

T.C.
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Tünelde Çelik Hasır Yerine Çelik Tel Kullanımının Mekanik
Açısından Araştırılması

Yüksek Lisans Tezi

Onur Gökçe

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜNELLERDE ÇELİK HASIR YERİNE ÇELİK TEL KULLANIMININ MEKANİK
AÇIDAN ARAŞTIRILMASI

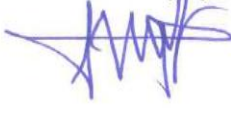
ONUR GÖKÇE


Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Doç. Dr. Mustafa FENER

Ağustos 2015

Onur GÖKÇE tarafından **Doç. Dr. Mustafa FENER** danışmanlığında hazırlanan “**Tünellerde Çelik Hasır Yerine Çelik Tel Kullanımının Mekanik Açından Araştırılması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Jeoloji Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : [(Doç. Dr. Mustafa FENER) (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fak. Jeoloji Müh. Bölümü)  İmza]

Üye : [(Doç. Dr. İsmail DİNÇER) (Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Fak. Jeoloji Müh. Bölümü)  İmza]

Üye : [(Yrd. Doç. Dr. Mustafa KORKANÇ) (Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Müh. Bölümü)  İmza]

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

(İmza)

Onur GÖKÇE

ÖZET

TÜNELLERDE ÇELİK HASIR YERİNE ÇELİK TEL KULLANIMININ MEKANİK AÇIDAN ARAŞTIRILMASI

GÖKÇE, Onur

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa FENER

Temmuz 2015, 89 sayfa

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada tünel kaplama betonlarında sıkça tercih edilen çelik hasırlar yerine çelik tel kullanımının betonlar üzerindeki mekanik davranışları incelenmiştir. Bu amaç için benzer beton dizaynında hazırlanmış 3 adet'i çelik hasırlı, 3 adet'i çelik telli ve kalan 3 adet'i donatısız toplam 9 adet plak numunesi üretilmiştir. Hazırlanan beton plak numunelerinde öncelikli olarak taze betonun işlenebilirliği ölçmek amacıyla; çökme testi, ve-be deneyi ve birim hacim ağırlık deneyi uygulanmıştır. Sertleşmiş beton numunelerinden çelik telli ve donatısız olanlara basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Literatürde çelik hasır ve çelik tellerin, betonların enerji yutma kapasitelerini arttırdığı bilinmektedir. Bu amaçla hazırlanan numunelere enerji yutma kapasitelerini (tokluk) belirleme amaçlı plak testleri yapılmıştır. Test sonuçları ele alındığında tünellerde püskürtme beton içinde kullanılan çelik hasırlar yerine, aynı enerji yutma kapasitesine sahip olduğu gözlenen çelik tellerin kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik hasır, çelik tel, donatısız beton, plak testi, tokluk, basınç dayanımı, işlenebilirlik.

SUMMARY

MECHANICAL RESEARCHING USING STEEL INSTEAD OF STEEL FİBER FOR TUNNELS

GÖKÇE, Onur

Nigde Universty

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Deparment of Geological Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Mustafa FENER

July 2015, 89 Pages

This study is prepared for master thesis. Construction companies usually using steel mesh nowadays. We are researching mechanical effect about using steel mesh instead of steel fiber. So similar concrete design was prepared and 9 panel samples produced. 3 panel samples was produced steel fiber, 3 panel samples was produced steel mesh and 3 panel samples was produced simple concrete. Prepared concrete platter samples were applied slump test, ve-be test and unit weight test for measuring penetrability. Sclerotic concurate samples (steel fiber and simple one) were applied compressive strength test for finding first crack strength. Steel mesh and steel fiber are absorbing the energy more than simple concrete. So this 9 panel samples were applied similar test for determinaty energy absorbing capacity. Finding test results determinaty mechanical effect about steel fiber and steel mesh.

Keywords: Steel mesh, steel fiber, simple concrete, panel test, satiety, compressive strength, penetrability.

ÖN SÖZ

Bu çalışmada tünel kaplama betonlarında sıkça tercih edilen çelik hasırlar yerine çelik tel kullanımının betonlar üzerindeki mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma boyunca betonların ilk çatlak yükleri takip edilmiş, ancak daha önce yapılmış deneyler ve yapılan basınç dayanımı deney sonuçlarında çelik telli numuneler ile donatısız yalın numuneler arasında genelleme yapılacak tarzda yük artışı veya düşüşü görülemediğinden, betonların ilk çatlak yüklerine ilişkin herhangi bir yorum yapılamamıştır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa FENER'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sırasında tecrübelerine başvurduğum mühendis ağabeylerim Mustafa UYAR, Oktay GÖKÇE ve Mehmet YERLİKAYA'ya, yardımlarıyla katkıda bulunan jeofizik mühendisi arkadaşım Fatma KEKLİK ve elektrik-elektronik mühendisi arkadaşım İlteriş Alp ŞAHİN'e, tezin yazımı esnasında tecrübelerinden sıkça faydalandığım sevgili dostum Emrah Onur ÖZÇİÇEKÇİ'ye, tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme minnet ve şükran duygularımı belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1. Lifin ve Çelik Lifli Betonun Tanımlanması	2
2.2. Çelik Lifli Betonun Tarihçesi	6
2.3. Çelik Liflerle İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar	7
2.4. Çelik Lifli Betonların Performansını Belirleyen Etkenler	9
2.4.1. Lif miktarı ve narinlik oranı etkisi	9
2.4.2. Lif tipi etkisi.....	10
2.4.3. Çelik lifli betonda matris etkisi.....	13
2.4.4. Mineral katkı etkisi	14
2.5. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Teknik Özellikleri.....	15
2.6. Taze Beton Özellikleri	16
2.7. Sertleşmiş Beton Özellikleri	17
2.7.1 Enerji emme kapasitesi (tokluk-toughness).....	17
2.7.2. Eğilmede çekme dayanımı (flexural strenght).....	18
2.7.3. Basınç dayanımı.....	19
2.7.4. Yorulma dayanımı	21

2.7.5. Darbe dayanımı.....	22
2.7.6. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda rötre.....	22
2.7.7. dayanıklılık	23
2.8. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Tasarımı, Üretimi, Taşınması Yerleştirilmesi ve Bakımı.....	24
2.8.1. Tasarımı	24
2.8.1.1. Karışım esasları.....	24
2.8.1.2. Karışım sırasında dikkat edilecek hususlar.....	26
2.8.2. Taşıma.....	28
2.8.3. Yerleştirme ve tesviye işlemi.....	29
2.8.4. Kür	30
2.9. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları	31
2.10. Çelik Hasırın Tanımlanması ve Çelik Hasır Hakkında Genel Bilgiler.....	35
3. TÜNELLERDE ÇELİK TEL VE ÇELİK HASIR KULLANIMI.....	40
3.1. Tünellerde Püskürtme Beton Kullanımı	42
3.1.1. Karışım dizaynı.....	43
3.1.2. Püskürtme beton atım tekniği	44
3.1.3. Tünellerde püskürtme beton avantajları	45
3.2. Püskürtme Betonda Çelik Lif Kullanımı	46
3.2.1. Çelik lifli püskürtme betonda geri sıçrama.....	49
3.2.2. Çelik tel katkılı püskürtme betonun karışım dizaynı	49
3.3. Çelik Tel ile Çelik Hasırlı Püskürtme Betonların Kıyaslanması	50
3.4. Çelik Tel ve Çelik Hasır Performansını Belirleyici Testler.....	54
3.5. Sistem Performans İlkeleri.....	56
4. MATERYAL ve METOD	59
4.1. Kullanılan Malzemeler	59
4.1.1. Agrega.....	59

4.1.2. Çimento.....	60
4.1.3. Katkı.....	62
4.1.4. Su	62
4.1.5. Betonun karışım oranları	63
4.1.6. Çelik lif	63
4.1.7. Çelik hasır	64
4.2. Beton Karışımları.....	65
4.2.1. Standart kabuller	65
4.2.2. Beton karışımı, üretimi ve kuru	65
4.3. Deneysel Çalışmalar	67
4.3.1. Taze beton deneyleri.....	67
4.3.2. Sertleşmiş beton deneyleri	68
4.3.2.1. Basınç dayanımı deneyi	68
4.3.2.2. Enerji depolama kapasitesi veya tokluk (efnarc plak testi)	69
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	74
5.1. Taze beton Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	74
5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	76
5.2.1. Basınç dayanımı deneyi	76
5.2.2. Efnarc plak testi deneyi.....	77
6. SONUÇLAR.....	87
KAYNAKLAR	90
ÖZ GEÇMİŞ	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Değişik cins liflere ait fiziksel özellikler	3
Çizelge 2.2. Değişik liflere ait fiziksel özellikler	5
Çizelge 2.3. Farklı uzunluk/çap oranları ve çelik tel aralıklarına göre asgari çelik tel dozajları (Bekaert)	9
Çizelge 2.4. Lifli betonun mekanik özelliklerindeki yaklaşık artışlar	15
Çizelge 2.5. Değişen agrega maksimum tane çapına göre betonda kullanılması gerekli lif miktarı, kg/m ³ (TS 10514, 1992).....	25
Çizelge 2.6. Çelik hasırların mekanik özellikleri	35
Çizelge 2.7. R tipi standart çelik hasır tablosu	37
Çizelge 2.8. Q tipi standart çelik hasır tablosu	37
Çizelge 3.1. Avusturya standartları ÖNORM 2203'e göre kaya sınıfları	41
Çizelge 3.2. Çelik liflerle ince agrega püskürtme beton karışım dizaynı.	49
Çizelge 3.3. Çelik lifli kaba agrega püskürtme betonu karışım dizaynı	50
Çizelge 3.4. Efnarc' a göre tokluk sınıfı.	56
Çizelge 4.1. Agregaların ağırlık ve karışım yüzdeleri.	59
Çizelge 4.2. Agregaların elek analizi.....	59
Çizelge 4.3. Cem II A PÇ 42,5 R çimentosunun fiziksel, kimyasal, minerolojik ve mekanik özellikleri.	61
Çizelge 4.4. Karışımında kullanılan katkı maddesinin teknik özellikleri	62
Çizelge 4.5. Çalışmada kullanılan betonun yoğunluk, hacim ve karışım oranları	63
Çizelge 4.6. Narinlik oranı 65 olan çelik tellerin özellikleri (Bekaert).	63
Çizelge 4.7. Q221x221 tipi çelik hasırın özellikleri	64
Çizelge 4.8. Taze betonun çökme ve vebe sınıflaması (TS EN 206-1, 2002).	68
Çizelge 5.1. Taze beton deney sonuçları	75

Çizelge 5.2. Çalışmada kullanılan yalın betonun (1. transmikser) 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları	76
Çizelge 5.3. Çalışmada kullanılan çelik tel katkılı betonun (2. transmikser) 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları	76
Çizelge 5.4. Çelik tel ve çelik hasır donatılı plaklara ait deney sonuçları	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çelik tel donatılı betonlar için lif içeriği – kırılma enerjisi ilişkisi	10
Şekil 2.2. Farklı lif uzunluklarının betondaki çatlaklara etkisi.....	10
Şekil 2.3. Çelik lif tipleri (TS 10513, 1992).	11
Şekil 2.4. Çelik lif kesitleri	11
Şekil 2.5. Değişik çelik liflerin enkesitleri	12
Şekil 2.7. Çelik tel donatılı püskürtme beton panelinin tipik eğilme eğrisi (Bekaert). ..	18
Şekil 2.8. Basınç dayanımını etkileyen lif yönlendiği.....	19
Şekil 2.9. Basınç gerilmesi altında lif hacmi ile değişen deformasyon davranışı.....	20
Şekil 2.10. Çelik tel donatılı betonların yük-deformasyon ilişkisi	20
Şekil 2.11. R tipi çelik hasır ebatları.....	36
Şekil 2.12. Q tipi çelik hasır ebatları	36
Şekil 2.13. R tipi ve Q tipi çelik hasır bindirme boyları.....	38
Şekil 3.1. Püskürtme başlığının doğru kullanımının gösterimi	45
Şekil 3.2. Çelik tellerin çatlak karşısındaki davranışı.....	48
Şekil 3.3. Hasır çelik donatı ile tel donatılı betonun karşılaştırılması	52
Şekil 3.4. Püskürtme betonda liflerin çatlak gelişimini önlemesi ve ilave taşıyıcılık işlevi (Arıoğlu vd., 2008).....	53
Şekil 3.5. Orta noktadan yüklenmiş kiriş eğilmede çekme deney düzeneği.....	54
Şekil 3.6. Tünellerde plak testi modellemesi	55
Şekil 3.7. Q sistemi (Barton) tablosu.....	58
Şekil 4.1. Standart agrega granülometri eğrileri ve karışımda kullanılan agregaların granülometri eğrileri	60
Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan çelik lif tipi.....	64
Şekil 4.3. Q221x221 tipi çelik hasır boyutları	64
Şekil 4.4. Test için kullanılan beton plakası boyutları.....	69

Şekil 4.5. EN 14488-5' e göre oluşturulması gereken plak testi grafikleri (a) yük-deformasyon, (b) enerji-deformasyon.....	70
Şekil 4.6. Tokluk indekslerinin hesaplanması için yük-sehim eğrisi	71
Şekil 5.1. 1 no'lu çelik tel donatılı betonun yük-sehim eğrisi	77
Şekil 5.2. 1 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi.	78
Şekil 5.3. 2 no'lu çelik tel donatılı betonun yük-sehim eğrisi	78
Şekil 5.4. 2 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi.	79
Şekil 5.5. 3 no'lu çelik tel donatılı betonun yük-sehim eğrisi	80
Şekil 5.6. 3 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi	80
Şekil 5.7. 1 no'lu çelik hasır donatılı betonun yük-sehim eğrisi.	81
Şekil 5.8. 1 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi.	82
Şekil 5.9. 2 no'lu çelik hasır donatılı betonun yük-sehim eğrisi.	83
Şekil 5.10. 2 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi.	83
Şekil 5.11. 3 no'lu çelik hasır donatılı betonun yük-sehim eğrisi.	84
Şekil 5.12. 3 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi.	85

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Değişik tiplerde çelik teller	4
Fotoğraf 2.2. Beton santralinde liflerin karıştırılması yöntemi	27
Fotoğraf 2.3. Transmikserde bulunan hazır betona çelik tellerin ilave edilmesi	28
Fotoğraf 2.4. Çelik lifli betonun şev stabilitesinin sağlanması (Bekaert, 2011).....	34
Fotoğraf 2.5. Çelik lifli yaş betonun püskürtme beton uygulaması.....	35
Fotoğraf 3.1. Kuru püskürtme (a) ve ıslak püskürtme (b) görünümü.....	43
Fotoğraf 3.2. Uçları kancalı çelik tel tipi (www.bekaert.com).	47
Fotoğraf 3.3. Tünelde çelik hasır montajı.....	51
Fotoğraf 3.4. Fransız (Efnarc) plak testi deney düzeneği	56
Fotoğraf 4.1. Plak numunelerinin perdahlanması	66
Fotoğraf 4.2. Çökme (slump) deneyi.	67
Fotoğraf 4.3. Plak testi deney düzeneği	73
Fotoğraf 5.1. Çelik tel donatılı betonların deney sonrası görüntüleri	81
Fotoğraf 5.2. Çelik hasır donatılı betonların deney sonrası görünümü	85
Fotoğraf 5.3. Donatısız beton plakların deney sonrası görüntüleri.....	86

1. GİRİŞ

Beton tarihte ilk kullanılmasından günümüze kadar hala güncelliğini koruyan ve kullanım alanı giderek gelişen bir yapı malzemesidir. Bunun en büyük sebebi ise fiziksel, kimyasal ve mekanik dış etkilere karşı dayanıklılığı, ekonomik ve kolay üretilmesidir (Şimşek, 1997).

Betonarme yapılardan beklenen özellikler dayanım, durabilite (dayanıklılık), ekonomiklik, fonksiyon ve estetiğin sağlanmasıdır.

Betonarme ile daha yüksek, daha küçük kesitli yapılar yapma ve bu malzemenin yetersiz görülen bazı özelliklerinin daha da iyileştirilmesi ihtiyacı, insanoğlunu beton içinde daha başka malzemelerde kullanma ve hatta bu malzemelere alternatif arama yoluna itmiştir. Beton içerisine katılan tüm malzemeler belirli bir amaca ve belirli bir özellik ya da özelliklerin iyileştirilmesine yönelik olarak kullanılır. Değişik ortamlarda çeşitli etkilere karşı betonun gösterdiği davranışları ya da bu davranışlardan herhangi birini tek bir matematik modelle açıklamak mümkün değildir. Bu nedenle yapılması gereken, beton hangi etkiye ya da hangi zorlamaya karşı çalışacaksa bu durumun açıkça tanımlanarak betonun bu yönünün güçlendirilmesi gerekmektedir (DSİ, 1999).

Bilindiği gibi kazı destek ve kaplama sistemlerinin vazgeçilmez elemanı olan püskürtme beton ve kaplama betonları, tünellerde yıllarca çelik hasırlarla birlikte kullanılmasına karşın, oluşan hızlanma (hızlı bir şekilde tahkimatlandırma), ekonomiklik ve estetik görünüm ihtiyacı sebebiyle gittikçe yaygınlaşan bir şekilde çelik liflerle birlikte kullanılmaya başlanmıştır.

Betona üniform bir şekilde dağılan lifler, çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi, çekme, yorulma, çarpma ve aşınma dayanımında önemli artışlar sağlamaktadır.

Bu çalışmada tünellerde beton içerisine katılan lifler üzerine çeşitli araştırmalar yapılarak betonun mukavemeti üzerine liflerin etkisi araştırılmış, maliyet analizleri yapılmış, betonun basınç altındaki davranışları incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan beton içerisine çeşitli yöntemler ile değişik miktarlarda (çelik, plastik, cam vb.) liflerin katılması ile elde edilen malzemeye lifli beton denilmektedir.

Ünal(1994), “Gevrek ve çekme dayanımı düşük olan normal betonun çekme gerilmeleri altında çatladığı kabul edilir. Özellikle tünellerde yüksek çimento yüzdesi ile hazırlanan püskürtme betonlar maruz kaldığı yük altında çatlama eğilim gösterirler.” demiştir.

Beton içerisine katılan lifler çimento matrisini (yada harç fazını) takviye ederek beton içerisinde, üzerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak rol oynarlar. Beton içerisine dağılmış olan liflerin çatlak sonlarına bitişik olmasından dolayı lifler, matristeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri kendi üzerlerine ve çatlama bölgesine naklederler. İletilen bu gerilmeler çatlağın diğer yanına daha düşük kuvvetler olarak nakledilir. Özellikle çelik liflerin kullanılması durumunda yukarıda açıklanan kompozit davranışı, çelik liflerin yüksek çekme gerilmesi nedeniyle daha belirgindir (DSİ, 1999).

Beton harcı içerisine katılan çelik lifler; betonun enerji tutma kapasitesini, darbe dayanımını, elastik mukavemeti, çatlama karşı direncini, yorulma ve kesme kuvvetlerine karşı dayanımını, yüksek plastik deformasyon karşısında yük taşıyabilme kapasitesini artırır (DSİ, 1999).

2.1. Lifin ve Çelik Lifli Betonun Tanımlanması

ACI (American Concrete Institute) 544'e göre lifin tanımı lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen “boy/çap” oranı olarak kabul edilmektedir. Bu orana kısaca “narinlik oranı” da denilmektedir. Ancak bazı liflerin uzunluklarının ve çaplarının farklı değerler alması ve cam liflerde olduğu gibi liflerin demet şeklinde olması nedeniyle liflerde, sadece boy/çap oranına göre sınıflandırma yapmak mümkün

olmamaktadır. Lifleri tanımlamada diğer önemli unsurlar ise; geometrik yapısı ve çekme gerilmesidir.

Lifli betonların en yaygın olarak kullanılan tipleri; cam lifli, çelik lifli, mika levhalı, plastik lifli ve polimer betonlardır.

Çizelge 2.1. Değişik cins liflere ait fiziksel özellikler (DSİ, 1999)

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (10^3 , MPa)	Maksimum Uzama (%)	Özgül Kütle (gr/cm^3)
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbestler	552-996	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,4
Poliyeten	690	0,14-0,4	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,9
Pamuk - Yün	414-621	6,9	10-25	1,5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-35	7,8

Çelik lifler, düşük karbonlu çelik C 1008'den üretilmişlerdir. En önemli özellikleri yüksek ve üniform çekme gerilmelerine karşılık düşük uzama göstermeleridir. Birbirinden farklı değişik yöntemlerle üretilirler. Bunlardan bazıları;

- soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi yöntemi
- çelik plakların kesilmesi yöntemi
- sıcak çekme yöntemi
- çelik tellerin öğütülmesi yöntemi



Fotoğraf 2.1. Değişik tiplerde çelik teller(Bekaert, 2014)

Yapılan çalışmalar lif tipinin, lifin beton içinde kopmasında ve sıyırılmasında etkili olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.2. Değişik liflere ait fiziksel özellikler (DSİ, 1999)

Lif Türü	Özgül Kütle ($10^3, \text{kg/m}^3$)	Elastisite Modülü (kN/mm^2)	Çekme Mukavemeti (kN/mm^2)	Kopma Uzama Oranı
Asbest:				
(a) Krisotil	2,55	164	3,1	2-3
(b) Krokidolit	3,37	196	3,5	2-3
Karbon:				
(a) Tip I	1,90	380	1,8	0,5
(b) Tip II	1,9	230	2,6	1
Polipropilen	0,90	5	0,5	20
Naylon (Tip 242)	1,14	4	0,9	15
Kevlar:				
(a) PRD 49	1,45	133	2,9	2,6
(b) PRD 29	1,44	69	2,9	4,0
Kenevir	1,50		0,8	3
Cam	2,60	80	2-4	2-3,5
Çelik	7,80	200	1-3	3-4

Çelik liflerin çekme gerilmeleri ortalama olarak 1200 N/mm^2 olup elastik limitleri %0,2'nin altındadır. Geometrik şekilleri, çekme gerilmeleri, çap uzunlukları arasında belli bir oran vardır. Kullanılan çelik liflerin çapları 0,13 ile 1,0 mm arasında olup uzunluk/çap oranları 30 ile 150 arasında değişmektedir. Lif boyları ise 13 mm'den 70 mm'ye kadar değişmektedir. Lif hacmi fraksiyonu diye tanımlanan ve betonda belirli bir yüzey alandaki lif alanını gösteren lif hacmi de %0,5 ile %3 arasında değişmektedir (DSİ 1999).

Çelik lifli beton, çimento, agrega, su ve bazı katkı maddeleri ile oluşturulan betona liflerin süreksiz bir şekilde dağılmasıyla elde edilir. Kısaca matris'e (çimento hamuru veya lifin etrafını saran ortam) çelik lif katılmasıyla oluşturulur.

2.2. Çelik Lifli Betonun Tarihçesi

Lifler eski zamanlardan beri kırılğan malzemeleri güçlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. İlk olarak güneşte kurutulan toprak briketleri güçlendirmek için saman, daha sonra at kılı kullanıldı ve günümüze yaklaştıkça portland çimentosunu güçlendirmek için asbestli lifler kullanılmaktadır. Daha sonra özellikle 1900'lerden itibaren çeşitli teller kullanılarak düşük çekme mukavemetine ve kırılğan bir yapıya sahip beton gibi malzemelerin çeşitli özellikleri iyileştirilmiştir (ACI Comitte 544, 1982).

Cam, asbest, karbon ve birçok doğal lifler bambu, hint keneviri gibi diğer lif çeşitleri betonun içinde kullanılarak test edildi. Her bir lif değişik işlev ve üstünlüklere sahip olduğundan betonun zayıf özelliklerine olası durumlara göre çözümler bulundu. Çelikdonatılı betonlar yamaç stabilitesi, yer altı uygulamaları ve yapısal güçlendirmeye kadar geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadırlar.

Çelik liflerle güçlendirilmiş püskürtme betonun yeraltı tahkimatlarında ilk uygulamaları, Kuzey Amerika'da 1970'li yıllarda başlamıştır. İlk uygulamalarda, çelik lif olarak 0,25 mm çapında ve 25 mm uzunluğundaki düzgün teller kullanılmış, çimento ile agrega karışımına ağırlıkça % 3-6 arasında katılmıştır (Yurdakul, 2001).

Özbayoğlu ve Kenet (1989), "Çelik lif ilk kez bir yaklaşım tüneline (Rivie Barajı, Idaho, ABD) uygulanmıştır." demiştir.

1980'lerden sonra, çelik lifli püskürtme betonun mühendislik özellikleri üzerinde yapılan çok sayıda araştırmaya paralel olarak üniform karıştırmayı sağlayan besleme ekipmanlarının da geliştirilmesiyle, çelik lifin betonda kullanımı yaygınlaşmıştır. Türkiye'de ise çelik lifli betonların, yapılarda yaygın olarak kullanılmaya başlanması son 10 seneye tekabül eder.

2.3. Çelik Liflerle İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar

Betonun çekme dayanımını arttırmak amacıyla yapılan ilk çalışmalar, 1963 yılında Romualdi ve Mandel tarafından başlatılmıştır. Bunlar betonun çekme bölgesinde birbirine paralel olarak yerleştirilmiş ince teller bulunan kirişler üzerinde deneyler yaparak kirişin eğilme dayanımının arttığını ve kırılma yüküne çok yaklaşıncaya kadar çatlakların fazla büyümediği gözlenmiştir (Ünal, 1994).

Wubs, lifli betonların eğilme dayanımı üzerine yaptığı araştırmada maksimum agrega tane büyüklüğü 16 mm, su/çimento oranı 0,53 olan karışıma 60/0,80 ebatındaki lifleri katarak deneyler yapmıştır. Bu deney sonuçlarına göre bütün deney numunelerinin ilk çatlaktan sonra bile belli bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğuna ve eğilme dayanımının lif miktarıyla arttığına görmüştür.

Traine ve Mansur (1972), tek ve iki eksenli gerilme hallerinde normal ve lifli betonların basınç dayanımları ile gerilme şekil değiştirme davranışlarını araştırmışlardır. Karışımlarda narinlik oranı 33 ve 60 olan iki tip lif, hacimce %0,5, %1 ve %1,50 oranlarında kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre; lifli betonların tek eksenli basınç dayanımlarında, lif miktarı ve tipine bağlı olarak, normal betonla kıyaslandığında artma veya önemli bir değişiklik görülmemiştir. Tek eksenli gerilme halinde narinlik oranı 60 ve lif miktarı %1,5 olan karışımlar da basınç dayanımı %22 oranında artmıştır.

Swamy (1975), çelik lifli betonların özelliklerini araştırmak amacıyla yaptığı çalışmada lifli beton kompozitlerinin durabilitesi ve çimento matrisi arasındaki ilişkinin önemini belirtmektedir. Yapılan çalışmada hacim artışından dolayı dışarıda kalan lifler dikkate alınmazsa, liflerin karışım içinde gelişi güzel dağıldığını belirtmektedir. Yapı elemanları üretiminde; lifli betonun kullanılması halinde işlenebilmeyi kolaylaştırmak amacıyla karışıma uçucu kül katılması lifli betonun aderans dayanımını arttırdığı belirtilmektedir.

Morgan ve Mowatt(1979), yapmış oldukları çalışmada donatısız, hasır donatılı ve çelik lifli püskürtme beton uygulamalarının yük-deformasyon davranışlarını ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Büyük paneller üzerinde yapılan yük-deformasyon deneyleri göstermiştir ki, ilk çatlağa kadar olan küçük deformasyonlarda malzemeler arasında

herhangi bir fark bulunamamış bunun aksine büyük deformasyonlarda çelik lifli beton daha iyi performans (%100'e yaklaşan) göstermiştir. Bu sonuçların bulunmasından sonra blok düşmesi (Falling block test) adı verilen ve bir kaya bloğun düşmesine benzer koşullar sağlanarak yapılan deneylerle yeniden kıyaslama yapılmıştır. Bu deneylerde tünelin tepe kısmında, boşta kalan blok veya kayanın değişik yüklerine maruz kalan püskürtme beton kaplamasının durumuna benzer bir sistem tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen verilerle hazırlanan grafiklerde yine yüksek deformasyonlarda çelik lifli püskürtme betonun gayet iyi performans gösterdiği görülmüştür.

J. Holmgren, 1972 yılında BeFo (Swedish Rock Engineering Foundation) ve FortF (Swedish Fortification Administration) ile birlikte bu konuda araştırmalara başladı. Raporda belirtilen sonuçlar şunlardır:

- Çelik tel donatılı püskürtme beton kaplamalar, çelik hasır donatı kaplamaların sağladığı eğilme dayanımını ve mukavemeti sağlar. Testler 20-40 kg/m³ tel dozajına sahip kaplamaların, hasır donatılı olanlarla karşılaştırılabildiğini gösterdi.
- Soğuk çekme sert çelik hasır, kaya kaplamaları için uygun değildir. Yumuşak çelik kullanılmalıdır.
- Çelik tel donatılı püskürtme betonun kesme dayanımı, çelik hasıra oranla daha yüksektir.
- Bu sonuçlar, sonu kancalı, yüksek çekme kopma dayanımına sahip teller için geçerlidir. Tellerin matriksin kırılma anında kopmayıp betondan sıyrılmaları gerekir. Püskürtme betonun plastik davranışı, tellerin betondan sıyrılmaya özelliklerine bağlıdır.

Ann Lambrechts, kendisine 2011 senesinde Avrupa'da sanayi dalında yılın mucidi ödülü verildiği çalışmasında, çelik elemanı güçlendirilmiş beton yapılarda eğilme mukavemetini arttırarak yeni bir mimari olasılıklar dünyası açtı. İcadı sayesinde eğilme mukavemeti % 32 artarak, daha yenilikçi projelerin inşa edilmesini sağladı. Maliyet beklentilerinin dışında, çelik tel elemanın devrimci tasarımı betonun tüm dayanımını

arttırdı. Çelik tel, betona daha stabil yapı sağlayan ankrajı geliştiren yassı, çengel şekilli uçlar içermektedir. Ann Lambrechts'in çözümü öncekilerin aksine maliyet avantajına sahipti. Eski çözümler, betona eklenecek nervürlü çeliğin artışıyla maliyetleri önemli ölçüde yükseltiyordu. Sadece 55 mm uzunlukla, Lambrecht'in çelik tel elemanı ıslak harç ile etkileyici bir oranda 50 metreküpde 20 kg karıştırılabilmekteydi. Stabiliteden feragat etmeksizin daha az çelik lif gerekmektedir.

2.4. Çelik Lifli Betonların Performansını Belirleyen Etkenler

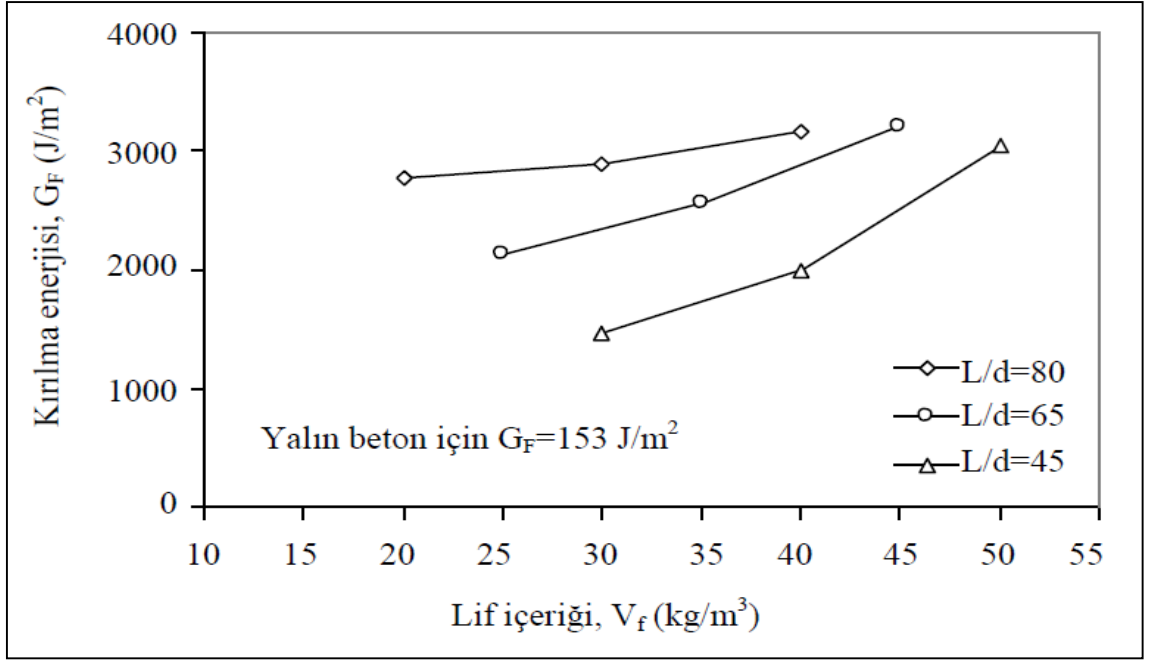
2.4.1. Lif miktarı ve narinlik oranı etkisi

İyi bir karışım için çelik lif miktarı beton hacmine oranla % 0,5 ile % 1,5 arasında olup, % 2 ve daha fazlasına çıkarmak mümkün olmakla birlikte, % 0,5 'in altına da düşülmemelidir. Yapılan araştırmalar optimum faydanın, hacimsel oranın % 1-2 olması halinde sağlandığı, çelik tel uzunluğunun ise metre küp başına minimum 10 km olması gerektiği yönündedir.

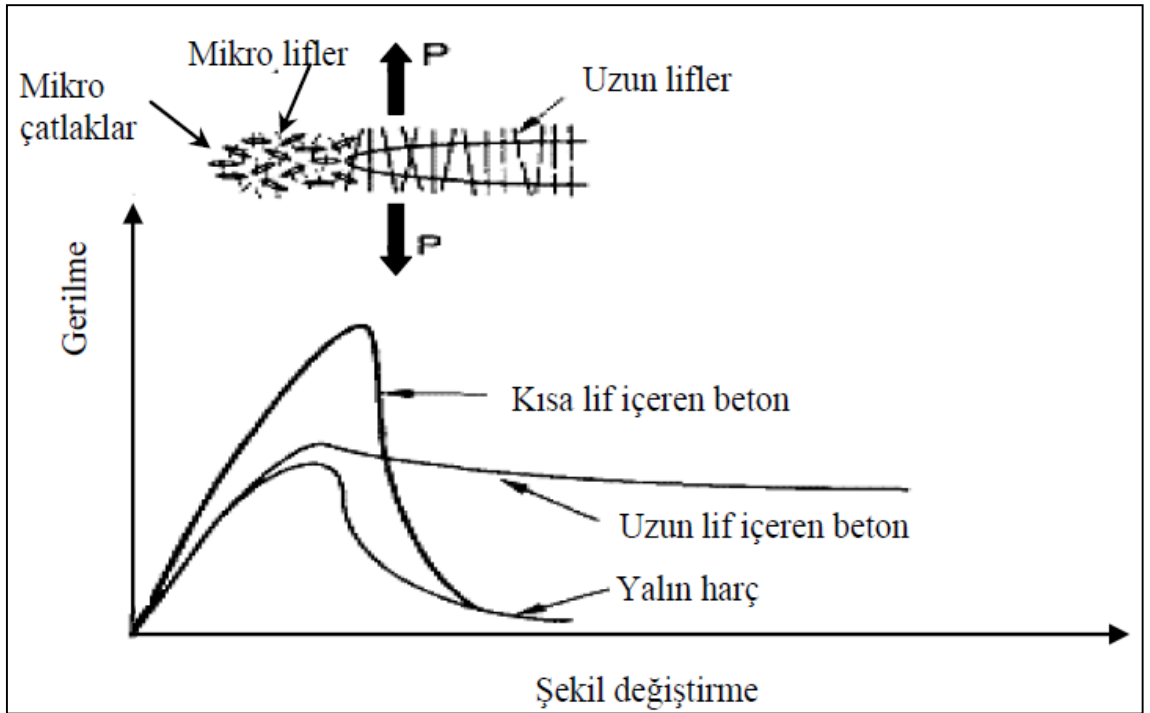
Çizelge 2.3. Farklı uzunluk/çap oranları ve çelik tel aralıklarına göre asgari çelik tel dozajları (Bekaert, 2014)

Uzunluk/Çap (L/D)	40	45	50	55	60	65	80
Minimum Dozaj (kg/m ³)	43	34	28	23	19	16	10

Çelik tel uzunluğunun tel çapına bölünmesine narinlik oranı (tel performansı) denir. Tel uzunluğu arttıkça veya tel çapı küçüldükçe tel performansı artar. Bunun nedeni ise, tel uzunluğunun artmasına bağlı olarak tellerin betondan sıyrılmasının zorlaşmasıdır. Bunun yanında tel çapının küçülmesine bağlı olarak performans artışı, metre küpteki tel adedinde kaynaklanan artış miktarından ötürüdür.



Şekil 2.1. Çelik tel donatılı betonlar için lif içeriği – kırılma enerjisi ilişkisi (DSİ, 1999)



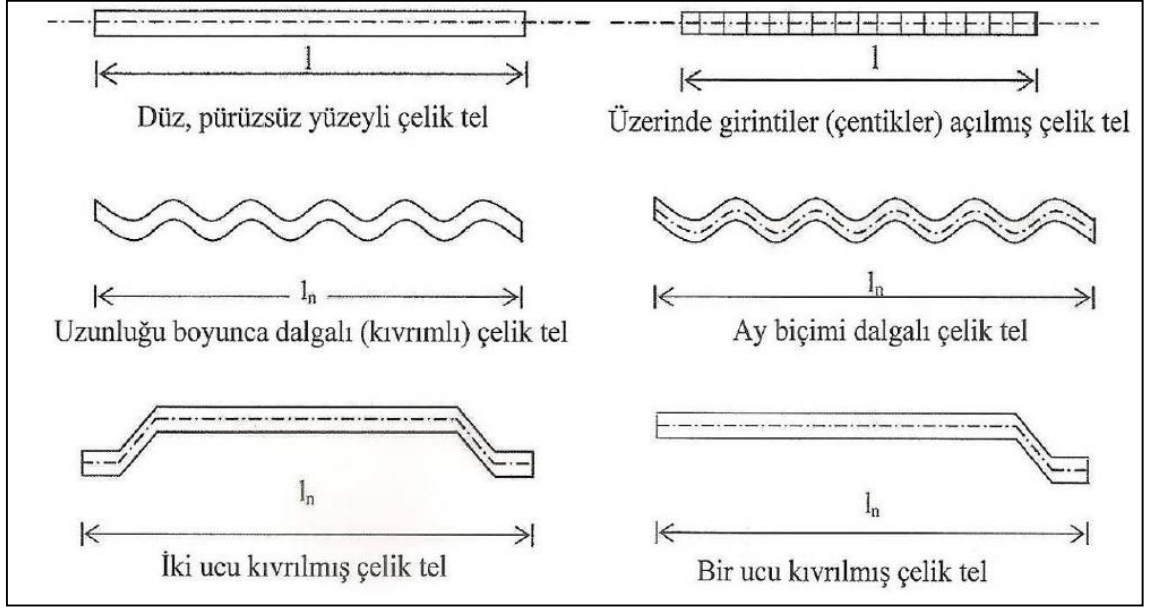
Şekil 2.2. Farklı lif uzunluklarının betondaki çatlaklara etkisi (Bekaert, 2014)

2.4.2. Lif tipi etkisi

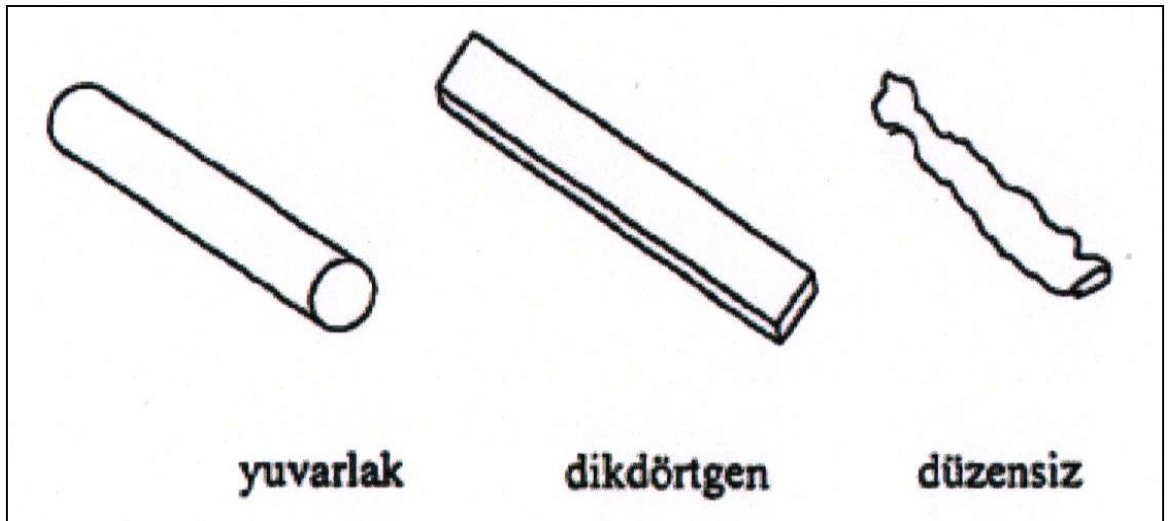
Çelik liflerin geometrik şekilleri, çekme gerilmeleri, çap ve uzunlukları arasında belli bir oran vardır. Kullanılan çelik liflerin çapları 0,13 ile 1,0 mm arasında olup

uzunluk/çap oranları 30 ile 150 arasında değişmektedir. Lif boyları ise 13 mm ‘den 70 mm ‘ye kadar değişmektedir (DSİ, 1999).

Lifler; düz, dalgalandırılmış (kıvrılmış) olabileceği gibi uçları bükülmüşde olabilir.

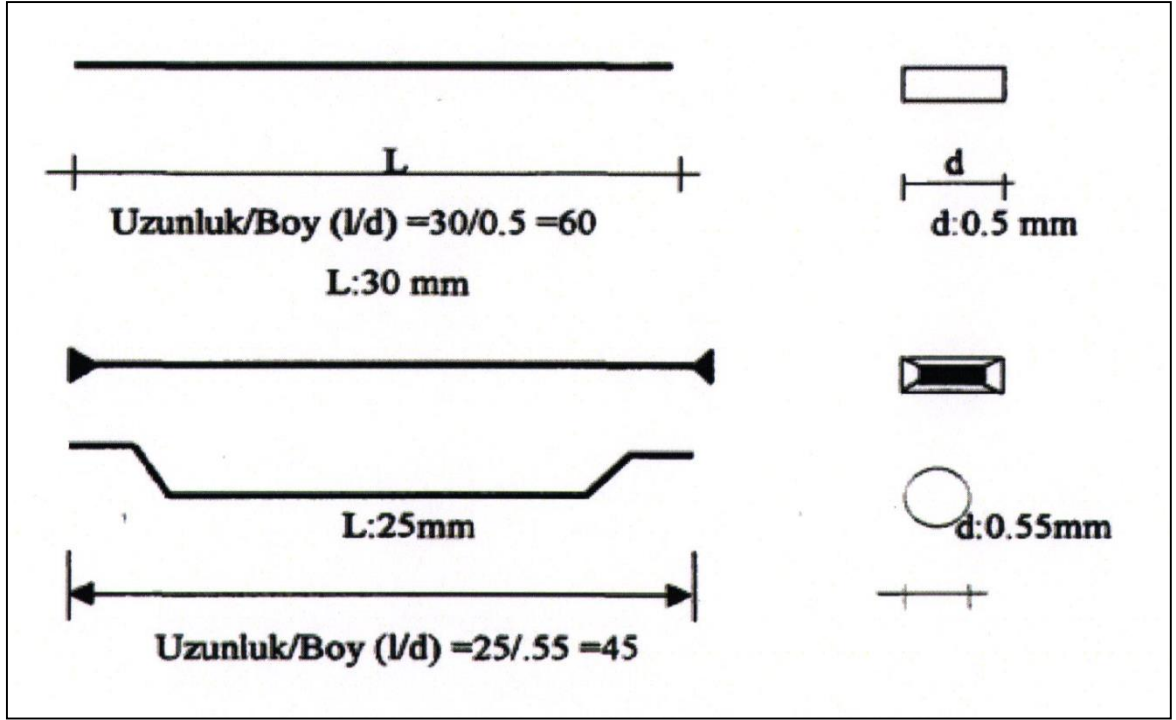


Şekil 2.3. Çelik lif tipleri, TS 10513, 1992 (DSİ, 1999)



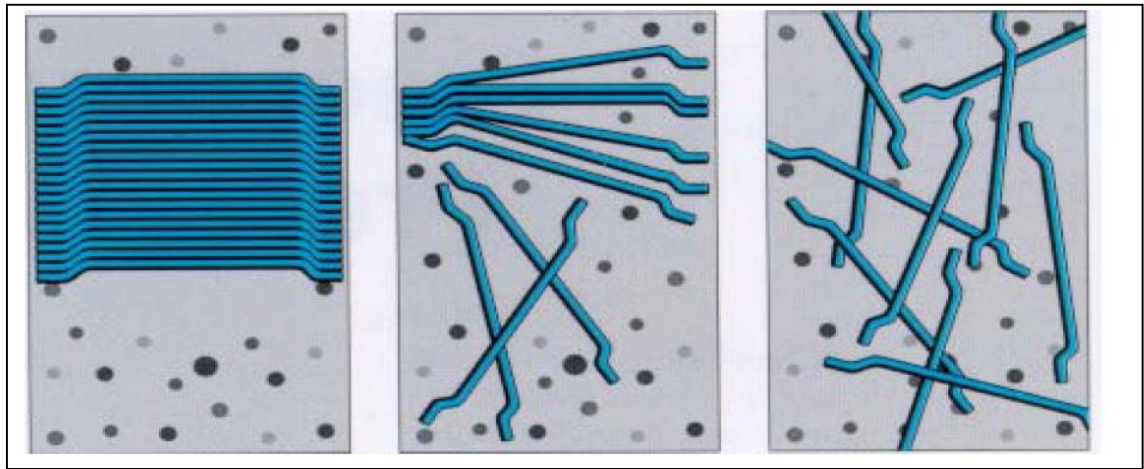
Şekil 2.4. Çelik lif kesitleri (DSİ, 1999)

Çelik liflerin beton içerisindeki performansı bu malzemelerin uzunluk/çap oranı, beton içerisindeki konsantrasyonu ve liflerin geometrik yapısı ile de yakından ilgili olduğu için piyasada değişik lifler bulunmaktadır.



Şekil 2.5. Değişik çelik liflerin enkesitleri (DSİ, 1999)

Tutkal ile birleştirilmiş tel demetlerinin de beton dayanımına etkisi yüksektir. Bu tutkallı demetler, beton içinde dağılarak kilitlenmeye ve toplanmaya imkan vermeden, yüksek dozajda kullanılmaya imkan tanır. Tel demetleri, hem kuru agregaya (kuru sistem) hemde ıslak hazır betona (ıslak sistem) ilave edilebilir. Karışım başladıktan sonra tel demetleri, karışımın içinde bulunan su ve agreganın sürtünme etkisiyle dağılmaya başlar ve beton karışımı içine homojen dağılırlar (Bekaert, 1991)



Şekil 2.6. Tutkalla birleştirilen tel demetleri, 15 sn. içinde dağılır (Bekaert, 2014)

Özellikle çekme ve kesme kuvvetlerine çalışan liflerin beton ile aderansı lifli betonun işlevini olumlu yada olumsuz yönde etkiler. Dalgalandırılmış ve uçları bükülmüş liflerin çekme kuvvetleri etkisi ile matristen ayrılması düz liflere göre daha zordur. Çelik liflerin yüksek çekme mukavemetleri sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Fakat bu liflerin yükün belli bir gerilme değerinden sonra matristen sıyrılması lifli betonun performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli öğedir. Bu olay harç fazının (matris) yapısı ile ilgili olmakla birlikte kullanılan liflerin geometrik yapısı ile de yakından ilgilidir (DSİ, 1999).

TS 10513/93'de lif özellikleri ile ilgili iki önemli parametre mevcut olup bunların birincisi her bir lifin çekme dayanımını 310 N/mm^2 den az olmayacağı zorunluluğudur. Diğeri ise $16 \text{ }^\circ\text{C}$ üzerindeki ortamda $3,18 \text{ mm}$ 'lik bir iç çap çevresinde eğilme etkisinde liflerin %90'ının kırılmaksızın 90° eğilme kabiliyeti gösterebilmesi şartıdır. Bu özellikler betonda kullanılan liflerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir mukavemet ile davranabilmesine olanak sağlar (Dramix, 1991).

Çelik lifli beton yüzeyinde, vibrasyonlu master kullanılmadığı zaman kırmızı lekelere sebep olurlar. Özel durumlarda, aşırı paslanmaya müsait ortamlarda, estetik görünüşün önemli olduğu yapılarda, (prekast) galvaniz teller tavsiye edilir. Isıya dayanımlı betonlarda ise, paslanmaz çelik teller kullanılır. Bu tellerin özellikleri kaplanmamış teller ile birdir.

2.4.3. Çelik lifli betonda matris etkisi

Lifli beton literatüründe matris diye tanımlanan yapı lifin etrafını saran ortam malzemesidir. Kısacası, çimento hamuru matris diye tanımlanır. Lifli beton kompozitlerin de matrisin fonksiyonu lifleri bir arada tutmak, onları sarmak ve liflerle veya liflerden gerilme transferini sağlamaktır (Uyan, 1985).

Lifli beton kompozitlerinin kalitesi kullanılan lifin olduğu kadar ortam malzemesi matrisin özellikleriyle de yakından ilgilidir. Özellikle kırılğan matris sünek lifli kompozitlerde gerilme-deformasyon davranışı lif ile matris arasındaki aderansın güçlü ya da zayıf olmasından oldukça etkilenir.

Lifli betonların üretiminde, şimdiye kadar yapılan çalışmaların çoğunda portland ya da katkılı portland çimentosu kullanılmıştır. Matrisin nitelikli olmasını sağlamak üzere lifli beton karışımlarının su/çimento oranları 0.55'den küçük olacak şekilde karışımlar hazırlanarak betonun çimento dozajı minimum 300 kg/m³ tutulmuştur. Yine bu amaçla yapılan çalışmalarda matrisi güçlendirmek amacı ile betonda silika kullanılmaktadır (Elmacı, 2005).

Matriste portland çimentoların kullanılmasına rağmen önemli bir sakıncada vardır. Bu da çimento hamurunun kırılma birim uzamanın çoğu liflerinkinden %0.2 – 0.006 mertebesinde düşük olması sonucu bir yükleme durumunda, elastik limitin çimento hamuru matrisin de çatlaklar oluşmasıdır. Diğer yandan, bilindiği üzere alkali bir ortamdır. Cam ve çelik lifler bu ortamdan kimyasal olarak etkilenip korozyona uğrayabilirler. Bunun sonucunda lifin malzeme içerisindeki etkisi oldukça azalabilir. Bu duruma karşı korozyona dayanıklı kaplanmış çelik lifler kullanılabileceği gibi çimento içerisine puzolanik malzemeler de katılabilir (Uğurlu, 1994).

Ünal (1994),“Lif geometrisi ve lif miktarından farklı olarak iri agreganın hacmi, biçimi ve boyutunun taze lifli beton karışımı üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Agreganın boyutu artarken lif boyutunu arttırmanın genellikle yararlı olacağı belirtilmiştir.” demiştir.

2.4.4. Mineral katkı etkisi

Beton içerisinde silis dumanı bazlı süper akışkanlaştırıcı içeren toz halde beton katkı malzemesi kullanımı; yoğunluk, dayanıklılık ve en önemlisi kıvamı arttırmak için kullanılır. Katkı; aktif silikon dioksit içermektedir. Bu, betonun sertleşme süresi boyunca beton içinde hidrate olmuş çimento tanelerinin oranını, işlenebilirlik süresini ve durabileteyi de arttırabilmektedir. Özellikle su, klor ve zararlı gaz geçirimsizliğini, donma-çözünme etkilerine karşı dayanıklılığı arttırmaktadır. Mineral katkıları etkisiyle; karbonasyon azalır, erken ve nihai mukavemetler artmaktadır. Mineral katkıları korozyon maddeleri içermemektedir. Mineral katkıları etkisiyle; karbonasyon azalır, erken ve nihai mukavemetler artmaktadır. Mineral katkıları korozyon maddeleri içermemektedir (Yıldırım, 2002).

2.5. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Teknik Özellikleri

Çelik lif donatılı betonları karakterize eden en önemli özellikleri, tokluk ve dinamik yüklere dayanımıdır. Başka bir deyişle, betonun enerji yutma kapasitesindeki artıştır. Basınç ve eğilme-çekme gerilmeleri çelik liflerle birlikte beton kalitesine, tokluk ise çelik liflerin performansına bağlıdır. Mikro çatlaklar arasında köprü görevini gördükleri ve gerilmeleri geniş bir alana transfer ettikleri için çelik lifler, kırılğan beton yapısını esnek ve dayanıklı hale getirmektedir. Sonuçta, gerilmelerin beton içindeki dağılımı değişmekte, yük taşıma kapasitesi belirgin bir şekilde artmaktadır. Tutkallı çelik lifler kolayca betona katılmakta ve homojen dağılmaktadır (Yerlikaya, 2003).

Çizelge 2.4. Lifli betonun mekanik özelliklerindeki yaklaşık artışlar (DSİ, 1999)

Mekanik Özellikler	Artış (%)
Tokluk (Toughness)	100-1200
Darbe Dayanımı (Impact resistance)	100-1200
İlk çatlak dayanımı (First crack resistance)	25-100
Çekme dayanımı (Tensile strength)	25-100
Nihai eğilme dayanımı (Ultimate flexural strength)	50-100
Yorulma dayanımı (fatigue endurance)	50-100
Deformasyon kapasitesi (Strain capacity)	50-100
Basınç dayanımı (Compressive strength)	±25
Kavitasyon-Erozyon dayanımı (Cavitation-Erosion resistance)	300
Elastisite modülü (Modulus of elasticity)	±25

Yukarıda sıralanan bu değerlerin niceliği üzerinde, lifsiz betonda olduğu gibi agrega cinsi ve tane dağılımı, çimento cinsi ve miktarı, su/çimento oranı gibi faktörlerde oldukça etkilidir. Bunların yanısıra kullanılan çelik liflerin şekli, teknik özellikleri, beton içerisindeki miktarı ve yönelimleri ile numune hazırlanması ve boyutları da deney sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

2.6. Taze Beton Özellikleri

Beton içerisine çelik liflerin katılması sonucu taze beton özelliklerinde bazı değişiklikler gözlenir. Çelik liflerle güçlendirilmiş karışımların taze beton özelliklerini doğru tespit edebilmek için bu karışımların taze beton özelliklerinin de sağlıklı yöntemlerle tespit edilmesi gerekir. Bu nedenle normal betonlarda taze beton özelliklerini tespit etmede kullanılan bazı yöntemlerin lifli betonlar için yeniden gözden geçirilerek bulunacak deneysel sonuçlara göre izlenilmesi gerekli yöntemler ortaya çıkarılmalıdır (DSİ, 1999).

Betonda işlenebilirlik olarak ifade edilen ve taze beton özelliği denince akla ilk gelen bu kavram betonun taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve homojenitesi ile yakından ilgilidir. Şimdiye kadar yapılmış tüm çalışmalarda betona lif ilave edilmesiyle işlenebilirlikte önemli derecede azalmalar tespit edilmiştir. Bu azalma üzerindeki en önemli iki parametre, karışımdaki lif hacmi ve lif görünüm oranı diye tanımlanan lifin uzunluk/çap oranıdır. Bu önemli parametrelerin dışında liflerin betona katılması, karıştırma teknikleri ve lifli betonun karışım tasarımları da lifli taze betonun özelliklerini önemli ölçüde değiştirir (DSİ, 1999).

Lifsiz betonlarda işlenebilirliği ölçmek için pratik olması nedeniyle çok kullanılan slump (çökme) deneyi çelik liflerle güçlendirilmiş beton karışımlarında pek kullanılmaz. Slump yöntemi ile yapılan işlenebilirlik deneylerinde lifli betonun işlenebilirliği sağlıklı olarak tespit edilememiştir. Bununla birlikte görece olarak slump yöntemi kullanılsa da işlenebilirliğin ölçüsü olarak değerlendirilmemeli yada dikkatle değerlendirilmelidir (ACI 544, 1978).

İşlenebilirliği ölçmek için lifsiz betonlarda uygulanan slump deneyi lifli betonlar için uygun değildir. Göreceli olarak kullanılsa da dikkate alınmamalıdır. Lifli betonlar için en uygun işlenebilirlik deneyi Ve-Be deneyidir. Ancak şantiye koşullarında zor bir yöntemdir. Daha çok laboratuvarlarda kullanılır (DSİ, 1999).

Gerek şantiyelerde gerekse de laboratuvarlarda çelik liflerle güçlendirilmiş betonların işlenebilirliğini ölçmek için kolayca kullanılabilen ve sonuçları açısından sağlıklı veriler

ortaya koyan ASTM C 995' de tanımlanan ters çevrilmiş koni deneyidir. Bu deneyde dahili vibratör hareketi ile ters koniden, koni ağzı açıklığı boyunca betonun akması için geçen süre ölçülür. Bu yöntem özellikle çelik lifli betonların işlenebilirliğini ölçmek için geliştirilmiştir. Bu deney yöntemi süper akışkanlaştırıcılar ile yüksek oranda akışkanlaştırılmış betonlar için uygun değildir, çünkü bu yöntemde beton vibrasyon ile akma eğilimindedir (ACI 544, 1978).

2.7. Sertleşmiş Beton Özellikleri

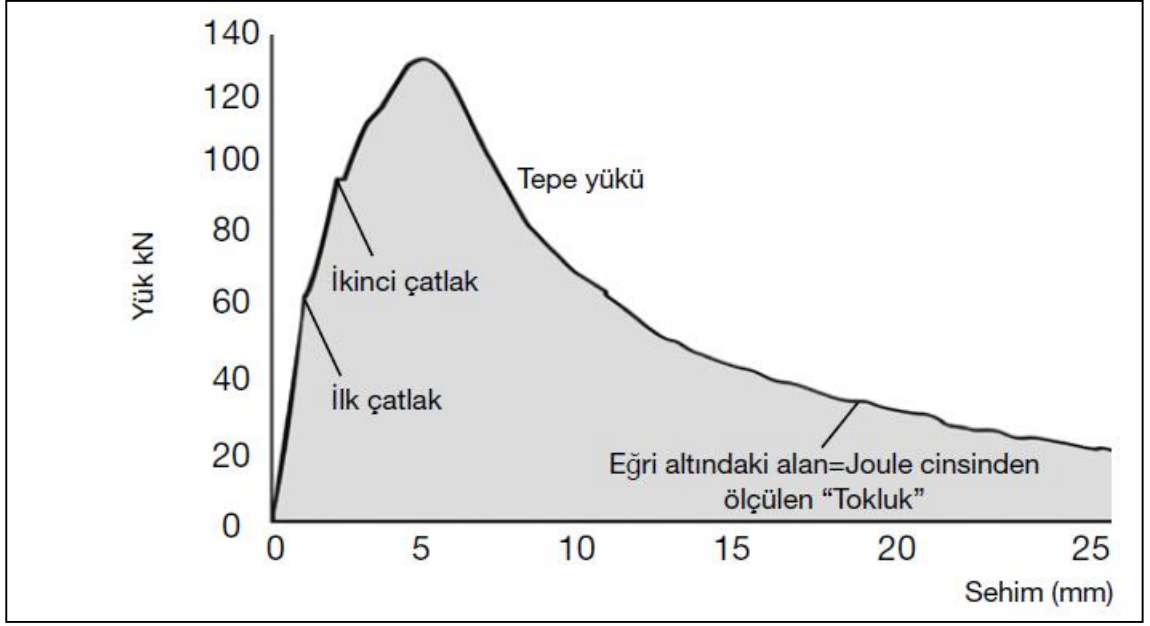
Çelik lif donatılı betonları karakterize eden en önemli özellikleri, tokluk ve dinamik yüklere dayanımıdır. Başka bir deyişle, betonun enerji yutma kapasitesindeki büyük artıştır. Basınç ve eğilme-çekme gerilmeleri çelik liflerin rolünden ziyade beton kalitesine, tokluk ise çelik liflerin performansına bağlıdır (Yerlikaya, 2006).

2.7.1 Enerji emme kapasitesi (tokluk-toughness)

Betonun eğilme yükleri altında enerji absorblaması olarak tanımlanan bu kavram ilk olarak Amerikan Beton Enstitüsünde (ACI) Henager tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonra Johnston tarafından ASTM C 1018'de standart haline getirilmiştir.

Japon standartı olarak JCI SF4 ve JSCE SF4 ve Türk standartı olarak da TS 10515/Aralık 1992'de tanımlanan bu özellik gerek statik ve gerekse de dinamik yüklemelerde betonun eğilme kuvvetleri altındaki deformasyonu sırasında yapılan işi arttırarak betona aynı gerilme ölçeğinde daha yüksek deformasyon yapabilme yeteneği kazandırır.

Tokluk veya enerji yutma kapasitesi yük-sehim eğrisinin altında kalan alan olup, yapı elemanlarının enerji yutma özelliklerinin ölçüsünü ve tepe noktası sonrası davranışını göstermekte kullanılır. Tokluk, genelde çentiksiz numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyinden elde edilmektedir.



Şekil 2.7. Çelik tel donatılı püskürtme beton panelinin tipik eğilme eğrisi (Bekaert)

Barr ve Norr (1983), su/çimento oranını (0.46) sabit tutarak lif miktarının (hacimce %0.03, 0.15, 0.3, 0.6 ve 0.9) çelik lifli betonların tokluk indeksi (betonun enerji emme kapasitesi) üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada betonun yük-deformasyon eğrisi altındaki alandan hesap edilen tokluğun çelik lifli betonların en önemli özelliklerinden birisi olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan deneylerde lif miktarının artmasıyla tokluğun arttığı belirlenmiştir. Nitekim lif miktarının hacimce %0.03'den %0.9'a çıkması tokluğu (betonun enerji emme kapasitesini) %100 oranında arttırdığı görülmüştür (Aslan ve Aydın, 1999).

2.7.2. Eğilmelerde çekme dayanımı (flexural strenght)

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarla ilgili standartlarda Raptüre Modülü olarak tanımlanan bu özellik betonun yük-deformasyon eğrisi çizilirken maksimum yükte meydana gelen gerilmenin bulunması ile belirlenir.

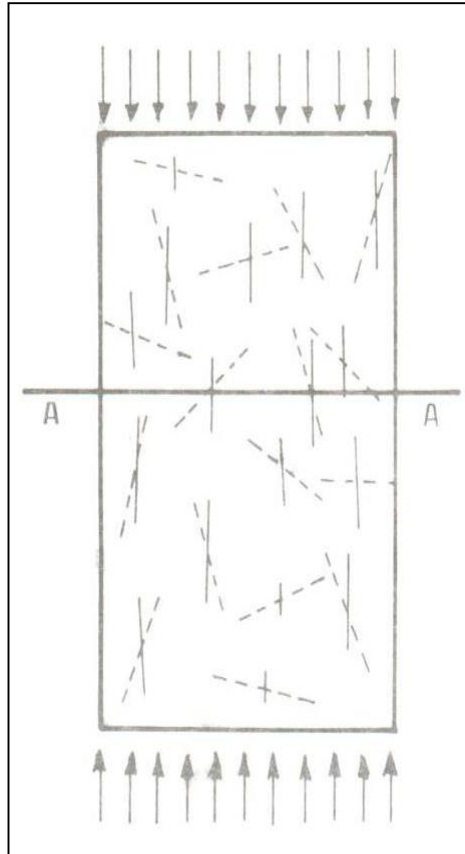
Çelik lifli betonların nihai dayanımları normal betonlara %50-100 arasında artış göstermektedir. Çimento hamuru matrisinin kırılmasından (ilk çatlaktan) sonra liflerin çatlak sonlarından da gerilme transferi ve dağılımı yapması nedeniyle yük, ilk çatlaktan

sonra bir miktar daha artar. Bu durumda maksimum gerilme yükü lifsiz betonlara göre daha fazla olmaktadır.

DSİ (1999), konuyla ilgili olarak “Eğilme dayanımı da liflerle güçlendirilmiş betonların diğer özellikleri gibi lif hacmine, lif geometrisine, narinlik oranına deney numunesi (kiriş) yüksekliğine ve liflerin beton içerisindeki dağılımına bağlıdır.” demiştir.

2.7.3. Basınç dayanımı

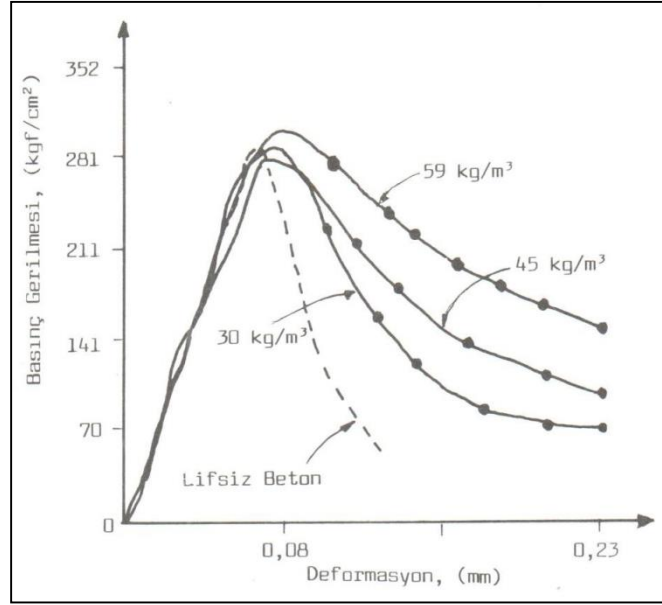
Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar üzerinde yapılmış değişik araştırma sonuçlarına göre, lifler betonun basınç dayanımını her zaman doğrudan olumlu etkilememekte, %25 seviyesinde basınç dayanımı artışı görülebileceği gibi bazen de bu düzeyde bir dayanım kaybı ortaya çıkmaktadır (ACI 544, 1978).



Şekil 2.8. Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi

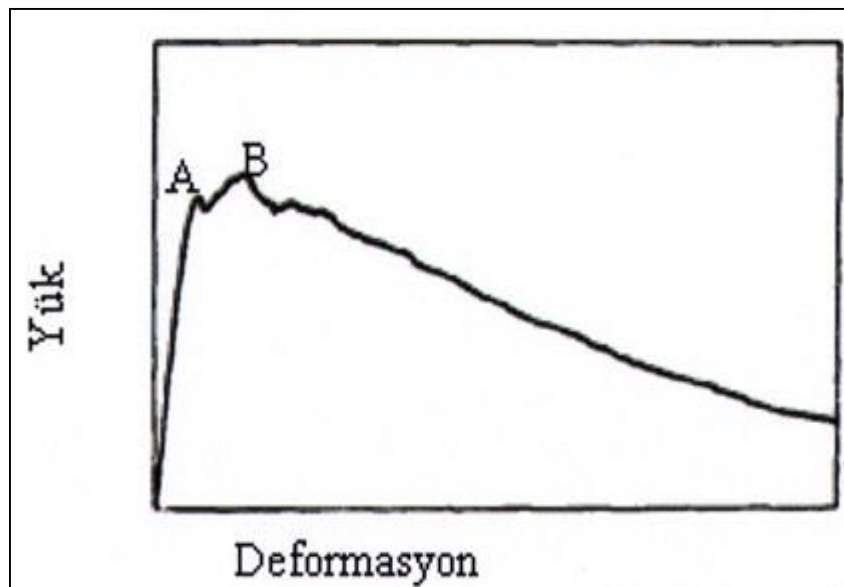
Beton içerisinde yükleme düzlemine dik olan lifler, betonun basınç gerilmesinde herhangi bir işlev yüklenmezler. Buna karşın şekil 2.8 'de kesik çizgilerle görülen ve

yüklemeye düzlemine paralel olan lifler, paralellikleri ölçüsünde basınç gerilmesi artmasına duyarlıdır.



Şekil 2.9. Basınç gerilmesi altında lif hacmi ile değişen deformasyon davranışı

Çelik lifli beton, basınç diktülitesi gösterir. Yani beton taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Ayrıca yapılan çalışmalar çelik lifli betonun kesme, burulma ve yorulmaya karşı mukavemeti fazla, çatlamlar, dökülme, parçalanma ve dağılmalar az olduğunu göstermişlerdir (Aslan ve Aydın 1999).



Şekil 2.10. Çelik tel donatılı betonların yük-deformasyon ilişkisi

Lifli beton numuneler eğilmeye maruz kaldıkları zaman, yükleme – deformasyon eğrisinde genellikle 2 davranış safhası görülür. Yükleme – deformasyon eğrisi A noktasına kadar az ya da çok lineer olarak düşünülebilir. A noktasından sonra, eğri artık lineer değildir. Ve eğri B noktasında maksimum bir değere ulaşır. A noktasına tekabül eden yük miktarı “ilk çatlama direnci”, “elastik sınır” ya da “oranlı sınırı” olarak adlandırılır. B noktasına tekabül eden yük kopma mukavemeti (dayanım sınırı) olarak adlandırılır. Şekil 8.’de görülen yükleme deformasyon eğrisinden önemli derecede farklı şekillerde eğrilerde meydana gelir. Liflerin dağılımına, uzunluğuna ve miktarına bağlı olarak betonun sergileyeceği dayanım, duktilite, deformasyon ve ilk çatlak dayanımı etkileyecektir. İdeal bir karışım için lif miktarı, lif geometrisi ve liflerin dağılımı lifli betonlar için önemlidir. Fakat dayanım, durabilite ve işlenebilirlik (su/çim oranı, hava içeriği, yoğunluğu vb.) için önemli olan değişkenler lifli betonun özelliklerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Bağlayıcıya (çimento vb.) etki eden değişkenler lifli betonların dayanım özelliklerini etkiler (ACI Comitte 544, 1982).

2.7.4. Yorulma dayanımı

Malzemeyi normal olarak kırmaya yetmeyen (elastiki limitin altındaki) gerilmelerin arka arkaya tekrarlı bir şekilde çok kere uygulanması sonucu meydana gelen ve sonunda malzemenin ani ve gevrek kırılmasına yol açan yorulma olayı da dinamik yüklemelerdeki kırılmanın bir başka örneğidir. Çelik lifli betonlar üzerinde yapılmış çalışmalarda yorulma dayanımının lifsiz betonlara göre %50 ile %100 arasında arttığı gözlenmiştir (Rice, 1975).

Lifsiz betonlarda yorulma mukavemeti limiti, genel olarak statik eğilme gerilmelerinin %50’sidir. Çelik lifli betonlarda beton içerisine ortalama 30-40 kg/m³ lif katılması sonucu bu limit % 80’ lere çıkartılmıştır. Çelik lifli betonlarda çatlak yayılmasının durdurulması ve oluşan çatlakların ilerlememesi gibi özellikler nedeni ile tekrarlı yükler altında kırılma engellenir veya en azından kırılma süreci geciktirilir (DSİ, 1999).

2.7.5. Darbe dayanımı

Betonun ani olarak dinamik bir kuvvetle yüklenmesi anlamına gelen darbe dayanımı çelik lifler ile güçlendirilmiş beton özellikleri içerisinde önemli derecede (%100-%1200 arasında) performans artışının kaydedildiği bir özelliktir. Darbe dayanımı betonun tokluğu (enerji tutma kapasitesi) ve kırılma işi ile yakından ilgilidir. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda beton içerisindeki çelik lifler matris üzerine gelen dinamik yükleri kendi üzerlerine alarak matrisin çarpma mukavemetinden daha yüksek bir çarpma mukavemeti getirirler.

ACI, çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar için değişik darbe dayanımı deneyleri tanımlamışsa da bunlardan sadece iki tanesini önermektedir. Birincisi bir çelik bilyanın defalarca düşürülmesi esasına dayanan Drop-weight (Ağırlık Düşürme) deneyi olup diğeri ise bir aletin çarpması yardımı ile malzemenin darbe dayanımı deneyleridir.

Drop-weight deneyi pratikte daha çok kullanılır. Bu deneyde, ilk çatlak anındaki darbe sayısı ve malzemenin kırılma anındaki darbe sayısı lifsiz betona göre yorumlanarak değerlendirilir. Ortalama bir lif dozajında (yaklaşık 30 kg/m³) çelik lifli betonun darbe direnci 10-20 kat lifsiz betondan daha yüksektir (Bekaert, 2011).

2.7.6. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda rötre

Hacimsel büzülme anlamına gelen rötre betonda sıkça görülen bir hareket olup dört ana başlık ile kategorize edilir;

- Termik rötre
- Plastik rötre (Bünyesel - Erken rötre)
- Kuruma rötresi (Hidrolik rötre - şişme)
- Karbonatlaşma rötresi

Bu dört farklı rötre oluşumunun mekanizmasında da betonun değişik nedenler ile meydana gelen çekme dayanımlarının karşılanamaması ve bu nedenle meydana gelen çatlakların artarak ve büyüyerek çoğalması gerçeği yatar. Bu nedenle priz süreci ve daha sonraki dönemlerde ortaya çıkan çekme gerilmelerini beton matristen alabilecek

ve gerilmeyi çatlak olmayan bölgelere de iletip dağıtacak lif gibi elemanlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle betonun serbest büzülme yapmasının engellendiği döşemelerde, yol kaplamalarında, havaalanlarında, farklı büzülme davranışlarının gerçekleştiği kütle betonlarında ve ani buharlaşmanın olduğu açık alan betonlarında (kanal, yol vs.) beton içerisinde değişik lifler kullanılmaktadır. Günümüzdeki uygulamaların bir çoğunda, özellikle çok güçlü olmayan büzülmelere karşı polipropilen lifler tercih edilmektedir. Bununla birlikte kritik yapılarda ve güçlü büzülmelerin olabileceği yerlerde ise çelik liflerin kullanılması önerilmektedir (DSİ, 1999).

Grzybowski ve Shah (1990), “Yapılan deneylerde çelik lifli betonlarda görülen çatlak genişliklerinin aynı özellikte polipropilen lif kullanılan betonlardaki rötre çatlaklarından daha az açıklıklı olduğu tespit edilmiştir.” demiştir.

2.7.7. Dayanıklılık

Özel olarak tek başına ifade edilebilecek bir lifli beton dayanıklılık problemi olmasa da özellikle su yapılarında paslanabilir çelik lif kullanılması bazı sorunlar yaratabilir. Bu tip yapılarda paslanmaz yada kaplanmış çelik liflerin kullanılması ile korozyon problemi ortadan kaldırılabilir (DSİ, 1999).

Lifli beton kompozitlerinde görülen ve betonda boşluk oluşmasına yol açan bir problem vardır ki o da demet halinde bulunan liflerin karışım sırasında tek tek tanelere ayrılmadan, beton yapısında kalması sonucu beton içerisinde boşluklu bir yapının kalması olasılığıdır. Bu şekilde ortaya çıkmış betonlar sıvı ve gazların beton içerisine nüfus etmesine oldukça müsaittirler.

DSİ (1999), konuyla ilgili olarak “Polipropilen lifli betonlarda görülen ve matrisin alkalitesi nedeni ile liflerin korozyonuna neden olan durum çelik lifler için söz konusu değildir.” demiştir.

2.8. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Tasarımı, Üretimi, Taşınması, Yerleştirilmesi ve Bakımı

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun davranış ve özelliklerinin gerçekleşebilmesi için çelik lifli betonun planlanmasından başlayıp bakımı ile son bulan üretim süreçlerinin doğru tasarımı ve yaşanması gereklidir. Bu olgu lifsiz betonlar için de geçerli olsa da lifli betonlar için daha karmaşıktır. Bu durum başlangıçta karmaşık gibi görünse de tasarım ve üretim sırasında uyulması gerekli zorunluluklar yerine getirildiği zaman herhangi bir sorun ortaya çıkmamaktadır (DSİ, 1999).

2.8.1. Tasarımı

Lifli beton üretilmeden önce betonun nerede kullanılacağı, yapının esası, yapıda hangi etkiler altında kalacağı ve bu betondan beklenen özellikler açıkça belirlenmelidir. Daha sonra bu mevcut ve beklenen koşulların sağlanmasında en yüksek performansa yönelik uygun malzeme (lif tipi ve boyutları, çimento çeşidi ve dozajı, agrega vb.) seçilmelidir. Ayrıca uygun bir tasarım, tasarımı yapan kişinin hem lifli betonu hemde onun kullanılacağı yapıyı ve yapıya gelen yükleri iyi tanıyıp doğru değerlendirmesine dayanır. Yani yapıya gelecek olan statik, dinamik veya başka bir deyişle tokluk, çekme ve kesme gerilmelerinin hesaplanmasına dayanır (Dramix, 1991).

2.8.1.1. Karışım esasları

Karışım işlemleri, lifli beton uygulamalarının başarılı olabilmesi için, yani betona lif katılması sonucu elde edilen teorik performansın yakalanabilmesi için dikkat edilmesi gerekli olan en önemli süreçtir. Lifsiz beton üretiminde uyulması gerekli zorunluluklar çelik lifli beton üretimi için de geçerlidir. Yani, kaliteli agrega, düşük su/çimento oranı, optimum çimento dozajı, yüksek kompasite ve iyi sıkıştırma gibi.

Lifli kompozitlerin yapımında, kompozit üretimi tasarımı yapılırken lifin gerilme altında beklenen şekilde davranabilmesi için onu çevreleyen matris özelliklerinin uygun olması gereklidir. matrisin liften life gerilme aktarabilmesi için öncelikle rijit, boşluksuz, kesif ve mukavim olması gereklidir. liflerle donatılı kompozitlerde

mukavemet üzerinde lif-matris aderansı ve matrisin boşluklu yapısının birincil bir etkisi vardır (Ersoy, 1985). Lifli betonlarda lifin davranışını etkileyen önemli parametrelerden biri olan matris özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile bir dizi sınırlamalar getirilmiştir:

- Su/çimento oranı 0,40 ile 0,55 arasında olmalıdır.
- Çimento miktarı minimum 320 kg/m³ olmalıdır.
- Beton içerisinde kum miktarı toplam agrega kütlelerinin en az % 45-55'i olmalıdır.
- Karışımlarda doğal kum tercih edilmelidir.

Çizelge 2.5. Değişen agrega maksimum tane çapına göre betonda kullanılması gerekli lif miktarı, kg/m³ (TS 10514, 1992)

Agrega Maksimum Tane Çapı (mm)	KULLANILACAK LİF MİKTARI, kg/m ³					
	Uzunluk/Çap = 60		Uzunluk/Çap = 75		Uzunluk/Çap = 100	
	Normal Beton	Pompa Betonu	Normal Beton	Pompa Betonu	Normal Beton	Pompa Betonu
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 2.5.'de görüldüğü gibi maksimum tane çapının ve uzunluk/çap oranının büyümesi ile gereksinim duyulan lif miktarı orantılı olarak azalmaktadır. Aynı şekilde pompa betonlarında kullanılan lif miktarı da normal, lifli betona göre miktar olarak daha azdır. Liflerin uzunluk/çap oranının 80 ile 100 arasında olması betonun performansı açısından gerekli bir ölçüdür. Bu oran püskürtme beton uygulamaları hariç hiçbir zaman 60'ın altına düşürülmemelidir.

2.8.1.2. Karışım sırasında dikkat edilecek hususlar

Çelik lifli taze beton karışımlarının hazırlığı sırasında karışımların homojen olması için ya da işi kolaylaştırmak için bir takım kurallar getirilmiştir. TS 10514/1992 tarafından belirtilen bu kurallar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

Genel Kurallar:

- Homojen bir beton karışımı elde etmek için temel ilkelere (TS 1247, TS 1248) dikkat edilmelidir.
- Kritik çelik tel miktarı aşılmamalıdır.
- Çelik tel teçhizatlı betonun karışımını kolaylaştırmak ve gerekli olduğunda tel miktarını arttırmayı sağlamak amacıyla ince agrega kullanılmalıdır.
- Taze betonda; homojen tel dağılımı gözle kontrol edilmeli birbirlerine yapışık teller halinde betona karıştırılan tel demetler veya teller beton içinde tamamen dağılıp ayrılincaya kadar beton karışımı devam etmeli ve üniform dağılım göz ile fark edilmelidir.
- Tel takviyeli beton döküm yerine kamyon ve transmiksler ile nakledilebilir. Transmikser kullanıldığında mikser düşük hızda döndürülmelidir.

Beton santralinde karıştırma

- Kum, çakıl ve çelik teller bir konveyör band aracılığıyla karıştırma kazanına verilebildiği gibi, beton santralının tartı kovaasına da konabilir. Her iki durumda da çelik teller kum ve çakılın üzerine dökülmelidir.
- Karışıma çimento, su ve gerekli ise uçucu kül ilave edilmelidir.

- Bütün teller ayrılıp dağılıncaya kadar karıştırılmalıdır. Gerekli süre mikser tipine bağlı olup bu süre 1-2 dakika arasında olmalıdır.
- Karıştırma kazanı içinde hazırlanan betona teller en son olarak da ilave edilebilir. Bu durumda karıştırmaya teller homojen dağılıncaya kadar devam etmelidir.



Fotoğraf 2.2. Beton santralinde liflerin karıştırılması yöntemi

Transmikserde bütün malzemelerin karıştırılması

- Agrega ve teller transmiksere konarak karıştırılmalıdır.
- Çimento ve su ilave edilmelidir.
- 2-4 dakika sonra karışım kontrol edilmeli ve homojen karışım gözle fark edilebilmelidir.

Transmikserde bulunan hazır betona tellerin ilave edilmesi

Diğer karıştırma kuralları mümkün olmadığı zaman uygulanmalıdır.

- Transmiksere konan beton mikser kapasitesinin %80'ini aşmamalıdır.
- Yüksek su/çimento oranından kaçınmak için akışkanlık verici katkı maddeleri kullanılmalıdır.
- Teller miksere 20-30 kg/dk hız ile konmalı ve bu esnada mikser tamburu en yüksek hız ile çevrilmelidir.

- Karıştırma zamanı mikser tipine bağlıdır. Bütün teller betona karıştırıldıktan sonra mikser kısa müddet durdurulmalı ve tel dağılımı göz ile kontrol edilmelidir. Homojen dağılım elde edilemezse transmikserin bu karışım sistemi için uygun olmadığına karar verilmelidir.



Fotoğraf 2.3. Transmikserde bulunan hazır betona çelik tellerin ilave edilmesi

2.8.2. Taşıma

Çelik lifli betonun taşınması iyi tasarlanmış ve yeterince temiz durumda bulunan geleneksel beton ekipmanları ile yapılmalıdır. Beton taşınırken transmikser haznesi tam doldurulmamalıdır. Özellikle karışım transmikserde hazırlanacaksa kapasitenin %85'i kullanılmalıdır. Tambur içerisindeki kanatlar liflerin topaklaşmasını kolaylaştıracak şekilde kirli ve deforme olmuş durumda olmamalıdır.

Lifli betonları karıştırmak için gerekli enerji lifsiz betonlara göre daha fazladır. Transmikserler ve pan mikserler bu ilave gücü kaldırabilecek niteliktedir. Düşük slump'lı betonların mikserden kolayca akmasını sağlamak için de gerekli önlemler

alınmalıdır (Örneğin transmikseri bir yamaca parketmek veya panmikser haznesinin dışına bir vibratör bağlamak).

Lifli beton pompa ile nakil ediliyorsa; kapasitesi yüksek bir pompa, geniş çaplı boru (yaklaşık 155 mm), bükülebilir ve kıvrılabilir bir hortum kullanılmalı, aletin giriş ağzına lif demetlerinin hortuma girmesini önleyecek şekilde 50-75 mm açıklık bir elek konulmalıdır. Çok yüksek slump'lı betonlarda, betonun ince kısmının akması ile tanelerin ve liflerin hortumu tıkamasından kaçınılmalıdır.

2.8.3. Yerleştirme ve tesviye işlemi

Lifli betonun yerleştirilmesi normal ekipmanlarla yapılabilir. Ancak işçilikte incelikler gereklidir. Çelik lifli beton yerleştirilirken harici vibrasyon ile sıkıştırma tercih edilmelidir. Çubuk şeklindeki daldırma tipi vibratörlerin kullanılması durumunda, sıkıştırma esnasında lifler dönerek belli yerlerde lif yığılmasına neden olurlar. Homojen olması gereken yapıyı bozarlar. Laboratuarlardaki araştırma çalışmalarında numune hazırlanırken harici vibrasyon kullanılmalıdır.

Genellikle yüzey tesviyesinde liflerden kaynaklanan bir sorunla karşılaşılmaz. Açık döşeme yüzeyleri düzeltilirken, vibrasyonlu masterlar kullanılmalı veya perdah makinesi ile tesviye edilmelidir. Kullanılacak perdah makineleri, tercihen metal ve kanat uçları yuvarlatılmış olmalıdır. Yüzey yırtıkları ve boşlukları tahta malalarla kapatılabilir. Ancak yüzeyde açıkta lifler varsa bu lifler yüzeyin pürüzlenmesine sebep olabilir.

Tesviye işlemleri sırasında yüzeyde fazla çalışılmamalıdır. Normal betonlara göre çimento harcı bakımından fazla olan lifli betonun aşırı masterlama yüzeyi hassaslaştırarak çatlamalara neden olabilir. Terleme sonucu beton yüzeyinde su ve ince şerbet birikirse, bu masterla ya da vakum yolu ile yüzeyden uzaklaştırılmalıdır. Mükemmel bir yüzey isteniyorsa düzgün yüzey elde etmede lifleri gömmede daha başarılı olan magnezyum kanatlı perdah makineleri kullanılmalıdır. Geniş perdah makinelerinin kullanımı zor olmakla birlikte cilalı yüzey elde etmede daha işlevseldir (Yiğiter, 2002).

2.8.4. Kür

Standart kür:

Betona çelik lif ilavesinin çimentonun hidrasyon reaksiyonlarına hiçbir etkisinin olmadığı göz önünde bulundurulursa, çelik lifli beton lifsiz betonlar gibi kür edebilir.

Hızlandırılmış kür:

Genel olarak inşaat sanayinde betonun dayanımını erken kazanması ve daha kısa sürede servise sunulması amacıyla çeşitli yöntemler uygulanmaktadır.

- Priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı katkıları kullanmak,
- Kristal çekirdekleri kullanmak,
- Yüksek basınç altında sıcaklık arttırmak,
- Isıl işlem uygulamak.

Bu yöntemlerin uygulanması ile sağlanacak olan avantajlarda şöyle sıralanabilir:

- Soğuk havalarda beton üretimi yapabilmek,
- Üretim artışını hızlandırmak,
- Yapılarda kalıp alma süresinin kısaltmak,
- Üretilen yapı elemanlarının stoklama sürelerini kısaltarak, depolama alanlarını küçültmek,
- Üretilen elemanların kalite kontrolünün daha kısa sürede yapılmasını sağlamaktır.

Isıl işlemler, çeşitli teknolojilerden yararlanarak betonu ısıtmak suretiyle, betonun daha kısa sürede mukavemet kazanmasını ve hizmete sunulmasını amaçlayan yöntemler olarak tanımlanabilir. Isıl işlem yöntemi, uygulama şekline göre:

- Betonun yerleştirilmesinden önce ısıtılması,
- Betonun yerleştirilmesinden sonra elemanın ısıtılması olarak iki grupta sınıflandırılabilir.

Diğer taraftan betona ısıtım işlem uygulanması, fiziksel prensiplere bağılı olarak řu şekilde sınıflandırılabilir.

1. Isıtım transferi ile ısıtım uygulaması
 - Doygun buhar ile ısıtım transferi
 - Sıcak hava ile ısıtım transferi
2. Kondüksiyon yolu ile ısıtım transferi
3. Işıma yolu ile ısıtım transferi (Ünal, 1994).

2.9. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Genellikle yapısal uygulamalarda çelik lifli beton kırılmayı önlemek için kullanılmaz, aynı zamanda betonun dinamik yükleme veya darbe mukavemetini arttırmak ve malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmasını önlemek için de betona çelik lif ilave edilmektedir.

Çelik liflerle güçlendirilmiş beton, ağır çalışma koşullarına maruz kalan yapılarda, ince kesitlerin ve yüksek dayanım özelliklerinin (çekme, darbe, kavitasyon, erezyon, yorulma, tokluk vs.) gerektiğı yerlerde kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanıldığı alanlar şöyledir:

Yol döşemelerinde

Karayolu gibi yol kaplamalarında aşınma ve çekme dayanımının yüksek olmasından dolayı dayanımı ve dayanıklılığı yüksek beton elde edilir. Ayrıca plak kalınlığının daha az olmasına imkan verir.

Kolon - kiriş birleşim bölgesinde

Hughes (1981), tarafından yapılan araştırma ile gevrek bir malzeme olan betonu düktil bir hale getirmek için kullanılan liflerin, basınç dayanımına nazaran eğilme

dayanımında büyük bir artış sağladığı; darbe tesiri altında kalan kolon-kiriş birleşiminde ve kirişlerde lif kullanımının çatlak kontrolü açısından önemli olduğu saptanmıştır.

Büyük sıcaklık farklarına maruz kalan yapılarda

Büyük sıcaklık farklılıkları ile karşı karşıya kalabilecek, termal ve mekanik şok tehlikesi bulunan yapılarda kullanılmaktadır.

Hidrolik yapılarda

Aktaş(2007), “Baraj, kanal, dinlendirme havuzu, dolu savak vb. hidrolik yapıların plaklarının yerine kullanılabilir. Ayrıca aşınma direnci yüksek olduğundan kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak kullanılabilir.” demiştir.

Beton, betonarme borular ve altyapı malzemeleri

Beton içerisine lif katılması sayesinde, betonların doluluğu artmaktadır bu da sızdırmazlık değerlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Klasik donatılı altyapı elemanlarında, donatının hazırlanması ve uygulamanın yapılması işçilik ve zaman yönünden bazı problemlere yol açmaktadır. Bazı paspayı sorunları ve donatının kalıp içerisine sabit tutulamaması büyük problemlere yol açmaktadır. Çelik liflerin betonarme borularda kullanılması ile hem işçilik, hem zaman ve hem de maliyet açısından büyük faydalar sağlanmıştır. Çelik lifler, beton altyapı elemanlarında kullanıldıklarında ise, ayrışmayı engellemeleri nedeniyle sızdırmazlık problemlerinin çözümünde büyük katkılar sağlamaktadır (Dramix, 1991).

Fabrika depo ve hangar döşemelerinde

Güçlendirilme ihtiyacı olan bir fabrika zemin döşeme betonu, hem onarım maliyetini arttıracak, hem de onarım süresince iş kaybına neden olacaktır. Ağır yüklerin maruz kaldığı döşemeler, üzerine gelen aşırı yükler ve aşırı zorlamalar etkisinde kalmaktadırlar. Özellikle dinamik etkilere karşı döşeme betonunun dayanımının artırılması çözüm olmaktadır. Liflerle güçlendirilmiş betonlar , bu yükleri karşılayabilecek dayanımlara sahiptir.

Havaalanı kaplamalarında

Havaalanı kaplamalarında genellikle çelik lifler kullanılmaktadır. Bu lifler kullanıldığında derz açıklıkları büyütülebilmektedir. Havaalanı uygulamalarında kaplama kalınlıkları lifli beton kullanılarak azaltılabilmektedir. Liflerle donatılı betonların yüksek eğilme dayanımları nedeniyle kaplama kalınlıkları azaltılabilmekte ve büyük bir maliyet indirimi olmaktadır.

Liman kaplamalarında

Liman kaplamaları diğer kaplamalardan farklı olarak ağır yük gemilerinin trafiğini karşılayabilecek şekilde projelendirilmektedir. Liman kaplamalarında yüklemeler boşaltmalar, çarpma etkileri, dalga hareketleri, gel-gitler ve aşırı yüklemeler gibi olasılıklar göz önüne alınmaktadır. Burada da çelik lifler kullanılarak kaplama kalınlıkları ve derz aralıkları azaltılabilmektedir (Bahadır, 2007).

İnce kabuk yapılarda

Gençel(2006), “Lifli betonun üstün nitelikleri kesit kalınlıklarının azaltılmasını mümkün hale getirdiğinden, ince kabuk yapılarda, kubbelerde, katlanmış plaklarda ve çeşitli mimari nedenlerle ince olması gereken yapı elemanlarında kullanılmaktadır.” demiştir.

Endüstri yapılarında

Çelik lifli beton endüstrisi yapılarında darbe rijitliğini sağlamak, ısısal ve dinamik etkilere karşı dayanıklılığı arttırmak için kullanılmaktadır.

Patlamaya karşı dayanıklı yapılarda

Patlamaya karşı dayanıklı olması gereken yapılarda, normal donatı ile birlikte çok uygun bir kullanım arz etmektedir. Uzun yıllardan beri Amerikan askeri tesis yapım şartnamelerinde yer almakta ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Aslan ve Aydın, 1999).

Şev stabilitesinin sağlanması

Ünal(1994), “Karayolları ve demiryollarını kesen, yer üstündeki kaya veya topraktan oluşan dik şevlerin veya toprak setlerin stabilitesinin sağlanmasında kullanılır.” demiştir.



Fotoğraf 2.4. Çelik lifli betonun şev stabilitesinin sağlanması (Bekaert, 2011)

Püskürtme beton (shotcrete) uygulamalarında

Çelik lifler hem ıslak hem de kuru püskürtme beton uygulamalarında çatlak kontrolü için ekonomik ve de pratik bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle çelik lifli püskürtme beton uygulaması barajların tamirinde, tünellerde, su kemerlerinde, iskelelerde, kanallarda, dolu savaklarda ve bu tür yapılarda başarıyla kullanılmaktadır.



Fotoğraf 2.5. Çelik lifli yaş betonun püskürtme beton uygulaması

2.10. Çelik Hasırın Tanımlanması ve Çelik Hasır Hakkında Genel Bilgiler

Çelik hasırlar, geniş satırlı dikey ve yatay betonarme elemanların teçhizat malzemesidir. Soğuk çekilerek mukavemeti artırılmış ve nervürlendirilmiş çelik çubukların birbirine nokta kaynağı ile milimetrik hassasiyette bağlanmaları ile imal edilirler. Hasır boyutları ve kafes aralıkları istenilen şekilde ayarlanarak imal edilebilmektedir.

Mekanik özellikleri

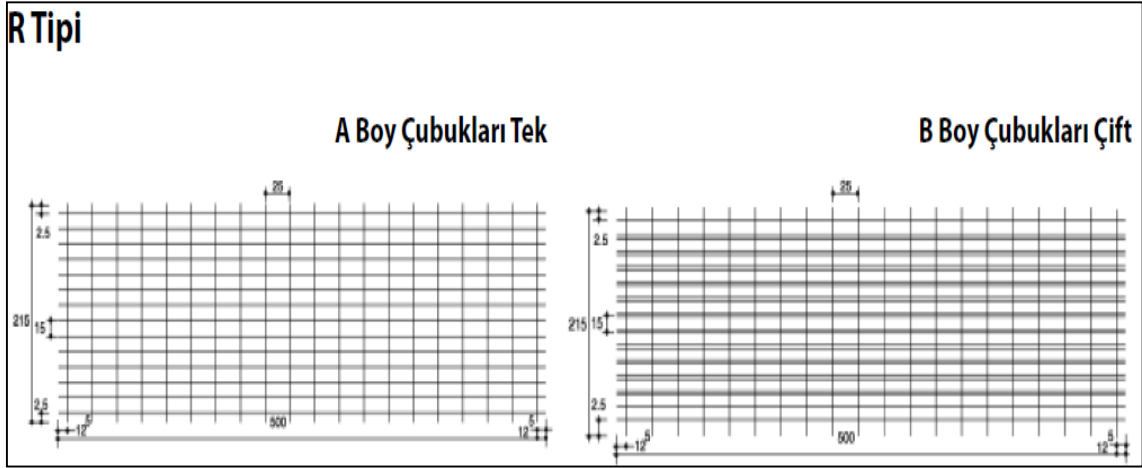
Çizelge 2.6. Çelik hasırların mekanik özellikleri (www.hasircelik.com)

	Çelik Hasır	ST 1
Minumum Akma Sınırı	5000 kg/cm ²	2200 kg/cm ²
Minumum Çekme Mukavemeti	5500 kg/cm ²	3400 kg/cm ²
Minumum Kopma Uzaması	8%	18%
Çubuk Çapı	4-9 mm	8-28 mm
Kaynak Noktalarındaki Makaslama Kuvveti	0,30 Bs.Fe	
Emniyet Gerilmesi (B 160 için)	2400 kg/m ²	1400 kg/m ²
Emniyet Gerilmesi (B 225 için)	2800 kg/m ²	1400 kg/m ²

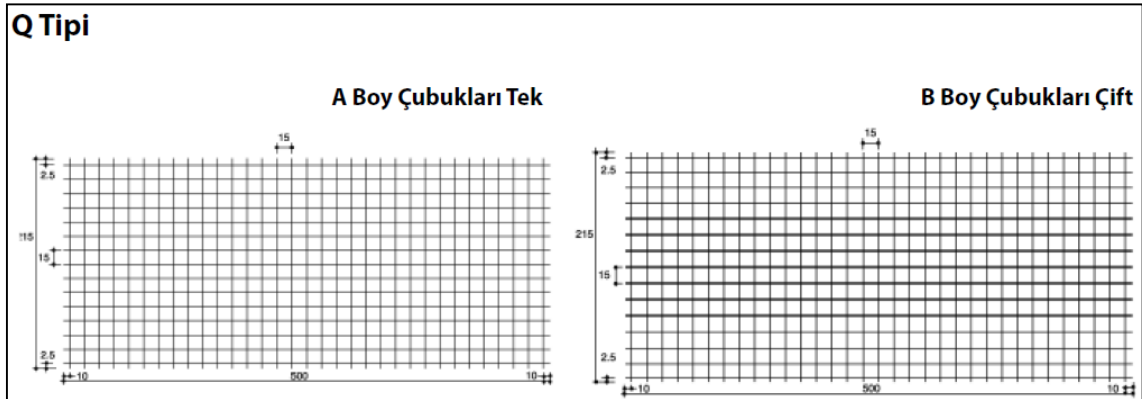
Çelik hasır tipleri

(R) Tipleri 15 adet boy, 20 adet en çubuklu,

(Q) Tipleri 15 adet boy, 33 adet en çubukludur.



Şekil 2.11. R tipi çelik hasır ebatları



Şekil 2.12. Q tipi çelik hasır ebatları

Standart çelik hasırlar en 2,15m x boy 5,00m (15x15cm) göz aralığında ve değişen çaplarda olur. Ancak çelik hasırda alıcı arzusuna ve projeye göre özel çelik hasırlarla ilgili farklı işlem, ebat ve değişebilen çaplarda üretim olanakları da sunulmaktadır.

Çizelge 2.7. R tipi standart çelik hasır tablosu(www.cayirovademircelik.com)

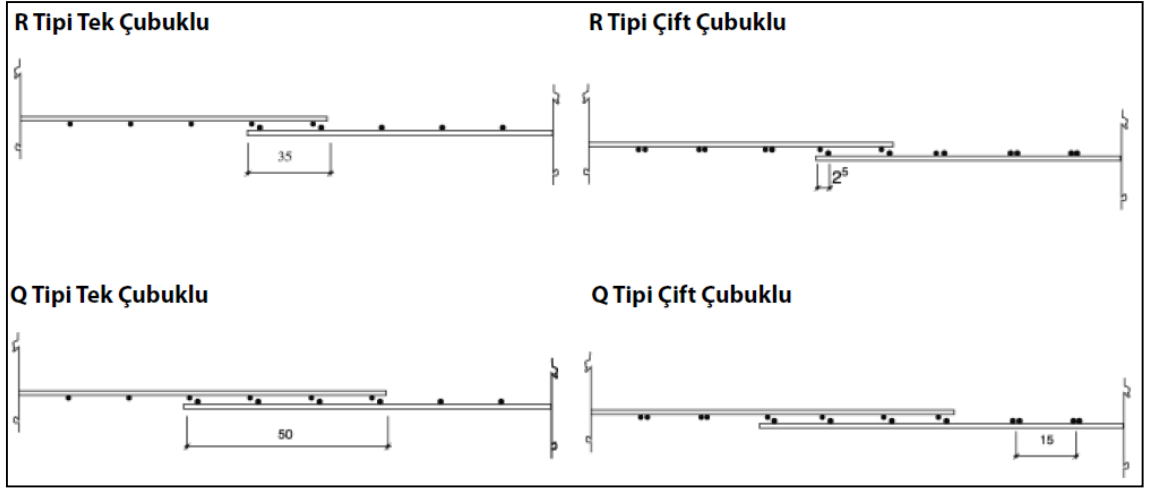
Hasır Tipi	Çubuk Aralığı (mm)	Çubuk Çapı (mm)	Hasır Kesit Alanı (cm ² /m)	Hasır Birim Ağırlığı
R	Boy/En	Boy/En	Boy/En	kg/m ²
R 106	150/250	4,5/4,5	1,06/0,64	1,33
R131	150/250	5,0/5,0	1,31/0,78	1,65
R158	150/250	5,5/5,0	1,58/0,78	1,86
R 188	150/250	6,0/5,0	1,88/0,78	2,10
R 221	150/250	6,5/5,0	2,21/0,78	2,36
R 257	150/250	7,0/5,0	2,57/0,78	2,63
R 295	150/250	7,5/5,0	2,95/0,78	2,93
R 335	150/250	8,0/5,0	3,35/0,78	3,25

Çizelge 2.8. Q tipi standart çelik hasır tablosu(www.cayirovademircelik.com)

HASIRIN		HASIR ÇUBUKLARININ								AĞIRLIK	
Tipi	Boy/Eni	ARALIĞI		ÇAPI		ÇIKINTISI		KESİT ALANI		m ²	Hasır
		Boy	En	Boy	En	Boy	En	Boy	En		
M		Mm						cm ² /m		Kg	
Q131/131	5,00/2,15	150	150	5	5	100/100	25/175	1,31	1,31	2,06	21,71
Q158/158		150	150	5,5	5,5	100/100	25/175	1,58	1,58	2,48	26,36
Q188/188		150	150	6	6	100/100	25/175	1,88	1,88	2,96	31,29
Q221/221		150	150	6,5	6,5	100/100	25/175	2,21	2,21	3,48	36,65
Q257/257		150	150	7	7	100/100	25/175	2,57	2,57	4,02	42,57
Q317/188		150	150	7,8	6	100/100	25/175	3,17	1,88	3,97	41,93
Q317/317		150	150	7,8	7,8	100/100	25/175	3,17	3,17	5	52,71
Q335/335		150	150	8	8	100/100	25/175	3,35	3,35	5,26	55,68
Q377/188		150	150	8,5	6	100/100	25/175	3,77	1,88	4,44	46,9
Q377/377		150	150	8,5	8,5	100/100	25/175	3,77	3,77	5,94	62,72
Q424/424		150	150	9	9	100/100	25/175	4,24	4,24	6,67	70,33
Q443/221		150	150	9,19	6,5	100/100	25/175	4,43	2,21	5,21	54,92
Q443/443		150	150	9,19	9,19	100/100	25/175	4,43	4,23	6,94	73,43
Q513/513		150	150	9,89	9,89	100/100	25/175	5,13	5,13	8,06	85,13
Q589/378		150	150	10,6	8,5	100/100	25/175	5,89	3,78	7,59	80,08
Q589/589		150	150	10,6	10,6	100/100	25/175	5,89	5,89	9,24	97,68

Çelik hasır bindirme boyları

Çelik hasırların bindirme boyu çalışan yönde en az 3 göz, tevzi yönünde en az 1 gözdür.



Şekil 2.13. R tipi ve Q tipi çelik hasır bindirme boyları(www.cayirovademircelik.com)

Çelik hasırın sağladığı avantajlar

- *Malzemeden Tasarruf:* Çelik hasır emniyet gerilmesinin normal inşaat demirinden yaklaşık iki kat fazla olması, çelik hasır kullanılması halinde normal inşaat demirine (STI) nazaran %40 civarında ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. STI demirinden, beton 160 için $V_e = 1400 \text{ kg/cm}^2$ iken çelik hasırda bu miktar; $V_e = 2400 \text{ kg/cm}^2$ olmaktadır. Bu nedenle çelik hasırlarda demirkesiti STI' e göre yarı yarıya azalmaktadır.
- *Zamandan Tasarruf:* Çelik hasırda kullanılan malzemenin azalması, plakalar halinde oluşu kolay taşınabilmesi ve montajının kolaylığı zamanı büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır.
- *İşçilikten Tasarruf:* Normal demirde olduğu gibi doğrultma, çubukları tel tel kesip pilye kırma, kanca yapma, döşemeye belirli aralıklarla yerleştirilip birbirine bağlama gibi işler yoktur. Çelik Hasırın ise kısa zamanda döşenmesi % 50 Tasarruf sağlamaktadır.
- *Nakliyeden Tasarruf:* Çelik Hasırlar standart (500 x 2.15) Tip ebadında imal edildikleri için nakliyesi kolaydır. Demirden Tasarruf sağladığı için nakliye ücreti azalmaktadır.

- *Paradan Tasarruf:* Malzemenin yarıya yakın azalması, zamanın kısalması, işçilikten tasarruf; netice olarak bütün bunlar %10 – 20 arasında parasal tasarruf sağlamaktadır.
- *Kalite Üstünlüğü:* Çelik Hasırlar otomatik kaynak marinalarında istenilen ölçüde hassasiyetle imal edilmektedir. Çelik Hasır çubukları beton içinde homojen bir dağılım göstermekte böylece çekme kuvvetlerinin düzgün bir şekilde alınması sağlanmaktadır. Çubukları nervürlü ve birbirine kaynaklı oluşu aderansı artırmakta, beton içerisindeki çubukların kayması önlenmekte yapıda olabilecek çatlaklar, korozyon ve sızıntılar giderilmektedir.
- *Çelik Hasır TSE Belgelidir:* Çap ve Boy Standardı bulunmaktadır dolayısıyla boydan ve çaptan zayıf verilmez inşaatlarda olumsuz görüntü arz eden demir artıklarına rastlanmaz.

Çelik hasırların kullanım alanları

- Betonarme yapıların tabliyelerinde,
- Kirişsiz döşemeler,
- Nervürlü döşemeler,
- Munferid ve radya temellerde,
- Perde ve istinat duvarlarında,
- Beton pist,
- Otoyol ve saha betonlarında,
- Metro ve tünel yapımında,
- Su yapılarında; baraj, kanal ve kanaletlerde,
- Prefabrik yapı elemanlarında,
- Endüstriyel yapıların çeşitli konstrüksiyonlarında,
- Asma tavanlarda,
- Bahçe çiti ve korkuluk vs yerler,
- Şev stabilitesi sağlamak amacıyla kullanılır.

3. TÜNELLERDE ÇELİK TEL VE ÇELİK HASIR KULLANIMI

Çeşitli kayaçlar ve zeminlerin içinde farklı amaçlarla açılan iki tarafı açık yeraltı kazılarına tünel, tek ucu açık kazılara ise galeri denir. Tüneller, karalarda veya su içinde demiryolu ve karayollarını kısaltmak, su getirmek, baraj yapımında nehir suyunu çevirmek, içme ve sulama için su getirmek, kent atık suyunu götürmek, kent trafiğini hafifletmek, yeraltından geçit sağlamak, hidroelektrik santrallerine su iletmek, yer altından taş, toprak ve maden çıkarmak gibi amaçlarla yapılmaktadır (Ayış, 2010).

Günümüzde en yaygın tünel açma yöntemleri;

- delme-patlatma yöntemi,
- yeni avusturya tünel açma yöntemi (NATM),
- tünel delme makinesi yöntemi (TBM),
- aç-kapa yöntemidir.

Tünel açma yöntemi ve iksa (destekleme) sistemlerinin belirlenmesinde güzergah topoğrafyası, zemin koşulları ve tünel geometrisine ait parametrelerin yanında hız, maliyet, zaman, emniyet ve işlevsellik faktörleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Tünel açma yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan “Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi” (NATM) klasik tünel açma tekniklerinin en deneysel ve esnek olanı, en optimum destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır (Ünlütepe, 2005). NATM’de ana ilke, en uygun kazı ve destekleme yönteminin seçilerek, kazı sonrası oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığının olabildiğince korunarak, boşluğu çevreleyen bölgede kaya/zemin kütlesi ve destekleme elemanlarının doğrudan teması ile kendini tutan ve taşıyan kompozit bir statik sistem oluşturmaktır. Kısaca NATM, tünel üzerine gelen yükü, yapılan uygun tünel geometrisi ve tahkimatlandırma ile yine zemine taşıtmaktır. NATM’ de kazı destek sistemlerinin oluşturulmasında , uluslararası kabul görmüş Avusturya Standartlarına (ÖNORM 2203, 1994) göre tanımlı kaya sınıflandırma sistemlerinden yararlanılmıştır.

Çizelge 3.1. Avusturya standartları ÖNORM 2203'e göre kaya sınıfları

	BARTON KAYA KÜTLESİ NİTELİĞİ (Q)	BIENIAWSKI KAYA KÜTLESİ DEĞERİ (RMR)	ÖNORM B2203 Ekim 1994 öncesi	ÖNORM B2203 Ekim 1994 sonrası
1000		100		
	Son derece iyi			
400		94	A1 Stabil	A1 Sağlam
	Pek çok iyi	Çok iyi		
		82.7		
100		80		
	Çok iyi	70.5		
40		76	A2 Aşırı sökülen	A2 Sonradan az sökülen
	İyi	iyi		
		65		
10		60	B1 Gevrek	B1 Gevrek
	Orta	Orta		
4		58		
	Zayıf			B2 Çok gevrek
		47		
1		45	B2 Çok gevrek	B3 Taneli
	Çok Zayıf	Çok Zayıf		
		40		
0.1		29	C1 Baskılı	C1 Dağ atma
	Çok fazla zayıf	Zayıf		
		20		
		17	C2 Çok baskılı	C2 Baskılı
		15		
0.01		10		C3 Çok baskılı
	Çok derece zayıf		L1 Gevşek zemin yüksek kohezyon	C4 Akıcı
		Çok Zayıf		
		5		
0.001		2.5	L2 Gevşek zemin düşük	C5 Şişen

Bilindiği gibi püskürtme beton (shotcrete), tünel kazı destek sistemlerinin vazgeçilmez elemanıdır. Çoğunlukla, kazı sonrası emniyet shotcrete'i veya oluşturulan tahkimat'ın üstüne püskürtme beton atımı ile tünellerde kullanılır. Yapılan tahkimatlandırmalar genel olarak çelik hasır, nervürlü demirler veya püskürtme betona katılan çelik teller yardımıyla oluşturulur. Son yıllarda sıkça tercih edilen çelik hasırlar yerine, uygulamacıda oluşan maliyet, hız ve estetik görünüm kaygılarıyla çelik teller tercih sebebi olmaya başlamıştır. Çelik teller tünellerde gerek kazı destek amaçlı püskürtme beton olarak, gerekse de tünel içi beton kaplama betonlarında oldukça yaygın şekilde kullanılırlar.

3.1. TünellerdePüskürtme Beton Kullanımı

Püskürtme beton, onarım veya yapım amacı ile önceden hazırlanmış olan betonun hava basıncı yardımı ile yüksek hızla uygulama yüzeyi veya uygulama alanına püskürtülerek elde edilen betondur (TS 11747).

Klasik yöntemlerle yapılan betonun hazırlanması, yerine konması, sıkıştırılması gibi bir çok işlem püskürtme beton uygulamasında, tek bir operasyonla çözüm bulabilmektedir.

Betonun kaya yüzeylerine püskürtülmesiyle çatlak ve yarıklar doldurulur, kısmen desteklenen parçalar birbirine bağlanır ve yüzeyin bozulması önlenir. Kaya yüklerinin, stabil kayalara transferi sağlanır. Eğer yapışma zayıfsa, eğilmeye çalışan bir membran olarak rol oynar. Yapışma, betonun özelliklerine ve kaya yüzeyine bağlıdır. Pürüzlü, iyi yıkanmış kaya yüzeylere yapışma, çatlaklı, çamurlu ve su gelen yüzeylere göre daha iyidir. Kaya yüzeylerinin temizlenmesi, püskürtme başlığından su ve basınçlı havanın püskürtülmesiyle yapılır. Sızıntı sular, hasara yol açabilir. Püskürtme beton yapılmadan önce, bu noktalardan delikler açılarak boru sokulmalı ve drenaja bağlanmalıdır. Kayaçların özelliklerine göre, sızıntı sular, betona etki ederek mekanik özelliklerini zayıflatabilirler (Bekaert, 2001).

Püskürtme beton, kuru karışım ve ıslak karışım olmak üzere iki şekilde uygulanır. Uygulama yapılan yerin özelliklerine, uygulama hızına ve istenen beton kalitesine bağlı olarak bu iki sistemden birisi tercih edilir.

Kuru sistem

Bu sistemde çimento, kum ve agrega homojen olarak karıştırılır. Bu karışım dağıtım elemanına gönderilir ve basınçlı hava ile büyük bir hızla uygulama yüzeyine püskürtülür. Karışıma ilave edilen su miktarı, operatör tarafından betonun püskürtülmesi sırasında el ile ayarlanır.

Islak sistem

Pompanarak püskürtme başlığına gelen beton/harç, burada basınçlı hava ve katkı ilave edilerek yüzeye püskürtülür.



(a)(b)

Fotoğraf 3.1. Kuru püskürtme (a) ve ıslak püskürtme (b) görünümü

Kuru sistem küçük çaplı tünellerde, ıslak sistem ise bunlara oranla daha büyük çaplı tünellerde uygulanır. Kuru sistem daha uzak mesafeye iletilebilir. Yaş sistemin ekipman maliyeti, kuru sistemin 3-10 katı daha yüksektir. Buna karşılık, yaş sistem ile 20 m³/saat' lik bir tüketim hızına ulaşılabilir ve geri dökülme daha azdır.

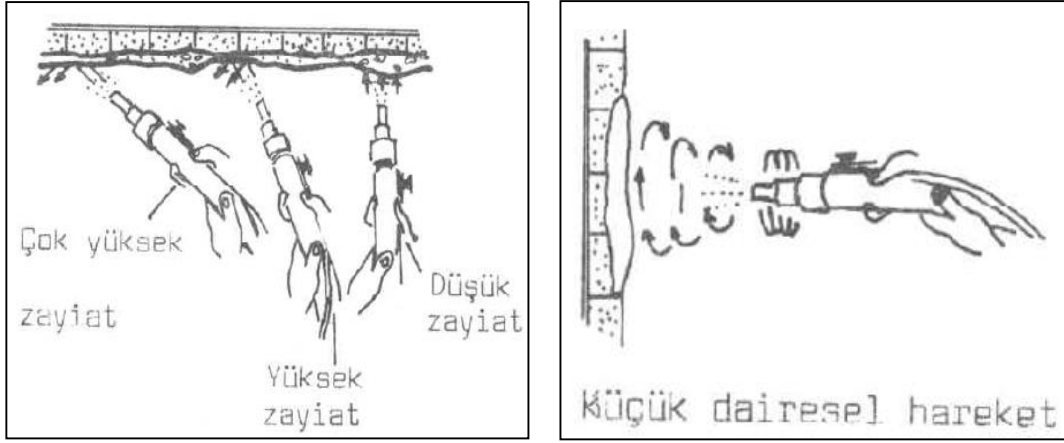
3.1.1.Karışım dizaynı

Püskürtme beton dizaynı, klasik beton dizaynına benzemekle beraber, bazı farkları vardır. Ana farklılık, agrega dizaynı ve çimento miktarıdır. Genel kural olarak, en büyük agrega çapı 16 mm'yi aşmamalıdır. Bu sınır aşıldığında, geri sıçrama büyük oranda artar. 8 mm'yi aşan agregaların yaklaşık %60-70'i geri dökülür. Uygulanmış püskürtme beton içindeki çimento miktarı, beton santralinde hazırlanan karışıma göre daha yüksektir. Bunun sebebi, agrega ve kumun geri sıçrama miktarının çimentodan fazla olmasıdır. Bunun yanında, püskürtme betona; dayanım arttırmak, geri sıçramayı azaltmak ve priz hızlandırmasını sağlamak amacıyla beton katkıları toz veya sıvı halde ilave edilebilir (Bekaert, 2014).

3.1.2. Püskürtme beton atım tekniği

Püskürtme betonun sağlıklı püskürtülebilmesi ve betondan beklenen performansın oluşması için bazı uygulama tekniklerine dikkat edilmesi gerekir. Bunlar:

- Sadece temiz yüzey üzerine püskürtme beton uygulanmalıdır. Bu nedenle de uygulama öncesi, basınçlı su+hava veya hava+kum ile uygulama bölgesi temizlenerek beton aderansına yardımcı olunmalıdır.
- Tecrübeli püskürtme beton operatörleri barındırılmalıdır. Onun kontrolü ile geri sıçrama en az seviyede tutulur.
- Tünel kesitleri ıslak püskürtme işlemini yapan robotlar için uygunsa bu makineler tercih edilmelidir. El ile atılan püskürtme betonlar, her zaman uygulama alanına homojen dağılmaz. Bazı yerlerde beton kalınlığı aşılabileceği gibi bazı yerlerde de istenen kalınlıkta beton püskürtülememe gibi sorunlarla karşılaşılabılır. Üstelik operatör uygulama alanına yakın olduğundan geri sıçrayan malzemelerden korunması güçleşir. Robot ile yapılan ıslak püskürtme işleminde hızlı, güvenli ve uniform dağılan beton ile bu sorunlar ortadan kalkar.
- Püskürtme beton yüzeyi ile püskürtme başlığı arasında 0,60-1,80 m. arasında mesafe bulunmalıdır. Amaç en az geri sıçramayı ve en yüksek derecede sıkışmayı sağlamaktır.
- Püskürtme beton kaplamanın; kuru, temiz ve sert bir zemine uygulanması yapışma gücünü artırır. Zemin ıslak, yumuşak ve pürüzsüz ise yapışma genelde zayıftır.
- Rebound' da (geri sekme) minimum kayıp yaşanması için, uygun dizayn, tecrübeli operatör ve gerekli robot ile adersana yardımcı katkılar kullanılmalıdır.



Şekil 3.1. Püskürtme başlığının doğru kullanımının gösterimi

- Düzenli bir püskürtme beton uygulanması için, yeterli havayı temin eden bir hava kompresörü kullanılmalıdır. Kuru sistemlerde, 30 metre ve daha kısa malzeme hortumu kullanılıyor ise hava basıncı , 175 kPa' dan (1,75 atm) daha düşük olmamalıdır. Hava basıncı, her 15 metre ilave uzunluk için 35 kPa, her 8 metre kot farkı için 35kPa arttırılmalıdır. Islak sistemde ise en az hava ihtiyacı 7 atm basınçtır.
- Püskürtme betona, klasik betonda olduğu gibi, dayanım ve dayanıklılığı arttırması için, kür uygulanması gerekir. En iyi yöntem, püskürtme betonu ıslak tutmaktır. Eğer ortamda rutubet % 85' in üzerinde ise, ilave kür uygulanmayabilir.

3.1.3. Tünellerde püskürtme beton avantajları

- Kalıp gerektirmeden yerleştirildiği için malzeme ve işçilik tasarrufu sağlar,
- Kazı yüzeyine açılır açılmaz hemen uygulanabilir,
- Betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması bir arada yapılır,
- Yüksek uygulama hızına sahiptir ve farklı çalışma koşullarında istenilen kalınlık sağlanabilir,
- Farklı boyut ve geometrideki açıklık kesitlerinde uygulanabilir.

Püskürtme betonların pratik ve kullanışlı oluşları yanında, bazı dezavantajları da vardır. Bunlardan biri de, düşük çekme dayanımı ve kaplama yüzeylerindeki değişik hareketler

karşısında çatlamalara maruz kalmasıdır. Püskürtme yüzeylerine çelik hasır kaplanması, bu tip çatlamalara bir önlem olabilmekle birlikte bu işlemlerin oldukça zaman alıcı ve uğraştırıcı oluşuda gözden uzak tutulmamalıdır. Bu durumda püskürtme betonu içine, çelik fiberlerin konması, bu sorunlara bir ölçüde çözüm getirmektedir (Valencia, 1973).

3.2. Püskürtme Betonda Çelik Lif Kullanımı

Günümüzde, özellikle tünel kaplamalarında ve yamaç stabilitesini sağlamada püskürtme beton kullanılmaktadır. Bu tip inşa çalışmalarında zeminin kalitesi gözönüne alındığında çoğu zaman püskürtme beton kaplamanın takviye edilmesi zorunluluğu ortaya çıkar. Bu takviye püskürtme beton içerisinde çelik hasır kullanarak gerçekleştirilir. Hasır kullanılması, montaj ve işçilik açısından güç ve pahalı bir işlem olup inşa sürecini uzatarak değişik sorunlara da neden olur. Çelik liflerle güçlendirilmiş beton teknik özellikleri itibari ile püskürtme beton içerisinde kullanılan donatının işlevini görebilir. Püskürtme beton uygulamasının yanı sıra yine tünellerde ön stabilizasyonu sağlayan önyapımlı tünel elemanlarının (segman) üretiminde de kullanılmaktadır. Çelik liflerle güçlendirilmiş segmanlar 15 cm'ye kadar yeraltı hareketlerinin beklenildiği zeminlerde gerekli destek işlevini yerine getirebilirler (USCOLD Concrete Committee, 1981).

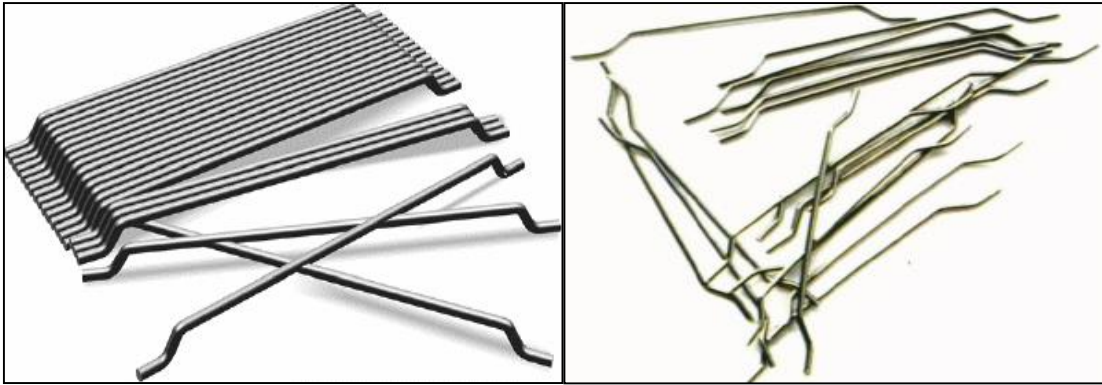
Çelik tel donatılı püskürtme beton, içinde homojen dağılmış çelik tel bulunan ve basınçlı hava ile uygulanacak yüzeye yüksek hızla püskürtülen harç veya betondur.

Çelik liflerle güçlendirilmiş beton, donatının işlevini yüksek tokluğu, çatlak oluşma direnci ve elastik davranabilme yetenekleri sayesinde üstlenir. Püskürtme betonun tünel ve yamaç uygulamalarında esas olan, kazılmış kaya yada toprak duvarlarda yarı sert bir kaplama yaratarak zemin hareketlerine karşı stabil bir yapı oluşturmaktır. Bu nedenle püskürtme betonun kaya yüzeylerine ve zemine iyi yapışması için yüksek bir başlangıç gerilmesine ve zemin-kaya hareketlerini durdurması için de yüksek esneme kapasitesi ve tokluğa sahip olması gereklidir. Zemin-kaya hareketleri nedeniyle ortaya çıkan gerilmeler, yüksek tokluk ve deformasyon özelliği olan lifli beton tarafından emilerek rijit malzeme içerisinde dağıtılır (Dramix, 1991).

Çelik fiber kullanımının püskürtme beton üzerindeki diğer olumlu etkilerinin yanında göçmeye neden olan büyük deformasyon hallerinde bile, çatlama sonrasında küçümsenemeyecek boyuta yük taşıyabilme özelliği dikkati çekmektedir. Çelik lifler, büyük deformasyonların ortaya çıkışında bile ani göçüklerin önlenmesi yönünden oldukça başarılı olmaktadır.

Püskürtme betonda kullanılan çelik fiberlerin bazı özellikleri;

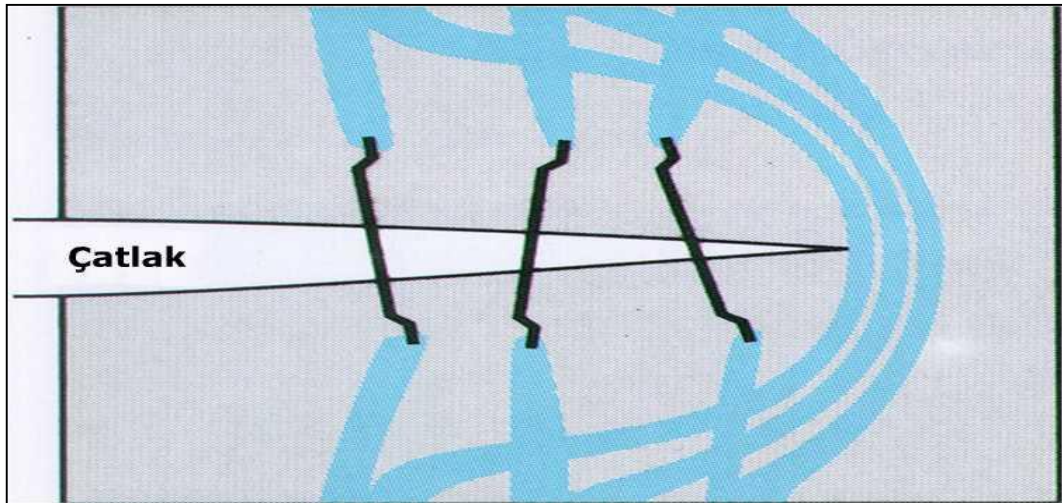
- Püskürtme beton uygulamalarında kullanılan çelik fiberler genellikle daire kesitli ve bazen de dikdörtgen kesitli olabilmektedir.
- Liflerin boyları 20-40 mm arasında olabilmektedir ve genellikle 25-30 mm uzunlukta olanları daha fazla kullanılmaktadır.
- Kullanılmalar sırasında kırılmaların genelde adezyon sıyrılması şeklinde ortaya çıktığı bilinmekte ise de çelik fiberler yaklaşık 2000 Mpa gibi büyük değerlerde çekme dayanımlarına sahip olmaları istenmektedir.
- Uçları kancalı özel olarak imal edilen tipleri daha büyük değerlerde çekip çıkarma (pull-out) dayanım değerleri verebilmektedir (ACI 506-66, 1966).



Fotoğraf 3.2. Uçları kancalı çelik tel tipi (www.bekaert.com)

- Çelik fiberler genelde çimento-agrega karışımına hacimce %1-2 oranında, ağırlıkça ise %3-6 oranında ilave edilmektedir (hacimce %1 çelik tel katkısı, yaklaşık 80 kg/m³ değerine tekabül etmektedir). Hacimce %2'den fazla fiber katkılarında hazırlama ve püskürtme güçlükleri görülmektedir (Godfrey, 1982).

- Çelik liflerin normal püskürtme beton karışımlarına katılması, bu çalışmaların en hassas ve titizlikle uygulanması gereken işlemleridir. Çünkü karıştırma işlemleri sırasında fiberler kümelenme ve topaklanma temayülündedir ve genellikle hortum çıkışlarında tehlikeli tıkanmalar ortaya çıkabilmektedir. Buna engel olmak üzere, çelik teller tutkal ile birleştirilmiş tel demetleri halinde karışıma eklenirler. Bu tutkallı teller su ve agreganın sürtünme etkisi ile beton içinde dağılarak kilitlenmeye ve topaklanmaya imkan vermezler.
- Betona çelik tellerin ilave edilmesi, slump'ı 2-3 cm etkiler. Betonun işlenebilirliğini arttırmak için su ilave edilmesi, mukavemetini büyük ölçüde azaltır. Bu nedenle slump testi ve betonun dıştan görünüşü işlenebilirlik konusunda yanıltıcı olabilir. Gerekli görüldüğünde su değil, su azaltıcı ve işlenebilirliği arttıran kimyasal katkılar kullanılmalıdır (Bekaert, 2014).
- Lifler, betondan kolayca sıyrılmamanın engellenmesi ve matrisin mekanik büyüklüklerin arttırılması açısından yeterli uzunlukta olmalıdır. Lif çapı, lifler arası boşluk ile doğru orantılıdır. Lif çapındaki azalma, birim hacim ve birim ağırlığa düşen lif adedini arttırır. Çelik lif uzunluğu, çatlak başladığında iki komşu agrega arasındaki boşlukta köprü oluşturabilmesi için, maksimum agrega boyutunun üç katı olmalıdır.



Şekil 3.2. Çelik tellerin çatlak karşısındaki davranışı (Dramix, 1991)

3.2.1. Çelik lifli püskürtme betonda geri sıçrama

Püskürtme beton uygulamalarında, yüksek hızla yüzeye püskürtülen malzemenin bir kısmı yüzeye çarpma anında geri sıçrayarak yere dökülür. Uygulamaların kaçınılmaz bir parçası olan geri sıçrama (rebound) olgusu, gerek maliyet, gerekse de püskürtme betonun kalitesi açısından çok önemlidir. Püskürtme beton uygulamalarında çelik tel kullanılması, geri sekme (rebound) olayını %5-10 arasında azaltır (Bekaert, 2014).

3.2.2. Çelik tel katkılı püskürtme betonun karışım dizaynı

Bugüne kadar pek çok çelik lifli püskürtme beton arazi uygulamalarında, genelde yüksek oranda kaba agregaya kullanımından ziyade, çimento oranlarının yüksek tutulmaları tercih edilmektedir (Henager, 1981). Henager'e göre çelik lifler, maksimum 13 mm dane çapına sahip ince agregaya çimento karışımlarına püskürtülemelidir (Çizelge 3.1.).

Çizelge 3.2. Çelik liflerle ince agregaya püskürtme beton karışım dizaynı (Haneger, 1981)

Malzeme	Ağırlık (kg/m ³)	Ağırlıkça %
Çimento	560	26
Kum karışımı (1/4 inç elek. Geçen)	1400	67
Çelik Lif	140-160	6,7
Hızlandırıcı	5	0,3

Agrega/Çimento Oranı: 2,5/1
Hızlandırıcı/Çimento Oranı: %1 (Ağırlıkça)

Kaba agregaya karışım dizaynı, çelik liflerle püskürtme betonu için, geleneksel püskürtme beton karışımındaki gibidir (Çizelge 3.3.).

Çizelge 3.3. Çelik lifli kaba agrega püskürtme betonu karışım dizaynı (Fernandes, 1975)

Malzeme	Ağırlık (kg/m ³)	Ağırlıkça %
Çimento	300	17,2
Kum	680	39,6
Agrega (1/2 inç elek. geçen)	680	39,6
Çelik Lif	80	3,0
Hızlandırıcı	10	0,6

Agrega/Çimento Oranı: 4,5/1
Hızlandırıcı/Çimento Oranı: %3 (Ağırlıkça)

Normal olarak kullanılan en büyük dane 8 mm olup, tabaka kalınlığı arttıkça daha büyük daneli agrega kullanılabilir. Hortum ve çıkış ucundaki muhtemel tıkanmaları önlemek amacı ile en büyük dane çapının, hortum çapının üçte birinden fazla olmamasına dikkat edilmelidir. Gerektiğinde, kısa hortum mesafeleri için yeterli miktarda basınçlı hava kullanılarak iri dane çapı, hortum çapının yarısına kadar büyütülebilir.

USCOLD Concrete Committee (1981), konuyla ilgili olarak “Çelik telli püskürtme beton uygulamalarında, en başarılı uygulama lif boyu 15-30 mm, çapı ise 0,25-0,40 mm arasında olan çelik liflerle gerçekleştirilmiştir.” demiştir.

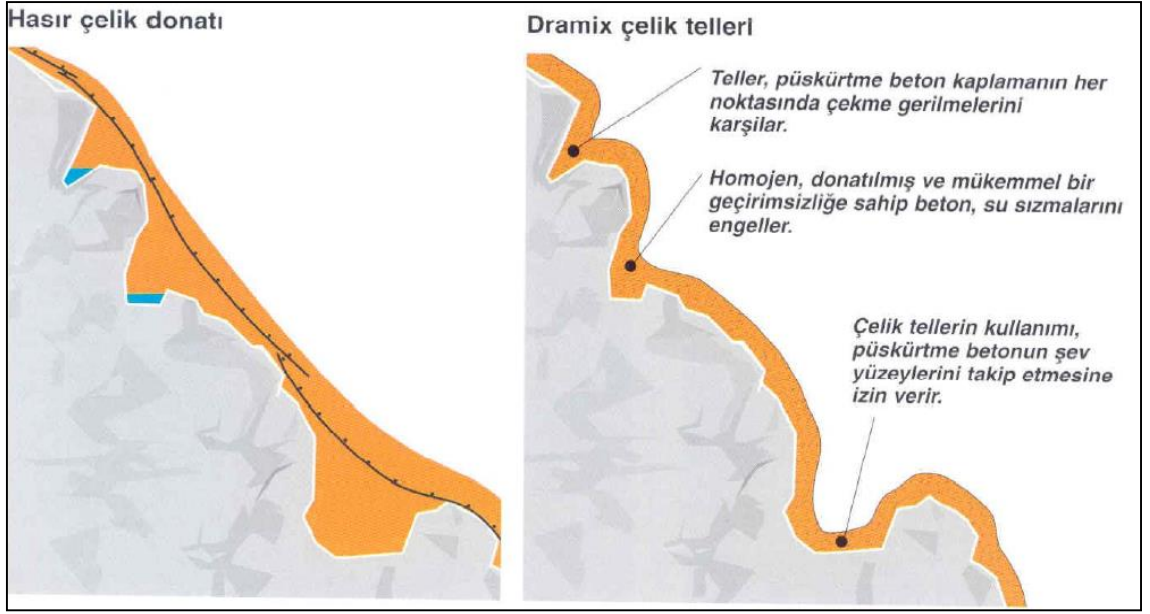
3.3. Çelik Tel ile Çelik Hasırlı Püskürtme Betonların Kıyaslanması

Çelik lifli püskürtme betonu çekici kılan nedenlerin başında çelik hasır montajının ortadan kalkması gelir. Hasırın tünel yüzeyine tutturulması masraflı ve tehlikeli bir işlem olmakla birlikte uzunca bir zamanda gerektirir. Kazı yüzeylerinin düzensiz olması itibarıyla hasır tünel yüzeyine bulonlarla bağlanır. Hasırın arkasında yüzey düzensizlikleri nedeniyle boşluklar vardır.



Fotoğraf 3.3. Tünelde çelik hasır montajı

Hasır kullanılması durumunda bu boşlukların betonla doldurulup hasır yüzeyinin de betonla kaplanması gereklidir, halbuki çelik lifli uygulamada daha az beton sarfiyatı söz konusudur. Yani bu sistemde yüzeylerin takip edilmesi mümkündür. Yine hasır kullanılması durumunda, eğer operatör nozulu hatalı kullanırsa hasır yüzeyine çarpma sonucu beton birikir ve arka kısımlara betonun gitmesi önlenerek hasırın arka kısmında boşluk ve ince madde içeriği fazla bir karışım meydana gelir (Şekil 3.3). Bu durumda beton kaya yüzeylerine iyi yapışamaz.



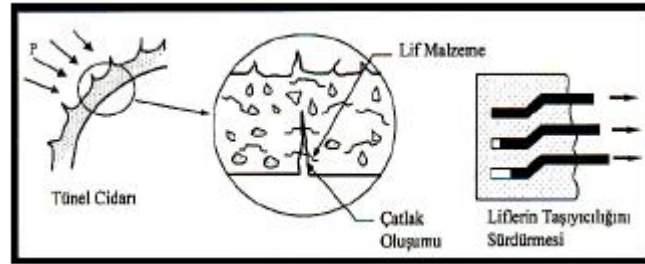
Şekil 3.3. Hasır çelik donatı ile tel donatılı betonun karşılaştırılması (www.bekaert.com)

Zemin suyunun söz konusu olduğu durumlarda hasırın paslanması, tünelde sızıntı ve kaplamanın bozulması gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkar. Hasıra çarpan iri agregaların hasırını sürekli titreştirmesi sonucu hasır ile beton arasında aderans sağlanamaz. Bu uygulamanın reboundu da yüksek olur. Her iki uygulama arasında beton sarfiyatı açısından %40 fark vardır (DSİ, 1999).

Çelik tellerin çelik hasır yerine kullanılma nedenleri özetle şöyle sıralanabilir:

- Çelik hasırlı kaplamada, hasırdan dolayı püskürtme betonun yapışma özelliğinin çok değişken olması ve geri sıçramanın özellikle tavan bölgelerinde %40 gibi yüksek değerlere ulaşması,
- Çelik hasır kullanıldığında, tünel cidarı ile hasır arasında kalan boşluğun doldurulamaması ve bu nedenle kaplamanın nem-su gibi dış etkenlere açık olması,
- Çelik hasırın tünel cidarlarına tespit edilmesi ve yerleştirilmesi işlemlerinde harcanan zaman ve işçilik girdisinin tünel ilerlemesindeki yüksek payı,
- Kaya patlaması gibi ani ve tahripkar özellik sergileyen dinamik zorlamalarda, yaşamsal işlevi olan süneklik özelliğinin çelik lifli püskürtme beton kaplamalarında daha iyi gerçekleştirilmesi,

- Çelik lifli püskürtme betonun taşıyıcılık özellikleri nedeni ile kaplama kalınlığı hasırlı kaplamaya kıyasla daha düşük olması, böylelikle anlamlı boyutta kazı ekonomisi yaratması (Arioğlu ve Girgin, 1998).
- Püskürtme betonda ilk mikro çatlakların oluşumunu takiben çatlak yüzeyine dik olan çelik lifler, uzarken kancalı biçimleri nedeniyle taşıyıcılığını devam ettirmekte ve bir miktar daha deformasyon yapabilme yeteneğine sahip olmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4.Püskürtme betonda liflerin çatlak gelişimini önlemesi ve ilave taşıyıcılık işlevi (Arioğlu vd., 2008)

- Çelik tel donatılı püskürtme beton kaplamalar, çelik hasır donatılı kaplamaların sağladığı eğilme dayanımını ve mukavemeti sağlar. Testler, 20-40 kg/m³ tel dozajına sahip kaplamaların, hasır donatılı olanlarla karşılaştırılabileceğini gösterdi (Bekaert, 2014).

Maliyet karşılaştırılması

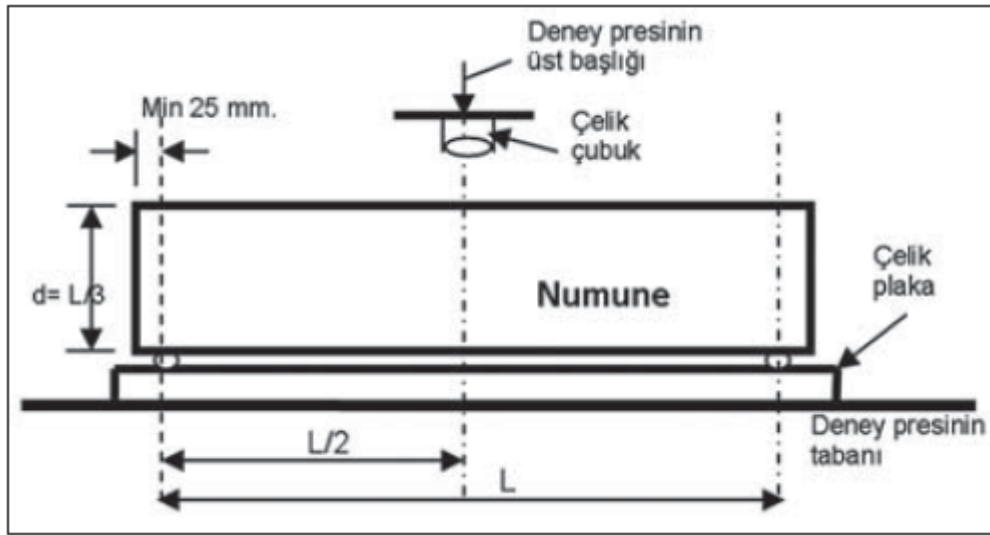
Sadece malzeme karşılaştırılması yapıldığında, çelik tel donatılı püskürtme beton, çelik hasır donatılı püskürtme betondan daha maliyetli bulunur. Ama, yerinde bitmiş kaplamaların maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, çelik telin daha avantajlı olduğu görülür. 100 mm kalınlığında püskürtme beton ve 1 sıra çelik hasır'ın (Q188) maliyeti yaklaşık 10-15 US\$/m² 'dir. Aynı taşıma gücüne sahip 80 mm kalınlıkta, 25 kg/m³ tel dozajı ile yapılan kaplama maliyeti, 8-12 US\$/m² 'dir. Bunlara püskürtme beton miktarındaki azalmayı, iş hızındaki artışı ve tünel içinde elektrik, yakıt vb. giderlerdeki azalmayı eklersek, çelik tel donatılı püskürtme betonun getirdiği ekonomik kazanç daha da artar (Bekaert, 2014).

3.4.Çelik Tel ve Çelik Hasır Performansını Belirleyici Testler

Kiriş testi (eğilmede çekme dayanımı)

Betonun eğilmede çekme dayanımının tayini için boyutları 15x15x60 cm olan kiriş numuneler hazırlanmaktadır. Beton kirişin oturtulduğu mesnetlerin arasındaki mesafenin orta noktasından yüklenmesi durumundaki deney yöntemini anlatır. Bu deney yöntemi ile çekme dayanımı, aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$\sigma_{\text{çekme}} = (3P.L)/(2b.d^2) \quad (3.1)$$



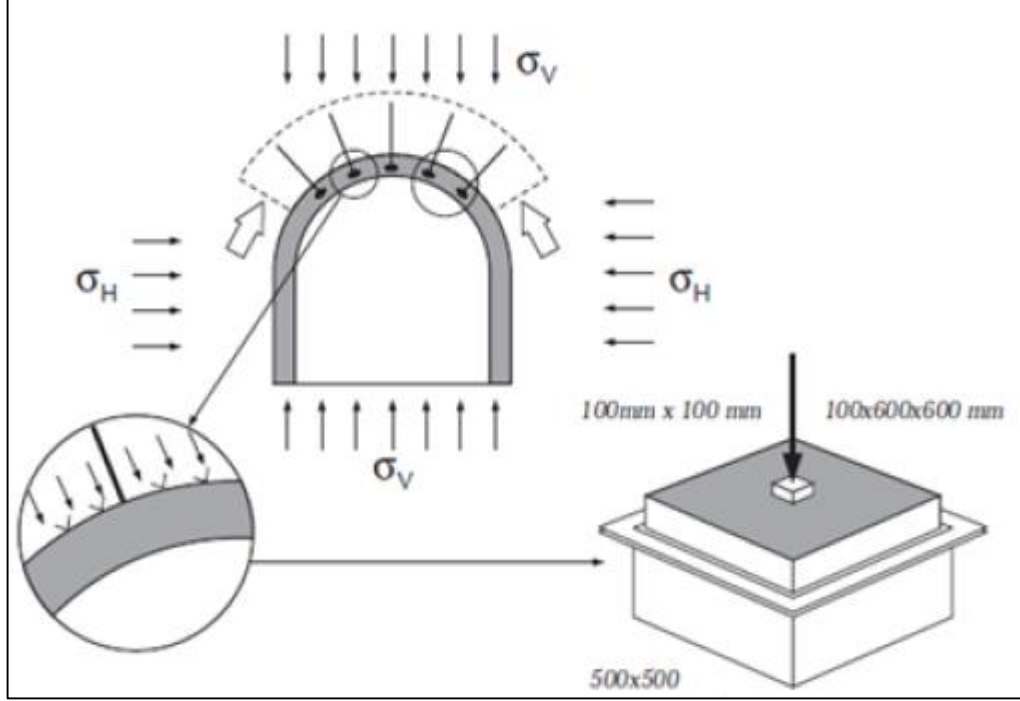
Şekil 3.5. Orta noktasından yüklenmiş kiriş eğilmede çekme deney düzeneği

Fransız (efnarc) plak testi

Bu testte 60x60x10 cm boyutlarında 4 kenarından mesnetlere oturtulan beton plağa, orta noktasından (10x10cm) yük uygulanmaktadır. Plak orta noktasının deformasyonu (sehim) 25 mm'ye ulaşıncaya kadar teste devam edilir ve yük-deformasyon eğrisi çizilir. Bu eğrinin yardımı ile deformasyonun bir fonksiyonu olarak enerji-deformasyon eğrisi çizilir.

Çelik tel donatılı püskürtme betonun performansını belirlemede, Fransız plak testi kiriş testinden daha uygundur. Bunun bazı nedenleri:

- Bir plak, gerçek bir tünel kaplamasını kirişten çok daha iyi temsil eder; 4 kenarından mesnetlenmiş beton bir plak püskürtme betonun sürekliliğini yansıtmaktadır.



Şekil 3.6. Tünellerde plak testi modellemesi (Bekaert, 2001)

- Çelik teller, kiriş testinde olduğu gibi sadece tek bir doğrultuda değil gerçekte olduğu gibi en az iki doğrultuda davranış gösterir; bir beton plakta telin donatı etkisi, çelik tel donatılı püskürtme beton kaplamanın gerçek davranışına çok yakındır.
- Özellikle kaya desteklemesinde olduğu gibi çift eksenli eğilmeyi daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilmektedir. Merkezi yükün, aynı zamanda bir kaya bulunu ankrajını temsil ettiği düşünülür (Bekaert, 2001).



Fotoğraf 3.4. Fransız (efnarc) plak testi deney düzeneği

Efnarc plak betonları enerji yutma kapasitelerine göre 500 J, 700 J ve 1000 J olarak üç sınıfa ayırmıştır. Bu tokluk sınıfları Çizelge 3.4' de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Efnarc' a göre tokluk sınıfı

Tokluk Sınıfı	25 mm'lik sehime kadar Joule cinsinden yutulan enerji
A	500
B	700
C	1000

3.5. Sistem Performans İlkeleri

Genel kaya stabilitesinin değerlendirilmesi kazılan kaya oyuğunun jeolojik haritasını temel almalıdır. Stabilitate, kaydedilmiş kaya parametrelerinden ve sistemde etkiyen kuvvetlerden hesaplanabilir. Daha önceki kazılardan elde edilen veriler temel alınarak birkaç ampirik sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. En yaygın kullanılan iki kaya

kütlesi sınıflandırması, Bieniawski RMR (1976, 1989) ve Barton ve arkadaşlarının Q (1974) sınıflandırmalarıdır. Her iki metod da, kaya kütlesi sınıfı için kantitatif bir değere ulaşmak amacıyla jeolojik, geometrik ve mühendislik parametrelerini içinde barındırır (Bekert, 2001).

Q-Sistemi

RQD – Kaya kütle tanımlaması

Jn – Çatlak takım sayısı

Jr – Çatlak pürüzlük durumu

Ja – Çatlak ayrışma durumu

Jw – Çatlak suyu indirgeme faktörü

SRF – Gerilme indirgeme faktörü

$$\text{Kaya Kütlesi Sınıfı } Q = (RQD/Jn) \cdot (Jr/Ja) \cdot (Jw/SRF) \quad (3.2)$$

E=700J ve E=1000J: EN 14488-5'e göre yapılan plak testinde 25 mm eğilmede çelik telli beton tarafından yutulan enerji.

Tünel tipine göre ESR değerleri:

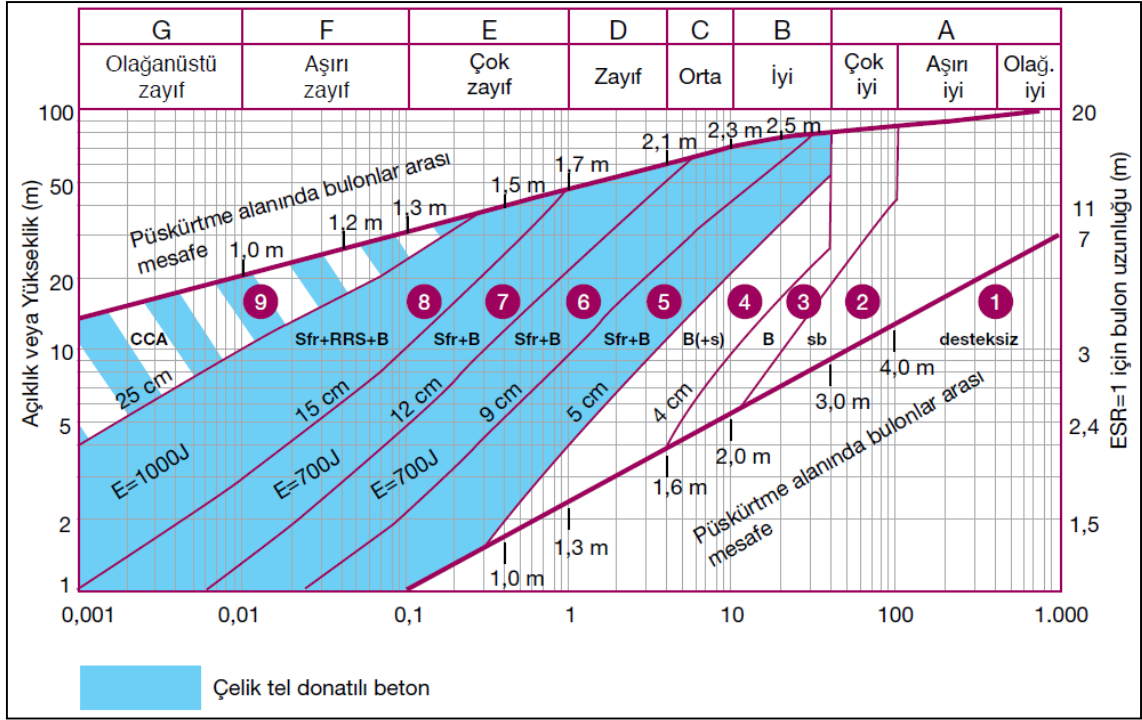
Geçici madenler vs. 3,5

Dikey shaftlar, sırasıyla dikdörtgen kesitli ve dairesel 2,0-2,5

Su tünelleri, kalıcı kaplamalar, yaklaşım tünelleri 1,6

Depolama mağaraları, az trafiği olan yol tünelleri, bağlantı tünelleri 1,3

Enerji santralleri, ağır trafiği olan kara ve demir yolu tünelleri sığınakları 1,0



TAHKİMAT KATAGORİLERİ

- | | |
|---|---|
| 1 Desteksiz | 6 Çelik tel donatılı püskürtme beton ve bulonlama, 9-12 cm, Sfr+B |
| 2 Yerel bulonlama, sb | 7 Çelik tel donatılı püskürtme beton ve bulonlama, 12-15 cm, Sfr+B |
| 3 Sistematik bulonlama, B | 8 Çelik tel donatılı püskürtme beton, > 15 cm, çelik iksa ve bulonlama, Sfr+RRS+B |
| 4 Sistematik bulonlama, (ve donatısız püskürtme beton, 4-10 xm), B(+s) | 9 Dökme Beton kaplama, CCA
(referans bilgileri için: infobuilding@bekaert.com) |
| 5 Çelik tel donatılı püskürtme beton ve bulonlama, 5-9 cm, Sfr+B | |

Şekil 3.7. Q sistemi tablosu

4. MATERYAL ve METOD

4.1. Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Agregalar

Çalışmada, 0-2 mm doğal kum, 0-12,5 mm ince çakıl olmak üzere farklı boyutta kum ve kireçtaşı kökenli agregalar kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 12 mm'dir. Agregaların ağırlıkları Çizelge 4.1' de, elek analizleri ise Çizelge 4.2' de verilmiştir.

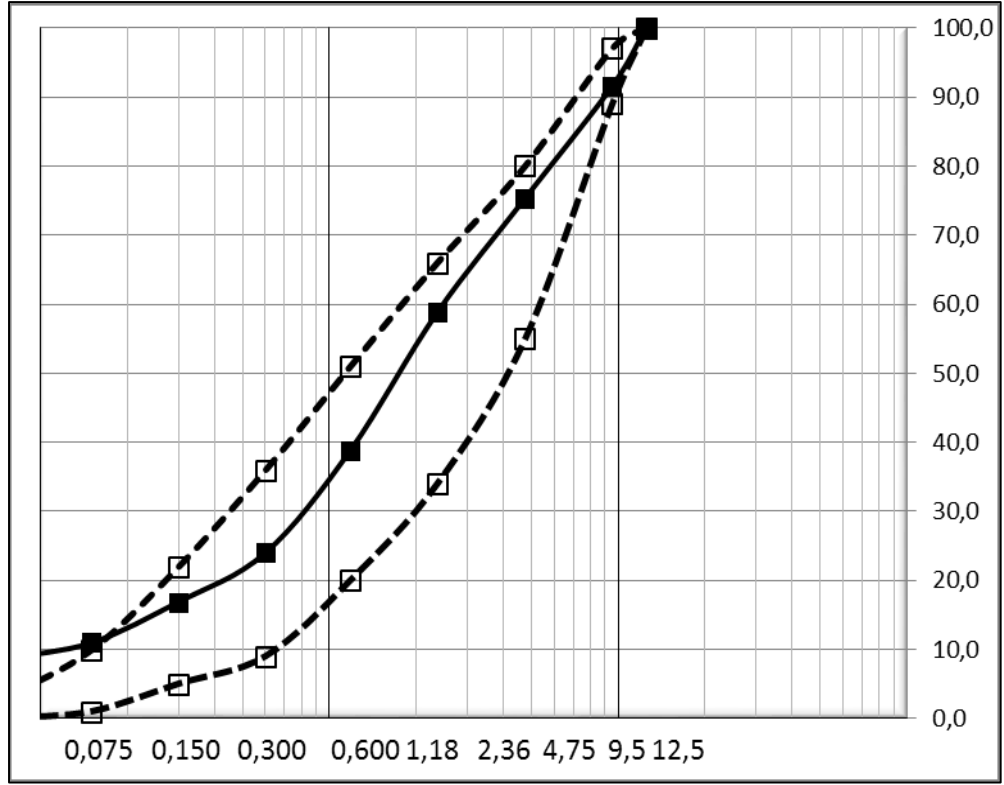
Çizelge 4.1. Agregaların ağırlık ve karışım yüzdeleri

Agrega Cinsi	Doğal Kum (0-4 mm)	İnce Çakıl (4-12 mm)
Ağırlık	1270,97	470,09

Beton karışımında kullanılan agregalar toplam karışımın % 74' ünü oluşturmaktadır. Karışımın kalan kısmını su, çimento ve katkı oluşturmaktadır.

Çizelge 4.2. Agregaların elek analizi

Agrega Cinsi	Elek Çapı /Elek No									Karışım Oranı (%)
	12,5 (mm) ½	9,5 (mm) 3/8	4,75 (mm) No:4	2,36 (mm) No:8	1,18 (mm) No:16	0,6 (mm) No:30	0,3 (mm) No:50	0,15 (mm) No:100	0,075 (mm) No:200	
Doğal Kum (0-4 mm)	100	100	100	80,6	53,2	32,9	23,1	15	11,4	73
İnce Çakıl (4-12 mm)	100	68,7	8,6	0	0	0	0	0	1,3	27



Şekil 4.1. Standart agrega granülometri eğrileri (kesikli çizgi) ve karışımda kullanılan agregaların granülometri eğrileri (düz çizgi)

4.1.2. Çimento

Beton karışımlarında, Cem II A PÇ 42,5 R çimentosu kullanılmıştır olup, kullanım miktarı 425 kg' dır. Çimentonun fiziksel, kimyasal, minerolojik ve mekanik özellikleri Çizelge 4.3' de verilmiştir.

Çizelge 4.3.Cem II A PÇ 42,5 R çimentosunun fiziksel, kimyasal, minerolojik ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler	SiO ₂ (%)	19,39	
	Al ₂ O ₃ (%)	4,21	
	Fe ₂ O ₃ (%)	3,49	
	CaO (%)	63,23	
	MgO (%)	1,72	
	SO ₃ (%)	2,73	
	Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,57	
	Kızdırma Kaybı (%)	2,91	
	Serbest Kireç (%)	1,42	
	Toplam Alkali (%) Na ₂ O + 0,658 K ₂ O	0,32	
	Klorür (%)	0,01	
	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,09	
	Kıvam (Su / Çimento)	30,80	
	Özgül Yüzey (cm ² /g)	4597	
	Fiziksel Özellikler	0,200 mm elekte kalan (%)	0,00
0,090 mm elekte kalan (%)		0,20	
0,032 mm elekte kalan (%)		6,90	
Donma Süresi (Vicat, dakika)		Başlangıç	Son
		178	247
Hacim Sabitliği (Le Chatelier, mm)		1,00	
Minerolojik Özellikler	C ₃ S (%)	64,20	
	C ₂ S (%)	7,46	
	C ₃ A (%)	5,79	
	C ₄ AF (%)	10,35	
Mekanik Özellikler	Basınç Dayanımı 2. Gün (Mpa)	25,40	
	Basınç Dayanımı 7. Gün (Mpa)	39,30	
	Basınç Dayanımı 28. Gün (Mpa)	56,50	

4.1.3. Katkı

Deneylerde kullanılan betona 5,10 kg miktarında katkı ilave edilmiş olup, bu miktar karışım dizaynı içinde bulunan toplam bağlayıcının % 0,22' si kadardır. İşlenebilirlik sağlaması amacıyla hiper akışkanlaştırıcı Polisan H 213 S katkı maddesi kullanılmıştır. Karışıma su ile karıştırılarak ilave edilmiştir.

Çizelge 4.4. Karışımda kullanılan katkı maddesinin teknik özellikleri

Kimyasal İçerik	Polikarboksil Bazlı Polimer
Renk	Koyu Kahverengi Sıvı
Homojenlik	Homojen
Yoğunluk g/cm ³	1,075 ± 0,015
PH	4,5 ± 1,0
Toplam klor Yüzdesi (%)	< 0,1
Suda Çözülebilir Klor Yüzdesi	< 0,1
Eşdeğer Alkali Miktarı (%)	< 4,0

4.1.4. Su

Beton karılmasında kullanılacak olan su kalitesi ile ilgili olarak çok uzun yıllardan bu yana elde edilen tecrübelerle dayanarak kural olarak benimsenmiş olan ve aynı zamanda betonla ilgili birçok kitapta ve hatta suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları standart'ı olan TS EN 1008'de (2003) belirtilmiş olan, su içilebiliyor ise, beton suyunda karma suyu olarak kullanılmaya da uygundur hükmü vardır. Ancak, içerdikleri yabancı maddelerin miktarı beton özelliklerine zarar verebilecek kadar yüksek değildir (Erdoğan, 2003). Buna bağlı olarak çalışmada kullanılan su, şehir şebekesinden akan sudan temin edilmiştir ve miktarı 178,5 kg' dır.

4.1.5. Betonun karışım oranları

Çizelge 4.5. Çalışmada kullanılan betonun yoğunluk, hacim ve karışım oranları

Bileşenler	Ağırlık (kg)	Özgül Ağırlık g/cm ³	Hacim m ³	Karışım Oranı %
Çimento	425,00	3,15	0,1349	18,08
Su	178,50	1,00	0,1785	7,59
Hava			0,0250	
Katkı (Santralden verilen)	5,10	1,20	0,0043	0,22
Katkı (Makineden verilen)	0,00		0,0000	
Kısmi Hacim			0,3427	
Toplam Agregası	1741,20		0,6573	
Kum	1270,97	2,63	481,80	54,09
İnce Çakıl	470,09	2,67	175,50	20,00
Toplam	2349,70		1,0000	100,00

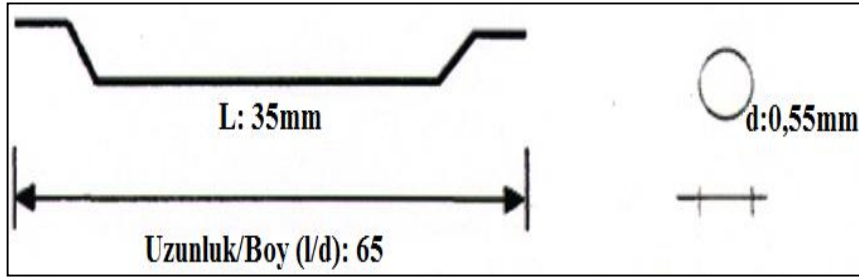
4.1.6. Çelik lif

Çalışmada narinlik oranı 65 olan çelik lifler taze betona 25 kg/m³ dozaj ile ilave edilmiştir.

Narinlik oranı 65 olan sonu kancalı iki ucu kıvrılmış çelik liflerin en belirgin özelliği çekme sırasında kopmadan direnç göstermeleridir. Ayrıca beton içerisinde homojen olarak dağılmayı kolaylaştırmak amacıyla su içerisinde kolayca çözünebilen bir tutkalla birleştirilmeleridir (Bekaert, 1998).

Çizelge 4.6. Narinlik oranı 65 olan çelik tellerin özellikleri (Bekaert, 2001).

Lif Tipi	GH 65/35
Boy (mm)	35
Çap (mm)	0,55
Narinlik Oranı (l/d)	65
Yoğunluk (g/cm ³)	7,80
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	1345
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Minumum Dozaj (kg/m ³)	16
Tel/kg	14500
Toplam Tel Uzunluğu (m)	10150



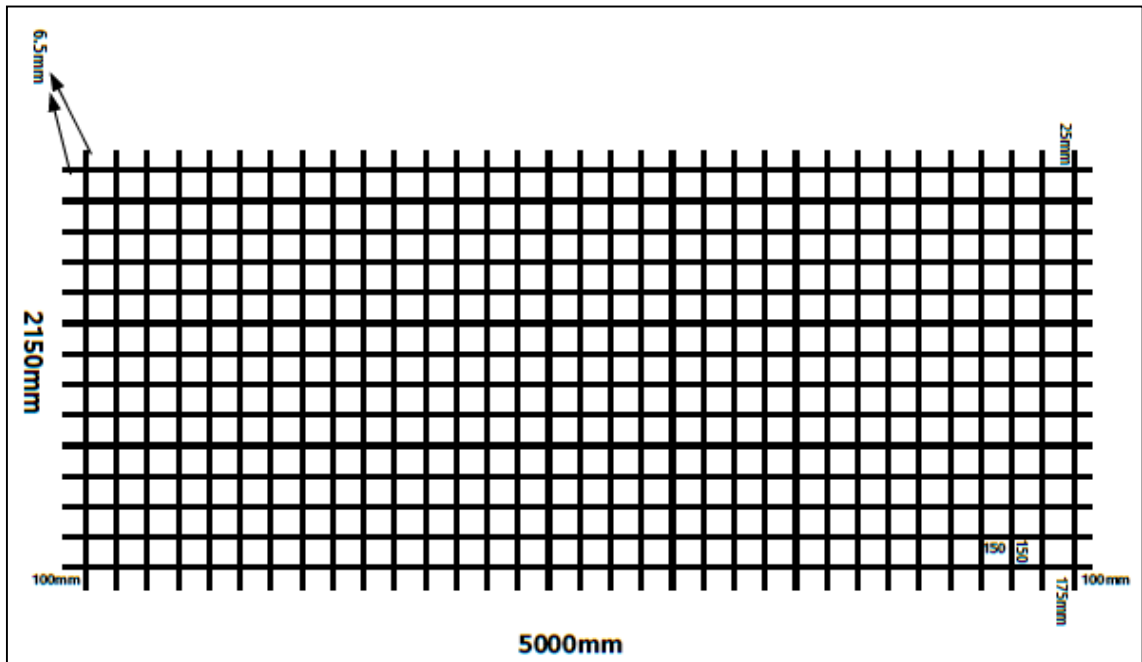
Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan çelik lif tipi (DSİ, 1999)

4.1.7. Çelik hasır

Çalışmada Q221x221 tipli çift kat çelik hasır kullanılmıştır. Çelik hasırların en belirgin özellikleri, normal inşaat demirine (ST1) nazaran emniyet gerilmesinin iki kat fazla olması ve % 40 civarında ağırlık tasarrufu sağlamasıdır (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Q221x221 tipli çelik hasırın özellikleri

HASIRIN		HASIR ÇUBUKLARININ								AĞIRLIK	
Tipi	Boy/Eni M	ARALIĞI		ÇAPI		ÇIKINTISI		KESİT ALANI		m ²	Hasır
		Boy	En	Boy	En	Boy	En	Boy	En		
Q221/221	5,00/2,15	150	150	6,5	6,5	100/100	25/175	2,21	2,21	3,48	36,65



Şekil 4.3. Q221x221 tipli çelik hasır boyutları

4.2. Beton Karışımları

4.2.1. Standart kabuller

Çalışmada TS 1247’de geçen standartlara uygun C 20/25 sınıfı beton kullanılmıştır. Betonların 28 günlük basınç dayanımlarının 20 MPa’ dan az olmaması hedeflenmiştir. Çelik tel takviyeli beton dizaynında kullanılan maksimum agrega tane boyutu 12 mm olarak belirlenmiştir. Karışım agregaları TS 706 EN 12260’ da verilen standart değerler arasında alınmıştır. Beton karışımındaki çimento dozajı 425 kg/m³ olarak sabitlenmiştir. Karışıma katılan lifler TS 10513’ de belirtilen kabullere uygundur ve tüm çalışmada 16 kg/m³ olarak sabitlenmiştir. Çalışmada kullanılan çimento TS EN 197-1 standardına uygundur ve bileşime %0,22 oranında işlenebilmeyi kolaylaştırmak amacıyla katılan katkı maddesi TS EN 197-1 standardına uygun bütün çimento türleri ile TS EN 206-1’de belirtilen bütün hazır beton sınıflarında kullanılabilir.

4.2.2. Beton karışımı, üretimi ve kürü

Betonların üretiminde betoniye öncelikle agregalar ile çimento konulmuştur ve homojen bir dağılım sağlanana kadar kuru karışım yapılmıştır. Ardından akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin de bulunduğu karışım suyu katılmıştır. Daha sonra homojen biçimde karıştırılan beton transmiksere sevk edilmiştir. Nem koşulları, sıcaklık ve diğer fiziksel koşullar nedeniyle transmikser uygulama bölgesine götürülmüştür. Uygulama bölgesinde 1 adet putzmeister marka shotcrete makinası hazır beklemektedir.

Transmikserde bulunan yaş beton kalıplara püskürtülmeden önce TS 12350-2’ ye göre betonların çökme deneyi, TS EN 12350-3’ e göre vebe deneyi ve TS 2941’ e göre birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Ardından transmikser shotcrete makinesinin beton kazanına yaklaşarak mikser tamburunda bulunan beton, makineye sevk edilmiştir. Daha sonra önceden temizlenmiş ve yağlanmış olan beton numune kalıplarına taze beton karışımları shotcrete makinesiyle püskürtülmüştür. Püskürtülen beton ile öncelikle 3 adet donatısız beton plağı ve daha sonra önceden hazırlanmış olan 3 adet çelik hasır donatılı beton plağına püskürtme beton atılmıştır. Daha sonra aynı beton dizaynı ile uygulama alanına bir transmikser sevkiyatı daha yapılmıştır. Bu transmikslerde bulunan

çimento hamuruna çelik teller el ile 20 kg/dakika hızla belirli periyotlar halinde ilave edilerek karıştırılmış ve bu esnada mikser tamburu en yüksek hız ile yaklaşık 5 dakika çevrilmiştir. Mikser içindeki betonun bir kısmı yere dökülerek homojen bir karışım yapılıp yapılmadığı kontrol edilmiştir. Homojenliğin sağlanmasının ardından çelik telli püskürtme beton 3 adet boş plağa püskürtülmüştür. Son olarak 9 adet beton plak numunesinin yüzeyleri mala ile perdahlanmış ve üzerleri hava almaması için naylon ile 24 saat kapatılmıştır. 24 saat sonunda plak betonlar günlük sulanıp tekrar naylon ile üzeri kapatılarak deneylerin yapılacağı güne kadar kür edilmiştir.



Fotoğraf 4.1. Plak numunelerinin perdahlanması

4.3. Deneysel Çalışmalar

4.3.1. Taze beton deneyleri

Taze betonun işlenebilirliği TS EN 12350-2 (2002)' ye göre çökme (slump) deneyi ve TS EN 12350-3 (2002)' ye göre vebe metodu ile saptanmıştır. Bunun yanında taze beton için çok önemli olan birim hacim ağırlık tayini tespit edilmiştir.

Çökme metodunda taze beton, ölçüleri belli olan kesik huninin içerisine standart bir şekilde sıkıştırılarak doldurulur. Her tabaka 25 kez şişlenmek suretiyle doldurularak yapılmıştır. Kalıp tamamen dolduktan sonra üst yüzey mala ile düzeltilerek hiç vakit kaybetmeden çökme hunisinin yukarı doğru çekilmiştir. Sonuçta beton kendi ağırlığınca bir miktar çökmesi ile kesik koninin üst yüzeyi ile çöken beton yığınının tepe noktası arasındaki mesafeden betonun çökme değeri okunmuştur. Taze beton kütesinin kendi ağırlığı nedeniyle çökme mesafesi, betonun kıvam ölçüsü olarak kullanılır.



Fotoğraf 4.2. Çökme (slump) deneyi

Vebe metotunda vebe silindir kabı içinde çökme hunisi içerisine taze beton standart bir şekilde sıkıştırılarak doldurulur, daha sonra çökme hunisi yukarı doğru çekilerek alınır ve taze beton kütesi serbest bırakılır. Saydam disk beton kütesi üzerine, betona temas edinceye kadar indirilerek betonun çökmesi kaydedilir. Vebe titreşim masası çalıştırılmış ve saydam diskin alt yüzünün çimento şerbetiyle tamamen kaplanması için geçen süre

kronometre ile ölçülmüştür. Taze betonun kıvamı çökme ve vebe süresine göre sınıflandırılması Çizelge 4.8' de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Taze betonun çökme ve vebe sınıflaması (TS EN 206-1, 2002)

Sınıf	S1	S2	S3	S4	S5
Çökme (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	≥220
Sınıf	V0	V1	V2	V3	V4
Vebe (sn)	≥31	30-21	20-11	10-6	5-3

Birim ağırlık tespiti için, kalıplar dökümden önce ve beton üç kademedeki sıkıştırılarak doldurulduktan sonra tartılmıştır. Kalıbın tam dolu olmasına ve betonun üstten taşmamasına dikkat edilmiştir. Numune ağırlığı kap hacmine bölünerek birim hacim ağırlıklara ulaşılır. Aşağıda taze beton birim ağırlığının bulunuş formülü verilmiştir.

$$\Delta = (W_{bk} - W_{kap}) / V_{kap} \quad (4.1)$$

Δ : Taze betonun birim ağırlığı, kg/m^3

W_{bk} : Taze beton + kap ağırlığı

W_{kap} : Kabin ağırlığı

V_{kap} : Kabin hacmi

4.3.2. Sertleşmiş beton deneyleri

4.3.2.1. Basınç dayanımı deneyi

Her bir karışımın basınç dayanımı tayini için 150x150x150 mm'lik küp numuneler üretilmiştir. Numunelerin zamanla göstereceği dayanım artışları için 3, 7 ve 28 günlük dayanımları ölçülmüştür. Numuneler, TS EN 12390-4' e (2002) basınç dayanımı-deney makinalarının özellikleri standardına uygun Ele Test 3000 markalı 300 ton basınç kapasiteli preste, TS EN 12390-3 (2003) deney numunelerinde basınç dayanımının tayini standardına uygun olarak deneye tabi tutuldu. Makine otomatik yükleme sistemi ile küp numuneler 530 kg/sn yükleme hızı ile yüklenmiştir. Basınç dayanımları, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_c = F/A_c (4.2)$$

Burada;

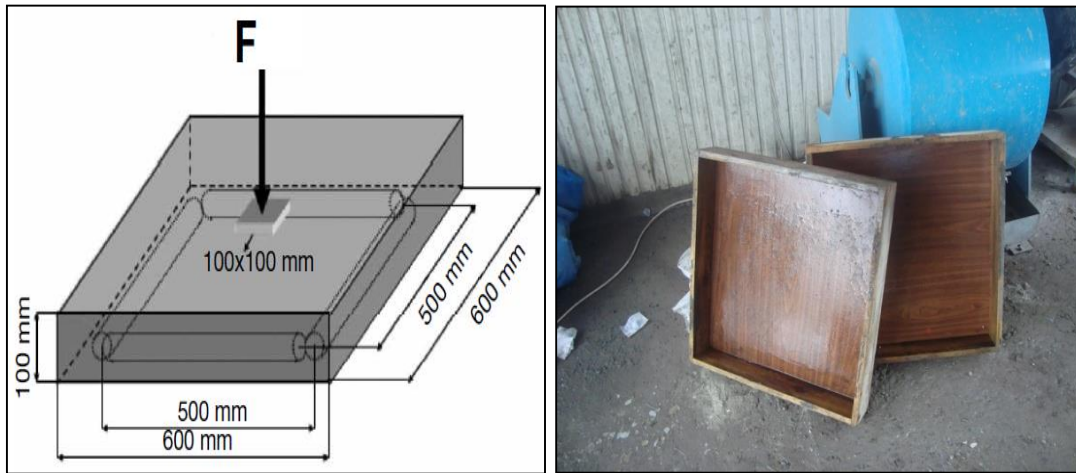
f_c : Basınç Dayanımı, MPa

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A_c : Numunenin üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm²

4.3.2.2. Enerji depolama kapasitesi veya tokluk (efnarc plak testi)

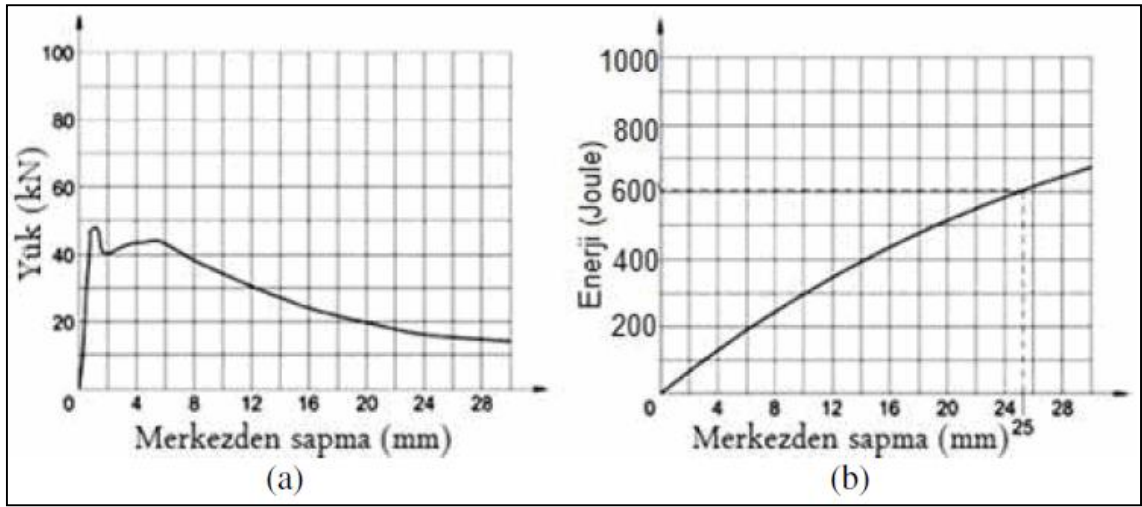
Çelik tel donatılı betonun yapısal davranışını belirleyebilmek için Fransa'da bir tünel inşaatında Ulusal Demiryolu Şirketi SNCF ve eski Alpes Essais Laboratuvarı tarafından bir test yöntemi geliştirilmiştir. Bu zımbalama-eğilme kare plak testi, bir ankraj bulonu etrafındaki kaya basıncına maruz tünel kaplamasının davranışını gerçeğe çok yakın bir şekilde modelleyebilmektedir. Bu plak testi EFNARC önerilerinde yayınlanmış ve Avrupa püskürtme beton standardı EN 14487' ye de dahil edilmiştir.



Şekil 4.4. Test için kullanılan beton plakası boyutları

Çalışmada 100x600x600 mm ebatlarındaki çelik telli, çelik hasırlı ve donatısız beton türlerinin her birinden 3'er adet, toplamda 9 adet plak EN 14488-5' e göre, Efnarc Plak Testine tabi tutulmuştur. Buna göre çelik korniyerlerle kaynaklanarak hazırlanan yeterli rijitlikteki mesnetler üzerine dört kenardan serbestçe oturtulmuştur. Açıklık 500 mm x 500 mm olup, pürüzlü üst yüzey üstte, kalıpla temasta olan alt yüzey altta olmak üzere plağın merkezinde 100 mm x 100 mm' lik bir kesite yük uygulanmıştır. Deney sırasında

plak merkezinin altında LVDT ile sehimler ölçülmüştür. Dakikada 1,5 mm' lik sehim oluşacak biçimde uygulanan bir yükleme hızıyla yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Çelik hasır donatılı, çelik tel donatılı ve donatısız beton numunelerine 25 mm sehim olana kadar yükleme yapılmıştır. 1, 2 ve 3 numaralı donatısız beton numunelerinde tel veya hasır bulunmadığı için beton kırıldıktan sonra yükleme durdurulmuştur. Yük verileri pres makinesine sabitlenen bir yük hücresinden analog bir veri kaydedicisine ve oradan bilgisayara aktarılmıştır. Testlerden 0,5 saniye aralıklarla yükleme ve sehim değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerle EN 14488-5'e göre şekil 4.5' deki gibi yük-deformasyon grafikleri oluşturulmuştur.

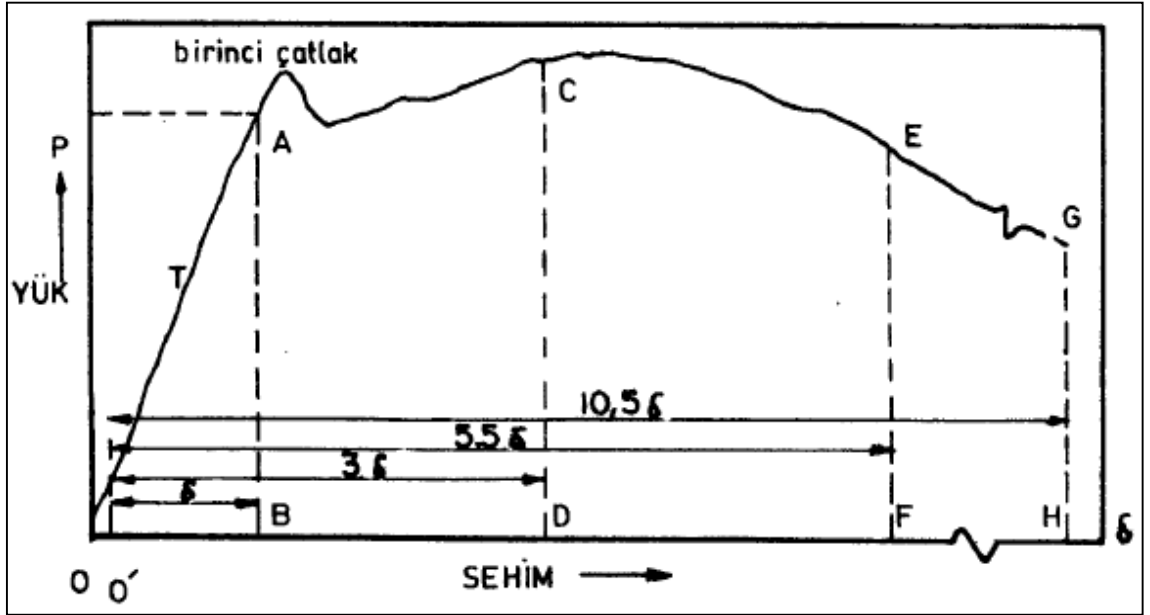


Şekil 4.5. EN 14488-5' e göre oluşturulması gereken plak testi grafikleri (a) yük-deformasyon, (b) enerji-deformasyon

Lifli betonlarda maksimum yükten sonra da betonun yük taşıması sonucu malzemenin tokluğu değerlendirilirken deney numunesinin belli bir aralığına kadar olan deformasyon boyutu göz önüne alınarak lifli betonun davranışı açıklanmıştır. Bunun sonucu TS 10515' te (1992) tanımlanan deney yöntemi geliştirilerek elastik şekil değiştirme indeksleri kavramı getirilmiştir. Elastik şekil değiştirme indekslerinin hesaplanmasında, yük-sehim eğrisinin altında yer alıp, ilk çatlak eğrisine ve belirtilen son nokta sehimine kadar devam eden alanlar esas alınır. Yük-sehim eğrisinin lineer bölümden ilk kez ayrıldığı nokta tanımlanarak ilk çatlak belirtilir. Karşılık gelen yükü kullanarak ilk çatlamayı meydana getiren gerilme hesaplanır, ilk çatlama sehimine ve ilk çatlakla kadar olan yük-sehim eğrisinin altındaki alan belirtilir.

Elastik şekil değiştirme indeksleri, belirtilen sehime kadar olan eğri altında kalan alanın, ilk çatlakla kadar olan alana bölünmesi ile elde edilen sayılardır. İlk çatlak sehiminin 3

katı sehime kadar yük-sehim eğrisinin altındaki alanın, ilk çatlak kadar olan alana bölünmesi ile I_5 , ilk çatlak eğiminin 5,5 katı sehime kadar yük-sehim eğrisinin altındaki alanın, ilk çatlak kadar olan alana bölünmesi ile I_{10} , ilk çatlak sehiminin 10,5 katı sehime kadar yük-sehim eğrisinin altındaki alanın, ilk çatlak kadar olan alana bölünmesi ile I_{20} şekil değiştirme indeksleri hesaplanır. Tokluk indekslerinin hesaplanmasında kullanılan yük-sehim eğrisi şekil 4.6' da gösterilmiştir (TS 10515, 1992). Çelik lifli betonların deney sonucu çizilen yük-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alan üzerinden hesaplanan I_5 , I_{10} , I_{20} elastik şekil değiştirme indeksleri, betonun enerji yutma kapasitesini göstermesi ve şahit beton ile karşılaştırılması açısından önemlidir.



Şekil 4.6. Tokluk indekslerinin hesaplanması için yük-sehim eğrisi

Mukavemet farkı değeri (kalıcı dayanım faktörü) $R_{10,20}$ ise, ölçülen ilk çatlak dayanımının yüzdesi olarak ilk çatlaktan sonra belirli sehime karşı gelen alanlarındaki ortalama kalıcı dayanımı göstermektedir. Kiriş deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisinde ilk çatlak oluşuktan sonra malzemenin yük-sehim eğrisi tam plastik davranış gösterirse $R_{10,20} = 100$, yumuşama eğilimi gösterirse $R_{10,20} < 100$ olmaktadır. Yalın betonda ise kalıcı dayanım faktörleri sıfırdır.

Kiriş numunelerinin yük-şekil değiştirme eğrilerinin oluşturulması için, yük etkisi altında numunede meydana gelecek deformasyonun okunması için de numunenin

açıklığının ve genişliğinin orta noktasına strain-gauge yerleştirilmiştir. Yük numuneye 10 kg/sn yükleme hızı ile uygulanmış, yük ve sehim değerleri kameraya kayıt edilmiştir. Tokluk değerleri şu şekilde hesaplanmıştır:

$$F_e = (T_b/tb)/(l/bh^2) \quad (4.3)$$

$$F_u (R_u) = P_{\max} (l/bh^2) \quad (4.4)$$

$$OAB = (P \times \delta)/2 \quad (4.5)$$

$$I_5 = OACD/OAB \quad (4.6)$$

$$I_{10} = OAEF/OAB \quad (4.7)$$

$$I_{20} = OAGH/OAB \quad (4.8)$$

$$R_{10.20} = 10 \times (I_{20} - I_{10}) \quad (4.9)$$

Burada;

F_e : Eşdeğer çekme dayanımı, N/mm²

$F_u (R_u)$: maksimum çekme dayanımı (Rapture Modülü), N/mm²

P_{\max} : Maksimum yük, N

T_b : 3 mm' lik eğilme deformasyonuna (sehim) kadar yük deformasyon eğrisi altında kalan alanın oluşması için harcanan enerji, N.mm

tb : Sehim, 3 mm (1/450)

l : Deney numunesinin iki mesnet arasındaki uzunluğu, mm

b : Kırılma yüzeyi kesit genişliği, mm

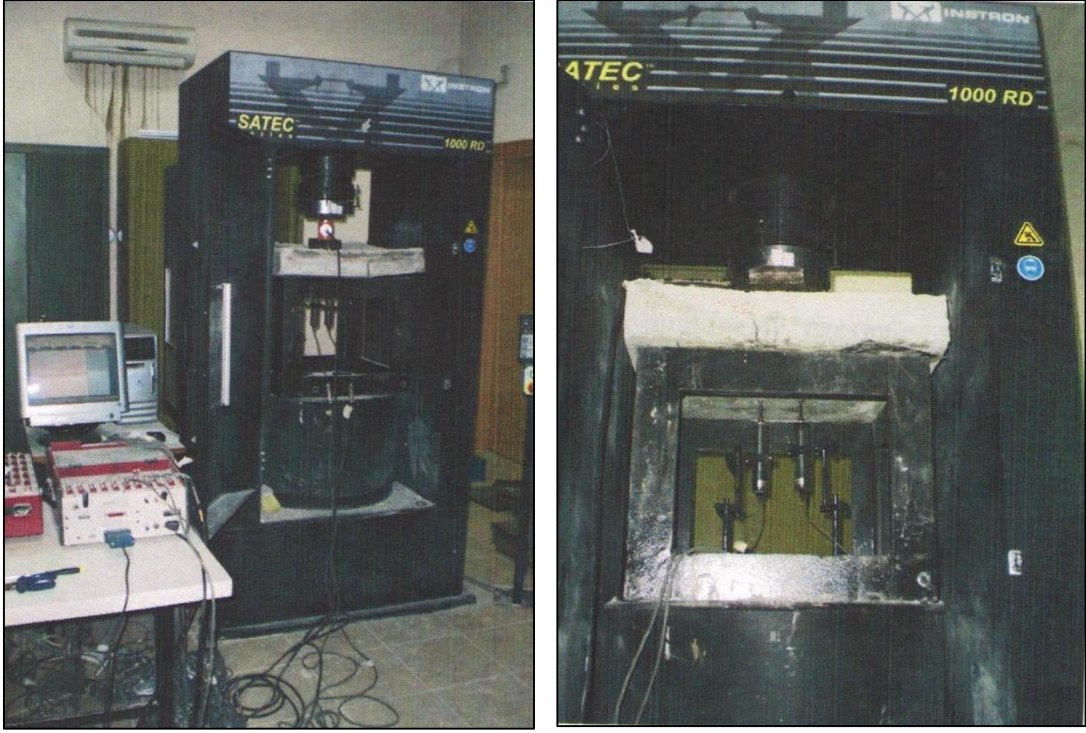
h : Deney numunesi yüksekliği, mm

P : İlk çatlak gerilmesi, N

δ : İlk çatlak sehim, mm

$R_{10.20}$: Mukavemet farkı değeri

I_5, I_{10}, I_{20} : Elastik şekil değiştirme indeksleri



Fotoğraf 4.3. Plak testi deney düzeneği

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Taze beton Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Slump (çökme) deneyi

Çalışmada deneye tabi tutulan beton plakları, santralden çıkan aynı beton dizaynı ile iki adet transmikserden alınan betonlardır. Betonların ilk anda yapılan çökme deneylerinde slumpaları 24 cm olarak belirlenmiştir.

Çelik hasır ve donatısız plak numuneleri için çıkarılan ilk transmikser uygulama alanına yaklaşık 25 dakikada ulaşmıştır ve bu süre boyunca mikser tamburu yavaş tempoda döndürülmüştür. Uygulama alanında yapılan ikinci çökme deneyinde slump değerinin 24 cm' den 21 cm' e düştüğü görülmüştür.

İkinci transmikser uygulama alanına aynı şekilde 25 dakikada ulaşmış ve bu süre boyunca mikser tamburu yavaş tempoda döndürülmüştür. Hemen ardından uygulama alanında yapılan çökme deneyinde slump değeri 22 cm olarak ölçülmüştür. Daha sonra taze betonun içerisine çelik lif katılarak transmikser 10 dakika kadar zaman zaman hızlı devirde döndürüldükten hemen sonra taze beton son defa deneye tabi tutulmuştur. Çelik tel ilave edilen betonun 4 cm slump kaybederek 18 cm' ye düştüğü görülmüştür.

Ve-be deneyi

Çalışmada ilk transmikserden alınan 24 cm ve 21 cm çökme değerli taze betonların Ve-Be süreleri ölçülmüştür. Ve-Be süreleri sırasıyla 2,3 saniye, 3,1 saniye olarak belirlenmiştir. Daha sonra ikinci transmikserden alınan 24 cm, 22 cm ve 18 cm slump değerli taze betonlara uygulanan deney sonunda, Ve-Be değerlerinin sırasıyla 2,6 saniye, 2,9 saniye ve 4,2 saniye olduğu görülmüştür. 18 cm slump değerli betonun Ve-Be süresinin diğer numunelerden fazla olmasının sebebi içine katılan lif miktarı ile slump değerinin düşmesidir. İşlenebilirliği önemli ölçüde etkileyen Çökme ve Ve-Be deneyleri birbiriyle bağlantılıdır. Çökme değeri düştükçe betonda meydana gelen sıvı kaybı nedeniyle Ve-Be değerinde artış gözlenmiştir.

Birim ağırlık tayini

Çalışmada 2 adet transmikserden alınan farklı çökme değerli taze beton numunelerine birim ağırlık tayini yapılmıştır. Her çökme deneyi yapılan taze beton numunesinden 3 adet örnek alınmış ve bunların ortalamaları kaydedilmiştir. Slump değerleri 24 ve 21 olarak alınan taze betonların birim ağırlıklarının 3 adet numuneden alınan ortalama değerleri sırasıyla 2371 kg/m³, 2363 kg/m³ olarak tespit edilmiştir. Daha sonra çelik tel ilave edilmiş ikinci mikserden alınan 24, 22 ve 18 cm slump değerli taze betonlara birim ağırlık tayini yapılmıştır. Betonların 3' er adet numuneden alınan ortalama birim ağırlıkları 2399kg/m³, 2394kg/m³ ve 2381kg/m³ olarak tespit edilmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Taze beton deney sonuçları

Plak Numarası	Çökme Değeri (cm)	Ve-Be (sn)	Birim Ağırlık (kg/m ³)
1 No'lu Plak (Çelik Hasırlı)	21	3,1	2363
2 No'lu Plak (Çelik Hasırlı)	21	3,1	2363
3 No'lu Plak (Çelik Hasırlı)	21	3,1	2363
1 No'lu Plak (Donatısız)	21	3,1	2363
2 No'lu Plak (Donatısız)	21	3,1	2363
3 No'lu Plak (Donatısız)	21	3,1	2363
1 No'lu Plak (Çelik Telli)	18	4,2	2381
2 No'lu Plak (Çelik Telli)	18	4,2	2381
3 No'lu Plak (Çelik Telli)	18	4,2	2381

Yapılan çökme ve Ve-Be deneyleri sonrasında, deneye tabi tutulacak taze betonların TS EN 206-1 (Çizelge 4.8)' e göre 1, 2 ve 3 no' lu beton plakların çökme değerleri S4

sınıfında, Ve-Be değerleri ise S5 (plastik kuru) sınıfında olup işlenebilirlik açısından uygundur.

5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

5.2.1. Basınç dayanımı deneyi

Çalışmada bilindiği gibi iki adet transmikserden alınan benzer dizaynı betonlar kullanılmıştır. Basınç dayanımları ilk transmikserden alınan 3 adetve sonraki transmikserden alınan çelik tel takviyeli 3 adet 15x15x15 cm³lük küp numunelere uygulanmıştır. Küp numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Çalışmada kullanılan yalın betonun (1. transmikser) 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları

Numune No	3 Gün	7 Gün	28 Gün
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1 (yalın)	16,8	20,8	25,7
2 (yalın)	16,1	21,5	24,3
3 (yalın)	15,9	20,1	26,1
Ortalama	16,3	20,8	25,4

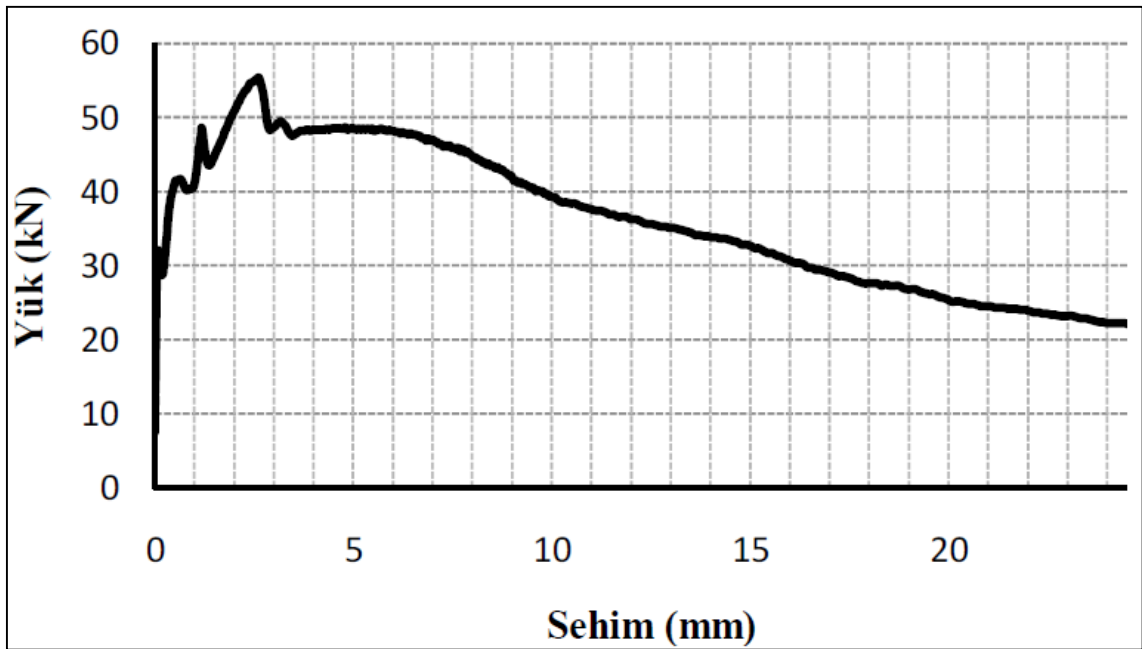
Çizelge 5.3. Çalışmada kullanılan çelik tel katkılı betonun (2. transmikser) 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları

Numune No	3 Gün	7 Gün	28 Gün
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1 (çelik telli)	15,9	19,8	24,8
2 (çelik telli)	16,5	20,4	25,3
3 (çelik telli)	16,1	20,2	25,7
Ortalama	16,1	20,1	25,2

5.2.2. Efnarc plak testi deneyi

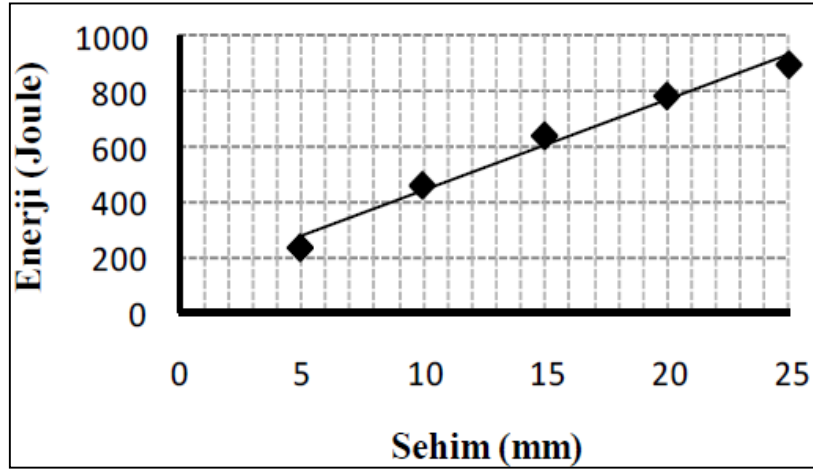
Çelik tel donatılı beton plaklar

1, 2 ve 3 no' lu çelik tel donatılı betonların doğrusal modelleme yöntemi ile elde edilen yük-sehim grafikleri Şekil 5.1, 5.3 ve 5.5' te, enerji-sehim grafikleri Şekil 5.2, 5.4 ve 5.6' da verilmiştir.



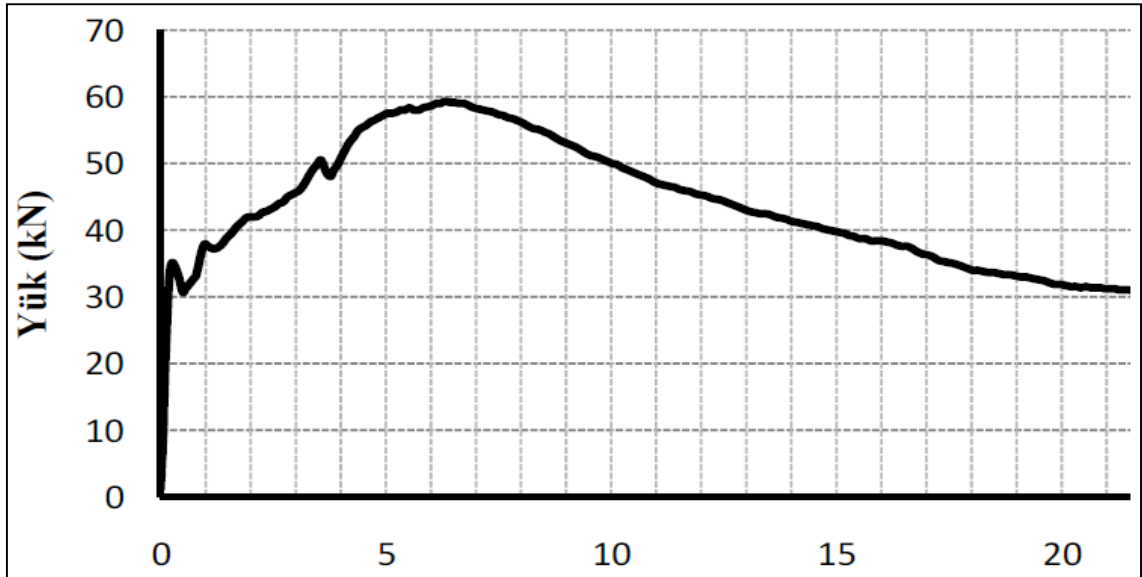
Şekil 5.1. 1 no'lu çelik tel donatılı betonun yük-sehim eğrisi

Şekil 5.1 incelendiğinde plak 0,65 mm sehimde iken yaklaşık 42 kN yüke dayandıktan sonra çatlamaktadır. Bu süre zarfında uygulanan kuvvet çelik tel ile beton arasındaki aderansa bağlı olarak beton çatladıktan sonra çelik tellere geçebilmektedir. Belirli bir yük kaybından sonra plak içindeki çelik teller nedeni ile yükleme kuvveti devam etmektedir. Plak numunesi 1,2 mm sehimde 48 kN yük dayanımı gerçekleştirdikten sonra inen kol betonun ikinci defa çatlamasına yol açmıştır. Hemen ardından kuvvetin tekrar beton içindeki çelik tellere geçmesi ile kuvvet düzlemi yaklaşık 56 kN' a kadar çıkarak maksimum seviyeye ulaşmıştır. Plak 6 mm sehime ulaştığında beton kırılmaya başlamış ve yük taşıma kapasitesi lineer bir azalma göstermiştir. Yapılan gözlemlerde çelik tel donatılı betonların 25 mm sehime ulaştığında bile hala tam olarak parçalara ayrılacak kadar kırılmadığı, herhangi bir parça kopması oluşmadığı ve bu deformasyonda dahi yaklaşık 23 kN taşıyabildiği görülmüştür.



Şekil 5.2. 1 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi

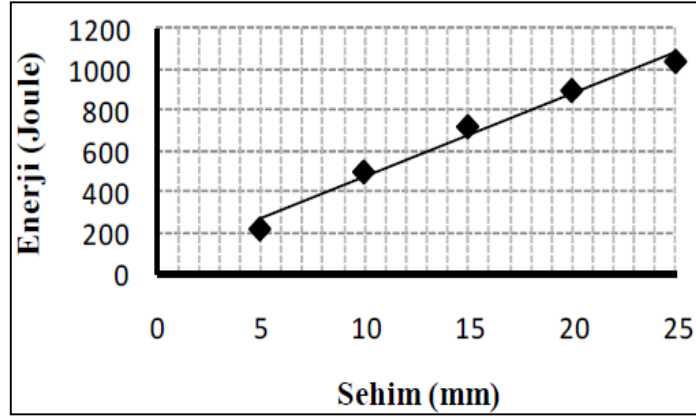
Şekil 5.2' de gösterilen 1 numaralı plağa ait yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanmış ve tokluk değerleri joule cinsinden bulunarak enerji-deformasyon grafiği oluşturulmuştur. 25 mm deformasyon (sehim) sonunda bakıldığında 1 numaralı çelik tel donatılı betonun 892 joule' a kadar enerji yuttuğu görülmüştür. Efnarc plak betonları enerji yutma kapasitelerine göre 500 J, 700 J ve 1000 J olarak üç sınıfa ayırmıştır. 1 numaralı çelik tel donatılı beton plağı 892 joule enerji yutarak "b" tokluk sınıfı içinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.3. 2 no' lu çelik tel donatılı betonun yük-sehim eğrisi

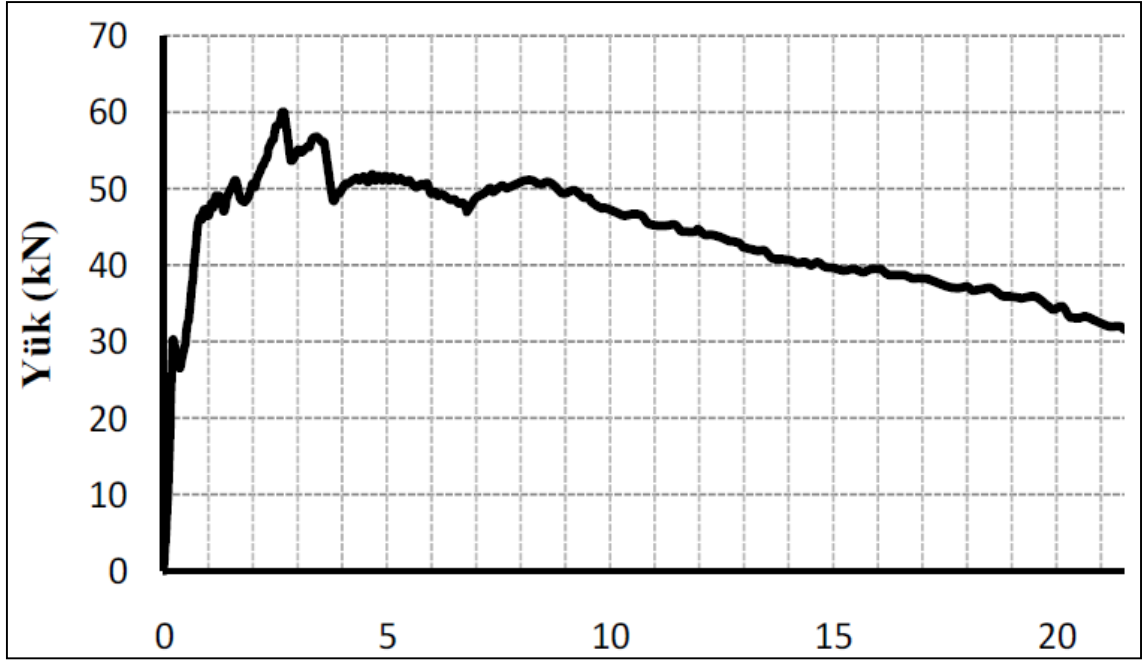
2 no' lu çelik telli beton plağın eğrisi incelendiğinde plak 0,25 mm sehimde iken ilk çatlak yükü yaklaşık 36 kN olarak tespit edilmiştir. Daha sonra uygulanan kuvvet, çelik

tel ile beton arasındaki aderansa bağlı olarak beton çatladıktan sonra çelik tellere geçmiştir. Beton zaman zaman çatlamaya devam ederek 6,35 mm sehimde 60 kN ile maksimum yüke ulaşmıştır. Plak 6,35 mm sehime ulaştığında beton büyük kırılmalarını gerçekleştirmiş ve yük lineer bir azalma göstermiştir.



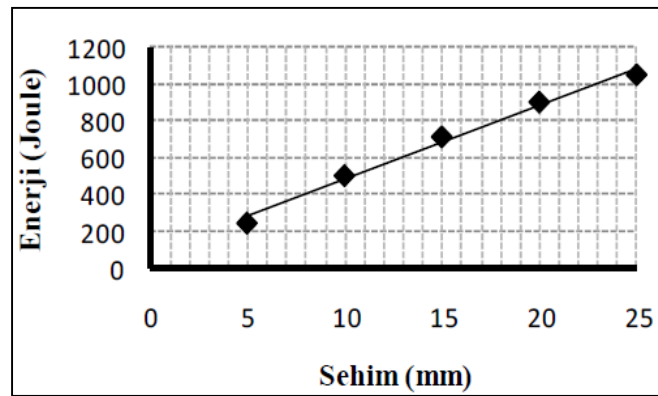
Şekil 5.4. 2 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi

Şekil 5.4' de gösterilen yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanmış ve tokluk değerleri joule cinsinden bulunarak enerji-deformasyon grafiği oluşturulmuştur. 25 mm deformasyon (sehim) sonunda bakıldığında 2 numaralı çelik tel donatılı betonun 1043 joule' a kadar enerji yuttuğu görülmüştür. Efnarc plak betonları enerji yutma kapasitelerine göre 500 J, 700 J ve 1000 J olarak üç sınıfa ayırmıştır. 2 numaralı çelik tel donatılı beton plağı1043 joule enerji yutarak en iyi performans sınıfı olan “c” tokluk sınıfına girmektedir.



Şekil 5.5. 3 no'lu çelik tel donatılı betonun yük-sehim eğrisi

3 no' lu çelik telli beton plak 0,22 mm sehimde iken ilk çatlak yükü yaklaşık 31 kN olarak tespit edilmiştir. Beton ilk çatlaktan sonra yük dayanımını çelik tellere devretmiştir. Plak numunesi çelik tellerin devreye girmesiyle yaklaşık 61 kN yüke dayanarak pik yapmış ve yaklaşık 8,26 mm sehime kadar zaman zaman kırılmaya devam ederek dayanım göstermiştir. Yaklaşık 52 kN' a kadar dayanım gösteren beton sünek bir davranış göstererek lineer bir yük düşüşü gözlenmiştir.



Şekil 5.6. 3 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi

Şekil 5.6' de gösterilen yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanmış ve tokluk değerleri joule cinsinden bulunarak enerji-deformasyon grafiği oluşturulmuştur. 25 mm deformasyon (sehim) sonunda bakıldığında 3 numaralı çelik tel donatılı betonun

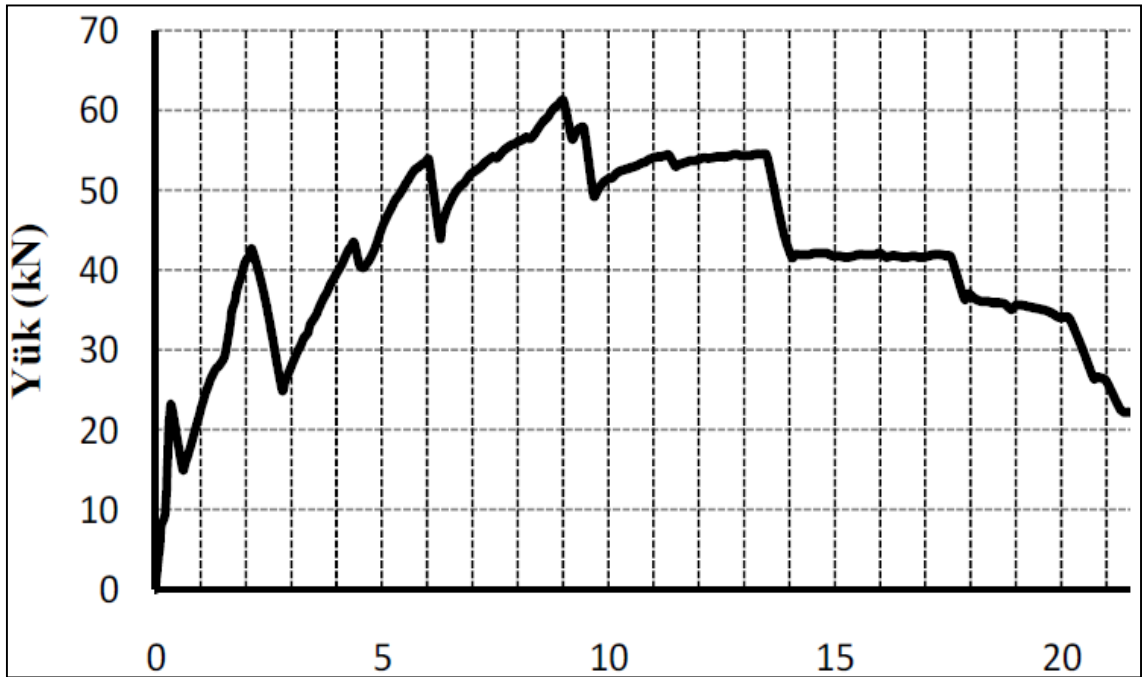
1055joule' a kadar enerji yuttuğu görülmüştür. 3 numaralı çelik tel donatılı beton plağı1055 joule enerji yutarak, Efnarc tokluk sınıfında en iyi performans sınıfı olan “c” tokluk sınıfına girmektedir.



Fotoğraf 5.1. Çelik tel donatılı betonların deney sonrası görünüşleri

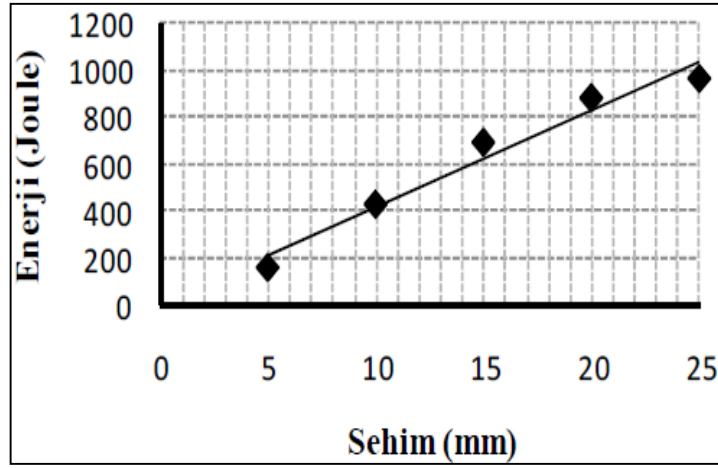
Çelik hasır donatılı beton plaklar

1, 2 ve 3 no' lu çelik hasır donatılı betonların doğrusal modelleme yöntemi ile elde edilen yük-sehim grafikleri Şekil 5.7, 5.9 ve 5.11' de, enerji-sehim grafikleri Şekil 5.8, 5.10 ve 5.12' de verilmiştir.



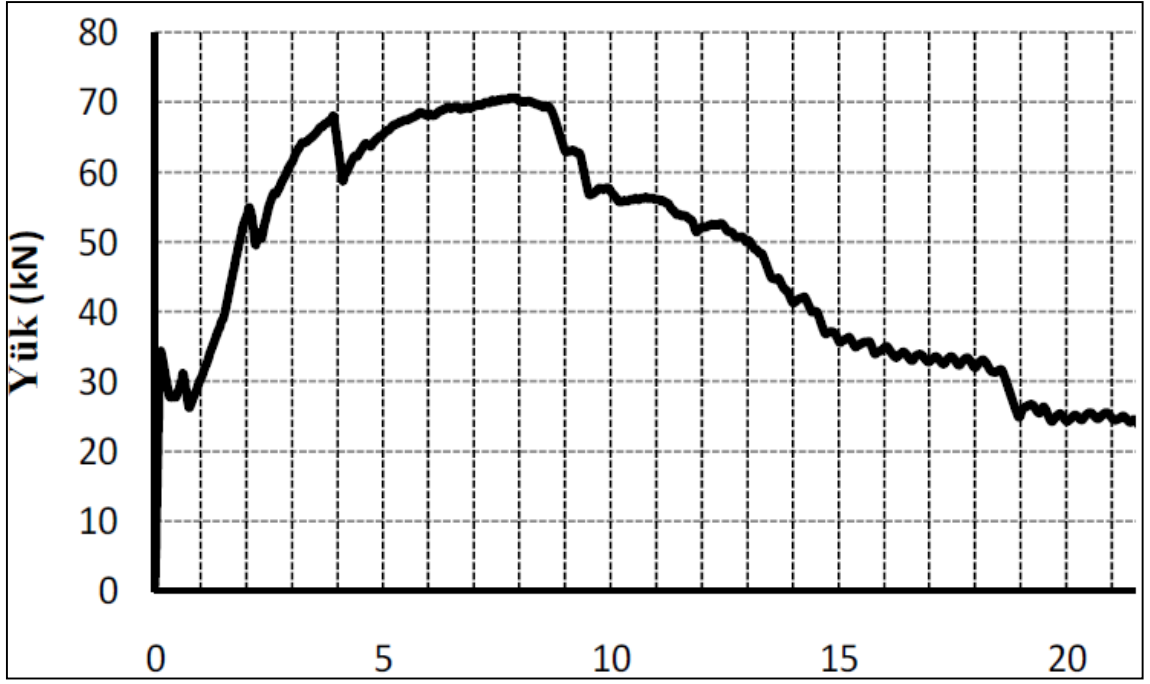
Şekil 5.7. 1 no'lu çelik hasır donatılı betonun yük-sehim eğrisi

Şekil incelendiğinde plak 0,42 mm sehimde iken yaklaşık 23 kN yüke dayandıktan sonra çatlamış ve beton içindeki çelik hasır gerilmeyi üzerine alarak tekrar dayanım göstermiştir. Plak numunesi 8,12 mm sehimde 61 kN ile maksimum yük seviyesine ulaşmıştır. Ardından gevrek biçimde kırılarak ve yük taşımaya devam ederek parçalanma göstermiştir. 1 no' lu plak numunesinde kırılmanın fazla olmasının nedeninin inen kolun çelik hasır boşluğuna denk gelerek gevrek kırılmayı ve dağılmayı hızlandırması olarak tespit edilmiştir.



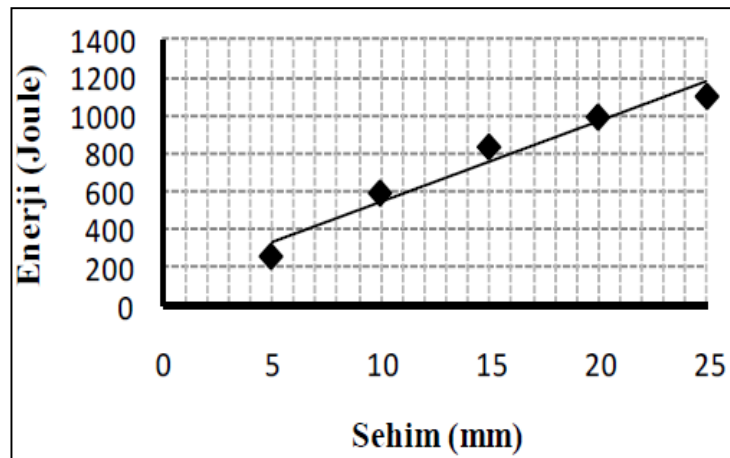
Şekil 5.8. 1 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi

Şekil 5.8' de gösterilen 1 numaralı çelik hasır donatılı plağa ait yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanmış ve tokluk değerleri joule cinsinden bulunarak enerji-deformasyon grafiği oluşturulmuştur. 25 mm deformasyon (sehim) sonunda bakıldığında 1 numaralı çelik hasır donatılı betonun 957 joule' a kadar enerji yuttuğu görülmüştür. Efnarc plak betonları enerji yutma kapasitelerine göre 500 J, 700 J ve 1000 J olarak üç sınıfa ayırmıştır. 1 numaralı çelik hasır donatılı beton plağı 957 joule enerji yutarak "b" tokluk sınıfı içinde olduğu tespit edilmiştir.



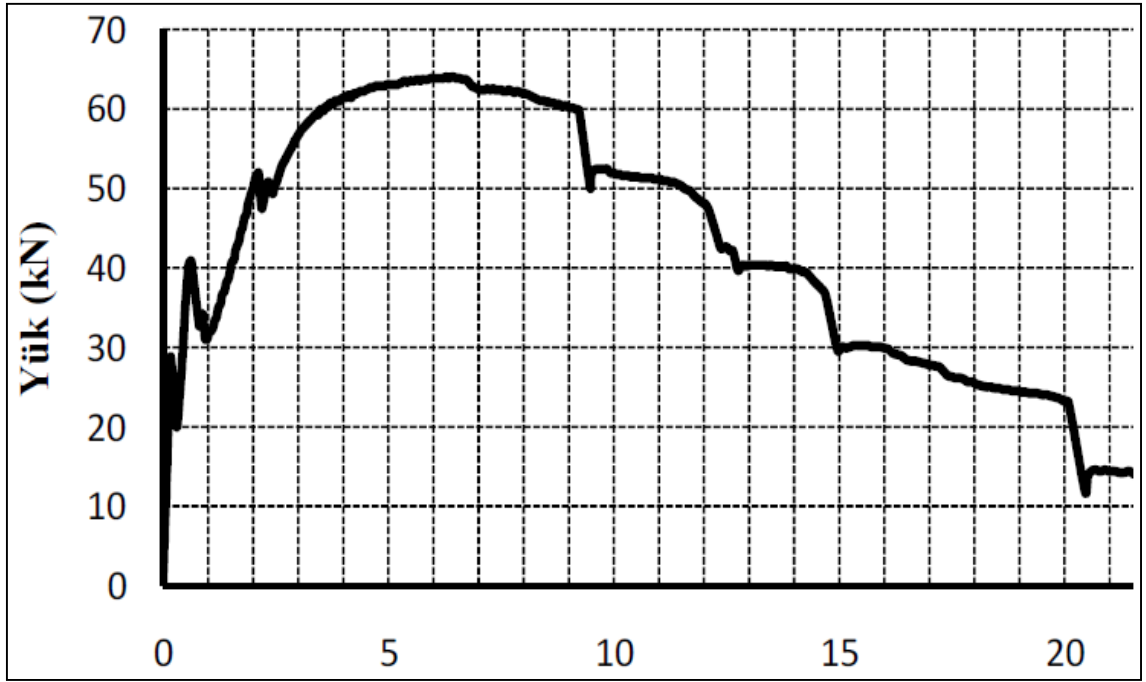
Şekil 5.9. 2 no'lu çelik hasır donatılı betonun yük-sehim eğrisi

2 no' lu çelik hasır donatılı plak numunesi 0,18 mm sehimde iken yaklaşık 35 kN yüke dayandıktan sonra ufak çatlamalara maruz kalmış ve beton içindeki çelik hasır gerilmeyi üzerine alarak dayanım devam etmiştir. Plak numunesi 2 defa daha büyük kırılma gösterdikten sonra 7,82 mm deplasmanda yaklaşık 71 kN yük ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Daha sonra plak numunesi 25 mm deplasmana kadar gevrek biçimde kırılarak ve yük taşımaya devam ederek parçalanma göstermiştir. 1 numaralı plak numunesinde görülen aşırı kırılma ve dağılma, inen kolun boşluk yerine çelik hasır donatısı üzerine baskı uygulaması nedeniyle bu plak numunesinde görülmemiştir.



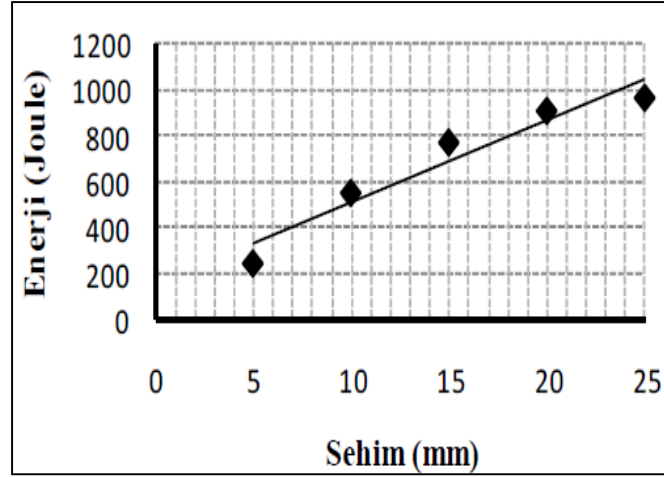
Şekil 5.10. 2 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi

Şekil 5.10' da gösterilen 2 numaralı çelik hasır donatılı plağa ait yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanmış ve tokluk değerleri joule cinsinden bulunarak enerji-deformasyon grafiği oluşturulmuştur. 25 mm deformasyon (sehim) sonunda bakıldığında 1 numaralı çelik hasır donatılı betonun 1109 joule' a kadar enerji yuttuğu görülmüştür. Efnarc plak betonları enerji yutma kapasitelerine göre 500 J, 700 J ve 1000 J olarak üç sınıfa ayırmıştır. 2 numaralı çelik hasır donatılı beton plağı 1109 joule enerji yutarak “c” tokluk sınıfı içinde olduğu tespit edilmiştir.



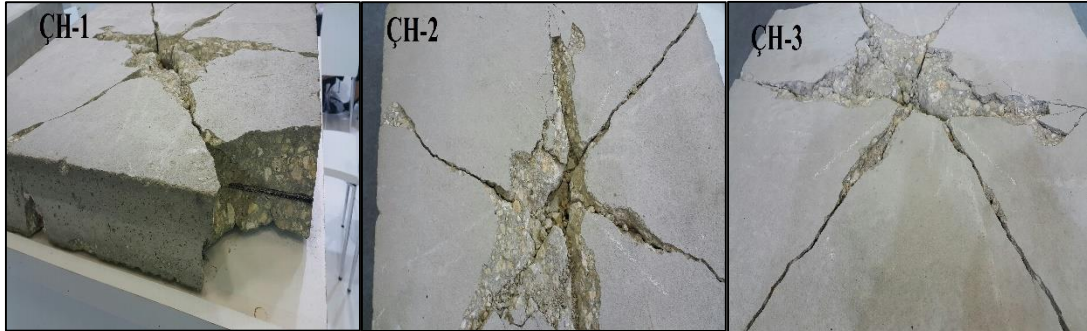
Şekil 5.11. 3 no'lu çelik hasır donatılı betonun yük-sehim eğrisi

3 no' lu çelik hasır donatılı plak numunesi 0,22 mm sehimde 29 kN yük karşılığıyla ilk çatlama maruz kalmıştır. Büyük çatlak ve dağılmaların ardından plak numunesi içindeki donatının yükü karşılması sebebiyle 6,62 mm sehimde yaklaşık 64 kN yük taşıyarak maksimum seviyeye ulaşmıştır. Ardından büyük parçalanma ve dağılmalar devam ederek 25 mm deplamana kadar betonun yük karşılama potansiyeli düşerek devam etmiştir. 1 no' lu plakta görülen aşırı dökülme ve ufalanmalar bu plak numunesinde gözlenmemiş ve grafikte diğer plaklara göre lineer bir çıkış ve düşüş tespit edilmiştir.



Şekil 5.12. 3 no' lu plakta yutulan enerji-sehim eğrisi

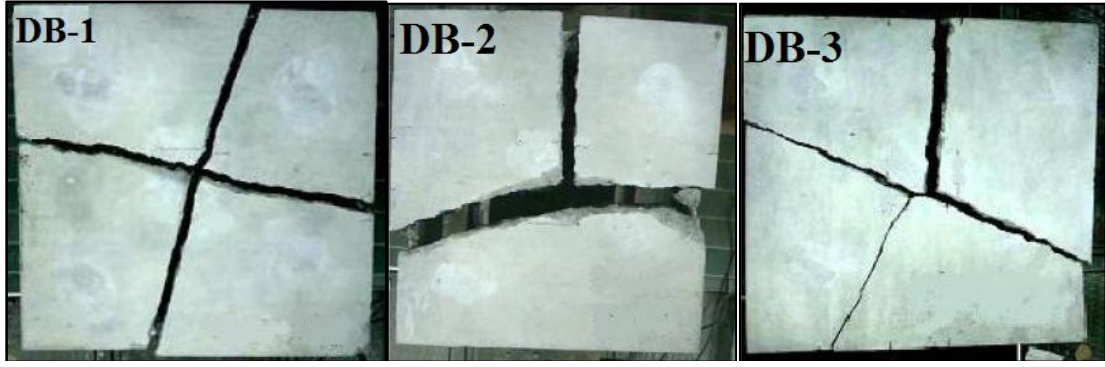
Şekil 5.12' de gösterilen 3 numaralı çelik hasır donatılı plağa ait yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanmış ve tokluk değerleri joule cinsinden bulunarak enerji-deformasyon grafiği oluşturulmuştur. 25 mm deplasman (sehim) sonunda bakıldığında 3 numaralı çelik hasır donatılı betonun 962 joule' a kadar enerji yuttuğu görülmüştür. Efnarc plak betonları enerji yutma kapasitelerine göre 500 J, 700 J ve 1000 J olarak üç sınıfa ayırmıştır. 3 numaralı çelik hasır donatılı beton plağı 962 joule enerji yutarak “b” tokluk sınıfı içinde olduğu görülmüştür (Fotoğraf 5.2).



Fotoğraf 5.2. Çelik hasır donatılı betonların deney sonrası görünümü

Yalın (donatısız) beton plaklar

Bu plaklarda yalnızca maksimum yük kaydedilmiş olup ani gevrek kırılmaları nedeniyle sehimler kaydedilmemiş ve dolayısıyla enerji değerleri elde edilememiştir. Bu plaklara ait maksimum yükler 23,8 - 24,6 - 41,2 kN olup ortalaması 29,8 kN' dur.



Fotoğraf 5.3. Donatısız beton plakların deney sonrası görünümleri

Çelik tel ve çelik hasır donatılı beton plak numunelerinin enerji yutma kapasitelerinin ortalamaları Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Çelik tel ve çelik hasır donatılı plaklara ait deney sonuçları

Plak No	Çelik Tel Donatılı Plak		Çelik hasır Donatılı Plak	
	Maksimum Yük (kN)	Tokluk (Joule)	Maksimum Yük (kN)	Tokluk (Joule)
1	56	892	61	957
2	60	1043	71	1109
3	61	1055	64	962
	Ortalama:	996	Ortalama	1009

6. SONUÇLAR

Çelik tel donatılı beton, çelik hasır donatılı beton ve donatısız beton numuneleri üzerine yapılan çökme (slump) deneyi, ve-be deneyi, birim hacim ağırlık tayini, basınç dayanımı deneyi ve plak testi deneylerinden elde edilen verilerle yapılan istatistiksel değerlendirmeler sonunda;

- Taze betonların çelik tel katılmadan önce çökme değerleri tasarlanan çökme değerlerinden 3 cm fazla çıkmıştır. Çelik teller betonun çökme değerini veya işlenebilirliği azalan değerde etkilemektedirler.
- Taze betona katılan çelik lifler işlenebilirliği düşürdüğünden dolayı Ve-Be süresini arttırmışlardır.
- Taze betonların birim hacim ağırlıkları; azalan slump ile düşmüş, ilave edilen çelik tel ile yükselme göstermiştir. Slump değerleri ve çelik tel takviyesi betonların birim ağırlıklarını önemli ölçüde etkilemiştir.
- Literatürde liflerin betonun basınç dayanımı üzerinde önemli etkiye bulunmadığı varsayılmaktadır. Çalışmada küp numuneleri üzerine yapılan deneyler bu savı kısmen doğrulamıştır. C 20/25 dayanım sınıfında tasarlanan betonlarda 28 günlük basınç dayanımlarında önemli bir fark görülmemiştir.
- Çelik lifin betonların basınç dayanımları üzerindeki etkisi lif ilavesine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Taze betona katılan çelik liflerin beton içindeki varlığı ile basınç dayanımı arasında bir genelleme yapılamamıştır. Lifler betonların basınç dayanımlarını yönelim ve dağılımlarından dolayı hem olumlu hem de olumsuz yönde etkilemiştir.
- Betona çelik lif ve çelik hasır ilave edilmesi ile tokluğun veya enerji yutma kapasitesinin çok önemli oranda arttığı görülmüştür. Buna karşın

donatısız plakların ilk çatlaktan sonra parçalara ayrılarak tokluk adına herhangi bir değer veremeyeceği gözlemlenmiştir.

- Betonla yüksek aderans veren çelik tel ve çelik hasır plakları ilk çatlak anına kadar ortak çalışması nedeniyle donatısız betonlara göre daha yüksek ilk çatlak yüküne sahip olduğu gözlenememiştir. Bunun yanında basınç dayanımı deneylerinde çelik telli küp numunelerinin dayanımı azalan veya artan yönde etkilemesi, donatılı beton plaklarının ilk çatlak yükü ile ilgili genelleme yapılamamasına kanaat getirmiştir.
- Çelik tel ve çelik hasır donatılı plaklar son yüklemde ilk çatlaktakinden daha fazla yük taşıırken, bu durum çelik tel ve çelik hasırların betondan daha çok yük taşıdığını göstermiştir.
- Çelik telli betonların, çelik hasır ve donatısız betonlara göre ilk çatlak genişliğinde azalma gözlemlenmiştir.
- Betonda kullanılan çelik lifler, lifsiz betonun gerilme-şekil değiştirme yeteneğini önemli derecede etkilemiştir.
- Hasır çelik donatılı plakların kırılma yüklerinin yüksek olmasına karşın, inen kolda ani düşüş oluşmuş, dolayısıyla yarı-gevrek türde göçtükleri görülmüştür. Bu plaklarda 25 mm' lik sehimden önce elemandan kopmalar olduğu gözlemlenmiştir.
- Çelik tel donatılı plaklarda tepe noktasından sonra inen kolda ani düşüş sergilenmiş ve dolayısıyla daha sünek davranış gösterdikleri görülmüştür. Bu plaklarda 25 mm' lik sehime kadar herhangi bir parça kopması oluşmamıştır.
- Yüksek dayanımlı betonların içinde çelik lifli donatı kullanılmasının malzemenin kırılma sırasında gevrek davranış göstermesini engellediği

görülmüştür. Çelik lif donatısı içermeyen plaklar çok gevrek bir şekilde kırılıp ufalanırken, çelik lif donatı içeren numuneler yüksek miktarda enerji yutarak kontrollü ve uzun sürede kırılmışlardır. Bu özellik ile yüksek dayanımlı malzemelerde en önemli sorun olan gevrek davranış ortadan kalkmakta, dolayısıyla ani göçme ihtimali çok azalmaktadır.

- Çelik tellerin beton içinde homojen dağılı halde bulunması, betona yük binerken dağılıp ufalanmasını engellediği görülmüştür. Buna karşınçelik hasırların betonun tamamına yayılamaması beton içinde büyük parçalanma ve kopmalara sebebiyet vermiştir.
- Yapılan plak testleri sonunda, 25 kg/m³ dozajlı iki ucu kancalı çelik tellerin 996 Joule enerji yuttuğu, Q221x221 çift kat çelik hasırın ise 1009 Joule enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüş, bu iki donatının benzer dizaynlı beton içindeki tokluk seviyelerinin hemen hemen eşit olduğu görülmüştür.
- Donatısız beton plakların ilk çatlak anından sonra büyük parçalara ayrıldığı gözlemlenmiştir. Bu plaklarla ilgili enerji yutma kapasitelerine ilişkin bir yorum yapılamamıştır.
- Tüm bu sonuçlar ele alındığında tünellerde püskürtme beton içinde yaygın olarak kullanılan çelik hasırlar yerine, aynı enerji yutma kapasitesine sahip olduğu gözlenen çelik tellerin kullanılabilceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

ACI 544 Committee 544. *State of The Art-Report Fiber Reinforced Concrete*, Concrete International Pp9-25. May, 1982.

ACI COMMITTEE 544.4R-88, 1988. *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. ACI Structural Journal, Committee Report, USA.

ACI 506.2-95 1995. *Specification for Shotcrete*, American Concrete Institute.

ACI Committee 544, *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI 544.1R-96, 1996.

Aktaş, B., 2007. Çelik Lifli Hafif Beton ile İmal Edilmiş Betonarme Kirişlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisan Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.

Anonim, 1992. TS 10513, “Çelik Teller – Beton Takviyesinde Kullanılan”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1992.

Anonim, 2002. TS EN 197-2, “Çimento- Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

Anonim, 2002. TS EN 12350-2, Taze Beton Kıvam Deneyi (çökme hunisi metodu ile), *Türk Standartları Enstitüsü*.

Anonim, 2002. TS EN 12390-5, Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

Anonim, 2003. TS EN 12390-3, Beton Basınç Mukavemeti Deney Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*.

Altun, F., Özcan, D. M., Vekli, M. ve Karahan, O. 2004. “Çelik Lif Katkılı C20 Betonun Mekanik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması”, Afyon Kocatepe Üniversitesi, *Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt-4, Sayı 1-2, Ekim, Afyon.

Arioğlu, E. ve Girgin,C., 1998.Çelik Lifli Püskürtme Beton Kaplama Tasarımı Kaya Patlama Olayına Maruz Tünellerde Kullanım, *4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 22-23 Ekim 1998, Zonguldak.

ARSLAN, A. ve AYDIN, A., 1999.Lifli Betonların Darbe Etkisi Altında Genel Özellikleri,*Beksa Lifli Beton Semineri*, Sabancı Center, İstanbul.

ASTM C 1018 Standardı, 1997.*Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete*, 10 December 1997.

Ayış, H., 2010.Tünel Açma Sistemlerinde Çelik Lifli Püskürtme Betonun Uygulanabilirliği, *Yüksek Lisans Tezi*, 2010.

Barr ve Norr, 1983.*Betonların Tokluk İndeks Kapasitesinin İncelenmesi*.

Bekaert, 1998.*Dramix Hakkında Genel Bilgier Klavuzu*. Bekaert, Belgium.

Bekaert, 2001.*Çelik Teller Hakkında Genel Bilgiler Kılavuzu*. Bekaert, Belgium.

Bekaert, 2011.*Çelik Tel Donatılı Püskürtme Beton Uygulama ve Test Yöntemleri*, Bekaert, Belgium.

Beksa Firması, Çelik Tel Takviyeli Beton Özellikleri, *Beksa Broşürleri Basımevi*, İzmit, 1998.

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi, 1994, “*Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton*” MLZ-878: 9-75, Ankara.

Elmacı, Ö., 2005.Lif Katkılı Betonun Elastisite Modülü Üzerine Kür Ortamının Etkisi, *6. Ulusal Beton Kongresi*, 16-18 Kasım, İstanbul, s. 157.

Erdoğan, T.Y., 2003. *Beton, O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü 1. Baskı*, O.D.T.Ü. Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

Ersoy, U., 1985. *Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı*, Cilt 1, 3. Baskı, Evrim Kitabevi, İstanbul.

Grzybowski, M. and Shah, S.P., 1990. *Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete*, ACI Materials Journal, Technical Paper, March – April 1990, Vol. 87, No. 2, pp. 123-129.

http://www.cayirovademircelik.com/images/stories/celik_hasir/Q_tipi_celik_hasir.pdf, 2015.

<http://www.hasircelik.com/index-7.html>, 2015.

KURUGÖL, S., 1997. Çelik Tel Donatı ve Polimer Katkının Normal ve Hafif Betonların Mukavemet Özelliklerine Etkileri. *Mimarsinan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İstanbul, 155s.

Lambrechts, A., 2011. Wins European Inventor Award 2011, <http://www.bekaert.com/en/about-us/news-room/news/bekaert-researcher-ann-lambrechts-wins-european-inventor-award-2011>

Morgan, D.R. and Mowat, D.N., 1979. *A Comparative Evaluation of Plain Mesh and Steel Fiber Reinforced Shotcrete*, Hardy Associates, International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Detroit, September, 1982.

Özbayoğlu, F. ve Kenet, L., 1989. Püskürtme Betonu Uygulamalarında Çelik Fiber Kullanımının Dayanım Üzerindeki Etkileri, *Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı*, 9 –12 Ekim 1989 Ankara T.M.M.O.B İnşaat Mühendisleri Odası Cilt 2.p 507-522.

Rice, J.L., 1975. *Fibroos Concrete Pavement Design Summary*, U.S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Lab., Report M-134, June 1975.

Shah, S. P. and Rangan, B.V. 1971. "Fiber Reinforced Concrete Properties", *ACI Journal*, pp.126-135, February.

Shah, S.P., 1983.*Properties of Concrete Subjected to Impact, Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 7, pp. 1727-1741.

Swamy, R.N. and Mannat, P.S., 1974.A *Theory for the Flexural Strength of Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research*, Vol. 4, No.2, pp. 313-325.

Şimşek, S., 1997. Lifli Betonlar Üzerine Bir Çalışma, *G.Ü., Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi*, Ankara.

Taşdemir, M. A., Çelik Lif Takviyeli Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Davranışı, *Beksa Sempozyum Notları*, 1999.

Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Şamhal, E. ve Yerlikaya, M., Endüstriyel Zemin Betonları, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 450 s*, 2006.

TS-2940 Taze Betondan Numune Alma Metotları. *Türk Standartları Enstitüsü*,Ankara.1978.

TS 3285, Betonun Eğilmede Çekme Dayanımını Tayini Deneyi(Orta Noktasından Yüklenmiş Basit Kiriş Metodu İle), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1979.

TS 802, Beton Karışım Hesap Esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1985.

TS 3114, Betonda Basınç Mukavemeti Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1990.

TS 10513, Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1992.

TS 10514, 1992. Beton-Çelik Tel Takviyeli-Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

TSE 10515, “Beton – Çelik Tel Takviyeli–Eğilme Mukavemeti Deney Metodu”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 1992.

TSE 1247 ve TS 1248, 1989. Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.

TS EN 12390-1, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 1:Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.

TS EN 12390-2, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.

TS EN 12390-4, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 4: Basınç Dayanımı-Deney Makinalarının Özellikleri. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.

TS EN 12390-3, 2003. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.

TS 706 EN 12620, 2003. Beton Agregaları. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.

UĞURLU, A., 1994. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton. **DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Dairesi Başkanlığı**, Yayın No: MLZ-878, 175s, Ankara.

Uyan, M., 1985. Lifli Betonların Genel Özellikleri ve Gelişimi, **İ.T.Ü., Malzeme Semineri**, Makale, İstanbul.

Ünal, O., 1994. Isıl İşlem Uygulamasının Lifli Beton Özelliklerine Etkisi, **İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi**, İstanbul.

Ünlütepe, A., 2005.**Marmaray BCI Projesi ve Ölçme Çalışmaları**, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2.Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu , 23-25 Kasım 2005, İ.T.Ü-İstanbul.

Yalçın, M., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A. ve Gökalp, İ., “Normal Ve Yüksek Dayanımlı Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Performans Sınıfları”, **XVI. Ulusal Mekanik Kongresi**, 22-26 Haziran, Kayseri, 2009.

Yalçın, M. Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Gökalp, İ. ve Yerlikaya, M., “Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanılabilirlik ve Taşıma Gücü Sınır Durumlarına Göre Tasarımı - Performans Sınıfları”, **8. Ulusal Beton Kongresi**, 5-7 Ekim, İzmir, 459-470, 2011.

Yerlikaya, M., 1994, **Çelik Tel Donatılı Zemin Betonları Tasarım ve Yapım İlkeleri**. Beksa, <http://www.bekaert.com>, 1994.

Yerlikaya, M., 2006. “Endüstriyel Zemin Betonları”, 450, **İMO İstanbul Şubesi**, İstanbul.

Yıldırım, S.T., 2002. Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması, **F.Ü. Fen Bil. Ens., Doktora Tezi**, Elazığ.

Yiğiter, H., 2002. Yüksek Performanslı Betonların Süneklilik Özelliklerinin Araştırılması, **DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi**, İzmir.

Yurdakul, Ş., 2001. Püskürtme Beton Teknolojisinin TTK Ocakları Ana Galerilerinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi**, Eylül 2001, Zonguldak

ÖZ GEÇMİŞ

Onur Gökçe, 30.05.1987 tarihinde Üsküdar'da doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini İstanbul'da tamamladı. 2006 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden haziran 2011'de mezun oldu. 2012-2014 yılları arasında hes, hızlı tren ve metro tünel inşaatlarında saha mühendisi olarak çalıştı. 2012 yılında Niğde Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Ayrıca 2011 yılından itibaren Tünel İnşaat Sektöründe Jeoloji Mühendisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.