

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONDA BASINÇ DAYANIMI İLE ELASTİSİTE
MODÜLÜ ARASINDAKİ İLİŞKİLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Enver Burak TÜRKEL**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2002

**BETONDA BASINÇ DAYANIMI İLE ELASTİSİTE
MODÜLÜ ARASINDAKİ İLİŞKİLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Enver Burak TÜRKEK
(501001186)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL
Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)**

MAYIS 2002

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanması sırasında sonsuz ilgi ve yardımlarını gördüğüm, bilgisinden ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Yrd.Doç.Dr.Hasan YILDIRIM'a;

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

Çalışmalarımdaki ilgi ve yardımlarından dolayı Ar.Gör. Bekir Y. PEKMEZCİ ve Ar. Gör. Nilüfer ÖZYURT'a, Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalı'ndaki tüm hocalarıma, araştırma görevlilerine ve laboratuvar çalışanlarına; deneyisel ve yazım çalışmalarım sırasındaki yardımlarından dolayı arkadaşlarım Gözde GÜLERYÜZ'e, Fırat BİLEN'e, Beyhan BAYHAN'a ve;

Tüm hayatım süresince, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Ercan TÜRKEK'e ve annem Zerrin TÜRKEK'e teşekkür ederim.

Mayıs 2002

Enver Burak TÜRKEK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1.GİRİŞ	1
1.1. Beton	1
1.2. Betonun Basınç Dayanımı	2
1.2.1. Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler	2
1.2.1.1. Çimento İle İlgili Faktörler	2
1.2.1.2. Karma Suyu Miktarı	3
1.2.1.3. Kompasitenin Mukavemet Üzerine Etkisi	4
1.3. Betonun Gerilme Deformasyon Diyagramları	6
1.4. Basınç Dayanım Formülleri	11
1.4.1. Feret Formülü	12
1.4.2. Bolomey Formülü	12
1.4.3. Graf Formülü	12
1.4.4. Abrams Formülü	12
1.5. Betonun Elastisite Modülü	13
1.5.1. Gerime-Deformasyon Eğrisi Yardımıyla Elastisite Modülünün Belirlenmesi	13
1.5.1.1. Sekant Modülü	14
1.5.1.2. Başlangıç Teğeti Modülü	14
1.5.1.3. Dinamik Elastisite Modülü	15
1.5.1.4. Betonun Elastisite Modülünün Tayini	16
1.5.1.5. Gerime-Deformasyon Eğrisi Yardımıyla Belirlenen Elastisite Modüllerinin Karşılaştırılması	20
1.5.1.6. Elastisite Modülünü Etkileyen Faktörler	21
1.5.2. Rezonans Frekansı Metodu	21
1.5.3. Ultrases Metodu	23
1.5.3.1. Cisim İçinde Ses Hızının Tayini	23
1.5.3.2. Ultrases Hızıyla Malzeme Kontrolü	26
1.5.4. Betona Zarar Vermeyen Metotların Avantajları	27
1.5.5. Değişik Metotlarla Bulunan Elastisite Modüllerinin Karşılaştırılması	28
1.6. Kimyasal Katkılar	29
1.6.1. Su Azaltıcı (Akışkanlaştırıcı) Katkılar	30
1.6.2. Su Azaltıcı Katkılarının Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları	31
1.6.3. Su Azaltıcı Katkılarının Sınıflandırılması ve Kimyasal Bileşimleri	31

1.6.4. Su Azaltıcı Katkıların Etki Mekanizması	31
1.7. Silis Dumanı	32
1.8. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	33
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	35
2.1.1. Agrega Özellikleri	35
2.1.1.1. Kum	35
2.1.1.2. Kırmataş I	35
2.1.1.3. Kırmataş II	36
2.1.1.4. Kırmataş Tozu	36
2.1.2. Çimento Özellikleri	37
2.1.3. Karışım Suyu	38
2.1.4. Katkıları	38
2.1.4.1. Normal Akışkanlaştırıcı	39
2.1.4.2. Süper Akışkanlaştırıcı	39
2.1.4.3. Hiper Akışkanlaştırıcı	40
2.1.5. Silis Dumanı	40
2.2. Beton Karışımları	40
2.3. Beton Üretimi	42
2.4. Taze Beton Deneyleri	42
2.4.1. Birim Ağırlık	42
2.4.2. İşlenebilme Deneyleri	42
2.4.2.1. Çökme Deneyi (Slump Deneyi)	42
2.4.2.2. VeBe Deneyi	43
2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri	43
2.5.1. Basınç Deneyi	43
2.5.2. Ultrases Hızı Ölçümü	44
3. DENEY SONUÇLARI	45
3.1. Taze Beton Deney Sonuçları	45
3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	48
3.2.1. Basınç Deneyi Sonuçları	48
3.2.2. Elastisite Modülü Değerleri	49
3.2.3. Ultrases Hızı Sonuçları	50
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	51
4.1. Birim Ağırlıklarla Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki	51
4.2. Silindir Basınç Dayanımı ile Küp Basınç Dayanımının Karşılaştırılması	52
4.3. Basınç Dayanımları ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki	54
4.4. Elastisite Modülleri ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki	55
4.5. Ultrases Hızları ile Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki	56
4.6. Ultrases Hızları ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki	58
4.7. Agrega Hacimleri ile Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki	58
4.8. Basınç Dayanımları ile Bolomey ve Feret Bağlantıları Arasındaki İlişki	61

4.9. Elastisite Modülleri ile Basınç Dayanımları Arasındaki İlişkiler	66
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
5.1. Taze Beton Deney Sonuçları	70
5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	70
5.3. Öneriler	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79

KISALTMALAR

PÇ	: Portland Çimentosu
TS	: Türk Standartları
BS	: Beton Sınıfı
ACI	: American Concrete Institute
RILEM	: Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de recherche sur les Matériaux et les Constructions
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ASCE	: American Society of Civil Engineers

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1	Agregaların ve Karışımın Granülometrik Analizi 36
Tablo 2.2	Agregaların Özgül ve Birim Ağırlıkları 36
Tablo 2.3	Çimentonun Fiziksel Özellikleri 37
Tablo 2.4	Çimentonun Basınç Dayanım Sonuçları 38
Tablo 2.5	Çimentonun Kimyasal Bileşimi 38
Tablo 2.6	Normal Akışkanlaştırıcının Özellikleri 39
Tablo 2.7	Süper Akışkanlaştırıcının Özellikleri 39
Tablo 2.8	Hiper Akışkanlaştırıcının Özellikleri 40
Tablo 2.9	Silis Dumanın Özellikleri 40
Tablo 2.10	Üretilen Betonların Kodlandırılması 41
Tablo 3.1	Taze Beton Deney Sonuçları 45
Tablo 3.2	Üretilen Betonların Hava miktarları ve Kompasiteleri 46
Tablo 3.3	Üretilen Betonların Karışımına Giren Gerçek Malzeme Miktarları 47
Tablo 3.4	Taze Beton Basınç Deney Sonuçları 48
Tablo 3.5	Elastisite Modülleri 49
Tablo 3.6	Ultrases Hızı Sonuçları 50
Tablo 4.1	Bağıntı Yardımıyla Bulunan Küp Basınç Dayanımları ile TS11222’de Verilen Küp Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması 53
Tablo 4.2	Feret ve Bolomey Katsayıları 62
Tablo 5.1	Beton Sınıflarına Karşı Gelen Silindir ve Küp Basınç Dayanımları 70

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	28 Günlük Beton Silindir Mukavemetinin C/W Oranına Bağlı Olarak Değişimi 4
Şekil 1.2.	28 Günlük Beton Silindir Mukavemetinin W/C Oranına Bağlı Olarak Değişimi 5
Şekil 1.3.	Yavaş ve Hızlı Yüklemeler Altındaki Deformasyonla 6
Şekil 1.4.	28 Günlük Beton numunesinin Çeşitli Yüklemeler Altındaki Deformasyon-Zaman Eğrisi 7
Şekil 1.5.	Betonun Gerilme-Deformasyon Parabolleri 9
Şekil 1.6.	Doğrusal ve Parabolik Kısımdan Oluşan Gerilme-Deformasyon Eğrisi 10
Şekil 1.7.	Elastisite Modülünün Gerilme-Deformasyon Eğrisi ile Bulunması 14
Şekil 1.8.	Gerilme-Deformasyon Eğrisinin Gerilme Hızıyla Değişimi 15
Şekil 1.9.	Gerilme-Deformasyon Eğrisi 17
Şekil 1.10.	Gerilmenin Değiştirilmesiyle Oluşan Gerilme-Deformasyon Diyagramı 17
Şekil 1.11.	Rezonans Frekansı Metodu Deney Düzeneği..... 22
Şekil 1.12.	Ses Hızının Gerilme ile Değişimi 26
Şekil 2.1.	TS 706 Referans ve Karışımın Granülometri Eğrisi 37
Şekil 4.1.	Birim Ağırlıklarla Silindir Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki 51
Şekil 4.2.	Birim Ağırlıklarla Küp Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki ... 52
Şekil 4.3.	Silindir Basınç Dayanımı ile Küp Basınç Dayanımının Karşılaştırılması 53
Şekil 4.4.	Su/Çimento Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki 54
Şekil 4.5.	Su/Çimento Oranı ile Küp Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki ... 55
Şekil 4.6.	Elastisite Modülü ile Su/Çimento Oranı Arasındaki İlişki 56
Şekil 4.7.	Ultrases Hızları ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki .. 57
Şekil 4.8.	Ultrases Hızları ile Küp Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki 57
Şekil 4.9.	Ultrases Hızları ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki 58
Şekil 4.10.	Agrega Hacimleri ile Silindir Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki 59
Şekil 4.11.	Agrega Hacimleri ile Küp Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki 59
Şekil 4.12.	Agrega Hacimleri ve Akışkanlaştırıcılar ile Silindir Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki 60
Şekil 4.13.	Agrega Hacimleri ve Akışkanlaştırıcılar ile Küp Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki 61
Şekil 4.14.	Silindir Basınç Dayanımı ile Feret Bağıntısı Arasındaki İlişki 63

Şekil 4.15.	Küp Basınç Dayanımı ile Feret Bağıntısı Arasındaki İlişki	64
Şekil 4.16.	Silindir Basınç Dayanımı ile Bolomey Bağıntısı Arasındaki İlişki	64
Şekil 4.17.	Küp Basınç Dayanımı ile Bolomey Bağıntısı Arasındaki İlişki	65
Şekil 4.18.	Deneysel Elastisite Modülleri ile Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki	66
Şekil 4.19.	TS 500'deki Bağıntı ile Bulunan Elastisite Modülleri ile Deneysel Elastisite Modüllerinin Basınç Dayanımlarına Göre Karşılaştırılması	67
Şekil 4.20.	Statik Elastisite Modülü Bağıntıları ile Bulunan Elastisite Modülleri ile Deneysel Elastisite Modüllerinin Basınç Dayanımlarına Göre Karşılaştırılması	67
Şekil 4.21.	Dinamik Elastisite Modülü Bağıntıları ile Bulunan Elastisite Modülleri ile Deneysel Elastisite Modüllerinin Basınç Dayanımlarına Göre Karşılaştırılması	68
Şekil 4.22.	TS 500'de Verilen Elastisite Modülü Bağıntısıyla ve Deneysel Elastisite Modülü Değerleri Yardımıyla Bulunan Bağıntının TS 11222 de Verilen Standart Beton Basınç Dayanımlarına Göre Karşılaştırılması	69

SEMBOL LİSTESİ

W	: Su Ağırlığı
C	: Çimento Ağırlığı
U	: Kum Miktarı
V	: Agregat Miktarı
h	: Hava Miktarı
δ	: Özgöl Ağırlık
Δ	: Birim Ağırlık
ε	: Şekil Değiştirme
σ	: Gerilme
R	: Maksimum Basınç Dayanımı
f_c	: Basınç Dayanımı
E	: Elastisite Modülü
K_F	: Feret Katsayısı
K_B	: Bolomey Katsayısı
f_{cc}	: Çimento Norm Dayanımı
K_G	: Graf Katsayısı
V	: Ultrases Hızı
f	: Frekans
t	: Zaman
g	: Yerçekimi İvmesi
L	: Uzunluk
d	: Çap
ν	: Poisson Oranı

BETONDA BASINÇ DAYANIMI İLE ELASTİSİTE MODÜLÜ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

ÖZET

Çok uzun yıllardan beri betonların elastisite modülleri araştırma konusu olmuştur. Elastisite modülleri bir çok metodla belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan bu farklı metodlar betonların elastisite modüllerinin farklı değerler almasına yol açabilirler.

Yapılan bu çalışmalar sonrasında betonların elastisite modülleri ile ilgili bir çok bağıntı öne sürülmüştür. Bulunan bu bağıntılar genel olarak betonun basınç dayanımı kullanılarak betonun elastisite modülünün bulunmasını sağlarlar. Fakat bu bağıntılarla bulunan elastisite modülleri betonun gerçek elastisite modüllerine ancak yakın değerler verirler.

Türk standartlarında da betonun elastisite modülüyle ilgili bağıntı bulunmaktadır. Bu bağıntı da diğerleri gibi gerçekten biraz uzak değerler verebilir. Bu bağıntının gerçekten uzak değerler vermesi, elastisite modülünün beton ve betonarme hesaplarda kullanımının öneminden dolayı, sakıncalar doğurmaktadır.

Bu nedenden dolayı betonlardaki elastisite modüllerinin dağılımını daha gerçekçi olarak tespit edebilmek için bu çalışmada düşük basınç dayanımından yüksek basınç dayanımına kadar çok farklı basınç dayanımlarına sahip betonlar üretilmiştir. Bu çalışmada su/çimento oranları, çimento dozajları ve katkıları birbirinden farklı toplam 20 ayrı seri beton üretilmiştir. Her beton serisi beş silindirik, beş de küp numune olmak üzere toplam on numunedir.

Üretilen betonlar üzerinde elastisite modülü, basınç dayanımı ve ultrases hızı ile ilgili deneyler yapılmıştır. Bulunan sonuçlarla elastisite modülleri ile basınç dayanımları, su/çimento oranları ve ultrases hızları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Ayrıca basınç dayanımı ile su/çimento oranları, birim ağırlık, ultrases hızı ve agrega hacimleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Çalışmanın sonucunda basınç dayanımı ile birim ağırlık, su/çimento oranı ve ultrases hızı arasında korelasyon yüksek bağıntılar elde edilmiştir. Yine aynı şekilde elastisite modülüyle ultrases hızı ve su/çimento oranı arasında korelasyonu yüksek bağıntılar elde edilmiştir.

Elastisite modülüyle basınç dayanımı arasında korelasyon katsayıları yüksek bağıntılar bulunmuştur. Basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında bulunan bu bağıntılar beton ve betonarme hesaplarda daha gerçekçi yaklaşımlar elde edilmesini sağlamış olacaktır.

THE RELATION BETWEEN COMPRESSIVE STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY IN CONCRETE

SUMMARY

The modulus of elasticity of concrete has been studied for a quite long period of time. Moduli of elasticity were tried to be determined by using various methods have been applied to find the moduli of elastiscity. The usage of these different methods may lead elasticity moduli of concrete taking different values.

As a result of these studies, various relations were clarified regarding the moduli of elasticity of concrete. These relations, in general, provide the ability of calculation modulus of elasticity of concrete by using compressive strength concept. However, the modulus of elasticity that was gathered by using these relations could only provide approximate values of the real elasticity modulus of any particular concrete.

There is also a relation, stated in the Turkish Standards regarding the elasticity modulus of concrete. This relation, as the other similar relations also possesses values, which are not close to the real values. This situation creates some problems that should be tackled since the usage of elasticity modulus in concrete and reinforced concrete calculations is a very critical and an important issue.

As a result, in order to identify the variation of modulus of elasticity of concrete with strength, different concretes with different compressive strengths between high and low values were produced in this study. 20 different series of concrete with different water/cement ratio, cement dasages, and admixtures were prepared. Each concrete series consist of 10 specimens in total involving with five cylinders and five cube specimens.

Some experiments that related with modulus of elasticity, compressive strength and ultra pulse velocity were applied over these concrete specimens. By using the data, relations between moduli of elasticity and compressive strength, water/cement ratios and ultra pulse velocity were investigated. Moreover, the relations between compressive strength and water/cement ratios; the relation between unit weight, ultra pulse velocity and aggregate volume ratio also were searched.

As a result of this study high corelations were obtained between, compressive strength and unit weight and, water/ cement ratio and ultra pulse velocity. Furthermore, high correlation coefficients were found between modulus of elasticity, ultra pulse velocity and water/cement ratios.

Finally, high correlations were found between modulus of elasticity and compressive strength. These relations between modulus of elasticity and compressive strength would enable finding more realistic approaches in the calculations of modulus for plain concrete and reinforced concrete.

1.GİRİŞ

1.1. Beton

Beton, inşaat mühendisliği alanında yüz yılımızın en önemli yapı malzemesidir. Beton, önceden şekil verilebilen yapay bir taş olarak tanımlanabilir. Beton, agrega adı verilen kum, çakıl, mıcır gibi taneli malzemenin, onları yapıştıran çimento ve su ile karıştırılması sonucu meydana gelen bir yapı malzemesidir. [1] Karışımında çimento, kum ve iri agrega tanelerini birbirine bağlar. Kum ise iri agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun kompasesini artırır. Çakıl veya kırma taş taneleri betonun bir nevi iskeletini oluşturur. Böylelikle bunlar malzemenin maruz kaldığı kuvvetlere karşı koyarlar. [2] Beton yük taşıyan, diğer bir deyişle esas taşıyıcı bir malzemedir. [1]

Yerleşik yaşam düzeyine erişen insan toplulukları yapay taş üretimi işine hızla girmişler ve neolitik devirde (M.Ö. 7000) kireç betonunu elde etmişlerdir. Bu ilk betonlar, söndürülmüş kireç içine volkanik toprak katılmasıyla oluşturulan hamurla ufak taş parçalarını yapıştırarak üretilmişti. Bu süreç yüzyıllar boyunca gelişme göstermeden uygulanmıştır.

Günümüz betonlarında da benzer bir yol izlenir. Agrega adını verdiğimiz taş parçaları, bağlayıcı denilen maddelerle yapıştırılarak sürekli bir yapıya kavuşturulur. Ancak bağlayıcı maddeler ilk çağların bağlayıcılarından farklıdır ve daha niteliklidir. 1824 de Aspadin tarafından icat edilen Portland Çimentosu modern betonun ilk bağlayıcısı olmuştur.

Yapay bir taş olan beton, üretiminin ilk aşamasında yüksek viskoziteli bir sıvıdır; geometrisi çok karmaşık bir yapı elamanının kalıbına sürekli bir biçimde yerleştirilebilir. Bu nitelik betonun doğal taşlara olan üstünlüğünü gösterir, çünkü doğal taşlar işlenmeden veya yontulmadan belirli bazı geometrik şekillerin dışında kullanılmazlar, sürekli taşıyıcı bir ortam meydana getirmezler. [3]

1.2. Betonun Basınç Dayanımı

Betonun mekanik dayanımları arasında değeri en büyük olanı basınç dayanımıdır. Bu konuda şunu söyleyebiliriz; betonun basınç dayanımı bileşimin belirli bir durumu için bileşimin bir fonksiyonudur. Bileşimin belirli bir durumu için basınç dayanımı maksimum değeri alırken diğer özellikler maksimum değerlerini değil, fakat maksimumdan az fark eden değerlere sahip olurlar. [3,4]

Ayrıca betonun basınç dayanımının zamanında bir fonksiyonu olduğunu ve son mukavemetini yıllar sonra aldığını unutmamak gerekir. [4]

1.2.1. Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler

Betonun basınç dayanımı çok farklı faktörlerden etkilenir. Basınç dayanımına etki eden faktörleri incelemekte amaç, basınç dayanımı yüksek olan beton elde etmek için özellikle betonun bileşiminin ne gibi kurallara uyarak saptanması gerektiğini anlamaktır.

Betonun dayanımı, çok sayıda faktörlerin etkilenmesinden dolayı, büyük bir dağılım göstermektedir. Başka bir deyişle beton üretiminde aynı agrega, çimento kullanılmasına ve bileşiminde ve üretim metotlarında bir değişiklik yapılmamasına karşın elde edilen betonların dayanımları birbirinden fark etmekte ve oldukça geniş bir aralık içinde değişmektedir.

İnceleme sınırlarını bu şekilde belirtildikten sonra betonun basınç dayanımını etkileyen belli başlı faktörlerin şunlardan ibaret olduğu söylenebilir. [2]

- 1- Çimento ile ilgili faktörler
- 2- Su miktarı
- 3- Betonun kompasitesi

1.2.1.1. Çimento İle İlgili Faktörler

Çimento iki bakımdan beton dayanımının değişmesine neden olmaktadır. Bunlardan birincisi çimento miktarı, yani $1m^3$ betonda ağırlık cinsinden çimento miktarıdır. Çimento dozajının arttırılması ile çimento hamurunun hacmi arttırılmış olur. Bu şekilde betonda herhangi bir zorlama altında çimento hamurunda meydana gelen gerilmelerin küçük değerler alması sağlanır. Bu durum betonun daha büyük bir

gerilme altında dayanımını kaybetmemesine neden olur. Kısaca betonun dayanımı çimento miktarı ile birlikte artar.

Çimentonun ikinci etkileme şekli ise, çimentonun mekanik dayanımının betonun dayanımını etkilemesidir. Çimentonun dayanımının yüksek olması ile çimento hamuru parçalanmadan daha büyük gerilmelere maruz kalabilir ki bu da betonun dayanımını artırır. [2]

1.2.1.2. Karma Suyu Miktarı

Beton üretiminde kullanılan karma suyu bağlayıcı maddenin hidratasyonunu sağlar, kum ve iri agrega tanelerini ıslatır ve betonun işlenebilme özelliğinin istenilen düzeyde olmasına yardım eder. [2] Karma suyu karışıma katıldığında agrega tarafından tutulur. Karışıma katılan karma suyunun bir miktarı agreganın boşlukları arasına girer ve bir miktarı da serbest olarak agrega yüzeyinde tutunur. [5]

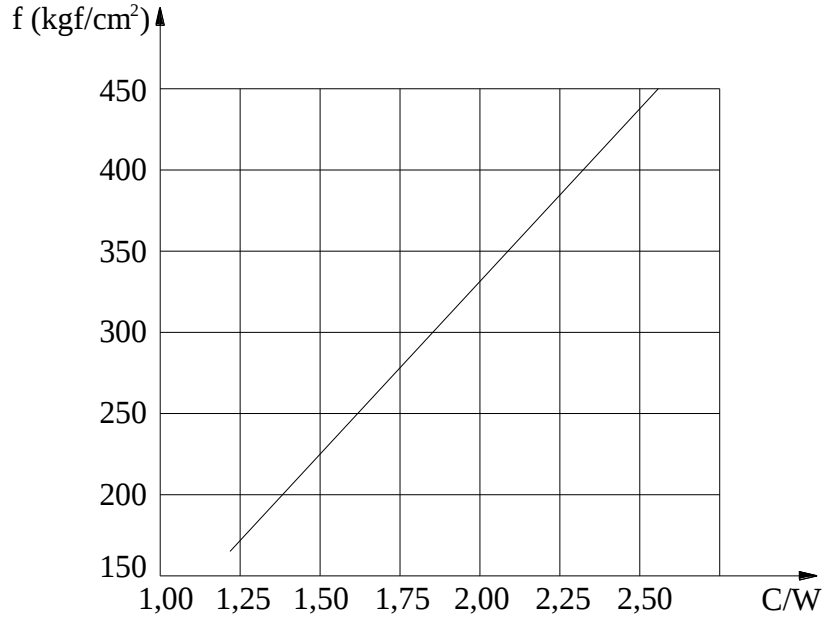
Belirli miktar çimento ve agrega kullanarak beton üretimi istendiği zaman buna uygun gelen bir optimum su miktarı vardır. Bu miktardaki suyun kullanılmasıyla, dayanımı maksimum olan beton elde edilir. Optimum miktardan daha az su kullanılırsa çimento hidratasyonunu tam olarak yapamaz, agrega tanelerinin yüzeyleri tamamen ıslanmaz, bu taneler ile çimento arasındaki aderans zayıflar ve betonun işlenebilme özelliği azalır. Bütün bu gelişmelerin sonunda boşluklu ve hidratasyonunu tamamlamış olarak elde edilen betonun dayanımı düşük olacaktır. Betona konulan suyun optimum miktardan büyük olması halindeyse çimento hamurunun dayanımı azalacak, fazla su betonun sıkışmasına engel olarak boşlukları arttıracak ve bu etkiler de dayanımın azalmasına yol açacaktır. [2]

Çimento dozajının yüksek olması dayanımı artırır, ancak dayanıma etkiyen faktör salt dozaj değildir su/çimento oranı da önemli bir faktördür. [1] Betonun basınç dayanımı ve dinamik elastisite modülü gibi özellikleri büyük ölçüde su/çimento oranından etkilenmektedir. [6]

Su miktarı yani W arttıkça dayanım azalır. W azaldıkça dayanım artar. Yukarıda dayanımın çimento miktarı yani C ile birlikte artmakta olduğu belirtildi. Bu iki faktör birleştirilirse, betonun dayanımını, özellikle basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör olan su/çimento (W/C) oranı elde edilir. W/C oranında W ve C aynı bir beton karışımında ağırlık cinsinden sırasıyla su ve çimento miktarlarını göstermektedir. Bir betonda W/C oranı ne kadar küçük ise dayanımda o kadar

yüksek değer alır. [2] Buna ilaveten W/C oranının artışıyla agreganın betonun dayanımı üzerindeki etkiside giderek azalır. [7]

TS802 Beton karışım hesap esaslarında verilen değerlere göre 28 günlük beton silindir dayanımlarının C/W ve W/C oranlarına bağlı olarak değişimleri Şekil 1.1' de ve Şekil 1.2'de gösterilmiştir. [8]



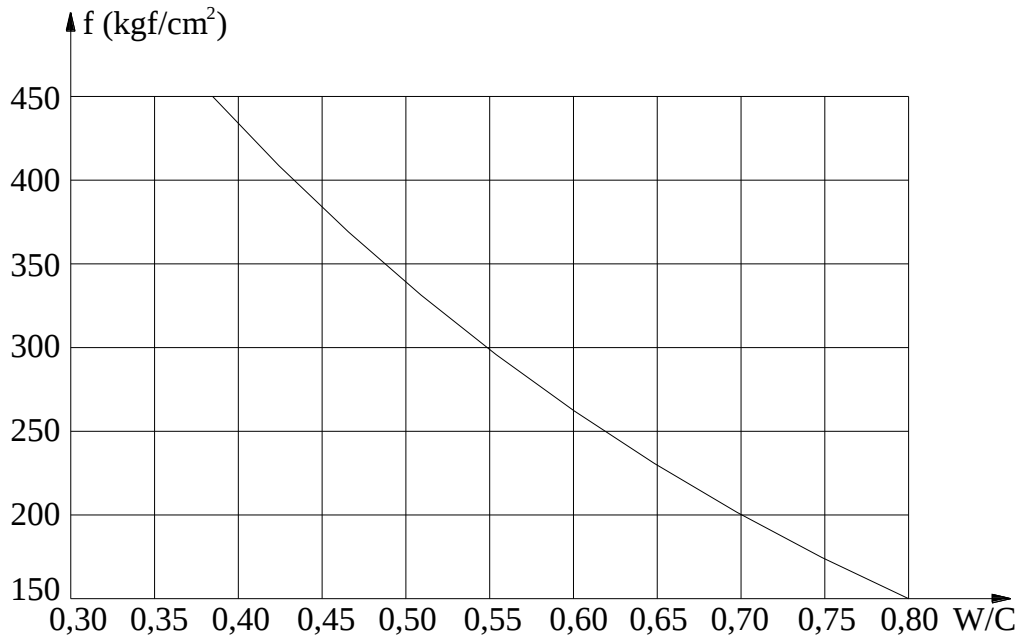
Şekil 1.1. 28 Günlük Beton Silindir Mukavemetinin C/W Oranına Bağlı Olarak Değişimi

Ayrıca W/C oranının betonun fiziksel özellikleri üzerine önemli etkileri vardır. Özellikle betonun geçirimsizlik özelliği ve donmaya dayanıklılığı ile W/C oranı arasında yakın bağıntılar bulunmaktadır. [2]

1.2.1.3. Kompasitenin Mukavemet Üzerine Etkisi

Betonun kompasitesi ile 1 m^3 betonda katı cisimlerin işgal ettikleri gerçek hacimlerin toplamı anlaşılmaktadır. Buna göre 1 m^3 betonda C, U, V kg cinsinden sırasıyla çimento, kum ve iri agreganın miktarını gösterirse ve δ_c , δ_u , δ_v sırasıyla çimentonun, kumun ve iri agreganın özgül ağırlığı ise betonun Δ ile belirtilen kompasitesi, yukarıda verilen tanıma göre şu denklem ile hesap edilir.

$$\hat{\alpha} = \frac{C}{\delta_c \times 1000} + \frac{U}{\delta_u \times 1000} + \frac{V}{\delta_v \times 1000} \quad (1.1)$$



Şekil 1.2. 28 Günlük Beton Silindir Mukavemetinin W/C Oranına Bağlı Olarak Değişimi

Kompasitenin küçük olması, betondaki boşlukların büyük olması demektir. Boşlukların, yani porozitenin, büyük olmasının dayanımı azalttığı ise yapı malzemesinin en önemli kanunlarından biridir. [2]

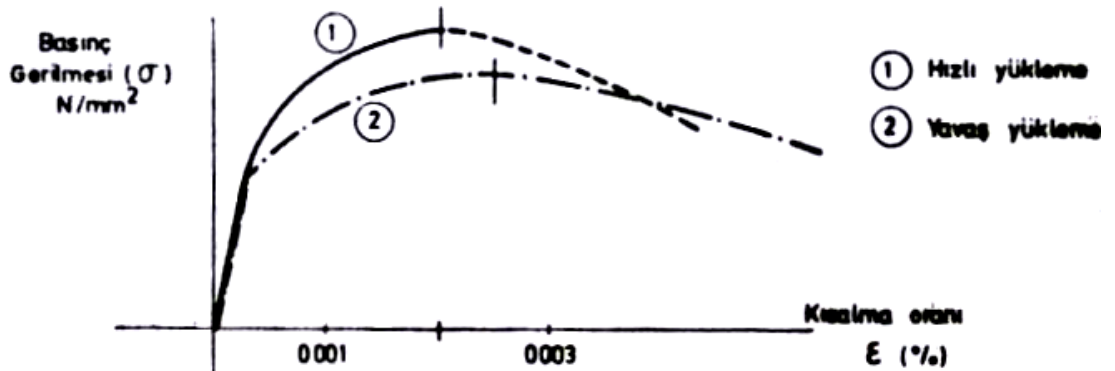
Agrega konsantrasyonun betonun dayanımı ve elastisite modülü üzerine etkileri vardır. Agreg a konsantrasyonun artmasıyla basınç dayanımı artmaktadır. Elastisite modülü, agreganın ve bağlayıcı olan çimento hamurunun elastisite modüllerinin ve bu bileşenlerin beton içindeki hacim oranlarının bir fonksiyonudur. Kırmataş veya çakıl gibi agregalarla üretilmiş betonlarda, agreg a konsantrasyonunun artışı, betonların elastisite modüllerini arttırmaktadır. [7]

Yukarıda sıralanan faktörlerin yanında numunenin bekletildiği kür koşulları da basınç mukavemeti ve elastisite modülü üzerine etki yapar. Yükseltilmiş kür sıcaklığı daha az hidrasyon derecesiyle sonuçlanır ve buna bağlı olarak sertleşmiş betonun özelliklerini olumsuz yönde etkiler. [6]

1.3. Betonun Gerilme Deformasyon Diyagramları

Basınç kuvvetleri altında betonun davranışını açığa vuran en önemli karakteristik gerilme-deformasyon diyagramıdır. Kısa süren yükleme sonunda elde edilen bu diyagram, deney tekniği bakımından iki değişik metot ile elde edilir. Metotlardan biri, deneyde gerilmenin sabit bir hızla artırılarak yapılması, diğeri ise deformasyon hızı sabit tutulacak şekilde kuvvetin artırılarak deneyin yürütülmesidir. Burada deney hızının artırılması betonun dayanımını belirgin ölçüde artırırken deformasyonu da belirgin ölçüde azaltır. Fakat dayanımdaki artışlarla deformasyondaki azalmalar sınırlı kalmaktadır. [2]

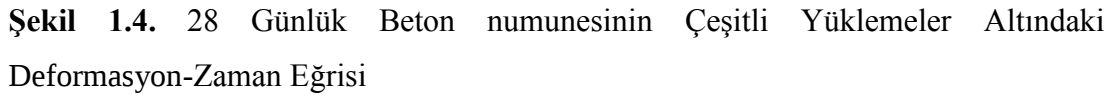
Betonun hızlı, yavaş ve sürekli basınç yüklemeleri altındaki farklı deformasyonları, çimento hamurunun jel bünyesiyle açıklanmaktadır. Özellikle sürekli yükler altında gösterdiği sünme çimento hamurunun önemli bir özelliğidir. Betonların içindeki iki bileşenden biri olan agrega, genellikle daha rijit olduğundan deformasyonların esas kaynağı çimento hamuru olarak kabul edilir. Betonların çeşitli yükleme hızları altında gösterdikleri deformasyonların karakterleri çimento hamurundaki gibi olur. Betonların yavaş ve hızlı yükleme durumları altındaki deformasyonları Şekil 1.3’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Yavaş ve Hızlı Yüklemeler Altındaki Deformasyonlar

Şekil 1.4’te 28 günlük bir numunenin sabit σ gerilmesiyle yüklendiğinde, öncelikle ε_0 elastik deformasyonunu yaptığı ve bundan sonra gerilmenin sabit tutulduğu 230 gün zarfında deformasyonun arttığı görülür. Ayrıca yük kaldırılınca

Yük hızlı olarak uygulanıp, daha sonra sabit tutulacağı yerde, bir çok binanın inşaatında olduğu gibi yavaş ve devamlı bir şekilde arttırılırsa elastik deformasyonlarla sünme birlikte gerçekleşir. [9]



(ε) şekil 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 itibaren $\Delta\sigma$ 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 basit şekilde (1.2) diferansiyel denklemi ile ifade edilir.

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

Bu denklemin integrali

$$\sigma = K\left(\varepsilon_0\varepsilon - \frac{1}{2}\varepsilon^2\right) \quad (1.3)$$

ifadesini verir.

ε_0 maksimum kısalma oranı ve R malzemenin maksimum basınç dayanımı olmak üzere $\varepsilon = \varepsilon_0$ olduğu zaman $\sigma = R$ olduğuna göre betonun gerilme deformasyon eğrisi için parabolü gösteren şu fonksiyon bulunur.

$$\sigma = R \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) \quad (1.4)$$

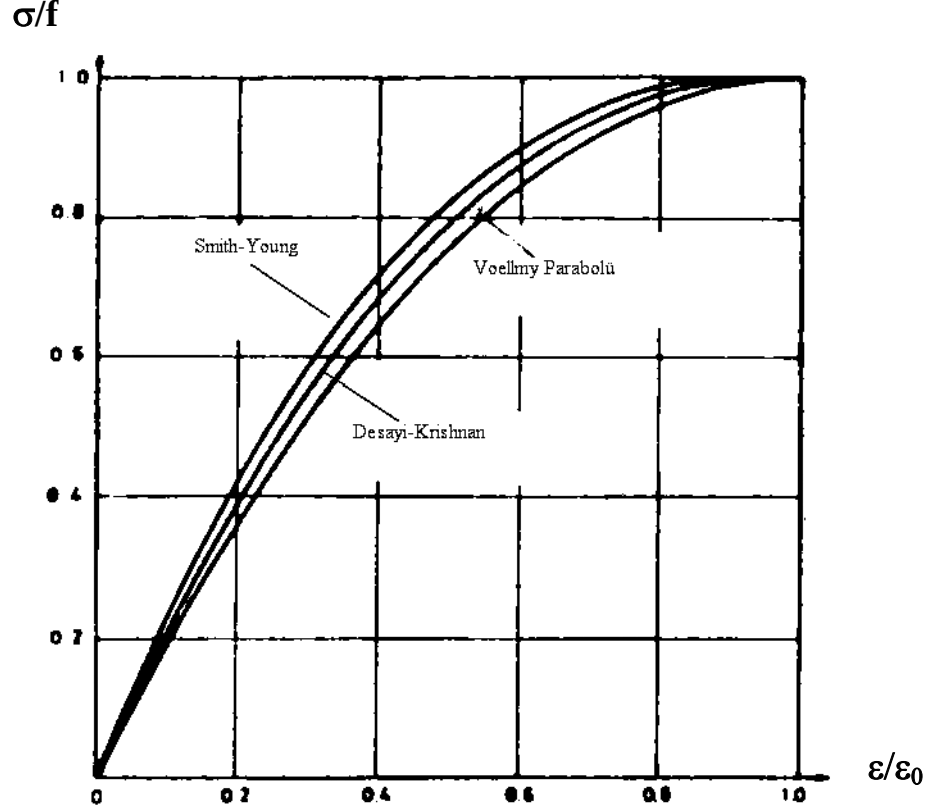
İsviçre’de Voellmy tarafından bulunan bu denkleme göre çizilen eğri bir çok halde betonun deney sonuçlarına dayanılarak buluna gerilme deformasyon eğrisini yakından izlemektedir.

Deney neticelerine olabildiğince yaklaşmak amacıyla yapılan çalışmalar sonunda betonun gerilme deformasyon eğrisi için başka fonksiyonlar da bulunmuştur. Bunlardan en çok kullanılanları şunlardır. [10]

Smith-Young Formülü
$$\sigma = R \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} e^{\left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)} \quad (1.5)$$

Desayı ve Krishnan Formülü
$$\sigma = \frac{2R \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad (1.6)$$

Betonun iki karakteristiğinin basınç dayanımı f ve ε_0 'ın bilinmesiyle eğriler tamamen belirgin olmaktadır. Bu üç fonksiyonu gösteren eğriler boyutsuz σ/f ve $\varepsilon/\varepsilon_0$ eksenlerinde Şekil 1.5 'te gösterilmiştir.

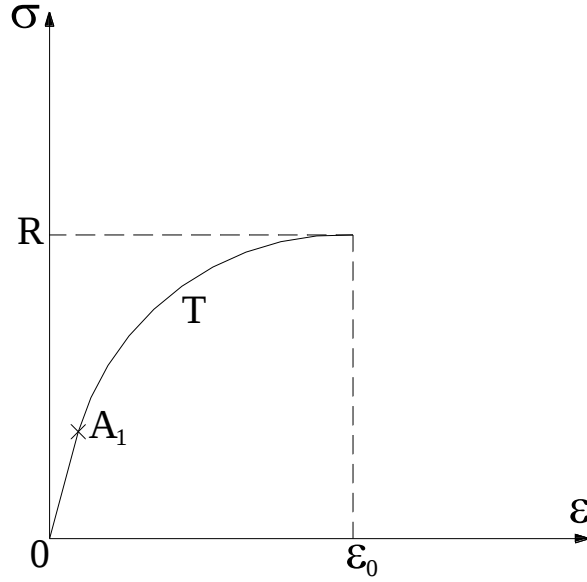


Şekil 1.5. Betonun Gerilme-Deformasyon Parabolleri

Şekil 1.5'te de görüldüğü gibi gerilme deformasyon eğrisi ile ε eksenini arasında kalan alan veya bağıl alan denilen karakteristik en büyük değerini Smith-Young parabolünde, en küçük değerini Voellmy parabolünde almaktadır. Diğer parabol olan Desayi ve Krishnan parabolüne ait bağıl alan ise bu iki parabol 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 hesap 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. [2] Diğer taraftan da Voellmy parabolünün kolay kullanılması bakımından diğerleri üzerinde önemli bir üstünlüğü vardır. [10]

Gerilme deformasyon eğrisinin bir doğru parçası içermesi halinde gerilme deformasyon eğrisinin iki kısımdan meydana geldiği kolaylıkla anlaşılmaktadır. [4]



Şekil 1.6. Doğrusal ve Parabolik Kısımdan Oluşan Gerilme-Deformasyon Eğrisi

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

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \sigma < \sigma_A \text{ için} \quad E = \frac{\sigma_A}{\epsilon_A} \quad (1.7)$$

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

$$\sigma = A\epsilon^2 + B\epsilon + C \quad (1.8)$$

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

$$E = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} \text{ olduğuna göre; } A = -\frac{1}{4} \frac{E^2}{(R - \sigma_A)} \quad (1.9)$$

$$B = E \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\sigma_A}{(R - \sigma_A)} \right) \quad (1.10)$$

$$C = -\frac{1}{4} \frac{\sigma_A^2}{(R - \sigma_A)} \quad (1.11)$$

Betonun gerilme-deformasyon eğrisinin iki kısımdan meydana geldiğini kabul etmek hesaplarda bir takım zorluklar meydana getirir. Bundan dolayı betonun gerilme deformasyon eğrisi tek bir kısımdan oluşan bir eğri olarak alınabilir. [10]

1.4. Basınç Dayanım Formülleri

Betonun bileşimi belli iken basınç dayanımı hesaplanabilir. Ne var ki bu alandaki çalışmalar matematiksel kesinlik taşıyan bağıntıların elde edilemeyeceğini kanıtlar durumdadır. Özellikle beton, deneme amacıyla bir kere üretilmiş ve dayanımı saptanmışsa, bu formüllerdeki katsayılar kesin bir biçimde belirlenmekte ve ikinci üretimde bu formüllerden yararlanılarak gerekli düzeltmeler yapılmakta ve istenilen dayanım elde edilebilmektedir. Basınç dayanım formüllerinden en önemlileri aşağıda verilmiştir. Hemen hemen tüm formüller, su/çimento oranının dayanımı etkileyen birleşim parametresi olduğunu kabul etmektedirler.

Bu formüllerde 1 m^3 yerleşmiş betona giren bileşenler çimento, kum, iri agrega, su, hava boşluğu sırasıyla C, U, V, E, h harfleriyle gösterilmiştir. Ağırlık cinsinden olan değerler kg cinsindendir ve büyük harflerle gösterilmişlerdir. Hacim değerleri ise küçük harflerle gösterilmişlerdir. [1]

1.4.1. Feret Formülü

$$f_c = K_F \left(\frac{c}{c+e+h} \right)^2 \quad (1.12)$$

Burada K_F bir katsayıdır. Beton yaşına, çimento türüne, çimento miktarına göre 80 ila 300 N/mm² arasında değişir. f_c ise N/mm² cinsinden betonun basınç dayanımıdır.

1.4.2. Bolomey Formülü

$$f_c = K_B \left(\frac{C}{E+h} - k' \right) \quad (1.13)$$

k' katsayısı bir ikincil katsayıdır, 0,3 – 0,5 arasında değişir. K_B değeri de beton yaşına, çimento tür ve dozajına bağlı bir katsayıdır ve 7 ila 35 N/mm² arasında değerler alabilir.

1.4.3. Graf Formülü

$$f_c = \frac{f_{cc}}{K_G} \left(\frac{C}{E} \right)^2 \quad (1.14)$$

Bu formülde f_{cc} çimentonun norm dayanımıdır. K_G değeri ise 4 ile 10 arasında değişen bir değerdir ve beton yaşından bağımsızdır. [1]

1.4.4. Abrams Formülü

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{w/c}} \quad (1.15)$$

Burada K_1 ve K_2 ampirik katsayılar ve W/C su/çimento oranını gösterir. Bu formül 1919 yılında Duff Abrams tarafından kanıtlanmıştır. [5]

1.5. Betonun Elastisite Modülü

Bir malzeme yük altında şekil değişimine uğratıldığı ve sonra yük kaldırıldığı zaman ilk şekline dönebilir ya da dönemez. Gerilme kaldırıldığı zaman geri dönebilen şekil değiştirmeye elastik şekil değiştirme adı verilir. Elastik limit sınırı aşıldığında ise, malzemelerin çoğu geri dönmeyen plastik şekil değiştirme yaparlar. Elastik şekil değiştirme yapı malzemelerinin çoğunda gerilmeye orantılı veya lineer olarak bağlıdır. Elastik şekil değiştirmenin zamandan bağımsız olduğu yani gerilme uygulanır uygulanmaz ani olarak yer aldığı kabul edilir. Tek eksenli yükleme halinde bu bağıntı $\sigma=E.\varepsilon$ (Hooke Kanunu) şeklindedir ve elastisitenin temel kanunu teşkil eder. Bu bağıntıdaki E orantı katsayısına malzemenin elastisite modülü adı verilir.[11]

Betonun elastiklik modülünün bilinmesi beton, betonarme ve öngerilmeli beton yapılarının deformasyonlarının hesaplanmasına yarar. Bu deformasyonlar bir çok bakımdan bilinmesi gerektiğinden elastisite modülü tayin edilmesi gerekli olan bir karakteristiktir. Ayrıca elastisite modülünün bilinmesinden faydalananarak deformasyonları ölçmek suretiyle gerilmeleri hesaplayabiliriz. Betonlarda elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında bağıntılar vardır. Bu bağıntılar bize malzemeyi tahrip etmeden betonun yaklaşık olarak dayanımının bulunmasını sağlarlar.

Betonun bünyesinde çimento hamuru gibi viskoz bir fazın bulunması bu malzemenin deformasyonunun katı cisimlerin deformasyonlarından farklı bir şekilde olmasına yol açmaktadır. [10]

1930'lu yıllardan beri elastisite modülü araştırma konusu olmuştur. Genel olarak elastisite modül üç yol ile belirlenir: gerilme-deformasyon eğrisi yardımı ile, rezonans frekansı metodu ile ve ultrases metoduyla. Farklı metotlar elastisite modülünün farklı değerler almasıyla sonuçlanabilirler. [12]

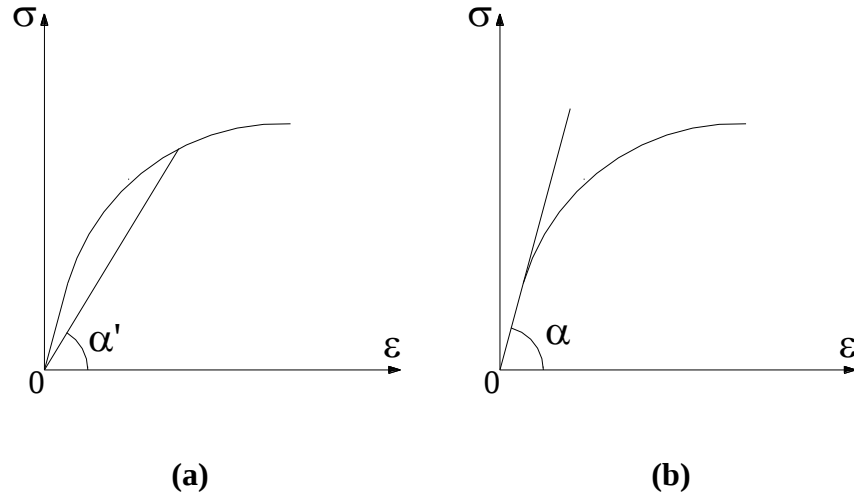
1.5.1. Gerilme-Deformasyon Eğrisi Yardımıyla Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Elastisite modülünün hesaplanmasının en doğru yolu beton numunesine basınç uygulamak ve numunenin gerilme-deformasyonunu kaydetmektir. Bu metot, sertleşmiş beton için uygundur fakat genç betonlarda, plastisite yanal deformasyonlara yol açtığından pek uygun değildir. [13]

Elastisite modülü hesaplanması için kaydedilen gerilme deformasyon eğrisinde genel olarak başlangıçta bir doğru parçası bulunmamaktadır. Bu durum betonlarda çeşitli elastisite modüllerinin bulunmasına sebep olmaktadır. Bunlar sekant modülü, başlangıç teğeti modülü ve dinamik elastisite modülüdür. Bu modüller sırasıyla aşağıda açıklanmıştır. [10]

1.5.1.1. Sekant Modülü

Bu modül gerilme deformasyon eğrisinin herhangi bir M noktasının koordinat merkezini birleştiren OM doğrusunun eğimidir. Şekil 1.7 (a) da görüldüğü gibi sekant modülü yani $E_s = \tan \alpha'$ dır. Yine kolaylıkla görülmektedir ki E_s gerilmenin değeri ile değişen büyüklüktür. [10] Numunelerin deneysel olarak gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinden belirlendiğinden sekant modülü statik modül olarak adlandırılır. [5]



Şekil 1.7. Elastisite Modülünün Gerilme-Deformasyon Eğrisi ile Bulunması

1.5.1.2. Başlangıç Teğeti Modülü

Bu modül gerilme deformasyon eğrisinin başlangıçtaki teğetinin eğimidir. Şekil 1.7 (b) deki duruma göre başlangıç teğeti modülü yani $E_t = \tan \alpha$ dır. Betonun maruz kaldığı gerilmelerin küçük olması halinde, özellikle R/3'den küçük olduğu takdirde başlangıçtaki teğetin gerilme- deformasyon eğrisiyle çakıştığını pratik

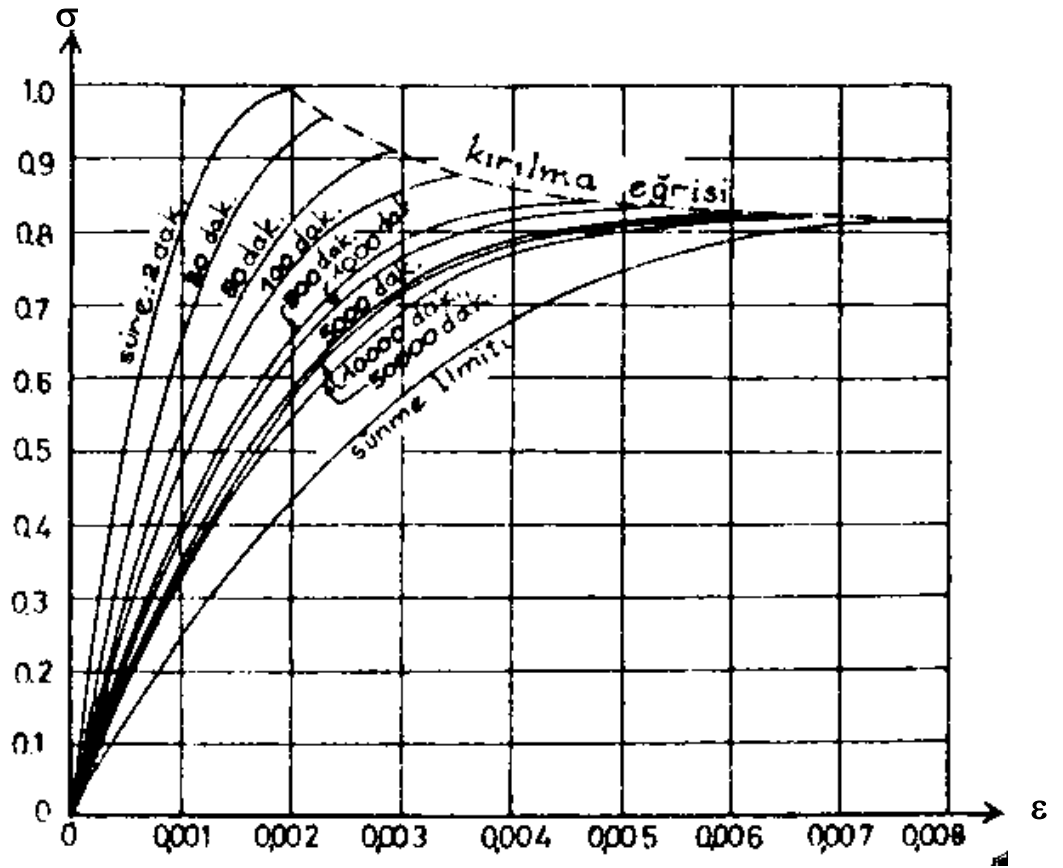
bakımdan kabul etmek mümkündür. Bu durumda beton için “Hooke Kanunu’nun” uygulanması doğaldır. Böylelikle σ , $R/3$ ’den küçük olmak şartıyla;

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_t} \quad (1.16)$$

ifadesini kullanılarak deformasyonu hesaplanabilir. [10]

1.5.1.3. Dinamik Elastisite Modülü

Gerilme deformasyon eğrisinin şekli uygulanan gerilme hızıyla birlikte değişmektedir. Değişimin ne şekilde olduğu Şekil 1.8’de görülmektedir.



Şekil 1.8. Gerilme-Deformasyon Eğrisinin Gerilme Hızıyla Değişimi

Burada başlangıç teğeti modülünün yükleme hızıyla birlikte azaldığı anlaşılmaktadır. Bunun aksi de bu karakteristiğin yükleme hızıyla birlikte artmasıdır.

Yükleme hızı belirli bir değerin üstünde arttırılacak olursa, elde edilecek gerilme-deformasyon eğrileri başlangıçta aynı bir OA doğrusuna teğet kalırlar. Bu E_t 'nin bir maksimum değere sahip olması veya belirli bir değeri geçmemesi demektir. İşte E_t 'nin bu maksimum değerine Dinamik Elastisite Modülü denir. Genel olarak iki dakika süren bir deneyde elde edilen gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıçtaki teğetinin eğimini dinamik elastisite modülü olarak kabul etmek mümkündür. [10]

1.5.1.4. Betonun Elastisite Modülünün Tayini

Elastisite modülü betonun gerilme deformasyon eğrisinin fonksiyonu saptanmış ise kolaylıkla bulunabilir. Bu fonksiyonun (ϵ) a göre türevinin $\epsilon=0$ için değeri elastisite modülünü verir. Voellmy ve Smith- Young fonksiyonları için bu metot uygulanırsa şu ifadeler bulunur.

$$\text{Voellmy fonksiyonu halinde:} \quad E_d = \frac{2R}{\epsilon_0} \quad (1.17)$$

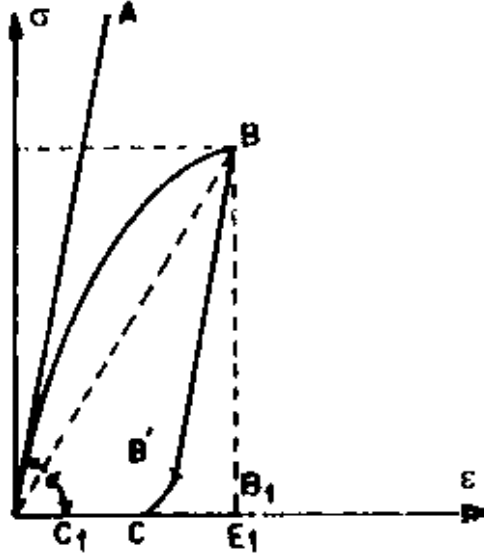
$$\text{Smith-Young fonksiyonu halinde:} \quad E_d = \frac{eR}{\epsilon_0} \quad (1.18)$$

Bu bağıntılarda E_d N/mm² cinsinden betonun dinamik elastisite modülüdür, ϵ ise şekil değiştirme miktarıdır.

Basınç gerilmesi sonucunda Şekil 1.9'daki BB' doğrusu OA doğrusuna paraleldir. Bu halde BB' doğrusunun eğimi bize doğrudan doğruya elastisite modülünü verir. Böylelikle bu modülü hesaplayabilmek için belirli bir σ_1 gerilmesi altındaki ϵ_1 deformasyonunu ve gerilmeyi bir σ_1' değerine indirerek bu gerilme altındaki ϵ_1' deformasyonunu ölçmek yeterlidir. Yukarıda açıklanan duruma göre;

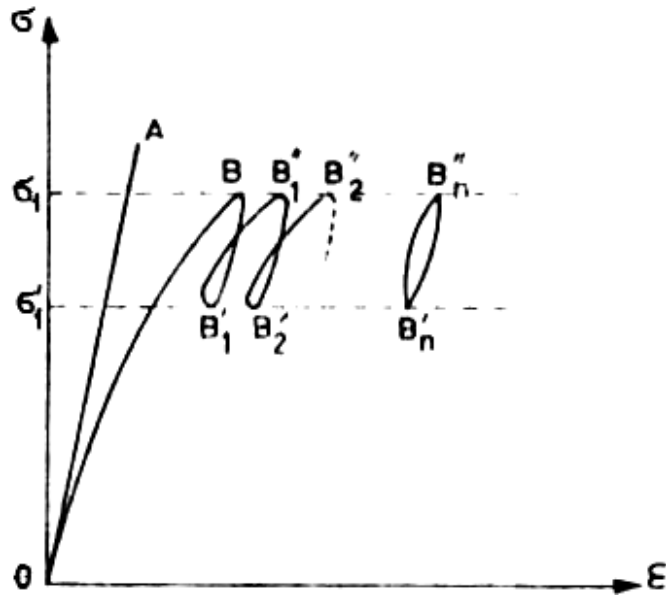
$$E = \frac{(\sigma_1 - \sigma_1')}{(\epsilon_1 - \epsilon_1')} \quad (1.19)$$

ifadesiyle elastisite modülü hesaplanır.



Şekil 1.9. Gerilme-Deformasyon Eğrisi

Şekil 1.10 da olduğu gibi gerilmenin σ_1 ile σ'_1 arasında bir çok defa değiştirilmesi halinde $BB_1B''_1$ gibi eğriler elde edildikten sonra $B'_nB''_n$ halkası ile belirtilen kararlı bir durum meydana gelir. Bu şekilde gerilmenin muhtelif kez iki değer arasında değiştirilmesi halinde elde edilen $B'_nB''_n$ doğrusunun eğimi betonun elastisite modülüdür.



Şekil 1.10. Gerilmenin Değiştirilmesiyle Oluşan Gerilme-Deformasyon Diyagramı

Yapılan deneysel çalışmalarda betonun elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında bazı bağıntılar kurulmuştur. [10] Fakat betonun heterojen yapısı dikkate alınınca, elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişki komplekstir. [14] Betonun elastisite modülü betonun basınç dayanımından etkilenir. [15] Elastisite modülü, kesin olmasa da, basınç dayanımının artmasıyla artmaktadır. Fakat, elastisite modülündeki artış basınç dayanımındaki artıştan küçük olmaktadır. Elastisite modülündeki artışın basınç dayanımındaki artışın kareköküyle orantılı olduğu ileri sürülmektedir. [5] Bu nedenlerden dolayı bu bağıntılar basınç dayanımının bilinmesi halinde elastisite modülünün yaklaşık olarak değerini vermektedir. Bu konuda en çok kullanılan bağıntılar şunlardır.

Ros Formülü:
$$E_d = \frac{600000 R_p}{200 + R_p} \quad (1.20)$$

Bu formülde R_p ve E_d kgf/cm² cinsinden ifade edilmektedir. E_d dinamik elastisite modülünü göstermek üzere, R_p kare kesitli, yüksekliği 2a olan (a kare kesitin kenarı) prizma şeklindeki beton numunelerin basınç dayanımıdır.

L'Hermite Formülü:
$$E_d = K\sqrt{R_s} \quad (1.21)$$

Burada da R_p ve E_d kgf/cm² cinsinden ifade edilmektedir. R_s çapı 15cm ve yüksekliği 30cm olan silindir şeklindeki beton numunelerinin basınç dayanımını göstermektedir. Buradaki K zamana bağlı olmayan ve 18000- 23000 arasında değişen bir katsayıdır. [10]

TS500 de de elastisite modülünü beton dayanımına bağlayan deneysel yoldan üretilmiş formül vardır.

$$E_{cj} = 3250\sqrt{f_{ckj}} + 14000 \quad (1.22)$$

f_{ckj} N/mm² cinsinden betonun j'inci gündeki karakteristik basınç dayanımıdır. E_{cj} ise gene N/mm² cinsinden j'ninci gündeki elastisite modülü olmaktadır. [16]

Fransa'da Dreux, elastisite modülünün $\sqrt[3]{f}$ değişkenine bağlı olarak şu bağıntıyı önermiştir.

$$E_d = 46800\sqrt[3]{f} \quad (1.23)$$

f , ortalama basınç dayanımı ve E_d kgf/cm² boyuntunda dinamik elastisite modülüdür. TS 500'de verilen bağıntıyla (1.23) de verilen bağıntı birbirine yakın değerler vermektedir. [2]

ACI komitesi elastisite modülüyle basınç dayanımı arasında şu bağıntıyı vermiştir: [17]

$$E_s = 4730\sqrt{f_c} \quad (1.24)$$

Yine ACI komitesi tarafından statik elastisite modülü için başka bir bağıntı olan (1.25) bağıntısı verilmiştir. [18]

$$E_s = 3320\sqrt{f_c} + 6900 \quad (1.25)$$

(1.24) ve (1.25) bağıntılarında f_c N/mm² cinsinden basınç dayanımını, E_s ise N/mm² cinsinden statik elastisite modülünü göstermektedir.

Ayrıca ACI betonun özgül ağırlığı ve basınç dayanımı değerleriyle elastisite modülünün bulunabilmesi için şu bağıntıyı öne sürmüştür:

$$E_s = 43000\rho^{1.5}\sqrt{f_c} \times 10^{-6} \quad (1.26)$$

Yukarıdaki bağıntılarında, f_c N/mm² cinsinden basınç dayanımını, E_s N/mm² cinsinden statik elastisite modülünü ve ρ kg/m³ cinsinden betonun birim ağırlığını göstermektedir. [17]

Bilindiği gibi betonun mekanik karakteristikleri özellikle basınç dayanımı ve elastisite modülü zamanla devamlı bir artış göstermektedir. Yalnız basınç dayanımının artışı yıllarca devam etmesine rağmen elastisite modülü beton üretiminden sonra geçen 90 gün sonunda pratik bakımdan en son ve doğal olarak en büyük değerini almaktadır. [10]

1.5.1.5. Gerime-Deformasyon Eğrisi Yardımıyla Belirlenen Elastisite Modüllerinin Karşılaştırılması

Küçük bir gerilmeyle belirlenmiş dinamik elastisite modülü, yaklaşık olarak başlangıç teğeti modülüne eşittir ve statik modülden bir miktar yüksektir. Dinamik ve statik modüller arasındaki farklılık betonun heterojen yapısına önemli ölçüde bağlıdır. [12]

Statik elastisite modülüne karşın dinamik elastisite modülü az yüklerde ve kısa süreli yüklemelerde belirlenir. Bu sebepten dolayı dinamik elastisite modülü saf elastik etkileri gösterir. [13]

Dinamik ve statik modüller arasındaki ilişkiyi gösteren bazı ampirik bağıntılar vardır.

$$E_s = 0,83E_d \quad (1.27)$$

Lydon ve Balendran tarafından bulunan (1.27) bağıntısında, N/mm^2 E_s statik elastisite modülünü, E_d ise dinamik elastisite modülünü göstermektedir. [19]

İngiliz beton yapıların dizaynı şartnamesinde bu iki elastisite modülü arasındaki bağıntıyı N/mm^2 cinsinden şu şekilde vermiştir: [20]

$$E_s = 1.25E_d - 19000 \quad (1.28)$$

Popovics S. statik ve dinamik elastisite modüllerinin birim ağırlığın bir fonksiyonu olarak nitelendirmiştir ve her iki elastisite modülüyle birim ağırlık arasında aşağıdaki bağıntıyı önermiştir. [21]

$$E_s = kE_d^{1,4}\rho^{-1} \quad (1.29)$$

Elastisite modülünün bulunmasında farklı test metotları bir takım karışıklıklara yol açmıştır; her ne kadar bazı mühendisler statik elastisite modülü kullansa da, dinamik elastisite modülü yüksek değerler verse de daha güvenilir ve üretkendir, ayrıca ölçme açısından daha kolaydır. [22]

1.5.1.6. Elastisite Modülünü Etkileyen Faktörler

Betonun elastisite modülü belli başlı bazı faktörlerden etkilenir. Çimento hamurunun elastisite modülünü, içindeki karışım oranları değiştirilerek örneğin su/çimento oranını azaltılarak , arttırmak elastisite modülünü arttırmanın en geçerli yoludur. Çimentonun elastisite modülünün arttırılması çimento hamurunun elastisite modülünün arttırılması kadar etkili değildir. [23]

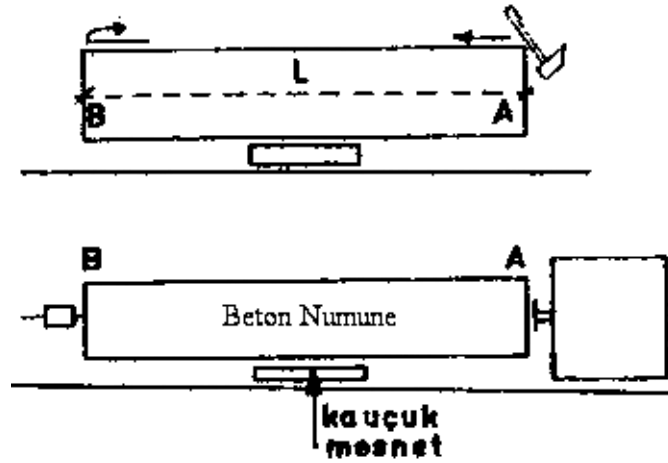
Bunlara ilaveten agregada dane büyüklüğünün belli bir oranda arttırımı veya yoğunluğu derecelendirilmiş agreganın kullanımı, kullanılan agreganın hacminin arttırılması ve beton karışımına silis dumanı karıştırılması betonun elastisite modülünü arttırır. [7]

1.5.2. Rezonans Frekansı Metodu

Dinamik elastisite modülü (E_d) yapısal betonun performansını ilgilendiren önemli bir parametredir. Laboratuarda belli şekil ve büyüklükteki numuneler üzerinde iyi geliştirilmiş rezonans metodu uygulanarak dinamik elastisite modülü bulunabilir.[24]

Elastisite modülünün, rezonans frekansı metoduyla bulunmasında beton darbe şeklinde olan son derece küçük gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu şekilde bu gerilmeler altında meydana gelen deformasyonun, gerilme deformasyon eğrisinin 0 noktasındaki teğeti olan 0A doğrusu boyunca olduğu kabul edilir. 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 beş mislinden daha büyüktür. Böyle bir prizmanın A ucuna Şekil 1.11’de görüldüğü gibi çekiçle vuracak olursak oluşan gerilmenin meydana getirdiği deformasyon dalga halinde bir (V) hızı ile numune boyunca ilerleyerek B ucuna ulaşır. B ucundan yansıyarak geri dönen deformasyon dalgası iki nokta arasında hareketine devam eder. Dalga A ucuna ulaştığı zaman A ucuna ikinci bir darbe yapılırsa iki darbenin üst üste binmesiyle B ucunda ölçülen deformasyon miktarında bir artış olur. Bu şekilde belirli aralıklarla A ucuna darbelerin yapılması sonucunda B ucunun titreşimi maksimum hale gelmiş olur. Bu durumda prizma rezonans halindedir ve kendi frekansı ile titreşim yapan bir pandül gibi çalışmaktadır.



Şekil 1.11. Rezonans Frekansı Metodu Deney Düzeneği

B deki titreşim maksimum olduğu zaman A noktasına yaptığımız birbirini takip eden iki darbe arasında geçen zaman (t_1) ve prizmanın da uzunluğu (L) ise şu denklemi yazmak mümkün olur.

$$t_1 = \frac{2L}{V} \quad (1.30)$$

A noktasında yapılan titreşimin frekansı (f) ise (t_1) ile (f) arasında şu bağıntı vardır:

$$t_1 \times f = 1 \quad (1.31)$$

Pratikte beton prizmanın A ucuna bir hoparlör, arada hava payı bırakılarak, yaklaştırılır ve bu hoparlörün yüksek frekansla çalıştırılması ile titreşim başlatılır. Numunenin B ucuna yerleştirilen bir alıcı ile numunenin titreşimi ölçülür. Hoparlörün frekansını değiştirerek B ucundaki titreşimin genliğinin maksimum olması sağlanır. Bu durumda frekans (f_1) ise deformasyon dalgasının malzeme içindeki hızı şu şekilde hesaplanır:

$$V = 2Lf_1 \quad (1.32)$$

Buradan betonu elastisite modülü aşağıdaki formülle bulunur:

$$E = 10^5 \times V^2 \times \frac{\Delta}{g} \quad (1.33)$$

Burada V km/sn cinsinden, g yerçekimi ivmesi ve Δ kg/dm³ cinsinden betonun birim ağırlığı olmak üzere betonun elastisite modülü kgf/cm² cinsinden bulunur. [25]

1.5.3. Ultrases Metodu

İnsan kulağının duyabileceği titreşim frekansı 16-16000 Hz (Hertz saniyede titreşim adedi) arasında bulunmaktadır. Frekansın 16000 hertzin üzerinde olması durumunda kulakla duyulamayan ultrases denilen ses dalgaları meydana gelir. Ultrases dalgaları boşlukta yayılmazken gaz, sıvı veya katı halde olan cisimler içinde belirli bir V hızıyla yayılırlar. Ultrases dalgalarının kaynağı çapı (d) olan disk şeklinde bir elemandır. Bu kaynaktan çıkan ve (f) frekansına sahip olan ultrases dalgalarının oluşturduğu enerjinin %90'ı yarı açısı θ olan bir koninin içinde bulunur. Bu açı şu ifadeyle hesaplanır:

$$\sin\theta = \frac{1,22V}{d \times f} \quad (1.34)$$

θ 'nın küçük olması ile mevcut olan enerjinin dağılmaması ve toplanabilmesi sağlanır. Bunun da sağlanabilmesi için frekansın büyük olması gerekir.

Ultrases demetinde üç çeşit dalga bulunmaktadır. Bunlardan birincisi boyuna dalgalar; sesin ilerleme doğrultusunda olanlar, ikincisi enine dalgalar; sesin yayılma doğrultusuna dik düzlemler içinde olanlar, ve sonuncusu cismin yüzeyini takip eden dalgalardır. Boyuna ses dalgalarının yayılma hızı enine dalgaların yayılma hızından belirli bir şekilde daha büyüktür. [10]

1.5.3.1. Cisim İçinde Ses Hızının Tayini

Ultrases hızı, çok uzun zamandır kullanılan, malzemeye zarar vermeden ses dalgalarının hızını ölçen bir metottur. Bu testte ses dalgalarının belirli bir uzunluğu katetme süresi ölçülür. [5] Uzunlamasına dalga hızı belirlemesine dayanan metotlar

betonun ultrases metodu için en doğrusudur. Çünkü bu testler basit ve maliyet açısından uygundur. Bir çok ülkenin bu testin performansı için standartları vardır.[26]

Bir beton numunesi alarak bunun bir ucuna ultrases üreten bir verici prob diğer ucuna da ses dalgalarını toplayan bir alıcı yerleştirilir. Alıcı prob tarafından toplanan ses dalgaları ile sesin malzeme içinde bir uçtan bir uca ulaşması için geçen zaman bulunur. Deney sonunda sesin L uzunluğundaki malzeme içerisinden geçme süresinin t_1 olduğu tespit edilmişse sesin malzeme içindeki hızı (1.35) bağıntısıyla ifade edilir. [10]

$$V = \frac{L}{t_1} \quad (1.35)$$

Bu ses hızı bulunduktan sonra prizmatik numune halinde E ise şu formülle hesaplanır.

$$E = k \times 10^5 \times V^2 \times \frac{\Delta}{g} \quad (1.36)$$

Bu ifadelerde V km/sn cinsinden ultrases hızı ve Δ kg/dm³ cinsinden betonun birim ağırlığı olmak üzere kgf/cm² boyutundan dinamik elastisite modülü bulunur. Yukarıdaki ifadede gözüken k katsayısı ses hızı prizma şeklinde olan beton numunesinde saptanması halinde 1'e eşittir. Beton numunesi prizmadan fark ediyor ve küp şekline yaklaşıyorsa k (1.37) bağıntısıyla hesaplanır. Burada v betonun Poisson oranını göstermektedir. [2]

$$k = \frac{(1+v)(1-2v)}{(1-v)} \quad (1.37)$$

Metot yukarıda belirtilenden farklı bir şekilde verici ve alıcı problemlerin malzemenin aynı tarafına yerleştirilerek de uygulanabilir. Burada ses dalgaları yansıtılmak suretiyle deney yapılmaktadır. Yapı mühendisliğinde yol kaplamalarının kontrolünde bu metot kullanılmaktadır. [10] Buna ilaveten ultrases metodunun eko tipi de beton yolların ve döşemelerin kalınlığını bulmaya imkan sağlar. [5]

Beton kütlesi içinde donatının bulunması halinde deney sonuçları önemli şekilde etkilenir. Beton içindeki donatılar sesin yayılma doğrultusuna dik bulunuyorsa ultrases hızları (1.38) bağıntısıyla hesaplanır.

$$\frac{V_b}{V} = \frac{1 - \frac{L_a}{L}}{1 - \frac{L_a}{L} \frac{V}{V_a}} \quad (1.38)$$

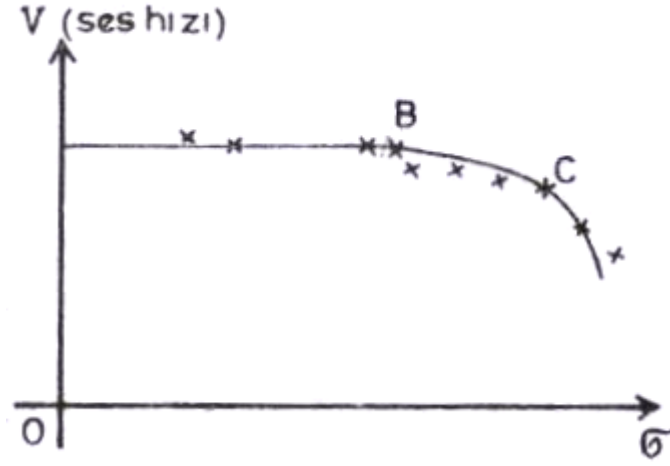
Burada V_b donatısız betonda, V_a donatıdaki, V de donatılı betondaki ses hızlarını göstermektedir. L problar arasındaki mesafe, L_a ses dalgalarının rastladığı ve geçtiği donatıların toplam kalınlığını göstermektedir. L_a/L oranı 1/12'den daha büyük bir değer aldığı zaman yukarıdaki formül kullanılmalıdır.

Ses dalgasının yayılma doğrultusuna paralel donatıların bulunması da deney sonuçlarını değiştirir. Eğer probun yerleştirildiği yer donatıya yakın ise ses dalgaları numunenin bir ucundan diğer ucuna daha kısa bir zamanda ulaşırlar, ve böylelikle bulunan sonuç yanıltıcı olur. Probun en yakın noktasının donatıya olan (a) mesafesi ($L/4$)'den daha küçük olması halinde ses hızı şu şekilde bulunur.

$$T = \frac{L}{V_a} + \frac{2a}{V_b} \sqrt{\frac{(V_a^2 - V_b^2)}{V_a V_b}} \quad (1.39)$$

Beton ve doğal taş gibi boşluklu malzemede bulunan ses hızının değeri bu cins malzemenin boşluk miktarı hakkında fikir verir. Bu hızın çok küçük bir değer alması, çok boşluklu bir malzeme olduğunu gösterir. Ayrıca ultrases hızı konusunda cisimlerin değişik bir özelliği vardır ki oda şudur; cisim yapısında bir değişiklik olmadıkça veya cismi bir gerilmenin etkilemesi durumunda gerilmenin belirli bir değerine kadar ses hızında hiçbir değişiklik olmaz. Fakat gerilmenin belirli bir değerinden sonra ses hızı azalmaya başlar. Bu durum Şekil 1.12'de gösterilmiştir.

Şekil 1.12'de görüldüğü gibi eğrinin B noktasına kadar olan bölümünde ses hızının sabit olduğu B noktasına varıldığında ise ses hızında bir azalma olduğu görülmektedir. Hızdaki bu azalma C noktasına kadar gayet sınırlıdır. Ancak bu nokta geçildikten sonra ses hızında çok büyük miktarda azalmalar olmaktadır. [10]



Şekil 1.12. Ses Hızının Gerilme ile Değişimi

1.5.3.2. Ultrases Hızıyla Malzeme Kontrolü

Ultrases metodu sertleşmiş betonun özelliklerini karakterize edebilmek için çok uzun yıllardır kullanılmaktadır. [14] Ultrases hızı metodu ile malzeme kontrolünün en ilginç tarafı cismi tahrip etmeden dayanımının, yaklaşık olarak da olsa, bulunmasıdır. Ultrases hızıyla betonun basınç dayanımı bulunabilir. (1.21) ile (1.36) denklemlerinin birleştirilmesiyle betonun basınç dayanımını ultrases cinsinden veren şu bağıntı elde edilir:

$$R = V^4 \times \left(\frac{\Delta}{g} \right)^2 \times k^2 \times 10^{10} \times \frac{1}{K^2} \quad (1.40)$$

Malzeme içinde boşluk bulunması V hızının düşük olmasını ve cismin basınç dayanımında düşürdüğüne göre, basınç dayanımının V'nin yüksek bir kuvvetiyle orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Ancak, E ile R arasında verilen (1.21) bağıntısı kesin değildir. Özellikle de buradaki K katsayısı oldukça geniş bir aralık içinde değişmektedir. Genel olarak bu katsayı, C ile gösterilen çimento dozajı arttıkça k katsayısı $K = - 7C + 29825$ formülüne göre azalmaktadır. Bu nedenle basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında farklı formüller de verilmiştir. 1953'de "Chef de Ville" şöyle bir bağıntının varlığını ileri sürmüştür.

$$E = K_1 R^{1/3} \quad (1.41)$$

Bu konuda araştırmalarıyla tanınmış R. Jones'a göre yaşı 3-200 gün arasında olan betonlarda $E, R^{1/4}$ ile orantılı olan değerler almaktadır.

Bütün bu açıklamalarda R ile E arasında genel bir bağıntının olamayacağı anlaşılmaktadır. Bu bakımdan bu tip formülleri uygulayarak bulunacak basınç dayanımı betonun gerçek dayanımından bir miktar fark edecektir. [10]

Ultrases hızının, basınç dayanımının ancak yaklaşık bir değerini vermesi hatta bazı durumlarda hatalı olması, beton basınç dayanımının bulunmasında kullanılmasında sakıncalar doğurmaktadır. [5] Fakat, yapılan uygulamalar sonunda ultrases hızının belirli bir değerden az olması o elemanın dayanımının düşük olma ihtimalinin bulunduğunu göstermektedir. [10]

Faydalanma şeklinin en önemlisi ise ultrases metodunun betonarme yapılarda muhtelif yapı elemanları üzerinde uygulanmasıdır. [10] Ultrases hızının değeri betonun homojenliğini test etmek için çok uygundur. [22] Belirli karşılıklı noktalar arasında yapılan ölçümlerde bulunan ses hızlarının birbirinden farklı olması betonun homojen olmadığını gösterir. Ultrases metodu uygulanarak betonun içindeki kusurların, özellikle boşlukların yerleri ve birbirine dik doğrultudaki ultrases hızları ölçülerek bunların yaklaşık olarak boyutları bulunur.

Aynı boşluk miktarına sahip olan betonların dayanımları birbirinden önemli derecede fark edebilir. Bu bakımdan ultrases hızı aracılığıyla betonun dayanımını gerçek değerine daha yakın bir şekilde belirlenmek istenirse betonun yaşı, çimento dozajı, su/ çimento oranı gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. [10] Ayrıca standartlarda sıcaklık, nem, numunenin büyüklüğü ve şekli gibi betonun ultrases hızını etkileyen faktörlerin olabileceği belirtilmiştir. [26]

Ultrases metodu kullanılarak betonun, ses hızı doğrultusuna paralel olmayan çatlakları, donma veya yangından aldığı hasarlar ve tekrar eden biçimde donma ve çözülme olayları sonrasında ki durumu belirlenebilir. [5]

1.5.4. Betona Zarar Vermeyen Metotların Avantajları

Kuvvet dışında başka beton özelliklerini, betona zarar vermeden, ölçmeye yarayacak bazı özel teknikler geliştirilmiştir ve sonraları bulunan bu teknikler

kuvvet, dayanıklılık veya başka özelliklerle ilişkilendirilmişlerdir. Bu özelliklerden bazıları sertlik (hardness), penetrasyon veya gülleye karşı dayanıklılık, sıçrama (rebound) sayısı, rezonans frekansı ve ultrasonik titreşimlerin beton boyunca üreme kabiliyetleridir.

Betonun elektriksel özellikleri, emme, yayma ve x ile gama ısınlarnı geçirme özellikleri ile nükleer aktivasyona tepkimesi ve betonun akustik emisyon özellikleri bize dayanımı, nem içeriğini, yoğunluğu, kalınlığı ve çimento içeriğini tahmin etme fırsatı sağlarlar.

Başarılı bir zararsızlık testi herhangi bir betona uygulanabilir, taşınabilir ve en az maliyetli olmalıdır. Lenchinsky zararsızlık testi için aşağıdaki avantajları özetlemiştir.

1. Test sırasın da eleman gereksinimi azalır
2. Elemanların ön hazırlık gereksinimi azalır
3. Daha az miktarda yapı zedelenir
4. Az zedelenme güçlendirme veya onarım gereksinimini azaltır.
5. Merkezin delinemediği ince duvarlarda zararı azaltacağı için daha faydalıdır
6. Daha ucuzdur

Zararsız (nondestructive) kelimesi elementlerin yapısal davranışlarını etkilemeyen ya da zarar vermeyen tüm testler için kullanılmaktadır. [27]

1.5.5. Değişik Metotlarla Bulunan Elastisite Modüllerinin Karşılaştırılması

Gerek rezonans frekansı ile gerek ultrases metodu ile bulunan elastisite modülleri dinamik elastisite modülünden farklı değillerdir. Bu iki metotta da betonun, çok kısa süren bir zaman aralığı içinde uygulanan çok küçük gerilmeler altındaki deformasyonları göz önünde tutulmaktadır. [10]

Rezonans frekansı metodu ile gerilme deformasyon diyagramı metoduyla bulunan elastisite modüllerinin birbirinden çok az fark ettiği görülmektedir. Fakat ultrases metoduyla bulunan elastisite modülünün gerilme deformasyon metodu ile bulunan elastisite modülünden daha büyük değerler aldığı söylenebilir. Buna ilaveten ultrases metoduyla bulunan elastisite modülünün Leslie ve Cheesman'ın deneylerine göre %8 oranında rezonans frekansı metodu ile bulunan elastisite modülünden daha büyük olduğunu görülmektedir.

Voellmy, ultrases metoduyla bulunan elastisite modülünün gerilme deformasyon diyagramı metoduyla ve rezonans frekansı metoduyla bulunan elastisite modüllerinden daha büyük olmasını şu şekilde açıklamıştır: “Ultrases metodunda betonun maruz kaldığı gerilmeler son derece küçüktür. Bu küçük gerilmelerin altında beton boşluklarında sıkışmış halde duran su betonun deformasyonuna karşı koymakta ve bu nedenle elastisite modülünün artmasına sebep olmaktadır.” [25]

1.6. Kimyasal Katkılar

Katkı maddeleri genel anlamda beton üretilirken karışıma az miktarda ilave edilen, harç ve betonun taze veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştiren; betonun ve inşaatın nihai özelliklerinde zararlı etkiler oluşturmeyen maddeler olarak tanımlanabilir. [28] Bu maddelerin kullanılmasıyla, çimentoların dayanım artışını hızlandırmak, beton üretiminde daha az su kullanarak dayanımı arttırmak, soğuk havalarda beton dökmek ve dış etkilere daha dayanıklı betonlar üretmek gibi olumlu sonuçlar elde edilir. [29]

Beton, harç yada çimento şerbeti katkıları inorganik yada organik kökenli, katı yada sıvı halde çimento yada bağlayıcı maddenin ağırlığının %5’ini geçmemek üzere karışıma eklenen maddelerdir. [30] Sıvı katkı maddeleri daha çok kullanılırlar çünkü karışım sırasında beton içine daha kolay yayılırlar. [5]

Katkı maddelerini kullanırken aşağıda belirtilen genel bilgiler hatırlanmalıdır.

1. Kurallarına uygun olarak üretilmeyen kötü bir beton, katkı maddeleri kullanarak iyileştirilemez.
2. Katkı malzemelerinin eldeki diğer maddeler ile uygunluğu önceden deneylerle araştırılmalıdır.
3. Üretici tarafından önerilen katkı maddelerinin dozajlarının uygunluğu önceden deneylerle araştırılmalıdır.
4. Katkı maddelerinin ana fonksiyonları yanında yan etkileri de vardır.
5. Bazı durumlarda kullanılacak birden fazla katkı maddesinin birbirleriyle olan uyumları önceden yapılacak deneylerle araştırılmalıdır. [1]

Katkılar oluşturdıkları etkiler ve fonksiyonları açısından sınıflandırılabilir. RILEM- Uluslararası Malzeme ve Yapı Laboratuvarları Birliği şu sınıflandırmayı yapmıştır:

- 1- Taze betonun reolojik özelliklerini değiştiren katkı maddeleri

- 2- Priz ve sertleşmeyi etkileyen katkı maddeleri
- 3- Beton hava içeriğini değiştiren katkı maddeleri
- 4- Betonların fiziksel ve mekanik niteliklerini arttıran katkı maddeleri
- 5- Betonun kimyasal etkilere dayanıklılığını etkileyen katkı maddeleri
- 6- Betona ek nitelikler kazandıran katkı maddeleri [1]

ACI Committee 212 tarafından beton katkı maddeleri 5 gruba ayrılmıştır:

- 1- Hava sürükleyen katkılar
- 2- Hızlandırıcı katkılar
- 3- Su azaltıcı ve priz süresini ayarlayan katkılar
- 4- Akıcı beton için katkılar
- 5- Diğer çeşitli katkılar [31]

TS 3452 ve ASTM ise kimyasal katkıları şu şekilde sınıflandırmıştır:

- 1- Tip A: Su indirgeyiciler
- 2- Tip B: Priz geciktiriciler
- 3- Tip C: Priz hızlandırıcılar
- 4- Tip D: Su indirgeyici ve priz geciktiriciler
- 5- Tip E: Su indirgeyici ve priz hızlandırıcılar
- 6- Tip F: Yüksek oranda su indirgeyiciler
- 7- Tip G: Yüksek oranda su indirgeyiciler ve priz geciktiriciler [5,32]

1.6.1. Su Azaltıcı (Akışkanlaştırıcı) Katkılar

Akışkanlaştırıcılar genel anlamda su azaltıcı katkılardır. Bu tür kimyasal katkılar, aynı işlenebilirlik değeri için daha az su kullanımını ve aynı su miktarı içinse daha büyük işlenebilirlik değeri elde etmeyi sağlarlar. [5] Aynı işlenebilirliği sağlamak koşuluyla su miktarında %5 - %15 arası bir indirim sağlarlar. Dayanım, su/çimento oranının bir fonksiyonu olduğuna göre, katkı kullanıldığında aynı dayanım daha az çimento ile de sağlanacak demektir; ekonomik gibi gözükse de bu çözüm aslında çok sakıncalıdır çünkü çimento dozajı düşük olarak üretilen betonun ileri zamanlardaki durabilitesi azalacak ve çabuk tahrip olacaktır. [1]

1.6.2. Su Azaltıcı Katkıların Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları

Su azaltıcı katkıların beton yapımında kullanımının sağladığı avantajlar şöyledir;

- Katkısız betonla aynı işlenebilmede olmak şartıyla su oranını azaltıp daha yüksek dayanım sağlaması
- İşlenebilmeyi arttırıp daha kolay yerleştirilmeyi sağlaması
- Daha dolu bir beton elde edilmesini sağlayarak geçirimsizliği ve donma çözölmeye dayanıklılığı arttırması [33]
- Terleme ve segregasyonu minimuma indirmesi
- Çimento-agrega aderansını arttırması
- Kapiler su emme kapasitesini azaltması

Üretilen betonlarda su azaltıcı katkıların kullanımından dolayı bazı olumsuzluklar olabilir. Bunların başlıcaları priz de gecikme olması ve hava sürüklemesinden dolayı dayanımın düşmesidir. Ayrıca bu katkı maddeleri akıcı kıvamlı betonlarda yarar sağlamazlar. C_3A oranı düşük çimentolara daha iyi uyum gösterirler. Yüksek oranda kullanıldıklarında alçıtaşının fonksiyonunu etkileyerek hızlı prizide yol açabilirler. [1]

1.6.3. Su Azaltıcı Katkıların Sınıflandırılması ve Kimyasal Bileşimleri

Su Azaltıcı Katkıların esasını suda çözülebilen organik bileşikler oluşturur. Bu katkıları dört ana grupta toplanabilir. İlki linyosülfonik asitlerin Ca , Na ve NH_4 tuzlarından meydana gelir. İkinci grup Na , NH_4 veya trietanolamin tuzlarından hidrosikarboksilik asitlerdir. Üçüncü gruba karbonhidratlar girer. Diğer bileşimler ise son grubu oluştururlar. Bu katkıların sıvı halde olanlarının özgül ağırlıkları genellikle 1,10 g/ml ile 1,30 g/ml arasında olur. [34]

1.6.4. Su Azaltıcı Katkıların Etki Mekanizması

Su azaltıcı katkılar çimento tanelerinin topaklaşmasını önleyerek, beton içine hava sürükleyerek veya taneleri beton içinde dağıtarak, ki buna dispersiyon etkisi denilir, etkili olurlar. Beton içindeki çimento tanelerinin yüzeyini saran katkı

maddelerinin oluşturduğu film negatif yüklüdür. Bu şekilde negatif yükün etkisinde bulunan taneler birbirlerini itmelerinden dolayı çimento taneleri birbirinden ayrılır. İşte bu şekilde katkı maddesi tarafından yüzeyi sarılan çimento tanelerinin topaklaşmayı önlemeleri ve birbirleri üzerinde kaymalarını sağlayan yağlayıcı etki göstermeleri betonun iç sürtünmesini azaltır. Bunun sonucunda da betonun işlenebilme yeteneğinin artmasını sağlarlar. [35]

1.7. Silis Dumanı

Silis dumanı yeni kullanılmaya başlanmış bir maddedir. İlk pozolon olarak tanıtılmışsa da daha faydalı bir çok özelliği bulunmaktadır. [5] Silis dumanı bazen silis tozu veya microsilica olarak da adlandırılır. [36]

Silis dumanı yüksek dereceli fırında ısıtılmış saf halde bulunan quartz ve kömürden elde edilen silikon ve ferrosilikonun birleşiminden oluşmuş bir alışımdır. [5] Silis dumanı yüksek miktarda (%85-%97) SiO_2 ve aynı zamanda çok miktarda camsı küreselleşmiş silis parçaları içermektedir. [36] Silis dumanı amorf şeklinde olduğunda bir hayli reaktiftir ve portland çimentosunun hidratasyonu sırasında oluşan kalsiyum hidroksit ile çok hızlı reaksiyon verir. Silis dumanı çimento arasındaki boşluklara girerek dayanıklılığı artırır. Silis dumanı eğer fırın sıcaklığı uygun şekilde ayarlanabilirse karbondan tamamen ayrılarak açık bir renk alırken, yeterince ısınmamış fırınlar da bu ayrışma gerçekleşmeyeceği için silis dumanının rengi koyu olacaktır. Silis dumanının özgül ağırlığı genellikle 2.20 g/cm^3 civarındadır. [5]

Silis dumanı Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından bir tip pozolan olarak sınıflandırılmıştır. ACI'ya göre üç tip pozolan vardır; N, F ve C. Silis dumanı N sınıfına daha yakın olarak konumlanmaktadır. [36]

Beton karışımlarda kullanılan silis dumanı, çok ince daneli yapısından dolayı agregaların arasındaki boşlukları çok iyi doldurmaktadır. [5] Silis dumanı kullanımının agrega harç temas yüzeyinin mikroyapısal özelliklerini değiştirdiği, bu arayüz bölgesinin daha yoğun ve homojen hale geldiği, bunun sonucu olarak malzemenin daha gevrek davranış sergilediği görülür. [37] Bu olay beton içindeki aderansı arttırdığından agraga parçaları arasından su geçişini azaltmaktadır. Eğer betonun özelliklerini arttırmak için fazla miktarda silis dumanı kullanılırsa betonun çabuk mukavemet almasını sağlanır ve düşük permeabilite yaratılır. Ayrıca taze

betonda kullanılan silis dumanı betonun kohezif özelliğini artırır ve çok az terleme yapmasına neden olur. Bu düşen terleme miktarından dolayı plastik rötre çatlakları daha fazla gözükebileceği için betonun prizi sırasında ortam koşullarına daha fazla dikkat etmek gerekir. [5]

Silis dumanın yüksek W/C oranlarında çimento hidratasyonunu hızlandırır. Fakat düşük W/C oranında silis dumanı çimento hidratasyonu geciktirir. [38] Ayrıca silis dumanının ince daneli yapısından dolayı, yüzey alanı büyüktür. Bu nedenlerden dolayı silis dumanı kullanılan karışımların W/C oranı daha yüksek olmalıdır. W/C oranını yükseltmek yerine akışkanlaştırıcı kullanmak daha iyi bir çözümdür. [36]

Beton üretiminde silis dumanının kullanılması önemli ölçüde basınç dayanımını ve elastisite modülünü arttırmaktadır ve hedeflenmiş belirli bir dayanım elde etmek için gerekli olan çimento miktarını azaltmaktadır. [6,38]

Silis dumanının betonun basınç dayanımını arttırmasının en büyük nedeni puzolanik etkidir. Normal sıcaklıklar altında puzolanik reaksiyonların başlaması yavaştır ve hidratasyon başladıktan bir kaç hafta sonrasına kadar önemli bir seviyeye ulaşmazlar. Bu, betonun uzun sürede yüksek dayanımını arttırsada betonun dayanım gelişiminin yavaş olmasıyla sonuçlanır. Silis dumanı yüksek reaktif özelliğiyle bu soruna potansiyel bir çözüm oluşturmaktadır. [38] Bu reaksiyona silis dumanının puzolanik etkisi denir. Bu etki, portland çimentosundaki kalsiyum silikatların hidratasyonundan oluşan Ca(OH)_2 nin silis dumanı ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat oluşturmaktadır. Puzolanik etkinin en belirgin olduğu bölge betonda en zayıf yer olan arayüz bölgesidir. Bunun sonucunda malzeme daha yoğun olur ve beton daha mukavemetli hale gelir. [39]

Basınç dayanımı ve elastisite modülündeki artış silis dumanı oranı karışım içinde %10 ile %20 arasında iken daha önemli miktarlardadır. Bu miktar silis dumanı için betona katılacak optimum oran olarak kabul edilebilir. [36]

1.8. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada düşük, orta ve yüksek basınç dayanımlarına sahip betonların elastisite modüllerinin ne şekilde değiştiği incelenmiştir. Günümüzde mevcut eski betonarme yapıların çoğunun beton basınç dayanımları 8 ile 17 N/mm^2 arasındadır. Türkiye’de meydana gelen depremlerden dolayı yapılarda güçlendirmeler yapılmaktadır. Proje çalışmalarında ilgili standartlardan alınarak kullanılan teorik

elastisite modüllerinin ne derece doğru olduğu ve dayanımları artan betonarme yapılarda da elastisite modülünün ne alınacağı önemli bir konudur. Bu bakımdan bu konuda çalışılmasının gerekliliği öngörülmüştür.

Çalışmada yaklaşık 6 N/mm^2 basınç dayanımından başlayarak 80 N/mm^2 'lik yüksek basınç dayanımına kadar ulaşan betonlar üretilmiştir. Bu betonlar üzerinde elastisite modülü ve mekanik özellikler ile ilgili deneyler yapılmıştır. Ayrıca bu betonlara zarar vermeden ultrasonik ölçüm yöntemleri ile yapıların elastisite modüllerinin yerinde gerçeğe yakın olarak tahmin edilip edilemeyeceği ile ilgili deneyler yapılmış ve ilişkili formüller çıkarılmıştır. Bunlara ilaveten betonun diğer özellikleri ile elastisite modülü arasında ki ilişkilerin varlığı da araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

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

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.1.1. Agrega Özellikleri

Deneysel çalışmalarda, beton üretiminde dört çeşit agrega kullanılmıştır. Bunlar kum, kırmataş I, kırmataş II ve kırmataş tozudur. Bu agregalar hakkında bilgi aşağıda verilmiştir. Üretilen betonlarda kullanılan agregaların granülometri analizi TS 3530'a göre [40] kare delikli eleklerde yapılmıştır.

2.1.1.1. Kum

Beton üretiminde deniz kumu kullanılmıştır. Kumun maksimum dane çapı 4 mm'dir ve granülometri analizi sonuçları Tablo 2.1'de verilmiştir. Kullanılan kum üzerinde TS 3526'ya göre [41] özgül ağırlık deneyi, TS 3529'a göre [42] de birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 2.2'de verilmiştir.

2.1.1.2. Kırmataş I

Betonların üretiminde iri agrega olarak kullanılan kırmataş I'in maksimum dane çapı 12 mm'dir ve granülometri analizi sonuçları Tablo 2.1 de verilmiştir. Kullanılan kırmataş I üzerinde TS 3526'ya göre [41] özgül ağırlık deneyi, TS 3529'a göre [42] de birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 2.2'de verilmiştir.

2.1.1.3. Kırmataş II

Betonların üretiminde kırmataş II iri agrega olarak kullanılmıştır. Kırmataş II beton üretiminde kullanılmadan önce yıkanmıştır ve böylece çamurlu maddeler ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Kırmataş II'nin maksimum dane çapı 16 mm'dir ve granülometri analizi sonuçları Tablo 2.1 de verilmiştir. Kullanılan kırmataş II üzerinde TS 3526'ya göre [41] özgül ağırlık deneyi, TS 3529'a göre [42] de birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 2.2'de verilmiştir.

2.1.1.4. Kırmataş Tozu

Kırmataş tozu'nun maksimum dane çapı 4 mm'dir ve granülometri analizi sonuçları Tablo 2.1 de verilmiştir. Kullanılan kırmataş tozu üzerinde TS 3526'ya göre [41] özgül ağırlık deneyi, TS 3529'a göre [42] de birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 2.2'de verilmiştir.

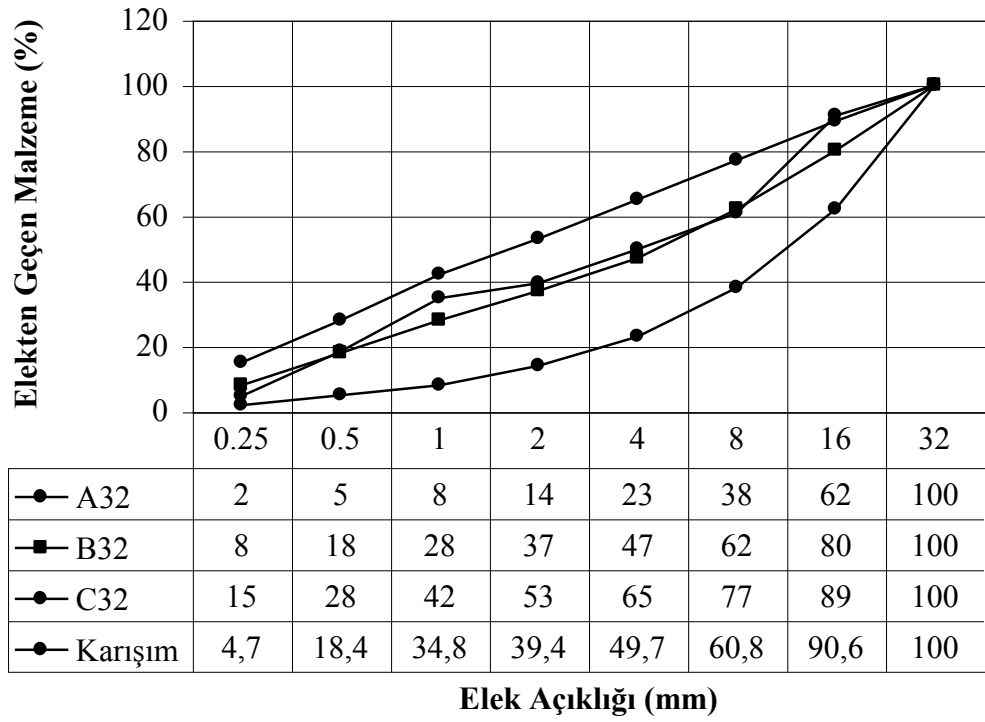
Tablo 2.1. Agregaların ve Karışımın Granülometrik Analizi

	Elekten Geçen Malzeme (%) leri								İncelik Modülü
Elek Çapları (mm)	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	
Kum (%27)	100	100	100	99	98	94	45	5,9	1,59
Kırmataş I (%25)	100	100	63	22	3	2	1	1,0	5,08
Kırmataş II (%30)	100	69	1	0	0	0	0	0,0	6,30
Kırmataş Tozu (%18)	100	100	100	97	67	50	33	16,1	2,37
Karışım	100	91	61	50	39	35	18	4,7	4,02

Tablo 2.2. Agregaların Özgül ve Birim Ağırlıkları

Agrega Cinsi	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Birim Ağırlık (g/cm ³)
Kum	2,64	1,41
Kırmataş I	2,73	1,42
Kırmataş II	2,71	1,37
Kırmataş Tozu	2,72	1,41

Üretilen beton karışımlarda kullanılan agregaların referans eğrileri ile birlikte karışımın granülometri eğrisi Şekil 2.1 de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. TS 706 Referans ve Karışımın Granülometri Eğrisi

2.1.2. Çimento Özellikleri

Beton numunelerinin üretiminde Lafarge Aslan Çimento A.Ş. tarafından üretilen PÇ 42,5 dökme çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri Tablo 2.3'te, mekanik özellikleri Tablo 2.4'de ve kimyasal özellikleri Tablo 2.5'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Çimentonun Fiziksel Özellikleri

Çimento Cinsi	PÇ 42,5
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12
Priz Süresi Başlangıcı (dk)	222
Priz Süresi Sonu (dk)	260
La Chatelier (mm)	1.00
Kıvam Suyu (%)	27.1
Blaine (cm ² /g)	2950
Dansite (g/L)	1057
32 m elek üzeri (%)	15.7
90 m elek üzeri (%)	0.5

Tablo 2.4. Çimentonun Basınç Dayanım Sonuçları

Gün	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
1	17.5
2	26.9
7	45.3
28	62.7

Tablo 2.5. Çimentonun Kimyasal Bileşimi

Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.16
Al ₂ O ₃ (%)	5.20
Fe ₂ O ₃ (%)	2.91
CaO (%)	64.27
MgO (%)	1.50
SO ₃ (%)	3.26
K ₂ O (%)	0.59
Na ₂ O (%)	0.16
Kızdırma Kaybı (%)	0.68
S.CaO (%)	0.45
Modül Hesaplamaları	
C ₃ S	54.06
C ₃ A	8.86
MS	2.55
MA	1.79

2.1.3. Karışım Suyu

Beton numunelerinin üretiminde ve küründe şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Katkılar

Beton numunelerinin üretiminde üç çeşit akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Beton numunelerinin üretiminde kullanılan tüm katkılar beton karma suyuna karıştırılarak kullanılmıştır. Bu katkıların özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1.4.1. Normal Akışkanlaştırıcı

Linyo sülfonat esaslı su azaltıcı normal akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Bu katkı çimento partiküllerini beton içerisinde homojen dağılımını sağlar, bu sayede su/çimento oranı azaltılabilir ve betonun işlenebilirliği ve dayanımı sabit su/çimento oranı için arttırılır. Bunlara ilaveten taze betonun birim ağırlığını arttırır, çimentonun hidratasyonu üzerindeki etkisiyle nihai dayanımlarda yüksek değerler elde edilir. Bu katkının özellikleri Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6. Normal Akışkanlaştırıcının Özellikleri

Görünüm	Sıvı
Yoğunluk	1,13 g/cm ³
Renk	Kahverengi
pH	6-8
Donma Noktası	<1°C
Klorür İçeriği (BS 5075)	İçermez

2.1.4.2. Süper Akışkanlaştırıcı

Polinaftelen bazlı sentetik polimer esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Bu katkı çimento ve kum moleküllerini bağlayıcı pasta içerisinde homojen olarak dağıtır. Bu dağılım, hidratasyonun daha geniş yüzeyde gerçekleşmesini sağlar, çok düşük su/çimento oranlarında çalışmayı sağlar ve erken ve son dayanımları yükseltir. Bu katkının özellikleri Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Süper Akışkanlaştırıcının Özellikleri

Görünüm	Sıvı
Yoğunluk	1,20 g/cm ³
Renk	Kahverengi
pH	7~9
Donma Noktası	Yaklaşık -3°C
Klorür İçeriği (BS 5075)	İçermez

2.1.4.3. Hiper Akışkanlaştırıcı

Polikarboksilat esaslı yeni jenerasyon süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Bu katkının özellikleri Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8. Hiper Akışkanlaştırıcının Özellikleri

Görünüm	Sıvı
Yoğunluk	1,06 g/cm ³
Renk	Süt Beyazı
pH	4~6

2.1.5. Silis Dumanı

Beton numunelerinin üretiminde silikaferrokrom esaslı silis dumanı kullanılmıştır. Çok ince taneli olan bu malzeme beton karma suyuna karıştırılarak karışıma ilave edilmiştir. Silis dumanına ait özellikler Tablo 2.9’da verilmiştir.

Tablo 2.9. Silis Dumanın Özellikleri

SiO ₂	70-85
MgO	4-8
Rutubet	max %3
Kızdırma Kaybı	1-3,5
Al ₂ O ₃	2-5
Fe ₂ O ₃	1-2,5
C	1-1,5
CaO	1-2
S	0,5-1,3
Özgül Ağırlık	2159 kg/m ³

2.2. Beton Karışımları

İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuarlar’ında toplam 20 seri beton karışımı üretilmiştir. Bu betonların yapımında su/çimento oranları, katkı miktarları, çimento dozajları değiştirilmiştir ve iki beton karışımına da silis dumanı

katılmıştır. Üretilen betonların çimento ve silis dumanı miktarları, katkı ve su/çimento oranları ve kodlandırılması Tablo 2.10'da verilmiştir.

Yapılan tüm beton serilerinde agregaların türü ve granülometrisi ile karışımın granülometrisi sabit alınmıştır. Beton numunelerinde kullanılan karışımın granülometri eğrisi ile B32 referans eğrisi olabildiğince karşılaştırılmaya çalışılmıştır.

Beton kodundaki ilk sayı 1 m³ betonda bulunan çimento miktarını, ikinci sayı su/çimento oranını, üçüncü sayı ve yanındaki harf betona eklenen akışkanlaştırıcı katkının çimento ağırlığına göre yüzdesi ile katkının tipini ve sadece iki betonda bulunan dördüncü rakam ve yanındaki harf 1 m³ betonda bulunan silis dumanı miktarını göstermektedir.

Tablo 2.10. Üretilen Betonların Kodlandırılması

Beton Kodu	Çimento Miktarı (kg/m ³)	Su/Çimento Oranı	Katkı Türü (Akışkanlaştırıcı)	Katkı Oranı (%)	Silis Dumanı Miktarı (kg/m ³)
C150/1,70-0,6N	150	1,70	Normal	0,6	-
C150/1,50-0,6N	150	1,50	Normal	0,6	-
C150/1,30-0,6N	150	1,30	Normal	0,6	-
C200/1,30-0,6N	200	1,30	Normal	0,6	-
C200/1,10-0,6N	200	1,10	Normal	0,6	-
C200/0,90-0,6N	200	0,90	Normal	0,6	-
C250/0,90-2,0S	250	0,90	Süper	2,0	-
C250/0,80-2,0S	250	0,80	Süper	2,0	-
C250/0,70-2,0S	250	0,70	Süper	2,0	-
C250/0,60-2,0S	250	0,60	Süper	2,0	-
C300/0,56-2,0S	300	0,56	Süper	2,0	-
C300/0,46-2,0H	300	0,46	Hiper	2,0	-
C300/0,36-2,0H	300	0,36	Hiper	2,0	-
C300/0,36-2,5H	300	0,36	Hiper	2,5	-
C350/0,38-2,5H	350	0,38	Hiper	2,5	-
C350/0,35-2,5H+35S	350	0,35	Hiper	2,5	35
C350/0,35-2,5H	350	0,35	Hiper	2,5	-
C400/0,33-2,5H	400	0,33	Hiper	2,5	-
C400/0,30-2,5H+40S	400	0,30	Hiper	2,5	40
C400/0,30-2,5H	400	0,30	Hiper	2,5	-

2.3. Beton Üretimi

Beton numunelerinin üretimi Eirich marka 50 dm³ kapasiteli düşey eksenli cebri karıştırıcılı betoniyerde yapılmıştır. Beton üretiminde izlenen sıra şöyledir:

- Çimentonun ve agregaların karışım oranlarına göre kuru olarak karıştırılması
- Karma suyuna akışkanlaştırıcı eklenerek karışıma karıştırılması
- Birim ağırlık deneyinin yapılması
- Elde edilen betonların vibrasyon tablasında sarsılarak kalıplara yerleştirilmesi.

Her bir karışımından boyutları 150x150x150 mm olan beş adet küp ile çapı 150 mm ve yüksekliği de 300 mm olan beş adet silindir olmak üzere toplam on beton numunesi üretilmiştir. Beton numuneleri bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak 20±2 °C deki kür havuzunda 28 gün saklanmıştır.

2.4. Taze Beton Deneyleri

2.4.1. Birim Ağırlık

Yapılan betonların gerçek bileşimlerini hesaplamak için taze betonda birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu deneyde 200x200x200 mm boyutlu, 8 lt hacimli kabın içine taze beton vibrasyon ile yerleştirilerek tartılmıştır. Bulunan bu değerlerden gerçek birim ağırlıklar hesaplanmıştır.

2.4.2. İşlenebilme Deneyleri

2.4.2.1. Çökme Deneyi (Slump Deneyi)

Taze betonların işlenebilme özelliğinin ölçülmesi amacıyla TS 2871'e göre [44] çökme hunisi ile çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyinde üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan bir kesik koni, yükseklikleri eşit üç tabaka halinde betonla doldurulur ve her tabaka 25 defa çelik çubukla şişlenir. Koni tamamen doldurulup üstü mala ile düzeltildikten sonra doldurulan beton sarsılmadan

kesik koni kalıp yukarı çekilir. Çökme miktarı kesik koninin üst yüzeyi ile çöken beton yığınının tepe noktasındaki seviye farkıdır.

Çökme deneyi, kuvvetli vibrasyonla yerleştirilebilecek çok kuru betonlar bakımından pek bir şey ifade etmez ve bu betonlarda çökme genellikle sıfır olur. Çökme deneyi akıcıya yakın plastik kıvamda betonlar için uygulanabilir. [1]

2.4.2.2. VeBe Deneyi

VeBe deneyinde özel bir vibrasyon masası üzerine bir silindir kap ve kabın içine bir Abrams konisi yerleştirilir. Koni çökme deneyindeki esaslara uygun olarak doldurulur. Koni kalıp çekildikten sonra serbest kalan betonun üzerine şeffaf plastik bir disk yerleştirilir. Yerleştirilen bu disk kılavuzlanmıştır ve kendi ağırlığı ile betona oturur. Vibrasyon masası çalıştırılır aynı anda kronometre başlatılır ve vibrasyon etkisiyle akışkanlaşan beton yayılmaya başlar. Beton, silindir içinde iyice yayıldığı ve disk tam oturduğu zaman kronometre durdurulur. Kronometre ile ölçülen zaman betonun VeBe değerini verir.

VeBe deneyinde taze betonun şekil değiştirmesi ve sıkışması için gerekli enerjinin ölçülmesine çalışılır. Ölçülen enerjinin doğrudan kendisi değildir, belirli bir sıkışma için gerekli zaman veya sıkışma oranıdır, bu değerler enerji ile orantılı büyüklüklerdir.

2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

2.5.1. Basınç Deneyi

Basınç deneylerinde 250 ton kapasiteli Amsler marka basınç presi kullanılmıştır. Bu deney hem küp hem de silindir numunelerde yapılmıştır. Numuneler kür havuzundaki 28. günlerinden sonra havuzdan çıkarılıp 1 gün yüzeylerinin kuruması için beklendikten sonra tartılıp basınç deneyi yapılmıştır.

Boyutları 150x150x150 mm olan küp numuneler tartıldıktan sonra, yükleme hızı sabit olan basınç presinde deneye tabi tutulmuşlardır ve maksimum basınç dayanımları kaydedilmiştir. Her bir beton serisi için 5 adet küp numune kırılmıştır.

Boyutları 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde olan silindir numuneler tartıldıktan sonra silindir numunelerin düşey yerdeğiştirmelerini ölçmek amacıyla

basınç presi uygulanmadan önce her bir beton serisinden üretilmiş olan beş adet numuneden üçüne çerçeve takılmıştır. Çerçeve üzerinde bulunan kompratör yardımıyla belirli yüklere karşı gelen düşey yerdeğiştirme değerleri okunmuştur ve elde edilen bu değerlerden elastisite modülleri hesaplanmıştır.

2.5.2. Ultrases Hızı Ölçümü

Ultrases hızı ölçümü, bir gün kurutulmuş numunelerde 29.günde basınç deneyleri yapılmadan önce yapılmıştır. Ultrases hızı ölçümünde önce tüm numunelerin boyutları ölçülmüştür, daha sonra numunelerin karşılıklı iki yüzüne gres yağı sürülüp, numune ses verici ve alıcı probların arasına yerleştirilmiştir. Sesin numune boyunca geçiş süresi mikro saniye cinsinden ölçülmüştür.

3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneyleri sonucunda elde edilen betonların birim ağırlıkları, çökme ve Vebe deneyi sonuçları Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Beton Kodu	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Çökme (cm)	VeBe (sn)
C150/1,70-0,6N	2277	Yayıldı	<1,0
C150/1,50-0,6N	2330	7	4,0
C150/1,30-0,6N	2350	0	6,0
C200/1,30-0,6N	2320	Yayıldı	<1,0
C200/1,10-0,6N	2365	15	1,0
C200/0,90-0,6N	2406	0	6,0
C250/0,90-2,0S	2424	Yayıldı	<1,0
C250/0,80-2,0S	2430	Yayıldı	<1,0
C250/0,70-2,0S	2382	0	10,0
C250/0,60-2,0S	2422	0	5,0
C300/0,56-2,0S	2390	Yayıldı	<1,0
C300/0,46-2,0H	2384	2,5	5,0
C300/0,36-2,0H	2352	0	10,0
C300/0,36-2,5H	2445	0	9,0
C350/0,38-2,5H	2464	0	6,0
C350/0,35-2,5H+S	2455	0	6,0
C350/0,35-2,5H	2485	0	9,0
C400/0,33-2,5H	2440	0	7,0
C400/0,30-2,5H+S	2447	0	7,0
C400/0,30-2,5H	2473	0	8,0

Taze betonların birim ağırlıkları yardımıyla betonların hava miktarları ve kompasiteleri bulunmuştur. Üretilen betonların hava miktarları ve kompasiteleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Üretilen Betonların Hava miktarları ve Kompasiteleri

Beton Kodu	Hava (%)	Kompasite
C150/1,70-0,6N	0,0	0,740
C150/1,50-0,6N	0,0	0,771
C150/1,30-0,6N	1,2	0,791
C200/1,30-0,6N	0,0	0,739
C200/1,10-0,6N	0,2	0,774
C200/0,90-0,6N	0,2	0,814
C250/0,90-2,0S	0,0	0,795
C250/0,80-2,0S	0,0	0,801
C250/0,70-2,0S	1,6	0,803
C250/0,60-2,0S	1,7	0,828
C300/0,56-2,0S	2,1	0,806
C300/0,46-2,0H	4,3	0,817
C300/0,36-2,0H	7,5	0,817
C300/0,36-2,5H	3,8	0,849
C350/0,38-2,5H	1,6	0,842
C350/0,35-2,5H+S	1,3	0,842
C350/0,35-2,5H	1,4	0,854
C400/0,33-2,5H	2,8	0,831
C400/0,30-2,5H+S	1,9	0,838
C400/0,30-2,5H	2,3	0,848

Taze beton deneyleri sonucunda, üretilen beton numunelerinin gerçek bileşimleri bulunmuştur. Üretilen betonların karışımına giren gerçek malzeme miktarları Tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Üretilen Betonların Karışımına Giren Gerçek Malzeme Miktarları

Beton Kodu	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Katkı (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	Kırmataş I (kg/m ³)	Kırmataş II (kg/m ³)	Kırmataş Tozu (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)
C150/1,70-0,6N	152	259	0,9	494	470	561	340	-
C150/1,50-0,6N	153	229	0,9	515	492	586	354	-
C150/1,30-0,6N	151	196	0,9	530	506	603	364	-
C200/1,30-0,6N	205	266	1,2	482	459	547	330	-
C200/1,10-0,6N	203	223	1,2	506	483	575	347	-
C200/0,90-0,6N	203	183	1,2	536	509	607	367	-
C250/0,90-2,0S	264	238	5,3	509	484	576	348	-
C250/0,80-2,0S	258	206	5,2	513	490	583	352	-
C250/0,70-2,0S	250	175	5,0	517	493	587	355	-
C250/0,60-2,0S	250	150	5,0	534	510	608	366	-
C300/0,56-2,0S	299	167	6,0	508	484	576	349	-
C300/0,46-2,0H	292	134	5,8	516	492	590	354	-
C300/0,36-2,0H	282	102	5,6	519	495	591	358	-
C300/0,36-2,5H	294	106	7,3	540	515	613	370	-
C350/0,38-2,5H	351	133	8,8	521	499	593	359	-
C350/0,35-2,5H+S	352	135	9,7	508	486	579	350	35
C350/0,35-2,5H	351	123	8,8	530	506	602	365	-
C400/0,33-2,5H	396	131	9,9	505	481	572	346	-
C400/0,30-2,5H+S	400	132	11,0	494	472	560	340	40
C400/0,30-2,5H	398	119	9,9	515	491	585	354	-

3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.2.1. Basınç Deneyi Sonuçları

Betonların üretiminden itibaren 29. günde yapılan basınç deneyi sonuçları Tablo 3.4 de verilmiştir. Tablo 3.4’de f_{cs} silindir basınç dayanımını, f_{ck} ise küp basınç dayanımını göstermektedir.

Tablo 3.4. Basınç Deneyi Sonuçları

Beton Kodu	f_{cs} (N/mm ²)	f_{ck} (N/mm ²)
C150/1,70-0,6N	6,2	7,8
C150/1,50-0,6N	8,8	9,7
C150/1,30-0,6N	12,2	13,9
C200/1,30-0,6N	10,4	13,8
C200/1,10-0,6N	14,1	17,9
C200/0,90-0,6N	26,1	27,8
C250/0,90-2,0S	15,0	20,8
C250/0,80-2,0S	15,5	25,2
C250/0,70-2,0S	19,5	30,7
C250/0,60-2,0S	42,9	45,9
C300/0,56-2,0S	31,3	41,4
C300/0,46-2,0H	54,7	57,3
C300/0,36-2,0H	49,8	50,2
C300/0,36-2,5H	62,3	66,4
C350/0,38-2,5H	75,2	77,8
C350/0,35-2,5H+S	61,7	71,1
C350/0,35-2,5H	67,9	74,7
C400/0,33-2,5H	76,4	80,9
C400/0,30-2,5H+S	70,5	86,2
C400/0,30-2,5H	65,9	78,8

Basınç dayanımları (3.1) bağıntısından hesaplanmıştır. Bu bağıntıda kuvvet P (N), basınç kuvvetinin uygulandığı alan A (mm²) ve elde edilen basınç dayanımı σ_b (N/mm²) olarak alınmıştır.

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Tablo 3.4’de verilen basınç dayanımları numunelerin ortalama basınç dayanımlarıdır.

3.2.2. Elastisite Modülü Değerleri

Silindir numunelerin belirli yük aralıklarındaki deformasyonlarını ölçmek suretiyle gerilme-deformasyon diyagramları yardımıyla elastisite modülleri hesaplanmıştır. Elastisite modüllerinin her bir numune için ortalama değerleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Elastisite Modülleri

Beton Kodu	E (N/mm ²)
C150/1,70-0,6N	12770
C150/1,50-0,6N	16360
C150/1,30-0,6N	27560
C200/1,30-0,6N	16930
C200/1,10-0,6N	20450
C200/0,90-0,6N	29890
C250/0,90-2,0S	20590
C250/0,80-2,0S	20700
C250/0,70-2,0S	24550
C250/0,60-2,0S	38680
C300/0,56-2,0S	31180
C300/0,46-2,0H	38880
C300/0,36-2,0H	47600
C300/0,36-2,5H	44730
C350/0,38-2,5H	49590
C350/0,35-2,5H+S	43180
C350/0,35-2,5H	50330
C400/0,33-2,5H	49520
C400/0,30-2,5H+S	43280
C400/0,30-2,5H	54090

3.2.3. Ultrases Hızı Sonuçları

Ultrases hızı ölçümü, 29.günde basınç deneyleri yapılmadan önce hem küp hemde silindir numuneler için yapılmıştır. Ultrases hızı değerleri 3.2 bağıntısı ile hesaplanmıştır. Bu bağıntıda V (km/sn) cinsinden ultrases hızını, t (sn) cinsinden ultrasesin geçiş süresini ve l (km) cinsinden numunenin uzunluğunu göstermektedir.

$$V = \frac{l}{t} \quad (3.2)$$

Ultrases hızı sonuçlarının her beton tipi için ortalamaları Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

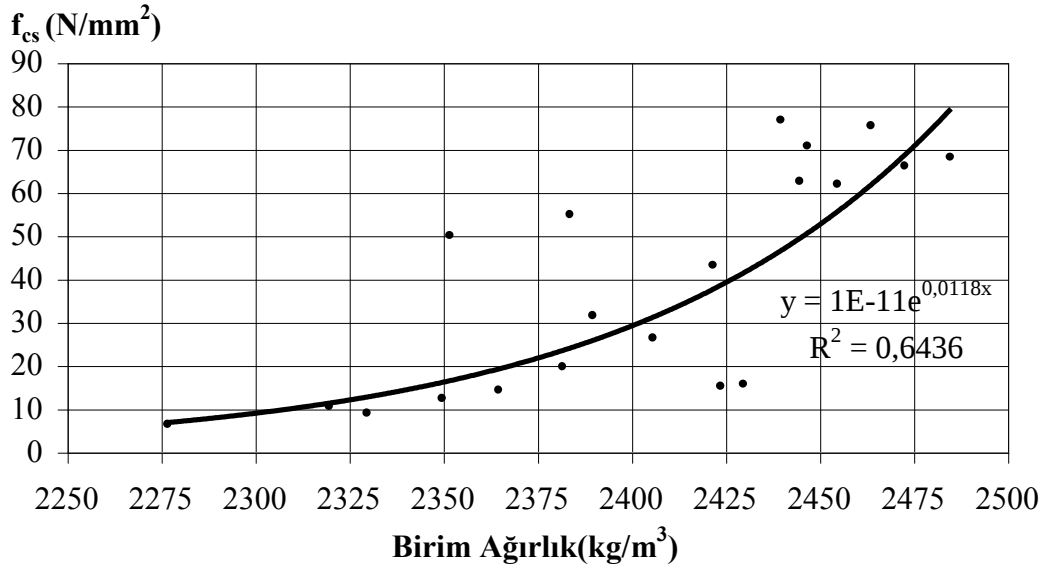
Tablo 3.6. Ultrases Hızı Sonuçları

Beton Kodu	V _{silindir} (km/sn)	V _{küp} (km/sn)
C150/1,70-0,6N	3,31	3,95
C150/1,50-0,6N	3,43	3,85
C150/1,30-0,6N	4,00	4,24
C200/1,30-0,6N	3,89	4,06
C200/1,10-0,6N	4,14	4,36
C200/0,90-0,6N	4,48	4,73
C250/0,90-2,0S	4,33	4,48
C250/0,80-2,0S	4,29	4,77
C250/0,70-2,0S	4,51	4,85
C250/0,60-2,0S	4,98	5,14
C300/0,56-2,0S	4,87	4,90
C300/0,46-2,0H	5,05	5,26
C300/0,36-2,0H	5,03	5,50
C300/0,36-2,5H	5,16	5,54
C350/0,38-2,5H	5,21	5,38
C350/0,35-2,5H+S	5,09	5,36
C350/0,35-2,5H	5,26	5,47
C400/0,33-2,5H	5,27	5,34
C400/0,30-2,5H+S	5,11	5,50
C400/0,30-2,5H	5,25	5,41

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Birim Ağırlıklarla Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Taze beton deneyleri sonucunda bulunan ve Tablo 3.1’de verilen birim ağırlıklarla Tablo 3.4’de verilen silindir ve küp numunelerin ortalama basınç dayanımları arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



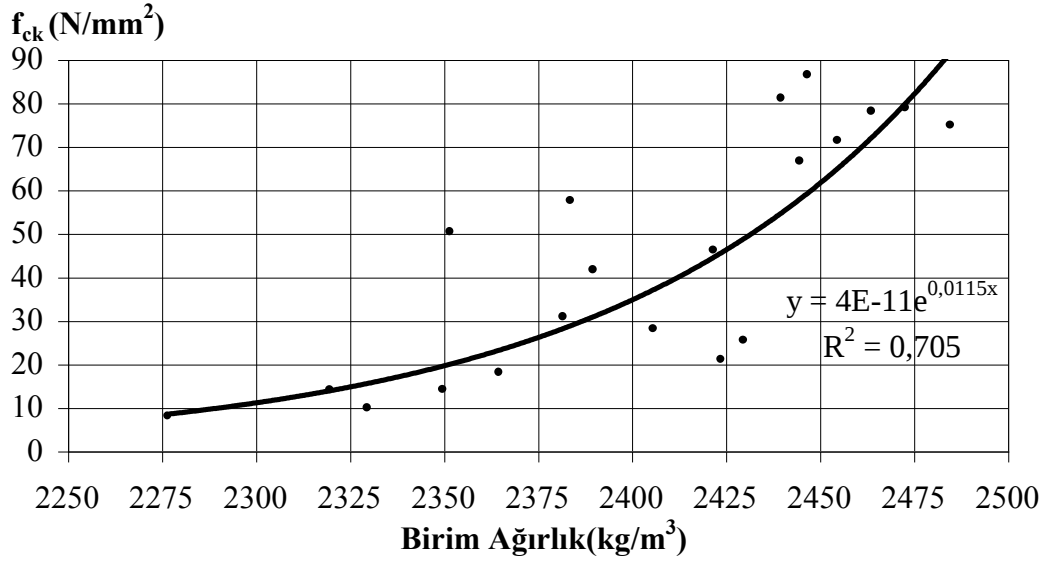
Şekil 4.1 Birim Ağırlıklarla Silindir Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den görüldüğü gibi birim ağırlık arttıkça betonun basınç dayanımı artmaktadır. Şekil 4.1 yardımıyla birim ağırlıklar ile silindir basınç dayanımları arasında korelasyon katsayısı $R=0.80$ olan (4.1) bağıntısı bulunmaktadır. Bu bağıntıda f_{cs} N/mm² cinsinden silindir basınç dayanımını, Δ ise kg/m³ cinsinden birim ağırlığı göstermektedir.

$$f_{cs} = 1,4 \times 10^{-11} e^{0,0118\Delta} \quad (4.1)$$

Şekil 4.2 yardımıyla da küp basınç dayanımları ile birim ağırlıklar arasında da bir bağıntı kurmak mümkündür. Korelasyon katsayısı $R=0,84$ olan bu bağıntı aşağıda verilmiştir. Bu bağıntıda f_{ck} N/mm^2 cinsinden küp basınç dayanımının göstermektedir.

$$f_{ck} = 3,8 \times 10^{-11} e^{0,0115A} \quad (4.2)$$



Şekil 4.2 Birim Ağırlıklarla Küp Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

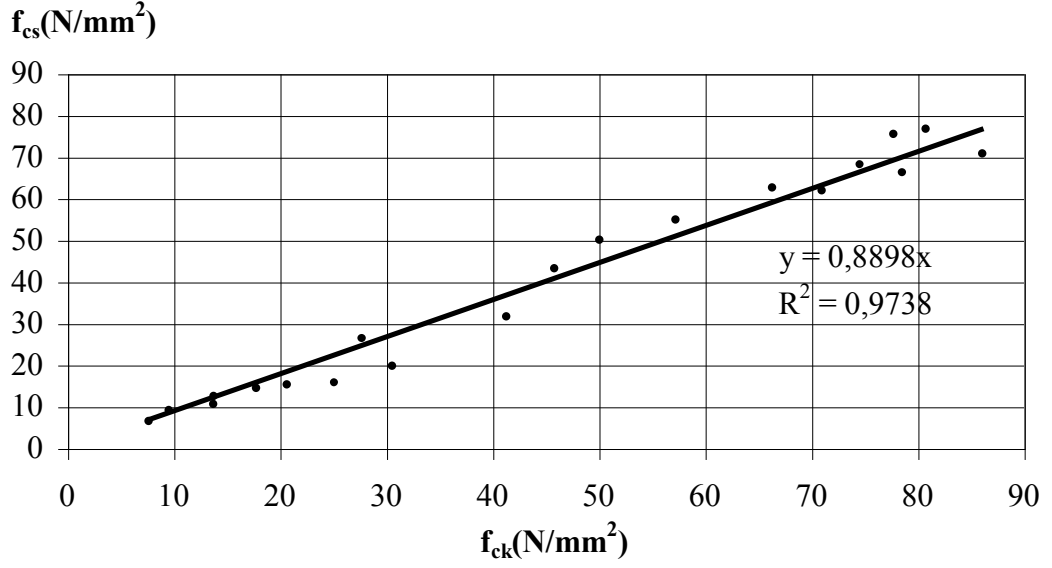
4.2. Silindir Basınç Dayanımı ile Küp Basınç Dayanımının Karşılaştırılması

Sertleşmiş beton deneyleri sonucunda bulunan silindir ve küp numunelerinin ortalama basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Şekil 4.3’ün yardımıyla silindir basınç dayanımları ile küp basınç dayanımları arasında korelasyon katsayısı $R=0,99$ olan bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişki aşağıda verilmiştir.

$$f_{cs} = 0,8898 f_{ck} \quad (4.3)$$

Bulunan bu bağıntı ile silindir ve küp basınç dayanımları arasında, TS 11222 [43] de verilen standart silindir ve küp basınç dayanımları arasındaki ilişkiye yakın bir ilişki kurulabilmektedir.



Şekil 4.3 Silindir Basınç Dayanımı ile Küp Basınç Dayanımının Karşılaştırılması

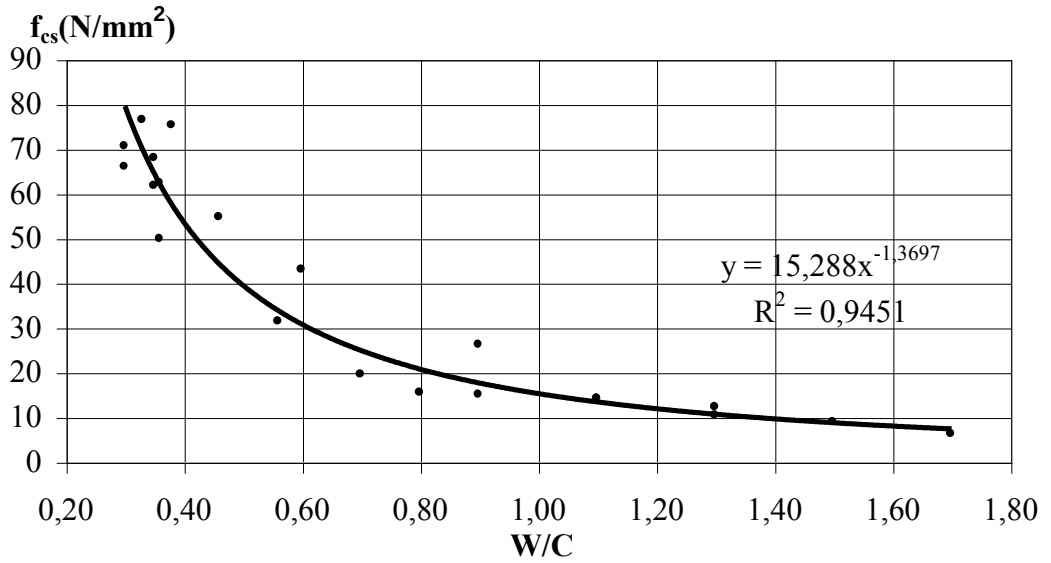
Tablo 4.1 Bağntı Yardımıyla Bulunan Küp Basınç Dayanımları ile TS 11222’de Verilen Küp Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması

Beton Sınıfı	TS 11222'ye Göre Basınç Dayanımları		Bağntı ile Bulunan	Bağntı/TS 11222 f_{ck} Oranları
	f_{cs} (N/mm ²)	f_{ck} (N/mm ²)	f_{ck} (N/mm ²)	
C14	14	16	15,7	0,98
C16	16	20	18,0	0,90
C18	18	22	20,2	0,92
C20	20	25	22,5	0,90
C25	25	30	28,1	0,94
C30	30	37	33,7	0,91
C35	35	45	39,3	0,87
C40	40	50	45,0	0,90
C45	45	55	50,6	0,92
C50	50	60	56,2	0,94
C55	55	67	61,8	0,92
C60	60	75	67,4	0,90
C70	70	85	78,7	0,93
C80	80	95	89,9	0,95
C90	90	105	101,1	0,96
C100	100	115	112,4	0,98

Tablo 4.1’de TS 11222’de beton sınıflarına karşı gelen küp basınç dayanımları ile yine bu beton sınıflarında (4.3) bağıntısı kullanılarak bulunan küp basınç dayanımları ile bunların birbirine oranları gösterilmiştir. Tablo 4.1’in son sütununda TS 11222’de verilen standart silindir basınç dayanımlarına karşı gelen küp basınç dayanımları ile standart silindir basınç dayanımları kullanılarak bağıntı yardımıyla bulunan küp basınç dayanımlarının oranı gözükmemektedir. Tablo 4.1’den de görülebileceği gibi bağıntı yardımıyla bulunan küp basınç dayanımları TS 11222’de verilen verilen küp basınç dayanımlarından az miktarda düşük çıkmaktadır.

4.3. Basınç Dayanımları ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki

Su/çimento oranlarıyla silindir ve küp basınç dayanımları arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 4.4’de ve Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Su/Çimento Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

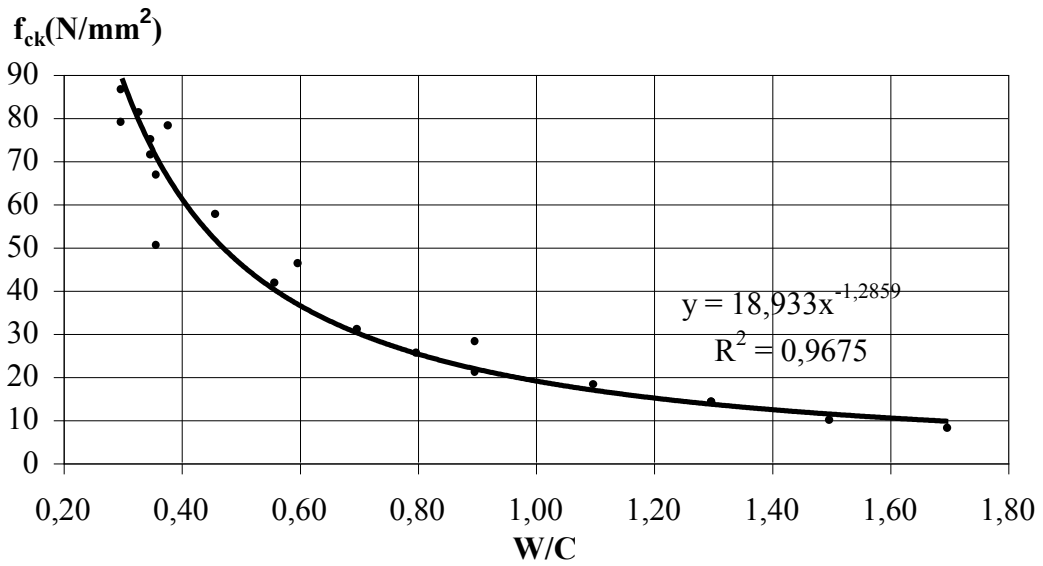
Şekil 4.4’ün yardımıyla silindir basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasında korelasyon katsayısı R=0,97 olan bir bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$f_{cs} = 15,288 \left(\frac{C}{W} \right)^{1,3697} \quad (4.4)$$

Şekil 4.5'ten de küp basınç dayanımı ile su/çimento oranı arasında korelasyon katsayısı R=0,98 olan bir bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$f_{ck} = 18,933 \left(\frac{C}{W} \right)^{1,2859} \quad (4.5)$$

Bu iki bağıntıda C/W çimento/su oranını göstermektedir. İki grafikten de anlaşılacağı gibi su/çimento oranı azaldıkça basınç dayanımı artmaktadır.



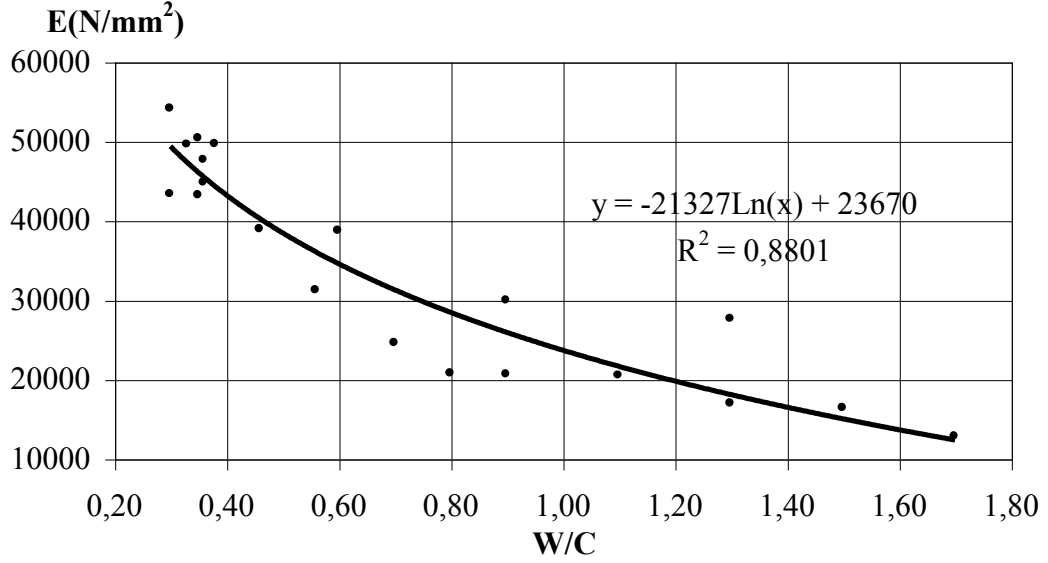
Şekil 4.5 Su/Çimento Oranı ile Küp Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

4.4. Elastisite Modülleri ile Su/Çimento Oranları Arasındaki İlişki

Su/çimento oranlarıyla elastisite modülleri arasındaki ilişki Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Elastisite modülünün su/çimento oranının azalmasıyla arttığı Şekil 4.6'daki grafikten görülmektedir. Bu grafik yardımıyla korelasyon katsayısı R=0,94 olan (4.6) bağıntısı bulunmuştur. Bu bağıntıda E, N/mm² cinsinden elastisite modülünü ifade etmektedir.

$$E = 23670 - 21327 \ln \left(\frac{W}{C} \right) \quad (4.6)$$



Şekil 4.6 Elastisite Modülü ile Su/Çimento Oranı Arasındaki İlişki

4.5. Ultrases Hızları İle Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Ultrases hızları ile silindir basınç dayanımları ve küp basınç dayanımları arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

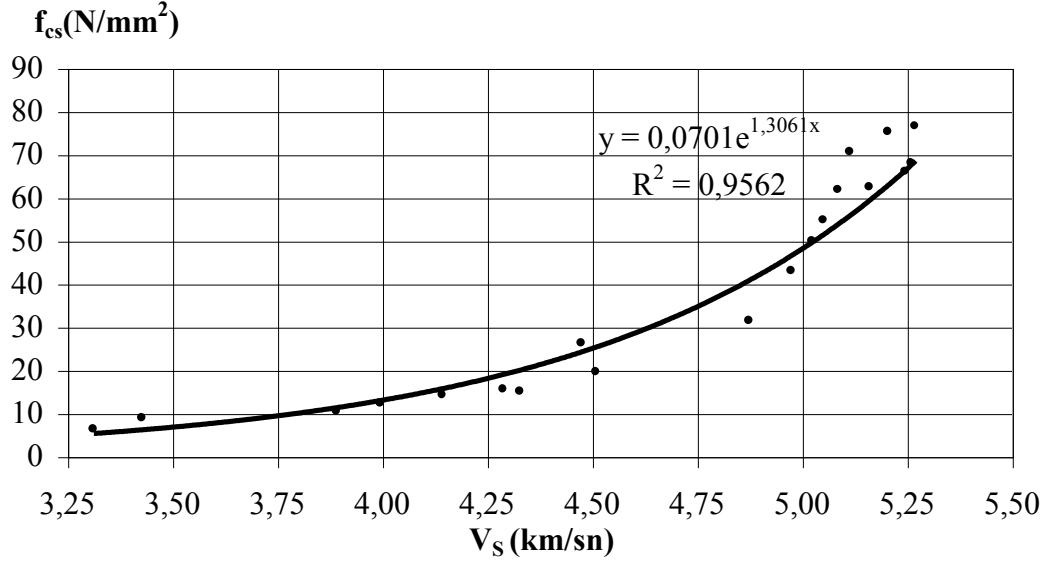
Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 den görülebileceği gibi ultrases değerlerindeki artışın sonucunda betonların basınç dayanımları da artmaktadır. Şekil 4.7 deki grafiğin yardımıyla ultrases değerleri ile silindir basınç dayanımları arasında korelasyon katsayısı $R=0,98$ olan (4.7) bağıntısı bulunmuştur.

$$f_{cs} = 0,0701e^{1,3061V} \quad (4.7)$$

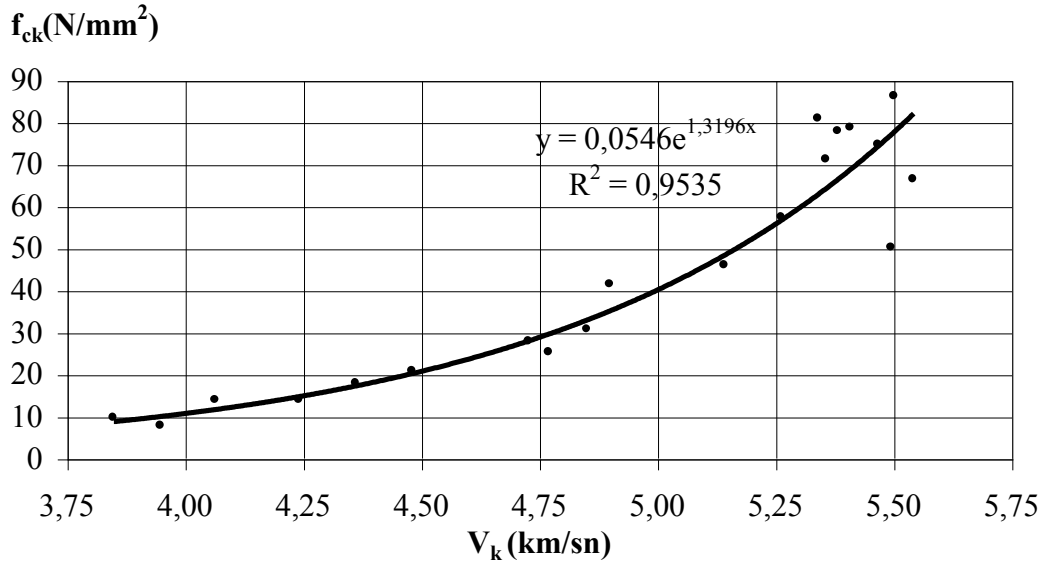
Yine aynı şekilde Şekil 4.8’in yardımıyla küp basınç dayanımları ile ultrases hızları arasında korelasyon katsayısı $R=0,98$ olan (4.8) bağıntısı bulunmuştur.

$$f_{ck} = 0,0546e^{1,3196V} \quad (4.8)$$

(4.8) ve (4.9) bağıntılarında V_s ve V_k sırasıyla km/sn cinsinden silindir ve küp numunelerin ultrases hızlarını ifade etmektedir.



Şekil 4.7 Ultrases Hızları ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

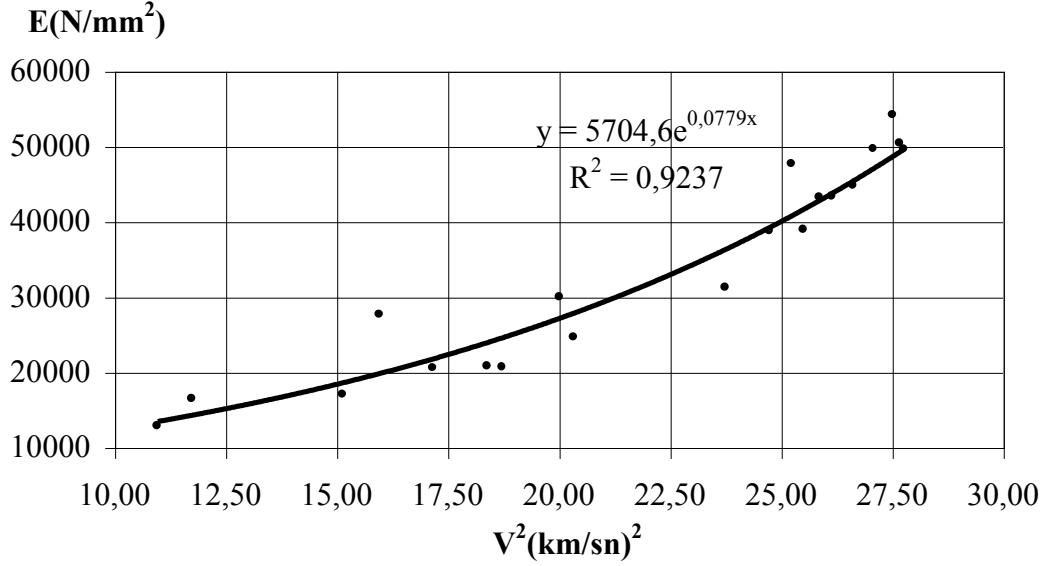


Şekil 4.8 Ultrases Hızları ile Küp Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki grafiklerden anlaşılacağı gibi ultrases değerlerinin artmasıyla birlikte basınç dayanımı artmaktadır fakat bu ilişki kesin değildir ve ultrases değerleriyle basınç dayanımının bulunması ancak yaklaşık sonuçlar verebilir.

4.6. Ultrases Hızları İle Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki

Ultrases hızlarıyla elastisite modülleri arasındaki ilişki Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Burada ultrases hızı değerlerinin karesiyle elastisite modülü değerleri arasında bağıntı kurulmuştur.



Şekil 4.9 Ultrases Hızları ile Elastisite Modülleri Arasındaki İlişki

Şekil 4.9'dan anlaşılabileceği gibi ultrases hızının artmasıyla elastisite modülü de artmaktadır. Şekil 4.9 daki grafiğin yardımıyla bu iki değer arasında korelasyon katsayısı 0,96 olan (4.9) bağıntısı kurulmuştur.

$$E = 5704,6e^{0,0779V^2} \quad (4.9)$$

4.7. Agrega Hacimleri ile Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

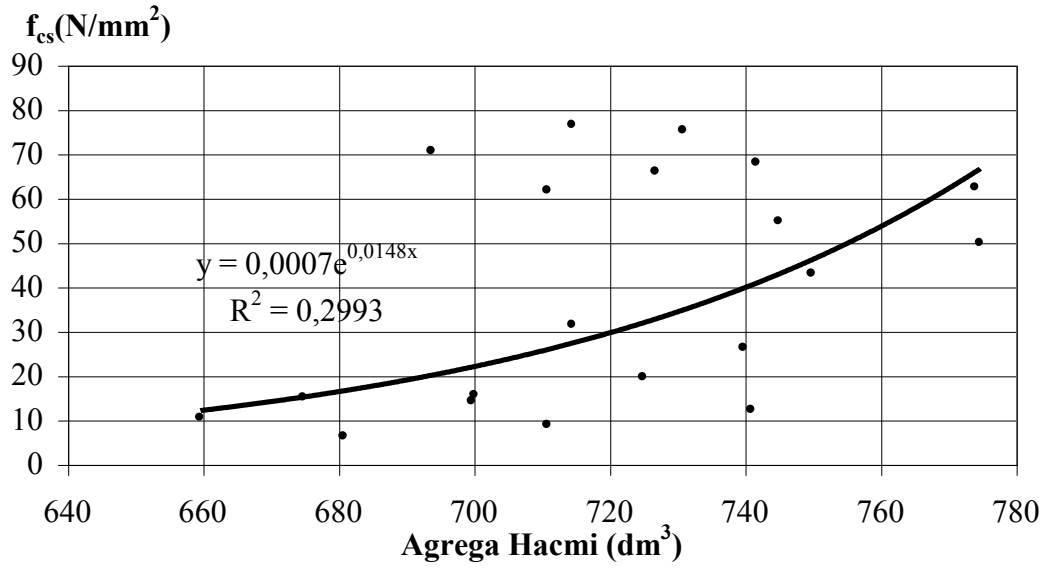
Agrega hacimleriyle silindir ve küp basınç dayanımları arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilmişlerdir.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 yardımıyla agrega hacmi ile basınç dayanımı arasında, korelasyon katsayısı $R=0,55$ olan silindir basınç dayanımı için (4.10) ve

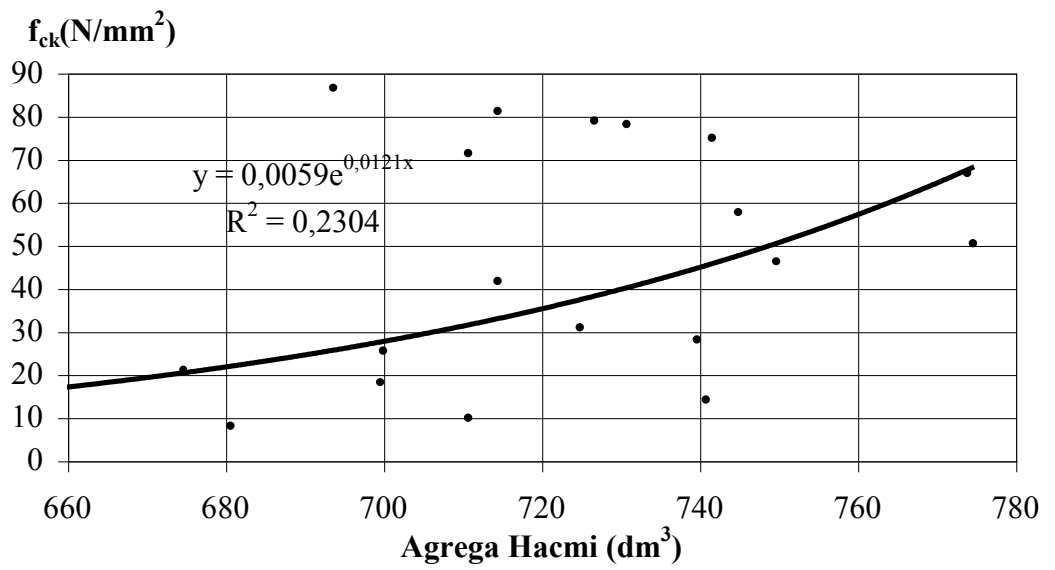
korelasyon katsayısı $R=0,48$ olan küp basınç dayanımı için (4.11) bağıntıları bulunmuştur. Her iki bağıntıda da $V \text{ dm}^3$ cinsinden agrega hacmini göstermektedir.

$$f_{cs} = 0,0007e^{0,0148V} \quad (4.10)$$

$$f_{ck} = 0,0059e^{0,0121V} \quad (4.11)$$



Şekil 4.10 Agreg a Hacimleri ile Silind ir Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki



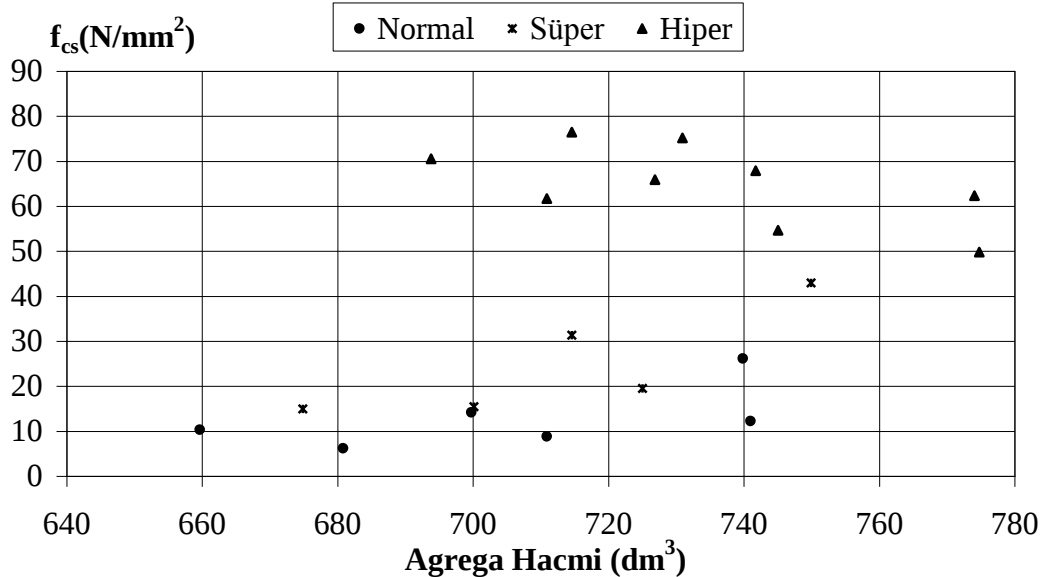
Şekil 4.11 Agreg a Hacimleri ile Küp Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Şekil (4.12) ve Şekil (4.13)'de deneysel çalışmalardaki agrega hacimleri ile basınç dayanımlarındaki ilişkinin akışkanlaştırıcı cinsine göre değişimi gösterilmiştir. Şekillerde normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcılar birbirinden ayrı şekillerle gösterilmişlerdir.

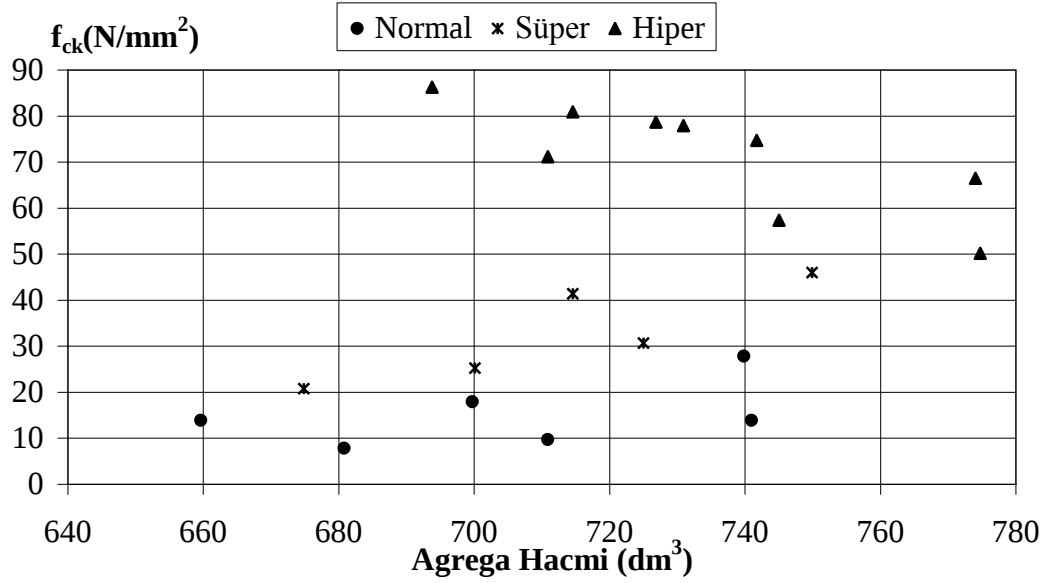
Şekil (4.12) ve Şekil (4.13)'den görüldüğü gibi bütün akışkanlaştırıcı cinslerinde de dağınık agrega hacmi ve basınç dayanımı oluşmuştur. Agrega hacimleri 660 dm^3 ile 775 dm^3 arasında değişmektedir. Agrega hacmi normal akışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda 660 ile 741 dm^3 , süper akışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda 675 ile 750 dm^3 ve hiper akışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda 694 ile 775 dm^3 arasında değişmektedir.

Basınç dayanımları normal akışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda silindir numunelerde $6,23$ ile $26,15 \text{ N/mm}^2$, küp numunelerde $7,78$ ile $27,82 \text{ N/mm}^2$, süper akışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda silindir numunelerde $15,00$ ile $42,94 \text{ N/mm}^2$, küp numunelerde $20,76$ ile $45,94 \text{ N/mm}^2$ ve hiper akışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda silindir numunelerde $49,80$ ile $76,45 \text{ N/mm}^2$, küp numunelerde $50,17$ ile $86,22 \text{ N/mm}^2$ arasında değişmektedir.

Sonuç olarak agrega hacimleri ile basınç dayanımları arasında bir ilişki kurulamamıştır.



Şekil 4.12 Agrega Hacimleri ve Akışkanlaştırıcılar ile Silindir Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki



Şekil 4.13 Agreg a Hacimleri ve Akışkanlaştırmacılar ile Küp Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

4.8. Basınç Dayanımları İle Bolomey ve Feret Bağıntıları Arasındaki İlişki

Bölüm 1 de (1.12) bağıntısı ile verilen Feret Formülü ile (1.13) bağıntısıyla verilen Bolomey Formülündeki katsayılar basınç dayanımlarının ortalama değerleri ile hesaplanmıştır. Bu katsayılar Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablo 4.1’de K_{Fs} ve K_{Fk} sırasıyla silindir ve küp numuneler için Feret katsayılarını, K_{Bs} ve K_{Bk} sırasıyla silindir ve küp numunelerde Bolomey katsayılarını göstermektedir.

Tablo 4.1 de verilen Feret Katsayıları silindir numuneler için 194 ile 471 N/mm², küp numuneler için 310 ile 491 N/mm² arasında değişmektedir. Yine aynı şekilde Bolomey katsayıları da silindir numuneler için 16 ile 41 N/mm² arasında, küp numuneler için 26 ile 43 N/mm² arasında değişmektedir.

Tablo 4.2 Feret ve Bolomey Katsayıları

Beton Kodu	$f_{cs}(N/mm^2)$	$f_{ck}(N/mm^2)$	$K_{Fs}(N/mm^2)$	$K_{Fk}(N/mm^2)$	$K_{Bs}(N/mm^2)$	$K_{Bk}(N/mm^2)$
C150/1,70-0,6N	6,2	7,8	255	319	22	27
C150/1,50-0,6N	8,8	9,7	294	322	24	26
C150/1,30-0,6N	12,2	13,9	355	403	29	33
C200/1,30-0,6N	10,4	13,8	273	365	22	29
C200/1,10-0,6N	14,1	17,9	290	366	24	30
C200/0,90-0,6N	26,1	27,8	398	424	33	35
C250/0,90-2,0S	15,0	20,8	224	310	18	26
C250/0,80-2,0S	15,5	25,2	194	317	16	27
C250/0,70-2,0S	19,5	30,7	230	362	19	30
C250/0,60-2,0S	42,9	45,9	421	450	36	39
C300/0,56-2,0S	31,3	41,4	282	372	24	32
C300/0,46-2,0H	54,7	57,3	471	494	41	43
C300/0,36-2,0H	49,8	50,2	446	449	38	39
C300/0,36-2,5H	62,3	66,4	406	433	36	38
C350/0,38-2,5H	75,2	77,8	416	430	37	38
C350/0,35-2,5H+S	61,7	71,1	338	389	30	34
C350/0,35-2,5H	67,9	74,7	342	376	30	33
C400/0,33-2,5H	76,4	80,9	396	419	35	37
C400/0,30-2,5H+S	70,5	86,2	342	418	30	37
C400/0,30-2,5H	65,9	78,8	301	360	26	32

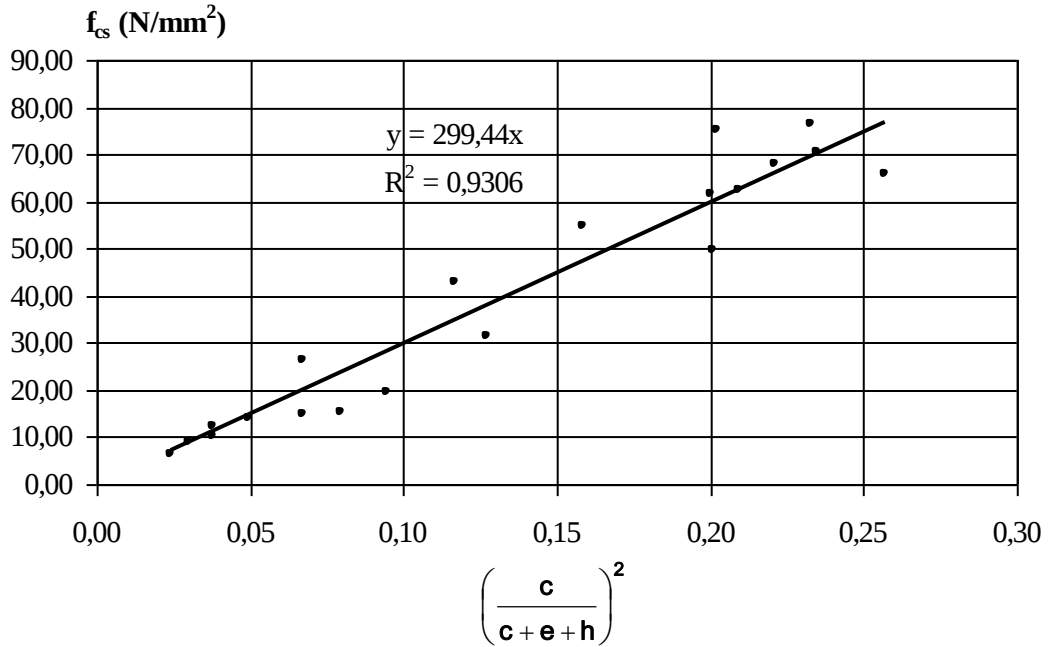
Silindir numuneler için Feret katsayısı Şekil 4.14'deki korelasyon katsayısı $R=0.96$ olan doğrunun eğiminden 299,44 olarak bulunmuştur. Korelasyon katsayısının mertebesi yaklaşımın güvenilirliğini göstermektedir.

Bulunan bu grafiğe göre silindir basınç dayanımı ile Feret Formülündeki

$\left(\frac{c}{c+e+h}\right)^2$ ifadesi arasında korelasyon katsayısı $R=0,96$ olan;

$$f_c = 299,44 \left(\frac{c}{c+e+h}\right)^2 \quad (4.12)$$

ilişkisi bulunmuştur.

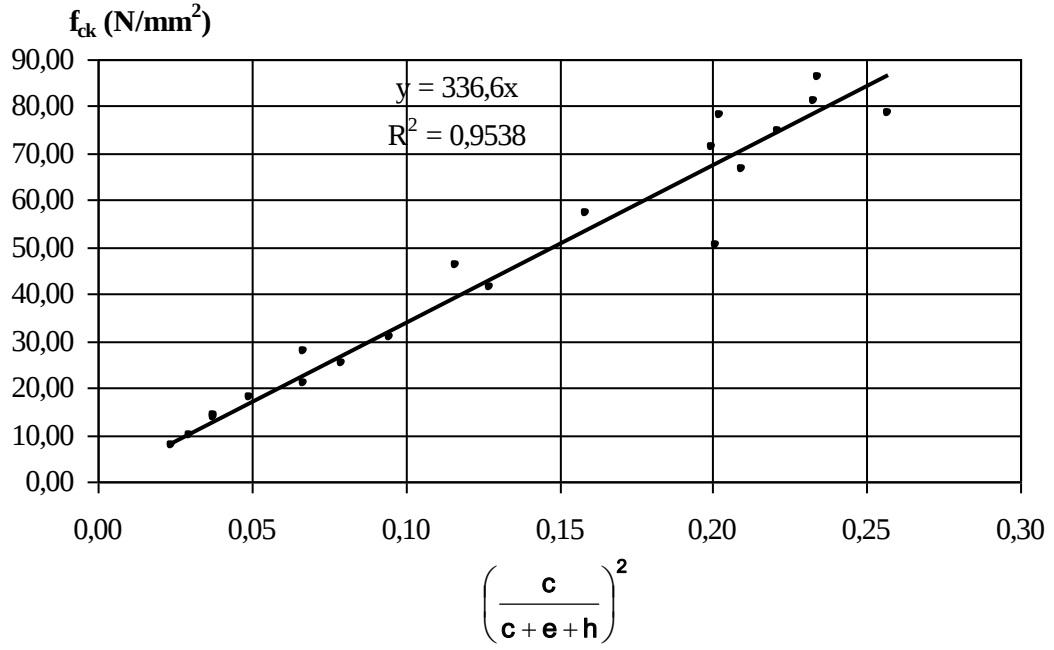


Şekil 4.14 Silindir Basınç Dayanımı ile Feret Bağıntısı Arasındaki İlişki

Küp numuneler için Feret katsayısı Şekil 4.15'deki korelasyon katsayısı $R=0.97$ olan doğrunun eğiminden 336,6 olarak bulunmuştur.

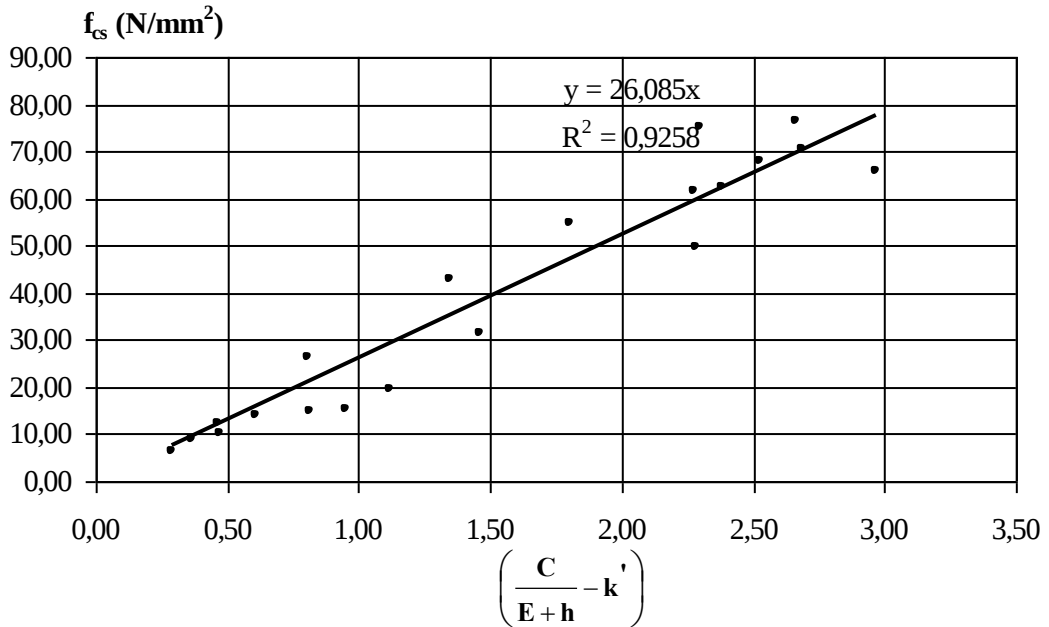
Buna göre küp basınç dayanımı ile Feret Formülündeki $\left(\frac{c}{c+e+h}\right)^2$ ifadesi arasında korelasyon katsayısı $R=0,97$ olan (4.13) ilişkisi bulunmuştur.

$$f_c = 336,6 \left(\frac{c}{c+e+h}\right)^2 \quad (4.13)$$



Şekil 4.15 Küp Basınç Dayanımı ile Feret Bağıntısı Arasındaki İlişki

Silindir numuneler için Bolomey katsayısı Şekil 4.16'daki korelasyon katsayısı $R=0.96$ olan doğrunun eğiminden 26,085 olarak bulunmuştur.



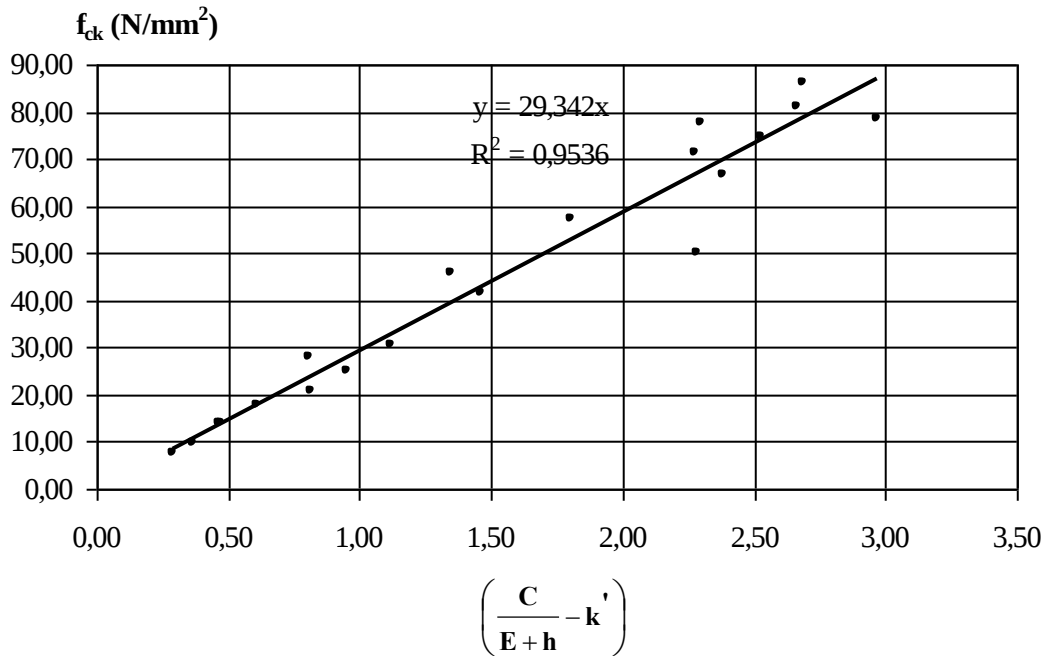
Şekil 4.16 Silindir Basınç Dayanımı ile Bolomey Bağıntısı Arasındaki İlişki

Bulunan bu grafiğe göre silindir basınç dayanımı ile Bolomey Formülündeki $\left(\frac{C}{E+h} - k'\right)$ ifadesi arasında korelasyon katsayısı $R=0,96$ olan

$$f_c = 26,085 \left(\frac{C}{E+h} - k' \right) \quad (4.14)$$

ilişkisi bulunmuştur.

Küp numuneler için Feret katsayısı Şekil 4.17'deki korelasyon katsayısı $R=0,97$ olan doğrunun eğiminden 29,342 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.17 Küp Basınç Dayanımı ile Bolomey Bağıntısı Arasındaki İlişki

Bulunan bu grafiğe göre küp basınç dayanımı ile Bolomey Formülündeki $\left(\frac{C}{E+h} - k'\right)$ ifadesi arasında korelasyon katsayısı $R=0,97$ olan;

$$f_c = 29,342 \left(\frac{C}{E+h} - k' \right) \quad (4.15)$$

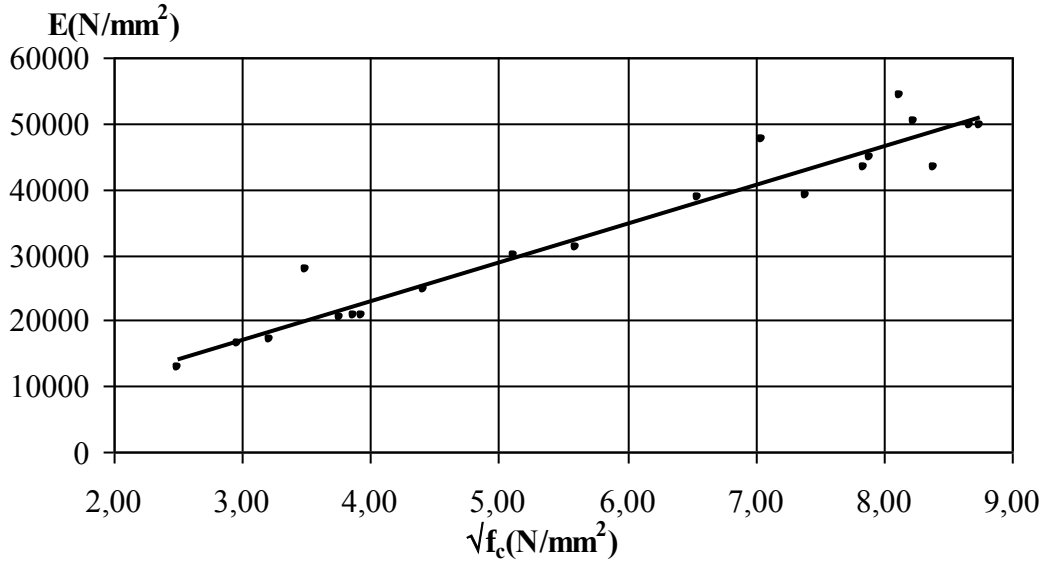
ilişkisi bulunmuştur.

4.9. Elastisite Modülleri ile Basınç Dayanımları Arasındaki İlişkiler

Şekil 4.18’de de görüldüğü gibi basınç dayanımının artışıyla elastisite modülü artmaktadır. Şekil 4.18 yardımıyla basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında korelasyon katsayıları sırasıyla $R=0,96$ ve $R=0,97$ olan (4.16) ve (4.17) bağıntılarını bulabiliriz. Bu iki bağıntıda yaklaşık olarak aynı değerleri vermektedir.

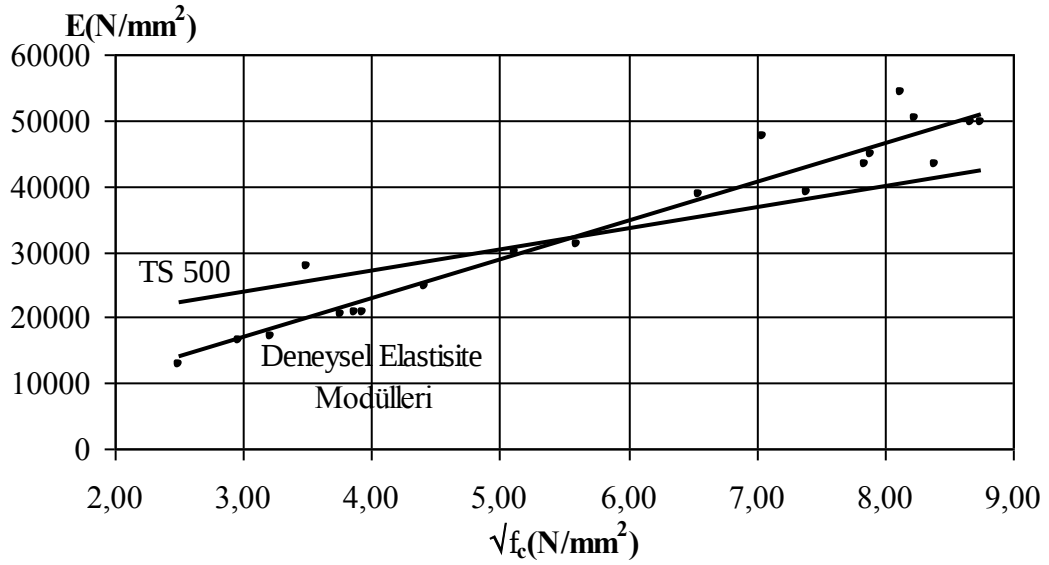
$$E = 5789,9\sqrt{f_c} \quad (4.16)$$

$$E = 5355,1(f_c)^{0,5196} \quad (4.17)$$



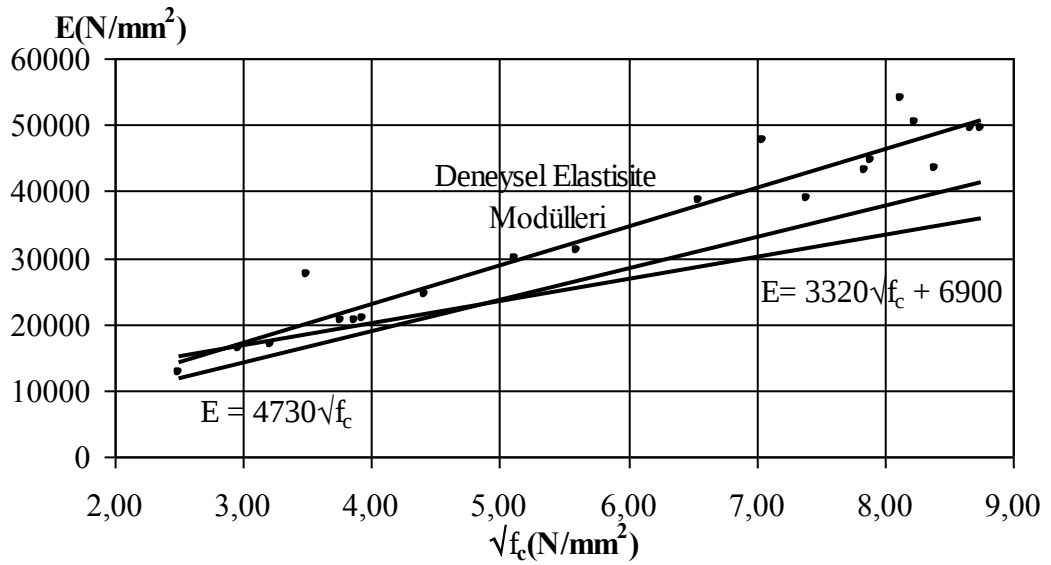
Şekil 4.18 DeneySEL Elastisite Modülleri ile Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Şekil 4.19’da TS 500 de verilen ve Bölüm 1’de (1.22) bağıntısıyla gösterilen formül yardımıyla hesaplanan elastisite modülü değerleriyle deneysel çalışmalarla bulunan elastisite modülü değerleri karşılaştırılmıştır. Şekilden de görülebileceği gibi TS 500 deki bağıntının [16] yardımıyla bulunan eğrinin eğimi deneysel elastisite modülü ile bulunan eğrinin eğiminden daha küçüktür. TS 500 deki bağıntıyla [16] bulunan elastisite modülü değerleri küçük basınç dayanımları için deneysel elastisite modülü değerlerinden büyük değerler ve büyük basınç dayanımları içinde daha küçük elastisite modülü değerleri vermektedir.



Şekil 4.19 TS 500'deki Bağıntı ile Bulunan Elastisite Modülleri ile Deneysel Elastisite Modüllerinin Basınç Dayanımlarına Göre Karşılaştırılması

Şekil 4.20'de ACI da verilen ve 1.bölümde (1.24) ve (1.25) bağıntılarıyla gösterilen bağıntılar yardımıyla hesaplanan elastisite modülü değerleri ile gerçek elastisite modülü değerleri karşılaştırılmıştır. (1.24) ve (1.25) bağıntılarıyla bulunan değerler statik elastisite modülü değerleridir. Bu bağıntılar ile bulunan elastisite modülü değerleri deneysel elastisite modülü değerlerinden daha küçük değerler vermektedir.



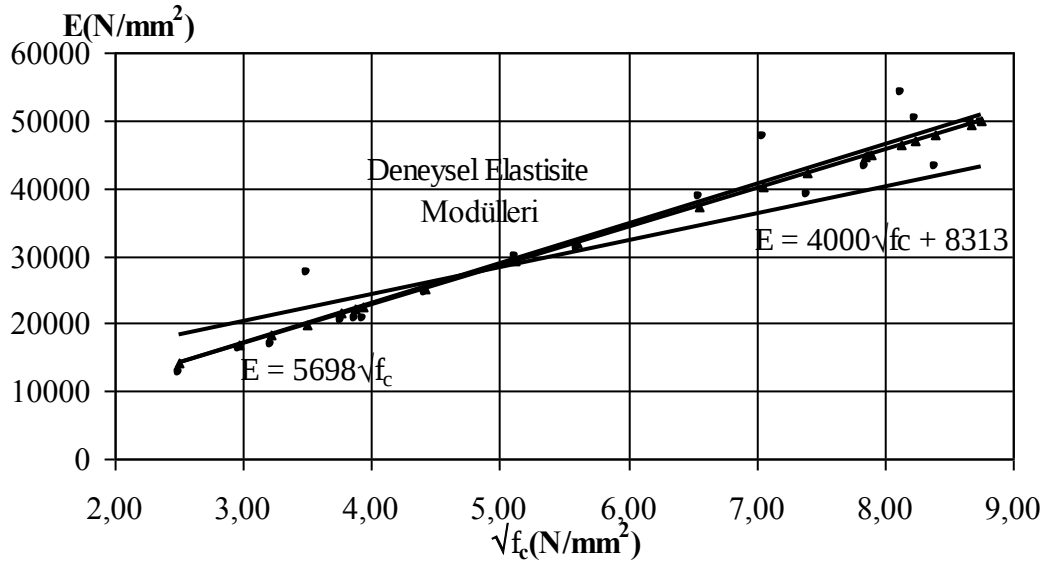
Şekil 4.20 Statik Elastisite Modülü Bağıntıları ile Bulunan Elastisite Modülleri ile Deneysel Elastisite Modüllerinin Basınç Dayanımlarına Göre Karşılaştırılması

Şekil 4.21’de ACI da verilen ve 1.bölümde (1.26) bağıntısıyla gösterilen statik elastisite modülünün, (1.24) ve (1.25) bağıntılarında yerine konulmasıyla dinamik elastisite modülü bağıntıları bulunmuştur. Bunlar (4.18) ve (4.19) bağıntılarında görülmektedir.

$$E_d = 5698\sqrt{f_c} \quad (4.18)$$

$$E_d = 4000\sqrt{f_c} + 8313 \quad (4.19)$$

Hesaplanan dinamik elastisite modülü değerleri Şekil 4.21’de gerçek elastisite modülü değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.21’deki grafikte anlaşılabacağı gibi deneysel elastisite modülü değerleriyle dinamik elastisite değerleri birbirine çok yakındır.

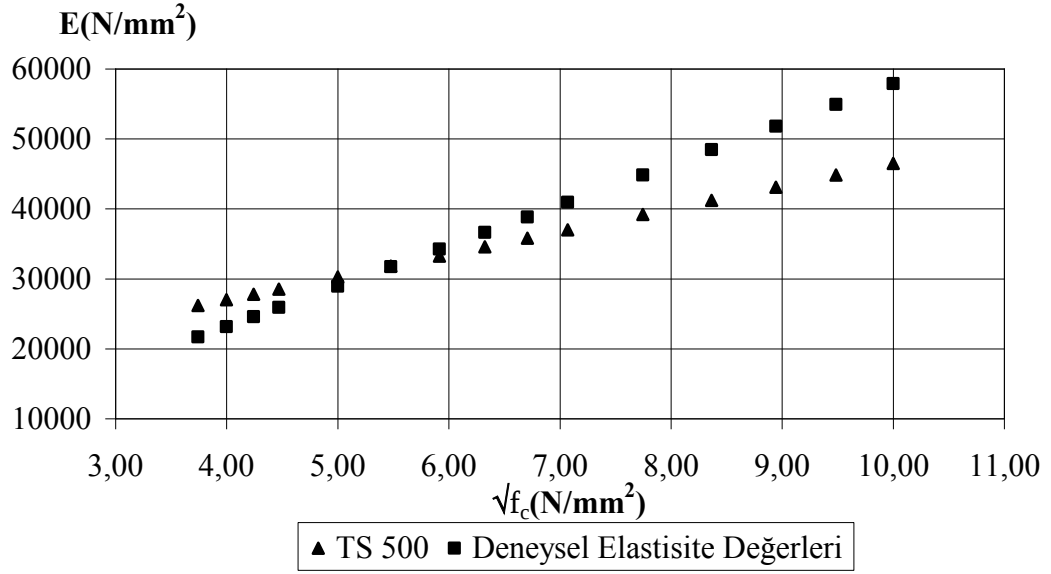


Şekil 4.21 Dinamik Elastisite Modülü Bağıntıları ile Bulunan Elastisite Modülleri ile Deneysel Elastisite Modüllerinin Basınç Dayanımlarına Göre Karşılaştırılması

Şekil 4.22, TS 500 de verilen elastisite modülü bağıntısında [16] ve gerçek elastisite modülü değerleri yardımıyla bulunan (4.16) bağıntısında TS 11222 de verilen standart beton basınç dayanımlarının [43] yerine konulmasıyla bulunmuştur.

Şekil 4.22’deki grafikte görüldüğü gibi iki formülün verdiği elastisite modülü değerleri arasında farklılıklar gözükmemektedir. Özellikle basınç dayanımının 40 N/mm²’nin üstündeki değerlerinde iki formül arasında büyük farklılıklar vardır.

Ayrıca 20 N/mm^2 den basınç dayanımı daha düşük olan betonlarda da bu farklılık açıkça gözükmemektedir



Şekil 4.22 TS 500’de Verilen Elastisite Modülü Bağıntısıyla ve Gerçek Elastisite Modülü Değerleri Yardımıyla Bulunan Bağıntının TS 11222 de Verilen Standart Beton Basınç Dayanımlarına Göre Karşılaştırılması

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışma sınırları içerisinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

5.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Betonun birim ağırlığı arttıkça buna bağlı olarak basınç dayanımında artmaktadır. Birim ağırlık ile silindir basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı $R=0.80$ olan

$$f_{cs} = 1,4 \times 10^{-11} e^{0,0118A} \quad (5.1)$$

ve küp basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı $R=0,84$ olan

$$f_{ck} = 3,8 \times 10^{-11} e^{0,0115A} \quad (5.2)$$

ilişkileri bulunmuştur.

5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Basınç dayanımları yaklaşık 6 N/mm^2 ile 80 N/mm^2 olan betonlar için;

Betonlarda su/çimento oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Yapılan çalışmalarda su/çimento oranı ile silindir basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı $R=0,97$ olan (5.3) ilişkisi vardır.

$$f_{cs} = 15,288 \left(\frac{C}{W} \right)^{1,3697} \quad (5.3)$$

Yine aynı şekilde su/çimento oranı ile küp basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı R=0,98 olan

$$f_{ck} = 18,933 \left(\frac{C}{W} \right)^{1,2859} \quad (5.4)$$

ilişkisi vardır.

Silindir basınç dayanımı ile küp basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı R=0,99 olan

$$f_{cs} = 0,8898 f_{ck} \quad (5.5)$$

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

Tablo 5.1 Beton Sınıflarına Karşı Gelen Silindir ve Küp Basınç Dayanımları

	Silindir Basınç Dayanımı	Bağıntı ile Bulunan Küp Basınç Dayanımı
Beton Sınıfı	f_{cs} (N/mm ²)	f_{ck} (N/mm ²)
C14	14	15,7
C16	16	18,0
C18	18	20,2
C20	20	22,5
C25	25	28,1
C30	30	33,7
C35	35	39,3
C40	40	45,0
C45	45	50,6
C50	50	56,2
C55	55	61,8
C60	60	67,4
C70	70	78,7
C80	80	89,9
C90	90	101,1
C100	100	112,4

Çalışmada su/çimento oranı azaldıkça elastisite modülü artmaktadır. Su/çimento oranı ile elastisite modülü arasında korelasyon katsayısı R=0,94 olan

$$E = 23670 - 21327 \ln\left(\frac{W}{C}\right) \quad (5.6)$$

ilişkisi bulunmuştur.

Çalışmada ultrases hızı arttıkça basınç dayanımı da artmaktadır. Ultrases hızı ile silindir basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı R=0.98 olan

$$f_{cs} = 0,0701e^{1,3061V} \quad (5.7)$$

ve ultrases hızı ile küp basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı R=0.98 olan

$$f_{ck} = 0,0546e^{1,3196V} \quad (5.8)$$

ilişkileri bulunmuştur.

Ayrıca ultrases hızı ile elastisite modülü arasında

$$E = 5704,6e^{0,0779V^2} \quad (5.9)$$

ilişkisi bulunmuştur.

Silindir basınç dayanımı ile Feret Formülündeki $\left(\frac{c}{c+e+h}\right)^2$ ifadesi arasında korelasyon katsayısı R=0,96 olan;

$$f_c = 299,44\left(\frac{c}{c+e+h}\right)^2 \quad (5.10)$$

ilişkisi bulunmuştur.

Küp basınç dayanımı ile Feret Formülündeki $\left(\frac{c}{c+e+h}\right)^2$ ifadesi arasında korelasyon katsayısı $R=0,97$ olan;

$$f_c = 336,6 \left(\frac{c}{c+e+h} \right)^2 \quad (5.11)$$

ilişkisi bulunmuştur.

Silindir basınç dayanımı ile Bolomey Formülündeki $\left(\frac{C}{E+h} - k'\right)$ ifadesi arasında korelasyon katsayısı $R=0,96$ olan;

$$f_c = 26,085 \left(\frac{C}{E+h} - k' \right) \quad (5.12)$$

ilişkisi bulunmuştur.

Küp basınç dayanımı ile Bolomey Formülündeki $\left(\frac{C}{E+h} - k'\right)$ ifadesi arasında korelasyon katsayısı $R=0,97$ olan;

$$f_c = 29,342 \left(\frac{C}{E+h} - k' \right) \quad (5.13)$$

ilişkisi bulunmuştur.

Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı $R=0,96$ olan

$$E = 5789,9 \sqrt{f_c} \quad (5.14)$$

şeklinde bir ilişki çıkmaktadır.

Bu formül ACI'da verilen $E_d = 5698 \sqrt{f_c}$ bağıntısı ile çakışmaktadır. Buna göre TS 500'de verilen $E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{ckj}} + 14000$ bağıntısı bulunan bu bağıntı ile 25

ile 35 N/mm² arası basınç dayanımları için çakışmakta ancak daha düşük ve yüksek basınç dayanımlarında hatalı sonuçlar vermektedir.

5.3. Öneriler

Daha ileri çalışmalarda;

- Bu çalışmada kullanılan agrega cinslerinden farklı cins agregalar ve farklı granülometri eğrileri,
 - Farklı fabrikalarda üretilmiş olan katkılı ve katkısız çimentolar,
 - Farklı tipte ve dozajda katkıları,
 - Türkiye’de kullanımı artmış olan uçucu kül,
 - Bu çalışmada kullanılan su/çimento oranlarından farklı oranlar ve çimento miktarlarından farklı miktarlar,
- kullanılarak çalışmada araştırılan konularla ilgili daha detaylı bilgi edinilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akman, M.S.**, 1990. *Yapı Malzemeleri*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul
- [2] **Postacioğlu, B.**, 1987. Beton Cilt 2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul
- [3] **Akman, M.S.**, 1997-1998. İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Dersi Yaz Yarıyılı Ders Notları, İstanbul
- [4] **Postacioğlu, B.**, 1969. *Yapı Malzemesi Dersleri*, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul
- [5] **Neville, A. M.**, 1996. *Properties of Concrete*, J. Wiley, New York
- [6] **Zain, M.F.M., Safuddin, Md., Mahmud, H.**, 2000. Development of High Performance Concrete Using Silica Fume At Relatively High Water-Binder Ratios, *Cement and Concrete Research*, Vol.30 No.9
- [7] **Yıldırım, H.**, 1995, Agrega Konsantrasyonunun Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [8] **TS 802**, 1985. Beton Karışım Hesapları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [9] **Kocataşkın, F.**, 1965. Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyorsunuz?, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul
- [10] **Postacioğlu, B.**, 1981. Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri Cilt 1, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul
- [11] **Kocataşkın, F.**, 1976. Yapı Mühendislerine Malzeme Bilimi, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul
- [12] **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
- [13] **Nagy, A.**, 1997. Determination of E-Modulus of Young Concrete with Nondestructive Method, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.9 No.1

- [14] **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
- [15] **Huo, X. S., Al-Omaishi, N., Tadros, M.K.,** 2001. Creep, Shrinkage and Modulus of Elasticity of High-Performance Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.98 No.6
- [16] **TS 500,** 1984. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [17] **ACI 318-95,** Building Code Requirements of Structural Concrete, 1996, Use of Concrete in Buildings-Design, Specifications and Related Topics, ACI Manual of Concrete Practice Part 3, Detroit, Michigan
- [18] **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
- [19] **Lydon, F.D., Balendran, R.V.,** 1986, Some Observations on Elastic Properties of Plain Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.16 No.3
- [20] The British Code For Design of Concrete Structures CP:110, 1972
- [21] **Popovics, S.,** 1975, Verification of Relationships Between Mechanical Properties of Concrete Like Materials, *Materials and Structures*, 8 No.45
- [22] **Lydon, F.D., Iacouou, M.,** 1995. Some Factors Affecting The Dynamic Modulus of Elasticity of High Strength Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.25 No.6
- [23] **Li, G., Zhao, Y., Pang, S., Li, Y.,** 1999. Effective Young's Modulus Estimation of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.29 No.9
- [24] **Qixian, L., Bungey, J.H.,** 1996. Using Compression Wave Ultrasonic Transducers to Measure The Velocity of Surface Waves and Hence Determine Dynamic Modulus of Elasticity for Concrete, *Construction and Building*, Vol.10 No.4
- [25] **Postacioğlu, B.,** 1966. Yapı Malzemesi Esasları Cilt 1, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul
- [26] **Komlos, K., Popovics, S., Nürnbergerova, T., Babal, B., Popovics, J.S.,** 1996. Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards, *Cement and Concrete Composites*, 18, 357-364

- [27] **Qasrawi, H.Y.**, 2000. Concrete Strength by Combined Nondestructive Methods Simply and Reliably Predicted, *Cement and Concrete Research*, Vol.30 No.5
- [28] **Uyan, M., Özkul, H.**, 1985, Beton Katkı Maddeleri ve Türkiye’de Durumu, *Üçüncü Mühendislik Haftası Bildirileri*, Akdeniz Üniversitesi Isparta Müh.Fak.
- [29] **Postacıoğlu, B.**, 1980. **Beton Cilt 1**, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul
- [30] **Pailier, A.M., Bassat, M.B., Akman, S.**, 1992, Guide for Use of Admixtures in Concrete, *Materials and Structures*, Vol.25
- [31] **ACI Committee 212**, 1986, Admixtures for Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1
- [32] **TS 3452**, 1988. Beton Kimyasal Katkı Maddeleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [33] **Sural, H.**, 2001. Melas Esaslı Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [34] **Ramachandran, V.S.**, 1995. Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publications, New Jersey
- [35] **Uyan, M., Yıldırım, H., Süvari, Y.**, 1996. Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkinliği, *Dördüncü Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü. İstanbul
- [36] **Safwan, A.K., Mohamed, N.A.**, 1994. Characteristics of Silica-Fume Concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.6 No.3
- [37] **Taşdemir, C., Akyüz, S., Taşdemir, M.A.**, 1994, Silis Dumanı İçeren Yüksek Mukavemetli Betonların Basınç Altındaki Davranışı, *Üçüncü Ulusal Beton Kongresi*, İ.T.Ü., İstanbul
- [38] **Langan, B.W., Weng, K., Ward, M.A.**, 2002. Effect of Silica Fume and Fly Ash on Heat of Hydration of Portland Cement, *Cement and Concrete Research*, 32 , 1-7
- [39] **Özyurt, N.**, 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [40] **TS 3530**, 1980. Beton Agregalarının Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara

- [41] TS 3526, 1980. Beton Agregalarında Özgöl Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [42] TS 3529, 1980. Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [43] TS 11222, 2001, Beton-Hazır Beton-Sınıflandırma, Özellikler, Performans, Üretim ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [44] TS 2871, 1977, Taze Beton Kıvam Deneyi (Çökme Hunisi Metodu İle), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Ankara’da doğan Enver Burak TÜRKEK, ilk,orta ve lise öğrenimini Ankara Özel Yükseliş Koleji’nde tamamladı. 1996 yılında başladığı İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2000 yılında mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı.