

LİFLİ GEÇİRİMLİ BETON YOL ÜSTYAPISININ İNCELENMESİ

83035

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Cem CEYLAN

501950208011

83035

Tezin Enstitüye Veriliş Tarihi : 14 Nisan 1999

Tezin Savunulduğu Tarih : 5 Mayıs 1999

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Güven ÖZTAŞ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Emine AĞAR
: Doç. Dr. İlhan SÜTAŞ

EC. MÜH.
DOKÜMAN

ENSTİTÜSÜ
MERKEZİ

MAYIS 1999

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresinde değerli yardımlarını esirgemeyen aileme ve çalışmalarımın hazırlanmasında büyük katkıları bulunan değerli Hocam Sn. Doç. Dr. Güven Öztaş'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Cem CEYLAN

MAYIS 1999



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
BÖLÜM I. GİRİŞ	1
BÖLÜM II. LİFLİ BETON	3
2.1. Lifli Beton Tanımı	3
2.2. Çelik Lifler	4
2.3. Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı	7
2.4. Çelik Liflerin Betona Kazandırdığı Nitelikler	7
2.5. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Teknik Özellikleri	8
2.5.1. Taze Beton Özellikleri	9
2.5.2. Sertleştirilmiş Beton Özellikleri	9
2.5.2.1. Basınç Dayanımı	9
2.5.2.2. Enerji Emme Kapasitesi (Tokluk)	11
2.5.2.3. Eğilmede Çekme Dayanımı	14
2.5.2.4. Yorulma Dayanımı	15
2.5.2.5. Darbe Dayanımı	15
2.5.2.6. Dayanıklılık	15
2.6. Çelik Lif Takviyeli Beton Karışım Esasları Ve Karışım Teknikleri	15
2.6.1. Karışım Esasları	15
2.6.2. Karışım Teknikleri	16
2.7. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Kullanım Alanları	17
BÖLÜM III. GEÇİRİMLİ ÜSTYAPILAR	18

3.1. Geçirimli Üstyapıların Tanımı	18
3.2. Geçirimli Üstyapıların Seçim Kriterleri	18
3.2.1. Geçirimli Üstyapıların Faydaları	18
3.2.2. Geçirimli Üstyapıların Sakıncaları	19
3.3. Geçirimli Üstyapıların Kullanım Amaçları Ve Sınırlamaları.	20
BÖLÜM IV. GEÇİRİMLİ ÜSTYAPILARIN ÖZELLİKLERİ	22
4.1. Geçirimli Üstyapıların Yapısı (Bileşimi)	22
4.2. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	23
4.3. Geçirimli Üstyapıların Yüzey Özellikleri	23
4.3.1. Aderans	23
4.3.2. Gürültü	24
4.4. Geçirimli Üstyapıların Yapısal Özellikleri	24
4.4.1. Geçirimsiz Alt Tabaka	25
4.4.2. Temel Tabakasındaki Doğrusal Bombeler	26
4.5. Geçirimli Üstyapıların Hidrolik Özellikleri	26
4.6. Geçirimli Üstyapıların Özelliklerinin Zamanla Değişimi	26
BÖLÜM V. LİFLİ GEÇİRİMLİ BETON ÜSTYAPILAR	28
5.1. Lifli Geçirimli Beton Üstyapıların Tanımı	28
BÖLÜM VI. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	30
6.1. Malzemelerin Tanımlanması	30
6.1.1. Çimento	30
6.1.2. Agregası	31
6.1.2.1. Özgül Ağırlık Deneyi	32
6.1.2.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi	32
6.1.2.3. Aşınma Deneyi (Los Angeles)	33
6.1.3. Çelik Lifler	34
6.2. Beton Karışımları	34
6.2.1. Kabul Edilen Esaslar	34
6.2.2. Beton Birleşimi	35
6.2.3. Beton Üretimi	35
6.3. Üretilen Beton Numunelerinin Fiziksel Özellikleri	36
6.3.1. Pratik Birim Hacim Ağırlık Deneyi	36
6.3.2. Teorik Birim Hacim Ağırlık Deneyi	37
6.3.3. Boşluk Oranı	38
6.3.4. Prizma Deneyleri	39

BÖLÜM VII. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	44
7.1. Betonun Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi	44
7.2. Optimum Karışımla İlgili Değerlendirmeler	47
BÖLÜM VIII SONUÇLAR VE ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	51



TABLO LİSTESİ

TABLO 2.1	Değişik Cins Liflere Ait Fiziksel Özellikler	4
TABLO 2.2	Çelik Liflere Ait Fiziksel Özellikler	5
TABLO 2.3	Lifli Betonda Meydana Gelen İyileşmeler	9
TABLO 2.4	Beton Sınıflarına Ait Karakteristik Özellikler	10
TABLO 2.5	Tokluk (Elastik Şekil Değiştirme) İndekslerinin Değerlendirme Kriterleri	14
TABLO 2.6	Betona İlave Edilebilen Maksimum Tel Miktarı (kg/m³)	17
TABLO 4.1	Geçirimli Üstyapılar İçin Örnek Bir Beton Karışımının Bileşim Oranları	22
TABLO 5.1	Uygulamalarda Önerilen Çelik Lif Tipleri Ve Dozajları	28
TABLO 6.1	Agrega Özgöl Ağırlıkları	32
TABLO 6.2	Agrega Birim Hacim Ağırlıkları	32
TABLO 6.3a	Birinci Grup 1 m³ Beton Bileşimi İçin Gerçek Malzeme Miktarı.	35
TABLO 6.3b	İkinci Grup 1 m³ Beton Bileşimi İçin Gerçek Malzeme Miktarı.	35
TABLO 6.4	Taze Beton Birim Hacim Ağırlıkları.	37
TABLO 6.5	Teorik Birim Hacim Ağırlıkları.	38
TABLO 6.6	Boşluk Oranı.	38
TABLO 6.7	7 Günlük Birinci Grup Kiriş Numunelerinin Eğilme - Çekme Direnci Hesap Tablosu.	42
TABLO 6.8	28 Günlük Birinci Grup Kiriş Numunelerinin Eğilme - Çekme Direnci Hesap Tablosu.	42
TABLO 6.9	7 Günlük İkinci Grup Kiriş Numunelerinin Eğilme - Çekme Direnci Hesap Tablosu.	43
TABLO 7.1	Birinci Grup Deneysel Çalışma Sonuçlarına Ait Özet Tablo.	44
TABLO 7.2	İkinci Grup Deneysel Çalışma Sonuçlarına Ait Özet Tablo.	46

ŞEKİL LİSTESİ

ŞEKİL 2.1	Çelik Lif Tipleri	5
ŞEKİL 2.2	Çelik Lifli Betona Ait Tipik Yük-Deformasyon Eğrisi	12
ŞEKİL 2.3	Çelik Tel Takviyeli Beton Numunesinin Eğilme Mukavemetinin Hesaplanması için Deney Düzeneği.	13
ŞEKİL 2.4	Yük - Sehim Eğrisi.	13
ŞEKİL 4.1	Lifli Geçirimli Beton Üstyapı Enkesiti.	25
ŞEKİL 6.1	Los Angeles Deney Düzeneği.	34
ŞEKİL 6.2	Numunelerin Islak Çuvallar Arasında Bekletilmesi.	36
ŞEKİL 6.3	Prizma Deney Düzeneği.	39
ŞEKİL 6.4	Eğilme - Çekme Deney Düzeneğinin Genel Görünüşleri.	40
ŞEKİL 6.5	Numunenin Kırıldıktan Sonraki Durumu.	41



SEMBOL LİSTESİ

σ_u	: En büyük gerilme (N/mm ²)
P_u	: Maksimum yük (N)
σ_e	: Öngörülen eğilme gerilmesi (N/mm ²)
T_b	: Şekil değiştirme (Nmm.)
δ_{tb}	: Sehim
L	: Deney numunesinin iki mesnedi arasındaki uzunluğu(mm)
b	: Kırılma yüzeyi kesit genişliği(mm)
h	: Deney numunesi yüksekliği (mm)
$\sigma_{emn.}$	: Emniyet gerilmesi (N/mm ²)
n	: Emniyet katsayısı
D	: Teorik birim hacim ağırlığı,
P_{agrega}	: Karışımdaki agreganın ağırlıkça yüzdesi
δ_{agrega}	: Agreganın özgül ağırlığı
$P_{çimento}$	: Karışımdaki çimentonun ağırlıkça yüzdesi
$\delta_{çimento}$	: Çimentonun özgül ağırlığı
P_{su}	: Karışımdaki su ağırlıkça yüzdesi
δ_{su}	: Suyun özgül ağırlığı
$P_{çelik lif}$	: Karışımdaki çelik lifin ağırlıkça yüzdesi
$\delta_{çelik lif}$	: Çelik lifin özgül ağırlığı
P	: Silindir içine konulan agrega miktarı (gr)
P_u	: Elek üstünde kalan parçalanmış malzeme miktarı (gr)

LİFLİ GEÇİRİMLİ BETON YOL ÜSTYAPISININ İNCELENMESİ

ÖZET

Ulaştırma türlerinden biri olan karayolu ulaşımının gelişmesiyle, karayolunun mekanik ve fiziksel özellikleri önem kazanmıştır. Bu sebeple araştırmacılar, yol koşullarını en iyi düzeye çıkartmayı amaç edinmiştir.

Bu çalışmada, yeni bir üst yapı tipi olan “lifli geçirimli beton yol üstyapısı” sekiz bölümde incelenmiştir. Bu tip üstyapıların kullanımına, gelişmiş ülkelerde rastlanmaktadır. Ülkemizde ise bu konuyla ilgili bir uygulama yoktur.

Çalışmanın Giriş Bölümünde modern bir yoldan beklenen özellikler belirtilmiştir. Lifli beton ve geçirimli üstyapılar tanıtılmış, dünyadaki uygulama alanlarından söz edilmiştir.

Çalışmanın İkinci Bölümünde, lifli beton hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın Üçüncü Bölümünde, geçirimli üstyapıların tanımı, kullanım çeşitleri, faydaları ve sakıncaları hakkındaki genel bilgiler sunulmuştur.

Geçirimli üstyapıların mekanik ve fiziksel özellikleri Dördüncü Bölümde verilmiştir.

Lifli geçirimli beton üstyapıların tanımı, kullanıldıkları yerler ve özellikleri Bölüm 5’te bahsedilmiştir.

Deneysel çalışmaları içeren Bölüm 6’da, iki grup halinde ve her bir grupta beş karışım seçeneği üzerinde çalışma yapılmıştır. İlk grup seçeneklerde su/çimento oranı ve çelik lif dozajı sabit tutularak, farklı boyutlardaki agreganın ağırlıkça yüzdeleri değiştirilmiştir. Bu ilk grup beş seçeneğin, birim hacim ağırlığı, eğilme - çekme dayanım değerleri ölçülmüştür. İkinci grup seçeneklerde ise su/çimento oranı sabit ve çelik lif dozajı değişken tutularak, birim hacim ağırlığı, eğilme - çekme dayanım değerleri ölçülmüştür.

Çalışmanın Yedinci Bölümünde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırması, beş farklı seçeneğin birim hacim ağırlığı, eğilme-çekme direnci üzerindeki etkisi ile yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının son bölümünde, konuyla ilgili olarak sonuçlar verilmiştir.



INVESTIGATION OF THE FIBER POROUS CONCRETE ROAD SURFACING

SUMMARY

By the development of road transportation which is a way of transportation system physical and chemical features of road are getting important. Therefore, experts are objected to rise the road conditions to the best level.

In this study , one of the new road surfacing type which is “ **the fiber porous concrete road surfacing**” has been investigated in eight parts. This type of road surfacing is found in developing countries. However in our country, there are not this type of applications.

In the introduction of the study, the properties that is expected to be in a modern road is pointed. The fiber porous concrete road surfacing is introduced and also mentioned about application fields of the fiber porous concrete road surfacing.

In the second part of the study, detailed information about the fiber porous concrete road surfacing is given.

In the third part of the study, the general information about; the fiber porous concrete road surfacing descriptions, application types, advantages and disadvantages is declined.

Mechanical and physical properties of the fiber porous concrete road surfacing is given in the fourth part.

Description of the fiber porous concrete road surfacing, application fields and properties have mentioned in the fifth part.

In part six which includes the experimental studies, mixing alternative has studied. In this alternative proportion by keeping the percentage of steel dosage and water-cement constant, the percentages of the aggregate in terms of weight have changed. These first five alternatives have measured in terms of unit volume weight and resistance of pulling - attraction.

In the seventh part of the study, the comparison of the results which are maintained by the experimental studies, unit volume weight of five different alternatives, resistance of pulling - attraction have made.

In the very final part of this thesis, the general results about the subjects have given.



BÖLÜM I. GİRİŞ

İnsanların ulaşım ihtiyaçlarını tekerlekli taşıtlarla gidermeye başlamalarından bu yana, tekerlekli taşıtların, üzerinde kolayca hareket edebilecekleri, üzeri kaplanmış arazi şeritleri inşa edilmeye başlanmıştır. Bu arazi şeritlerinde üstyapı olarak, genellikle geçirimsiz üstyapı kullanılmıştır. Bu geçirimsiz üstyapılardan biri de beton plaklı üstyapıdır.

Beton, inşaat mühendisliğinde çok geniş uygulama alanı bulan bir malzemedir. Günümüzde betonun değişik alanlarda kullanılması sonucu beton teknolojisinde bir anlamda zorunlu gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler sonucu beton, yeni teknolojiler ve yeni malzemeler yardımıyla kullanıldığı ortamda karşılaştığı fiziksel ve kimyasal etkilere karşı güçlendirilerek ondan beklenen klasik niteliklerinin çok üzerinde hizmet verebilecek bir yapı malzemesi haline gelmiştir.

Modern bir yoldan beklenen özellikler çok sayıdadır. Hatta bu özellikler birbirleri ile çelişirler. Yolu yapan ve işletenlerin yolu, aşağıdaki hususlarda gerçekleştirmeleri ve uzun süre korumaları gerekir.

Taşıt sürücüsü, fren tedbirlerine başvurduğu zaman, yol yüzeyi ile tekerlek bandajları arasında, yağışlı havada bile emniyetli bir sürtünme katsayısı sağlanmalıdır.

Taşıt sürücüsü, bir yatay kurbu dönerken, yolun enine reaksiyonları, taşıtı belirli bir yörüngede tutabilmelidir.

Yol yüzeyinde girinti çıkıntı olmamalıdır. Girinti ve çıkıntılar, taşıtın düşey yönde sarsılmasına sebep olurlar. Sarsıntı ise yolcular ve taşıtlar için sakıncalar yaratır.

Yol sağlam olmalıdır. Trafik etkisi, frenleme ve dönüş etkisi ve tekrarlanan yükler altında uzun yıllar aynı kalitede kalabilmelidir.

Yol üstyapısı ekonomik olmalıdır. Büyük bakım ve yenileme masrafları gerektirmemelidir.

Konfor ve güvenlik üzerinde, yola gelen yağış sularının uzaklaştırılması ve yağış anında görüş koşulları gibi özellikler etkilidir. Yol üstyapısında oluşacak su filmi, kayma - sürtünme direncini azaltarak taşıtların kızaklanma tehlikesini artırır. Yol yüzeyine gelen yağış suları, yolun yüzeyindeki enine eğimle uzaklaştırılabildiği gibi yolun üstyapısını geçirimli inşa ederek de drene edilebilir. Yağış anında taşıt seyir hızlarının azalma nedeni, öndeki taşıtların su sıçratmasıyla arkadaki taşıtların görüş mesafesinin azalmasıdır. Geçirimli üstyapılar, yol yüzeyinde su birikimine engel olduklarından taşıtların su sıçratması önemli ölçüde azalır. Drenaj ve görüş koşulları ile ilgili bütün bu faydalardan başka, bu tip üstyapıların yüzeyi boşluklu olduğundan, trafiğin oluşturduğu gürültü, kaplama tarafından emilerek, taşıtların çevreye verdiği rahatsızlık, normal tip üstyapıya göre daha azdır.

Geçirimli üstyapılarla ilgili ilk çalışmalar, 1967 yılında İngiltere’de, orta trafik koşullarında yapılmış, daha sonra ağır trafik koşulları altındaki durum araştırılmıştır. Danimarka ve Norveç’te de otoyollarda ve havaalanlarında kullanılmıştır. USA’da Dallas’taki askeri havaalanında, Hollanda’da otoyollarda uygulanmıştır. Fransa’da ise Nantes deneme yolunda incelenmiş, Paris şehri içinde ve şehirlerarası yollarda geçirimli üstyapılar uygulanmıştır.

Lifli geçirimli beton yol üstyapılarının uygulanması henüz ülkemizde mevcut değildir. Bu konudaki eksikliği biraz olsun azaltmak ve bu tip üstyapıların önemini vurgulamak için, bu tez çalışmasında lifli geçirimli beton yol üstyapısı özelliklerinin incelenmesi amaç edinilmiştir.

BÖLÜM II. LİFLİ BETON

2.1. Lifli Beton Tanımı

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş kompozit malzeme olan beton içerisine çeşitli yöntemler ile değişik miktarlarda (çelik, cam, plastik vb.) liflerin katılması ile elde edilen malzemeye **lifli beton** denilmektedir[3].

Belirli özellikleri olan liflerle homojen olarak takviye edilmiş olan lifli beton, ilk görünüşte normal beton karışımlarına benzemesine rağmen değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betondan oldukça farklı bir özellik gösterir. Liflerin beton içerisinde gelişi güzel dağılımına rağmen lifli beton yük altında homojen bir malzeme olarak davranır.

Betonun içerisinde bulunan değişik gerilmeler, malzeme içerisindeki mikro çatlaklar nedeniyle düzensizdirler. Beton içine katılan lifler matrisini takviye ederek beton içerisinde, üzerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak rol oynarlar. Beton içine dağılmış olan liflerin çatlak sonlarına bitişik olmasından dolayı lifler, çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri kendi üzerlerine ve çatlamamış bölgelere naklederler. Özellikle çelik liflerin kullanılması durumunda kompozit davranışı, çelik liflerin yüksek çekme gerilmesi nedeniyle daha belirgindir[4]. Kısacası liflerle güçlendirilmiş beton;

- Yüksek elastik mukavemet ve çatlamaya karşı yüksek dayanımı,
- Çok yüksek enerji yutma kapasitesi ve darbe dayanımı,
- Yorulma ve kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım,
- Yüksek plastik deformasyon derecelerinde yük taşıyabilme kapasitesi demektir.

Lifleri tanımlayan en önemli öge, lifin sahip olduğu mekanik ile onun sayısal bir parametre gibi ifade edilmesini sağlayan biçimsel özellikleridir. Bunlar;

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

Tablo 2.1'de çelik liflerin mekanik özelliklerinin diğer liflerle karşılaştırılması yapılmaktadır.

TABLO 2.1 Değişik Cins Liflere Ait Fiziksel Özellikler

LİF CİNSİ	ÇEKME DAYANIMI (Mpa)	ELASTİSİTE MODÜLÜ (10^3 Mpa)	MAKSİMUM UZAMA (%)	ÖZGÜL KÜTLE (gr/cm^3)
Akrilik	207 - 414	2,1	25 - 45	1,1
Asbestler	552 - 966	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
Polietilen	690	0,14 - 0,4	10	0,95
Polipropilen	552 - 759	3,5	25	0,90
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

Beton içerisindeki lifler, statik hesaplarda eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmemelidir. Beton içerisindeki çelik lifler, betonun yapısını değiştiren ve ona plastik davranış özelliği kazandıran bir malzeme olarak görülebilir. Çelik lifli betonun özelliği, onun artırılmış plastik davranışı ve enerji tutma yeteneğidir. Özellikle kritik yüklemelerde beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik liflerin beton içerisindeki işlevi daha iyi anlaşılır.

2.2. Çelik Lifler

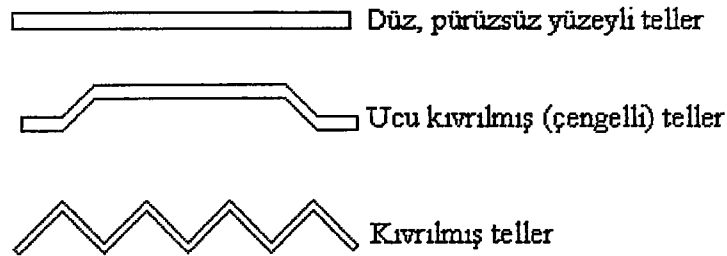
Çelik lifler, düşük karbonlu çelik C1008'den üretilmişlerdir. En önemli özellikleri yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özellikleridir. Çekme gerilmeleri ortalama olarak 1200 N/mm^2 olup elastiklik limitleri %0,2'nin altındadır. Çelik liflerin geometrik şekilleri, çekme gerilmeleri, çap ve uzunlukları arasında belli bir oran vardır. Kullanılan çelik liflerin çapları 0,13 ile 1,0 mm. olup uzunluk/çap oranları 30 ile 150 arasında değişmektedir. Lif boyları 13 mm.'den 70 mm.'ye kadar

değişmektedir. Lif hacim fraksiyonu (V_f) diye tanımlanan ve betondaki belirli bir yüzey alandaki lif alanını gösteren lif hacmi de %0,5 ile %3 arasında değişmektedir. Liflere ait bazı fiziksel özellikler tablo 2.2'de gösterilmektedir.

TABLO 2.2 Çelik Liflere Ait Fiziksel Özellikler

Lif Türü	Özgül Ağırlık (gr/cm 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 1	1,90	380	1,8	0,5
b-Tip 2	1,90	230	2,6	1
Polipropilen	0,90	5	0,5	20
Naylon (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	2,6	80	2-4	2-3,5
Çelik	7,80	200	1-3	3-4

Lifler, şekil olarak düz, dalgalandırılmış (kıvrımlı) olabileceği gibi uçları bükülmüş de olabilir. Çelik liflerin betonun içindeki performansı bu malzemelerin uzunluk/çap oranı, beton içerisindeki konsantrasyonu ve liflerin yapısı ile de yakından ilgili olduğu için uygulamada çeşitli tip lifler bulunmaktadır. Şekil 2.1'de de çeşitli çelik lif tipleri görülmektedir[1].



ŞEKİL 2.1 Çelik Lif Tipleri

Özellikle çekme ve kesme kuvvetlerine çalışan liflerin beton ile aderansı lifli betonun işlevini olumlu ya da olumsuz yönde etkiler. Dalgalandırılmış ve uçları bükülmüş liflerin çekme kuvvetleri etkisi ile matrilden 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 matrilden sıyrılması, lifli betonun performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli öğedir. Bu olay harç fazının yapısı ile ilgili olmakla birlikte kullanılan liflerin geometrik yapısı ile de ilgilidir.

Çelik lifler ile güçlendirilmiş betonların genel uygulamalarında yüzeyi kaplanmamış çelik teller kullanılır. Bu tellerin tek sakıncası, özellikle beton vibrasyonlu master ile yerleştirilmiyorsa, açıkta kalan tellerin paslanarak yüzeyinde kırmızı pas lekeleri meydana getirmesidir. Aşırı paslanmanın olabileceği durumlarda ya da estetik kaygının ağır bastığı kaplamalarda ve ön yapımlı beton elemanlarda galvanize liflerin kullanılması daha uygundur. Isıya dayanıklı ve su ile doğrudan temas eden betonlarda ise paslanmaz çelik liflerin kullanılması gerekir. Bu liflerin teknik özellikleri diğerleri ile aynı olup sadece korozyona karşı daha dirençlidirler.

Taşımada ve kullanımda kolaylık açısından 10 veya 30 adedi suda kolay eriyebilen ya da mekanik etkilerle kopabilen bir tutkal ile yapıştırılmıştır. Tutkal tipi, kullanıma ve karışıma bağlı olarak iki çeşit olup çözülme süreleri;

- P tipi tutkal, birkaç saniye,
- C tipi tutkal, 30 ile 60 saniye arasındadır.

Çelik lif özellikleri ile ilgili iki önemli parametre mevcuttur[1]:

1. Her lifin çekme dayanımının 310 N/mm^2 (3100 kgf/cm^2)'den az olmamalıdır.
2. 16°C 'nin üzerindeki ortamlarda $3,18 \text{ mm}$ 'lik bir çap çevresinde yapılacak lif eğilme deneyinde teste tabi tutulan liflerin %90'ının kırılmaksızın 90° eğilme kabiliyeti gösterebilmelidir.

Bu özellikler, betonda kullanılan liflerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir mukavemet ile davranabilmesine olanak sağlar. Çelik liflerin sünek davranış göstermesi betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi için de gerekli bir parametredir.

2.3. Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı

Çelik liflerin beton içerisindeki işlevi ile betonda kullanılan donatı çeliğinin işlevi birbirine karıştırılmamalıdır. Birçok yerde donatı ve çelik lif belli bir yere kadar aynı işlevi görebilir. Fakat bunlar arasındaki en önemli fark beton içerisindeki fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü ne zaman yaptıklarıdır.

Statik hesaplamalarda, homojen bir malzeme olarak çelik lifler eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmemelidir. Çelik lifleri betonun yapısını değiştiren ve onu plastik davranışa zorlayan bir malzeme olarak görülebilir. Çelik lifli betonun özelliği, onun artırılmış elastikiyet ve enerji yutma yeteneğidir. Özellikle kritik yüklemelerde, beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik liflerin beton içerisindeki davranışı daha iyi açıklanır.

Çelik lifler en büyük etkiyi, çatlakların ilk oluşum anında, çatlak sonlarındaki gerilmeleri kendi üstlerine ve sağlam alanlara transfer ederek işlevlerini yerine getirirler. Ayrıca içerisine çelik liflerin katılması ile performansında büyük artışlar görülen betonun tokluk, ilk çatlak dayanımı, kavitasyon - erozyon dayanımı, yorulma dayanımı ve çarpma dayanımı gibi özellikleri, işlev açısından daha farklı davranış gösterecek ve onun matris özelliklerini değiştirecek bir malzeme olan çelik liflere karşı daha duyarlıdır.

2.4. Çelik Liflerin Betona Kazandırdığı Nitelikler

Çelik liflerle güçlendirilmiş beton, özellikle kavitasyon - erozyon dayanımı, darbe dayanımı, ilk çatlak oluşum dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, deformasyon kapasitesi ve tokluk açısından lifsiz betondan çok daha iyi performans gösterir. Betonun bu özelliklerindeki performans artışı liflerin beton içerisindeki davranışı, betonun bu özelliklere karşı tepkisi, betonda ilk çatlak ve nihai yükte meydana gelen kopma olayı ile açıklanabilir. Yukarıda sıralanan özellikler liflerden en fazla etkilenen kompozit özellikleridir.

Liflerle güçlendirilmiş betonda, değişik gerilmeler ya da değişik nedenlerle meydana gelmiş çatlaklardan her biri çatlak ucuna yakın bir yerdeki bir lif ile takviye edilmiştir. Beton içerisinde lif bulunmaması durumunda, betona herhangi bir gerilme

uygulandığında meydana gelen mikro çatlaklar, gerilmenin artması ile birlikte çeşitli yönlerde doğru yayılarak belli bir gerilme değerinde betonun parçalanmasına neden olurlar.

Liflerle güçlendirilmiş beton kompozitlerinde ise betonun kırılma mekaniği değişiktir. Bu kompozitlerde ilk çatlağın oluşmasından sonra çimento hamuru fazından çelik liflere doğru bir gerilme transferi meydana gelir. Bunun sonucu, beton içerisindeki miktar ve geometrik özelliklerine bağlı olarak çelik lifler, bu gerilmelerin bir kısmını kendi üzerlerinde taşıdıkları gibi bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine transfer ederek yayarlar.

Lifsiz betonda başlangıçta gerilmenin artması ile meydana gelen çatlağın yayılması için gerekli enerji düşüktür ve genellikle böyle bir çatlağın başlatılması için gereken enerjinin yarısı kadardır. Beton içerisinde lif bulunması halinde ise başlangıçtaki mikro çatlağı meydana getiren enerji, lifler aracılığı ile çatlağın yanındaki sağlam çimento hamuru fazı bölgelerine aktarılır. Bu nedenle çatlağın yayılması ya da büyümesi için daha fazla enerji gerekir. Böyle bir enerjinin bulunması durumunda bile bu enerjinin büyük bir bölümü lifler tarafından taşınır ve bu taşıma, liflerin çimento hamuru matrisinden çekilip sıyrılması için gerekli enerji seviyesine kadar devam eder. Bu enerjinin sağlanması için çok büyük bir kuvvet gereklidir. Nihai yüke ulaşıldıktan (beton kırıldıktan) sonra bile çelik lifler, kırılan beton parçalarını bir arada tutmaya devam ederek nihai yükten bir miktar daha fazlasını da taşımaya devam ederler.

2.5. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Teknik Özellikleri

Normal beton içerisine değişik miktarlarda ve belli özelliklerde çelik liflerin katılması ile elde edilen lifli beton teknik olarak normal betonun zayıf olan bir çok özelliğini iyileştirerek performansını artırır. Bu iyileşmeler tablo 2.3'te özetlenmiştir.

TABLO 2.3 Lifli Betonda Meydana Gelen İyileşmeler

BETONUN ÖZELLİĞİ	ARTIŞ (%)
Tokluk	100-1200
Darbe Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-100
Nihai Eğilme Dayanımı	50-100
Yorulma Dayanımı	50-100
Deformasyon Kapasitesi	50-100
Basınç Dayanımı	±25
Kavitasyon-Erozyon Dayanımı	300
Elastisite Modülü	±25

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

2.5.1. Taze Beton Özellikleri

Taze beton özelliği denince akla gelen ilk kavram olan işlenebilirlik, betonun taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve homojenliği ile yakından ilgilidir. Yukarıda anılan ve taze betonla ilgili olan bu unsurların sertleşmiş beton özellikleri ve betonun performansı üzerinde önemli derecede bir etkisi vardır. Şimdiye kadar yapılmış olan tüm çalışmalarda betona lif ilave edilmesi ile 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.

2.5.2. Sertleştirilmiş Beton Özellikleri

2.5.2.1. Basınç Dayanımı

Betonun mekanik dayanımları arasında en çok inceleneni, bir anlamda en önemlisi basınç dayanımıdır. Bunun nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Beton gevrek bir malzemedir. Basit mukavemet değerleri arasında en yüksek olanı basınç, en düşük olanı çekmedir. Pratik olarak betonun hiç çekme gerilmesi almadığı, hemen çatladığı varsayılır ve beton sadece basınca çalıştırılır.
- Basınç dayanımını saptamakla betonun niteliği hakkında global bir değerlendirme yapılabilir.
- Basınç dayanımı deneyi diğer denetleme deneylerine oranla en kolaydır.
- Basınç dayanımının saptanmasında belli standart koşullara uyulmaktadır.

Bu koşullar şunlardır:

1. Numune şekli
2. Numune boyutları
3. Numune yaşı
4. Numunenin saklanma koşulları.

Basınç dayanımı standart silindir (15 cm. çap, 30 cm. yükseklik) veya küpler (10, 15, veya 20 cm. kenarlı) üzerinde belirlenir. Basınç dayanımı, üretimi izleyen 28. günde belirlenir. Pratik yönden dayanım 7. ve 90. günlerde de belirlenir. Ancak beton sınıfını belirten dayanım 28.gündeki dayanımdır. Basınç numuneleri deney gününe kadar 20 °C sıcaklıkta kirece doymun su içinde tutulur. Tablo 2.4'te de beton sınıfları ve basınç dayanımları gösterilmektedir.

TABLO 2.4 Beton Sınıflarına Ait Karakteristik Özellikler

Beton Sınıfı	Silindir Basınç Dayanımı (N/mm ² veya MPa)	Küp Basınç Dayanımı (N/mm ² veya MPa)
BS12	12	15
BS16	16	20
BS20	20	25
BS25	25	30
BS30	30	35
BS35	35	40
BS40	40	45

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar üzerinde yapılmış değişik araştırma sonuçlarına göre lifler, betonun basıncını her zaman doğrudan olumlu etkilememektedir. Basınç dayanımı artışı %25 seviyesinde görülebileceği gibi bu düzeyde bir dayanım kaybı ortaya çıkmaktadır. Bu durum beton içerisine gelişigüzel dağılan liflerin yönelimi ile doğrudan ilgilidir. Yükleme düzlemine dik olan lifler betonun basınç gerilmesinde herhangi bir işlev yüklenmezler. Kesikli çizgilerle gösterilmiş olan lifler ise yükleme

düzlemine paralellikleri ölçüsünde basınç gerilmesi artmasına duyarlıdır. Basınç dayanımının nihai yükünde belirli bir artış olmamasına karşın çelik lifli beton tek eksenli yükleme altında daha sünek davranabilmektedir.

2.5.2.2. Enerji Emme Kapasitesi (Tokluk)

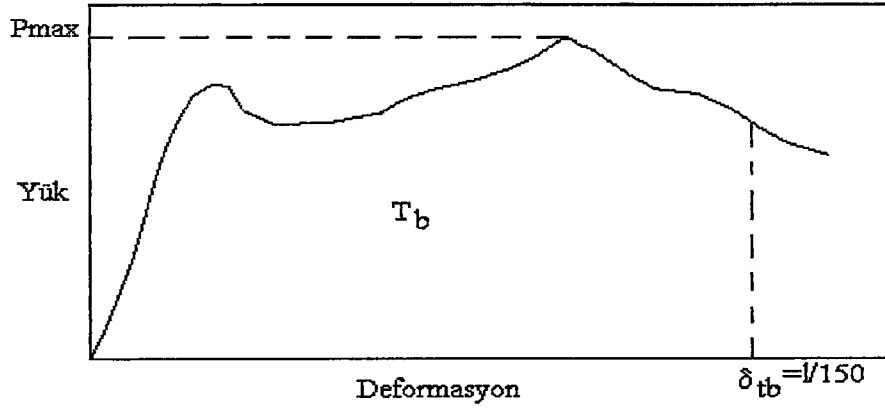
Betonun eğilme yükleri altında enerji absorblaması olarak tanımlanan bu kavram, gerek statik gerekse dinamik yüklemelerde betonun eğilme kuvvetleri altındaki deformasyonu sırasında yapılan işi artırarak betona aynı gerilme ölçeğinde daha yüksek deformasyon yapabilme yeteneği kazandırır[2].

Normal betonlar çekme mukavemetleri altında çok küçük taşıma ve deformasyon gösterirler. Bu betonun kırılgan yapısı ile açıklanabilir. Betonun çekme gerilmelerine karşı gösterdiği bu performans, düşüklüğü beton içerisine çelik çubuklar koyarak çekme mukavemetinin artırılmasıyla nisbeten telafi edilmektedir. Bu klasik çözüme rağmen beton matrisinin gerilmeler altında beton içerisindeki çelik gibi davranmaktan uzak bir davranış gösterilmesi, malzeme mühendislerini, hem çekme mukavemetlerini arttıracak hem de yük altında betonda meydana gelen çatlakları önleyerek betonu sünek davranmaya zorlayacak, yani taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıyabilecek yeni malzeme aramaya yöneltmiştir.

Tokluk, beton değerlendirilmesinde kullanılan yeni bir kavram olup betonun yük - deformasyon eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile bulunur. Lifli kompozitlerde **tokluk**, daha çok **eşdeğer çekme dayanımı** (eğilmedeki tokluk, σ_e) olarak değerlendirilir. Eşdeğer çekme dayanımı, betonun çatlama sırasındaki gerilmesidir. Lifli beton tokluğunu açıklamada eşdeğer çekme dayanımı olarak adlandırılan kavram, maksimum çekme dayanımı (σ_u) veya **kırılma modülü** olarak adlandırılan kırılma anındaki çekme gerilmesini gösteren kavramdan daha açıklayıcıdır.

Şekil 2.2'de çelik lifli betonun tipik bir Yük- Deformasyon eğrisi görülmektedir[2]. Buradan da görüleceği üzere maksimum çekme dayanımı (σ_u) ve **kırılma modülü** (R_u) nihai yük (P_{max})'dan , eşdeğer çekme dayanımı ise yük - deformasyon eğrisi altında kalan (T_b) alanın hesaplanmasıyla bulunur. Burada dikkat edilmesi gerekli husus da şekilde görülen yük - deformasyon eğrisi ve bu eğri altında kalan alanın

deney numunesi boyutlarından, deney düzeneği yükleme tipinden ve yükleme hızından etkileneceği gerçektir.



ŞEKİL 2.2 Çelik Lifli Betona Ait Tipik Yük-Deformasyon Eğrisi

Şekil 2.3'te deney düzeneği ile yapılan deney sonucunda yük-deformasyon eğrisi grafiğinde eğilme dayanımı kriterleri de şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_e = (T_b / \delta_{tb}) * (1/bh^2) \quad (2.1)$$

$$\sigma_u (R_u) = P_{max} / bh^2 \quad (2.2)$$

$$\sigma_{emn.} = \sigma_e / n \quad (2.3)$$

Burada;

σ_u = En büyük gerilme (N/mm²),

P_u = Maksimum yük (N),

σ_e = Öngörülen eğilme gerilmesi (N/mm²),

T_b = Şekil değiştirme (3 mm.'lik sehime kadar eğri altında kalan alan)(Nmm.),

δ_{tb} = Sehim = 3mm. (mesnetler arası açıklığın [450 mm.] 1 / 150 ölçüsündeki deformasyon,

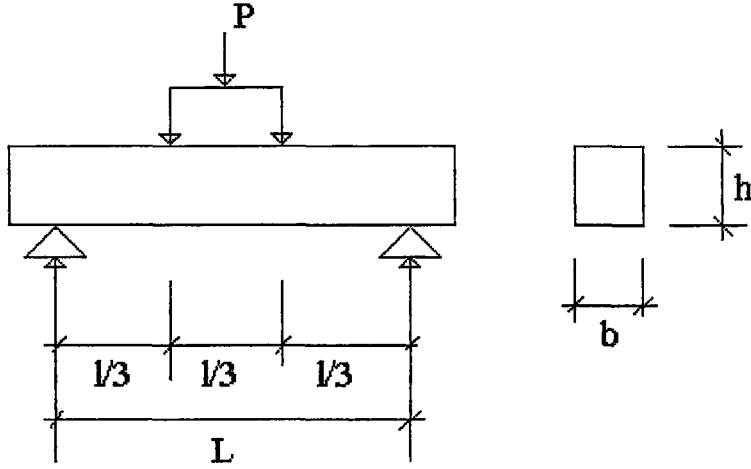
L = Deney numunesinin iki mesneti arasındaki uzunluğu(mm),

b = Kırılma yüzeyi kesit genişliği(mm),

h = Deney numunesi yüksekliği (mm),

$\sigma_{emn.}$ = Emniyet gerilmesi (N/mm²),

n = Emniyet katsayısı'dır.

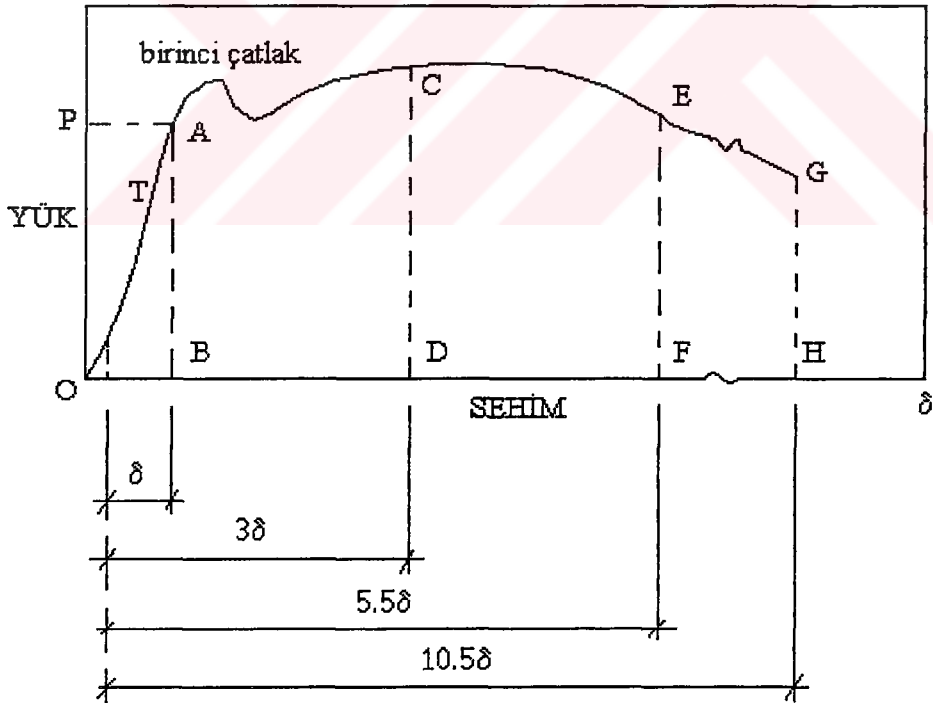


ŞEKİL 2.3 Çelik Tel Takviyeli Beton Numunesinin Eğilme Mukavemetinin Hesaplanması için Deney Düzeneği.

Tokluk indeksi, çelik lifli betonların elastik-plastik davranışını açıklayabilmek amacıyla geliştirilmiş bir kavramdır. Şekil 2.4'te ilk çatlama gerilmesi olan A noktasına kadar olan yük-deformasyon eğrisinin altındaki OAB üçgeninin alanı belirlenir. Bu alan ilk çatlak tokluğudur, ilk çatlak tokluğu 2.4 formülüyle hesaplanır.

$$\text{İlk çatlak tokluğu} = P \cdot \delta / 2$$

(2.4)



ŞEKİL 2.4 Yük - Sehim Eğrisi.

Numunenin, ilk çatlak gerilmesi alanın 3 katındaki deformasyon (sehim) değerine kadar yüklenerek OACD alanı (şekil 2.4'te) belirlenir. Bu alan OAB ilk çatlak gerilmesi alanının 3 katıdır. Bulunan OACD alanı ilk çatlak alanına (OAB) bölüldüğünde I_5 elastik şekil değiştirme indeksi hesaplanır[2].

I_{10} ve I_{20} indeksleri ise ilk çatlak gerilmesinin 5.5 ve 10.5 katı kadar yapılan deformasyonlar sonucu bulunan alanların ilk çatlak alanına bölünmesiyle bulunur[2].

Çelik lifli betonlarda deneyler sonucu çizilen yük - deformasyon eğrisi altında kalan alan üzerinden hesaplanan I_5 , I_{10} , I_{20} , elastik şekil değiştirme indeksleri gerçek performansın kolayca anlaşılabilirliğini ve referans betonla karşılaştırılmasını sağlar. Bu endeksler ilk çatlak anına kadar doğrusal elastik davranış ve daha sonra da meydana gelen plastik davranışı açıklar. Elastik şekil değiştirme indeksleri değerlendirilirken tablo 2.5'teki değerler esas alınır.

TABLO 2.5 Tokluk (Elastik Şekil Değiştirme) İndekslerinin Değerlendirme Kriterleri

Baz Alan (Şekil 2.4)	İndeks	Eğilme Kriteri	Lifsiz beton	Elastik - Plastik Malzeme	Lifli Beton İçin Aralık
OACD	I_5	3	1,0	5,0	1-6
OAEF	I_{10}	5,5	1,0	10,0	1-12
OAGH	I_{20}	10,5	1,0	20,0	1-25

2.5.2.3. Eğilmede Çekme Dayanımı

Çelik lifli betonlarda Eğilmede Kırılma Modülü olarak tanımlanan bu özellik, betonun yük-deformasyon eğrisi çizilirken maksimum yükte meydana gelen gerilmenin bulunması ile belirlenir[2]. Çelik lifli betonların nihai eğilme dayanımları normal betonlara göre %50-100 arasında artış göstermektedir. Bu artış, Çelik liflerin yüksek çekme dayanımlarından ileri gelmektedir. İlk çatlak oluşumundan sonra liflerin çatlak zonlarından gerilme transferi ve dağılımı yapması nedeniyle yük, ilk çatlaktan sonra bir miktar daha artar.

Eğilme dayanımı da liflerle güçlendirilmiş betonların diğer özellikleri gibi lif hacmi fraksiyonundan, lif geometrisi ve uzunluğundan, deney numunesi (kiriş) yüksekliğinden ve liflerin beton içerisindeki yönelmesinden etkilenmektedir.

2.5.2.4. Yorulma Dayanımı

Lifsiz betonlarda yorulma mukavemeti limiti, genel olarak statik eğilme gerilmelerinin %50'sidir. Çelik lifli betonlarda ortalama 30-40 kg/m³ lif katılması sonucu bu limit %80'lere çıkarılmıştır. Çelik lifli betonlarda çatlak yayılmasının durdurulması ve oluşan çatlakların ilerlememesi gibi özellikler nedeni ile tekrarlı yükler altında kırılma engellenir veya geciktirilir.

Çelik lifli betonun artırılmış yorulma direnci yol üst yapılarında önemli bir faktördür.

2.5.2.5. Darbe Dayanımı

Betonun ani olarak dinamik bir kuvvetle yüklenmesi anlamına gelen darbe dayanımı çelik lifli betonun özellikleri arasında önemli derecede (%100-1200 arasında) performans artışının sağlandığı bir özelliktir[4]. Bu değer direkt olarak, enerji tutma kapasitesi ile ilgilidir. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun şok alma direnci normal betondan 10 ile 30 kat daha yüksektir.

2.5.2.6. Dayanıklılık

Lifsiz betonlarda olduğu gibi lifli betonlarda da iyi karışım, iyi yerleştirme ve sıkıştırma sonrasında yapılacak iyi bir kür çalışması sonucu lifli betonlarda ortaya çıkabilecek dayanıklılık sorunu önlenmiş olur.

2.6. Çelik Lif Takviyeli Beton Karışım Esasları Ve Karışım Teknikleri

2.6.1. Karışım Esasları

Lifsiz beton üretiminde uyulması gerekli zorunluluklar çelik lifli beton üretimi için de geçerlidir[2]. Yani kaliteli agrega, düşük su/çimento oranı, optimum çimento dozajı, yüksek kompakte ve iyi sıkıştırma gibi. Yapının maruz kalacağı gerilmeler hesaplanarak karışım için gerekli malzemeler ve hedefler buna göre belirlenmelidir.

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. Bu nedenle çelik lifli beton üretiminde, lifin davranışını etkileyen önemli parametrelerden birisi olan matris özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli sınırlamalar getirilmiştir. Aşağıda karışım esasları sıralandırılmıştır[5]:

- Su/çimento oranı 0.40 ile 0.55 arasında olmalıdır.
- Çimento miktarı 320 kg/m³ olmalıdır.
- Beton içerisindeki kum miktarı toplam agreganın en az %40-45'i olmalıdır.

2.6.2. Karışım Teknikleri

Karışım sırasında sıkça görülen iki problemten biricisi, çelik lifler bir araya gelip toplanarak karışımı güçleştirmeleri, ikicisi, karışım sırasında liflerin eğilerek deforme olmalarıdır. Bunlara benzer problemlerin ortaya çıkmaması için alınması gereken önlemler aşağıda sıralandırılmıştır[2].

- Kritik lif miktarı aşılmamalıdır. Tablo 2.6'da betona ilave edilecek maksimum tel miktarları verilmiştir.
- Lif miktarının artırılması gerekiyorsa karışımında çimento ve ince agreganın miktarı da artırılmalıdır. Fakat geçirimli üst yapılarda ince agreganın miktarının artırılması istenmeyen bir durumdur.
- İşlenebilirliği sağlamak üzere akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmalıdır.
- Birbirlerine yapışık lifler halinde betona katılan lifler tek tek ayrılınca kadar karışım devam ettirilerek üniform bir dağılım sağlanmalıdır.
- Liflerin karışıma verilmeden önce dağılmasını sağlamak amacıyla betonyer teknesinin üzerine bir sarsıcı konularak liflerin tek tek ayrılması sağlanabilir.
- Lifli beton, döküm yerine kamyon ve transmikserle nakledilebilir. Transmikser kullanıldığında, mikser düşük hızda döndürülmelidir.

TABLO 2.6 Betona İlave Edilebilen Maksimum Tel Miktarı (kg/m³)

En büyük tane çapı mm.	Uzunluk/Çap = 60		Uzunluk/Çap = 75		Uzunluk/Çap = 100	
	Normal	Pompa	Normal	Pompa	Normal	Pompa
4	160	120	125	95	95	70
8	125	95	100	75	75	55
16	85	65	70	55	55	40
32	50	40	40	30	30	25

2.7. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Kullanım Alanları

Çelik lifli beton içerisindeki davranışı ve yapısal özellikleri nedeniyle betonun birçok özelliğini güçlendirmesi sonucu çelik liflerle güçlendirilmiş beton, ağır çalışma koşullarına maruz kalan yapılarda, ince kesitlerin ve yüksek dayanım özelliklerinin gerektiği yerlerde kullanılmaktadır. Bazı yerlerde ise beton içerisinde donatı kullanmamak için ekonomik gerekçelerle kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanıldığı alanlar aşağıda sıralandırılmıştır:

- Beton yol üstyapılar,
- Endüstriyel döşemeler,
- Su yapıları,
- Püskürtme beton uygulamaları,
- Şev stabilitesi ve tünel kaplamaları,
- Havaalanı kaplama betonları,
- Liman kaplamaları,
- Depreme dayanıklı yapılar,
- Ateşe dayanıklı beton yapılar,
- Prekast elemanlar,
- Beton borular,
- Askeri güvenlik yapılarında kullanılmaktadır

BÖLÜM III. GEÇİRİMLİ ÜSTYAPILAR

3.1. Geçirimli Üstyapıların Tanımı

Geçirimli üstyapı, içindeki boşluk hacmi yüzdesi yüksek olan ve yola gelen suyun hemen kaplama tabakası içine girmesine ve suyun drenaj tesisine ulaşmasından veya taban zeminine sızmasından önce üstyapı içinde geçici olarak depo edilmesine imkan sağlayan bir üstyapı tipidir.

3.2. Geçirimli Üstyapıların Seçim Kriterleri

Gözenekli karışımların fayda ve sakıncaları aşağıda verilmiştir[9].

3.2.1. Geçirimli Üstyapıların Faydaları

Gözenekli karışımların kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliği şu özelliklere bağlıdır:

- Yağışlı ortamlarda kaplama yüzeyini kuru tutabilme kapasiteleri,
- Geçirimli ve boşluklu yüzeyler olmaları ve negatif makrodoku (makro pürüzlülük) oluşturmaları,
- Yüksek ses emme kapasiteleri,
- Kızaklanma riskini önemli ölçüde azaltır,
- Yağışlı havalarda taşıtlar tarafından çevreye sıçratılan su miktarı azalır,
- Yansıma engellenir,
- Yüksek hızlarda, kayma-sürtünme dirençleri yüksektir.
- Taşıt trafiğinin oluşturduğu gürültü azalır.

3.2.2. Geçirimli Üstyapıların Sakıncaları

Geçirimli üstyapılar, normal tip üstyapılarla karşılaştırıldığında, kullanım alanlarında göz önüne alınması gereken sınırlamalar ve sakıncalar saptanabilir. Özellikle fiziksel ve fonksiyonel dayanıklılıkları, su geçirmeyen bir tesviye yüzeyi üzerine uygulama zorunlulukları, kış bakımı ve yapısal kapasiteleri karşılaşılan bu sınırlamalara örnektir.

- Fiziksel dayanıklılık.

Geçirimli üstyapıların boşluk oranı arttıkça trafik akımına veya atmosferin yıpratıcı etkilerine karşı dirençlerinin azalması beklenmelidir. Üretimleri sırasında daha fazla bağlayıcı kullanılırsa bu durum düzeltilebilir.

- İşlevsel dayanıklılık.

Zaman içinde geçirimli üstyapıların boşluklarının dolması (siltlenme) sonucu karışım normal tip bir karışım gibi davranmaya başlar. Siltlenme olayı, karışımın en baştaki gözenekliliği azaldıkça ve hava kirliliği arttıkça hız kazanır. Araç lastiklerinin emme etkisi sonucu kaplamanın temizlenmesi dolayısıyla siltlenmenin araç tekerlek izi alanında azaldığı gözlenmiştir.

- Su geçirmeyen bir yüzey üzerinde uygulama zorunluluğu.

Geçirimli üstyapı, suyu temel tabakasına geçirmeden drenaj kanalına ulaştıracak, su geçirmeyen bir tesviye tabakası üzerine uygulanmalıdır.

- İzolasyon kontrolünün zorunluluğu.

Geçirimli üstyapı tabakaları uygulanmadan önce mevcut drenaj tabakalarının sızdırmazlığı sağlanmalıdır.

- Kış bakımı.

Gözenekli karışımlar kış aylarında yoğun makadam'dan farklı bir davranış gösterirler. Gerekli tedbirler alındığında bu durum trafik akışında tehlike teşkil etmez. Her şeyden önce bu tür kaplamalar, normal kaplamalardan ortalama 1 °C daha az

ısıya sahip olduklarından don olayına ve kar tutmasına karşı dirençleri daha düşüktür. Ayrıca yola atılan tuz, karı erittikten ve iç kısma sızdıktan sonra kısa sürede kaybolur. Bu nedenle kar yağışından önce gerekli tedbirler alınmalıdır ve kullanılan tuz miktarı iki katına çıkarılmalıdır.

- Yapısal kapasite.

Gözenekli karışımların ısı değişimlerine daha az duyarlı olduklarını ve buna ek olarak, kullanımlarının yüzey ortalama ısını düşürdüğünü göz önüne alan uygulamacılar, bu tip kaplamaların yapısal kapasitelerini klasik yoğun kaplamaların kapasiteleri ile eşdeğer tutarlar.

3.3. Geçirimli Üstyapıların Kullanım Amaçları Ve Sınırlamaları.

Geçirimli üstyapıların kullanım alanları çok geniştir. Her çeşit yol ve trafik koşulunda kullanılabilirler. Özellikle aşağıdaki alanlarda uygulanırlar.

- Ücretsiz yollar ve şehirlerarası yollarda.

Yüksek hızla seyredilen yollarda su sıçramasını engellemek, kızaklanma tehlikesini ortadan kaldırmak, trafik emniyetini ve kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılır.

- Şehir içi yollarda,

Şehir içi yollarda kullanımının ilgi görmesinin nedeni, trafik gürültülerini azaltmasıdır. Ancak şehir içi yollarda kullanımına sınırlamalar getirilmiştir. Benzin, mazot gibi bazı organik çözücülere karşı dayanıklılıkları daha düşüktür ve set veya kaldırım bulunan yerlerde drenajları problem yaratmaktadır.

- Tünellerde,

Bu tür yüzeyler, ses emme özellikleri sayesinde tünellerde kullanılabilirler.

- Yüzeysel drenaj problemi olan yol kesitlerinde,

Bu durumda yoğun karışımların kullanımı, yüzeyde su birikimine ve dolayısıyla kızaklanma problemine sebebiyet verirler. Gözenekli malzemenin kullanımı, yüzeyde su birikimine engel olur.



BÖLÜM IV. GEÇİRİMLİ ÜSTYAPILARIN ÖZELLİKLERİ

Geçirimli kaplamalarda en az %20-27 oranında boşluk bulunması istenir. Klasik yol kaplamalarında boşluk oranı, %3-5 kadardır. Kaplamanın geçirimsiz olması özellikle istenir. Geçirimli üst yapılarda ise bunun tersi amaç edinilmiştir. Geçirimli üstyapılar, klasik üst yapılara oranla daha düşük mekanik özelliklere sahiptir[10].

4.1. Geçirimli Üstyapıların Yapısı (Bileşimi)

Geniş gözenekli veya geçirimli malzeme bileşenlerinin seçimi, karışımların sahip olması gereken özelliklere ve bunların üretim, taşıma, serilme, sıkıştırılma ve kullanım koşullarına dayanır.

Geçirimli kaplama malzemelerinin temel özelliği, kendisine ses emme işlevi de kazandıran, birbiri ile bağlantılı (serme anında %20-27) boşluklara sahip olmasıdır. Bu özellik, su dolaşımını ve yüzey gürültüsünün emilmesini sağlamakla beraber, bağlayıcıları yaşlandıran hava ve ışığın gözeneklere ulaşabilmesine yol açar.

Geçirimli kaplamanın sahip olduğu yüksek boşluk oranı, malzemenin büyük miktarda kaba taneli agrega içermesinden doğar. Boşluk oranı, agrega malzemesinin granülometrik bileşiminin özenli bir şekilde incelenmesi ve oluşturulması ile sağlanmaktadır.

Aşağıda, tablo 4.1’de geçirimli üstyapı için bir beton karışımının bileşim oranları verilmiştir.

TABLO 4.1 Geçirimli Üstyapılar İçin Örnek Bir Beton Karışımının Bileşim Oranları

Malzeme Cinsi	Malzeme Miktarı [kg/m ³]
Çimento	150
Kum	300
Kırmaş I	600
Kırmaş II	100
Su	70 (lt)

4.2. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Aynı trafik için, klasik kaplamada kullanılanlardan daha dirençli (Los Angeles aşınma direnci ve Cilalanma Direnci Katsayısı açısından daha iyi) agregalar kullanılmalıdır. Bunun nedeni, taneler arasındaki değme noktaları, sıkıştırma sırasında ve trafik altında daha çok yüklenmektedir. Agregalar malzemesi, tamamen kırılmış tanelerden oluşmalıdır. Agreganın kırılmış olması, üst yapının gerek kayma direncini, gerekse mekanik direncini artırır.

Geçirimli çimento betonunun direncini yüksek tutmak için su/çimento oranı artırılarak maksimum stabilite için optimum bir değere ulaşılır. Kalıcı deformasyonlara karşı direnç, büyük boyutlu tanelerin arasındaki sürtünme ve temas ile sağlanmaya çalışılır. Burada mineral parçacıkların köşeliliği önemli bir rol oynar. Bu temaslar ve sürtünmeler trafik etkisiyle doğan sürtünmelerle yok edilemez. Kohezyon ise bağlayıcılarla sağlanmalı ve yaşlanmadan büyük çapta etkilenmemelidir. Özellikle su bulunduran ortamlarda agregalar arasında yapıştırıcı bağlar (adezyon) bulunmalıdır.

Bütün bu özellikler ve bunların zaman içindeki kararlılıkları, geçirimli kaplama malzemelerinin dayanıklılığını sağlar.

4.3. Geçirimli Üstyapıların Yüzey Özellikleri

Bu konu aderans ve gürültü açısından incelenmiştir.

4.3.1. Aderans

Taşıt güvenliğinin sağlanabilmesi için kaplama yüzeyi ile tekerlek lastiği arasında yeterli bir aderans bulunmalıdır. Kuru bir yol üzerinde, yolun geometrik düzgünlüğü iyi ve taşıtın süspansiyonu yeterli ise aderans eksikliği yoktur. Ancak düşük enine eğimler, yüzey deformasyonları, yüzeysel suların yanal akıtılmasının kötü oluşu, yatay yüzeylerin varlığına yol açan hatalı deşer uygulamaları yolda su birikimine neden olur. Yola gelen su, yüzeyde serbestçe akarsa bile, yağışın şiddetine bağlı

olarak, yol yüzeyinde 0,1 ile 1-3 mm. arasında değişen kalınlıkta su filmi oluşur. Yüksek bir aderans elde etmek için tekerlek lastiğinin yola değdiği alanda bulunan suyun parçalanması ve uzaklaştırılması gerekir. Bu parçalama sırasında etrafa fırlatılan su, yoldaki görüş koşullarını bozduğu gibi yol çevresindekileri de rahatsız edici durumlar oluşturur[11].

4.3.2. Gürültü

Karayolu gürültüsünde değişik kaynaklar bulunduğu bilinmektedir. Bunlar;

- Motor gürültüsü,
- Transmisyon ve havalandırma gürültüsü,
- Seyir gürültüsü olarak gruplanabilir.

Bu konudaki araştırmalar, aşağıdaki sonuçları vermiştir:

- Yol yüzeyinin pürüzlülüğü azaldıkça gürültü azalmaktadır.
- Hız arttıkça gürültü artmaktadır.
- Islak kaplama kuru kaplamaya göre daha gürültülüdür.

Geçirimli kaplamaların seyir gürültüsünün azalmasında çift fonksiyonları vardır. Bunlar:

- Lastiğin titreşimini minimuma indirir. Ayrıca porozite sayesinde havanın lastik profilinde ve kaplama girintisinde sıkışıp gevşemesinde oluşacak gürültünün doğmasını önler.
- Gürültüyü kısmen emer.

4.4. Geçirimli Üstyapıların Yapısal Özellikleri

Geçirimli üst yapılar, yağmur sularının yüzeye girmesini ve geçirimli tabakada akarak, yol kenarında drenajı sağlamalıdır. Bunu başarmak için aşağıdaki koşullar yerine getirilmelidir[12].

- Şekil 4.1’de lifli geçirimli beton üst yapı tipi görülmektedir.



Geçirimsiz bir alt tabaka elde etmek veya tabakayı geçirimsiz hale getirmek, gözenekli beton teknolojisinin zorunlu hedeflerinden biridir. Yeni bir yol inşa ederken veya gözenekli betondan oluşan yolu sererken alttaki tabaka mümkün mertebe geçirimsiz olmalıdır. Bir bitüm emülsiyon yapıştırma tabakasının 300 ile 500 gr/m² nispetinde uygulanması, normal alt tabakanın sudan korunmasını sağlar.

Eğer alt tabakanın bütün yüzeyi rasgele çatlaklarla dolu ise, geçirimsiz hale getirmek için geniş çaplı bir iyileştirme çalışmasına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, klasik yapıştırma tabakalarının yerine sadece yüzeyi kuru tutmakla kalmayan, aynı zamanda süreksizlik noktalarında gerilme yığılmalarını azaltan kalın bir membran kullanılması tavsiye edilir.

Kauçuk - bitüm, bu çeşit membranlar için bağlayıcı olarak kullanılabilir. Bu madde, özellikle gerilmeleri azaltmak ve yarıklar ile aktif çatlakların alt yüzeyindeki çimento betonundan yansımaları ertelemek gibi amaçlar için tavsiye edilir.

4.4.2. Temel Tabakasındaki Doğrusal Bombeler

Gözenekli beton içinde durgun su birikimine engel olmak için aşağıdakiler uygulanmalıdır:

- Geçirimsiz tabakaya yeterli miktarda bombe verilmelidir.
- Bu tabakadaki boşluklar sıcak uygulanmış bitüm ile doldurulmalıdır.
- Eğer tekerlek izleri ± 1 cm'den daha fazla ise bu izler yoğun bitümlü karışım kullanılarak düzeltilir.

4.5. Geçirimli Üstyapıların Hidrolik Özellikleri

Geçirimli üstyapıların işleyişi şöyle sıralanabilir:

- Yağış suyunun derhal yol gövdesine girmesine ve sızmasına imkan sağlar.
- Bir sağınak yağmurun büyük kısmını, doymun hale gelmeden, yol gövdesi içinde toplamak, bir rezervuar gibi çalışmak.
- Gövdeye gelen suyun mümkünse alt tabakalara sızmasını sağlamak veya bir drenaj sistemi yardımıyla suyu boşaltmak.

4.6. Geçirimli Üstyapıların Özelliklerinin Zamanla Değişimi

Boşluk oranı ve geçirimsizlik, yerinde ve karot numuneleri alınarak yapılan deneylerle tayin edilir.

Trafik koşullarına bağlı olarak, yağışlı havalarda taşıt lastiklerinin geçirimsiz kaplamalar üzerinde basınç/emme etkisiyle yarattığı ayrışma koşullarındaki değişimlerin sonucunda geçirimsizlik, kaplama enkesiti boyunca değişim gösterir. Banketler, diğer

şeritlerden sel suları ile taşınan bir takım katı maddelerin birikimine de uğrarlar. Buna benzer olarak, geçirimsizlik, tekerleklerin geçtiği yerlerde diğer yerlere göre daha yüksektir[13].

Kullanım süresi içerisinde üst tabaka, çevre kirliliği sebebiyle drenaj özelliğini kaybetmeye başlar. Yolun (otayol, şehir içi alanlar, vs.) kullanım şekline ve bulunduğu yere göre çevre kirliliği hızlı veya yavaş bir şekilde ilerleyebilir. Genellikle kirlilik yolu etkileyen diğer bozucu olaylardan daha çabuk gelişir. Bu diğer sebeplerden dolayı bakım yapma ihtiyacı duymadan önce kaplamanın bir takım işlevsel özellikleri kaybolmuş demektir. Özellikle yolun arabalar tarafından kullanılmamış kısımları ciddi şekilde kirlenir. Fakat drenaj özellikleri, tekerlek izi alanlarında da bozulabilir.

Pek çok araştırmacı, gözenekli beton tabakasını temizleme çalışmaları yapmıştır. Yüksek basınçlı su ile temizleme metodunun veya emme-süpürme temizleme kamyonlarının bu amaç için kullanılması yaygındır. Hollandalı araştırmacıların elde ettikleri ve "Gözenekli Yolların Bakımı" adında yayınladıkları sonuca göre önce drenaj kapasitesinde geçici bir düzelme görülmekte, fakat daha sonra bu kapasite eski seviyesine dönmektedir. Şimdiye kadar elde edinilmiş olan sonuçlar umut verici değildir. Fakat kullanımda olan araçları, bu özel amaç için geliştirerek teknik ilerlemeler kaydedilebileceği kanısı hala yaygındır.

BÖLÜM V. LİFLİ GEÇİRİMLİ BETON ÜSTYAPILAR

5.1. Lifli Geçirimli Beton Üstyapıların Tanımı

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş beton içerisine çeşitli yöntemler ile değişik miktarlarda (çelik, cam, plastik vb.) liflerin katılması ile elde edilen, içindeki boşluk hacmi yüzdesi yüksek olan ve yola gelen suyun hemen kaplama tabakası içine girmesine ve suyun drenaj tesisine ulaşmasından veya taban zeminine sızmasından önce üstyapı içinde geçici olarak depo edilmesine imkan sağlayan bir üstyapı tipidir.

Beton yollar, üzerine gelen aşırı yükler ile karşı karşıyadır. Özellikle dinamik yüklere karşı betonun dayanımının artırılması çözüm olmamaktadır. Bunun için yol betonunun, yorulma dayanımının, darbe dayanımının, yüksek ve düzensiz sıcaklık değişikliklerine karşı direncinin iyi olması gereklidir. Çelik liflerle güçlendirilmiş beton, homojen bir malzeme olarak bu yükleri yüksek mukavemetle karşılar.

Lifli beton uygulamalarında çelik lif uzunluk / çap oranı tablo 5.1’de verilmiştir.

TABLO 5.1 Uygulamalarda Önerilen Çelik Lif Tipleri Ve Dozajları

Uzunluk / Çap	Lif Dozajı (kg/m ³)	Uygulama alanı
30/0,50	30-50	Döşemede özel uygulamalar, su geçirmez tabaka ve şap
50/0,50	30-50	Beton kaplamalar
60/0,80	20-40	Monolitik olmayan döşemeler
60/1,00	20-40	Monolitik döşemeler

Lifli beton yollarda çatlama olasılığının tamamen ortadan kaldırılması için yol yalancı derzler teşkil ettirilir.

Beton yollarda elik liflerle güçlendirilmiş betonun st yapıda kullanım avantajları şunlardır:

- st yapı kalınlığının azaltılması,
- Donatı miktarının azaltılması,
- Daha düşük bakım onarım masrafları,
- İşçilikten ve zamandan tasarruf,
- Çatlak yayılmasının durdurulması,
- Dinamik yüklere karşı dayanım,
- Liflerin üç boyutlu donatı gibi çalışması sonucu yapısal güvenliğin artmasıdır.

Lifli beton, havaalanı, liman gibi benzeri yerlerde st yapı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu gibi yerlerde kullanılan lifli beton st yapılar, ağır yol trafiğini karşılayacak şekilde projelendirilir. Lifli beton st yapılarda, yük transferi, çarpma etkileri, kesme momentleri, su yüzeyinin sürekli değişmesi, noktasal yükler ve aşırı yükleme olasılığı gibi durumlar göz önüne alınır.

Lifli geçirimli beton styapıların özellikleri, bölüm IV'te anlatılan geçirimli styapılara daha çok benzemektedir.

Geçirimli beton üstyapılar üzerinde yapılan çalışmalarda, beton numuneleri üzerinden fazla olumlu sonuçlar alınamamıştır[16].

Burada, daha önceki çalışmalara paralel olarak, beton numunelerine lif ilave edilmek suretiyle numuneler üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

BÖLÜM VI. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Malzemelerin Tanımlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler aşağıda sırayla tanımlanmıştır.

6.1.1. Çimento

Beton yol yapımında, normlara uygun ve çabuk işlenebilme bakımından bazı ek koşulları sağlayan çimento türleri kullanılmalıdır. Bu malzeme, DIN 1164'deki tanımlara uygun portland ve yüksek fırın çimentosu olabilir. Çimento, DIN 1165 ve DIN 1166'ya göre incelenir. Beton yollarda beton direnci yeterli, eğilme - çekme direnci yüksek, rötresi az ve yavaş priz yapan çimentolar tercih edilir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Çimento cinsi : PÇ 42.5
- Üretici firma : Akçimento
- Ambalaj şekli : Orjinal torba (50 kg)

a) Fiziksel Özellikler

- Blaine özgül yüzeyi (cm^2/gr) : 3270
- 90 mikronluk elekte kalan % : 6,0
- 200 mikronluk elekte kalan % : 0,2
- Özgül ağırlık (gr/cm^3) : 3,11
- Priz başlangıcı : 1 saat 40 dakika
- Priz sonu : 3 saat 35 dakika

b) Mekanik özellikler

Basınç mukavemetleri (MPa)

- 7 günlük : 36,6
- 28 günlük : 51,9

Eğilme mukavemetleri (MPa)

- 7 günlük : 6,8
- 28 günlük : 8,9

c) Kimyasal özellikler

- SiO₂ (çözünen) : %20,38
- SiO₂ (çözünmeyen) : %0,32
- Al₂O₃ : %5,99
- Fe₂O₃ : %3,53
- CaO : %64,27
- MgO : %1,30
- SO₃ : %2,52
- Kızdırma kaybı : %1,30
- Ölçülemeyen : %0,39

Karmaşık bileşikler

- C₃S (trikalsiyum silikat) : %47,37
- C₂S (dikalsiyum silikat) : %22,77
- C₃A (trikalsiyum alüminat) : %9,91
- C₄AF (tetrakalsiyum alüminoferrit) : %10,74

6.1.2. Agregat

Beton agregası kırma kum ve kırmataş malzemedan oluşturulmuştur. Özellikle geçirimli yol betonlarında, kırma kum kullanılır.

Aşınma tabakasını oluşturan betonda uygulanacak agreganın basınç direnci yüksek, aşınma direnci büyük ve hava etkilerine dayanıklı malzemedan sağlanması gereklidir. Kırmataşın tane formu yeterince kübik forma yakın olmalıdır. Yassı veya uzun taneli kırmataşlar, betonun işlenme yeteneğini azaltırlar.

Beton agregasının bünyesinde, beton kumu adı verilen 0 ile 4 mm. çaplı tanelerin özel bir önemi vardır. Bu ince kısım, çimento ile birlikte harcı oluşturur. Harç, daha büyük boyutlu taneleri birbirine yapıştırır. Betonun direnci, bu harcın kalitesine ve agregat içindeki oranının yeterliliğine bağlıdır.

Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri, özgül ağırlık ve aşınma direnci deneyleri ile kontrol edilmiştir.

6.1.2.1. Özgül Ağırlık Deneyi

Özgül ağırlık deneyi, kum, kırmataş tozu, kırmataş I ve kırmataş II için yapılmıştır. Tablo 6.1’de hesap sonuçları verilen 500 gr. malzeme önce hassas şekilde tartılarak ağırlığı bulunmuş olan su dolu kavanoza konularak tartılmıştır. Malzemenin özgül ağırlığı 6.1 formülüyle hesaplanarak tablo 6.1’de gösterilmiştir.

$$\text{Özgül Ağırlık} = d = \frac{\text{Malzeme (gr)}}{(\text{Kavanoz + su}) - \text{Malzeme} - (\text{Malzeme} + \text{Kavanoz} + \text{su})} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (6.1)$$

TABLO 6.1 Agregaların Özgül Ağırlıkları

Agrega Cinsi	Özgül Ağırlık (kg/m ³)
Kum	2680
Kırmataş tozu	2600
Kırmataş I	2660
Kırmataş II	2680

6.1.2.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi, kum, kırmataş tozu, kırmataş I ve kırmataş II için yapılmıştır. Tablo 6.2’de hesap sonuçları verilen malzeme, hacmi belli kaba serbestçe yerleştirilerek ağırlığı saptanmıştır. Malzemenin birim hacim ağırlığı 6.2 formülüyle hesaplanarak tablo 6.2’de gösterilmiştir.

$$\text{Birim Hacim Ağırlık} = D = \frac{P \text{ (agrega ağırlığı)}}{V_G \text{ (Kabın ağırlığı)}} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad (6.2)$$

TABLO 6.2 Agregaların Birim Hacim Ağırlıkları

Agrega Cinsi	Birim Hacim Ağırlık (kg/dm ³)
Kum	1.790
Kırmataş tozu	1.770
Kırmataş I	1.760
Kırmataş II	1.760

6.1.2.3. Aşınma Deneyi (Los Angeles)

Yol ve hava meydanlarındaki beton üstyapılar, bilindiği gibi çarpma ve aşınma etkileri altındadır. Bu gibi yerlerdeki betonun bu etkilere dayanabilmesi için yapımında kullanılan iri agreganın aşınmaya ve çarpmaya karşı büyük bir dirence sahip olması lazımdır. Bu amaçla, agregalar üzerinde Los Angeles deneyi yapılır[14].

Bu deneyde kullanılan alet, 71,1 cm. çapında ve 50,8 cm. uzunluğunda çelik saçtan yapılmış, yatay eksen etrafında dakikada 30 - 35 devir yapmak suretiyle dönebilen, bir silindirden ibarettir. Silindir içine fonttan yapılmış küresel bilyeler (47,7 mm. çaplı ve 390,45 gr. ağırlıklı) konur. Silindir içine 5000 gr. ağırlığında agrega konulmuştur. Alet eksen etrafında 500 tur döndükten sonra deneye son verilir. Deney sırasında taneler birbirine çarparak ve font kürelerin bu tanelere vurmasıyla parçalanır. Deney sonunda silindirden alınan malzeme 1,6 mm.'lik elekten elenir. Bu elek üstünde kalan malzeme tartılarak aşınma yüzdesi 6.3 formülüyle hesaplanır.

$$\text{Aşınma yüzdesi} = \frac{P - P_U}{P} \quad (6.3)$$

Burada

- P : Silindir içine konulan agrega miktarı (gr)
- P_U : Elek üstünde kalan parçalanmış malzeme miktarı (gr)'dır.

P = 5000 gr. ve P_U = 3697 gr. deney sonucunda bulunmuştur. Aşınma yüzdesi, 6.3 formülü yardımıyla %26 olarak hesaplanmıştır. Beton yol kaplamasının agregalar için maksimum yüzdesi % 35'tir. Şekil 6.1'de deney düzeneği görülmektedir.



ŞEKİL 6.1 Los Angeles Deney Düzeneği.

6.1.3. Çelik Lifler

Bu deney programında Beksa Firmasının ürünü olan Dramix markalı ZC 60/80 çelik lifler kullanılmıştır. Kullanılan çelik lifler, 60 mm. boyunda, 0,80 mm. çapındadır. Uzunluk/ çap oranı 75'tir. Bu lifler, sert çekilmiş düşük karbonlu çelik C 1008'den üretilmiştir. Yüksek ve üniform çekme gerilmesine, düşük uzama özelliğine sahiptir. Çekme mukavemeti 1100 MPa'dır. ZC 60/80 tipi çelik lifler, c tipi tutkalla birleştirilmiştir. Bu tip tutkalla birleştirilmiş liflerin çözülmesi için 30 ile 60 saniyeye ihtiyaç vardır.

Çelik liflerle ilgili ayrıntılar, Bölüm II'de geniş bir şekilde verilmiştir.

6.2. Beton Karışımları

6.2.1. Kabul Edilen Esaslar

Bu çalışmada en büyük agregası boyutu sabit ve 40 mm. olarak saptanmıştır. Birinci Grup Beş seçenekte, su/çimento oranı 0,67 ve çelik lif 30 kg/m³ olarak sabit alınmıştır. İkinci Grup Beş seçenekte, su/çimento oranı 0,67 sabit ve çelik lif miktarı değişken alınmıştır.

6.2.2. Beton Birleşimi

Birinci Grup beton karışım oranlarındaki ilk seçenekte, yapılan araştırmalar sonucunda Fransa'da uygulanan oranlardan yararlanılmıştır[15]. Diğer dört seçenek ise tablo 6.3a'da da belirtildiği gibi ilk seçeneğin yüzde dağılımını değiştirerek aradaki farkı gözlemek amacıyla üretilmiştir.

TABLO 6.3a Birinci Grup 1 m³ Beton Bileşimi İçin Gerçek Malzeme Miktarı.

KARIŞIM		1. seç	2. seç	3.seç	4.seç	5. seç
Çimento	(kg/m ³)	150	150	150	150	150
Çelik Lif	(kg/m ³)	30	30	30	30	30
Kum	(kg/m ³)	250	300	350	250	250
Kırmataş I	(kg/m ³)	675	675	675	725	725
Kırmataş II	(kg/m ³)	675	675	575	625	525
Su	(lt/m ³)	100	100	100	100	100
Su/Çimento Oranı	(%)	67	67	67	67	67

İkinci Grup beton karışım oranlarındaki ilk seçenekte, yapılan araştırmalar sonucunda Fransa'da uygulanan oranlardan yararlanılmıştır[15]. Diğer dört seçenek ise tablo 6.3b'de de belirtildiği gibi ilk seçeneğin **çelik lif miktarını** değiştirerek aradaki farkı gözlemek amacıyla üretilmiştir.

TABLO 6.3b İkinci Grup 1 m³ Beton Bileşimi İçin Gerçek Malzeme Miktarı.

KARIŞIM		1. seç	2. seç	3.seç	4.seç	5. seç
Çimento	(kg/m ³)	150	150	150	150	150
Çelik Lif	(kg/m ³)	0	15	30	45	60
Kum	(kg/m ³)	250	250	250	250	250
Kırmataş I	(kg/m ³)	675	675	675	675	675
Kırmataş II	(kg/m ³)	675	675	675	675	675
Su	(lt/m ³)	100	100	100	100	100
Su/Çimento Oranı	(%)	67	67	67	67	67

6.2.3. Beton Üretimi

Beton üretimi sırasında laboratuvar ortamında tutulan malzemelerin, her karışımının hazırlanması için betonyer tamburuna konuşu, karıştırılması, yerleştirilişi ve saklanması aynı sıra ve koşullarda sağlanmıştır.

Bütün karışımlar, 1,5 dakika kuru olarak karıştırılmıştır. Sonra içine su, yüzeyde kuru yer kalmayacak şekilde dökülmüştür ve karıştırma yapılmadan önce suyun bir miktar emilmesi beklenmiştir. Karıştırma işlemi düşey eksenli, zorlamalı betonyerde yapılmıştır. Her karışımdan sonra 100*100*500 mm.'lik 6 adet prizma numune alınmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan sökülerek üzerlerine ıslak çuval serilmiştir. 20°C±2'deki %65±5 bağıl nemli odada bekletilmiştir. Üretimi izleyen 7. ve 28. günde numuneler üzerinde eğilme deneyleri yapılmıştır. Şekil 6.2'de üretilen numunelerin çuvallar arasında bekletilme işlemi görülmektedir.



ŞEKİL 6.2 Numunelerin Islak Çuvallar Arasında Bekletilmesi.

6.3. Üretilen Beton Numunelerinin Fiziksel Özellikleri

6.3.1. Pratik Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Betonyerde karıştırılan beton, darası önceden saptanmış 5 lt'lik bir kaba doldurulup vibratörle sıkıştırılmıştır. Kapla birlikte tartılan betondan kabın darası çıkarılıp kabın hacmine oranlanmasıyla taze beton birim hacim ağırlıkları hesaplanmış ve tablo 6.4'te ortalamaları verilmiştir.

TABLO 6.4 Taze Beton Birim Hacim Ağırlıkları.

	Taze beton birim hacim ağırlığı (kg/dm ³)
1. Grup Numuneler	
1. seçenek ortalama	1,88
2. seçenek ortalama	1,90
3. seçenek ortalama	1,87
4. seçenek ortalama	1,88
5. seçenek ortalama	1,82
2. Grup Numuneler	
1. seçenek ortalama	1,86
2. seçenek ortalama	1,87
3. seçenek ortalama	1,88
4. seçenek ortalama	1,90
5. seçenek ortalama	1,91

6.3.2. Teorik Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Teorik birim hacim ağırlığı 6.4 formülüyle hesaplanmış ve tablo 6.5'te sonuçlar verilmiştir.

$$D = \frac{100}{\frac{P_{agrega}}{\delta_{agrega}} + \frac{P_{çimento}}{\delta_{çimento}} + \frac{P_{su}}{\delta_{su}} + \frac{P_{çelik lif}}{\delta_{çelik lif}}} \quad (6.4)$$

Burada,

- D : Teorik birim hacim ağırlığı,
- P_{agrega} : Karışımdaki agreganın ağırlıkça yüzdesi,
- δ_{agrega} : Agreganın özgül ağırlığı,
- P_{çimento} : Karışımdaki çimentonun ağırlıkça yüzdesi,
- δ_{çimento} : Çimentonun özgül ağırlığı,
- P_{su} : Karışımdaki su ağırlıkça yüzdesi,
- δ_{su} : Suyun özgül ağırlığı,
- P_{çelik lif} : Karışımdaki çelik lifin ağırlıkça yüzdesi,
- δ_{çelik lif} : Çelik lifin özgül ağırlığı'dır.

TABLO 6.5 Teorik Birim Hacim Ağırlıkları.

	Teorik birim hacim ağırlığı (kg/dm ³)
1. Grup Numuneler	
1. seçenek ortalama	2,45
2. seçenek ortalama	2,47
3. seçenek ortalama	2,46
4. seçenek ortalama	2,47
5. seçenek ortalama	2,45
2. Grup Numuneler	
1. seçenek ortalama	2,48
2. seçenek ortalama	2,47
3. seçenek ortalama	2,45
4. seçenek ortalama	2,46
5. seçenek ortalama	2,47

6.3.3. Boşluk Oranı

Üretilen betonların boşluk oranları (V), pratik birim hacim ağırlığı (d) ve teorik birim hacim ağırlığını (D) kullanarak 6.5 formülü yardımıyla hesaplanmış ve tablo 6.6'da sonuçlar verilmiştir.

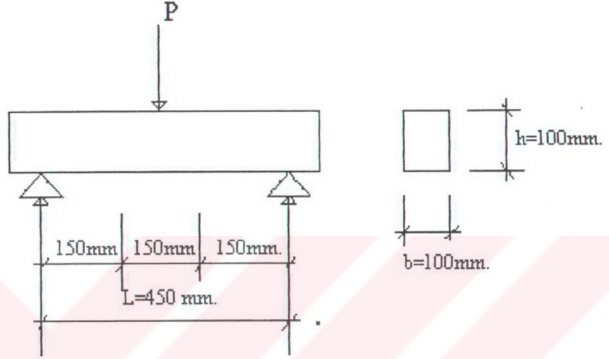
$$V = 100 \frac{D - d}{D} \quad (6.5)$$

TABLO 6.6 Boşluk Oranı.

	Boşluk Oranı(%)
1. Grup Numuneler	
1. seçenek ortalama	23,3
2. seçenek ortalama	23
3. seçenek ortalama	24
4. seçenek ortalama	23,9
5. seçenek ortalama	25,8
2. Grup Numuneler	
1. seçenek ortalama	25,00
2. seçenek ortalama	24,50
3. seçenek ortalama	23,30
4. seçenek ortalama	23,00
5. seçenek ortalama	22,80

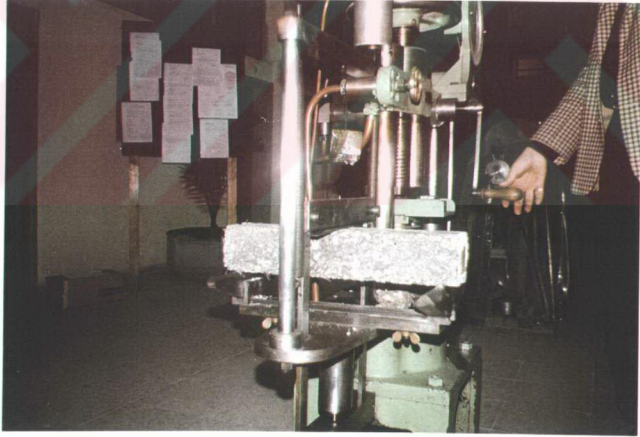
6.3.4. Prizma Deneyleri

Çelik lifli betonu yol üst yapısında kullanmak için eğilme altındaki davranışını saptamak amacıyla **prizma deneyleri** yapılmıştır. Prizma deney düzeneği şekil 6.3'de gösterilmiştir. Tablo 6.7 ve tablo 6.8'de deney sonuçları verilmiştir.

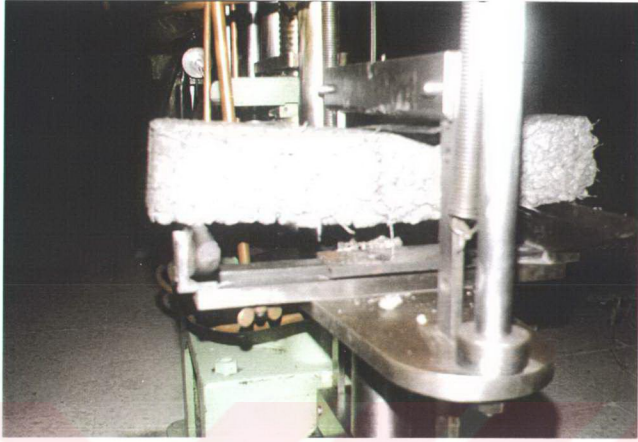


ŞEKİL 6.3 Prizma Deney Düzeneği.

Test yönteminin tüm numuneler için özdeş olmasına özen gösterilmiştir. Sabit deformasyon hızlı tekil yükün, hazırlanan kirişlere orta nokta yükleme altında kırılması sonucu deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4'de deney düzeneğinin genel şekilleri görülmektedir.



ŞEKİL 6.4 Eğilme - Çekme Deney Düzeneklerinin Genel Görünüşleri.



ŞEKİL 6.5 Numunenin Kırıldıktan Sonraki Durumu.

Buna göre elde edilen veriler,

P_k : Kırılma anındaki en büyük yük,

L : Yükleme yatakları arasındaki açıklık,

b : Kırılma kesitinin ortalama genişliği,

h : Kırılma kesitinin ortalama yüksekliği,

olmak üzere, eğilme - çekme dayanımı aşağıdaki 6.6 formülüyle hesaplanmıştır.

$$\sigma_{E\check{C}} = \frac{3 P_k L}{2 b h^2} \quad (6.6)$$

TABLO 6.7 7 Günlük Birinci Grup Kiriş Numunelerinin Eğilme - Çekme Direnci Hesap Tablosu.

1. Grup Numuneler	Kırılma Yüğü P_k (kg)	b (cm)	h (cm)	L (cm)	σ_{EC} (kg/cm ²)	σ_{Eort} (kg/cm ²)
A	384	10	10	45	25,92	26,10
1. Seçenek B	386	10	10	45	26,06	
C	390	10	10	45	26,33	
A	488	10	10	45	32,94	33,14
2. Seçenek B	491	10	10	45	33,14	
C	494	10	10	45	33,35	
A	534	10	10	45	36,05	36,21
3. Seçenek B	538	10	10	45	36,32	
C	537	10	10	45	36,25	
A	429	10	10	45	28,96	29,14
4. Seçenek B	432	10	10	45	29,16	
C	434	10	10	45	29,30	
A	472	10	10	45	31,86	32,27
5. Seçenek B	480	10	10	45	32,40	
C	482	10	10	45	32,54	

TABLO 6.8 28 Günlük Birinci Grup Kiriş Numunelerinin Eğilme - Çekme Direnci Hesap Tablosu.

1. Grup Numuneler	Kırılma Yüğü P_k (kg)	b (cm)	h (cm)	L (cm)	σ_{EC} (kg/cm ²)	σ_{Eort} (kg/cm ²)
A	548	10	10	45	36,99	36,99
1. Seçenek B	544	10	10	45	36,72	
C	552	10	10	45	37,26	
A	710	10	10	45	47,93	48,29
2. Seçenek B	716	10	10	45	48,33	
C	720	10	10	45	48,60	
A	741	10	10	45	50,01	50,26
3. Seçenek B	745	10	10	45	50,29	
C	748	10	10	45	50,49	
A	622	10	10	45	41,99	42,24
4. Seçenek B	625	10	10	45	42,19	
C	630	10	10	45	42,53	
A	666	10	10	45	44,96	44,93
5. Seçenek B	660	10	10	45	44,55	
C	671	10	10	45	45,29	

TABLO 6.9 7 Günlük İkinci Grup Kiriş Numunelerinin Eğilme - Çekme Direnci Hesap Tablosu.

2. Grup Numuneler	Kırılma Yüğü P_k (kg)	b (cm)	h (cm)	L (cm)	σ_{EC} (kg/cm ²)	σ_{Ecort} (kg/cm ²)
1. Seçenek	A 340	10	10	45	22,95	23,06
	B 345	10	10	45	23,29	
	C 340	10	10	45	22,95	
2. Seçenek	A 370	10	10	45	24,98	24,98
	B 365	10	10	45	24,64	
	C 375	10	10	45	25,31	
3. Seçenek	A 384	10	10	45	25,92	26,10
	B 386	10	10	45	26,06	
	C 390	10	10	45	26,33	
4. Seçenek	A 400	10	10	45	27,00	27,00
	B 390	10	10	45	26,33	
	C 410	10	10	45	27,68	
5. Seçenek	A 410	10	10	45	27,68	28,13
	B 420	10	10	45	28,35	
	C 420	10	10	45	28,35	

BÖLÜM VII. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada incelenen lifli beton üstyapılarla ilgili olarak elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

7.1. Betonun Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Hazırlanan alternatif karışımların,

- Eğilme - çekme dayanımı,
- Birim hacim ağırlığı,
- Boşluk oranı

gibi özellikleri birbiri ile daha kolay karşılaştırılabilmek için amacıyla tablo 7.1 ve tablo 7.2'de tüm sonuçlar verilmiştir.

TABLO 7.1 Birinci Grup Deneysel Çalışma Sonuçlarına Ait Özet Tablo.

1. Grup Numuneler	Birim	1. Seçenek	2. Seçenek	3. Seçenek	4. Seçenek	5. Seçenek
Çimento	kg/m ³	150	150	150	150	150
Su	lt/m ³	100	100	100	100	100
Kum (0-5 mm.)	kg/m ³	250	300	350	250	250
Kırmataş I(5-20 mm)	kg/m ³	675	675	675	725	775
Kırmataş II(20-40 mm)	kg/m ³	675	625	575	625	575
Lif	kg/m ³	30	30	30	30	30
Su/çimento	%	67	67	67	67	67
Eğilme - Çekme Dayanımı 7. Gün 28. Gün	kg/m ²	26,10 36,99	33,14 48,29	36,21 50,26	29,14 42,24	32,27 44,93
Birim Ağırlık (d)	gr/cm ³	1,88	1,90	1,87	1,88	1,82
Boşluk Oranı (n)	%	23,3	23	24	23,9	25,8

- Çelik liflerin, özellikle betonun tek eksenli çekme, eğilme-çekme ve silindirik yarıma dayanımlarının artırılmasında etkin olduğu bilinmektedir. Beton, yarı gevrek bir malzemedir. Çelik donatı ile çekme gerilmelerinin karşılanması öngörülmektedir. Çelik lif kullanımının beton basınç dayanımına etkisi yoktur.

- Birinci Grup Numunelerde çelik lif ve su/çimento oranları sabit tutulmuştur. İkinci Grup Numunelerde su/çimento oranları sabit tutulmuş, çelik lif miktarları değişken alınmıştır.
- Fransa'da kullanılan oranlardan faydalanılarak üretim yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen karışıma ait fiziksel ve mekanik özellikler Fransa'daki uygulama değerlerine yakındır[15].

Yukarıdaki tablo 7.1 incelendiğinde aşağıdaki şu sonuçlar elde edilmiştir:

Birinci Grup Numunelere Ait Değerlendirmeler:

- Birinci seçenekteki karışımın kırmataş II miktarı %3 azaltılıp, kum miktarı %3 artırılarak ikinci seçenek elde edilmiştir. Bu değişikliğin sonucunda 1. seçeneğe göre 2. seçeneğin 7 günlük eğilme-çekme direnci %26,97 ve 28 günlük eğilme-çekme direnci %30,55 artmıştır. Karışımın birim hacim ağırlığı 1,88 gr/cm³'ten 1,90 gr/cm³'e yükselmiştir. Birim hacim ağırlığının artması sonucunda boşluk oranında da %1'lik azalma olması normaldir.
- İkinci seçenek agregalarının ağırlıkça %6 oranında değiştirilmesiyle üçüncü seçenek elde edilmiştir. Bunun sonucunda, birinci seçeneğe göre üçüncü seçeneğin 7 günlük eğilme-çekme direncinin %38,74 ve 28 günlük eğilme-çekme direncinin %35,87 arttığı gözlenmiştir.
- Dördüncü karışım seçeneğinin elde edilmesinde ise, birinci karışım seçeneğine göre kırmataş I ağırlıkça %3 artırılmış, kırmataş II %3 azaltılmıştır. Bunun sonucunda, birinci seçeneğe göre dördüncü seçeneğin 7 günlük eğilme - çekme direncinin % 11,65 ve 28 günlük eğilme-çekme direncinin %14,19 arttığı gözlenmiştir.

Bir önceki seçeneğe benzer şekilde, beşinci karışım seçeneğinde kırmataş I ağırlıkça %6 artırılmış, kırmataş II %6 azaltılmıştır. Bunun sonucunda, birinci seçeneğe göre beşinci seçeneğin 7 günlük eğilme - çekme direncinin % 23,64, 28 günlük eğilme-çekme direncinin %21,47 arttığı gözlenmiştir.

TABLO 7.2 İkinci Grup Deneysel Çalışma Sonuçlarına Ait Özet Tablo.

1. Grup Numuneler	Birim	1. Seçenek	2. Seçenek	3. Seçenek	4. Seçenek	5. Seçenek
Çimento	kg/m ³	150	150	150	150	150
Su	lt/m ³	100	100	100	100	100
Kum (0-5 mm.)	kg/m ³	250	250	250	250	250
Kırmataş I(5-20 mm)	kg/m ³	675	675	675	675	675
Kırmataş II(20-40 mm)	kg/m ³	675	675	675	675	675
Lif	kg/m ³	0	15	30	45	60
Su/çimento	%	67	67	67	67	67
Eğilme - Çekme Dayanımı 7. Gün	kg/m ²	23,06	24,98	26,10	27,00	28,13
Birim Ağırlık (d)	gr/cm ³	1,86	1,87	1,88	1,90	1,91
Boşluk Oranı (n)	%	25,00	24,50	23,30	23,00	22,80

Yukarıdaki tablo 7.2 incelendiğinde aşağıdaki şu sonuçlar elde edilmiştir:

İkinci Grup Numunelere Ait Değerlendirmeler:

- İkinci Grup Numunelerde çelik lif miktarı değişken alınmış ve su/çimento oranları sabit tutulmuştur.
- Fransa'da yapılan çalışmalarda kullanılmış olan ikinci grubun birinci seçeneğindeki malzeme oranları esas alınarak, diğer dört seçenekte lif miktarı artırılmıştır[15].
- Birinci seçenekte çelik lif kullanılmamış olup, eğilme-çekme direnç değeri, daha önce yapılan çalışma sonuçlarına yakın bulunmuştur[16].
- İkinci ve üçüncü seçeneklerde çelik lif miktarı, numuneler içinde homojen dağılımı çok iyi sağlanmıştır. Betonun işlenmesinde olumsuzluklar çıkmamıştır. Bu seçeneklerin üretimi yapılırken, işlenebilirliğinin yüksek olduğu ve kritik çelik lif miktarının aşılmadığı gözlenmiştir.
- İkinci seçenekteki karışımın, birinci seçeneğe göre eğilme-çekme direnci %8, üçüncü seçenekteki karışımın, birinci seçeneğe göre eğilme-çekme direnci %13, dördüncü seçenekteki karışımın, birinci seçeneğe göre eğilme-çekme direnci %17, beşinci seçenekteki karışımın, birinci seçeneğe göre eğilme-çekme direnci %22 oranlarında artış göstermiştir.
- Dördüncü ve beşinci seçeneklerdeki karışımlarda kullanılan çelik lif miktarı, eğilme-çekme direncini dolayısıyla sünekliği arttırmış olsa da işlenebilirliği güçleştirmiştir. Karışım sırasında topaklaşmalar ve betonu kalıplara yerleştirirken çelik liflerde eğilmeler gözlenmiştir.Bu durum, kritik çelik tel miktarının aşıldığını göstermektedir.

- Çelik lif dozajının fazla olması, homojen dağılımı engellemektedir. İnce malzemenin azlığı nedeniyle, numune yüzeyinde bulunan lifler, betonla aderans sağlayamamıştır. Fakat geçirimli üst yapılarda ince malzemenin artırılması, istenilmeyen bir durumdur. İnce malzemenin artırılmasıyla boşluk oranı düşmektedir.

Amaç, geçirimli bir beton üst yapı elde etmek olduğu için, üst yapı yüzeyinde bu liflerin olması, araç lastiğine zarar verebilir. Bunlar gözönüne alınarak aşağıda da belirtildiği gibi optimum bir karışım miktarı belirlenmelidir.

7.2. Optimum Karışımla İlgili Değerlendirmeler

Lif içeriği arttıkça her ne kadar betonun süneklilik dayanımı artsa da işlenebilirliği güçleşmektedir. Bu nedenle lif içeriğine sınırlama getirme zorunluluğu vardır. Bu sınırlama ekonomi açısından da gereklidir. Yapılmış olan deneylerde ve tablo 7.2'de de belirtildiği gibi bu optimum miktarın 30 - 45 kg/m³ olduğu görülmektedir.

Optimum karışımla ilgili genel kurallar aşağıda verilmiştir[5].

- Homojen bir beton karışımı elde etmek için temel ilkelere dikkat edilmelidir[7],[8].
- Kritik çelik tel miktarı aşılmamalıdır. Bu kritik tel miktarının yapılan deneylerde 30 - 45 kg/m³ olduğu görülmektedir.
- Çelik tel teçhizatlı betonun karışımını kolaylaştırmak ve gerekli olduğunda tel miktarını arttırmayı sağlamak amacıyla ince agregası kullanılmalıdır. Ancak ince agreganın artırılması, boşluk oranını düşürerek geçirimliliği azaltır. Geçirimli üst yapılarda boşluk oranının düşük olması istenmeyen bir durumdur.
- Taze betonda, homojen tel dağılımı, gözle kontrol edilmeli, birbirlerine yapışık teller halinde betona karıştırılan tel demetler veya teller beton içinde tamamen dağılıp, ayrılıncaya kadar beton karışımı devam etmeli ve üniform dağılım göz ile fark edilmelidir.
- Betona karıştırılacak en fazla tel miktarı; agreganın en büyük tane çapına ve uzunluk / çap oranına bağlı olarak tablo 2.6 ve tablo 5.1'de verilmiştir.

BÖLÜM VIII SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada incelenen lifli geçirimli beton üstyapılarla ilgili olarak elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

–Yağışlı havalarda yollarda yolların yüzeySEL drenajını hızlandırarak taşıtların seyir güvenliğini ve görüş koşullarını iyileştiren yeni bir uygulamadır.

–Karışımındaki yüksek boşluk oranı, agrega granülometrisinde büyük tanelerin ağırlıkça yüzdesi fazla tutularak sağlanır.

–Yetersiz sıkışma ile elde edilecek yüksek boşluk oranının yolun serviste bulunduğu sırada trafikten kaynaklanacak ek sıkışma sonunda gerekenin altına ineceği unutulmamalıdır.

–Bu tip üst yapılarda boşluk oranının yüksekliği, mekanik özelliklerin düşük olması sonucunu doğurmaktadır. Geçirimli üstyapılarda yüksek dozajda ve katkılı çimento kullanılarak mekanik özellikler iyileştirilebilir.

–Karışımındaki iri agreganın yüzdesi ağırlıkça artırıldığında geçirimsizlik artmaktadır. Buna karşılık üstyapının mekanik özellikleri bozulmaktadır. Bu durum, hem hidrolik hem de mekanik projelendirme sırasında dikkate alınmalıdır.

–Üstyapının boşluklu olması, kaplamanın dış etkenlerden kolayca etkilenmesine sebep olmaktadır. Bu durum, kaplamanın ömrünü kısaltır.

–Lifli geçirimli beton yollarda çelik liflerle güçlendirilmiş betonun üst yapıda kullanım avantajları şunlardır:

- Üst yapı kalınlığının azaltılması,
- Donatı miktarının azaltılması,
- Daha düşük bakım onarım masrafları,
- İşçilikten ve zamandan tasarruf,

- Çatlak yayılmasının durdurulması,
- Dinamik yüklere karşı dayanım,
- Liflerin üç boyutlu donatı gibi çalışması sonucu yapısal güvenliğin artmasıdır.

Yapılan **ikinci grup** deney numunelerinden de görüldüğü gibi çelik lif donatılı betonun eğilme etkisindeki davranışı ile ilgili olarak elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır:

- Çelik lif dozajı arttıkça, betonun eğilme - çekme dayanımı artmaktadır. Deneylerde %22 eğilme - çekme dayanım artışı sağlanmıştır
- Çelik liflerin gereğinden fazla kullanılmasıyla işlenebilme ve uygulama zorluğu olmaktadır. Deney sırasında, lif miktarı 60 kg/m^3 olan numunelerde işlenebilirlik zorlaşmıştır.
- Çelik lif dozajı arttıkça, betonun sünekliliği artmaktadır.
- Çelik lifli betonun dizaynında, betonun işlenebilirliği, betondan beklenen yüksek dayanım, yüksek enerji yutma, deformasyon yapma yeteneği gibi performansları ve ekonomik çözümlerle birlikte değerlendirerek bir optimizasyona gidilmelidir.

Beton içerisindeki lifler, statik hesaplarda eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi değil, betonun yapısını değiştiren ve ona plastik davranış özelliği kazandıran bir malzeme olarak görülmelidir. Çelik lifli betonun özelliği, onun artırılmış plastik davranışı ve enerji tutma yeteneğidir.

Elde edilen bu sonuçlara bakılarak lifli geçirimli beton üstyapıların değerlendirilmesi yapıldığında, bu tip yapıların uygulanmasıyla ilgili olumlu bir durum oluşmaktadır. Buna göre lifli geçirimli beton üstyapılar, geliştirilmesi gereken bir üstyapı tipidir.

Ülkemizde lifli geçirimli beton üstyapılarla ilgili uygulama yoktur. Gerek uygulamada kalifiye elemana ihtiyaç olduğundan gerekse ülke ekonomisi yönünden bu tip uygulamalar ancak araştırma ve deneysel çalışmalar seviyesinde kalmaktadır. Ülkemizde lifli geçirimli beton üst yapıların hayata geçirilmesinden önce beton üstyapıların artırılması ve bu konuyla ilgili altyapıların tamamlanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. **TS 10513** Çelik Teller - Beton Takviyesinde Kullanılan
- [2]. **TS 10515** Beton - Çelik Tel Takviyeli - Eğilme Mukavemeti Deney Metodu
- [3]. **AĞAR, E., SÜTAŞ, İ., ÖZTAŞ, G.**, Beton Yollar. İ.T.Ü. İnşaat Fak., İst. 1998.
- [4]. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton, DSI Yayınları, Ankara, 1994
- [5]. **TS 10514** Beton - Çelik Tel Takviyeli- Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları
- [6]. **TS 707** Beton Agregalarından Numune Alma Ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi
- [7]. **TS 1247** Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları -Normal Hava Şartlarında
- [8]. **TS 1248** Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları -Anormal Hava Şartlarında
- [9]. **PEREZ - JIMENEZ, F.**, Directive Concerning Porous Mixes Publication Project, Pıarc Raporu, Mart 1990.
- [10]. **SERHE, H.**, Behavioral Characteristics Over Time, PIARC Raporu, Mart 1990.
- [11]. **AĞAR, E.** Geçirimli Üstyapılar Çalışması, İTÜ. İnşaat Fakültesi, Ulaştırma Anabilim Dalı Semineri, 1989.
- [12]. **HEYSTRAETEN, G.**, Belgianroad Research Centre, Pıarc Raporu, Mart 1990.
- [13]. **DABLIN, J.**, İntial Characteristics of The Mixes, PIARC Raporu, Mart 1990.
- [14]. **POSTACIOĞLU, B.**, Beton Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton Cilt 2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi - İstanbul, 1987.
- [15]. **NISSOUX, J. L. - MERRIEN, P.**, Les Bandes D'arret D'urgence En Beton Poreux Bull, Liaison Labo Pet Ch. - Dec 1977.
- [16]. **YAĞCI, İ. Ş.**, Geçirimli Beton Yol Üstyapısının İncelenmesi, Tez Çalışması, İTÜ. İnşaat Fak. Ulaştırma Anabilim Dalı, Haziran 1991.