İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA LİF İÇERİĞİNİN VE DAYANIMININ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. D.Sanem SARI

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Programı: YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA LİF İÇERİĞİNİN VE DAYANIMININ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Deniz Sanem SARI
(501061027)

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

Tez Danışmanı :	**Prof.Dr. M. Ali TAŞDEMİR**
Diğer Jüri Üyeleri	**Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA (İ.T.Ü.)**
	Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY (M.S.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yanımda olan sayın hocam Prof.Dr. Mehmet Ali Taşdemir'e, çalışmalarımda ilgi ve yardımları dolayısıyla sevgili hocalarım ve arkadaşlarım, Araş.Gör. Cengiz Şengül ve Araş.Gör. Arda Kiremitçi'ye , deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları için İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuarı çalışanları ile, çalışmalarım süresince her anımda yanımda olan ve gösterdikleri sevgi, destek ve üstün sabır için aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2008 D.Sanem SARI

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
ÖZET **viii**
SUMMARY **ix**

1.GİRİŞ **1**

2. ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER **3**
2.1. Normal Betonlar 3
2.2. Özel Betonlar 4
2.2.1. Yüksek dayanımlı betonlar 4
2.2.2. Çok yüksek dayanımlı betonlar 5
2.2.2.1 Büyük kusurlarından arınmış polimer hamurlar (MDF) 5
2.2.2.2 Ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP) 6
2.2.2.3 Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON) 7
2.2.2.4 Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemeler 7
2.2.2.5 Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler 8
2.2.2.6 Nemli sıkıştırılmış çimento (DCC) 9

3. ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR **10**
3.1. Çelik Tel Donatılı Betonların Tanımı ve Temel Kavramları 10
3.2. Çelik Tel Türleri 10
3.3. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları 12
3.4. Çelik Tellerin Betona Karıştırılması 15
3.5. Çelik Liflerin Beton Özelliklerine Etkisi 16
3.5.1. Lif miktarı, lif narinliği ve lif dağılımının etkisi 19
3.5.2. Lif matris aderansının etkisi 21
3.5.3. Lifin çekme gerilmesi 21
3.5.4. Çelik lif dayanımının etkisi 22
3.5.5. Çelik lif geometrisi 23
3.6. Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı 24

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **29**
4.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması 29
4.1.1. Çimento 29
4.1.2. Agregalar 30
4.1.3.Silis dumanı 31
4.1.4. Çelik lif 31
4.1.5. Kimyasal KatkıMaddesi 32
4.2 Beton Karışımları 32
4.3 Beton Üretiminde İzlenen Sıra 32
4.4 Numune Boyutları ve Şekilleri 32
4.5 Numune Kodlarının Belirlenmesi 33
4.6 Birim Ağırlık Deneyi 34
4.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri 34
4.7.1. Küp basınç deneyi 35
4.7.2. Silindir basınç deneyi 35
4.7.3. Yarmada çekme deneyi 35
4.7.4. RILEM kırılma enerjisi deneyleri 36
4.7.4.1. RILEM kırılma enerjisinin hesaplanması 37
4.7.4.2.RILEM kırılma enerjisinden net eğilme dayanımının hesaplanması 38

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ **39**
5.1. Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 39
5.2. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 40
5.3. Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 41
5.4. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 42
5.4.1 Kırılma enerjisinin değerlendirilmesi 42
5.4.2 Net eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi 43

6. GENEL SONUÇLAR **49**

KAYNAKLAR **51**

EKLER **54**

ÖZGEÇMİŞ **57**

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: MDF Çimentosu ve Normal Portland Çimentosu Hamurlarının Mekanik ve Kırılma Özellikleri.……...……...6

Tablo 3.1: Lif Türlerinin Geometrileri...…….……....23

Tablo 4.1. Çimento Laboratuar Analiz sonuçları.…….……....29

Tablo 4.2: Numune İçeriklerinde Bulunan Agregalara ait Elek Analizi.....……..30

Tablo 4.3: Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri.....…….……31

Tablo 4.4: Kullanılan Liflerin Teknik Özellikleri……...…..31

Tablo 4.5: Üretilen Karışımlarda Kullanılan Lif Türleri ve Oranları.....…….....34

Tablo 4.6: Taze Beton Bileşimi ve Özellikleri ……...……....34

Tablo 5.1: Sertleşmiş Beton Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar…...……...39

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Tek Eksenli Basınç Altında Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri.....4

Şekil 2.2: Topaklanmış Porland Çimentosu Parçacıkları 6

Şekil 2.3: Farklı Poroziteye Sahip Çimento Hamurları ve DCC'lerin Basınç Dayanımları.....9

Şekil 3.1.a: Düz Pürüzsüz Yüzeyli Tel.....11

Şekil 3.1.b: Üzerinde Girintiler ve Çıkıntılar Oluşturulmuş Tel.....11

Şekil 3.1.c: Uzunluğu Boyunca Dalgalı Teller.....11

Şekil 3.1.d: Ay Biçimi Teller.....11

Şekil 3.1.e: İki Ucu Kancalı Teller.....12

Şekil 3.1.f: Bir Ucu Kancalı Teller…..…..……....12

Şekil 3.2: Gevrek Matrisli Lif Donatılı Kompozitin Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi……..17

Şekil 3.3: Farklı Narinliğe Sahip Çelik Liflerle Donatılmış Betonların Özgül Kırılma Enerjisinin ,Tel İçeriği İle Değişimi……...20

Şekil 3.4: Farklı Tipteki Çelik Tellerle Üretilmiş Beton Kirişlerin Yük-Sehim Eğrileri……..…….....22

Şekil 3.5: Farklı Lif Boyutlarının Çatlak Köprüleme Etkisi.....25

Şekil 3.6: Hasarsız Eğilme Rijitliğindeki Artış- Çelik Tel İçeriği İlişkisi……..27

Şekil 4.1: Agrega Granülometri Eğrisi…….…….....30

Şekil 4.2: Numune Boyutları ve Şekilleri…….…….....33

Şekil 4.3: Küp Basınç Deney Düzeneği.....35

Şekil 4.4: Eğilme Deney Düzeneği.....36

Şekil 4.5: RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi.....37

Şekil 4.6: Yalın Beton ve ÇTDB için Örnek Yük-Sehim Eğrileri..……..…...38

Şekil 5.1: Farklı Miktarda ve Dayanımda Çelik Tel Donatı İçeren Numunelerin Küp Basınç Dayanımlarının Ortalama Değerleri…….……39

Şekil 5.2: Farklı Miktarda ve Dayanımda Çelik Tel Donatı İçeren Numunelerin Silindir Basınç Dayanımlarının Ortalama Değerleri…….……40

Şekil 5.3: Farklı Miktarda ve Dayanımda Çelik Tel Donatı İçeren Numunelere Ait Ortalama Elastisite Modülü Değerleri.....41

Şekil 5.4: Farklı Miktarda ve Dayanımda Lif İçeren Numunelere Ait Ortalama Yarma Çekme Dayanımı Diyagramı…..……...41

Şekil 5.5: Farklı Miktarda ve Dayanımda Lif İçeren Numunelere Ait Ortalama Kırılma Enerjisi Diyagramı……..…….43

Şekil 5.6: Farklı Miktarda ve Dayanımda Lif İçeren Numunelere Ait Net Eğilme Dayanımı Diyagramı……..……...44

Şekil 5.7: Çelik Tel İçermeyen Normal ve Yüksek Dayanımlı Yalın Betonların Yük-Sehim Eğrileri…….....45

Şekil 5.8: V57N-C25 ve V39Y-C80 Betonlarına Ait Yük – Sehim Eğrisi ..…….45

Şekil 5.9: Beton Sınıfı 25 Olan Yalın ve Çelik Tel Donatılı Betonların Yük-Sehim Eğrisi..……...46

Şekil 5.10: Beton Sınıfı 80 Olan Yalın ve Çelik Tel Donatılı Betonların Yük-Sehim Eğrisi ……..…….47

Şekil 5.11: Tüm Çelik Tel Donatılı Betonlara ait Tipik Yük-Sehim Eğrileri..……..…….47

Şekil A.1: V0-C25 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi…….. …….55

Şekil A.2: V39Y-C25 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi…….55

Şekil A.3: V57N-C25 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi…….56

Şekil A.4: V0-C80 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi…….…….56

Şekil A.5: V39Y-C80 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi…….57

Şekil A.6: V57N-C80 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi…….57

NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞINA LİF İÇERİĞİNİN VE DAYANIMININ ETKİSİ

ÖZET

Son yıllarda gelişen beton teknolojisi ile birlikte yüksek performansın anlamı belirlenen ihtiyaçlara cevap verebilmek için beton bileşiminin düzenlenmesi şekline dönüşmüştür. Bu yaklaşımla belirli bir basınç dayanımının elde edilmesi, kendiliğinden yerleşebilme ve işlenebilirlik, çelik lifler ile optimum donatılandırmanın sağlanması gibi kavramlar başlı başına bir amaç olarak ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, karma lif içeren normal ve yüksek dayanımlı betonlarda lif içeriğinin ve dayanımının yük-sehim eğrisine etkisi incelendi. Su/bağlayıcı oranı 0,75 ve 0,29 olan iki seri karışım üretildi. Bu karışımlardan iki tanesi yalın beton (C25 ve C80) olup, diğerleri ise karma ve tek tip çelik tel içeren donatılı betonlardır. Çelik tellerin sertleşmiş çelik tel donatılı betonların (ÇTDB) basınç dayanımı, elastisite modülü, yarma çekme dayanımı, net eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerine etkisi incelendi. Her beton sınıfı için, elastisite modülü ve basınç dayanımlarında çelik tel içeriğinin önemli bir etkisinin olmadığı görüldü. Buna karşın, çelik tel donatılı betonlarda çelik tel içeriği yarmada çekme dayanımı ve özellikle net eğilme dayanımını etkilemektedir. Yüksek dayanımlı betonda 39 kg/m^3 yüksek dayanımlı çelik lif içeren betonun kırılma enerjisi, 57 kg/m^3 normal dayanımlı çelik tel içeren normal betonun kırılma enerjisinden daha yüksektir. Çelik tel donatılı yüksek dayanımlı betonlar veya daha yüksek çelik tel içerikli normal dayanımlı betonlarda, ilk çatlaktan sonra deformasyon arttıkça tepe noktası öncesinde belirgin şekil değiştirme sertleşmesi oluşmakta diğer bir deyişle yüksek performanslı kompozit davranışı sergilenmektedir. Normal dayanımlı ÇTDB'larda kırılma enerjisi yalın betonun kırılma enerjisinin 38 katına, yüksek dayanımlı betonda ise çelik tellere bağlı olarak bu oran 83 kata kadar yükseldi.

EFFECTS OF FIBER CONTENTS AND STRENGTH ON MECHANICAL BEHAVIOUR OF NORMAL AND HIGH STRENGTH CONCRETES

SUMMARY

The meaning of high performance has changed to adjusting the mix design of concrete according to the demands accompanying the improving concrete technology. Parallel to this approach, the concepts like self-compaction, workability, determination of optimum reinforcement and attainment of a specified compressive strength have turned into a main objective.

In this research, effects of strength and contents of steel fibers on the load versus deflection at midspan curves of normal and high strength concrete beams with hybrid fibers were investigated. Two series of concrete with water/binder ratios of 0,75 an 0,29 were produced. Two of them were plain concretes, (C25 and C80) others SFRCs with hybrid steel fibers and single steel fiber. Effects of fibers on the mechanical properties of hardened concrete, such as compressive strength, modulus of elasticity, splitting tensile strength, net bending strength and fracture energy were also investigated. For each concrete class, it is shown that there is no significant effect of fiber volume fraction on the compressive strength on the modulus of elasticity. However, there is an effect of the steel fiber content on splitting tensile and especially net bending strengths of SFRCs. Fracture energy of high strength concrete with 39 kg/m^3 high strength steel fiber is higher than that of normal strength concrete with 57 kg/m^3 normal strength steel fiber. In high strength concretes with steel fibers or normal strength concretes with higher steel fiber content, the typical strain hardening in the ascending branch of the load-deflection curve is an indication of high performance cementitious composites. Fracture energy of high strength SFRCs increased up to 83 times compared to that of normal strength conrete, while in normal concretes with steel fibers, this increase in fracture energy due to steel fibers was 38 times compared to the plain concrete.

1.GİRİŞ

Betonarme yapılar gün geçtikçe gelişmektedir. Bu gelişmeye bağlı olarak betonun kalitesi ve istenilen niteliklerde artmaktadır. Son yıllarda üretilen betonlar, yüksek dayanımla birlikte üstün durabiliteye sahiptir. Ancak, bunlar normal betona göre daha gevrek davranış gösterirler ve bu yüzden tokluğu artırmak için çelik lifler eklenebilir.Böyle malzemelerle binaların güçlendirilmesine yönelik laboratuar deneylerinde başarı sağlanmakta ve depremle ilgili potansiyel kullanımlarının araştırılması gerekmektedir. Son yıllarda betonlarda inanılması güç gelişmeler kaydedildi. Sadece 30 yıl önce betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa idi. Böyle bir beton küp basınç dayanımları 200-800 MPa arasında , çekme dayanımları 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m^2 olan yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, şu anda gerçekten oldukça düşük malzeme olarak kabul edilir (Taşdemir ve diğ. ,2004).

Son teknoloji ürünü olan reaktif pudra betonları, ultra yüksek dayanımlı-performanslı çimento esaslı kompozit malzemeler olarak nitelendirilmektedir. Reaktif pudra betonlarının üretiminde boşluksuz ve homojen bir yapı elde etmek için iri agrega kullanılmamakta, ince malzemelerin tane çapı dağılımları optimize edilmektedir. Sıcak kür işlemleri ve hidratasyon sırasında ve öncesinde uygulanan basınç ile çok yüksek dayanımlı betonlar elde edilmektedir. Reaktif pudra betonu; hamur fazı yoğun, yüksek miktarda silis dumanı ve düşük miktarda su içeren harç olarak nitelendirilebilir (Bonneau ve diğ., 1997).

Yüksek dayanımlı beton, yüksek kalitede agrega, çimento ve silis dumanı kullanılarak üretilen, su/çimento oranı büyük oranda düşürülerek süperakışkanlaştırıcı katkı ile yüksek işlenebilirlik ve pompalanabilirlik ile elde edilebilen özel bir beton türüdür (Kocataşkın, 1991).

Gevrek bir malzeme olan geleneksel betonlar, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı ve tepe yükü sonrası taşıma kapasiteleri bakımından zayıf özeliklere sahiptirler. Çelik teller gevrek olan betonun çekme şekil değiştirmesini artırarak

betona yarı-sünek davranış özeliği kazandırır. Bundan dolayı betonun çatlama dayanımı ve tokluk özeliklerinde iyileşme görülür. Çelik tellerin betona katılmasındaki amaç, çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento hamuru matrisi tarafından taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktır. Genel olarak, Çelik Tel Donatılı Betonların (ÇTDB) davranışında ; eğilme dayanımı ile tokluğun önemi büyüktür. Çelik telin narinliği ve kullanılan tel miktarı ÇTDB'ların özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerdir (Köksal, 2004).

ÇTDB'ların kaplama, koruma, endüstriyel zeminler, prefabrike elemanlar, kıyı ve liman yapıları, güçlendirme projeleri, tünel kaplamaları, şev stabilizasyon işleri gibi oldukça geniş kullanım alanları vardır (Balaguru ve Shah, 1992). Özellikle, ÇTDB'ların ana uygulama alanları, tünel kaplamaları ve değişik tipteki döşeme plaklarıdır (TFHRC, 2000). Küçük endüstriyel zeminler genellikle darbe ve diğer mekanik yüklerin etkisindedir. Ancak, büyük endüstriyel zeminler ve havaalanı pistleri gibi büyük saha betonları mekanik yükler yanında rötre ve termal çatlaklara karşı dayanıklı olmak zorundadır (Gettu ve diğ, 2000).

Bu çalışmanın amacı, geleneksel çelik tel donatılı betonlarda lif dayanımının ve içeriğinin normal ve yüksek dayanımlı betonun mekanik davranışına olan etkilerini incelemektir. Bunun için, çalışmada üç farklı boya fakat aynı narinliğe sahip kancalı uçlu çelik tellerin farklı içerikte kullanılmalarıyla C25 ve C80 sınıflarındaki betonların mekanik özelliklerine ve kırılma enerjilerine etkileri değerlendirilmektedir.

2.ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER

Beton, kum, çakıl, çimento ve su karışımından oluşur. Bileşiminden anlaşılacağı gibi beton seramik türü malzeme sayılır ve yapılarda büyük ölçüde kullanılır. Değişik büyüklükte kum, çakıl ve kırma taştan oluşan agrega iskeleti hidrolik çimento hamuru yardımı ile birbirlerine bağlanarak sağlam ve dayanıklı bir kütleye dönüşür. Bu kütlede bağlayıcı madde olarak kullanılan çimento su ile karıştırılınca işlenebilir plastik bi kıvam alır. Su ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanır. Agrega, çimento ve su karıştırılıp kalıp içine yerleştirilir ve karışım zamanla sertleşir. Uygulamada betonda en çok kullanılan bağlayıcı madde mineral esaslı çimentodur (Onaran , 2006).

2.1.Normal Betonlar

Normal betonlar, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Normal betonların, malzemesine kolay ulaşılabilmesi, özel nitelikler gerektirmeyen ve kolay elde edilebilen işgücü ile ekonomik ve standartlara göre seri üretim yapılabilmesi avantajlarındandır.

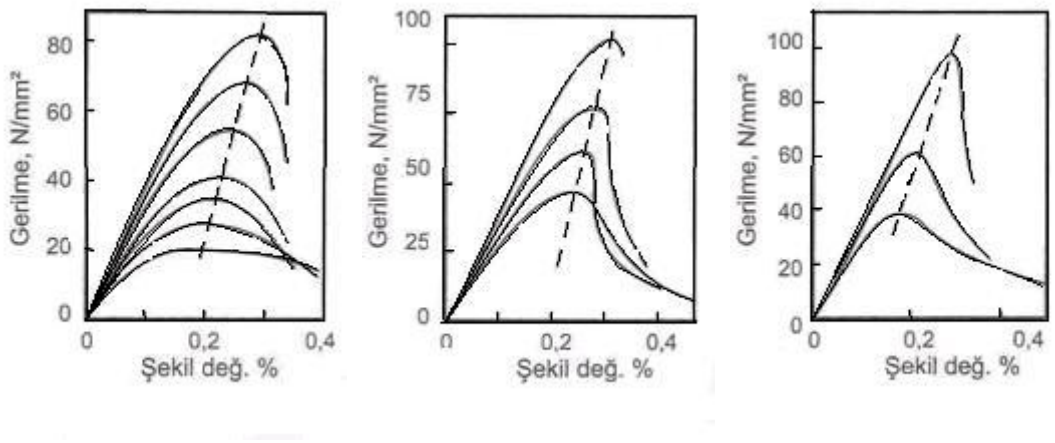
Normal betonlar, basınç dayanımları 20MPa-60MPa, kırılma enerjileri 100 J/m^2-120 J/m^2 civarında olan, agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilen ekonomik malzemelerdir (Taşdemir ve Bayramov, 2002). Normal betonların kırılma enerjileri, ultra yüksek dayanımlı betonların %0,3'ü, basınç dayanımları ise % 8'i civarındadır. Bu nedenle çok özel yapılarda normal betonlar yerini ultra yüksek dayanımlı betonlara bırakmaktadır. Normal betonlar bina, yol, sanat yapıları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İlerleyen beton teknolojisine rağmen normal betonlar günümüzde en çok kullanılan beton türüdür (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

2.2.Özel Betonlar

Özel betonlar, normal betonların iyileştirilerek daha kaliteli hale getirilmesi sonucu oluşmuş olan betonlardır. Bunlara yüksek dayanımlı betonlar, mineral katkılı betonlar, geciktiricili veya hızlandırıcılı betonlar, kendiliğinden yerleşen beton ve harçlar, hafif beton, polipropilen ve çelik tel takviyeli betonlar, püskürtme beton örnek olarak verilebilir.

2.2.1. Yüksek dayanımlı betonlar (YDB)

Yüksek dayanımlı beton, yüksek kalitede agrega ve çimento ile silis dumanı kullanılarak üretilen, su/çimento oranı 0,20 mertebelerine hatta altına düşürülerek yüksek işlenebilirlik ve pompalanabilirlik elde edilebilen özel bir beton türüdür. Yüksek dayanımlı betonlarda basınç dayanımı yaklaşık olarak 100 N/mm^2 mertebelerine kadar çıkabilmektedir. (Kocataşkın, 1991).



Şekil 2.1. Tek Eksenli Basınç Altında Gerilme Şekil Değiştirme Eğrileri (Taşdemir ve diğ, 2004).

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi yüksek dayanıma sahip betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi tepe noktasına kadar hemen hemen lineerdir. Yüksek dayanımlı betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Şekil 2.1 aynı zamanda elastisite modülündeki bağıl artışın basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğunu da göstermektedir. Yüksek dayanımlı betonlar için en yüksek gerilmeye kadar yutulan bağıl enerji daha düşük dayanımlı betonlarınkinden düşük, buna karşın en büyük gerilmedeki şekil değiştirme yüksektir (Taşdemir ve diğ. 2004).

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

2.2.2. Çok yüksek dayanımlı betonlar (ÇYDB)

1930’ larda Eugéne Freyssinet yerleştirme sırasında betona basınç uygulanmasının beton dayanımını arttıracağını belirtmiştir. 1960’ larda ise beton ve harç numuneleri üzerine doygun atmosfer koşullarında sıcak kür ve basınç uygulanmıştır (Richard ve Cheyrezy, 1995). Uzun süren çalışmalar sonucunda, yüksek dayanımlı ileri çimento esaslı malzemeler elde edilmiştir. Bu kompozitlerden bazıları; yoğunlaştırılmış çimento ve ultra ince tane esaslı malzemeler, büyük kusurlarından arındırılmış polimer hamurlar, çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı betonlar, karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler, ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemeler’ dir.

2.2.2.1. Büyük kusurlarından arındırılmış polimer hamurlar (MDF)

MDF çimentolu malzemeler Portland veya yüksek alüminli çimentoların yüksek moleküler kütleli suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Burada polimerin görevi düşük su/katı oranında karışımın viskozitesini arttırmak, çimento tanelerinin topaklanmasını önlemektir (Taşdemir ve diğ.,2004).

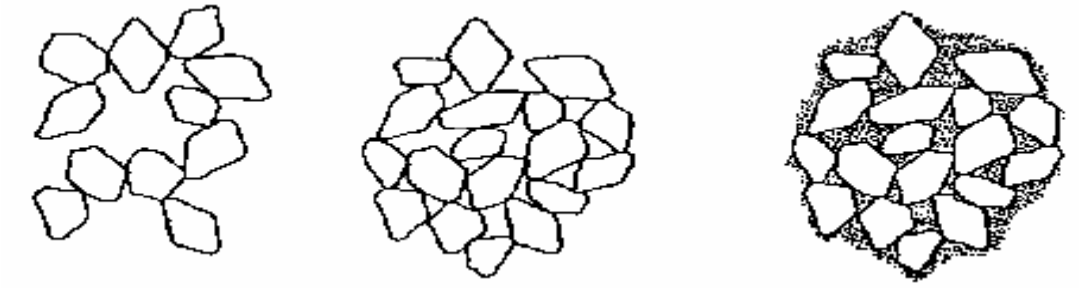
Tablo 2.1: MDF Çimentosu ve Normal Portland Çimentosu Hamurlarının Mekanik ve Kırılma Özelikleri (Taşdemir ve diğ.,2004).

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

Tablo 2.1' de görüldüğü gibi MDF çimentosunun kırılma enerjisi basınç ve eğilme dayanımları çok yüksektir.

2.2.2.2. Ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP)

Çimentolu malzemelerin bu yeni sınıfı Danimarka' daki Aalborg Portland çimento fabrikası tarafından üretilmiştir. Şekil 2.2' de gösterildiği gibi DSP bağlayıcılar çimento taneleri arasında kalan boşluklarda homojen olarak dağıtılan ultra incelikteki silis dumanını içerirler (Taşdemir ve Bayramov, 2002).



a) b) c)

Şekil 2.2 Topaklanmış Portland Çimentosu Parçacıkları (a) , sadece süperakışkanlaştırıcı katlılarla dağıtılabilir (b) DSP hamurundaki silis dumanının boşlukları doldurmasıyla elde edilen yoğun bir diziliş (c) (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Mümkün olan en yoğun dizilişi elde etmek için, karıştırma ve döküm sırasında çimento ve silis dumanının topaklanmasını önlemek için süperakışkanlaştırıcılar kullanılır. Bu DSP esaslı kompozitler "Densit" adı altında söz konusu firma tarafından uygulayıcılara sunulmaktadır. 16 mm'lik kırılmış granit agregasına sahip normal DSP'nin basınç dayanımı yaklaşık 130 MPa' dır. Eğer kalsine olmuş boksit gibi dayanımı yüksek agregalar kullanılırsa basınç dayanımı 270 MPa' a kadar

ulaşabilir. DSP esaslı malzemeler çok gevrek olup normal Portland çimentosu hamurundan daha gevrektir (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

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

Çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı beton (SIFCON), çok yüksek dayanımlı betonların özel bir çeşidi olup, kullanılan lif hacmi %20'ye kadar ulaşmaktadır. Lif oranının yüksek olması yerleştirme problemlerine neden olacağından, SIFCON'un üretiminde özel bir teknik geliştirilmiştir. SIFCON, çelik liflerin hazırlanan kalıba yerleştirilmesinden sonra, akıcı harç bulamacının liflerin içine enjekte edilmesi ile üretilir. Kullanılan lif hacmi; lif narinlik oranına, lif geometrisine, yerleştirme tekniğine bağlı olarak değişir. SIFCON matrisi bileşimini; çimento-uçucu kül, çimento-silis dumanı, çimento-kum-uçucu kül veya çimento–kum-silis dumanı oluşturmaktadır, iri taneli agrega bileşimde kullanılmaz. Karışımlarda bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılacaksa çimento miktarının %20'si kadar, silis dumanı kullanılacaksa çimento miktarının %10'u kadar katılmaları önerilmektedir. SIFCON' un üretiminde lifin harç içerisinde yönlenme doğrultusu büyük önem taşır. SIFCON köprülerin ve kaldırımların onarılmasında, patlayıcı malzeme saklanan, yangına karşı koruma gerektiren yerlerin inşaasında, prekast ürünlerde kullanılmaktadır (Balaguru ve Shah, 1992).

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

Reaktif pudra betonları 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 40000J/m^2 kırılma enerjisine ulaşılmıştır (Richard,1995).

Bu özeliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir.

i) Bütün tanelerin dağılımının yoğun bir matris elde etmek için optimum biçimde ayarlanması,

ii) Agrega tanelerinin en büyük boyutunu azaltarak betonun homojenliğinin sağlanması,

iii) Betondaki su miktarının azaltılması,

iv) Çok ince bir malzeme olan silis dumanının puzolanik özeliğinden yararlanılması,

v) Beton bileşenlerinin optimum bileşimi,

vi) Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,

vii) Sıkıştırma ve yüksek sıcaklıkta ısıl kür uygulanması (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

İri agrega ve matris arasındaki geçiş bölgesi mikro çatlakların kaynağını oluşturur. Bu durum, hamur ile agreganın mekanik ve fiziksel özeliklerinin farklı olması ile ortaya çıkar. Dolayısıyla yüksek performans/dayanım elde etmek için beton homojenliği büyük önem taşır (Ma ve Schneider, 2002).

Homojen bir yapıya sahip RPB' de bu özeliğe aşağıdaki etmenler sayesinde erişilmektedir.

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

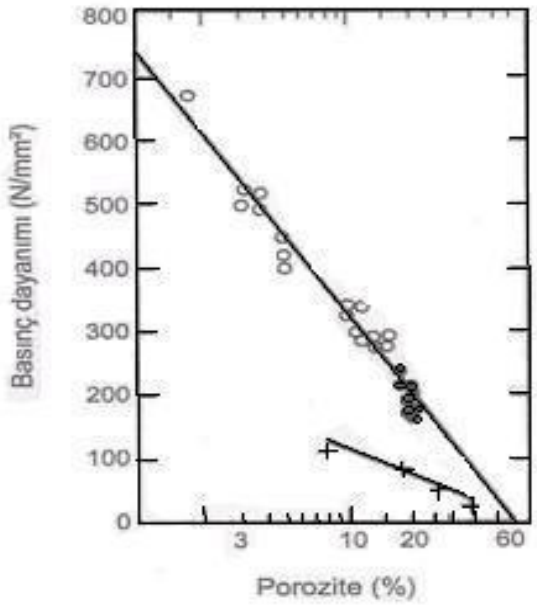
RPB' de en büyük agrega boyutunun yaklaşık 50 kat azaltılması, dış yüklerden oluşan mekanik çatlakların, otojen rötre sonucu oluşan kimyasal çatlakların, ısıl işlem sonucu çimento hamuru ile agregaların genleşme farkından kaynaklanan termo-mekanik çatlakların boyutlarında büyük bir azalma oluşturur (Richard,1995).

2.2.2.5. Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler

Karma lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemeler betonda farklı tip ve boyutta lif kullanılması ile üretilir ve burada amaç çatlakların mikro düzeyden itibaren kontrol edilmesidir. Mikro, mezo ve makro düzeyde çelik teller kullanılarak mikro, mezo ve makro düzeydeki çatlaklar kontrol altına alınmaktadır. Mikro lifler mikro çatlakların, makro lifler makro çatlakların oluşumunu ve gelişimini kontrol eder. Mikro lifler, çatlakları makro düzeye gelmeden durdurarak, elastik bölgedeki davranışı iyileştirir. Makro lifler ise, makro düzeydeki çatlakları kontrol ederek, maksimum yük sonrası davranışı iyileştirirler. Dolayısı ile malzemenin çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve sünekliği artar (Taşdemir ve diğ.,2006).

2.2.2.6 Nemli sıkıştırılmış çimento (DCC)

0,05-0,10 arasında su-çimento oranına sahip nemli çimento yüksek basınç altında sıkıştırılıp uygun biçimde kür uygulandığında , çok düşük poroziteye ve çok yüksek dayanıma sahip bir DCC elde etmek mümkündür. Çok düşük su-çimento oranları (0,05-0,10) , yüksek basınçlı kür ile 250 ºC' lik yüksek sıcaklıkta %2' den daha az bir porozite ve 665 MPa' lık bir basınç dayanımı vermektedir.



Şekil 2.3 Farklı Poroziteye Sahip Çimento Hamurları ve DCC'lerin Basınç Dayanımları (Taşdemir ve diğ.,2004)

Şekil 2.3' de donatısız DCC' nin basınç dayanımının 700 MPa' a yaklaştığını göstermektedir. Hidrate olmamış çimento tanecikleri DCC içinde bir mikro agrega işlevi görmektedir. Bu laboratuar bulgularının mühendislik pratiğine doğrudan transfer edilmesi mümkün görünmemektedir; çünkü bu aşamadaki teknoloji tüm uygulamalar için geçerli değildir (Taşdemir ve diğ., 2004).

3.ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR

3.1 Çelik Tel Donatılı Betonların Tanımı ve Temel Kavramları

Çelik tel donatılı beton, agrega, çimento ve su gibi temel beton bileşenlerine, mineral ve/veya kimyasal katkıların yanı sıra çelik tel katılmasıyla elde edilen bir kompozit malzemedir. Çelik teller yalın betonların ve betonarme elemanların performanslarının iyileştirilmesi için kullanılır. Bilindiği gibi geleneksel betonlar gevrek malzemelerdir ve sünek olmayan bir davranış gösterirler. Çekme gerilmesi altında donatısız betonlar çatlar. 1800' li yılların başında bu sorun çekme yükünü alacak donatı çubuklarının kullanılmasıyla aşılmıştır.

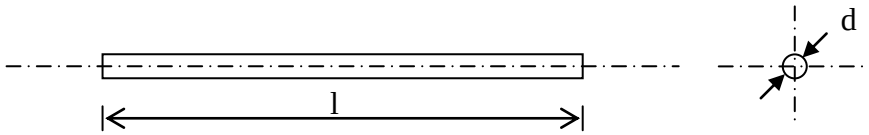
Gevrek bir malzeme olan geleneksel betonlar, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı ve çatlak dayanımı sonrası yük taşıma kapasiteleri bakımından zayıf özeliklere sahiptirler. Çelik tellerin betona katılmasıyla betonların bu özeliklerinde belirgin iyileştirmeler elde edilmiştir. Çelik teller gevrek olan betonun çekme şekil değiştirmesini artırarak betona yarı-sünek davranış özeliği kazandırır. Bundan dolayı betonun çatlama dayanımı ve tokluk özelikleri iyileşme gösterir.

Çelik tellerin betona katılmasındaki amaç, çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktır. Genel olarak ÇTDB' ların davranışını şu iki özelik belirler; eğilme dayanımı ve eğilmedeki tokluğu. Çelik telin narinliği ve kullanılan tel miktarı ÇTDB' ların özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerdir (Köksal,2004).

3.2 Çelik Tel Türleri

Çelik Teller şekillerine göre üç sınıfa ayrılır:

Sınıf A: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller



Şekil 3.1a Düz Pürüzsüz Yüzeyli Tel

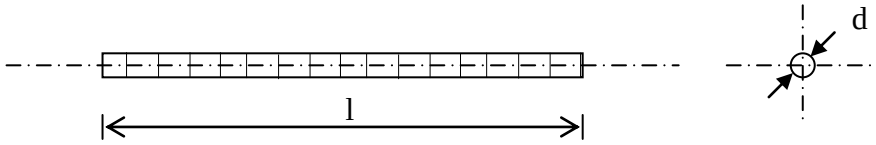
Sınıf B: Bütün uzunluğunca deforme olmuş teller

Uzunluğu boyunca deforme olma şekline göre üç tipe ayrılır.

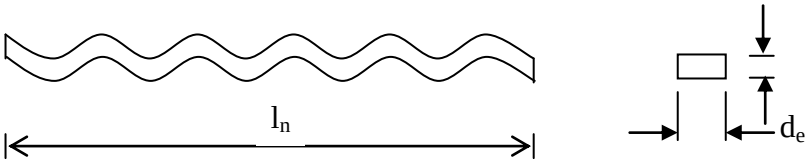
a) Üzerinde girintiler ve çıkıntılar oluşturulmuş tel

b) Uzunluğu boyunca dalgalı teller

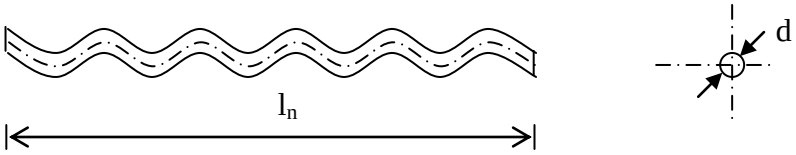
c) Ay biçimi teller



Şekil 3.1.b. Üzerinde Girintiler ve Çıkıntılar Oluşturulmuş Tel



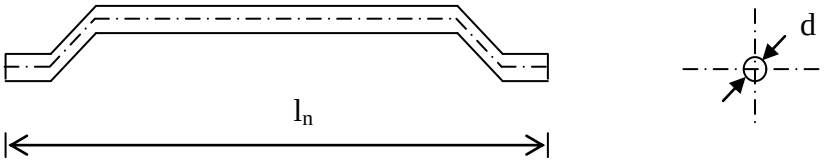
Şekil 3.1.c Uzunluğu Boyunca Dalgalı Teller



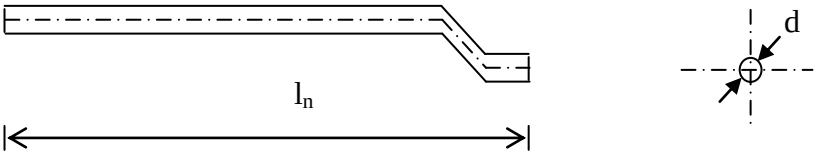
Şekil 3.1.d Ay Biçimi Teller

Sınıf C: Sonu Kancalı Teller

Sonlarındaki kancalara göre iki tipe ayrılır.



Şekil 3.1.e İki Ucu Kancalı Teller



Şekil 3.1.f Bir Ucu Kancalı Tel

3.3. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Çelik tel içeren betonlar normal betonlara oranla sağladıkları belirgin üstünlüklerinden dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Bu kullanım alanları 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.

b) Yol kaplamaları; 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. Buna 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., 2004).

- Yüksek sünekliği sahip olması,
- Kaplama kenar ve köşelerin kırılmaya karşı dirençlerinin iyileştirilmesi,
- Betonun rötresinde azalma,
- Geleneksel donatı yerleştirilmesindeki hataların ortadan kalkması,
- Geleneksel beton yollara kıyasla yapım süresinin kısa olması,
- Bütün doğrultularda daha yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesi,
- 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 bakımda, açık kanal kaplamalarında, toprak dolgu barajların geçirimliliğinin 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 yüklemeler karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, ambar ve hangar zeminlerinde, iskele ve rıhtım kaplamaları gibi kullanım alanları bulunmaktadır (ACIFC, 1999).

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 stratejikyapılar; 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) Kabuk yapılar ; kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkan verdiğinden ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır (Arslan ve Aydın, 1999).

h) Güvenlik Yapılarında; sığınaklar, sığınak kapıları ve güvenlik odalarının yapımında kullanılmaktadır (Köksal, 2004).

3.4. Çelik Tellerin Betona Karıştırılması

Çelik teller betona ilave edilmeden önce betondan şu standartların sağlanmış olması beklenir, çimento miktarı en az 320 kg/m^3 olmalı, kum (0mm-4mm) miktarı toplam agrega kütlesinin %40- %45' i olmalı (750 kg/m^3 – 850 kg/m^3) , en büyük dane büyüklüğü doğal agrega için 28 mm kırma taş için 32 mm olmalı, 14 mm' den büyük agrega oranı %15- %20 ile sınırlandırılmalıdır. Su/çimento oranı en çok 0,55 olmalıdır. Betona işlerlik sağlaması amacı ile akışkanlık verici katkılar kullanılabilir. Çelik teller, beton santralinde beton hazırlanırken, transmikserde bütün malzemenin karıştırılması esasında veya transmikserde bulunan hazır betona ilave edilebilir. Tüm durumlar için genel kurallar şunlardır: Homojen bir beton karışımı elde etmek için temel ilkelere dikkat edilmelidir, kritik çelik tel miktarı aşılmamalıdır, çelik tel donatılı betonun karışımını kolaylaştırmak ve gerekli olduğunda tel miktarını artırmayı sağlamak amacıyla ince agrega kullanılmalıdır, taze betonda homojen tel dağılımı gözle kontrol edilmeli birbirine yapışık teller halinde betona karıştırılan tel demetler veya teller beton içinde tamamen dağılıp ayrılıncaya kadar beton karışımı devam etmeli ve üniform dağılım göz ile fark edilmelidir (Kişin, 2006).

- Beton santralinde karıştırılması kuralları

Kum çakıl ve çelik teller bir konveyör band aracılığı ile karıştırma kazanına verilebildiği gibi beton santralinin tartı kovasınada konulabilir. Her iki durumdada, çelik teller kum ve çakılın üzerine dökülmelidir. Karışıma , çimento, su ve gerekli ise uçucu kül ilave edilmelidir. Bütün teller ayrılıp dağılıncaya kadar karıştırılmalıdır. Gerekli süre mikser tipine bağlı olup , bu süre 1-2 dakika arasında olmalıdır. Karıştırma kazanı içinde hazırlanan betona teller en son olarak da ilave edilebilir.

- Transmikserde bütün malzemelerin karıştırılması kuralları

Agrega ve teller mikserlere konarak karıştırılmalıdır. Çimento ve su ilave edilmelidir. 2 dakika- 4 dakika sonra karışım kontrol edilmelidir. Homojen karışım gözle fark edilebilir.

- Transmikserlerde bulunan hazır betona tellerin ilave edilmesi kuralları

Transmikserlere konan beton, mikser kapasitesinin %80' nini aşmamalıdır. Yüksek su/çimento oranından kaçınmak için akışkanlık verici katkı maddeleri kullanılmalıdır. Teller, miksere 20 kg/dak-30 kg/dak hızı ile konmalı ve bu esnada

mikser tamburu en yüksek hız ile çevrilmelidir. Karıştırma zamanı mikser tipine bağlıdır. Bütün teller betona karıştırıldıktan sonra mikser kısa müddet ile durdurulmalı ve tel dağılımı göz ile kontrol edilmelidir. Homojen dağılım elde edilmezse, transmikserin bu karışım sistemi ile uygun olmadığına karar verilmelidir.

- Kontrol kuralları

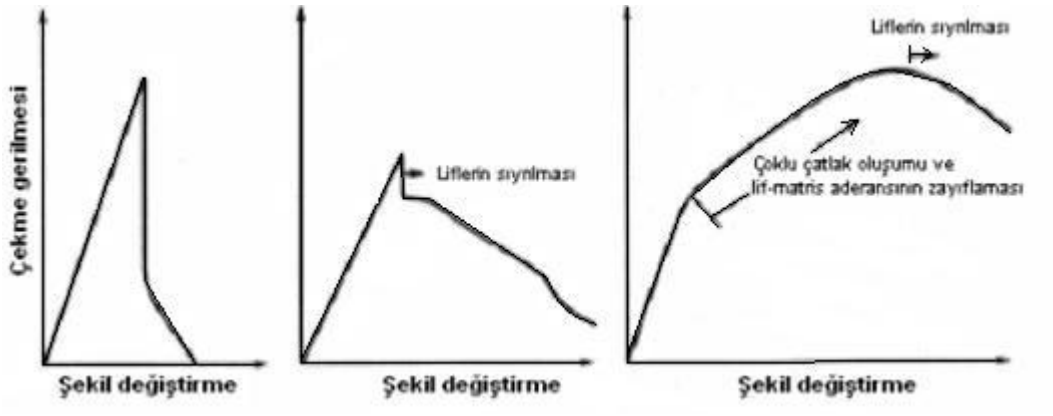
Kontrolluğun seçeceği karışımlardan her kontrol için, her 1000 $m^{3'}$ lük betondan 3 adet 10 litrelik beton numunesi alınmalıdır. Alınan 3 adet 10 litrelik numuna su ile yıkandıktan sonra çelik lifler mıknatıs yardımı ile toplanıp hassas olarak tartılmalıdır (Kişin,2006).

3.5. Çelik Liflerin Beton Özeliklerine Etkisi

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

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

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



(a) **(b)** **(c)**

Şekil 3.2: Gevrek Matrisli Lif Donatılı Kompozitin Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi: (a) düşük lif oranı; (b) yeterli lif oranı; (c) yüksek lif oranı(Balaguru ve Shah, 1992).

• Güçlü lif - gevrek matris: Güçlü lifleri zayıf – gevrek matris içinde kullanmanın ana amacı matrisin sünekliğini arttırmaktır. Bu tip kompozitlerde genel olarak lif oranı düşüktür (< %1) ve beton dayanımını fazla miktarda değiştirmez. Matrisin şekil değiştirme kapasitesi, lifin şekil değiştirme kapasitesinden, daha düşük olduğu için lif mevcut kapasitesine ulaşamadan, matris devre dışı kalır. Yüksek lif oranı (>%5) kullanılan kompozit malzemelerde, çekme dayanımı da önemli ölçüde artar. Matris çatladıktan sonra kompozitin davranışı aşağıdaki gibi gelişebilir:

1. Matris çatladıktan hemen sonra kompozit göçer. Bu göçme tipine çok düşük lif oranlarında rastlanır. Bu davranışa ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.2.a' da gösterilmektedir.

2. Matrisin çatlamasından sonra, yük taşıma kapasitesi düşer, fakat kompozitin yüke direnci en yüksek gerilmeden düşük olmakla birlikte devam etmektedir. Matrisin çatlaması ile yük kompozitten liflere aktarılır. Deformasyonun artmasıyla lifler matristen sıyrılmaya başlar ve bu olayı takiben yük taşıma kapasitesi de zamanla azalır. Bu tip kompozitlerde dayanımda artış gözlemlenmezken sünekliğin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır. Bu davranışa ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.2.b' de gösterilmektedir.

3. Lif hacminin yüksek olması durumunda, matrisin çatlamasından sonra lifler artan yükleri taşımaya devam ederler. Matrisin dayanıma katkısının ortadan kalkmasıyla gerilme – şekil değiştirme eğrisinin eğimi azalır. Çatlama sonrasındaki davranışa lif oranı ve matris ile lifin aderansı etkili olacaktır. Yükün artmasıyla çatlak miktarı

artar ve taşıma kapasitesi liflerin matristen sıyrılmaya başlamaları ile düşer. Bu tip göçmede lif ile matris özeliklerinin optimum kullanımı gerçekleşir. Bu davranışa ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.2.c' de gösterilmektedir (Balaguru ve Shah, 1992).

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

Uçları kancalı liflerin düz olanlara göre daha fazla sıyrılma kuvveti yükü verdikleri, sıyrılma yükünün matris dayanımının artması ile arttığı, lifin plastik deformasyonu gerçekleştiği takdirde, çelik telin kalitesinin sıyrılma davranışını etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca matrisin dayanımı da yük taşıma kapasitesini ve kırılma enerjisini etkilemektedir (Özyurt ve diğ. ,2002). Matrisin dayanıma ve enerji yutma kapasitesine katkısı iki şekilde olur.

1. Lif ile matrisin aderansı: Silis dumanı içeren kompozit malzemede lif ile matris arasındaki bağ çok daha güçlü olacağından liflerin etkin kullanımı söz konusu olacaktır (Balaguru ve Shah, 1992).

Chan ve Chu, RPB' de silis dumanının lif ile matris aderansına olan etkisini incelemişlerdir. Bileşimlerde silis dumanını çimentonun %0, %10, %20, %30 ve %40' ı oranında kullanmışlar, diğer beton bileşenlerini sabit tutmuşlardır. Çalışmalar silis dumanının çimentonun %20'si ile %30'u arasında kullanıldığında, lif ile matris arasındaki bağ kuvvetinin ve lif sıyrılma enerjisinin optimum değere ulaştığını göstermektedir. %30 silis dumanı kullanılması ile sıyrılma enerjisi %100 artarken, sıyrılma yükü %14 oranında artmıştır. %40 silis dumanı kullanılan betonda ise sıyrılma yükünde artış gözlemlenmezken sıyrılma enerjisi normal betona göre %70 artış göstermiştir. Bu davranış silis dumanının lifin sıyrılma enerjisini lifin sıyrılma yükünden çok daha fazla etkilediği göstermektedir. Ayrıca silis dumanı oranı yüksek olan betonlarda lifin sıyrılma yüzeyinde yüksek oranda ince malzemeye rastlanmıştır. Sürtünmeyi ve aderansı kuvvetlendiren bu malzemeler dolayısıyla sıyrılma enerjisi silis dumanı yüksek olan betonlarda fazla çıkmıştır (Chan ve Chu, 2004).

Eren ve Çelik , silis dumanı ve çelik lifin birlikte kullanımının yüksek dayanımlı beton özeliklerine etkisini incelemişlerdir. Çelik lif kullanımı ile narinlik oranı ve lif

yüzdesine bağlı olarak beton basınç dayanımında %13 - %40 oranında azalma gözlemlenmiştir. Silis dumanı ve lifin birlikte kullanılması ile basınç dayanımı silis dumanı ve lif kullanılmayan sade betona göre artmıştır (Eren ve Çelik, 1997).

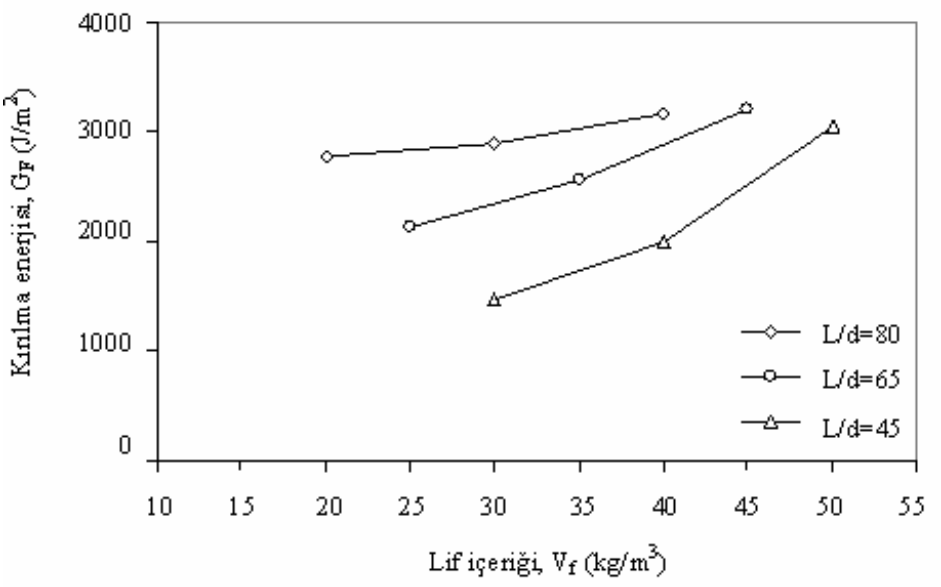
Gutiérez ve diğerleri , silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun harcın dayanımını arttırdığını, uçucu kül kullanılmasının ise harç dayanımını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Karışımlarda çelik lif kullanılması ile basınç dayanımı %6,6 oranında düşmüştür. Ancak silis dumanı kullanılması ile lifin olumsuz etkisinin ortadan kalktığı ve normal harca göre basınç dayanımının %30 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu durum silis dumanının, çelik lif – matris aderansını güçlendirmesi ile basınç dayanımını arttırmasına bağlanmaktadır (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 hesaplanmıştır. Ayrıca, bu betonlarda betonun enerji yutma kapasitesi silis dumanı artışına bağlı olarak düzenli biçimde artmıştır. Bu durum, silis dumanının lif matris aderansını güçlendirmesine, çelik liflerin artan aderans ile daha etkin hale gelerek betonun sünekliğini arttırmasına ve silis dumanının basıncı arttırıcı özeliğine bağlanmaktadır.

2. Matrisin gevrekliği: Normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı betona göre daha az gevrek olup, liflerin eklenmesi kompoziti daha sünek hale getirir. Yüksek dayanımlı betonda ise sünek kırılmanın meydana gelmesi için lif oranının artması gerekir. Normal dayanımlı betonda kancalı uçlu liflerden 60 kg/m^3 kullanmak gerekirken, yüksek dayanımlı betonda aynı sünek davranışı elde etmek için bu miktarı 120 kg/m^{3,} e çıkarmak gerekmektedir (Balaguru ve Shah, 1992).

3.5.1. Lif miktarı, lif narinliği ve lif dağılımının etkisi

Lifli beton konusunda yapılan çalışmalarda; beton bileşimine giren parametrelerin içerisinde beton özeliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörlerin narinlik ile lif miktarı olduğu belirtilmektedir (Swamy, 1971).



Şekil 3.3 : Farklı Narinliğe (L/d) Sahip Çelik Liflerle Donatılmış Betonların Özgül Kırılma Enerjisinin ,Tel İçeriği ile Değişimi (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Narinlik, çelik telin geometrik özeliklerini tanımlamak için kullanılan sayısal bir parametredir. Bu oran, dairesel kesitli teller için tel boyunun tel çapına oranı (L/d) ve dairesel olmayan kesitler içinse eşdeğer lif çapına oranıdır. Genellikle kullanılan tellerin narinliği 20 ile 100 arasında boyları ise 6.4 mm ile 76 mm arasında değişmektedir (ACI Commitee544,1993). Lifin narinliği ve karışımdaki miktarının beton özeliklerine etkisi üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Şekil 3.3' de farklı narinliğe sahip çelik liflerle donatılmış betonların özgül kırılma enerjisinin tel içeriği ile değişimi gösterilmektedir. Lif içeriği 20 kg/m^3 olan 80 narinliğindeki çelik lifli numunelerin kırılma enerjisi 3000 J/m^2, Lif içeriği 25 kg/m^3 olan 65 narinliğindeki çelik lifli numunelerin kırılma enerjisi 2000 J/m^2, Lif içeriği 30 kg/m^3 olan 45 narinliğindeki çelik lifli numunelerin kırılma enerjisi 1000 J/m^2 olmaktadır.

Soroushian ve Bayasi ,yaptıkları çalışmada karışıma eklenen liflerin özellikle de narinliğin büyük olması durumunda taze betonun işlenebilmesini azalttığını göstermişlerdir (Bayasi ve Soroushian,1991).

Shah ve Rangan , kullanılan çelik tellerin dozajı, narinliği ve karışım içerisindeki doğrultuları gibi faktörlerin betonun basınç ve eğilme dayanımına etkisini araştırdıkları çalışmada eğilme dayanımının çelik tel miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığını ve çelik telin narinlik oranı ile tellerin çatlak doğrusunda göre

yönlerinin çatlak sonrası dayanımda çok önemli etkileri olduğunu görmüşlerdir (Shah ve Rangan, 1971).

Lange-Kornbak , ÇTDB' ların kırılma enerjilerinin kullanılan çelik boyunun karesi ile doğru orantılı ve tel çapının karekökü ile ters orantılı olduğunu ifade ettiler (Lange-Kornbak,1998).

Chang ve Chai , çelik tel narinliği arttıkça ilk çatlak yükü değerinin arttığını ve matris içerisinde rastgele dağılı bulunan lifler arasındaki mesafenin 8 mm' den az olduğunda ÇTDB' nun ilk çatlak yükünde büyük artış gözlendiğini ifade ettiler (Chang ve Chai,1995).

3.5.2. Lif- matris aderansının etkisi

Lifin beton içerisinde yararlı olabilmesi için matris ile aderanslarının iyi olması gerekir. Liflerin betonla aderansını etkileyen en önemli parametre liflerin geometrik yapılarıdır. Yapılan birçok araştırma göstermiştir ki lif geometrisinin ÇTDB' ların mekanik özelikleri üzerine çok önemli etkileri vardır. Ramakrishnan ve diğ., iki ucu kancalı ve düz çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, tokluk indisi ve enerji yutma kapasitelerini araştırdılar. İki ucu kancalı çelik tel donatılı betonların bahsedilen özelikler üzerinde en iyi performansı gösterdiğini ve ilk çatlak yükünü %90 ve eğilme dayanımını %129 artırdığını ifade ettiler. Düz çelik tellerin ise daha az iyileştirme yaptığını belirttiler (Ramakrishnan ve diğ,1989).

P.Soroushian ve Z.Bayasi, lif tiplerinin beton özelikleri üzerine yaptığı etkileri belirtmek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarda doğru, uçları kancalı, zigzaglı ve birleştirilmiş lif tiplerinin beton karışımına katılmasıyla etkin olan lif tipi belirlenmiştir. Yapılan deneylerde, hacimce %2 oranında ve narinliği 60 olan uçları kancalı liflerle üretilen betonun eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesinin, diğer liflere göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Bayasi ve Soroushian,1991).

3.5.3. Lifin çekme gerilmesi

Farklı özelikleri ve kullanım alanları olan birçok lif çeşidi vardır. Bunlar en genel şekliyle şu şekilde sınıflandırılabilir;

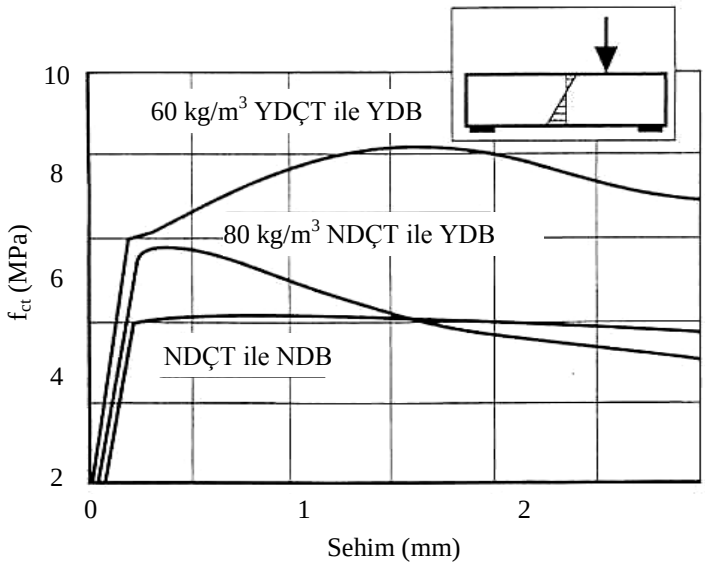
- Doğal lifler (Bitkisel lifler, Hayvansal lifler, Madensel lifler)

- Yapay lifler (Cam yünü, Polimer lifler)

olarak sınıflandırılabilir. Metal liflerin çekme dayanımı genel olarak 1100-2500 N/mm² arasında iken polipropilen liflerde bu değer 600 N/mm² mertebesindedir. Kullanılacak malzemeden beklenen özeliklere göre lif seçimi yapılmalıdır.

3.5.4 Çelik lif dayanımının etkisi

Yüksek dayanımlı betonun mekanik davranışına çelik lif dayanımının etkisi Şekil 3.4'de gösterilmiştir. 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.



Şekil 3.4 Farklı Tipteki Çelik Tellerle Üretilmiş Beton Kirişlerin Yük-Sehim Eğrileri (Walraven, 1999)

3.5.5. Çelik lif geometrisi

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

- Deforme olmuş, ucu kancalı ve kıvrımlı liflerin matris ile lif arasındaki bağa mekanik katkısı,
- Lif ile matris arasındaki fiziksel ve kimyasal aderans,
- Matris eklenmeden önce lifin lif ile kenetlenmesi (SIFCON),
- Matris ile lif arasında sürtünme (Naaman ve Najm, 1991).

Çelik lif geometrisi betonun göçme sonrası davranışına etki eden en önemli faktördür. Lif türünün işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve kırılma enerjisi üzerine etkisini incelenmişlerdir. Çalışmalarında uçları kancalı, düz yuvarlak, kıvrımlı yuvarlak, kıvrımlı dikdörtgen ve uçları kancalı-tutkalla birleştirilmiş olmak üzere 5 çeşit lif kullanmış ve betondaki lif oranını %2' de sabit tutmuşlardır. Çelik liflerin geometrileri ile ilgili bilgiler Tablo 3.1' de özetlenmektedir. (Bayasi ve Soroushian, 1991).

Tablo 3.1: Lif Türlerinin Geometrileri (Bayasi ve Soroushian,1991).

Lif tipi	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Narinlik
düz-yuvarlak	50,8	0,889	57
kıvrımlı-yuvarlak	50,8	0,889	57
kıvrımlı-dikdörgen	50,8	0,889	57
çengelli-birleştirilmiş	30,5	0,500	60
çengelli-tek	30,5	0,500	60
düz-yuvarlak	60,0	0,889	72
çengelli-birleştirilmiş	59,9	0,800	75

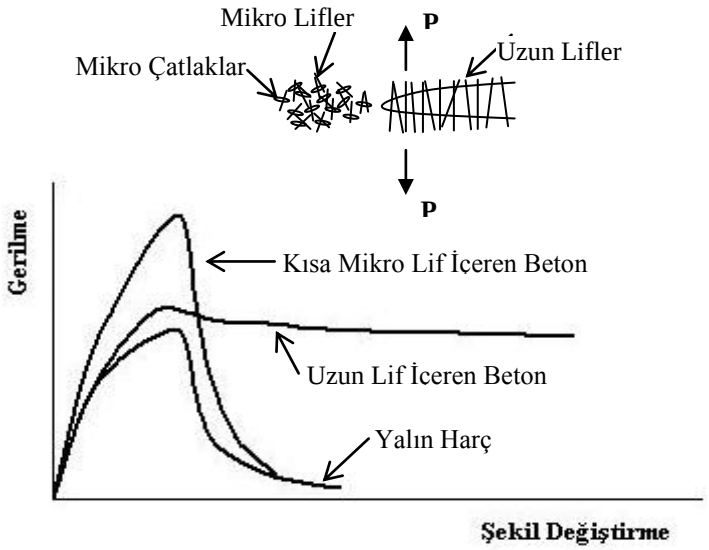
Deney sonuçları narinlik arttıkça işlenebilirliğin azaldığını fakat lif türünün işlenebilirliğe etkisinin dikkate alınmayacak kadar az olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalarda uçları kancalı liflerin enerji yutma kapasitesinin düz ve kıvrımlı olan liflere oranla daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durum en yüksek basınç gerilmesi şekil değiştirmesinin, uçları kancalı liflerde diğer liflere göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Farklı tür çelik liflerin aderans-kayma mekanizmasını incelemişler ve çalışmalarında düz lif, çengelli lif, deforme olmuş lif olmak üzere 3 farklı tip lif kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda,

mekanik katkının etkisi ile uçları çengelli lifler ve deforme olmuş lifler (yüzeysel işlem görmüş) düz liflere göre daha yüksek sıyrılma dayanımı göstermişlerdir. Yüksek kayma değerlerinde, deforme lifler sıyrılmaya karşı direnç gösterirken kancalı uçlu liflerin kanca uçlarında açılma gözlemlenmiştir. Bu durum kancalı uçlu liflerde sıyrılmanın daha kolay gerçekleşmesine neden olmuştur. Düz liflerde ise sıyrılma hızı çengelli liflere göre çok daha fazladır. Tüm liflerde başlangıç P/Δ (sıyrılma yükü/kayma) oranının aynı olması, mekanik katkının etkisinin yüksek kayma değerlerinde ortaya çıktığını ve lif türünün çatlama dayanımına katkısının olmadığını göstermektedir. Deney sonuçlarına göre, kancalı uçlu liflerde en yüksek sıyrılma yükü ve bu yükte gerçekleşen kayma miktarı düz liflere göre daha fazla bulunmuştur. Bu durum kancalı uçlu liflerin enerji yutma kapasitelerinin daha fazla olduğunu göstermektedir (Naaman ve Najm, 1991).

3.6 Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı

Çelik Tel Donatılı Beton hidrolik bağlayıcı, agrega ve çelik telin karışımı ile üretilen betondur. Betona ikamesiyle matriste süreksiz ve rastgele dağılı olarak bulunan çelik teller, yükler ve çevresel değişiklikler altında betonda çatlak gelişimini köprüleme etkisi yapar. Çelik teller, yeteri kadar dayanıma sahip, çelik tel-matris bağı yeterli ve uygun miktarda kullanılırsa çatlak genişliğini küçük düzeyde tutar ve betonun tepe yükü sonrası büyük şekil değiştirme yaparak yük taşımasını sağlar. Böylece yüksek sünekliğe sahip betonlar elde etmek mümkün olur. Çelik tellerin genel olarak betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azaltmakta, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, darbe, yorulma ve çekme dayanımı arttırmaktadır (Köksal ve Özcan , 2002).

Çelik teller kendi çekme mukavemetlerine ulaşıncaya kadar beton matrisinde basınç ve çekme yüklerinden dolayı meydana gelecek olan çok sayıdaki kılcal çatlak oluşumunu önlemektedir. Ayrıca, çimento matrisi çelik telleri bir arada tutarak çelik teller vasıtasıyla gerilme transferi yapmakta ve bu şekilde kırılma birim uzamasını çelik tellere oranla düşük olan çimento hamurunda meydana gelebilecek kılcal çatlaklar önlenebilmektedir. Bunun yanısıra, çelik teller mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geçiktirir, ayrıca çatlak köprüleme etkisi ve tutma başarısı ile ÇTDB'ların göçme modunda iyileştirme yapar (Miao ve diğ., 2002).



Şekil 3.5 Farklı Lif Boyutlarının Çatlak Köprüleme Etkisi (Betterman ve diğ.1995).

Çelik tellerin betonun basınç dayanımına etkisi eğilme ve çekme dayanımlarına nazaran daha azdır (ACI, 1993). ACI Committe 544 (1993) tarafından, %1.5 çelik tel içeriğinde betonların basınç dayanımlarında %0 ile %15 arasında bir artış olabileceği ifade edilmektedir. ÇTDB'ların basınç dayanımın etkileyen en önemli faktörler çelik tel geometrisi ve matris dayanımıdır (Trottier ve Banthia, 1994).

Yapılan çalışmalarda iki ucu kancalı çelik tellerin basınç tokluğunda en iyi iyileştirmeyi yaptığı, kıvrımlı çelik tellerin ise düz olanlara kıyasla daha az etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çelik tel geometrisinin basınç dayanımına etkisinin olmadığını belirlenmiştir (Soroushian ve Bayasi, 1991).

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). Taylor ve diğ. ' a dayanarak Fuat Köksal'ın doktara tezine göre, çelik tel içeriği artıkça eğilme ve yarma dayanımlarının arttığını saptadılar.

Lim ve Oh' a dayanarak Fuat Köksalın doktara tezine göre, çelik teller betonun basınç, eğilme ve yarma dayanımlarını artırdığını ve en büyük artışın yarma dayanımında görüldüğünü ifade ettiler.

Kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi için çok sayıda model bulunmaktadır. İki malzemeden yapılmış kompozitler için verilen en basit model, malzemelerin kompozit içerisindeki hacim oranları ve malzemelerin elastisite modellerine bağlı olarak belirlenmesini içeren üst sınır ve alt sınır modelleridir. Çelik tel donatılı kompozitler için ise, çelik telin sürekliliği, dağılımı, yönlenmesi ve narinliği gibi parametreleri içeren modeller geliştirilmiştir (Paul ve diğ.,1996). İki malzemeden (beton ve çelik tel) yapılmış olduğu düşünülen ÇTDB'ların elastisite modüllerinin belirlenmesinde genellikle en basit modeller olan üst sınır ve alt sınır veya ikisinin aritmetik birleşimi olan çözümler kullanılmaktadır. Üst sınır çözümleme çelik tellerin sürekli olduğunu ve elastisite modülünün belirleneceği doğrultu boyunca konumlandığını dikkate almaktadır ve elastisite modülü şu şekilde ifade edilmektedir;

$$E_{cL} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \qquad \textbf{(3.1)}$$

burada, c, L, f ve m sırasıyla, kompoziti, uzun doğrultuyu, çelik teli ve matrisi ifade etmektedir. Alt sınır çözümleme ise çelik tellerin elastisite modülünün belirleneceği doğrultuya dik yönde kümelendiğini dikkate almaktadır ve elastisite modülü şu şekilde ifade edilmektedir;

$$E_{cT} = E_f E_m / [(1 - V_f) E_f + V_f E_m] \qquad \textbf{(3.2)}$$

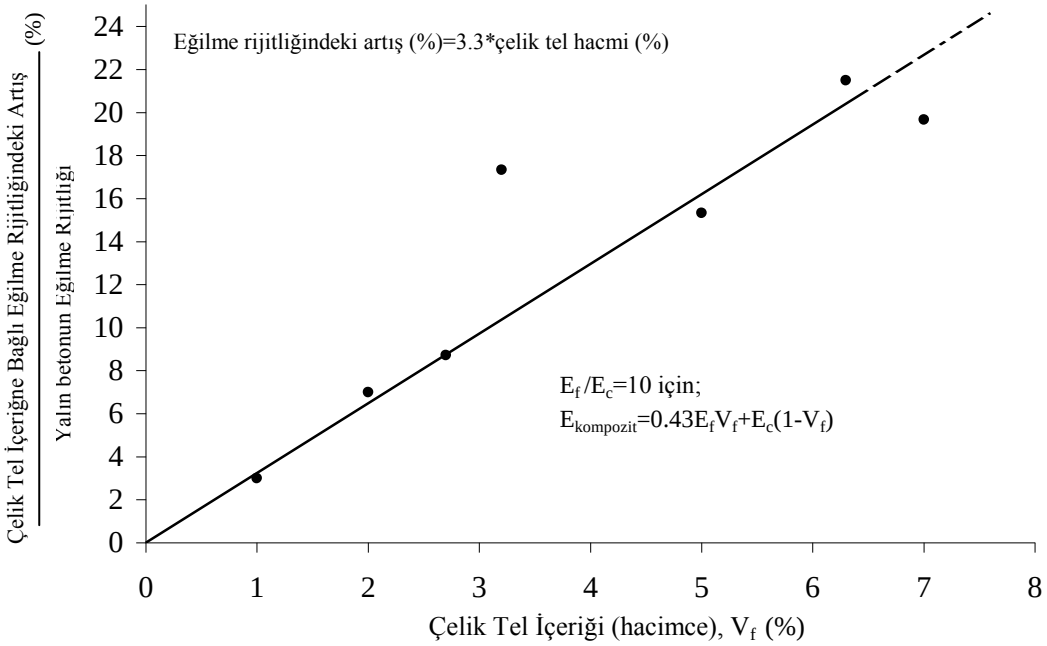
burada, T enine doğrultuyu ifade etmektedir. Yapılan araştırmalar, çelik tellerin matris içerisinde rastgele dağılı bulunması durumunda, elastisite modül için üst sınır ve alt sınır modellerde verilen eşitliklerin birleşimini içeren bir model önerdi ve bu modellere bağlı olarak ÇTDB'ların elastisite modülünü ;

$$E_c = (3/8) E_{cL} + (5/8) E_{cT} \qquad \textbf{(3.3)}$$

formülüyle ifade etti. Burada, E_{cL} boyuna, E_{cT} ise enine doğrultudaki elastisite modülüdür. (Halpin, ve Tsai, 1969) .

Yapılan çalışmalarda genel olarak çelik tel içeren betonların elastisite modülleri normal betonlara göre yüksek olduğu ifade edilmektedir Ayrıca ÇTDB'ların elastisite modüllerinin, çelik telin narinlik oranı ve miktarı, malzemelerin elastik

modülleri, telin matris içerisindeki konumu ve tellerin süreklilik ve süreksizlik durumlarının yanı sıra, çelik tel-matris ara yüzeyindeki aderans karakteristiklerine bağlı olduğunu belirtilmektedir (Köksal,2004). Hasarsız eğilme rijitliğindeki artışın çelik tel içeriğine bağlı olarak değişimi Şekil 3.6 da verildi (Patton ve Whittaker,1983).



Şekil 3.6 Hasarsız Eğilme Rijitliğindeki Artış-Çelik Tel İçeriği İlişkisi (Patton ve Whittaker,1983).

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

Yüksek çekme dayanımı ve süneklik sağlayan çelik teller, betonların çatlamaya karşı dirençlerini ve hasar düzeylerini sınırlamadaki kabiliyetlerini büyük ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca servis yükleri altında, matris içerisinde mevcut veya oluşan çatlakların ilerlemesini ve yayılmasına karşı gösterdikleri köprüleme etkisi ile betonların darbe ve yorulma direnci kapasitelerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bunun sonucunda betonların darbe ve yorulma altındaki hasar düzeyleri azaltılmaktadır. Çelik tellerin matris içerisinde çatlakları köprüleme etkisi ve çatlak sonrası yük taşıma özeliği ile kazanılan yüksek süneklik, tekrarlı yükler altında ÇTDB' ların göçmeye karşı dirençleri normal betonunkilere oranla daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Betonların darbe dayanımları çelik tel kullanılmasıyla 2-20

kat artmakta ve yorulma dayanımlarında ise düşük tel içeriklerinde bile 1.25-2 kat iyileşme görülmektedir (Bayramov ve diğ., 2004).

Darbe ve yorulma dayanımındaki bu iyileşmeler, özellikle tekrarlı dinamik yükler altındaki havaalanı, karayolu kaplama betonları ve endüstriyel zemin beton uygulamalarında önemli bir konuma sahiptir (Köksal,2004).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar bölümünde, beton üretiminde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özelikleri, yapılmış olan beton deneyleri ile bunlardan elde edilen sonuçlar verilmektedir.

4.1 Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

4.1.1 Çimento

Çalışmada Akçansa Çimento Fabrikasından temin edilen özgül ağırlığı 3,17 g/cm ^{3} olan CEM I 42,5 R çimentosu kullanıldı. Çimentonun laboratuar analiz sonuçları Tablo 4.1' de verildi.

Tablo 4.1: Çimento Laboratuar Analizi Sonuçları

Kimyasal Analiz		Standartlar	Analiz Sonuçları
SiO_2 Çözünen	(%)		20,79
Çözünmez -kalıntı	(%)	<5,0	0,48
Al_2O_3	(%)		4,76
Fe_2O_3	(%)		3,59
CaO	(%)		63,53
MgO	(%)		1,31
SO_3	(%)	<4,0	2,82
Kızdırma Kaybı	(%)	<5,0	1,22
Cl^-	(%)	<0,10	0,0352
Na_2O / K_2O	(%)		0,22/0,91
Tayin edilemeyen	(%)		0,81
SCaO-Free Lime	(%)		1,20
Minerolojik Bileşim		C3 S	50,52
		C2 S	21,57
		C3 A	6,55
		C4 AF	10,93
LSF			0,93

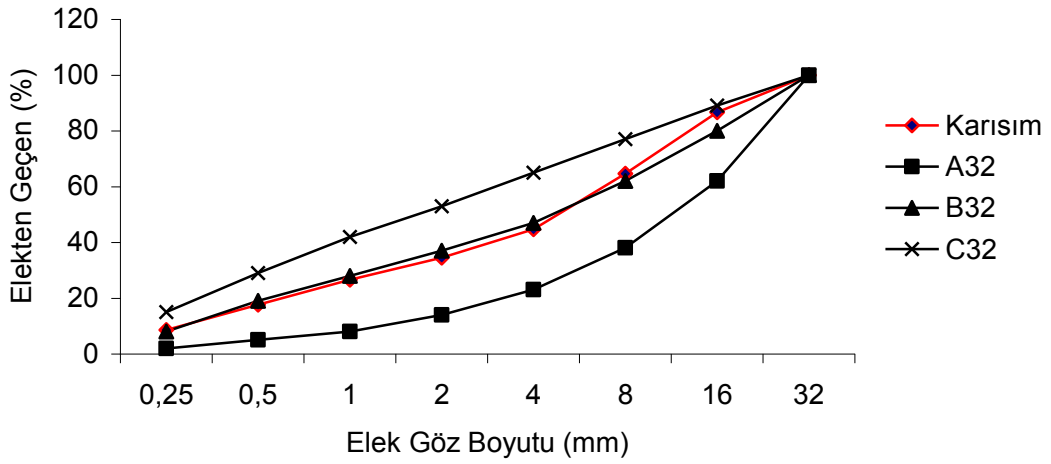
4.1.2 Agregalar

Üretimde Betonsa firmasından sağlanan kırmataş I ve II, kırmataştozu ve kum kullanılmıştır. Kullanılan kırmataş I , kırmataş II ve kırmataştozunun özgül ağırlıkları 2,6 g/cm^3 olup, kumun özgül ağırlığı 2,58 g/cm^3' dür. Karışımlarda kullanılan bu malzemelerin elek analizleri Tablo 4.2' de verilmiştir. Agrega granülometri eğrisi ise Şekil 4.1' deki gibidir.

Tablo 4.2: Numune İçeriklerinde Bulunan Agregaya Ait Elek Analizi

	Elekten Geçen (%)							
Elek Göz Boyutu	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
A32	2	5	8	14	23	38	62	100
B32	8	19	28	37	47	62	80	100
C32	15	29	42	53	65	77	89	100
Doğal Kum	18,1	48,5	71,5	84,5	94,9	100	100	100
Kırmataştozu	19,5	30,2	49,8	74,7	96,9	99,6	100	100
Kırmataş I	2	2,3	2,7	3,8	15,7	72,8	100	100
Kırmataş II	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	50,4	100

Yapılan elek analizlerinden sonra 1 nolu mıcırın incelik modülünün 5,6 ; 2 nolu mıcırın incelik modülünün 8,3 ;taş tozunun incelik modülünün 2,3 ; doğal taşın incelik modülünün 1,8 olarak saptanmıştır.



Şekil 4.1: Agrega Granülometri Eğrisi

4.1.3 Silis dumanı

Silis dumanı olarak, Elkem firmasının GL 140 kodlu 2,34 kg/dm³ özgül ağırlıklı yoğunlaştırılmamış silis dumanı kullanıldı. Silis dumanı sadece C80 serisinde kullanılmıştır. Silis dumanının kimyasal özellikleri Tablo 4.3' de gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri

Bileşen	%
CaO	0,14
SiO_2	96,74
Al_2O_3	0,42
Fe_2O_3	0,35
MgO	0,2
K_2O	0,28
Cl	0,0064
Na_2O	0,15
$CaCO_3$+$MgCO_3$	Eser
H_2O	0,2
Kızdırma Kaybı	1,4

4.1.4 Çelik lif

Bu çalışmada Bekaert üretimi olan dört tip çelik lif kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çelik liflerin özgül ağırlıkları 7,81 g/cm^3 olup, teknik özellikleri Tablo 4.4' da verilmektedir.

Tablo 4.4: Kullanılan Liflerin Teknik Özellikleri

Lif Kodu	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)
RC-80/60-BN	60	0,75	80	1100
RC-80/60-BP	60	0,75	80	2300
RC-80/40-BP	40	0,50	80	2600
RC-80/30-BP	30	0,38	80	2600

4.1.5 Kimyasal katkı malzemesi

Bu çalışmada kimyasal katkı malzemesi olarak normal dayanımlı betonlarda Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.' nin Sikament MR50W markalı orta akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanıldı. Kimyasal katkı malzemelerinin yoğunlukları 1,08-1,15 g/cm^3 arasındadır. Yüksek dayanımlı betonlarda ise YKS Firmasına ait Glenium 51 kodlu hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu hiperakışkanlaştırıcının tercih edilmesinin nedeni; polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkı malzemesi olmasıdır.

4.2 Beton Karışımları

Bu çalışmada üretilen C80 dayanımındaki betonların hepsinde çimento dozajı 1000 kg/m³'de, su/bağlayıcı oranı 0,29' da ve C25 dayanımındaki betonlarda su/bağlayıcı oranı 0,75' de sabit tutulmuştur. Bu şekilde çelik lif içermeyen iki referans betonu ve çeşitli miktarlarda çelik lifin çeşitli kombinasyonlarda kullanılmasıyla toplam 6 adet karışım dökülmüştür.

4.3 Beton Üretiminde İzlenen Sıra

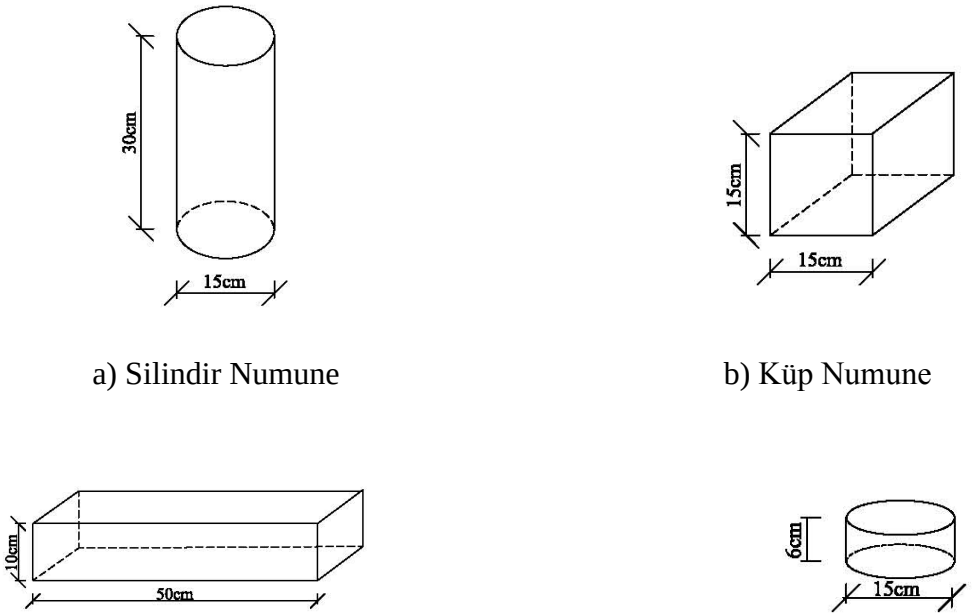
Bu çalışmada üretilen betonların üretimi sırasındaki izlenen yol aşağıdaki gibidir.

- Agregaların etüvde içinde hiç su kalmayacak şekilde tamamen kurutulması,
- Çimento, silis dumanı ve agregaların kuru olarak karıştırılması,
- Karışım suyunun %70' nin betona katılması ve karışımın 2 dakika süreyle karıştırılması,
- Karışım suyunun kalan miktarı ve katkının ilave edilmesi,
- Çelik liflerin ilave edilmesi,
- Taze beton birim ağırlığının yapılması,
- Betonun kalıplara alınması ve vibrasyonun yapılması.

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

4.4 Numune Boyutları ve Şekilleri

Her bir karışımdan 4 adet kiriş, 3 adet küp, 3 adet silindir ve 6 adet disk olmak üzere toplam 16 adet numune üretildi. Numune boyutları Şekil 4.2' deki gibidir.



a) Silindir Numune

b) Küp Numune

c) Kiriş numune

d) Disk Numune

Şekil 4.2: Numune Boyutları ve Şekilleri

4.5 Numune Kodlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada toplam altı tane karışım bulunmaktadır. Bu karışımlardan 3 tanesinde normal dayanımlı beton, 3 tanesinde yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Karışımların kodlanması VABX-CYZ şeklinde yapılmıştır. V'yi izleyen AB sayısı tel içeriğini , X telin yüksek (Y) ya da normal (N) dayanımlı olduğunu, C' yi izleyen sayı ise betonun sınıfını göstermektedir. Örnek olarak, V39Y-C25 yüksek dayanımlı çelik tel içeriği 39 kg/m^3 ve beton sınıfı C25 olan karışımdır. Karışımlarda çelik tel içeriği 39 kg/m^3 olan numunelerde kullanılan çelik lifler yüksek dayanımlı ve karma, çelik tel içeriği 57 kg/m^3 olan numunelerde ise kullanılan çelik lifler normal dayanımlı ve tek tip liftir. Böylece, V57N-C25 ve V57N-C80 ise sırasıyla 25 ve 80 sınıfına ait ÇTDB'lar olup 57 kg/m^3 normal dayanımlı çelik tel (RC-80/60-BN) içermektedir. İçeriği 39 kg/m^3 olan yüksek dayanımlı çelik tellerin (RC-80/60-BP, RC-80/40-BP, RC-80/30-BP) kullanımında her bir boy için miktar aynı olup 13 kg/m^3' dür.

Tablo 4.5: Üretilen Karışımlarda Kullanılan Lif Türleri ve Oranları

Karışım Kodu	RC-80/60-BP (kg/ m^3)	RC-80/40-BP (kg/ m^3)	RC-80/30-BP (kg/ m^3)	RC-80/60-BN (kg/ m^3)	TOPLAM (kg/ m^3)
V0-C25	0	0	0	0	0
V39Y-C25	13	13	13	0	39
V57N-C25	0	0	0	57	57
V0-C80	0	0	0	0	0
V39Y-C80	13	13	13	0	39
V57N-C80	0	0	0	57	57

4.6 Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen malzeme kalıplara yerleştirilmeden önce hacmi ve ağırlıkça darası bilinen bir kaba vibrasyon uygulanarak dolduruldu ve taze betonun birim ağırlığı bulundu. Yapılan birim ağırlık deneyinden karışımdaki malzemelerin gerçek bileşimi Tablo 4.6' da verilmiştir.

Tablo 4.6: Taze Beton Bileşimi ve Özellikleri

Karışım Kodu	V0-C25	V39Y-C25	V57N-C25	V0-C80	V39Y-C80	V57N-C80
Çimento, kg/m^3	268	264	260	520	499	510
Silis dumanı, kg/m^3	0	0	0	57,75	55	56,6
Su, kg/m^3	169	174	179	169	172	177
Kırmataş Tozu, kg/m^3	335	331	322	296	282	280
Kırmataş I, kg/m^3	582	568	560	487	463	470
Kırmataş II, kg/m^3	491	479	472	466	446	453
Doğal Kum, kg/m^3	432	424	411	381	361	381
Katkı, kg/m^3	1,87	2,9	3,38	8,08	8,87	9,63
Çelik lif, kg/m^3	0	38	55	0	38	56,6
Birim ağırlık, kg/m^3	2279	2279	2263	2325	2372	2394
Hava boşluğu (%)	3,6	4,1	4,9	0,7	3,6	1,2

4.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Standart küp basınç deneyleri 30. günde, diğer sertleşmiş beton deneyleri ise 56. günde yapıldı.

4.7.1 Küp basınç deneyi

150x150x150 mm' lik küp numuneleri üzerinde 30. günde 5000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılaraktan basınç deneyleri yapıldı.



Şekil 4.3: Küp Basınç Deney Düzeneği

4.7.2 Silindir basınç deneyi

Silindir basınç deneyleri 150 mm çaplı 300 mm yükseklikteki silindir numuneler üzerinde 300 ton kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak yapıldı. Normal dayanımlı beton numunelerde her 5 ton'luk yüke karşılık gelen düşey yer değiştirme değeri okunarak, yüksek dayanımlı beton numunelerde ise her 20 ton'luk yüke karşılık gelen düşey yer değiştirme değeri okunarak, elde edilen grafiklerden elastisite modülü hesaplanmaktadır.

4.7.3 Yarmada çekme deneyi

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

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

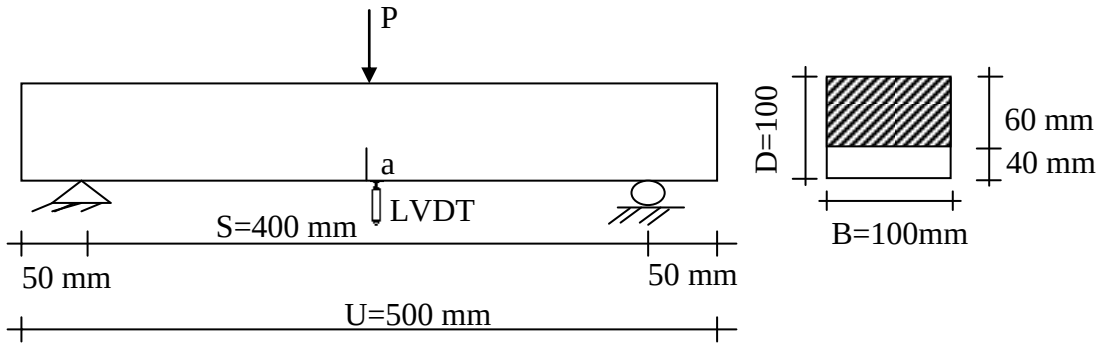
f_t = Yarmada çekme dayanımı (N/mm²)

P_{maks} = Maksimum yük (N)

D = Silindirin çapı (mm)

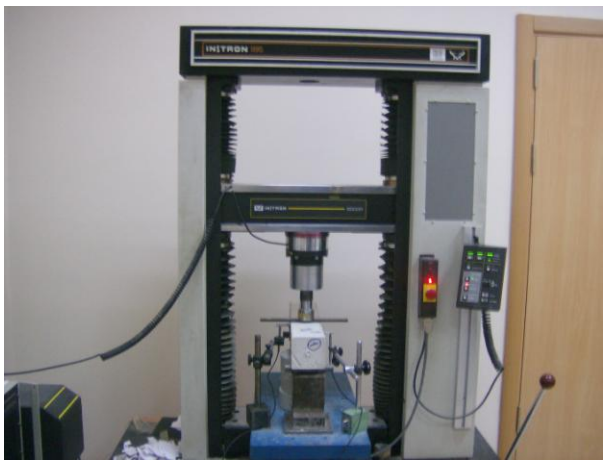
L = Silindirin yüksekliği

4.7.4 RILEM kırılma enerjisi deneyleri



Şekil 4.4: Eğilme Deney Düzeneği

Kiriş numunelerinin eğilme dayanımı ve kırılma enerjisini bulmak amaçlı İ.T.Ü. Yapı Malzemesi laboratuarında bulunan Instron 5500R marka yükleme makinesi kullanıldı. Numunelerin ortasına kırılmanın kontrollu olabilmesi amaçlı 40 mm' lik çentikler açıldı ve böylelikle numune etkin kesit alanı 100x60 mm olarak seçildi. Yalın betonlarda yükleme hızı 0,02 mm/dk, lifli betonlarda ise 0,05 mm/dk olarak seçildi. Yapılan deneylerle farklı miktar ve dayanımda çelik liflerin kullanılması betonun eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesine etkileri araştırıldı. Deneylerin yapılması esnasında kullanılan deney düzeneği Şekil 4.4' de gösterilmektedir.



a) Instron 5500R Marka Yükleme Makinesi



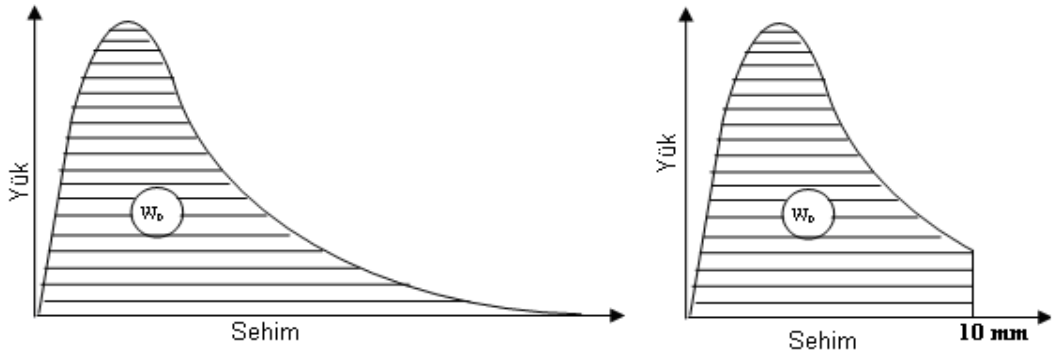
b)Veri Toplama Sistemi

Şekil 4.5: RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi

Deney esnasında oluşan sehimi belirlemek amaçlı 2 adet LVDT alıcı numune alt yüzeyine yerleştirildi. Numuneler üzerine uygulan yük değerleri ve bunlara karşılık gelen sehim sonuçları alıcılardan bilgisayara aktarılmak suretiyle toplandı ve bu sonuçlarden Yük-Sehim grafiklerine geçildi.

4.7.4.1 RILEM kırılma enerjilerinin hesaplanması

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



(a) (b)

Şekil 4.6 : Yalın Beton İçin Yük-Sehim Eğrisi (a), ÇTDB İçin Yük-Sehim Eğrisi (b)

Şekil 4.6.a' da yalın beton için, Şekil 4.6.b' de ise ÇTDB için örnek yük-sehim eğrileri görülmektedir. Eğri yardımıyla enerjinin nasıl hesaplandığı açıklanmaktadır.

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

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

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg),

g = Yerçekim ivmesi (9.81 m/sn²),

δ_o = Kirişin göçme esnasındaki deformasyonu,

A_{lig} = Etkin kesit alanı (m²).

4.7.4.2 RILEM enerji deneyinden net eğilme dayanımının hesaplanması

Aşağıdaki bağıntı kullanılarak net eğilme dayanımları hesaplanmaktadır.

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

F_{net} = Net eğilme dayanımı,

P = Kırılma yükü (N),

L = Mesnetler arası uzaklık (mm),

B = Numune kesitinin genişliği (mm),

D = Numune kesitinin yüksekliği (mm).

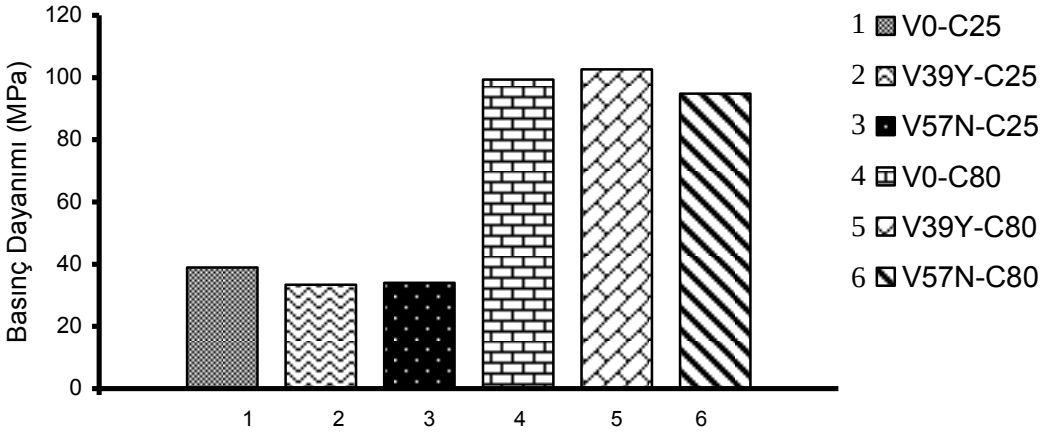
5. DENEY SONUÇLARININ İRDELEME VE DEĞERLENDİRMESİ

5.1 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Küp basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 5.1' de verilmektedir.

Tablo 5.1: Sertleşmiş Beton Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Karışım kodu	Küp basınç dayanımı (MPa)	Silindir basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Yarma çekme dayanımı (MPa)	Net eğilme dayanımı (MPa)	Kırılma enerjisi (N/m)
V0-C25	38,9	36,5	30,8	4,04	3,84	106
V39Y-C25	33,4	35,7	27,4	4,01	4,33	3735
V57N-C25	34,0	37,5	27,4	4,18	6,22	3976
V0-C80	99,4	86,3	39,3	5,21	4,42	65
V39Y-C80	102,7	97,5	36,0	8,01	8,37	5411
V57N-C80	94,8	94,1	41,0	8,17	10,88	4585

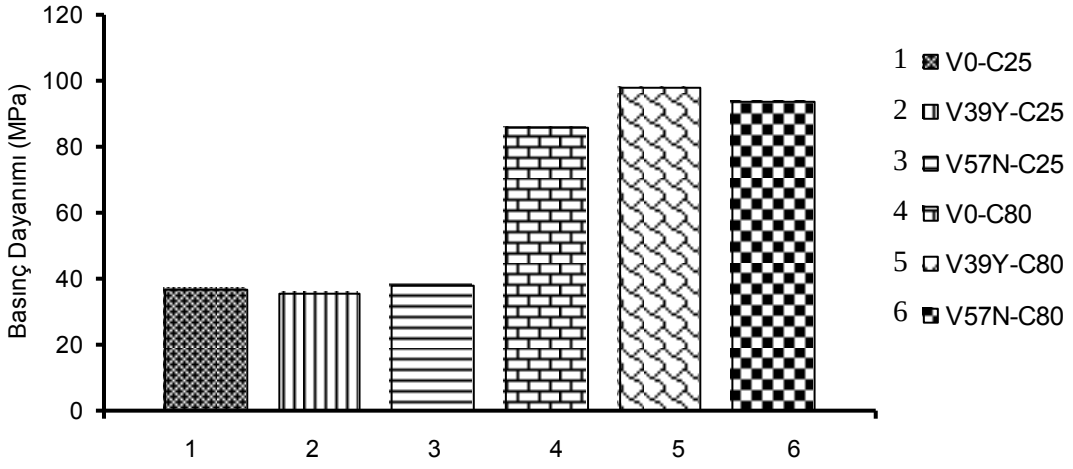


Şekil 5.1: Farklı Miktarda ve Dayanımda Lif İçeren Numunelerin Küp Basınç Dayanımlarının Ortalama Değerleri

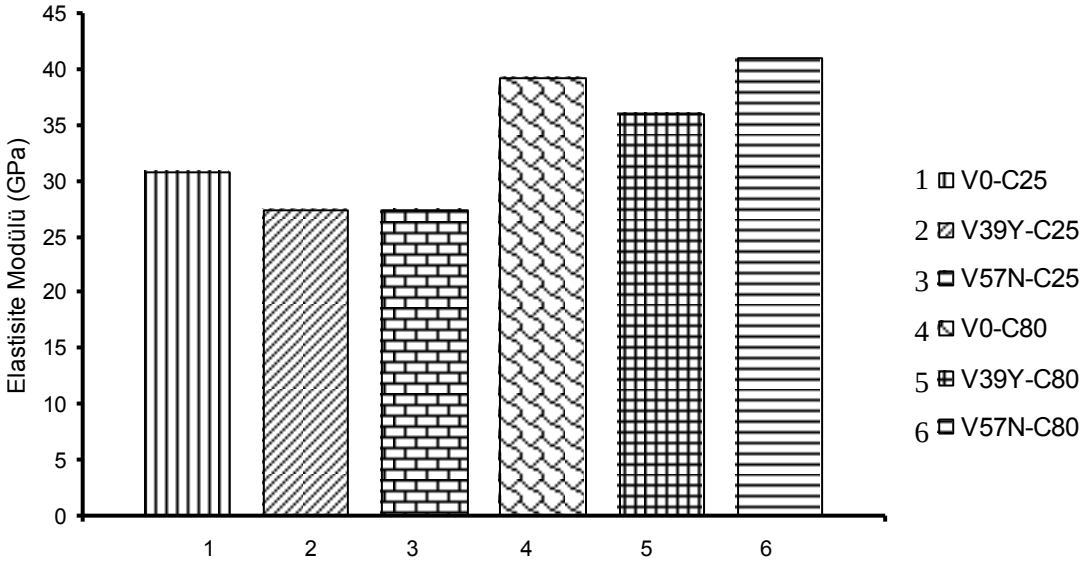
Şekil 5.1 incelendiğinde, normal dayanımlı beton olan V0-C25 , V39Y-C25 ve V57N-C25 betonlarının diğer yüksek dayanımlı betonlara göre daha düşük basınç dayanımlarına sahip olduğu görülmektedir. Tablo 5.1' de görüldüğü üzere; yalın betonla çelik tel donatılı betonların basınç dayanımları kıyaslandığında önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. Sonuçta, betona çelik tel eklemenin basınç dayanımı üzerinde önemli bir değişiklik yapmadığı söylenebilir.

5.2 Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 5.2' de görüldüğü üzere; yalın betonla çelik tel donatılı betonların basınç dayanımları kıyaslandığında önemli bir farklılığın olmadığı görülmektedir. Sonuçta, betona çelik tel eklemenin basınç dayanımı üzerinde önemli bir değişiklik yapmadığı söylenebilir. Şekil 5.3' den anlaşılacağı üzere yüksek veya normal dayanımlı betonlara, yüksek ya da düşük dayanımlı lif eklenmesi elastisite modülünde belirgin bir değişiklik yapmamıştır.



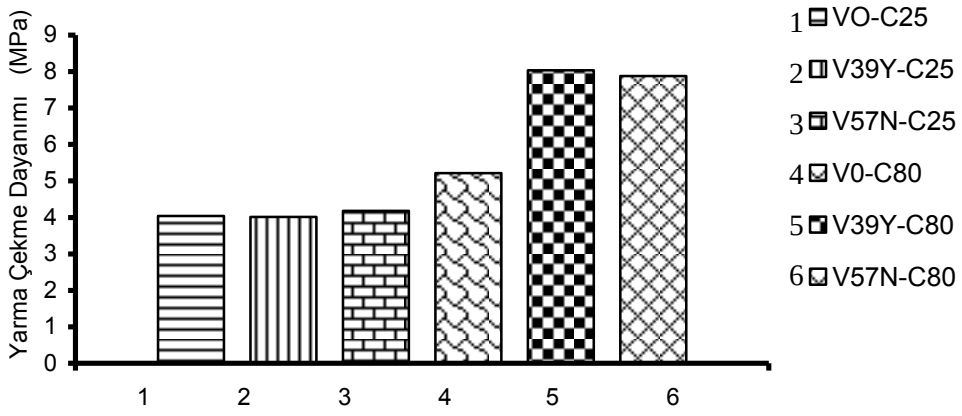
Şekil 5.2: Farklı Miktarda ve Dayanımda Çelik Tel Donatı İçeren Betonlara Ait Ortalama Silindir Basınç Dayanımı



Şekil 5.3: Farklı Miktarda ve Dayanımda Çelik Tel Donatı İçeren Betonlara Ait Ortalama Elastisite Modülü Değerleri

5.3 Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Yarma çekme deneylerinden elde edilen yarma çekme dayanımı değerleri Tablo 5.1' de verilmektedir. Bu tablodan elde edilen sonuçlar Şekil 5.4' de gösterilmektedir.



Şekil 5.4: Farklı Miktarda ve Dayanımda Lif İçeren Numunelerin Yarma Çekme Dayanımlarının Ortalama Değerleri

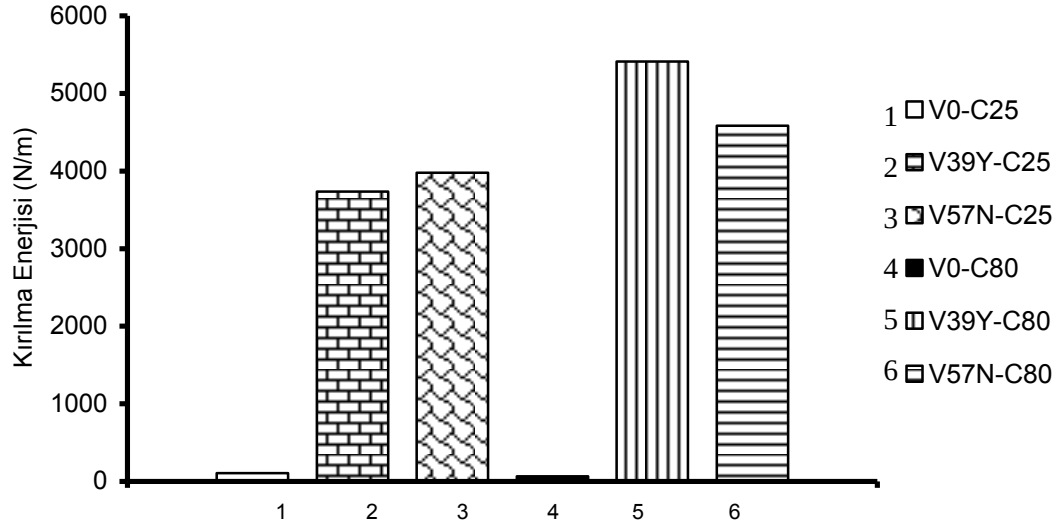
Sonuçlar incelendiğinde normal dayanımlı betona çelik lif ilave edilmesi yarma çekme dayanımını etkilemezken, yüksek dayanımlı betona eklenen çelik liflerin yarmada çekme dayanımlarını artırdığı söylenebilir. Tel içermeyen betonlarla kıyaslandığında en çok artış, 1 $m^{3'}$ de 39 kg yüksek dayanımlı lif içeren yüksek dayanımlı beton karışımında meydana gelmiştir. Yarma dayanımının normal dayanımlı betonda, 4,01 MPa değerine yüksek dayanımlı olan telden 39 kg/m^3 kullanılarak erişilirken, 4,18 değeri için normal dayanımlı olan telden 57 kg/m^3 kullanmak yeterli olmaktadır. Aynı şekilde; yarma dayanımının yüksek dayanımlı betonda, 8,04 MPa değerine yüksek dayanımlı olan telden 39 kg/m^3 kullanılarak erişilirken, 7,88 değeri için normal dayanımlı olan telden 57 kg/m^3 kullanmak gerekmektedir. Sonuç olarak, Yüksek dayanımlı betona 39 kg/m^3 yüksek dayanımlı çelik tel ilavesi yarma çekme dayanımını % 54 artırırken, 57 kg/m^3 normal dayanımlı çelik tel ilavesi yarma çekme dayanımını % 57 oranında artırmıştır.

5.4 RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

5.4.1 Kırılma enerjisinin değerlendirilmesi

Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda, bu eğrinin altında kalan alan hesaplanarak kırılma süresince harcanan enerjiye geçilmektedir. Sünek malzemelerde şekil değiştirme kapasitesi yüksek olduğu için, kırılma anında büyük sehimlere ulaşılmakta ve harcanan enerji artmaktadır. Bu çalışmada numunelerin yük-sehim eğrileri elde edilerek kırılma enerjileri hesaplanmıştır.

Şekil 5.5 incelendiğinde belirgin sonuçlar elde edilmektedir. Lif kullanılmayan V0-C25 ve V0-C80 kodlu karışımlardaki numunelerin kırılma enerjisi değerleri çelik lif içeren diğer tüm karışımlardan oldukça küçüktür. Ayrıca normal dayanımlı lifsiz V0-C25 betonunun kırılma enerjisi yüksek dayanımlı lifsiz beton olan V0-C80 betonunun iki katı kadardır.Buradan da yüksek dayanımlı betonların daha gevrek olduğu sonucuna varılabilir. RILEM kırılma enerjisi deneylerinden elde edilen sonuçlara göre betona çelik lif ilave edilmesi kırılma enerjisi belirgin şekilde arttırmaktadır.

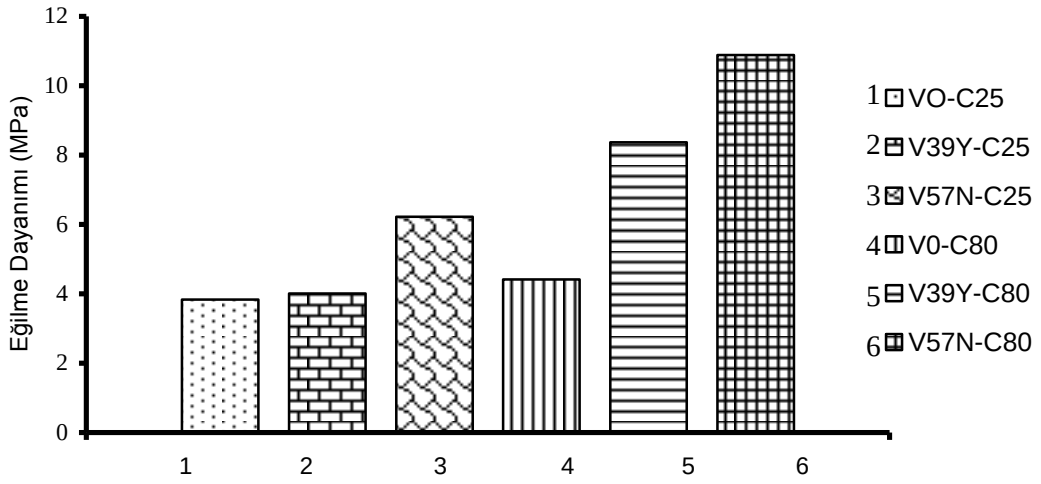


Şekil 5.5: Farklı Miktarda ve Dayanımda Lif İçeren Numunelere Ait Ortalama Kırılma Enerjisi Diyagramı

Sonuç olarak, herbir beton sınıfı için yüksek dayanımlı telin kullanılması betonun kırılma enerjisini arttırmaktadır. Normal dayanımlı ÇTDB' larda kırılma enerjisi yalın betonun kırılma enerjisinin 38 katıdır. Yüksek dayanımlı betonda ise bu oran 83 kata çıkmaktadır. Ayrıca normal dayanımlı betonda yüksek dayanımlı fakat miktarı az olan çelik tel (39 kg/m^3) içeren betonun (V39Y-C25) kırılma enerjisi ile daha fazla normal dayanımlı çelik tel içeren (57 kg/m^3) betonun (V57N-C25) kırılma enerjileri hemen hemen aynıdır.

5.4.2 Net eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi

Şekil 5.6 'daki net eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, çelik tel miktarı arttıkça eğilme dayanımının düzenli olarak arttığı görülmektedir. Eğilme dayanımının telin yüksek dayanımlı veya normal dayanımlı olmasından çok, miktarı ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Ancak yinede yüksek dayanımlı betondaki eğilme dayanımı artışı düşük dayanımlı betona göre daha fazladır.



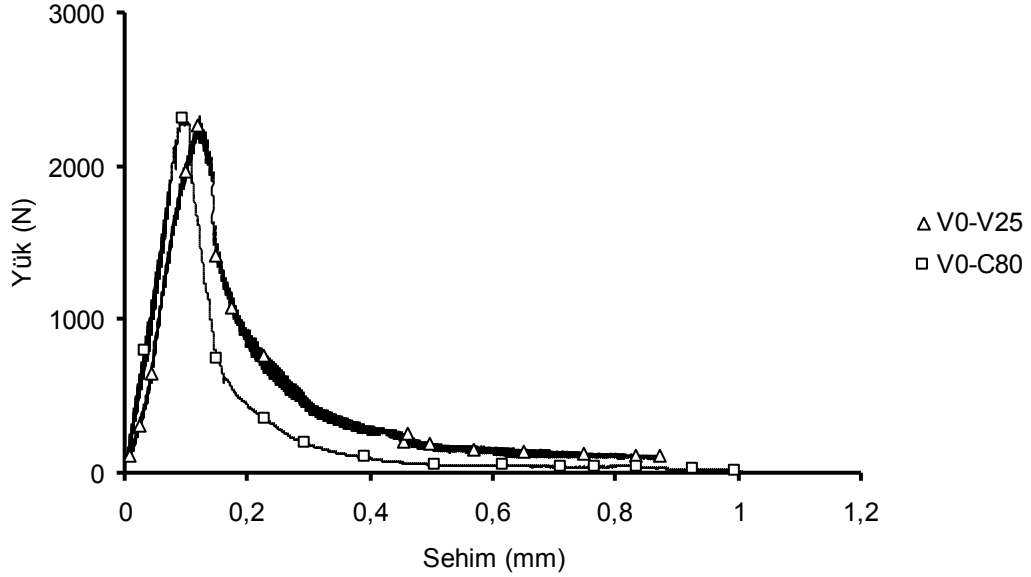
Şekil 5.6: Farklı Miktarda ve Dayanımda Lif İçeren Numunelere Ait Net Eğilme Dayanımı Diyagramı

Normal dayanımlı betonda, tellerin kullanım miktarı 0' dan 57 kg/m^3' e kadar artması eğilme dayanımında %62' ye varan artışa yol açmıştır. Yüksek dayanımlı betonda ise bu artış %146 olmuştur. Çelik tellerin betona eklenmesi ile yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Çelik tel donatılı betonların kırılma süreci, yavaş ilerleyen çatlakların oluşması esnasında tellerin betondan sıyrılmaya çalışması ile olur. Nihai göçme, düzensiz çatlak yayılmasıyla tellerin tamamen betondan sıyrılması ve içsel kayma gerilmelerinin taşıma gücü dayanımını aşmasıyla gerçekleşir. Eğilme dayanımının artmasının sebebi, matris fazında ilk çatlak oluştuktan sonra tellerin betona gelen yükü, tel ile beton arasındaki aderans bölgesinin çatlamasına kadar taşımasıdır (Gao ve diğ., 1997).

Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı yalın betonların deney sonuçlarından elde edilen tipik yük-sehim eğrisi Şekil 5.7' de gösterilmektedir. Tablo 5.1' deki sayısal verilerden de anlaşılacağı üzere, yüksek dayanımlı betona eklenen yüksek dayanımlı lif, gene yüksek dayanımlı betona eklenen düşük dayanımlı liften miktarca daha az olmasına rağmen kırılma enerjisinde daha fazla artışa sebep olmuştur.

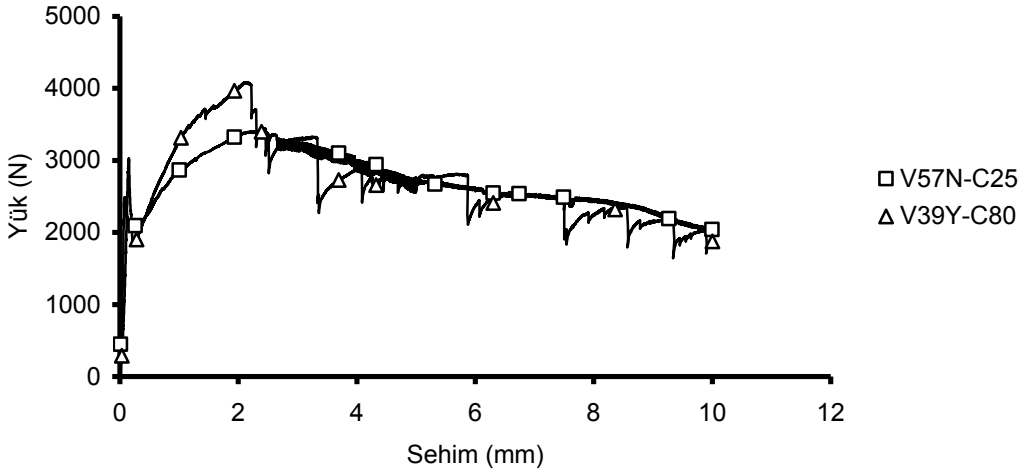
Yük sehim eğrilerinin her bir eğrinin altında kalan alan, malzemenin kırılma enerjisinin değeri olarak tanımlanır. Bu şekle göre yüksek dayanımlı betonun inen kolu daha dik ve daha kısadır. Sonuçta, normal dayanımlı yalın betonun kırılma enerjisi, yüksek dayanımlı yalın betonun kırılma enerjisinden %63 daha fazla

olmaktadır. Bu da yüksek dayanımlı betonun daha gevrek davranış sergilediğini göstermektedir.

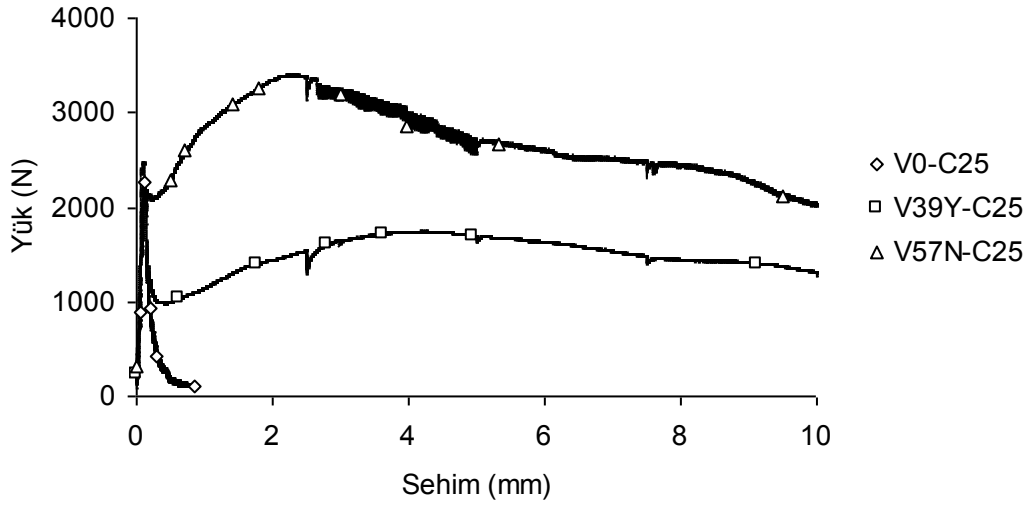


Şekil 5.7: Çelik Tel İçermeyen Normal (C25) ve Yüksek Dayanımlı (C80) Yalın Betonların Yük-Sehim Eğrisi

Şekil 5.5' den görüldüğü üzere, 1 m^3 'te 57 kg normal dayanımlı lif içeren düşük dayanımlı betonun (V57N-C25) kırılma enerjisi, gene 1 $m^{3'}$ de 39 kg yüksek dayanımlı lif içeren, yüksek dayanımlı betonla (V39Y-C80) karşılaştırıldığı zaman kırılma enerjisinde yaklaşık %36' lık bir artış meydana gelmiştir. Bu iki betona ait yük -sehim eğrisi Şekil 5.8' de verilmiştir.

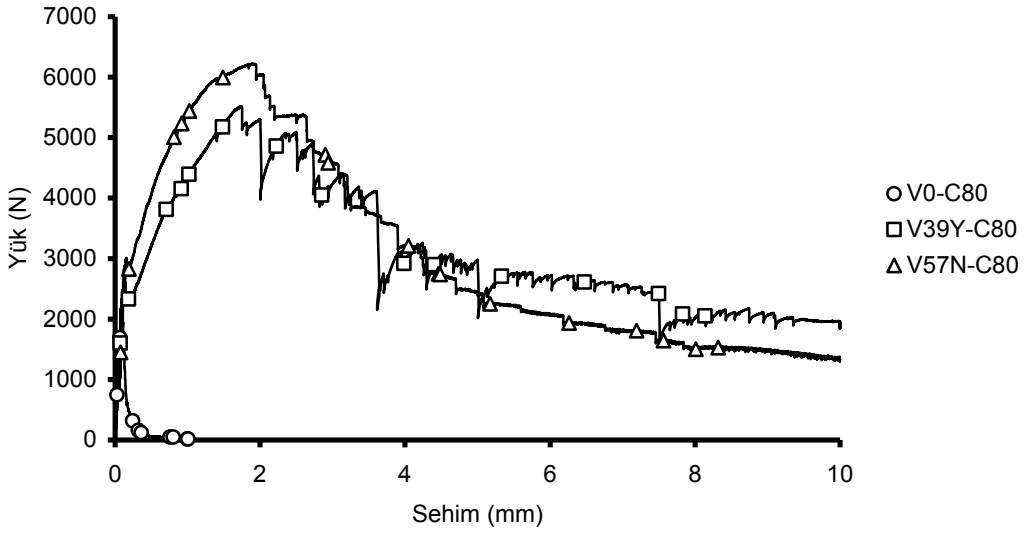


Şekil 5.8: V57N-C25 ve V39Y –C80 Betonlarına Ait Yük (N)- Sehim (mm) Eğrisi



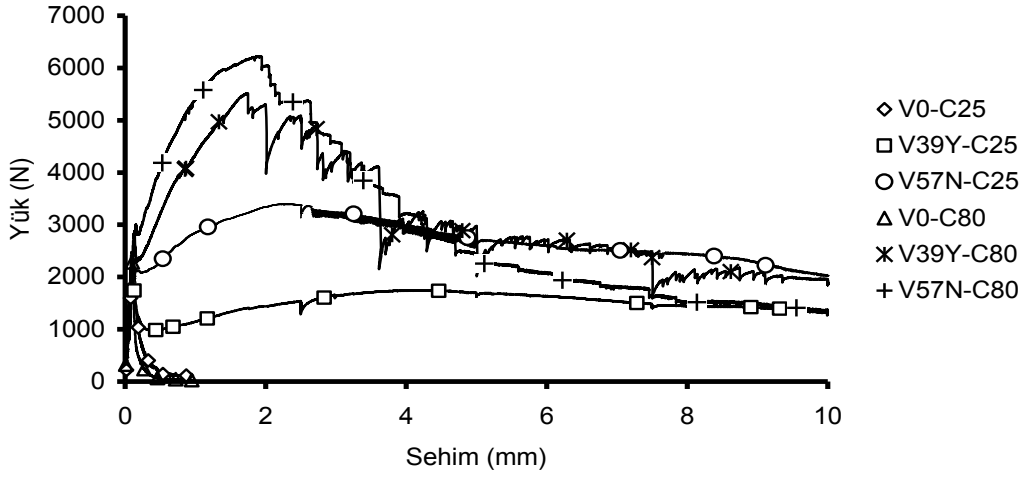
Şekil 5.9: Beton Sınıfı 25 Olan Yalın ve Çelik Tel Donatılı Betonların Yük-Sehim Eğrileri

Şekil 5.9' da görüldüğü üzere, yüksek dayanımlı kancalı uçlu çelik tel içeriği az olan V39Y-C25 numunesinde çatlak oluştuktan sonra geleneksel ÇTDB' nun tipik davranışı oluşmaktadır. Diğer bir değişle maksimum yük ilk çatlak yüküdür. Buna karşın çelik tel içeriği fazla olan ve normal dayanımlı çelik tel içeren V57N-C25 betonunda ilk çatlak oluştuktan sonra yük düşmekte, ancak tekrar artış kaydedilmekte ve şekil değiştirme sertleşmesinin tipik bir göstergesi elde edilmektedir. Bu da yüksek performanslı çelik tel donatılı betonların genel karakterini temsil etmektedir. Balaguru ve Shah, tarafından da belirtildiği üzere V57N-C25 karışımında olduğu gibi çelik tel içeriğinin yüksek olması durumunda matrisin çatlamasından sonra çelik teller artan yükleri taşımaya devam ederler. Matrisin dayanıma katkısının ortadan kalkmasıyla gerilme şekil değiştirme eğrisinin eğimi azalır. Çatlama sonrasındaki davranışa lif oranı ve matris ile lifin aderansı etkili olur. Yükün artmasıyla çatlak miktarı artar ve taşıma kapasitesi liflerin matristen sıyrılmaya başlamasıyla düşer.



Şekil 5.10: Beton Sınıfı 80 Olan Yalın ve ÇTDB ların Yük-Sehim Eğrileri

Şekil 5.10' da görüldüğü gibi yüksek dayanımlı betonda yüksek dayanımlı çelik tellerin kullanılması daha olumlu etki yapmaktadır. Her iki tel içeriğinde de ilk çatlaktan sonra yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun tipik davranışına uygun olarak sehim arttıkça tepe noktası öncesinde belirgin şekil değiştirme sertleşmesi oluşmakta diğer bir deyişle yüksek performanslı kompozit davranışı sergilenmektedir. Beton dayanımının artmasıyla daha az yüksek dayanımlı çelik tel (39 kg/m^3) kullanılmasına karşın fazla miktarlarda (57 kg/m^3) normal dayanımlı lif kullanılan betonun performansına yakın bir seviyeye ulaşılmaktadır.



Şekil 5.11: Tüm Çelik Tel Donatılı Betonlara Ait Tipik Yük-Sehim Eğrileri

Şekil 5.11’ de deneye tabi tutulan tüm çelik tel donatılı betonların yük-sehim eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerin incelenmesinden de anlaşılacağı üzere aynı tel içeriği için beton dayanımının yüksek olması daha fazla süneklik ve daha fazla dayanım demektir. Ayrıca, daha az tel içeriğine sahip yüksek dayanımlı betonun kırılma enerjisi normal dayanımlı fakat daha fazla tel içeren betonun kırılma enerjisinden daha fazladır.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Bu çalışmanın sınırları içinde her bir normal veya yüksek dayanımlı beton sınıfı için elde edilen sonuçlara göre tel içeriğinin basınç dayanımı ve elastisite modülünü fazla etkilemediği anlaşılmaktadır. Normal dayanımlı betona eklenen çelik tel içeriği yarma çekme dayanımını fazla etkilemediği , yüksek dayanımlı betonda ise 39 kg/m^3 yüksek dayanımlı çelik lif ilavesi yarma çekme dayanımını yaklaşık 2 katına çıkarırken, 57 kg/m^3 normal dayanımlı çelik lif ilavesi yarma dayanımını yaklaşık 2,5 katına çıkarmıştır.
- Normal dayanımlı betona 57 kg/m^3 normal dayanımlı çelik lif ilave edilmesi halinde net eğilme dayanımında %62'ye varan artış elde edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonda ise bu miktar çelik tel, %146' lık bir artışa neden olmuştur.
- Tel içeriği yüksek olan normal ve yüksek dayanımlı betonlarda yük – sehim eğrilerinde ilk çatlak oluştuktan sonra eğri tekrar yükselmekte olup yüksek performanslı çelik tel donatılı çimento esaslı kompozit malzemelerin tipik bir davranışı sergilediği görülmüştür. Daha az çelik tel içeriğine sahip olan yüksek dayanımlı beton, normal dayanımlı lif içeriği fazla olana kıyasla daha yüksek kırılma enerjisine sahip olmuştur. Normal dayanımlı ÇTDB'larda kırılma enerjisi yalın betonun kırılma enerjisinin 38 katına çıkmıştır. Yüksek dayanımlı betonda ise bu oran 83 kata yükselmiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda (C80) daha az yüksek dayanımlı çelik tel içeren betonun kırılma enerjisi, daha fazla normal dayanımlı çelik tel içeren betonun kırılma enerjisinden fazladır.

KAYNAKLAR

ACIFC, 1999. Steel Fibre Reinforced Concrete Industrial Ground Floors, Association of Industrial Flooring Contractors, Warwickshire

Altın M., Çöğürcü M.T., Döndüren S.M., 2006. *Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanım Özellikleri için Deneysel Bir Çalışma, Teknik-Online Dergi,Cilt5, Sayı:3*,77-78

Arslan, A. ve Aydın, A.C., 1999. Lifli betonların darbe etkisi altındaki genel özellikleri, *Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu*, 24 Kasım, Sabancı Center, İstanbul.

Balaguru, P.N. and Shah, S.P.,1992. Fiber Reinforced Cement Composites ,McGraw-Hill,Inc,Singapore

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., Ilki A., Taşdemir C., Taşdemir M.A. and Yerlikaya M.,2004. SFRCs for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, *9th International Symposium on Concrete Roads*, 4-7 April **2**, Istanbul, Turkey**.**

Betterman, L.R., Ouyang, C. And Shah, S.P., 1995. Fiber matrix ınteraction in microfiber-reinforced mortar, *Advanced Cement Based Materials*, **2**, 53-61

Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. and Aitcin, P., 1997. Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes, *ACI Materials Journal*, **94**, 286-290.

Chan, Y. and Chu, S., 2004. Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, **34,** 1167-1172

Chang, D-I. and Chai, W-K., 1995. Flexural fracture and fatique behaviour of steel fibre reinforced concrete structures, *Nuclear Engineering and Design*, **156**, 201-207

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.

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

Gettu, R., Schnütgen, B., Erdem, E., and Stang, 2000. "Test and design methods for SFRC" H. A state-of-the-art report, Report of sub-task 1.2, Brite-EuRam Project BRPR - CT98 – 0813 (DG, 12 – BRPR) 55 pp

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.

Halpin, J. C. and Tsai, S. W., 1969. Effects of environmental factors on composite materials, *Technical Report*, **AFML-TR 67423**

Kişin E., 2006. "Elastik Zemine Oturan Çelik Lif ve Çelik Hasır Donatılı Beton Plakların Mekanik Davranışı", *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, Türkiye

Kocataşkın, F., 1991. Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi, *2.Ulusal Beton Kongresi*, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası, (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), sf. 211-226

Koksal, F., Eyyubov, C. ve Özcan, D.M., 2002. Çelik tel içeriğinin betonun mekanik özeliklerine etkisi", *5. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, Eylül , İstanbul, Türkiye, s.169-179.

Koksal, F., 2004. "Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı", *Doktora Tezi*, İstanbul, Türkiye,

Lange-Kornbak, D., ve Karihaloo, B.L., 1998. Design of fibre-reinforced DSP mixes for minimum brittleness, *Advanced Cement Based Materials*, **7**, 89-101.

Ma, J. and Schneider, H., 2002. Properties of Ultra High Performance Concrete, LACER, **7**, 25-32.

Miao, C., Mu, R., Tian, Q. and Sun, W., 2002. Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fibre reinforcement, *Cement and Concrete Research*, **32**, 31-34.

Naaman, E.A. and Najm, H., 1991. Bond-Slip Mechanism of Steel Fibers in Concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, 135-145.

Onaran K., 2006. Malzeme Bilimi, *Bilim Teknik Yayınevi,10 Baskı* **,** 357

Özyurt, N., İlki, A., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A., 2002. Mechanical Behavior of High Strength Steel Fiber Reinforced Concretes with Various Steel Fiber Contents, *in 5th International Congress on Advances in Civil Engineering*, I.T.U, Istanbul, 25-27 September, **2**, 885-894.

Paul Z, Shuaib A. and Michael L., 1996. High-performance concretes a state-of-art report (1989-1994) **FHWA-RD-97-030** .

Patton, M. E. and Whittaker, W.L., 1983. Effect of fiber content and damaging load on steel fiber reinforced concrete stiffness, *ACI Journal*, **80**, No.1, Jan-Feb,13-16.

Ramakrishnan, V., Wu, G. Y., and Hosalli, G., 1989. Flexural fatigue strength, endurance limit, and impact strength of fiber reinforced concretes, *Transportation Research Record*, **No.1226**

Richard, P. and Cheyrezy, M., 1995. Composition of Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1501-1511.

Shah, S. P. and Rangan, B. V., 1971. Fiber reinforced concrete properties, *ACI Materials Journal*, Vol. 68, **2**, 126-135.

Soroushian, P. and Bayasi, Z., 1991. Fiber-type effects on the performance of steel fiber reınforced concrete, *ACI Materials Journal*, Mar-Apr, Vol. 88, **2**, 129-134

Swamy, R.N., 1971. Fibre reinforcement of cement and concrete evaluation of fibre reinforcement cement and composites, *Materials and Structures*, 19 FRC Commitee, Vol.8, **45**, 235-254.

Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F., 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, İTÜ Dergisi, **1**, 125-144.

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

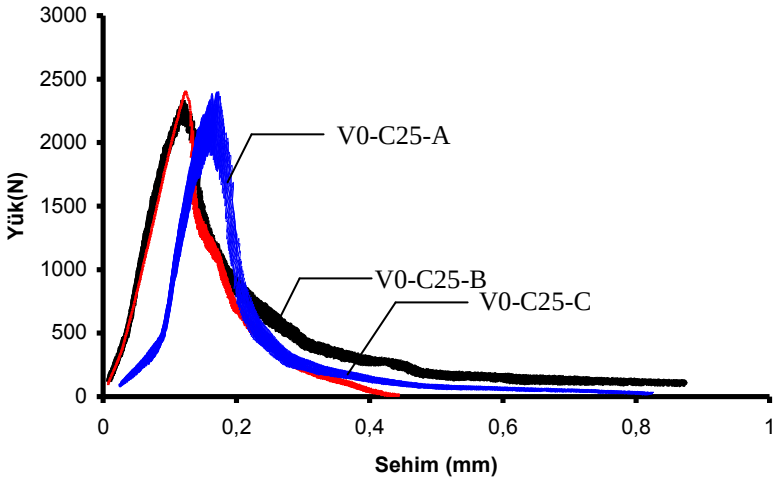
Taşdemir, M.A., Atahan H.N., Gökalp İ., 2006. Kendiliğinden Yerleşen Normal ve Hafif Çelik tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı, *Technical Papers*,66-67

Taşdemir, M.A., Karihaloo, B.L., Bayramov, A.N., Yerlikaya, M. ve Sönmez, R., 2004. Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi İçin yüksek Dayanımlı / Yüksek Performanslı Betonlar, Yüksek Performanslı Lif Donatılı Kompozitler ve Kendiliğinden Yerleşen Betonlar, *14. ERMCO Kongresi*, Helsinki, 16-18 Haziran

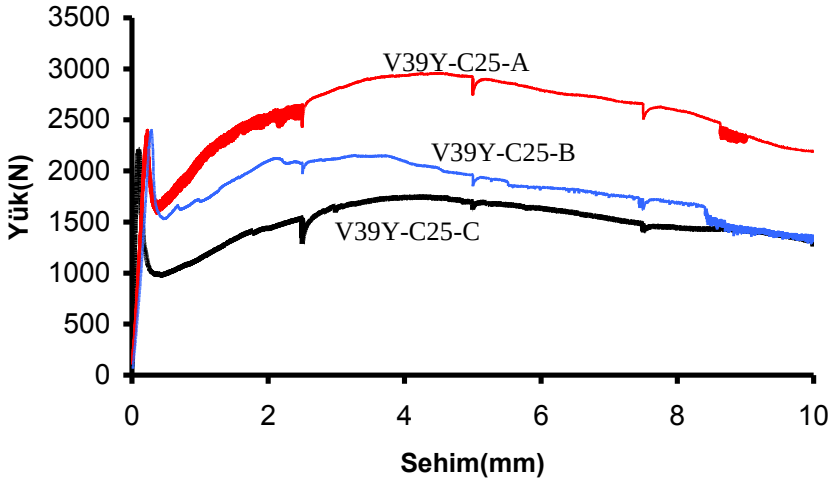
TFHRC , 2000 http://www.tfhrc.gov/structure/hcp2/chap5.htm, Turner-Fairbank Highway Research Center, Library, Chapter 5 – *High Performance Concretes*

Trottier, J.-F. and Banthia, N., 1994. Toughness characterization of steel fiber reinforced concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6, **2**, 264-289.

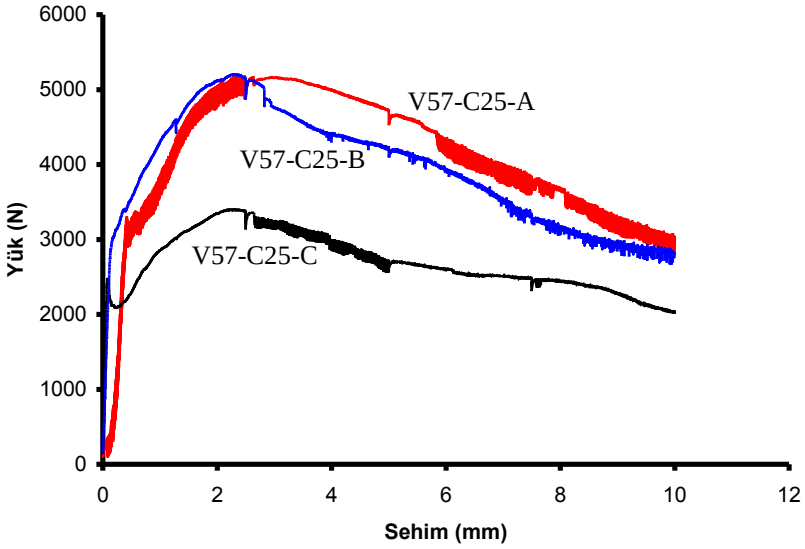
EKLER



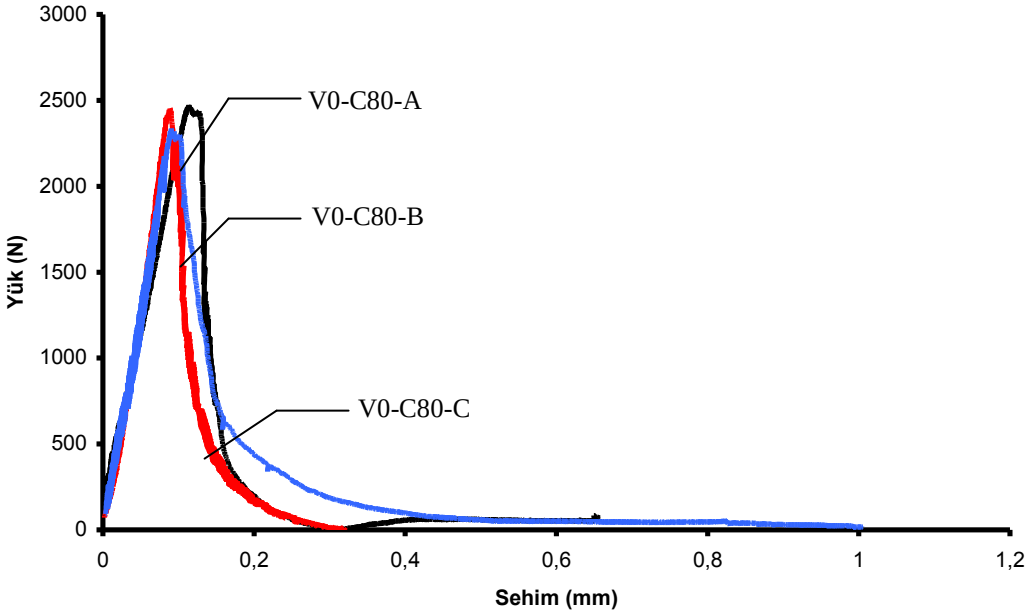
Şekil A.1: V0-C25 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi



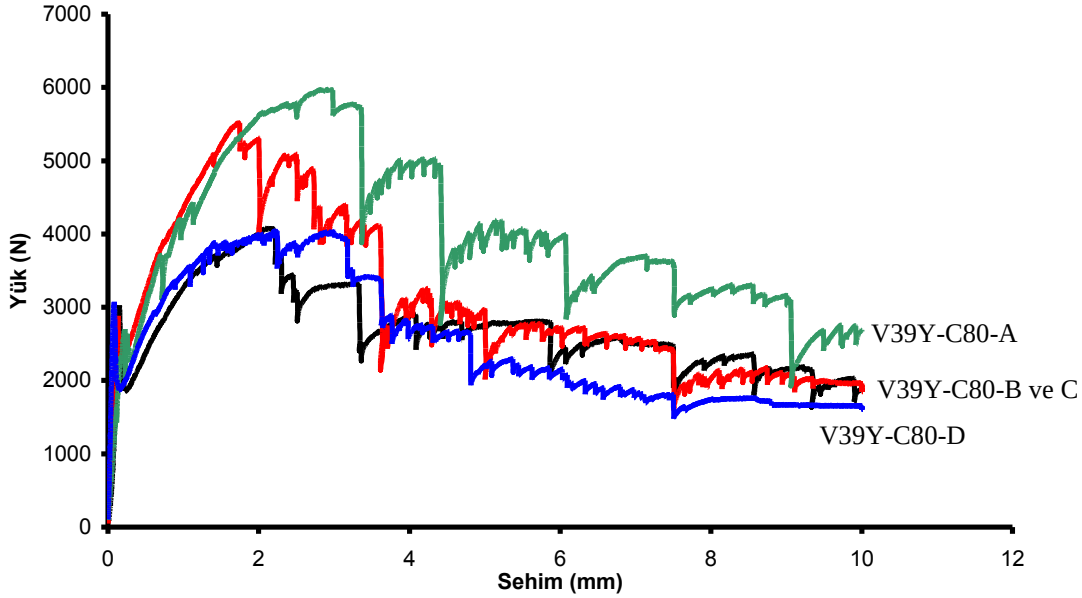
Şekil A.2:V39Y-C25 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi



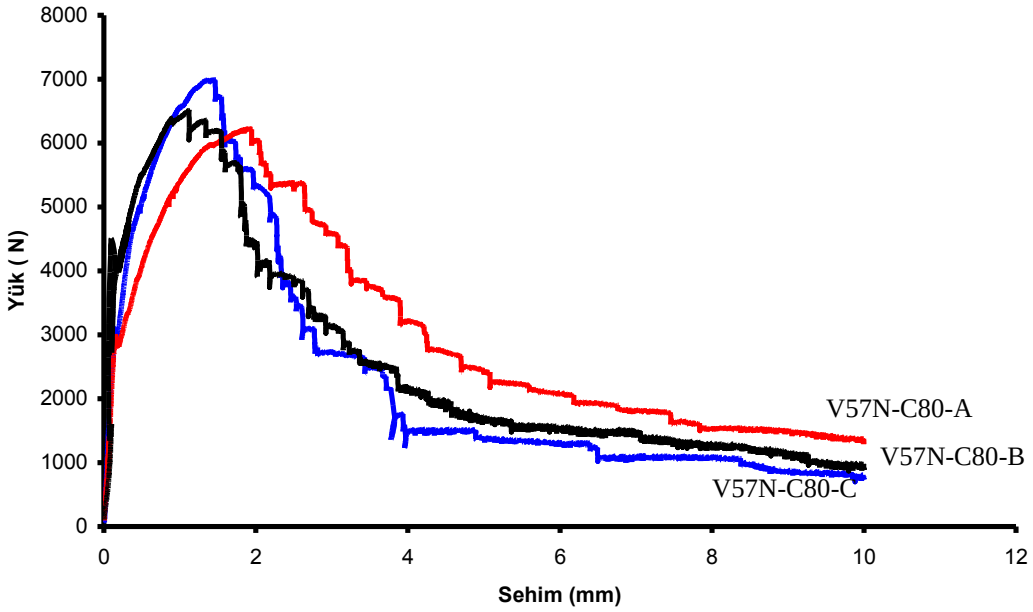
Şekil A.3: V57N-C25 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi



Şekil A.4: V0-C80 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi



Şekil A.5: V39Y-C80 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi



Şekil A.6: V57N-C80 Kodlu Numunelerin Yük Sehim İlişkisi

ÖZGEÇMİŞ

D. Sanem Sarı , 1982 yılında İstanbul' da doğdu. Orta ve lise öğrenimini Eskişehir'de tamamladı. 2001 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 2001-2002 öğretim yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İngilizce Hazırlık Bölümünü tamamladıktan sonra 2002-2003 öğretim yılında başladığı lisans öğrenimini 2006 yılında tamamladı. 2006 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilimdalı' nda Yapı Mühendisliği yüksek lisans öğrenimine başladı.