

Ali İhsan ATEŞ

Yüksek Lisans Tezi

KÜ 2008

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR

ALİ İHSAN ATEŞ

EYLÜL 2008

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR

ALİ İHSAN ATEŞ

EYLÜL 2008

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü'nün onayı.

16/09/2008

Doç. Dr. Burak BİRGÖREN

Müdür V.

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa Y. KILINÇ

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İlter TAŞKIRAN

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr.

Mustafa Y. KILINÇ

Yrd. Doç. Dr.

Hüseyin İlter TAŞKIRAN

Yrd. Doç. Dr.

İlhami DEMİR

ÖZET

ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR

ATEŞ, Ali İhsan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İlder TAŞKIRAN

Eylül 2008, 121 Sayfa

Bu tez çalışmamızda; betonarme ve kompozit yapılarda Mikro Donatı Sistemlerinin kullanımı hakkında araştırmalarda bulunarak bu alternatif donatı türünün özellikleri incelenmiştir. Özellikle Mikro Donatı Sistemlerinin başlıca türü olan Çelik Lif Katkılı betonların uygulama özellikleri incelenmiş olup, ana yapı kriterleri olan; Basınç Dayanımı, Çekme Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Tokluk, Yorulma Dayanımı, Darbe Dayanımı, Rötire ve Durabilite, üzerindeki katkıları incelenerek uygulama ve tasarıma esas özelliklerinin tespiti için değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Son olarak Çelik Lif Donatılı betonların, yapısal uygulamalardaki güncel durumu ortaya konularak, tasarım ve uygulamada görev alan meslektaşlarımıza malzeme kullanımı hakkında genel bilgiler verilmesi planlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikro Donatılı Betonlar, Çelik Lif Donatılı Betonlar, Yapı Kriterleri, Durabilite

ABSTRACT

STEEL REINFORCED CONCRETE

ATEŞ, Ali İhsan

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Hüseyin İlter TAŞKIRAN

September 2008, 121 Pages

In this study; the features of this alternative reinforcement type has been examined by doing research on use of Micro Reinforcement Systems in concrete and composite. As a main product species of Micro Reinforcement Systems properties of Steel Reinforced Composite Concrete has been studied and an evaluation is done to find out principal application and design properties its positive effects on main structural criteria such as Strength to Pressure, Resistance to Axial Force, Resistance to Bending, Toughness, Impact Resistance, Rotre and Durability.

Finally, via outlining actual status of Steel Reinforced Concrete in structural applications, it has been planned to provide general information over material usage to our fellow engineers who are functioning in design and application.

Key Words: Micro Reinforced Concrete, Steel Fiber Reinforced Concrete,
Structural Criteria, Durability

TEŞEKKÜR

Lisans ve Yüksek Lisans Eğitimim boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım; Sayın Prof. Dr. Mustafa Yılmaz KILINÇ'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman YILDIZ'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Orhan DOĞAN'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali Payidar AKGÜNGÖR'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. İlhami DEMİR'e, ve diğer tüm Araştırma Görevlisi hocalarıma,

Tez çalışmam esnasında her türlü bilimsel ve manevi desteği sunan, tez danışmanım ve değerli hocam; Sayın Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İlter TAŞKIRAN'a

Son olarak da; en yakın destekçim ve hayat arkadaşım biricik eşime ve şuan henüz bir buçuk yaşında olan dünyalar tatlısı oğluma,

Yürek dolusu sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Genel.....	5
1.2. Mikro Donatılı Betonlar.....	5
1.2.1. Mikro Donatı Olarak Liflerin Kullanımının Tarihçesi.....	6
1.2.2. Mikro Donatı Olarak Kullanılan Lifler	7
1.2.3. Mikro Donatılı Betonların Üretim Yöntemleri.....	11
1.2.3.1. Ön Karıştırma Yöntemi.....	11
1.2.3.2. Elle Yayma Yöntemi.....	12
1.2.3.3. Hamur Yöntemi.....	12
1.2.3.4. Püskürtme Yöntemi.....	12
1.2.3.5. Püskürtme Betonu Karışımı Yöntemi.....	12
1.2.4. Mikro Donatılı Betonlar İle Normal Donatılı Betonların Karşılaştırılması.....	13
1.3. Çelik Lif Donatılı Betonlar.....	18
1.3.1. Çelik Liflerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....	19
1.3.2. Çelik Lifli Betonların Hazırlanmasında Dikkat Edilecek Hususlar.....	23

1.3.2.1. Hazırlanan Çelik Lifli Betonların Kontrolü	25
1.3.3. Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı.....	26
1.3.4. Çelik Lifli Beton Bulamacının Uygulama Teknikleri.....	31
1.3.4.1. Kıvam.....	31
1.3.4.2. Karıştırma	33
1.3.4.3. Kalıba Yerleştirme	37
1.3.4.4. Perdahlama.....	37
1.3.4.5. Kür ve Koruma	39
1.3.5. Çelik Lifli Betonun Özellikleri.....	40
1.3.5.1. Basınç Dayanımı.....	40
1.3.5.2. Çekme Dayanımı	43
1.3.5.3. Eğilme Dayanımı	47
1.3.5.4. Darbe Dayanımı.....	52
1.3.5.5. Yorulma Dayanımı	59
1.3.5.6. Durabilite.....	61
1.3.5.7. Tokluk.....	63
1.3.5.8. Rötire.....	73
1.4. Çelik Lif Donatılı Betonların Kullanım Alanları.....	75
1.4.1. Çelik Lif Donatılı Betonların Yapısal Uygulamalarda Kullanımı.....	77
1.5. Çalışmanın Amacı.....	83
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	86
2.1. Genel.....	86
2.2. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	87
2.2.1. Agregası.....	87

2.2.2. Çimento.....	88
2.2.3. Karışım Suyu.....	89
2.2.4. Kimyasal Katkılar.....	90
2.2.4.1. Su Azaltıcı (Akışkanlaştırıcı).....	90
2.2.4.2. Priz Geciktirici.....	90
2.2.5. Hazır Beton.....	90
2.2.5.1. Kullanılan Beton Karışımı.....	93
2.2.6. Çelik Tel.....	93
2.2.6.1. Kullanılan Çelik Tellerin Teknik Özellikleri.....	94
2.3. Çelik Lif Donatılı Beton Uygulama Yöntemleri.....	94
2.3.1. Beton Uygulanacak Alanın Hazırlığı.....	94
2.3.2. Hazır Karışım Betona Çelik Lif İlave Edilmesi.....	95
2.3.3. Betonun Kalıba Alınması ve Perdahlama.....	97
2.3.4. Kür ve Koruma İşlemi.....	98
3. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	100
3.1. Genel.....	100
3.2. Araştırma Bulgularının Derlenmesi.....	100
3.2.1. Mikro Donatılı Beton Laboratuar Deneyleri.....	100
3.2.1.1. Taze Beton Deneyleri.....	100
3.2.1.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	101
3.2.2. Mikro Donatılı Beton Şantiye Gözlem ve Deneyleri.....	105
4. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	107

KAYNAKLAR.....	111
EK-1.....	116
EK-2.....	117
EK-3.....	118
EK-4.....	120

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

1.1.	Lif Çeşitleri ve Mekanik Özellikleri.....	8
1.2.	Lifli Betonlarda Geleneksel Betonlara Kıyasla Mekanik Özelliklerde Meydana Gelen Artışlar	17
1.3.	Çelik Lifli Betonda Bulunması Gereken İnce Malzeme Miktarı	24
1.4.	Betona İlave Edilebilecek Maksimum Tel Miktarı (kg/m^3).....	24
1.5.	Kırılma Darbe Sayıları.....	57
1.6.	Aderans Dayanımları İle Kırılma Enerji Değerleri.....	59
1.7.	Tokluk İndekslerinin Değerlendirme Kriterleri.....	68
1.8.	Enerji Yutma Kapasiteleri	70
2.1.	Çok Kullanılan Beton Sınıflarının Teknik Değerleri.....	92
3.1.	Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları (7 Günlük).....	103
3.2.	Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları (28 Günlük).....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

1.1.	Değişik Tipteki Lifli Betonların Çekme Etkisi Altındaki Davranışları.....	10
1.2.	Betonda 1, 2 ve 3. Boyutlarda Donatı Dağılımları.....	14
1.3.	Lifli Betonlarda Tipik Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramları.....	15
1.4.	Çelik Lif Çeşitleri	22
1.5.	Çelik Lifli Betonlarda Gerilme Aktarımı.....	27
1.6.	Normal ve Lifli Betonun Yük Altındaki Davranışı	29
1.7.	Çatlak Köprülenmesine Farklı Lif Boyutlarının Etkisi.....	31
1.8.	Slump / Ve-Be Deneyleri ve Ters Çevrilmiş Koni / Ve-Be Deneyleri Arasındaki İlişki.....	33
1.9.	Çelik Liflerin Santralde Kuru Karışıma Eklenmesi.....	35
1.10.	Çelik Liflerin Şantiyede Elle Transmiksere Eklenmesi.....	36
1.11.	Çelik Liflerin Şantiyede Konveyörle Transmiksere Eklenmesi.....	36
1.12.	Dar Alanda Satıh Vibratörü İle Perdahlama.....	38
1.13.	Geniş Endüstriyel Zeminde Perdahlama.....	39
1.14.	Lif Hacmi Değişiminin Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisine Etkisi.....	41
1.15.	Lif Görünüm Oranı (Uzunluk / Çap) Değişiminin Gerilme- Şekil Değiştirme Eğrisine Etkisi	41
1.16.	Basınç Dayanımına V_f ve l/d 'nin Etkisi	43
1.17.	Farklı Şekillerde, Lif İçeren Betonların Çekmede Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri	45
1.18.	Çelik Lifli Betonda Tipik Eğilmede Yük-Deplasman Eğrisi.....	48

1.19.	Moment-Eğrilik Bağıntısına $\tau_d(L/d)$ Ve (V_f) 'nin Etkisi.....	49
1.20.	Çelik Lifli Betonlarda Lif l/d Oranının ve Lif İçeriğinin Kırılma Enerjisine Etkisi	54
1.21.	Çelik Lifli Betonlarda Yük-Deplasman Eğrisi ve I_5 , I_{10} ve I_{30} İndeksleri İçin Tanımlanmış Alanlar	65
1.22.	I_5 , I_{10} ve I_{30} İndekslerinin Hesaplanmasında Baz Alınan Tanımlanmış Yük-Deplasman Alanlarının Şematik Gösterimi	66
1.23.	Eğilme Tokluğuna V_f ve l/d'nin Etkisi.....	72
1.24.	Ucu Kancalı Çelik Liflerin Hacim Değişiminin Rötire Üzerine Etkisi.....	75
1.25.	Çelik Lif ile Geleneksel Donatının Birlikte Kullanıldığı Kirişlerde Moment-Şekil Değişirme Eğrileri.....	79
1.26.	Kolon-Kiriş Birleşim Bölgesinde Etriyeli ve Çelik Lifli Birleşim Donatı Düzeni.....	82
2.1.	Agrega Örneği.....	87
2.2.	Uygulamada Kullanılan Çelik Lifler.....	93
2.3.	Uygulama Yapılacak Alanın Hazırlığı.....	95
2.4.	Şantiyede Hazır Betona Çelik Lif Ekleme İşlemi.....	96
2.5.	Mikro Donatılı Betonun Kalıba Alınması.....	98
2.6.	Çelik Tel Donatılı Beton Karışımı.....	99
4.1.	Betonarme Yapıların İnşasında Yapılan Hatalar.....	108

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihindeki yapı üretim çalışmalarında değişik malzemeler kullanıla gelmiştir. Fakat tarih boyunca taş ve türevi malzemeler, yapı malzemeleri arasında hep en ön sırada yerlerini almışlardır. Ancak zamanla yapı üretiminde kullanılan malzemelerin özüne sağdik kalınarak geliştirilmesi zorunluluğu otaya çıkmış ve kullanım rahatlıkları ile birlikte malzemelere daha büyük ve kompleks yüklere daha uzun süre dayanım özelliği kazandırılmaya çalışılmıştır.

Yapıların ana malzemesi olan taşın, taşıma ve işleme zorluklarından dolayı aynı dayanım ve taşıma değerlerini sağlayabilen ancak daha hafif ve işlenebilir yapı malzemeleri üretilmeye çalışılmıştır. Birkaç farklı malzemenin uygun miktar ve şartlarda birleştirilmesi ile oluşturulan malzemelerde doğal olarak karışımı oluşturan alt bileşenler yük ve zorlanma etkisi altında birleşim yüzeylerinden ayrılmaya zorlanmaktadır. Bu grubun en eski ve köklü malzemesi sayılabilecek toprak kerpiç buna en güzel örnektir. Aynı ayrı değerlendirildiklerinde çok düşük dayanım değerlerine sahip bulunan; toprak, su, saman ve taş bir araya gelip uygun bir malzeme ile yapıştırıldıklarında gayet yüksek yük taşıma kapasitesi olan bir yapı elemanına dönüşebilmektedir.

Tam bu noktada ise; ihtiyacı ilk etapta sağlayan bu malzemenin zaman içinde bütünlüğünü koruma ve aşınmaya karşı koyabilme özelliklerinin iyileştirilmesi gerekliliği karşımıza çözülmesi gerekli bir sorun olarak çıkmaktadır. Söz konusu bu problem zaman içinde çözülmüş ve malzeme içine yapışmayı kuvvetlendirmek ve ayrışmayı önlemek amacıyla saman, tüy, ot gibi bazı malzemeler konulmuştur.

Teknolojinin ilerlemesi ve özellikle çimentonun icadı ile birlikte yapı üretim sektörü çok farklı ve rahatlatıcı bir sürecin içine girmiştir. Özellikle taşıma ve şekil verme yönlerinden problem yaşanan taşın yerini çimento ile istendiğinde birleştirilen küçük taş partiküllerinden oluşan beton almıştır. İlerleyen zamanlarda ise; beton malzemesinin yapı imalatında karşılaşılan dezavantajları çözülmeye çalışılmıştır. Öncelikle beton malzemesinin şekil verilme ve basınca dayanım özellikleri kaybettirilmeden malzemeye çekme ve eğilme yüklerine karşı koyabilecek özellikler kazandırılmaya çalışılmış ve bu ihtiyaçlar doğrultusunda çelikle kuvvetlendirilerek betonarme sistemler oluşturulmuştur. İlerleyen zamanlarda ise; betonarme yapıların değişik problemlerinden olan; suya maruz kalan bölgelerde korozyon, aşınma ve dağılma gibi değişik problemlerine çözümler aranmıştır.

Beton, çekme ve eğilme yüklerine karşı oldukça zayıftır. TS-500 Standartlarına göre bu değer maksimum düzeyde basınç dayanımının % 10'u mertebelerinde kabul edilmiştir. Bu nedenle beton, direnç gösterebileceğinden fazla çekme veya eğilme yükleri ile karşılaştığı takdirde kolayca çatlayabilmekte, bu çatlaklar beton elemanın göçmesine veya beton eleman içerisine zararlı sıvı ve gaz girişine açık bir ortam oluşturmaktadır. Bu da ileriki aşamalarda önemli durabilite sorunlarının yaşanmasına neden olabilmektedir.

Özellikle beton yol ve hava limanları gibi yerlerde beton elemanlar üzerinde önemli ölçüde darbe etkileri görülür. Betonun darbe etkisine karşı koyabilmesi için betonun tokluğunun yüksek olması gerekir. Aksi takdirde beton eleman üzerine gelen darbe etkileri sonucu, gevrek bir malzeme olan beton kolaylıkla çatlayıp ileriki aşamada dağılacaktır. Darbe etkilerinin yoğun olduğu bu gibi yapılarda betonun tokluğunu arttırıcı teknikler uygulanmalıdır.

Beton, farklı malzemelerden oluşan kompleks bir yapıya sahiptir. Çimento, su, agrega ve gerektiğinde kimyasal ve mineral katkıların eklendiği, içindeki agregaların rastgele dağıldığı heterojen bir yapıdadır. Bu heterojen yapı, betonun iç yapısında farklı gerilmelere neden olur. Farklı gerilmeler, özellikle en zayıf bölge olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyinde (geçiş bölgesi) oluşur. Özellikle bu hassas bölgede başlayan çatlaklar, dıştan gelen gerilmelerin de etkisiyle ilerleme eğiliminde bulunurlar. Bu aşamada iken çatlakların kontrol altında tutulması çatlağın ilerlemesini durduracak ve daha sonra oluşabilecek zararlı oluşumlar önlenmiş olacaktır.

Tam bu noktada, yapı malzemeleri tasarımında farklı bir yaklaşıma geçilmesi zorunluluğu ortaya çıkmış ve yeni tasarım kriterleri ile üretilen bu bileşimler kompozit malzemeler olarak adlandırılmıştır. Kompozit malzemeler özet olarak; birden fazla malzemenin birbirlerinin dezavantajlarını egale etmek üzere bir arada kullanılmasından oluşan özel bileşimli yapılar olarak tanımlanabilmektedir. Yapı sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin önemli bir kısmı geleneksel yapı malzemesi üretiminde katkı malzemesi olarak görev alan; saman, ağaç yongası, kuş tüyü, hayvan kılı gibi malzemelerden esinlenerek üretilen yapay liflerin geleneksel beton ile uygun şartlarda karıştırılmasından oluşturulmaktadır.

Betonda yapay lif kullanımı sayesinde betonun iyi performans gösteremediği çekme, eğilme, darbe, yorulma ve aşınma dayanımı, deformasyon kapasitesi, çatlak sonrası yük taşıma özelliği ve tokluk gibi özellikleri önemli derecede iyileştirilebilmektedir. Liflerin betona sağladığı üstün performans ile birlikte beton daha güvenilir bir yapı malzemesi haline alarak kullanım alanı da genişlemiştir. Geleneksel betona ilave edilen camsı, sentetik, karbon, çelik vb. liflerin en büyük

etkisi betonda oluşan çatlakların gelişimini engellemesidir. Bu sayede betonun yapısında oluşan içsel gerilmelerin beton tarafından karşılanamamasından dolayı meydana gelen mikro ölçekteki çatlakların genişlemesi ve ilerlemesi, lifler tarafından sağlanan gerilme transferi ile önlenmiş olur. Lifler, çimento hamuru fazında oluşan gerilmelerin bir kısmını miktarlarına ve geometrik şekillerine bağlı olarak kendileri taşır, diğer kısmını da matrisin sağlam bölgelerine aktarırlar. Lifli betonun gerilme altında gösterdiği bu davranış, lifli betonu geleneksel betona kıyasla üstün kılar.

Bu tez çalışması dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci Bölümde; Giriş adı altında; tez çalışmasının amacı ve tez konusunun literatürlerden geniş bir kapsam içinde araştırılarak ilgili bilgilerin derlenmesi yapılmış, İkinci Bölümde; Materyal ve Yöntem başlığı altında ilgili teze konu olan malzeme ve uygulanan yöntemler açıkça belirtilmiş, Üçüncü Bölümde ise; Araştırma Bulguları ve Tartışma başlığı altında tez çalışması sonucunda elde edilen bilgiler derlenerek kıyaslamalarda bulunulmuş ve son olarak ta, Dördüncü Bölümde; elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.1. Genel

Çalışmamızın bu bölümünde; çelik lif donatılı betonların üretilme gerekçeleri ve teknikleri ile birlikte, özellikleri, mekanik ve fiziksel yapıları, üretim teknikleri, çelik liflerin beton içindeki davranışları, çelik lif katkılı taze ve sertleşmiş betonun özellikleri ile çelik lifli betonların yapısal uygulamalardaki kullanım alanları incelenerek derlenmiştir.

1.2. Mikro Donatılı Betonlar

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenleri ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan betonun içerisine değişik tekniklerle ve değişik oranlarda plastik, çelik, polipropilen vb. liflerin ilavesiyle elde edilen betona 'lifli beton' denir. ⁽¹⁾

Lifli beton üretimine duyulan ihtiyaç, geleneksel betonun kullanım sırasında karşımıza çıkan zayıf yönlerinin giderilmek istenmesindedir. Bu şekilde kullanılan liflerin betona sağladığı gelişme ile betonun, tokluğu, darbe yüklerine karşı direnci, eğilme ve çekme kuvvetlerine karşı direnci artırılmış olur.

Geleneksel betonun içine doğal yada yapay lif ilavesiyle meydana getirilen lifli beton, görünüşte geleneksel beton karışımına benzese de, çeşitli yükler altında gösterdiği davranış ve performans bakımından geleneksel betondan oldukça farklıdır. Beton içerisinde meydana gelen farklı gerilmeler, malzeme içerisindeki mikro çatlaklar nedeniyle düzensizdirler. Beton içerisine katılan lifler, matris fazını takviye ederek beton içerisinde, üzerlerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak rol oynarlar. Beton içerisinde üç boyutlu olarak dağılmış olan liflerin betondaki çatlak zonlarına bitişik olmasından dolayı lifler, matristeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri kendi üzerlerine alarak matrisin çatlama bölgesine naklederler. ⁽²⁾

Lifli betonlarda, betonun yük altında gösterdiği maksimum çatlama deformasyonu geleneksel betona oranla önemli bir artış gösterir. Maksimum yükten sonra, lifli betonlarda, artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre çok daha yavaştır. Dolayısıyla, liflerin matristen ayrılması ve uzamaları nedeniyle emilen enerji, lifli betonlarda oldukça fazladır. (3)

Lifli betonlarda, beton bileşimine giren parametreler içerisinde beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörler, lifin narinlik oranı ve lifin miktarıdır. Lifli betonun üretilmesinde karıştırma ve yerleştirme gibi aşamalarda lifin narinlik oranı önemli olmaktadır. Genellikle beton karışımlarında kullanılan çelik liflerin narinlik oranı 50 ile 100 arasında değişmektedir. Bu oran ne kadar büyük olursa karışım içerisinde topaklanmanın oluşması ve liflerin homojen dağılmaması ihtimali yükselir. Karışıma katılan lif miktarı da betonun işlenebilme özelliğini önemli ölçüde etkilemektedir.

Genellikle beton karışımlarında en uygun lif yüzdeleri betonun toplam hacminin % 0.5 ile 2.5'i arasındadır. Beton bileşimine katılan liflerin çeşidi ne olursa olsun liflerin homojen olarak dağılması ve beton karıştırıldıktan sonra da bu dağılımın bozulmaması gerekmektedir. (4)

1.2.1. Mikro Donatı Olarak Liflerin Kullanımının Tarihçesi

Eğilme ve çekme kuvvetlerine maruz yapı malzemelerini güçlendirmek için liflerin kullanımı çok eski zamanlara dayanmaktadır. Günümüzden yaklaşık 3500 yıl öncesi, Bağdat yakınlarında inşa edilmiş 57 metre yüksekliğindeki “Aqar Quf” kulesinin yapımında güneşte pişirilmiş tuğlalarda saman kullanıldığı tespit edilmiştir. (5) Bazı kaynaklara göre saman takviyeli kil harcı kullanımı, günümüzden 4500 yıl öncesine dayanmaktadır. (6) Eski çağlardan beri kullanılan kerpiç

malzemesinde, kil hamuru ile birlikte bitkisel liflerin (genellikle saman), bazı sıva uygulamalarında da keten ve kenevir liflerinin ve at kuyruğu, kuş tüyü gibi hayvansal liflerin kullanıldığı bilinmektedir.

Günümüzde lif kullanımı, 1898 yılında Hatschek işleminin bulunmasından sonra asbest liflerinin çimento hamuru ile birlikte ticari alanda kullanılmasıyla yaygınlaşmıştır. Daha sonraları asbest liflerinin insan sağlığı açısından zararlı olduğunun açığa çıkmasıyla 1960'lı ve 1970'li yıllarda alternatif lif çeşitleri piyasaya sürülmüştür. 1960'ların başlarında Amerika'da çelik liflerin betonda donatı malzemesi olarak kullanımına başlanmıştır. ⁽⁷⁾

Sovyetler Birliği'nde 1950'lerin sonlarından, İngiltere'de 1966 yılından itibaren cam lifi ile donatı, buna uygun matris malzemesinin seçimi ve donatıda kullanılacak cam lifinin özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır.

Özellikle, betonda alkali ortamda tahrip olan liflerin yerine alkali ortama dayanıklı cam liflerinin üretilmesine başlanmıştır. Bu dönemlerde polipropilen, naylon gibi sentetik lifler ve karbon liflerin uygulanabilirliği konusunda çalışmalar yürütülmüştür. Fakat bu liflerin o yılların teknolojisiyle cam lifler ve çelik lifler kadar üretiminin kolay olmaması, buna bağlı olarak maliyetlerinin daha yüksek oluşu nedeniyle çelik tel ve cam lifi önemini korumuştur.

1.2.2. Mikro Donatı Olarak Kullanılan Lifler

Donatı malzemesi olarak kullanılan bu lifler (çelik, karbon, plastik vb.) çeşitli malzemelerden farklı tip ve boyutlarda üretilmektedirler. Kullanılan lif malzemesini belirleyici kriter olarak lifin tipi ile lifin çapı ve lifin boy/çap oranı olan narinlik oranı

kullanılır. Lifli betonlarda kullanılan lif çeşitleri ve mekanik özellikleri Çizelge 1.1.'de verilmiştir. ⁽⁵⁾

Çizelge 1.1. Lif Çeşitleri ve Mekanik Özellikleri (5)

Lif Tipi	Çap (µm)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Elastisite Modülü (kN/mm ²)	Çekme Dayanımı (kN/mm ²)	Kopma Uzama Oranı (%)
Çelik	5 – 500	7.84	200	0.5 – 2	0.5 – 3.5
Cam	9 – 15	2.60	70 - 80	2 – 4	2 – 3.5
Polipropilen	20 – 200	0.90	5 – 77	0.5 – 0.75	8
Naylon	-	1.10	4	0.9	13 - 15
Karbon	9	1.90	230	2.6	1
Asbest	0.02 – 0.4	3.20	164 - 196	3.1 – 3.5	2 – 3
Krokidolit	0.02 – 0.4	3.40	196	3.5	2 – 3
Krositol	0.02 – 0.4	2.60	164	3.1	2 – 3
Polietilen	-	0.95	0,30	0.7*10 ⁻³	10
Selüloz	-	1.20	10	0.3 – 0.5	-
Ahşap lif	-	1.50	71	0.9	-
Akrilik	18	1.18	14 – 19.5	0.4 – 1	3
Çimento Matrisi	-	2.50	10 - 45	3.7*10⁻³	0.02

Lifli betonlarda donatı malzemesi olarak kullanılan liflerin, istenilen performansı gösterebilmesi için matris içerisinde homojen dağılım göstermesine özen gösterilmelidir.

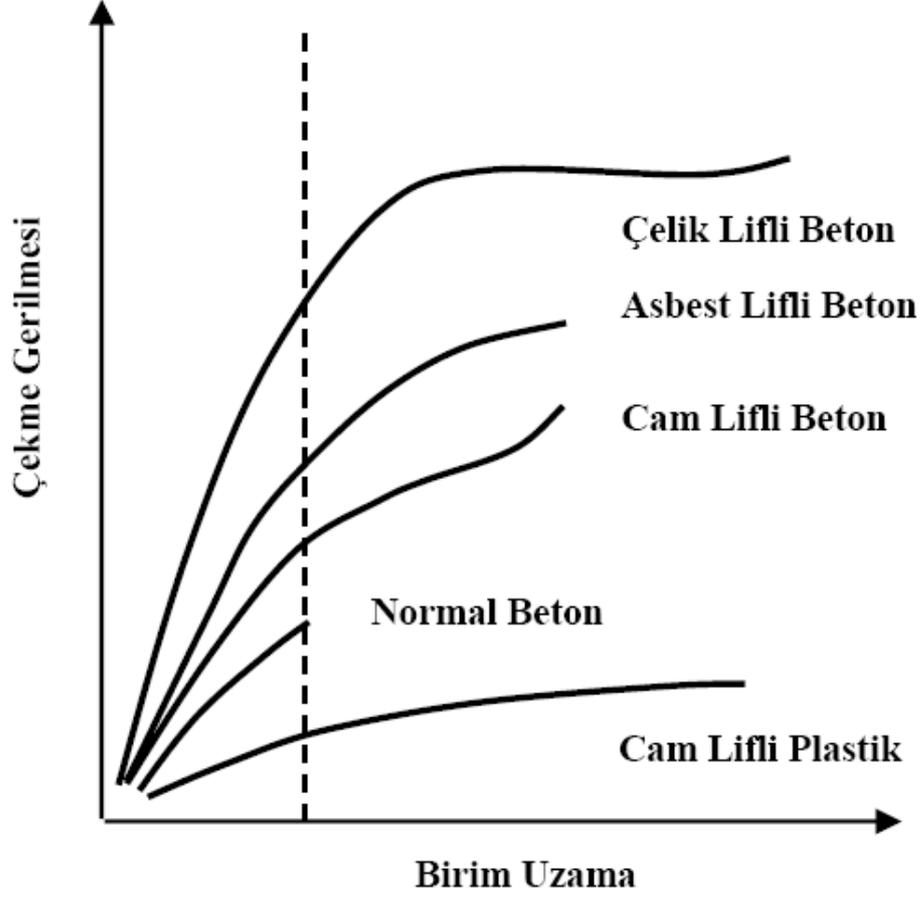
Bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy/çap oranının en az 10 olması ($l/d > 10$), lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm'den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm^2 'den daha küçük olması gibi sınırlamalar getirilmektedir. ACI Committee 544'e göre bir lifi tanımlayan en uygun sayısal parametre "lif narinlik oranı"dır. Lif boyunun, lifin kesit alanı kadar alanı olan bir dairenin çapı olarak tanımlanan "eşdeğer lif çapı"na bölünmesiyle bulunan bu oranın, beton malzemedeki boyları 0.60 ile 7.62 cm arasında değişen lifler için tipik değeri 30 ile 150 arasında verilmektedir.

Çeşitli araştırmalar sonucu bazı liflerin, lifli beton teknolojisinde kullanımları yaygınlaşmıştır.

Bunlar;

- Cam Yünü Lifli Beton
- Çelik Lifli Beton
- Polimer Beton
- Mika Levhalı Beton
- Plastik Lifli Beton'lardır (Arslan, 1993).

Lifli betonlarda kullanılan donatının etkinliği, donatı malzemesinin elastisite modülünün, matrisin elastisite modülünden daha yüksek olmasına bağlıdır. Şekil 1.1.'de değişik tip lif içeren lifli betonların çekme etkisi altındaki davranışları görülmektedir.



Şekil 1.1. Değişik Tipteki Lifli Betonların Çekme Etkisi Altındaki Davranışları.⁽⁸⁾

Şekil 1.1.'den de görülebileceği gibi beton içerisinde kullanılan donatı malzemelerinden elastisite modülü en yüksek olan çelik, çekme etkisi altında en iyi performansı göstermektedir.

Soroushian ve Marikunte (9), iki aşamalı yaptıkları çalışmada selüloz lifli çimento kompozitlerinde 6 farklı lif içeriği ve 3 farklı nem koşulu sağlayarak, uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak hazırlanan kompozitin eğilme performanslarını incelemişlerdir.

Sonuç olarak, maksimum eğilme dayanımını tüm nem koşullarında % 8 selüloz lifli içeren karışımın sağladığı, maksimum eğilme tokluğunun ise en fazla lif içeriğine sahip % 14 selüloz lif içeren karışımın sağladığı görülmüştür.

Nelson, Li ve Kamada (10), % 4.9 polipropilen, % 3.4 polivinilalkol, % 5.1 selüloz lif içerikli ince levha şekilli çimento kompozitleri ve lif içermeyen yalın çimento kompozitleri üzerinde, numunelerin kırılma tokluklarını araştırmışlardır. Deneyle sonuçunda polivinilalkol ve selüloz lif içeren kompozitlerin kırılma tokluklarının lif içermeyen yalın çimento kompozitine göre % 40 daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Polipropilen lif içeren kompozitlerin kırılma tokluklarının ise lif içermeyen yalın çimento kompozitinin kırılma tokluğuna yakın değerler verdiği sonucuna varmışlardır.

Polipropilen liflerin beton içerisindeki esas kullanım nedeni, betonda oluşabilecek plastik rötre çatlaklarını ve termik çatlakları önlemeye çalışmaktır. Betonda kullanılan diğer lifler çatlak oluşumunu engellemek için değil, çatlak oluşuktan sonra çatlağın ilerlemesini engellemektedir. Polipropilen lifler ise çatlağın oluşumunu baştan önlemektedir. Polipropilen lifler beton dökümünden sonraki ilk saatlerde oluşan plastik rötre çatlaklarını ortalama olarak % 90 azaltmaktadır.

1.2.3. Mikro Donatılı Betonların Üretim Yöntemleri

Bentur ve Mindness (5), lifli beton üretim yöntemlerini beş ana grupta toplamışlardır.

1.2.3.1. Ön Karıştırma Yöntemi

Bu yöntemde lifler, beton karışım malzemeleri ile birlikte beton mikserine

ilave edilir. Lifler, betona katılan ekstra bir malzeme gibi kabul edilir ve beton üretiminde ilave bir iş gerektirmez. Özellikle çelik lifler ilave edildiği beton karışımının işlenebilirliğini etkileyeceği için beton içine ilave miktarı, karışımın % 2'sini geçmemelidir.

1.2.3.2. Elle Yayma Yöntemi

Bu yöntemde kalıbın içerisine lifler, hasır şeklinde yayılarak bir lif katmanı oluşturacak şekilde kalıba yerleştirilirler. Yayılan liflere çimento bulamacı emdirilerek vibrasyon uygulanır ve yüksek lif içerikli yoğun yapı elemanları üretilir.

1.2.3.3. Hamur Yöntemi

Asbest çimentoları veya selüloz yada diğer liflerin asbest yerine kullanıldığı yerlerde, liflerin çimento bulamacı içine yayılması ile gerçekleştirilir. Genellikle ince levha şeklindeki malzemelerin üretiminde kullanılır. Bu tipteki üretim yöntemi ile hazırlanan kompozitte lif içeriği genellikle % 9 ile % 20 arasındadır.

1.2.3.4. Püskürtme Yöntemi

Bu yöntem genel olarak camsı lifler için kullanılır. İnce kesilmiş camsı lifler ile çimento bulamacı eş zamanlı olarak kalıba alınmış yüzeye ince tabaka oluşturmak amacıyla püskürtülürler. Bu yöntem genellikle lif içeriği % 6'dan fazla olan lifli betonlarda uygulanır.

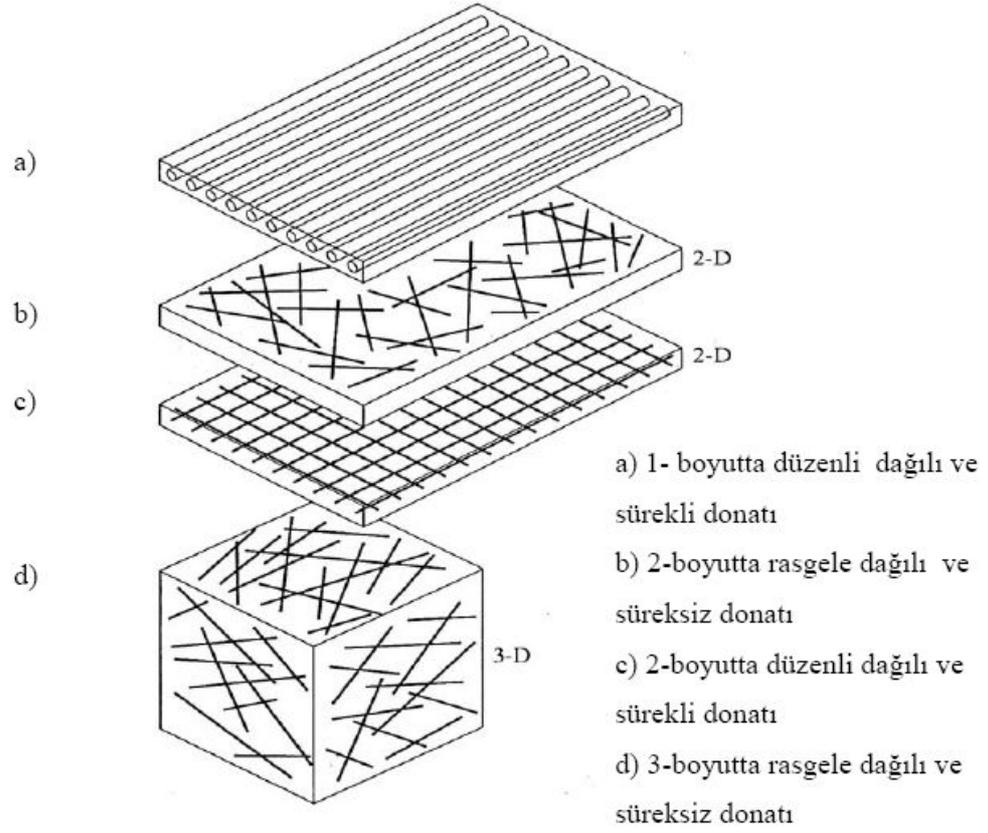
1.2.3.5. Püskürtme Betonu Karışımı Yöntemi

Normal püskürtme betonu üretim tekniği modifiye edilerek çelik lifli püskürtme betonu elde etmek mümkündür. Bu yöntemle tünel kaplamaları ve şev

stabilizasyonu elik lifli püskürtme betonu ile daha güvenli bir Şekilde yapılabilir. Bu yöntemde püskürtme beton karışımının içine yüksek oranda lif ilavesi mümkündür.

1.2.4. Mikro Donatılı Betonlar İle Normal Donatılı Betonların Karşılaştırılması

Donatısız betonlar, çekme dayanımları ve kırılma anındaki Şekil değiştirme kapasiteleri bakımından çok yetersizdirler. Bu olumsuz özelliklerin giderilmesi için beton içerisine öngermeli veya ngermesiz donatı çubukları, düzenli ve sürekli bir Şekilde ilave edilir. Oluşan betonarme eleman, kendisinden beklenen optimum performansı gösterir. Betonda kullanılan lifler ise üç boyutlu ve süreksiz donatı oluşturacak bir Şekilde gelişigüzel daĐılıŐı olarak matris içinde yer alırlar. Lifler yapısal uygulamalarda geleneksel donatı çubukları ile birlikte de kullanılabilirler. ⁽⁷⁾ Şekil 1.2.'de 1, 2 ve 3-boyutlarda donatı daĐılıŐımları gösterilmiştir.

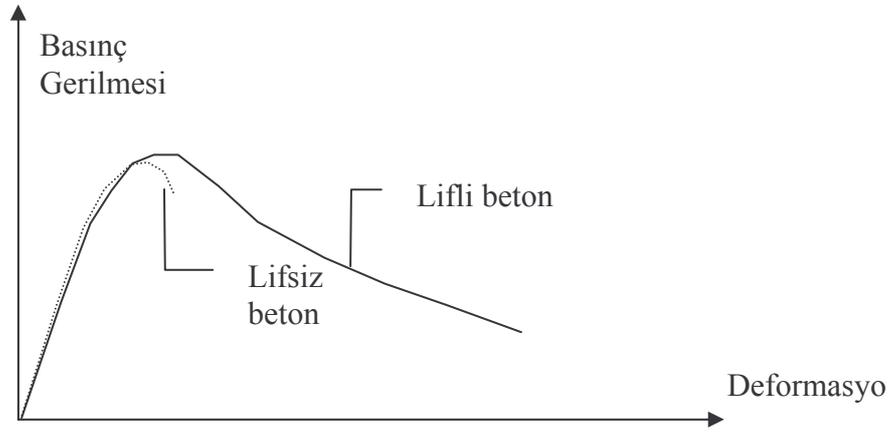


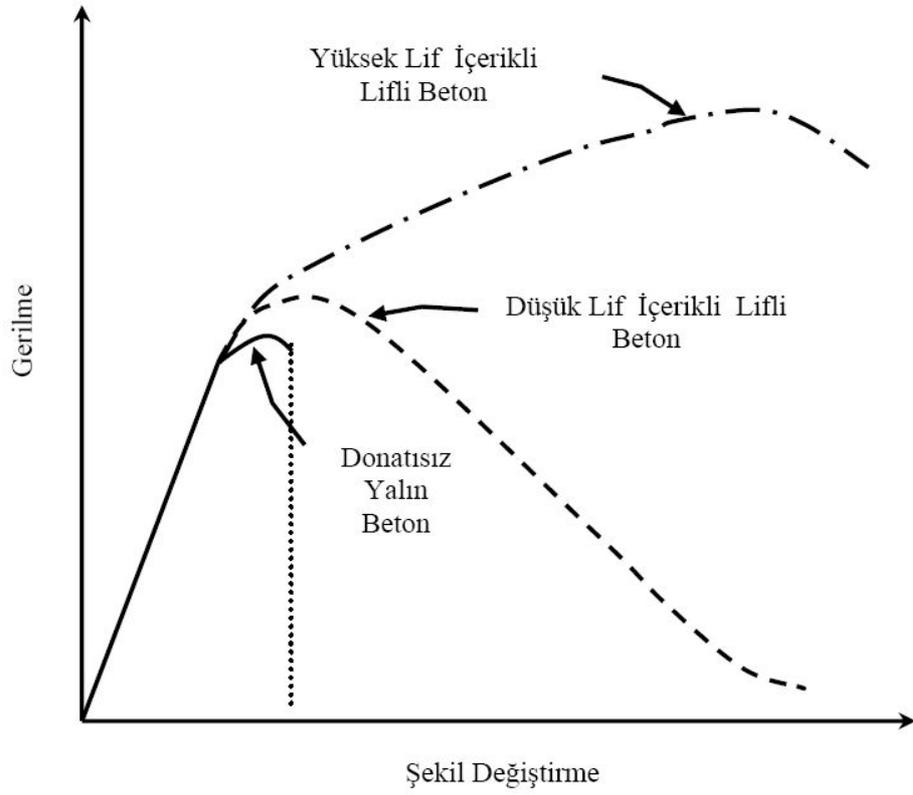
Şekil 1.2. Betonda 1,2 ve 3. Boyutlarda Donatı Dağılımları

Geleneksel betonlara donatıların düzenli ve sürekli bir şekilde ilave edildiği sistemlerde donatı, bulunduğu lokal bölgeye gelen çekme ve kesme kuvvetlerini karşılar. Donatının bulunmadığı bölgeler, betonun çekme ve kesme dayanımını aşan yüklere maruz kaldığı takdirde, bu bölgelerde gerilme yığılmaları ve sonrasında bir takım yapı hasarları meydana gelecektir. Liflerin üç boyutlu ve süreksiz donatı oluşturacak bir şekilde gelişigüzel dağılı olarak matris içinde dağılımları nedeniyle betonun her bölgesinde oluşabilecek gerilmeler, lifler tarafından karşılanabilecektir. Bu sayede betonda oluşabilecek çatlaklar kontrol altına alınabilecektir.

Bu bilgiler doğrultusunda ;

- Geleneksel donatının kullanılmadığı ince kesitli plaklarda lifler birincil donatı olarak kullanılırlar. Bu plaklarda lif konsantrasyonu genellikle % 5'in üzerindedir. Bu uygulamalarda lifler; Şekil 1.3'de görüldüğü gibi plağın dayanımını ve tokluğunu arttırıcı rol oynarlar.
- Tünellerde, patlama etkilerine karşı dayanıklı olması gereken yapılarda, çakma etkilerine maruz kalacak prekast kazıklarda lokal ani yüklerle karşı geleneksel donatıya göre daha dayanıklıdırlar.
- Lifli beton; nem ve ısı değişikliklerinin hasar yaratabileceği döşeme ve kaplama betonlarında, çatlak kontrolü açısından geleneksel donatıdan daha üstündür. ⁽⁵⁾





Şekil 1.3. Lifli Betonlarda Tipik Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramları

Betonda kullanılan geleneksel donatı çubukları betonun yük taşıma kapasitesini arttırmaları, lifler ise daha çok betonda, oluşabilecek çatlakların oluşmasının ve gelişmesinin engellenmesinde etkilidirler. ⁽⁵⁾ Lif kullanılan betonlar, geleneksel betonlara göre daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptirler. Diğer bir deyişle yük altında daha sünek davranış gösterirler. Lifli betonlarda geleneksel betona göre beton karışımına çeşitli boy, çap ve tipteki liflerin ilavesi sonucu betonun, çökme değerinde bir miktar düşme olacaktır. Çökme kaybını etkileyen etken; lifin görünüm oranı denem boy/çap oranı ve lifin miktarıdır. Bu çökme kaybı çeşitli kimyasal katkı kullanımı ve iyi vibrasyon yapılması ile giderilebilmektedir.

Liflerin donatı malzemesi olarak kullanıldığı lifli betonlarda geleneksel betonlara nazaran çekme, eğilme, çarpma dayanımları gibi mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlanır. Bu iyileşmeler sayesinde çekme, eğilme, çarpma gibi etkilere maruz kalacak yapılarda, lif donatısı kullanımı önem kazanmaktadır. Betonda lif kullanımı ile betonun mekanik özelliklerinde meydana gelen artışlar Çizelge 1.2.'de gösterilmiştir. ⁽¹⁾

Çizelge 1.2. Lifli Betonların Geleneksel Betonlara Kıyasla Mekanik Özelliklerde

Meydana Gelen Artışlar

Mekanik Özellik	Artış Yüzdeleri (%)
Tokluk	100-1200
Çarpma Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Eğilmede Çekme Dayanımı	25-200
Çekme Dayanımı	25-150
Yorulma Dayanımı	50-100
Şekil Değiştirme Oranı	50-300
Basınç Dayanımı	± 25
Kavitasyon/Erozyon Direnci	200-300
Elastisite Modülü	± 25
Sehim	20-500

1.3. Çelik Lif Donatılı Betonlar

Çelik lifli beton, hidrolik çimento, ince veya ince ve kaba agreganın ve süreksiz dağılmış çelik liflerin bir arada kullanıldığı, gerektiğinde puzolan ve katkı maddesi ilavesiyle hazırlanan bir tür betondur. ⁽¹¹⁾ Diğer bir tanımla çelik takviyeli beton, betona çelik tellerin karıştırılmasıyla elde edilen, 3 boyutta teçhizatlı betondur. ⁽¹²⁾

Çelik liflerin betona veya harca hacimce % 0.25 (yaklaşık 20 kg/m^3) ve hacimce % 2 (yaklaşık 150 kg/m^3) arasındaki miktarlarda eklenmesi beton ve harçların mühendislik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlar. Özellikle betonun darbe dayanımı, eğilme dayanımı, yorulma mukavemeti, kırılma ve parçalanma dayanımı artmaktadır. ⁽¹¹⁾

Çelik liflerin betona belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen yeni betonun çekme dayanımının yanında birçok özelliklerinde de iyileşme görülür. Bu çelik lifler basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altında, liflerin çekme mukavemeti tam olarak kullanılmadan önce, beton matrisinde olması muhtemel çatlakların meydana gelmesini önler. Bunun yanında betonda oluşmuş çatlakların matris içinde ilerlemesini yavaşlatır.

Çelik lifli beton basınç düktilitesi gösterir. Yani taşıma gücüne ulaştığı halde yük taşıma özelliği vardır. Maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre daha yavaştır. Betonda çatlama, dökülme, parçalanma ve dağılma azdır. Kesme, yorulma ve burulma mukavemetleri yüksektir. Basınç mukavemetinde de bir miktar artış görülür. Çekme dayanımındaki artış ise normal betona göre oldukça fazladır. ⁽⁶⁾

Çelik lifli betonlarda kırılma enerjisi de normal betonlara göre yüksektir. Kırılma yükünden sonra oldukça yüksek düktilite gösterirler. Bu nedenle lif oranı arttıkça betonun kırılma enerjisi de yükselir. ⁽¹³⁾

Bu özelliklerinden dolayı çelik lifli betonlar kullanılması söz konusu olan yerlerde kesitler küçültülerek ekonomi sağlanabilir. Bazı döşemelerde hasır döşemeye gerek kalmadan daha küçük döşeme kalınlığı ve uygulama süresiyle çelik lifli beton kullanımı avantaj sağlar. ⁽⁸⁾

Çelik lifler genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kavitasyon dirençlerini arttırırlar. Çelik teller, darbe aşınmasının neden olduğu mikro kırılma çatlaklarını kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını azaltmaktadırlar. Ayrıca çelik lifler, büzülme çatlak genişliklerini azaltmakta ve büzülme hareketlerini sınırlamaktadırlar. ⁽¹⁴⁾

1.3.1. Çelik Liflerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek amacı ile taze beton içerisine çeşitli yöntemlerle ve çeşitli miktarlarda eklenen çelik lifler, değişik boyutlarda ve kesitlerde üretilebilmektedirler. ⁽⁷⁾

- Soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi yöntemi
- Çelik plakaların kesilmesi yöntemi
- Sıcak çekme yöntemi
- Çelik tellerin öğütülmesi yöntemi

Beton bileşiminde kullanılan çelik lifler, çoğunlukla soğuk çekilmiş düşük karbonlu C 1008 çelikten üretilirler. Lifleri tanımlayan en önemli unsur, liflerin sahip oldukları mekanik özellikler ve lifin sayısal bir parametre ile ifade edilmesini sağlayan biçimsel özellikleridir.

Çelik liflerin tanımını sağlayan bu özellikler;

- Görünüm oranı (lif uzunluğu/lif çapı)
- Geometrik yapı
- Lifin çekme gerilmesi'dir.

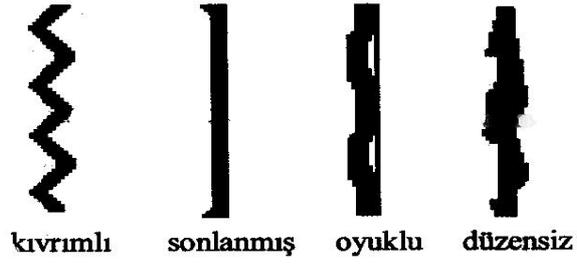
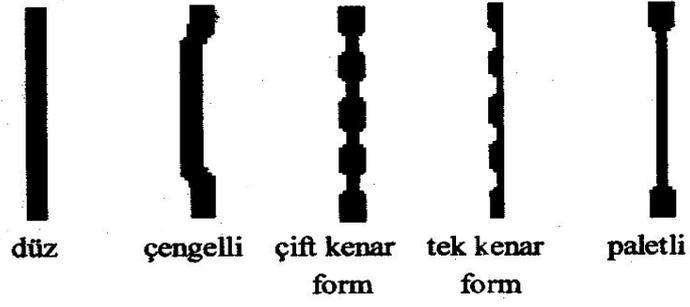
Çelik lifler, TS 10513'de geometrik yapılarına göre üç sınıfa ayrılırlar.

- Düz, pürüzsüz yüzeyli teller
- Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller (üzerinde çentikler açılmış teller, kıvrımlı teller, ay biçimli dalgalı teller)
- Sonu kancalı teller (iki ucu kıvrılmış teller, bir ucu kıvrılmış teller).

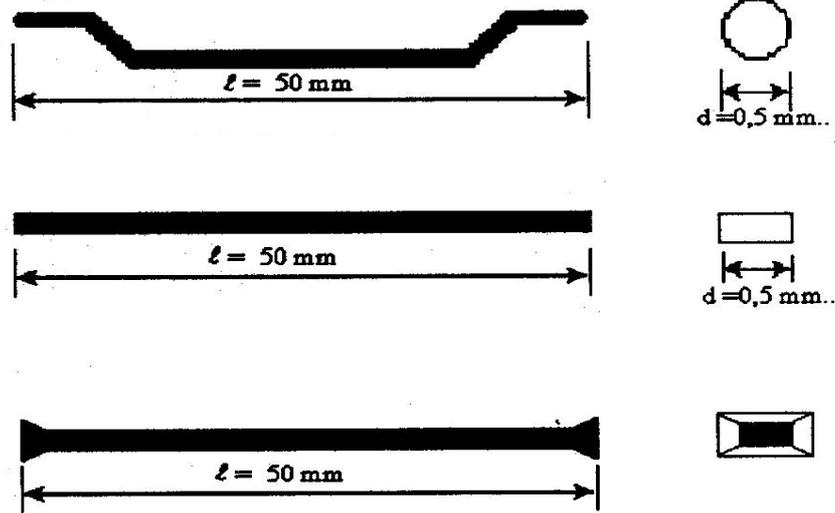
Çelik liflerin en önemli özellikleri yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özellikleridir. Çekme gerilmeleri ortalama olarak 1200 N/mm^2 olup elastik limitleri % 0.2'nin altındadır. Çelik liflerin yüksek çekme gerilmeleri sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. ⁽⁶⁾

Çelik liflerin çapları 0.25 - 1.00 mm arasında, boyları 12.7 – 63.5 mm arasında, görünüm oranları (l/d) ise 20-100 arasında değişmektedir. ⁽¹¹⁾

TS 10513'e göre betonda kullanılacak elik liflerin yüzeylerinin kir, pas ve yağdan arındırılmış olması, her bir lifin çekme dayanımının 310 N/mm^2 'den az olmaması ve 16°C ' lik bir ortamda 3.18 mm çaplı silindir çevresinde 90° kırılmadan kıvrılır olması istenmektedir. Bu zellikler elik liflerin daha sünek ve daha yüksek mukavemetle davranabilmesine imkan sağlaması bakımından gereklidir.



Çelik lif tipleri ve kesitleri



Değişik Çelik Liflerin Enkesitleri

Şekil 1.4. Çelik Lif Çeşitleri

1.3.2. Çelik Lifli Betonların Hazırlanmasında Dikkat Edilecek Hususlar

Geleneksel beton üretiminde uyulması gereken hususlar çelik lifli beton üretiminde de geçerlidir. Yeterli fiziksel ve kimyasal dayanıklılık için gerekli olan kaliteli malzeme, düşük su / çimento oranı, optimum çimento içeriği, iyi vibrasyon ve iyi işçilik gibi unsurların sağlanması gerekir. Bunun yanında “Çelik Tel Takviyeli Betonlar İçin Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları” standardı olan TS 10514/92’de bir takım sınırlamalar getirilmiştir.

Kompozit bir malzeme olan çelik lifli betonda liflerin gerilme altında istenilen davranışını gösterebilmesi için lifi saran matrisin boşluksuz, rijit, yoğun ve istenilen dayanımda olması gerekir. Bu sıkı yapının sağlanması durumunda liflere gelen gerilmeler matris aracılığıyla diğer bir life aktarılacak ve böylece gerilme transferi sağlanacaktır. Betonun kusurlu bir bölgesine gelen bir gerilme, bu gerilme transferi ile betonun sağlam bölgesine aktarılacaktır. Lifin davranışını etkileyen önemli bir parametre olan matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi bakımından bir takım sınırlamalar getirilmiştir.

- Çimento miktarı en az 320 kg/m^3 olmalıdır.
- Kum (0-4 mm) miktarı, toplam agrega kütlelerinin % 40 - % 45’i olmalıdır ($750\text{-}850 \text{ kg/m}^3$).
- D_{max} , doğal agrega için 28 mm, yapay agrega (kıırma taş) için 32 mm, olmalıdır. 14 mm’den büyük agrega oranı % 15 – % 20 ile sınırlandırılmıştır.
- Su/çimento oranı 0.55’nin altında olmalıdır.
- İşlenebilirlik sağlanması bakımından akışkanlık verici katkıları kullanılabilir.
- Betonda bulunması gereken 0.25 mm’den küçük ince malzeme miktarı aşağıda verilen Çizelge 1.3. değerlerini sağlamalıdır.

Çizelge 1.3. Çelik Lifli Betonda Bulunması Gereken İnce Malzeme Miktarı

En Büyük Agrega Dane Boyutu	İnce Malzeme Miktarı (< 0,25 mm)	
	kg/m ³	L/m ³
8 mm	525	180 – 185
16 mm	450	150 – 155
32 mm	400	130 - 135

Çelik liflerin betonun içerisine katılma oranları hacimce % 0.5 - % 2.5 arasında olabilmektedir. Ancak yapılan araştırmalar sonunda optimum faydanın hacimsel oranın % 1–2 olması halinde sağlandığı görülmüştür. Lif miktarlarının bu değerlerden az olması çelik lifli betonun teknik özelliklerinin normal betondan pek fazla olmamasına neden olur. Gereğinden fazla lif eklenmesi de çok fazla bir fayda sağlamaz. ⁽⁶⁾ Bu nedenle kullanılacak maksimum tel miktarı Çizelge 1.4.’te verilmiştir.

Çizelge 1.4. Betona İlave Edilen Maksimum Tel Miktarı (kg/m³)

En Büyük Dane Çapı (mm)	Uzunluk/çap=60		Uzunluk/çap=75		Uzunluk/çap=100	
	Normal	Pompa	Normal	Pompa	Normal	Pompa
4	160	120	125	95	95	70
8	125	95	100	75	75	55
16	85	65	70	55	55	40
32	50	40	40	30	30	25

Çizelge 1.4.’ten de anlaşılacağı gibi çelik lifin l/d oranı arttıkça ihtiyaç duyulan tel miktarı azalmaktadır. Aynı şekilde pompa betonlarında kullanılan lif miktarı da normal lifli betona göre bir miktar daha azdır. Beton karışımı esnasında

homojen tel dağılımı gözle kontrol edilmeli, birbirine yapışık teller ayrışınca kadar karıştırma işlemine devam edilmelidir.

Çelik teller, beton karışımında kum ve agreganın üzerine dökülmelidir. Karışıma su, çimento ve gerekli ise katkı maddesi eklenerek karıştırılmalıdır. Karıştırma işlemi bütün teller ayrışınca kadar devam etmelidir. Bu süre ortalama olarak 1-2 dakikadır. İkinci bir yöntem olarak lifler, karıştırma kazanı içine en son olarak da ilave edilebilir. ⁽¹⁵⁾

Lif seçiminde dikkat edilebilecek bir husus da lif boyunun agrega maksimum tane çapının en az 1.5- 2 katı olması gereğidir. ⁽¹⁵⁾

Çelik lifli betonların yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve masterlama işlemleri geleneksel ekipmanlarla yapılabilir. Çelik lifli betonların yerleştirilmesi sırasında dışsal vibrasyon ile sıkıştırılma tercih edilir. Dışsal vibrasyon sağlanamayan durumlarda içsel vibratörler kullanılabilir. Fakat çubuk tipi daldırma vibratörlerinin kullanılmasından kaçınılmalıdır. Bu tip vibratörlerin kullanılması sırasında lifler dönerek belli yerlerde lif yığılmasına sebep olur.

Açık döşeme yüzeyleri perdahlanırken vibrasyonlu masterlar kullanılmalı veya daha önceden içsel vibratörlerle yerleştirilmiş beton, perdah makinesiyle tesviye edilmelidir.

Aşırı paslanmanın olabileceği durumlarda ise galvanizlenmiş liflerin kullanılması daha uygundur.

1.3.2.1. Hazırlanan Çelik Lifli Betonların Kontrolü

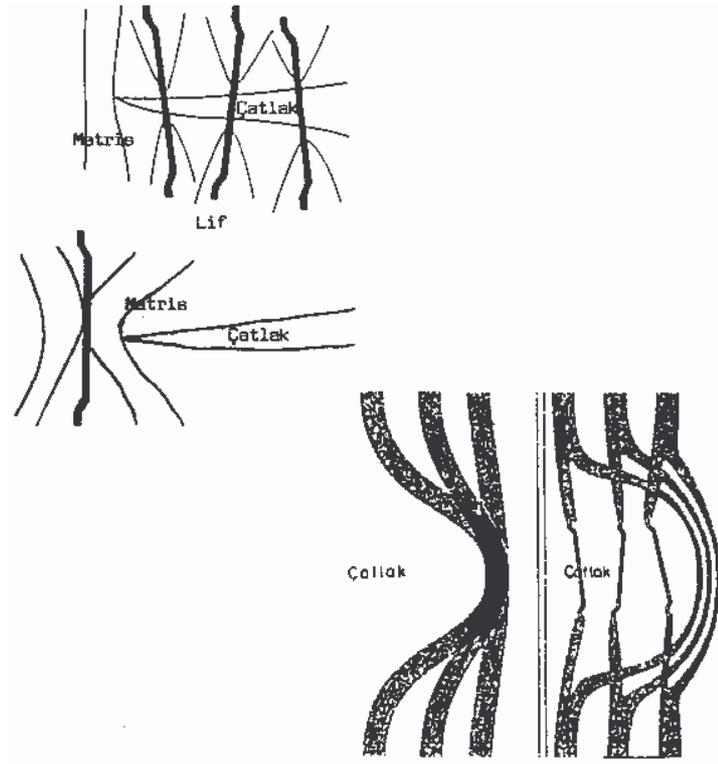
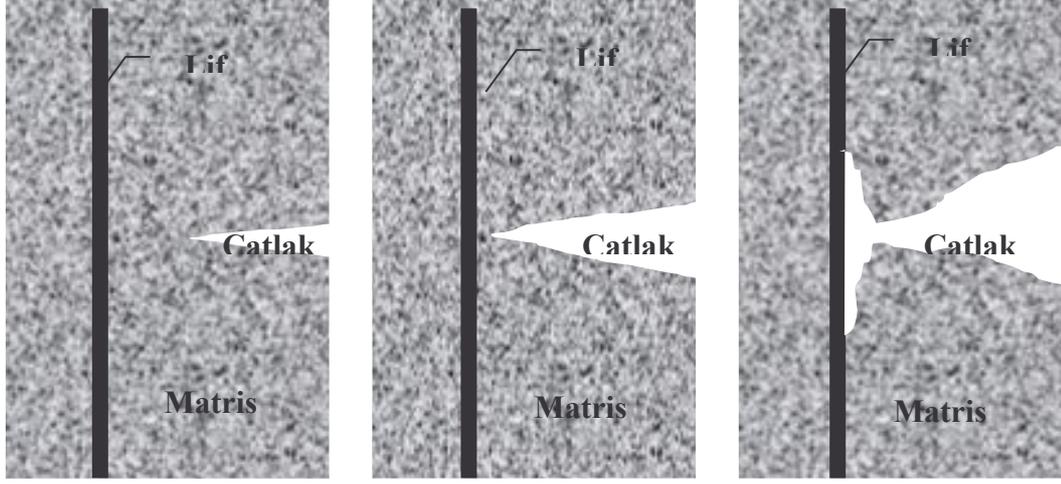
Hazırlanan beton karışımlarından her kontrol için 3 adet 10 litrelik beton numunesi alınmalı ve TS 2940'da belirtilen "Taze Betondan Numune Alma Metodları"

kullanılmalıdır. Alınan 3 adet 10 litrelik numune su ile yıkandıktan sonra çelik lifler miknatis yardımı ile toplanıp hassas olarak tartılmalıdır. 3 numunedeki ortalama çelik lif miktarı, olması gerekenden en çok % 10, her bir numunedeki miktar ise en çok % 15 farklı olabilir. İstenilen oranlar elde edilinceye kadar, beton santralında gerekli tedbirler alınmalıdır.

1.3.3. Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı

Çelik liflerin beton içerisindeki işlevi ile betonda kullanılan geleneksel donatının işlevi birbirlerinden farklıdır. Bir çok yerde donatı ve çelik lifler bir yere kadar aynı işlevi görse de, bunlar arasındaki en önemli fark beton içerisindeki fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü nasıl ve ne zaman yaptıklarıdır. Statik hesaplar yapılırken çelik lifler, eğilme momentini alan hasır veya çubuk donatı gibi görülmemelidir. Çelik lifler, betonunu plastik bir davranışa iten malzemelerdir. Çelik lifli betonun özelliği, onun arttırılmış elastikiyet ve enerji yutma yeteneğidir. ⁽⁶⁾

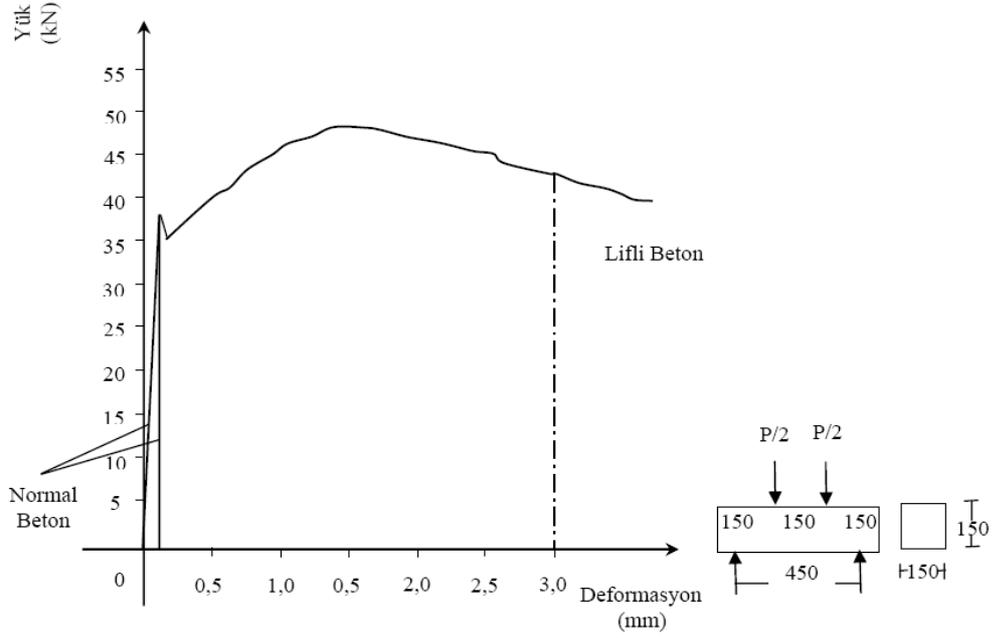
Lifsiz betonlarda gerilme ile başlayan mikro çatlaklar, gerilmenin artışı ile çeşitli yönde yayılarak belli bir gerilme değerinde betonun parçalanmasına yol açar. Lifli betonlarda ise ilk çatlaktan sonra çimento hamuru fazından liflere doğru bir gerilme transferi olur. Lifler, miktarları ve geometrik şekillerine bağlı olarak bu gerilmelerin bir kısmını kendi taşır, bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine aktarırlar. Özellikle kritik yüklemelerde, beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik liflerin beton içerisindeki davranışı daha iyi açıklanır. Çelik lifli betonlarda gerilme aktarımı Şekil 1.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Çelik Lifli Betonlarda Gerilme Aktarımı

Lifsiz betonlarda çatlak yayılımı, ilk çatlak oluşumu için gerekli enerjinin yarısı kadar bir enerjiyle olurken, lifli betonlarda çatlak yayılımı için gerekli olan enerji ilk çatlak enerjisinden daha fazladır. Nihai yüke ulaşıp beton kırıldıktan sonra da lifler kırılan parçaları bir arada tutmaya devam eder. Hatta nihai yükten bir miktar daha fazlasını taşımaya devam eder. ⁽¹⁶⁾

Lifsiz betonda kırılma sonrası yükün azalma hızı çok yüksek olup betonun yapabileceği maksimum deformasyon da çok azdır. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda ise maksimum gerilmeden sonra yükün davranışı lifsiz betona göre oldukça değişiktir. Maksimum gerilmeden sonra yükte hafif bir düşüş meydana gelir. Daha sonra meydana gelen gerilmenin bir kısmının lifler üzerinden taşınması nedeniyle betonun gerilme-deformasyon davranışında geleneksel betona göre farklılıklar yaşanır. Çelik lifli betonda yük, tedrici olarak azalır. Dolayısıyla liflerin matristen ayrılması ve uzaması nedeniyle emilen enerji yada başka bir deyişle meydana gelen deformasyon işi oldukça büyüktür. ⁽²⁾



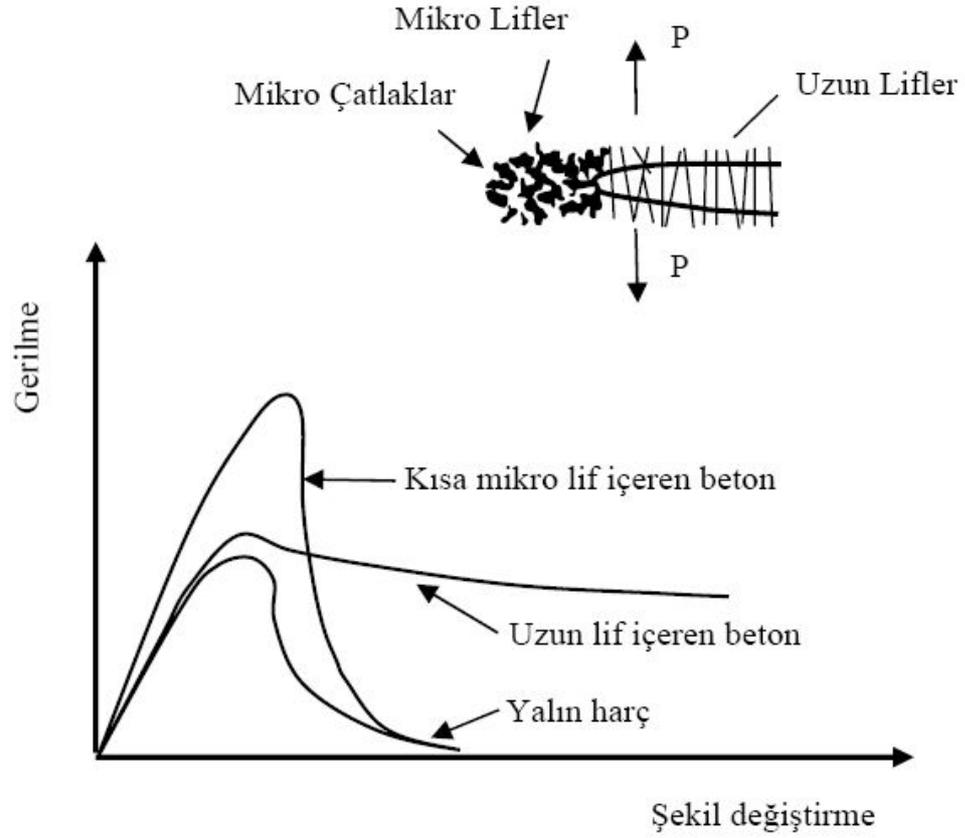
Şekil 1.6. Normal ve Lifli Betonun Yük Altındaki Davranışı. (1)

Şekil 1.6'dan da görüleceği gibi geleneksel betonun maksimum yükte kırılma sonrası gösterdiği yükün azalma hızı çok yüksek olup yapabileceği maksimum deformasyon da çok düşüktür. Çelik lifli betonda ise maksimum yükten sonra yükün daha da yükseldiği görülmektedir. Bu, kullanılan çelik liflerin çekme dayanımının betonunkinden daha yüksek olması gerçeği ile açıklanabilir. Beton maksimum yükte kırıldıktan sonra yükün kısa bir aralıkta ani olarak azalmasını takiben çelik liflerin gerilmeyi taşıması sonrası beton, belli bir deformasyon değerine kadar maksimum yükten daha fazla yük taşır. Maksimum yükten sonra, lifli betonlarda, artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre çok yavaştır. ⁽¹⁾

Nelson, Li ve Kamada (10), yaptıkları çalışmada lifli betonlarda çatlak

genişliklerini etkileyen en önemli parametrelerin liflerin hacim yüzdesi ve lifleri kenetlenme özellikleri olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca mikro çaplı liflerin betonda oluşabilecek mikro çatlakları uzun liflere göre daha etkin bir şekilde engellediğini vurgulamışlardır. Diğer bir deyişle mikro çaptaki lifler, betonda mikro çatlakların gelişimini engelleyerek bölgesel çatlakların oluşumunu geciktirirler.

Matristeki çatlaklar, mikro düzeyde başlar. Büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamazlar. Büyük boyutlu lifler, anak çatlaklar gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olur. Buna karşın, mikro lifler çatlaklar mikro düzeyde iken arada köprü vazifesi görerek çatlakları durdururlar. Mikro lifler, matrisin hemen hemen her bölgesine dağılabilecek kadar küçük oldukları için makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki küçük çatlakların başlamasını ve gelişimini kontrol edebilirler. Mikro lifler, mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar. Şekil 1.7'dekine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik teller) harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirmektedir. ⁽¹³⁾



Şekil 1.7. Çatlak Köprülenmesine Farklı Lif Boyutlarının Etkisi

1.3.4. Çelik Lifli Beton Bulamacının Uygulama Teknikleri

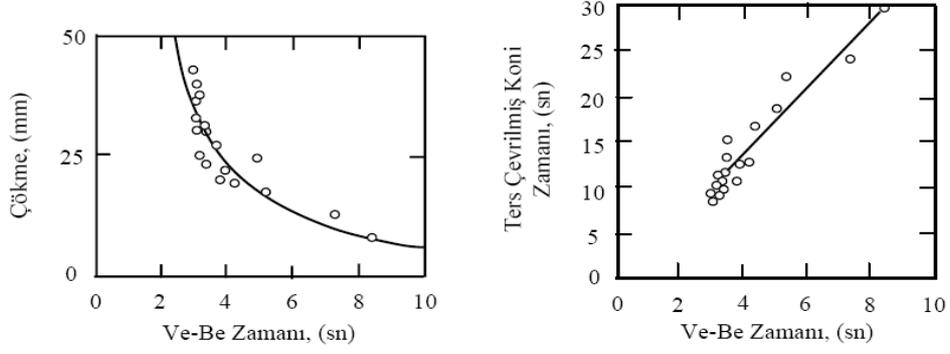
1.3.4.1. Kıvam

Betonun içerisine çelik liflerin katılması sonucu taze beton özelliklerinde bir takım değişiklikler görülür. Betonda çelik lif kullanımı, betonun hazırlanma, taşınma, yerleştirme ve sıkıştırma sürecini ifade eden işlenebilirliğini etkiler. Yapılan çalışmalarda lif kullanımının betonda işlenebilirliği azalttığı görülmüştür. Bu azalma üzerindeki en önemli parametre lif tipi, lif hacmi ve lif görünüm oranı (l/d)' dir.

Betondaki lif içeriğinin artması ve görünüm oranının büyümesi işlenebilirliği zorlaştırır. Lifin geometrik şeklinin kıvrımlı, çentikli, çift kenarlı olması da işlenebilirliği azaltır. ⁽⁵⁾

Lifsiz betonlarda kıvam ölçümü için kullanılan slump (çökme) deneyi, çelik lifli betonlar için pek uygun değildir. Laboratuvar koşullarında olmak şartıyla çelik lifli betonların işlenebilirliğini ölçmek için en uygun yöntem Ve-Be deneyidir. Ve-Be deneyinin şantiyede uygulanabilirliğinin zorluğundan ötürü, şantiyelerde uygulanmak üzere ise ters çevrilmiş koni deneyi daha uygundur. Şekil 1.8.'de Slump-Ve-Be deneyleri ve Ters Çevrilmiş Koni-Ve-Be deneyleri arasındaki ilişki verilmiştir.

Uğurlu (1), yaptığı çalışmalarda değişik lif hacimleri (V_f) ile üretilen betonlarda yeterli işlenebilirliği sağlamak için çeşitli miktarlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanmış ve katkı miktarının artmasıyla işlenebilirlikte iyileşme olduğunu görmüştür. Özellikle çimento ağırlığının % 0.3'ü oranındaki katkı miktarından sonra işlenebilirlikte önemli artışlar gözlemiştir. Yapılan Ve-Be ve ters koni deneyleri sonunda ise lif hacmi yüzdesinin yaklaşık % 0.6 – 0.8 değerlerinden sonra işlenebilirlikteki zorlukların arttığını tespit etmiştir.



Şekil 1.8. Slump / Ve-Be Deneyleri ve Ters Çevrilmiş Koni / Ve-Be Deneyleri

Arasındaki İlişki (5)

Ters çevrilmiş koni deneyi, standart slump konisinin ters çevrilerek kullanımı ile yapılır. Ters çevrili halde bulunan slump konisinin içi herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan beton ile doldurulur. Daldırma tipi vibratör beton dolu koninin merkezinden düşey olacak şekilde aşağıya doğru kendi ağırlığı ile bırakılır. Vibratörün betonun içinden geçip tabana deydiği süre tespit edilir. Geçen bu süre ters çevrilmiş slump koni zamanı olarak belirlenir. Bu deney yöntemi lifli betonlar ve slump deneyinde katı kıvam olarak nitelenen betonlar için daha uygundur. ⁽¹¹⁾

1.3.4.2. Karıştırma

Çelik lifli betonların karışımı sırasında dikkat edilecek en önemli husus, liflerin homojen dağılımını sağlamak ve liflerin topaklaşmasını önlemektir. Çelik

lifli betonların hazırlanmasında elik liflerin betona ilavesi iki yöntemle sağlanabilir. İlk yöntemin uygulanması sırasında, öncelikle lifsiz ıslak karışım hazırlanır. Hazırlanan lifsiz ıslak karışımın slump değeri, liflerin ilavesiyle oluşacak yeni lifli betonun istenen slump değerinden daha fazla olmalıdır. Bunun sağlanması için de çeşitli kimyasal katkıların kullanımı yararlıdır. Kullanılacak lifler, ıslak karışım olarak hazırlanmış mikserin içine konveyör bant aracılığıyla veya el ile ilave edilebilir. Lifler, mikserde kek yığınlar halinde eklenmeli, ekleme işlemi sırasında mikser hızlı bir seviyede döndürülmelidir. Liflerin ilavesi işlemi bittiğinde mikser hızı yavaşlatılmalıdır.

Bu işlem kek çaplı işlerde, konveyör bant kullanılarak yada liflerin betona elle dökümü sağlanarak yapılan işler için uygundur. Daha büyük çaplı işlerde ise ikinci bir yöntem olarak liflerin beton tesisinde agregalarla birlikte konveyör bantlar ile karışıma ilavesi yöntemi kullanılır. Bu sayede daha hızlı üretim sağlanmış olur. Her iki yöntemde de liflerin ilavesi sırasında büyük bir yığın halinde karıştırıcıya eklenmek yerine daha kek yığın oluşturacak şekilde eklenmesi, topaklanmayı önlemek açısından daha uygun bir işlem olacaktır. ⁽⁷⁾



Şekil 1.9. Santralde Kuru Karışıma Ekleme



Şekil 1.10. Şantiyede Elle Transmiklere Ekleme



Şekil 1.11. Şantiyede Konveyör ile Transmiklere Ekleme

1.3.4.3. Kalıba Yerleştirme

Genellikle lifli betonlar, geleneksel betona göre su / çimento oranlarının düşük olması nedeniyle daha katı kıvamda ve düşük işlenebilirliktedirler. Bu durum vibrasyon işlemi veya yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanımı ile giderilebilir. Yerleştirmenin vibrasyonsuz yapılması durumunda beton, yoğunluğu düşük, hava oranı yüksek ve liflerle arasında düşük aderansa sahip bir hal alır.

Çelik liflerin yerleştirilmesi işleminde en önemli unsur, lifli betonun yararlı etkilerini minimuma indirmemek için, betonun su / çimento oranına dikkat etmektir. Çelik lifli betonların su / çimento oranı 0.35 ile 0.50 arasında olduğu takdirde optimum fayda sağlanacaktır. Yerleştirme işlemini kolaylaştırmak için ilave edilen ekstra su, betonda kalite azalışı ile kanama ve segregasyon riskini arttıracaktır. ⁽⁵⁾

Çelik lifli taze betonların yerleştirme işlemi sırasında özel bir işlem yada teçhizata gerek yoktur. Geleneksel beton yerleştirme işleminde geçerli olan kurallar, lifli betonlar için de geçerlidir. Dikkat edilmesi gereken husus, yerleştirme sırasında beton içerisinde liflerin düzgün dağılım göstermesine özen göstermektir. Bu nedenle mikser karıştırma süresine özen gösterilmeli, gereğinden fazla vibrasyon uygulanmamalı, betona ilave su eklenmemelidir. Dar kesitli elemanlara beton dökümü sırasında yerleştirme işleminde zorluk yaşanmaması için seçilecek agrega boyutları ve lif uzunlukları mümkünse küçültülmelidir.

1.3.4.4. Perdahlama

Çelik lifli betonlarda perdahlama işlemi, geleneksel betonda kullanılan klasik ekipmanlar ile biraz daha itinalı bir işçilik gerektirerek yapılır. Çelik lifli betonlarda çimento ve ince malzeme miktarı, geleneksel betondan fazla olduğu için yüzey

perdahı sırasında işlem çok uzun süre uygulanmamalıdır. Uzun süren perdahlama işlemi sonunda hassas olan beton yüzeyi çatlama meyilli hale gelir.

Çelik lifli betonlara yapılacak perdah işlemi elle yada perdah makineleri ile yapılabilir. Düzgün yüzey elde etmek ve liflerin beton içine daha iyi gömülmesi için magnezyum kanatlı perdah makinelerinin kullanılması tavsiye edilir. Ahşap kanatlı perdah aletleri çok düzgün yüzey elde edilmesini güçleştirirler, yüzeyde yırtılmaya yol açarlar. ⁽¹¹⁾



Şekil 1.12. Dar Alanda Satih Vibratörü İle Perdahlama



Şekil 1.13. Geniş Endüstriyel Zeminde Perdahlama

1.3.4.5. Kür ve Koruma

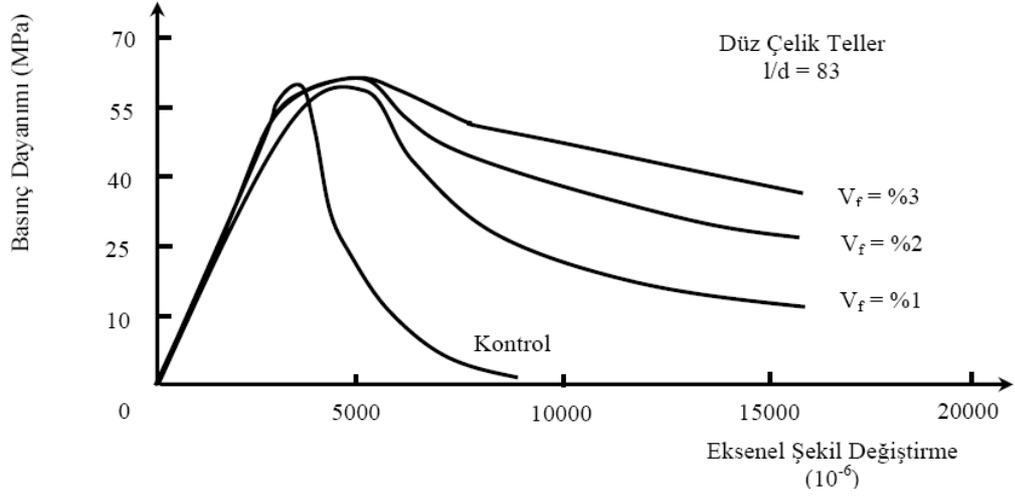
Çelik lifli betonların hidrasyon süresince kuru, soğuk veya sıcak hava koşullarından korunması, geleneksel betona uygulanan kür ve koruma işlemleri ile aynıdır. Çelik lifli betonlar, çimento miktarlarının normal betona göre daha fazla olmasından dolayı, özellikle saha betonlarında, plastik büzülme çatlaklarının oluşmasında daha hassastırlar. Bu nedenle çelik lifli betonlar, kür süresi boyunca sıcak ve rüzgarlı havalarda çeşitli kür teknikleri kullanılarak iyi bir şekilde korunmalıdırlar. ⁽¹¹⁾

1.3.5. Çelik Lifli Betonun Özellikleri

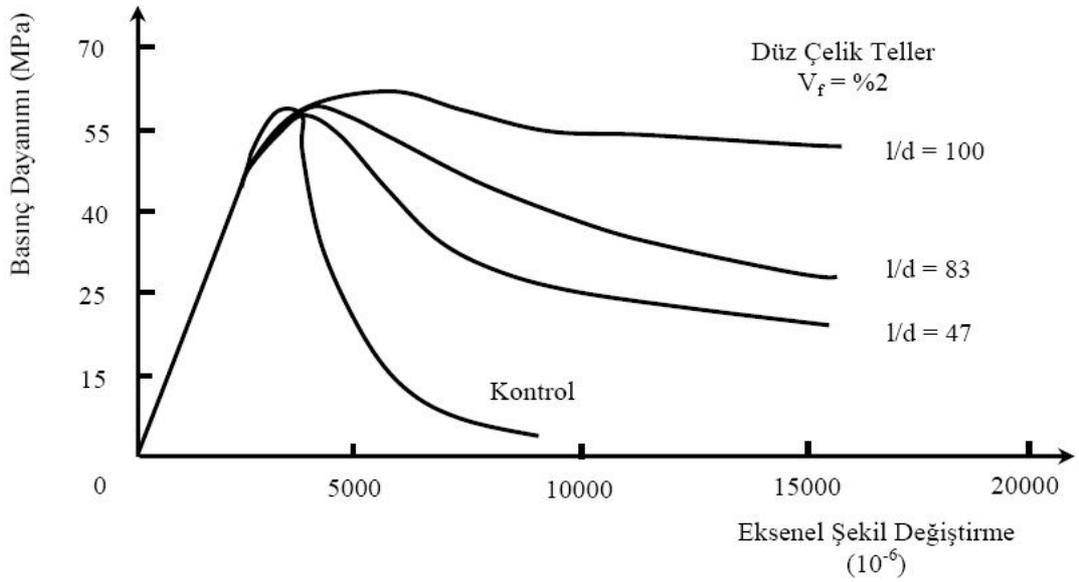
1.3.5.1. Basınç Dayanımı

Çelik lifli betonlar üzerinde yapılmış değişik araştırmalarda liflerin betonun basınç dayanımına % 25 gibi bir artış sağladığı bazı araştırmalarda ise liflerin basınç dayanımına bir etkisinin olmadığı görülmüştür. ⁽⁸⁾ Liflerin basınç dayanımına etkisi, liflerin beton içerisindeki yönelimleri ile ilgilidir. Betona uygulanan yüklemenin düzlemine dik olan lifler basınç dayanımına bir etkide bulunmazlar. Beton içerisinde yükleme düzlemine paralel yerleşmiş lifler ise basınç dayanımının artmasına neden olurlar.

Fanella ve Naaman; (17) yaptıkları bir çalışmada çelik lifli harçlar üzerine yaptıkları deneylerde lif hacmi ve lif görünüm oranı (uzunluk/çap) arttıkça basınç dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 1.14. ve Şekil 1.15.'den de görüleceği gibi çelik lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızının normal betonlara göre daha yavaş olduğunu görmüşlerdir.



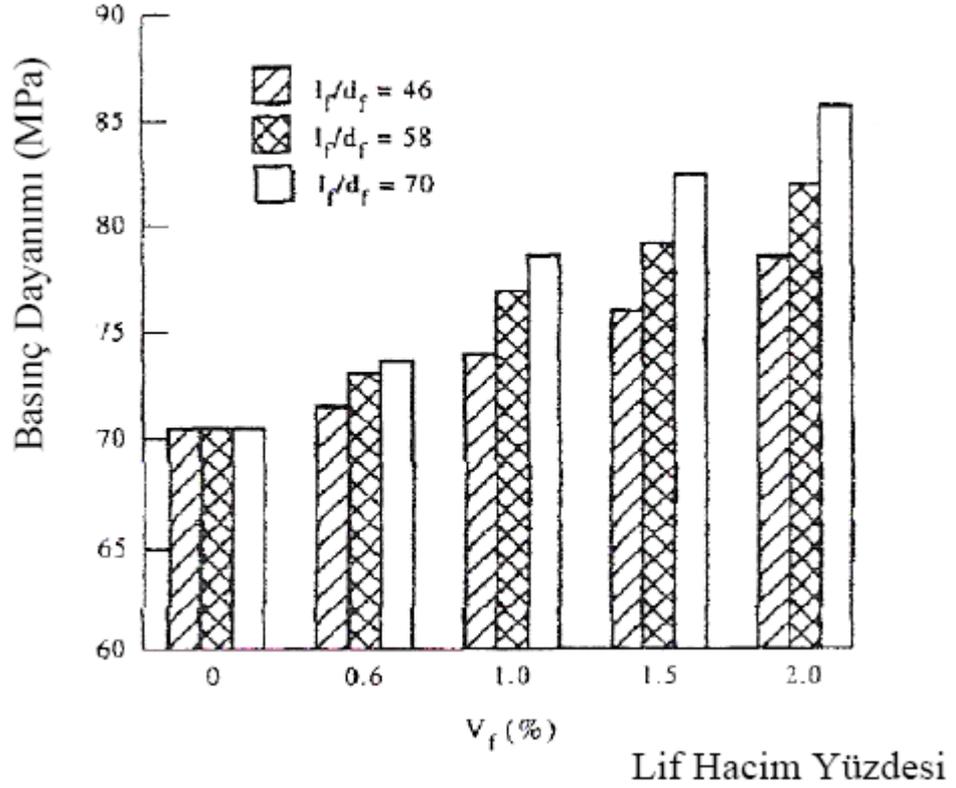
Şekil 1.14. Lif Hacmi İçeriğinin Değişiminin Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisine Etkisi



Şekil 1.15. Lif Görünüm Oranı (Uzunluk/Çap) Değişiminin Gerilme- Şekil Değişirme Eğrisine Etkisi

Gao, Sun ve Morino (18), yaptıkları çalışmada % 0, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0 lif içerikli, süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı kullanılan yüksek dayanımlı hafif betonlar hazırlamışlardır. Kullandıkları çelik liflerin uzunlukları 20, 25 ve 30 mm, lif görünüm oranları ise 46, 58 ve 70'tir. Yapılan testler sonunda betonların basınç dayanımlarının lif içeriğinin ve lif görünüm oranının artması ile arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Basınç dayanımındaki artış düşük oranda bir artış olup lif içeriğinin ve lif görünüm oranının artmasıyla 70.2'den 85.4 MPa değerine çıkmıştır. Ayrıca lif içeriğinin % 2.5 değerinden fazla olması durumunda verimli lif dağılımının sağlanamadığı görülmüştür. Basınç dayanımındaki artış Şekil 1.16'da gösterilmiştir.

Ashour, Wafa ve Kamal (19), kontrol betonu basınç dayanımları 49, 79 ve 102 MPa ve lif içerikleri % 0.0, 0.5, 1.0 olacak şekilde hazırlanmış numunelerle çalışmışlardır. Hazırladıkları kiriş ve silindir numuneler üzerinde basınç, çekme, eğilme deneyleri yapmışlardır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki en önemli etkinin basınç dayanımı 49 MPa olan numunelerde görüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı 49 MPa olan betonda lif içeriğinin % 0.0'dan % 1.0'a çıkması basınç dayanımında % 34 artış sağlamıştır. Aynı şekilde basınç dayanımları 79 ve 102 MPa olan betonlarda ise basınç dayanımlarındaki artışın % 38.5 ve % 8.8 olduğu gözlenmiştir.



Şekil 1.16. Basınç Dayanımına V_f ve l/d 'nin Etkisi (Gao ve diğ., 1997)

Balaguru (20), çalışmasında hızlı dayanım kazanan çimento ile hazırlanmış çelik lifli betonların basınç ve eğilme özelliklerini incelemiştir. Karışımlarda 20 ile 60 mm arasında değişen uzunlukta ucu çengelli ve kıvrımlı lifler ve % 0.4-1.2 arasında değişen lif hacimleri kullanılmıştır. Deneyler sonunda basınç dayanımındaki artışın % 5-25 arasında olduğunu ve hızlı dayanım kazanan çimento ile yapılan lifli beton performansının portland çimentolu çelik lifli betondan farklılık göstermediği görülmüştür.

1.3.5.2. Çekme Dayanımı

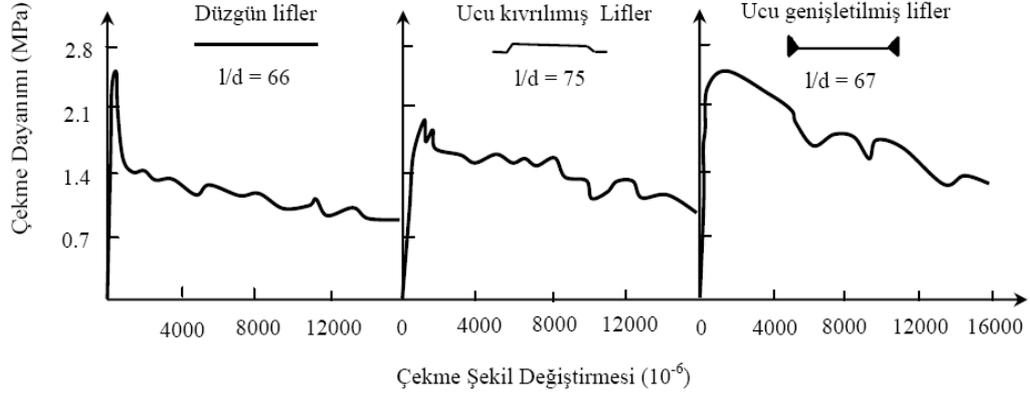
Çelik lifli betonların çekme dayanımları geleneksel betonlara göre daha

fazladır. Çelik lifli betonların çekme dayanımlarındaki artış, lif şekline, lif miktarına, lif görünüm oranına ve liflerin beton içerisinde dağılma şekline ve lif-matris aderansına göre geleneksel betonlara oranla % 25-100 arasında olmaktadır. ⁽¹⁾

Çekme gerilmesi almadığı kabulüne göre dizayn edilen beton elemanlarında özellikle dinamik yüklere maruz kaldığı deprem, türbülanslı su akımı, patlama vb. durumlarda dinamik çekme gerilmeleri ve dolayısıyla çekme gerilmelerinin neden olduğu göçmeye sebebiyet veren çatlaklar oluşmaktadır. Beton elemanlar için tehlike oluşturan bu gibi durumlarda çekme gerilmelerine maruz kalabilecek bölgelerde, çekme gerilmesinin daha homojen yayılımını sağlamak, dinamik etkiler altında oluşabilecek mikro ve makro çatlak oluşumuna karşı betonunun dayanımını arttırmak için liflerin kullanımı faydalıdır.

Fanella ve Naman (17), yaptıkları çalışmada çelik lifli betonlarda lifle beton arasındaki kenetlenmeyi açıklayan teorileri incelemişlerdir. Betonda çekme gerilmesi nedeniyle ilk çatlak oluşumunun gerilme-şekil değiştirme grafiğinde lineerliğin bittiği nokta olarak kabul edildiği teoriyi açıklamışlardır.

Bu alanda yapılan diğer çalışmalar da ise; oluşan ilk çatlağın normal betonlardaki gibi gerilme-şekil değiştirme eğrisinin üst bölgelerinde oluştuğunu vurgulamış ve eğrideki azalma bölgesini liflerin şekli, hacmi ve görünüm oranının etkilediğini belirtmiştir (Şekil 1.17) ⁽¹⁶⁾



Şekil 1.17. Farklı Şekillerde Lif İçeren Betonların Çekmede Gerilme – Şekil Değişirme Eğrileri

Gao, Sun ve Morino (18), yaptıkları çalışmada hazırladıkları karışımların lif içeriklerini % 0, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, çelik liflerin uzunluklarını 20, 25 ve 30 mm ve lif görünüm oranlarını 46, 58 ve 70 olarak seçmişlerdir. Deneyler sonunda lif hacminin % 0'dan % 2'ye çıkmasıyla yarmada çekme dayanımının 4.95 MPa değerinden 8.8 MPa değerine çıktığını görmüşlerdir. Yarmada çekme dayanımındaki artış, lif hacminin artışıyla, lineer özellik göstermiştir. Daha sonra, 3 mm uzunluğunda, çekme dayanımı 600 MPa olan mikro lifler kullanarak yaptıkları çalışmada üç değişik lif içeriği (% 0, % 2.5, % 5), üç değişik kum/bağlayıcı oranı (0, 1 ve 2) ve üç değişik kum gradasyonu (incelik modülü = 4.4, 3.0, 1.3) kullanmışlardır. Deneyler, çimento pastası ve harçlar üzerinde yapılmıştır. Numuneler 50/50 mm küp ve 200/35/35 mm prizma şeklinde ve vakum altında hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde basınç, çekme ve eğilme deneyleri yapmışlardır. Çekme dayanımları çimento pastasına % 2.5 mikro lif ilavesi ile 3.9 MPa değerinden 6.1 MPa değerine çıkmıştır. Bu artış yaklaşık olarak % 50 mertebelerindedir. Mikro lif içeriği % 5 olan karışımın

çekme dayanımı 6.5 MPa'dır. Bununla birlikte kum gradasyonunun ve kum/bağlayıcı oranı değişiminin çekme dayanımına etkisinin pek fazla etkisinin olmadığını gözlemişlerdir. Ayrıca lif içeriğinin artmasıyla harçların hava içeriğinin arttığını belirlemişlerdir. Hava içeriğinin ve kum/bağlayıcı oranının artması ile çekme, eğilme ve basınç dayanımlarında düşüş görülmüştür.

Tokyay, Ramyar ve Turanlı (3), 1 kg/m³ polipropilen lif içeren ve % 1.5 oranında düz çelik lif içeren betonlar hazırlamışlardır. Numuneler 150/300 mm silindir şeklinde olup numuneler üzerinde basınç ve dolaylı çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan testler sonunda polipropilen lif içeren betonların basınç dayanımlarının lifsiz betona oranla % 0.4 – 0.5 civarında azaldığı, çekme dayanımlarının ise % 14 – 15 civarında arttığını gözlemişlerdir. Öte yandan çelik lifler, basınç dayanımlarında % 1'lik bir artış ve çekme dayanımında da % 35'lik bir artış sağlamışlardır.

Zhan, Foure ve Trinh (21), yaptıkları karşılaştırmalı çalışmada çelik lifli betonların çekme gerilmesi altındaki davranışını, direkt çekme, dört nokta yüklemeli eğilmede çekme ve yarma deneyleri ile incelemişlerdir. Çalışmada üç tip çelik lifli bir tip kontrol betonu hazırlamışlardır. Kullanılan çelik lifler, çekme dayanımı 1400 MPa, 60 mm uzunluğunda, başlı ve kıvrımlı biçimli olup betondaki lif içerikleri 25 ve 40 kg/m³'tür. Direkt çekme deneyi için 14 cm çapında silindir kesitli, numunenin sonuna doğru genişleyen test cihazının başlığının numuneyi kavrayabileceği şekilde özel numuneler hazırlanmıştır. Diğer deneyler için 160/320 mm silindir ve 140/140/560 mm prizmatik numuneler kullanılmıştır. Deneyler sonunda direkt çekme ile eğilmede çekme deneyleri arasında bir sapma olmadığı, çelik lifli betonların düktil davranışını iyi ifade ettikleri görülmüştür. Silindir yarma deneyinde

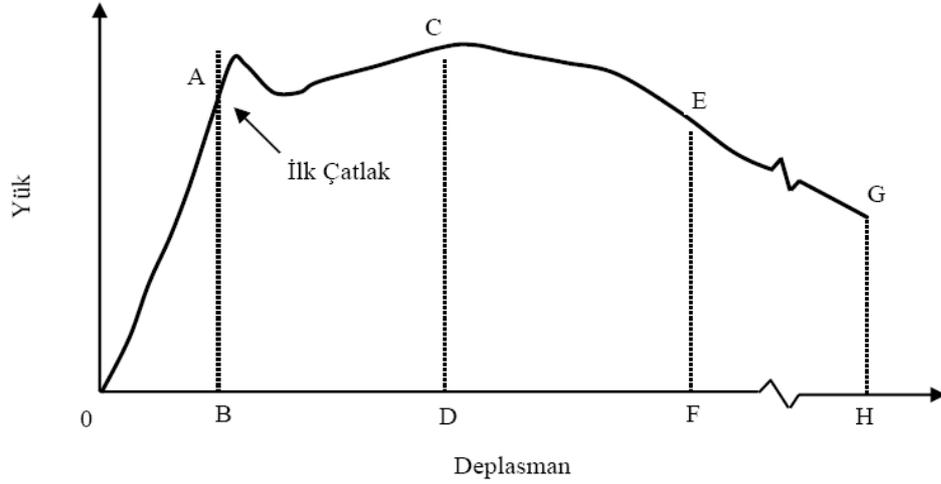
ise çelik lifli betonun kompozit etkisinin numunenin iç yapısında içsel gerilmelerin dağılmasında değişkenlik oluşturduğunu görmüşlerdir.

1.3.5.3. Eğilme Dayanımı

Çelik liflerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi çekme ve basınç dayanımlarına olan etkisinden daha fazladır. Çelik lifli betonların nihai eğilme dayanımları normal betonlara göre % 50-100 arasında artış göstermektedir. Bu artış, çelik liflerin yüksek çekme dayanımları ile ilişkilidir. Çimento hamuru matrisinin çatlamasından sonra çatlak sonlarından gerilme transferi ve dağılımı yapması nedeniyle yük, ilk çatlaktan sonra bir miktar daha artar. Bu durumda maksimum eğilme yükü normal betonlara göre daha fazla olmaktadır. ⁽¹⁾

Eğilme dayanımını etkileyen faktörler, diğer dayanımlarda olduğu gibi lifin şekli, lifin görünüm oranı, lif hacmi, deney numune boyutları ve liflerin beton içerisindeki dağılımlarıdır . Esas olan betonla lif arasındaki aderans gerilmesini arttırmaktır. Tipik yük-sehim eğrisinde iki tip eğilme dayanımından bahsedilir. Şekil 1.18'de A noktası ile gösterilen yük-sehim eğrisinin lineerlikten çıktığı değer ilk çatlak eğilme dayanımı olarak adlandırılır. Bu noktada numunede ilk çatlak oluşumu gerçekleşmiştir. Diğer eğilme dayanımı ise C noktası ile gösterilen dayanımın maksimum değere ulaştığı nihai eğilme dayanımıdır. İlk çatlak eğilme dayanımı, betonun çekme dayanımına bağlıdır. Nihai eğilme dayanımı, betonda bulunan liflerin hacim yüzdesi (lif içeriği) ve görünüm oranları (l/d) ile ilişkilidir. Hacim yüzdesinin % 0.5'ten, görünüm oranınının 50 değerinden az olması durumunda betonun statik dayanım özellikleri üzerinde liflerin etkisi az olmaktadır. Ucu kancalı veya kıvrımlı liflerin betonda kullanımı, iyi aderans sağlanması nedeniyle, eğilme dayanımını

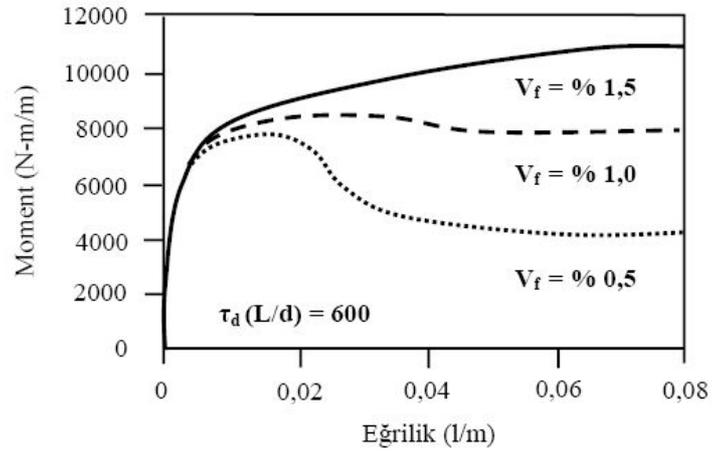
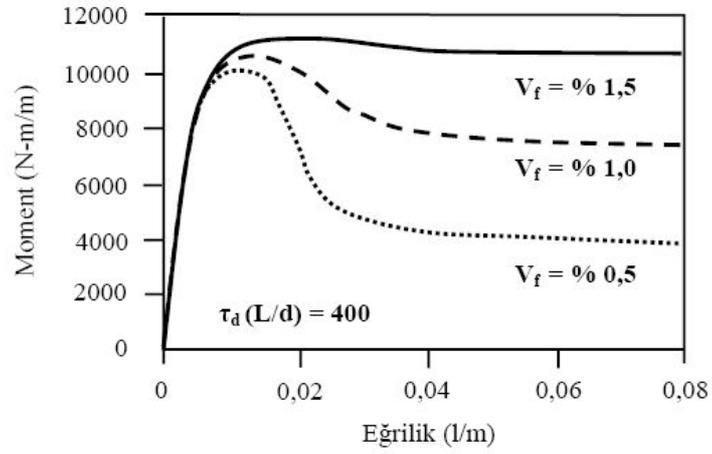
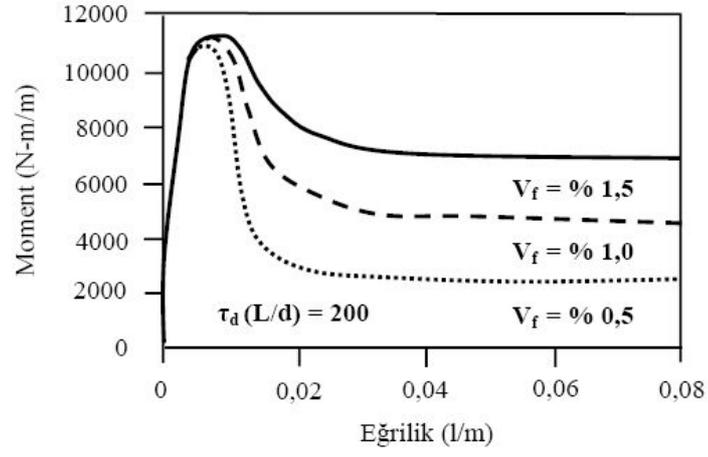
% 100 oranında arttırdığı görülmüştür. Ucu kancalı, çentikli veya kıvrımlı liflerin dayanım artışı, aynı yüzdelerde olsalar da, düz liflere göre daha fazladır. Diğer bir deyişle aynı dayanımı sağlamak için kullanılması gereken lif içeriği, düz liflerde, diğerlerine göre daha fazla olacaktır. ⁽¹⁶⁾



Şekil 1.18. Çelik Lifli Betonda Tipik Eğilmede Yük-Deplasman Eğrisi

Sonraki çalışmalarda, lif donatılı betonların gerçek üstünlüğünün, çatlak gelişimi ve yükleme durumundaki çatlak genişlemelerinde saklı olduğu saptanmıştır. Bu özellikten dolayı çelik lifli betonlar önemli eğilme performanslarına sahiptirler. ⁽²²⁾

Look ve Xiao (22), beton karışımlarında yüksek lif içeriği ve görünüm oranı kullanımının moment-eğrilik bağıntısına etkisini incelemiştir. Çelik lifli betonların eğilme dayanımlarındaki iyileştirmenin artırılması için su/çimento oranı, lif yüzey özellikleri, lif geometrisi ve yükleme hızı gibi birçok etkene bağlı olan aderans gerilmesinin artırılmasının esas olduğunu vurgulamışlardır (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Moment-Eğrilik Bağntısına $\tau_d(L/d)$ (Aderans Dayanımı İle Lif Görünüm Oranı) Çarpımının ve Tel İçeriğinin (V_f) Etkisi

Eyyubov, Köksal ve Ünal (14), yaptıkları çalışmada 60 mm uzunluğunda, 0.90μ çapında 67 narinliğe sahip çelik lif ve 13 mm uzunluklu, 0.022μ çaplı

polipropilen lif kullanmışlardır. Hazırlanan beton numuneler üzerinde basınç, elastisite modülü, eğilme, donma-çözülme ve aşınma direnci deneyleri yapılmıştır. Karışımlar, kontrol betonu, 600 gr/m³ polipropilen lif içerikli beton, 40 kg/m³ çelik tel içerikli beton, 300 gr/m³ polipropilen ve 20 kg/m³ çelik tel içerikli karma beton, 600 gr/m³ polipropilen ve 40 kg/m³ çelik tel içerikli karma beton olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneyler sonucunda eğilme dayanımlarındaki artışın en fazla olduğu betonlar, 40 kg/m³ çelik tel içerikli beton ile 600 gr/m³ polipropilen ve 40 kg/m³ çelik tel içerikli karma betonda sağlanmıştır. Artışlar sırayla % 19.71 ve % 21.15 olarak elde edilmiştir. İlk çatlak enerjileri ve ilk çatlak yükleri açısından bakıldığında 40 kg/m³ çelik tel içerikli beton % 135.74, 300 gr/m³ polipropilen ve 20 kg/m³ çelik tel içerikli karma beton % 38.56, 600 gr/m³ polipropilen ve 40 kg/m³ çelik tel içerikli karma beton ise % 13.21, kontrol betonuna oranla artış göstermişlerdir.

Pierre, Pleau ve Pigeon (23), 3 mm uzunluğunda, çekme dayanımı 600 MPa olan mikro lifler kullanarak yaptıkları çalışmada üç değişik lif içeriği (% 0, % 2.5, % 5), üç değişik kum/bağlayıcı oranı (0, 1 ve 2) ve üç değişik kum gradasyonu (incelik modülü = 4.4, 3.0, 1.3) kullanmışlardır. Deneyler çimento pastası ve harçlar üzerinde yapılmıştır. Deneyler sonucunda % 2.5 mikro lif ilavesinin harç ve çimento pastasının mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini fakat mikro lif ilavesinin % 2.5'ten % 5'e çıkarılmasının mekanik özelliklerde aynı ölçüde bir artış sağlamadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca mikro lif ilavesi, özellikle basınç ve çekme dayanımlarından çok harcın eğilme dayanımı üzerinde etkisini göstermiştir.

Harçlarda ki hava içeriği mikro lif ilavesinin artması ile artmıştır. Eğilme dayanımları lifsiz harçta 7.7 MPa iken % 2.5 mikro lif ilavesiyle 14 MPa değerine

çıkarak yaklaşık % 100'lük bir artış sağlamıştır. % 5 lif ilavesinde ise eğilme dayanımı 14.8 MPa değerine çıkmıştır.

Lok, Member ve Pei (24), çelik lifli betonun çekme davranışını, yumuşama davranışı ile birleştiren bir modelleme yapmışlardır. Yapılan analitik modelde çekme dayanımı (f_t), lif içeriği (V_f), lif görünüm oranı (l/d) ve lif- beton aderans dayanımı (τ_d) bu çalışmadaki parametrelerdir. Bu model çelik lifli betonun pekleşme karakteristiğinin değişkenlerin büyüklüğüne bağlı olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışma sonunda yüksek lif içeriği ve uzun lif kullanımının aderans dayanımının olumlu etkisi ile daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Bu nedenle lif yüzeyi ve lifin diğer fiziksel özelliklerin lif seçiminde etkili birer parametre olduğu görülmüştür.

Ünal (4), prefabrik sektöründe kullanılan seri üretim sağlayarak ilk günlerdeki mukavemet gelişimini hızlandırmak için ısıtma işlem uygulamasının çelik lifli betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada kullandığı lif miktarları 0, 2.5, 5, 8, 10 dm^3/m^3 olarak seçilmiştir. Üretilen numunelere farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtma işlem çevrimleri uygulanmıştır. Isıtma işlem çevrimleri 20°C'de normal kür, 50°C'de yumuşak çevrim, 65°C'de ılımlı çevrim ve 80°C'de sert çevrim olmak üzere dört çevrim uygulanmıştır. Deney süreleri 1, 28 ve 90 gün olarak belirlenmiştir.

Deneyler sonunda, ısıtma işlem uygulamasının 1 günlük numunelerdeki mukavemet artırıcı etkisinin, betona eklenen lif miktarının artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Betona eklenen lif miktarının hem 20°C'de normal kür uygulanmış numunelerde hem de ısıtma işlem uygulanmış numunelerde erken ve ileriki

yaşlardaki eğilme dayanımını arttırdığı görülmüştür.

1.3.5.4. Darbe Dayanımı

Betonun ani olarak dinamik bir yükü yüklenmesine karşı gösterdiği direnç “darbe dayanımı” denir. Lifli betonlardaki darbe dayanımı normal betonlara göre % 100-1200 arasında artış göstermektedir. Çelik lifler, matris üzerine gelen dinamik yükleri kendi üzerlerine alarak matrisin, çarpma etkilerine karşı daha yüksek bir çarpma mukavemeti göstermesini sağlarlar. Bu nedenle darbe dayanımı, betonun tokluğu ve kırılma enerjisi ile doğrudan ilgilidir. ⁽⁸⁾

Çekme gerilmesi almadığı kabulüne göre dizayn edilen beton elemanların özellikle dinamik yüklere maruz kaldığı deprem, türbülanslı su akımı, patlama, darbe vb. durumlarda beton elemanlar üzerinde dinamik çekme gerilmeleri ve dolayısıyla çekme gerilmelerinin neden olduğu göçmeye sebebiyet veren çatlaklar meydana gelecektir. Bu gibi dinamik gerilmelere maruz kalabilecek elemanlarda çekme gerilmelerinin daha homojen yayılımını sağlamak, dinamik etkiler sırasında oluşabilecek mikro ve makro düzeydeki çatlak oluşumlarına karşı betonun direncini arttırmak için çelik lif kullanımı uygun bir çözümdür. ⁽⁶⁾

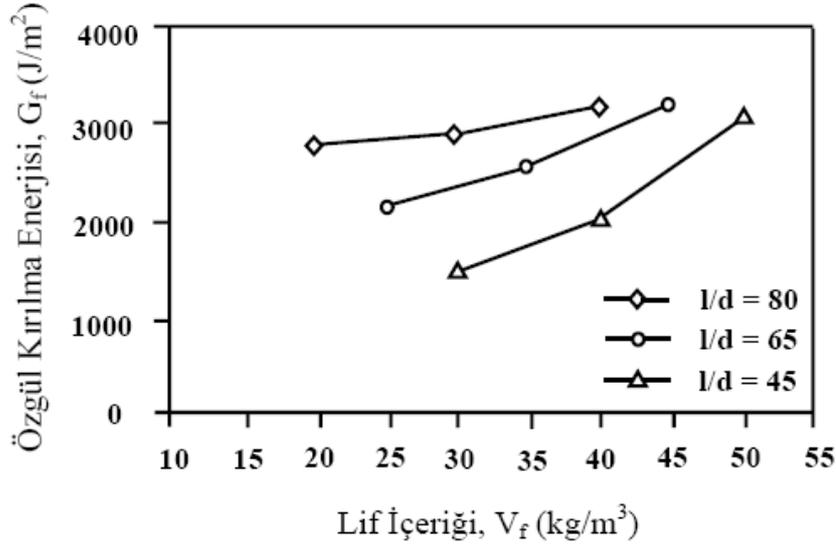
Çelik lifli betonun yüksek kırılma enerjisi özelliği sebebiyle özellikle tam korumalı askeri yapılar, hastaneler, köprüler, telekomünikasyon yapıları, okullar, hareket merkezleri, hava yolları gibi herhangi bir savaş durumunda gelebilecek saldırılara karşı veyahut büyük çaplı afet durumlarında (deprem, sel, kasırga vb.) ayakta kalması istenilen yapılarda, yapıya sünek özellik ve darbe dayanımı kazandıracak çelik liflerin yapı malzemesi olarak kullanımı büyük avantaj sağlayacaktır.

Betonun darbe yükleri altındaki davranışını tanımlayabilmemiz için en önemli parametreler betonun dayanımı ve kırılma enerjisidir. Betonun darbe dayanımı Drop-weight denen ağırlık düşürme deneyi ya da darbe etkisi veren bir alet ile dinamik çekme, eğilme veya basınç yükü uygulanarak yapılır. Ağırlık düşürme deneyinde, ilk çatlak anındaki darbe sayısı ve malzemenin kırılma anındaki darbe sayısı normal betona göre yorumlanır. Diğer kıyaslama yöntemi ise çelik lifli betonun darbe yükü altındaki davranışı ile statik yükleme altındaki davranışının karşılaştırılmasıdır. (7)

Çelik lifli betonlarda, lif görünüm oranının ve lif içeriğinin artması ve ayrıca lif şeklinin kancalı veya kıvrımlı olması, kırılma enerjisini arttıran unsurlardır. Çelik lifli betonun kırılma enerjisinin belirlenmesinde, çelik liflerin çekme dayanımı da önemli rol oynar. Normal betonlarda kırılma enerjisi (G_f), $100 - 150 \text{ J/m}^2$ arasındadır. Bu kırılma enerjisi, çelik lifli betonlarda 4000 J/m^2 değerine kadar çıkabilmektedir. (25)

5 mm'lik bir sehim için yük-sehim eğrisi altındaki alandan hesaplanmış olan özgül kırılma enerjisinin lif görünüm oranı ve lif içeriği ile değişimi Şekil 1.20'de verilmektedir. Şekil 1.20'den görüldüğü gibi çelik lifin görünüm oranı ve içeriğinin artmasıyla yüksek özgül kırılma enerjisi ve sonuçta yüksek süneklik elde edilmektedir. Lif içeriği 30 kg/m^3 olduğunda narinliğin 45'ten 80'e çıkmasıyla özgül kırılma enerjisi yaklaşık 2 kat artış göstererek 1468 J/m^2 'den 2889 J/m^2 'ye artmaktadır. Ayrıca, çelik lifli betonların sünekliği normal betonunkine oranla yaklaşık 25 kat daha fazla olduğu da görülebilir. Lif içeriği ile lif görünüm oranının artışıyla özgül kırılma enerjisinin artmasının nedeninin; kırılma sürecinde liflerin sıyrılmasından, çok sayıda ve rasgele dağılılı liflerin çatlakların birleştirilmesinde bir

köprü rolü oynamasından ve böylece dolaylı çatlak yayılmasından kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 1.20'dan görüldüğü gibi çelik lif içeriğini ve görünüm oranını istenilen performansa göre tasarlamak mümkündür. ⁽²⁶⁾



Şekil 1.20. Çelik Lifli Betonlarda Lif l/d Oranının ve Lif İçeriğinin Kırılma Enerjisine Etkisi

Wang ve Maji (27) yaptıkları çalışmada dalgalı ve ucu kancalı çelik liflerle % 0.50, % 0.75 ve % 1.5 oranlarında yapılan betonlarda kırılma enerjisinin lif hacmi ile arttığı ve normal betondan oldukça yüksek olduğunu gözlemişlerdir. Çelik liflerin kırılma enerjisi üzerindeki büyük etkisinin % 1.5 lif hacmine sahip kırıntı maksimum eğilme deformasyonunun 0.4 mm'den 3 mm gibi büyük bir değere çıktığı görülmüştür.

Marar, Eren ve Çelik (28), ağırlık düşürme darbe test cihazını kullanarak, ucu kancalı 60, 75, 83 l/d oranlarına sahip, hacimce % 0.5, % 1, % 1.5, % 2 lif hacimleri

ile hazırlanmış silindirik, yüksek dayanımlı beton numuneler üzerinde darbe deneyleri yapmışlardır. Tüm numunelerin yuttuğu enerjiyi bulmak için basınç deneyinde gerilme-şekil değiştirme diyagramları çizilmiştir. Deneyler sonucunda görülmüştür ki; çelik lif hacminin artması, betonun darbe direncini arttırmıştır. Çelik lif hacminin % 2 olduğu betonda, görünüm oranı 83 olan betonun darbe direnci 74 kat lifsiz betona göre artmıştır. Görünüm oranı 60 ve 75 olan betonların darbe direnci artışları ise sırasıyla 38 ve 55 kat değerindedir. Betonların basınç tokluklarında da önemli artış görülmüş ve betonun darbe direnci ile arasında regresyon analizi yapılarak formüsel ilişki türetilmiştir.

Najatara, Dhang ve Gupta (29), çalışmalarında 27.5 mm uzunluğunda l/d oranı 55 olan lifleri, % 0.5 oranında kullanarak hazırladıkları silindirik lifli ve lifsiz numuneler üzerinde darbe testleri yapmışlardır. Darbe testini ağırlık düşürme test cihazında yapmışlar ve numunelerde oluşan ilk çatlak ile kırılma sayılarını belirlemişlerdir. Lifsiz beton numunelerde meydana gelen ilk çatlak oluşum sayısı ortalaması 71 iken bu değer çelik lifli betonda 103 olmuştur. Yine aynı şekilde kırılma anındaki düşü sayısı ortalaması lifsiz betonda 77 iken çelik lifli betonda 142 olarak tespit edilmiştir.

Mindess, Wang, Rich ve Morgan (30), çekme dayanımı 296 MPa, elastisite modülü 2647 MPa (çeliğin yaklaşık % 1.2'si), uzunlukları 19 mm ve 25.4 mm olan polyolefin liflerin prefabrik sektöründeki prekast eleman yapımında geleneksel donatı yerine kullanımını, darbe dayanımı bakımından araştırmışlardır. Polyolefin liflerin betonda kullanım hacimleri % 0.5, % 1.0, % 1.5 olacak şekilde seçilmiştir. Darbe deneyi 557 kg'lık darbe test çekicinin 50 mm'den numunenin üzerine düşürülmesi ile gerçekleşmiştir. Deneyler sonunda % 1.5 polyolefin lif içeren prekast

betonların kırılma enerjisi ve taşıdıkları maksimum yük, geleneksel donatılı prekast elemanlar ile benzer seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Böylece prekast eleman üretiminde kullanılan geleneksel donatı yerine polyolefin lif kullanarak yapım maliyetinde ve birim ağırlığında düşüş sağlanabileceği rapor edilmiştir.

Yıldırım (31), araştırmasında kontrol, cam lif ve çelik lif içeren ve ayrıca çelik ile cam liflerin beraber kullanıldığı karma lifli betonlar hazırlamıştır. Darbe dayanım testlerini 100/100/100 mm küp örnekler üzerinde 38 cm düşü yükseklikli, 14 kg düşü ağırlıklı deney düzeneği ile yapmıştır. Deneylede ortaya çıkan kırılma darbe sayıları Çizelge 1.5'te verilmiştir. Çelik liflerin hacimsel yüzde oranlarının cam liflerden daha fazla olması ve çelik liflerin uçlarının kıvrık olması kırılmayı geciktirmiştir. Sadece cam lif eklenmiş betonlarda lif hacminin düşük olmasına karşın kırılma darbe sayılarında lifsiz betona göre % 100 artış sağlamışlardır. Liflerin beraber kullanımı, artan lif sayısı ile birlikte kırılma darbe sayısını doğru orantılı olarak arttırmıştır.

Çizelge 1.5. Kırılma Darbe Sayıları

Beton Cinsi	Kırılma Darbe Sayısı
Kontrol	13
Çelik Lif (hacim % 0.5)	31
Çelik Lif (hacim % 0.75)	32
Çelik Lif (hacim % 1.0)	42
Cam Lif (hacim % 0.1)	28
Çelik + Cam Lif (hacim % 0.5 + % 0.1)	44
Çelik + Cam Lif (hacim % 0.75 + % 0.1)	48
Çelik + Cam Lif (hacim % 1.0 + % 0.1)	54

Özyurt, İlki, Taşdemir ve Yerlikaya (25), çalışmalarında hazırladıkları yüksek dayanımlı çelik lifli betonları 7 gün 20°C'de, sonraki 2 gün 90°C'de ve ardından 13 gün 20°C'de kür etmişlerdir. Kontrol numuneleri ise standart kür sıcaklığı olan 20°C'de saklamışlardır. 100/100/500 mm'lik prizmatik numuneler üzerinde eğilme testi yaparak kırılma enerjilerini belirlemişlerdir. Testler sonunda yüksek sıcaklıktaki kürün, normal kür koşullarına göre çelik lifli betonun eğilme dayanımını ve kırılma enerjisini önemli ölçüde arttırdığını görmüşlerdir.

Bilimsel çevrelerde, darbe testlerinde kullanılan gerek patlayıcı gerekse düşü ağırlıklı deney düzenekleri içinden herhangi birinin standart olarak kabul edilemeyeceğini öngörülmüştür. Söz konusu bu deney düzeneklerinde, değişik numune boyutu ve geometrilerinde yapılan deneylerde elde edilen sonuçların ancak kendi içinde kıyaslanabileceğini, dizayn maksadıyla malzeme özelliklerini belirlemede kullanılamayacağı vurgulanmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, düşü

ağırlıklı darbe deney düzeneklerinde, darbe kafasında ölçülen yük ile kirişin karşı koyduğu yükün numune içi etkiler nedeniyle aynı olmadığı kabul edilmiştir. Ayrıca numunede meydana gelebilecek iç osilasyonların kauçuk bir ped kullanmak suretiyle indirgenebileceğini belirtmişlerdir. Lifli betonlarda yaptıkları deneylerde, çelik lifli numunelerin lifsiz numunelere nazaran 20-100 kat daha fazla darbe dayanımı gösterdiğini, lif ile matris arasındaki kenetlenmenin şekil değiştirme derecesinden hemen hemen bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir. ⁽⁶⁾

Mindess ve Yan (32), geleneksel donatı çubuğu ile beton arasındaki aderans dayanımının, darbe etkisi altındaki değişimini ve lif ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Deneylerinde yalın beton, % 0.1 ve % 0.5 polipropilen lifli beton ve % 0.5 ve % 1.0 çelik lifli beton kullanmışlardır. Darbe deneyleri, üç farklı düşü yüksekliği ile düşü ağırlıklı darbe test cihazı yardımıyla yapılmıştır. Düşü yüksekliği arttıkça numunelerin aderans dayanımı ve kırılma enerjisi artmıştır. Çelik liflerin betona ilavesi, darbe etkisi altında donatı ile beton arasındaki aderans dayanımı ve betonun kırılma enerjisinin artışında, polipropilen liflerden daha etkili olmuştur. Betonların aderans dayanımları ile kırılma enerji değerleri Çizelge 1.6'da verilmiştir.

Çizelge 1.6. Aderans Dayanımları İle Kırılma Enerji Değerleri

	Lif İçeriği (% hacimce)	Düşü Yüksekliği (mm)	Ortalama Aderans Dayanımı (MPa)	Kırılma Enerjisi (Nm)
Yalın Beton	-	300	10.1	53.8
		500	10.4	55.8
		800	11.2	58.0
Polipropilen Lifli Beton	0.1	300	10.2	54.2
		500	10.8	56.1
		800	11.5	59.9
	0.5	300	11.1	60.1
		500	11.6	63.4
		800	12.3	66.7
Çelik Lifli Beton	0.5	300	11.8	74.3
		500	13.8	83.2
		800	16.7	94,5
	1.0	300	14.8	110.3
		500	16.3	129.8
		800	19.1	140.4

1.3.5.5. Yorulma Dayanımı

Malzemeyi kırmaya yetmeyen elastik limitin altındaki gerilmelerin arka arkaya tekrarlı bir şekilde uygulanması sonucunda malzemede görülen ani ve gevrek kırılma olayına “yorulma” denilmektedir. Bu kırılma olayı dinamik yüklemelerdeki kırılmanın başka bir örneğidir. “Yorulma dayanımı” ise belirli sayıdaki yük tekrarı altında, malzemenin kırılmadan direnebileceği en büyük gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır. ⁽³³⁾

Tekrarlı uygulanan gerilmelerin etkisiyle, malzemenin bünyesinde yer almakta olan veya yeni oluşan mikro çatlaklar giderek daha büyük çatlaklara

dönüşmekte ve kırılmalara yol açmaktadır. Çelik lifler, bu noktada performanslarını gösterirler ve çatlak gelişimini engelleyerek tekrarlı yüklerin oluşturacağı hasarların şiddetini azaltırlar. Yapılan çalışmalar sonunda, çelik lifli betonların yorulma dayanımının normal betonlara göre % 50-100 arasında arttığı gözlenmiştir. ⁽¹⁶⁾

Genel olarak, betondaki yorulma sınırı, 10 milyon yük tekrarına karşılık gelen gerilme değeri olarak kabul edilmektedir. Lif tipi ve içeriğine bağlı olarak, çelik lifli betonlarda 2 milyon yük tekrarında yorulma dayanımı, statik eğilme dayanımının % 65-90'i arasındadır. ⁽¹⁶⁾ Normal betonlarda yorulma mukavemeti limiti, genel olarak statik eğilme gerilmelerinin % 50'si kadardır. Normal betonlarda beton içerisine 30-40 kg/m³ lif eklenmesi sonucu, bu limit % 80'lere çıkar.

Betonda oluşan çatlaklar, betonun yük taşıma kapasitesini ve dolayısıyla yorulma dayanımını da düşürürler. Çelik lifli betonlarda çatlak oluşumu ve çatlakların ilerlemesi engellendiği için tekrarlı yorulma yükleri altındaki kırılma süreci engellenir ya da geciktirilir. Çelik lifli betonlarda lif hacminin artması, yorulmaya karşı direnci arttırmaktadır. Bu nedenle yorulma dayanımı arttırılmak istenen geleneksel donatılı yapı elemanının, çelik liflerle güçlendirilmesi uygun olmaktadır.

Yıldırım (31), araştırmasında kontrol, hacimce % 0.5, % 0.75 ve % 1.0 oranlarında çelik lif içeren, % 0.1 oranında cam lif içeren betonlar ve ayrıca hacimce (% 0.5 + % 0.1), (% 0.75 + % 0.1), (% 1.0 + % 0.1) oranlarında çelik ile cam liflerin beraber kullanıldığı karma lifli betonlar hazırlamıştır. Numuneler üzerinde darbe ve yorulma tesirlerini araştırmıştır. Yorulma dayanımının, çelik ve cam liflerin ayrı ayrı kullanıldığı numunelerde kontrol betonuna göre pek fazla etkilenmediğini, en belirgin dayanım artışının % 0.5 çelik ve % 0.1 cam lifin birlikte kullanıldığı

numunelerde ortaya çıktığını görmüştür.

Ramakrishnan ve Lokvik (34), lifli betonların yorulma davranışı üzerine yaptığı çalışmasında 50 mm uzunluğunda düz, kıvrımlı ve ucu kancalı çelik lifler ile 19 mm uzunluğunda polipropilen lifler kullanarak lif içerikleri % 0.5 ve % 1.0 olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Eğilme yorulma deneylerini 152/152/533 mm'lik prizmatik örnekler üzerinde yapmıştır. Yüklemeler, numunelerin testler sonucu belirlenen ortalama statik eğilme dayanımlarının % 10'u mertebesinde iki milyon kez tekrarlı olarak uygulanmıştır. Yüz bin tekrarda yorulma limiti, ucu kancalı çelik lifler için % 0.5 lif içeriğinde % 76.3, % 1.0 lif içeriğinde ise % 77.2 olarak belirlenmiştir. Bu değer lifsiz betonlarda % 65 bulunmuştur.

Deneyle sonucunda elde edilen veriler şunlardır;

- Yorulma dayanımı, lif ankraj özelliğinin ve aderans dayanımının artması ile artmıştır. Bu nedenle ucu kancalı çelik lifler en iyi performansı göstermiştir.
- Liflerin kirişin çekme bölgelerinde dağılması yorulma performansında önemli değişiklikler sağlamıştır.
- Polipropilen lif kullanımı, eğilme dayanımında yükselme sağlamamıştır. Fakat eklenen lif miktarının artışına bağlı olarak yorulma dirençleri artmıştır.

1.3.5.6. Durabilite

Dayanımı etkileyen bir problem de birbirine yapışık halde bulunan liflerin beton karışımı sırasında ayrılamayıp betonun içerisinde kalması sonucu betonda boşluklu bir yapı oluşmasıdır. Böyle bir durumda sıvı ve gazların beton içerisine nüfuz etmesi olasıdır. Geçirgenlikteki olumsuz gelişme dayanıklılık problemlerinin

başlangıcıdır. Böyle bir gelişme sonucu çelik lifli betonlarda beton içerisindeki çelik lifin korozyona uğraması yada kimyasal olaylar ile bozulması kolaylaşacaktır. (1)

Bunun önlenmesi için normal betonlar için de geçerli olan iyi karışım, iyi yerleştirme ve sıkıştırma ile iyi kür koşulları sağlanmalı ve ayrıca korozyon riski olan yerlerde galvanizlenmiş lifler kullanılmalıdır.

Çelik lifler, genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kaviteasyon dirençlerini arttırmaları. Çelik lifler darbe aşınmasının neden olduğu mikro çatlakları kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını azaltırlar. Ayrıca çelik lifler, beton kaplamaların yüzeylerinin pullanmasını önleyici etki yapmaktadır. ⁽¹⁴⁾

Rapoport, Aldea, Shah, Ankenmann ve Karr (35), çelik lifli betonlarda çatlak genişliği ile geçirimsizlik arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Ayrıca çelik liflerin geçirimsizlik üzerine etkisi incelenmiştir. Deneylerde lifsiz, hacimce % 0.5 lifli ve % 1.0 lifli karışımlar hazırlanmıştır. Silindirik numunelerde 0, 100, 200, 300, 400 ve 500 µm seviyelerinde çatlaklar oluşturulmuştur. Daha sonra numunelerde düşük basınçlı su geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Deneyler sonunda çelik liflerin çatlak genişliğini düşürüp çok sayıda durabilite açısından önemsiz küçük çatlaklar oluşmasına sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca % 1.0 lif içerikli numuneler, % 0.5 lif içerikli numunelerden daha az geçirimsizlik göstermişlerdir. Çatlak genişliğinin 100 µm olması durumunda geçirimsizlik en az seviyede olmuştur.

Eyyubov, Köksal ve Ünal (14), çelik lifli ve polipropilen lifli numuneler üzerinde, donma-çözülme ve aşınma direnci deneyleri yapmışlardır. Karışımlar, kontrol betonu, 600 gr/m³ polipropilen lif içerikli beton (PPL), 40 kg/m³ çelik tel içerikli beton (ÇT), 300 gr/m³ polipropilen ve 20 kg/m³ çelik tel içerikli karma beton

(K1), 600 gr/m³ polipropilen ve 40 kg/m³ çelik tel içerikli karma beton (K2) olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneyler sonunda, aşınma direnci bakımından K1, ÇT ve K2 betonları sırasıyla kontrol betonuna kıyasla % 12.7, % 6.6, % 5.4 artış, PPL betonu ise % 23.7 düşüş göstermiştir. Donma-çözülme dirençleri bakımından ÇT ve K2 grubu betonlar, kontrol betonuna kıyasla % 42.4 ve % 42.1 artış, PPL ve K1 grubu betonlar ise %15.8 ve % 25 düşüş göstermişlerdir.

Mu, Meyer ve Shimanovich (36), suda ve % 3.5 NaCl çözeltisi içinde 0.44, 0.32 ve 0.26 su/çimento oranlı lifsiz ve % 1.5 çelik lifli betonların donma-çözülme dirençlerini araştırmışlardır. Deneyler sonunda NaCl çözeltisi içindeki numunelerin donma-çözülme tekrarları sonundaki ağırlık kayıpları daha fazla olmuştur. Ayrıca su / çimento oranlarının azalması ve betonda lif kullanımı hasarı azaltmıştır.

Erbaş (37), polipropilen lifler kullanarak yaptığı çalışma sonunda polipropilen liflerin betonun birçok özelliğini iyileştirdiğini belirlemiştir. Betonun çökmesinde bir miktar artış sağlanmıştır. Kılcal su emme ve geçirimsilikte azalma olmuş, yangın direnci artmıştır. Plastik rötre ve çatlamların sınırlandığı görülmüştür. Aderans yeteneği artmış ve metal donatının korozyonu önlenmiştir.

1.3.5.7. Tokluk

Çelik lifler, gerek dinamik gerekse statik yüklemelerde betonun eğilme kuvvetleri altındaki deformasyonu sırasında yapılan işi arttırarak betona aynı gerilme ölçeğinde daha yüksek deformasyonlar yapabilme yeteneği kazandırır. Bu çelik lifli betonların en önemli özelliğidir. Çelik lifli betonların enerji yutma kapasitesi normal betonlara göre %100-1200 arasında artış gösterebilmektedir. Bu değer eğilme deneyinde bulunan yük-deplasman eğrisi altında kalan alan ile belirlenir.⁽¹⁾

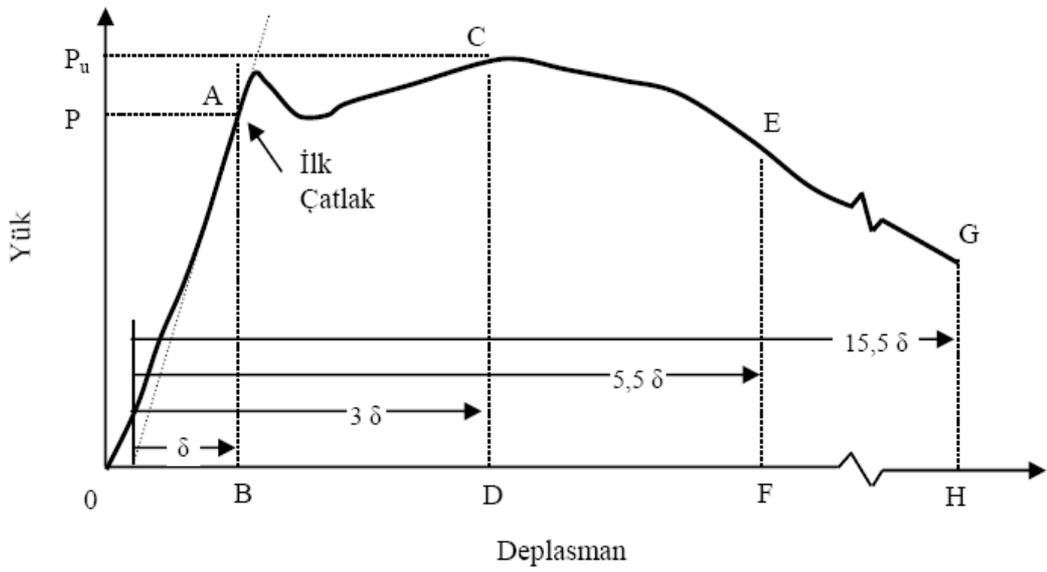
Betonda maksimum gerilmeye ulaşmadan meydana gelen ilk çatlakların oluşumu sırasındaki deformasyonlar, normal ve çelik lifli betonlarda hemen hemen aynı olmaktadır. İlk çatlak oluşumundan sonra artan gerilmeler maksimum gerilmeye kadar, gelişen çatlakların birleşmesine, dolayısıyla betonun rijitliğinin azalmasına neden olmaktadır. Ancak çelik lifli betonlarda yük eksenine dik olan lifler, yanal deformasyonları, yüksek çekme dayanımları ve matris ile aralarındaki aderans nedeniyle, azalttıklarından tokluk artmaktadır. ⁽³⁾

Çelik lifli betonların enerji yutma kapasitesi lifin şekli, lifin görünüm oranı, lif hacmi, deney numune boyutları ve liflerin beton içerisindeki dağılımlarından etkilenir. Statik hesaplar yapılırken, çelik lifler eğilme momentini alan hasır veya çubuk donatı gibi görülmemelidir. Çelik lifler betonun yapısını değiştiren, betonu plastik davranışa iten malzemelerdir. Çelik lifli betonun özelliği onun arttırılmış elastikiyet ve enerji yutma yeteneğidir. Yani, lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre çok daha yavaştır. Dolayısıyla meydana gelen şekil değiştirme işi çelik lifli betonlarda oldukça büyüktür. ⁽⁶⁾

İlerideki çalışmalarda ise; tokluğun yük-deformasyon grafiğinin altında kalan alan yardımıyla bulunduğunu bu nedenle tokluğun numune boyutu, yükleme düzeni (üç noktalı veya dört noktalı), yükleme hızı gibi parametrelere bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

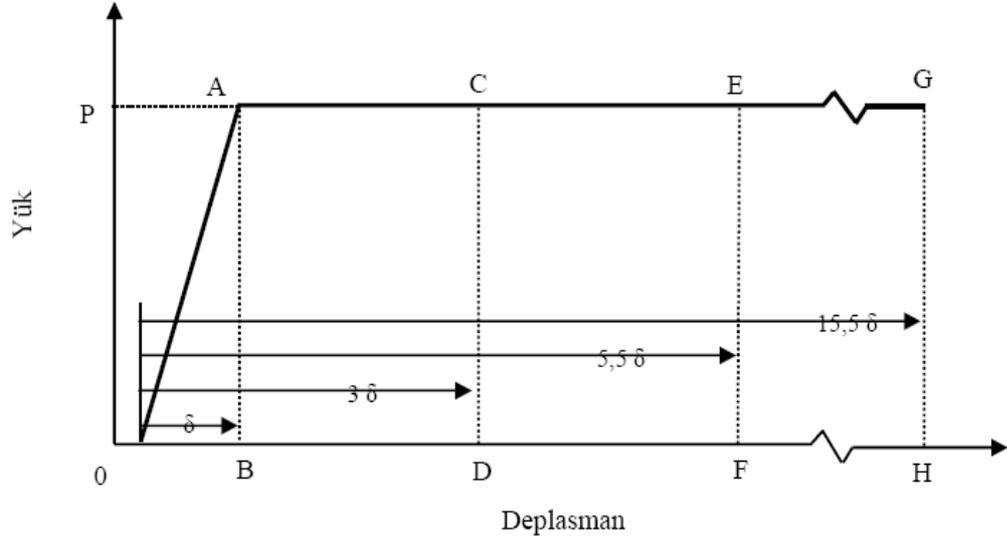
Çelik lifli betonda tokluğun belirlenmesi için yapılan eğilme deneyinden elde edilen yük-deplasman eğrisi, deney numunesi boyutu ve geometrik yapısı, deney düzeneği ve yükleme tipi ile yükleme hızına bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Bu nedenle malzemenin tokluğunun açıklanması için ASTM C 1018'de tanımlanmış

olan I_5 , I_{10} ve I_{30} TOKLUK İNDEKSLERİ sırasıyla, malzemenin doğrusal elastik davranışı ve plastik davranışını açıklamak bakımından daha kullanışlıdır. Bu indeksler numune özelliklerinden bağımsız olduğu için daha anlamlıdır. Tokluk indeksleri ne kadar yüksekse malzeme o kadar sünektir. Şekil 1.21’de görülen ilk çatlak gerilmesi olan A noktasına kadar olan yük-deplasman eğrisinin altındaki OAB üçgen alanı belirlenir.



Şekil 1.21. Çelik Lifli Betonda Yük-Deplasman Eğrisi ve I_5 , I_{10} ve I_{30} İndeksleri İçin Tanımlanmış Alanlar

ASTM C 1018’e göre ilk çatlak gerilmesi alanının üç katındaki eğilme değerine kadar numune yüklenerek OACD alanı belirlenir. Bu alan OAB ilk çatlak gerilmesi alanının üç katıdır. Bulunan OACD alanı ilk çatlak alanına bölüldüğünde I_5 indeksi hesaplanır. I_{10} ve I_{30} indeksleri de ilk çatlak gerilmesinin 5.5 ve 15.5 katı kadar yapılan yüklemeler sonucu bulunan alanların ilk çatlak alanlarına bölünmesi ile bulunur. (Şekil 1.22)



Şekil 1.22. I_5 , I_{10} ve I_{30} İndekslerinin Hesaplanmasında Baz Alınan Tanımlanmış Yük-Deplasman Alanlarının Şematik Gösterimi

Şekil 1.22'ye dayanarak;

$$I_5 = \frac{OACD}{OAB} \quad I_{10} = \frac{OAEF}{OAB} \quad I_{30} = \frac{OAGH}{OAB}$$

olarak hesaplanır. Ayrıca aynı verilerden aşağıdaki denklemlerde yazılabilir.

Maksimum çekme dayanımı (Rapture Modülü):

$$\sigma_u = P_u * \frac{L}{bh^2} \quad (N / mm^2)$$

Eşdeğer çekme dayanımı :

$$\sigma_e = \frac{Tb}{tb} * \frac{L}{bh^2} \quad (N / mm^2)$$

P_u : maksimum gerilme

L : mesnet açıklığı

b : kırılma yüzeyi kesit genişliği, (ort.)

h : kırılma yüzeyi kesit yüksekliği, (ort.)

Tb : 3 mm'lik eğilme deformasyonuna kadar yük-deplasman eğrisi altında kalan alan (eğilme gerilmesindeki tokluk)

tb : 3 mm (150*150*500 mm'lik numunede mesnetler arası açıklığın (450mm) 1/150 ölçüsündeki deformasyon

Deneyler sonunda yük-deplasman eğrisi altında kalan alan içerisinde hesaplanan I_5 , I_{10} ve I_{30} elastik dayanım indeksleri fiili performansın kolayca anlaşılabilirliğini ve referanslar ile karşılaştırılmasını sağlar. Tokluk indeksleri değerlendirilirken Çizelge 1.7. dikkate alınmalıdır.

Çizelge 1.7. Tokluk İndekslerinin Değerlendirme Kriterleri

Baz Alınan Tokluk Alanı	İndeks	Eğilme Kriteri	Normal Beton	Elastik- Plastik Malzeme	Çelik Lifli Beton İçin Aralık
OACD	I_5	3.0	1.0	5.0	1-6
OAEF	I_{10}	5.5	1.0	10.0	1-12
OAGH	I_{30}	15.5	1.0	30.0	1-40

I_{10} / I_5 oranı için 2 değeri, bu indekslere eşlik eden eğilmeler arasındaki mükemmel plastik malzeme hareketini, yani yükte herhangi bir değişiklik olmaksızın eğilmedeki artışı gösterir. I_{30} / I_{10} oranı için 3 değeri, bu indekslere eşlik eden eğilmeler arasındaki mükemmel plastik hareketi gösterir. 3'ten küçük değerler ise düşük performansı ifade eder.

Çelik lifli betonlar için bu kriterler çeşitli normlar ile belirlenmiş olmasına rağmen çelik lifli betonun performansını normal betonlarda olduğu gibi karışım parametreleri ve çelik liflerin beton içindeki miktarı, görünüm oranı (l/d), dağılımı, şekli gibi parametreler de önemli ölçüde etkiler. ⁽¹⁾

Tokyay, Ramyar ve Turanlı (3), yaptıkları çalışmada polipropilen lifler ve çelik lifler ile çalışmışlar ve polipropilen liflerin normal betonun tokluğunu arttırmadığını, çelik liflerin ise normal betonun tokluğunu % 110 mertebesinde

arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin alçalan kısımlarının eğimlerinin daha düşük olması, çelik liflerin sünekliği arttırdığını ortaya koymaktadır.

Kara ve Akın (38), yaptıkları çalışmada betonarme karkas binalarda kolon kiriş birleşimlerinde deprem sırasında ortaya çıkan hasarları, çelik lif kullanarak minimize etmeyi planlamışlardır. Çalışmada donatı yerleştirme zorluğu, maliyeti ve işçilik hatalarının minimize edilmesi göz önünde tutularak etriyeli ve etriyesiz birleşim bölgesine sahip birebir modellerin taşıma kapasiteleri karşılaştırılmış ve alternatif olarak birleşim bölgesindeki betona sırayla 20 kg/m³, 30 kg/m³ ve 40 kg/m³ çelik lif ilave edilerek gerekli olan sünekliğin ve mukavemetin sağlanabilmesi amaçlanmış ve çelik liflerin etriye yerine kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır.

Hazırlanan kolona 15 ton aksenal yük verilmiş ve kiriş numunesi yön değiştiren yükleme altında teste tabi tutulmuştur. Deneylerin sonunda, hasar görme mekanizmaları, yer değiştirme ve moment eğrilik karakteristikleri ve enerji yutma kapasiteleri irdelenmiştir. Etriye yerine alternatif olarak kullanılan liflerin, birleşim bölgesinde betonun parçalanmasını ve dağılmasını engellediği, enerji yutma kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Bulunan enerji yutma kapasiteleri etriyeli birleşim için 100 birim olarak kabul edilerek Çizelge 1.8.'de verilmiştir.

Çizelge 1.8. Enerji Yutma Kapasiteleri

Deney No	Enerji Yutma Kapasiteleri
Deney 1 (Etriyesiz Birleşim)	79
Deney 2 (Etriyeli Birleşim)	100
Deney 3 (20 kg/m ³ Lifli Birleşim)	130
Deney 4 (30 kg/m ³ Lifli Birleşim)	200
Deney 5 (40 kg/m ³ Lifli Birleşim)	250

Not : Etriyeli birleşim 100 birim olarak kabul edilmiştir.

Görüldüğü gibi etriyesiz birleşimde tokluğun, etriyeli birleşime göre % 20 azaldığı, 20 kg/m³ lifli birleşimde tokluğun % 30 arttığı, 30 kg/m³ lifli birleşimde tokluğun % 100 arttığı ve 40 kg/m³ lifli birleşimde tokluğun % 150 arttığını belirlemişlerdir.

Mu, Miao, Luo ve Sun (39), yapılan çalışmada cam ve polipropilen lif ağları ile çalışmışlardır. Cam lif ağlarının elastisite modülü 70 GPa, çekme dayanımları 1800 MPa ve göz açıklıkları 4.5*4.5 mm'dir. Polipropilen lif ağlarının elastisite modülü ise 3.5 GPa, çekme dayanımları 620 MPa ve göz açıklıkları 5*5 mm'dir. Hazırlanan karışımlara arayüzeyi güçlendirmek için silis dumanı ve ASR etkisini engellemek için metakaolin eklenmiştir. Deneyler sonunda cam lif ağ donatılı beton numunelerin eğilme tokluğunun polipropilen lif ağ donatılı beton numunelerden daha fazla olduğu görülmüştür. Cam lif ağ miktarı polipropilen ağ miktarının % 37'si olmasına rağmen cam lif ağ donatılı örneklerin tokluk indeksleri, polipropilen ağ

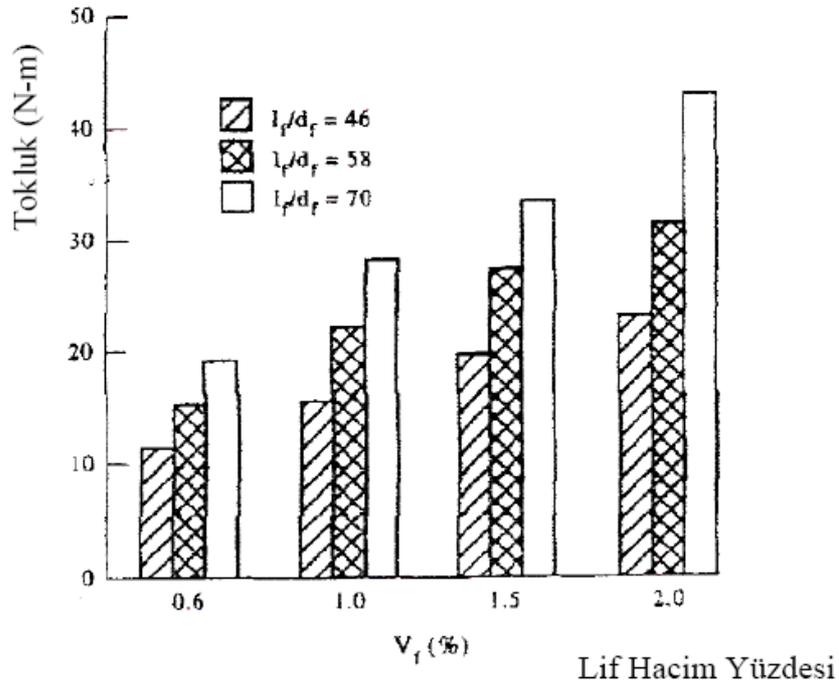
donatılı örneklerin % 88'i daha fazla değerinde bulunmuştur. Bu artış cam lif ağlarının yüksek çekme dayanımları ve elastisite modüllerine bağlıdır.

Mansur, Member, Chin ve Wee (40), basınç değeri 70 ve 120 MPa olan yüksek dayanımlı betonlarda silindirik ve prizmatik numuneler üzerinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisini incelemişlerdir. Karışımlardaki diğer parametreler, çelik lif içeriği ve yükleme eksenine göre döküm yönüdür. Karışımların prizmatik kalıplara yerleştirilmesi kalıplar, yatay ve dikey halde iken ayrı ayrı yapılmıştır. Deneyler sonunda yatay şekilde duran kalıplara dökülen numuneler daha yüksek düktilite göstermiştir. % 1 çelik lif içeriği için kare kesitli numunelerin dairesel kesitli numunelere göre daha sünek olduğu görülmüştür. Şekil etkisi beton dayanımının artması ile azalmıştır. Ayrıca prizmatik ve dairesel numunelerde görülmüştür ki tokluk indeksi beton dayanımı arttıkça azalmaktadır.

Balaguru (20), çalışmasında hızlı dayanım kazanan çimento ile hazırlanmış çelik lifli betonların basınç ve eğilme özelliklerini incelemiştir. Karışımlarda 20 ile 60 mm arasında değişen uzunlukta ucu çengelli ve kıvrımlı lifler ve 30-90 kg/m³ arasında değişen lif içerikleri kullanılmıştır. Deneyler sonunda ucu çengelli ve boyu 50 mm olan liflerin tokluk bakımından en iyi performansı gösterdiği, çimento tipinin önemli bir etki yapmadığı ve iyileşmenin kaba agrega içermeyen karışımlarda daha fazla olduğu görülmüştür.

Gao, Sun ve Morino (18), yaptıkları çalışmada % 0, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0 lif içerikli, süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı içeren yüksek dayanımlı hafif betonlar hazırlamışlardır. Kullandıkları çelik liflerin uzunlukları 20, 25 ve 30 mm, lif görünüm oranları ise 46, 58 ve 70'tir. Yapılan testler sonunda çelik liflerin tokluğa olan katkısının diğer mekanik özelliklere olan katkısından çok daha fazla olduğunu

belirtmişlerdir. Yüksek dayanımlı hafif betonların, eğilme gerilmeleri altındaki davranışının normal dayanımlı çelik lifli betonların davranışına benzediğini fakat yüksek dayanımlı hafif betonlarda meydana gelen çatlakların çimento pastasından önce kullanılan hafif agregalarda oluştuğunu görmüşlerdir. Çelik liflerin çatlakların gelişimini çatlak köprülenmesi sağlayarak kontrol etmesinden dolayı yüksek dayanımlı hafif betonların eğilme-şekil değiştirme davranışını önemli ölçüde etkilediğini, dolayısıyla toklukta büyük iyileşmeler meydana getirdiğini vurgulamışlardır. Toklukta meydana gelen bu iyileşmenin lif aderans dayanımına ve matris dayanımından etkilendiğini belirtmişlerdir. Eğilme tokluğunun lif hacmi ve lif görünüm oranı değişiminden nasıl etkilendiğini Şekil 1.23'te göstermişlerdir.



Şekil 1.23. Eğilme Tokluğuna V_f ve l/d'nin Etkisi (18)

Nelson, Li ve Kamada (10), % 4.9 polipropilen, % 3.4 polivinilalkol, % 5.1 selüloz lif içerikli ince levha şekilli çimento kompozitleri ve lif içermeyen yalın çimento kompozitleri üzerinde, numunelerin kırılma tokluklarını araştırmışlardır. Deneyler sonucunda polivinilalkol ve selüloz lif içeren kompozitlerin kırılma tokluklarının lif içermeyen yalın çimento kompozitine göre % 40 daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Polipropilen lif içeren kompozitlerin kırılma tokluklarının ise lif içermeyen yalın çimento kompozitinin kırılma tokluğuna yakın değerler verdiği sonucuna varmışlardır.

Soroushian ve Marikunte (9), iki aşamalı yaptıkları çalışmada selüloz lifli çimento kompozitlerinde 6 farklı lif içeriği ve 3 farklı nem koşulu sağlayarak, uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak hazırlanan kompozitin eğilme performanslarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, maksimum eğilme dayanımını tüm nem koşullarında % 8 selüloz lifi içeren karışımın sağladığı, maksimum eğilme tokluğunun ise en fazla lif içeriğine sahip % 14 selüloz lif içeren karışımın sağladığı görülmüştür.

1.3.5.8. Rötire

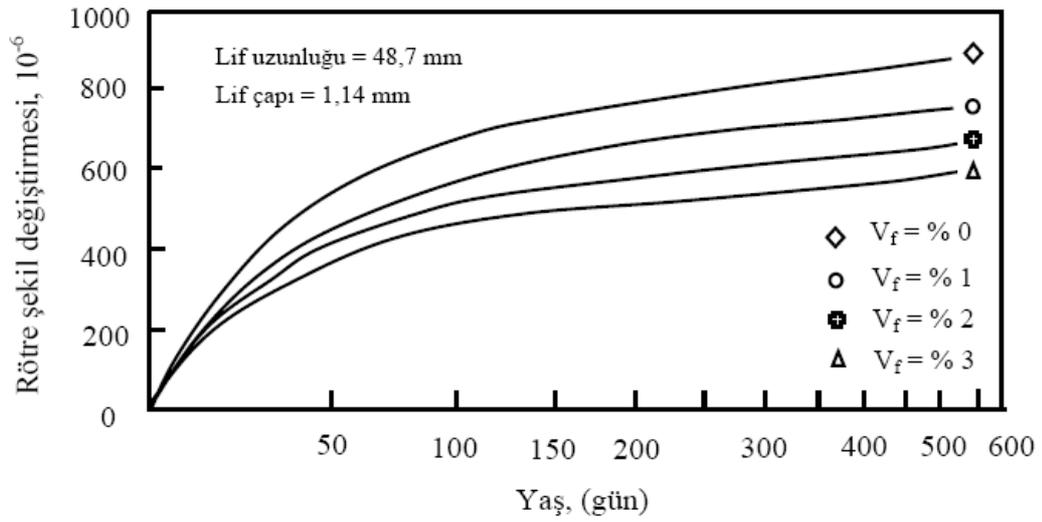
Priz süresi ve sonrası çeşitli nedenlerle çıkan çekme gerilmelerinin karşılanamaması ve dolayısıyla oluşan çatlakların büyüyerek çoğalması rötrenin oluşma mekanizmasıdır. Betonun büzülmesi (rötresi) çatlak oluşumunun önemli sebeplerinden biridir. Rötrenin en önemli oluşma nedeni, makro ve mikro boşluklardaki suyun, beton bünyesinden uzaklaşmasıdır. Ortamda bulunan suyun uzaklaşması ile betonda bir büzülme meydana gelir. Rötire olayının iki önemli zararlı etkisi vardır. Bunlardan biri betonda çatlakların oluşması, diğeri de betonarme donatıda parazit gerilmelerin oluşmasıdır. Çatlaklar, betonun özellikle çekme dayanımını düşürürler. Ayrıca geçirirmliliğın artması nedeniyle betonun, kimyasal

etkilere ve donaya dayanıklılığını azaltıp, donatının korozyonunu kolaylaştırırlar.

Parazit gerilmelerin oluşması, bu ek kuvvetleri karşılamak için donatı kesitinin artmasını gerektirir. ⁽⁴¹⁾ Bu doğrultuda bakılacak olursa, betonda çelik lif kullanımını, oluşan çekme gerilmelerinin bir miktarının lifler tarafından alınmasını, matristeki gerilmelerin ise çatlaksız bölgelere aktarılıp dağıtılmasını sağlar.

Çelik lifler, beton içinde yüzey ve kenarlar da dahil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında hidrasyon süreci, malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik lifler karşı koyar ve rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenir. ⁽²⁶⁾

Yapılan araştırmalarda özellikle çentikli çelik liflerin, betonun rötresini % 40 oranında önledikleri belirtilmiştir. Rötre miktarındaki bu azalma, çelik liflerin beton içindeki kullanım miktarına ve lifin geometrisine bağlıdır. Lif hacminin ve görünüm oranının artması, rötre miktarını azaltır (Şekil 1.24.). Ayrıca kullanılan liflerin geometrisinin çentikli yada ucu çengelli olması düz liflere nazaran rötreyi azaltıcı bir unsurdur. ⁽⁵⁾



Şekil 1.24. Ucu Kancalı elik Liflerin Hacim Değişiminin Betonun Rötresi Üzerine Etkisi (5)

Lifler, betonda büzölme çatlak genişliklerini azaltmakta ve büzölme hareketi sınırlanmaktadır. Ayrıca köprüleme etkisi ile kılcal çatlak oluşumunu azaltmakta ve çatlak ilerlemesini belirli düzeyde tutmaktadır. Yüksek çekme mukavemetleri ile birlikte düşük elastisite modülüne sahip elik lif donatılı betonlarda rötre çatlakları normal betona oranla daha az olmaktadır. Buna karşılık liflerin büzölme özellikleri üzerinde iyileştirme yapması için matris içerisinde etkili olacak şekilde yeterli miktarda bulunması gerekmektedir. Ayrıca uzun lifler, kuruma rötresinin sınırlanmasında daha etkili olmaktadır. ⁽¹⁴⁾

1.4. elik Lif Donatılı Betonların Kullanım Alanları

elik liflerin, beton içerisindeki davranışı ve yapısal özellikleri nedeni ile betonun birçok özelliğini iyileştirmesi, elik lifli betonların ağır çalışma koşullarına

maruz kalan yapılarda, yüksek dayanım gerektiren ince kesitlerin yapımında, donatının yerine kullanılarak ekonomi ve yüksek çekme dayanımı sağlar. Çelik lifli betonların duktilitesinin normal betona göre daha yüksek olması nedeniyle, çarpma etkisine, titreşimli yük etkisine ve dinamik yük etkisine karşı dayanım istenilen yapılarda kullanımı yaygındır. Deprem olasılığı yüksek olan tüm yapılarda kullanılması uygun olmaktadır.

Çelik lifli betonların yapısal ve yapısal olmayan kullanım alanları ve sağladıkları avantajlar aşağıda verilmiştir. ⁽⁶⁾

Endüstri Yapılarında;

- Çarpma rijitliği ve termal etkilere karşı dayanımı artırır.
- Döşeme kalınlığını azaltılır.
- Homojen donatılı beton elde edilir.
- Çatlakların ilerlemesini engeller.
- Yapısal güvenliği artırır.

Hidrolik Yapılarda;

- Baraj, kanallar, dinlendirme havuzları, dolu savaklarda kullanılır.

Havaalanları ve Karayollarının Yol Kaplamalarında;

- Normal plaklardan daha ince plaklar elde edilir.
- Yorulma direnci artar.
- Çekme mukavemetindeki artış nedeniyle derzler arası mesafe büyür ve derz sayısı azalır.

- Dinamik ve statik yüklere karşı direnç artar.

Tünellerde;

- Hasır çelik donatı kalkar ve sürekli astarlama yapılır.
- Betonun deformasyon kapasitesi artar.

Şev Stabilitesinin Sağlanmasında;

- Karayollarını ve demiryollarını kesen yer üstündeki kaya ve topraklardan oluşan dik şevlerin veya toprak setlerin stabilitesini sağlar.

Püskürtme Beton Kaplamalarında;

- Toplam beton miktarından tasarruf sağlanır.
- Çelik hasır ve üst kaplamadan tasarruf sağlanır.
- İşlem miktarı azaldığı için yapım süresi azalır.

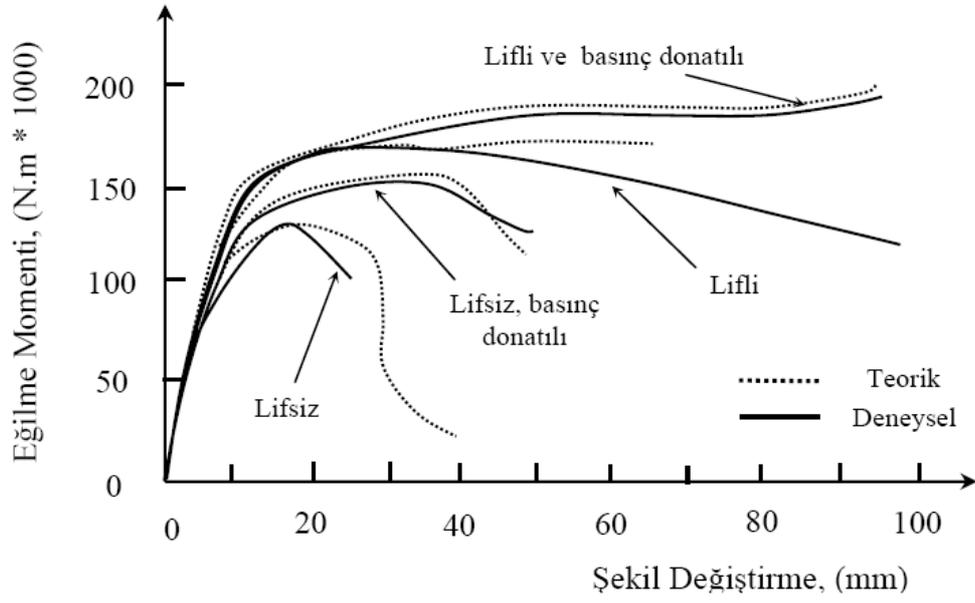
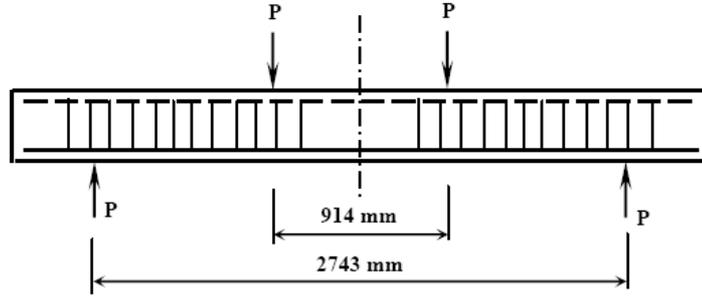
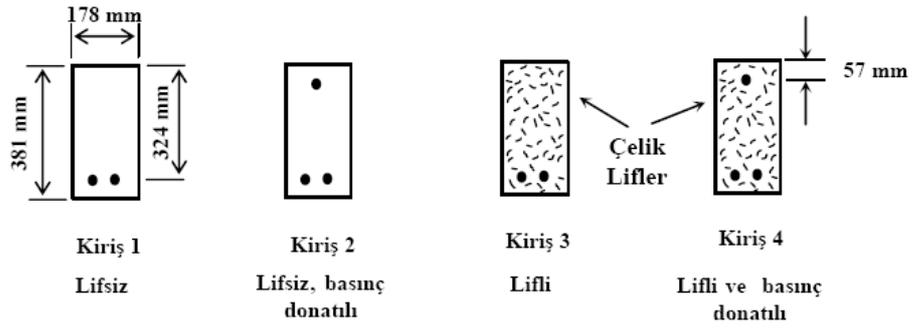
1.4.1. Çelik Lifli Betonların Yapısal Uygulamalarda Kullanımı

Çelik liflerin yapı elemanlarında kullanımları sırasında çatlakları önlemek, darbe ve dinamik yüklere direnci arttırmak ve malzemenin dağılmasını önlemek gibi avantajlarından faydalanmalıdır. Yapı elemanlarına gelen eğilme ve çekme gerilmelerinin karşılanmasında geleneksel sürekli donatı daha yeteneklidir. Betonda kullanılan geleneksel donatı çubukları, betonun yük taşıma kapasitesini arttırmalar, lifler ise daha çok betonda oluşabilecek çatlakların oluşmasının ve gelişmesinin engellenmesinde etkilidirler. Bazı yapısal uygulamalarda, çelik lifler geleneksel donatı ile birlikte kullanılmaktadır. ⁽³⁸⁾

Çelik lif ile sürekli donatı çubukların birlikte kullanıldığı kirişlerde lifler; çelik lifli betonun çekme dayanımının proje dizaynı sırasında kullanımına olanak sağlar. Çünkü, matris artık ilk çatlaktan sonra yük taşıma özelliğini

kaybetmeyecektir. Ayrıca çelik lifler, çatlakların oluşumunu ve gelişimini engellediği için geleneksel donatı çubuklarının etrafında oluşabilecek çatlakları önlerler ve donatı çubuğu ile matris arasındaki aderansı güçlendirirler.

Çelik lifler geleneksel donatı ile birlikte kullanıldıkları kirişlerde nihai momenti ve nihai sehimini arttırmaları. Bu artış çelik liflerin yüksek çekme mukavemetleri nedeniyle gerçekleşir. Şekil 1.25'te çelik lif ilavesinin moment ve sehim üzerine etkisi gösterilmektedir. ⁽⁵⁾



Şekil 1.25. Çelik Lif ile Geleneksel Donatının Birlikte Kullanıldığı Kirişlerde Moment-Şekil Değişirme Eğrileri

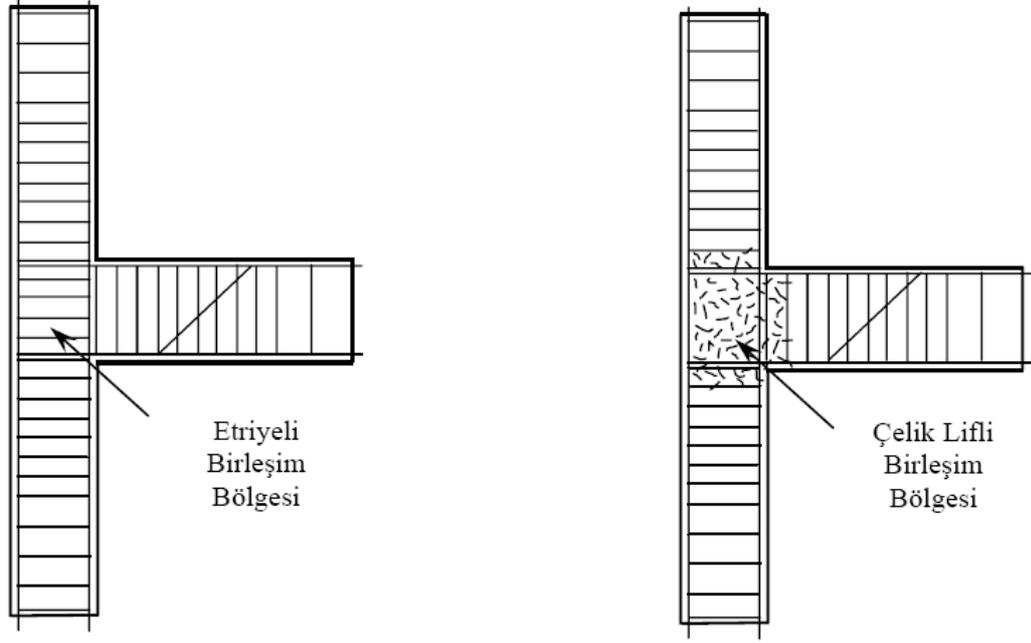
Yapısal elemanlarda kullanılan çelik lifler, oluşabilecek kayma gerilmelerinin karşılanmasında da etkilidirler. Liflerin gelişigüzel dağılımı her bölgede kesme kuvvetlerinin karşılanmasını sağlar. Batson ve diğerlerinin geleneksel donatı ve düz çelik liflerin birlikte kullanıldığı % 0, % 0.88, % 1.76, % 2.66 lif içerikli numunelerde yaptığı deneyler sonunda kayma gerilmelerindeki (τ_f) artış sırasıyla 1.91, 2.14, 2.28 ve 2.43 şeklinde görülmüştür. ⁽⁵⁾

Betonarme çerçevelerden yapılmış binaların taşıyıcı sistemini oluşturan elemanlar, sünek davranış göstererek ağır hasarlar oluşmadan deprem etkisi altında oluşan zorlamaları ve yer değiştirmeleri taşıyabilecek şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmesi gerekmektedir. Yapının taşıyıcı sisteminin sünek davranış göstermesinde zorlamaların yoğun olduğu kolon-kiriş birleşim bölgelerinin önemi büyük olmaktadır. Bu bölgelerdeki deprem etkisiyle artan zorlamaların karşılanabilmesi için çok miktarda boyuna donatıya ihtiyaç duyulur. Bu donatılara ilaveten bu bölgelerin sünek davranış göstermesi için şartname gereğince sık enine donatılarla bu bölgedeki betonun iyi sarılması gerekmektedir. Birleşim bölgelerinde boyuna ve enine donatıların çok yoğun olmasından kaynaklanan nedenlerle bu bölgedeki betonun iyi sıkıştırılmasında ve yerleştirilmesinde, hatta bu donatıların projedeki detaylara uygun olarak konulmasında karşılaşılan işçilikteki hatalardan ve zorluklardan dolayı kolon- kiriş birleşimleri şartnamelere ve projeye uygun olarak inşası iyi yapılamamaktadır. Bu nedenle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde sargı donatısı olarak kullanılan ilave enine donatıların yerine birleşim bölgelerinde çelik tel takviyeli beton kullanımı uygun olmaktadır. ⁽⁴²⁾

Kara ve Akın (38), yaptıkları çalışmada betonarme karkas binalarda kolon kiriş birleşimlerinde deprem sırasında ortaya çıkan hasarları, çelik lif kullanarak minimize etmeyi planlamışlardır. Çalışmada donatı yerleştirme zorluğu, maliyeti ve

işçilik hatalarının minimize edilmesi göz önünde tutularak etriyeli ve etriyesiz birleşim bölgesine sahip birebir modellerin taşıma kapasiteleri karşılaştırılmış ve alternatif olarak birleşim bölgesindeki betona sırayla 20 kg/m^3 , 30 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 çelik lif ilave edilerek gerekli olan sünekliğin ve mukavemetin sağlanabilmesi amaçlanmış ve çelik liflerin etriye yerine kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır.

Hazırlanan kolona 15 ton aksenal yük verilmiş ve kiriş numunesi yön değiştiren yükleme altında teste tabi tutulmuştur. Deneylerin sonunda, hasar görme mekanizmaları, yer değiştirme ve moment eğrilik karakteristikleri ve enerji yutma kapasiteleri irdelenmiştir. Etriye yerine alternatif olarak kullanılan liflerin birleşim bölgesinde betonun parçalanmasını ve dağılmasını engellediği, enerji yutma kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Enerji yutma kapasiteleri, yük-deplasman ve moment-dönme grafikleri göz önüne alınarak, deneyler sonucunda 20 kg/m^3 lif oranına sahip lifli betonun davranışı yaklaşık olarak kolon-kiriş birleşim bölgesi etriyeli numune davranışına karşılık gelmekte ve lifler etriyenin görevini yerine getirmektedir (Şekil 1.26).



Şekil 1.26. Kolon-Kiriş Birleşim Bölgesinde Etriyeli ve Çelik Lifli Birleşim Donatı Düzeni

Çelik liflerin yapısal elemanlarda geleneksel donatılar ile birlikte kullanımı sırasında dikkat edilecek husus paspayı kalınlığıdır. Lifin paspayı bölgesine girmesi ve donatının etrafını sarması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda paspayı kalınlığı 2.5 cm'den 6-7 cm'ye çıkarılmalıdır. Kolon tamirinde kullanılan mantolama sistemlerinde de aynı yöntem kullanılmaktadır. ⁽¹³⁾

Arslan ve Ulucan (43), çalışmalarında prefabrik yapı elemanlarının üretim sırasında, elemanın kalıptan erken alınması sonucu kendi öz ağırlığı ve çarpma gibi beklenmeyen etkilerden dolayı istenmeyen çatlakların ve deformasyonların önlenmesi amaçlanmıştır. Deneyler dökümden 24 saat sonra başlamıştır. Deneyler

sonunda elik liflerin çatlak genişliklerini, çatlak sayısını ve kiriş deplasmanını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Ayrıca, elik lifler erken yaştaki betonarme kirişte yük tekrar kaldırıldığında çatlak genişliklerinin kapanma oranını arttırmaktadır. Lif katılması ile betonarme kirişin eğilme etkisindeki erken yaş taşıma gücü arttırılabilmektedir. Bu durum da betonun çekme ve basınç dayanımında artışlar sağlandığını göstermektedir.

Özden (44), çalışmasında kolon-döşeme arasındaki zımbalama etkisini incelemiştir. 12 cm kalınlığında hazırlanan döşeme numunesinin orta bölgesine 20*20 cm ebatlarında kolon yerleştirilmiştir. elik lif ilavesiyle numunelerin zımbalama kapasitesinin ve zımbalama deformasyonunun arttığı görülmüştür. Ayrıca enerji yutma kapasiteleri artmıştır.

Fritz, Naaman ve Reinhardt (45), sifkon teknolojisi ile dikdörtgen ve T-kesitli kiriş numuneler hazırlamışlardır. Numuneler % 4.3 lif içeren etriyesiz, % 4.3 ve % 8.8 elik lif içeren etriyeli numuneler olarak teşkil edilmiştir. Kontrol numunesi olarak sadece etriyeli numuneler hazırlanmıştır. Tüm numunelerde eğilme testi yapılmıştır. Deneyler göstermiştir ki; kirişlerin sünekliği matrisin sünekliğinin artması ile artar. Sifkon matris kullanılan kirişlerde etriyeye ihtiyaç yoktur. Oluşan çatlaklar geleneksel donatılı kirişlere nazaran çok küçüktür.

1.5. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında; elik liflerin tipleri, özellikleri ve statik katkı değerlerinin yanında, elik liflerin beton içinde kullanımları, liflerin betona karıştırılması esnasında dikkat edilmesi gerekli konular, elik lifli betonların

kullanım alanları ile elik lifli betonların mekanik ve fiziksel özellikleri literatür araştırması yapılarak derlenmiştir. Bunun yanında bu çalışmalar sonucunda; betona eklenen elik liflerin, betonun çatlak karakteristiğini nasıl etkilediği, basınç, çekme, eğilme, darbe, yorulma dayanımları, enerji yutma kapasitesi, rötre gibi mekanik ve fiziksel özelliklerinde nasıl bir iyileştirici etki yaptığı anlatılmıştır. Mekanik özelliklerdeki iyileşmede, betonun matris kalitesi dışında, elik liflerin çekme dayanımlarının, betonda kullanılan elik lif özelliklerinin de etkin olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışmadaki asıl amaç; geniş literatür araştırma ve derleme çalışmaları sonucunda belirlenen elik lifli betonların laboratuvar özelliklerinin uygulamada ve özellikle şantiye ortamında yapı üretimi esnasında ne şekilde etkin olduğu araştırılmıştır.

Bilinen en önemli gerçeklerden biri; laboratuvar şartlarında belirlenen yapı malzemeleri özellik ve kullanım şartlarının yapı üretimi esnasında, şantiyelerde çok büyük farklılıklara uğradığıdır. Çünkü şantiyelerde malzeme kullanımını etkileyen oldukça fazla etken mevcuttur. Hava şartları, uygulayıcı tutumları, ihmaller, taşıma ve yerleştirme şartları, yapı malzemeleri arası etkileşim bu etkenlerin başlıcaları olarak nitelendirilebilmektedir.

Laboratuvar şartlarında üretilen bir malzeme ne kadar mkemmelenirse olsun şantiyelerde, yapı üretimi esnasında kullanılmadığı durumlarda hiçbir anlam ifade edememektedir. Bununla birlikte bir malzemenin uygulama esnasında kullanılması ile o malzeme için gerekli ek donanım ve tutumlar tespit edilmiş olmaktadır.

Bu tez çalışmamızda; bu durumun tahlilinden hareketle literatür inceleme çalışmalarımızdan elde ettiğimiz, çelik lifli betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin büyük bir deney düzeneği olan şantiye ortamında incelenmesi ve sonuçlarının tespit edilerek bu deneyimlerin meslektaşlarımızın kullanımına sunulması hedeflenmiştir. Uygulama merkezi olarak ise; Kontrol Amirliği görevini üstlenmiş olduğum “Yenimahalle Belediyesi Hasan Doğan Spor Tesisleri Projesi” seçilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Genel

Tez çalışmamızın bu bölümünde tezimizin özel uzmanlık konusu olan “Çelik Lif Donatılı Betonların Uygulama Aşamasında Şantiyedeki Performansları” incelenerek, uygulama yöntemleri hakkında çıkarımlar yapılarak laboratuvar şartlarında elde edilen değerler ile şantiyede elde edilen değerler kıyaslanacaktır.

İnşaat yapı üretim alanları dış etkenlere oldukça açık alanlar olduğu ve uygulama esnasında çok farklı bileşenlerin uygun şartlarda bir araya gelmesinin gerekliliğinden dolayı genelde laboratuvar deney sonuçları ile büyük farklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle şantiyede, uygulama esnasında; kalıp işçiliği, donatı işçiliği, beton sertleşme ortamının laboratuvar şartlarında çok farklı oluşu standart güvenlik sınırlarından farklı bir değer ortaya çıkartmaktadır. Diğer yandan şantiyede, laboratuvar şartlarına yakın uygulamalar gerçekleştiğinde alınacak standart güvenlik kat sayısı optimum maliyetten uzaklaşma anlamına gelecektir.

Mikro donatıların yapı uygulamasında kullanılmasında karşılaşılan diğer bir sorunda, santralde veya şantiyede miksere lif karıştırılarak üretilen çelik lif katkı betonun kalıba yerleştirilmesi, masterlanması ve kür ve koruma işlemlerinin yerine getirilmesidir. Betonarme sistemler bir bütün olarak tasarlandığından ana bileşen olan betona eklenen lifler sonrasında betonun fiziksel özellikleri değiştiğinden sistemin kurulmasında bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Beton kıvamının arzu edilenden farklılaşmasından dolayı oluşması muhtemel sorunlarda bu çalışmada incelenerek çözüm yolları araştırılacaktır.

2.2. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Şantiyede, Mikro Donatılı Beton üretiminin ana bileşenleri olan; agrega, çimento, karışım suyu, hazır beton ve çelik telin özellikleri bu bölümde detaylı olarak incelenecektir.

2.2.1. Agregası

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerin genel adı agregasıdır. Beton içinde hacimsel olarak %60-75 civarında yer işgal eden agrega önemli bir bileşendir. Agregalar tane boyutlarına göre ince (kum, kırma kum.. gibi) ve kaba (çakıl, kırmataş... gibi) agregalar olarak ikiye ayrılır.



Şekil 2.1. Agregası Örneği

Aregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır:

- Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları,
- Zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür... gibi)
- Basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları,

- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri,
- Yassı ve uzun taneler içermemeleri,
- Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir.

Agreganın kirli (kil, silt, mil, toz,...) olması aderansı olumsuz etkilemekte, ayrıca bu küçük taneler su ihtiyacını da artırmaktadır. Beton agregalarında elek analizi, yassılık, özgül ağırlık ve su emme gibi deneyler uygun aralıklarla yapılarak kalite sürekliliği takip edilmelidir. Betonda kullanılacak agregalar TS 706 EN 12620'ye uygun olmalıdır.

2.2.2. Çimento

Çimento, ana hammaddeleri kalkerle kil olan ve mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, briket ..vs.) yapıştırmada kullanılan bir malzemedir. Çimentonun bu yapıştırma özelliğini yerine getirebilmesi için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcıdır. Kırılmış kalker, kil ve gerekiyorsa demir cevheri ve / veya kum katılarak öğütülüp toz haline getirilir. Bu malzeme 1400-1500°C'de döner fırınlarda pişirilir. Meydana gelen ürüne "klinker" denir.

Daha sonra klinkere bir miktar alçı taşı eklenip (%4-5 oranında) çok ince toz halinde öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir. Katkılı çimento üretiminde; klinker ve alçı taşı dışında, çimento tipine göre tek veya birkaçı bir arada olmak üzere tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb. katılır. Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir; ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir. En çok kullanılan çimento tipleri Portland Kompoze Çimento, Katkılı Çimento, Cürüflü Çimento ve Sülfata Dayanıklı Çimento'dur,

bunun dışında özel amaçlar için Beyaz Portland Çimentosu ve diğer bazı tip çimentolar kullanılmaktadır.

Normal betonda agrega taneleri en sağlam unsur olduğundan, diğer iki unsur (çimento hamuru ve aderans) mukavemeti belirlemektedir. Çimento hamurunun mukavemeti önemli ölçüde su/çimento oranına da bağlıdır.

Betonda kullanılan çimento tipleri ve uygunluk değerlendirmesi TS EN 197 serilerinde standartlaştırılmıştır.

2.2.3. Karışım Suyu

Beton üretiminde kullanılan karışım suyunun iki önemli işlevi vardır:

1. Kuru haldeki çimento ve agregayı plastik, işlenebilir bir kütle haline getirmek.
2. Çimento ile kimyasal reaksiyon yaparak plastik kütlelerin sertleşmesini sağlamak.

Kıvam m^3 'e giren su miktarına bağlıdır. Hatırlanacağı üzere beton mukavemeti, su/çimento oranına bağlıdır. İşte bu sebeple şantiyeye teslimi yapılan taze betona daha fazla kıvam kazandırmak amacıyla fazladan su katmak betonun mukavemetini yok eder.

Genel olarak içilebilir nitelik taşıyan bütün sular betonda kullanıma uygundur. Ancak, betonda kullanılacak suyun içilebilir özellikte olması şart değildir. Birtakım ön deneyler yapılmak kaydıyla, içilemeyen sularla gayet kaliteli beton üretilebilmektedir. Bununla birlikte karışım suyu içinde bulunabilecek tuz, asit, yağ, şeker, lağım ve endüstriyel atıklar gibi bazı maddeler betonda istenmeyen etkiler yaratabilir. Karışım suyunun analizlerle belirlenmesi ve kalitesinin belli

aralıklarla denetlenmesi şarttır. Betonun bünyesinde çimento ile reaksiyona girmeyen fazla suyun bıraktığı boşluklar yalnız dayanımı düşürmekle kalmamaktadır.

Boşluklardan içeri giren zararlı unsurlar (klor, sülfat vb.) beton ve donatıya zarar vermekte ve betonun ömrünü kısaltmaktadır.

2.2.4. Katkılar

2.2.4.1. Su Azaltıcı (Akışkanlaştırıcı)

Mikro Donatı Ekleyerek Güçlendirdiğimiz betonun geleneksel betonla aynı kıvamın veya işlenebilirliğin elde edilmesini ve bu aşamada dayanım kaybedilmemesi için kullanılmıştır. Ek su kullanımı gerektirmediği için hem kolay işleme hemde dayanım kaybı olmaması sağlanmaya çalışılmıştır.

2.2.4.2. Priz Geciktirici

Taze betonun katılaşmaya başlama süresini uzatırlar. Uzun mesafeye taşınan betonlar veya sıcak hava dökümleri için yararlıdırlar. Bu uygulamamızda kullanma sebebimiz ise; döküm sonrası perdelama işleminin daha rahat ve hatasız yapılması istenmesidir.Hava şartlarının olumsuz etkisini egale etmeside diğer önemli bir etken olmuştur.

2.2.5. Hazır Beton

Bu uygulama çalışmamızda C25 beton sınıfına uygun hazır beton kullanılmıştır. Betonun karakteristik dayanımı, beton sınıfını tanımlama için kullanılan , istatistiksel verilere dayanılarak belirlenen ve bu değerden daha küçük

dayanım değeri elde edilmesi olasılığı , olan (TS EN 206'ya göre %5) dayanım değeridir.

Betonarme yapıların dizaynında betonun çekme dayanımı öngermeli elemanların çatlama momentlerinin hesaplanmasında, çatlama genişliklerinin kontrol edilmesi için donatı hesaplanmasında , erken yaş termal gerilmelerinin neden olduğu çatlakların belirlenmesinde, sehim hesabının yapılmasında kullanılır. Özellikle yüksek sınıf beton kullanımıyla yapı elemanındaki çatlak ve sehim miktarı azalır. Diğer yandan yüksek dayanımlı betonlarda erken yaş termal gerilmeler daha geniş aralıklarla daha geniş açıklıkta istenemeyen çatlaklara neden olabilir. Malzeme en zayıf halkasından kırılır. Deney uygulanan numune ne kadar büyükse o kadar büyük bir olasılıkla belli bir düzlemde boşluklar meydana gelir. Bu nedenle yapı boyutu önemlidir. Eğilmedeki çekme dayanımı yarmadaki çekme dayanımından daha büyük olur. Yarmada çekme dayanımı da direkt çekme dayanımından daha büyük olur.

EN 1992 'de çekme dayanımı ile direkt çekme dayanımı belirtilmektedir. Normal yapılardaki kullanımlar için betonun çekme dayanımı aşağıdaki denklemlerle verilmiştir.

£C50/60 beton dayanımları için

$$f_{ctm}=0,3 \times f_{ck}^{(2/3)} \text{ MPa}$$

³C50/60 dayanımlar için

$$f_{ctm}= 2.12 \times \log_e (1+((f_{ck}+3)/10))\text{MPa}$$

$$f_{ct}= 0,9 f_{ctsp} \text{ olarak elde edilir.}$$

$$f_{ctm,fl}=(1,6-h/1000)f_{ctm} \text{ veya}$$

$$f_{ctm,fl}= f_{ctm}$$

Çekme dayanımı genellikle erken yaş termal çatlamlar için kullanılsa da EN 1992 betonun farklı olgunlukları için çekme dayanımı değerleri verir. Bu yapı elemanının bulunduğu ortam koşulları hesaplanarak çekme dayanımı hesap edilebilir.

Çizelge 2.1. Çok Kullanılan Beton Sınıflarının Standart Değerleri

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı f_{ck} MPa	Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı MPa	Karakteristik Eksenel Basınç Dayanımı, f_{ctk} MPa	28 Günlük Elastisite Modülü E_c MPa
C16	16	20	1,4	27000
C18	18	22	1,5	27500
C20	20	25	1,6	28000
C25	25	30	1,8	30000
C30	30	37	1,9	32000
C35	35	45	2,1	33000
C40	40	50	2,2	34000
C45	45	55	2,3	36000
C50	50	60	2,5	37000

2.2.5.1 Kullanılan Beton Karışımı

Beton Kalitesi : C 25

Çimento (PÇ 42.5) : 326 kg

Uçucu Kül : 55 kg

Mıçır No1 : 623 kg

Mıçır No2 : 422 kg

Kum+Taştozu : 733 kg

Su : 170 kg

2.2.6. Çelik Tel

Uygulama çalışmamızda La Gramigna firmasının üretimi olan; İki Ucu Kancalı, Sınıf:C, Tip:A (60 mm uzunluk ve 0.8 mm çap) özelliklerine uygun çelik tel kullanılmıştır. Dozaj 35 kg/m³ olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.2. Uygulamada Kullanılan Çelik Lifler

2.2.6.1. Kullanılan Çelik Tellerin Teknik Özellikleri

- Çelik teller düşük karbonlu çeliklerden soğuk çekme işlemi ile elde edilmişlerdir.
- Teller tutkalsız olarak üretilmişlerdir. Şantiyede hazır betona elle karışıma uygun.
- Tel çekme dayanımı (DIN 17 140-00; EN 10016-2-C9D): 1100 N/mm²
- Tel eğilme dayanımı (DIN 17 140-00; EN 10016-2-C9D): 800 N/mm²
- Uzamadaki kopma: < %2
- Tel kimyasal analizi; C: 0.04, MN: 0.25, Si:0.03, P: 0.012, S: 0.013
- Teller galvaniz kaplamalı olup, korozyona karşı korumalıdır.
- ASTM A 820, TSE 10513 standartlarına uygun olarak üretilmişlerdir.

2.3. Çelik Lif Donatılı Beton Uygulama Yöntemleri

2.3.1. Beton Uygulanacak Alanın Hazırlığı

Mikro Donatılı Betonların uygulamalarında döküm alanının hazırlığı büyük bir önem arz etmektedir. Uygun bir döküm alanından beklenen en önemli özellikler; en fazla 1 cm yüzey toleransı ile hazırlanmış sıkışmış zemin, beton karışımının suyunu koruyabileceği su doygunluğuna ulaşmış ıslatılmış zemin, tekniğine uygun hazırlanmış kalıp, Uygulama durumuna ve özelliğine göre değişim göstermesi ile birlikte betonun dış etkenlerle (mıcır dolgu, hava akımı) etkilenmesini engelleyecek ara malzeme (uygulamamızda, su tutmayan keçe ve ısı yalıtım levhası kullanılmıştır.



Şekil 2.3. Uygulama Yapılacak Alanın Hazırlığı

2.3.2. Hazır Karışım Betona Çelik Lif İlave Edilmesi

Uygulamamızda şantiye alanına santralde hazırlanarak transmikselerle taşınan C25 sınıflı betona beher m³ betona 35 kg gelecek şekilde Çelik Lif eklenmiştir. Ekleme işleminde dikkat edilmesi gerekli en önemli konu ise karışımın mümkün olduğu kadar homojen olmasının sağlanmasıdır. Laboratuvar şartlarından çok daha farklı durumların ortaya çıktığı Lif İlave işlemi sırasında; düzgün karışımın sağlanabilmesi için düşük devirde dönen mikserde topak oluşturamayacak miktarda

Çelik Lif elle eklenmiştir. Sonrasında tam karışımın sağlanması için mikser yüksek devire alınarak beton karıştırılmıştır. Topaklanma olmayarak uygun karışımın sağlanması için bu işlemlerin yavaş yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Ön görülemeyen bir uygulama detayı olan bu duruma engel olmak için Çelik Lif Eklenmeden önce betona uygun miktarda Priz Geciktirici Katkı koyma kararı alınmıştır.



Şekil 2.4. Şantiyede Hazır Betona Çelik Lif Ekleme İşlemi

2.3.3. Betonun Kalıba Alınması ve Perdahlama

Uygulamamızda üretmiş olduğumuz Çelik Lifli Betonun kalıba alınmasında beton pompası uygun görülmüştür. Yapıların fiziksel olarak büyümesi (oturma alanı ve kat sayısı gibi) nedeni ile yapı üretimi esnasında betonun pompa ile kalıba yerleştirilmesi neredeyse zorunluluk haline gelmiştir. Bu noktadan hareketle laboratuvar şartlarından farklı olarak Mikro Donatılı Betonun kalıba alınırken pompa kullanımını kolaylaştırmak gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Mikro Donatı ilavesi ile kıvamı artan betonun pompaj ve kalıba alınmasının kolaylaştırmak için uygulamamızda Akışkanlaştırıcı Beton Katkı malzemesi santralde betonumuza eklenecek şekilde bir beton üretim reçetesi oluşturulmuştur. Bu sayede pompajın yanı sıra perdahlama işleminin de kolaylaştırılmış olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde perdahlama işleminde vibratör kullanmanın da çok büyük bir problem oluşturmadığı görülmekle birlikte döşeme betonlarında satıh mastarı kullanımının daha uygun olacağı görüşüne varılmıştır.



Şekil 2.5. Mikro Donatılı Betonun Kalıba Alınması

2.3.4. Kür ve Koruma

Mikro Donatılı betonlarda kıvam lif ilavesi ile birlikte arttığından kür işleminde özellikle daha kısa sürede nemli ortama ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte kalıba yerleştirme ve pompaj işlemini rahatlatmak için betona eklenmesi ön görülen priz geciktirici beton katkıları kür işlemine de büyük faydalar sağlamaktadır. Söz konusu katkıların uygulanması ile birlikte özel bir ek işlem gerektirmeyen Mikro Donatılı Betonlar kür ve koruma yönünden oldukça rahattırlar. Aderans ve Rötne çatlakları oluşumu mikro donatılar sayesinde tutulduğu içinde betonun fiziksel görünümünün geleneksel betona göre çok daha güzel olması sağlanmış olmaktadır.



Şekil 2.6. Çelik Tel Donatılı Beton Karışımı

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Genel

Çalışmamızın bu bölümünde literatür bilgilerine göre özelliklerini öğrenerek uygulamasını gerçekleştirdiğimiz Çelik Lif Donatı Betonun Yapı İmalatındaki Kullanım esasları konusunda elde ettiğimiz verileri derleyip bir arada değerlendirilecektir.

Özellikle şantiye ortamındaki gerçekleşen uygulama ile laboratuarda ön görülen olay arasında bir bağ kurularak değerlendirmeler yapılmaya çalışılacaktır.

3.2. Araştırma Bulgularının Derlenmesi

Bu çalışma kapsamında yürütmüş olduğumuz deney ve gözlemleri iki ana başlık altında toplamamız mümkündür. Bunlar; 1. Çelik Lif Katkılı Betonun Normal Betona kıyasla mekanik özelliklerindeki değişimin tespiti. (Mikro Donatılı Beton Laboratuar Deneyleri.) ve 2. Mikro Donatılı Betonların fiziksel özelliklerinin Normal Betonlara göre değişiminin tespiti. (Mikro Donatılı Beton Şantiye Gözlem ve Deneyleri.)

3.2.1. Mikro Donatılı Beton Laboratuar Deneyleri

3.2.1.1. Taze Beton Deneyleri

Uygulama esnasında beton döküm aşamasındaki ortam hava sıcaklıkları tespit 29 ve 34 c⁰ olarak tespit edilmiştir. Betonun malzeme sıcaklığı ise; 27 ve 30 c⁰ olarak ölçülmüştür. Karışımların çökme değerleri standart çökme deneyi (Slump Deneyi)

ile saptanmış olup Normal Beton için bu deger 11-12 cm olarak ölçülürken, Mikro Donatılı Betonda çökme değeri ancak 8-9 cm olarak tespit edilmiştir. Çökme değerlerinden de açıkça görüldüğü gibi betona çelik lif eklenmesi ile birlikte beton kıvamı oldukça artmaktadır. Bu kıvamdaki bir betonun kalıba yerleştirilmesi esnasında değişik problemler yaşanması oldukça olağan bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda yapılabilecek tek şey uygulamada karşımıza çıkması muhtemel diğer faktörleri de göz önüne alarak uygulama çözümleri gerçekleştirmektir. Bu durumda uygulanabilecek en basit çözüm ise; betona kıvamına rağmen kalıba yerleşmeyi sağlayıcı katkı maddeleri eklemektir.

3.2.1.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri (Tek Eksenli Basınç Deneyi)

Çalışmamızda uygulama şantiyemizde bulunan en büyük metrajlı beton grubu için hazırlanan Mikro Donatılı (Çelik Lif Donatılı) betonumuzdan; TS EN 12350-1 (Taze Beton Deneyleri Bölüm 1: Numune Alma), TS EN 12350-2 (Taze Beton Deneyleri Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi), TS EN 12390-2 (Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Olan Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi), TS EN 12390-3 (Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini), TS EN 206 (Beton Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk) ve TS 500 (Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları) standartlarına uygun olarak alınan 6 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler üçerli gruplara bölünerek önce ilk grup 7.gün sonunda tek eksenli basınç deneyine tabi tutularak ilgili deney sonuçları kayıt altına alınmıştır. İkinci grup ise 28. günün sonunda deneye tabi tutularak sonuçları kaydedilmiştir. Bu deneyde 200 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmış olup

deneylerde presin yükleme hızı 6 MPa/s olarak belirlenmiştir.

Benzer deney düzeneği elik Lif Katkırsız normal beton grubu içinde hazırlanmış ve elde edilen değerler kayıt altına alınmıştır.

4 deney grubu ve 12 numuneden oluşan Tek Eksenli Basınç Deneyi Düzeneği sonucunda elde edilen değerler izelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Tek Eksenli Basınç deneyi Sonuçları (7 Günlük)

Numunenin Tanımı	Deney No	Deney Numunesinin Yaşı	Beton Basınç Dayanım Değeri N/mm² (MPa)
Katkısız C25	1	7 gün	23,2
“”	2	7 gün	23,6
“”	3	7 gün	24,3
Katkısız (C25) Ortalaması		7 gün	23,7
Çelik Lif Donatılı Beton	1	7 gün	33,2
“”	2	7 gün	34,6
“”	3	7 gün	34,6
Çelik Lif Donatılı (C25) Ortalaması		7 gün	34,1

Not: Resmi deney sonuçlar ve grafikler için; Bakınız; EK-1 ve EK-2

Çizelge 3.2. Tek Eksenli Basınç deneyi Sonuçları (28 Günlük)

Numunenin Tanımı	Deney No	Deney Numunesinin Yaşı	Beton Basınç Dayanım Değeri N/mm² (MPa)
Katkısız C25	1	28 gün	32,3
“”	2	28 gün	32,1
“”	3	28 gün	33,2
Katkısız (C25) Ortalaması		28 gün	32,5
Çelik Lif Donatılı Beton	1	28 gün	35,7
“”	2	28 gün	39,7
“”	3	28 gün	37,0
Çelik Lif Donatılı (C25) Ortalaması		28 gün	37,5

Not: Resmi deney sonuçları ve grafikler için; Bakınız; EK-3 ve EK-4

Deney sonuçlarının değerlendirildiği Çizelge 3.1 ve 3.2 incelendiğinde; 7 günlük ortalama dayanım sonuçlarında: $34,1-23,7=10,4$ MPa (%44) ve 28 günlük ortalama dayanım sonuçlarında ise: $37,5-32,5=5,0$ MPa (%15) değişim olduğu görülmüştür.

Deney sonuçları dikkatle incelendiğinde; 7 günlük dayanım değerlerindeki artışın %44 seviyesinde olduğu fakat 28 günlük değerlerde artış oranının %15' lere gerilediği görülmektedir. Bunun nedeninin ise; Mikro Donatıların bağlayıcı özelliklerinin olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir. Normal beton ilk 7 günde ancak az bir dayanım kazanabilirken, Mikro Donatılı Beton ise %40' lar oranında dayanım artışı gösterebilmektedir.

Mikro Donatılı Betonların deneysel çalışmalarımız sonucu tespit edilen bu ön sertleşme dönemindeki (7 gün) dayanım artışı özelliği, ani prizlenmesi ve mukavemet kazanması istenilen püskürtme betonlardaki Mikro Donatının kullanımının önemini açıkça ortaya koymaktadır.

3.2.2. Mikro Donatılı Beton Şantiye Gözlem ve Deneyleri

Bu tez çalışmasında amacımız literatürde edindiğimiz bilgilerin uygulamada ne şekilde hayata geçirilebildiğinin tespiti idi. Bu gözlemler esnasında bazı uygulama şartlarının alana uymadığını, Mikro Donatılı Beton uygulamalarında farklı çözümler üretmemiz gerekliliğini tespit etmiş olduk.

Mikro Donatılı Betonların sağlıklı alana uygulayabilmemiz için önce alan hazırlıklarının eksiksiz yapılması gerektiğini aksi takdirde, zemin sıkıştırma ve tesviye çalışmalarının yetersiz yapılmasından dolayı, gereksiz iç gerilmelerin oluşabildiğini ve kıvam değeri oldukça yüksek olan betonun eğer uygulanmasında

uygulama alanı yeterince suya doyurulmadığında rötre alıklarının oluşabileceğini ve perdahlamanın mümkün olamayacağını gözlemlemiş olduk.

Bunun yanında, elik Liflerin betona şantiyede karıştırılması n görüldüğünde betona priz geciktirici katkı malzemesi katılması gerektiğini aksi takdirde lif katma işleminin uzun sürdüğü durumlarda beton döküm sresinin dolması, betonun kıvam kazanarak kalıba yerleşmeyi zorlaştıracaağı tespit edilmiş oldu. Mikro Donatı eklenmesi sonucu kıvam kazanan betonun rahat uygulama ve pompaj için akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmasının doğru olacağını görmüş olduk.

Bunun yanında Mikro Donatılı Betonun kıvam değerinin yüksek olmasından dolayı kr işlemlerinin fazla geciktirilmeden yapılması ve hemen bakıma alınması gerekliliğini tespit etmiş olduk.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

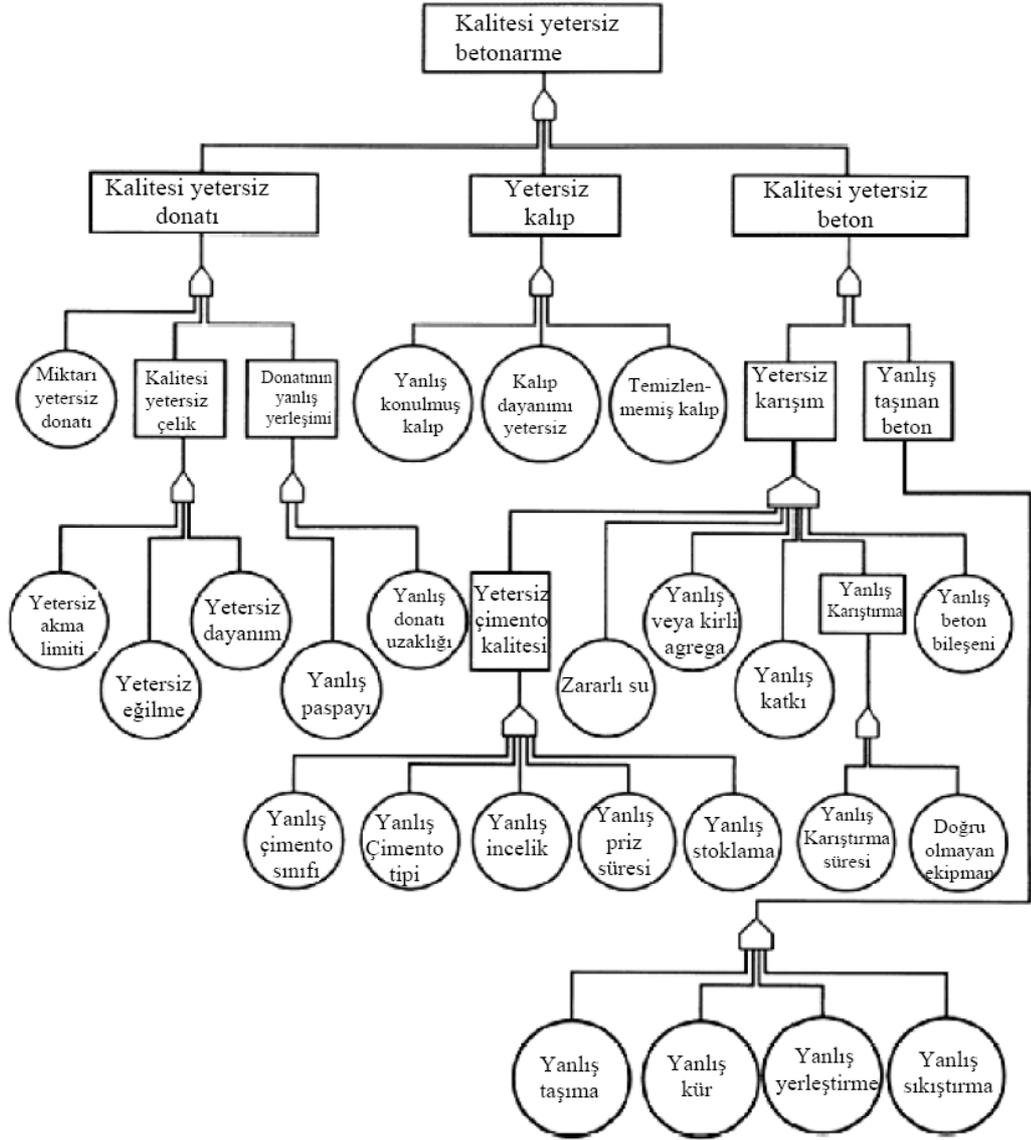
Bu tez çalışmamızda “Mikro Donatılı Beton” sistemleri geniş ve detaylı bir literatür çalışması ile araştırılmış, özellikle “Çelik Tel Donatılı Betonların” laboratuvar da yapılan deneysel çalışmalarda verdikleri sonuçlar ile uygulamada verdikleri sonuçlar ve uygulanabilirlikleri kıyaslanarak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Asıl önemli nokta ise; malzemenin tez çalışması boyunca süren uzun bir uygulama sürecinden geçirilerek şantiye ortamındaki problem, uygulama tekniği ve detaylarının araştırılmasıdır.

Çelik Tel Donatılı Betonların laboratuvar ortamındaki performanslarına bakıldığında normal betonlara göre; ilk sertleşme döneminde gözlem ile bile hissedilebilir düzeyde olmak üzere, dayanım artışı elde edildiği görülmüştür. Tespit edilen diğer önemli bir konu ise; Çelik Tel Donatılı Betonların kırılma sonrasında dahi yük taşıyabildikleri yani dağılmadıklarıdır.

Bunun yanında betonlara lif eklenmek sureti ile; betonlarda oluşan rötre çatlakları ve darbe yükleri nedeni ile oluşan dağılmalarında engellenmiş olduğu tespit edilmiştir.

Laboratuvar ortamındaki şartlarda elde edilen tüm bu verilerin bu çalışma ile; şantiyede elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Bunun yanında, betonarme sisteme yeni bir malzeme eklendiğinden dolayı fiziksel yapısında oluşan değişimin uygulamada bir problem oluşturup oluşturmayacağı araştırılmıştır.

Şekil 4.1. incelendiğinde; betonarme yapıların inşasında yapılan hataların nedeni fazla ve karmaşık olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.1. Betonarme Yapıların İnşasında Yapılan Hatalar

Bu tez çalışmamız sonucunda elde ettiğimiz veriler ve sağlıklı betonarme yapı oluşmasını engellemeye yönelik yukarıdaki belirtilen ana eksiklikler incelendiğinde; Mikro Donatı Sistemlerinin betonarme yapılar için oldukça kullanışlı ve faydalı oldukları açıkça görülebilmektedir.

Tez çalışmamızda elde ettiğimiz veriler değerlendirildiğinde; betona çelik lif ilavesi ile birlikte betona, her yerine (pas payı bölgesi de dahil) dağılan ve mükemmel bir aderans sağlayan ek bir donatı sistemi eklendiği, böylece de sistem içindeki donatı kalitesinin artırılmış olduğu gözlenmiştir.

Bunun yanında eklenen Mikro Donatı sayesinde betonarme sistem daha sünek çalıştığı için kalıp üretimi esnasında yapılan hatalar sonucu sisteme bir yük olarak yüklenen içsel gerilmelere karşı pas payı bölgelerinde bile karşı koyabilen bir betonarme yapı üretilmiş olmaktadır.

Sisteme eklenen Mikro Donatıların diğer bir özelliği ise; santralde üretildikten sonra yukarıda şekilsel olarak ifade edilen değişik etken ve hatalardan dolayı özelliğini kaybeden betona, her bölgesine dağılarak kaybettiği dayanım özelliklerini yeniden kazandırabilmesidir.

Tüm bunlar ve deneysel çalışma verileri dikkate alındığında; betonarme sisteme Çelik Lif ilave edilmesi ile sistemin yüksek yük taşıma kapasitesine ulaştığı, aynı karışıma haiz olmasına rağmen betonun basınç dayanımının % 15 oranında arttığı (28 günlük veriler doğrultusunda), bununla birlikte 7 günlük veriler dikkate alındığında betonun % 40 oranında fazla dayanım kazandığı tespit edilmiştir. Buda Mikro Donatı Katkılı betonların; ilk mukavemet fazlalığı istenen püskürtme beton uygulamalarında rahatlıkla kullanılabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte tüm

hacme dağılma ve mikro düzeyde aderans sağlandığından beton dinamik yükler altında oluşan yorulma ve darbe etkilerine karşı güçlendirilmiş olmuştur. Göçme anında elde edilen süneklik ve dağılmama özelliği ile de katkılı betonun deprem tehlikesi veya dinamik yükler etkisi altında bulunan yapılarda kullanılmasının faydalı olacağı kanaatine varılmıştır.

Tasarım aşamasında beton kalınlığının azaltılabilmesi, kolay uygulama, sistemin bakım giderlerinin azalması gibi ek aydalar da dikkate alındığında, elik Lif Donatılı Betonların uygulamada kullanımının hızla artacağı ve artması gerektiği kanaatine varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Uğurlu, Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Özellikleri ve Su Yapılarında Kullanılması, DSİ Teknik Bülteni, **80**,17 (1994).
2. M. Yerlikaya, Çelik Teller İle Donatılmış Beton Elemanların Düşey Yük Altında Davranışları, Hazır Beton Dergisi, **Eylül-Ekim**,72 (1998).
3. M. Tokyay, K. Ramyar, L. Turanlı, Polipropilen ve Çelik Lifli Yüksek Dayanımlı Betonların Basınç ve Çekme Yükleri Altındaki Davranışları, 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul 1991.
4. O. Ünal, Isıl İşlem Uygulamasının Lifli Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, AKÜ Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon 1999.
5. A. Bentur, S. Mindness, Fibre Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, London and Newyork 1990.
6. A. Arslan, A.C. Aydın, Lifli Betonların Genel Özellikleri, Hazır Beton Dergisi, **Kasım-Aralık**, 67 (1999).
7. ACI Committe 544.1R-96, State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Journal, **729** (1973).
8. A. Arslan, Çelik Lifli Betonların Özellikleri ve Kullanım Potansiyeli, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, **369**, 29 (1993).
9. P. Soroushian, S. Marikunte, High Performance Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by H.W.Reinhardt & A.E. Naaman, London, 1992.

10. P.K. Nelson, V.C. Li, T. Kamada, Fracture Toughness of Microfiber Reinforced Cement Composites, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **14-5**, 384 (2002).
11. ACI Committe 544.3R-93, Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Journal*. 1998.
12. TS 10515, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 1992.
13. M. A. Taşdemir, F. Bayramov, M. Yerlikaya, Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, **426**, 76 (2003).
14. C. Eyyubov, F. Köksal, B. Ünal, Polipropilen ve Çelik Liflerin Donma-Çözülme ve Aşınma Dirençlerine Ortak Etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi, Ekim, 345 (2003).
15. TS 10514, Çelik Tellerin Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, Ankara, 1992.
16. ACI Committe 544.4R-88, Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Journal*, 1999.
17. D. A. Fanella, A. E. Naaman, Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression, *ACI Journal*, **8-4**, 475 (1985).
18. J. Gao, W. Sun, K. Morino, Mechanical Properties of Steel Fiber- reinforced, High-Strength, Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Composites*, **19**,307 (1997).
19. A. S. Ashour, F. F.Wafa, M. I. Kamal, Effect of The Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on The Flexural Behavior of Fibrous Concrete Beams, *Engineering Structures*, Elsevier Science Ltd., **22**, 1145

- (2000).
20. P. Balaguru, Properties of Fiber Reinforced Rapid Hardening Cement Composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by H.W.Reinhardt & A.E. Naaman, London, 1992.
 21. Z. F. Zhan, B. Foure, L. J. Trinh, Characterizing Tests in Tension for Fibre Reinforced Concrete, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by H.W.Reinhardt & A.E. Naaman, London, 1992.
 22. T. S. Look, J. R. Xiao, Flexural Strength Assessment of Steel Fiber Reinforced Concrete, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, **11-3**, 188 (1999).
 23. P. Pierre, R. Pleau, M. Pigeon, Mechanical Properties of Steel Microfiber Reinforced Cement Pastes and Mortars, Journal of Materials in Civil Engineering, **November**, 317 (1999).
 24. T. S. Lok, ASCE Member, J. S. Pei, Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, **10-2**, 86 (1998).
 25. N. Özyurt, A. İlki, C. Taşdemir, M. A. Taşdemir, M. Yerlikaya, Mechanical Behavior of High Strength Steel Fiber Reinforced Concretes with Various Steel Fiber Contents, Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, ITU, **September** 2002.
 26. M. A. Taşdemir, F. Bayramov, A. N. Kocatürk, M. Yerlikaya, Betonun Mekanik Özellikleri, İstanbul 2004.
 27. M. L. Wang, A. K. Maji, Shear Properties of Slurry Infiltrated Fiber Concrete, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by H.W.Reinhardt & A.E. Naaman, London, 1992.

28. K. Marar, Ö. Eren, T. Çelik, Relationship Between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete, *Materials Letters*, **47**, 297 (2001).
29. M. C. Najatara, N. Dhang, A. P. Gupta, Statistical Variations in Impact Resistance of Steel-Reinforced Concrete Subjected to Drop Weight Test, *Cement and Concrete Research*, **29**, 989 (1999).
30. S. Mindess, N. Wang, L. D. Rich, D. R. Morgan, Impact Resistance of Polyolefin Fibre Reinforced Precast Units, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 387 (1998).
31. S. T. Yıldırım, Lifli Betonlarda Yorulma Tesirlerinin Araştırılması, Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 2003.
32. S. Mindess, C. Yan, Bond of Reinforcing Bars in Fiber Reinforced Concrete Under Impact Loading, *Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, Edited by H.W.Reinhardt & A.E. Naaman, London, 1999.
33. T. Y. Erdoğan, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları, **Mayıs**, Ankara., 2003.
34. V. Ramakrishnan, B. J. Lokvik, Flexural Fatigue Strength of Fiber Reinforced Concretes, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, Edited by H.W.Reinhardt & A.E. Naaman, London, 271 1992.
35. J. Rapoport, C. M. Aldea, S. P. Shah, B. Ankenman, A. Karr, Permeability of Cracked Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **14-4**, 355 (2002).
36. B. Mu, S. Meyer, S. Shimanovich, Improving The Interface Bond Between Fiber Mesh and Cementitious Matrix, *Cement and Concrete Research*, **32**, 783 (2002).

37. M. Erbaş, Polipropilen Lifler ve Betonun Durabilitesine Etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi, **Ekim**, 593 (2003).
38. N. Kara, S. K. Akın, Kolon Kiriş Birleşim Bölgesinde Fiber Betonun Taşıma Kapasitesine Etkileri, Selçuk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, (1992).
39. R. Mu, C. Miao, X Luo, W. Sun, Interaction Between Loading, Freze- Thaw Cycles, and Chloride Salt Attack of Concrete With and Without Steel Fiber Reinforcement, *Cement and Concrete Research*, **32**, 1061 (2002).
40. M. A. Mansur, ASCE Member, M. S. Chin, T. H. Wee, Stres-Strain Relationship of High Strength Fiber Concrete in Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11-1**, 21 (1999).
41. B. Baradan, H. Yazıcı, H. Ün, Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir 2002.
42. M. Gençoğlu, İ. Eren, İki Yönlü Tekrarlı Yüklemeler Altındaki Betonarme Kenar Kolon-Kiriş Birleşimlerinde Kullanılan Çelik Tel Takviyeli Betonun Etkili Bölgesinin Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul 2000.
43. A. Arslan, Z. Ç. Ulucan, Çelik Liflerin Erken Yaştaki Betonarme Kirişlerin Göçmesine Etkisi, Fırat Üniversitesi İnşaat Müh. Böl., Elazığ 1997.
44. ř. Özden, Punching Tests on Flat-Plates, Kocaeli University, Department of Civil Engineering, Kocaeli 1997.
45. C. Fritz, A. E. Naaman, H. W. Reinhardt, Sifkon Matrix in Reinforced Concrete Beams, Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by H.W.Reinhardt & A.E. Naaman, London 1992.