

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONUN ELASTİSİTE MODÜLÜNE
ÇAKIL AGREGASININ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Müh. Çağdaş KORKMAZ**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MALZEME BÖLÜMÜ

HAZİRAN 2005

**BETONUN ELASTİSİTE MODÜLÜNE
ÇAKIL AGREGASININ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Müh. Çağdaş KORKMAZ
501011057**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.05.2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 03.06.2005**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Hasan YILDIRIM
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Fevziye AKÖZ
Prof. Mehmet UYAN**

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanması sırasında yardımlarını gördüğüm, bilgisinden ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM ve birlikte omuz omuza çalıştığım Ali ERSOY'a;

Çalışmalarımdaki ilgi ve yardımlarından dolayı Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalındaki tüm hocalarıma, araştırma görevlilerine ve labaratuvar çalışanlarına;

Tez yazım aşamasında yardımlarından dolayı Günnur BAYRAM, Ayşegül SAVCI ve Engin TANRIVERDİ' ye;

Deneyisel çalışmalarımda bana malzeme sağlayan Lafarge Aslan Çimento'ya ve Chryso Kimya'ya ve;

Tüm hayatım süresince, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2005

Çağdaş KORKMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Beton	1
1.2. Betonun Yapısı	2
1.3. Betonu Oluşturan Maddeler	3
1.3.1. Çimento	3
1.3.2. Agrega	4
1.3.3. Karma Suyu	4
1.3.4. Katkı Maddeleri	4
1.4. Betonun Sınıflandırılması	6
1.5. Betonun Basınç Dayanım	7
1.5.1. Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler	8
1.5.1.1 Betondaki Boşluklar	8
1.5.1.2 Çimento İle İlgili Faktörler	11
1.5.1.3 Karma Suyu Miktarı	11
1.5.1.4 Agrega Dayanımı, Yüzey Dokusu ve Biçimi	13
1.6. Beton Gerilme-Deformasyon Diyagramları	14
1.6.1. Gerilme-Deformasyon İlişkisi	14
1.6.2. Gerilme-Deformasyon Oranının Zamanla İlişkisi	16
1.7. Basınç Dayanım Formülleri	19
1.8. Betonun Elastisite Modülü	21
1.8.1. Gerilme-Deformasyon Eğrisi ile Elastisite Modülünün Hesaplanması	23
1.8.1.1. Dinamik Elastisite Modülü	23
1.8.1.2. Statik Elastisite Modülü	24
1.8.1.3. Betonun Elastisite Modülünün Tayini	25
1.8.2. Elastisite Modülünün Rezonans Frekansı Metodu ile Tayini	29
1.8.3. Elastisite Modülünün Ultrases Hızının Ölçülmesi ile Tayini	31
1.8.3.1. Ultrasesin Özellikleri	31
1.8.3.2. Cismin İçinde Ses Hızının Tayini	32

1.8.3.3. Ultrases Hızını Etkiyen Faktörler	34
1.8.4. Betona Zarar Vermeden Uygulanan Metotların Avantajları	35
1.8.5. Değişik Metotlarla Bulunan Elastisite Modüllerinin Karşılaştırılması	35
1.9. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	36
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	38
2.1.1. Agrega Özellikleri	38
2.1.1.1. Kum	38
2.1.1.2. Çakıl I	38
2.1.1.3. Çakıl II	38
2.1.1.4. Karışım III	39
2.1.2. Çimento Özellikleri	40
2.1.3. Karışım Suyu	41
2.1.4. Katkılar	41
2.1.5. Akışkanlaştırıcılar	41
2.2. Beton Karışımları	41
2.3. Beton Üretimi	42
2.4. Taze Beton Deneyleri	43
2.4.1. Birim Ağırlık	43
2.4.2. İşlenebilme Deneyleri	43
2.4.2.1. Çökme (Slump) Deneyi	43
2.4.2.2. Ve-Be Deneyi	44
2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri	45
2.5.1. Basınç Deneyi	45
2.5.2. Ultrases Deneyi	45
3. DENEY SONUÇLARI	46
3.1. Taze Beton Deney Sonuçları	46
3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	48
3.2.1. Basınç Deneyi Sonuçları	48
3.2.2. Elastisite Modülü Değerleri	48
3.2.3. Ultrases Hızı Sonuçları	49
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	51
4.1. Birim Ağırlıkla Basınç Dayanımları Arasındaki İlişkiler	51
4.2. Silindir Basınç Dayanımı ile Küp Basınç Dayanımının Karşılaştırılması	52
4.3. Basınç Dayanımları ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki	54

4.4. Elastisite Modülleri ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki	56
4.5. Ultrases Hızı ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	56
4.6. Ultrases Hızı ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki	58
4.7. Komposite ve Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki	58
4.8. Basınç Dayanımları ile Bolomey ve Feret Bağlılıları Korelasyonu	60
4.9. Ultrases Hızı ile Feret Çarpanı Arasındaki İlişki	63
4.10. Ultrases Hızı ile Bolomey Çarpanı Arasındaki İlişki	65
4.11. Basınç Dayanımları ile Elastisite Modülleri Arasındaki Bağlılı	66
5. SONUÇLAR	71
5.1. Taze Beton Deneyleri Sonuçları	71
5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	71
5.2.1. Küp – Silindir Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki	71
5.2.2. Küp - Silindir Basınç Dayanımı ile Su/Çimento Oranı Arasındaki İlişki	72
5.2.3. Elastisite Modülü ve Su/Çimento Oranı Arasındaki İlişki	73
5.2.4. Ultrases Hızı ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	73
5.2.5. Ultrases Hızı ve Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki	73
5.2.6. Komposite ve Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki	73
5.2.7. Basınç Dayanımları ile Bolomey ve Feret Bağlılıları Korelasyonu	74
5.2.8. Ultrases Hızı ile Bolomey ve Feret Çarpanları Arasındaki İlişki	75
5.2.9. Basınç Dayanımları ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki	75
5.3. Sonuç	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	80

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
	<u>No</u>
Tablo 1.1. Betonun çeşitli özellikleri.....	2
Tablo 1.2. Çimento hamuru, harç ve betonun yapısı.....	3
Tablo 1.3. Betonu oluşturan maddeler.....	3
Tablo 2.1. Kullanılan agregaların özgül ve birim ağırlıkları.....	39
Tablo 2.2. 16 mm için agrega ve karışım granülometrik analizleri.....	39
Tablo 2.3. Çimentonun fiziksel özellikleri.....	40
Tablo 2.4. Çimentonun basınç dayanımı sonuçları.....	40
Tablo 2.5. Çimentonun kimyasal bileşimi.....	40
Tablo 2.6. Akışkanlaştırıcı özellikleri.....	41
Tablo 2.7. Üretilen betonların kodlanması.....	42
Tablo 3.1. Taze beton deney sonuçları.....	46
Tablo 3.2. Üretilen betonların hava miktarları ve kompasiteleri.....	47
Tablo 3.3. Üretilen betonların karışımına giren gerçek malzeme miktarları	47
Tablo 3.4. Basınç deneyi sonuçları.....	48
Tablo 3.5. Elastisite modülleri.....	49
Tablo 3.6. Ultrases hızı sonuçları.....	50
Tablo 4.1. Bağıntı ile bulunan küp basınç dayanımlarının TS 11222 ile karşılaştırılması.....	54
Tablo 4.2. Küp – silindir basınç dayanımı ile feret – bolomey katsayıları korelasyonu.....	60
.....	
Tablo 5.1. TS 11222’ deki Beton Sınıflarına Karşı Gelen Küp Basınç Dayanımları.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Su/Çimento oranının betonun basınç dayanımına etkisi.....	9
Şekil 1.2 28 günlük beton silindir mukavemetinin c/w oranına bağlı olarak değişimi.....	13
Şekil 1.3 Yavaş ve hızlı yükleme altındaki deformasyon.....	15
Şekil 1.4 28 günlük beton numunesinin çeşitli yüklemeler altındaki deformasyon - zaman eğrisi.....	16
Şekil 1.5 Betonun gerilme – deformasyon parabolleri.....	18
Şekil 1.6 Doğrusal ve parabolik kısımdan oluşan gerilme – deformasyon eğrisi.....	19
Şekil 1.7 Gerilme – deformasyon grafiği.....	24
Şekil 1.8 Gerilme – deformasyon grafiği.....	24
Şekil 1.9 Gerilme – deformasyon eğrisinin gerilme hızıyla değişimi.....	25
Şekil 1.10 Gerilme – deformasyon eğrisi.....	26
Şekil 1.11 Gerilmenin değiştirilmesiyle oluşan gerilme deformasyon diyagramı.....	27
Şekil 1.12 Rezonans frekansı metodu deney düzeneği.....	29
Şekil 1.13 Ultrases hızı tayini deney düzeneği.....	32
Şekil 1.14 Ses hızının gerilme ile değişimi.....	34
Şekil 2.1 TS 706 Referans ve Karışım Granülometri Eğrisi (16 mm).....	39
Şekil 4.1 Birim ağırlıkla küp basınç dayanımı bağıntısı.....	51
Şekil 4.2 Birim ağırlıkla silindir basınç dayanımı bağıntısı.....	52
Şekil 4.3 Silindir ile küp basınç dayanımları bağıntısı.....	53
Şekil 4.4 Su/çimento oranı ile küp basınç dayanımı arasındaki bağıntı.....	55
Şekil 4.5 Su/çimento oranı ile silindir basınç dayanımı arasındaki bağıntı...	55
Şekil 4.6 Su/çimento oranı ile elastisite modülü bağıntısı.....	56
Şekil 4.7 Ultrases hızı ile küp basınç dayanımı bağıntısı.....	57
Şekil 4.8 Ultrases hızı ile silindir basınç dayanımı bağıntısı.....	57
Şekil 4.9 Ultrases hızının karesi ile elastisite modülü bağıntısı.....	58
Şekil 4.10 Komposite ile küp basınç dayanımı bağıntısı.....	59
Şekil 4.11 Komposite ile silindir basınç dayanımı bağıntısı.....	59
Şekil 4.12 Küp basınç dayanımı ile feret çarpanı arasındaki ilişki.....	61
Şekil 4.13 Silindir basınç dayanımı ile feret çarpanı arasındaki ilişki.....	61
Şekil 4.14 Küp basınç dayanımı ile bolomey çarpanı arasındaki ilişki.....	62
Şekil 4.15 Silindir basınç dayanımı ile bolomey çarpanı arasındaki ilişki.....	63
Şekil 4.16 Ultrases hızı küp ile feret çarpanı bağıntısı.....	64
Şekil 4.17 Ultrases hızı silindir ile feret çarpanı bağıntısı.....	64
Şekil 4.18 Ultrases hızı küp ile bolomey çarpanı bağıntısı.....	65
Şekil 4.19 Ultrases hızı silindir ile bolomey çarpanı bağıntısı.....	66
Şekil 4.20 Deneysel elastisite modülleri ile basınç dayanımları bağıntısı.....	67

Şekil 4.21	TS500 bağıntısı ve deneysel elastisite modüllü formülünün basınç dayanımlarına göre karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.22	ACI ve deneysel sonuçla elde edilen elastisite modülü ilişkisi....	68
Şekil 4.23	TS 500' de verilen elastisite modülü bağıntısı ile deneysel elastisite modülleri ile bulunan bağıntının TS 11222' de verilen Standart Beton Basınç Dayanımlarına göre karşılaştırılması.....	69
Şekil 4.24	ACI (I), ACI (II), TS 500, Burak Türkel Denklemi ve Deneysel Yoldan Elde Edilen Elastisite Modülü Denkleminin Karşılaştırılması.....	70

SEMBOL LİSTESİ

W	: Su Ağırlığı
C	: Çimento Ağırlığı
U	: Kum Miktarı
V	: Agrega Miktarı
h	: Hava Miktarı
ρ	: Özgül Ağırlık
α	: Birim Ağırlık
ε	: Şekil Değiştirme
σ	: Gerilme
R	: Maksimum Basınç Dayanımı
f_c	: Basınç Dayanımı
$f_{c_{\text{silindir}}}$	: Silindir Basınç Dayanımı
$f_{c_{\text{küp}}}$	: Küp Basınç Dayanımı
E	: Elastisite Modülü
K_f	: Feret Katsayısı
K_b	: Bolomey Katsayısı
f_{cc}	: Çimento Norm Dayanımı
K_G	: Graf Katsayısı
V	: Ultrases Hızı
f	: Frekans
t	: Zaman
g	: Yerçekimi İvmesi
L	: Uzunluk
d	: Çap
ν	: Poisson Oranı
R	: Korelasyon Katsayısı

BETONUN ELASTİSİTE MODÜLÜNE ÇAKIL AGREGASININ ETKİSİ

ÖZET

Bu araştırmada ana konu olarak “betonun elastisite modülüne çakıl agregasının etkisi” dir. Betonun elastisite modülü çok uzun yıllardır araştırma konusu olmuş ve bu araştırmada da, iri agrega olarak kırmataş yerine çakıl kullanılmıştır. Bu şekilde farklı agregalar kullanıldığında betonun elastisite modülü ve basınç dayanımı arasındaki farklar anlaşılacak istenmiştir.

Bu konu çerçevesinde farklı çimento dozajlarında, farklı su/çimento oranlarında ve de farklı karışımlarda 17 ayrı seri beton üretilmiştir. Her seri beş küp ve beş silindir olmak üzere toplamda 10 adet numuneden oluşmaktadır.

Üretilen betonlar üzerinde elastisite modülü, basınç dayanımı ve ultra ses hızı ile ilgili deneyler yapılmıştır. Bu deneysel veriler kullanılarak örneğin, elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki yada su/çimento oranı ile ultra ses hızı arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda da, betonun elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında korelasyonu yüksek bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntıların TS500 ve ACI standartlarındaki benzerleri ile kıyaslanması sonucu, deneysel yolla elde edilmiş bağıntıların elastisite modülü hesaplamalarında gerçeğe yakın sonuçlar ortaya koyduğu anlaşılmıştır.

EFFECT OF GRAVEL AGGREGATE ON ELASTICITY MODULUS OF CONCRETE

SUMMARY

In this research the main topic is “effect of gravel aggregate on elasticity modulus of concrete”. The modulus of elasticity of concrete has been studied for a long period of time and in this research, gravel was used for huge aggregate instead of crushed stone. This was done for understanding the difference between the compressive strength and modulus of elasticity by using different kinds of aggregate.

According to this topic 17 different series of concrete with different cement dosages, water/cement ratios, admixtures are prepared. Each concrete series consist of 10 specimens in total that involving with five cube and five cylinder specimens.

Some experiments that related with modulus of elasticity, compressive strength and ultra pulse velocity were applied over these concrete specimens. By using these experimental data, for example relations between modulus of elasticity and compressive strength; water/cement ratios and ultra pulse velocity were investigated.

As a result, high correlations between modulus of elasticity and compressive strength were found and after discussing this correlation with TS500 and ACI standards, the correlations which were found by experimental ways can give more realistic approaches in calculation of modulus of elasticity.

BÖLÜM 1 GİRİŞ

1.1. Beton

Dünyanın en eski yapı malzemesi olan beton, günümüzde teknolojinin vazgeçilmez parçası olmaya devam ediyor. Betonun tarihi uygarlık tarihi kadar eskidir. Betonun, en ilkel ve kaba şekliyle 5000 yıl kadar önce, Mısır Piramitleri'nin yapımı sırasında kullanıldığı bilinmektedir. Romalılar içinse beton, inşaat mühendisliğinde hayati bir öneme sahip olmuştur. Betonun ilkel halini kullanarak kollozyumlar, anıtlar ve millerce yol yapmışlardır. Betonun bu güne kadar yaygın olarak kullanılması onun klasik bir malzeme olarak algılanmasını sağlamıştır. Fakat, bu durum betonun yeniliklere kapalı bir malzeme olduğunu göstermez, aksine, yapılan çalışmaların da gösterdiği üzere beton geliştirilmeye en açık yapı malzemesidir (1).

Beton çimento, ince ve kaba agrega, su ve gerektiğinde çeşitli kimyasal ve/veya mineral katkıları içeren bir kompozit malzemedir (2). Başka bir deyişle beton yük taşıyan, diğer bir deyişle asıl taşıyıcı malzemedir (3). Çimento sanayii bugünkü düzeyine varmasaydı, beton da günümüzdeki önemli yerine gelemezdi.

Beton çağdaş toplumların temelini oluşturan malzemelerin en önemlilerinden biridir. Çevremize baktığımızda, binalar, yollar, köprüler, barajlar, santraller, istinat duvarları, su depoları, limanlar, havaalanları, kent mobilyaları v.b. betondan yapıldığını görürüz. Günümüzde, dünyada her yıl yaklaşık 5,5 milyar ton beton üretilmektedir. Bu miktar dünya nüfusuna bölündüğünde kişi başına 1000 kg beton üretildiği ortaya çıkar (2).

Betonun bu derece yaygın kullanılan bir yapı malzemesi olmasının en önemli nedenleri kolay şekil verilebilmesi, ekonomik olması, dayanıklı olması ve daha az enerji ile üretilmesidir. Taze haldeyken plastik kıvama sahip olması betona istenilen şeklin verilmesini sağlar. Diğer bir deyişle, taze beton sertleştiğinde içine konulduğu kabın şeklini almış olur. Beton üretiminde büyük ölçüde yerel malzemeler

kullanılır. Bu durum maliyetinin diğer yapı malzemelerine göre düşük olmasındaki en önemli noktalardan biridir. Uygun bir şekilde tasarlanmış, üretilmiş, yerleştirilmiş, sıkıştırılmış ve bakımı yapılmışsa uzun yıllar herhangi bir bakım, onarım gerektirmeden hizmetini sürdürür.

İyi bir betonda tüm ince agregâ tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba agregâ tanelerinin de harçla bütünüyle kaplanmış olması gerekir. Bu sistem içindeki bağlayıcı malzeme olan çimentonun suyla reaksiyonu (hidratasyon) sonucunda beton dayanım kazanır (2).

Günümüz betonlarında da benzer yol izlenir. Agregalar, bağlayıcı maddeler kullanılarak sürekli bir yapıya kavuşturulur. Beton üretim esnasında yüksek viskoziteye sahip olma özelliği onu doğal taşlardan ayıran en büyük özelliğidir. Oysa doğal taşlar belli bir form verilmeden kullanılamazlar ve sürekli taşıyıcı bir ortam meydana getirmezler.

TİPİK BİR BETONUN ÇEŞİTLİ ÖZELLİKLERİ	
Basınç dayanımı	30 N/mm ²
Eğilme dayanımı	5 N/mm ²
Çekme dayanımı	3 N/mm ²
Elastisite modülü	25000 N/mm ²
Poisson oranı	0,17
Isıl genleşme katsayısı	10 x 10-6 °C
Yoğunluk	2300 kg/m ³

Tablo 1.1. Betonun çeşitli özellikleri

1.2. Betonun Yapısı

Beton , agregâ adı verilen kum, çakıl, mıcır gibi taneli malzemeler ve onları bağlama görevini üstlenen çimento ve suyla karıştırılması ile oluşur (3). Bu oluşumda çimento su birleşimi olan hamur, kum ve iri agregâ tanelerini birbirine bağlar. Kum ise iri

agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun dayanımını artırır. Çakıl veya kırmataş taneleri betonun bir nevi iskeletidir ve betonun maruz kaldığı kuvvetlere karşı koyar.

MALZEME	BİLEŞİMİ
ÇİMENTO HAMURU	ÇİMENTO + SU
HARÇ	İNCE AGREGA + ÇİMENTO HAMURU
BETON	KABA AGREGA + İNCE AGREGA + ÇİMENTO HAMURU

Tablo 1.2 Çimento hamuru, harç ve betonun yapısı

Beton üretimine başlamadan, betonun hangi ölçütlere göre sınıflandırıldığı ve betonu meydana getiren malzemelerin özelliklerini belirlemeliyiz. Bu özelliklere ve istenilen mukavemete göre malzeme karışım oranları ve ağırlıkları hesaplanır.

1.3. Betonun Oluşturan Maddeler

Beton mutlak hacim olarak ortalama %75 oranında agrega, %10 oranında çimento ve %15 oranında sudan oluşur. Gerektiğinde çimento oranının %2' sinden fazla olmamak kaydı ile katkı maddesi ilave edilebilir (2).

Çimento	Su	Hava	İnce Agrega	Kaba agrega
% 7-15	% 14-18	% 0,5-8	% 24-28	% 30-50

Tablo 1.3 Betonun oluşturan maddeler

1.3.1. Çimento

Öğütülmüş kalker ve diğer hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılıp döner fırınlarda pişirildikten sonra elde edilen klinkerin, alçı taşı ve diğer katkılarla karıştırılıp öğütülmesiyle elde edilen toz halindeki bağlayıcıya çimento denir (2).

Çimentonun beton içerisindeki işlevi; agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak ve taneler arasındaki boşlukları doldurarak bağlayıcılık görevi yapmaktır.

1.3.2. Agrega

Beton içerisinde kullanılan ve betonun yaklaşık olarak %60-85' ini oluşturan kırmataş, kum-çakıl gibi malzemelere agrega denir. Agregalar doğal (kum-çakıl, kırmataş) ve yapay (yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş kil, perlit) olmak üzere iki farklı kökene sahiptir. Ancak her mineral kökenli malzeme veya endüstriyel atık, beton agregası olarak kullanılamaz.

Agregalar kaba ve ince agrega olarak iki kısımda incelenebilir. Şantiyelerde kaba agrega “mıcır-kırmataş” yada “çakıl”, ince agrega “kum” olarak isimlendirilir. Bu iki bileşeni tane büyüklüğü olarak birbirinden ayırmak için kullanılan kriter 4 mm boyutundadır. 4 mm’ den büyük boyuttaki tanelerden oluşan kısma kaba agrega, 4 mm’ den küçük boyuttaki kısma ise ince agrega denir (4). Agrega bir yerde betonun iskeletini oluşturduğundan özelliklerinin kullanılmasından önce deneylerle belirlenmesi gerekir.

1.3.3. Karışım Suyu

Betonda kullanılan suyun hidrasyon adı verilen kimyasal reaksiyonu başlatıp sürdürmek ve betonun işlenebilirliği sağlamak gibi iki önemli işlevi vardır.

Temiz, içilebilir, berrak ve kokusuz her su beton üretiminde kullanılabilir. Beton karma suyu asit niteliğinde olmamalıdır. Sülfat, değişik tuz v.b. betona zarar verebilecek kimyasal maddeleri içermemelidir.

1.3.4. Katkı Maddeleri

Betonun birtakım özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton içerisindeki çimento miktarı baz alarak belli oranlarda katılan organik veya inorganik kökenli kimyasallar katkı maddesi olarak adlandırılırlar. Katkı maddeleri çoğunlukla beton karışım suyuna katılır. Gereğinden fazla kullanıldığında aksi etkiler oluşturabileceği gibi yine gereğinden az kullanıldığı takdirde hiç bir faydası olmayabilir (2).

Akışkanlaştırıcılar genelde üç amaç için kullanılırlar :

- Katkısız betonla aynı işlenebilmede olmak şartıyla su/çimento oranını azaltarak daha yüksek mukavemet kazanmak

- Antifrizler ;

Bu tip katkılar beton içindeki suyun donma sıcaklığını düşürerek suyun donmasını ve betonun çatlamasını engeller. Ancak soğuk hava şartlarında betona sadece antifriz katkı ilave edilmesi kesin çözüm olmayıp döküm yerinde betonun korunması için özel önlemlerin alınması gereklidir.

- Diğer katkılar ;

Hafif beton, geçirimsiz beton, rötreyi önleyici, aderansı artırıcı, renklendirici vb...değişik katkı maddeleri vardır. Uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanik özelliklere sahip mineral malzemeler de bir yerde katkı maddesi sayılabilir.

Çimentonun yada betonun belirli bir özelliğini daha iyi bir duruma getirmek amacıyla kullanılan katkılar ile istenilen hedeflere ulaşırken diğer bazı özelliklerde iyiye doğru olmayan değişimler olabilir. Böyle bir durumu anlayabilmek için belirli koşullar altında katkı kullanarak ve kullanmayarak kıvam deneyi, rötre deneyi ve mukavemet deneylerin yapılmalı ve bu deney sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak katkı maddelerinin betonun diğer özellikleri üzerinde bir zararı olup olmadığı anlaşılır. Bu açıdan katkı maddelerinin kullanılmasında çok titiz davranılmalı, uygulamada yapılabilecek küçük bir hatanın bile olumsuz sonuçlar doğuracağı unutulmamalıdır (6).

1.4. Betonun Sınıflandırılması

Betonlar birim ağırlıklarına göre üç ana gruba ayrılırlar. Yaklaşık 2400 kg/m^3 ağırlığında olan betonlar normal beton olarak isimlendirilir ve taşıyıcı amaçla en çok kullanılan beton türüdür. Hafif betonlar, birim ağırlıkları 1800 kg/m^3 'den az olan betonlardır. Yalıtım amaçlı olarak yada veya dayanım/ağırlık oranının yüksek olduğu koşullarda kullanılır. Birim ağırlığı 3200 kg/m^3 'den yüksek olan betonlar ise ağır betonlar olarak adlandırılır. Bu tip betonlar bazı özel agregalar kullanılarak ağırlık artırılır, bu sayede radyasyon kalkanı olarak kullanılabilir (2).

Basınç dayanımlarına göre de beton üç ana gruba ayrılabilir :

- Düşük dayanımlı betonlar; basınç dayanımları 20 N/mm^2 'nin altında olan betonlar.

- Normal dayanımlı betonlar; basınç dayanımları $20-40 \text{ N/mm}^2$ nin arasında olan betonlar.
- Yüksek dayanımlı betonlar; basınç dayanımları 40 N/mm^2 nin üzerinde olan betonlar.

1.5. Betonun Basınç Dayanımı

Dayanım malzemenin kırılma alabileceği en yüksek gerilme olarak tanımlanır. Beton basınç yükleri altında daha iyi davranış gösterdiğinden, betonun dayanımından söz edildiğinde, diğer dayanımlar belirtilememişse, basınç dayanımı anlaşılır. Betonun dayanımı çimento hidratasyonunun bir fonksiyonu olduğundan ve bu işlem de zamana bağlı olduğundan, dayanım belirtilirken çoğunlukla betonun yaşıyla birlikte söylenir. Mühendisler hesaplarında daha çok betonun 28 günlük basınç dayanımını esas alırlar. Dayanım, standart ortam koşullarında (sıcaklık ve nem) tutulan, standart boyutlardaki numunelerin ve standart deney yöntemleri kullanılarak belirlenir. Daha önce belirtildiği gibi, bir çok yapıda normal dayanımlı (28 günlük basınç dayanımı $20-40 \text{ N/mm}^2$) betonlar kullanılır. Son yıllarda, beton teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, 120 N/mm^2 basınç dayanımına sahip olan betonları ticari olarak üretmek mümkün olmuştur (2).

Beton gevrek bir malzemedir, basit mukavemet değerleri arasında en yüksek olan basınç, en düşük olanı çekmedir (3). Bu iki direnç arasındaki oran $1/10$ mertebesinde. Pratik olarak betonun sadece basınca çalıştığı yani hiç çekme gerilmesi almadığı varsayılır.

Basınç dayanımı, betonun tüm pozitif özellikleri ile paralellik gösterir. Yüksek basınç dayanımlı bir beton doludur, serttir, su geçirmez, dış etkilere dayanıklıdır, aşınmaz. Bu durumda basınç dayanımı hesaplanarak beton hakkında iyi bir değerlendirme yapılabilir. Sonuç olarak basınç dayanımı yüksek bir beton üretmekle diğer mekanik özellikleri de yeteri derecede üstün bir beton üretilmiş olur.

1.5.1. Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler

Yüksek mukavemetli beton elde etmede kullanılacak malzemelerin ne gibi özelliklere sahip olması gerektiğini anlamak için betonun basınç dayanımına etki eden faktörleri iyi bir şekilde belirlememiz gerekmektedir. Beton üretiminde aynı agregayı, çimentoyu ve karışım oranını kullansak ta beton dayanımları farklı değerler alabilmektedir (7).

Betonun basınç dayanımını etki eden belli başlı faktörler;

- 1) Betondaki boşluklar,
- 2) Çimento ile ilgili faktörler,
- 3) Karma suyu miktarı,
- 4) Agregaların yüzey dokusu, biçimi ve dayanımıdır.

Bu etkenler dışında ortam koşulları, betonun yaşı, numune boyutları ve deney koşulları da betonun dayanımını çeşitli yönlerden değiştiren noktalardır.

1.5.1.1. Betondaki Boşluklar

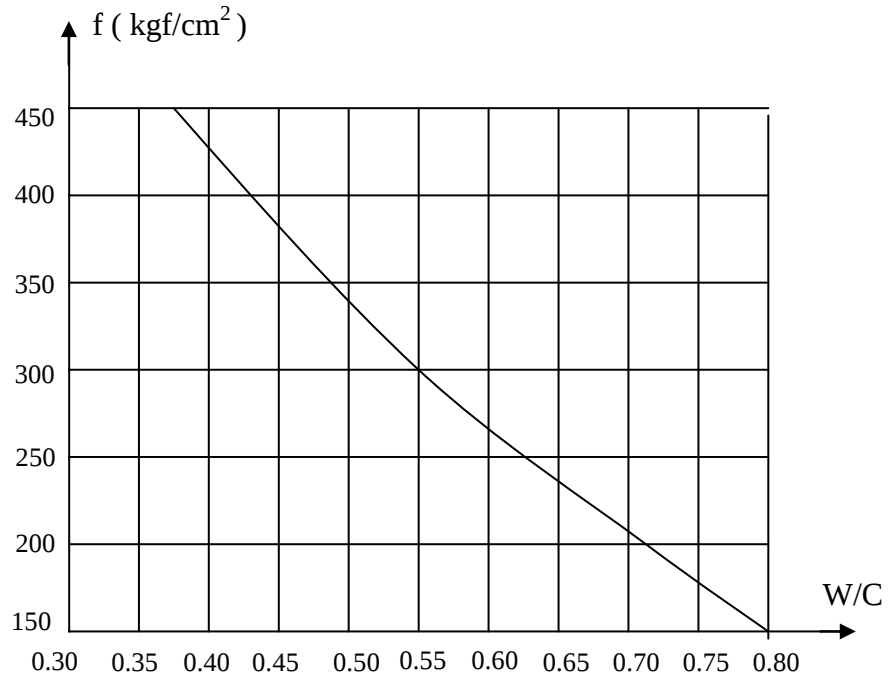
- Hava Boşlukları

Beton yeterince sıkıştırılmazsa yada sıkıştırma işlemi sırasında ayrışırsa içinde hava boşlukları oluşur. Bu durum basınç dayanımını olumsuz yönde etkiler. Kalıbına iyi bir şekilde yerleştirilmiş bir betonda bile hava boşlukları kalabilir. Çimento dozajının düşük olması, agregataneleri arasında kalan boşluğun iyi bir şekilde çimento hamuru ile dolmamasına neden olur. Çimento dozajının minimum dozajdan küçük olmaması için granülometrisi uygun bölgede kalan agregat karışımları için minimum çimento dozajı;

$C_{min} = 550/\sqrt[5]{D}$ formülü ile yaklaşık olarak hesaplanır. Burada “ C_{min} ”, kg/m^3 cinsinden minimum dozaj, “D” ise agregat karışımındaki en büyük tane boyutunun mm cinsinden değeridir. Bu formüle göre, agregat boyutu arttıkça, minimum dozaj azalmaktadır. Bunun sebebi, granülometrisi uygun bölgede kalan agregat karışımlarında, en büyük tane boyutu arttıkça, agregaların arasındaki boşluk hacmi azalır, bu boşlukları doldurmak için daha az çimento hamuru gerekir, yani minimum dozaj değeri azalmış olur.

- Kılcal Boşluklar

Su, taze betonda çimento tanelerinin arasında bulunur ve hidrasyonun başlaması ile çimento tanelerinin yüzeyinde jel oluşturur. Çimento taneleri şişerek başlangıçta su ile dolu olan boşlukları doldururlar. Eğer su/çimento oranı ağırlıkça yaklaşık 0,38 ise, çimento taneleri tamamen hidrate olduklarında boşluklar da tamamen dolar. Su/çimento oranı bu değerden az ise, hidrasyon bittiğinde boşluklar yine tamamen dolar fakat çimento tanelerinin iç kısımları bir araya gelecek su kalmadığından hidrate olmamış durumda kalır. Su/çimento oranı 0,38' den yüksekse, hidrasyon sonrası çimento taneleri tamamen hidrate olur, fakat başlangıçta su ile dolu olan boşluklar tamamen dolamaz ve sertleşmiş çimento hamurunda kılcal boşluklar kalır. Bu gibi boşluklar mekanik dayanımı olumsuz yönde etkiler.



Şekil 1.1 Su/Çimento oranının betonun basınç dayanımına etkisi

Bu grafikten, su/çimento oranının basınç dayanımını etkileyen en önemli etkenlerden biri olduğu anlaşılmaktadır.

- Komposite Kavramı

Taze betonun kompasitesi, kalıbına yerleştirilmiş betonda katı malzemelerin (çimento, kum ve iri agrega) mutlak hacminin, betonun mutlak hacmine oranıdır. İyi

bir betonda kompasitenin 0,80 veya bu değerin biraz daha üzerinde olması beklenir.

1 m³ betonda çimento, kum, iri agrega, su ve hava boşluğunun kapladığı mutlak hacimler sırası ile c, u, v, e ve h ise ;

$$c + u + v + e + h = 1 \text{ m}^3 \text{ yazabiliriz.}$$

Betonun kompasitesi K olarak ifade edersek;

$$K = \frac{c + u + v}{1 \text{ m}^3} = 1 - (e + h) \quad \text{değerini almaktadır.}$$

Bundan ayrı olarak sırası ile çimentonun, kumun ve agreganın özgül ağırlığı ρ_c , ρ_u , ρ_v ise betonun kompasitesi aşağıdaki formüle de hesaplanabilir;

$$K = \frac{C}{\rho_c \cdot 100} + \frac{U}{\rho_u \cdot 100} + \frac{V}{\rho_v \cdot 100} \quad (1.1)$$

Betonda oluşabilecek kılcal boşluklar ve hava boşluklarının yanında sadece katı bileşenlere (çimento ve agregalar) dayanarak kompasiteyi tanımlamak eskiden beri süre gelen bir uygulamadır. Bu yaklaşım her ne kadar boşluk oluşumlarını ve bunun dayanıma etkisini göz ardı etse de, yinede betonun ileriye dönük sahip olacağı özellikler konusunda bize fikir vermektedir. Kompasitenin küçük olması demek, betondaki boşlukların büyük olduğu anlamına gelir. Boşlukların, yani porozitenin, büyük olmasının dayanımı azalttığı ise yapı malzemesinin en önemli kurallarından biridir (7). Bir karışımın doluluğunun yüksek olması, o karışımı oluşturan tanelerin granülometrik dağılımına bağlıdır. Betonun yüksek bir doluluğa sahip olabilmesi için granülometrik yönden aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır:

- İri agrega olabildiğince fazla olmalıdır.
- Kum, iri agrega taneleri arasındaki toplam boşluğu dolduracak miktarda olmalıdır. Bu miktardan fazla veya eksik kullanılması doluluğu azaltır.
- İri agrega boyutları kum danelerinin boyutlarına göre ne kadar büyükse doluluk yüzdesi o denli büyük olur.

Agrega konsantrasyonu, beton dayanımı ve elastisite modülü ile doğru orantılıdır. Agrega konsantrasyonunun artmasıyla basınç dayanımı artmaktadır. Elastisite modülü, agreganın ve bağlayıcı olan çimento hamurunun elastisite modüllerinin ve bu bileşenlerin beton içindeki hacim oranlarının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla kırmataş veya çakıl gibi agregalarla üretilmiş betonlarda, agrega konsantrasyonunun artışı, betonların elastisite modüllerini arttırmaktadır (8).

1.5.1.2. Çimento İle İlgili Faktörler

Betonda kullanılacak çimentonun normal harç dayanımı ne kadar yüksekse, bu çimento ile üretilen betonun da dayanımının normal olarak yüksek olması beklenir. Çimento dozajının artırılması ile çimento hamurunun hacmini de arttırılmış olur. Bu şekilde betonda herhangi bir yük altında çimento hamurundaki gerilmelerin düşük değerlerde olması sağlanır. Kısacası çimento miktarındaki artışla dayanım da artar.

Bu nokta da çimento hamuru ile agrega oranını da göz önüne almamız gereklidir. Bir betonun agrega karışımını göz önüne aldığımızda, bu karışıma giderek daha fazla miktarda çimento hamuru katılarak çeşitli betonlar oluşturalım. Bu şekilde üretilen betonlarda önce agrega taneleri arasındaki boşluklar giderek daha fazla dolar ve dayanım yükselmiş olur. Boşluklar çimento hamuru ile dolduktan sonra katılan çimento hamuru, agrega tanelerinin birbirlerinden uzaklaşmasına neden olur. Bundan sonra çimento hamuru hacminin basınç dayanımı üzerindeki etkisi agrega türüne bağlı olarak değişir ve bu oldukça karmaşık bir durum yaratır. Bu nedenle, agrega taneleri arası yeterli bir şekilde çimento hamuru ile dolmuş ise, çimento dozajının basınç dayanımına etkisi dolaylı bir etki olarak kalır.

1.5.1.3. Karma Suyu Miktarı

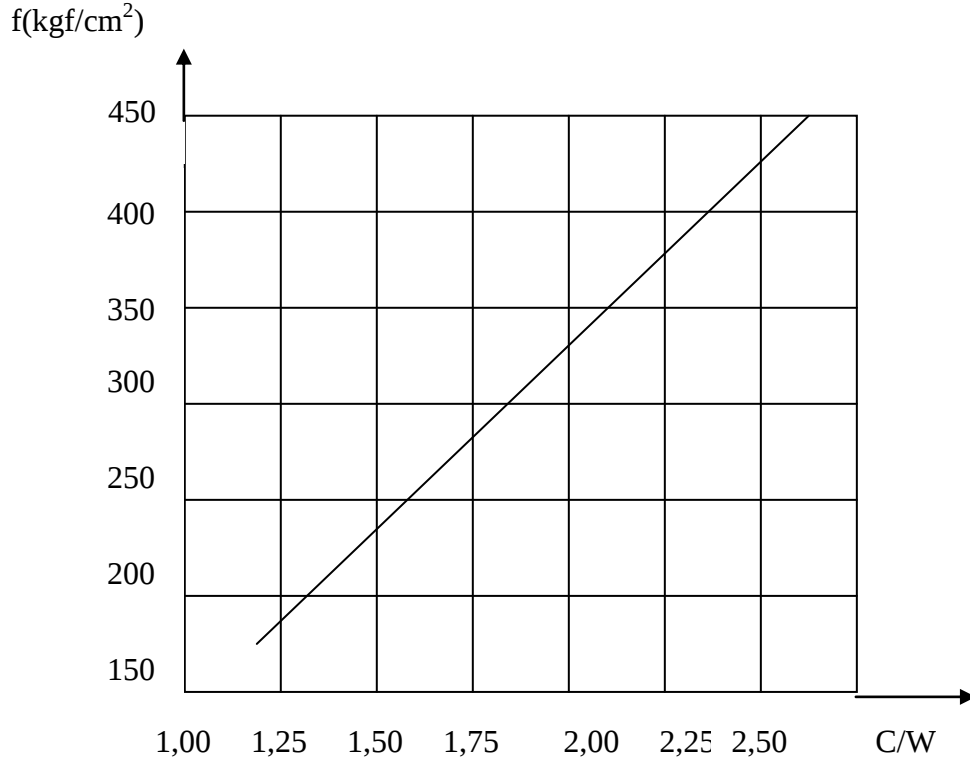
Karma suyunun temel görevleri bağlayıcı maddenin hidratasyonunu sağlamak, kum ve iri agregaların yüzeylerini ıslatarak ve betonun işlenebilir kıvamda olmasını sağlamaktır (7). Hidratasyon için gerekli su, çimento ağırlığının %14' ü kadardır. Hidrate çimento taneleri arasında kalacak absorbe edilmemiş jel suyunu da bu orana eklersek, gerekli olan toplam su miktarı %25 oranına ulaşır (3). Karma suyu karışımında agregalar tarafından tutulur ve bunun yanı sıra çimento ile birleşerek bağlayıcı madde çimento hamurunu oluşturur.

Su miktarını ayarlamak, beton üretimdeki en hassas ve zor uygulamalardan bir tanesidir. Her çimento ve agrega karışımı için optimum yani en uygun bir su miktarı vardır. Ancak optimum değerde su kullanılmasıyla maksimum dayanımlı beton üretilebilir. Bu noktada karışımda su miktarının uygun değerin üzerinde olması kadar bu değerin altında olması da büyük sorunlara neden olur. Su miktarı optimumdan az ise çimento hidratasyonu tam olarak sağlanamaz, agregaların yüzeyleri tam olarak ıslanmaz ve betonun işlenebilme özelliği düşer. Bu şekilde bir üretim olursa, boşluklu ve mukavemeti düşük bir beton ortaya çıkar. Suyun optimum değerden yüksek kullanılması halinde de betonda yerine iyi yerleştirilemediği için yine içinde boşluklar oluşmasına neden olur ve dayanımı bu durumda da düşük çıkar.

Çimento miktarının yüksek olması dayanımı artırır fakat dayanıma etkiyen tek faktör çimento dozajı değildir. Su/çimento oranı da önemli bir faktördür (3). Betonun basınç dayanımı ve dinamik elastisite modülü de büyük ölçüde su/çimento oranından etkilenir (7).

Su miktarı (w) ne kadar fazla ise dayanım o kadar düşük çıkar, w ne kadar az ise dayanım o kadar büyük çıkar. Burada su kadar çimento miktarı da önemlidir. Şöyle ki w/c oranındaki azalma dayanımı artırır. w/c oranındaki artışta aynı şekilde dayanımı düşürür. Sonuç olarak dayanım w/c ile ters orantılıdır.

TS 802 Beton karışım hesap esaslarında verilen değerlere göre 28 günlük beton silindir dayanımlarının c/w ve w/c oranlarına bağlı olarak değişimleri Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 28 Günlük beton silindir mukavemetinin c/w oranına bağlı olarak değişimi

1.5.1.4. Agregaların Dayanımı, Yüzey Dokusu ve Biçimi

Agrega maliyeti çimento maliyetine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle agreganın beton içinde kullanılması tek sebebi ekonomik oluşu değil, sağlamış olduğu bazı teknik avantajlardır. Betonda agreganın kullanılması sağladığı teknik özelliklerin başında, sertleşen betonun hacim değişikliğini önlemesi veya azaltması, sertleşmiş betonun aşınmaya karşı dayanımını artırması, çevre etkilerine karşı dayanıklılığını artırması ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonun taşımakta olduğu yüklere karşı dayanımı sağlayabilmesi gelir.

Agrega, gereken mukavemete sahip olmalı ve dış etkenlere dayanabilmelidir. Agreganın fiziki ve mekanik özellikleri istenilen şartları karşılayabilecek nitelikte olmalıdır. Örneğin, aşınmaya maruz kalabilecek bir betonda kullanılan agreganın aşınma mukavemetinin yüksek olması yada don olan iklimlerde kullanılacak beton agregasının don etkisi için konulmuş standartları sağlaması gerekmektedir.

Betonda kullanılan agreganın dayanıklılığı, gözenekliliği, su geçirgenliği, mineral yapısı, tane şekli, gradasyonu, tanelerin yüzey pürüzlülüğü, en büyük tane boyutu,

elastiklik modülü, termik genleşme katsayısı, agregada kil olup olmadığı ve agreganın temizliği gibi birçok özellik beton dayanıklılık türlerinin bir veya daha fazlasını etkilemektedir (2).

Agreganın biçimi ve yüzey pürüzlüğü taze betonun iç sürtünmesinde önemli bir rol oynar. İç sürtünme taneler arası, tanelerle çimentolar hamuru arasındaki sürtünmeye denir. Dış sürtünme ise beton ile kalıp ve donatı arasındaki sürtünmedir. Dış sürtünme, istenilen kıvam düzeyine ulaşmak için ve seçilecek maksimum tane çapı için bir kıstas oluşturur. İç sürtünme ise taze betona ait bir malzeme özelliğidir. İç sürtünmeye, agrega yüzey ve şekil özellikleri dışında agregadaki ince malzeme oranı ve çimentonun bazı özellikleri de etki eder. Betonun kohezyonunu arttıran etkenler iç sürtünmeyi de arttırmaları (2). Tıpkı ince agrega oranının artmasında olduğu gibi, çimentonun inceliğinin fazla olması ve çimentonun su tutma yeteneğinin artması da iç sürtünmeyi fazlaştıran olgulardır. Kumun biçimsizliği işlenebilirlik üzerinde olumsuz etki oluşturur. Yassı taneler içeren ve çok ince kumlar sakıncalıdır. İşlenebilirliği etkileyen kuma ait bu özellikler, sertleşmiş betonda da direncin düşmesine yol açar.

Agrega bileşeninin uygun bir tane boyu dağılımına yani granülometriye sahip olması da çok önemlidir. Çünkü granülometri ne kadar iyi ise, betonun yoğunluğunun artması yani hava boşluklarının daha az olması sağlanacaktır. Bu şekilde beton hacmi içinde çimento-su harcı daha ekonomik kullanılarak beton istenilen yere kolay ve kalitesi bozulmadan yerleştirilebilir.

Agrega granülometrisinin hangi değerler arasında olması gerektiği TS 706' da belirtilmiştir. Bu çalışmada çakıl agregası kullanılmıştır. Bu durumun getirdiği avantaj ve dezavantajlar ileride daha ayrıntılı açıklanmıştır.

1.6. Beton Gerilme-Deformasyon Diyagramları

1.6.1. Gerilme-Deformasyon İlişkisi

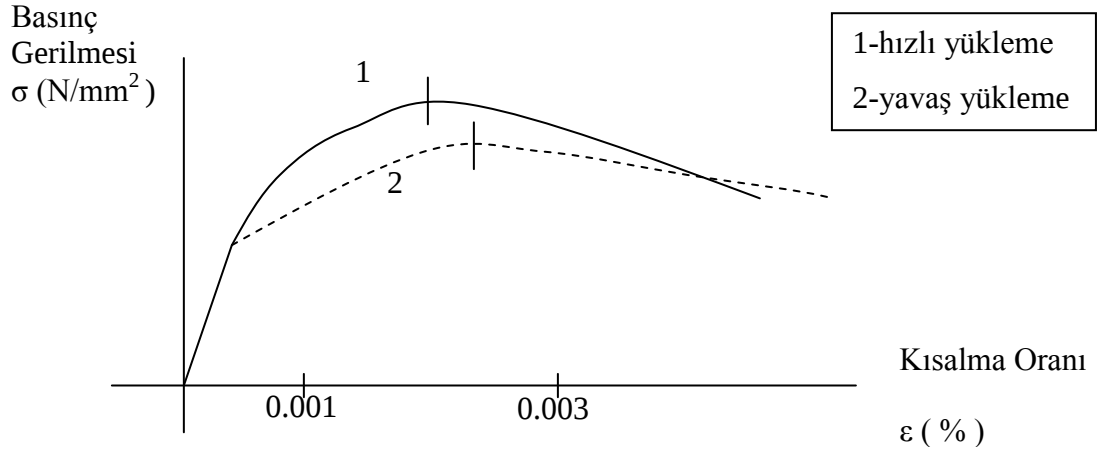
Malzemelerin mekanik davranışı incelenirken homojen ve sürekli ortamlar oldukları varsayılır ve parça boyutlarından soyutlamak için kuvvet yerine kuvvet şiddeti anlamına gelen gerilme, boyutlarda oluşan değişimler yerine deformasyon (şekil

değiştirme) oranı göz önüne alınır. Gerilme birim alana etkiyen kuvvet, deformasyon oranı da birim boydaki değişimdir (9).

Deneylerle elde edilen gerilme deformasyon oranı eğrileri malzemelerin mekanik davranışları ile ilgili çok yararlı bilgiler ortaya koyar. Gerilme–deformasyon grafiği betonun karakteristiğini belirleyen en kullanılabilir grafikdir. Bu grafiğin çizilmesi iki farklı yöntemle yapılabilir.

- Sabit bir hızla gerilmenin artırılması
- Deformasyon hızı sabit kalacak şekilde kuvvetin hızının artırılması

Beton numunelerinin hızlı ve yavaş yükleme karşısındaki deformasyonları Şekil 1.3’de verilmiştir.



Şekil 1.3 Yavaş ve hızlı yüklemeler altındaki deformasyon

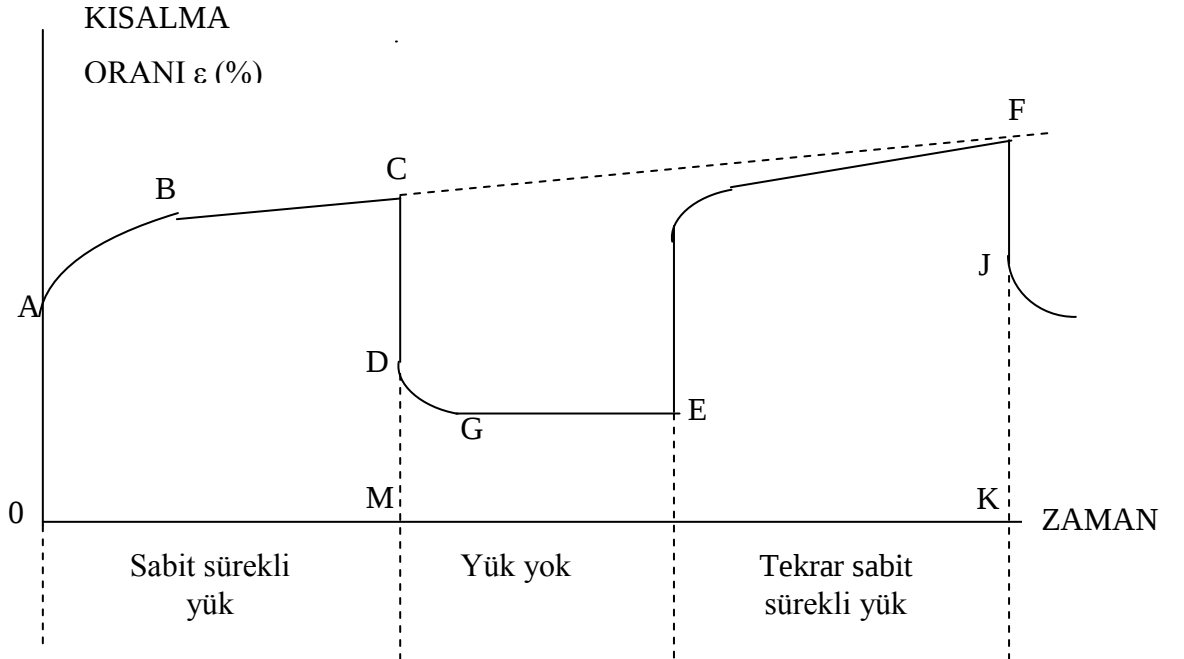
Hızlı bir deneyde yükleme hızı büyük önem taşır. Hız düşürüldüğünde mukavemet değerleri daha düşük, kırılma anındaki kısalma oranları daha büyük değerler alabilir. Mukavemet değeri aşıldıktan sonra da şekil değiştirmeler artmaya devam eder, ancak beton taşıma yeteneğini yitirir (3). Yükleme hızının artırılması durumunda ise betonun dayanımını belirgin ölçüde artırırken deformasyonu da belirgin ölçüde azaltır. Fakat dayanımdaki artışlarla deformasyondaki azalmalar sabit kalmaktadır (7).

Beton çimento hamuru ile birlikte hareket ederler. Özellikle sürekli yükler altındaki sünme çimento hamurunun önemli bir özelliğidir. Betonun içinde bulunan agrega çimento hamuruna göre daha rijit olduğundan beton çimento hamuru ile simetrik deformasyon gösterir.

1.6.2. Gerilme-Deformasyon Oranının Zamanla İlişkisi

Yükün uzun süre beton üzerinde kalması sonucu oluşan şekil değiştirmeye sünme denir. Yük hızlı olarak uygulanıp daha sonra sabit tutulacağı yerde, bir çok binada olduğu gibi yavaş ve devamlı bir şekilde arttırılırsa elastik deformasyon ve sünme birlikte gerçekleşir (10).

Uzun süre uygulanan yük kaldırıldığında ani elastik şekil değiştirme, yani yükün ilk uygulandığı anda oluşan şekil değiştirme derhal kaybolmakta, sünmenin bir bölümünün kaybolması ise uzun süre almaktadır. Boşaltılan yük tekrar yüklenirse aynı olaylar gerçekleşecektir.



Şekil 1.4 28 Günlük beton numunesinin çeşitli yüklemeler altındaki deformasyon–zaman eğrisi

Statik ve mukavemet hesaplarında malzemenin yük altında deformasyonlarının göz önünde tutulması gerekir. Gerilme–deformasyon eğrisinin lineer olmaması halinde gerilme–deformasyon eğrisinin denklemini elde etmek mümkündür.

(ϵ) sekil değiştirme ve (σ) gerilme olmak üzere ϵ_1 ve σ_1 birbirine ait bir çift değer olduğuna göre deformasyon (ϵ_1) den itibaren $\Delta\epsilon$ kadar artarsa gerilmede σ_1 den $\Delta\sigma$ kadar bir artış olacaktır. Yalnız ϵ_1 , ϵ_0 değerine ne kadar yakınsa aynı artışa isabet eden gerilme artışı $\Delta\sigma$ kadar küçük olacaktır. Bu özelliği en güzel şekilde aşağıdaki denklemle ifade edebiliriz :

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = K(\epsilon_0 - \epsilon) \quad (1.2)$$

denkleminin integrali ,

$$\sigma = K(\epsilon_0 \epsilon - 1/2 \epsilon^2) \quad (1.3)$$

ifadesini verir.

ϵ_0 maksimum kısalma oranı ve R malzemenin maksimum dayanımı olmak üzere, $\epsilon = \epsilon_0$ olduğu zaman $\sigma = R$ olduğuna göre betonun gerilme deformasyon eğrisi için

$$\sigma = R \epsilon / \epsilon_0 (2 - \epsilon / \epsilon_0) \quad (1.4)$$

parabolü gösteren şu fonksiyon bulunur.

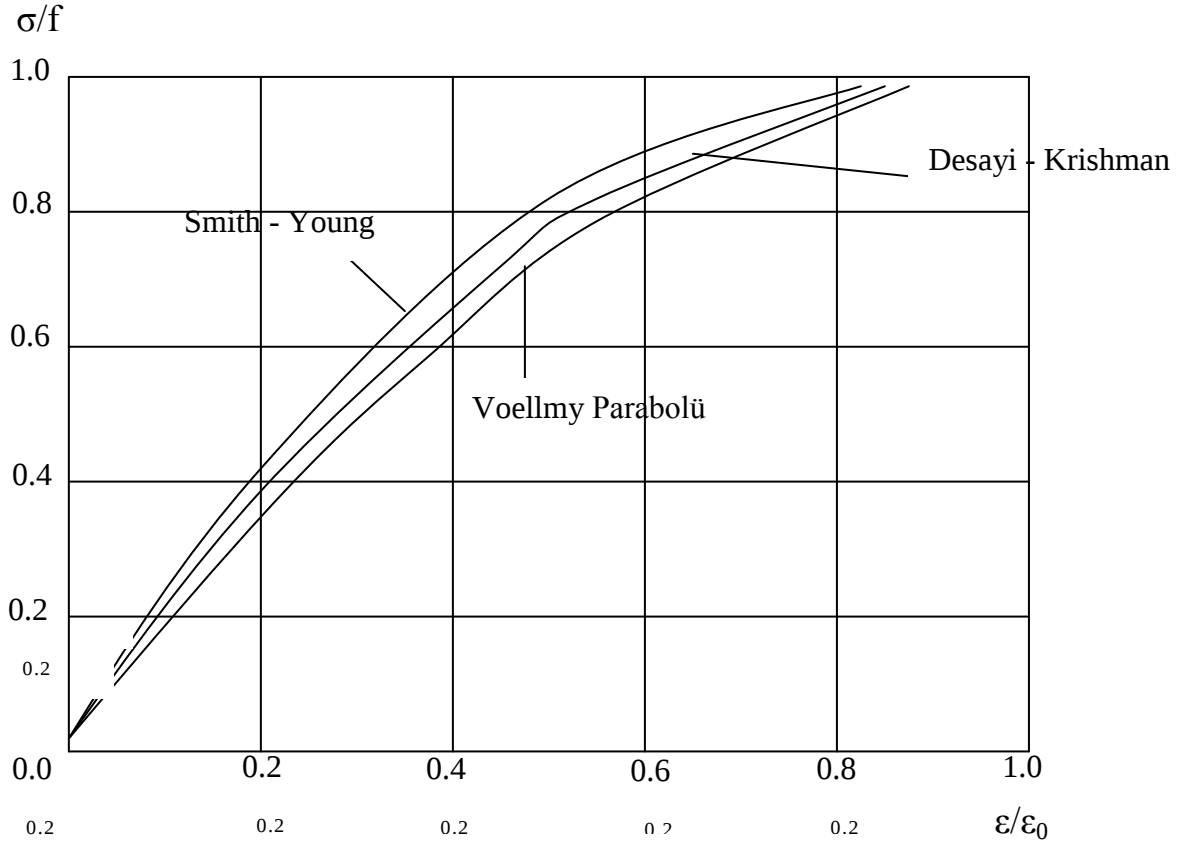
İsviçre’de Voellmy tarafından bulunan bu matematik denklemine göre çizilen eğri bir çok halde betonun deney sonuçlarına dayanılarak bulunan gerilme deformasyon eğrisi ile örtüşmektedir.

Betonun gerilme deformasyon eğrisi için başka matematiksel ilişkilerde bulunmuştur. Bunlardan en çok kullanılanları şunlardır (11).

$$\text{Smith-Young formülü} \quad \sigma = R \times (\epsilon / \epsilon_0) e^{(1 - \epsilon / \epsilon_0)} \quad (1.5)$$

$$\text{Desay ve Krishan formülü ;} \quad \sigma = \frac{2R \frac{\epsilon}{\epsilon_0}}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2} \quad (1.6)$$

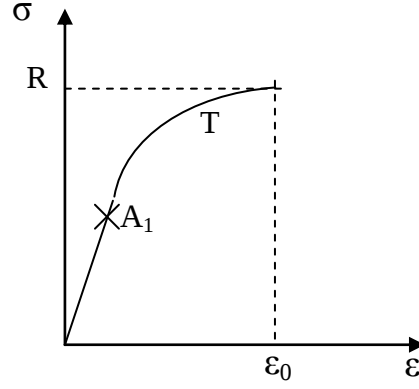
Şekil 1.5’de görüldüğü gibi gerilme deformasyon eğrisi ile ε eksenini arasında kalan alan veya bağıl alan denilen karakteristik en büyük değerin Smith – Young parabolünde en küçük değerini Voellmy parabolünde almaktadır. Desayi ve Krishnan parabolüne ait bağıl alan ise bu iki parabolün arasında kalmaktadır. Bu bağıl alanların taşıma gücü hesapları yapılırken bilinmesi gerekir. Betonarme yapı elemanlarında, betonun taşıyacağı yük bu bağıl alan ne kadar büyük ise o kadar büyük değerler almaktadır. Bu durumda Voellmy eğrisi alınacak olursa, bu eğriye ait bağıl alan en küçük olduğundan en emniyetli şekilde yapılmış olur. Bu üç formül arasında genç betonlarda, yaşı 56 günden küçük olan, gerilme deformasyon eğrisi Smith–Young fonksiyonuna uygunluk gösterirken, yaşı ilerlemiş betonlarda Voellmy parabolüne yaklaşır (7). Voellmy parabolünün kolay kullanılması bakımından diğerleri üstünde önemli bir üstünlüğü vardır (11).



Şekil 1.5 Betonun Gerilme – Deformasyon Parabolleri

Şekil 1.6’ daki eğrinin birinci kısmı doğrudan doğruya OA_1 doğrusundan ibarettir. A_1 noktasının koordinatları ε_A ve σ_A olduğuna göre bu doğrunun denklemi şudur :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \sigma < \sigma_A \quad \text{için} \quad E = \sigma_A / \varepsilon_A$$



Şekil 1.6 Doğrusal ve Parabolik Kısımdan Oluşan Gerilme – Deformasyon Eğrisi

İkinci kısımda yani eğrinin A_1T kısmının bir parabol eğrisi olarak alınması mümkündür. Bunun genel denklemi A, B ve C birer katsayı olmak üzere şu şekilde yazılır.

$$\sigma = A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C$$

Bu eğrinin A_1 ve T noktalarından geçmesi ve ayrıca devamlılık ilkesine göre A_1 noktasında OA_1 doğrusuna teğet olması gerekmektedir. Gerekli hesaplar yapılarak bu şartları yerine getirecek şekilde A , B , C katsayıları tayin edilecek olursa bunlar şu ifadeler elde edilir.

1.7. Basınç Dayanımı Formülleri

Beton basınç dayanımının bileşimine dayanılarak tahmin edilmesinde kullanılan formüllerdir. Birleşimi belli olan bir betonun, basınç dayanımının hesaplanması çok yararlıdır. Fakat bu alanda yapılan çalışmalar matematiksel kesinlik taşıyan bağıntıların elde edilemeyeceğini de kanıtlamış durumdadır. Deneyleri oluşturan bağıntılar dayanımın hesaplanmasında değil tahmin edilmesinde yardımcı olmaktadır. Özellikle beton deneme amacı ile bir kere üretilmiş ve dayanımı saptanmışsa, bu formüldeki katsayılar daha kesin bir şekilde belirlenmekte ve ikinci üretimde formüllerden yararlanarak gerekli düzeltmeler yapılmakta ve istenilen dayanım elde edilmektedir. Neredeyse tüm formüller W/C oranının dayanımı etkileyen birleşim parametresi olduğunu kabul etmektedir.

Bu formüllerde 1 m^3 yerleşmiş betona giren birleşenler çimento, kum, iri agrega, su

ve hava boşluğu sırasıyla aşağıdaki notasyonlarla gösterilecektir. Değerler ağırlık cinsinden (kg) ise büyük harflerle, mutlak hacim (dm³) ise küçük harflerle gösterilecektir.

f_c = Betonun Basınç Dayanımı (N/mm²)

$C = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki çimentonun ağırlığı (kg)

$U = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki kumun ağırlığı (kg)

$V = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki iri agreganın ağırlığı (kg)

$E = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki suyun ağırlığı (kg)

$c = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki çimentonun mutlak hacmi (dm³)

$u = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki kumun mutlak hacmi (dm³)

$v = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki iri agreganın mutlak hacmi (dm³)

$e = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki suyun hacmi (dm³)

$h = 1 \text{ m}^3$ sıkıştırılmış betondaki hava hacmi (dm³)

Feret Formülü (1896)

$$f_c = K_F \left(\frac{c}{c + e + h} \right)^2 \quad (1.7)$$

Paydadaki c+e+h ifadesi 1m³ sıkıştırılmış taze betonda agregalar arasındaki toplam hacmi gösteriyor. Paydaki c ise bu hacimde çimento tanelerinin kapladığı hacmi ifade ediyor. Buna göre c/(c+e+h) oranı taze betondaki çimento hamuru fazında çimento konsantrasyonudur. Feret Formülü, betonun basınç dayanımının bu konsantrasyonun karesi ile orantılı olduğunu ifade ediyor.

K_F ise bir katsayı olup, beton yaşına, çimento türüne, çimento miktarına göre 80 ile 300 N / mm² arasında değişir. 7 gün için 150 N / mm², 28 gün için 180 N / mm² ortalama değerlerini alır (3).

Abrams Formülü (1919)

$$f_c = A / B^{1.5E / C} \quad (1.8)$$

Abrams Formülü, basınç dayanımını E/C ile gösterilen su/çimento oranına bağlıyor. Dikkat edilirse hava boşluğu dikkate alınmamıştır. Bu açıdan basınç dayanımı hesabında Abrams Formülü gibi formüllerin kullanılabilmesi için, betonun iyi

yerleştirilmiş ve kompasitesinin 0,80 veya daha fazla olması gerekir.

A ve B birer katsayı olup, K_F nin etkilendiği faktörlerden etkilenir (12).

Graf Formülü

$$f_c = \frac{f_{cc}}{K_G} \left(\frac{C}{E} \right)^2 \quad (1.8)$$

Graf Formülü betonun basınç dayanımının C/E ile gösterilen çimento/su oranının karesi ile orantılı olduğunu kabul ediyor. Burada f_{cc} , f_c 'nin hesaplandığı yaşta çimento normal dayanımını gösteriyor. Örneğin PÇ –325 için 32.5 N / mm^2 dir.

K_G beton yaşından bağımsız olarak, agraanın türüne, betonun saklandığı ortam koşullarına ve çimento dozajına bağlıdır. Deneysel çalışmalar K_G 'nin 4 ile 10 arasında kalan değerler aldığını gösteriyor (13).

Graf Formülünün kullanılabilmesi için, betonun iyi yerleştirilmiş ve kompasitesinin 0,80 veya daha fazla olması gerekir.

Bolomey Formülü

$$f_c = K_B \left(\frac{C}{E + h} - k' \right) \quad (1.9)$$

Bolomey Formülünde, basınç dayanımının çimento/su oranının doğrusal fonksiyonu olduğu kabul edilmiştir. Bu formülde hava boşluğunun etkisi de göz önüne alınmıştır.

K_B ve k' birer katsayıdır. k' 0,3 ile 0,5 arasında değişir. k' 0,5 alınması yeterlidir. h hava boşluğu su ile doluymuş gibi varsayılır, örneğin betonda 25 dm^3 hava boşluğu saptanmışsa, formülde h yerine 25 konur. K_B de geride beton yaşına, çimento tür ve dozajına bağlı bir katsayıdır. 7 ile 35 N / mm^2 arasında değerler alabilir (3).

1.8. Betonun Elastisite Modülü

Beton gerçek anlamda elastik bir malzeme olmasa da, özellikleri arasında en çok kullanılan elastik sabit, elastisite modülüdür. Basitçe tek eksenli basınç yada çekme

altında malzemenin ani şekil değiştirme ölçüsü olarak tanımlanır (14). Bir malzemeye yük uygulanması sonucu şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Uygulanan yük kaldırıldığı zaman malzeme ilk şekline dönebilir yada yeni kazandığı şekliyle kalabilir. Yükün kısa sürede veya uzun sürede yüklenmesi sonucu olacak şekil değiştirmeler farklı nitelikte olacaktır. Bu şekil değiştirme şayet kalıcı olursa buna plastik şekil değiştirme, yük kalkınca tekrardan eski haline geri dönüyorsa elastik şekil değiştirme denir. Malzemelerin çoğu yük altında elastik sınır aşıldıktan sonra plastik sınıra geçer. Betonda elastik sınır yaklaşık olarak kırılma değerinin üçte biri şeklinde düşünülebilir. Elastik şekil değiştirmenin zamandan bağımsız olduğu yani gerilme uygulanır uygulanmaz ani olarak yer aldığı kabul edilir. Tek eksenli yüklemde bu bağıntı $\sigma = E \cdot \epsilon$ (Hooke Kanunu) şeklindedir ve elastisitenin temel kanununu teşkil eder. “E” elastisite modülünü temsil eder (7).

Betonda elastisite modülünün bilinmesi beton, betonarme ve ön gerilmeli beton yapılarının deformasyonlarının hesaplanmasına yarar. Elastisite modülünün bilinmesiyle, deformasyonları ölçerek gerilmeleri hesaplayabiliriz. Betonlarda elastisite modülü ve basınç mukavemeti arasında bazı ilişkiler vardır. Bu ilişkiler, betona zarar vermeden yaklaşık olarak mukavemetinin tayin edilmesini sağlar. Betonun bünyesinde çimento hamuru gibi viskoz bir karışımın bulunması bu malzemenin deformasyonunun asıl katı cisimlerin deformasyonlarından farklı olmasını sağlar (7).

Betonun bileşimi içindeki bağlayıcı maddelerin miktarı ve W/C oranı elastisite modülünü etkileyen başlıca nedenlerdendir. Su/çimento (W/C) oranı arttıkça elastisite modülü düşer (14). Bu durumda su/çimento (W/C) oranını azaltılarak elastisite modülünü artırmak en geçerli yoldur. Bununla birlikte bu etki basınç dayanımı kadar telaffuz edilmez (14).

Elastisite modülü, kullanılan agrega boyutu ve miktarına oldukça duyarlıdır. Örneğin kırmataş kullanılarak üretilmiş bir betonun elastisite modülü düşük iken, aynı betonda yuvarlak çakıl kullanıldığında elastisite modülünün yüksek çıktığını görmek mümkün olabilir (15). Agrega dane boyutunun belli oranda artırımı veya yoğunluğu derecelendirilmiş agrega kullanımı elastisite modülünü artırır. Bağlayıcı madde olarak çimentoya ilaveten uçucu kül ilavesi de elastisite modülünü artırır.

Elastisite modülü uzun araştırmalar sonucunda üç farklı yoldan tespit edilebilmiştir. Gerilme-deformasyon eğrisi yardımı ile, rezonans frekansı metodu ile ve ultrases metodu ile elastisite modülünü elde edebiliriz. Ancak yöntem farklarından ötürü modül farklı değerler alabilir (16).

1.8.1. Gerilme–Deformasyon Eğrisi ile Elastisite Modülünün Hesaplanması

Elastisite modülünü hesaplariken beton numunesine basınç uygulanarak ve betondaki deformasyonları gerilmelere göre kaydederek elde edilen gerilme-deformasyon eğrisini kullanmak en uygun yöntemdir. Ancak yeni betonlarda plastisite yanall deformasyonlara yol açtığından pek uygun değildir (17).

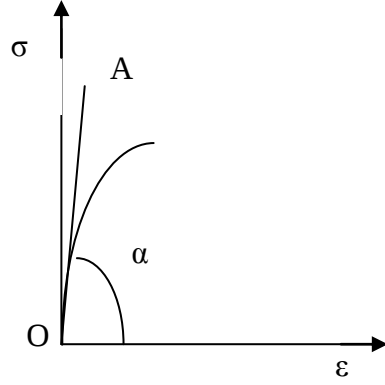
Betonlarda, gerilme–deformasyon eğrisinin lineer olmamasından, iki tür elastik modülün tanımı gerekmektedir. Bunlardan biri dinamik elastiklik modülü diğeri ise statik elastiklik modülüdür (11).

1.8.1.1. Dinamik Elastisite Modülü

Dinamik elastisite modülü başka bir deyişle başlangıç teğeti modülü betonun gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıçtaki teğetinin eğiminin alabileceği maksimum değerdir. Buna göre deney hızı belli bir değer üzerinde artırılacak olursa elde edilecek gerilme deformasyon eğrileri başlangıçta daima aynı bir OA doğrusuna teğet kalır. İşte bu OA doğrusunun eğimi $tg\alpha$ bize betonun dinamik elastisite modülünü verir (11).

Bu karakteristik betonun maruz kaldığı gerilmeye bağlı değildir. Gerilmelerin küçük olması, özellikle $R/3$ den küçük olduğu taktirde (R betonun basınç mukavemeti) başlangıçtaki teğetin gerilme – deformasyon eğrisi ile çakıştığını pratik olarak kabul ederiz. Σ , $R/3$ ten küçük olması şartı ile (18), formülüyle deformasyon hesaplanır.

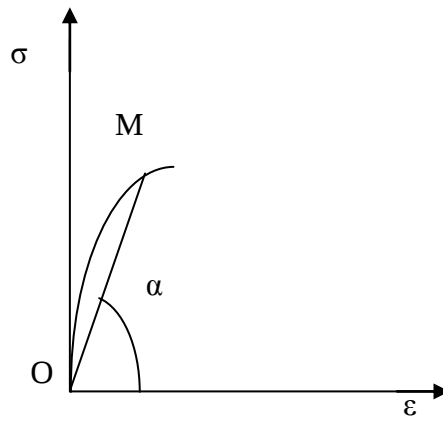
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_t} \quad (1.10)$$



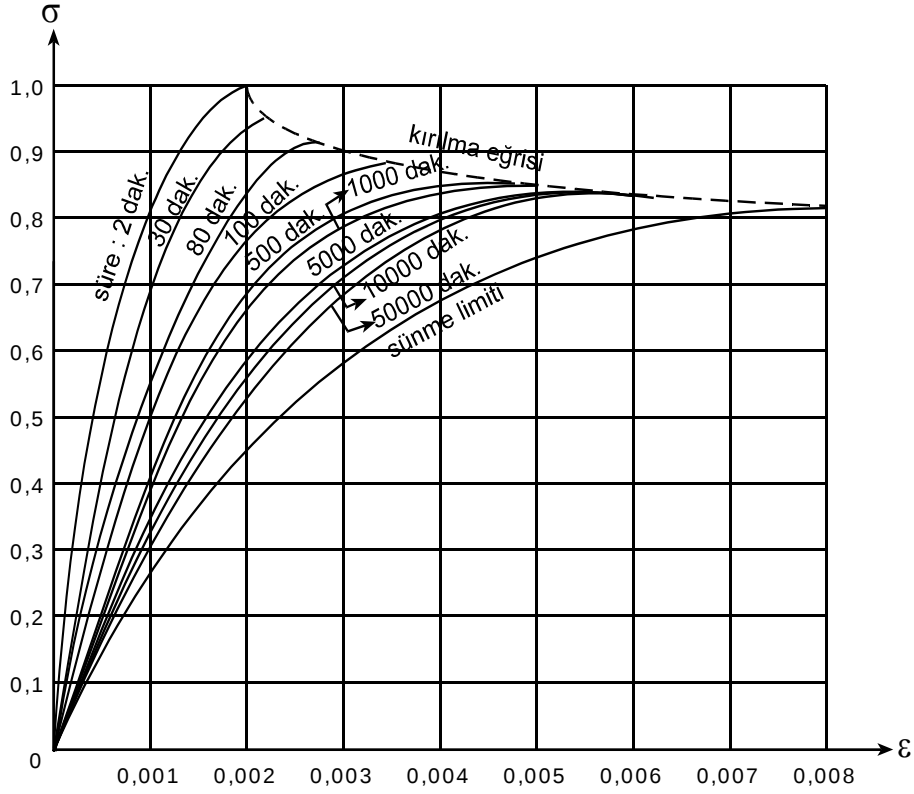
Şekil 1.7 Gerilme – Deformasyon Grafiği

1.8.1.2. Statik Elastisite Modülü

Bu modül gerilme – deformasyon eğrisinin herhangi bir M noktasının koordinat merkezini birleştiren OM doğrusunun eğimidir. $E_s = \tan \alpha$ ’ dır. Bu modülün bilinmesiyle deformasyondan derhal gerilmeye hesaplamak mümkün olur. Yalnız E_s gerilmenin değeriyle değişiklik göstermektedir.



Şekil 1.8 Gerilme – Deformasyon Grafiği



Şekil 1.9 Gerilme – Deformasyon Eğrisinin Gerilme Hızıyla Değişimi

Bu tabloda başlangıç teğeti modülünün yükleme hızıyla birlikte azaldığı görülmektedir. Oysa elastisite modülünün yükleme hızıyla birlikte arttığı gerçeği vardır. Yükleme hızı belirli bir seviyenin üstünde artırılacak olursa, elde edilecek gerilme deformasyon eğrileri başlangıçta aynı bir OA eğrisine teğet kalırlar. Bu E_t' nin bir maksimum değere sahip olması veya belirli bir değeri geçmemesi demektir. İşte bu E_t' nin bu maksimum değerine dinamik elastisite modülü denir (18).

1.8.1.3. Betonun Elastisite Modülü Tayini

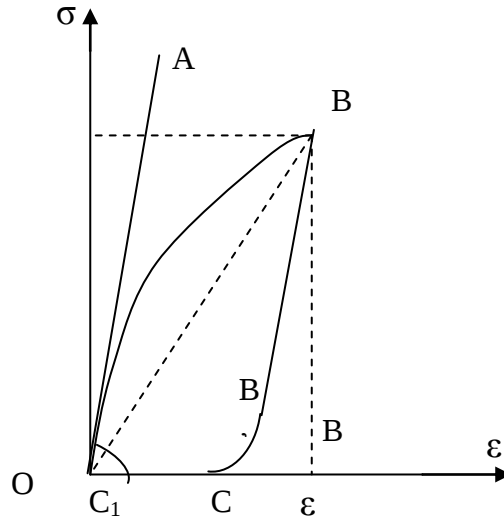
Elastisite modülü gerilme– deformasyon eğrisinin fonksiyonu saptanmışsa kolaylıkla tayin edilebilir. Bu saptanan fonksiyonun ϵ 'a göre türevinin $\epsilon=0$ için değeri E modülünü verir. Voellmy ve Smith – Young fonksiyonları için bu metot uygulanırsa;

$$E = \frac{eR}{\varepsilon_0} \quad (\text{Voellmy Fonksiyonu}) \quad (1.11)$$

$$E = \frac{eR}{\varepsilon_0} = \frac{2.72 R}{\varepsilon_0} \quad (\text{Smith - Young Fonksiyonu}) \quad (1.12)$$

Şekil 1.10’ da görüldüğü üzere BB’ doğrusu OA doğrusuna paraleldir. Bu halde BB’ doğrusunun eğimi bize doğrudan elastisite modülünü verir. Böylelikle bu modülü hesaplayabilmek için belirli bir σ_1 gerilmesi altındaki ε_1 deformasyonunu ve gerilmeyi σ_1 ’ değerine indirerek bu gerilme altındaki ε_1 ’ deformasyonunu ölçmek yeterlidir (18).

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (1.13)$$

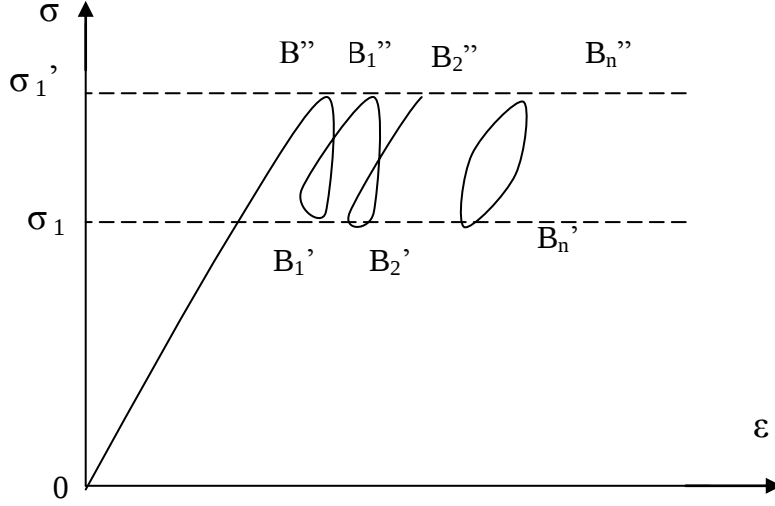


Şekil 1.10 Gerilme – Deformasyon Eğrisi

1.8.1.2’de belirtildiği gibi E_s gerilmenin değeri ile değişen bir büyüklüktür. E_s ’i belirsizlikten kurtarmak için RILEM şu deneysel çalışmayı önermiştir. Betona öncelikle $f/3$ dolayında bir gerilme uygulanır. Sonra kuvvet azaltılarak gerilme 5 kgf/cm^2 değerine indirilir. Her iki gerilme altında betonun yaptığı deformasyon ölçülür. Bu gerilmelerin uygulanması bir kaç kez tekrarlandıktan sonra, betonun deformasyonu, pratik bakımdan değişmeyen değerler alır. Bu durumdan sonra elastiklik modülü şu ifade ile hesaplanır ;

$$E_s = \frac{(f/3) - 5}{(\varepsilon_f / 3) - \varepsilon_5} \quad (1.14)$$

$\varepsilon_f/3$ ve ε_5 sırasıyla gerilme $f/3$ ve 5 kgf/cm^2 değerlerine eşit iken betonun yaptığı en son deformasyondur (5).



Şekil 1.11 Gerilmenin Değiştirilmesiyle Oluşan Gerilme–Deformasyon Diyagramı

Yapılan deneysel çalışmalarda betonun elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında bazı bağıntılar kurulmuştur (18). Fakat betonun heterojen yapısı dikkate alındığında elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişki komplekstir(19). Betonun elastisite modülü betonun basınç dayanımından etkilenir (20). Elastisite modülü basınç dayanımının artmasıyla artmakta fakat artış daha küçük olmaktadır. Yapılan araştırmalarda elastisite modülündeki artışın basınç dayanımındaki artışın karekökü ile orantılı olduğu ileri sürülmektedir (21). Bu sayede basınç dayanımının bilinmesi halinde matematiksel olarak elastisite modülü yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bu konuda en çok kullanılan bağıntılar ;

$$\text{Ros formülü; } E_d = \frac{600000 R_p}{200 + R_p}$$

Bu formülde R ve E kgf/cm^2 cinsinden ifade edilmektedir. R_p kare kesitli yüksekliği $2a$ olan (a kare kesitin kenarı) prizmatik beton numunelerinin basınç mukavemetidir.

L ‘Hermite Formülü; $E = K \sqrt{R_s}$

Burada da R_s kgf/cm² cinsinden yerine konulacak ve aynı boyut cinsinden E bulunacaktır. R_s çapı 15 cm olan 30 cm yüksekliğindeki silindirin mukavemetidir. K zamana bağlı olmayan 18000 ila 23000 aralığında değişen bir katsayıdır (18).

TS 500 de elastisite modülünü deneysel yoldan hesaplayan formül ;

$$E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{ckj}} + 14000 \quad (1.15)$$

f_{ckj} N / mm² cinsinden betonun j. günündeki karakteristik basınç dayanımıdır. E_{cj} ise gene N / mm² cinsinden j. gündeki elastisite modülü olmaktadır (20). Fransa’da Dreux, elastisite modülünün $\sqrt[3]{f}$ değişkenine bağlı olarak şu bağıntıyı önermiştir;

$$E_d = 46800 \sqrt[3]{f} \quad (1.16)$$

f , ortalama basınç dayanımı ve E_d kgf/cm² boyutunda dinamik elastisite modülüdür. TS 500’ de verilen bağıntıyla yukarıdaki bağıntı birbirine yakın değerler vermektedir (10).

Yine ACI komitesi elastisite modülüyle basınç dayanımı arasında aşağıdaki bağıntıyı vermiştir (22).

$$E_c = 4730 \sqrt{f} \quad (1.17)$$

Yine ACI komitesi tarafından statik elastisite modülü için başka bir bağıntı olan aşağıdaki bağıntı verilmiştir (23).

$$E_s = 3320 \sqrt{f_c} + 6900 \quad (1.18)$$

Yukarıdaki bağıntılarında f_c N / mm² cinsinden basınç dayanımını , E_s ise N / mm² cinsinden statik elastisite modülünü göstermektedir.

Ayrıca ACI betonun özgül ağırlığı ve basınç dayanımı değerleriyle elastisite modülünün bulunabilmesi için aşağıdaki şu bağıntı verilmiştir.

$$E_s = 43000 \rho^{1.5} \sqrt{f_c} * 10^{-6} \quad (1.19)$$

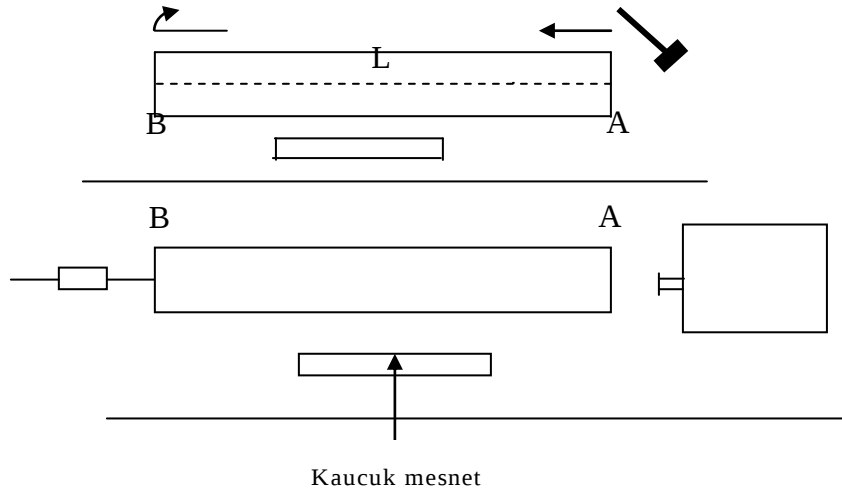
Yukarıdaki bağıntılarda, f_c N / mm² cinsinden basınç dayanımı, E_s ise N / mm² cinsinden statik elastisite modülünü, ρ kg/m³ cinsinden betonun birim ağırlığını göstermektedir (22).

Betonun basınç mukavemeti zamanla elastisite modülüyle birlikte artış göstermektedir. Yalnız basınç mukavemetinin artışı senelerce devam etmesine rağmen elastisite modülü doksan gün sonunda en son ve en büyük değerini alır. Buna göre yaşı doksan günü aşmayan betonlarda hangi günlük betonun mukavemeti konulursa o güne ait elastisite modülü elde edilir (18)

1.8.2. Elastisite Modülünün Rezonans Frekansı Metodu ile Tayini

Rezonans frekansı metodu ile elastisite modülünün bulunması esnasında beton numunesi çok küçük gerilmeler ile karşı karşıya kalır. Bu nedenle bu gerilmeler altında oluşan deformasyonun, gerilme deformasyon eğrisinin O noktasındaki teğeti olan OA doğrusu boyunca olduğu kabul edilebilir. Bu son derece küçük gerilmeler altında betonun bünyesinde bir değişiklik meydana gelmez.

Kare kesitli beton prizma kauçuk bir mesnet üzerine yerleştirilir. Prizmanın uzunluğu kesit boyutunun 5 mislinden daha büyüktür (Şekil 1.12). Böyle bir prizmanın A ucuna çekiçe vurulacak olursa meydana gelen gerilmenin oluşturduğu deformasyon dalgası halinde bir (V) hız ile numune boyunca ilerleyerek B ucuna varır.



Şekil 1.12 Rezonans Frekansı Metodu Deney Düzeneği

B ucundan yansıyarak geri donen deformasyon dalgası A' ya ulaşarak tekrar B ye gelerek iki nokta arasında hareketine devam eder. Dalga A' ya ulaştığı zaman A noktasına ikinci bir darbe yapılırsa, iki etkinin bir araya gelmesi sebebiyle, B' de ölçülen deformasyon miktarında bir artış olur. Bu şekilde belirli zamanlarda A ucuna darbelerin yapılması sonucunda B noktasındaki titreşim maksimum hale gelmiş olur.

Bu durumda prizma rezonans halindedir. B' deki tesir maksimum olduğu zaman A noktasına yaptığımız birbirini izleyen iki darbe arasında geçen zaman (t_1) ve prizmanın da uzunluğu (L) ise şu denklemi yazmak mümkün olur:

$$t_1 = \frac{2L}{V} \quad (1.20)$$

A noktasına yapılan titreşimin frekansı (f) ise (t_1) ile (f) arasında şu bağıntı vardır;

$$t_1 \times f = 1$$

Pratikte ölçüler Şekil 1.12'ye göre yapılır. Beton prizmasının A ucuna bir hoparlör hava payı bırakılarak yüksek frekansla çalıştırılması ile titreşim başlatılır. Bu titreşim aradaki hava tabakası vasıtasıyla betona gönderilir. Numunenin B ucuna tespit edilen bir alıcı ile numunenin titreşimi tayin edilir. Frekansın değiştirilerek B' deki titreşimin genliğinin maksimum olması sağlanır. Bu durumda frekans (f_1) ise deformasyon dalgasının malzeme içindeki hızı ;

$$V = 2Lf_1 \quad (1.21)$$

Burada geçiş hızı (V) ile (E) betonun elastisite modülü arasında

$$E = V^2 \frac{\Delta}{g} \quad (1.22)$$

bağıntısı vardır. Bu formülde Δ malzemenin birim ağırlığını , g yerçekimi ivmesini göstermektedir. V km/sn , Δ kg/lt cinsinden yerine konulunca E nin kgf/cm² cinsinden aşağıdaki formülden hesaplanır (24).

$$E = 10^5 V^2 \frac{\Delta}{g} \quad (1.23)$$

1.8.3. Elastisite Modülünün Ultrases Hızının Ölçülmesi ile Tayini

1.8.3.1. Ultrasesin Özellikleri

Bilindiği gibi titreşim frekansı 20 K Hz' den fazla olan ses dalgalarına ultrases denir. Malzeme testinde kullanılan ultrases, pizzo-elektrik metodu ile elde edilmektedir. Bu metodun esası kuartz kristal dilimini bir alternatif akım alanına yerleştirmektir. Bu durumda kuartz kristali, sahip olduğu bir özellik sayesinde sabit bir frekansta titreşir. Eğer elektriksel alanın frekansı kuartzın titreşim frekansına eşit olur ise rezonans hali meydana gelir (25). Bu durumda insan kulağının duyabileceği titreşimin frekansı 16-16000 Hz (Hertz saniyede titreşim adedi) arasında bulunmaktadır. 16000 üzerine çıkıldığında kulakla duyulmayan ve ultrases denilen ses dalgaları oluşur.

Bu dalgalar boşlukta yayılmazlar. Ancak katı, sıvı veya gaz halde bulunan bir cismin içinde belirli bir V hızıyla yayılırlar.

Ultrases dalgalarının kaynağının çapı (d) olan disk şeklinde bir elemandır. Bu kaynaktan çıkan (f) frekansına sahip ultrases dalgalarının meydana getireceği enerjinin %90' nı yarı açısı θ olan bir koniğin içinde bulunur.

$$\sin \theta = \frac{1.22 V}{d \cdot f} \quad (1.24)$$

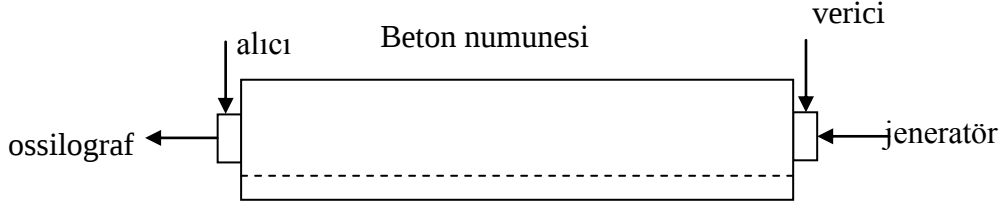
Açığa çıkan enerjinin dağılmaması ve toplanabilmesi için θ ' nın küçük olması gerekir. θ küçük olabilmesi içinde frekansın büyük olması gerekir.

Ultrases dalgaları ışık dalgalarının özelliklerine sahip bulunmaktadır. Bu dalgalar yansır, kırılır ve difraksiyon olayına maruz kalabilirler. Bu dalgalar üzerine, aynen ışık dalgalarına ait belli başlı kanunları uygulamak mümkündür.

Ultrases demetinde üç çeşit dalga bulunmaktadır. Boyuna dalga, sesin ilerleme doğrultusunda bulunurlar. Enine dalgalar, sesin yayılma doğrultusuna dik düzlemlerde bulunurlar. Üçüncü tip dalgalar cismin yüzeyini takip eden dalgalardır. Boyuna ses dalgalarının yayılma hızı, enine dalgaların yayılma hızından daha büyüktür (18).

1.8.3.2. Cismin İçinde Ses Hızının Tayini

Prizma şeklinde, L uzunluğundaki bir beton numunesinin bir ucuna ultrases üreten prob, diğer ucuna da bu sesleri toplayan prob altına gress sürülerek yerleştirilir.



Şekil 1.13 Ultrases Hızı Tayini Deney Düzeneği

Prob tarafından oluşturulan dalgalar bir oskilografa nakledilerek sesin A dan B' ye ulaşması için geçen zaman saniyenin milyonda biri yani mikro saniye cinsinden tayin edilir. Sesin A dan B ye bir t_1 suresinde ulaştığı bulunduğundan sonra yayılma hızı ;

$$V = \frac{L}{t_1} \quad (1.25)$$

V bulunduğundan sonra prizmatik çubuk halinde E ;

$$E = k \cdot 10^5 \cdot V^2 \cdot \frac{\Delta}{9.81} \quad (1.26)$$

V km/sn cinsinden ultrases hızı, Δ kg/dm³ cinsinden betonun birim ağırlığı olmak üzere kgf/cm² boyutundaki dinamik elastisite modülü bulunur. k katsayısı ses hızı prizma şeklinde olan beton numunesinde saptanması halinde 1'e eşittir. Numune prizmadan farklı küpe yaklaşıyorsa (18),

$$k = \frac{(1 + \nu) - (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (1.27)$$

Bu deney metodu uygulanırken verici ve alıcı prob lar numuneye temas ettirilirken aralarında boşluk bulunmamalıdır. Arada hava boşluğu bulunursa ultrasesin %100 u yansır ve bir sonuç alınamaz. Bu nedenle prob lar ve numune arasında boşluk olmaması için yüzeylerine gress yağı sürülür.

Numunenin boyuda ultrases ölçümünde önemlidir. Numunenin boyu L , içinde bulunan maksimum dane çaplı agrega D ile simgelenirse, $L_{\min}=3.5D$ olarak alınmalıdır. L uzunluğu $L_{\min}$ den küçük ise ses darbeleri numune içinde başlangıçtaki karakteristiklerini kaybetmeyecek ve bundan dolayı ses hızı hakiki değer in %10 - %22 oranında fazlalık gösterecektir. Deney sonucunda bulunan değerlerde büyük bir dağılma meydana gelecek , aynı betona ait V hızları birbirinden önemli derecede farklı olacaktır.

Sıcaklığın 5 – 30 °C arasında olduğu zaman V hızına bir etkisi olmaz yalnız 5°C altına düştüğünde hız normalden %1.5 oranında az , 30°C üzerine çıkarsa %5 oranında çıkan hız değerini artırmak gerekir.

Beton içindeki teçhizat ultrases hızını etkiler. Ultrases demir içinde çok daha hızlı ilerleyeceğinden bunun da göz önünde bulundurulması gerekir. Beton içindeki armatürler sesin yayılmasına dik bulunuyorsa ;

$$\frac{V_b}{V} = \frac{1 - \frac{L_a}{L}}{1 - \frac{L_a}{L} \cdot \frac{V}{V_a}} \quad (1.28)$$

V_b armatürsüz betonda, V_a armatürdeki , V de teçhizatlı betondaki ses hızlarını göstermektedir. L alıcı ve verici arasındaki mesafe , L_a ses dalgalarının rastladığı ve kat ettiği toplam kalınlığını göstermektedir. V_a 5.2 km/sn mertebesinde değer alır. Yukarıdaki denklemden yararlanarak V ' nin bilinmesiyle V_b bulunur. L_a/L değeri 1/12 den daha büyük bir değer alırsa V ' nin değerinde belirli bir artış meydana geldiğinden yalnız bu durumda Yukarıdaki formül kullanılarak V_b 'nin hesaplanması yoluna gidilmelidir.

Ses doğrultusunun yayılmasına paralel teçhizatların bulunması da deney sonuçlarının değişmesine yol açar. Eğer probun yerleştirildiği yer teçhizata yakın ise ses dalgaları numunenin bir ucunda diğer ucuna daha kısa zamanda ulaşır. Böyle bir durumun vuku bulmaması için probun en yakın teçhizattan $L/4$ daha büyük bir mesafeye yerleştirilmelidir. Bu şartlar altında teçhizatlar ses dalgalarını etkilemez. Eğer bu mesafe sağlanamıyorsa zaman;

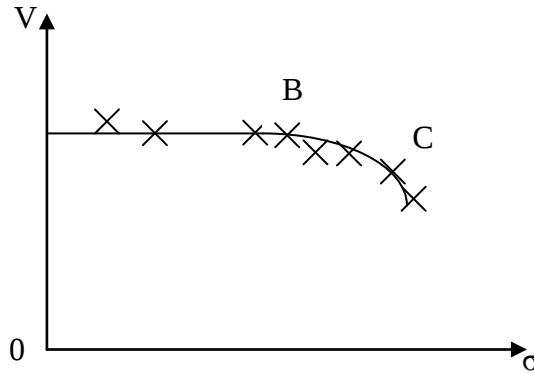
$$T = \frac{L}{V_a} + \frac{2a}{V_b} \sqrt{\frac{V_a^2 - V_b^2}{V_a \cdot V_b}} \quad (1.28)$$

T yerine konularak buradan V_b bulunur.

1.8.3.3. Ultrases Hızını Etkileyen Faktörler

Ultrases deneyi ile bulunan hız malzemenin cinsine ve bünyesine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle ses dalgalarının karşısına bir boşluk çıktığında dalga oradan geçemez ve etrafından dolaşır. Buda dolayısıyla geçiş süresini artırır ve geçiş hızını düşürür. Bu sayede beton ve doğal taş gibi boşluklu malzemelerdeki ses hızı bize bu malzemelerin boşlukları hakkında fikir sahibi olmamızı sağlar. Bu hızın çok düşük olması o malzemenin çok boşluklu olduğunu gösterir.

Cismin yapısında bir değişiklik olmadıkça, cisme bir gerilmenin etkilemesi veya etkilememesi halinde bulunan ses hızları birbirinden fark etmez. Gerilmenin etkisiyle çatlakların gelişmesiyle meydana gelen yapı değişikliği ses hızının düşmesine sebep olur.



Şekil 1.14 Ses Hızının Gerilme İle Değişimi

Şekil 1.14’de ses hızının gerilmeye bağlı olarak ne şekilde değiştiği gösterilmektedir. Grafikteki gibi belli bir gerilmeye kadar ultrases hızında bir değişiklik olmamaktadır. Buda gerilmenin malzemede bir deformasyon yapmadığını gösterir. Ancak limit değer (B noktası) asıldıktan sonra ultrases hızında bir azalma meydana gelmektedir. Buda artık malzemede boşluklar oluştuğunu yani deformasyona uğradığını gösterir (18).

1.8.4. Betona Zarar Vermeden Uygulanan Metotların Avantajları

Kuvvet dışında beton özelliklerini, betona zarar vermeden, ölçmeye yarayacak bazı özel teknikler geliştirilmiştir ve son zamanlarda bulunan bu teknikler kuvvet, dayanıklılık veya başka özelliklerle ilişkilendirilmiştir. Bu özelliklerden bazıları sertlik, penetrasyon veya gülleye karşı dayanıklılık, sıçrama sayısı, rezonans frekansı ve ultrasonik titreşimlerin beton boyunca üreme kabiliyetleridir.

Betonun elektriksel özellikleri, emme, yanma, x ile gama ışınlarını geçirme özellikleri ile nükleer aktivasyona tepkimesi ve betonun akustik emisyon özellikleri bize dayanımı, nem içeriğini, yoğunluğu, kalınlığı ve çimento içeriğini tahmin etme fırsatı sağlar. Başarılı bir zararsızlık testi her cins betona uygulanabilir, taşınabilir ve minimum maliyetli olmalıdır. Lenchinsky'nin zararsızlık testi için önerdiği avantajlar;

1. Test sırasında eleman gereksinimi azalır
2. Elemanların on hazırlık gereksinimi azaltır.
3. Daha az miktarda yapı zedelenir
4. Az zedelenme güçlendirme veya onarım gereksinimini azaltır.
5. Merkezin delinmediği iç duvarlarda zararı azaltacağı için daha faydalıdır.
6. Daha ucuzdur.

Zararsız kelimesi elementlerin yapısal davranışlarını etkilemeyen yada zarar vermeyen tüm testler için kullanılır (17).

1.8.5. Değişik Metotlarla Bulunan Elastisite Modüllerinin Karşılaştırılması

Rezonans frekansı veya ultrases deneyi ile bulunan elastisite modülleri dinamik elastikiyet modülüdür. Bu iki metotta da betonun çok kısa süren bir zaman aralığı içinde uygulanan son derece küçük gerilmeler altındaki deformasyonları göz önüne alınır.

- Gerilme – deformasyon eğrisinden faydalananarak tayin edilen (E_d)
- Rezonans frekans metodu ile (E_r)
- Ultrases hızını ölçerek tayin edilen (E_v) ile gösterilen dinamik elastisite modülleri arasında yapılmalıdır.

Yapılan araştırmalar sonucunda (E_d) ve (E_r) değerlerinin aynı beton için birbirinden pratik bakımdan fark etmemektedir. Leslie ve Cheesman tarafından yapılan deneylerde (E_v) , (E_r) den %8 oranında daha büyük değerlere sahiptir. Bazı hallerde aradaki fark %15,4 değerine kadar artmaktadır. Voellmy' e göre bu farkın nedeni, ultrases deneyinde betonun maruz kaldığı gerilmeler, rezonans frekansı metodu esnasından maruz kaldığı gerilmelerden bile çok daha küçük olmasıdır. Bu çok küçük gerilmeler altında beton boşluklarında sıkışmış halde duran su betonun deformasyonuna karşı koymakta ve böylelikle elastikiyet modülünün artmasına sebep olmaktadır.

İçinde önemli boşluğu bulunan beton, taş ve benzeri cisimlerin E modülleri birbirinden farklıdır. Metaller gibi boşluksuz cisimlerde, bünyelerinde ayrıca bir bozukluk veya bir kusur bulunmuyorsa her üç metoda göre tayin edilen E modülleri pratik bakımdan birbirine eşittir (18).

1.9. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada düşük, orta ve yüksek dayanımlarda, kırılmamış tanelerden meydana gelen iri agrega olarak tanımlanmış, maksimum dane büyüklüğü 16 mm' lik çakıl (26) kullanılmış 17 çeşit beton üretilmiştir. İyi beton elde edebilmek için uygun agrega kullanılması gerektiği bilinen bir gerçektir. Agreganın şekli, yüzey yapısı ve elastisite modülü gibi özelliklerinin betonun mekanik davranışına etkili olduğunu ve dayanım arttıkça bu özelliklerin daha önem kazandığını söyleyebiliriz. Agreganın kimyasal bileşimi, mineralojik ve petrografik yapısı, özgül ağırlığı, dayanımı, fiziksel ve kimyasal kararlılığı, boşluk yapısı, rengi gibi özellikleri elde edildiği kayacın özelliklerine bağlıdır. Ancak genellikle agreganın tane şekli ve boyutu, yüzey yapısı ve su emme gibi özellikleri göz önüne alınır. (27)

Betonun dayanımı, imento harcı, kullanılan agrega ve bunların arasında olan bağ ile yakından ilgilidir (28). Bu açıdan agrega tanelerinin şekil ve biçimlerinin betonun muhtelif özellikleri üzerinde etkileri mevcuttur. Yalnız bu etkiler daha çok iri agregalar için geçerlidir. İri agregalar genel olarak çakıl ve kırmataş olarak iki çeşittir. Düzgün yüzeyli agregaların köşeli ve pürüzlü yüzeye sahip olanlardan daha dayanıklı olduğu kabul edilir (29). En uygun biçimli agrega taneleri küre ve küp

şekline mümkün olduğunca yaklaşanlardır. Çakıl agregaları yuvarlak olması dolayısı ile daha az boşluk bırakarak belirli bir hacmi doldurabilir. Buna karşın kırmataşlarda tanelerin sahip oldukları kesin köşeler aralarında önemli boşlukların kalmasına neden olur. Bu durum tane boyutları aynı olan çakıl ve kırmataş numunelerinden çakıl daha büyük bir kompasiteye sahip olur. Agregada kompasitesinin düşük olması o malzeme ile üretilen betonun da mukavetinin düşük olmasına genel olarak yol açar. Fakat kırmataş halinde tanelerin yüzeylerinin pürüzlü olması, tanelerle çimento hamuru arasında kuvvetli bir aderansın oluşmasına sebep olur. Bundan dolayı kırmataş ile üretilen betonların mukavetinde bir azalma değil birçok hallerde bir artış gözlenir (7).

Bu bilgiler ışığında çakıl agregası kullanılarak üretilen betonlar üzerinde elastisite modülü ve mekanik özellikler ile ilgili deneyler yapılmış, elastisite modülünün betonun çeşitli özellikleri ile olan ilişkileri incelenmiştir. Çeşitli standartlarda verilen elastisite modülü formülleri elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak bu formüllerin ne denli gerçeğe yakın değerler verebildiği ortaya konulmuştur.

BÖLÜM 2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, beton üretiminde kullanılan malzemeler, malzemelerin özellikleri, beton karışımları ile üretimi ve deneysel çalışmalarda yapılacak taze ve sertleşmiş beton deneyleri açıklanmıştır.

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.1.1. Agrega Özellikleri

Bu deneysel çalışmada aşağıda özellikleri açıklanan kum, çakıl I ve çakıl II olmak üzere 3 çeşit agrega kullanılmıştır. Kullanılan çakıllar Silivri yöresine aittir.

2.1.1.1. Kum

Granülometri sonuçları Tablo 2.2` de verilmiş, maksimum dane çapı 4 mm olan kum kullanılmıştır. Tablo 2.1` de TS 3526`ya (30) göre özgül ağırlık ve TS 3529`a (31) göre birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar verilmiştir.

2.1.1.2. Çakıl I

Çakıl I` in granülometri sonuçları Tablo 2.2` de verilmiştir. TS 3526`ya (30) göre özgül ağırlık ve TS 3529`a (31) göre birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 2.1` de işlenmiştir.

2.1.1.3. Çakıl II

Çakıl II` nin granülometri sonuçları Tablo 2.2` de verilmiştir. TS 3526`ya (30) göre özgül ağırlık ve TS 3529`a (31) göre birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 2.1` de işlenmiştir.

Tablo 2.1 Kullanılan agregaların özgül ve birim ağırlıkları

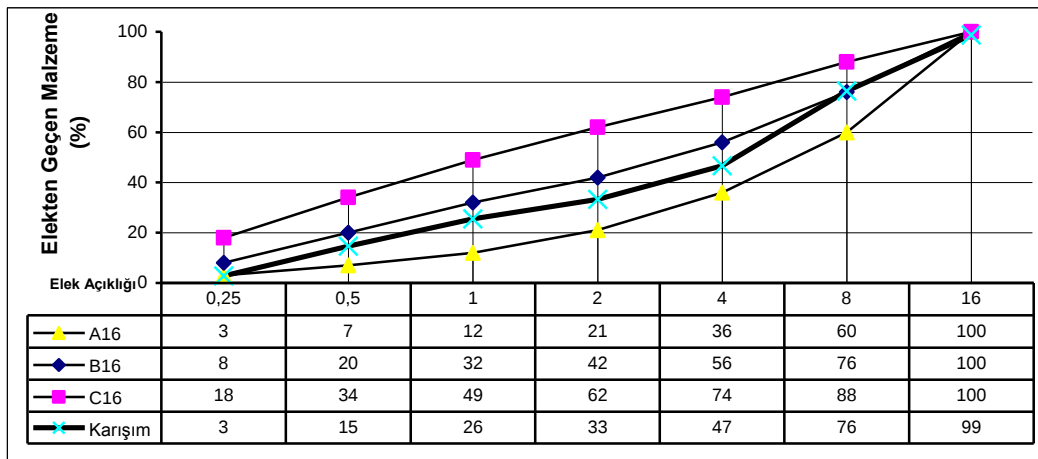
AGREGA CİNSİ	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m ³)
KUM	2600	1650
Ç I	2630	1620
Ç II	2564	1500

2.1.1.4. Karışım

Beton karışımlarında %46 kum, % 22 çakıl I, % 32' de çakıl II kullanılmıştır. Karışımın incelik modülü 4,01' dir.

Tablo 2.2 16 mm için agrega ve karışım granülometrik analizleri

	0.25	0.50	1	2	4	8	16	(%)
KUM	6	32	55	71	93	100	100	46
Ç I	0	0	1	3	16	96	100	22
Ç II	0	0	0	0	1	29	96	32
KARIŞIM	3	15	26	33	47	76	99	
A16	3	7	12	21	36	60	100	
B16	8	20	32	42	56	76	100	
C16	18	34	49	62	74	88	100	

**Şekil 2.1** TS 706 Referans ve Karışım Granülometri Eğrisi (16 mm)

2.1.2. Çimento Özellikleri

Beton numunelerde Lafarge Aslan Çimento A.Ş. tarafından üretilen PC 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel özellikleri Tablo 2.3’de, mekanik özellikleri Tablo 2.4’ de, kimyasal özellikleri ise Tablo 2.5’ de gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Çimentonun fiziksel özellikleri

Çimento Cinsi	PÇ 42.5
Özgül ağırlık gr/cm ³	3.12
Priz Süresi başlangıcı (dak)	200
Priz süresi sonu (dak)	255
La Chatelier (mm)	0.5
Kıvam Suyu (%)	27.5
Blaine (cm ² /gr)	2930
Dansite (gr/L)	1089
32 m elek üzeri (%)	22.8
90 m elek üzeri (%)	1.4

Tablo 2.4 Çimentonun basınç dayanımı sonuçları

Gün	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
1	13.8
2	25.4
7	40.1
28	54.0

Tablo 2.5 Çimentonun kimyasal bileşimi

Çözünmeyen Kalıntı (%)	21.31
Al ₂ O ₃ (%)	0.27
Fe ₂ O ₃ (%)	5.59
CaO (%)	2.94
MgO (%)	63.71
SO ₃ (%)	2.11
K ₂ O (%)	2.93
Na ₂ O (%)	0.80
Kızdırma Kaybı (%)	0.70
S.CaO (%)	0.80
Modül Hesaplamaları	
C ₃ S	44.00
C ₃ A	9.84
MS	2.50
MA	1.90

2.1.3. Karışım Suyu

Beton numunelerin üretiminde ve kür'ünde pH değeri 7 (nötr) olan şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Katkılar

Beton üretiminde “CHRYSO” firmasının ürettiği 3 çeşit katkı kullanılmıştır. Normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcılar olan bu katkılar karma suyuna katılarak kullanılmıştır ve her birinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.1.5. Akışkanlaştırıcılar

Normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcıların özellikleri Tablo 2.6’da görülmektedir.

Tablo 2.6 Akışkanlaştırıcı özellikleri

Adı	Chrysoplast 207 S	Chrysofluid AG	Chrysofluid Optima 200
Yoğunluk (gr/m ³)	1.187	1.200	1.050
pH	5.50	6.85	7.00
K.Madde (%)	38.90	40.10	20.50
Renk	Koyu kahverengi	Koyu kahverengi	Beyaz
Esası	Sodyum lignosülfanat	Naftalen	(PCP) Polikarboksilat Poliox Esası

2.2. Beton Karışımları

İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarlarında, toplam 17 seri beton üretimi yapılmış, her seride farklı su/çimento oranı ve farklı katkılar kullanılarak değişik mukavemetlerde beton üretilmeye çalışılmıştır. Yapılan üretimler Tablo 2.7’de verilmiştir. Yapılan tüm beton serilerinde agreganın türü ve granülometrisi ile karışımın granülometri eğrisi sabit alınarak B16 eğrisine yakın olmasına dikkat edilmiştir.

Kodlamalar yapılırken birinci rakam 1m³ beton içindeki çimento miktarını, ikinci rakam suyun çimentoya oranını ve sonraki rakam ve harf kullanılan katkının çimento miktarına olan oranını ve cinsini göstermektedir.

Tablo 2.7 Üretilen betonun kodlanması

BETON KODU	Çimento miktarı (kg/m ³)	w/c oranı	Katki	
			Türü	Oranı (%)
C150/1,70-0,6N	150	1,70	Normal	0,6
C150/1,50-0,6N	150	1,50	Normal	0,6
C150/1,30-0,6N	150	1,30	Normal	0,6
C200/1,30-0,6N	200	1,30	Normal	0,6
C200/1,10-0,6N	200	1,10	Normal	0,6
C200/0,90-0,6N	200	0,90	Normal	0,6
C250/0,90-2,0S	250	0,90	Süper	2,0
C250/0,80-2,0S	250	0,80	Süper	2,0
C250/0,70-2,0S	250	0,70	Süper	2,0
C250/0,60-2,0S	250	0,60	Süper	2,0
C300/0,56-2,0S	300	0,56	Süper	2,0
C300/0,46-2,0H	300	0,46	Hiper	2,0
C300/0,36-3,0H	300	0,36	Hiper	3,0
C350/0,38-2,5H	350	0,38	Hiper	2,5
C350/0,35-2,5H	350	0,35	Hiper	2,5
C400/0,33-2,5H	400	0,33	Hiper	2,5
C400/0,30-3,0H	400	0,30	Hiper	3,0

2.3. Beton Üretimi

Beton üretiminde 50 dm³ kapasiteli, düşey eksenli cebri karıştırıcılı betonyer kullanılmıştır. Üretiminde sırasıyla;

- Malzemenin daha iyi karışması için kum, çakıl agregası ve çimento betonyere konulup kuru olarak karıştırılmıştır.
- Karma suyunun yarısına yakınının kuru karışıma eklenmiş ve karıştırılmaya devam edilmiştir.
- Kalan karma suyuna akışkanlaştırıcı eklenip, karışımın içine eklenmiştir.
- Birim ağırlık deneyi yapılmıştır.
- Slamp ve Ve-Be deneyleri yapılmıştır.
- Hazırlanan beton vibre edilerek uygun kalıplara yerleştirilmiştir.

Her karışımdan boyutları 150x150x150 mm olan olan beş adet küpe ve çapı 150 mm yüksekliği 300 mm olan beş adet silindire yerleştirilerek her üretimden toplam on adet numune üretilmiştir. Beton numuneleri bir gün sonra kalıptan çıkarılmış 20±2 °C deki kür havuzunda 27 gün süreyle bekletilmiş 28. günde çıkartılarak başlık yapılmış başlığında mukavemetini alması için 10 gün süreyle bekletilmiştir.

2.4. Taze Beton Deneyleri

2.4.1. Birim Ağırlık

Hazırlanan betonlarda kullanılan gerçek malzeme miktarlarını hesaplanabilmesi için 8 lt' lik birim ağırlık kabı ile betonda birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık kabına hazırlanan beton yerleştirilmiş, daha sonra vibre edilerek betonun kaba iyi bir şekilde yerleşmesi sağlanarak tartılmış ve tartım sonucunda çıkan ağırlıktan kabın darası düşülerek, kabın hacmine bölünmüş, birim ağırlıklar bulunmuştur.

2.4.2. İşlenebilme Deneyleri

2.4.2.1. Çökme (Slump) Deneyi

Taze betonun işlenebilme özelliğinin ölçülmesi amacıyla TS 2871'e göre (32) Abrams Çökme konisi ile çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyinde yüksekliği 30 cm, üst çapı 10 cm, alt çapı ise 20 cm olan bir kesik koni içine eşit yükseklikte 3 tabaka halinde beton doldurulmuştur. Her tabaka doldurulduktan sonra 25 defa çelik çubuk ile şişlenerek malzemenin yerleşmesi sağlanmıştır. Koni tamamen doldurulduktan sonra üstü mala ile düzlenmiş ve kesik koni kalıp yukarı çekilerek doldurulan beton sarsılmadan koniden ayrılmıştır. Çökme miktarı kesik koninin üst kenarı ile yayılan betonun üstünde oluşan en yüksek orta ve en düşük yükseklikler alınarak çökme miktarı bulunmuştur.

Çökme miktarının fazla olması betonun kendi ağırlığı altındaki hareket etme kabiliyetinin büyük olduğunu gösterir. Bu bakımdan çökme miktarı ne kadar fazla ise işlenebilme özelliğinin derecesi de o kadar yüksektir.

Bu deney metodu ile işlenebilme özelliği tam olarak ölçülemez. Su miktarındaki değişiklik çökmenin farklı değerler almasına sebep olur. Su miktarının çok az olduğu ancak kuvvetli vibrasyonla yerleşebilen betonlarda çökme sıfır çıkar.

Elde edilen çökme miktarları, bu karakteristiğe etki eden karma suyu miktarı dışında, başka faktörlerinde etkisi altında bulunmaktadır. Bu da iri agrega tanelerinin biçimidir. İri agreganın kırmataş tanelerinden veya köşeli tanelerden oluşması

halinde taze beton, meydana gelen kenetlenme betonun daha az çökmesine sebep olur. Buna karşılık iri agrega taneleri çakıl veya yuvarlak yüzeyli taneler şeklinde ise bu kenetlenme gerçekleşmeyecek ve çökme daha büyük bir değer alacaktır. Ayrıca agrega granülometrisi de etkili bir rol oynar (11). Tane boyutu küçüldükçe aynı dozajda bir betondan iri malzeme ile üretilmiş beton ile aynı çökme istendiğinde su miktarının artırması veya akışkanlaştırıcı kullanılması gerekir ki bu da mukavemetin azalmasına sebebiyet verir.

2.4.2.2. Ve-Be Deneyi

Taze betonun sıkışması ve şekil değiştirmesi için gerekli enerjinin ölçülmesi için yapılan Ve-Be deneyi, özel bir vibrasyon masasında bulunan bir silindir kap ve kabın içinde bulunan abrams konisi kullanılarak gerçekleştirilir. Çökme (Slump) deneyindeki esaslara uygun olarak doldurulan abrams konisi kaldırıldıktan sonra serbest kalan beton üzerine şeffaf plastik bir disk yerleştirilir ve kılavuzlu olan bu disk kendi ağırlığı ile betonun üzerine oturur. Vibrasyon masasının çalıştırılması ile vibrasyon etkisiyle beton yayılmaya başlar. Beton, silindir içinde tam olarak yayılıp şeffaf disk sabitlendiği ana kadar geçen süre kronometre ile sn biriminden ölçülür. Ölçülen bu zaman betonu Ve-Be değerini verir. V_1 betonun kesik koni içerisindeki hacmi V_2 de deneyden sonraki hacmidir. t_1 kronometrede ölçülen süreyi simgelerse,

$m = t_1 \times V_1 / V_2$ bağıntısı hesaplanır (11).

Buradan bulunan Ve-Be değeri ne kadar küçük ise betonun işlenebilme özelliği o kadar büyük değer alır diyebiliriz.

2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

2.5.1. Basınç Deneyi

Basınç deneylerinde 250 ton kapasiteli Amsler marka basınç presi kullanılmıştır. Bu deney hem küp hem de silindir numuneleri için yapılmıştır. Küp ve silindir numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra kür havuzunda 27 gün bekletilmiş, 27. gün sonunda çıkartılıp başlık yapılmıştır. Başlıklarında mukavemetini kazanması için 38. günde basınç deneyleri yapılmıştır.

Boyutları 150x150x150 mm olan küp numuneler tartıldıktan sonra sabit yükleme hızı altında pres ile yüklenmiş ve maksimum dayanımı kaydedilmiştir. Her bir beton serisinden 4 adet numune kırılmıştır.

150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir numunelerde düşey yer değiştirmeyi de ölçmek için  er eve (strane gage) takılmış ve yükleme esnasında belli aralıklarla komprator yardımıyla belli yükler altında oluşan düşey şekil değiştirmeler okunmuştur. Bu okunan değerler elastisite modülü hesabında kullanılmıştır.

2.5.2. Ultrases Deneyi

Ultrases hızı ölçümü basıncı deneyinden önce yapılmıştır. Bu deneyde tüm numunelerin boyları ölçülmüş, karşılıklı yüzeyleri üzerine gres yağı sürülüp numune ses alıcı ve verici probalar arasına yerleştirilmiştir. Sesin numune boyunca geçiş süresi (t) mikro saniye cinsinden ölçülmüştür. Boşluğu fazla olan başka bir deyişle su/ imento oranı fazla olan betonlardan sesin daha yavaş ilerlediği saptanmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneyleri sonucunda elde edilen birim ağırlıklar, çökme ve ve-be deneyi sonuçları Tablo 3.1’ de ki çizelgede ifade edilmiştir.

Tablo 3.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Beton Kodu	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Çökme (cm)	Ve-Be (sn)
C150/1,70-0,6N	2163	Yayıldı	<1 sn
C150/1,50-0,6N	2198	Yayıldı	<1 sn
C150/1,30-0,6N	2177	Yayıldı	1 sn
C200/1,30-0,6N	2212	3	5 sn
C200/1,10-0,6N	2219	15	2 sn
C200/0,90-0,6N	2217	10	3 sn
C250/0,90-2,0S	2225	1	4 sn
C250/0,80-2,0S	2217	Yayıldı	<1 sn
C250/0,70-2,0S	2244	Yayıldı	<1 sn
C250/0,60-2,0S	2267	1	5 sn
C300/0,56-2,0S	2361	Yayıldı	<1 sn
C300/0,46-2,0H	2338	0	5 sn
C300/0,36-3,0H	2350	0	5 sn
C350/0,38-2,5H	2370	0	8 sn
C350/0,35-2,5H	2353	0	8 sn
C400/0,33-2,5H	2385	0	7 sn
C400/0,30-3,0H	2425	0	8 sn

Taze beton deneylerinden elde edilen birim ağırlıklar yardımıyla betonlar içersindeki hava miktarlarını ve kompasiteleri hesaplayabiliriz.

Tablo 3.2 Üretilen Betonların Hava Miktarları ve Kompasiteleri

Beton Kodu	Hava (%)	Kompasite (m ³)
C150/1,70-0,6N	1,7	0,723
C150/1,50-0,6N	2,6	0,751
C150/1,30-0,6N	5,5	0,757
C200/1,30-0,6N	0,0	0,736
C200/1,10-0,6N	2,3	0,757
C200/0,90-0,6N	5,1	0,774
C250/0,90-2,0S	1,9	0,752
C250/0,80-2,0S	3,9	0,761
C250/0,70-2,0S	4,4	0,781
C250/0,60-2,0S	5,1	0,800
C300/0,56-2,0S	0,3	0,822
C300/0,46-2,0H	3,2	0,826
C300/0,36-3,0H	4,5	0,843
C350/0,38-2,5H	2,4	0,836
C350/0,35-2,5H	3,7	0,834
C400/0,33-2,5H	2,1	0,838
C400/0,30-3,0H	1,2	0,857

Bu veriler ışığında üretilen beton numunelerinin gerçek bileşimleri bulunmuştur. Karışımlara giren gerçek malzeme miktarı Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Üretilen Betonların Karışımına Giren Gerçek Malzeme Miktarları

Beton Kodu	Çimento (kg)	Su (kg)	Katkı (kg)	Kum (kg)	Çakıl1 (kg)	Çakıl2 (kg)
C150/1,70-0,6N	152	259	0,9	829	355	568
C150/1,50-0,6N	148	222	0,9	842	407	577
C150/1,30-0,6N	144	187	0,9	851	411	583
C200/1,30-0,6N	203	265	1,2	803	389	551
C200/1,10-0,6N	198	218	1,2	829	402	570
C200/0,90-0,6N	193	173	1,2	853	412	584
C250/0,90-2,0S	250	225	5,0	805	389	551
C250/0,80-2,0S	244	196	4,9	817	395	560
C250/0,70-2,0S	243	170	4,9	842	407	577
C250/0,60-2,0S	241	145	4,8	865	418	593
C300/0,56-2,0S	304	170	6,1	868	419	594
C300/0,46-2,0H	296	136	5,9	876	423	600
C300/0,36-3,0H	292	105	7,3	897	434	615
C350/0,38-2,5H	349	132	8,7	867	419	594
C350/0,35-2,5H	344	120	8,6	867	419	594
C400/0,33-2,5H	400	132	9,9	850	411	582
C400/0,30-3,0H	403	121	10,1	872	422	597

3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.2.1. Basınç Deneyi Sonuçları

Üretilen betonların 38. gün de yapılan basınç deneyi sonuçlarından belirlenen basınç dayanımları aşağıdaki Tablo 3.4' de verilmiştir. $f_{c_{\text{silindir}}}$ silindir basınç dayanımını, $f_{c_{\text{küp}}}$ küp basınç dayanımını göstermektedir.

Tablo 3.4 Basınç Deneyi Sonuçları

Beton Kodu	$f_{c_{\text{silindir}}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$f_{c_{\text{küp}}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
C150/1,70-0,6N	4,3	3,6
C150/1,50-0,6N	6,0	6,1
C150/1,30-0,6N	7,2	7,3
C200/1,30-0,6N	6,3	7,9
C200/1,10-0,6N	13,1	13,3
C200/0,90-0,6N	14,5	14,6
C250/0,90-2,0S	11,8	16,1
C250/0,80-2,0S	15,3	21,3
C250/0,70-2,0S	17,7	23,2
C250/0,60-2,0S	31,6	33,5
C300/0,56-2,0S	28,2	33,1
C300/0,46-2,0H	44,1	36,3
C300/0,36-3,0H	31,6	25,5
C350/0,38-2,5H	32,5	44,9
C350/0,35-2,5H	48,0	34,8
C400/0,33-2,5H	52,3	39,1
C400/0,30-3,0H	54,9	49,0

3.2.2. Elastisite Modülü Değerleri

Silindir numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi sırasında belli aralıklarla ölçülen deformasyon değerleri ile gerilme–deformasyon diyagramı çizilmiş maksimum gerilmenin 1/3’ü bölgesinde σ - ϵ eğrisi lineer kabul edilmiş, elastisite modülleri hesaplanmış, sonuçlar aşağıdaki Tablo 3,5’de verilmiştir.

Tablo 3.5 Elastisite Modülleri (N/mm²)

Beton Kodu	E (N/mm ²)
C150/1,70-0,6N	13103
C150/1,50-0,6N	13017
C150/1,30-0,6N	15563
C200/1,30-0,6N	14975
C200/1,10-0,6N	20779
C200/0,90-0,6N	20253
C250/0,90-2,0S	21509
C250/0,80-2,0S	20462
C250/0,70-2,0S	20190
C250/0,60-2,0S	25819
C300/0,56-2,0S	27323
C300/0,46-2,0H	33174
C300/0,36-3,0H	29856
C350/0,38-2,5H	33524
C350/0,35-2,5H	35449
C400/0,33-2,5H	32355
C400/0,30-3,0H	33015

3.2.3. Ultrases Hızı Sonuçları

Ultrases deneyi numuneler 38. günde kırılmadan önce hem küp hem de silindirler üzerinde yapılmıştır. V (km/sn) cinsinden ultrases hızını, t (sn) cinsinden ultrases geçiş süresini, l (km) cinsinden numunenin uzunluğunu göstermektedir.

$$V = \frac{l}{t} \quad (2.1)$$

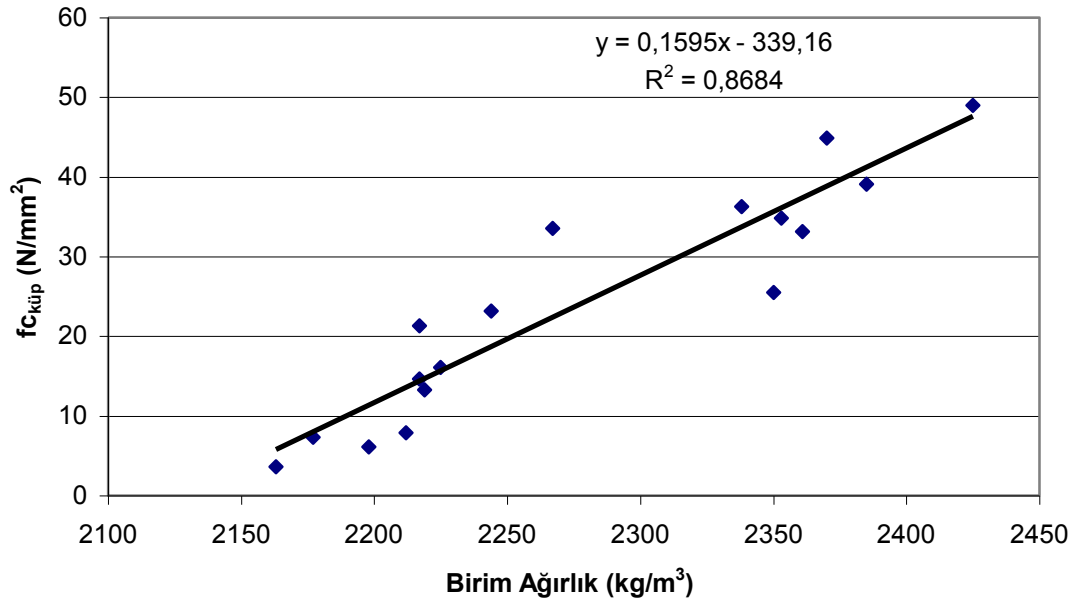
Tablo 3.6 Ultrases Hız Sonuçları (km/sn)

Beton Kodu	Hız Ölçümleri	
	V_{küp} (km/sn)	V_{silindir} (km/sn)
C150/1,70-0,6N	3,24	3,29
C150/1,50-0,6N	3,38	3,33
C150/1,30-0,6N	3,60	3,50
C200/1,30-0,6N	3,69	3,55
C200/1,10-0,6N	3,87	3,84
C200/0,90-0,6N	4,13	3,93
C250/0,90-2,0S	3,96	3,93
C250/0,80-2,0S	4,18	3,98
C250/0,70-2,0S	4,10	3,37
C250/0,60-2,0S	4,40	4,24
C300/0,56-2,0S	4,60	4,40
C300/0,46-2,0H	4,69	4,51
C300/0,36-3,0H	4,62	4,50
C350/0,38-2,5H	4,63	4,43
C350/0,35-2,5H	4,66	4,56
C400/0,33-2,5H	4,76	4,58
C400/0,30-3,0H	4,68	4,52

BÖLÜM 4 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Birim Ağırlıkla Basınç Dayanımları Arasındaki İlişkiler

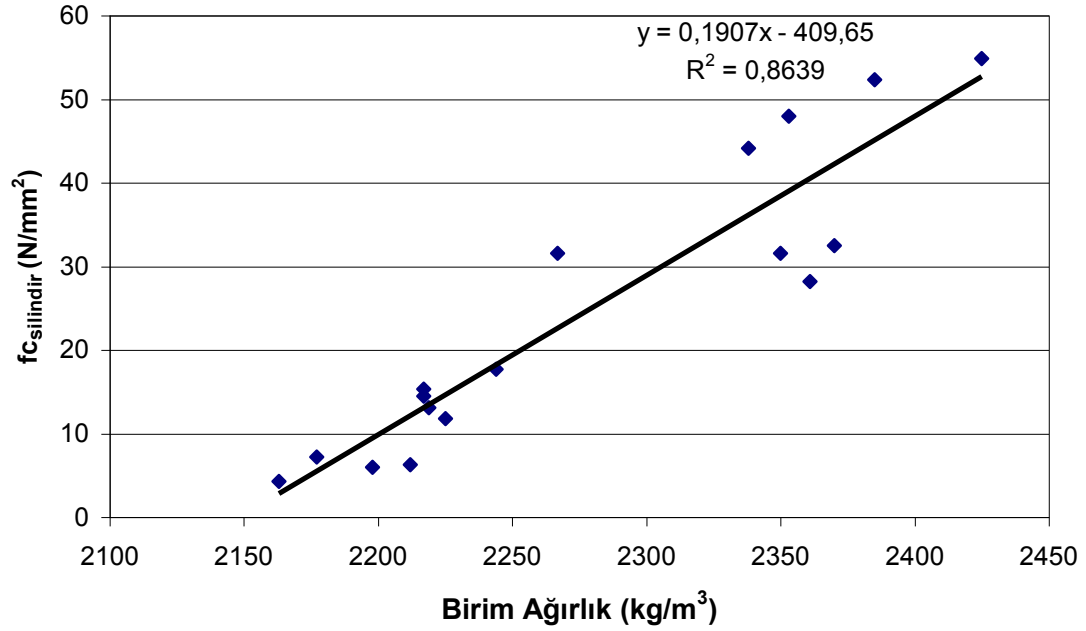
Taze beton birim ağırlık deney sonuçları Tablo 3.1'deki değerlerle silindir ve küp numunelerinin ortalama basınç dayanımları Tablo 3.4' deki değerler arasındaki bağıntılar Şekil 4.1' de "küp birim ağırlık / basınç dayanımı" ve Şekil 4.2' de "silindir birim ağırlık / basınç dayanımı" olarak verilmiştir.



Şekil 4.1 Birim Ağırlıkla Küp Basınç Dayanımları Bağıntısı

Şekil 4.1 ve 4.2'de görüldüğü gibi birim ağırlık arttıkça betonun basınç dayanımı artmaktadır. Şekil 4.1 yardımıyla birim ağırlıklar ve küp basınç dayanımları arasındaki korelasyon katsayısı $R=0,93$ 'dir. Bu bağıntıda $f_{Cküp}$ N/mm² cinsinden küpün basınç dayanımı, α ise kg/m³ cinsinden birim ağırlığı göstermektedir.

$$f_{Cküp} = 0,1595\alpha - 339,16 \quad (4.1)$$



Şekil 4.2 Birim Ağırlıkla Silindir Basınç Dayanımları Bağıntısı

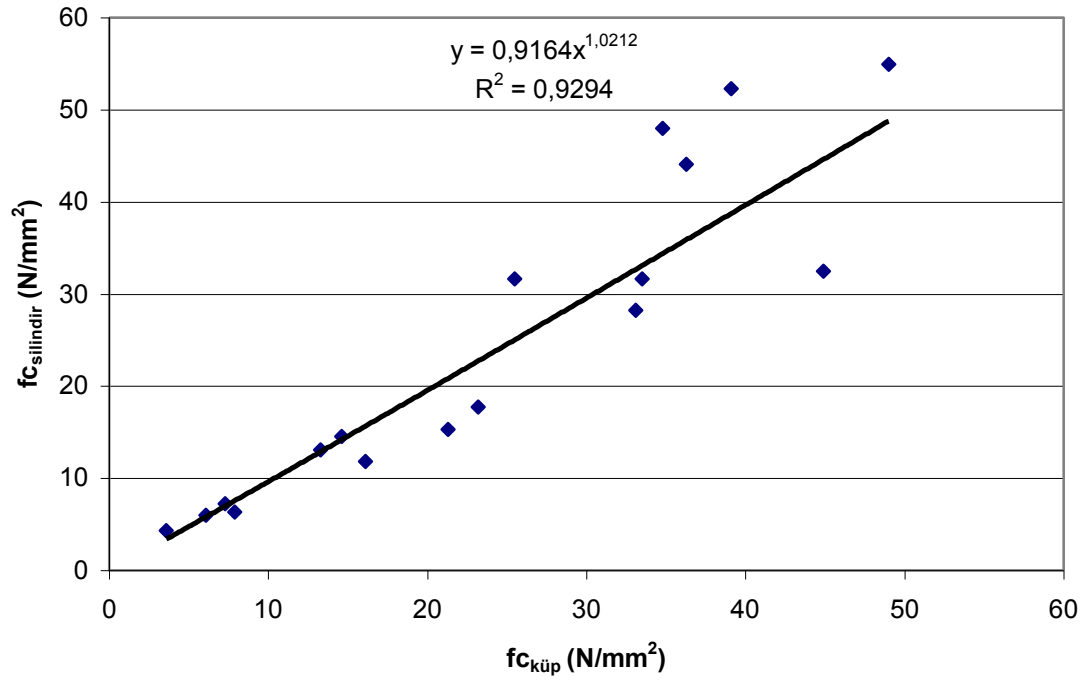
Şekil 4.2 yardımıyla silindir basınç dayanım dayanımı ile birim ağırlık arasında bir bağıntı kurmak mümkündür. Korelasyon katsayısı $R=0.93$ ' dir. Bu bağıntıda $f_{c_{silindir}}$ N/mm^2 cinsinden küpün basınç dayanımı, α ise kg/m^3 cinsinden birim ağırlığı göstermektedir.

$$f_{c_{silindir}} = 0,1907\alpha - 409,65 \quad (4.2)$$

4.2. Silindir Basınç Dayanımı ile Küp Basınç Dayanımının Karşılaştırılması

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen silindir ve küp numunelerinin ortalama basınç dayanımları arasındaki lineer bağıntılar Şekil 4.3'de verilmiştir. Silindir basınç dayanımı ile küp basınç dayanımı arasında ki ilişkinin korelasyon katsayısı $R=0,96$ olan bir bağıntı bulunmuştur.

$$f_{c_{silindir}} = 0,9164f_{c_{küp}}^{1,0212} \quad (4.3)$$



Şekil 4.3 Silindir ve Küp Basınç Dayanımları Bağıntısı

Tablo 4.1’de TS 11222’de beton sınıflarındaki küp basınç dayanımları ile yine aynı beton sınıflarında Şekil 4.2’den elde edilen bağıntılar kullanılarak bulunan küp dayanımları ile bunların birbirine oranları gösterilmiştir. Tablo 4.1’de görüleceği gibi Şekil 4.3’te elde edilen bağıntılar yardımıyla bulunan küp basınç dayanımları TS 11222’de verilen küp basınç dayanımlarından düşük çıkmıştır.

Tablo 4.1 Bağntı ile bulunan küp basınç dayanımlarının TS 11222 ile karşılaştırılması

Beton Sınıfı	TS 11222 Basınç Dayanımları		Bağntı ile Bulunan	Bağntı / TS11222 Oranları
	$f_{c_{\text{silindir}}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$f_{c_{\text{küp}}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$f_{c_{\text{küp}}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	
C14	14	16	14.4	0.90
C16	16	20	16.5	0.83
C18	18	22	18.5	0.84
C20	20	25	20,5	0.82
C25	25	30	25.5	0.85
C30	30	37	30.5	0.82
C35	35	45	35.4	0.79
C40	40	50	40.4	0.81
C45	45	55	45.3	0.82
C50	50	60	50.2	0.84
C55	55	67	55.5	0.83
C60	60	75	60.0	0.80
C70	70	85	69.8	0.82
C80	80	95	79.6	0.84
C90	90	105	89.3	0.85
C100	100	115	99.0	0.86

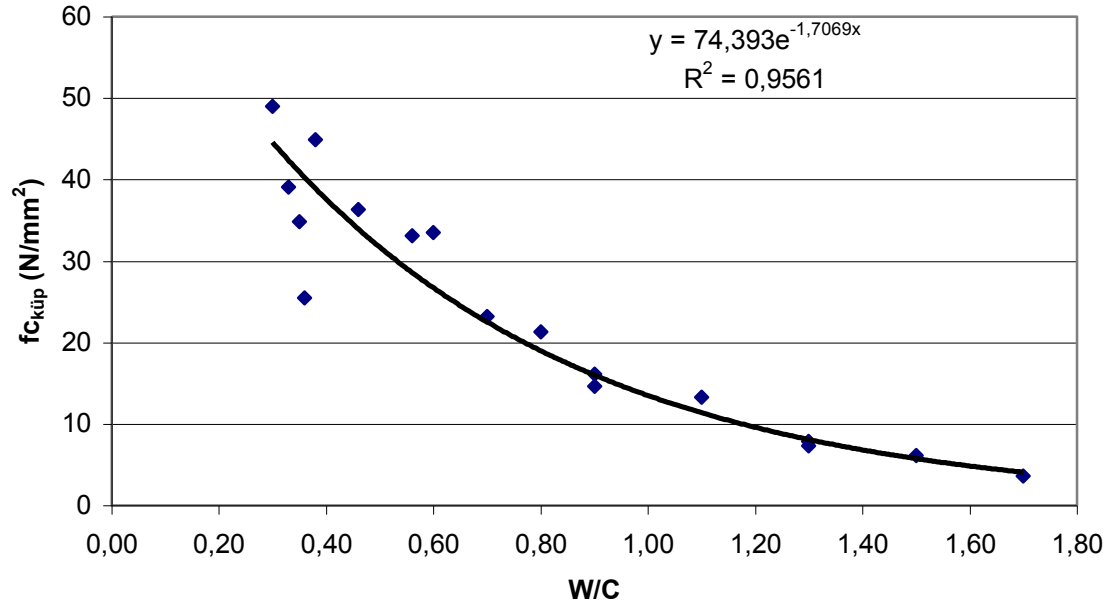
4.3. Basınç Dayanımları ve Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki

Su/Çimento (W/C) oranlarıyla küp ve silindir basınç dayanımları arasındaki bağntı sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Şekil 4.4 kullanılarak küp basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasında korelasyon katsayısı $R=0.98$ olarak elde edilmiştir.

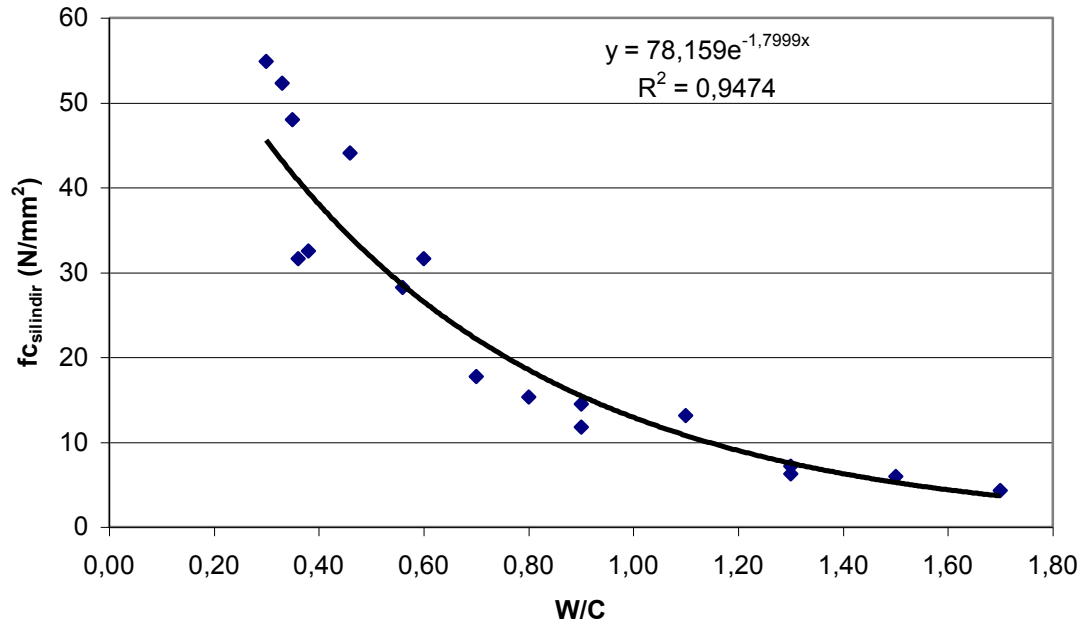
$$f_{c_{\text{küp}}} = 74,393e^{-1.7069(w/c)} \quad (4.4)$$

Şekil 4.5 yardımıyla silindir basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasında korelasyon katsayısı $R=0.97$ olarak elde edilmiştir.

$$f_{c_{\text{silindir}}} = 78,154.e^{-1.7999(w/c)} \quad (4.5)$$



Şekil 4.4 Su/Çimento Oranı ile Küp Basınç Dayanımı Arasındaki Bağıntı

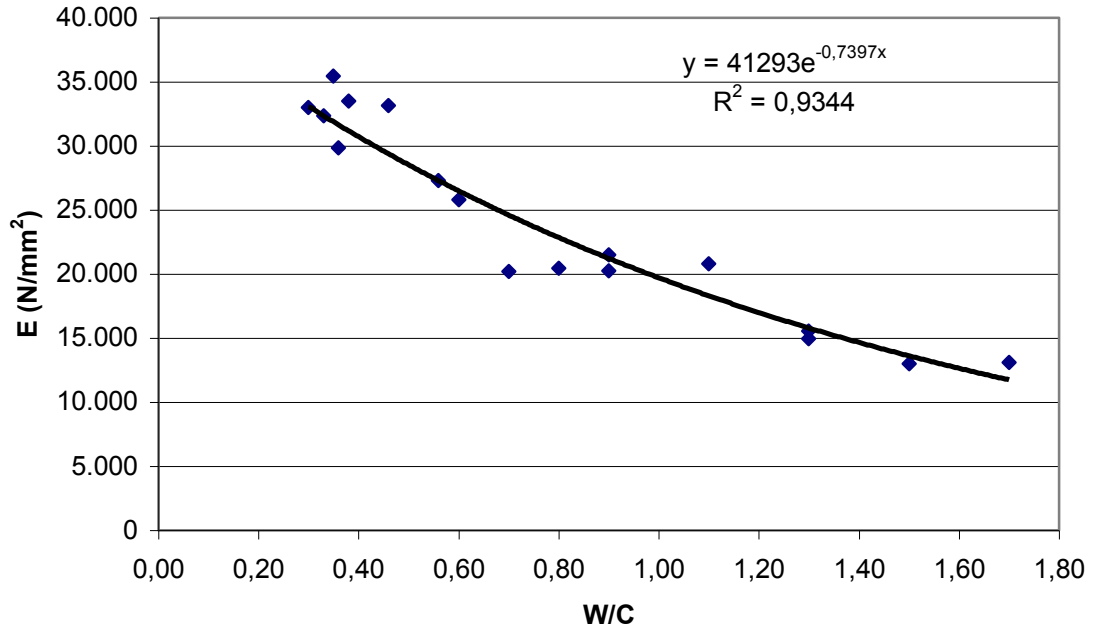


Şekil 4.5 Su/Çimento Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki Bağıntı

4.4. Elastisite Modülleri ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki

Su/çimento (W/C) oranıyla elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 4.6'da verilmiştir. Elastisite modülünün su/çimento oranının azalmasıyla arttığı Şekil 4.6'dan anlaşılmaktadır. Bu grafik yardımıyla $R=0.97$ olarak elde edilmiştir. Aşağıdaki bağıntılarda E , N/mm^2 cinsinde elastisite modülünü gösterir.

$$E=41293e^{-0.7397(w/c)} \quad (4.6)$$



Şekil 4.6 Su/çimento Oranı ile Elastisite Modülü Bağıntısı

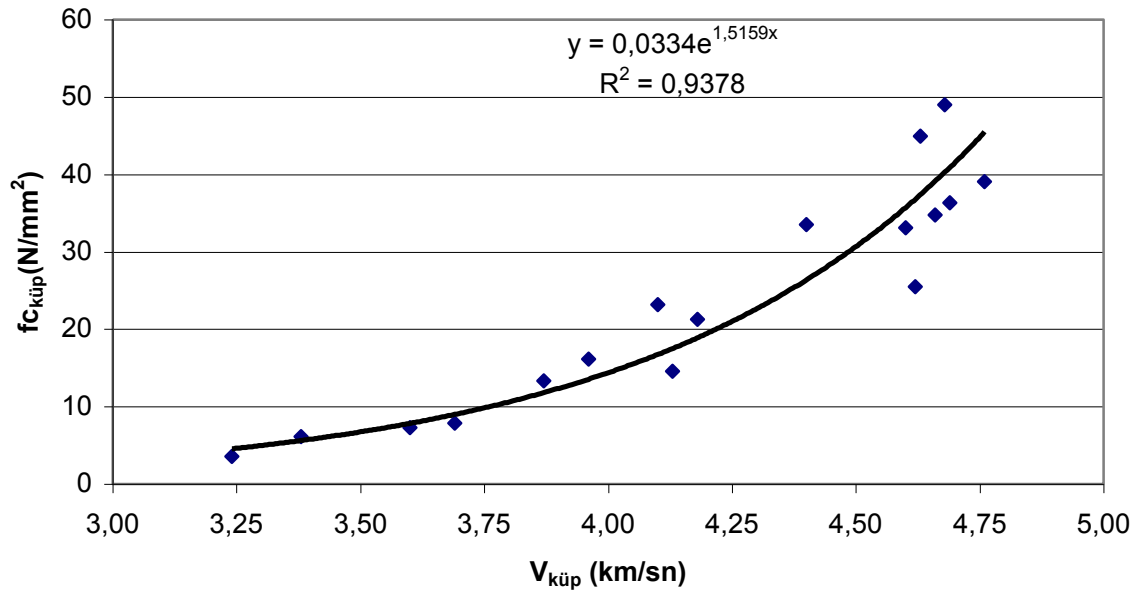
4.5. Ultrases Hızı ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Ultrases hızları ile küp ve silindir basınç dayanımları arasındaki bağıntılar sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de de görüleceği gibi ultrases hızı ile basınç mukavemeti doğru orantılıdır. Şekil 4.7'de küp numunelerin korelasyon katsayısı $R=0.97$ olarak bulunmuştur.

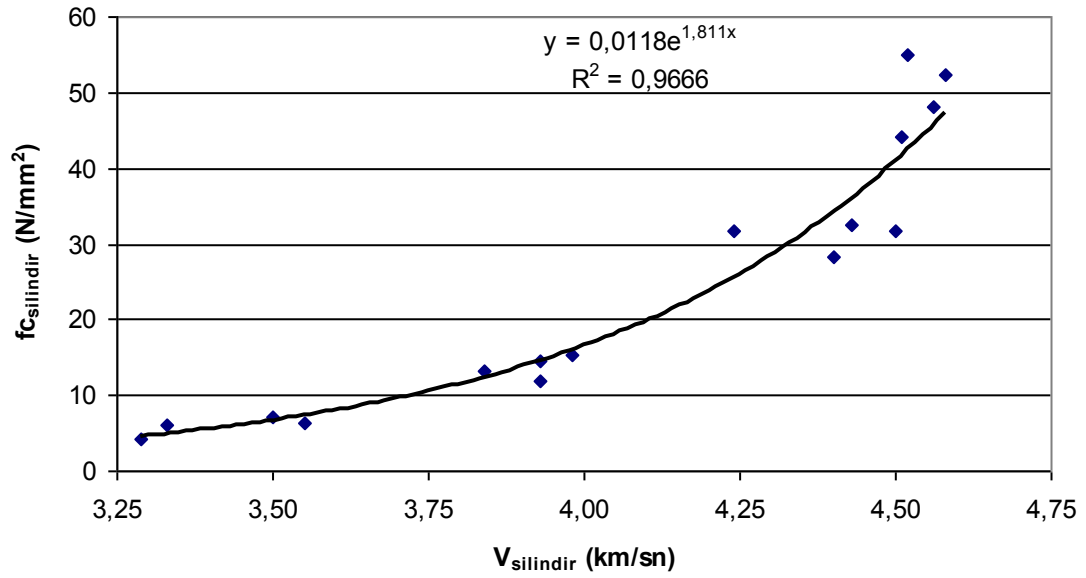
$$f_{C_{küp}} = 0,0334.e^{1.5159V_{küp}} \quad (4.7)$$

Şekil 4.8'de silindir numunelerin korelasyon katsayısı $R=0.98$ olarak bulunmuştur.

$$f_{C_{silindir}} = 0,0118.e^{1.811V_{silindir}} \quad (4.8)$$



Şekil 4.7 Ultrases Hızı ile Küp Basınç Dayanımı Bağıntısı

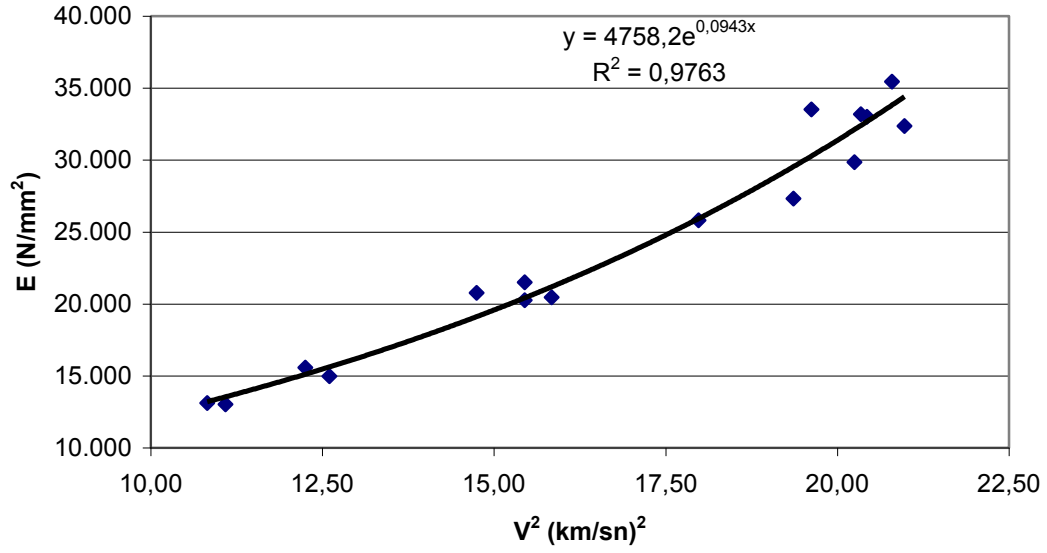


Şekil 4.8 Ultrases Hızı ile Silindir Basınç Dayanımı Bağıntısı

4.6. Ultrases Hızı ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki

Ultrases hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Burada ultrases hızın karesiyle elastisite modülü arasında bir ilişki kurulmuş, korelasyon katsayısı $R=0,99$ olarak bulunmuştur.

$$E = 4758,2e^{0,0943 V^2} \quad (4.9)$$



Şekil 4.9 Ultrases Hızının Karesi ile Elastisite Modülü Bağıntısı

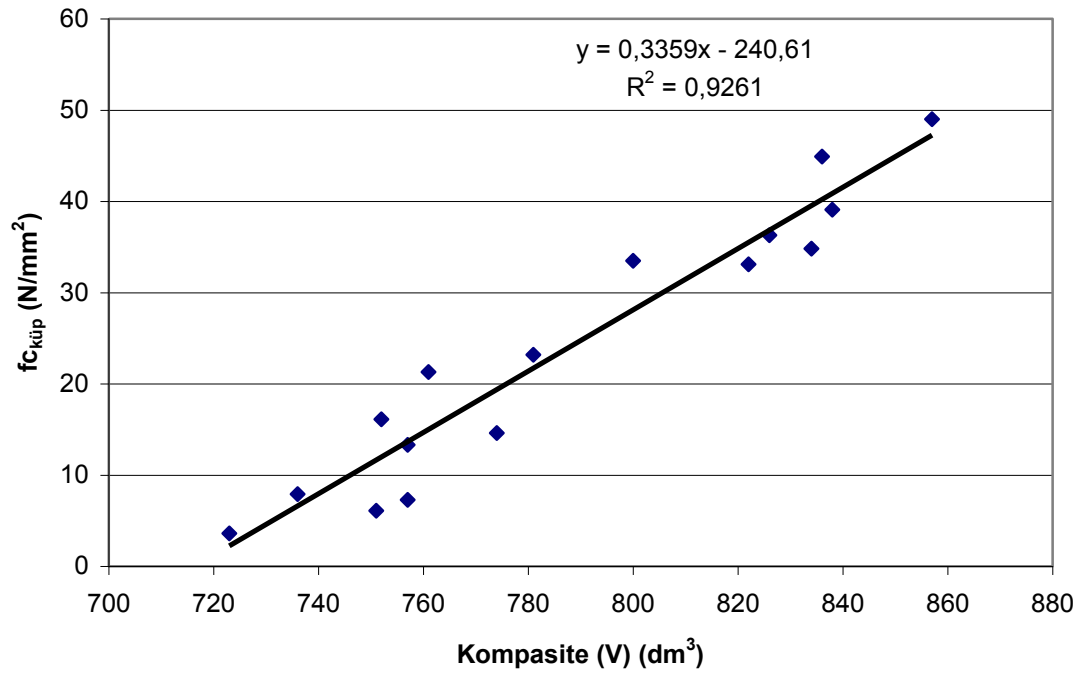
4.7. Komposite ve Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Kompositeyle küp ve silindir basınç dayanımları bağıntıları sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Küpler için korelasyon katsayısı $R=0,96$ olarak bulunmuştur.

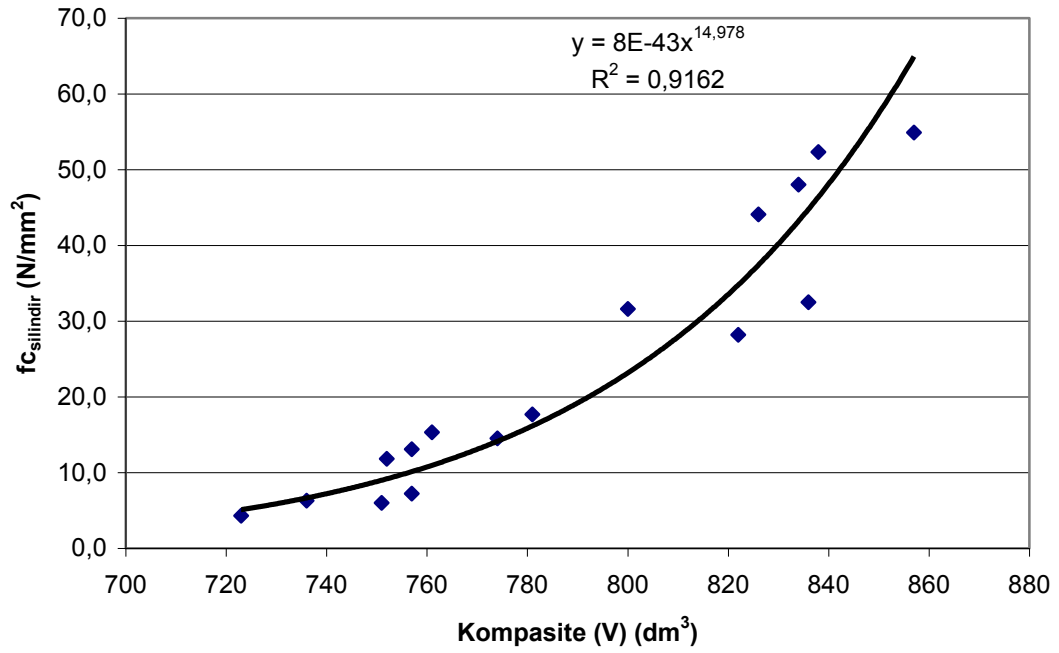
$$f_{C_{küp}} = 0,3359V - 240,61 \quad (4.9)$$

Silindirler için de korelasyon katsayısı $R=0.96$ olarak bulunmuştur.

$$f_{C_{silindir}} = 8 \times 10^{-43} V^{14,978} \quad (4.10)$$



Şekil 4.10 Komposite ile Küp Basınç Dayanımı Bağıntısı



Şekil 4.11 Komposite ile Silindir Basınç Dayanımı Bağıntısı

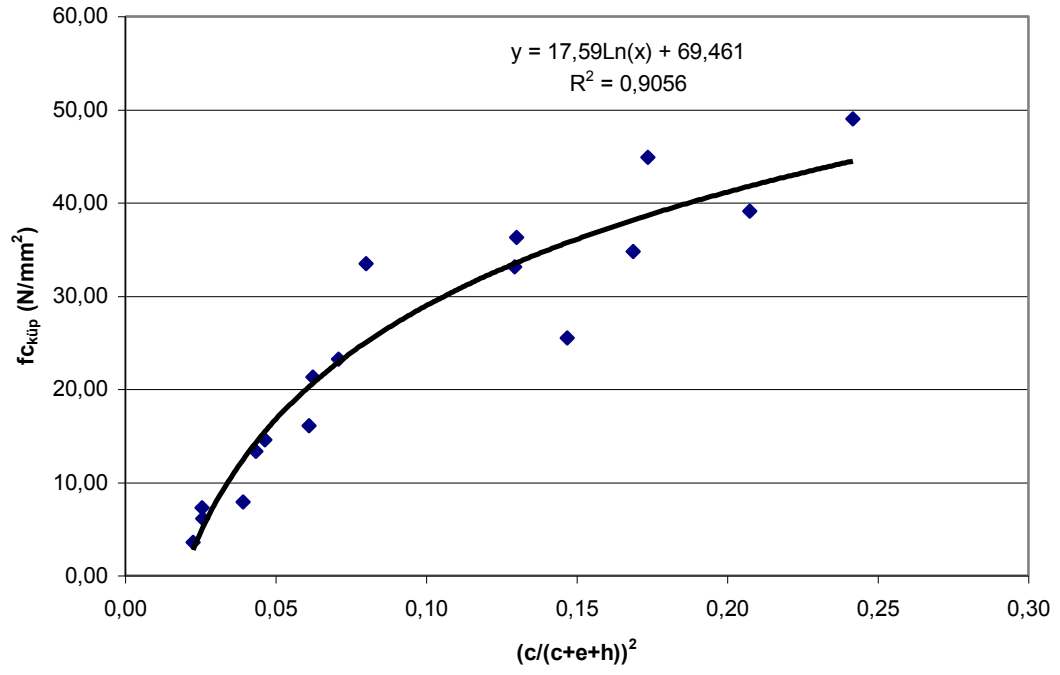
4.8. Basınç Dayanımları ile Bolomey ve Feret Bağlılıları Korelasyonu

Daha önceden Bölüm 1' de (1.7) ve (1.9) bağıntıları ile verilmiş Feret ve Bolomey Formüllerindeki katsayılar basınç dayanımlarının ortalama değerleri yardımı ile hesaplanarak Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.2'de verilen $K_{f_{küp}}$ ve $K_{f_{silindir}}$ sırasıyla küp ve silindir Feret katsayılarını , $K_{b_{küp}}$ ve $K_{b_{silindir}}$ ise sırasıyla küp ve silindir Bolomey katsayılarını gösterir.

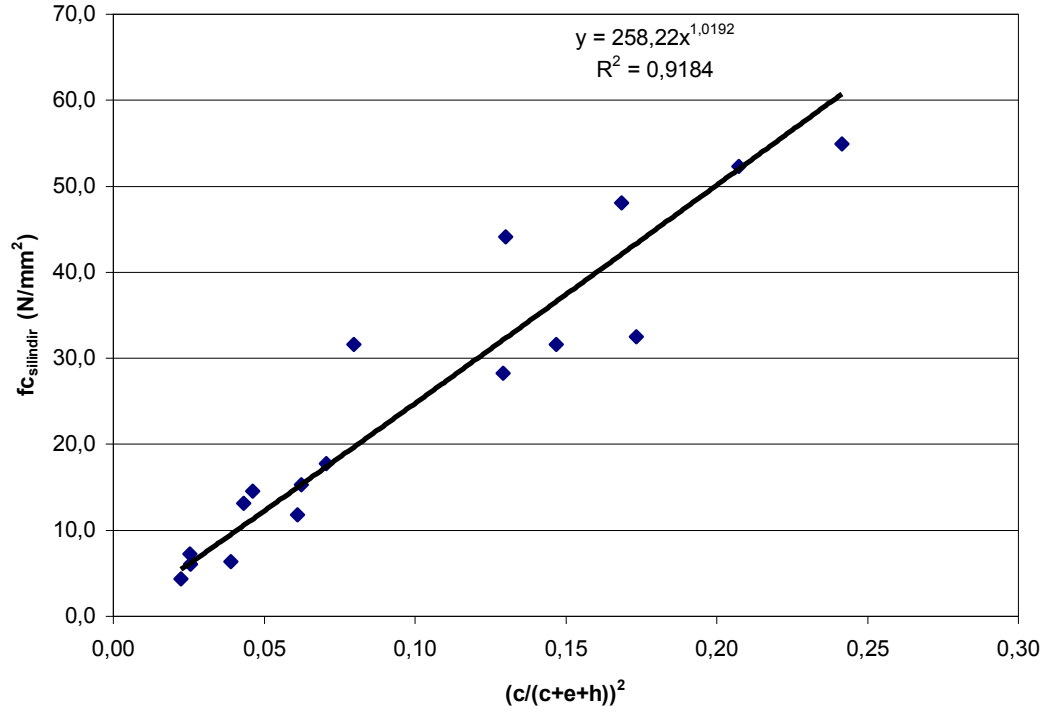
Tablo 4.2'de verilen Feret katsayıları küp numunelerde minimum 159, maksimum 419 N/mm^2 ; silindir numunelerde minimum 190, maksimum 395 N/mm^2 değerlerini almıştır. Aynı şekilde Bolomey katsayıları da küp numunelerde maksimum 83, minimum 19 N/mm^2 ; silindir numunelerde minimum 18, maksimum 79 N/mm^2 değerlerini almıştır.

Tablo 4.2 Küp-Silindir Basınç Dayanımı ile Feret, Bolomey Katsayıları Korelasyonu

Beton Kodu	$f_{c_{silindir}}$ (N/mm^2)	$f_{c_{küp}}$ (N/mm^2)	$K_{f_{silindir}}$ (N/mm^2)	$K_{f_{küp}}$ (N/mm^2)	$K_{b_{silindir}}$ (N/mm^2)	$K_{b_{küp}}$ (N/mm^2)
C150/1,70-0,6N	4,3	3,6	190	159	83	70
C150/1,50-0,6N	6,0	6,1	233	237	62	63
C150/1,30-0,6N	7,2	7,3	283	287	78	79
C200/1,30-0,6N	6,3	7,9	161	202	23	29
C200/1,10-0,6N	13,1	13,3	302	307	41	42
C200/0,90-0,6N	14,5	14,6	313	315	41	41
C250/0,90-2,0S	11,8	16,1	193	263	22	31
C250/0,80-2,0S	15,3	21,3	245	341	28	40
C250/0,70-2,0S	17,7	23,2	250	328	28	37
C250/0,60-2,0S	31,6	33,5	395	419	43	46
C300/0,56-2,0S	28,2	33,1	218	256	23	26
C300/0,46-2,0H	44,1	36,3	339	279	35	29
C300/0,36-3,0H	31,6	25,5	215	174	22	18
C350/0,38-2,5H	32,5	44,9	187	259	19	26
C350/0,35-2,5H	48,0	34,8	285	206	29	21
C400/0,33-2,5H	52,3	39,1	252	188	25	29
C400/0,30-3,0H	54,9	49,0	227	203	22	29



Şekil 4.12 Küp Basınç Dayanımı ile Feret Çarpanı Arasındaki İlişki



Sekil 4.13 Silindir Basınç Dayanımı ile Feret Çarpanı Arasındaki İlişki

Küp numuneler için Feret katsayısında Şekil 4.12'deki korelasyon katsayısı $R=0.95$ dir.

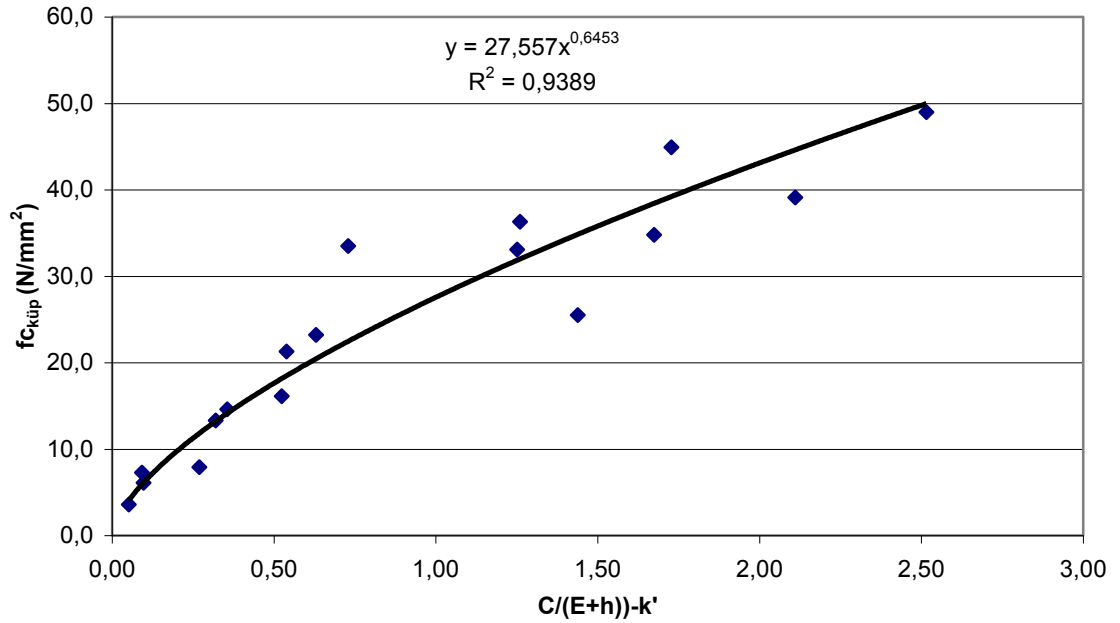
$$f_{c_{küp}} = 17,59 \ln \left(\frac{c}{c + e + h} \right)^2 + 69,491 \quad (4.11)$$

olan ilişki bulunmuştur.

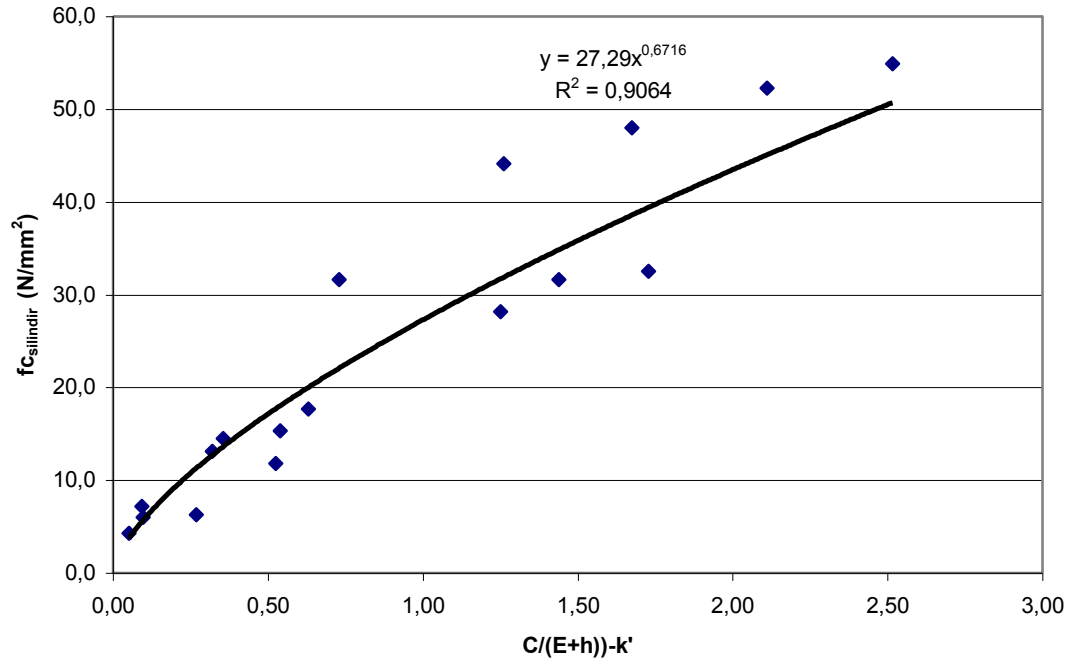
Silindir numuneler için Feret katsayısında Şekil 4.13'deki korelasyon katsayıları $R=0.96$ dır.

$$f_{c_{silindir}} = 258,22 \left(\left(\frac{c}{c + e + h} \right)^2 \right)^{1,0192} \quad (4.12)$$

olan ilişkiler bulunmuştur.



Şekil 4.14 Küp Basınç Dayanımı ile Bolomey Çarpanı Arasındaki İlişki



Şekil 4.15 Silindir Basınç Dayanımı ile Bolomey Çarpanı Arasındaki İlişki

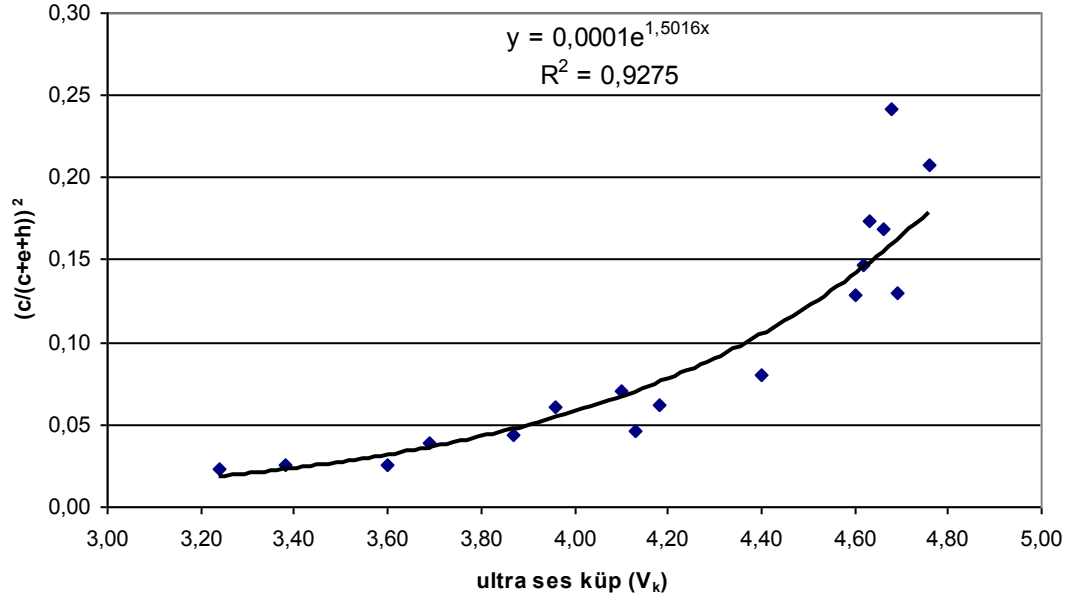
Küp numuneler için Bolomey katsayısında Şekil 4.14'deki korelasyon katsayısı $R=0,96$ 'dır.

$$fc_{küp} = 27,557 \left(\frac{C}{E + h} - k' \right)^{0,6453} \quad (4.13)$$

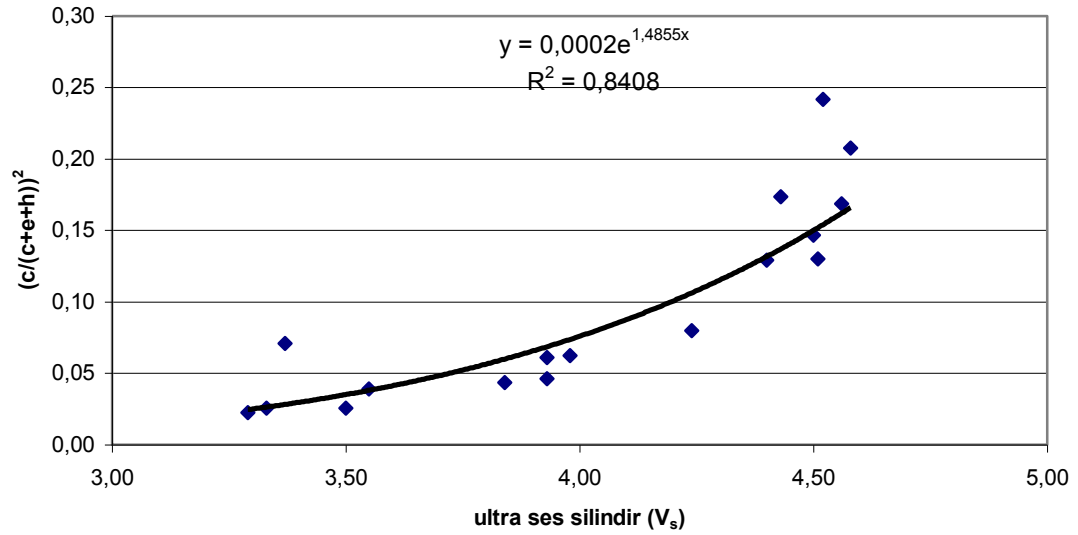
Silindir numuneler için Bolomey katsayısında Şekil 4.15'deki korelasyon $R=0,95$ ' dir.

$$fc_{silindir} = 27,29 \left(\frac{C}{E + h} - k' \right)^{0,6716} \quad (4.14)$$

4.9. Ultrases Hızı ile Feret Çarpanı Arasındaki İlişki



Şekil 4.16 Ultrases Hızı Küp - Feret Çarpanı Bağıntısı



Şekil 4.17 Ultrases Hızı Silindir - Feret Çarpanı Bağıntısı

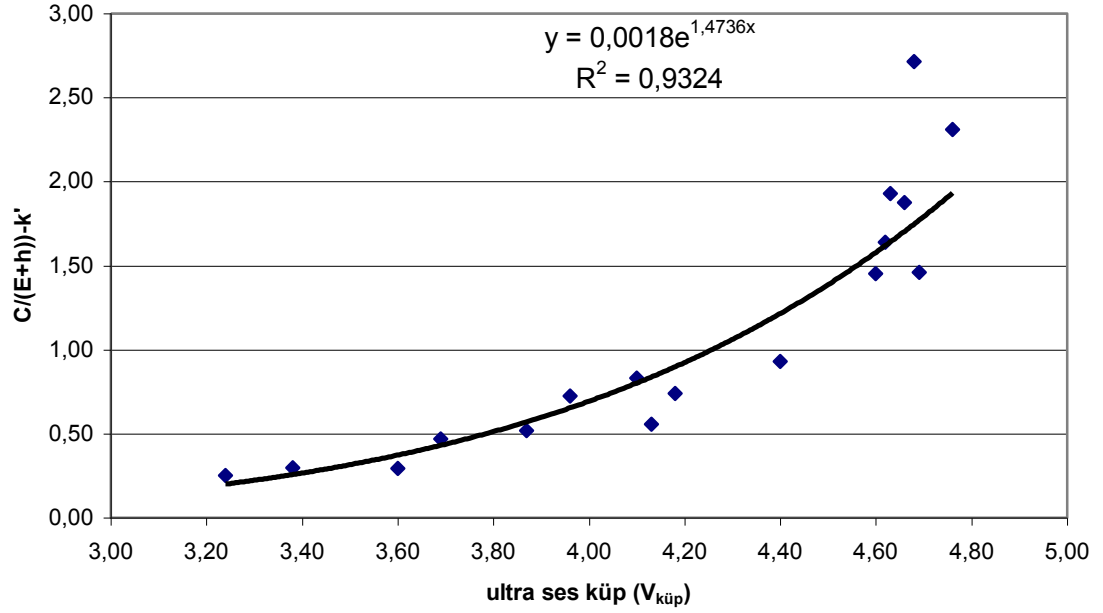
Küp numuneler için Şekil 4.16'deki korelasyon katsayısı $R=0,96'$ dır.

$$F_k = 0.0001 e^{1,5016 V_{küp}} \quad (4.15)$$

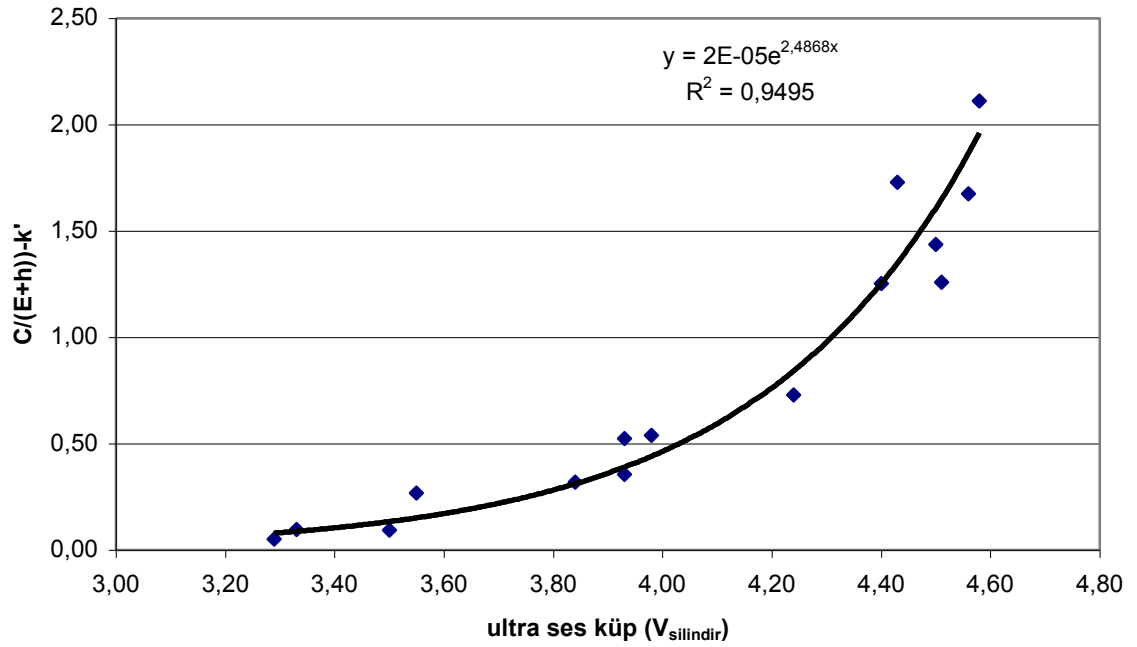
Silindir numuneler için Şekil 4.17'deki korelasyon katsayısı $R=0,92'$ dır.

$$Fs = 0.0002 e^{1,4855 V_{silindir}} \quad (4.16)$$

4.10. Ultrases Hızı ile Bolomey Çarpanı Arasındaki İlişki



Şekil 4.18 Ultrases Hızı Küp - Bolomey Çarpanı Bağıntısı



Şekil 4.19 Ultrases Hızı Silindir - Bolomey Çarpanı Bağıntısı

Küp numuneler için Şekil 4.18'deki korelasyon katsayısı $R=0,97$ ' dir.

$$B_k = 0,0018 e^{1,4736 V_{\text{küp}}} \quad (4.17)$$

Silindir numuneler için Şekil 4.19'deki korelasyon katsayısı $R=0,97$ ' dir.

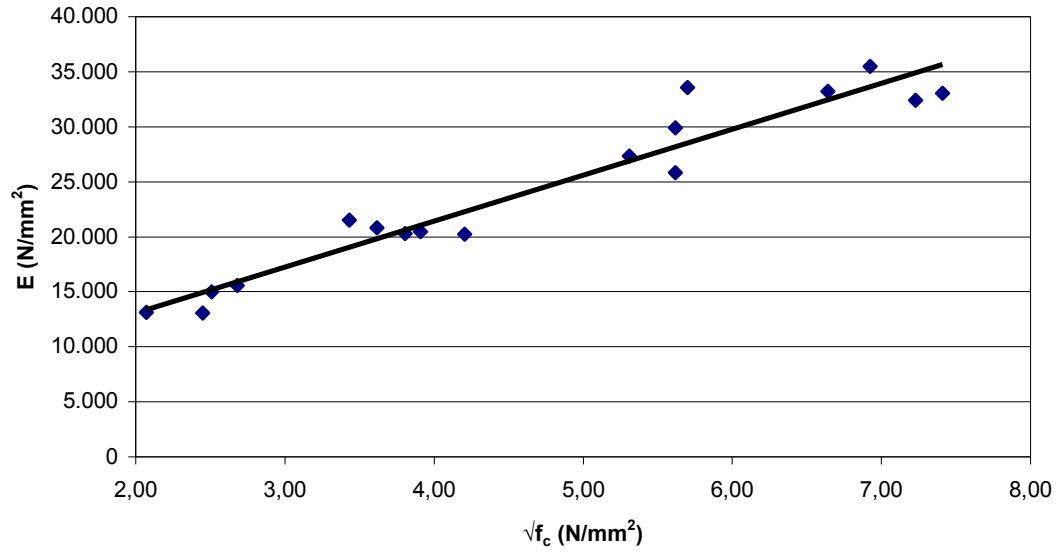
$$B_s = 2 \times 10^{-5} e^{2,4868 V_{\text{silindir}}} \quad (4.18)$$

4.11. Basınç Dayanımları ile Elastisite Modülleri Arasındaki Bağıntı

Şekil 4.20'de görüldüğü üzere basınç dayanımının artmasıyla elastisite modülü de artmaktadır. Burada deneysel olarak bulunan elastisite modülü ile basınç dayanımları arasında korelasyon katsayısı; $R=0,97$ ve $R=0,96$ olan (4.19) ve (4.20) bağıntıları bulunmuştur. Bu iki bağıntı da birbirlerine yakın değerler vermektedir.

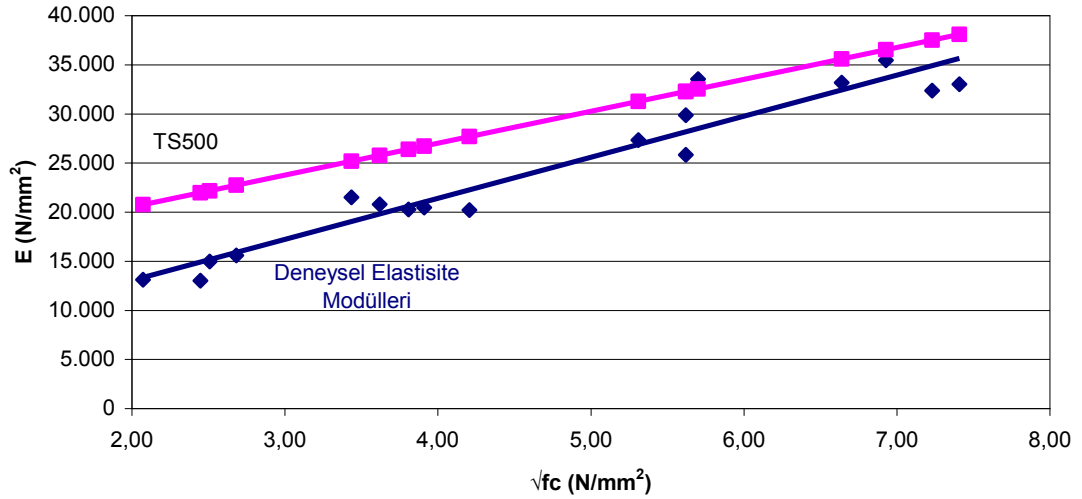
$$E = 7037,2(\sqrt{f_c})^{0,807} \quad (4.19)$$

$$E = 4182,7\sqrt{f_c} + 4661,9 \quad (4.20)$$

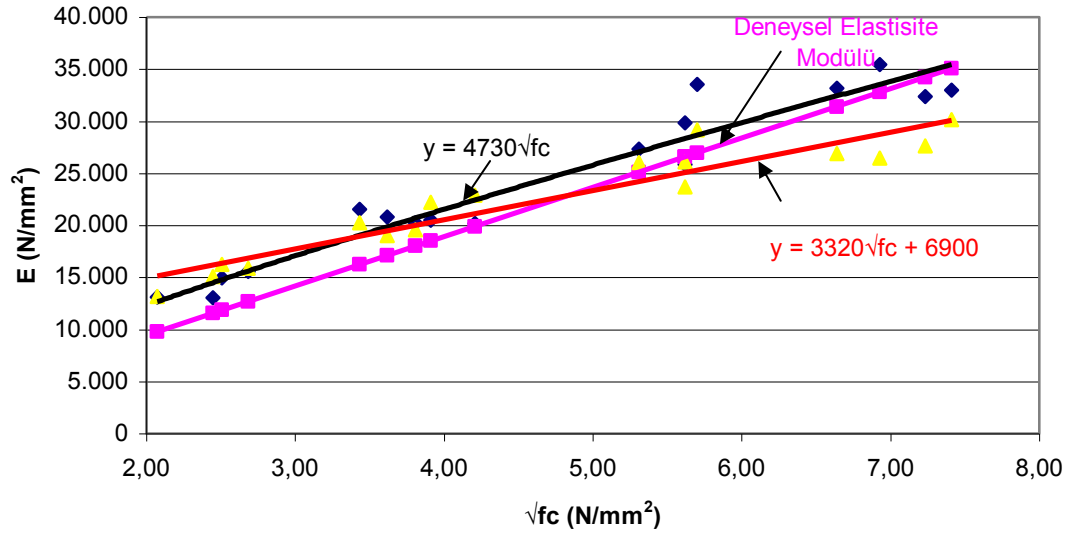


Şekil 4.20 Deneysel Elastisite Modülleri ile Basınç Dayanımları Bağıntısı

Şekil 4.21’ de TS 500 standardında verilen Bölüm 1’ de (1.15) bağıntısı ile ifade edilen denklem yardımı ile hesaplanan elastisite modülleri ile deneysel çalışma ile bulunan elastisite modülleri gösterilmektedir. TS 500’ deki elastisite formülü ile bulunan eğrinin eğimi, deneysel elastisite modülleri ile bulunan bağıntının eğiminden daha küçüktür.

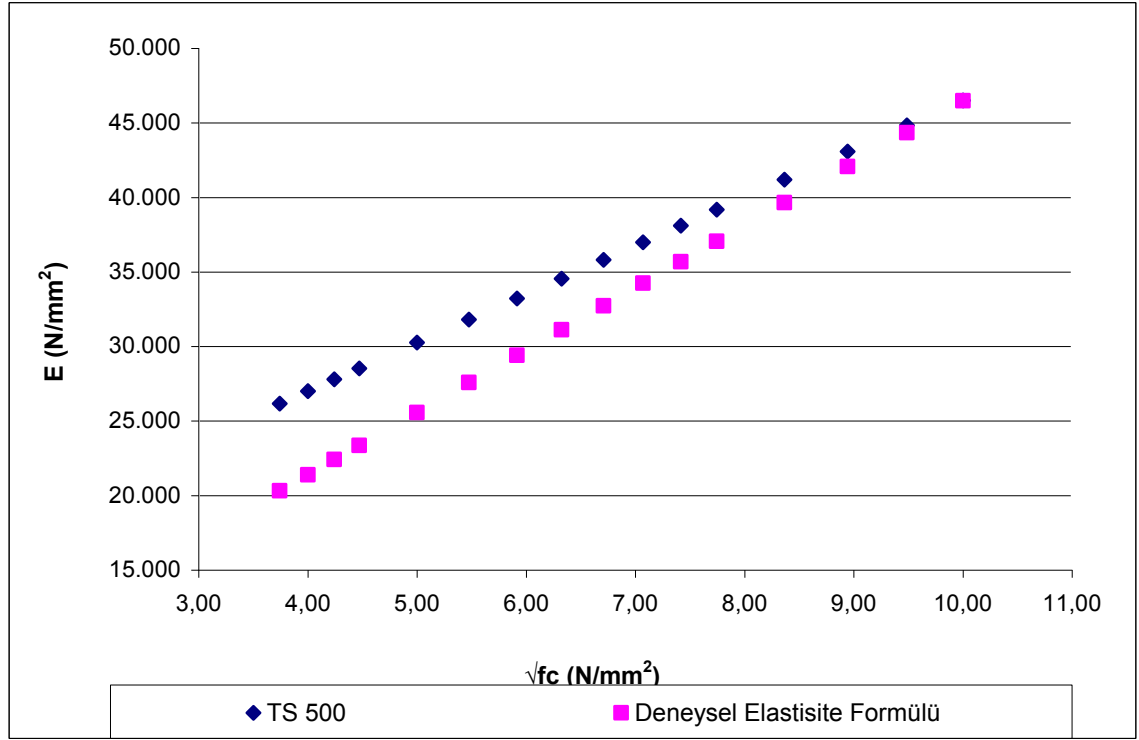


Şekil 4.21 TS 500 Bağıntısı ve Deneysel Elastisite Modüllü Formülünün Basınç Dayanımlarına göre karşılaştırılması

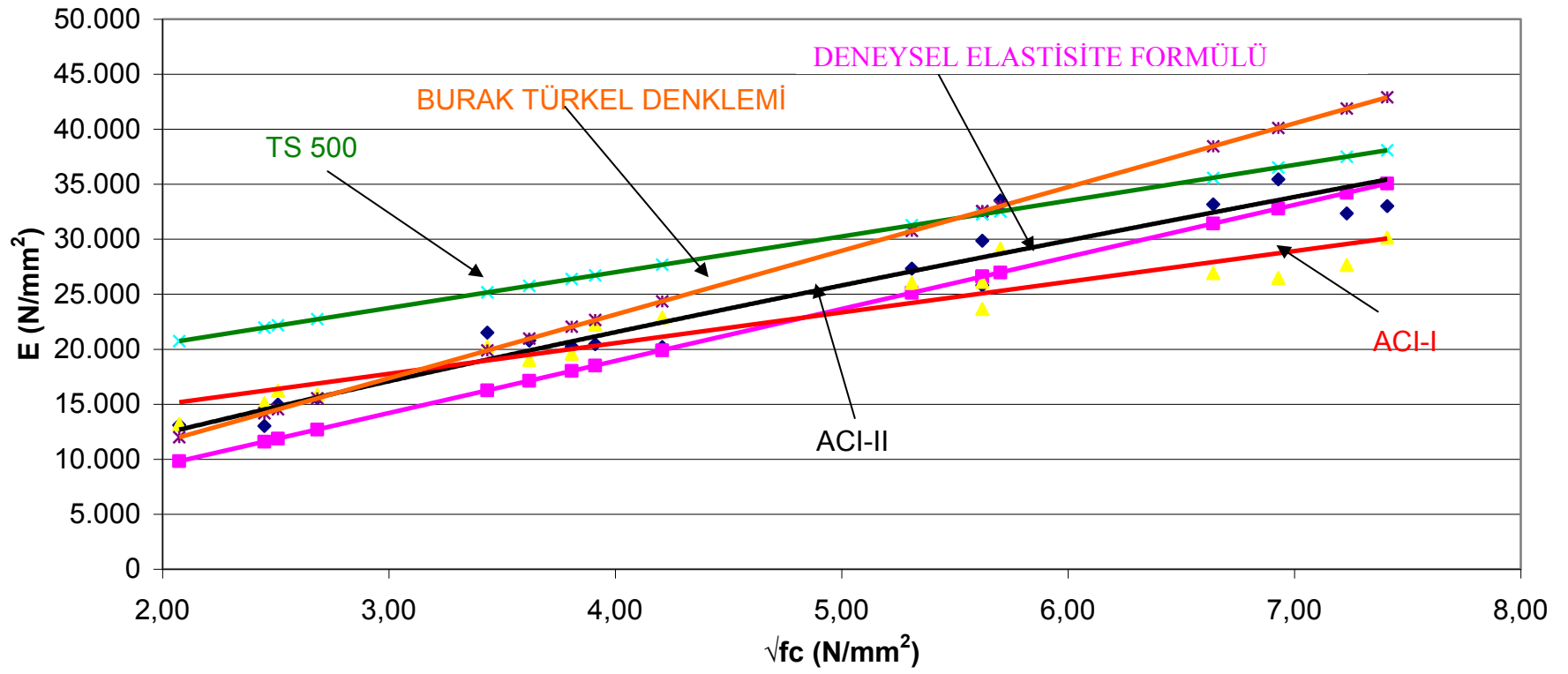


Şekil 4.22 ACI ve DeneySEL Sonuçla Elde Edilen Elastisite Modülü İlişkisi

Şekil 4.23' deki grafik TS 500' de verilen elastisite modülü bağıntısı ile deneySEL elastisite modülleri ile bulunan (4.20) bağıntısının TS 11222' de verilen Standart Beton Basınç Dayanımlarına göre karşılaştırılması ile elde edilmiştir.



Şekil 4.23 TS 500’ de verilen elastisite modülü bağıntısı ile deneysel elastisite modülleri ile bulunan bağıntının TS 11222’ de verilen Standart Beton Basınç Dayanımlarına göre karşılaştırılması



Tablo 4.24 ACI (I), ACI (II), TS 500, Burak Türkel Denklemi ve Deneysel Yoldan Elde Edilen Elastisite Modülü Denklemine Karşılaştırılması

BÖLÜM 5 SONUÇLAR

Yapılan deneylerden sonucunda aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

5.1 Taze Beton Deneyleri Sonuçları

Taze betonun birim ağırlığı arttıkça basınç dayanımı da artmaktadır. Birim ağırlık ile küp dayanımı arasında;

$$f_{C_{küp}} = 0,1595\alpha - 339,16 \quad (5.1)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Bağıntının korelasyon katsayısı $R = 0,93$ 'dür.

Birim ağırlık ile silindir dayanımı arasında;

$$f_{C_{silindir}} = 0,1907\alpha - 409,65 \quad (5.2)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Bağıntının korelasyon katsayısı $R=0,93$ 'dür.

5.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Basınç dayanımları yaklaşık 4 N/mm^2 ile 55 N/mm^2 arasında değişen betonların;

5.2.1 Küp – Silindir Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Silindir dayanımı ile küp basınç dayanımları arasındaki (5.3) bağıntısı bulunmuştur.

$$f_{C_{silindir}} = 0,9164f_{C_{küp}}^{1,0212} \quad (5.3)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı $R=0,96$ 'dır.

Bu bağıntıya göre, çalışmada TS 11222' de beton sınıflarına karşı gelen silindir basınç dayanımları ile bu basınç dayanımlarına karşı gelen ve bağıntı ile bulunan küp basınç dayanımlarının değerleri Tablo 5.1' de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 TS 11222’ deki Beton Sınıflarına Karşı Gelen Küp Basınç Dayanımları

	TS 11222 Basınç Dayanımları	Bağıntı ile Bulunan
Beton Sınıfı	$f_{c_{\text{silindir}}}(\text{N/mm}^2)$	$f_{c_{\text{küp}}}(\text{N/mm}^2)$
C14	14	14.4
C16	16	16.5
C18	18	18.5
C20	20	20,5
C25	25	25.5
C30	30	30.5
C35	35	35.4
C40	40	40.4
C45	45	45.3
C50	50	50.2
C55	55	55.5
C60	60	60.0
C70	70	69.8
C80	80	79.6
C90	90	89.3
C100	100	99.0

TS 11222 verilen silindir – küp basınç mukavemetleri ile deneysel sonuçlarla elde edilen veriler arasında %80’ lere yakın farklılıklar ortaya çıkmıştır.

5.2.2 Küp ve Silindir Basınç Dayanımı ile Su/Çimento Oranı Arasındaki İlişki

Betonda su/çimento (w/c) oranı arttırıldıkça basınç dayanımı azalmaktadır.

Küp basınç dayanımı ile su/çimento (w/c) oranı arasında aşağıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$f_{c_{\text{küp}}} = 74,393e^{-1.7069(w/c)} \quad (5.4)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı $R=0,98$ olarak elde edilmiştir.

Silindir basınç dayanımı ile su/çimento (w/c) oranı arasında aşağıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$f_{C_{\text{silindir}}} = 78,154.e^{-1.7999(w/c)} \quad (5.5)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı $R=0.99$ olarak elde edilmiştir.

5.2.3 Elastisite Modülü ve Su/Çimento Oranı Arasındaki İlişki

Su/çimento (w/c) oranı azaldıkça elastisite modülü azalmaktadır.

Elastisite Modülü ile su/çimento oranı arasında, (5.6) bağıntısı elde edilmiştir. Bu bağıntılarda E , N/mm^2 cinsinde elastisite modülünü ifade eder.

$$E = 41293e^{-0.7397(w/c)} \quad (5.6)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı, $R = 0,97$ dir.

5.2.4 Ultrases Hızı ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Ultrases hızı ile basınç dayanımı doğru orantılı olarak artıp azalmaktadır.

$$f_{C_{\text{küp}}} = 0,0334.e^{1.5159V_{\text{küp}}} \quad (5.7)$$

Küp numune için korelasyon katsayısı $R=0,97$ olarak bulunmuştur.

$$f_{C_{\text{silindir}}} = 0,0118.e^{1,811V_{\text{silindir}}} \quad (5.8)$$

Silindir numune için ise korelasyon katsayısı $R=0,98$ olarak bulunmuştur.

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere basınç dayanımı arttıkça hem küpte hem de silindirde ultrases hızı artmaktadır. Bu da numunedeki boşlukların azaldığını gösterir. Ultrases hızları küplerde silindirlere nazaran daha yüksek olması malzemenin küpün içine daha iyi yerleştiğini gösterir.

5.2.5 Ultrases Hızı ve Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki

Ultrases hızının karesi ile elastisite modülü arasındaki ilişkide (5.9) bağıntısı bulunmuştur.

$$E = 4758,2e^{0,0943V^2} \quad (5.9)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı $R=0,99$ dur.

5.2.6 Komposite ve Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Komposite ile küp ve silindir basınç dayanımları arasındaki ilişki sırasıyla;

$$f_{C_{küp}} = 0,3359V - 240,61 \quad (5.10)$$

$$f_{C_{silindir}} = 8 \times 10^{-43} V^{14.978} \quad (5.11)$$

Küp numuneler için korelasyon katsayısı $R=0,96$, silindir numuneler için ise $R=0,96$ olarak bulunmuştur.

Komposite arttıkça çimento, agrega hacmi arttığından basınç mukavemeti de artmaktadır.

5.2.7 Basınç Dayanımları ile Bolomey ve Feret Bağlılıları Korelasyonu

Feret ve Bolomey bağıntılarındaki katsayılar basınç dayanımlarının ortalama değerleriyle hesaplanmıştır. Bu katsayılar Tablo 4.2’de verilmiştir. Tablo 4.1’de verilen $Kf_{küp}$ ve $Kf_{silindir}$ sırasıyla küp ve silindir Feret katsayılarını , $Kb_{küp}$ ve $Kb_{silindir}$ ise sırasıyla küp ve silindir Bolomey katsayılarını gösterir.

Tablo 4.2’de verilen Feret katsayıları küp numunelerde minimum 159, maksimum 419 N/mm^2 ; silindir numunelerde minimum 190, maksimum 395 N/mm^2 değerlerini almıştır. Aynı şekilde Bolomey katsayıları da küp numunelerde maksimum 14, minimum 36 N/mm^2 ; silindir numunelerde minimum 13, maksimum 34 N/mm^2 değerlerini almıştır.

$$f_{c_{küp}} = 17,59 \ln \left(\frac{c}{c + e + h} \right)^2 + 69,491 \quad (5.12)$$

Küp numuneler için Feret katsayısında Şekil 4.12’deki korelasyon katsayısı $R=0.95$ ’ dir.

$$f_{c_{silindir}} = 258,22 \left(\left(\frac{c}{c + e + h} \right)^2 \right)^{1,0192} \quad (5.13)$$

Silindir numuneler için Feret katsayısında Şekil 4.13’deki korelasyon katsayıları $R=0.96$ ’ dır.

$$f_{c_{küp}} = 27,557 \left(\frac{C}{E + h} - k' \right)^{0,6453} \quad (5.14)$$

Küp numuneler için Bolomey katsayısında Şekil 4.14'deki korelasyon katsayısı R=0,96'dır.

$$f_{c_{silindir}} = 27,29 \left(\frac{C}{E + h} - k' \right)^{0,6716} \quad (5.15)$$

Silindir numuneler için Bolomey katsayısında Şekil 4.15'deki korelasyon R=0,95'dir.

5.2.8 Ultrases Hızı ile Bolomey ve Feret Çarpanları Arasındaki İlişki

Küp numuneler için Şekil 4.16'deki bağıntı bulunmuştur.

$$F_k = 0.0001 e^{1,5016 V_{küp}} \quad (5.16)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı R=0,96'dır.

Silindir numuneler için Şekil 4.17'deki bağıntı bulunmuştur.

$$F_s = 0.0002 e^{1,4855 V_{silindir}} \quad (5.17)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı R=0,92'dir.

Küp numuneler için Şekil 4.18'deki bağıntı bulunmuştur.

$$B_k = 0,0018 e^{1,4736 V_{küp}} \quad (5.18)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı R=0,97'dir.

Silindir numuneler için Şekil 4.19'deki bağıntı bulunmuştur.

$$B_s = 2 \times 10^{-5} e^{2,4868 V_{silindir}} \quad (5.19)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı R=0,92'dir.

5.2.9 Basınç Dayanımları ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki

Basınç dayanımının artmasıyla elastisite modülü de artmaktadır. Burada deneysel olarak bulunan elastisite modülü ile basınç dayanımları arasında (4.19) ve (4.20) bağıntıları bulunmuştur. Bu iki bağıntı da birbirlerine yakın değerler vermektedir.

$$E = 7037,2(\sqrt{f_c})^{0,807} \quad (5.20)$$

$$E = 4182,7\sqrt{f_c} + 4661,9 \quad (5.21)$$

Bağıntıların korelasyon katsayısı; R=0,97 ve R=0,96' dır.

5.3 Sonuç

Betonun elastisite modülüne çakıl agregasının etkisi ile ilgili yapılan deneyler sonucunda;

- Betonun birim ağırlığı arttıkça basınç dayanımının da arttığı,
- Su/çimento (w/c) oranı arttırıldıkça basınç dayanımının ve elastisite modülünün azaldığı,
- Ultrases hızı ile basınç dayanımının ve elastisite modülünün doğru orantılı olarak artıp azaldığı,
- Kompasitenin artması ile basınç dayanımının da arttığı,
- Basınç dayanımının artması ile elastisite modülünün de arttığını tespit edilmiştir.

Bu doğrultuda daha önceden gerek kırmataş gerekse çakıl agregası kullanılarak yapılmış deneysel çalışmalardan elde edilen elastisite modülü-basınç dayanımı bağıntıları ve ACI standardında verilen elastisite modülü denklemleri kullanılarak hesaplanan elastisite modülleri nispeten birbirlerine yakın değerler vermekteyken, TS 500 standardında verilen elastisite modülü denkleminde elde edilen diğerlerinden daha yüksek değerler almıştır. TS 500 standardında mevcut elastisite modülü denkleminin tekrar gözden geçirilmesi ve gerekiyorsa revize edilmesi uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **BAŞEĞMEZ, C.;** 1999 Ağustos. Beton : Dünyanın En Eski Yapı Malzemesi (Çeviri), The Economist
- [2] **www.agrega.org**
- [3] **Akman, S.;** 1987. Yapı Malzemeleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbası ,İstanbul
- [4] **Çağlayan, M., Haberveren, S., İpekoğlu, B., Kurşun, İ.;** 2003., Beton Yapımında Kullanılan Agregaların Özellikleri ve Örnek Bir Kuruluş “İSTON”
- [5] **YAZICI, Ş.;** 2002 Mayıs, Değişik Akışkanlaştırıcıların Betondaki Performansları, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 4 Sayı: 2 sh. 41-52
- [6] **Postacioğlu, B.;** 1986.Beton Cilt 1, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul
- [7] **Postacioğlu, B.;** 1975.Yapı Malzemesi, İTÜ Matbaası Gümüşsuyu, İstanbul.
- [8] **Ersoy, A.;** 2004. Değişik Maksimum Dane Boyutlu Betonların Elastisite Modülleri, İ.T.Ü. , İstanbul
- [9] **Onaran, K.;**1991. Malzeme Bilimi, İ.T.Ü. Matbaası Gümüşsuyu, İstanbul
- [10] **Kocataşkın F.;** 1976. Yapı Mühendislerine Malzeme Bilimi, İTÜ Matbaası Gümüşsuyu, İstanbul.
- [11] **Postacioğlu, B.;** 1987.Beton Cilt 2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [12] **Oktar, O.N.;** Ders Notları
- [13] **Akman, S.;** Ders Notları
- [14] **Popovic, S.;** 1998, Strength and Related Properties of Concrete; a quantitative approach; New York
- [15] **Nebit, J.K.;** 1966, Structural Lightweight Aggregate Concrete, London
- [16] **Shih, T.S., Lee, G.C., Chang, K.C.;** 1989. On Static Modulus of Elasticity Of Normal-Weight Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.115, No.9

- [17] **Türkel B.**, 2002. Betonda Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişkiler, İTÜ, İstanbul
- [18] **Postacıoğlu, B.**, 1981. Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt 1, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul
- [19] **Boumiz, A., Vernet, C., Tenoudji, F.C.**, 1996. Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages, Advanced Cement Based Materials, Vol.3 No.3-4.
- [20] **TS 500.**, 1984. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [21] **Neville, A.M.**, 1996. Properties of Concrete, J. Willey, New York
- [22] **ACI 318-95.**, Building Code Requirements of Structural Concrete, 1996, Use of Concrete in Building – Design, Specifications and Related Topics, ACI Manual of Concrete Practice Part 3, Detroit, Michigan.
- [23] **ACI 363R-92.**, Materials and General Properties of Concrete, 1994, State of The Art Report on High Strength Concrete, ACI manual of Concrete Practice Part 1 , Detroit, Michigan.
- [24] **Postacıoğlu, B.**, 1966. Yapı Malzemesi Esasları, Cilt 1, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul
- [25] **Bayazıt, Ö.L.**, 1980. Beton ve Deneyleri, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara
- [26] **TS 706**, 1980, Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [27] **Şengül, Ö.**, Agrega Türünün Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Davranışına Etkisi, İ.T.Ü., İstanbul
- [28] **Zhou, F.P., Lydon, F.D., Barr, B.I.G.**, 1995. Effect of Course Agregate on Elastic Modulus and Compressive Strength og High Performance Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25 No.1. pp. 177-186
- [29] **Taşdemir, M.A.**, 1982. Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul
- [30] **TS 3526**, 1980. Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

- [31] **TS 3529**, 1980. Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [32] **TS 2871**., 1977, Taze Beton Kıvam Deneyi (Çökme Hunisi Metodu İle), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [33] **TS 802**, 1985. Beton Karışım Hesapları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [34] **TS 3452**,1988.Beton Kimyasal Katkı Maddeleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [35] **TS 3530**, 1980. Beton Agregalarının Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [36] **TS 11222**, 2001. Beton – Hazır Beton – Sınıflandırma, Özellikler, Performans, Üretim ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

ÖZGEÇMİŞ

13.01.1979 Bandırma’da doğdu. İlkokulu Bandırma 17 Eylül İlkokulu’nda, orta okul Bandırma K.E.V. Özel Lisesi’ nde, liseyi de Bursa A.O.S. Fen Lisesi’nde tamamladıktan sonra 1997 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi ve 2001 yılında mezun oldu. Şu an İstanbul Teknik Üniversitesi’nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.