise çelik lifsiz yalın beton şeklindedir. Bütün bileşimlerde nominal çimento dozajı 1000 kg/m^3, su/çimento oranı 0,20 ve su/bağlayıcı oranı 0,16'da sabit tutulmuştur. Agrega olarak ince silis kumu (0-500 µm) ve iri silis kumu (0,5mm - 2mm) kullanılmıştır. Silis dumanı çimento ağırlığının %25'i, süperakışkanlaştırıcı ise %1,15'i oranında kullanılmıştır. Mikro lif olarak demir tozu kullanılmıştır. Kısa kesilmiş, 6 mm uzunluğa, 0,16 mm çapa, ve 2250 MPa çekme dayanımına sahip kısa düz uçlu teller mezo lif olarak ve 30 mm uzunluğa, 0,55 mm çapa, ve 2250 MPa çekme dayanımına sahip kanca uçlu uzun çelik teller ise makro lif olarak kullanılmıştır. M0 karışımı yalın beton olarak üretilmiştir. M1 karışımına hacimsel olarak %9 oranında demir tozu katılmıştır. Geri kalan 3 karışım ise demir tozu ve çelik tel eklenerek üretilmiştir. Karışımlardaki demir tozu ve çelik tel yüzdeleri Tablo 3.8'de gösterilmiştir.

Tablo 3.8 Karışımların kodları, karışımlardaki demir tozu ve çelik lif yüzdeleri.

Numune kodu	M0	M1	M2	M3	M4
Demir tozu (%)	0	9	6	6	3
Düz çelik tel (%)	0	0	3	0	3
Kancalı uçlu çelik tel (%)	0	0	0	3	3
Toplam (%)	0	9	9	9	9

3.3 Numune Boyutları ve Şekilleri

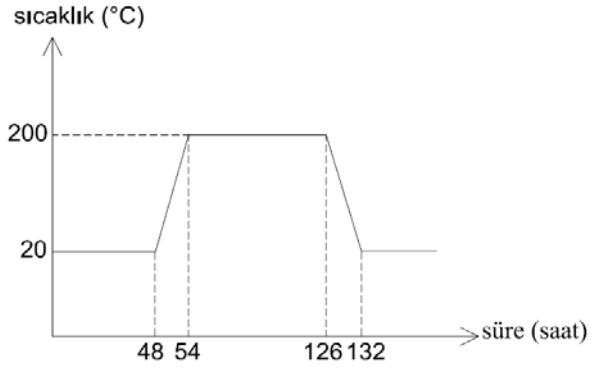
Üretilen numunelerin şekilleri ve boyutları Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2 Numune şekilleri ve boyutları.

3.4 Kür Programı

Uygulanan ısıl işlem programına göre; üretilen numunelerin 48 saat sonunda kalıpları sökülmüş ve ardından 3 gün 200°C ± 5°C'deki etüvde kür uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık kürü sırasında numuneler, nemin buharlaşmasını önleyen koruyucu iki tabaka ile sarılmıştır. Birinci sargı malzemesi yüksek sıcaklığa dayanıklı plastik bir tabaka, ikinci malzeme ise aluminyum folyodur. Son olarak numuneler deney tarihine kadar 20°C ± 2°C'de kirece doygun su içine alınarak bekletilmiştir. Numunelerin sıcaklık değişimleri 6'şar saatlik bir programla uygulanmıştır. Uygulanan kür programı Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3 Numunelere uygulanan kür programı.

3.5 Taze Beton Özellikleri

Üretilen malzeme, hacmi bilinen bir silindir kap içerisine vibrasyon uygulanarak yerleştirilmiş ve taze betonun birim ağırlığı bulunmuştur. Taze beton özelikleri Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9 Taze beton özellikleri.

Karışım kodu	M0	M1	M2	M3	M4
Çimento, kg/m³	972	966	966	977	977
Silis dumanı, kg/m³	243	242	242	244	244
Su, kg/m³	107	106	106	107	107
Su/bağlayıcı	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
İnce kum, kg/m³	535	380	380	384	384
İri kum, kg/m³	357	253	253	256	256
Demir tozu, kg/m³	0	662	443	448	223
Kısa düz tel, kg/m³	0	0	224	0	229
Uzun kancalı tel, kg/m³	0	0	0	227	229
Süperakışkanlaştırıcı, kg/m³	112	111	111	112	112
Birim ağırlık, kg/m³	2393	2815	2821	2821	2826
Hava boşluğu (%)	2,90	4,80	4,50	3,90	3,50

3.6 Sertleşmiş Beton Deneyleri

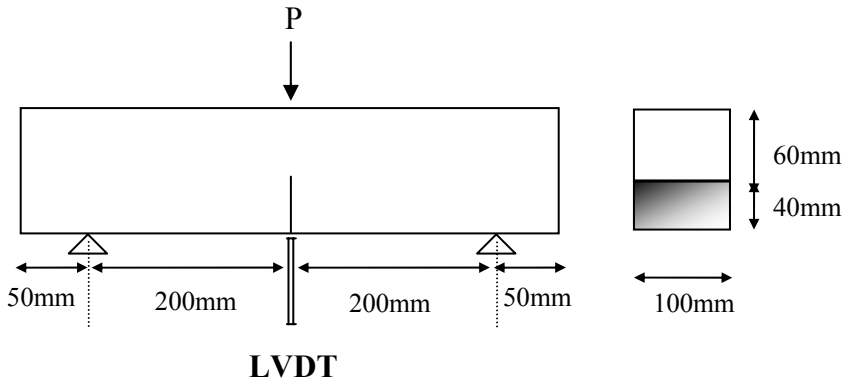
3.6.1 Silindir basınç deneyi

Silindir basınç deneyleri 100 mm çaplı 200 mm yükseklikteki silindir numuneler üzerinde 120. günde gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülleri 2000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak elde edilmiştir. Deneye tabi tutulan numuneler için her 20 kN'luk yüke karşı gelen eksenel yer değiştirme değerleri okunmuştur.

Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, maksimum yükün %33'üne kadar olan grafiğin eğiminden faydalanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır. Ayrıca numunelerin kırılma yükleri 500 ton kapasiteli basınç presi kullanılarak bulunmuş ve basınç dayanımları hesaplanmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçların ortalamaları Tablo 3.10'da gösterilmiştir.

3.6.2 Üç noktalı eğilme deneyi ve kırılma enerjisinin belirlenmesi

Kırılma enerjisinin belirlenmesi için çentikli 100x100x500 mm'lik kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Numuneler elmas testere ile kesilerek 40 mm'lik bir çentik açılmış ve etkin kesit alanının 60x100 mm olması sağlanmıştır. Beton kiriş numunelere yük, maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile uygulanmıştır. Yükleme hızı, lifsiz numunelerde, 0,018 mm/dak., lifli numunelerde ise 2,5 mm'lik bir sehime kadar 0,05 mm/dak., 10 mm'lik sehime kadar ise 0,10 mm/dak.'da sabit tutulmuştur. Kirişin ortasına yerleştirilen 2 adet LVDT ile sehim ölçülmüş ve her bir kiriş numune için yük–orta noktadaki sehim eğrisi elde edilmiştir. Çentikli kiriş numune için eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Üç noktalı eğilme deney düzeneği.

Şekil 3.5'de gösterilmiş olan yük-sehim eğrisinin altındaki alan yardımıyla kırılma enerjisi RILEM 50-FMC'nin önerdiği denklem 3.1 ile bulunmuştur.

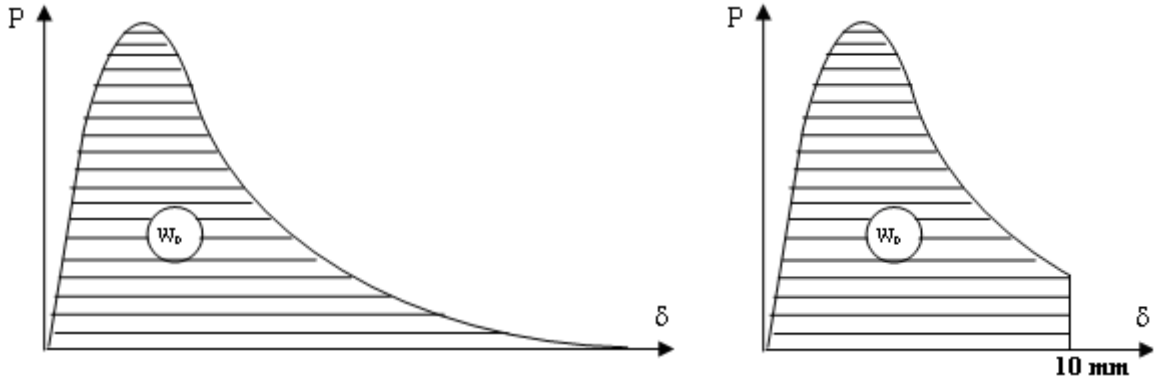
$$G_F = (Wo + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (3.1)$$

Denklemde, Wo: Yük-sehim eğrisi altında kalan alanı (Nm), m: Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığını (kg), g: Yer çekimi ivmesini, δ_o: Kirişin göçme sırasındaki son sehim değerini (m), A_{lig}: Etkin kesit alanını (m^2) temsil etmektedir.

Numunelerin eğilme dayanımları ise 3.2 bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{net} = (3PL) / 2BD^2 \quad (3.2)$$

Denklemde P: Kırılma yükünü (N), L: Mesnetler arası uzaklığı (mm), B: Numunenin kesit genişliğini (mm), D: Numune kesitinin yüksekliğini (mm) temsil etmektedir.



a) Yalın harç numuneler için b) Lif donatılı harçlar için

Şekil 3.5 Yük-sehim eğrisinin temsili gösterimi.

3.6.3 Sertleşmiş numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar

Sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçların ortalamaları Tablo 3.10'da görülmektedir.

Tablo 3.10 Sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlar.

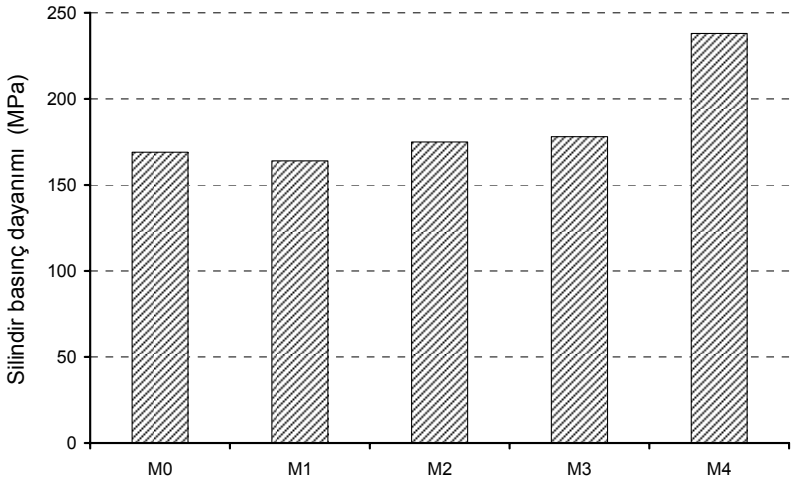
Karışım kodu	M0	M1	M2	M3	M4
Silindir basınç dayanımı (MPa)	169	164	175	178	238
Elastisite modülü (GPa)	41,1	42,0	41,0	43,9	44,0
Kırılma enerjisi (N/m)	135	154	12770	22715	30940
Net eğilme dayanımı (MPa)	6,3	7,8	31,1	37,5	58,6

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELEME VE DEĞERLENDİRMESİ

4.1 Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

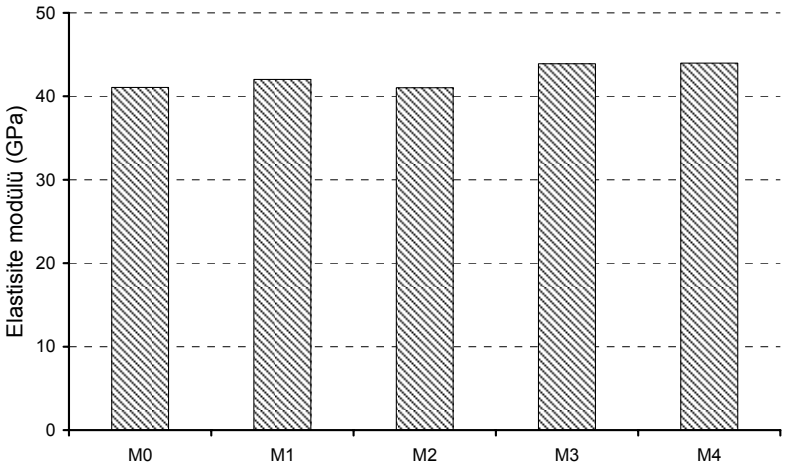
120. günde yapılan silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri her numune için EK A'de verilmiştir. Bu değerlerin ortalaması Tablo 3.10, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'te gösterilmiştir.

Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre, yalın karışımlarda ortalama silindir basınç dayanımı 169 MPa iken %9 oranında demir tozu katılmış karışımın dayanımı hemen hemen aynı kalmıştır ve 164 MPa olarak bulunmuştur. Demir tozu ile birlikte kısa veya uzun lif içeren karışımların dayanımlarında da pratikte bir değişme olmamış ve sırasıyla 175 MPa ve 178 MPa olarak bulunmuştur. Üç tip lif (mikro, mezo, makro) katılmış karışımlarda ise silindir basınç dayanımı %41 oranında artmış ve 238 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1 Silindir basınç deney sonuçları.

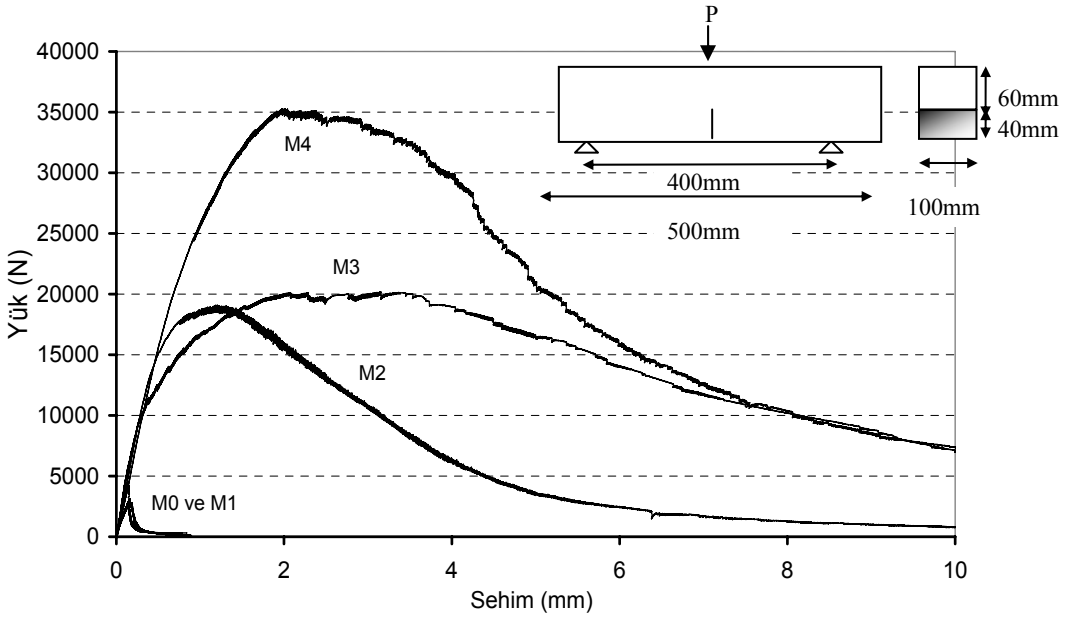
Silindir basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü değerlerine göre, betona çelik tel ve demir tozu katılmasının elastisite modülüne belirli bir etkisi yoktur. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi karışımların elastisite modülleri pratik anlamda değişmemiştir.



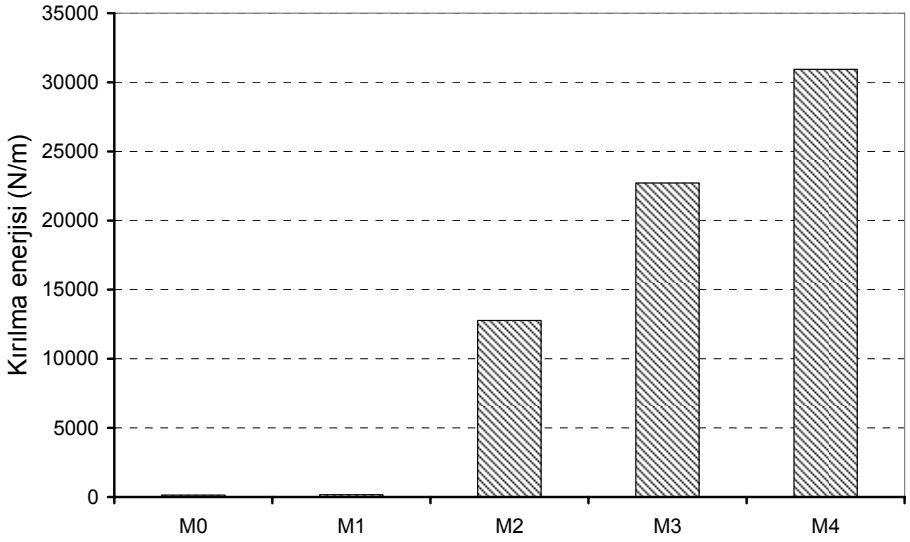
Şekil 4.2 Karışımları elastisite modülü sonuçları.

4.2 Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre betona çelik lif eklenmesi kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımını büyük ölçüde arttırmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar çok gevrek malzemeler olup, çelik tel katılması betonun maksimum yük sonrası davranışını iyileştirerek daha sünek bir yapı oluşmasını sağlar. Malzeme tarafından yutulan enerjinin artması ile ani göçme kırılmaları engellenir. Deneylerden elde edilen yük sehim eğrileri Şekil 4.3'te görülmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen grafikler ve değerler Ek B'de verilmiştir.

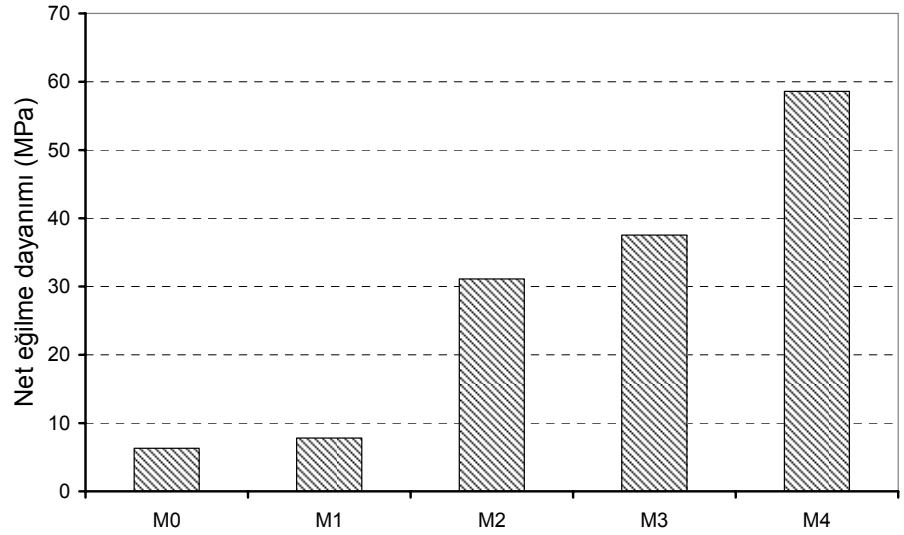


Şekil 4.3 Numunelerin yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.4 Kırılma enerjisi sonuçları.

Deneyler sonucunda hesaplanan kırılma enerjilerinden elde edilen ortalamalar Tablo 3.10 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Sonuçlara göre, M0 karışımında kırılma enerjisi 135 N/m iken mikro lif olarak demir tozu katılmış M1 karışımında kırılma enerjisi az miktarda artarak 154 N/m olarak bulunmuştur. Kırılma enerjisindeki en büyük artış ise üç tip lif içeren M4 karışımında olmuştur. Bu karışımdaki kırılma enerjisi yalın betona oranla yaklaşık 230 kat artmış ve 30340 N/m olarak bulunmuştur. Uzun tel ve demir tozu katılmış karışımlarda ise kırılma enerjisi yaklaşık 170 kat artarak 22715 N/m olarak bulunmuştur. Demir tozu ile birlikte kısa kesilmiş tellerin eklendiği M2 karışımında ise kırılma enerjisi 95 kat artmış ve 12270 N/m olarak bulunmuştur.



Şekil 4.5 Net eğilme dayanımı sonuçları.

Karışımların net eğilme dayanımları 3 noktalı eğilme deneyleri sonucunda elde edilen maksimum yük değeri kullanılarak hesaplanmıştır.Elde edilen değerlerin ortalamaları Tablo 3.10 ve Şekil 4.5'da verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre karışımlarda lif kullanılmasının net eğilme dayanımlarını büyük ölçüde arttırdığı gözlenmektedir. Yalın betonda eğilme dayanımı 6.33 MPa olarak bulunmuştur. Mikro lif eklenmiş karışımın eğilme dayanımı ise çok fazla değişmemiş ve 7,83 MPa olarak bulunmuştur. Net eğilme dayanımlarında en büyük artış üç tip lif kullanılan M4 karışımında olmuştur, bu karışımda net eğilme dayanımı 9 kattan fazla artarak 58,6 MPa olarak bulunmuştur. Demir tozu ve makro çelik tel içeren M3 karışımında artış 6 kat olmuş ve 37,5 MPa olarak bulunmuştur. Demir tozu ve mezo çelik tel içeren M2 karışımında ise artış 5 kat olmuş ve 31,1 MPa olarak bulunmuştur.

5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- Yüksek sıcaklık kürü uygulanması ile dayanımlarda meydana gelen artış, ince malzemesi yüksek olan betonda, yüksek sıcaklığın betonun mikro yapısını geliştirmesi ve ince malzemede bulunan silisin yüksek sıcaklıkta aktif hale gelmesi ile sağlanmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisi ile mikro yapının gelişmesi, lif-matris aderansını arttırarak, liflerin matris içerisinde aktif olarak çalışmasını sağlar. Artan lif-matris aderansı ile betonun basınç dayanımında, net eğilme dayanımında ve kırılma enerjilerinde artışlar sağlanır.

- Silindir basınç dayanımları, sadece mikro lif ve mikro lif ile birlikte mezo veya makro lif eklenmiş karışımlarda değişmemiştir, 3 tip lif eklenmiş karışımlarda ise 1,45 kat artmıştır.

- Çelik tel ve demir tozu kullanılmasının karışımların elastisite modülü değerlerine belirli bir etkisi görülmemiştir.

- Karışımlara çelik tel eklenmesi ile kırılma enerjilerinde en az 95, en fazla 230 kat artış görülmüştür.

- Betona çelik lif eklenmesi ile kırılma enerjisinde meydana gelen artışlar lif tipine ve miktarına göre değişmektedir. Sadece mikro lif kullanılan karışımlarda %14 oranında bir artış görülmüştür. Mikro ve mezo lif katılmış karışımlarda 95 kat, mikro ve makro lif katılmış karışımlarda ise 170 kat artış görülmüştür. Üç tip lif katılmış karışımlarda ise 230 kat artış görülmüştür.

- Mikro ve mezo lif içeren karışımlar ile mikro ve makro lif içeren karışımların maksimum kırılma yükleri birbirlerine yakın olmasına rağmen, makro lif içeren karışımlarının kırılma enerjisi, mezo lif içeren karışımlarından 1,78 kat daha fazladır. Bunun nedeni yük-sehim eğrisinde, kancalı uçlu uzun çelik tellerin maksimum yük sonrası davranışı iyileştirmesidir. Kısa kesilmiş düz teller ise mikro çatlakların oluşumunu engelleyerek ilk çatlak yükünün artmasını sağlamaktadır, fakat ilk çatlaktan sonra tellerin matristen sıyrılmaya başlaması ile kompozitin taşıdığı yük

azalmaktadır. Bu durumda kanca uçlu uzun çelik tel kullanımının kırılma enerjisini arttırdığı sonucuna varılabilir.

- Betona çelik tel eklenmesiyle net eğilme dayanımları en az 5, en fazla 9,3 kat artmıştır.

- Betona çelik lif eklenmesi ile net eğilme dayanımlarında meydana gelen artışlar çelik lif miktarına göre değişmektedir. Sadece mikro lif kullanılan karışımlarda net eğilme dayanımı %23 artmıştır. Mikro ve mezo lif kullanılan karışımlarda eğilme dayanımı 5 kat, mikro ve makro lif kullanılan karışımlarda ise 6 kat artmıştır ve kancalı tellerin etkisiyle tepe noktası sonrasında belirgin şekil değiştirme yumuşaması elde edilmiştir. 3 tip lif içeren karışımlarda ise eğilme dayanımı 9 kattan fazla artmıştır.

KAYNAKLAR

ACI Committee 234, 2000. Guide for the use of silica fume in concrete, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, 2000

ACIFC, 1999. Steel fibre reinforced concrete industrial ground floors, *An Introductory Guide*, Association of Concrete Industrial Flooring Contractors (ACIFC), Warwickshire, UK.

Akkaya, Y., Peled, A. and Shah, S. P., 2000. Parameters Related to Fiber Length and Processing in Cementitious Composites, RILEM, *Materials and Structures*, **33**, 515-524.

Akkaya, Y. ve Shah, S. P., 2001. Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **127**, 311-316.

Akkaya, Y., 2000, Microstructural characterization of high performance fiber reinforced cement composites, *PhD Thesis*, Northwestern University, Ilinois.

Alaee, F.J., Benson, S.D.P. and Karihaloo, B.L., 2001. High-performance fiber-reinforced cementitious composites for retrofitting, *Proceedings of the 3rd International Conference on Technology Convergence in Composites Application*, Sydney, Australia, February 5-9, 1-10.

Alaee, F.J., 2002. Retrofitting of concrete structures using high performance fibre reinforced cementitious composite, *PhD Thesis*, Cardiff University Department of Civil Engineering, Cardiff .

Balaguru, P.N., Shah, S.P., 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, New York.

Banthia, N. And Trottier, J.F., 1995. Concrete reinforced with deformed steel fibers Part II:Tougness characterization, *ACI Materials Journal*, **92**, 146-154.

Bayasi, Z. and Soroushian P., 1991. Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, 129-134.

Bayramov, F., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A., 2002. Optimum design of cement-based composite materials using statistical response surface method, *Proceedings of the 5th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, September 25-27, 725-734.

Bayramov F., İlki A., Taşdemir C., Yerlikaya M., Taşdemir M.A. and Yerlikaya M., 2004a. SFRCs for concrete roads in heavily trafficed situations, *The 9th International Symposium on Concrete Roads*, Istanbul, Turkey, April 4-7.

Bayramov, F., Aydoner T., A. Ilki, C. Tasdemir, M.A. Tasdemir and M. Yerlikaya, 2004b. "An Optimum Design for Steel Fiber Reinforced Concretes under Cyclic Loading," Proc. 5th Int. *Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure*s, Vail, Colorado, USA, April 12-16.

Bayramov, F., 2004, Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Blais, P. Y., and Couture, M., 1999, Precast, Prestressed Pedestrian Bridge — World's First Reactive Powder Concrete Structure, *PCI Journal*, Volume **44**, 60-71.

Dugat, J., Roux, N. and Bernier, G., 1996. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, *Materials and Structures*, **29**, 233-240.

Emerging Construction Technologies, 2008. Purdue University, Reactive Powder Concrete - http://rebar.ecn.purdue.edu/ECT/Civil/reactive.aspx

Eren, Ö. and Çelik, T., 1997. Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, **11**, 373-392.

FIP, 1988. Condensed silica fume in concrete, *The State of the Art Report*, p 37, Thomas Telford, London.

Fırat, M.T., 1996. Silis dumanı içeren yüksek mukavemetli betonların enerji yutma kapasitelerinin arttırılmasında çelik lif kullanımının etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gao, J., Sun, W. and Morino, K., 1997. Mechanical properties of steel fibre-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, **19**, 307-313.

Gebman, M., 2001. Application of steel fiber reinforced concrete in seismic beam-column joints, *MSc Thesis*, San Diego State University, San Diego.

Goldman, A. and Bentur, A., 1993. The Influence of Strength Microfillers on Enhancement of Concrete Strength, *Cement and Concrete Research*, **23**, 962-972.

Gutiérez, R.M., Diaz, L.N. and Delvasto, S., 2005. Effect of Pozzolons on The Performance of Fiber-Reinforced Mortars, *Cement and Concrete Composites*, **27**, 593-598.

Hijorth, L., 1983. *Development and Application of High-Density Cement-Based Materials*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A310, 167-173.

Karihaloo, B.L., 2000. Retrofitting damaged RC beams with high-performance fiber-reinforced concrete, *Proceedings Concrete Communications Conference*, 153-164, British Cement Association.

Kocataşkın, F., 1991. Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi, *2.Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü., İstanbul, 27-30 Mayıs, 211-226.

Kocatürk, N.A., Haberveren, S., Aslan, E.G. ve Taşdemir, M.A., 2005. Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, *6. Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü, İstanbul, 16-18 Kasım, 447-457.

Köksal, F., 2004, Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özyurt, N., 2000, Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Postacıoğlu, B., 1986. Beton, 1, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.

Rebentrost, M. Ve Cavill, B., 2006. Reactive Powder Bridges, *AustRoads Conference*, Perth, Australia, 12-15 September, 11.

Richard, P. and Cheyrezy, M., 1995. Composition of reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1501-1511.

Richard, P., and Cheyrezy, M. H., 1994. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, *American Concrete Institute*, **ACI SP-144**, 507-518 .

RILEM 50-FMC, 1985. Committee of fracture mechanics of concrete, Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of threepoint bend tests on notched beams, *Materials and Structure*s, 18, **106**, 285-290.

Tanaka, Y. Musya, H. Ootake, A. Shimoyama, Y. and Kaneko, O., 2002. Design and Construction of Sakata-Mirai Footbridge using Reactive Powder Concrete, *Proceedings of the 1st fib Congress 2002: Concrete Structures in the 21st Century*, Osaka, Japan, 417-424.

Taşdemir, M.A. ve Bayramov F., 2002. Yüksek performanslı çimento esaslı kompositlerin mekanik davranışı, *itüdergisi/d*, Cilt **1**, Sayı **2**, 125-144.

Taşdemir, M.A., İlki, A. and Yerlikaya, M., 2002. Mechanical behaviour of steel fibre reinforced concrete used in hydraulic structures, *Proceedings of HYDRO 2002: International Conference of Hydropower and Dams*, November 4-7 2002, Kiris-Antalya, 159-166.

Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar, A.Ş. ve Yerlikaya, M., 2005. Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı, *6. Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü, İstanbul, 16-18 Kasım, 33-43.

Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N. ve Yerlikaya, M., Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, *Beton 2004 Kongresi*, Dünya Ticaret Merkezi, İstanbul, 10-12 Haziran.

Temiz, H. and Karakeçi, A.Y., 2002. An Investigation on Microstructure of Cement Paste Containning Fly Ash and Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, **32**, 1131-1132.

TS10153, 1992. Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

Uyan, M. ve Yıldırım, H., 1991. Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği, *2.Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü., İstanbul, 27-30 Mayıs, 262-279.

Vandewalle, L., 1996. Influence of the yield strength of steel fibres on the toughness of fibre reinforced high strength concrete, Proceedings of the CCMS Symposium, *Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry*, Chicago, USA, April 15-18, 496-505.

Wafa, F.F. and Ashour, S.A., 1992. Mechanical properties of high-strength fibre reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **89**, 449-455.

Williamson, G. R., 1974. The effect of steel fibers on the compressive strength of concrete, A State-of-art report, *American Concrete Institute*, ACI SP-**44**, 195-207.

Yeğinobalı, A., 2002. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, *TÇMB/AR-GE Enstitüsü*, Ankara.

EKLER

Ek A. Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

Tablo A-1 Silindir numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerleri

Numune Kodu	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
M0-1	138
M0-2	132
M0-3	133
M0-4	136
M1-1	133
M1-2	127
M1-3	134
M1-4	128
M2-1	142
M2-2	138
M2-3	140
M2-4	142
M3-1	146
M3-2	143
M3-3	142
M3-4	140
M4-1	192
M4-2	185
M4-3	195
M4-4	190

Tablo A-2 Silindir numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri

Numune Kodu	Elastisite Modülü (MPa)
M0-2	40847
M0-3	41304
M0-4	41007
M1-2	42000
M1-3	42029
M1-4	42004
M2-2	40688
M2-3	41734
M2-4	40656
M3-2	44527
M3-3	43589
M3-4	43596
M4-2	43788
M4-3	44600
M4-4	43504

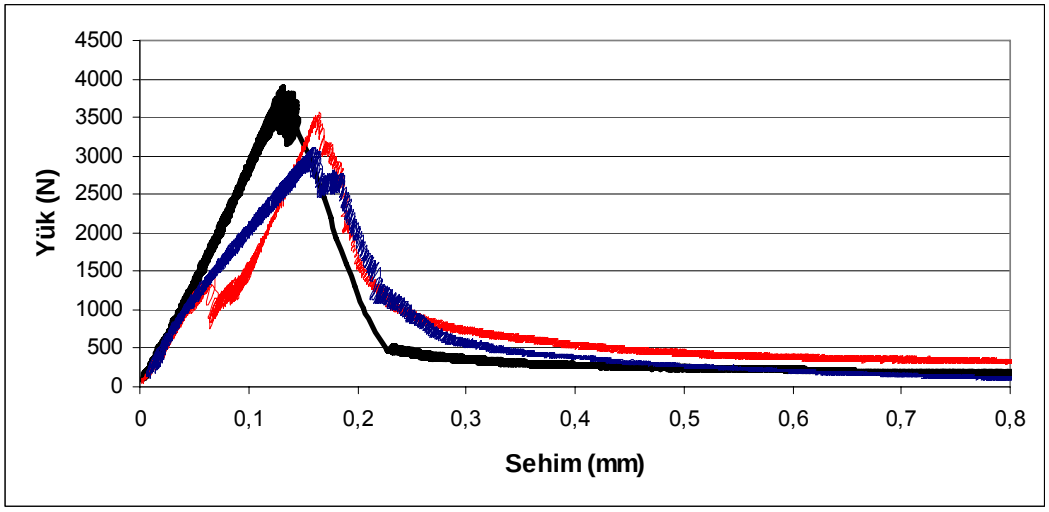
Ek B. Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar ve Grafikler

Tablo B-1 Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjisi değerleri

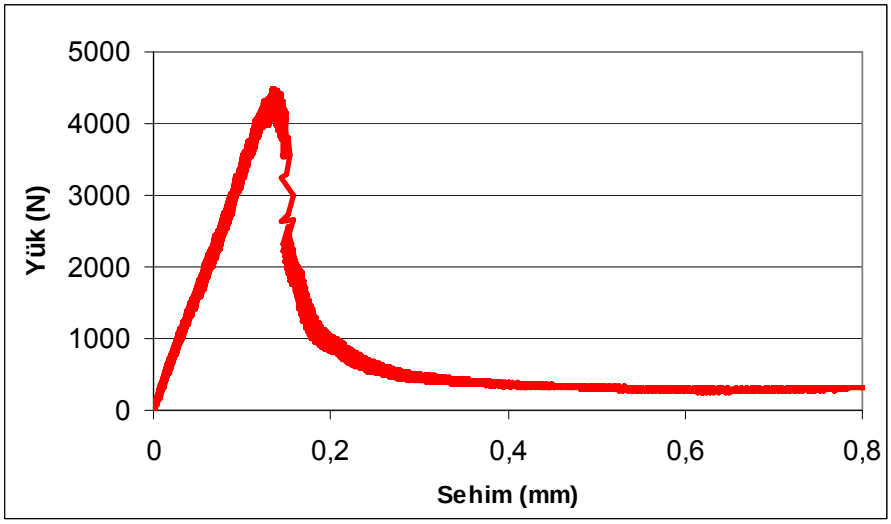
Numune	Kırılma Enerjileri (N/m)	Ortalamalar (N/m)
M0-2	128	135
M0-3	148	
M0-4	130	
M1-2	154	154
M2-1	10985	12770
M2-2	11143	
M2-3	14907	
M2-4	14045	
M3-2	20970	22715
M3-3	24677	
M3-4	22498	
M4-1	31943	30939
M4-2	33899	
M4-3	26977	

Tablo B-2 Prizma numunelerden elde eğilen eğilme dayanımı değerleri

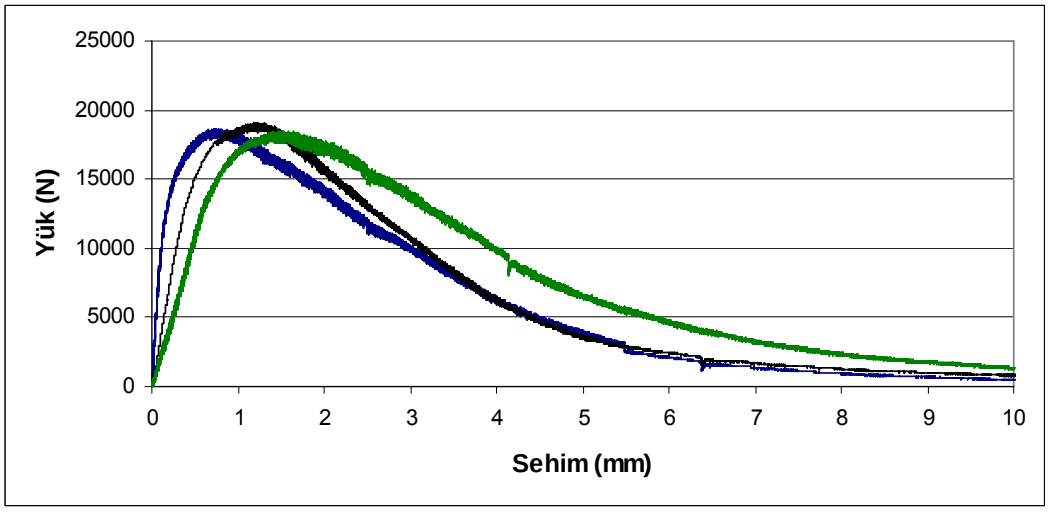
Numune	**Eğilme Dayanımları (Mpa)**	**Ortalamalar (Mpa)**
M0-2	7.05	6,33
M0-3	6.64	
M0-4	5.30	
M1-1	7.74	7,83
M1-2	7.26	
M1-4	8.46	
M2-1	30.23	31,13
M2-2	32.03	
M2-4	31.13	
M3-1	40.11	37,53
M3-2	38.08	
M3-3	35.01	
M3-4	36.93	
M4-1	60.56	58,58
M4-2	61.25	
M4-3	56.54	
M4-4	55.99	



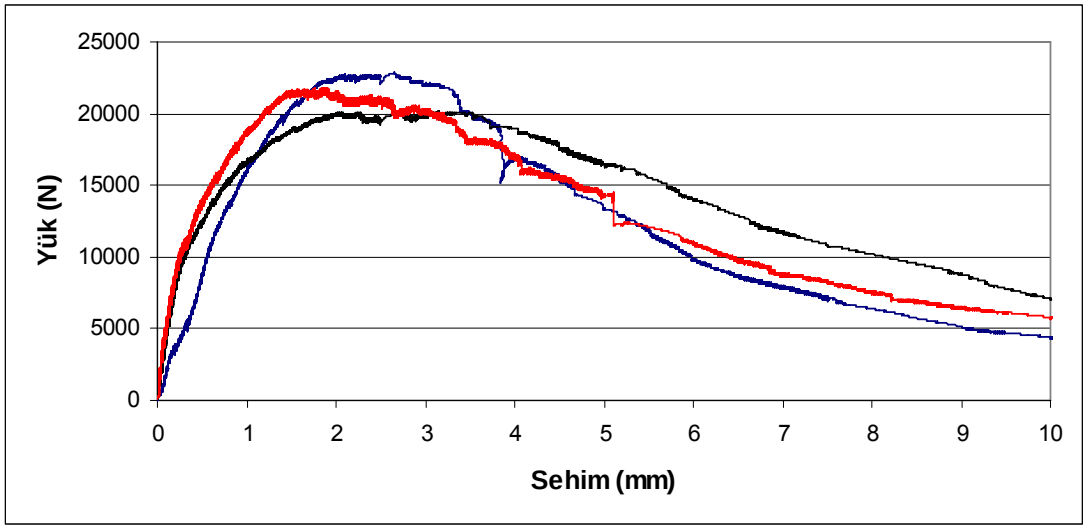
Şekil B.1 M0 numunelerine ait yük sehim grafikleri



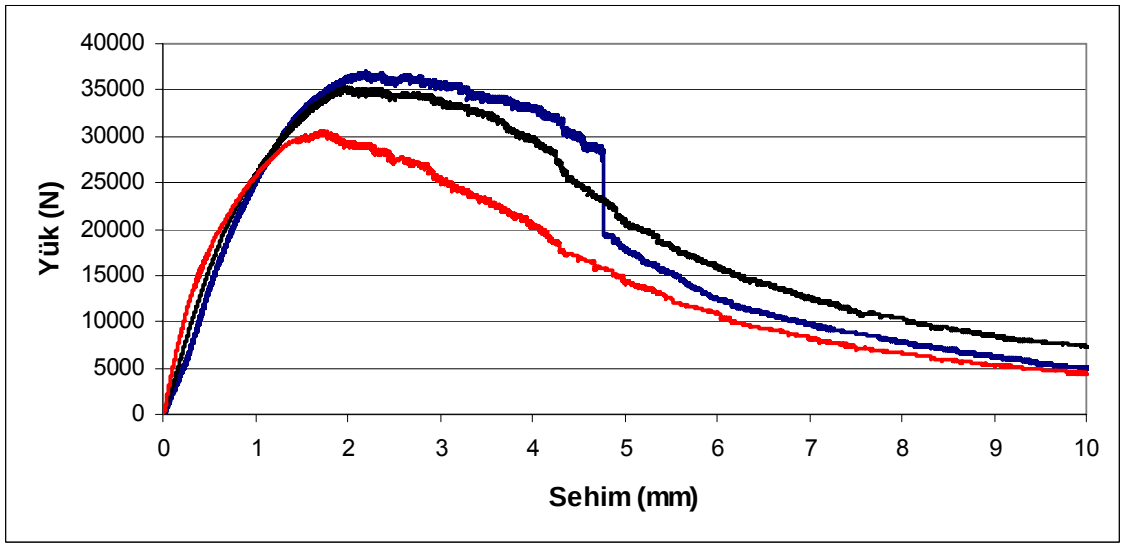
Şekil B.2 M1 numunelerine ait yük sehim grafikleri



Şekil B.3 M2 numunelerine ait yük sehim grafikleri



Şekil B.4 M3 numunelerine ait yük sehim grafikleri

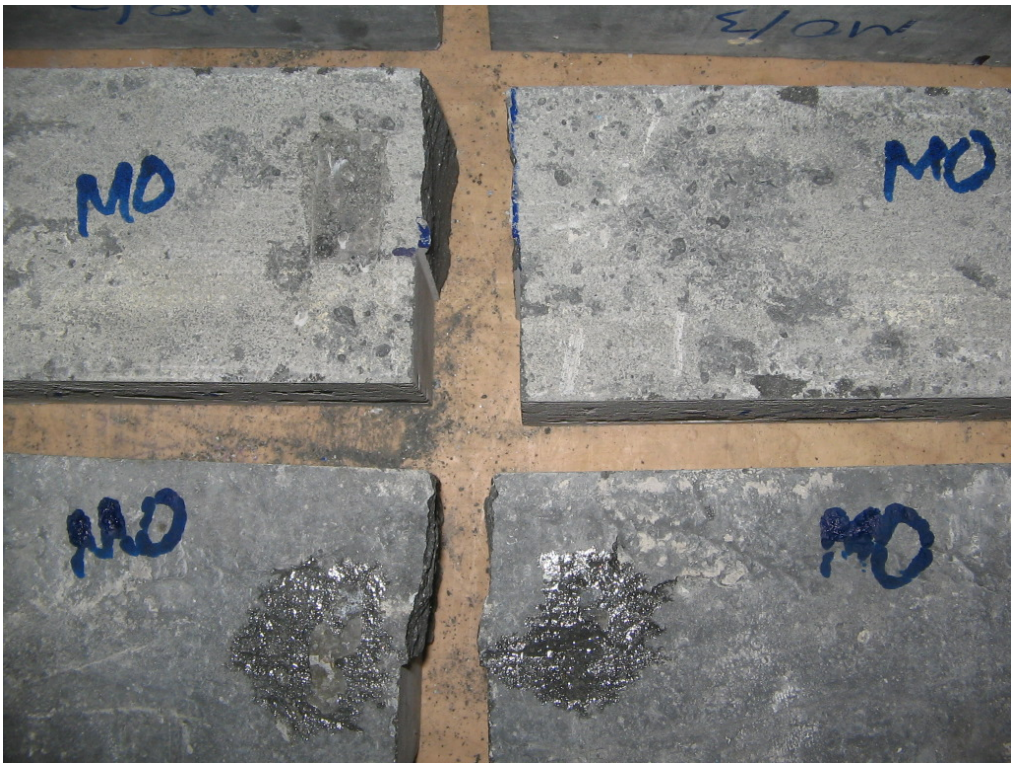


Şekil B.5 M4 numunelerine ait yük sehim grafikleri

Ek C. Deney Fotoğrafları



Şekil C.1 Eğilme deneyi sonrası M0 numuneleri (A)



Şekil C.2 Eğilme deneyi sonrası M0 numuneleri (B)



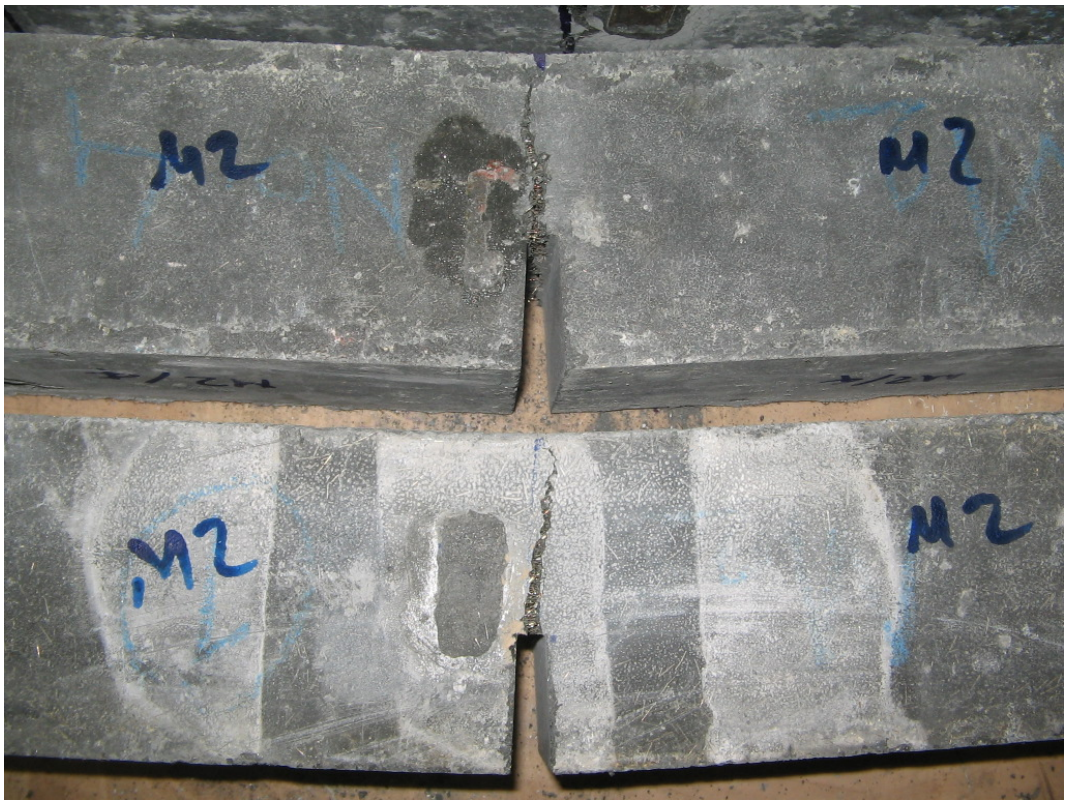
Şekil C.3 Eğilme deneyi sonrası M1 numuneleri (A)



Şekil C.4 Eğilme deneyi sonrası M1 numuneleri (B)



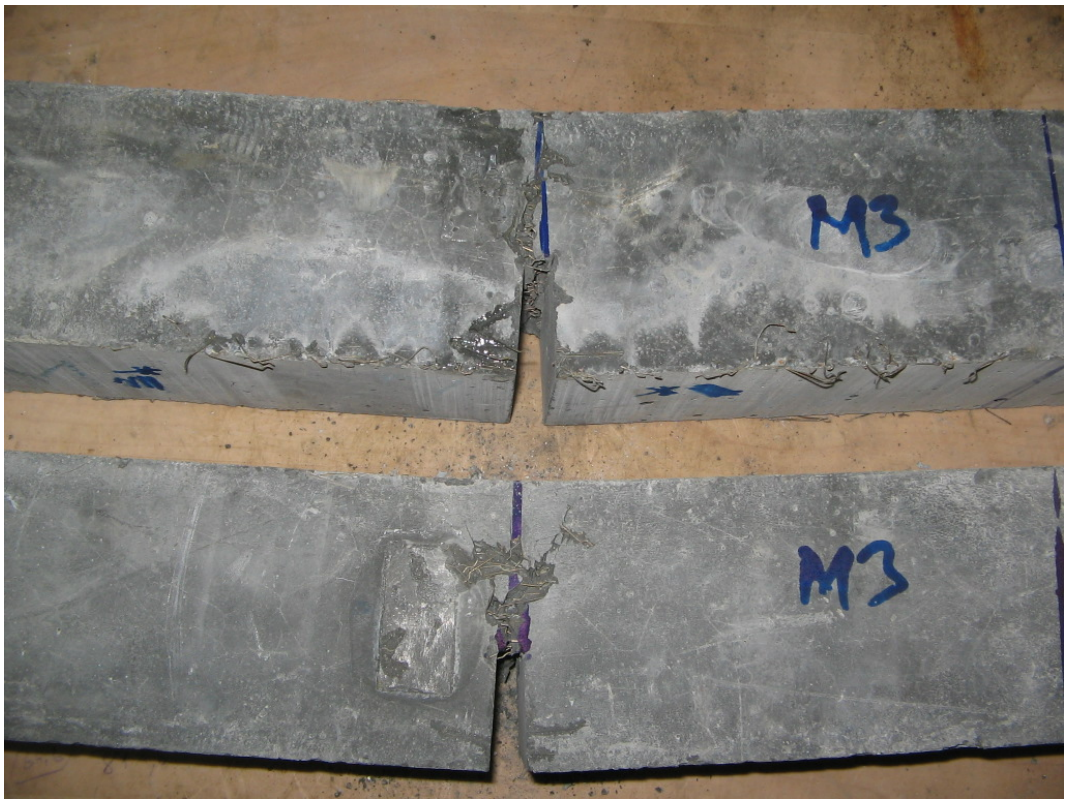
Şekil C.5 Eğilme deneyi sonrası M2 numuneleri (A)



Şekil C.6 Eğilme deneyi sonrası M2 numuneleri (B)



Şekil C.7 Eğilme deneyi sonrası M3 numuneleri (A)



Şekil C.8 Eğilme deneyi sonrası M3 numuneleri (B)



Şekil C.9 Eğilme deneyi sonrası M4 numuneleri



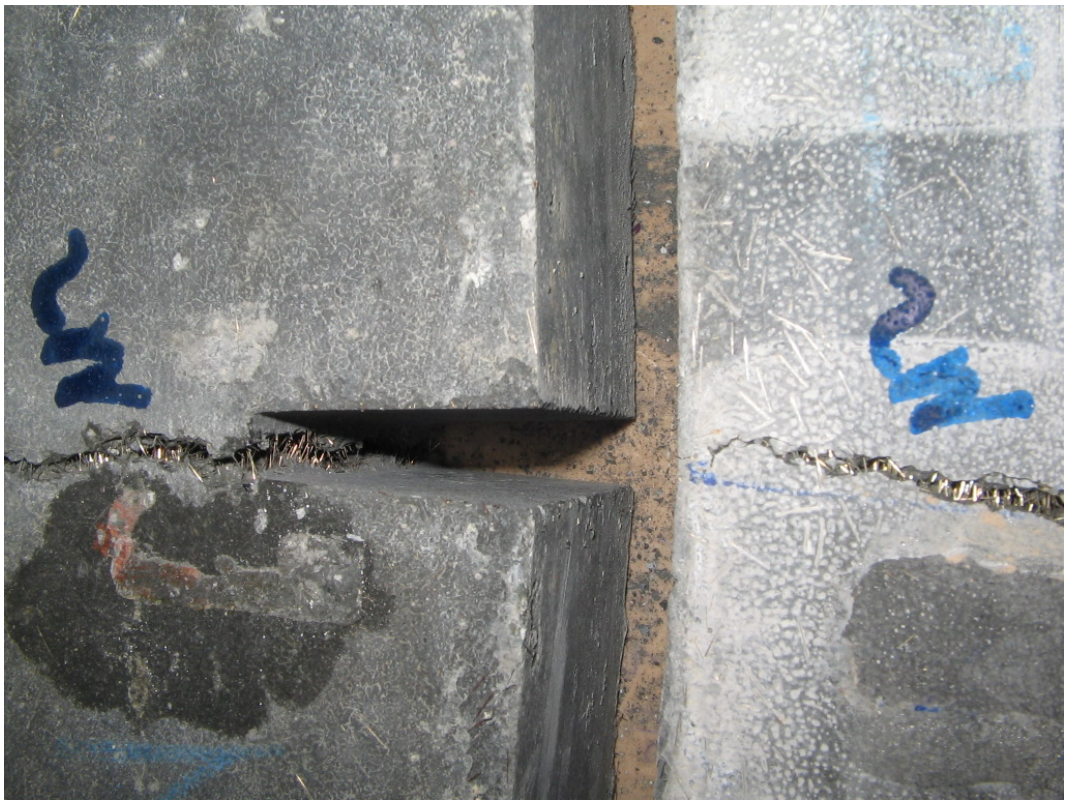
Şekil C.10 Eğilme deneyi sonrası M4 numuneleri



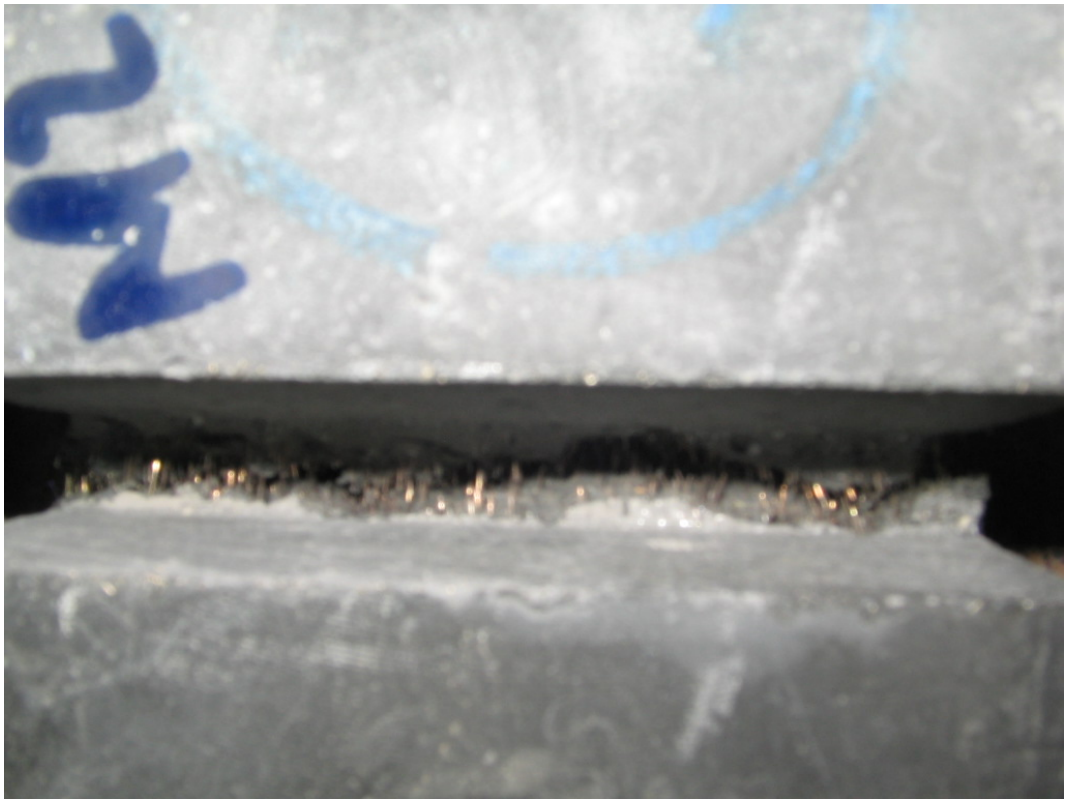
Şekil C.11 Eğilme deneyi sonrası M0 numunesi kesiti



Şekil C.12 Eğilme deneyi sonrası M1 numunesi kesiti



Şekil C.13 Eğilme deneyi sonrası M2 numunesi çatlak görüntüsü



Şekil C.14 Eğilme deneyi sonrası M2 numunesi çatlak detayı



Şekil C.15 Eğilme deneyi sonrası M3 numunesi çatlak görüntüsü



Şekil C.16 Eğilme deneyi sonrası M3 numunesi çatlak detayı



Şekil C.17 Eğilme deneyi sonrası M4 numunesi çatlak görüntüsü



Şekil C.18 Eğilme deneyi sonrası M4 numunesi çatlak detayı

ÖZGEÇMİŞ

Can Arda Kiremitçi, 1979 yılında İstanbul' da doğdu. Orta ve lise öğrenimini Kadıköy Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 1997 yılında Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 2005 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilimdalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2006 yılında İstanbul Metropoliten Planlama Merkezi Kentsel Tasarım Bölümünde çalıştıktan sonra Ocak 2007'de İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilimdalı'na araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmektedir.