

**BETONUN ÇEKME DAYANIMI
ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

Ali Alper KOÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2010
ANKARA**

Ali Alper KOÇ tarafından hazırlanan BETONUN ÇEKME DAYANIMI ÜZERİNE
BİR ÇALIŞMA adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Meral BEĞİMGİL

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüsnü CAN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Meral BEĞİMGİL

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç Dr. Mehmet Halis GÜNEL

.....

Mimarlık Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Tarih: 10/06/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini
onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış 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.

Ali Alper KOÇ

**BETONUN ÇEKME DAYANIMI
ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA
(Yüksek Lisans Tezi)**

Ali Alper KOÇ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2010**

ÖZET

Bu çalışmada, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin, endüstriyel bir atık olan silis dumanı mineral katkısının ve çelik lifin betonun basınç dayanımına ve yarmada çekme dayanımı ile doğrudan çekme dayanımına olan etkileri araştırılmıştır. Bu malzemelerle üretilen beton numunelerin basınç ve çekme etkisi altındaki davranışları şahit beton numuneler ile karşılaştırılmıştır. Bu malzemelerin betonun basınç ve çekme dayanımına katkısının hangi mertebede olacağı araştırılmıştır. Bu amaçla C30/37 beton sınıfında şahit beton, süper akışkanlaştırıcı (SA) katkılı beton, silis dumanı (SD) katkılı beton ve çelik lifli beton karışımları üretilmiştir. Deneylerde PÇ 42,5 R çimentosu kullanılmış ve su/çimento oranı 0,51 olarak sabit tutulmuştur. SA katkılı beton dışındaki karışımlarda da slump değeri 10-12 cm arasında sabit tutulmuştur. SD katkılı karışımda SD % 10 oranında çimento ile ikame edilmiş, SA katkılı karışımda da ağırlıkça % 1 oranında SA kullanılmıştır. Çelik Lifli karışımda ise 45 kg/m³ oranında çelik lif ilave edilmiştir. Her bir karışımdan 27 adet olmak üzere toplamda 108 adet 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir numune üretilmiş ve bu numuneler 3,7,14 ve 28 gün süreyle laboratuvar kürüne tabi tutulmuştur. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, doğrudan çekme dayanımı ve elastisite modülü deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. 28 günlük numunelerde en yüksek basınç

dayanımı ve doğrudan çekme dayanımı çelik lifli betondan, en yüksek yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü de SD katkılı betondan elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.143
Anahtar Kelimeler : Beton, lif, silis dumanı, çekme dayanımı, katkı
Sayfa Adedi : 90
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç Dr. Meral BEGİMGİL

**A STUDY ON THE TENSİLE
STRENGTH OF CONCRETE
(M.Sc. Thesis)**

Ali Alper KOÇ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2010**

ABSTRACT

In this study, the effects of super plasticizer additive, silica fume and steel fiber on the compressive strength, splitting tensile strength and direct tensile strength of concrete are investigated. The compressive and tensile strengths of the specimens produced with these materials are compared with reference concrete specimens. It is investigated how much these materials contribute to the tensile strength of concrete and compressive strength of concrete. Concrete mixtures including reference concrete class C30/37, super-plasticizer, silica fume and steel fiber are produced in order to find the contribution. PC 42.5 R cement is used in the experiments and the water/cement ratio is kept constant at 0.51. The slump value is kept constant between 10-12 cm except the concrete mixture including super plasticizer. In the mixture including silica fume, silica fume is replaced with 10 percent of cement, as in the mixture including super plasticizer, super plasticizer is added at the rate of 1 percent of cement. Steel fiber is added at the rate of 45 kg/m³ to prepare the mixture including steel fibers. Because 27 specimens are produced for each mixture, it makes 108 cylindrical specimens with 15 cm diameter and 30 cm height for four mixtures. All the specimens are kept in the standard cure conditions until the testing day. Compressive strength, splitting tensile strength, direct tensile strength and elastic modulus tests are conducted and the results are compared with each other. Maximum compressive strength and direct tensile strength results are

obtained from steel fiber concrete specimens. Maximum splitting tensile strength and modulus of elasticity results are obtained from the specimens including silica fume addition.

Science Code : 911.1.143

Key Words : Concrete, tension strength, silica fume, fiber, additive

Page Number: 90

Adviser : Assist. Prof. Dr. Meral BEGİMGİL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sürecinde değerli zamanını benim için ayırarak yardımlarını esirgemeyen, yapıcı önerileri ile önemli katkılarda bulunarak beni yönlendiren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Meral BEĞİMGİL'e, deneysel çalışmalarda her an desteğini yanımda hissettiğim Kimya Yüksek Mühendisi Sn. Aydın SAĞLIK'a ve başta Sayın M. Fatih KOCABEYLER olmak üzere katkı sağlayan diğer TAKK Dairesi Başkanlığı çalışanlarına, beni cesaretlendirerek desteklerini esirgemeyen anne, baba ve ablama, her aşamada yanımda olan can dostum Serkan TERZİ'ye ve Ünal KOÇ'a en derin sevgi ve saygı duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	.iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	.viii
İÇİNDEKİLER	.ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	.xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	.xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	.xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	.xvi
1. GİRİŞ	1
2. BETON	3
2.1. Betonun Dayanımı	4
2.1.1. Betonun dayanımını oluşturan unsurlar	6
2.1.2. Betonun basınç dayanımı	7
2.1.3. Betonun çekme dayanımı	9
3. MALZEMELERLE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR	20
3.1. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkılar	20
3.1.1. Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin birleşimi	21
3.2. Silis Dumanı.....	22
3.2.1. Tane özellikleri	24
3.2.2. Silis dumanı katkısının çimento hamuru üzerindeki etkileri	24
3.2.3. Silis dumanı katkısının taze beton özelliklerine etkisi	25
3.2.4. Silis dumanı katkısının sertleşmiş betonun özelliklerine etkileri.....	26
3.2.5. Silis dumanı içeren betonların bileşimi.....	28
3.3. Lifli beton.....	29
3.3.1. Çelik lif	31
3.3.2. Çelik lifli betonun teknik özellikleri	33
3.3.3. Çelik lifli betonun karışım esasları	35
3.3.4. Çelik lifli betonun kullanım alanları	37
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39

	Sayfa
4.1. Deneysel Çalışmaların Kapsamı	39
4.2. Deney Programı	40
4.3. Deney Çalışmasında Kullanılan Malzemeler.....	42
4.3.1. Çimento	42
4.3.2. Agregas	43
4.3.3. Su	44
4.3.4. Kimyasal katkı	45
4.3.5. Silis dumanı	45
4.3.6. Çelik lif	46
4.4. Karışım Hesapları.....	47
5. DENEYLERİN YAPILIŞI	50
5.1. Beton Üretimi ve Kür Şartları	50
5.2. Taze Beton Deneyleri.....	54
5.2.1. Çökme (slump) deneyi	54
5.2.2. Birim ağırlık deneyi	55
5.2.3. Hava miktarı deneyi	55
5.3. Sertleşmiş beton deneyleri	56
5.3.1. Basınç dayanımı deneyi	56
5.3.2. Yarmada çekme dayanımı deneyi	57
5.3.3. Doğrudan çekme dayanımı deneyi	59
5.3.4. Elastisite modülü deneyi	61
6. DENEY SONUÇLARI	64
6.1. Taze Beton Deney Sonuçları.....	64
6.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları.....	65
6.2.1. Basınç dayanımı deneyi	65
6.2.2. Yarmada çekme dayanımı deneyi	69
6.2.3. Doğrudan çekme dayanımı deneyi	72
6.2.4. Elastisite modülü deneyi	75
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	80
EKLER.....	82

	Sayfa
EK- 1 Şahit betonun elastisite modülü.....	83
EK- 2 SA katkılı beton 1. numune elastisite modülü.....	84
EK- 3 SA katkılı beton 2. numune elastisite modülü.....	85
EK- 4 SD katkılı beton 1. numune elastisite modülü.....	86
EK- 5 SD katkılı beton 2. numune elastisite modülü.....	87
EK- 6 ÇL katkılı beton 1. numune elastisite modülü.....	88
EK- 7 ÇL katkılı beton 2. numune elastisite modülü.....	89
ÖZGEÇMİŞ	90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Farklı malzemelerin özgül yüzey alanları.....	24
Çizelge 3.2. Lifli betondaki iyileşmeler.....	34
Çizelge 3.3. Çelik lifli betonlarda 0,25 mm'den küçük malzeme miktarı	36
Çizelge 3.4. D_{max} 'a göre betonda kullanılması gereken lif miktarı.....	37
Çizelge 4.1. B1 betonu deney programı.....	40
Çizelge 4.2. B2 betonu deney programı.....	41
Çizelge 4.3. B3 betonu deney programı.....	41
Çizelge 4.4. B4 betonu deney programı.....	41
Çizelge 4.5. PÇ 42,5 R çimentoya ait kimyasal özellikler.....	42
Çizelge 4.6. PÇ 42,5 R çimentoya ait fiziksel ve mekanik özellikler.....	42
Çizelge 4.7. Agrega çarpanları.....	43
Çizelge 4.8. Karışım elek analizi sonuçları.....	43
Çizelge 4.9. Karışım da kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....	44
Çizelge 4.10. Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri.....	45
Çizelge 4.11. Silis dumanının özellikleri	46
Çizelge 4.12. Çelik lifin kimyasal bileşimi.....	47
Çizelge 4.13. Çelik lifin görünüm özellikleri	47
Çizelge 4.14. B1 karışımına giren malzeme miktarları.....	48
Çizelge 4.15. B2 karışımına giren malzeme miktarları.....	48
Çizelge 4.16. B3 karışımına giren malzeme miktarları.....	49
Çizelge 4.17. B4 karışımına giren malzeme miktarları.....	49

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Karışım türlerinin taze beton deney sonuçları	64
Çizelge 6.2. Numunelerin basınç altında kırılma yükü değerleri.....	66
Çizelge 6.3. Beton türlerinin yaşa göre ortalama basınç dayanımları.....	66
Çizelge 6.4. Beton türlerinin yaşa göre basınç dayanımı kazanma yüzdeleri.....	67
Çizelge 6.5. Numunelerin yarmada çekme deneyi kırılma yükü değerleri.....	69
Çizelge 6.6. Beton türlerinin yaşa göre ortalama yarmada çekme dayanımları.....	70
Çizelge 6.7. Beton türlerinin yaşa göre yarmada çekme dayanımı kazanma yüzdeleri.....	70
Çizelge 6.8. Numunelerin doğrudan çekme kuvveti altında kırılma yükü değerleri.....	73
Çizelge 6.9. Beton türlerinin yaşa göre ortalama doğrudan çekme dayanımları.....	73
Çizelge 6.10. Beton türlerinin yaşa göre doğrudan çekme dayanımı kazanma yüzdeleri.....	74
Çizelge 6.11. 28 günlük beton numunelerin elastisite modülü deneyi sonuçları...	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Beton numunelerin basınç dayanımı deneyi	8
Şekil 2.2. Betonun basınç altındaki gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisi.....	9
Şekil 2.3. Betonun çekmede gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisi	12
Şekil 2.4. Beton numuneye doğrudan çekme yükü uygulanabilmesine dair ilk örnekler	13
Şekil 2.5. Beton numuneye doğrudan çekme yükü uygulanabilmesine dair örnekler	14
Şekil 2.6. Doğrudan çekme deneyleri için Kassas tarafından kullanılan düzen	15
Şekil 2.7. Doğrudan çekme deneyleri için Rusch tarafından kullanılan düzen	16
Şekil 2.8. Yarmada çekme dayanımı deneyi (a), asal gerilmeler (b), asal çekme gerilmelerinin eleman çapı boyunca dağılımı (c).....	17
Şekil 2.9 Orta noktadan (a) ve iki noktadan (b) yüklemeli eğilmede çekme dayanımı deneyi.	18
Şekil 3.1. Silis dumanının betonun dayanımına etkisi	27
Şekil 3.2. Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi	35
Şekil 4.1. Agrega karışımı granülometre eğrisi	44
Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan çelik lifler.....	46
Şekil 6.1. Beton türlerinin basınç dayanımları.....	67
Şekil 6.2. Beton türlerinin yaşa göre ortalama yarmada çekme dayanımları.....	71
Şekil 6.3. Beton türlerinin yaşa göre ortalama doğrudan çekme dayanımları	74
Şekil 6.4. Beton kodlarının elastisite modülü deney sonuçları	76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Çelik lifli betonda liflerin gelişigüzel dağılımı.....	30
Resim 3.2. Çelik lifler (çengelli tip).....	31
Resim 5.1. Beton karışımının hazırlanması	50
Resim 5.2. Beton karışımı.....	52
Resim 5.3. Numunelerin kalıplardan çıkarılması.....	53
Resim 5.4. Numunelerin kür odasında bakımı.....	53
Resim 5.5. Çökme deneyinin yapılışı	54
Resim 5.6. Hava miktarı deneyinin yapılışı	56
Resim 5.7. Betonun basınç dayanımı deneyi düzeneği.....	57
Resim 5.8. Betonun yarmada çekme dayanımı deneyi düzeneği.....	58
Resim 5.9. Beton numunenin alt ve üst yüzlerine yapıştırılan metal başlıklar	60
Resim 5.10. İki bileşenli epoksi yapıştırıcının metal başlığa uygulanması	60
Resim 5.11. Metal başlıkların numuneye yapıştırılmış hali.....	60
Resim 5.12. Betonun doğrudan çekme dayanımı deneyi düzeneği	61
Resim 5.13. Elastisite modülü deneyinde LVDT'lerin kurulumu	62
Resim 5.14. Elastisite modülü deney düzeneği.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A_c	Betonun numune en kesit alanı
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{ct}	Betonun çekme dayanımı
f_{cte}	Betonun eğilmede çekme dayanımı
f_{ctk}	Betonun karakteristik eksenel çekme dayanımı
f_{cty}	Betonun yarmada çekme dayanımı
F	Maksimum kırılma yükü
E	Elastisite modülü
σ	Gerilme
ϵ	Birim deformasyon
MPa	Megapascal, $[N/mm^2]$
GPa	Gigapascal, $[10^3 N/mm^2]$

Kısaltmalar	Açıklama
ÇL	Çelik lif
SA	Süper akışkanlaştırıcı
SD	Silis dumanı
s/ç	su/çimento
TS	Türk Standartları

1. GİRİŞ

Beton, istenilen şekil ve boyut verilebilmesi, ahşap gibi yanmaması, çelik gibi korozyona uğramaması v.b. üstün özellikleri nedeniyle günümüzde yapı mühendisliğinde en sık kullanılan malzeme durumundadır. Rastgele dağılmış agregalardan oluşan, heterojen ve gözenekli yapıda bir malzemedir.

Geleneksel beton tipik olarak; çekme dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çarpma dayanımı, deformasyon kapasitesi, kayma dayanımı, çatlama sonrası yük taşıma dayanımı ve tokluk (enerji yutma kapasitesi) gibi mekanik özellikler bakımından zayıf performans gösterir.

Betonun yerini alabilecek ve çok değişik ortamlarda kullanılacak başka bir yapı malzemesinin henüz keşfedilmemiş olması ve betonun açık deniz platformlarından, gaz tanklarına kadar çok değişik ortamlarda 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 niteliklerin çok üzerinde hizmet verebilecek bir yapı malzemesi haline gelmiştir.

Çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betondaki en zayıf halkadır. Betonun zayıf özelliklerini geliştirilerek daha dayanıklı bir hale gelebilmesi için değişik özelliklerde güçlendirme elemanları kullanılmaktadır. Örneğin kimyasal katkıları su/ çimento oranını düşürerek basınç dayanımını yükseltmenin yanında, betonun daha yoğun ve geçirimsiz olmasını da sağlamaktadır. Silis dumanı gibi ultra ince tanelerin kullanımı, yoğunluğun artırılması dolayısıyla boşlukların azaltılması taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için önemlidir [1-4]. Böylece durabilite iyileştirilir ve dayanım yükseltilir. Silis dumanı tanelerinin etkili olabilmesi için, beton içinde iyi bir dağılıma gereklidir ve bunu da bir süper akışkanlaştırıcı ile sağlamak olasıdır [3,4]. Ayrıca, betonun çekme dayanımını, aşınma ve çarpma dayanımını, düktilitesini, tokluğunu, sünekliğini artırmak ve betonu güçlendirmek için betona çeşitli metodlarla değişik miktarlarda gelişigüzel

dağılmış lifler eklenmektedir. Lifli betonun yüksek elastik mukavemet ve çatlamaya karşı yüksek dayanım, çok yüksek enerji yutma kapasitesi (toughness), darbe dayanımı, yorulma ve kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım gösterdiği yapılan araştırmalarla tespit edilmiştir [5-7].

Bu çalışmada, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin, endüstriyel bir atık olan silis dumanı mineral katkısının ve çelik lifin betonun basınç dayanımına ve yarmada çekme dayanımı ile doğrudan çekme dayanımına olan etkileri araştırılmıştır. Bu malzemelerle üretilen beton numunelerin basınç ve çekme etkisi altındaki davranışları şahit beton numuneler ile karşılaştırılmıştır. Bu malzemelerin betonun basınç ve çekme dayanımına katkısının hangi mertebede olacağı araştırılmıştır. Bu amaçla aynı su/ çimento oranına (seçilen su/çimento oranı 0,51) sahip şahit beton, süper akışkanlaştırıcı katkılı beton, silis dumanı katkılı beton ve çelik lifli beton numunelerinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve doğrudan çekme dayanımının 3, 7, 14 ve 28 günlük değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 28 günlük numuneler üzerinde ayrıca elastisite modülü deneyleri yapılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkılı beton dışındaki karışımlarda çökme (slump) değerleri 10-12 cm'de sabit tutulmuştur.

Numunelerin basınç dayanımı deneyi TS EN 12390- 3 standardına uygun olarak, yarmada çekme dayanımı deneyi ise TS EN 12390- 6 standardına uygun olarak yapılmıştır. Doğrudan çekme dayanımı deneyi ise herhangi bir noktada gerilme yığılmasına sebep olmadan üniform çekme gerilmesi dağılımı elde edilmesi prensibinden hareketle 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir numunelerin iki ucuna epoksi ile çelik başlıklar yapıştırılması ve başlık merkezlerinden zincir vasıtasıyla deney makinesine bağlanarak eksenel çekme kuvveti uygulanması şeklindeki deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülü deneyleri de TS 3502 standardına uygun olarak yapılmıştır.

2. BETON

Beton, değişik boyutlarda agregası adı verilen mineral dolgu malzemesinin, imento ve su karışımından oluşan imento hamuru ile bileşimi sonucu, zamanla sertleşip dayanım kazanan kompozit bir malzemedir. Burada imento, kum ve iri agregaları birbirine bağlar. Kum ise iri agregası taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun kompasitesini artırır. akıl veya kırmataş taneleri betonda iskelet görevi yaparak, dış kuvvetlere karşı koyarlar.

Betonun bileşenlerinin kullanılmadan önce özelliklerinin saptanması gerekir. Malzemelerin nitelikleri beton üretimi için uygun ise, bunların ne oranda kullanılacağı saptanır. Gerek taze betonun ve gerekse serleşmiş betonun tüm özellikleri, beton karışımının oluşturulmasında kullanılan çimentonun, agreganın, suyun ve katkı maddelerinin özellikleri ve karışım içerisindeki oranları tarafından etkilenmektedir.

Beton agregaları, minerallerden oluşmuş taneli malzemelerdir. Kum, akıl ve kırma taş beton yapımında en çok kullanılan agregası cinsleridir. Türk Standartlarının (TS) tanımlamasına göre, elendiğinde 4,0 mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçebilen boyutlardaki agregaya “ince agregası” ve bu elek üzerinde kalan agregaya “iri agregası” denilmektedir.

Çimento, bağlayıcı özelliğe sahip bir malzemedir. Çimentonun sağlayabileceğı bağlayıcılık özelliğı, bu malzemenin su ile birlikte karılması sonucu elde edilmektedir. Çimento ve suyun oluşturduğu malzeme “imento hamuru” olarak adlandırılmaktadır.

Betonun oluşturulmasında imento hamurunun işlevi, agregası tanelerinin yüzeylerini kaplamak, agregası taneleri arasındaki boşlukları doldurmak ve agregası tanelerini bir arada tutacak tarzda bağlayıcılık sağlamaktır. O bakımdan beton, “imento hamurundan ve agregalardan oluşan kompozit bir malzeme” olarak da tanımlanabilmektedir.

Çimento, su ve ince agreganın karışımından oluşan malzemeye “harç” denilmektedir. Harç, içerisinde iri agrega bulunmayan bir betondur.

Çimento ve suyun birleştirilmesiyle elde edilen çimento hamuru, başlangıçta plastik (yumuşak, şekil verilebilir) bir malzeme durumundadır. Ancak, çimento ve su arasında hemen başlayan ve devam etmekte olan kimyasal reaksiyonların (hidratasyonun) etkisiyle, çimento hamurunun başlangıçtaki plastiklik özelliği zaman ilerledikçe azalmaktadır. Böylece, bir veya birkaç saat içerisinde çimento hamuru katılaşmakta ve daha sonraları da tamamen sertleşmiş bir duruma gelmektedir.

Betonun plastikliğini koruduğu süredeki durumuna (yani malzemelerin karılmasıyla elde edilen plastik durumun, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle giderek azalıp, katılaşmanın başladığı ana kadarki haline) “taze beton” denilmektedir. Betonun katılaşma olayından sonraki safhadaki durumu, “sertleşmiş beton” olarak anılmaktadır.

Sertleşmiş beton, taze betonun katılaşmasından sonraki safhadaki durumu olarak tanımlandığı için, sertleşmiş betondan beklenen performans, önemli ölçüde taze betonun özelliklerine bağlı olmaktadır. Sertleşmiş betonun özelliklerini çok büyük ölçüde etkileyen başka faktörler de bulunmaktadır. Bunlar, taze betonun uygun tarzda taşınması, yerine yerleştirilmesi, sıkıştırılması, yüzeyinin düzgünleştirilmesi ve hidratasyonun sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesi için kür edilmesi (bakım) işlemleridir. Sertleşmiş betondan beklenen özelliklerin elde edilebilmesi için bu işlemlerin uygun tarzda yerine getirilmiş olması gerekmektedir.

2.1. Betonun Dayanımı

Değişik türdeki yapılarda kullanılmakta olan betonun üzerine değişik yönlerde etki yapan statik ve/veya dinamik yükler (kuvvetler) gelebilmektedir. Beton, bu yükleri taşıyabilmek için direnç göstermektedir. Doğal olarak, üzerine gelen yükün etkisiyle betonda bir miktar şekil değişikliği meydana gelmektedir. Üzerine gelen yüklerin büyüklüğü arttıkça, hem betondaki şekil değişikliklerinin miktarı artmakta, hem de

bu yükleri taşıyabilmek için daha çok direnç gerekmektedir. Şayet betonun üzerine gelen yüklerin büyüklüğü, betonun bu yüklere karşı koyma kapasitesinden daha büyük boyutlara ulaşır ise, çok büyük şekil değişiklikleri oluşmakta ve beton kırılmaktadır.

“Beton dayanımı”, üzerine gelen yüklerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği maksimum direnme olarak tanımlanmaktadır.

Betonun üzerine değişik yönlerde uygulanan yükler, değişik etkiler yaratabilmektedir. Basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyeti, sırasıyla, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlı yüklerin etkisi altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyetine de yorulma dayanımı denmektedir.

Betonun kullanılacağı yapının tasarımı yapılırken, betonun üzerine gelebilecek değişik türdeki yüklerin büyüklükleri göz önünde tutulmakta ve üretilecek betonun bu yüklere karşı yeterli dayanımı göstereceği varsayılmaktadır. Üretilecek betondaki dayanım değerlerinin, tasarım hesaplarında kullanılmış olan değerlerden daha az olmaması istenmektedir.

Betonun özellikleri arasında en çok aranılanı ve kullanılanı, dayanım özelliğidir. Çünkü, betonun genellikle kullanıldığı yapılar, basınç, çekme, eğilme ve kayma yaratacak kuvvetlerin doğrudan etkisi altındadır. O nedenle, betondaki basınç, çekme, eğilme ve kayma dayanımlarının bilinmesi, beton yapıların bu yükler altındaki taşıma kapasitelerinin bilinmesine yaramaktadır. Ayrıca sertleşmiş betonda aranılan birçok özellik arasında deneysel olarak en kolay tayin edileni betonun dayanım özelliğidir ve bu özelliği ile diğer özellikleri arasında bir korelasyon kurabilmek, diğer özelliklerin ne büyüklükte olduğunu değerlendirebilmek mümkündür.

Su/çimento oranının düşürülmesi ile betonun dayanımında artış sağlanabilmektedir. Ancak betonun işlenebilirliğinin de dayanımı kadar önemli olması nedeniyle normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcılar ortaya çıkana kadar uzun yıllar su/çimento oranını yeterince aşağılara indirmek mümkün olmamıştır. 1950'li yıllarda betonda su/çimento oranı 0,60-0,80 arasında iken günümüzde su/bağlayıcı oranı 0,15 mertebesine düşürülebilmektedir. 1980'li yıllardan itibaren betonda süper akışkanlaştırıcıların ve silis dumanı gibi ultra incelikteki mineral katkıların birlikte kullanılması dayanımlarda çok yüksek artışlar sağlamıştır [6].

2.1.1. Betonun dayanımını oluşturan unsurlar

Değişik boyutlardaki agrega tanelerinden ve bu tanelerin yüzeylerini kaplayarak aralarındaki boşlukları dolduran çimento hamurundan oluşan beton, çok fazlı kompozit bir malzemedir ve çok kompleks bir yapısı vardır.

Temel bir yapı malzemesi olan beton, doğası bakımından diğer yapı malzemelerinden ayrılır. Betonun özelliklerinin, tıpkı yaşayan sistemlerde olduğu gibi zamanla gelişme gösterdiği saptanmıştır. Betonun bir bütün olarak doğası, bileşenlerinin özelliklerinin tek tek süperpozisyonu ile elde edilemez. Beton davranışlarının önemli bir bölümü, bu bileşenlerinin arasındaki etkileşimler sonucu ortaya çıkar.

Betonun yapısı makro ölçekte ele alınacak olur ise betonun yük altında kırılması, çimento hamurunun veya agreganın yeterli direnci göstermemesinden, yada çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansın yeterince yüksek olmamasından kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle beton dayanımı, çimento hamurunun, agreganın dayanımına ve çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansın ne ölçüde iyi olduğuna bağlıdır [8].

Sertleşmiş betondaki kırılmanın başladığı en zayıf bölgeler, iri agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki yüzeylerdir.

Betonun dayanımını etkileyen faktörler; su/ çimento oranı, karma suyunun kalitesi, çimento ve agrega özellikleri, betona uygulanan karılma, taşınma, yerleştirilme ve sıkıştırılma işlemleri, kür koşulları ve betonun yaşı şeklinde sıralanabilir.

2.1.2. Betonun basınç dayanımı

Betonun basınç dayanımı, “eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti (eksenel basınç yükü etkisiyle, betonda oluşan maksimum gerilme)” olarak tanımlanmaktadır.

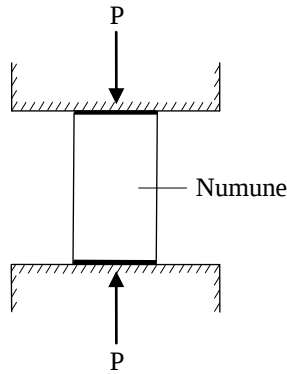
Betonun tüm mekanik özellikleri arasında en önemli olanı ve değeri en büyük olanı basınç dayanımıdır. Ancak betonun çekme dayanımı oldukça zayıftır. Malzemenin bu özelliği göz önüne alınarak betonarme yapı sistemi doğmuştur. Betonarme yapılar kesit içindeki basınç gerilmelerini betonun, çekme gerilmelerini çelik malzemesinin alarak, iki malzemenin ortaklaşa çalışma ilkelerine göre düzenlenir. Çekme dayanımının çok düşük olması nedeniyle pratikte beton yalnızca basınca çalışır.

Basınç dayanımı betonun tüm olumlu nitelikleriyle paralellik gösterir. Örneğin yüksek basınç dayanımına sahip olan bir betonun; kompasitesi fazladır, serttir, geçirimsizdir, dış etkilere dayanır ve aşınması azdır. Bu nedenle basınç dayanımını saptamak suretiyle betonun kalitesini global olarak değerlendirmek mümkündür. Ayrıca beton kalitesi basınç dayanımı ile tanımlanır [9].

Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı zamanın artan bir fonksiyonudur ve dayanım artımı yıllarca sürebilir. İlk yedi günde çok hızlı olan dayanım kazanımı, yavaşlayarak devam eder. Bu nedenle standart dayanımın belirli bir beton yaşı ile ifade edilmesi zorunlu olmuştur. Betonarme yapılarda genel olarak 28 günlük dayanım esas alınarak, emniyet gerilmeleri saptanmaktadır. Basınç dayanımı deneyinde, standart şekilde hazırlanmış, deney gününe kadar korunmuş 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir numuneler tek eksenli basınç dayanımı deneyine tabi tutulur [10]. Bugün tüm uluslar arası ve ulusal yönetmeliklerde 28 günlük dayanım, standart dayanım kabul edilmiştir.

Gerilme cinsinden ifade edilen dayanım silindirin kırılma yükü kesit alanına bölünerek hesaplanır. Basınç dayanımı kg/cm^2 veya N/mm^2 (MPa) birimleri ile ifade edilir.

TS 500’de “beton basınç dayanımı, bakımı ilgili standardına göre yapılmış, 28 günlük, çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan standart beton silindir numunesinin, ilgili standardında belirtilen hızla uygulanan tek eksenli basınç altında taşıyabildiği en büyük gerilme değeridir.” şeklinde tanımlanmıştır. TS 500 silindir deney numunelerini esas kabul etmekle beraber küp numuneleri de geçerli saymıştır.

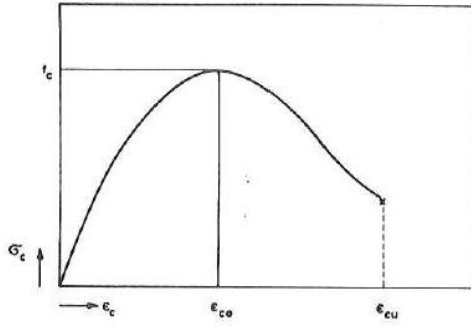


Şekil 2.1.Beton numunelerin basınç dayanımı deneyi.

Betonun davranışını anlayabilme ve gerçekçi bir şekilde modelleyebilme açısından, malzemenin gerilme- birim deformasyon özellikleri büyük önem taşır. Betonarme sistemlerde betonun çekme dayanımı hesaplarda dikkate alınmadığından, beton için önemli olan basınç altındaki gerilme- birim deformasyon ilişkisidir. Betonun basınç altındaki davranışını belirleyen bu eğriler, standart beton numunelerin eksenel basınç altında denenmesinden elde edilir. Şekil 2.2’de gösterilen gerilme-birim deformasyon eğrisi, betonun genel davranışı hakkında bir fikir vermektedir [10].

Betonda araştırılan değişik dayanım türleri arasında mühendislik uygulamalarında en çok kullanılanı ve en popüler olanı “basınç dayanımı”dır. Bunun nedenleri basınç dayanımının bulunabilmesi için uygulanan deney yönteminin diğer dayanım türlerinin bulunması için uygulanan yöntemlerden daha basit olması, hemen hemen

tüm yapıların tasarımında betonun basınç dayanımı değerinin esas alınması ve betonun basınç dayanımı ile çekme ve eğilme dayanımları arasında, yaklaşık da olsa bir korelasyon bulunmasıdır.



Şekil 2.2. Betonun basınç altındaki gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisi.

Zamanla dayanım kazanan betonun basınç dayanımını birçok değişken etkilemektedir. Bunlar; numune geometrisi ve boyutları, yükleme hızı, su/ çimento oranı, karma suyu kalitesi, çimento özellikleri, agrega özellikleri, betona uygulanan üretim, taşıma, sıkıştırma işlemleri, kür koşulları ve betonun yaşı olarak sayılabilir.

2.1.3. Betonun çekme dayanımı

Betonun çeki dayanımı, “betonda çekme etkisi yaratacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti” olarak tanımlanmaktadır.

Betonun dayanım değerleri arasındaki en yüksek olanı basınç, en düşük olanı da çekmedir. Ancak betonda basınç ve çekme dayanımları, birbiriyle yakından ilgilidir. Genel olarak, betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının % 9 -% 10’u kadardır. Betonun kalitesine ve yaşına bağlı olarak bu oran % 7 ile % 17 arasında değişebilmektedir.

Genellikle yapıdaki betona doğrudan çekme kuvveti uygulanmamaktadır. Ancak, beton elemanların üzerlerine gelen basınç ve/veya eğilme kuvvetleri betonun

içerisinde dolaylı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Betonda büzülme olması durumunda yer alacak şekil değiştirmelerin agrega taneleri ve betondaki donatı tarafından engellenerek serbestçe yer almaması nedeniyle de beton içerisinde çekme kuvvetleri oluşmaktadır.

Betonda oluşan çekme kuvvetleri, betonun çatlamasına ve kırılmasına yol açan en önemli neden olarak kabul edilmektedir. Oldukça gevrek bir malzeme olan betonun çekme kuvvetlerine karşı direnme kabiliyeti çok düşük olduğundan, çekme dayanımının değeri betonun içerisindeki çatlakların oluşmasında önemli rol oynamaktadır. Betonda büyük çatlakların oluşması da kırılmaya neden olmaktadır.

Betonun kırılmasına yol açabilecek kadar büyük çatlakların oluşmadığı durumlarda dahi, karşılaşılan sorunlar ortadan kalkmamaktadır. Çatlakların oluşması ile, betonun içerisine dışarıdan su ve bu sularla birlikte sülfat, asit, klor gibi maddelerin girebilmesi daha kolay olmakta, betonarme elemanlardaki demir donatı korozyon (paslanma) göstermektedir. Betonun içerisine giren yabancı maddelerin yarattığı kimyasal olaylar betonun büyük hasar görmesine, dayanıklılığın azalmasına yol açmaktadır. Betonun çekme dayanımının bilinmesi, çatlakların ve yapıyla ilgili analizlerin yapılabilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

Özellikle su depolama yapılarının tasarımında önemli bir problem teşkil eden çekme bölgesindeki çatlaklar, betonun çekme davranışına bağlıdır. Ayrıca havaalanı betonlarında, beton yollarda, ön gerilmeli beton elemanlarda ve kütle betonlarının çatlamasında çekme dayanımı birincil derecede öneme sahiptir. Diğer yandan, basit kiriş üzerindeki eğilme yükleri kiriş kesitinde kesme kuvveti ve eğilme momenti yaratmakta, bu da tarafsız eksenin altında kalan bölgede çekme gerilmesi meydana getirmekte ve “eğik çatlak” olarak adlandırılan çatlakların yer almasına neden olmaktadır. Betonarme elemanların kesme kuvveti altında göçmesi diyagonal çekme çatlağıyla olur ve bu nedenle kesme dayanımı, çekme dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden, beton harcının, çimento hamurunun ve betonun çekme dayanımının basınç dayanımından çok daha dikkatli ve derinlemesine incelenmesi

gerekir [11]. Bir bölgede bir çatlak oluşmuşsa, genellikle o bölgede çatlağa dik yönde büyük bir çekme gerilmesi oluşmuştur denebilir.

Betonun çekme dayanımını etkileyen faktörler, basınç dayanımını etkileyen faktörlerin aynısıdır. Yalnız burada bağlayıcı madde ile agrega taneleri arasındaki aderans daha önemlidir. Aderansın zayıf olmasına neden olan faktörler, örneğin kil ve silt fazlalığı, betonun çekme dayanımını düşürürler [9]. Çekme deneylerinde kullanılan numunelerin herhangi bir noktasındaki yerel zayıflık, elemanın o kesitten kırılmasına sebep olur. Bir numunede, yerel zayıflık yaratan kusurların sayısı rastgele (random) bir olay olduğundan, çekme dayanımını az sayıda deneyle saptamaya çalışmak yanıltıcı sonuçlar verir. Gerçekçi sonuçlar almak için çok sayıda deney yapmak ve bunların ortalamasını almak gerekir.

Betonun kusurlarını daha belirgin bir şekilde gösterdiğinden bazı araştırmacılar çekme deneylerini basınç deneylerine yeğlemektedirler [9]. Ayrıca hava meydanı betonlarında denetleme, basınç deneyi yerine eğilme deneyi ile yapılır. Örneğin, Fransız şartnamelerine göre hava alanları betonunda 28 günlük çekme dayanımının $2,85 \text{ N/mm}^2$ den küçük olmaması istenir. Çünkü piste inen uçakların beton elemanlar üzerindeki zararlı etkisi, eğilmeden dolayı çekme gerilmelerinden olur.

Çekme dayanımı ile betonun basınç dayanımı arasında farklı bağıntılar, değişik kuruluşlarca önerilmiştir. Örneğin TS 500 betonun çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasında şu ilişkinin kurulabileceğini belirtmiştir:

$$f_{ctk} = 0,35\sqrt{f_{ck}} \text{ [MPa]}$$

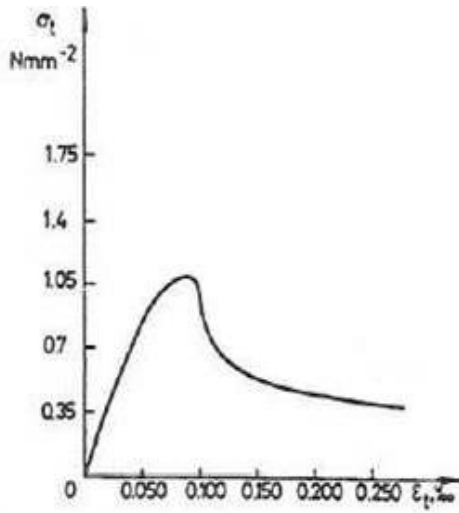
Burada;

f_{ck} = Betonun karakteristik basınç dayanımı, [MPa]

f_{ctk} = Betonun karakteristik eksenel çekme dayanımı, [MPa]

Çekme gerilmeleri altında betonun dayanımı ve yer değiştirmesi; beton, betonarme,

öngörilmeli beton dizaynı yapılırken çatlak başlangıcı ve gelişimi, burulma ve yüksek gerilmeler altında davranış gibi pratik ya da teorik problemlerle karşılaşıldığında gerekli parametrelerdir [12]. Şekil 2.3’de çekme kuvvetleri altında betonun genel davranışının anlaşılabilmesi açısından çekme yükleri altında betonun gerilme- birim deformasyon eğrisi verilmiştir [12].



Şekil 2.3. Betonun çekmede gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisi.

Betonun çekme dayanımının ideal olarak, aksenal çekme altında denenen bir elemandan elde edilmesi gerekir. Geçmiş yıllarda bu konuda yapılan deneyler başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bu başarısızlıktan dolayı çekme dayanımının dolaylı olarak saptanması yoluna gidilmiştir.

Betonun çekme dayanımı, üç değişik deney yöntemiyle bulunabilmektedir. Bunlar, doğrudan çekme dayanımı deneyi, yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyidir. Bu deney yöntemlerinin sonuçları da birbirinden oldukça farklı değerler verebilir. Bu nedenle betonun çekme dayanımı verilirken, hangi deney yöntemi ile saptandığı açıklanmalıdır.

Doğrudan çekme dayanımı deneyi

Betonun doğrudan çekme yükleri altındaki dayanımını bulabilmek için standart bir

deney yöntemi yoktur. O nedenle, böyle bir deneyde kullanılmak üzere standart boyutlu ve şekilli numuneler de bulunmamaktadır.

Betonun çekme dayanımının ideal olarak, eksenel çekme altında denenen bir elemandan elde edilmesi gerekir. Geçmiş yıllarda bu konuda yapılan deneyler başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Önce, uzunluğu boyunca kesiti sabit olan prizma ve silindirler, Şekil 2.4 (a)'da gösterildiği şekilde denemek istenmiş, ancak pres çenelerinin sebep olduğu yöresel gerilmeler nedeni ile, elemanlar çenenin numuneyi kavradığı yerden kırılmıştır. Bu tür numunelerin gerçekçi sonuçlar veremeyeceği anlaşıncı Şekil 2.4 (b)'de gösterilen briket şeklindeki numunelere gidilmiştir. Ancak, bu tür numunelerden de gerilme yığılmaları nedeni ile iyi sonuçlar alınamamıştır [10].

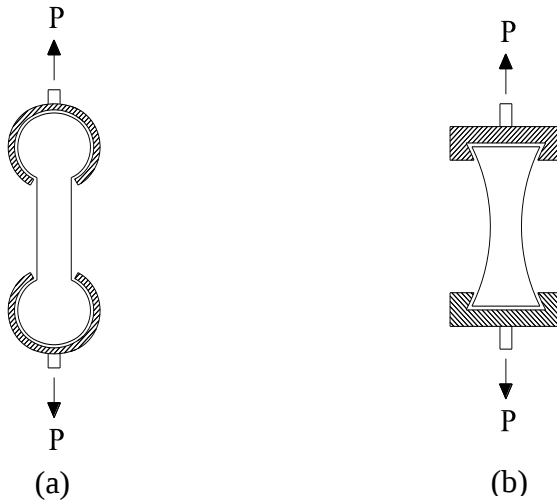


Şekil 2.4. Beton numuneye doğrudan çekme yükü uygulanabilmesine dair ilk örnekler.

Doğrudan çekme yükleri, değişik boyutlardaki silindir, prizma, ve Şekil 2.5'deki gibi özel boyutlu numuneler üzerinde de uygulanabilmektedir. Ancak, beton numuneye doğrudan çekme yükleri uygulayabilmek için, kullanılacak numunelerin uçlarına özel olarak hazırlanmış metal başlıkların yapıştırılması ve bu metal başlıkların ortasına da 90 derece açıyla dik olacak tarzda metal çubukların bağlı olması gerekmektedir.

Özel başlık düzeni takılan beton numunelerin uçlarındaki metal çubuklar, normal beton çubukların çekme deneyinde olduğu gibi, deney makinasının çeneleri tarafından sıkıca kavranacak tarzda deney makinasına yerleştirilmektedir. Deney makinası çalıştırıldığında, makinanın çeneleri birbirinden uzaklaşmakta ve böylece

Çubuklara ve metal başlıklara sıkıca bağlanmış olan beton numuneye doğrudan çekme yükleri uygulanmış olmaktadır. Yk uygulaması, beton numune kırılıncaya kadar devam etmektedir.



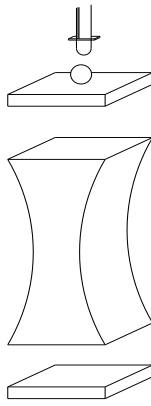
şekil 2.5. Beton numuneye doğrudan çekme yükü uygulanabilmesine dair rnekler.

Betonun ekme dayanımı, kırılma yaratacak olan yükün (P 'nin), numune boyunun ortasındaki numune kesit alanına bölünerek hesaplanmakta ve kgf/cm^2 veya MPa birimiyle ifade edilmektedir.

Başlık düzeni takılmadan beton numuneye doğrudan çekme yükü uygulanamamaktadır. Standart boyutlu silindirlerin uçlarının deney makinasının çeneleri tarafından sıkıca kavranarak çekme yükü uygulanması mümkün olmamaktadır. Zira, gevrek bir malzeme olan betonun uçları ezilip kırılmaktadır. Deney makinasının yarattığı çekme yükleri numuneye aktarılamamaktadır. Gerilme birikimleri nedeniyle, kırılmanın yer alacağı kesitteki yük dağılımı üniform olmamaktadır [8].

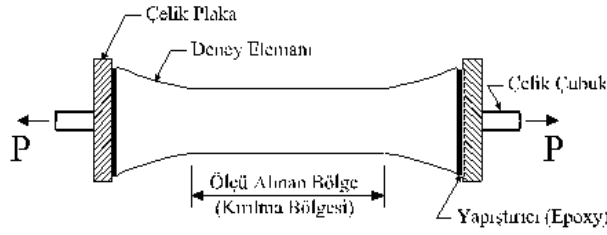
Başlık düzeni takılarak beton numuneye doğrudan çekme yüklerinin uygulanması da pek kolay değildir. Metal başlıkların numune uçlarına sıkıca bağlanmış olmaları ve bu başlıklara kaynaklanmış olan metal çubukların tamamen dik konumda olması gerekmektedir.

Kassas ve Erdoğan tarafından yürütülen bir araştırmada, beton numunelere Şekil 2.6’de görülen metal başlık düzeni takılmıştır. Numunelerin üst ve alt yüzeyleri, metal başlık düzenine çok kuvvetli bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Bu yöntemle, numunelere oldukça üniform dağılımlı çekme yükü uygulanabileceği sonucuna ulaşılmıştır [11].



Şekil 2.6. Doğrudan çekme deneyleri için Kassas tarafından kullanılan düzen.

Betonun doğrudan çekme yükleri altındaki dayanımının bulunabilmesine dair birçok araştırmacı değişik boyutlu ve şekilli numuneler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu konuda oldukça kapsamlı araştırmalar yapan Prof. Rusch, 1960’lı yıllarda Şekil 2.7’de görülen deney düzenini gerçekleştirmiştir. Bu deneyde pres çenesinin örneği kavrayacağı bölgedeki yöresel kırılmasını önlemek için iki uçtaki kesitleri büyük tutulmuştur. Yük, beton deneyi elemanına yüksek dayanımlı, epoxy kökenli yapıştırıcılarla tutturulan çelik plaklardan yararlanılarak uygulanmıştır. Basit çekme deneyi olarak adlandırılan ve gerçek çekme dayanımını veren bu deney, ideale en yakın olanıdır [10]. Ancak bu tür bir deneyin deney numunelerini hazırlamak oldukça zor olduğu gibi, laboratuarlarda standart deney olarak uygulanması da pratik değildir. O nedenle, betonun çekme dayanımının bulunabilmesi için doğrudan çekme deney yöntemi nadiren kullanılmaktadır. Hazırlanmaları ve yüklenmeleri daha kolay olan eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı deneyleri standart çekme deneyleri olarak kullanılmaktadır.



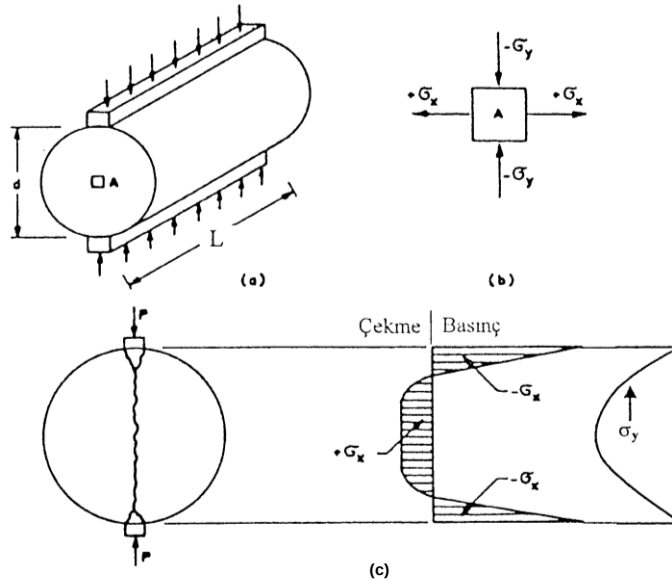
Şekil 2.7. Doğrudan çekme deneyleri için Rusch tarafından kullanılan düzen.

Yarmada çekme dayanımı deneyi

Dolaylı çekme yükleri altında betonun çekme dayanımının elde edilebilmesini belirleyen bu deney yöntemi bütün ülke standartlarında yer almaktadır. Bu konudaki Türk standardı TS EN 12390- 6'dır. Bu deney yönteminde genellikle silindir şekilli beton numuneler kullanılmaktadır. Küp şekilli beton numunelerin kullanılabilmesi de mümkündür.

Bu deney, pres tablasına yatay olarak yerleştirilen 150 mm çaplı ve 300 mm yükseklikli standart bir beton silindir numunesinin altına ve üstüne yerleştirilen çelik plaklara dik yönde basınç uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Numunenin yan yüzünün alt ve üst kısımlarına 25 mm eninde ve yaklaşık 3 mm kalınlığında kontrplak çıtalar yerleştirilmektedir. Deney presi vasıtasıyla uygulanan basınç yükü numune kırılincaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin kırılma tarzı, numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir.

Silindirin yarılama yüzeyinde birbirine dik asal çekme ve basınç gerilmeleri oluşur. Beton kesitinin alt ve üst taraflarında çok büyük yanal basınç gerilmesi yer almakta fakat kesitin orta bölgesinde oldukça üniform dağılımlı çekme gerilmesi oluşmaktadır [8]. Kırılmaya neden olan asal çekme gerilmelerinin eleman çapı boyunca dağılımı Şekil 2.8 de gösterilmiştir. Yüken uygulandığı yerde oluşan yöresel büyük basınç gerilmeleri, yükten biraz uzaklaştığında çekme gerilmelerine dönüşmekte ve bu çekme gerilmeleri çap boyunca sabit kalmaktadır.



Şekil 2.8.Yarmada çekme dayanımı deneyi (a), asal gerilmeler (b), asal çekme gerilmelerinin eleman çapı boyunca dağılımı (c).

Silindir yarma deneyinden betonun çekme dayanımı, elastisite teorisi kullanılarak aşağıda verilen eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$f_{cty} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

Burada;

f_{cty} = Yarmada çekme dayanımı, [MPa]

F = En büyük yük, [N]

L = Silindir numunenin boyu, [mm]

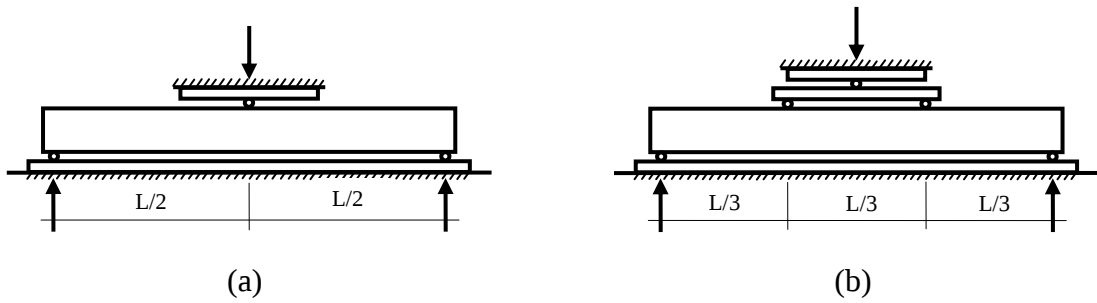
d = Silindir numunenin çapı, [mm]

Bu tür deney elemanında yarıma, gerçekten çekme gerilmesinden oluşmasına rağmen, elde edilen sonuçlar betonun gerçek çekme dayanımını vermemektedir. Burada uygulanan gerilme iki yönlü olduğundan asıl çekme dayanımından büyük değerler elde edilir.

Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Dolaylı çekme yükleri altında betonun çekme dayanımının elde edilebilmesini belirleyen bu deney yöntemi bütün ülke standartlarında yer almaktadır. Bu konudaki Türk standardı TS EN 12390- 5’dir.

Betonun eğilme dayanımının bulunabilmesi için beton kiriş numuneler hazırlanmakta ve Şekil 2.9 (a)’daki gibi kirişin oturtulduğu mesnetlerin arasındaki mesafenin orta noktasından veya Şekil 2.9 (b)’deki gibi mesnetlerden L/3 uzaklıktaki iki noktadan eğilme yükü uygulanarak kırılmaya tabi tutulmaktadır. Eğilme dayanımı deneylerinde kare kesitli kirişler kullanılmaktadır.



Şekil 2.9. Orta noktadan (a) ve iki noktadan (b) yüklemeli eğilmede çekme dayanımı deneyi.

Beton kiriş numunelerde kırılmaya neden olan yük deney presinin göstergesinde okunduktan sonra, örneğin iki noktadan eğilme yükü uygulanan deneylerde eğilme dayanımının hesaplanabilmesi için aşağıdaki formül uygulanmaktadır.

$$f_{cte} = \frac{F \times L}{d_1 \times d_2^2}$$

Burada;

f_{cte} = Eğilmede çekme dayanımı, [MPa]

F = Maksimum yük, [N]

L = Mesnetler arası mesafe, [mm]

d_1, d_2 = Numune enkesit boyutları, [mm]

Betonun eğilme dayanımının araştırılmasında genellikle kullanılan yükleme yöntemi, yükün mesnetlerden $L/3$ uzaklıktaki iki noktadan uygulandığı yöntemdir. Bunun nedeni, iki noktadan yükleme durumunda oluşan maksimum momentin kirişin oldukça uzun bir bölümünde (ortadaki $L/3$ bölgesinde) üniform etki göstermesi ve bu bölümün kesme kuvvetleri etkisinde bulunmuyor olmasıdır. Tek noktadan yüklenme durumunda, maksimum moment sadece kirişin ortasında etkili olmakta, orta noktadan uzaklaştıkça momentin değeri ve etkisi azalmaktadır.

Çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması

Yukarıda sıralanan deney türleri arasında gerçek çekme dayanımını veren doğrudan çekme dayanımı deneyi ideale en yakın olanıdır. Ancak bu tür bir deneyin laboratuvarlarda standart deney olarak uygulanması pratik olmadığından, hazırlanmaları ve yüklenmeleri daha kolay olan eğilme veya yarma silindir deneyi, standart çekme deneyleri olarak kullanılmaktadır.

TS 500'de betonun çekme dayanımı, eksenel çekme deneylerinden elde edilen değer olarak tanımlanmaktadır. Silindir yarma deneyinden elde edilen çekme dayanımının 1,50 ile, eğilme deneyinden elde edilen çekme dayanımının da 2,0 ile bölünerek betonun eksenel çekme dayanımının yaklaşık olarak hesaplanabileceği kabul edilmektedir.

3. MALZEMELERLE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR

3.1. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkılar

Katkı maddelerinin tümünün işlevlerinde kimyasal özellikler ve kimyasal olaylar ön planda olmakla beraber, beton teknolojisinde kimyasal katkı maddeleri denildiğinde su içerisinde çözünme gösteren katkı maddeleri anlaşılmaktadır.

Kimyasal katkılar; su azaltıcı, priz geciktirici, priz hızlandırıcı ve hava sürükleyici katkı maddeleri olarak sayılabilir. Ayrıca bunların dışında özel amaçlar için kullanılan muhtelif bir çok katkı maddeleri bulunmaktadır.

Su azaltıcı katkı maddeleri olarak adlandırılan ve taze betonda olması istenilen işlenebilme özelliğini elde edebilmek üzere beton karışımının su ihtiyacını azaltan katkılar, “akışkanlaştırıcı” katkı maddesi ismiyle de anılmaktadır.

Karışım suyunda, katkı maddesinin yol açtığı azalmanın miktarı % 5-11 arasında ise normal akışkanlaştırıcı katkı, % 12’den fazla ise süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı olarak isimlendirilmektedir.

Akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri, etki açısından pratik olarak aynı görünmekle beraber, özellikle süper akışkanlaştırıcıların normal akışkanlaştırıcı katkı maddelerine oranla daha az hava sürüklediği bilinmektedir.

Akışkanlaştırıcılar uygulamada üç amaçla kullanılmaktadır [13];

- Katkısız betonla aynı işlenebilmede olmak şartıyla su/çimento oranını azaltarak daha yüksek mukavemet ve daha az geçirimsizlik sağlamak,
- Su/ çimento oranını sabit tutarak kütle betonlarında hidrasyon ısını düşürmek için su ve çimento miktarını azaltarak aynı işlenebilmeyi kazanıp ekonomik yarar sağlamak,

- Beton karışımında kullanılan malzeme miktarlarını ve oranlarını değiştirmeden ulaşılamayan yerlere kolay yerleşmeyi sağlamak için işlenebilmeyi artırmak.

Akışkanlaştırıcı katkıları, düşük su/çimento (s/ç) oranı ile istenilen işlenebilirlikte beton üretimini sağlamak amacı ile kullanılmakta, böylece betonda dayanım artışı sağlandığı gibi istenilen yere ve yüksekliğe daha kolay pompalanabilmeyi sağlamakta, betoniyerde karıştırmayı kolaylaştırmakta, betoniye çeperine yapışmayı azaltmakta, betonun ayrışmasını önlemekte ve yerleşmesini kolaylaştırmaktadır. Günümüz beton teknolojisinde kimyasal katkı kullanımı işlenebilirlik açısından sağladığı bu kolaylıklarla bir zorunluluk haline gelmiştir.

3.1.1. Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin birleşimi

Su azaltıcı katkı maddelerinin kimyasal esasları bakımından çeşitli türleri vardır. Ancak bu katkıların çoğunluğu linyosülfonik asit ve bu asidin tuzları ve bunların değişime uğramış türleriyle üretilmektedir.

Su azaltıcı katkı maddeleri, içerdikleri aktif maddelerin genel bileşimine göre, dört grup altında sınıflandırılabilir;

- a) Linyosülfonatlı tuzlar ve linyosülfonat türevleri,
- b) Hidroksil- karboksilik asitler ve türevleri,
- c) Polimerik karbohidratlar
- d) Naftalin ve melamin esaslı yüksek oranda su azaltıcılar [14].

Akışkanlaştırıcılar beton içine hava sürükleyerek ve çimento tanelerinin birbirine yapışmasını, topaklaşmasını önleyerek etki gösterirler. Akışkanlaştırıcı maddeler çimento taneleri tarafından absorbe edilerek tane yüzeyine çöker. Topaklaşmaya meyilli çimento tanecikleri akışkanlaştırıcıların ayırıcı elektrostatik etkisiyle dağılır, su ile temas eden yüzeyleri artar ve hidrasyon da kolaylaşır. Akışkanlaştırıcıların topaklaşmayı önlemeleri ve aynı zamanda tanelerin birbirleri üzerinde kaymalarını

kolaylaştırmaları, betonun iç sürtünmesini azaltır ve betonun işlenebilme yeteneğinin artmasına neden olur.

3.2. Silis Dumanı

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızla soğutularak yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve % 85- % 98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” ya da kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir [8].

Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO_2 miktarı da artar. Bu miktar silisyum metalinde % 98’e ulaşır. Araştırmalarda ve pratikte kullanılan silis dumanları genellikle % 75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmiştir. Daha düşük oranlı silis dumanlarının kullanımı konusunda fazla bilgi yoktur.

Silis dumanı (SD) amorf yapıya sahip olduğundan, çok ince taneli malzeme olduğundan ve yüksek miktarda SiO_2 içerdiğinden, mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiği takdirde, hidrolik bağlayıcılık göstermektedir. Bu nedenle beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı yaklaşık % 10 kadar azaltılmakta ve onun yerine bu puzolanik madde yerleştirilmektedir. Çok ince taneli olması ve çok yüksek miktarda SiO_2 içermesi nedeniyle oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesinde kullanılmaktadır [8].

Silis dumanının çok ince tanelerden oluşmuş olması, taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta, su ihtiyacını artırmaktadır. O nedenle, yüksek dayanımlı beton üretilebilmesi için katkı maddesi olarak silis dumanı kullanıldığında, betonda daha az su kullanmak amacıyla, ayrıca su azaltıcı katkı maddesi de kullanılmaktadır. Silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılardaki gelişmeler sonucu yüksek

dayanımlı ve yüksek performanslı betonların vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir [4].

Silis dumanının taneleri çok ince olduğundan belirli bir çökme değeri elde etmek üzere, silis dumanlı betonların ihtiyacı olan su, katkısız betonunkinden çok daha fazla olmaktadır. Genel olarak, her 1 kg/m³ silis dumanı katkısı için, taze betondaki su ihtiyacı yaklaşık 1 lt/m³ artmaktadır [4].

Silis dumanı, temel bileşen olmasa da betonun çeşitli fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton üretiminde giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Bu mineral katkı maddesi puzolanik aktivitesi ve boşluk doldurucu etkileriyle beton özelliklerinde iyileştirme yapabilmektedir.

Silis dumanı betonda yüksek basınç dayanımı elde edilmesini sağlamakta, taze betondaki terleme ve ayrışmayı azaltmakta, betonun hidrasyon ısını ve su geçirimsizliğini azaltmakta, buna karşın yüksek miktarda karışım suyu ihtiyacına neden olmakta, terlemeyi azaltarak yüzeyinin düzeltilmesi işlemini zorlaştırmakta, plastik büzülme çatlağına yol açabilmektedir.

Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık isteyen yerlerde kullanılmaktadır. Yaklaşık 20 yıldan bu yana betonda silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcıların birlikte kullanımı ile daha yüksek performanslı betonlar üretilmeye başlanmış ve bu betonların son zamanlarda özellikle çok katlı yüksek yapıların inşasında kullanımı yaygınlaşmıştır.

Uygulama alanı olarak yerinde dökülmüş veya prefabrike yüksek dayanımlı yada erken dayanımı yüksek beton elemanları, ağır aşınmaya maruz döşemeler ve yol kaplamaları, erozyona ve oyulmaya maruz hidrolik yapılar, zararlı kimyasallara maruz betonlar, deniz yapıları, yüksek dayanımlı hafif beton elemanlar, beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi, çelik donatının korunması, yüksek performanslı çimento şerbet ve sıvaları sayılabilir. Türkiye’de silis dumanı Antalya’da Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilmektedir.

3.2.1. Tane özellikleri

Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli küresel taneciklerden meydana gelir. Çok ince taneli ve hafif olduğundan özgül yüzey bazında inceliği Blaine metodu ile tayin edilememektedir. Çok ince taneli cisimlerde özgül yüzey azot adsorpsiyon (BET) metodu ile tayin edilebilmektedir. İki farklı metoduyla elde edilen sayısal sonuçların doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir. Ancak, aşağıdaki değerler yine de silis dumanının inceliği konusunda bir fikir vermektedir.

Çizelge 3.1. Farklı malzemelerin özgül yüzey alanları.

Malzeme	Metod	Özgül Yüzey [m^2/kg]
Portland çimentosu	Blaine	300- 400
Uçucu kül	Blaine	400- 700
Granüle Y. F. Curufu	Blaine	350- 600
Silis dumanı	Azot (BET)	13000- 20000

Silis dumanının tanelerin hemen tümü $1\mu\text{m}$ 'dan küçük olup ortalama tane boyu $0,1\mu\text{m}$ civarındadır [4]. Ortalama çimento tanesinin çapı $10\mu\text{m}$ kabul edilirse silis dumanının çimentodan 100 kere daha ince olduğu sonucuna varmak mümkündür.

3.2.2. Silis dumanı katkısının çimento hamuru üzerindeki etkileri

Çok ince ve yuvarlak silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek burada sıkışan suyu dışarı iterler ve granülometriyi iyileştirirler. Bu olumlu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin oluşturduğu büyük yüzey alanı su ihtiyacını arttıracak ve kıvamı olumsuz etkileyecektir. Araştırmalara göre çimentonun % 5'i kadar katılan silis dumanı su ihtiyacını fazla değiştirmemekte, daha büyük miktarlarda ise su ihtiyacı artmaktadır. Benzer şekilde, çimentonun % 7,5'dan fazlası yerine silis dumanı katıldığında hamurun akma sınırı ve viskozitesinin arttığı, daha az miktarlarda ise azaldığı bulunmuştur. [4]

Özellikle genç yaşlardaki betonlarda iri agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki arayüzey bölgesi hamurun diğer bölgelerine göre daha zayıftır.

Araştırmacılar silis dumanı katkısının beton dayanımı üzerindeki olumlu etkisini daha ziyade agrega- hamur arayüzeyini kuvvetlendirmesine bağlamaktadırlar. İnce silis dumanı taneleri ara yüzeydeki boşlukları doldurmakta, terleme azaldığı için agrega taneleri arasında daha az su toplanmakta ve daha yapışkan hale gelen hamur ile agrega taneleri arasındaki fiziksel aderans artmaktadır.

3.2.3. Silis dumanı katkısının taze beton özelliklerine etkisi

Çimentonun % 5'i gibi az miktarlarda katılan silis dumanı çimento hamurunun kıvamını ve dolayısıyla taze betonun işlenebilmesini fazla etkilememektedir. Ancak daha yüksek katkı oranlarında belirli bir işlenebilme düzeyi için gerekli su miktarı silis dumanı miktarı ile birlikte artmaktadır. Sellevold'a göre taze betonda kıvamı sabit tutmak için katılan her 1 kg silis dumanı için karışım suyunu 1 litre artırmak gerekmektedir. [4] İlave su dayanımı düşüreceğinden silis dumanlı betonlarda akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılması olağan hale gelmiştir. Katkı dozajı, katkının türüne, silis dumanı miktarına ve istenilen su/ bağlayıcı orantısına bağlı olmaktadır.

Silis dumanlı betonlarda kullanılan akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcı katkıları değişik miktarlarda çökme kaybına neden olabilirler. Burada katkı veya çimento türlerinin de rolü olduğundan kullanılacak malzeme ile önceden deneme karışımı yapılması ve çökme kaybının belirlenmesi önerilmektedir. Katkı türünün ve beton karışımına giriş zamanının doğru seçimi ve ilk çökme değerinin yüksek tutulması alınabilecek önlemler arasındadır.

Silis dumanı tanelerinin büyük yüzey alanı taze beton içindeki serbest suyun önemli bölümünü bağlar. Ayrıca bu taneler boşluk ve gözenekleri doldurarak suyun beton yüzeyine çıkışını yavaşlatırlar. Sonuç olarak silis dumanı katkılı betonlarda terleme katkı miktarı ile orantılı olarak önemli oranda azalır.

Silis dumanı katılmış betonlarda terlemenin çok azalması veya hiç meydana gelmemesi özellikle beton yüzeyinden buharlaşmanın fazla olduğu ortamlarda plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini artırır. Çatlakların oluşması priz başlangıcına kadar sürebilir. Bu süre içinde beton yüzeyinin kürüne itina edilmesi veya beton yüzeyinin örtülerek buharlaşmanın önlenmesi yararlı olur.

3.2.4. Silis dumanı katkısının sertleşmiş betonun özelliklerine etkileri

Silis dumanı taze halde betonun işlenebilirliğini azaltmakta ise de, sertleşmiş betonun birçok özelliğini iyileştirmektedir.

Silis dumanının beton içindeki davranışı fizikokimyasaldır. Bu davranışın fiziksel kısmı çimento hamuru matrisindeki, özellikle de agrega-çimento arayüzündeki boşluk sisteminin boyutunun küçültülmesidir. Kimyasal kısım ise zayıf kalsiyum-hidroksit (kireç) kristallerini kalsiyum-silikat-hidrateye dönüştüren puzolanik reaksiyonlardan oluşmaktadır. Bu davranış sonucunda silis dumanı betonun basınç ve çekme dayanımını arttırmanın yanı sıra durabilite ve geçirimsizlikte de oldukça önemli iyileşmeler sağlar

Silis dumanının beton içinde kullanılması, betonun asit ve sülfat saldırılarına karşı durabilitesini arttırmakta, boşluk oranını ve geçirimsizliğini azaltmaktadır. Aşınmaya karşı direncini attırmakta, alkali- silika reaksiyonlarından dolayı oluşacak genleşmeyi azaltmaktadır.

Basınç dayanımı

Silis dumanı katkısının beton dayanımına olan etkisi Şekil 3.1'deki gibi açıklanabilir [4]. Diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamaları yanı sıra ince silis dumanı taneleri agrega- hamur arayüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını arttırırlar [4]. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını arttırmaları gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısı ile betondaki optimum silis

dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tip ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir [4]. Bazı araştırmacılara göre silis dumanı katkısının beton dayanımına olan olumlu etkisi agrega-hamur arayüzeyinin kuvvetlenmesinden dolayıdır.



Şekil 3.1. Silis dumanının betonun dayanımına etkisi

Silis dumanının betonun basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Normal bakım koşullarında bu etki 3-28 gün arasında kendini gösterir. Ancak s/b oranısını 0,40 civarına indirerek 1 günlük dayanımları dahi yükseltmek mümkündür [4]. Süper akışkanlaştırıcı kullanıp su/bağlayıcı oranısını 0,40'da sabit tutarak dökülen betonlarda çimentonun % 30'una kadar varan miktarlarda katılan silis dumanı ilk birkaç günden itibaren dayanımları artırmaktadır. İleri yaşlarda olumlu etki azalmakta olup bazı araştırmacılara göre silis dumanlı betonlarda dayanım 90. günden sonra düşebilmektedir.

Betonun 28 günlük dayanımını arttırmayı amaçlayan çalışmalarda silis dumanının genellikle çimentonun %5-20'si oranlarında betona katıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için % 10'dan yukarı miktarların süper akışkanlaştırıcı katkılarıyla birlikte kullanıldığı görülmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı çimentonun ağırlıkça yaklaşık %15'i yerine katılmaktadır. Bu betonlarda çimento dozajını 400-

500 kg/m³ sınırının üstüne çıkarmak ya da su/bağlayıcı orantısını 0,30'un altına indirmek gibi zorlamalar fazla yarar sağlamamaktadır.

Malhotra ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmalarda, çimento ağırlığının % 5- % 15'i kadar silis dumanının kullanılmasıyla, "su/(çimento+silis dumanı)" oranı 0,60 olan betonlarda ilk üç gün içerisinde belirgin bir dayanım artışı olmadığı, fakat bu oranın 0,40'a indirilmesiyle, ilk günlerde de dayanım artışı elde edildiği görülmüştür.

Çekme ve eğilme dayanımları

Silis dumanı katkılı betonlarda çekme ve eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranı katkısız betonlarınkine benzer. Basınç dayanımı arttıkça çekme ve eğilme dayanımları da artar. Ancak artış hızı giderek yavaşlar. Silis dumanı miktarının artması veya süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması eğilme-basınç dayanımları orantısının katkısız betonlarınkinden daha küçük olmasına yol açmaktadır [4].

Aderans

Değişik tip agregalar ve % 5'den % 30'a kadar silis dumanı katkısı içeren betonlarda hamur- agregası arasındaki aderansın kuvvetlendiği çok sayıda araştırmacı tarafından bildirilmektedir. En az % 5 silis dumanı katkısı arayüzeyindeki kırılma enerjisini önemli ölçüde arttırmaktadır [4].

3.2.5. Silis dumanı içeren betonların bileşimi

Silis dumanı içeren betonların bileşimini belirlemek için gereken karışım hesapları normal betonlarınkinden farklıdır. Bunda yüksek dayanım, geçirimsizlik gibi bazı özelliklerin vurgulanması ile süper akışkanlaştırıcı kullanma gereği de rol oynamaktadır. Adım adım izlenecek genel bir karışım hesabı metodu bulunmamaktadır. Evvelce denenmiş karışımlar esas alınarak önce projede kullanılacak malzeme ile deneme karışımları yapılması önerilmektedir.

Yüksek dayanımlı betonlarda çimento dozajı $355-565 \text{ kg/m}^3$ civarında değişmekte, ilaveten çimento ağırlığının %5-15'i kadar silis dumanı katılmakta ve su/bağlayıcı orantısı 0,20'ye kadar düşürülmektedir. Geçirimsizlik ve dayanıklılığın önem kazandığı yerler için hazırlanan betonlarda $325-390 \text{ kg/m}^3$ arası çimento, %3,5- %10 kadar silis dumanı kullanılmakta ve su/bağlayıcı orantısı 0,35-0,45 arasında değişmektedir [4]. Normal beton için kullanılan karışım hesaplarındaki su/bağlayıcı orantısı-dayanım ilişkilerinin su/bağlayıcı orantısına göre yeniden belirlenmeleri gerekmektedir. Kullanılacak kimyasal katkıların çeşitliliği, su azaltıcı etkilerine rağmen priz sürelerini ve zamana bağlı olarak çökme değerlerini etkilemeleri deneme karışımlarının önemini arttırmaktadır.

3.3. Lifli Beton

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan betonun özelliklerini iyileştirmek şartıyla taze beton içerisine çeşitli yöntemlerle değişik miktarlarda liflerin katılmasıyla elde edilen betona lifli beton adı verilir. Lifli beton, dağılmış gelişigüzel yönlenmiş kısa lif ihtiva eden betondur. Lifli betonlarda, gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı maddeleri de kullanılabilir [15].

Geleneksel beton, tipik olarak çekme dayanımı, yorulma dayanımı, kavitasyon ve aşınma dayanımı, çarpma dayanımı, deformasyon kapasitesi, kayma dayanımı, çatlama sonrası yük taşıma dayanımı ve tokluk (enerji tutabilme kapasitesi) açısından zayıf bir performans sergiler. Betonun bu özelliklerinin belirgin olarak gerektiği yerlerde, beton içine değişik malzemelerden üretilmiş ve teknik özellikleri yüksek liflerin katılması sonucu betonun yukarıda anılan zayıf özellikleri iyileştirilerek beton güçlendirilir.

Lifli beton, ilk görünüşte normal beton karışımlarına benzemesine rağmen değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betondan oldukça farklı bir özellik gösterir. Lifler beton içerisinde gelişigüzel dağılmasına rağmen lifli beton yük altında homojen bir malzeme olarak davranır. Beton içerisine

katılan lifler, çimento matrisini (ya da harç fazını) takviye ederek beton içerisinde üzerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak davranırlar.



Resim 3.1. Çelik lifli betonda liflerin gelişigüzel dağılımı.

Lif malzemesi olarak kullanılan cam, plastik ve polipropilen gibi malzemelerin ilavesi betonda bir mukavemet artışı sağlamamaktadır. Söz konusu lif malzemelerinin elastisite modüllerinin betonun elastisite modülünden daha küçük olması, aderansın çok iyi olması halinde bile bu sonucu doğurmaktadır. Bu özellikten dolayı da cam, polipropilen ve plastik liflerin ilavesi betonun duktilitesini artırmaktadır. Çeliğin elastisite modülü betonunkinden çok daha büyük olduğundan, çelik lifli betona gelen yükün taşınmasında çelik liflerin payı diğer lif türlerine göre daha büyük olmaktadır [7].

Lifli betonda matris diye tanımlanan lifleri saran ortam malzemesi çimento hamurudur. Matrisin fonksiyonu, lifleri bir arada tutmak, onları korumak, liflerle veya liflerden gerilme transferi yapmaktır. Lifli betonun performansı üzerinde; matrisin boşluk yapısı, çimento dozajı, su/çimento oranı, lif- matris aderansı gibi özellikler oldukça etkilidir. [7].

Beton içerisindeki çelik lifler, statik hesaplarda eğilme momentini alan çubuk ve hasır donatı gibi görülmemelidir. Beton içerisindeki çelik lifleri, betonun yapısını değiştiren ve ona plastik davranış özelliği kazandıran bir malzeme olarak görebiliriz.

Çelik lifli betonun özelliği, onun arttırılmış plastik davranışı ve enerji tutma yeteneğidir. Lifli beton uygulamaları, esas itibariyle, betonda çatlakların ilerlemesini ve yayılmasını önlemek, sünekliği ve tokluğu artırmak maksadıyla yapılır. Uygulamanın etkinliği kullanılan lif miktarı ve şekline, liflerin beton içerisindeki yönelmesi ve dağılımına, liflerin boy-çap oranına, liflerin ve betonun elastisite modüllerinin oranına ve lifli betonun sıkıştırılma yöntemine bağlıdır [16].

3.3.1. Çelik lif

Çelik lifler (ÇL), birbirinden farklı yöntemlerle ve düşük karbonlu çelik C 1008'den üretilmişlerdir. Yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özelliği gösterirler.

Çelik liflerin çekme gerilmeleri ortalama olarak 1200 N/mm^2 olup elastik limitleri % 0,2'nin altındadır. Geometrik şekilleri, çap ve uzunlukları arasında belli bir oran vardır. Kullanılan çelik liflerin çapları 0,13- 1,00 mm arasında olup, uzunluk/ çap oranları 30 ila 150 arasında değişmektedir. Lif boyları ise 13 mm'den başlayıp 70 mm'ye kadar değişmektedir. Betonda belli bir yüzey alanındaki lif alanını gösteren ve lif hacmi fonksiyonu (V_f) diye tanımlanan lif hacmi, % 0,50 ile % 3 arasında değişmektedir [7]. Lifler; düz, dalgalandırılmış (kıvrımlı) olabileceği gibi uçları bükülmüş de olabilir.



Resim 3.2. Çelik lifler (çengelli tip).

Taze beton içerisine katılan lifler, görünüm oranı (lif uzunluğu/ lif çapı), geometrik yapısı ve lifin çekme dayanımı gibi mekanik ve biçimsel özelliklerle tanımlanmaktadır. ACI 544'e göre lifin tanımı, lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen "boy/çap" (aspect ratio) oranı olarak kabul edilmektedir. Bu orana "narinlik oranı" da denilmektedir.

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.

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 matrsten ayrılması düz liflere göre daha zordur. Çelik liflerin yüksek çekme dayanımları sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Fakat bu liflerin yükün belli bir gerilme değerinden sonra matrsten 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. Bu sebeple, çimento matrisinden ayrılması daha zor olan dalgalandırılmış ya da uçları bükülmüş liflerin kullanımı daha uygun olmaktadır.

Beton takviyesinde kullanılan çelik tellerle ilgili Türk standardı TS 10513'de lif özellikleri ile ilgili iki önemli parametre mevcuttur. Bunlardan birincisi liflerin çekme dayanımının 310 N/mm^2 'den az olamayacağıdır. Diğeri ise 16°C 'nin üzerindeki ortamda 3,18 mm bir iç çap çevresinde yapılan lif eğilme deneyinde teste tabi tutulan liflerin % 90 kırılmaksızın 90° eğilme kabiliyeti gösterebilmesi şartıdır. Bu özellikler, betonda kullanılan liflerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden daha yüksek bir mukavemet ile davranabilmesine imkan sağlar.

Çelik liflerin betona kazandırdığı nitelikler

Çelik liflerin betona sağladığı katkıların en önemlileri şöyle özetlenebilir; özellikle kavitasyon, erozyon dayanımı, darbe dayanımı, ilk çatlak oluşumu dayanımı, çekme

dayanımı, yorulma dayanımı, deformasyon kapasitesi, süneklik ve tokluk açısından lifsiz betonlardan çok daha iyi performans göstermesi.

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.

Lifsiz betonda başlangıçta meydana gelen bir çatlağın (gerilme artması ile) yayılması için gereken enerji düşüktür ve genellikle böyle bir çatlağın başlatılması için gereken enerjinin yaklaşık yarısı kadardır. Beton içerisinde lif bulunması halinde ise başlangıçtaki mikro çatlağı meydana getiren enerji, lifler tarafından taşındığı gibi bir kısmını da çatlağın yanındaki sağlam çimento hamuru fazı bölgesine aktararak yayarlar. İletilen bu gerilmeler çatlağın diğer yanına daha düşük kuvvetler olarak nakledilir. Bu nedenle çatlağın yayılması için daha fazla enerji gereklidir. 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 [7].

Nihai yüke ulaştıktan (beton kırıldıktan) sonra bile, çelik lifler kırılan beton parçalarını bir arada tutmaya devam ederek nihai yükten bir miktar daha fazlasını da taşımaya devam ederler.

3.3.2. Çelik lifli betonun teknik özellikleri

Normal betonun 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.

Çizelge 3.2. Lifli betondaki iyileşmeler [7]

Mekanik Özellik	Artış (%)
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

Eğilmede çekme dayanımı

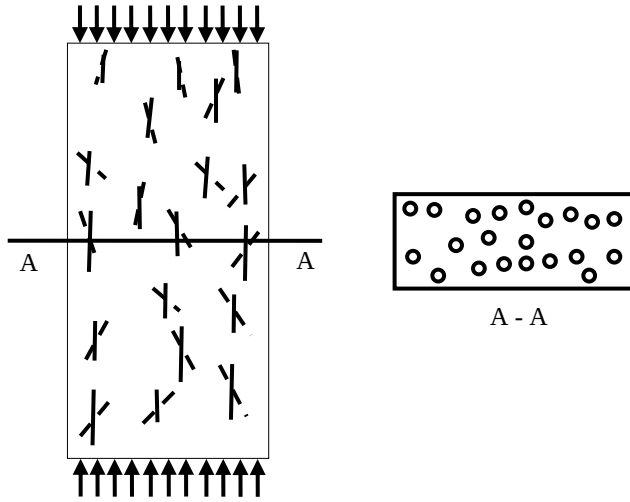
Daha önce belirtildiği üzere çelik lifli betonların nihai eğilme dayanımları normal betonlara göre %50- %100 arasında artış göstermektedir. Bu artış çelik liflerin yüksek çekme dayanımlarından ileri gelmektedir. Çimento hamuru matrisinin çatlamasından (ilk çatlaktan) sonra liflerin çatlak sonlarından gerilme transferi ve dağılımı yapması nedeniyle yük, ilk çatlaktan sonra bir miktar daha artar. Bu durumda maksimum eğilme yükü lifsiz betonlara göre daha fazla olmaktadır.

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.

Şekil 3.2 den de görüleceği üzere bu durum beton içerisine gelişigüzel dağılan çelik liflerin yönelimi ile doğrudan ilgilidir. Yükleme düzlemine dik olan lifler betonun

basınç gerilmesinde herhangi bir işlev yüklenmezler. Kesikli çizgiler ile yüklenmiş olan lifler ise yükleme düzlemine paralellikleri ölçüsünde basınç gerilmesi artmasına duyarlıdır.



Şekil 3.2 Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi.

Basınç dayanımının nihai yükünde belirgin bir artış olmamasına karşın çelik lifli beton tek eksenli yükleme altında daha sünek davranabilmektedir.

3.3.3. Çelik lifli betonun karışım esasları

Kaliteli agreg, düşük su/çimento oranı, optimum çimento dozajı, yüksek kompakte ve iyi sıkıştırma gibi lifsiz betonun üretiminde uyulması gerekli zorunluluklar çelik lifli beton üretimi için de geçerlidir.

Lifli kompozitlerin yapımında, kompozit üretimi tasarlanırken lifin gerilme altında beklenilen 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 bir dizi sınırlama getirilmiştir.

- S/Ç oranı 0,40 ila 0,55 arasında olmalıdır. Bazı özel betonlar için bu değer 0,38 ila 0,44 arasında sınırlandırılmıştır [17].
- Çimento miktarı 250 kg/m^3 'den az olmayacaktır. Bazı kaynaklarda bu sınırlama en az 320 kg/m^3 'dür. Üst sınır ise 420 kg/m^3 'dür [17].
- Beton içerisindeki kum miktarı toplam agrega kütlelerinin en az % 45-55'i olmalıdır. Bu oran, çelik tellerin betona karıştırılma ve kontrol kurallarıyla ilgili Türk Standardı TS 10514'de % 40-45'e kadar toleranslıdır [17].
- Karışımlarda doğal kum tercih edilmelidir.
- Matrisin yoğunluğunu ve kompasitesini arttırmak üzere doğal puzolan, uçucu kül, özellikle de silis dumanı kullanılmasında fayda vardır.
- Kum içerisinde $0,25 \text{ mm}$ 'den küçük ince malzeme miktarı Çizelge 3.3'deki gibi olmalıdır [17].

Çizelge 3.3. Çelik lifli betonlarda $0,25 \text{ mm}$ 'den küçük malzeme miktarı

Agrega maksimum tane çapı [mm]	İnce malzeme miktarı(< $0,25\text{mm}$)	
	[Kg/m ³]	[Litre/m ³]
8	525	180-185
16	450	150-155
32	400	130-135

- Günümüzde lifli beton uygulamalarında çok değişik lifler kullanılmakla birlikte en çok düz ve çengelli çelik lifler kullanılmaktadır. Çengelli çelik lifler, taze beton içerisindeki uyumlu davranışı ve gösterdiği yüksek performans nedeni ile daha çok tercih edilir.
- Çengelli liflerin kullanılması halinde düz lifler için verilmiş olan kullanım miktarı % 40- 45 oranında azaltılabilir.
- Tatminkar bir karışım için lif içeriği beton hacmine oranla %0,5 ila %1,5 arasındadır. Bu oranı % 2'ye kadar mümkün olmakla birlikte etkili bir fayda

sağlayabilmek için hiçbir zaman % 0,5'in altına düşürülmemelidir. Çelik lif konsantrasyonunun % 2'nin üzerine çıkması karıştırma ve yerleştirme işlemlerinde çok büyük problemler yaratır. Ancak çengelli lif kullanılması durumunda bu oranı % 2'ye kadar çıkarmak mümkün olabilmektedir. TS 10514'de betonda kullanılması gereken lif miktarı değişen maksimum tane çapı ve betonun durumuna göre şu şekilde verilmiştir [17].

Çizelge 3.4. D_{max} 'a göre betonda kullanılması gereken lif miktarı

Agrega max tane çapı [mm]	Kullanılacak Lif Miktarı [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

Liflerin uzunluk/ çap (görünüş) oranının 80 ila 100 arasında olması betonun performansı açısından gerekli bir ölçüdür. Bu oran püskürtme beton uygulamaları hariç hiçbir zaman 60'ın altına düşürülmemelidir.

Lif seçiminde dikkat edilecek bir husus da lif boyunun agrega maksimum tane çapının en az 2 veya 1,5 katı olması zorunluluğudur.

Çelik lifli beton uygulamalarında genellikle maksimum tane çapı 4 mm ile 32 mm arasında değişen agregalar kullanılır. Maksimum tane çapı 32 mm olan betonlarda 16 mm'den büyük agrega miktarı toplam agreganın % 15 ya da % 20'si olmalıdır [7].

3.3.4. Çelik lifli betonun kullanım alanları

Çelik liflerin beton içerisindeki davranışı ve yapısal özellikleri nedeni ile betonun bir çok özelliğini güçlendirmesi sonucu bu beton, ağır çalışma koşullarına maruz kalan

yapılarda, ince kesitlerin ve yüksek dayanım özelliklerinin (çekme, darbe, kavitasyon, erozyon, yorulma, tokluk vs.) gerektiği yerlerde ve ayrıca beton içerisinde donatı ve hasır kullanmamak için ekonomik gerekçelerle kullanılmaktadır. Çelik lifli betonların en yaygın olarak kullanıldığı alanlar aşağıda sıralanmıştır.

- Endüstriyel döşemeler,
- Su yapıları,
- Püskürtme beton uygulamaları,
- Şev stabilitesi ve tünel kaplamaları,
- Hava alanı kaplama betonları,
- Liman kaplama betonları,
- Çeşitli kaplamalar,
- Depreme dayanıklı yapılar,
- Ateşe dayanıklı beton yapılar,
- beton borular
- Askeri güvenlik yapılarında (sığınak, hangar vs) kullanılmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneysel Çalışmaların Kapsamı

Deneysel çalışmalar Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda, betonun ana bileşenleri olarak Set İtalcementi Group tarafından üretilen CEM I 42,5 R Portland Çimento, Çankaya Yakup Aptal Köyü mevkiinden elde edilen üç farklı boyutta agrega ve şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Ayrıca, etkilerinin belirlenmesi amacıyla deney programına göre karışımlara melamin sülfonat polimer esaslı sıvı Sikament FFN süper akışkanlaştırıcı beton katkısı, Norveç menşeyli ve Elkem firması tarafından üretilen silis dumanı, Beksa firması ürünü, Dramix markalı, sonu kancalı, iki ucu kıvrılmış RC 65/60 BN çelik lifler eklenmiştir.

Bu çalışmada, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin, endüstriyel bir atık olan silis dumanı mineral katkısının ve çelik lifin betonun basınç dayanımına ve yarmada çekme dayanımı ile doğrudan çekme dayanımına olan etkileri araştırılmıştır. Bu malzemelerle üretilen beton numunelerin basınç ve çekme etkisi altındaki davranışları şahit beton numuneler ile karşılaştırılmıştır. Bu malzemelerin betonun basınç ve çekme dayanımına katkısının hangi mertebede olacağı araştırılmıştır. Bu amaçla aynı su/ çimento oranına (seçilen su/çimento oranı 0,51) sahip şahit beton, süper akışkanlaştırıcı katkılı beton, silis dumanı katkılı beton ve çelik lifli beton numunelerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve doğrudan çekme dayanımının 3,7,14 ve 28 günlük değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 28 günlük numuneler üzerinde ayrıca elastisite modülü deneyleri yapılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkılı beton dışındaki karışımlarda çökme (slump) değerleri 10-12 cm'de sabit tutulmuştur.

Numunelerin basınç dayanımı deneyi TS EN 12390- 3 standardına uygun olarak, yarmada çekme dayanımı deneyi ise TS EN 12390- 6 standardına uygun olarak

yapılmıştır. Doğrudan çekme dayanımı deneyi ise herhangi bir noktada gerilme yığılmasına sebep olmadan üniform çekme gerilmesi dağılımı elde edilmesi prensibinden hareketle 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir numunelerin iki ucuna epoksi ile çelik başlıklar yapıştırılması ve başlık merkezlerinden zincir vasıtasıyla deney makinesine bağlanarak eksenel çekme kuvveti uygulanması şeklindeki deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülü deneyleri de TS 3502 standardına uygun olarak yapılmıştır.

Deney programından görüleceği üzere her bir karışım türü için 9 adedi basınç dayanımı, 8 adedi yarmada çekme dayanımı, 8 adedi doğrudan çekme dayanımı ve 2 adedi de elastisite modülü deneyinde kullanılmak üzere 27 adet numune hazırlanmıştır. Böylece dört tür karışım için toplamda 108 adet 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir numune hazırlanmış ve yukarıda belirtilen deneylere tabi tutulmuştur.

4.2. Deney Programı

Beton karışım türleri, deney ve numune tipleri ile numune adetlerine göre düzenlenerek laboratuvar çalışmaları kapsamında hazırlanan deney programı Çizelge 4.1- Çizelge 4.4.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. B1 betonu deney programı

B1- Şahit Beton (Normal Beton)					
Deney Tipi	Numune Tipi ve Boyutu [cm]	Hazırlanan Numune Adedi			
		3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
Basınç Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	3 Ad
Yarmada Çekme Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	2 Ad
Doğrudan Çekme Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	2 Ad
Elastisite Modülü	Silindir (15/30)	-	-	-	2 Ad

Çizelge 4.2. B2 betonu deney programı

B2 – Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Beton (% 1 SA İlaveli)					
Deney Tipi	Numune Tipi ve Boyutu [cm]	Hazırlanan Numune Adedi			
		3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
Basınç Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	3 Ad
Yarmada Çekme Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	2 Ad
Doğrudan Çekme Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	2 Ad
Elastisite Modülü	Silindir (15/30)	-	-	-	2 Ad

Çizelge 4.3. B3 betonu deney programı

B3- Silis Dumanı Katkılı Beton (% 10 SD İkameli)					
Deney Tipi	Numune Tipi ve Boyutu [cm]	Hazırlanan Numune Adedi			
		3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
Basınç Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	3 Ad
Yarmada Çekme Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	2 Ad
Doğrudan Çekme Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	2 Ad
Elastisite Modülü	Silindir (15/30)	-	-	-	2 Ad

Çizelge 4.4. B4 betonu deney programı

B4- Çelik Lifli Beton (45 kg/m ³ Çelik Lif İlaveli)					
Deney Tipi	Numune Tipi ve Boyutu [cm]	Hazırlanan Numune Adedi			
		3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
Basınç Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	3 Ad
Yarmada Çekme Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	2 Ad
Doğrudan Çekme Dayanımı	Silindir (15/30)	2 Ad	2 Ad	2 Ad	2 Ad
Elastisite Modülü	Silindir (15/30)	-	-	-	2 Ad

4.3. Deney Çalışmasında Kullanılan Malzemeler

Deneyisel çalışmalar için hazırlanan beton karışımlarındaki bileşenlerinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

4.3.1. Çimento

Deneylerde Set İtalcementi Group tarafından üretilen CEM I 42,5 R Portland Çimento kullanılmıştır. Çimentonun, üretici firma tarafından verilen kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.5’de ve Çizelge 4.6’de sunulmuştur.

Çizelge 4.5. PÇ 42,5 R çimentoya ait kimyasal özellikler.

Kimyasal Özellikler (%)	Elde Edilen Değerler	TS EN 197/1 Standart Değerler	
		En Az	En Çok
Kızdırma kaybı	3,31	-	5,0
Çözünmeyen kalıntı	0,35	-	5,00
Klorür (Cl)	0,0113	-	0,10
Kükürt trioksit (SO ₃)	2,88	-	4,00

Çizelge 4.6 PÇ 42,5 R çimentoya ait fiziksel ve mekanik özellikler

Fiziksel Özellikler	Elde Edilen Değerler	TS EN 197/1 Standart Değerler	
		En Az	En Çok
Özgül yüzey [cm ² /gr]	3126	-	-
2 günlük basınç dayanımı [N/mm ²]	27,1	20,0	-
28 günlük basınç dayanımı [N/mm ²]	49,3	42,5	62,5
Priz başlangıcı [dk]	155	60	-
Hacim genleşmesi [mm]	1	-	10

4.3.2. Agregâ

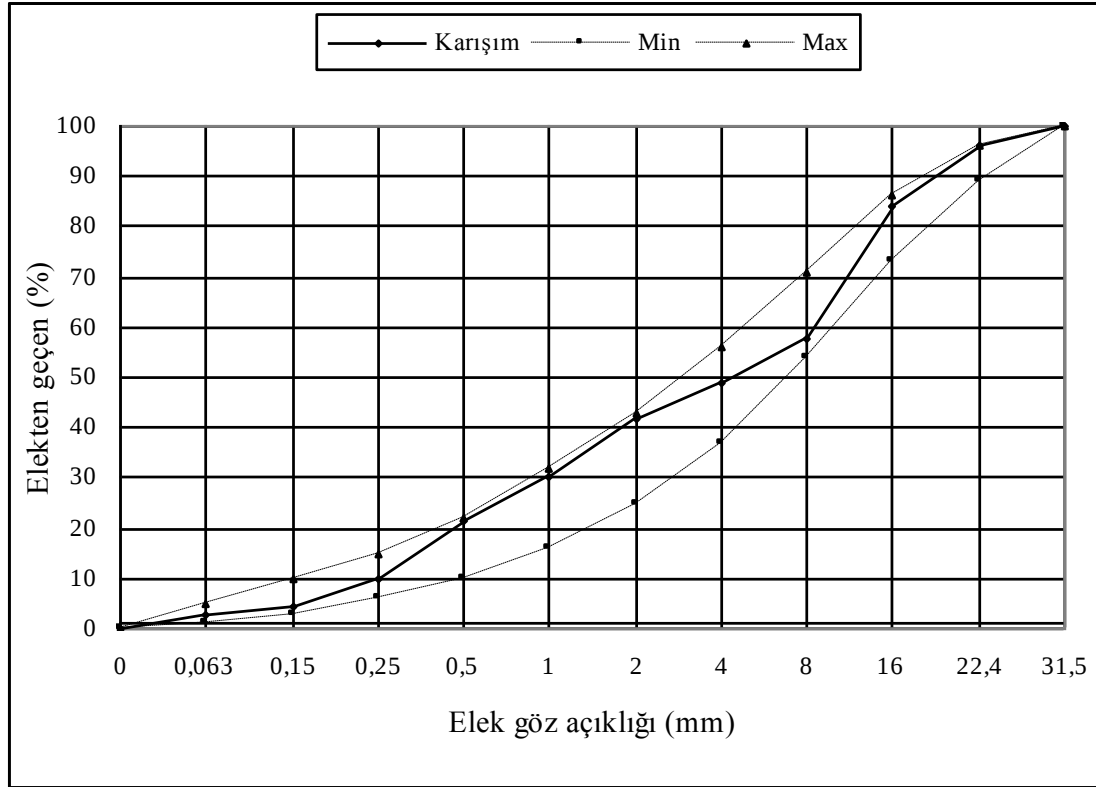
Beton imalinde kullanılan agregâ, Çankaya Yakup Aptal Köyü mevkiinden elde edilmiştir. Deneylerde 0-4, 4-12 ve 12-22,4 mm boyut aralıklarında olmak üzere 3 farklı agregâ tipi kullanılmıştır. Kullanılan agregâların elek analizi TS 706'ya uygun olarak yapılmış olup , agregâ çarpanları Çizelge 4.7'de , elek analizi sonuçları Çizelge 4.8'de, agregâ fiziksel özellikleri de Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Agregâ çarpanları

Dane Boyutu	Agregâ	%
0-4 mm	Kum	50
4-12 mm	Çakıl 1	25
12-22,4 mm	Çakıl 2	25

Çizelge 4.8. Karışım elek analizi sonuçları

Elek Göz Açıklığı [mm]	Karışım Geçen (%)	TS Min Geçen (%)	TS Max Geçen (%)
0	0	0	0
0,063	2,93	1	5
0,15	4,13	3	10
0,25	9,66	6	15
0,5	21,60	10	22
1	30,41	16	32
2	41,93	25	43
4	49,13	37	56
8	57,63	54	71
16	83,96	73	86
22,4	96,00	89	96
31,5	100,00	100	100



Şekil 4.1. Agrega karışımı granülometre eğrisi

Çizelge 4.9. Karışımında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellik	0-4 mm	4-12 mm	12-22,4
Sıkışık B.H.A. [kg/m ³]	1790	1550	1550
Kuru özgül ağırlık [t/m ³]	2,62	2,69	2,69
Kuru yüzey doygun özgül ağırlık [t/m ³]	2,67	2,70	2,70
Su emme (%)	1,90	0,30	0,40
İncelik modülü	2,57	-	-

4.3.3. Su

Yapılan deneylerde karışım suyu olarak şehir şebekesinden elde edilen musluk suyu kullanılmıştır. Musluk suyu, kür havuzunda yerine yerleştirilmiş betonu ıslak tutarak içerisindeki suyun buharlaşmasını önlemek amacıyla kür suyu olarak ve beton

içerisine giren agregaların yıkanması ve betoniyerin temizlenmesi amacıyla yıkama suyu olarak da kullanılmıştır.

4.3.4. Kimyasal katkı

Karışımlarda kimyasal katkı olarak betonun karma suyunu yüksek oranda azaltarak erken ve son dayanımları arttıran ve betona yüksek oranda akışkanlık kazandıran TS EN 934-2'ye uygun, melamin sülfonat polimeri esaslı sıvı Sikament FFN süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır.

SA, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş Ankara Bölge Temsilciliğinden temin edilmiştir. Firma tarafından tavsiye edilen miktar bağlayıcı dozunun % 0,8- 3,0 aralığında (100 kg bağlayıcı için 800- 3000 gr) kullanılmasıdır. Optimum katkı dozu, kullanılan bağlayıcı ve agrega kalitesi, su/bağlayıcı oranı ve ortam sıcaklığına göre belirlenir. SA, laboratuara 10 kg'lık plastik bidonla getirilmiş ve karışım suyuna ilave edilerek kullanılmıştır.

Çizelge 4.10. Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Yoğunluk [gr/cm ³]	1,20- 1,22 kg/l
Klorür İyon İçeriği (%)	<%0,1
Alkali Miktarı	<%7
Renk	Kahverengi
Homojenite	Homojen
Kimyasal içerik	Melamin sülfonat polimeri esaslı sıvı

4.3.5. Silis dumanı

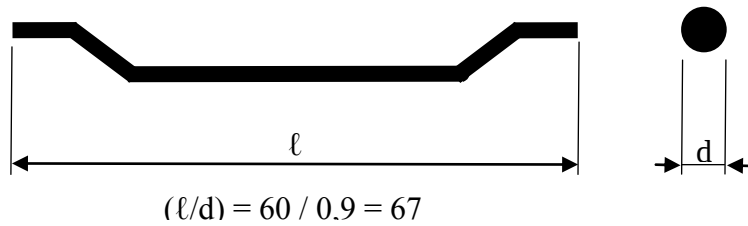
Deneylerde mineral katkı olarak kullanılan silis dumanı Norveç menşeyli ve Elkem firması üretimidir. Kullanılan silis dumanının bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Silis dumanının özellikleri

SiO ₂ (%)	93,2
MgO (%)	0,58
SO ₃ (%)	0,23
Cl ⁻ (%)	0,025
Na ₂ O (%)	0,014
CaO (%)	0,009
Si (%)	0,13
H ₂ O (%)	0,21
Kızdırma Kaybı (%)	1,73
Özgöl Yüzey [m ² /gr]	21,7
Mikrosilika yoğunluğu [kg/m ³]	2232

4.3.6. Çelik lif

Deneylerde TS 10513 standardına uygun, sonu kancalı, iki ucu kıvrılmış, birbirlerine tutkalla birleştirilmiş Beksa firması ürünü, Dramix markalı RC 65/60 çelik lifler kullanılmıştır. Bu lifler soğuk çekilmiş düşük karbonlu çelik C 1008'den üretilmiş olup yüksek ve üniform çekme gerilmesi ile düşük uzama özelliğine sahiptirler. 60 mm uzunluğunda ve 0,90 mm çapındaki lifin çekme dayanımı minimum 1030 N/mm², maksimum da 1370 N/mm²'dir. RC 65/60 tipi çelik lifler C sınıfı tutkalla birleştirilmiş olup betoniyerde karışırken liflerin çözülmesi için 30 ile 60 saniyeye ihtiyaç vardır. Kullanılan çelik lifler Şekil 4.2'de, kimyasal bileşimleri Çizelge 4.12'de, çelik life ait görünüm özellikleri ise Çizelge 4.13'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan çelik lifler

Çizelge 4.12. Çelik lifin kimyasal bileşimi (%)

Element	Düşük Karbonlu	Paslanmaz Çelik
C	0,10	0,05- 0,15
Si	0,30	2,0
Mn	0,60	2,0
P	0,035	0,045
S	0,035	0,015
Cr	-	16- 19
Ni	-	6- 9,5

Çizelge 4.13. Çelik lifin görünüm özellikleri

Uzunluk [ℓ]	60 mm
Çap [d]	0,90 mm
Uzunluk/ çap oranı	67
Performans sınıfı	65
Adet	3200 lif/kg
Yüzey görünümü	Parlak

4.4. Karışım Hesapları

Beton karışım hesapları, “TS 802 Beton karışım tasarımı hesap esasları” standardına göre yapılmıştır. Betonun uygulama yerleri dikkate alınarak C30/37 beton dizaynı hedeflenmiştir. Çimento dozajı 350 kg/m^3 , agrega en büyük tane büyüklüğü $D_{\max} = 22,4 \text{ mm}$, agrega tane sınıfları ve tane dağılımı sırasıyla 0-4 mm(% 50), 4-11,2 mm(%25) ve 11,2-22,4 mm(%25) olarak belirlenmiş; SA katkılı beton dışındaki betonlarda çökme (slump) değerinin de 10-12 cm’de sabit tutulması öngörülmüştür.

Üretilen beton karışımları B1, B2, B3 ve B4 olarak adlandırılmıştır. Çizelge 4.14-4.17’de beton karışımlarına giren malzeme miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.14. B1 karışımına giren malzeme miktarları.

B1 Karışımı			
Şahit Beton (s/ç= 0,51; Çökme= 10-12 cm)			
1 m ³ beton için [kg]		150 dm ³ beton için [kg]	
Su	180	Su	27,00
Çimento	350	Çimento	52,50
Kum (0-4 mm)	924	Kum (0-4 mm)	138,60
Çakıl 1 (4-11,20 mm)	462	Çakıl 1 (4-11,20 mm)	69,30
Çakıl 2 (11,2- 22,4 mm)	462	Çakıl 2 (11,2- 22,4 mm)	69,30

Çizelge 4.15. B2 karışımına giren malzeme miktarları.

B2 Karışımı			
% 1 Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Beton (s/ç= 0,51; Çökme= 19 cm)			
1 m ³ beton için [kg]		150 dm ³ beton için [kg]	
Su	180	Su	27,00
Çimento	350	Çimento	52,50
SA katkı (% 1,00)	3,50	SA katkı (% 1,00)	0,525
Kum (0-4 mm)	924	Kum (0-4 mm)	138,60
Çakıl 1 (4-11,20 mm)	462	Çakıl 1 (4-11,20 mm)	69,30
Çakıl 2 (11,2- 22,4 mm)	462	Çakıl 2 (11,2- 22,4 mm)	69,30

Çizelge 4.16. B3 karışımına giren malzeme miktarları.

B3 Karışımı			
%10 Silis Dumanı Katkılı Beton ($s/(\phi+sd)=0,51$; Çökme= 10-12 cm)			
1 m ³ beton için [kg]		150 dm ³ beton için [kg]	
Su	180	Su	27,00
Çimento	315	Çimento	47,25
Silis dumanı	35	Silis dumanı	5,25
SA katkı	4,20	SA katkı	0,63
Kum (0-4 mm)	924	Kum (0-4 mm)	138,60
Çakıl 1 (4-11,20 mm)	462	Çakıl1 (4-11,20 mm)	69,30
Çakıl 2 (11,2- 22,4 mm)	462	Çakıl 2 (11,2- 22,4 mm)	69,30

Çizelge 4.17. B4 karışımına giren malzeme miktarları

B4 Karışımı			
45 kg/m ³ Çelik Lifli Beton ($s/\phi=0,51$; Çökme= 10-12 cm)			
1 m ³ beton için [kg]		150 dm ³ beton için [kg]	
Su	180	Su	27,00
Çimento	350	Çimento	52,50
Çelik Lif	45	Çelik Lif	6,75
SA katkı	4,20	SA katkı	0,63
Kum (0-4 mm)	924	Kum (0-4 mm)	138,60
Çakıl 1 (4-11,20 mm)	462	Çakıl 1 (4-11,20 mm)	69,30
Çakıl 2 (11,2- 22,4 mm)	462	Çakıl 2 (11,2- 22,4 mm)	69,30

5. DENEYLERİN YAPILIŞI

Karışım hesapları tamamlandıktan sonra laboratuvar çalışmalarına başlanmıştır. Laboratuvar çalışmaları kapsamında beton üretimi, taze beton deneylerinin yapılması, deney numunelerin hazırlanması, numunelerin deney gününe kadar küre tabi tutulması ve deney programına göre sertleşmiş beton deneylerinin yapılması işlemleri gerçekleştirilmiştir.

5.1. Beton Üretimi ve Kür Şartları

Deneme karışımları 25 dm³'lük, numune alınacak karışımlar ise 150 dm³'lük mikserde hazırlanmıştır. Hedeflenen slump değeri elde edilene kadar tekrarlanan deneme karışımlarının ardından her bir karışım türüne ait numuneler tek seferde hazırlanmıştır. Homojen bir karışım elde etmek için (TS 1247) karışım kurallarına dikkat edilmiştir. SA, karma suyuna eklenerek karışımlara ilave edilmiş, SD ise çimento ile birlikte eklenmiştir. Deneyler sırasında meydana gelebilecek kayıplar da dikkate alınarak karışımlar toplam hacmin %10'u oranında arttırılarak hazırlanmıştır.



Resim 5.1. Betonun karışımının hazırlanması

Beton üretimi aşamasında ilk etapta süper akışkanlaştırıcı, silis dumanı ya da çelik lifin kullanılmadığı; sadece çimento, agrega ve sudan oluşan şahit beton (B1) karışımı üretilmiştir. Karışımda kullanılacak çimento dozajı, agrega miktarları ve çarpanları belirlendikten sonra, hedeflenen slump değeri elde edilinceye kadar farklı miktarlarda su kullanılarak deneme karışımları üretilip, 10- 12 cm slump elde edilen karışımdaki su miktarı baz alınarak su/çimento oranı 0,51 olarak belirlenmiştir. Deney numuneleri, bu karışımdan elde edilen betonun kalıplara yerleştirilmesi ile alınmıştır. Bu şahit beton karışımında kullanılan su, bağlayıcı ve agrega miktarları tüm karışım tiplerinde sabit tutulmuştur.

Şahit beton hazırlandıktan sonra, diğer malzemelerin miktarları aynı tutularak çimento miktarının kütlece % 1'i oranında süper akışkanlaştırıcı eklenen yeni bir karışım hazırlanmış ve elde edilen karışım B2 koduyla adlandırılmıştır.

Daha sonra mineral katkı olarak silis dumanı çimento miktarının kütlece % 10'u oranında yer değiştirilerek 10- 12 cm'lik hedef slump değerini elde edilinceye kadar değişik miktarlarda süper akışkanlaştırıcı içeren deneme karışımları üretilmiş ve 10- 12 cm çökme (slump) değeri elde edilen karışımdan numuneler alınmış, bu karışım da B3 koduyla anılmıştır.

Çelik lif kullanılan beton karışımı üretilirken de aynı prensipten hareketle karışıma 45 kg/m^3 oranında iki ucu kıvrılmış çelik lifler ilave edilip hedef slump değeri elde edilene kadar farklı miktarlarda süperakışkanlaştırıcı ile deneme karışımları üretilmiş ve 10- 12 cm slump değeri elde edilen karışımdan deney numuneleri alınmıştır. Bu karışım ise B4 koduyla anılmıştır.

Çelik lifli beton karışımı, TS 10514 standardına göre yapılmıştır. Öncelikle tüm agregalar (0-4, 4-12, 12-22,4) iri agrega altta olmak üzere mikser konulup karıştırılmış ve ardından bağlayıcı bileşenler (çimento, silis dumanı) eklenmiştir. Homojen bir kuru karışım elde edildikten sonra lif malzemesi mikser çalışır durumda iken karışımı ilave edilmiştir. Daha sonra kimyasal katkılı suyun azar azar ilave edilmesi suretiyle betonun karılmasına başlanmıştır. 150 dm^3 kapasiteli mikserde

karışımın homojen olduğuna karar verilinceye kadar karıştırılarak beton hazır hale getirilmiştir.

Deney programından da görüleceği üzere her bir karışım türü için 9 adedi basınç dayanımı, 8 adedi yarmada çekme dayanımı, 8 adedi doğrudan çekme dayanımı ve 2 adedi de elastisite modülü deneyinde kullanılmak üzere 27 adet 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir numune hazırlanmış ve deneylere tabi tutulmuştur.

Bütün karışım türlerinde hazırlanan taze betonlar, iyi bir şekilde yağlanan beton kalıplarına üç kademe doldurulmuş ve her kademe, ucu yuvarlatılmış ,16 mm'lik çelik çubuk ile 25 eş dağılımlı darbe ile sıkıştırılmıştır. Kalıbın üstü düzgün bir şekilde tesviye edildikten sonra beton numuneleri 24 saat bekletilmiş ve daha sonra kalıptan çıkarılarak kür havuzuna alınmıştır. 23 °C sıcaklık ve % 95 bağıl nem ortamında kirece doymun su ile hazırlanmış kür havuzu içerisinde deney gününe kadar muhafaza edilen numuneler deneyden yaklaşık 1 saat önce kuru yüzey doymun hale gelmeleri için kür havuzundan çıkarılmışlardır.

Betonun karıştırılması, numunelerin kalıplarından çıkarılması ve bakımına ait resimler aşağıda gösterilmiştir.



Resim 5.2. Beton karışımı



Resim 5.3. Numunelerin kalıplardan çıkarılması



Resim 5.4. Numunelerin kür odasında bakımı

5.2. Taze Beton Deneyleri

5.2.1. Çökme (Slump) deneyi

Her karışımda betonun karıştırılma işlemi bittikten sonra, taze betonun işlenebilirliğini anlamak için TS EN 12350-2 deney standardına göre çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyi, betonun kalıba yerleştirilmesinden önce yapılmıştır. Üst çapı 10 cm, tabanı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan çökme hunisi ve tablası temizlenip ıslak bir bezle silindikten sonra düzgün bir yere yerleştirilmiştir. Huninin 1/3'ü taze beton ile doldurularak 16 mm çaplı şişleme çubuğu ile 25 defa şişlenmiştir. Sonra 1/3'ü daha doldurulmuş ve 25 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. Kalan 1/3'lük kısmı da doldurularak yine 25 defa şişlenmiştir ve mala ile yüzey düzeltildikten sonra huni yavaşça kaldırılmış ve beton kütesinin yanına konmuştur. Huninin üst yüzeyi ile kendi ağırlığından dolayı bir miktar çöken beton kütesi arasındaki düşey mesafe ölçülerek aradaki yükseklik farkı çökme değeri olarak alınmıştır. Çökme deneyi, dolaylı olarak su/çimento oranı hakkında bilgi vermektedir.



Resim 5.5. Çökme deneyinin yapılışı

Çökme miktarının büyük değerler alması, taze betonun kendi ağırlığı altında hareket etme kabiliyetinin büyük olduğunu ifade etmektedir. Bu bakımdan çökme miktarı ne kadar fazla ise taze betonun işlenebilirliğinin de o kadar yüksek olduğu kabul edilmektedir.

5.2.2. Birim ağırlık deneyi

Taze betonda birim ağırlık deneyi, TS 2941 standardına uygun olarak yapılmıştır. Birim hacim ağırlığı, belirli bir hacim içerisinde sıkıştırılarak yerleştirilmiş taze betonun birim hacmine uygun gelen ağırlığın kg/m^3 olarak gösterilmesidir. Deneye başlamadan önce, agrega tane büyüklüğüne uygun ölçme kabı seçilmiş ve kabın boş ağırlığı kayıt edilmiştir. Hazırlanan beton karışımından alınmış ve üç tabaka halinde şişlenerek sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi bittikten sonra kabın kenarlarına tokmak ile 10-15 kere vurularak beton içinde olan boşluk ve hava kabarcıkları giderilmiştir. Betonun yüzeyi, sıyırma levhası ile düzeltildikten sonra kap terazide tartılmıştır. Önceden tartılarak bulunan kap ağırlığı düşülerek betonun net ağırlığı hesaplanmıştır. Betonun net ağırlığı ölçme kabının hacmine bölünerek taze betonun birim hacim ağırlığı bulunmuştur.

5.2.3. Hava miktarı deneyi

Taze betonda hava miktarının tayini, TS 2901 standardına uygun olarak basınç metodu ile yapılmıştır. Beton karışımı hazır olduktan sonra deney numunesi yaklaşık eşit hacimlerde üç tabaka halinde ölçme kabına yerleştirilmiştir. Her tabaka 25 defa şişleme yöntemi ile sıkıştırılmıştır. Her tabakanın şişlenmesinden sonra kabın kenarlarına 10-15 kere vurularak beton içinde kalan boşluk ve hava kabarcıkları giderilmiştir. Şişleme işlemi bittikten sonra sıyırma çubuğu ile kabın tam dolu ve beton yüzeyinin düzgün olması sağlanmış, kapak oturma yeri iyice temizlendikten sonra kapak yerleştirilip kilitlenmiştir. Hava hücresi ile ölçme kabı arasındaki ana hava musluğu kapatılarak kapaktaki iki boşaltma musluğu açılmış ve cihaza su ilave edilmiştir. Bu işlem, diğer musluktan su çıkıncaya kadar devam ettirilmiş ve cihaz, hafifçe sarsılarak havanın tamamen musluktan dışarıya çıkması sağlanmıştır. Hava

boşaltma musluğu kapatılarak, manometre göstergesi ile basınç çizgisine gelinceye kadar hava pompalanmıştır. 3-5 saniye sonra göstergenin durumunu sabitleştirmek için tekrar hava pompalanmış bazen de boşaltılmıştır. Sonra kapaktaki boşaltma muslukları kapatılmış ve hücre ile kap arasındaki ana hava musluğu açılmıştır. Göstergenin sabitleşmesi sağlandıktan sonra ibrenin gösterdiği hava miktarı okunup kayıt edilmiştir.

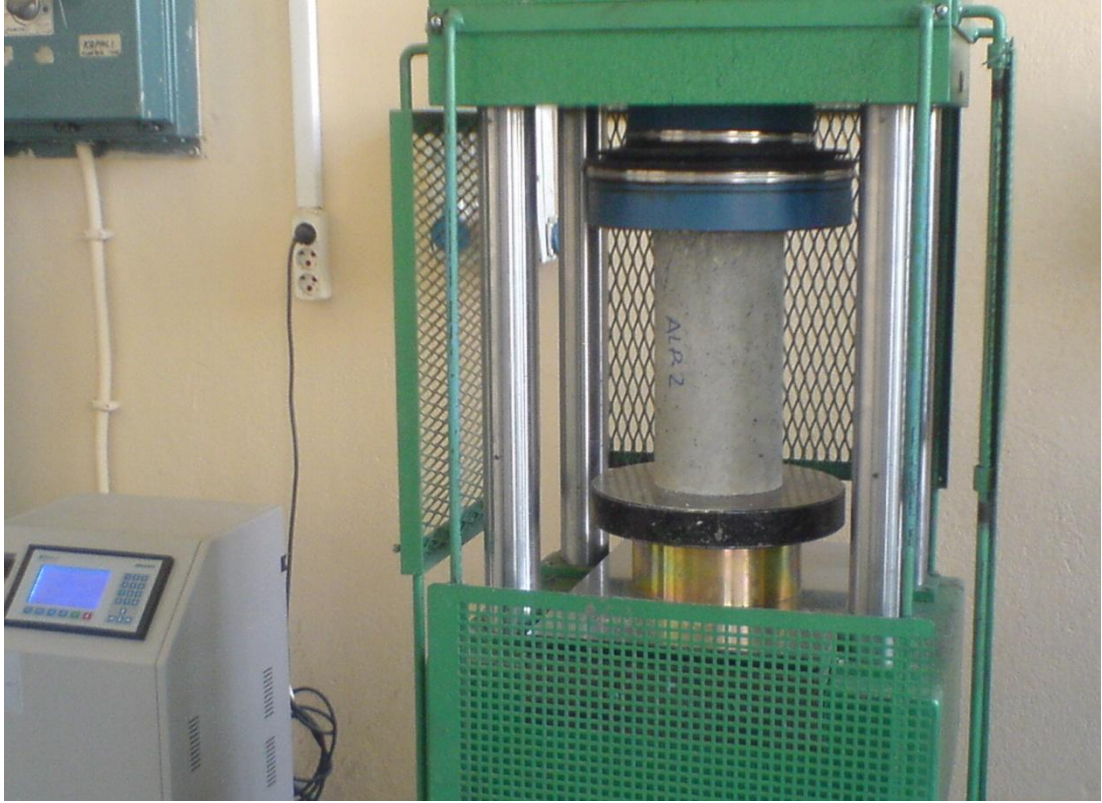


Resim 5.6. Hava miktarı deneyinin yapılışı

5.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

5.3.1. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyleri, kükürt karışımı ile başlıklanmış 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir beton numuneler üzerinde TS EN 12390-3 “Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini” standardına uygun olarak yapılmıştır [18]. Deney, BESMAK marka ve 2000 KN kapasiteli, bilgisayar kontrollü hidrolik beton presinde 5,00 kN/sn yükleme hızı ile yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin taşıyabildiği maksimum gerilmeler N/mm^2 olarak belirlenmiştir.



Resim 5.7. Betonun basınç dayanımı deneyi düzeneği

Deney numunelerinin basınç dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Burada;

f_c = Deney numunesinin basınç dayanımı, [N/ mm²]

F = Maksimum kırılma yükü, [N]

A_c = Numunenin en kesit alanı, [mm²]

5.3.2. Yarmada çekme dayanımı deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyleri, 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir beton numuneler üzerinde TS EN 12390- 6 “Deney Numunelerinin Yarmada Çekme

Dayanımının Tayini” standardına uygun olarak yapılmıştır. Prensip olarak deney, şöyle özetlenebilir: Silindir şekilli deney numuneleri, uzunluğu boyunca dar bir alana basınç yükü uygulanarak yüklenir. Yükleme doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme kuvveti sonucunda, numunedeki çekme gerilmesi parçalanmaya yol açar.

Deney, BESMAK marka ve 2000 KN kapasiteli, bilgisayar kontrollü hidrolik beton presinde 3,50 kN/sn yükleme hızı ile yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin taşıyabildiği maksimum gerilmeler N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır[19]:

$$f_{cty} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

Burada;

f_{cty} = Yarmada çekme dayanımı, $[\text{N/mm}^2]$

F = En büyük yük, [N]

L = Silindir numunenin boyu, [mm]

d = Silindir numunenin çapı, [mm].



Resim 5.8. Betonun yarmada çekme dayanımı deneyi düzeneği

5.3.3. Doğrudan çekme dayanımı deneyi

Beton numunelerin doğrudan çekme dayanımı deneyinin zorluklarından ve bu nedenle bir standardı bulunmadığından 2.1.3’de bahsedilmişti. Bu tez çalışmasında uygulanan doğrudan çekme dayanımı deneyleri, 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindirik şekilli beton numunelere, alt ve üst yüzlerine epoksiyle yapıştırılan metal başlıklar vasıtasıyla kopma oluncaya kadar tek eksenli çekme kuvveti uygulanması şeklinde özetlenebilir [20]. Deneyler, Amsler marka, 8 ton kapasiteli, universal çekme- basma hidrolik test cihazında 100 N/sn yükleme hızı ile yapılmıştır.

Deney günü kür havuzundan çıkarılan deney numunelerinin bütün yüzleri önce yıkanmış, ardından basınçlı hava ile çapaklar ve gözenekler temizlenmiş, böylece metal başlık ile beton numune arasındaki yapışma yüzeyinde yer alabilecek toz vb. kusurlardan arındırılmıştır. Daha sonra, beton numune ile aynı çaptaki (150 mm) metal başlığı birbirine yapıştıracak iki bileşenli epoksi yapıştırıcı yapışma yüzeyine uygulanarak paralellik şartı sağlanacak konuma getirildikten sonra kuruması beklenmiştir. Aynı işlem beton numunenin diğer başlık yüzeyine de uygulanmıştır. Numune, iki yüzünün de kuruması ile üzerine çekme kuvveti uygulanmak üzere hazır hale gelmiştir. Metal başlıklar bağlantı elemanları vasıtasıyla tek eksenli çekme gerilmesi uygulanacak deney makinesine yerleştirildikten sonra deney numunesi üzerine kopma oluncaya kadar çekme kuvveti uygulanmış ve kopma olunca deney tamamlanmıştır.

Çekme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_{ct} = \frac{F}{A_c}$$

Burada;

f_{ct} = Deney numunesinin çekme dayanımı, [N/ mm²]

F = Maksimum kırılma yükü, [N]

A_c = Numunenin en kesit alanı, [mm²]



Resim 5.9. Beton numunenin alt ve üst yüzlerine yapıştırılan metal başlıklar



Resim 5.10. İki bileşenli epoksi yapıştırıcının metal başlığa uygulanması



Resim 5.11. Metal başlığın numuneye yapıştırılmış hali



Resim 5.12. Betonun doğrudan çekme dayanımı deneyi düzeneği

5.3.4. Elastisite modülü deneyi

Elastisite modülü deneyleri, kükürt karışımı ile başlıklanmış 15 cm çaplı, 30 cm yükseklikli silindir beton numuneler üzerinde TS 3502 “Betonda statik elastisite modülü ve poisson oranı tayini” standardına uygun olarak yapılmıştır [21]. Deney, 3000 kN kapasiteli, deformasyon kontrollü beton presinde $0,25 \text{ N/mm}^2/\text{sn}$ yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Beton numunelere basınç dayanımının % 40’ı oranında sınır yükü üç kere uygulanmış ve sonuncuda numune kırılıncaya kadar gerilmeler arttırılmıştır. Beton numuneler üzerine sabitlenen boyunduruklar arasına karşılıklı olarak yerleştirilen iki adet LVDT (Linear variable differential transducer) yardımıyla basınç gerilmeleri altında betonda oluşan deformasyonlar ölçülmüş ve bilgisayar programı vasıtasıyla kaydedilmiştir. Kaydedilen değerler, dikey eksen

gerilmeyi ve yatay eksenli birim deformasyonu gösteren bir diyagram üzerine yerleştirilerek gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisi elde edilmiştir.

Betonda statik elastisite modülü, beton deney numunelerinde elastik bölgede uygulanan kuvvetin oluşturduğu basınç gerilmelerinin numunelerde meydana getirdiği boyuna birim kısalmaya oranıdır. Hem σ - ϵ eğrisinin başlangıç noktasından, hem de sınır yükte elde edilen σ - ϵ değerlerinin bulunduğu noktadan geçen bir doğru çizilmiştir. Çizilen bu doğrunun eğimi hesaplanarak betonun elastisite modülü bulunmuştur.

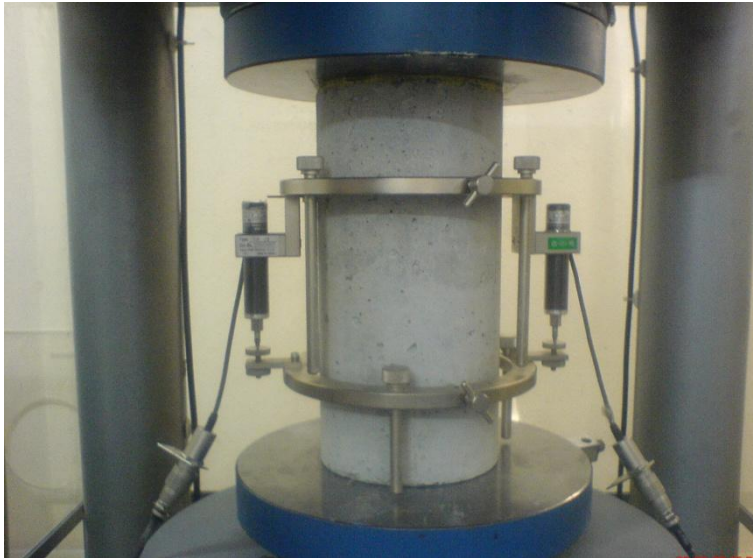
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Burada;

E = Elastisite modülü, [MPa]

σ = Sınır yükünde oluşan gerilme, [MPa]

ϵ = Sınır yükünde görülen birim kısalma



Resim 5.13. Elastisite modülü deneyinde LVDT'lerin kurulumu



Resim 5.14. Elastisite modülü deney düzeneği

6. DENEY SONUÇLARI

Deneylerde elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulup değerlendirilecektir.

6.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Karışımların taze beton deney sonuçları topluca aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Karışım türlerinin taze beton deney sonuçları

Karışım	Çökme [cm]	Birim Ağırlık [t/m ³]	Hava Miktarı (%)
B1 (Şahit Beton)	10,50	2,339	2,50
B2 (SA Katkılı Beton)	19,00	2,377	1,60
B3 (SD Katkılı Beton)	11,00	2,371	2,30
B4 (Çelik Lifli Beton)	10,00	2,382	2,30

Deneylere yönelik teorik çalışma esnasında süper akışkanlaştırıcı katkılı beton (B2) dışındaki karışım türlerinin çökme değerlerinin 10-12 cm aralığında sabit tutulmasının hedeflendiği 4.4’de belirtilmiştir. Deneme karışımları üretilmiş ve numuneler istenilen çökme değerleri elde edilen karışımlardan alınmıştır. Bu nedenle B2 dışındaki diğer karışımlar arasında belirgin bir çökme değeri farkı bulunmamaktadır.

B2 betonunda şahit betona göre % 90 oranında çökme artışı sağlanmıştır. Bu durum akışkanlaştırıcının, tanelerin birbirleri üzerinden kaymalarını kolaylaştırması ve betonun iç sürtünmesini azaltması yönündeki etki mekanizması ile açıklanabilir. Diğer yandan betonlarda su/bağlayıcı oranının sabit tutulmasının da bunda etkisi bulunmaktadır.

Betonlarda SA katkısı ile çökme değeri artmakta, buna karşılık SD ikamesi ile çökme değeri azalmaktadır.

Birim ağırlık deneyinden elde edilen sonuçlara göre katkılı karışımlarda, şahit betona göre birim ağırlık değerinde ortalama % 1,6 oranında artış görülmüştür.

B4 betonunda en yüksek birim ağırlık değeri elde edilmiştir. Bunda SA'nın betonun iç sürtünmesinin azalması ve boşlukların daha iyi doldurulması yönündeki etkisinin yanında kullanılan çelik liflerin birim ağırlığının betonunkinden yüksek olmasının da etkisi olduğu düşünülmektedir.

SD katkılı B3 karışımında elde edilen birim ağırlık değerinin diğer katkılı karışımlardan daha düşük olmasının nedeni ise SD'nin özgül ağırlığının çimentoya oranla daha düşük olması nedeniyle betonun birim ağırlığında azalma yönünde katkıda bulunmasıdır.

Hava miktarı deneyinden elde edilen sonuçlara göre katkılı karışımlarda, şahit betona göre hava miktarı değerinde ortalama % 18 oranında azalış sağlanmıştır. En düşük hava miktarı değeri elde edilen B2 betonunda şahit betona göre % 36 oranında azalma görülmüştür. Bu durum akışkanlaştırıcının, boşlukların daha iyi doldurulması yönündeki etki mekanizması ile açıklanmaktadır.

Akışkanlaştırıcının SD ile kullanıldığı B3 betonunda ve ÇL ile birlikte kullanıldığı B4 betonunda ise hava miktarı değerleri % 8 oranında azalmıştır. Şahit betona göre belirgin bir etkileri gözlenmemiştir.

6.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

6.2.1. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyleri sonucu bulunan kırılma yükleri Çizelge 6.2'de, yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen ortalama basınç dayanımları Çizelge 6.3'de, betonların yaşa göre basınç dayanımı kazanma yüzdeleri de Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Numunelerin basınç altında kırılma yükü değerleri

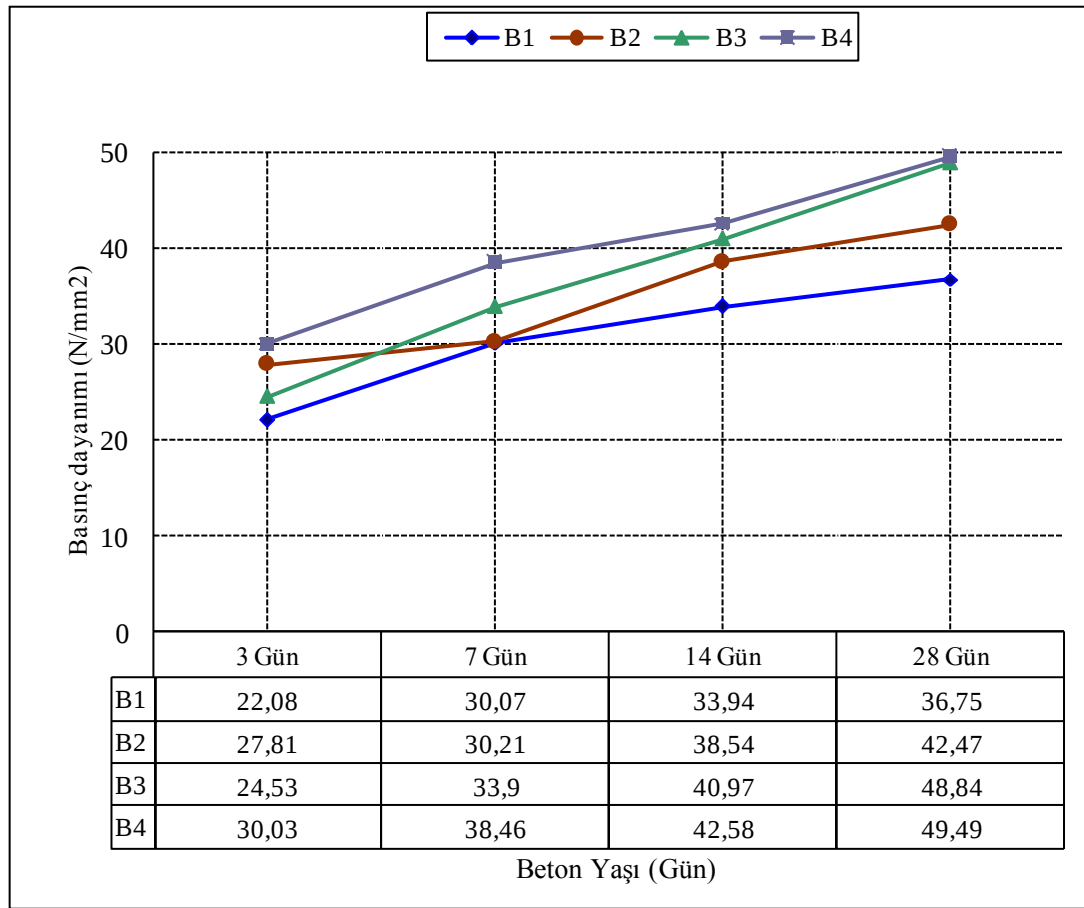
Kod	Yaş	Kırılma Yüğü [kN]			ORT [kN]
		1.Numune	2. Numune	3. Numune	
B1	3 gün	401,74	378,57	-	390,16
	7 gün	531,91	530,78	-	531,35
	14 gün	582,34	617,23	-	599,79
	28 gün	669,18	654,96	624,08	649,41
B2	3 gün	496,18	486,88	-	491,53
	7 gün	562,13	505,56	-	533,85
	14 gün	658,93	703,29	-	681,11
	28 gün	731,29	770,16	750,22	750,56
B3	3 gün	424,98	441,87	-	433,43
	7 gün	616,88	581,25	-	599,07
	14 gün	803,93	643,93	-	723,93
	28 gün	838,51	820,68	930,18	863,12
B4	3 gün	520,92	540,59	-	530,76
	7 gün	665,48	693,97	-	679,73
	14 gün	748,54	756,20	-	752,37
	28 gün	862,47	885,66	875,41	874,51

Çizelge 6.3. Beton türlerinin yaşa göre ortalama basınç dayanımları

Kod	Basınç Dayanımı [N/mm ²]			
	3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
B1	22,08	30,07	33,94	36,75
B2	27,81	30,21	38,54	42,47
B3	24,53	33,90	40,97	48,84
B4	30,03	38,46	42,58	49,49

Çizelge 6.4. Beton türlerinin yaşa göre basınç dayanımı kazanma yüzdeleri

Kod	Dayanım Kazanma Oranı (%)			
	3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
B1	60	82	92	100
B2	65	71	91	100
B3	50	69	84	100
B4	61	78	86	100



Şekil 6.1. Beton türlerinin basınç dayanımları

Üretilen betonlar 3. günde 28 günlük basınç dayanımlarının ortalama % 59'unu, 7. günde ise % 75'ini kazanmışlardır. Katkılı betonların 28 günlük basınç

dayanımlarında şahit betona göre ortalama % 28 dayanım artışı meydana gelirken, tüm yaşlarda en yüksek basınç dayanımı değeri B4 betonundan elde edilmiştir.

B2, B3 ve B4 betonlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarının şahit betona göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda gerek SA ve gerekse SD ve çelik lif kullanımının, betonun basınç dayanımını 28 güne kadar arttırdığı, şahit betona göre yüksek basınç dayanımı gerektiren yerlerde tercih edilebileceği ve basınç dayanımını arttırıcı yönde etki edebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Literatürde, daha önce yapılan deneylerde silis dumanının betonun basınç dayanımına sağladığı olumlu etkinin ilk birkaç günden sonra kendisini göstereceği bildirilmiştir [3,4]. Bu çalışmada da silis dumanı katkılı B3 karışımının başlangıçta basınç dayanımı katkılı beton karışımlarına göre düşükken zaman içinde diğer karışımlardan daha hızlı arttığı, 7 günlük basınç dayanımı değeriyle bu açığı kapattığı ve 28 gün içinde dayanım artış oranı en yüksek olan beton türü olduğu görülmektedir. 3. günde diğer karışımların basınç dayanımı kazanma yüzdeleri 28 günlük dayanımlarının en az % 60'ı iken, bu oran B3 betonunda % 50'dir. Beton türlerinin 28 günlük basınç dayanımının 3 günlük basınç dayanımına oranı hesaplandığında silis dumanı için 1,99 olan bu değer diğer beton türlerinde 1,66, 1,65 ve 1,53 olmasından yola çıkarak da bu durum anlaşılabilmektedir. Beton türlerinin basınç dayanımını gösteren Şekil 6.1'den de bu durum rahatlıkla görülebilmektedir.

B3 betonunun 7 günlük dayanımında beklenen artışı gerçekleştirmeye başlaması ile büyükten küçüğe doğru B4,B3,B2,B1 şeklinde oluşan yüksek basınç dayanımı sıralaması 28. güne kadar değişmemiş, katkılı karışımlar ile şahit beton arasındaki basınç dayanımı farkı da giderek açılmıştır. Betonların 28 günlük basınç dayanımı değerlerini karşılaştırdığımızda en düşük dayanım değerinin şahit betondan alındığı, B4 betonundan % 35 oranında daha yüksek bir dayanım, B3 betonundan % 33 oranında daha yüksek bir dayanım, B2 betonundan da % 16 oranında daha yüksek bir dayanım elde edildiği görülmüştür.

Çelik lifli betonda SA ve yükleme düzlemine paralellik gösteren çelik liflerin basınç dayanımını arttırdığı, SD katkılı betonda ince silis dumanı tanelerinin agrega-hamur arayüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirmesi ve ilave puzolanik jeller meydana getirmesi ile basınç dayanımının yükseldiği, SA katkılı betonlarda da çimentonun suyla temas eden yüzeyinin ve hidrasyonunun artması sonucu betonun basınç dayanımının arttığı bilinmektedir.

6.2.2. Yarmada çekme dayanımı deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyleri sonucu bulunan kırılma yükleri Çizelge 6.5’de, yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen yarmada çekme dayanımları Çizelge 6.6’da, betonların yaşa göre yarmada çekme dayanımı kazanma yüzdeleri de Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Numunelerin yarmada çekme deneyi kırılma yükü değerleri

Kod	Yaş	Kırılma Yüğü [kN]		ORT [kN]
		1.Numune	2. Numune	
B1	3 gün	164,86	200,86	182,86
	7 gün	217,37	224,50	220,94
	14 gün	227,88	232,27	230,08
	28 gün	245,41	230,28	237,85
B2	3 gün	218,32	206,11	212,22
	7 gün	225,78	225,70	225,74
	14 gün	264,53	257,50	261,02
	28 gün	293,15	294,51	293,83
B3	3 gün	140,38	175,73	158,06
	7 gün	174,14	170,15	172,15
	14 gün	252,21	262,35	257,28
	28 gün	310,14	330,42	320,28
B4	3 gün	211,52	199,61	205,57
	7 gün	247,16	187,38	217,27
	14 gün	294,50	289,94	292,22
	28 gün	305,43	310,54	307,99

Çizelge 6.6. Beton türlerinin yaşa göre ortalama yarmada çekme dayanımları

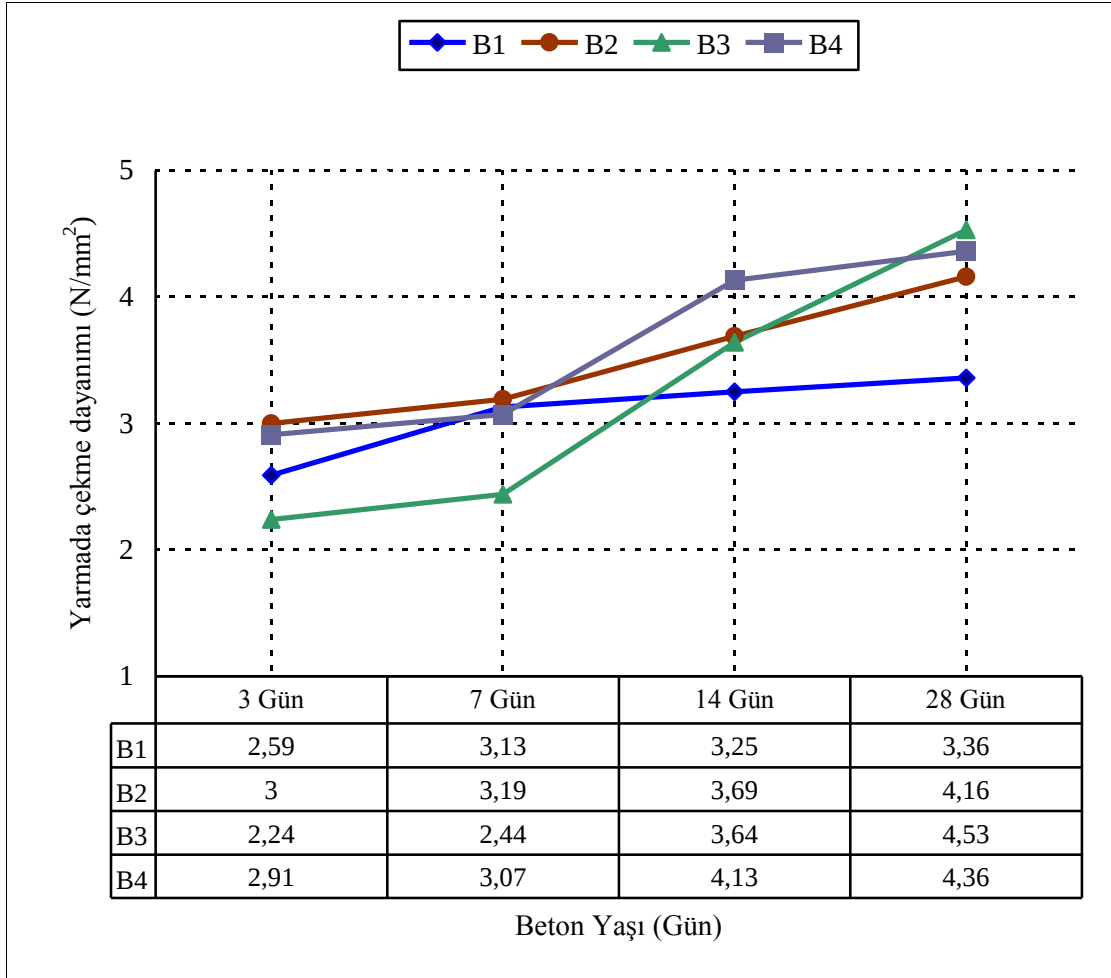
Kod	Yarmada Çekme Dayanımı [N/mm ²]			
	3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
B1	2,59	3,13	3,25	3,36
B2	3,00	3,19	3,69	4,16
B3	2,24	2,44	3,64	4,53
B4	2,91	3,07	4,13	4,36

Çizelge 6.7. Beton türlerinin yaşa göre yarmada çekme dayanımı kazanma yüzdeleri

Kod	Dayanım Kazanma Oranı (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
B1	77	93	97	100
B2	72	77	89	100
B3	49	54	80	100
B4	67	71	95	100

Üretilen betonlar 3. günde 28 günlük yarmada çekme dayanımlarının ortalama % 66'sını, 7. günde ise % 74'ünü kazanmışlardır. Katkılı betonların 28 günlük yarmada çekme dayanımlarında, şahit betona göre ortalama % 29 oranında dayanım artışı meydana gelirken, 3.gün ve 28. gün arasında en yüksek dayanım artışının % 102 ile B3 betonunda olduğu görülmüştür.

B3 betonunun 3 günlük ve 7 günlük yarmada çekme dayanımları sıralamada en düşük değerde iken basınç dayanımına göre gecikmeli olarak gerçekleşen hızlı bir dayanım artışı ile 28. günde beton türleri arasında en yüksek yarmada çekme dayanımına ulaşmıştır.



Şekil 6.2. Beton türlerinin yaşa göre ortalama yarmada çekme dayanımları

Literatürde daha önce yapılan deneylerde silis dumanının betonun dayanımına sağladığı olumlu etkinin ilk birkaç günden sonra kendisini göstereceği bildirilmiştir [3,4]. Bu çalışmada da silis dumanı katkılı B3 karışımının başlangıçta dayanımı katkılı beton karışımlarına göre düşükken zaman içinde diğer karışımlardan daha hızlı arttığı, 7 günlük yarmada çekme dayanımı değeriyle bu açığı kapattığı ve 28. günde dayanım artış oranı en yüksek olan beton türü olduğu görülmektedir. 3. günde diğer karışımların yarmada çekme dayanımı kazanma yüzdeleri 28 günlük dayanımlarının en az % 67'si iken, bu oran B3 betonunda % 49'dur. Beton türlerinin 28 günlük yarmada çekme dayanımının 3 günlük dayanımına oranı hesaplandığında silis dumanı için 2,02 olan bu değer diğer beton türlerinde 1,30, 1,38 ve 1,49 olmasından yola çıkarak da bu durum anlaşılabilmektedir. En düşük dayanımı artışı

şahit betonda gerçekleşmiş olup (% 30), en düşük 14 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları da şahit betondan elde edilmiştir. Beton türlerinin yarmada çekme dayanımını gösteren Şekil 6.2'den de bu hususlar görülebilmektedir.

B2,B3 ve B4 betonlarının 14 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımlarının şahit betona göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda gerek SA ve gerekse SD ve çelik lif kullanımının, betonun yarmada çekme dayanımını 14 günden sonra arttırdığı, şahit betona göre yüksek çekme dayanımı gerektiren yerlerde tercih edilebileceği ve çekme dayanımını artırıcı yönde etki edebileceği sonucu bulunmuştur.

3. ve 7. gün deney sonuçlarına göre şahit betonun yarmada çekme dayanımları bazı katkılı karışımlardan yüksek iken 14. ve 28. gün deney sonuçlarında katkılı karışımlar şahit betona göre daha yüksek yarmada çekme dayanımlarına ulaşmış ve katkılı karışımlar ile şahit beton arasındaki yarmada çekme dayanımı farkı da giderek açılmıştır. Betonların 28 günlük dayanım değerlerini karşılaştırdığımızda en düşük dayanım değerinin şahit betondan alındığı, B3 betonundan % 35 oranında daha yüksek bir dayanım, B4 betonundan % 30 oranında daha yüksek bir dayanım, B2 betonundan da % 24 oranında daha yüksek bir dayanım elde edildiği görülmüştür.

SD katkılı betonda ince silis dumanı tanelerinin agrega-hamur arayüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirmesi ve ilave puzolanik jeller meydana getirmesi ile çekme dayanımını yükseltmekte, elik lifli betonda çelik liflerin yüksek çekme dayanımlarından kaynaklı olarak çekme dayanımı artmaktadır. SA katkılı betonlarla ilgili olarak da yapılan deneyler önemli düzeyde dayanım artışını işaret etmektedir.

6.2.3. Doğrudan çekme dayanımı deneyi

Doğrudan çekme dayanımı deneyleri sonucu bulunan kırılma yükleri Çizelge 6.8'de, yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen çekme dayanımları Çizelge 6.9'da, betonların yaşa göre çekme dayanımı kazanma yüzdeleri de Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.8. Numunelerin doğrudan çekme kuvveti altında kırılma yükü değerleri

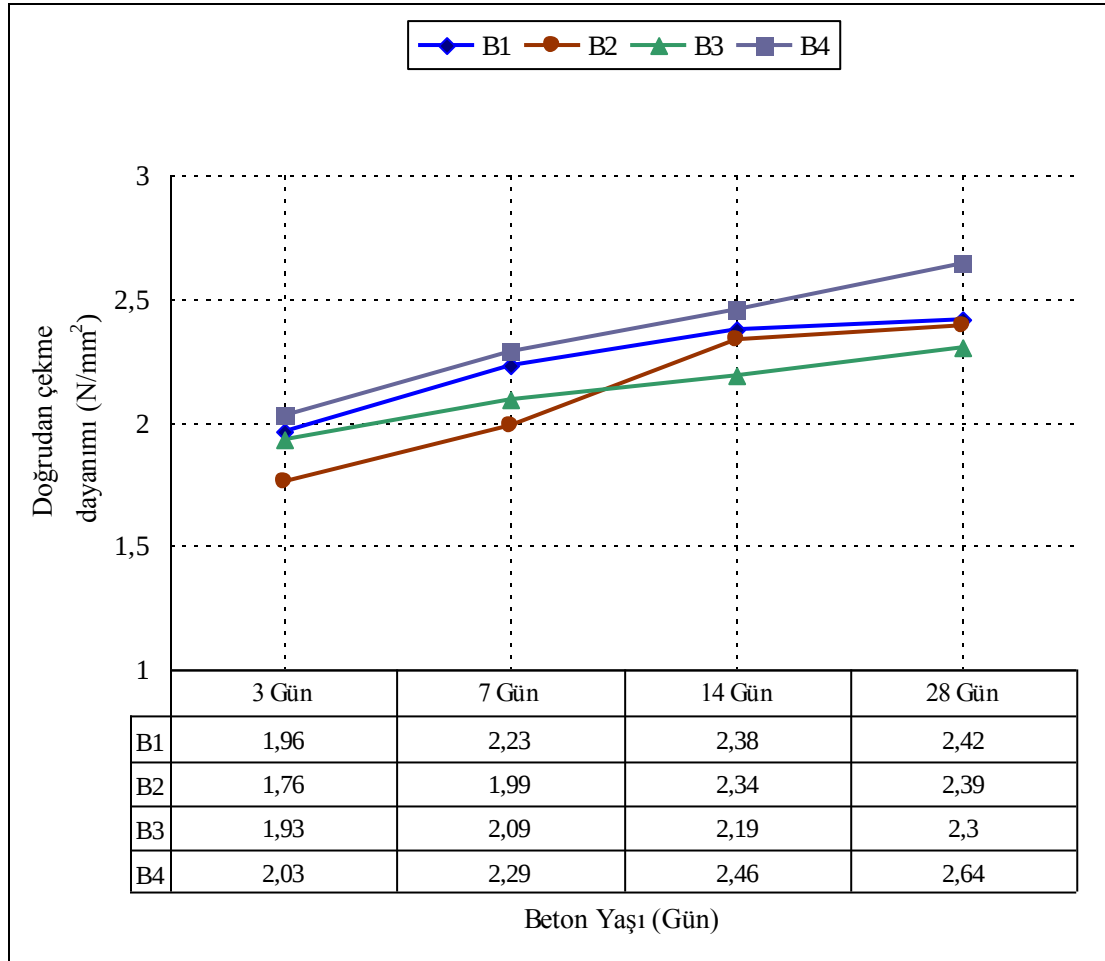
Kod	Yaş	Kırılma Yüğü [kN]		Ort [kN]
		1.Numune	2. Numune	
B1	3 gün	33,84	35,51	34,68
	7 gün	40,47	38,46	39,46
	14 gün	42,67	41,45	42,06
	28 gün	43,51	41,89	42,70
B2	3 gün	32,03	30,12	31,07
	7 gün	37,38	32,86	35,12
	14 gün	42,67	40,12	41,40
	28 gün	41,64	42,67	42,16
B3	3 gün	35,32	32,86	34,09
	7 gün	36,79	37,18	36,98
	14 gün	37,52	39,98	38,75
	28 gün	41,01	40,12	40,56
B4	3 gün	36,59	35,12	35,86
	7 gün	39,93	41,15	40,54
	14 gün	44,39	42,72	43,56
	28 gün	47,68	45,62	46,65

Çizelge 6.9. Beton türlerinin yaşa göre ortalama doğrudan çekme dayanımları

Kod	Doğrudan Çekme Dayanımı [N/mm ²]			
	3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
B1	1,96	2,23	2,38	2,42
B2	1,76	1,99	2,34	2,39
B3	1,93	2,09	2,19	2,30
B4	2,03	2,29	2,46	2,64

Çizelge 6.10. Beton türlerinin yaşa göre doğrudan çekme dayanımı kazanma yüzdeleri

Kod	Dayanım Kazanma Oranı (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
B1	81	92	99	100
B2	74	83	98	100
B3	84	91	96	100
B4	77	87	93	100



Şekil 6.3. Beton türlerinin yaşa göre ortalama doğrudan çekme dayanımları

Üretilen betonlar 3. günde 28 günlük doğrudan çekme dayanımlarının ortalama % 79'unu, 7. günde % 88'ini, 14. günde ise % 97'sini kazanmışlardır. Diğer dayanım deneylerinden farklı olarak, 14. günde 28 günlük dayanımların tamamına yakını kazanılmıştır. Katkılı betonların 28 günlük doğrudan çekme dayanımları ortalaması, şahit betonla aynı düzeydedir. En yüksek dayanım artışının % 35 ile B2 betonunda olduğu görülmüştür.

3,7,14 ve 28. günlerde en yüksek doğrudan çekme dayanımı B4 betonundan elde edilmiştir. B1 betonu da tüm deney günlerinde ikinci yüksek doğrudan çekme dayanımını vermiştir.

Zaman içerisinde yaşa göre dayanım kazanma yüzdesi en düşük olan beton türü B3 betonu olmuştur. Beton türlerinin 28 günlük yarmada çekme dayanımının 3 günlük dayanımına oranı hesaplandığında B3 betonu için 1,19 olan bu değer diğer beton türlerinde 1,23, 1,36 ve 1,30 olmasından yola çıkarak da bu durum anlaşılabilmektedir. En düşük dayanım artışı B3 betonunda gerçekleşmiş olup (% 19), en düşük 14 ve 28 günlük doğrudan çekme dayanımları da B3 betonundan elde edilmiştir. Beton türlerinin doğrudan çekme dayanımını gösteren Şekil 6.3'dan da bu hususlar görülebilmektedir.

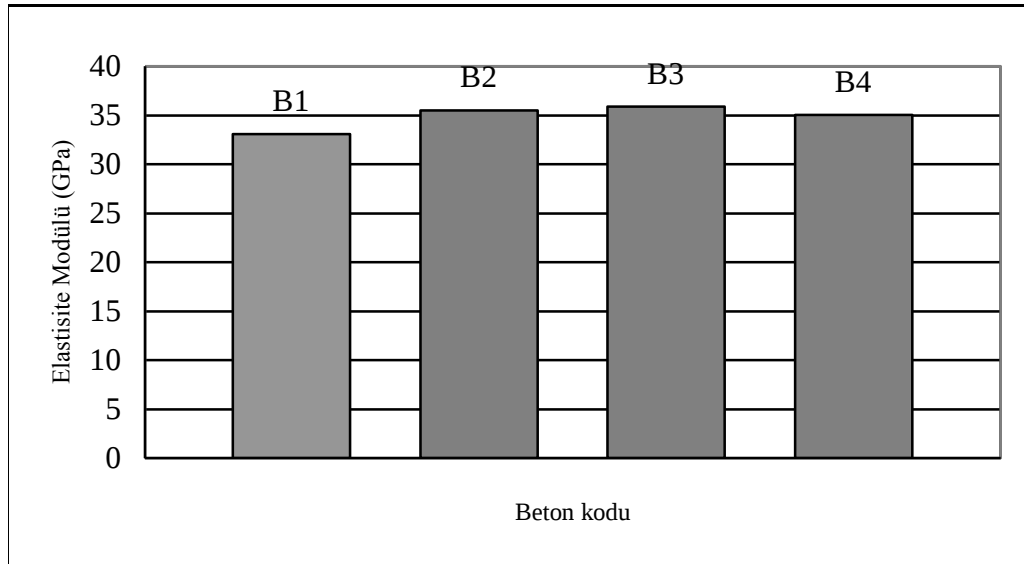
Betonların 28 günlük doğrudan çekme dayanımı değerlerini karşılaştırdığımızda en düşük dayanım değerinin B3 betonundan alındığı, B2 betonundan % 4 oranında daha yüksek bir dayanım, B1 betonundan % 5 oranında daha yüksek bir dayanım ve en yüksek dayanım değerini veren B4 betonundan da % 15 oranında daha yüksek bir dayanım elde edildiği görülmüştür [22].

6.2.4. Elastisite modülü deneyi

Yapılan deneyler sonucu bulunan beton türlerinin elastisite modülleri Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.11. 28 günlük beton numunelerin elastisite modülü deney sonuçları

Beton Kodu	Numune	Elastisite Modülü [GPa]	Ortalama
B1	1. numune	33,1	33,10
	2.numune	- ¹	
B2	1. numune	35,4	35,50
	2. numune	35,6	
B3	1. numune	35,6	35,90
	2. numune	36,2	
B4	1. numune	35,6	35,05
	2. numune	34,5	



Şekil 6.4. Beton kodlarının elastisite modülü deney sonuçları

Deney sonuçlarına göre tüm katkılı betonların elastisite modülü şahit betona göre daha yüksektir. En yüksek elastisite modülü SD katkılı B3 betonundan elde edilmiştir ve şahit betona göre %8,46 oranında daha yüksek bir değer görülmüştür. Daha sonra sırasıyla B2 betonunda şahit betona göre % 7,25 oranında daha yüksek bir değer, B4 betonunda da şahit betona göre %5,89 oranında daha yüksek bir değer bulunmuştur.

¹ Veri kaydı yapılamadığından değerlendirilememiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Beton deneylerinden elde edilen sonuçlar, beton üretiminde süper akışkanlaştırıcı ile silis dumanı veya çelik lif kullanımının taze ve sertleşmiş betonun özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu ve betonun mekanik özellikleri üzerinde olumlu sonuçlar verdiğini ortaya koyar yöndedir.
- Beton içerisindeki lif ya da silis dumanı miktarı arttıkça taze betonun işlenebilirliği önemli ölçüde azalmaktadır. İşlenebilirlik kaybını önlemek için akışkanlaştırıcı katkıları ile birlikte kullanılmaları önerilmektedir.
- Tüm katkılı betonlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları şahit betona göre daha yüksektir. Elde edilen sonuçlara göre gerek SA ve gerekse SD ve ÇL kullanımının, betonun basınç dayanımını artırıcı yönde etki edebileceği söylenebilir.
- Deney sonuçlarına göre ÇL ilaveli betonundan elde edilen 28 günlük basınç dayanımı şahit betondan % 35 daha yüksek, SD katkılı betonundan elde edilen basınç dayanımı % 33 daha yüksek, SA katkılı betondan elde edilen basınç dayanımı da % 16 daha yüksektir. SD'nin betonun basınç dayanımına sağladığı olumlu etki ilk birkaç günden sonra kendisini göstermektedir.
- SA katkılı, SD katkılı ve ÇL ilaveli betonlarının 14 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımlarının şahit betona göre daha yüksektir. Yarmada çekme dayanımında en az artış şahit betonda gerçekleşmiştir.
- SD katkılı betonundan elde edilen 28 günlük yarmada çekme dayanımı şahit betondan % 35 daha yüksek, ÇL ilaveli betonundan elde edilen dayanım % 30 daha yüksek, SA katkılı betondan elde edilen dayanım da % 24 daha yüksektir.
- Basınç dayanımı deneylerine benzer şekilde, silis dumanının betonun yarmada çekme dayanımına sağladığı olumlu etki, daha gecikmeli olarak, ilk

haftadan sonra kendisini göstermekte ve 28. günde en yüksek yarmada çekme dayanımını SD katkılı beton vermektedir.

- Üretilen betonlar 14. günde 28 günlük doğrudan çekme dayanımlarının ortalama % 97'sini kazanmışlardır. Diğer deneylerden farklı olarak, 14. günde 28 günlük dayanımların tamamına yakını kazanılmıştır.
- 3,7,14 ve 28. günlerde en yüksek doğrudan çekme dayanımı ÇL ilaveli betonundan elde edilmiştir. Şahit beton da tüm deney günlerinde ikinci yüksek doğrudan çekme dayanımını vermiştir.
- 28 günlük numunelerde en düşük doğrudan çekme dayanımı SD katkılı betonundan alınmıştır. SA katkılı betonundan % 4 oranında daha yüksek bir dayanım, şahit betondan % 5 oranında daha yüksek bir dayanım ve en yüksek doğrudan çekme dayanımı değerini veren ÇL ilaveli betondan da % 15 oranında daha yüksek bir dayanım elde edilmiştir.
- Tüm katkılı betonların elastisite modülü şahit betondan daha yüksektir. En yüksek elastisite modülü SD katkılı B3 betonundan elde edilmiştir ve şahit betona göre % 8,46 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. SA katkılı betonda şahit betona göre % 7,25 oranında daha yüksek, ÇL ilaveli betonda da % 5,89 oranında daha yüksek elastisite modülü bulunmuştur.
- Çelik lifli betonların tüm yaşlardaki basınç dayanımı ve doğrudan çekme dayanımı en yüksek değerleri verdiği gibi, yarmada çekme dayanımı değerleri de şahit betona göre önemli düzeyde yüksektir. SD katkılı betonların da ilk günlerden sonra basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı oldukça yüksektir. 28 günlük numunelerde en yüksek yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü de SD katkılı betondan elde edilmiştir.

- Betonun doğrudan çekme dayanımının tayini için pratik ve laboratuvar şartlarında uygulanması kolay bir deneyin bulunması, araştırmacılar için ilgi çekici bir konudur.
- Akışkanlaştırıcı ile silis dumanı, çelik lif gibi malzemelerin farklı miktarlarda ve farklı su/çimento oranlarında birlikte kullanılmasının betonun çekme dayanımına etkilerinin araştırılmasına yönelik çalışmalar yapılması önerilmektedir.

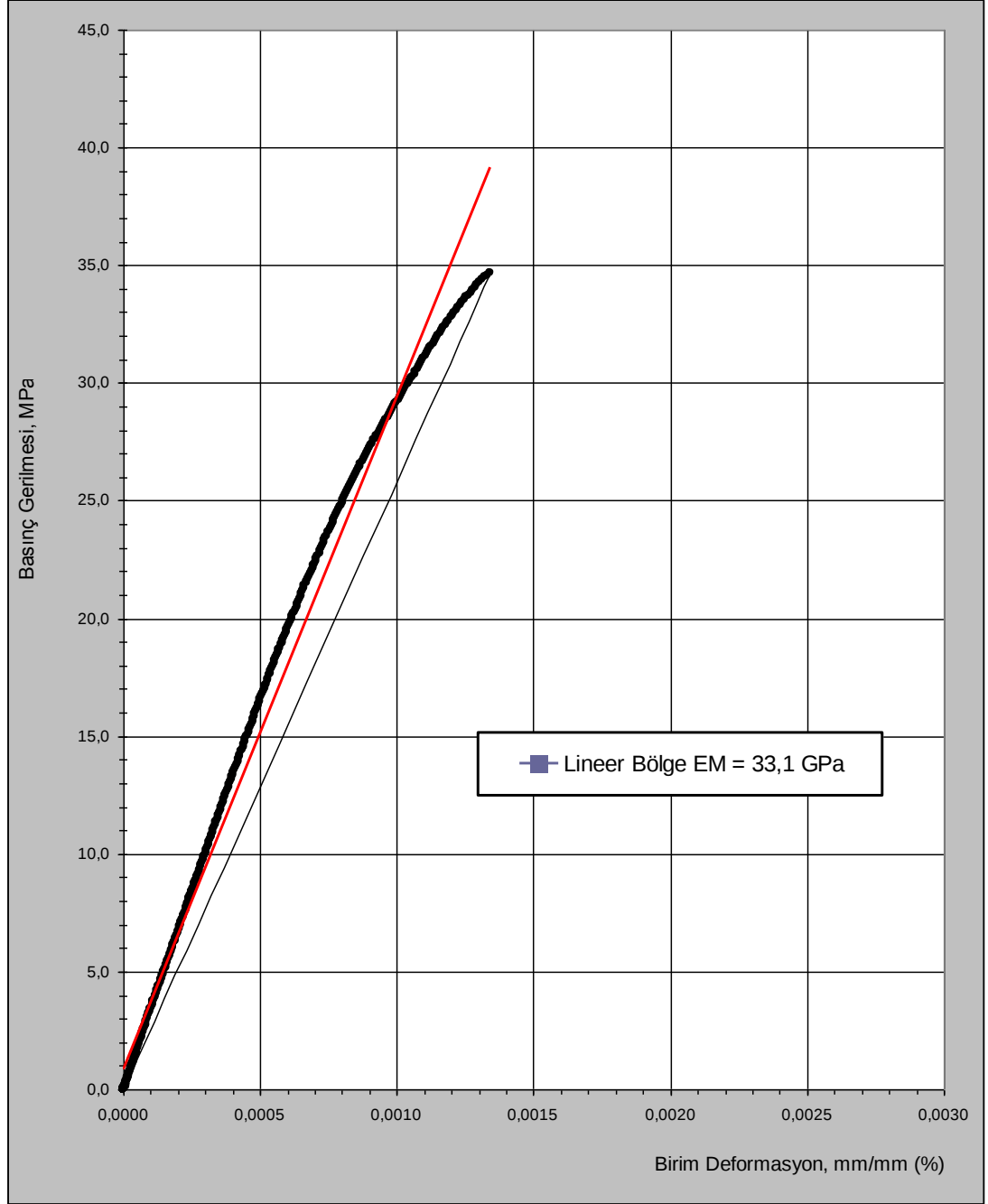
KAYNAKLAR

1. Begimgil, M., “Silica fume, fly ash in high performance concrete and their microstructural overview”, ***Proceedings of the international congress of challenges of concrete construction***, University of Dundee, Scotland, UK, Volume of innovations and developments in concrete metarials and construction, 879-888 (2002).
2. Begimgil, M., Doğan,A., “The effect of mineral admixtures and superplasticizers on the microstructure of concrete”, ***1. international symposium on mineral admixtures in cement***, İstanbul, 74-83 (1997).
3. Begimgil, M. ve Doğan, A., “Silis dumanının beton performansına katkısı”, ***Hazır Beton***, 40, 40-43 (1998).
4. Yeğınobalı, A., “Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı”, AR-GE/Y 01.01, ***TÇMB***, Ankara, 01-10, 16-34 (2001).
5. Şener, S., Begimgil, M., Belgin, C., “Size effect on failure tests of concrete beams with and without steel fibres”, ***ASCE journal of materials in civil engineering***, 14 (5): 436-440 (2002).
6. Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M., “Betonun performansa göre tasarımında yeni gelişmeler”, ***Beton Kongresi***, İstanbul, 24-57 (2004).
7. DSİ, “Çelik liflerle güçlendirilmiş beton” ***T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Daire Başkanlığı, Yayın No:MLZ-878***, 7-122,130-138 (1994).
8. Erdoğan, T.Y., “Beton”, ***ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.***, Ankara, 130-156 (2003).
9. Baradan, B., “Yapı Malzemesi II”, ***DEÜ Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi***, İzmir, 92-106,154-158 (1998).
10. Ersoy, U., “Betonarme, Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı”, ***Evrım Yayınevi***, 18-40 (1985).
11. Kassas, A.A., “Studies on the tensile strength of concrete”, Yüksek lisans tezi, ***Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-5 (1976).
12. Avram, C., Facaoaru, I., Filimon, I., Mirsu, O., Terteia, I., “Concrete Strength and Strains Vol:3”, ***Elsevier Scientific Publishing Company***, Romania, 185-270 (1981).

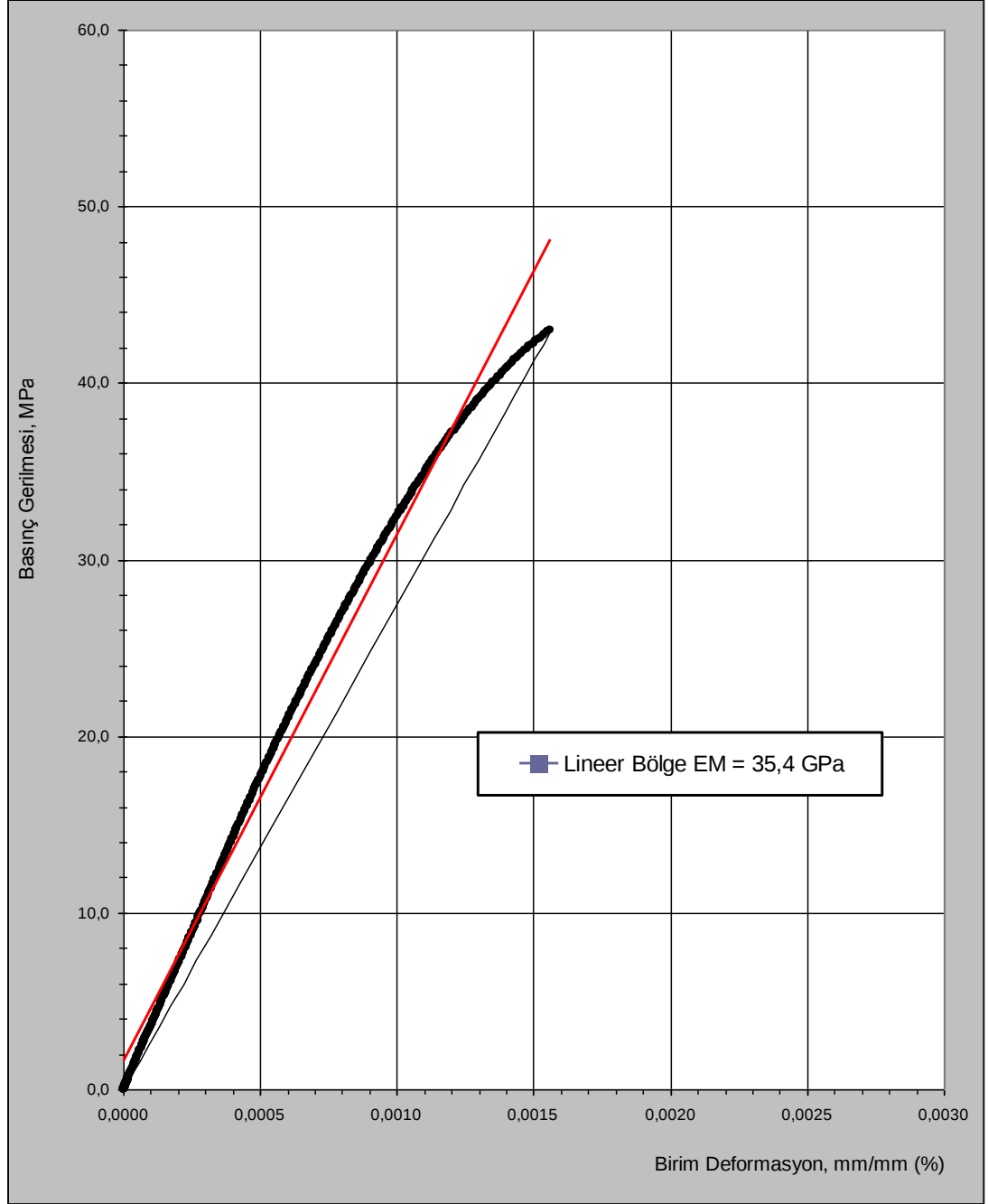
13. Ramachandran V. S., Malhotra M., “Concrete Admixtures Handbook”, *Noyes Publications*, 462-463 (1984).
14. DSİ, “Beton Kursu Ders Notları” *T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı*, 120-128 (2008).
15. Şimşek, O., “Beton ve Beton Teknolojisi”, *Seçkin Yayıncılık*, 47-59 (2004).
16. Halilov, S., “Silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkılı lifli betonların özellikleri”, Doktora tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-23 (2003).
17. TS 10514, “Beton- çelik tel takviyeli- çelik telleri betona karıştırma ve kontrol kuralları”, *TSE*, Ankara, (1992).
18. TS EN 12390-3, “Beton -Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini”, *TSE*, Ankara, (2003).
19. TS EN 12390-6, “Beton deneylerinin yarmada çekme dayanımının tayini”, *TSE*, Ankara, (2002).
20. CRD-C 164-92, “Standart test method for direct tensile strength of cylindrical concrete or mortar specimens”, *ERDC*, U.S.A., 1-4 (1992).
21. TS 3502, “Betonda statik elastisite modülü ve poisson oranı tayini”, *TSE*, Ankara, (1981).
22. Çivici, F., Eren, İ., “Çelik lifli betonun direkt çekme dayanımının ölçülmesi üzerine deneysel bir çalışma”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, (434): 49-53 (2004)

EKLER

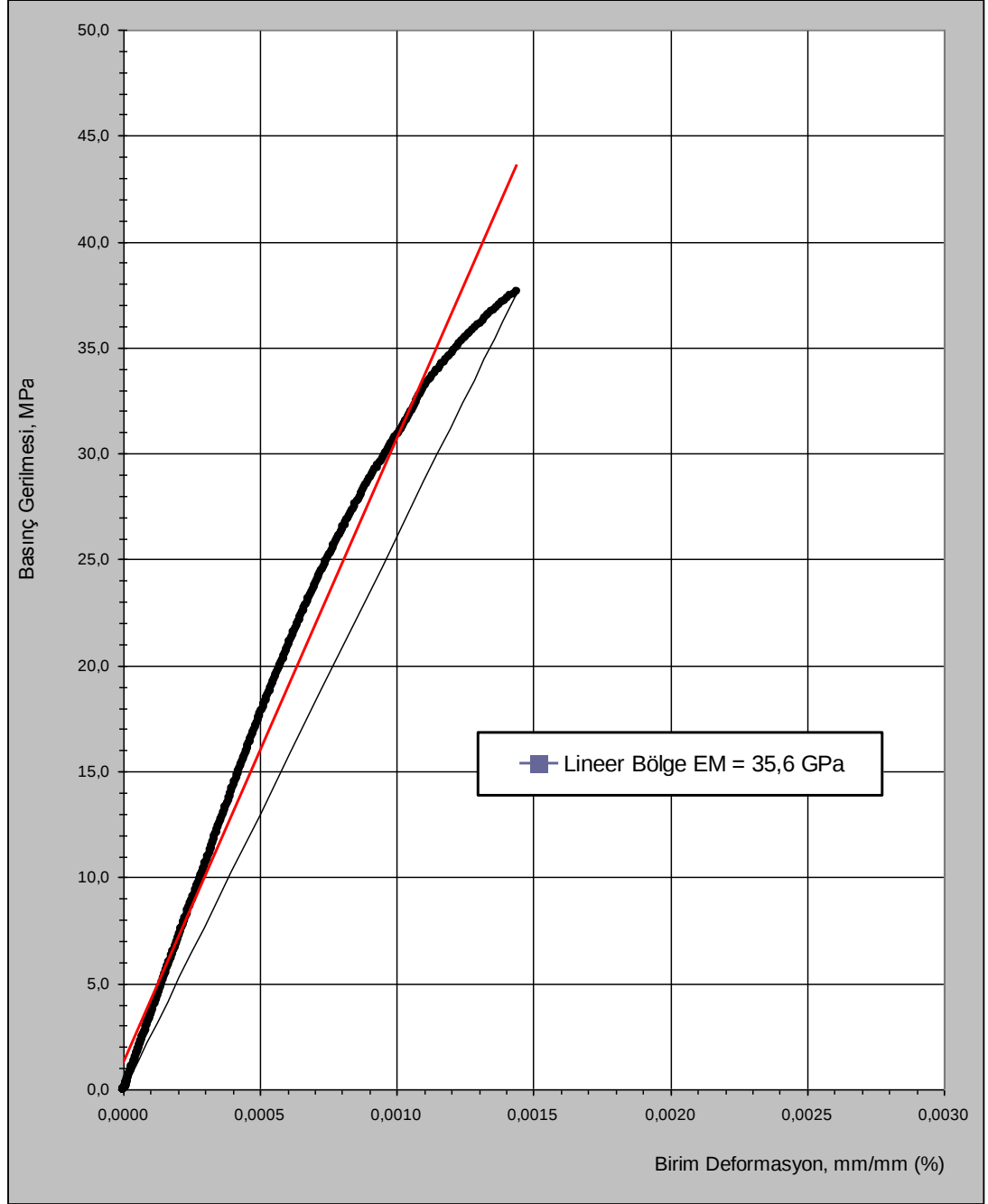
EK-1 Şahit betonun elastisite modülü



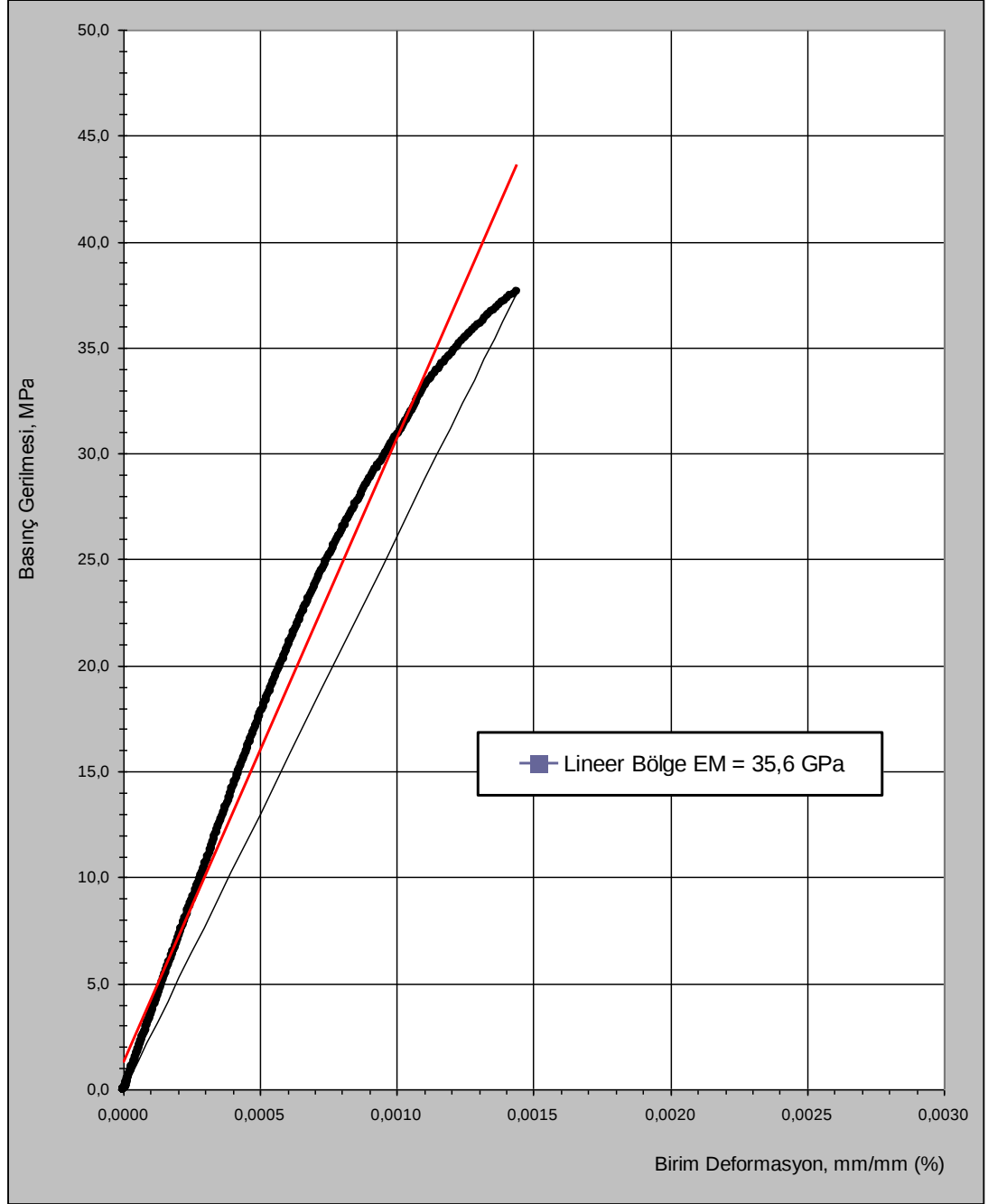
EK-2 SA katkılı beton 1. numune elastisite modülü



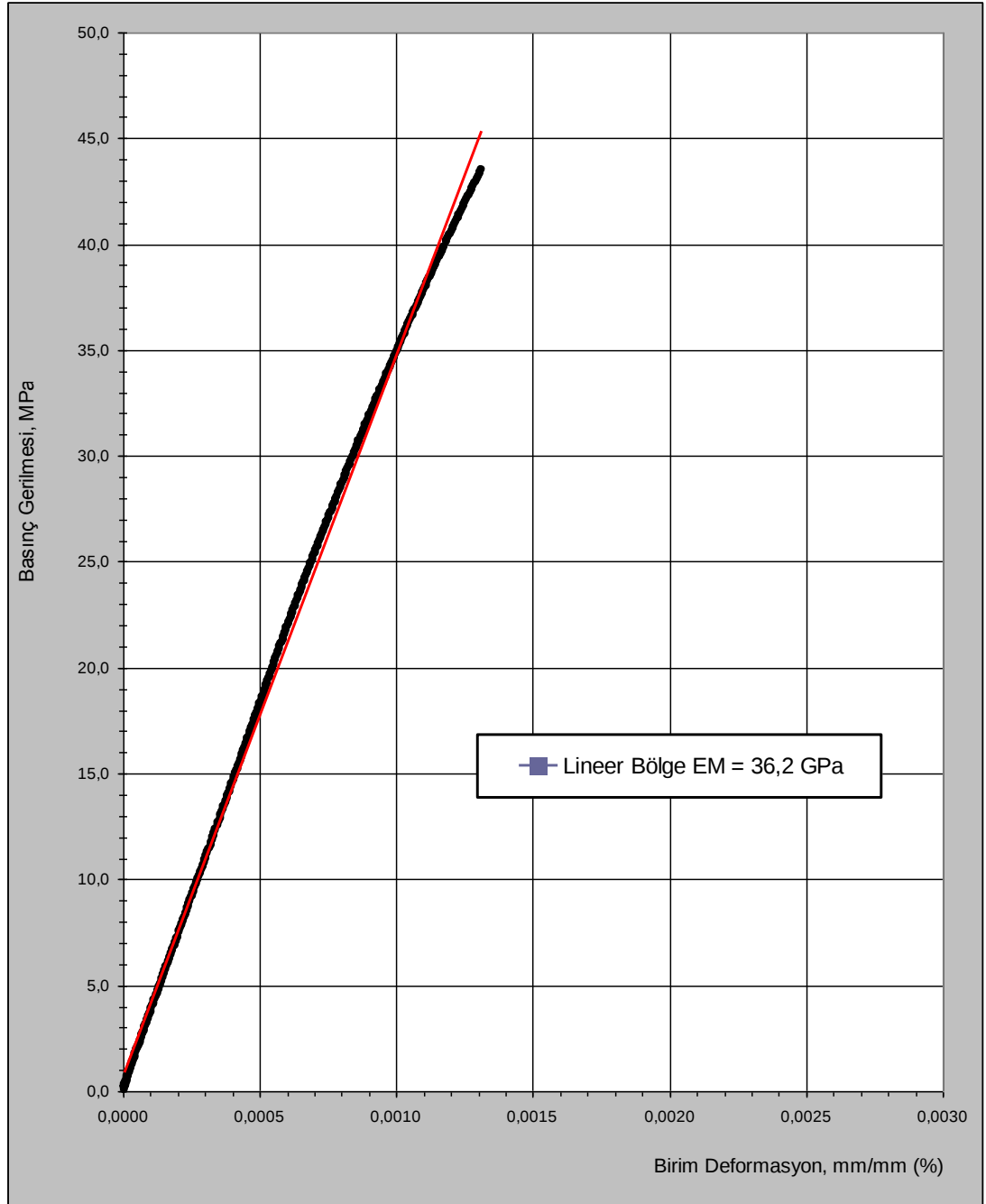
EK-3 SA katkılı beton 2. numune elastisite modülü



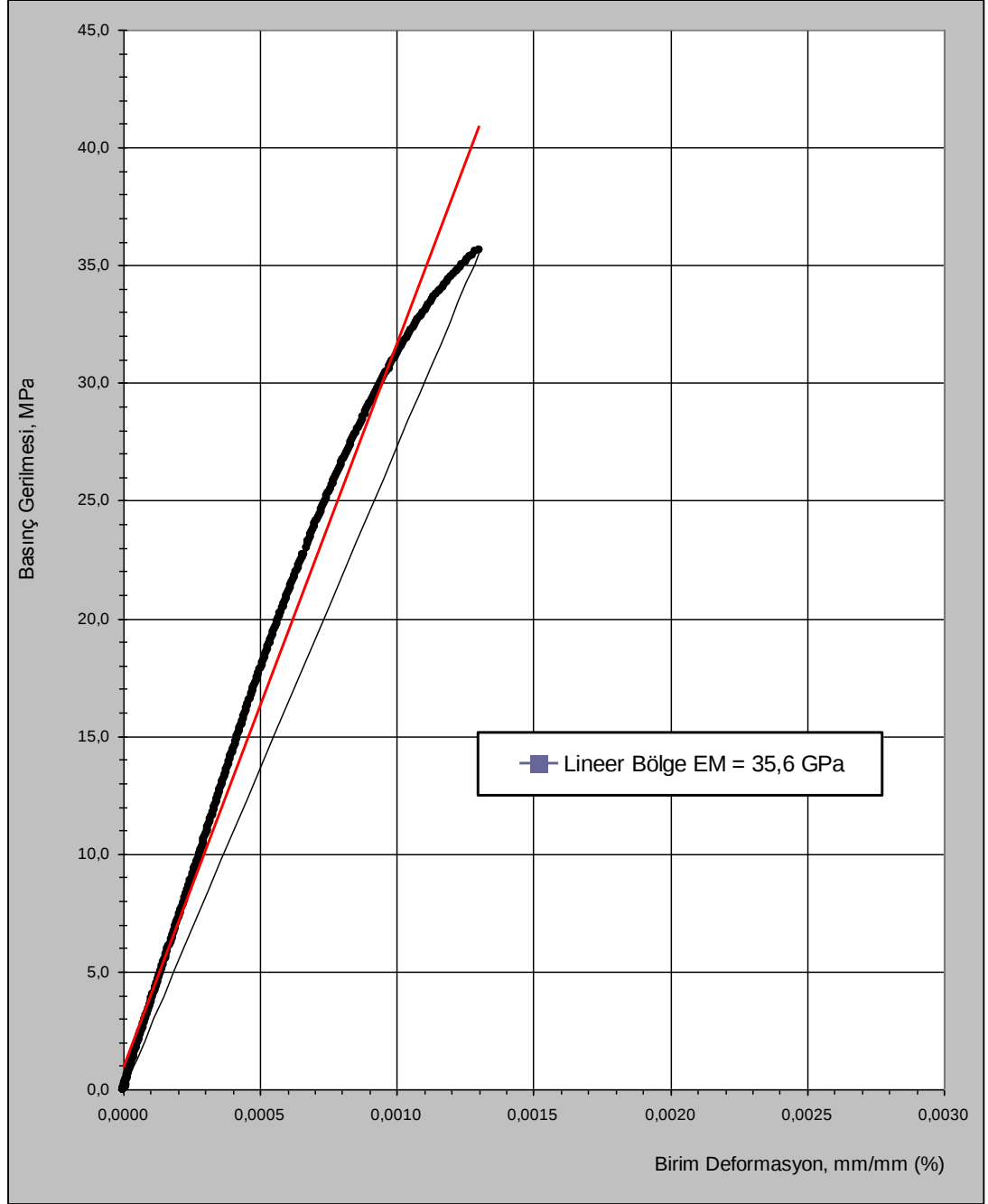
EK-4 SD katkılı beton 1. numune elastisite modülü



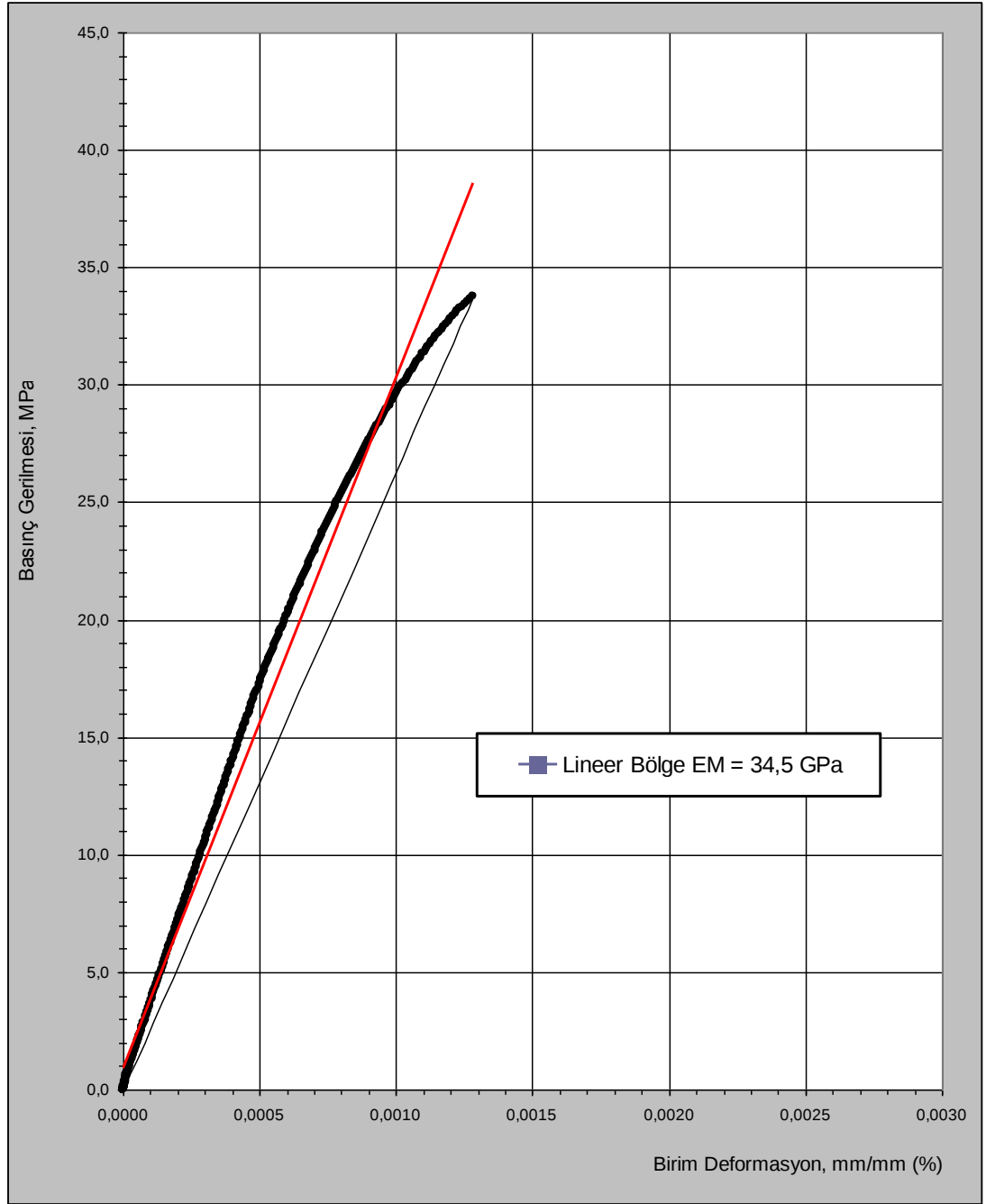
EK-5 SD katkılı beton 2. numune elastisite modülü



EK-6 ÇL katkılı beton 1. numune elastisite modülü



EK-7 ÇL katkılı beton 2. numune elastisite modülü



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KOÇ, Ali Alper
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1975 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 279 13 28
 e-mail : alialperkoc@yahoo.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üni./İnş. Müh. A.B.D	2010
Lisans	Dokuz Eylül Üni./ İnş. Müh.	1999
Lise	Maltepe A. Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2010	DSİ	Tatbikat Mühendisi
2004-2005	Eskişehir B. Bel.	Kontrol Mühendisi
2002-2004	E.G.M.	Kontrol Mühendisi
2001	UBM	Proje Muhendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol, teknoloji, voleybol, basketbol