İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UÇUCU KÜLLÜ DÜŞÜK VE YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONLARIN ELASTİKLİK MODÜLÜNÜN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Râná TANGÜNER

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UÇUCU KÜLLÜ DÜŞÜK VE YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONLARIN ELASTİKLİK MODÜLÜNÜN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Rânâ TANGÜNER
501031197

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2007

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Fevziye AKÖZ (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanması sırasında yardımlarını gördüğüm, bilgisinden ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a;
Çalışmalarımdaki ilgi ve yardımlarından dolayı Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalındaki tüm hocalarıma, araştırma görevlilerine ve laboratuvar çalışanlarına;
Deneysel çalışmalarımda bana malzeme sağlayan Lafarge Aslan Çimento'ya ve İnka Kimya'ya ve;
Tüm hayatım süresince, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Haziran 2007 Rânâ TANGÜNER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ **ii**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **viii**
ÖZET **ix**
SUMMARY **x**
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. Karışım Suyu 4
1.3.4. Katkı Maddeleri 4
1.4. Betonun Sınıflandırılması 6
1.5. Betonun Basınç Dayanımı 7
1.5.1. Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler 7
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 Agregaların 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 15
1.7. Betonun Elastisite Modülü 19
1.7.1. Gerilme-Deformasyon Eğrisi ile Elastisite Modülünün Hesaplanması 20
1.7.1.1. Dinamik Elastisite Modülü 21
1.7.1.2. Statik Elastisite Modülü 21
1.7.1.3. Betonun Elastisite Modülü Tayini 23
1.7.2. Elastisite Modülünün Rezonans Frekansı Metodu ile Tayini 27
1.7.3. Elastisite Modülünün Ultrases Hızının Ölçülmesi ile Tayini 28
1.7.3.1. Ultrasesin Özellikleri 28
1.7.3.2. Cismin İçinde Ses Hızının Tayini 29
1.7.3.3. Ultrases Hızını Etkiyen Faktörler 32

1.7.4. Betona Zarar Vermeden Uygulanan Metotların Avantajları 33
1.7.5. Değişik Metotlarla Bulunan Elastisite Modüllerinin Karşılaştırılması 33
1.8. Uçucu Kül 34

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 36
2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 36
2.1.1.Agrega Özellikleri 36
2.1.1.1.Doğal Kum 36
2.1.1.2. Kırmataş Kumu 36
2.1.1.3. Kırmataş I 36
2.1.1.4. Kırmataş II 37
2.1.1.5. Karışım 37
2.1.2. Çimento ve Uçucu Kül Özellikleri 38
2.1.3. Karışım Suyu 40
2.1.4. Katkılar 40
2.2. Beton Karışımları 40
2.3. Beton Üretimi 41
2.4. Taze Beton Deneyleri 42
2.4.1. Birim Ağırlık 42
2.4.2. İşlenebilme Deneyleri 42
2.4.2.1. Çökme (Slump) Deneyi 42
2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri 43
2.5.1. Basınç Deneyi 43
2.5.2. Ultrases Deneyi 43

3. DENEY SONUÇLARI 44
3.1. Taze Beton Deney Sonuçları 44
3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları 46
3.2.1. Basınç Deneyi Sonuçları 46
3.2.2. Elastisite Modülü Değerleri 46
3.2.3. Ultrases Hızı Sonuçları 47
3.3. Kullanılan Malzemelerin Maliyetleri 48

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 50
4.1. Birim Ağırlıkla Basınç Dayanımları Arasındaki İlişkiler 50
4.2. Birim Ağırlıkla Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler 51
4.3. Elastisite Modülleri ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki 51
4.4. Elastisite Modülleri ile Su/Bağlayıcı Oranları Arasındaki İlişki 52

4.5. Basınç Dayanımları ve Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki 53
4.6. Basınç Dayanımları ve Su/Bağlayıcı Oranları Arasındaki İlişki 54
4.7. Beton Karışımlarının Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki 55
4.8. Beton Karışımlarının Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki 56
4.9. Basınç Mukavemeti ve Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki 57
4.10. Basınç Mukavemeti ve Ultrases Hızı Arasındaki İlişki 58

5. SONUÇLAR 60
KAYNAKLAR 62
ÖZGEÇMİŞ 64

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
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…….	37
Tablo 2.2.	Agrega elek analizleri ve karışım granülometrisi……...	37
Tablo 2.3.	Çimentonun fiziksel özellikleri…….	38
Tablo 2.4.	Çimentonun basınç dayanımı sonuçları……	39
Tablo 2.5.	Çimento ve uçucu külün kimyasal özellikleri…….	39
Tablo 2.6.	Akışkanlaştırıcı özellikleri……	40
Tablo 2.7.	Üretilen betonun kodlanması…….	41
Tablo 3.1.	Taze beton deney sonuçları……..	44
Tablo 3.2.	Üretilen betonların hava miktarları ve kompasiteleri	45
Tablo 3.3.	Üretilen betonların karışımına giren gerçek malzeme miktarları	45
Tablo 3.4.	Basınç deneyi sonuçları	46
Tablo 3.5.	Elastisite modülleri……...	47
Tablo 3.6.	Ultrases hız sonuçları……..	48
Tablo 3.7.	Üretilen betonların karışımına giren malzemelerin maliyetleri	49

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
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……...	12
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……	18
Şekil 1.7	Gerilme – deformasyon grafiği…….....	21
Şekil 1.8	Gerilme – deformasyon grafiği…….....	22
Şekil 1.9	Gerilme – deformasyon eğrisinin gerilme hızıyla değişimi…….....	23
Şekil 1.10	Gerilme – deformasyon eğrisi..…….....	24
Şekil 1.11	Gerilmenin değiştirilmesiyle oluşan gerilme deformasyon diyagramı.....	25
Şekil 1.12	Rezonans frekansı metodu deney düzeneği.....	27
Şekil 1.13	Ultrases hızı tayini deney düzeneği.....	30
Şekil 1.14	Ses hızının gerilme ile değişimi.....	32
Şekil 2.1	Karışım Granülometri Eğrisi …….....	38
Şekil 4.1	Birim ağırlıkla silindir basınç dayanımları arasındaki ilişki……	50
Şekil 4.2	Birim ağırlıkla elastisite modülü arasındaki ilişki……	51
Şekil 4.3	Su/çimento oranı ile elastisite modülü arasındaki ilişki……...	52
Şekil 4.4	Su/bağlayıcı oranı ile elastisite modülü arasındaki ilişki…….	53
Şekil 4.5	Su/çimento oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki…	54
Şekil 4.6	Su/bağlayıcı oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.7	Beton karışımlarının basınç dayanımları arasındaki ilişki...…...	56
Şekil 4.8	Beton karışımlarının elastisite modülleri arasındaki ilişki.....	57
Şekil 4.9a	Basınç mukavemeti-elastisite modülü arasındaki ilişki.....	57
Şekil 4.9b	Basınç mukavemeti-elastisite modülü arasındaki ilişki……...	58
Şekil 4.10	Ultrases hızı-elastisite modülü arasındaki ilişki…….	59

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
$\mathbf{f_c}$	: Basınç Dayanımı
$\mathbf{fc_{silindir}}$	**:** Silindir Basınç Dayanımı
E	**:** Elastisite Modülü
$\mathbf{f_{cc}}$	**:** Çimento Norm Dayanımı
V	**:** Ultrases Hızı
f	**:** Frekans
t	**:** Zaman
g	**:** Yerçekimi İvmesi
L	**:** Uzunluk
d	**:** Çap
ν	**:** Poisson Oranı
R	**:** Korelasyon Katsayısı

UÇUCU KÜLLÜ DÜŞÜK VE YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONLARIN ELASTİKLİK MODÜLÜNÜN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, betonun elastisite modülüne uçucu külün etkisi incelenmiştir.Çalışmanın amacı düşük ve yüksek mukavemetli betonlarda elastiklik modülünün incelenmesi ve buna dayanarak betonun diğer özellikleri hakkında da bazı sonuçlara varılabilmesidir. Betonun elastisite modülü çok uzun yıllardır araştırma konusu olmuş ve bu araştırmada da, üretilen 15 tip betonun 6 tanesi sadece portland çimentosuyla,9 tanesi de uçucu kül ilave etmek suretiyle hazırlanmıştır.

Bu konu çerçevesinde farklı çimento dozajlarında, farklı su/çimento oranlarında ve de farklı karışımlarda 15 ayrı seri beton üretilmiştir. Her seri altı adet silindir numuneden oluşmaktadır. Gerek sadece portland çimentosu kullanılarak hazırlanan referans numuneler, gerekse uçucu kül içeren numuneler üzerinde kalıplara konulmadan önce taze betonda birim ağırlık ve çökme deneyleri yapılmıştır. Üzerinde taze beton deneyleri yapılan ve 150x300 mm boyutlarında silindir kalıplara yerleştirilen numuneler, 27 gün süreyle kür havuzunda bekletilmiş ve 28. gün çıkarılarak numunelere başlık yapılmıştır.

Sertleşmiş betonlarda elastisite modülü, basınç dayanımı ve ultra ses hızı ile ilgili deneyler yapılmıştır. Bu deneysel verilerden yararlanılarak elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki yada su/çimento oranı ile ultra ses hızı arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

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

THE INVESTIGATION ON THE MODULUS OF ELASTICITY OF FLY ASH CONCRETE OF LOW AND HIGH RESISTANCE

SUMMARY

In this study, the effect of fly ash on the modulus of elasticity of concrete has been investigated.The purpose of the study is to investigate the modulus of elasticity of low and high resistance concrete and according to this,to obtain some results about other properties of concrete. The modulus of elasticity of concrete has been studied for a long period of time and in this research, 15 kinds of concrete were produced. 6 of them were prepared with only Portland cement,9 of them were produced as adding fly ash in Portland cement.

According to this topic 15 different series of concrete with different cement dosages, water/cement ratios, admixtures are prepared. Each concrete series consist of 6 cylinder specimens.Before placing into forms,fresh concrete tests were applied over the samples of both reference concrete prepared with only Portland cement and concrete including fly ash.They are unit weight and slump tests.The samples,on which these tests were applied and placed into 150 x300 mm cylinderical forms,have been exposured for 27 days and on the 28.th day edging strips were done.

Some experiments that related with modulus of elasticity, compressive strength and ultra pulse velocity were applied over these hardened concrete. By using these experimental data 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 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 yapı teknolojisinin 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 için beton, inşaat mühendisliğinde hayati bir öneme sahip olmuştur. Betonun ilkel halini kullanarak kollozyumlar, anıtlar ve millerce uzunluğunda yol yapmışlardır. Betonun bu güne kadar yaygın olarak kullanılması onun klasik bir malzeme olarak algılanmasını sağlamıştır; Bu durum betonun yeniliklere kapalı bir malzeme olduğunu göstermez, aksine, yapılan çalışmaların da gösterdiği üzere beton geliştirilmeye en açık yapı malzemesidir (1).

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

Beton çağdaş toplumlarda yapı teknolojisinin temelini oluşturan malzemelerin en önemlilerinden biridir. Çevremize bakıldığında, binalar, yollar, köprüler, barajlar, santraller, istinat duvarları, su depoları, limanlar, havaalanları, kent mobilyaları v.b. betondan yapıldığı görülür. 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 üretilebilmesidir. 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 agrega tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba agrega tanelerinin de harçla bütünüyle kaplanmış olması gerekir. Bu sistem içindeki bağlayıcı malzeme olan çimentonun suyla reaksiyonu (hidratasyon) sonucunda beton dayanım kazanır (2). Agregalar, bağlayıcı maddeler kullanılarak sürekli bir yapıya kavuşturulur. Üretim aşamasında yüksek viskoziteye sahip olma özelliği betonu doğal taşlardan ayıran en büyük özelliğidir. Oysa doğal taşlar belli bir form verilmeden kullanılamazlar ve sürekli taşıyıcı bir ortam meydana getirmezler.

Tablo 1.1. Betonun çeşitli özellikleri

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} ^oC
Yoğunluk	2300 kg/m^3

1.2. Betonun Yapısı

Beton, agrega 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 agrega 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.

Tablo 1.2 Çimento hamuru, harç ve betonun yapısı

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

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. Betonu 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).

Tablo 1.3 Betonu oluşturan maddeler

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

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" ya da "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 hidratasyon adı verilen kimyasal reaksiyonu başlatıp sürdürmek ve betonun işlenebilirliğini 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 alınarak 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

• Kütle betonlarında hidratasyon ısısının düşürülmesi için çimento miktarının azaltılması durumunda aynı işlenebilirliğin sağlanması. Katkının bu amaç ile diğer

beton türleri için de kullanılması aynı zamanda daha ekonomik bir beton üretiminin sağlanması anlamına gelmektedir.

• Kolay yerleşmenin sağlanması için özellikle ulaşılamayan köşelerde işlenebilmenin artırılması.

Akışkanlaştırıcıların genel olarak betondaki olumlu etkileri, sabit işlenebilmede su gereksinimini % 6,5'dan fazla azaltabilir, her yaştaki basınç dayanımını %10'dan fazla artırabilir, daha sıkı bir beton elde ederek donma çözülmeye, agresif ortama dayanıklılık artar, geçirimsizlik sağlanır, yüzey görünümü düzelir. Olumsuz etkileri ise priz gecikebilir, rötre artabilir, çökme kaybı meydana gelebilir (5).

- Akışkanlaştırıcı katkılar;

Betonun işlenebilir özelliğini arttırıcı katkı maddeleridir. Aynı zamanda beton karma suyu ihtiyacını azalttıklarından betonun dayanımını da arttırırlar. Bu guruba giren katkılar çoğunlukla çimento ağırlığının %0,2 -0,5 arası oranlarda kullanılır.

- Süper akışkanlaştırıcılar;

Daha çok yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan bu katkılarla betonun su/çimento oranını 0,25' lere düşürmek mümkündür. Ancak süper akışkanlaştırıcılar normal akışkanlaştırıcılara kıyasla %1-%3 gibi çok daha yüksek dozajlarda kullanılır.

- Priz süresini değiştiren katkılar;

Taze betonun priz adı verilen sertleşme sürecinin bazı koşullarda hızlandırılması veya geciktirilmesi istenebilir. Özellikle yaz aylarında, uzun taşıma mesafelerinde priz geciktiriciler, kış aylarında ise priz hızlandırıcılar kullanılır.

- Hava sürükleyici katkı maddeleri;

Soğuk iklim koşullarında donma-çözülme tehlikesine karşı koruyan bu maddeler, aynı zamanda betonun işlenebilirliğini arttırırlar.

- 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 ya da betonun belirli bir özelliğini daha iyi bir duruma getirmek amacıyla kullanılan katkılar ile istenilen hedeflere ulaşırken diğer bazı özelliklerde iyiye doğru olmayan değişmeler olabilir. Böyle bir durumu anlayabilmek için belirli koşullar altında katkı kullanarak ve kullanmayarak kıvam deneyi, rötre deneyi ve mukavemet deneyleri 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. Hafif betonlar yalıtım amaçlı olarak yada dayanım/ağırlık oranının yüksek olduğu koşullarda taşıyıcı olarak 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 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 numuneler ve standart deney yöntemleri kullanılarak belirlenir. Daha önce belirtildiği gibi, birçok yapıda normal dayanımlı (28 günlük basınç dayanımı 20-40 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 mertebesindedir. 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 da beton dayanımları farklı değerler alabilmektedir (7).

Betonun basınç dayanımına 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

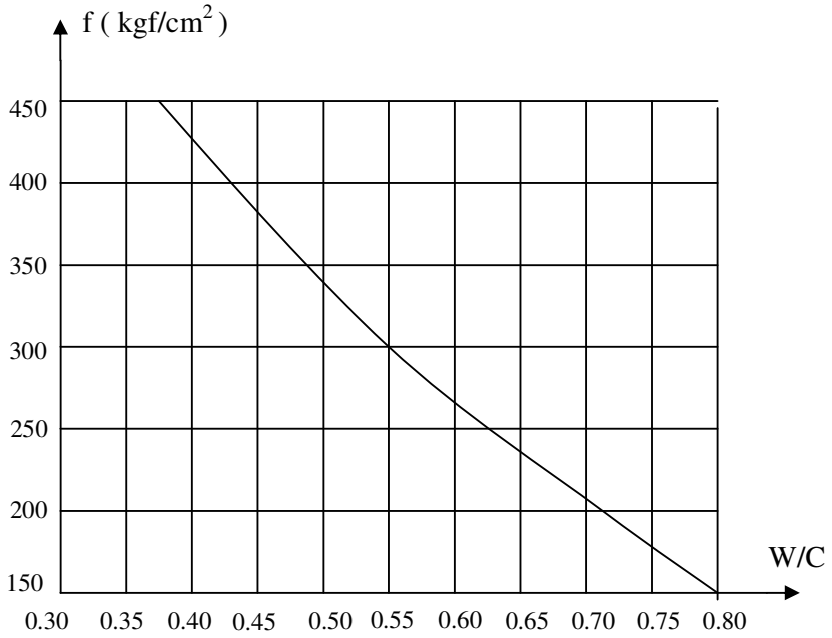
Beton yeterince sıkıştırılmazsa ya da sıkıştırma işlemi sırasında ayrışırsa içinde hava boşlukları oluşur. Bu durum basınç dayanımını olumsuz yönde etkiler. Kalıbına iyi bir şekilde yerleştirilmiş bir betonda bile hava boşlukları kalabilir. Çimento dozajının düşük olması, agrega taneleri arasında kalan boşluğun iyi bir şekilde çimento hamuru ile dolmamasına neden olur. Çimento dozajının minimum dozajdan küçük olmaması için granülometrisi uygun bölgede kalan agrega 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 agrega karışımındaki en büyük tane boyutunun mm cinsinden değeridir. Bu formüle göre, agrega boyutu arttıkça, minimum dozaj azalmaktadır. Bunun sebebi, granülometrisi uygun bölgede kalan agrega 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 hidratasyonun 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, hidratasyon 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, hidratasyon 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.

-Kompasite 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 m^3 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 m^3 yazabiliriz.

Betonun kompasitesini K olarak ifade edersek;

$K = \frac{c+u+v}{1m^3} = 1-(e+h)$ 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;

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

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, yine de 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 konsantrasyonunun beton dayanımı ve elastisite modülü 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 arttırılması ile çimento hamurunun hacmi 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 noktada 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 ıslatmak 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 karışımda agregalar tarafından tutulur ve bunun yanı sıra çimento ile birleşerek bağlayıcı madde çimento hamurunu oluşturur.

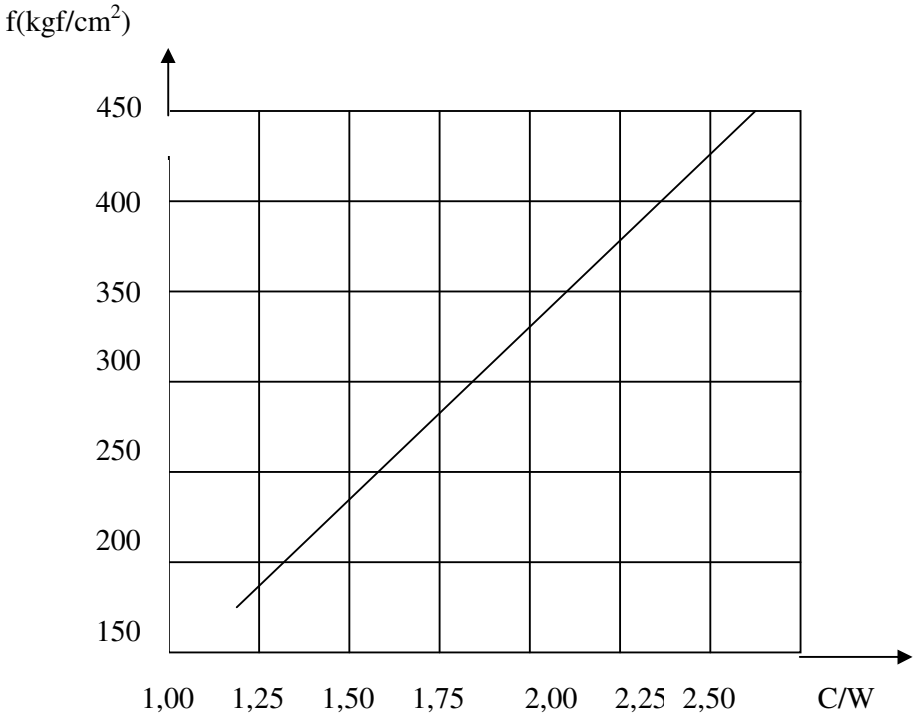
Su miktarını ayarlamak, beton üretimindeki en hassas ve zor uygulamalardan bir tanesidir. Her çimento ve agrega karışımı için optimum yani en uygun bir su miktarı vardır. Ancak optimum değerde su kullanılmasıyla maksimum dayanımlı beton üretilebilir. Bu noktada karışımda su miktarının uygun değerin üzerinde 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 arttırır 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 1.2`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 agrega betonda bir dolgu maddesi olarak işlev görür diyebiliriz. Ancak agreganın beton içinde kullanılmasının tek sebebi ekonomik oluşu değil, sağlamış olduğu bazı teknik avantajlardır. Betonda agrega kullanılmasının sağladığı teknik özelliklerin başında, sertleşen betonun hacim değişikliğini önlemesi veya azaltması, sertleşmiş betonun aşınmaya karşı dayanımını arttırması, çevre etkilerine karşı dayanıklılığını arttırması ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonun taşımakta olduğu yüklere karşı dayanımı sağlayabilmesi gelir.

Agrega, gereken mukavemete sahip olmalı ve dış etkenlere dayanabilmelidir. Agreganın fiziği ve mekanik özellikleri istenilen şartları karşılayabilecek nitelikte olmalıdır. Örneğin, aşınmaya maruz kalabilecek bir betonda kullanılan agreganın aşınma mukavemetinin yüksek olması ya da 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 özelik 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 çimento 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 arttırırlar (2). Tıpkı ince agrega oranının artmasında olduğu gibi, çimentonun inceliğinin fazla olması ve çimentonun su tutma yeteneğinin artması da iç sürtünmeyi fazlalaştıran olgulardır. Kumun biçimsizliği işlenebilme üzerinde olumsuz etki oluşturur. Yassı taneler içeren ve çok ince kumlar sakıncalıdırlar.

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 kırmataş ve kırma kum kullanılmıştır.

1.6. Beton Gerilme-Deformasyon Diyagramları

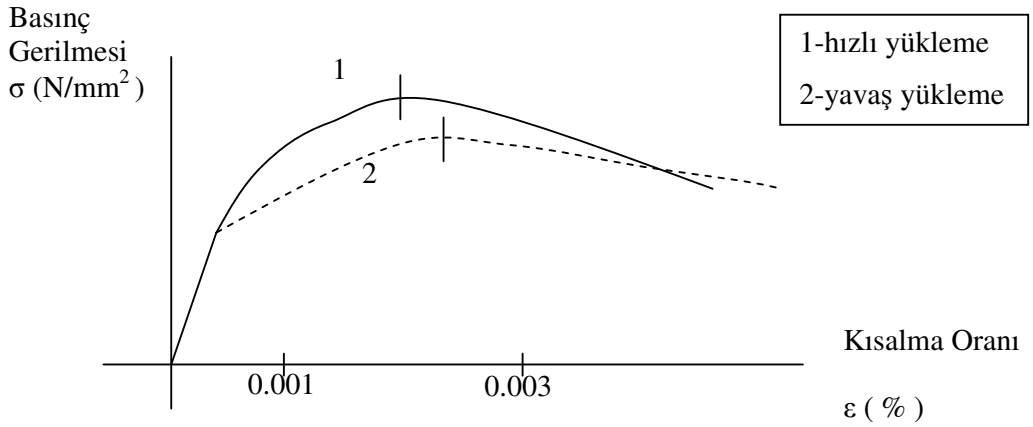
1.6.1. Gerilme-Deformasyon İlişkisi

Malzemelerin mekanik davranışı incelenirken homojen ve sürekli ortamlar oldukları varsayılır ve parça boyutlarından soyutlamak için kuvvet yerine kuvvet şiddeti anlamına gelen gerilme, boyutlarda oluşan değişmeler 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 grafiktir. Bu grafiğin çizilmesi iki farklı yöntemle yapılabilir.

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

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 arttırılması durumunda ise betonun dayanımını belirgin ölçüde arttırırken deformasyonu da belirgin ölçüde azaltır. Fakat dayanımdaki artışlarla deformasyondaki azalmalar sabit kalmaktadır (7).

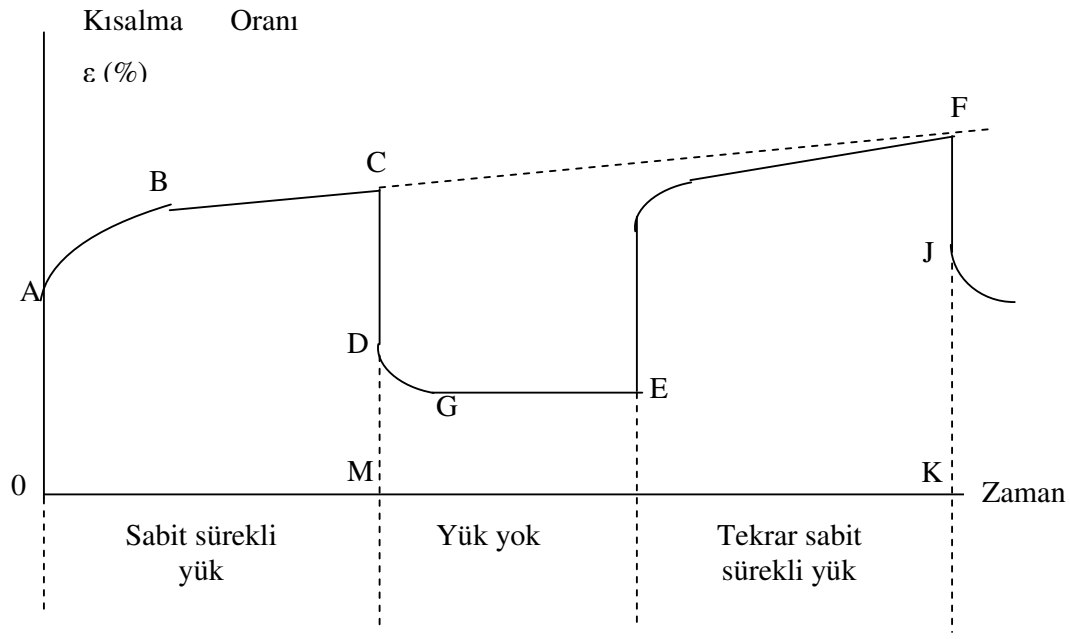
Beton çimento hamuru ile birlikte hareket eder. Özellikle sürekli yükler altındaki sünme çimento hamurunun önemli bir özelliğidir. Betonun içinde bulunan agrega çimento hamuruna göre daha rijit olduğundan beton çimento hamuru ile simetrik deformasyon gösterir.

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, birçok 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 $\Delta\varepsilon$ 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;

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = K(\varepsilon_0 - \varepsilon) \tag{1.2}$$

Denkleminin entegrali,

$$\sigma = K(\varepsilon_0 \varepsilon - 1/2\ \varepsilon^2) \tag{1.3}$$

İfadesini verir.

ε_0 maksimum kısalma oranı ve R malzemenin maksimum dayanımı olmak üzere, $\varepsilon = \varepsilon_0$ olduğu zaman $\sigma = R$ olduğuna göre betonun gerilme deformasyon eğrisi için

$$\sigma = R\, \varepsilon/\varepsilon_0 \ (2 - \varepsilon/\varepsilon_0) \tag{1.4}$$

Parabolü gösteren şu fonksiyon bulunur.

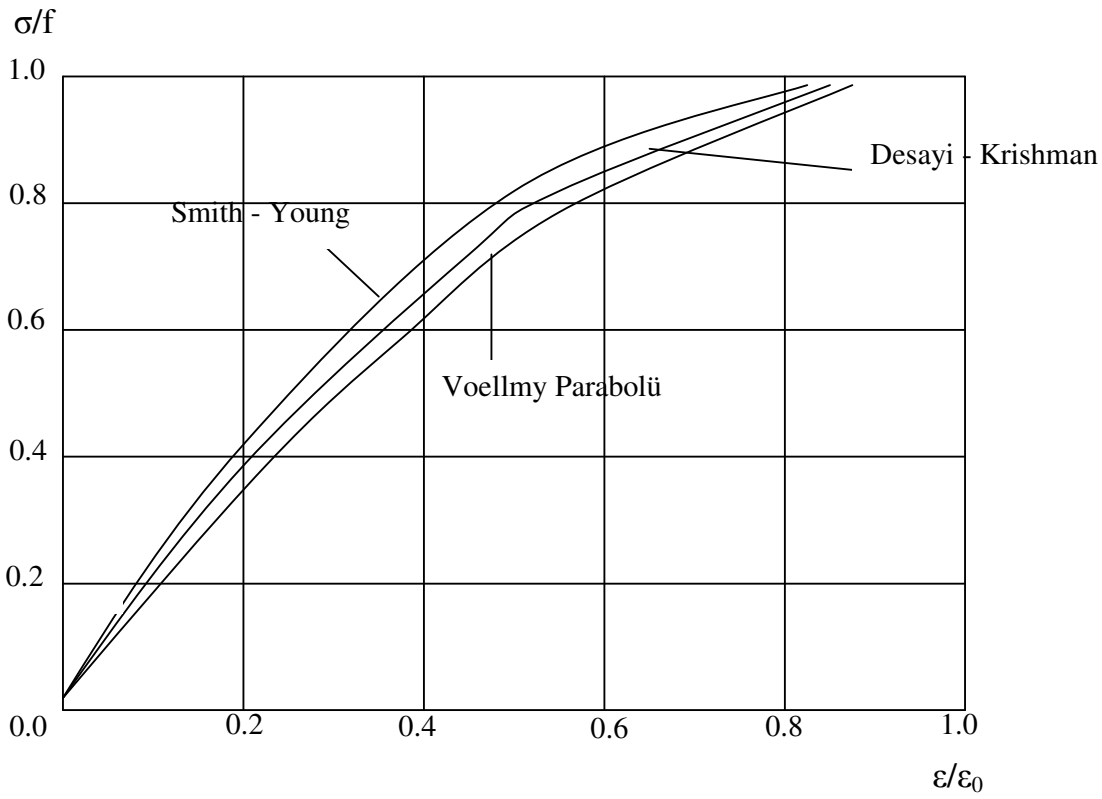
İsviçre'de Voellmy tarafından bulunan bu matematik denklemine göre çizilen eğri birçok halde betonun deney sonuçlarına dayanılarak bulunan gerilme deformasyon eğrisi ile örtüşmektedir.

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

Smith-Young formülü $\sigma = R \text{ x } (\varepsilon / \varepsilon_0)\, e^{(1-\varepsilon/\varepsilon_0)}$ (1.5)

Desay ve Krishan formülü ; $$\sigma = \frac{2R\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}{1+\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \tag{1.6}$$

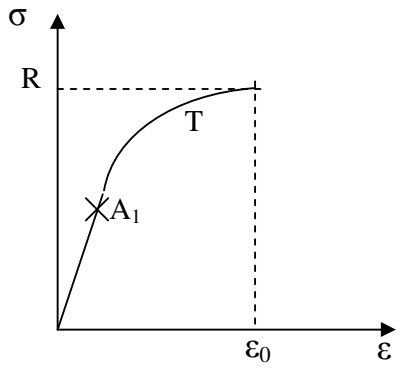
Şekil 1.5'de görüldüğü gibi gerilme deformasyon eğrisi ile ε ekseni arasında kalan alan veya bağıl alan denilen karakteristik en büyük değerin Smith – Young parabolünde en küçük değerini Voellmy parabolünde almaktadır. Desayi ve Krishnan parabolüne ait bağıl alan ise bu iki parabolün arasında kalmaktadır. 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:

$\sigma = E.\ \varepsilon \qquad \sigma < \sigma_A$ 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 edilir.

1.7. Betonun Elastisite Modülü

Beton gerçek anlamda elastik bir malzeme olmasa da, özellikleri arasında en çok kullanılan elastik sabit, elastisite modülüdür. Basitçe tek eksenli basınç ya da çekme altında malzemenin ani şekil değiştirme ölçüsü olarak tanımlanır (12). Bir malzemeye yük uygulanması sonucu şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Uygulanan yük kaldırıldığı zaman malzeme ilk şekline dönebilir ya da 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 yüklemede bu bağıntı $\sigma = E.\varepsilon$ (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 (12). Bu durumda su/çimento (W/C) oranını azaltılarak elastisite modülünü artırmak en geçerli yoldur. Bununla birlikte bu etki basınç dayanımı kadar telaffuz edilmez (12).

Elastisite modülü, kullanılan agrega boyutu ve miktarına oldukça duyarlıdır. Örneğin kırmataş kullanılarak üretilmiş bir betonun elastisite modülü düşük iken, ayın betonda yuvarlak çakıl kullanıldığında elastisite modülünün yüksek çıktığını görmek mümkün olabilir (13). Agrega dane boyutunun belli oranda artırımı veya yoğunluğu derecelendirilmiş agrega kullanımı elastisite modülünü artırır. Bağlayıcı madde olarak çimentoya ilaveten uçucu kul 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 (14).

1.7.1. Gerilme–Deformasyon Eğrisi ile Elastisite Modülünün Hesaplanması

Elastisite modülünü hesaplarken beton numunesine basınç uygulanarak ve betondaki deformasyonları gerilmelere göre kaydederek elde edilen gerilme-deformasyon eğrisini kullanmak en uygun yöntemdir. Ancak yeni betonlarda plastisite yanal deformasyonlara yol açtığından pek uygun değildir (15).

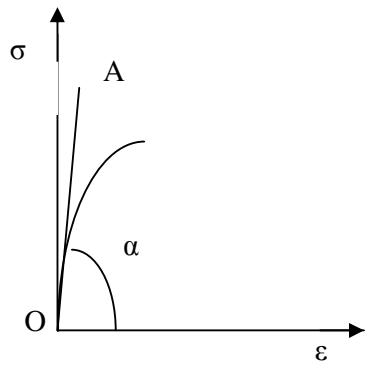
Betonlarda, gerilme–deformasyon eğrisinin lineer olmamasından dolayı, iki tür elastik modülün tanımı gerekmektedir. Bunlardan biri dinamik elastiklik modülü diğeri ise statik elastiklik modülüdür (11).

1.7.1.1. 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 tgα bize betonun dinamik elastisite modülünü verir (11).Bu durum Şekil1.7'de görülmektedir.

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 (16), (1.7) formülüyle deformasyon hesaplanır.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_t} \qquad (1.7)$$

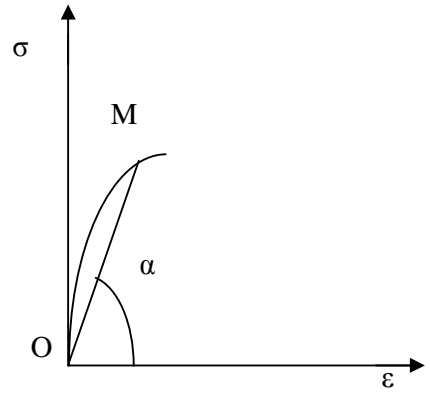


Şekil 1.7 Gerilme – Deformasyon Grafiği

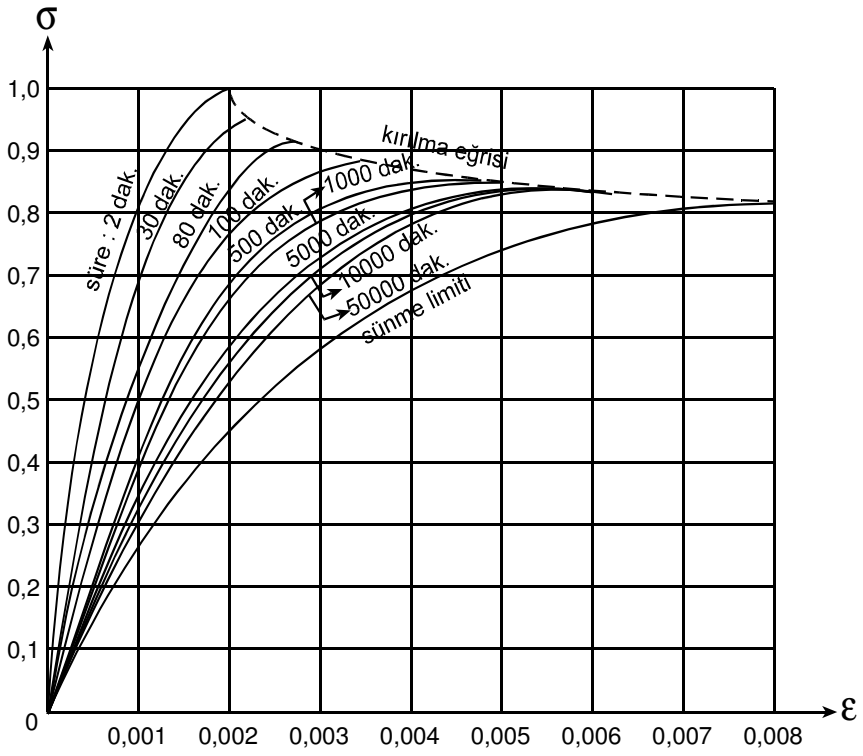
1.7.1.2. Statik Elastisite Modülü

Bu modül gerilme – deformasyon eğrisinin herhangi bir M noktasının koordinat

merkezini birleştiren OM doğrusunun eğimidir. E_s = tgα' dır. Bu modülün bilinmesiyle deformasyondan derhal gerilmeyi 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 (16).

1.7.1.3. Betonun Elastisite Modülü Tayini

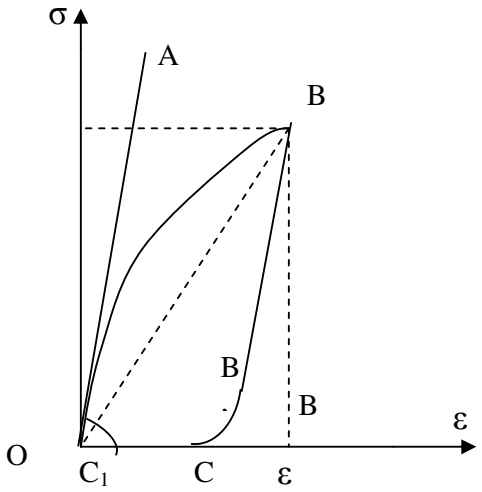
Elastisite modülü gerilme– deformasyon eğrisinin fonksiyonu saptanmışsa kolaylıkla tayin edilebilir. Bu saptanan fonksiyonun ε'a göre türevinin ε=0 için değeri E modülünü verir. Voellmy ve Smith – Young fonksiyonları için bu metot uygulanırsa;

$$E = \frac{eR}{\varepsilon_0} \qquad \text{(Voellmy Fonksiyonu)} \qquad (1.8)$$

$$E = \frac{eR}{\varepsilon_0} = \frac{2.72R}{\varepsilon_0} \qquad \text{(Smith - Young Fonksiyonu)} \tag{1.9}$$

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 (16).

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \tag{1.10}$$

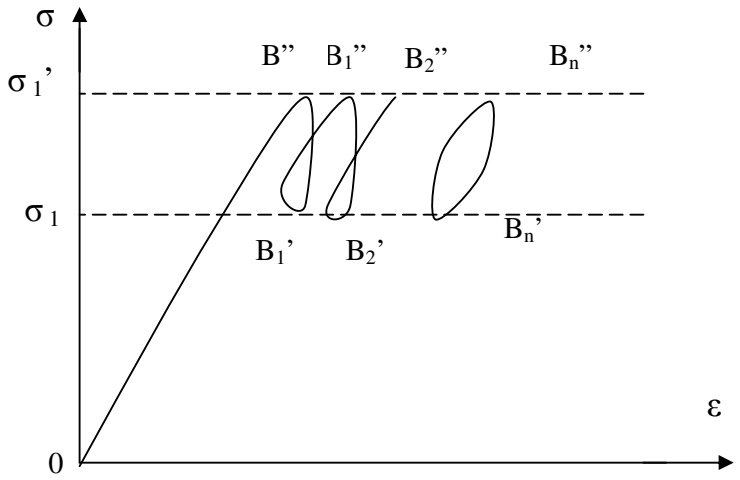


Şekil 1.10 Gerilme – Deformasyon Eğrisi

1.7.1.2'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;

$$E_s = \frac{f/3 - 5}{\varepsilon_f/3 - \varepsilon_5} \tag{1.11}$$

ε_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 (16). Fakat betonun heterojen yapısı dikkate alındığında elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişki komplekstir(17). Betonun elastisite modülü betonun basınç dayanımından etkilenir (18). 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 (19). Bu sayede basınç dayanımının bilinmesi halinde matematiksel olarak elastisite modülü yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bu konuda en çok kullanılan bağıntılar;

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

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/cm^2 cinsinden yerine konulacak ve ayni 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 (16).

TS 500 de elastisite modülünü deneysel yoldan hesaplayan formül;

$$E_{cj} = 3250\sqrt{f_{ckj}} + 14000 \tag{1.12}$$

f_{ckj} N / mm^2 cinsinden betonun j. günündeki karakteristik basınç dayanımıdır. E_{cj} ise gene N / mm^2 cinsinden j. gündeki elastisite modülü olmaktadır (18). Fransa'da Dreux, elastisite modülünün $\sqrt[3]{f}$ değişkenine bağlı olarak şu bağıntıyı önermiştir;

$$E_d = 46800\sqrt[3]{f} \tag{1.13}$$

f, ortalama basınç dayanımı ve E_d kgf/cm^2 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 (20).

$$E_c = 4730\sqrt{f} \tag{1.14}$$

Yine ACI komitesi tarafından statik elastisite modülü için başka bir bağıntı olan aşağıdaki bağıntı verilmiştir (21).

$$E_s = 3320\sqrt{f_c} + 6900 \tag{1.15}$$

Yukarıdaki bağıntılarda f_c N / mm^2 cinsinden basınç dayanımını, Es ise N / mm^2 cinsinden statik elastisite modülünü göstermektedir.

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

$$E_s = 43000\rho^{1.5}\sqrt{f_c} * 10^{-6} \tag{1.16}$$

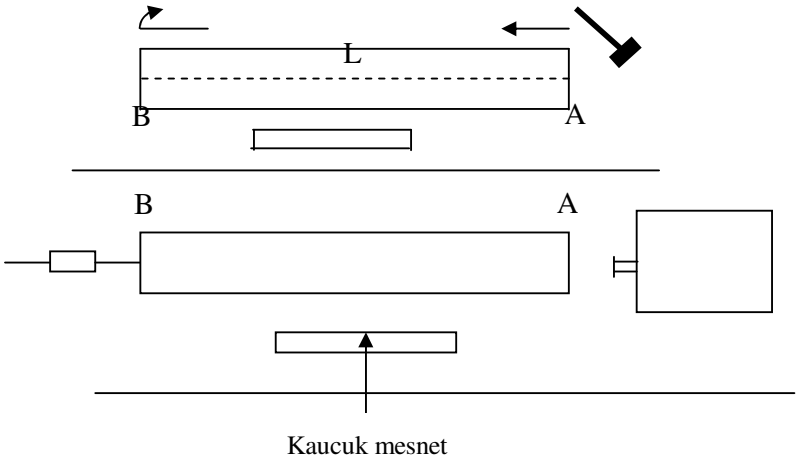
Yukarıdaki bağıntılarda, f_c N / mm^2 cinsinden basınç dayanımı, E_s ise N / mm^2 cinsinden statik elastisite modülünü , ρ kg/m^3 cinsinden betonun birim ağırlığını göstermektedir (20).

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 (16)

1.7.2. 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 oluştuğu 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 çekiçle vurulacak olursa meydana gelen gerilmenin oluşturduğu deformasyon dalga 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:

$$t_1 = \frac{2L}{V} \tag{1.17}$$

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 alici 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;

$$V = 2Lf_1 \tag{1.18}$$

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

$$E = V^2 \frac{\Delta}{g} \tag{1.19}$$

Bağıntısı vardır. Bu formülde Δ malzemenin birim ağırlığını, g yerçekimi ivmesini göstermektedir. V km/sn , Δ kg/lt cinsinden yerine konulunca E kgf/cm^2 cinsinden aşağıdaki formülden hesaplanır (22).

$$E = 10^5 V^2 \frac{\Delta}{g} \tag{1.20}$$

1.7.3. Elastisite Modülünün Ultrases Hızının Ölçülmesi ile Tayini

1.7.3.1. 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 (23). 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 kaynağı çapı (d) olan disk seklinde bir elemandır. Bu kaynaktan çıkan (f) frekansına sahip ultrases dalgalarının meydana getireceği enerjinin %90' ı yarı açısı θ olan bir koniğin içinde bulunur.

$$\text{Sin } \theta = \frac{1.22V}{d.f} \tag{1.21}$$

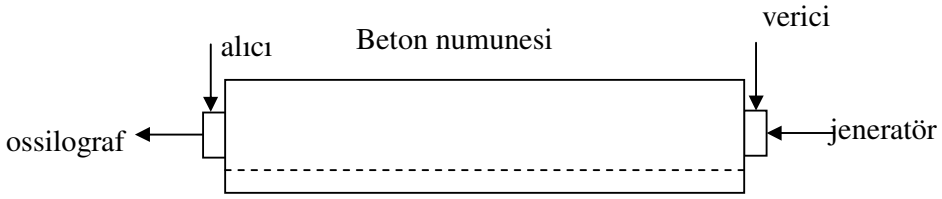
Açığa çıkan enerjinin dağılmaması ve toplanabilmesi için θ' nın küçük olması gerekir. θ'nın küçük olabilmesi için de frekansın büyük olması gerekir.

Ultrases dalgaları ışık dalgalarının özelliklerine sahip bulunmaktadır. Bu dalgalar yansırlar, kırılırlar 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 (16).

1.7.3.2. Cismin İçinde Ses Hızının Tayini

Prizma seklinde, 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 ossilografa 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 bulunduktan sonra yayılma hızı;

$$V = \frac{L}{t_1} \tag{1.22}$$

V bulunduktan sonra prizmatik çubuk halinde E ;

$$E = k.10^5.V^2.\frac{\Delta}{9.81} \tag{1.23}$$

V km/sn cinsinden ultrases hızı, Δ kg/dm^3 cinsinden betonun birim ağırlığı olmak üzere kgf/cm^2 boyutundaki dinamik elastisite modülü bulunur. k katsayısı ses hızı prizma seklinde olan beton numunesinde saptanması halinde 1'e eşittir. Numune prizmadan farklı küpe yaklaşıyorsa (16),

$$k = \frac{(1+\nu)-(1-2\nu)}{(1-\nu)} \tag{1.24}$$

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

Numunenin boyu da 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 değerin %10 - %22 oranında fazlalık gösterecektir. Deney sonucunda bulunan değerlerde büyük bir dağılma meydana gelecek, ayni betona ait V hızları birbirinden önemli derecede fark edecektir.

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

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

$$\frac{V_b}{V} = \frac{1 - \frac{L_a}{L}}{1 - \frac{L_a}{L}.\frac{V}{V_a}} \tag{1.25}$$

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 kalınlığı 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 ucundan diğer ucuna daha kısa zamanda ulaşır. Böyle bir durumun vuku bulmaması için prob en yakın teçhizattan L/4 daha büyük bir mesafeye yerleştirilmelidir. Bu şartlar altında teçhizatlar ses dalgalarını etkilemez. Eğer bu mesafe sağlanamıyorsa zaman;

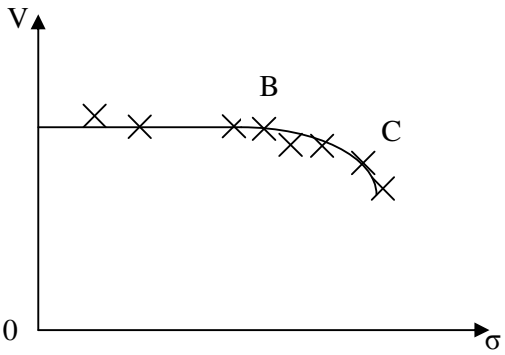
$$T = \frac{L}{V_a} + \frac{2a}{V_b}\sqrt{\frac{V_a^{\,2} - V_b^{\,2}}{V_a.V_b}} \tag{1.26}$$

T yerine konularak buradan V_b bulunur.

1.7.3.3. 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. Bu da dolayısıyla geçiş suresini 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. Bu da artık malzemede boşluklar oluştuğunu yani deformasyona uğradığını gösterir (16).

1.7.4. 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 ön hazırlık gereksinimini azaltır.
3. Daha az miktarda yapı zedelenir.
4. Az zedelenme güçlendirme veya onarım gereksinimini azaltır.
5. Merkezin delinemediği iç duvarlarda zararı azaltacağı için daha faydalıdır.
6. Daha ucuzdur.

Zararsız kelimesi elementlerin yapısal davranışlarını etkilemeyen ya da zarar vermeyen tüm testler için kullanılır (15).

1.7.5. 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 faydalanarak 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) değerleri 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 gerilmelerin, rezonans frekansı metodu esnasında 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 (16).

1.8. Uçucu Kül

Elektrik santrallerinde yakılan kömür ürün olarak bir mineral çıkarır ki buna uçucu kül denir. Kömürün inorganik ve mineral içerikleri, kil, kuartz, feldspar yanma esnasında kimyasal olarak birleşerek kristaller ve cam gibi düz ve parlak fazda uçucu kül oluşturur. Bu çıkan gazlar içinde bulunan uçucu kül, küresel şekildeki tanecikler şeklinde soğur ve elektrostatik yağmurlamayla veya torbalamayla toplanır. Çimento hidratasyonundan çıkan serbest kireçle reaksiyona giren uçucu kül ilave olarak kalsiyum silikat hidratı oluşturur, mukavemeti artırır ve betonun permeabilitesini düşürür. Uçucu kül kullanmanın yararları; su ihtiyacını 1% ila 10% oranında düşürmesi, hidratasyon ısısını düşürmesi, sülfat direncini artırması, alkali silika reaksiyonunu kontrol etmesi, işlenebilme ve pompalanabilme kolaylığı sağlaması ve daha ekonomik bir karışım oluşturmasıdır.

İki çeşit uçucu kül vardır. Bunlar C sınıfı ve F sınıfı olarak adlandırılır. C sınıfı uçucu küller daha yüksek miktarda kalsiyum oksit içerirler (%10-%30). F sınıfı uçucu küllerde ise genelde %10'un altındadır. C sınıfı uçucu küller genellikle her yaşta basınç mukavemetini artırırlar. F sınıfı uçucu küller ise sadece 7 günden 28 güne kadar olan mukavemeti artırır. C sınıfı uçucu küller hem puzolonik hem de

çimento özellikleri taşır. C sınıfında daha az miktarda karbon içeriği vardır (%2). Ancak F sınıfında genellikle %5'in altında olmasına rağmen %10'a kadar çıkabilir (24).

Bu bilgiler ışığında uçucu kül 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 yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri açıklanmıştır.

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.1.1 Agrega Özellikleri

Bu deneysel çalışmada aşağıda özellikleri açıklanan Akpınar Köyünden temin edilen doğal kum, Cebeci yöresinden temin edilen kırma kum, kırmataş I ve kırmataş II olmak üzere 4 çeşit agrega kullanılmıştır.

2.1.1.1 Doğal Kum

Granülometri sonuçları Tablo 2.2` de verilmiş, maksimum dane çapı 2 mm olan doğal kum kullanılmıştır. Tablo 2.1` de TS 3526'ya (25) göre özgül ağırlık ve TS 3529'a (26) göre birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar verilmiştir.

2.1.1.2 Kırmataş Kumu

Kırmataş kumunun granülometri sonuçları Tablo 2.2` de verilmiştir. TS 3526'ya (25) göre özgül ağırlık ve TS 3529'a (26) göre birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 2.1` de işlenmiştir.

2.1.1.3 Kırmataş I

Kırmataş I' in granülometri sonuçları Tablo 2.2` de verilmiştir. TS 3526'ya (25) göre özgül ağırlık ve TS 3529'a (26) göre birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 2.1` de işlenmiştir.

2.1.1.4 Kırmataş II

Kırmataş II' nin granülometri sonuçları Tablo 2.2` de verilmiştir. TS 3526'ya (25) göre özgül ağırlık ve TS 3529'a (26) göre birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 2.1` de işlenmiştir.

Tablo 2.1 Kullanılan agregaların özgül ve birim ağırlıkları

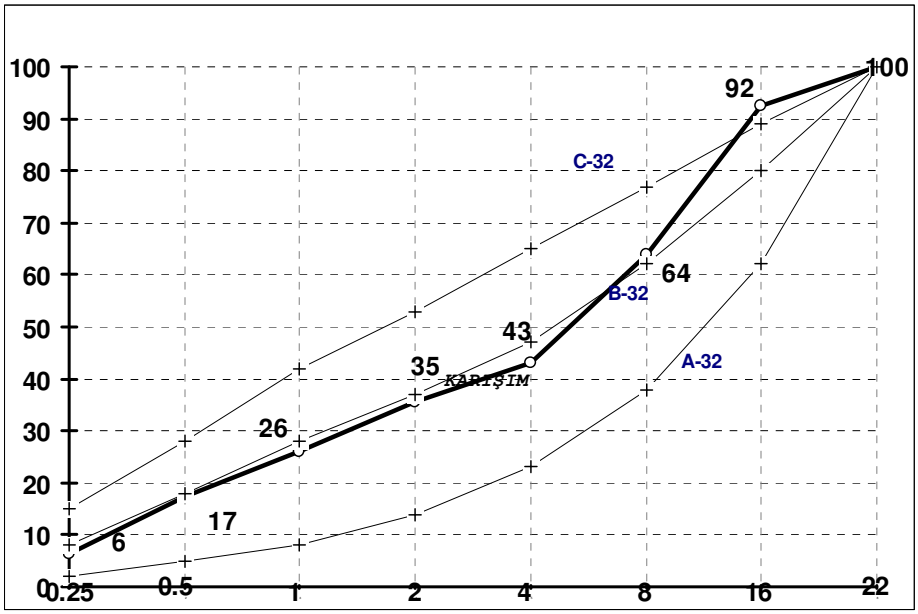
Agrega Cinsi	**Özgül Ağırlık** (kg/m^3)	**Birim Ağırlık** (kg/m^3)
Doğal Kum	2620	1410
Kırmataş Kumu	2650	1510
Kırmataş I	2710	1390
Kırmataş II	2720	1400

2.1.1.5 Karışım

Beton karışımlarında %25 doğal kum, %20 kırmataş kumu, % 32,5 kırmataş I ve % 22,5 kırmataş II kullanılmıştır. Karışımın incelik modülü 4,15' dir.Karışımın granülometri eğrisi Şekil 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Agrega elek analizleri ve karışım granülometrisi

Elek gözü	0.25	0.50	1	2	4	8	16	31,5
Doğal kum	10,6	52	78	94	99	100	100	100
Kırmataş kumu	15,4	27	40	65	89	100	100	100
Kırmataş I	0,6	0,7	0,7	0,9	3	58	100	100
Kırmataş II	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	66	100
KARIŞIM	6,2	17,5	26	36	43	64	92	100
A32	2	5	8	14	23	38	62	100
B32	8	18	28	37	47	62	80	100
C32	15	28	42	53	65	77	89	100



Şekil 2.1 Karışım Granülometri Eğrisi

2.1.2 Çimento ve Uçucu Kül Özellikleri

Beton numunelerde Lafarge Aslan Çimento A.Ş. tarafından üretilen CEM I 42.5R çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel özellikleri Tablo 2.3'de, mekanik özellikleri Tablo 2.4' de, kimyasal özellikleri ise Tablo 2.5' de gösterilmiştir. Beton üretiminde özellikleri Tablo 2.5'de verilen C tipi Çayırhan uçucu külü kullanılmıştır.

Tablo 2.3 Çimentonun fiziksel özellikleri

Çimento Cinsi	CEM I 42.5R
Özgül ağırlık gr/cm^3	3.14
Priz Süresi başlangıcı (dak)	140
Priz süresi sonu (dak)	180
La Chatelier (mm)	1,0
Kıvam Suyu (%)	25.5
Blaine (cm^2/gr)	3360
Dansite (gr/L)	1037
32 m elek üzeri (%)	23,7
90 m elek üzeri (%)	1.3

Tablo 2.4 Çimentonun basınç dayanımı sonuçları

Gün	Basınç Dayanımı (N/mm^2)
1	15,0
2	26,4
7	48,2
28	57,3

Tablo 2.5 Çimento ve uçucu külün kimyasal özellikleri

Cinsi	Çimento (%)	Çayırhan (%)
$CaCO_3 + MgCO_3$	-	19,00
H_2O	-	0,00
SiO_2	19,49	48,66
Al_2O_3	5,05	13,43
Fe_2O_3	2,54	9,31
CaO	65,0	15,28
MgO	1,39	3,32
SO_3	2,73	3,81
Na_2O	-	3,27
K_2O	0,67	1,83
Klorür	-	0,006
Kızdırma Kaybı	2,54	0,05
Uçucu Külün Cinsi	-	Çayırhan
Çözünmeyen Kalıntı	-	-
Toplam	-	98,97
S.CaO	0,44	0,20
İncelik (45)	-	42,2
(90)	-	24,7
(200)	-	7,2
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	-	2,27
Özgül Yüzey (cm^2/gr)	-	3080
Modül Hesaplamaları	-	-
C_3S	69,75	-
C_3A	9,09	-
MS	2,57	-
MA	1,99	-

2.1.3 Karışım Suyu

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

2.1.4 Katkılar

Beton üretiminde özellikleri Tablo 2.6'da verilen normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcılar, katkılar karma suyuna katılarak kullanılmıştır.

Tablo 2.6 Akışkanlaştırıcı özellikleri

Adı	İnka BvMr	İnka BSF	İnka BS 2000
Yoğunluk (gr/m^3)	1.16	1.200	1.17
pH	6	7	7
K.Madde (%)	31	40	35
Renk	Kahverengi	Kahverengi	Kahverengi
Esası	Sodyum lignosülfanat	Naftalen	(PCP) Polikarboksilat + modifiye Melamin

2.2 Beton Karışımları

İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuarlarında, toplam 15 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 B32 eğrisine yakın olmasına dikkat edilmiştir.

Kodlamalar yapılırken birinci rakam $1m^3$ beton içindeki çimento miktarını, ikinci rakam uçucu külün miktarını göstermektedir.

Tablo 2.7 Üretilen betonun kodlanması

BETON KODU	Çimento miktarı (kg/m^3)	Uçucu kül (kg/m^3)	Su (kg)	Çökme (cm)	Katkı	
					Türü	Oranı (%)
B300	300	0	196	15	Normal	1,0
B255	255	0	194	17	Normal	1,0
B255+45UK	255	45	195	14	Normal	1,0
B255+65UK	255	65	197	15	Normal	1,0
B255+85UK	255	85	196	17	Normal	1,0
B380	380	0	161	20	Süper	1,5
B323	323	0	162	21	Süper	1,5
B323+57UK	323	57	162	22	Süper	1,5
B323+83UK	323	82,5	165	20	Süper	1,5
B323+108UK	323	107,5	167	23	Süper	1,2
B450	450	0	159	22	Hiper	2,0
B383	383	0	152	21	Hiper	2,1
B383+68UK	383	67,5	155	21	Hiper	2,2
B383+98UK	383	98	157	22	Hiper	2,8
B383+127UK	383	127	157	24	Hiper	2,1

2.3 Beton Üretimi

Beton üretiminde 50 dm^3 kapasiteli, düşey eksenli cebri karıştırıcılı betonyer kullanılmıştır. Üretimde sırasıyla;

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

Her karışımdan çapı 150 mm yüksekliği 300 mm olan 6 şar adet silindir numune üretilmiştir. Beton numuneleri bir gün sonra kalıptan çıkarılmış 20±2 ^{0}C deki kür havuzunda 28 gün bekletildikten sonra deneyler yapılmıştır.

2.4 Taze Beton Deneyleri

2.4.1 Birim Ağırlık

Hazırlanan betonlarda kullanılan gerçek malzeme miktarlarının 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 (27) 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. Çökme miktarı ne kadar fazla ise bu betonun kendi ağırlığı altında o kadar büyük bir hareket etme kabiliyetine sahip olduğunu gösterir.

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 artırılması veya akışkanlaştırıcı kullanılması gerekir ki bu da mukavemetin azalmasına sebebiyet verir.

2.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

2.5.1 Basınç Deneyi

Basınç deneylerinde 200 ton kapasiteli Amsler marka basınç presi kullanılmıştır. 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir numunelerde düşey yer değiştirmeyi de ölçmek için çerçeve takılmış ve yükleme esnasında belli aralıklarla komparatör yardımıyla belli yükler altında oluşan düşey şekil değiştirmeler okunmuştur. Bu okunan değerler elastisite modülü hesabında kullanılmıştır.

2.5.2 Ultrases Deneyi

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

3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneylerinden elde edilen birim ağırlık ve çökme deneyi sonuçları Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1 Taze beton deney sonuçları

Beton Kodu	Birim Ağırlık (kg/m^3)	Çökme (cm)
B300	2345	15
B255	2359	17
B255+45UK	2340	14
B255+65UK	2342	15
B255+85UK	2320	17
B380	2410	20
B323	2415	21
B323+57UK	2383	22
B323+82,5UK	2408	20
B323+107,5UK	2409	23
B450	2438	22
B383	2440	21
B383+68UK	2450	21
B383+98UK	2432	22
B383+127UK	2430	24

Taze beton deneylerinden elde edilen birim ağırlıklar yardımıyla betonlar içersindeki hava miktarları ve kompasiteleri hesaplanmış, aşağıda tabloda verilmiştir.

Tablo 3.2 Üretilen betonların hava miktarları ve kompasiteleri

Beton Kodu	Hava (%)	Kompasite (m^3)
B300	1,7	0,787
B255	1,1	0,793
B255+45UK	1,4	0,788
B255+65UK	1,4	0,786
B255+85UK	1,8	0,783
B380	1,7	0,816
B323	1,2	0,821
B323+57UK	2,1	0,813
B323+82,5UK	0,8	0,822
B323+107,5UK	0,5	0,824
B450	0,9	0,824
B383	1,1	0,829
B383+68UK	0,1	0,836
B383+98UK	0,2	0,829
B383+127UK	0,2	0,831

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)	Uçucu kül (kg)	Su (kg)	Kum (kg)	Kır. Kum (kg)	KT1 (kg)	KT2 (kg)	Katkı (%)	Su/Çim	Su/Bağ
B300	302	0	196	361	456	606	421	1,0	0,65	0,65
B255	258	0	194	372	471	626	435	1,0	0,75	0,75
B255+45UK	257	45,4	195	360	455	605	420	1,0	0,76	0,64
B255+65UK	259	65,9	197	355	450	597	406	1,0	0,76	0,61
B255+85UK	257	85,6	196	348	440	584	406	1,0	0,76	0,57
B380	383	0	161	364	460	612	425	1,5	0,42	0,42
B323	326	0	162	376	475	632	439	1,5	0,50	0,50
B323+57UK	324	57,2	162	359	454	603	419	1,5	0,50	0,42
B323+82,5UK	329	84	165	357	451	600	416	1,5	0,50	0,40
B323+107,5UK	331	110	167	351	444	590	410	1,2	0,50	0,38
B450	448	0	159	356	450	599	416	2,0	0,35	0,35
B383	388	0	152	370	468	622	432	2,1	0,39	0,39
B383+68UK	393	69,3	155	357	451	599	416	2,2	0,39	0,34
B383+98UK	391	100	157	346	438	582	405	2,8	0,40	0,32
B383+127UK	393	131	157	340	430	571	397	2,1	0,40	0,30

3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.2.1. Basınç Deneyi Sonuçları

Üretilen betonların 28. günde yapılan basınç deneyi sonuçlarından belirlenen basınç dayanımları aşağıdaki Tablo 3.4' de verilmiştir. $fc_{silindir}$ silindir basınç dayanımını göstermektedir.

Tablo 3.4 Basınç deneyi sonuçları

Beton Kodu	$fc_{silindir}$ (MPa)
B300	29,5
B255	22,7
B255+45UK	23,1
B255+65UK	26,3
B255+85UK	25,3
B380	39,9
B323	38,6
B323+57UK	42,9
B323+82,5UK	42,5
B323+107,5UK	42,5
B450	56,1
B383	51,1
B383+68UK	55,4
B383+98UK	52,1
B383+127UK	52,0

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/mm^2)

Beton Kodu	E (N/mm^2)
B300	36633
B255	33828
B255+45UK	33070
B255+65UK	32049
B255+85UK	36587
B380	44294
B323	40050
B323+57UK	41403
B323+82,5UK	38771
B323+107,5UK	40265
B450	43110
B383	41307
B383+68UK	44529
B383+98UK	40085
B383+127UK	40800

3.2.3. Ultrases Hızı Sonuçları

Ultrases deneyi numuneler 28. günde kırılmadan önce silindirler üzerinde yapılmıştır. V (km/sn) cinsinden ultrases hızını, t (sn) cinsinden ultrases geçiş süresini, l (km) cinsinden numunenin uzunluğunu göstermektedir.

$$V = \frac{1}{t} \tag{3.1}$$

Tablo 3.6 Ultrases hız sonuçları (km/sn)

Beton Kodu	Ultrases Hızı (km/sn)
B300	4,68
B255	4,85
B255+45UK	4,92
B255+65UK	4,87
B255+85UK	4,66
B380	5,02
B323	5,20
B323+57UK	5,20
B323+82,5UK	5,15
B323+107,5UK	4,96
B450	5,28
B383	4,90
B383+68UK	5,27
B383+98UK	5,25
B323+127UK	4,98

3.3. Kullanılan Malzemelerin Maliyetleri

Üretilen betonlarda kullanılan malzemelerin maliyetleri birim fiyatlar esas alınarak hesaplanmış,her bir beton serisinin üretim maliyeti çıkarılarak elde edilen değerler Tablo 3.7'de verilmiştir.Böylece uçucu küllü ve külsüz betonların maliyetlerini karşılaştırma imkanı elde edilmiştir.

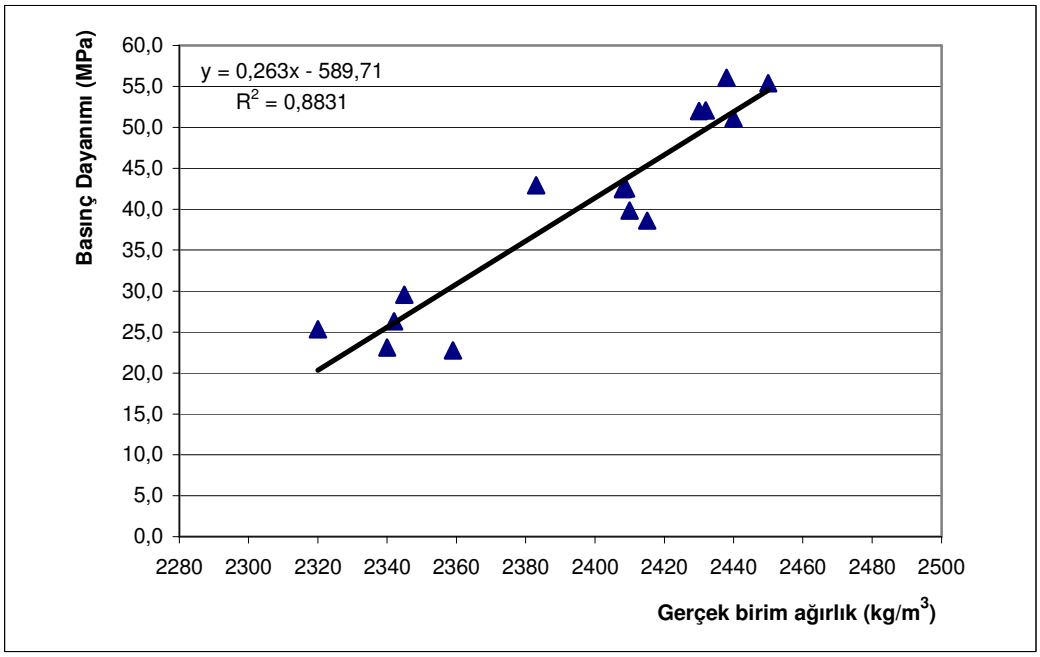
Tablo 3.7 Üretilen betonların karışımına giren malzemelerin maliyetleri

Beton Kodu	Çimento (TL)	Uçucu kül (TL)	Su (TL)	Kum (TL)	Kır. Kum (TL)	KT1 (TL)	KT2 (TL)	Katkı (TL)	Toplam Maliyet	fc/mal. (MPa/TL
B300	37,75	0	0,39	5,96	5,02	6,66	4,63	1,21	61,62	0,48
B255	32,25	0	0,39	6,14	5,18	6,87	4,79	1,03	56,65	0,40
B255+45UK	32,125	2,04	0,39	5,94	5,01	6,66	4,62	1,03	57,82	0,40
B255+65UK	32,375	2,97	0,39	5,86	4,95	6,57	4,47	1,04	58,63	0,45
B255+85UK	32,125	3,85	0,39	5,74	4,84	6,42	4,47	1,03	58,87	0,43
B380	47,875	0	0,32	6,01	5,06	6,73	4,68	2,30	72,98	0,55
B323	40,75	0	0,32	6,20	5,23	6,95	4,83	2,00	66,30	0,58
B323+57UK	40,50	2,57	0,32	5,92	4,99	6,63	4,61	1,94	67,48	0,64
B323+82,5UK	41,125	3,78	0,33	5,89	4,96	6,60	4,58	2,00	69,27	0,61
B323+107,5UK	41,375	4,95	0,33	5,79	4,88	6,49	4,51	1,60	69,93	0,61
B450	56,00	0	0,32	5,87	4,95	6,59	4,58	3,60	81,91	0,69
B383	48,50	0	0,30	6,11	5,15	6,84	4,75	3,30	75,00	0,68
B383+68UK	49,125	3,12	0,31	5,89	4,96	6,59	4,58	3,50	78,08	0,71
B383+98UK	48,875	4,50	0,31	5,71	4,82	6,40	4,46	4,40	79,48	0,65
B383+127UK	49,125	5,90	0,31	5,61	4,73	6,28	4,37	3,30	79,63	0,65

BÖLÜM 4 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Birim Ağırlıkla Basınç Dayanımları Arasındaki İlişkiler

Taze beton birim ağırlık deney sonuçları ile silindir basınç dayanımı arasındaki ilişki aşağıdaki Şekil 4.1' de verilmiştir.

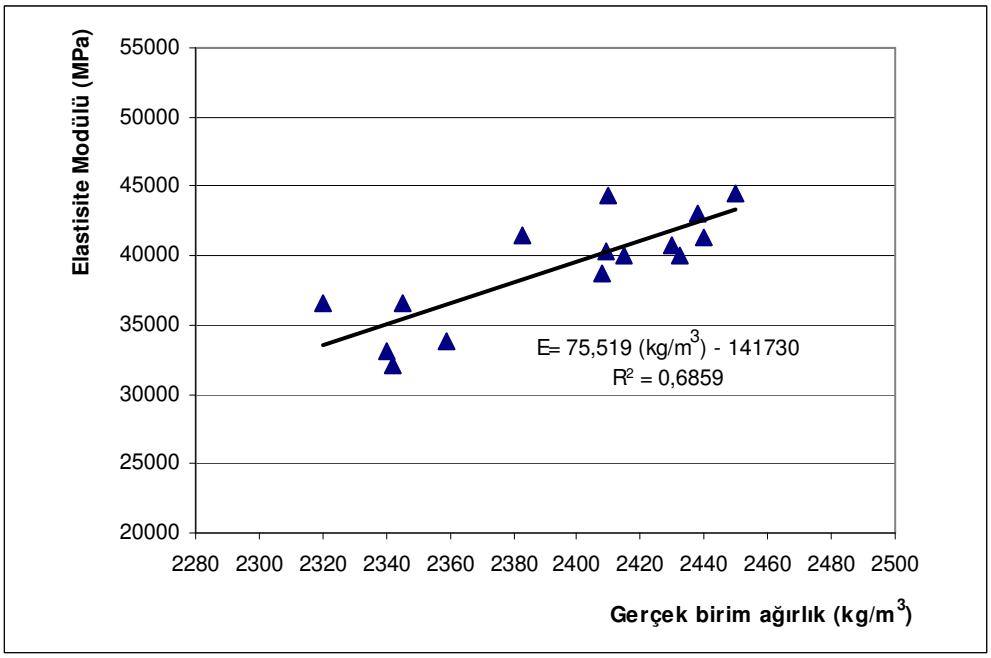


Şekil 4.1 Birim ağırlıkla silindir basınç dayanımları arasındaki ilişki

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi birim ağırlık arttıkça betonun basınç dayanımı artmaktadır. Şekil 4.1 yardımıyla birim ağırlıklar ve silindir basınç dayanımları arasında bulunan korelasyon katsayısı R=0,94'dür. Bu bağıntıda $fc_{silindir}$ MPa cinsinden silindirin basınç dayanımını, α ise kg/m^3 cinsinden birim ağırlığı göstermektedir. Birim ağırlıkla silindir basınç dayanımları arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir

$$fc_{silindir} = 0{,}263\alpha - 589{,}71 \qquad (4.1)$$

4.2 Birim Ağırlıkla Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler



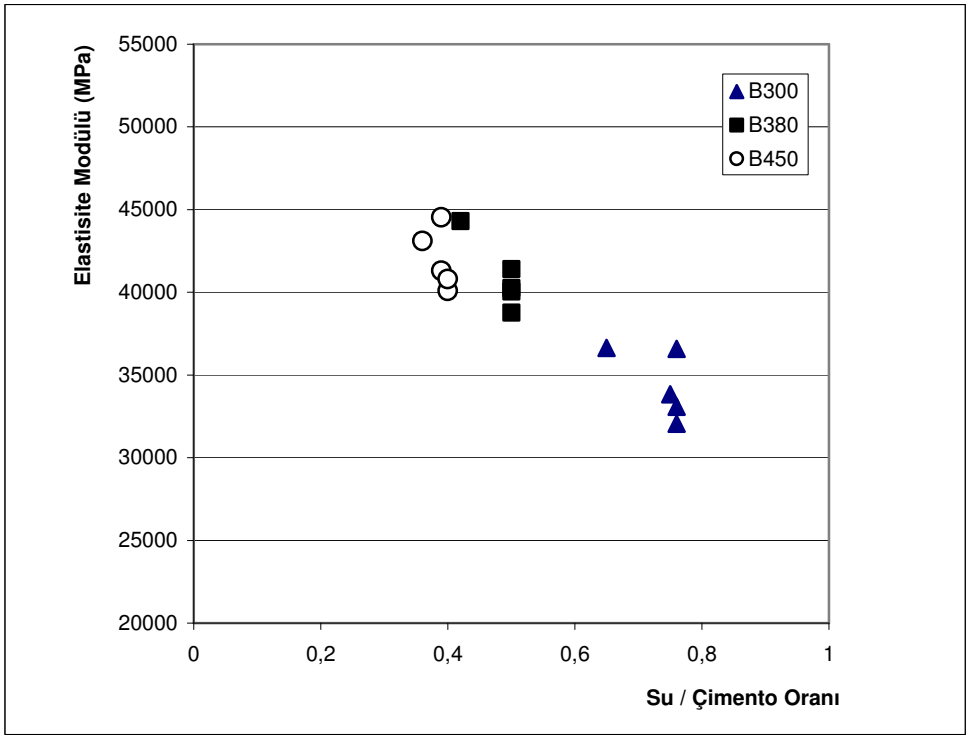
Şekil 4.2 Birim ağırlıkla elastisite modülü arasındaki ilişki

Şekil 4.2 yardımıyla Elastisite Modülü ile birim ağırlık arasında bir bağıntı kurmak mümkündür. Korelasyon katsayısı R=0.83' dür. Bu bağıntıda $fc_{silindir}$ MPa cinsinden Elastisite Modülü, α ise kg/m^3 cinsinden birim ağırlığı göstermektedir.

$$E = 75{,}519\alpha - 141730 \qquad (4.2)$$

4.3 Elastisite Modülleri ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki

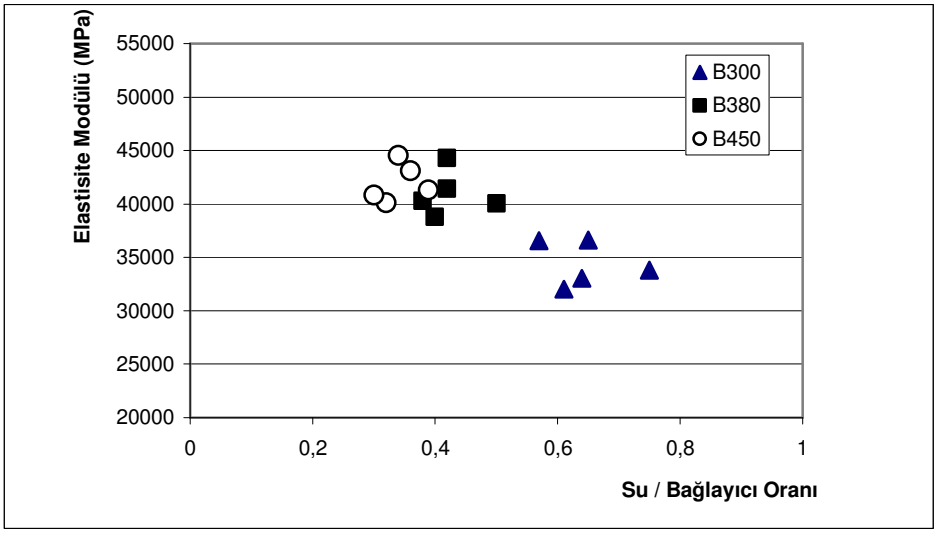
Su/çimento (W/C) oranıyla elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 4.3'de verilmiştir. Elastisite modülünün, su/çimento oranının azalmasıyla arttığı Şekil 4.3'den anlaşılmaktadır. Her karışım kendi içinde değerlendiğinde 255, 323 ve 383 dozlu karışımlarda uçucu kül ilavesi Elastisite modülünü belirgin şekilde değiştirmemektedir.



Şekil 4.3 Su/çimento oranı ile elastisite modülü arasındaki ilişki

4.4. Elastisite Modülleri ile Su/Bağlayıcı Oranları Arasındaki İlişki

Su/bağlayıcı (W/Bağlayıcı) oranıyla elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 4.4'de verilmiştir. Elastisite modülünün su/bağlayıcı oranının azalmasıyla arttığı Şekil 4.4'den anlaşılmaktadır.



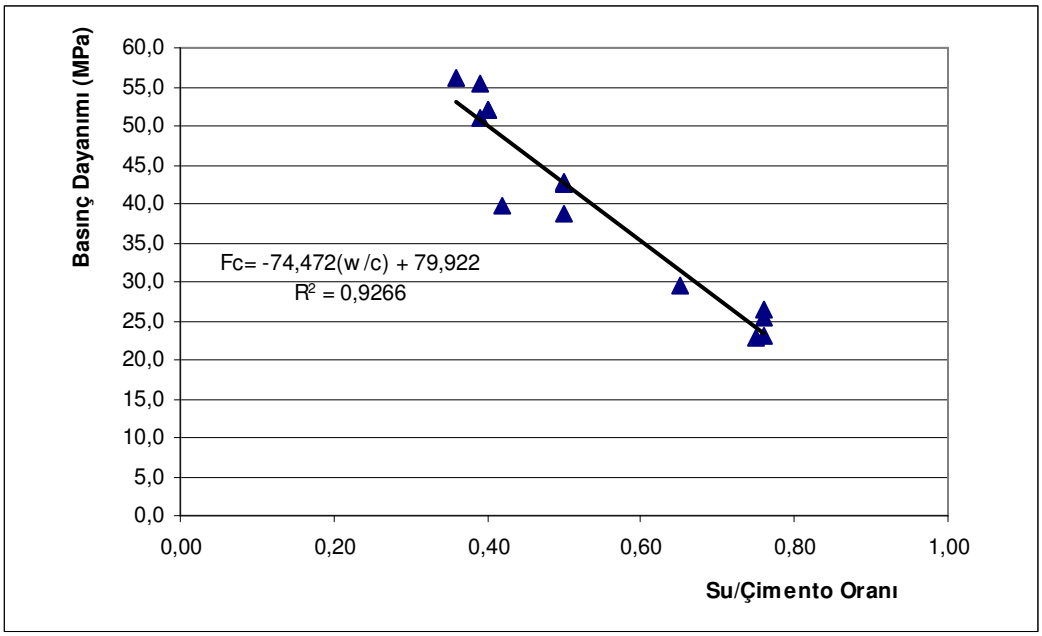
Şekil 4.4 Su/bağlayıcı oranı ile elastisite modülü arasındaki ilişki

4.5. Basınç Dayanımları ve Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki

Su/Çimento (W/C) oranlarıyla silindir basınç dayanımları arasındaki bağıntı Şekil 4.5'den elde edilmiştir.

$$Fc = -74{,}472\ (w/c) + 79{,}922 \qquad (4.3)$$

Su/çimento oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü görülmektedir. Bu durum Literatür incelemeleri ile de benzerlik göstermektedir. Şekil 4.5 kullanılarak silindir basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasında korelasyon katsayısı R=0.96 olarak elde edilmiştir.

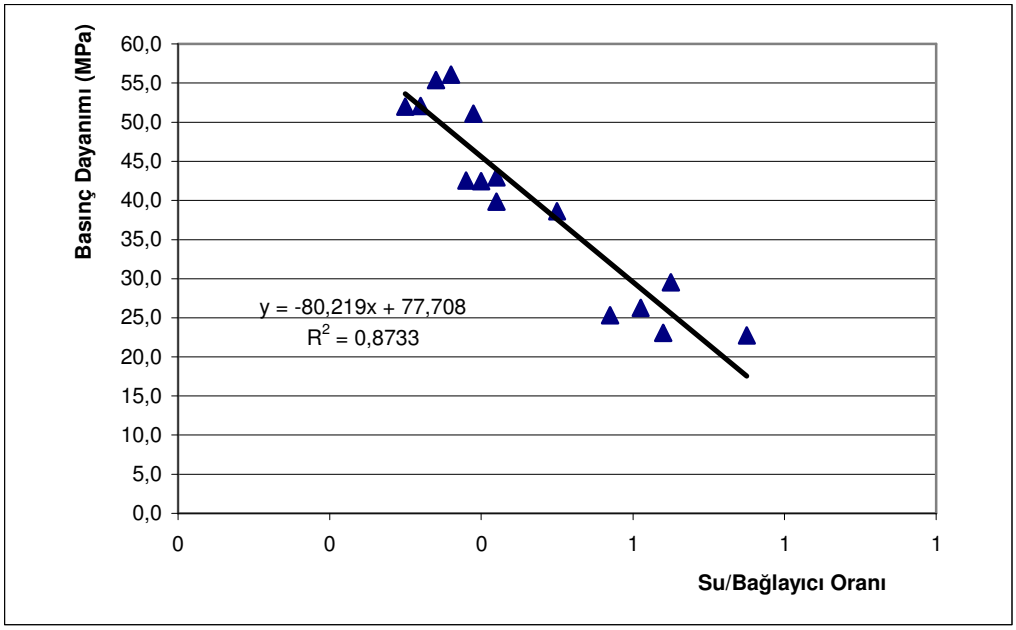


Şekil 4.5 Su/çimento oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

4.6. Basınç Dayanımları ve Su/Bağlayıcı Oranları Arasındaki İlişki

Su/bağlayıcı (W/Bağlayıcı) oranlarıyla silindir basınç dayanımları arasındaki bağıntı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Su/çimento oranına benzer ilişki de, su/bağlayıcı oranında oluşmaktadır. Bu oran arttıkça basınç dayanımının düştüğü görülmektedir. Şekil 4.6 kullanılarak silindir basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı arasında korelasyon katsayısı R=0.93 olarak elde edilmiştir. Oluşan bağıntı ise aşağıda verilmiştir.

$$Fc = -80.219\ (w/c) + 77.708 \qquad (4.4)$$

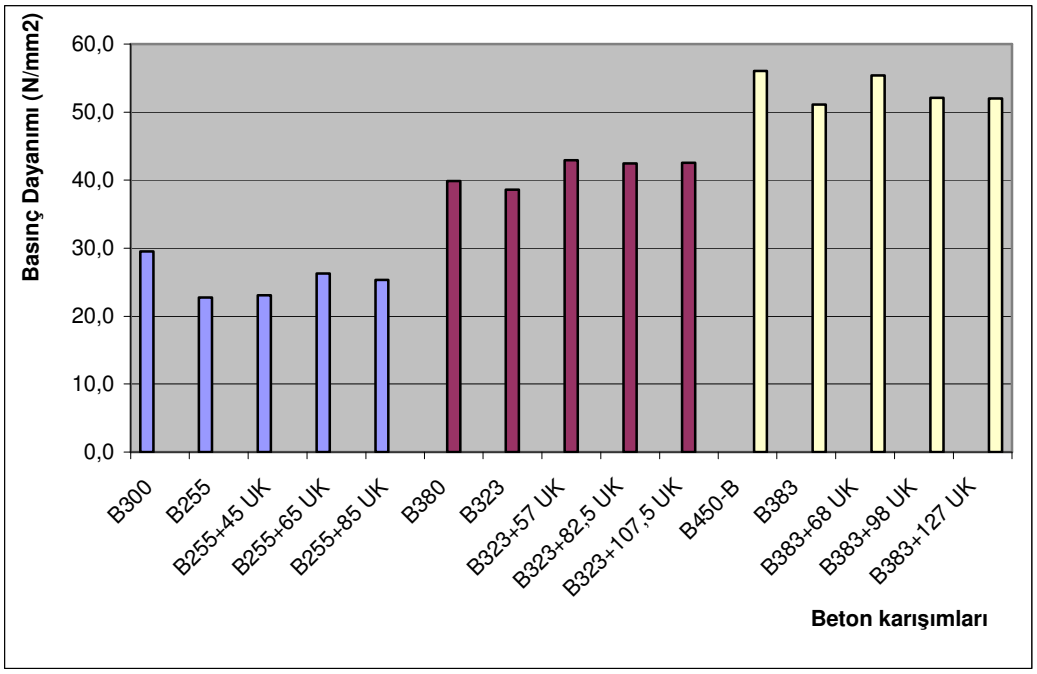


Şekil 4.6 Su/bağlayıcı oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

4.7. Beton Karışımlarının Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Beton karışımlarının basınç dayanımları arasındaki bağıntı Şekil 4.7'de gösterilmiştir. İçerisinde uçucu kül olmayan 300, 380 ve 450 dozlu beton karışımları arasında en yüksek basınç dayanımının yüksek dozlu olan 450 dozla üretilen betonlardan elde edildiği görülmektedir. Buradan çimento dozajı arttıkça basınç dayanımının da artması doğaldır. Her dozajdan %15 çimento azaltılarak oluşturulan 255, 323 ve 383 dozlu betonlara uçucu kül ilave edildiğinde her karışımda mukavemetler uçucu kül ilavesi ile bir miktar artmakta daha sonra azalmaktadır. 255 dozlu betona 65 kg (çimentonun %25i) uçucu kül konulduğunda, 323 dozlu betona 57-82,5 kg (ortalama 70 kg civarı) (çimentonun %22 si) arasında ve 383 dozlu betona ise 98 kg (çimentonun %26 sı) konulduğunda en iyi sonuçlar elde edilmektedir. 255 dozlu beton için olmasa da diğer dozu farklı betonlar için %15 dozaj azaltılmış asıl beton mukavemetlerine, bu uçucu kül miktarları ile ulaşılmaktadır. Bu uçucu kül miktarları azaltılan dozajlara oranlandığında, uçucu kül etkinlikleri 380-323=57 kg çimento için 57/70=0,81, 450-382,5=67,5 kg çimento için 67,5/98=0,69 olarak bulunur. Bu oranda etkinlik 300 dozaj için bu çalışma sınırları içinde (çayırhan külü ile) olamamaktadır. Buradan da düşük dozajlı betonlarda serbest kireç

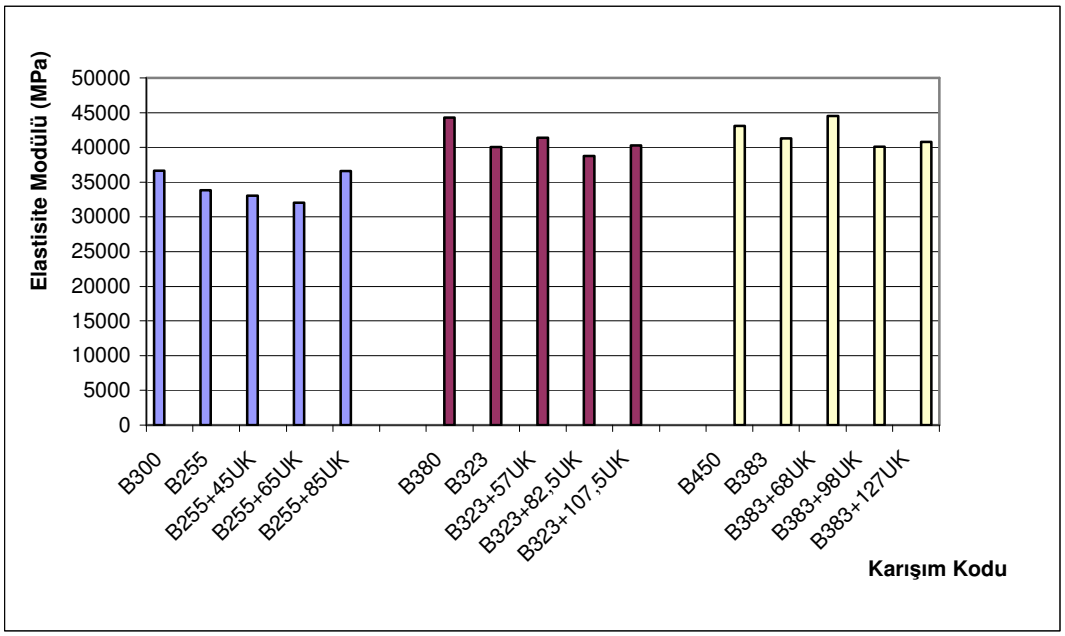
miktarının az olması sebebiyle, puzzolanlardan olan ve serbest kireçle bağlanan uçucu külün etkinliği azaldığı söylenebilir. Çimento dozajı arttıkça uçucu külün etkinliği daha da artmaktadır.



Şekil 4.7 Beton karışımlarının basınç dayanımları arasındaki ilişki

4.8. Beton Karışımlarının Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki

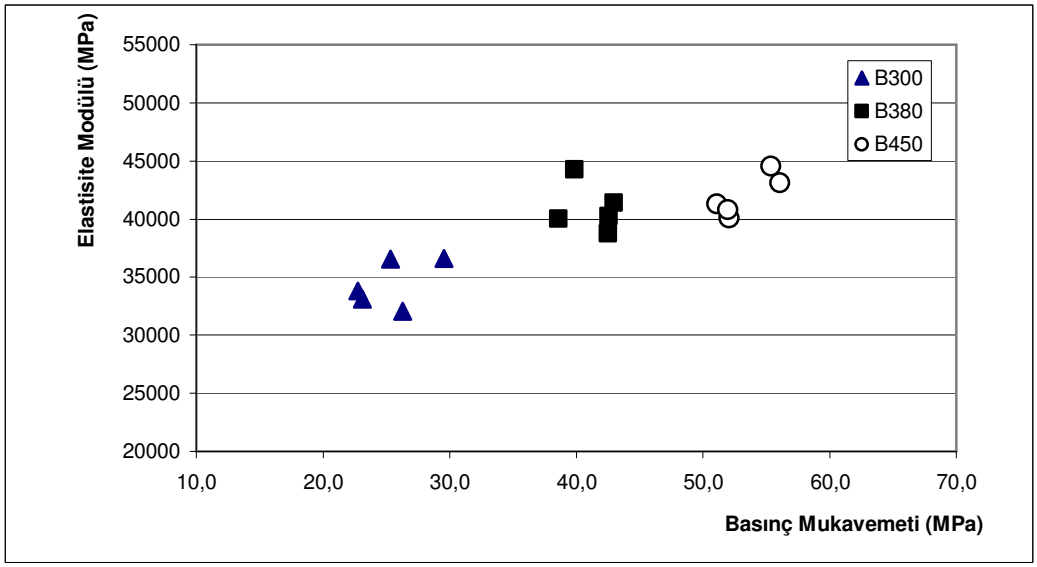
Beton karışımlarının elastisite modülleri arasındaki bağıntı Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Beton karışımları arasında en yüksek elastisite modülü değerlerinin 450 dozla üretilen betonlardan elde edildiği,bağlayıcı madde olarak çimentonun %26 oranında uçucu kül ile ikame edilmesinin elastisite modülünü azalttığı, daha yüksek oranlarda uçucu kül kullanımının elastisite modülünde azalma yönünde etki yaptığı, Şekil 4.8'den görülmektedir.



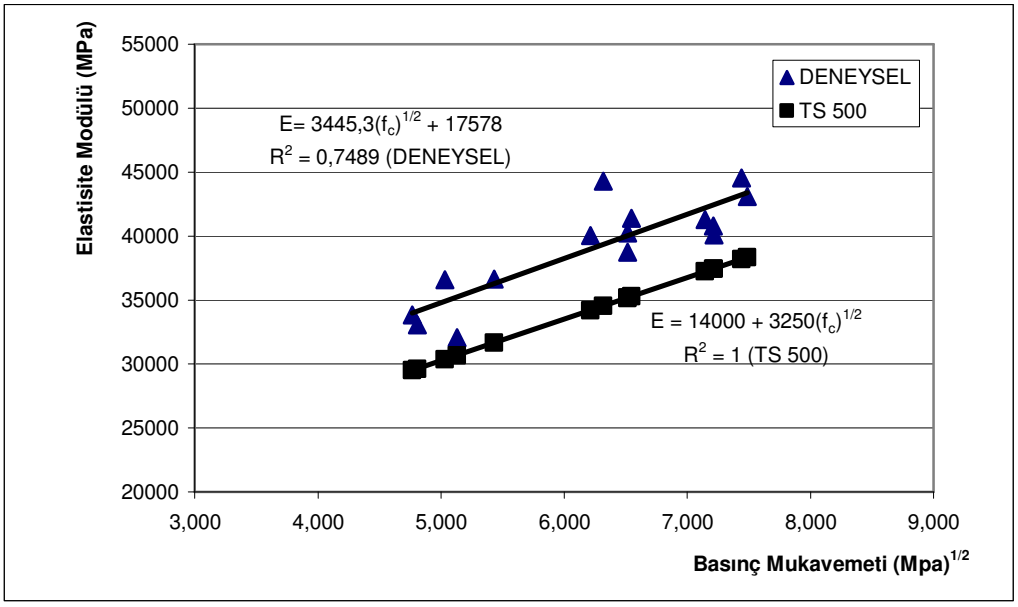
Şekil 4.8 Beton karışımlarının elastisite modülleri arasındaki ilişki

4.9 Basınç Mukavemeti ve Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki

Basınç mukavemeti ve elastisite modülleri arasındaki bağıntı Şekil 4.9b'de gösterilmiştir. Şekil 4.9a,b de görüldüğü gibi basınç mukavemeti arttıkça elastisite modülü değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.9a Basınç mukavemeti-elastisite modülü arasındaki ilişki



Şekil 4.9b Basınç mukavemeti-elastisite modülü arasındaki ilişki

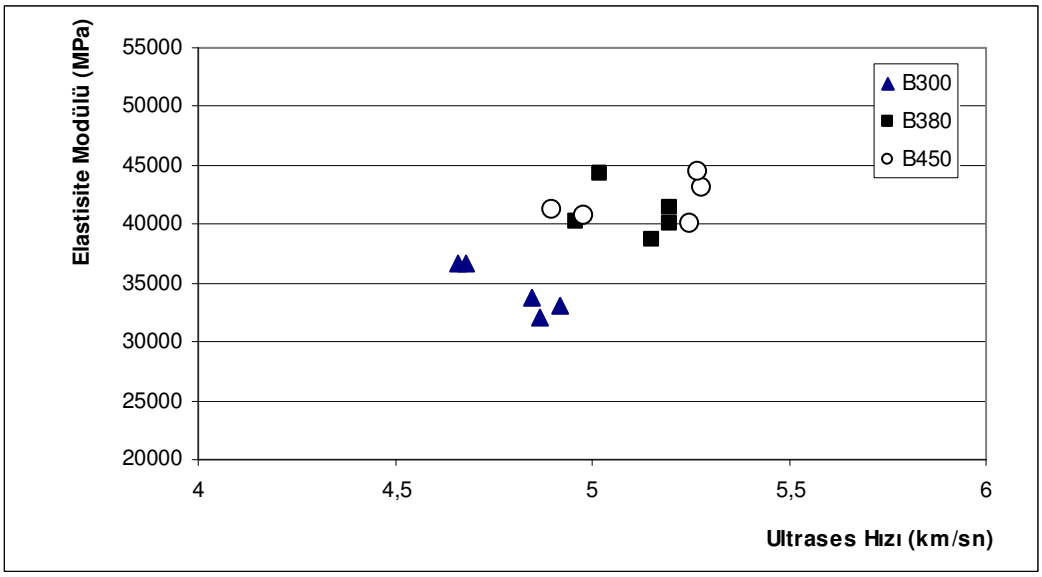
Çalışmada Elastisite modülü ile basınç mukavemetinin karekökü arasındaki bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$E=3445,3(fc)^{1/2} + 17578 \qquad (4.5)$$

Şeki 4.9b de görüldüğü gibi elastisite modülü ile basınç mukavemeti arasındaki ilişkiler incelendiğinde uçucu küllü betonların elastisite modülü eğimi TS 500 de verilen eğime yakındır. Ancak TS 500'ün önerdiği değerler, deneysel değerlerin bir miktar altında olmaktadır.

4.10 Basınç Mukavemeti ve Ultrases Hızı Arasındaki İlişki

Şekil 4.10 incelendiğinde tüm karışımlarda ultrases hızı arttıkça Elastisite modülü artmaktadır. Bu literatürden de görüldüğü üzere beklenen durumdur. 255, 323 ve 383 dozlu betonlara uçucu kül ilave edildiğinde her bir karışım kendi içinde değerlendirildiğinde, Elastisite modülleri uçucu kül ilavesi ile belirgin bir değiştirme yapmamıştır.



Şekil 4.10 Ultrases hızı-elastisite modülü arasındaki ilişki

BÖLÜM 5 SONUÇLAR

Uçucu kül kullanılarak üretilen düşük ve yüksek mukavemetli betonların elastisite modülünün incelenmesi amacıyla yapılan bu deneysel çalışma sınırları içinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Uçucu küllü ve külsüz betonlarda birim ağırlık arttıkça betonun basınç dayanımı artmaktadır. Birim ağırlıkla silindir basınç dayanımları arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde bulunmuştur. Bu bağıntıda $fc_{silindir}$ MPa cinsinden basınç dayanımını, α ise kg/m^3 cinsinden birim ağırlığı göstermektedir.

$$fc_{silindir} = 0{,}263\ (\alpha)\ -589{,}71 \qquad (5.1)$$

Elastisite modülü ile birim ağırlık arasında bir bağıntı aşağıdaki şekildedir. Burada birim ağırlık arttıkça, elastisite modülü de artmaktadır.

$$E = 75{,}519\alpha - 141730 \qquad (5.2)$$

Elastisite modülü, su/çimento veya su/bağlayıcı oranının azalmasıyla artmaktadır. Her karışım kendi içinde değerlendirildiğinde 255, 323 ve 383 dozlu karışımlara uçucu kül ilavesi elastisite modülünü belirgin şekilde değiştirmemektedir.

Su/çimento oranı veya su / bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımı düşmektedir. Su/Çimento (W/C) oranlarıyla silindir basınç dayanımları arasındaki bağıntı Fc = -74,472 (w/c) +79,922, Su/bağlayıcı oranlarıyla silindir basınç dayanımları arasındaki bağıntı Fc = -80.219 (w/bağ) +77.708 şeklinde bulunmuştur.

255, 323 ve 383 dozlu betonlara uçucu kül ilave edildiğinde her karışımda mukavemetler uçucu kül ilavesi ile bir miktar artmakta daha sonra azalmaktadır. 255 dozlu betona 65 kg (çimentonun %25i) uçucu kül konduğunda, 323 dozlu betona 57-82,5 kg (ortalama 70 kg civarı) (çimentonun %22 si) arasında ve 383 dozlu betona ise 98 kg (çimentonun %26 sı) konulduğunda en iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Çimento dozajı arttıkça uçucu külün etkinliği artmaktadır.

Basınç mukavemeti arttıkça elastisite modülü değerleri de artmaktadır. Elastisite modülü ile basınç mukavemetinin karekökü arasındaki bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$E=3445,3(fc)^{1/2} + 17578 \quad (5.3)$$

Tüm karışımlarda ultrases hızı arttıkça elastisite modülü artmaktadır. 255, 323 ve 383 dozlu betonlara uçucu kül ilave edildiğinde her bir karışım kendi içinde değerlendirildiğinde, elastisite modülleri uçucu kül ilavesi ile belirgin bir değiştirme yapmamıştır.

Deneyler sonucunda bağlayıcı madde olarak çimentonun belli oranlarında uçucu kül kullanılması durumunda, betonun basınç dayanımında önemli bir azalmaya neden olmadan daha ekonomik karışımlar elde etmenin mümkün olduğu söylenebilir.

Özetle;

1-Numunelerin birim ağırlıkları arttıkça basınç dayanımları doğru orantılı olarak artmıştır.

2-Numunelerde su/çimento oranı arttıkça basınç dayanımları düşmüştür.

3-Numunelerde su/çimento oranı arttıkça elastiklik modülü değerleri düşmüştür.

4-Numunelerde basınç dayanımı arttıkça ultra ses hızı artmıştır.

5-Ultra ses hızının artmasıyla elastiklik modülleri artış göstermiştir.

6-TS500'e göre bulunan elastisite modülü, deneysel olarak bulunan elastisite modülünden, sabit olarak eklenen 14000 N/mm^2 nedeniyle, çok üstünde çıkmıştır.

7-Uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımları kontrol numunelerinin basınç dayanımlarına yakın değerler vermektedir. Uçucu kül/çimento oranı belli bir değeri geçtikten sonra betonun basınç dayanımı düşmektedir.

8-Uçucu kül içeren numunelerin elastisite modülleri kontrol numunelerinin elastisite modüllerine yakın değerler vermektedir.

9-Deneyler sonucunda bağlayıcı madde olarak çimentonun belli oranlarda uçucu kül ile ikame edilmesi durumunda betonun basınç dayanımında ve elastisite modülünde önemli bir azalmaya neden olmadan daha ekonomik karışımlar elde etmenin mümkün olduğu söylenebilir.

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] **Postacıoğlu, B.**, 1986.Beton Cilt 1, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul

[7] **Postacıoğlu, 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] **Postacıoğlu, B.**, 1987.Beton Cilt 2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.

[12] **Popovic, S**., 1998, Strength and Related Properties of Concrete; a quantitative approach; New York

[13] **Nebit, J.K.,** 1966, Structural Lightweight Aggregate Concrete, London

[14] **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

[15] **Türkel B.**, 2002. Betonda Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişkiler, İTÜ, İstanbul

[16] **Postacıoğlu, B.**, 1981.Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt 1, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul

[17] **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.

[18] **TS 500**., 1984. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

[19] **Neville, A.M.**, 1996.Properties of Concrete,J. Willey, New York

[20] **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.

[21] **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.

[22] **Postacıoğlu, B.**, 1966.Yapı Malzemesi Esasları, Cilt 1, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul

[23] **Bayazıt, Ö.L.,** 1980. Beton ve Deneyleri, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara

[24] **Lafarge,** .www.lafargecorp.com/ttt-fa.htm

[25] **TS 3526,** 1980. Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

[26] **TS 3529,** 1980. Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

[27] **TS 2871**., 1977, Taze Beton Kıvam Deneyi (Çökme Hunisi Metodu İle), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

ÖZGEÇMİŞ

03.09.1977'de Balıkesir'de doğan Rânâ TANGÜNER, ilköğrenimini Balıkesir Dumlupınar İlkokulu, ortaokul ve lise öğrenimini Balıkesir Sırrı Yırcalı Anadolu Lisesi'nde tamamladı.1995 yılında başladığı İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2002 yılında mezun oldu. Halen İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği-Yapı Malzemesi programında yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.