

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ \*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

33760

AGREGA PETROGRAFIK YAPISININ BETONUN DAYANIM  
VE AKIŞKANLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

İnş.Müh. Selim PUL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"İnşaat Yüksek Mühendisi"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.01.1994

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 28.01.1994

Tezin Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet DURMUŞ

Jüri Üyesi : Prof.Dr. Ragıp ERDÖL

Jüri Üyesi : Prof.Dr. İlhan SUNGUR

Enstitü Müdürü : Prof.Dr. Temel SAVAŞKAN

Ocak-1994

TRABZON

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU**  
**AKADEMİK DEĞERLENDİRME VE YETİŞTİRME MERKEZİ**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Agrega petrografik yapısının betonun dayanım ve akışkanlığı üzerindeki etkileri konusunda bu değerli çalışmayı bana önererek, diğer önemli görevlerine rağmen, çalışmamı başlangıcından sonuna kadar sürekli takip edip destekleyen, böylece araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılama için uğraşan, geniş bilgi ve tecrübelerinden daima yararlandığım yönetici hocam, Sayın Prof.Dr. Ahmet DURMUŞ'a şükran ve saygılarımı sunmayı çok zevkli bir görev sayarım.

Öğrenim hayatım boyunca ve özellikle üniversite yıllarında bana emeği geçen tüm hocalarıma da bu fırsatla teşekkür eder, kendilerine minnettar olduğumu belirtirim.

Çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm laboratuvar arkadaşlarıma, özellikle Sayın Arş.Gör. Metin HÜSEM'e, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Sayın Arş.Gör. Hasan KOLAYLI'ya, Akışkanlık Deney Aletinin imalatını gerçekleştiren Sayın Tekn. Öğr. İlyas KOLAYLI ve Sayın Tekn. Öğr. Orhan KOÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında ortaya çıkan teknik aksamaları çabucak düzelterek deneysel programın sağlıklı olarak yürütmesini sağlayan teknisyen Sayın Hâyrî ÇAKIR'a çok teşekkür ederim.

Çalışmamı büyük fedakarlık göstererek özenle daktilo eden ve çok sayıda bilimsel çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen Sayın Araştırma Teknisyeni Temel TOSUN'a teşekkür ederim.

Okul hayatım boyunca beni sabırla destekleyen ailemin tüm fertlerine, özellikle anne ve babama müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize yararlı olmasını gönülden dilerim.

Trabzon, Ocak 1994

Selim PUL

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	II
SEMBOLLER	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
ÇİZELGELER LİSTESİ	IX
TANIMLAR LİSTESİ	X
ÖZET	XI
SUMMARY	XII
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. AGREGA PETROGRAFIK YAPISININ BETONUN KIRILMA MEKANİZMALARINA ETKİSİ KONUSUNDA DAHA ÖNCE GERÇEKLEŞTİRİLEN BAZI ÇALIŞMALAR	3
2.1 Giriş	3
2.2 Betonun Yapısı ve Davranışı	3
2.3 Betonun Merkezi Çekme Altında Kırılma Mekanizması	5
2.3.1 Betonun Merkezi Çekme Dayanımı	5
2.3.1.1 Yapılan Kabuller	5
2.3.1.2 Merkezi Çekme Dayanımının İfadesi	6
2.3.2.1 $f_{ct1}$ , $f_{ct2}$ , ve $f'_{ct2}$ nün beton bileşimine bağlı ifadeleri	8
2.3.2.1.1 $f_{ct}$ nin ifadesi	9
2.3.2.1.2 $f_{adt}$ nin ifadesi	9
2.3.2.1.3 $\sigma_a/\sigma_c$ nin ifadesi	10
2.3.2.1.4 $s_a/s$ nin ifadesi	11
2.3.2.1.5 $s_c/s$ nin ifadesi	12
2.3.3 Grafik Gösterilim	12
2.3.3.1 $a$ ve $v$ nin Sabit Hallerine Karşılık Gelen Eğriler	13
2.3.3.2 $e$ ve $v$ nin sabit Hallerine Karşılık Gelen Eğriler	14
2.3.3.3 $c$ ve $v$ nin Sabit Hallerine Karşılık Gelen Eğriler	17
2.4. Betonun Merkezi Basınç Altında Kırılma Mekanizması	18
2.4.1 Betonun Merkezi Basınç Dayanımı	18

2.4.2 Kırılma Mekanizması	21
2.4.3 Merkezi Basınç Dayanımının İfadesi	24
2.4.3.1 $f_{c1}$ , $f_{c2}$ ve $f'_{c2}$ nün beton bileşimine bağlı ifadeleri	30
2.4.3.1.1 $v_c$ nin ifadesi	30
2.4.3.1.2 $E_c/E'_c$ nin ifadesi	31
2.4.4 Grafik Gösterilim	32
2.5 Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki Bağlılıklar, Basınç Dayanımının Yaklaşıklık ve Harçtan Betona Geçiş	35
2.5.1 Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki Bağlılıklar	35
2.5.2 Beton Basınç Dayanımının Yaklaşıklık	35
2.5.3 Harçtan Betona Geçiş	36
<b>BÖLÜM 3. AGREGA PETROGRAFIK YAPISININ BETONUN DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ</b>	<b>38</b>
3.1 Giriş	38
3.2 Deney Yöntemi	38
3.3 Agregaların Temini ve Petrografik Yapıları	39
3.4 Agregaların Granülometrik Bileşimi	46
3.5 Kullanılan Çimento	47
3.6 Deney Numuneleri ve Üretimleri	48
3.6.1 Farklı Hava İçeriğine Sahip Numunelerin Ayıklanması	50
3.7 Numunelerin Muhafaza Koşulları ve Deney Anındaki Yaşları	51
3.8 Deneylerin Yapılması ve Kullanılan Aletler	51
3.9 Sabit Çimento Konsantrasyonuna (c, e ve v sabit) Sahip Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler	54
3.10 Değişken Çimento Konsantrasyonuna Sahip Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler	55
3.10.1 Değişken Su Miktarıyla Deneyler (c ve v sabit)	57
3.10.2 Değişken Çimento Miktarıyla Deneyler (e ve v sabit)	57
<b>BÖLÜM 4. AGREGA PETROGRAFIK YAPISININ BETONUN AKIŞKANLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ</b>	<b>71</b>
4.1 Giriş	71
4.2 Deney Yöntemi	71
4.3 Kullanılan Agregalar ve Granülometrik Bileşim	72
4.4 Kullanılan Çimento	73
4.5 Deney Aleti	73



4.5.1 Deney Aletinin Çalışma Prensibi ve Deneylerin Yapılması	74
4.6 Değişken E/C Oranına Sahip Betonlar Üzerinde Deneyler	77
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	83
EK 1. MERKEZİ BASINÇTA BETONUN KIRILMASI ESNASINDA ADERANS BÖLGESİNE UYGULANAN ÇEKME GERİLMESİ	85
ÖZGEÇMİŞ	86



## SEMBOLLER

- A : Numune kesit alanı, Abrams bağıntısında bir katsayı  
a : Agregası, beton ya da harçta hacimce agregası miktarı  
B : Abrams bağıntısında bir katsayı  
b : Çimento türüne bağılı bir katsayı  
C : Beton ya da harçta kütlece çimento miktarı  
c : Beton ya da harçta hacimce çimento miktarı  
E : Beton ya da harçta kütlece su miktarı, Elastisite modülü  
e : Beton ya da harçta hacimce su miktarı  
E<sub>a</sub> : Betonun kırılması anında agregası sekant modülü  
E'<sub>a</sub> :  $v_a \epsilon_a$  şekildeğıştirmesine karşılık gelen agregası sekant modülü  
E<sub>c</sub> : Betonun kırılması anında çimento hamuru sekant modülü  
E'<sub>c</sub> :  $v_c \epsilon_c$  şekildeğıştirmesine karşılık gelen çimento hamuru sekant modülü  
E<sub>co</sub> : Betonun başlangıç elastisite modülü  
f<sub>at</sub> : Agregası çekme dayanımı  
f<sub>adt</sub> : Aderans çekme dayanımı  
f<sub>c</sub> : Beton basınç dayanımı  
f<sub>c1</sub> : Birinci şekil kırılmada beton basınç dayanımı  
f<sub>c2</sub> : İkinci şekil kırılmada beton basınç dayanımı  
f'<sub>c2</sub> : Betonun kırılmasına agregası dayanım düşüklüğünün neden olması halinde basınç dayanımı  
f<sub>ct</sub> : Beton çekme dayanımı, Çimento hamuru çekme dayanımı  
f<sub>ct1</sub> : Birinci şekil kırılmada beton çekme dayanımı  
f<sub>ct2</sub> : İkinci şekil kırılmada beton çekme dayanımı  
f'<sub>ct2</sub> : Betonun kırılmasına agregası dayanım düşüklüğünün neden olması halinde çekme dayanımı  
f<sub>ct3</sub> : En genel bir cisim için önce bağılayıcının kırılma olmaması halinde aderans sökülmesine bağılı olarak çekme dayanımı  
f'<sub>ct3</sub> : En genel bir cisim için önce bağılayıcının kırılma olmaması halinde tanelerin kırılmasına bağılı olarak çekme dayanımı  
f<sub>ct4</sub> : En genel bir cisim için bağılayıcı kırılmasının tüm cismin kırılmasına neden olması halinde çekme dayanımı  
K : Agregası granülometrisine bağılı bir katsayı  
K<sub>B</sub> : Bolomey bağıntısında bir katsayı  
K<sub>F</sub> : Feret bağıntısında bir katsayı  
K<sub>G</sub> : Graf bağıntısında bir katsayı  
k : Çimento ve agregası yapısına bağılı bir katsayı, Kompaşite

- $m$  : Agregada granülometrisine bağlı bir katsayı  
 $N$  : Merkezi çekme kuvveti  
 $N_r$  : Kırılma yükü  
 $N_{r\omega}$  :  $\omega$  elemanının  $s$  alanına düşen kırılma yükü  
 $N_\omega$  :  $\omega$  kesit elemanında ortalama normal kuvvet  
 $r_c$  : Bolomey bağıntısında çimento hamuru basınç dayanımı  
 $s$  :  $\omega$  elemanı kesit alanı  
 $s_a$  :  $s$  alanında agreganın işgal ettiği alan  
 $s_c$  :  $s$  alanında sertleşmiş çimento hamurunun işgal ettiği alan  
 $s_v$  :  $s$  alanında hapsedilmiş havanın işgal ettiği alan  
 $t_{ad}$  : Katı elemanların yapısına bağlı olarak aderansla ilgili bir katsayı  
 $t_c$  : Çimento yapısına ve muhafaza koşullarına bağlı bir katsayı  
 $v$  : Beton ya da harçta hapsedilmiş hava miktarı  
 $\alpha_i$  : Zamanla artan bir fonksiyon  
 $\gamma$  : Çimento hamurundaki çimento miktarı (çimento konsantrasyonu)  
 $\gamma_0$  : Hidratasyon için ancak yeterli olan çimento konsantrasyonu  
 $\gamma_1$  : Aderans için ancak yeterli olan çimento konsantrasyonu  
 $\Delta$  : Numunenin birim kütlesi  
 $\delta$  : Numunenin teorik özgül kütlesi  
 $\epsilon$  : Birim şekildeğiştirme  
 $\epsilon_a$  : Agregada birim şekildeğiştirmesi  
 $\epsilon_c$  : Çimento hamuru birim şekildeğiştirmesi, betonda birim şekildeğiştirme  
 $\epsilon_{co}$  : Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekildeğiştirme  
 $\epsilon_{cu}$  : Maksimum birim şekildeğiştirme  
 $\epsilon_{oa}$  : Aderans olmaması halinde agregada enine birim şekildeğiştirmesi  
 $\epsilon_{1a}$  : Agregada ortalama birim şekildeğiştirmesi  
 $\epsilon_{1c}$  : Aderans olmaması halinde çimento hamuru birim şekildeğiştirmesi  
 $\epsilon_{oc}$  : Çimento hamuru enine birim şekildeğiştirmesi  
 $\mu$  : Sadece agregada şekline bağlı bir katsayı  
 $\nu_a$  : Agregada poisson oranı  
 $\nu_c$  : Çimento hamuru poisson oranı  
 $\sigma$  : Normal gerilme  
 $\sigma_a$  : Agregada çekme gerilmesi  
 $\sigma_{adt}$  : Aderans bölgesinde çekme gerilmesi  
 $\sigma_c$  : Çimento hamurunda çekme gerilmesi, Beton basınç gerilmesi  
 $\sigma_{ct}$  : Betonda ortalama çekme gerilmesi  
 $1-e_1$  : Salt çimento hamuru için çimento konsantrasyonu

NOT: Bu listede verilmeyen bazı semboller metin içinde ilgili oldukları yerlerde açıklanmaktadır.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sekil 1.	a ve v sabit halleri için teorik çekme dayanımı eğrileri	13
2.	Aderansın zayıf ya da hiç olmaması durumunda e ve v nin sabit halleri için teorik çekme dayanımı eğrileri	15
3.	Aderansı yeterli olması durumunda e ve v nin sabit halleri için teorik çekme dayanımı eğrileri	15
4.	c ve v sabit halleri için teorik çekme dayanımı eğrileri	17
5.	Geleneksel betonun bir eksenli merkezi basınç altında gerilme-birim şekildeğiştirme diyagramı	19
6.	Normal kırılma şekilleri	21
7.	Merkezi basınçta aderans olmaması halinde agrega ve çimento hamuru şekildeğiştirmeleri	24
8.	Merkezi basınçta aderans olması halinde agrega ve çimento hamuru şekildeğiştirmeleri	25
9.	Merkezi basınçta bir beton numunenin ezilmesinden sonra agrega tanesinin durumu	28
10.	e ve v nin sabit halleri için teorik basınç dayanımı eğrileri	33
11.	Deneylerde kullanılan agregalar	41
12.	Granit'in ince kesiti	42
13.	Bozulmuş granitin ince kesiti	43
14.	Dasit'in ince kesiti	44
15.	Agregaların granülometrik bileşimi	46
16.	Deney numuneleri	48
17.	Otomatik karıştırıcı	49
18.	Sarsma tablası ve üçlü çelik kalıp	49
19.	Kür tankındaki numuneler	52
20.	Numunelerin eğilme deneyi	52
21.	Michaelis deney aleti	53
22.	Merkezi basınç deneyi ve yükleme çerçevesi	53
23.	Üniversal deney aleti	54
24.	Agregası mermerle değiştirilen numune dayanımlarındaki artış	56
25.	Agregasının bir kısmı mermerle değiştirilen numune dayanımlarındaki artış	59-62
26.	Taşunsuz numune dayanımları	64-66
27.	Eğilme etkisindeki numunelerde kırılma	68-70
28.	Agregaların granülometrik bileşimi	72
29.	Akışkanlık deney aleti	73
30.	Akışkanlık deney aletinin teknik resmi	75-76
31.	Akışkanlık deneylerinden elde edilen eğriler	78

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1. Gerçekleştirilen üretimlerin toplu olarak gösterilimi	40
2. Kullanılan agregalara ait bazı fiziksel özellikler	41
3. Kullanılan agregaların mineralojik bileşimleri	45
4. Kullanılan çimentonun özellikleri	47
5. Agregasının bir kısmı mermerle değiştirilen numune dayanımlarındaki artış	58
6. Taşunsuz numune dayanımları	63
7. Akışkanlık deney sonuçları	77



## TANIMLAR LİSTESİ

- BİRİNCİ ŞEKİL KIRILMA : Kırılmanın sadece sertleşmiş çimento hamuru dayanımına bağlı olduğu durumdur.
- İKİNCİ ŞEKİL KIRILMA : Kırılmanın sadece aderans dayanımına ya da sadece agrega dayanımına bağlı olduğu durumdur.
- ÇİMENTO KONSANTRASYONU : Çimento hamurundaki hacimce çimento oranıdır.
- PETROGRAFIK YAPI : Kayacı oluşturan minerallerin cinsleri, oranları, bozulma ve bağ durumlarıdır. Petrografik yapı yerine bazen mineralojik yapı da denmektedir.
- İNCE KESİT : Kayacın petrografik yapısının belirlenmesi amacıyla petrograf mikroskopunda incelenmek üzere lam üzerine yapıştırılan 0.002 mm kalınlığındaki kayaç kesitidir.
- POLARİZE IŞIK : İnce kesitteki minerallerin çok canlı renklerle görülüp rahatça ayırt edilebildiği ışık durumudur.
- GELENEKSEL BETON : Geleneksel agrega (hafif ve ağır olmayan) kullanılarak üretilen betondur.
- MİKROBETON : En büyük tane boyutu 4.0 mm 'yi geçmeyen agregalarla üretilen betondur. Bu beton bazen harç olarak da adlandırılmaktadır.
- TAŞUNU : 0.075 mm gözenek açıklıklı elekten geçen agrega sınıfıdır (0-0.075 mm).

## ÖZET

Betonun, dünyadaki mühendislik yapılarının hemen hepsinde çok yaygın bir şekilde kullanılageldiği ve özellikleri gereği mühendislere vazgeçilmez avantajlar sunan ilginç bir yapı malzemesi olduğu bilinmektedir. Ancak bu malzemenin tüm sırları, özellikle dış yükler altındaki gerçek davranışı, klasik elastisite teorisiyle bağdaşmayan heterojen yapısı nedeniyle halen tam olarak açıklanabilmiş değildir. Uzun yıllar süren araştırmaların ışığında belirlenen ve herkesçe kabul gören beton dayanımını etkileyen faktörler arasında genellikle agrega granülometrik bileşimi, tane şekli, yüzey temizliği, tane birim kütlesi, çimento dozajı, su/çimento oranı, çimento türü, üretim ve muhafaza koşulları, hapsedilmiş hava içeriği gibi etkenler bulunmaktadır. Feret'in çalışmaları esas alındığından, agrega petrografik yapısının betonun özellikleri üzerinde etkisinin olmadığı kabul edilmekteydi. Oysa, petrografik yapıyı belirlemek agrega tanelerinin yapısını ve bu tanelerin çimento hamuruyla aderanslarını da belirlemek anlamına geldiğinden, agrega petrografik yapısının betonun özellikleri üzerinde bir etkisinin olması gerektiği akla daha uygun gelmektedir. Bu nedenle bu çalışmada agrega petrografik yapısının beton dayanımı ve akışkanlığı üzerindeki etkisi teorik ve deneysel olarak incelenmektedir. Çalışma beş asıl ve bir ek bölüm olmak üzere toplam altı bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm çalışmayı ana hatlarıyla tanıtan giriş bölümü olup ikinci bölümde, agrega petrografik yapısının betonun kırılma mekanizmaları üzerindeki etkisi teorik olarak incelenmekte ve betonda iki şekil kırılmanın varlığı ortaya konmaktadır. Üçüncü bölümde, bu konuda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmektedir. Dördüncü bölümde, agrega petrografik yapısının betonun akışkanlığı üzerindeki etkisi geliştirilen bir deney aleti yardımıyla incelenmekte ve bu incelemeden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Çalışmanın bütününden çıkarılan sonuçlar ve öneriler ise beşinci bölümde özetlenmekte, bu son bölümü yararlanılan kaynaklar listesiyle "Merkezi basınçta betonun kırılması esnasında aderans bölgesine uygulanan çekme gerilmesi"ne ilişkin bir ek bölüm izlemektedir.

## SUMMARY

It is well known that concrete has commonly been used as a construction material almost all over the world. Due to its properties, concrete is an interesting material which offers invaluable advantages to the engineers. However, all of the mysteries of this material have not been understood yet, especially its real behavior under the external forces, as it is a heterogen material which cannot be explained by the classical elasticity theory. Amongst the factors accepted to be effective on the strength of the concrete by the researchers working in this field are size gradation, shape, texture, cleanliness and unit weight of the aggregate, cement content, water to cement ratio, cement type, producing and curing conditions, and air content.

Based on the studies carried out by Feret, it was assumed that the petrographic nature of the aggregate does not have any effect on the characteristics of the concrete. Whereas, it could be more logical to consider that the petrographic nature of the aggregate could effect the properties of the concrete as it determines the adherence between the aggregate and the cement paste. In this regard, in this study, the effect of the petrographic nature of the aggregate on the strength and consistency of the concrete is theoretically and experimentally investigated.

This study consists of five main chapters and one supplementary section. The first chapter introduces roughly the work done. In the second chapter, the effect of the petrographic nature of the aggregate on the fracture mechanisms of the concrete is explained theoretically and the existence of the two types of fracture is elaborated. In the third chapter, experimental work is detailed and the results associated with are given. In the fourth chapter, the effect of the petrographic nature of the aggregate on the consistency of the concrete is investigated. The results obtained from the study in general and the recommendations are summarized in the fifth chapter. This chapter is followed by a supplementary section which contains a list of references together with an explanation on "Tensile stresses existed in the adherence region during the fracture of the concrete under simple compression".



## BÖLÜM 1

### G İ R İ Ş

Geleneksel beton, sertleşmiş çimento hamuruyla sarılmış çeyitli boyutlardaki kayaç parçalarından (agregalar) meydana gelen ve kullanımı son derecede yaygın olan yapay bir yapı malzemesidir. Bununla beraber bugün de betonun tüm sırlarının, özellikle dış yükler etkisi altında kırılma mekanizmalarının, tam olarak bilindiği söylenemez. Teknik literatürde beton dayanımı üzerinde etkisi olduğu bilinen agrega özellikleri (granülometrik bileşimi, tane şekli, yüzey pürüzlülüğü, yüzey temizliği, tane birim kütlesi, dayanımı, çimentodaki alkali maddelerle reaksiyonları, kemirici etkilere dayanıklılığı, vb.) arasında petrografik (mineralojik) yapısı bulunmamaktadır.

Feret (1) 'in 1890'lı yıllarda başlayıp 20. yüzyılın ilk çeyreğine kadar sürdürdüğü ve doğal olarak o günlerin bilim ve teknoloji koşullarına bağlı olan çalışmalarından agrega petrografik yapısının beton dayanımı üzerinde hiçbir etkisi olmadığı yolunda, ünlü araştırmacılar tarafından da tam kabul gören, bir sonuca varılmıştır.

Daha sonra, 1967 yılından itibaren bazı araştırmacılar Feret'in aksine agrega petrografik yapısının betonun özellikleri üzerinde etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir. Ancak, bu çalışmalardan ortak bir sonuç elde edilemediğinden araştırmacılar genellikle betonun özelliklerini yine agrega petrografik yapısından bağımsız olarak incelemeye devam etmişlerdir.

Oysa, petrografik yapıyı belirlemek, agrega tanelerinin yapısını ve bu tanelerin çimento hamuruyla aderanslarını da belirlemek anlamına geldiğinden, agrega petrografik yapısının betonun özellikleri üzerinde bir etkisinin olması gerektiği akla daha uygun gelmektedir.

Bu nedenle bu çalışmada agrega petrografik yapısının betonun dayanımı ve akışkanlığı üzerindeki etkisi, bu konuda hemen hiçbir Türkçe kaynak bulunamadığından sınırlı sayıda yabancı teknik literatürün ışığında, teorik ve deneysel olarak incelenmektedir.

Çalışma, beş asıl ve bir ek bölüm olmak üzere toplam altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümü olup, ikinci bölümde betonun yapısı ve davranışı, merkezi çekme ve merkezi basınç altında kırılma mekanizmaları üzerinde durularak bunlara ilişkin dayanım ifadeleri, grafik

incelemeleriyle birlikte, verilmekte ve betonda iki şekil kırılmanın varlığı ortaya konmaktadır. Betonun çekme ve basınç dayanımı arasındaki bağıntılar, basınç dayanımının yaklaşıklığı ve harçtan betona geçiş ifadeleri de bu bölümde verilmektedir.

Üçüncü bölümde, agrega petrografik yapısının beton dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi için uygulanan deney yöntemi, kullanılan agregaların temini, petrografik yapıları, granülometrik bileşimleri, numunelerin üretim ve muhafaza koşulları, farklı hava içeriğine sahip numunelerin ayıklanması ve deneylerde kullanılan aletler hakkında bilgiler, sadece agrega petrografik yapıları bakımından birbirinden farklı, sabit ve değişken çimento konsantrasyonuna sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilen eğilme ve merkezi basınç deneyleri ile bu deneylerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Dördüncü bölüm, agrega petrografik yapısının betonun akışkanlığı üzerindeki etkisinin incelenmesine ayrılmıştır. Burada uygulanan deney yöntemi, kullanılan agregalar, granülometrik bileşimleri, deney aleti ve çalışma prensibi açıklanarak sadece agrega petrografik yapıları ve E/C oranları farklı betonlar üzerinde gerçekleştirilen akışkanlık deneyleri ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar üzerinde durulmaktadır.

Beşinci bölüm bu araştırmadan çıkarılabilecek sonuç ve önerileri kapsamakta olup, bu son bölümü yararlanan kaynaklar listesiyle, "Merkezi basınçta betonun kırılması esnasında aderans bölgesine uygulanan çekme gerilmesi"ne ilişkin bir ek bölüm izlemektedir.

## BÖLÜM 2

### AGREGA PETROGRAFIK YAPISININ BETONUN KIRILMA MEKANİZMALARINA ETKİSİ KONUSUNDA DAHA ÖNCE GERÇEKLEŞTİRİLEN BAZI ÇALIŞMALAR

#### 2.1 Giriş

Oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan betonun irili ufaklı kayac parçalarından meydana gelen agregası, çimento ve suyun önceden belirlenmiş oranlarda karıştırılmasından elde edilen, kullanımı giderek daha da yaygınlaşan kompozit bir yapı malzemesi olduğu bilinmektedir. Kullanımının yaygınlaşması, çimentonun katılaşmasından önce taze betonun kalıplara rahatça yerleştirilip belirli bir süre sonra istenen biçimi alabilecek şekilde plastik kıvamlı oluşu, ekonomikliği, yeni uygulamalara açık oluşu ve beton teknolojisinin ilerlemesinden ileri gelmektedir.

Katılaşmış ve zamanla amaçlanan dayanımını kazanmış olan betonun tüm özelliklerinin bileşiminde kullanılan malzemelerin özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğunu düşünmek akla uygun gelmektedir. Oysa yakın zamana kadar bunun tamamen böyle olmadığı düşüncesi hakimdi. Bunun başlıca nedeni, eskiden olduğu gibi bugün de betonun dış kuvvetler altında kırılma mekanizmasının iyi bilinmeyişiştir. Zira homojen yapıya sahip katı cisimler için geliştirilmiş olan elastisite teorilerinin betona uygulanması, betonda gözlenen olaylara bugüne kadar kesin bir açıklama getirememiştir. Bunun nedeni ise homojen, izotrop ve sürekli malzemeler için geçerli olan bu teorilerin sürekli bir ortam olmayan, heterojen ve anizotrop yapıya sahip betona uygulanmış olmasıdır.

Bu bölümde betonun gerçek yapısına bağlı kırılma mekanizmaları üzerinde durulmaktadır.

#### 2.2 Betonun Yapısı ve Davranışı

Betonun bir taraftan agregası, diğer taraftan sertleşmiş çimento hamuru olmak üzere iki fazlı heterojen bir malzeme olarak dikkate alınması basitleştirici bir kabuldür. Zira, çimento hamuru genel olarak jel

özelliğinde olup, çok ince boyutlu çimento tanelerinin suyla hidratasyonu sonucu oluşan amorf yapısı nedeniyle kendi içinde heterojen olduğu gibi, agrega da kendi fazı içinde son derece heterojen bir yapıya sahiptir.

Bir teoriye göre (Viskoz akım teorisi) sertleşmiş çimento hamuru fazı yüksek viskoziteli bir sıvı olarak dikkate alınmaktadır. Bu teoriyi, sertleşmiş çimento hamurunda sabit gerilme altında, doğal taşlardakinden çok ileri düzeyde, sünme adı verilen şekildeğıştirmelerin zamanla devam etmesi olayı desteklemektedir. Diğer bir deyişle, sertleşmiş çimento hamurunu viskoz bir cisim olarak dikkate almak mümkün gözükmektedir.

Çimentonun suyla yaptığı kimyasal reaksiyonların (hidratasyon) çok uzun süre devam etmesinin sonucu olarak betonun özellikleri, çevre koşullarına da bağlı olarak zamanla değişmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, heterojen bir yapıya sahip olan betonun sertleşmiş çimento hamuru fazında da rötire, sünme, şişme gibi şekildeğıştirmeler meydana geldiğinden, bu malzemenin dış kuvvetler altındaki davranışı klasik teorilerle açıklanamamaktadır. Gerçekten, beton üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar elastisite teorisiyle elde edilenlerle uyuşmamaktadır. Bu uyumsuzluğun farklı iki cisimden meydana gelen, bağlantıları (kenetlenmeleri) kendisini oluşturan cisimlerin yapısına, oranlarına, sertleşme süresine ve muhafaza koşullarına bağlı olan bu malzemenin, yukarıda belirtilmeye çalışılan, kendi özel yapısından ileri geldiği açıktır.

1967 yılına kadar Feret'in çalışmaları (1) temel alındığından, agrega petrografik ve mineralojik yapısının beton kırılma mekanizması üzerinde etkisi olmadığı kabul edilmekteydi. Bugün de genellikle beton dayanımına etki eden en önemli etkenlerin;

- Çimento türü
- Agrega granülometrik bileşimi
- Agrega tane şekli, yüzey pürüzlülüğü
- Agrega yüzey temizliği
- Agrega birim kütlesi
- Su/çimento oranı
- Üretim ve muhafaza koşulları
- Betonda hapsedilmiş hava oranı
- Sertleşme süresi

şeklinde olduğu bilinmektedir. Oysa agrega petrografik yapısının da bu etkenler arasında olması daha mantıklı gözükmektedir. Zira, agrega

petrografik yapısını belirlemek, beton içine yerleşmiş bulunan agrega taneleri ve bu tanelerin çimento hamuru ile olan bağlantılarının özelliklerini de belirlemek anlamına geldiğinden, bu düşünce haklılık kazanmaktadır.

### 2.3 Betonun Merkezi Çekme Altında Kırılma Mekanizması

#### 2.3.1 Betonun Merkezi Çekme Dayanımı

Betonarme hesaplarda beton çekme dayanımının genellikle sıfır olarak dikkate alındığı bilinmektedir. Bununla beraber betonun çekme etkisi altında davranışının bilinmesi de gerekli olmaktadır. Zira betonun çatlama-sı, uzama kapasitesinin aşılmasıyla meydana gelmektedir (2). Oysa, sırf betondan imal edilen pist ve yollar gibi yapılarda meydana gelen çekme gerilmelerinin beton tarafından emniyetle taşınması gerektiği gibi, rötre etkisinden dolayı çatlama olmaması için de betonun çekme dayanımının belirli bir değerin üstünde olması arzulanan bir durumdur.

Betonun merkezi çekme dayanımının deneysel olarak belirlenmesi bir takım zorluklar göstermektedir. Bu nedenle eğilme ya da yarmada çekme dayanımları belirlenerek merkezi çekme dayanımına bir takım amprik bağıntılarla dolaylı yoldan geçilmektedir (3).

##### 2.3.1.1 Yapılan Kabuller

Betonun merkezi çekme ve merkezi basınç altında kırılma mekanizmasının incelenmesi için yapılan kabuller aşağıda verilmektedir:

a) Beton heterojen ancak, yeterli derecede izotrop ve ilk yaklaşım olarak tam doğru olmamakla beraber çatlaksız bir malzemedir.

b) Gerilme altındaki davranışları için sadece ortalama gerilme ve şekildeğiştirmeler dikkate alınmaktadır.

c) Bu çalışmayı ilgilendiren kırılma anında  $E$  kırılmaya karşılık gelen sekant modülünü göstermek üzere, gerilmeler ( $\sigma$ ) şekildeğiştirmelere ( $\epsilon$ )  $\sigma = E\epsilon$  ifadesiyle bağlıdır. Betonun elasto-plastik bir cisim olmasına rağmen birinci yükleme için gerilmelerle şekildeğiştirmeler arasında birebir tekabül olduğundan, bu varsayım oldukça geçerli sayılabilir.

d) Kırılma sadece yükleme hızının yeterince büyük olduğu durumlar için incelenmektedir.

### 2.3.2 Merkezi Çekme Dayanımının İfadesi

Ortalama eksenî doğrusal ve bu eksene dik kesit alanı  $A$  olan bir beton ya da harç numune eksenî doğrultusunda  $N$  merkezi çekme kuvvetinin etkisinde ise,  $N_r$  kırılma yükünü göstermek üzere numunenin çekme dayanımını;

$$f_{ct} = \frac{N_r}{A} \quad (1)$$

bağıntısıyla hesaplandığı bilinmektedir. Bu oran bazı genelleştirilmiş kabuller içerdiğinden, gerçek kırılmanın meydana geldiği yüzeyden bağımsız olup, bu yüzeydeki her bir noktada oluşan farklı gerçek gerilmelerin ortalama bir değeri olarak kabul edilmektedir.

$\omega$ ,  $A$  numune kesit alanının  $s$  alanlı küçük bir elemanı olarak dikkate alınsın. Ancak, beton için bu elemanın boyutları istenildiği kadar küçük seçilmesi gerçekçi olmayacağından, bunun en büyük agrega tane boyutundan daha büyük olduğu kabul edilsin. Bu özellikteki elemanın alanı ( $s$ ),  $s_a$ ,  $s_c$ ,  $s_v$  sırasıyla agrega, sertleşmiş çimento hamuru ve hapsedilmiş hava boşluğu alanlarını göstermek üzere;

$$s = s_a + s_c + s_v \quad (2)$$

şeklinde ifade edilsin. Ayrıca bu dağılımın gerçek kırılma yüzeyinin numune kesit alanındaki ( $A$ ) izdüşümü için de geçerli olduğu kabul edilebilir.

Numunenin merkezi çekme etkisinde kırılması için genel bir varsayım olarak, hem karışımdaki çimento hamuru ve agrega oranlarına hem de aderans, çimento hamuru ve agrega çekme dayanımlarına bağlı olarak, iki durum söz konusu olabilir:

1) Aderans ya da agrega kırılması betonun kırılmasına neden olmamaktadır. Bu durumda betonun dayanımı sadece sertleşmiş çimento hamuru tarafından sağlanmaktadır.

$N_{r\omega}$ ,  $s$  alanına düşen kırılma yükünü ve  $f_{ct}$  çimento hamuru çekme dayanımını göstermek üzere,

$$N_{r\omega} = f_{ct} s_c \quad (3)$$

olarak ifade edilebilir. Bu durumda kırılma anında  $A$  numune kesitindeki ortalama gerilme, çimento hamuru çekme dayanımı cinsinden;

$$f_{ct1} = f_{ct} \frac{s_c}{s} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Bu tür kırılma, çekme dayanımı düşük ya da aderansı zayıf agrega içeren veya çok az oranda çekme dayanımı ve aderansı yüksek agrega içeren betonlardaki kırılmaya karşılık gelmektedir.

2) Aderans ya da agrega kırılması betonun kırılmasına neden olmaktadır. Bu durumda çimento hamuru kırılma anından hemen önce çatlamamış olduğundan dayanıma katkıda bulunmaktadır.

$\sigma_a$  ve  $\sigma_c$  sırasıyla agrega ve çimento hamuru tarafından taşınan ortalama normal gerilmeleri göstermek üzere  $\omega$  kesit elemanı içinde kırılma anına kadar ortalama normal kuvvet;

$$N_\omega = \sigma_a s_a + \sigma_c s_c \quad (5)$$

ve ortalama normal gerilme ise;

$$\sigma_{ct} = \frac{N_\omega}{s} = \sigma_a \frac{s_a}{s} + \sigma_c \frac{s_c}{s} \quad (6)$$

bağıntılarıyla ifade edilebilir. Bu son bağıntıya göre iki durum söz konusu olabilir:

a) Betonun kırılmasına aderans sökülmesi neden olmaktadır. Bu durumda  $f_{adt}$  aderans dayanımını göstermek üzere (6) bağıntısı kırılma anında;

$$f_{ct2} = f_{adt} \left( \frac{s_a}{s} + \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \frac{s_c}{s} \right) \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir.

b) Betonun kırılmasına agrega dayanım düşüklüğü neden olmaktadır.  $f_{at}$  agrega çekme dayanımını göstermek üzere (6) bağıntısı bu kez;

$$f_{ct2} = f_{at} \left( \frac{s_a}{s} + \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \frac{s_c}{s} \right) \quad (8)$$

şeklini almaktadır.



Ayrıca, bir bağlayıcı ile sarılmış çeşitli boyutlardaki tanelerden meydana gelen en genel bir cisim için kırılmanın önce bağlayıcı fazında olabileceği de düşünülebilir. Eğer bu tür bir kırılma tüm cismin kırılmasına neden olmuyorsa, bu heterojen cismin çekme dayanımı kırılmanın aderans sökülmesi ya da bağlayıcıyla sarılmış tanelerin kırılmasına bağlı olarak sırasıyla;

$$f_{ct3} = f_{adt} \frac{s_a}{s} \quad (9)$$

$$f'_{ct3} = f_{at} \frac{s_a}{s} \quad (10)$$

bağıntılarıyla belirlenebilir.

Bağlayıcı kırılmasının tüm cismin kırılmasına neden olması halinde ise cismin çekme dayanımı;

$$f_{ct4} = f_{ct} \left( \frac{s_c}{s} + \frac{\sigma_a}{\sigma_c} \frac{s_a}{s} \right) \quad (11)$$

şeklinde ifade edilebilir.

(9), (10) ve (11) bağıntıları, cismin içerdiği tanelerin şekil değiştirme kapasitelerinin bağlayıcıyıkinden daha büyük olması hali için geçerlidir. Dolayısıyla da geleneksel beton ya da harçlara uygulanamazlar. Diğer taraftan (9) ve (10) bağıntıları, iddiaların aksine, çekme dayanımının bağlayıcı içindeki tanelerin yapısından hiçbir zaman bağımsız olmayacağını, ancak bağlayıcı yapısından bağımsız olabileceğini göstermektedir.

#### 2.3.2.1 $f_{ct1}$ , $f_{ct2}$ ve $f'_{ct2}$ nün beton bileşimine bağlı ifadeleri

Bu başlık altında  $f_{ct}$ ,  $f_{adt}$ ,  $\frac{s_c}{s}$ ,  $\frac{s_a}{s}$  ve  $\frac{\sigma_a}{\sigma_c}$  nin betonun birer bileşiminin oranına ( $\gamma$ ) bağlı olarak ifade edilmeleri üzerinde durulmaktadır.



### 2.3.2.1.1 $f_{ct}$ nin ifadesi

Bağlayıcının çekme dayanımının, kendi fazı içinde bağlı katı bir yapı oluşmadığı sürece, sıfır olduğu bilinmektedir. Gerçekten çimento hamuru içinde  $c$ ,  $e$  ve  $v$  sırasıyla betonda hacimce çimento, su ve hapsedilmiş hava miktarlarını göstermek üzere;

$$\gamma = \frac{c}{c + e + v} \quad (12)$$

oranıyla tanımlanan çimento hamuru içindeki çimento oranının (çimento konsantrasyonu),  $\gamma_0$  gibi, çimento yapısına bağlı, belirli bir değerden küçük ya da eşit olması halinde durum böyle olmaktadır.  $\gamma > \gamma_0$  olması durumunda ise bağlayıcının çekme dayanımı, çimento konsantrasyonu ve zamana bağlı olarak artmaktadır.

Bu durumda sertleşmiş çimento hamuru çekme dayanımı ( $f_{ct}$ ),  $\alpha_1$  zamanla artan bir fonksiyonu ve  $t_c$  çimento yapısına ve muhafaza koşullarına bağlı bir katsayıyı göstermek üzere;

$$f_{ct} = \alpha_1 (\gamma - \gamma_0) t_c \quad (13)$$

olarak ifade edilebilir.

Burada çalışmanın takip eden kısmında, basitleştirmek amacıyla, betonda hapsedilmiş hava olmadığı kabulüyle ( $v=0$ )  $\gamma = c/c+e$  olarak dikkate alındığını belirtmek uygun olmaktadır.

### 2.3.2.1.2 $f_{adt}$ nin ifadesi

Aderans dayanımının da zamanla ve bağlayıcı içindeki çimento konsantrasyonu ile değiştiği düşünülebilir. Bu durumda  $\alpha_2$  yine zamanla artan bir fonksiyonu,  $\gamma_1$  çimento hamurunun bağlayıcı özellikte olabilmesi için ancak yeterli olan  $\gamma$  değerini,  $t_{ad}$  mevcut katı elemanların yapısına bağlı, aderansla ilgili bir katsayıyı göstermek üzere;

$$f_{adt} = \alpha_2 (\gamma - \gamma_1) t_{ad} \quad (14)$$

şeklinde ifade edilebilir.

### 2.3.2.1.3 $\sigma_a/\sigma_c$ nin ifadesi

$\epsilon_a$  ve  $\epsilon_c$  sırasıyla agrega ve çimento hamurunun ortalama birim boy-değişimlerini,  $E_a$  ve  $E_c$  ise betonun kırılması anında agrega ve çimento hamurunun sekant modülünü göstermek üzere;

$$\sigma_a = E_a \epsilon_a$$

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c$$

bağıntıları yazılabilir. Daha önce çimento hamuru dayanımı için elde edilen hipotez (13 bağıntısı) dikkate alınır ve  $E_c$  nin zamanla ve çimento konsantrasyonuyla artan bir fonksiyon olduğu oysa,  $E_a$  nın bunlara bağlı olmadığı düşünülürse,  $\alpha_3$  zamanla artan bir fonksiyonu,  $k$  çimento ve agrega yapısına bağlı bir katsayıyı göstermek üzere;

$$\frac{E_c}{E_a} = \alpha_3 k (\gamma - \gamma_0) \quad (15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Diğer taraftan, kırılma meydana gelmediği sürece agrega ve çimento hamurunda numune kesitine dik doğrultudaki birim şekildeğiştirmelerin temas yüzeylerinde birbirine eşit olduğu açık olmakla beraber, çimento hamuru şekildeğiştirmesi sardığı tanelerden uzaklaştıkça artmaktadır. Ancak agrega oranı yüksek olduğu sürece  $\epsilon_c/\epsilon_a$  şekildeğiştirme oranı dayanıma etki etmemektedir. Zira bu durumda agregalar arasındaki mesafe küçük olduğu için,

$$\epsilon_c \cong \epsilon_a$$

yazılabileceğinden,

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_a} = \alpha_3 k (\gamma - \gamma_0) \quad (16)$$

olarak elde edilir.

2.3.2.1.4  $s_a/s$  nin ifadesi

Kesit alanı  $s$  olan bir beton küp gözönüne alınsın. Bu hacimde karakteristik boyutu  $d_i$  olan agreganın sınıfındaki tane sayısının  $n_i^3$  olduğu düşünülür. Eğer bu küpteki agreganın dağılımının homojen olduğu ve şekillerinin boyutlarıyla değişmediği kabul edilirse,  $\mu$  ve  $\xi$  sadece agreganın şekline bağlı katsayıları göstermek üzere küpteki agreganın hacmi;

$$V_a = \mu \sum n_i^3 d_i^3$$

şeklinde ve kesitte agregalar tarafından işgal edilen yüzey ise;

$$s_a = \xi \sum n_i^2 d_i^2$$

şeklinde hesaplanabilir. Buna göre,  $d_1$  ve  $n_1$  maksimum tane çaplı agregalara karşılık gelmek ve

$$\lambda_i = \frac{d_i n_i}{d_1 n_1}$$

olmak üzere  $s$  alanı içindeki agreganın alanı;

$$s_a = \frac{\xi}{\mu^{2/3}} V_a^{2/3} \frac{\sum \lambda_i^2}{(\sum \lambda_i^3)^{2/3}} \quad (17)$$

olarak ifade edilebilir. Bu bağıntıda, sadece agreganın geometrisine bağlı terim  $K = \xi/\mu^{2/3}$  ve sadece agreganın granülometrisine bağlı terim ise

$$m = \frac{\sum \lambda_i^2}{(\sum \lambda_i^3)^{2/3}}$$

olarak gösterilirse,

$$s_a = m K V_a^{2/3}$$

ve

$$\frac{s_a}{s} = m K a^{2/3} \quad (18)$$

bağıntısı elde edilir.

### 2.3.2.1.5 $s_c/s$ nin ifadesi

Kesitte, alanı  $s_v$  olan hava boşluğuna rastlanması durumunda benzer hesapla;

$$\frac{s_v}{s} = m'K'V^{2/3}$$

olarak elde edilir.  $s=s_a+s_c+s_v$  olduğundan, yukarıdaki oranlar bu son bağıntıda yerine konup gerekli işlemler yapıldığında;

$$\frac{s_c}{s} = 1-mKa^{2/3} - m'K'V^{2/3} \quad (19)$$

olarak ifade edilebilir.

(13), (14), (16), (18) ve (19) bağıntıları (4), (7) ve (8) bağıntılarında yerlerine yazılırsa, bağlı oldukları başlıca faktörlerin fonksiyonu olarak, betonun çekme dayanımı;

$$f_{ct1} = \alpha_1(\gamma-\gamma_0) t_c(1-mKa^{2/3}-m'K'V^{2/3}) \quad (20)$$

$$f_{ct2} = \alpha_2(\gamma-\gamma_1) t_{ad} [mKa^{2/3} + \alpha_3k(\gamma-\gamma_0)(1-mKa^{2/3}-m'K'V^{2/3})] \quad (21)$$

$$f'_{ct2} = f_{at} [mKa^{2/3} + \alpha_3k(\gamma-\gamma_0)(1-mKa^{2/3}-m'K'V^{2/3})] \quad (22)$$

olarak elde edilir.

Bu dayanım,  $\gamma \leq \gamma_0$  için sıfır olup,  $\gamma > \gamma_0$  için  $f_{ct1}$  'in  $f_{ct2}$  ve  $f'_{ct2}$  den büyük olması halinde (birinci şekil kırılma)  $f_{ct1}$  'e;  $f_{ct1} < f_{ct2} < f'_{ct2}$  iken  $f_{ct2}$  'ye ve  $f_{ct1} < f'_{ct2} < f_{ct2}$  olduğunda ise (ikinci şekil kırılma)  $f'_{ct2}$  'ne eşit olmaktadır.

Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında ikinci şekil kırılmalardan sadece aderans kırılması (21 nolu bağıntı) dikkate alınmaktadır.

### 2.3.3 Grafik Gösterilim

Bu incelemede belirli bir agrega şekline ( $\alpha_1$ ,  $m$  ve  $K$  sabit) ve granulometrik bileşimine sahip belirli bir yaştaki beton için  $f_{ct}=f(\gamma)$

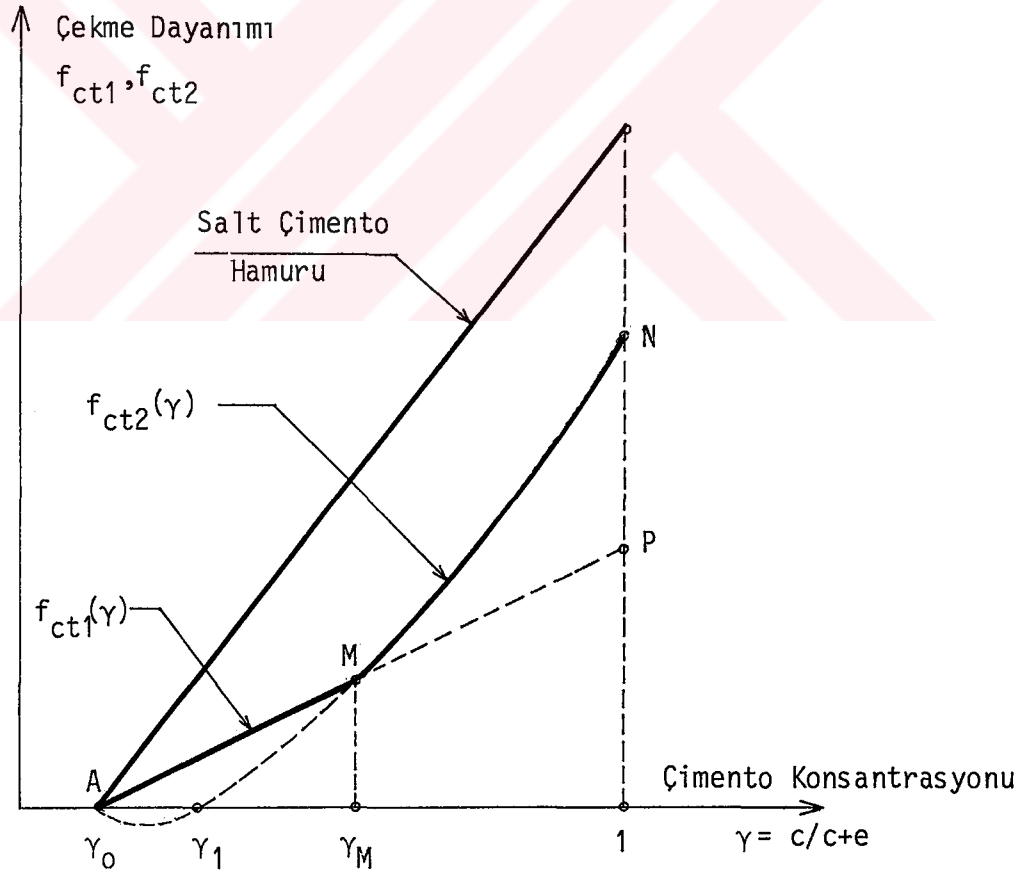
şeklinde, üç düzlem gösterilimle sınırlı olarak, sırasıyla

- a ve v sabit
- e ve v sabit
- c ve v sabit

hallerine karşılık gelen eğriler dikkate alınmaktadır.

### 2.3.3.1 a ve v nin Sabit Hallerine Karşılık Gelen Eğriler

Bu eğriler, çimento konsantrasyonu ( $\gamma$ ) değıştikçe sabit agrega ve sabit hapsedilmiş hava miktarına sahip bir betonun çekme dayanımının gelişimini göstermektedir (Şekil 1).



Şekil 1. a ve v sabit halleri için teorik çekme dayanımı eğrileri

Bu şekilden görüldüğü gibi  $f_{ct1}(\gamma)$  eğrileri doğru olup,  $a$  ve  $v$  değerleri sabit olduğundan aynı tür çimento ile üretilen tüm betonlar için sadece bir tane  $f_{ct1}(\gamma)$  doğrusu sözkonusu olmaktadır.  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrileri ise eksenini  $f_{ct}$  eksenine paralel parabol şeklindedir.  $a$  ve  $v$  değerleri sabit olduğundan aynı tür çimento için agrega petrografik yapısı türü kadar  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrisi vardır. Burada (21) bağıntısındaki  $\gamma_1$ ,  $t_{ad}$  ve  $k$  değerlerinin agrega petrografik yapısına bağlı olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.

Çimento konsantrasyonu  $\gamma_0$  dan maksimum teorik değeri olan 1'e doğru arttıkça  $f_{ct2}$  nin  $f_{ct1}$  den daha büyük değerler alabilmesi için, aderans yetersizse, betonun dayanımını gösteren nokta  $f_{ct1}(\gamma)$  doğrusu üzerinde A dan P ye yerdeğiştirir. Bu da aderansın yeterli olmaması durumunda, betonun çekme dayanımının agrega petrografik yapısından bağımsız olduğunu göstermektedir.

Eğer  $\gamma$  nın  $\gamma_m$  gibi belirli bir değerinden sonra  $f_{ct2}$  nin  $f_{ct1}$  den daha büyük olabilmesi için aderans yeterli oluyorsa, beton dayanımını gösteren nokta  $f_{ct1}(\gamma)$  doğrusu üzerinde A dan M ye, daha sonra da  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrisi üzerinde M den N ye doğru yerdeğiştirir. Diğer taraftan  $f_{ct2}$  değeriyle bilinen bölgede, diğer koşulların hiçbiri değişmemek üzere, bu dayanım aderans iyileştikçe artmaktadır.

Ayrıca AP doğrusu ya da MN parabol yayının P ve N noktaları  $e=0$  olması haline karşılık geldiğinden, bu noktalar pratik bir anlam taşımamaktadır.

### 2.3.3.2 $e$ ve $v$ nin sabit hallerine karşılık gelen eğriler

Bu eğriler, su ve hapsedilmiş hava miktarı sabit olmak üzere agrega ve çimento oranlarının değişimine bağlı olarak betonun çekme dayanımının gelişimini göstermektedir (Şekil 2 ve Şekil 3). Ayrıca, kolaylık açısından sadece  $e=e_1$ =sabit ve  $v=0$  durumu için inceleme yapılmakta ve böylece,

$$a + c + e = 1$$

olup, buradan

$$a = 1 - \frac{e_1}{1-\gamma}$$

olarak bulunur. Bu son bağıntı (20) ve (21) bağıntılarında yenire konursa;



$$f_{ct1} = \alpha_1(\gamma - \gamma_0) t_c \left[ 1 - mK \left( 1 - \frac{e_1}{1 - \gamma} \right)^{2/3} \right] \quad (23)$$

$$f_{ct2} = \alpha_2(\gamma - \gamma_1) t_{ad} \left[ mK \left( 1 - \frac{e_1}{1 - \gamma} \right)^{2/3} + \alpha_3 k(\gamma - \gamma_0) \left[ 1 - mK \left( 1 - \frac{e_1}{1 - \gamma} \right)^{2/3} \right] \right] \quad (24)$$

bağıntıları elde edilmektedir. Burada  $\gamma = 1 - e_1$  değeri için  $a = 0$  olduğundan beton sadece çimento hamurundan ibaret olmaktadır. Ayrıca (24) bağıntısı ancak beton bileşiminde agrega olması ve  $\gamma < 1 - e_1$  hali için fiziksel bir anlam taşımaktadır. Bu nedenle  $f_{ct1}$  in  $\gamma$  ya bağlı değişimi,

$$\gamma_0 < \gamma \leq 1 - e_1$$

aralığında ve  $f_{ct2}$  nin  $\gamma$  ya bağlı değişimi ise,

$$\gamma_1 < \gamma \leq 1 - e_1$$

aralığında incelenmekte ve böylece Şekil 2 ve Şekil 3 deki eğriler elde edilmektedir.

Burada da  $e$  ve  $v$  değerleri sabit olduğundan aynı tür çimento ile üretilen tüm betonlar için sadece bir tane  $f_{ct1}(\gamma)$  eğrisine karşılık, agrega petrografik yapısı türü kadar  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrisi söz konusu olmaktadır.

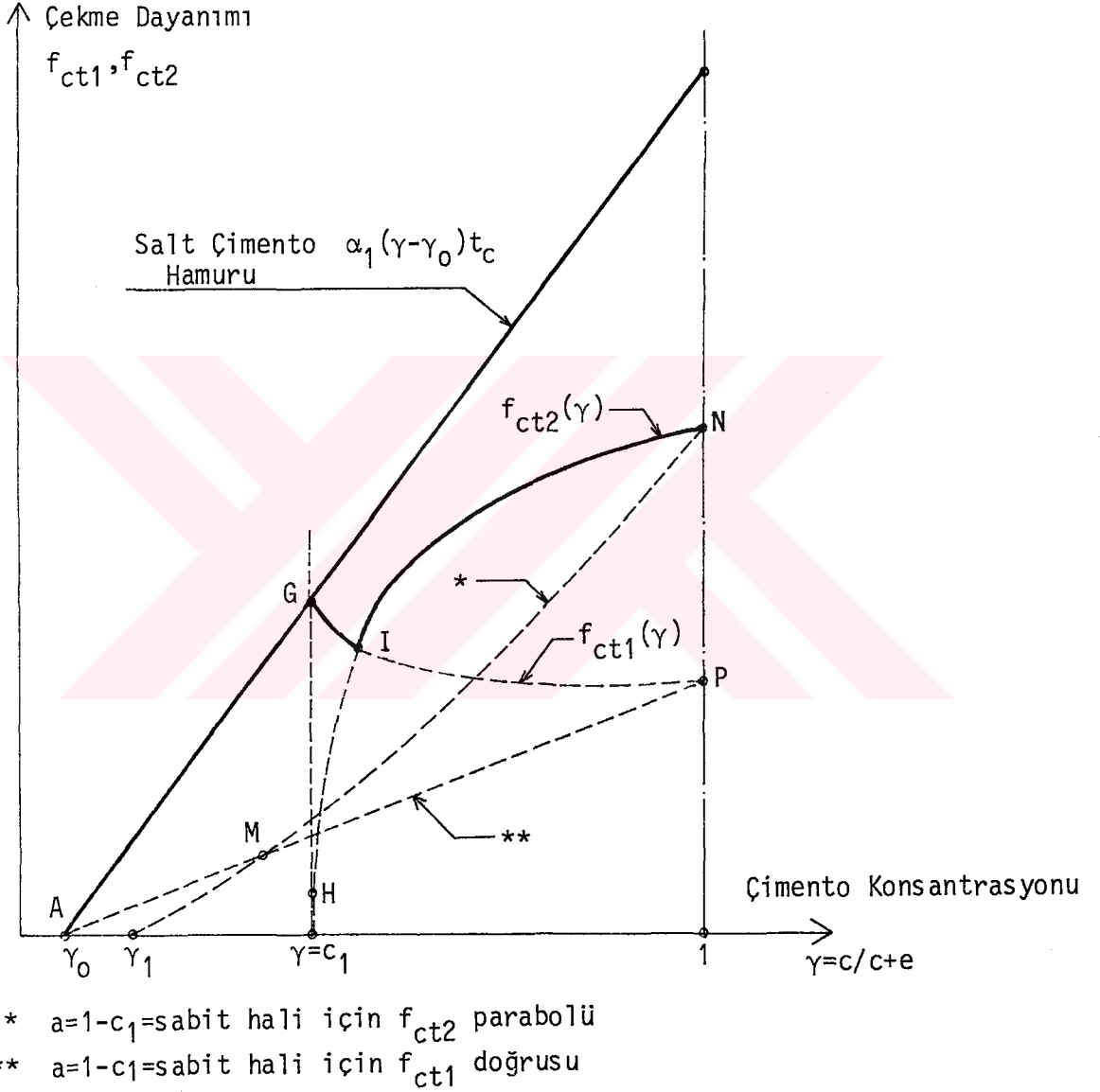
Aderansın zayıf ya da hiç olmaması durumunda  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrisi daima  $f_{ct1}(\gamma)$  eğrisinin altında kalmakta ve beton dayanımı agrega petrografik yapısından bağımsız olmaktadır (Şekil 2).

$f_{ct2}$  nin  $f_{ct1}$  den daha büyük değerler alabilmesi için aderansın yeteri kadar büyük olması gerekmektedir. Agrega ile çimento hamuru arasında yeterli miktarda aderans olması halinde  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrisi  $f_{ct1}(\gamma)$  eğrisini B ve C gibi iki noktada kesmekte ve üstte kalmaktadır (Şekil 3). Bu da (24) bağıntısıyla tanımlanan beton çekme dayanımının, B ve C noktaları arasında, aderans dayanımına ve dolayısıyla agrega petrografik yapısına bağlı olduğunu göstermektedir.



### 2.3.3.3 c ve v nin sabit hallerine karşılık gelen eğriler

Bu eğriler, çimento ve hapsedilmiş hava miktarları sabit olmak üzere agrega ve su oranlarının değişimine bağlı olarak betonun çekme dayanımının gelişimini göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 4. c ve v sabit halleri için teorik çekme dayanımı eğrileri

Madde 2.3.3.2 de olduğu gibi burada da basitleştirmek amacıyla sadece  $c=c_1$ =sabit ve  $v=0$  haline karşılık gelen eğriler incelenmekte ve böylece,

$$a = 1 - \frac{c_1}{\gamma}$$

olduğundan; betonun çekme dayanımı,

$$f_{ct1} = \alpha_1(\gamma - \gamma_0)t_c \left[ 1 - mK \left( 1 - \frac{c_1}{\gamma} \right)^{2/3} \right] \quad (25)$$

$$f_{ct2} = \alpha_2(\gamma - \gamma_1)t_{ad} \left[ mK \left( 1 - \frac{c_1}{\gamma} \right)^{2/3} + \alpha_3 k(\gamma - \gamma_0) \left[ 1 - mK \left( 1 - \frac{c_1}{\gamma} \right)^{2/3} \right] \right] \quad (26)$$

olarak elde edilmektedir.

Bu durumda da çimento türü ve oranı ile hapsedilmiş hava miktarı sabit olduğundan sadece bir tane  $f_{ct1}(\gamma)$  eğrisi ve buna karşılık agrega petrografik yapısı türü kadar  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrisi vardır.

$f_{ct1}(\gamma)$  eğrisi soldan salt çimento hamuru dayanımını gösteren doğru ile ve sağdan, varsa,  $f_{ct2}(\gamma)$ ; yoksa,  $\gamma=1$  doğrusuyla sınırlıdır.  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrileri ise soldan  $f_{ct1}(\gamma)$  eğrisi ve sağdan  $\gamma=1$  doğrusuyla sınırlıdır.

Eğer  $f_{ct2}(\gamma)$  eğrisi  $f_{ct1}(\gamma)$  eğrisini herhangi bir noktada kesiyorsa beton çekme dayanımını gösteren nokta önce  $f_{ct1}(\gamma)$  üzerinde G den I ya, daha sonra  $\gamma$ ,  $C_1$  den 1'e doğru arttıkça  $f_{ct2}(\gamma)$  üzerinde I dan N ye doğru yerdeğiştirmektedir. Aderansın yetersiz kalması durumunda ise bu nokta  $f_{ct1}(\gamma)$  üzerinde G den P ye doğru yerdeğiştirmektedir.

## 2.4 Betonun Merkezi Basınç Altında Kırılma Mekanizması

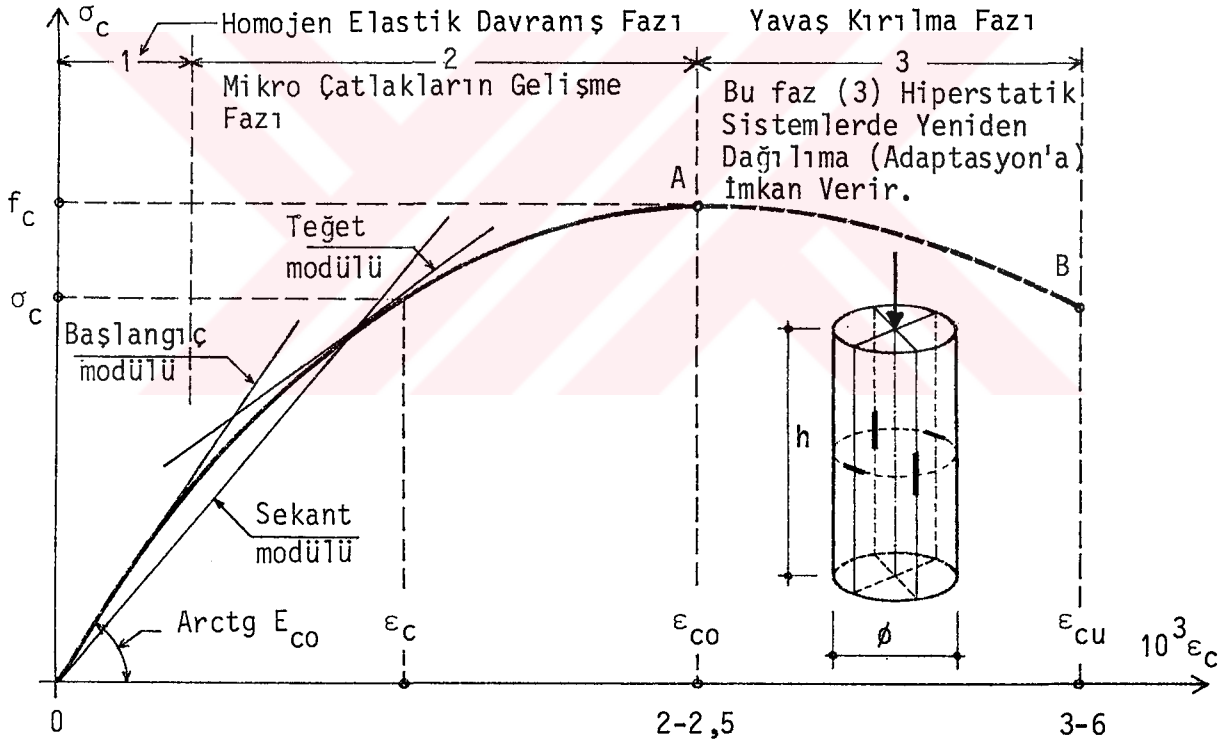
### 2.4.1 Betonun Merkezi Basınç Dayanımı

Bir betonda beklenen en önemli özelliklerden birinin yüksek bir basınç dayanımı olduğu bilinmektedir. Betonun basınç dayanımı, kemirici (Agresif) ortam etkisinde kalmadığı sürece, zamanla artan bir mekanik özelliği olup, ilk 7 günde bu değer yaklaşık %70'ine ve 28. gün sonunda da standart dayanım olarak kabul edilen değerine ulaşmaktadır. Betonun basınç dayanımının maksimum değerini alması ise, yine ortam koşullarına bağlı olarak, birkaç yıl kadar sürebileceğinden basınç dayanımından söz

ederken betonun yaşının da belirtilmesi zorunlu olmaktadır.

Birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2$  sıcaklıktaki su içinde 28 gün boyunca saklanmış standart beton silindir numunelerin ( $\phi=15$  cm,  $h=30$  cm) sabit yükleme hızıyla bir eksenli merkezi basınç dayanımları standart numune dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Beton sınıfları ise genellikle karakteristik silindir basınç dayanımlarına göre belirlenmektedir. Bununla beraber bazen küp numuneler de standart numune olarak kullanılmakta ve bu dayanımlar istendiğinde yaklaşık bir takım bağıntılarla silindir dayanımına çevrilebilmektedir (3).

Geleneksel betonun bir eksenli merkezi basınç altındaki standart numuneler üzerinde, sabit şekildeğiştirme hızıyla, elde edilen gerilme-birim şekildeğiştirme diyagramının genel görünümü Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 5. Geleneksel betonun bir eksenli merkezi basınç altında gerilme-birim şekildeğiştirme diyagramı (4)

Bu diyagramı birçok parametre etkilediğinden, analitik bir bağıntıyla ifade edilmesi imkansız denecek kadar zor olmaktadır. Bununla beraber bazı araştırmacılar bu eğrinin genel ifadesini analitik olarak vermeye çalışmıştır. Bunlara örnek olarak; sırasıyla Smith-Young, Voellmy,

Torraja ve Sargin tarafından önerilen aşağıdaki (27), (28), (29) ve (30) bağıntıları verilebilir (5,6).

$$\sigma_c = f_c \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} e^{(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}})} \quad (27)$$

$$\sigma_c = f_c \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} (2 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}) \quad (28)$$

$$\sigma_c = f_c [1 - (1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}})^{7/3}] \quad (29)$$

ve  $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}$ ,  $y = \frac{\sigma_c}{f_c}$ ,  $k = \frac{E_{co} \epsilon_{co}}{f_c}$  ve  $k'$  de sözkonusu eğrinin alçalan kısmının şekline bağlı olarak seçilen bir parametre olmak üzere;

$$y = \frac{kx + (k' - 1)x^2}{1 + (k-2)x + k'x} \quad (30)$$

Teorik olan bu bağıntılar betonun davranışını yaklaşık olarak temsil etmektedirler.

Beton dayanımının bileşenlerine bağlı olarak önceden tahmini için de bazı bağıntılar önerilmiştir. Bunlara örnek olarak da,  $A$ ,  $B$ ,  $K_B$ ,  $K_G$ ,  $K_F$  birer katsayıyı ve  $r_c$  çimento hamuru dayanımını göstermek üzere;

$$f_c = \frac{A}{B E/C} \quad (31)$$

Abrams,

$$f_c = K_B \left[ \frac{C}{E} - 0,5 \right] \quad (32)$$

Bolomey,

$$f_c = \frac{r_c}{K_G} \left( \frac{C}{E} \right)^2 \quad (33)$$

Graf ve beton basınç dayanımına etkiyen en önemli faktörün çimento konsantrasyonu olduğu varsayımına dayanan,

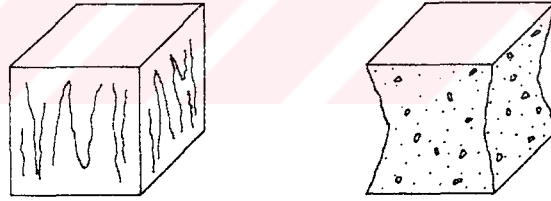
$$f_c = K_F \gamma^2 \quad (34)$$

şeklindeki Feret bağıntısı verilebilir (7,8,9).

Bu bağıntıların en çarpıcı ortak özelliği, agreganın petrografik yapısının etkisini içermemiş olmalarıdır.

#### 2.4.2 Kırılma Mekanizması

F merkezi basınç yükünün etkisinde A kesit alanlı bir beton numunede ortalama gerilmenin  $\sigma = F/A$  bağıntısıyla hesaplandığı bilinmektedir. Bu gerilmenin belirli bir değerinden sonra beton içindeki mevcut çatlaklar ya da süreksizliklerin yoğun olduğu zayıf hatlar boyunca oluşan çatlaklar büyümekte, kırılma yüküne ulaşıldığında ise, örneğin küp numune, Şekil 6'daki gibi kırılmaktadır.



Şekil 6. Normal kırılma şekilleri

Kırılma mekanizmasına etkiyen birçok faktörün bulunduğu bilinen bir gerçektir. Ancak çekme ya da basınç etkisindeki beton ya da harç numunelerinin kırılma yüzeyleri, agreganın dayanımı az olmamak koşuluyla, genellikle agreganın çevresini kısmen takip etmektedir. Diğer bir deyişle, bağlantının katı-katı tipinde olması halinde kırılma çimento hamuru-agrega ara yüzeyindeki aderans bölgesinde meydana gelmektedir (10).

Bu olayın açıklaması üç şekilde yapılabilir:

- 1) Agregalarla çimento hamuru arasındaki aderans, dayanımı düşük özel bir hamurla sağlanmış olabilir.

- 2) Aderans bölgesi çok yüksek gerilmelerin etkisinde kalmış olabilir.
- 3) Aderans bölgesinde çok sayıda süreksizlikler vardır.

Bir betonda bu üç açıklama aynı anda da geçerli olabilir.

Gerçekten, yapılmış olan deneylere göre çimento anhidritlerinin su ile reaksiyonu sonucu meydana gelen iyonlar yapılarına bağlı olarak farklı hareketliliğe sahiptirler. Böylece çimento hamuru içinde en çabuk olarak yayılan iyonlar tarafından meydana getirilen hidratlar agrega etrafında ilk önce çökelmektedirler (10). Diğerleri ise daha çok anhidrit çimento tanelerinin etrafında bulunmakta, bu da çimento hamuru yapısının aderans bölgesinde ve global çimento hamuru bünyesinde farklı olmasına neden olmaktadır.

Diğer taraftan hidrate olmuş bileşenlere göre aşırı doygunluk bir çimento taneciği etrafına göre agrega yakınında daha zayıf olmakta, bu da çimento hamuru ile agrega temas yüzeyinde kristalleşmenin hem daha yavaş, hem de daha büyük olmasına neden olmaktadır. Böylece bu bölgedeki dayanım çimento hamurunun diğer kısımlarında daha iyi koşullar altında oluşan dayanımdan daha zayıf olmaktadır.

Ayrıca aderans bölgesinde yapılan mikroskopik gözlemler, burada çok sayıda boşluğun varlığını göstermektedir (11). Bu boşlukların bir kısmı agregalara bağlı olan hava kabarcıklarından, bir kısmı da agrega yakınlığında çimento hamurunun katı eleman yönünden zayıf oluşundan ve bu bölgede hidrate olmuş tanecik konsantrasyonunun minimum oluşundan ileri gelmektedir. Bu durum karma suyu oranı arttıkça daha net olarak ortaya çıkmakta, diğer bir deyişle beton içindeki su miktarı arttıkça agrega ve çimento hamuru arasındaki aderans kuvveti azalmaktadır (10).

Diğer taraftan geleneksel agrega elastisite modüllerinin çimento hamurununkinden çok daha büyük olduğu da bilinmektedir (11). Bu durumda aderans bölgesi bazı noktalarda çimento hamuru kütlesi içinde taşınan gerilmelerden daha büyük gerilmelerin etkisinde kalmaktadır. Böylece beton ya da harcın başlıca iki bileşeni olan hidrate olmuş çimento hamuru ve agregalar, dayanımı global çimento hamuru ve agregaların dayanımından daha düşük olan ve çok sayıda süreksizlikler içeren, özel bir hamur tabakası ile birbirine bağlanmaktadır. Bu bağ, dış yüklerin etkisinde maksimum gerilmelerin etkisinde kaldığından ilk kırılma bu düzeyde meydana gelmektedir.

Deneyler, çekme durumunda kırılma yüzeyinin dış kuvvete dik konumda olduğunu ve bu durumda bu yüzeye rastlayan agregaların pratik olarak, çimento hamurundan ayrılır ayrılmaz hiçbir etki altında kalmadığını göstermektedir.

Birinci kabule göre beton, aderans sökülmesinden sonra hemen kırılmaktadır. Bu durumda betonun dayanımı aderans dayanımına ve bu düzeyde uygulanan gerilmelere bağlı olmaktadır.

Farran'ın gösterdiği gibi, birinci faktör agregaların petrografik yapılarıyla önemli derecede değişmektedir (10).

Aderans bölgesindeki gerilmeler ise çimento hamuru ve agregaların elastisite modüllerine bağlıdır. Zira çimento hamuru ile agregaların elastisite modülleri çok farklı olduğu gibi, bileşimde bulunan agregaların da elastisite modülleri arasında, petrografik yapılarına bağlı olarak, büyük farklılıklar olabilmektedir.

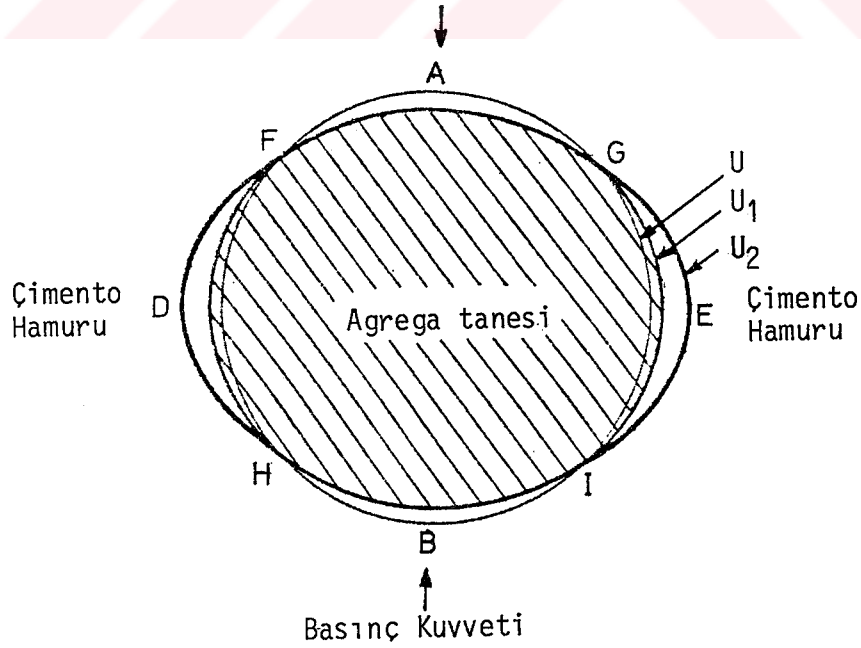
Diğer bir kabule göre betonun aderans sökülmesini meydana getiren kuvvetten daha büyük bir kuvveti taşıyabileceği düşünülebilir. Aderans sökülmesinden sonra dış kuvvetlere sadece, birtakım hava boşlukları içeren, çimento hamuru karşı koymaktadır. Zira, aderans sökülmesinden sonra agregalar, sadece şekilleri, oranları ve beton içindeki dağılımlarıyla etkili olmaktadır.

Basınç etkisindeki bir numunede eğer yanal bir sıkışma (fretaj) etkisi yoksa, diğer bir deyişle numune serbest yüzeylerinden rahatça şekil değiştirme yapabiliyorsa, genellikle dış yük doğrultusunda birbirine paralel birçok kırılma yüzeyi meydana gelmektedir. Bu durumda numunenin tamamen parçalanıp dağılmasına kadar çimento hamuruyla birlikte agregalar da gerilme etkisinde kalmaktadır. O halde basınç altındaki kırılma şekli ne olursa olsun betonun basınç dayanımı, içerdiği agregaların mekanik özellikleri ve dolayısıyla petrografik-mineralojik yapıları ile de yakından ilgili olmak durumundadır. Bununla beraber Feret, yapmış olduğu deneyler sonucunda çimento hamuruyla reaksiyon dışında agrega petrografik yapısının betonun dayanımı üzerinde hiçbir etkisi olmadığı sonucuna varmıştır (1). Feret'in çalışmalarını esas alan çağdaş birçok araştırmacı tarafından da kabul edilen bu sonuçların doğruluğu özellikle basınç durumunda kanıtlanamamakta ve sonradan yapılan bazı deneylerin sonuçları da Feret'in sonuçlarıyla kısmen çelişmektedir (12,13,14). Durum böyle olunca, bunların sınırlı çalışmalarından genel bir kural çıkarmak zor olmaktadır.

### 2.4.3 Merkezi Basınç Dayanımının İfadesi

Madde 2.4.2 de kırılıncaya kadar, merkezi basınç etkisinde kalan bir beton numunede, serbest genişmesi engellenmediği takdirde, dış yük doğrultusuna paralel çatlaklar oluştuğu belirtilmişti. Bu durumda numunenin dış yüke dik doğrultuda çekme etkisinde kırılıyormuş gibi davrandığı düşünülebilir.

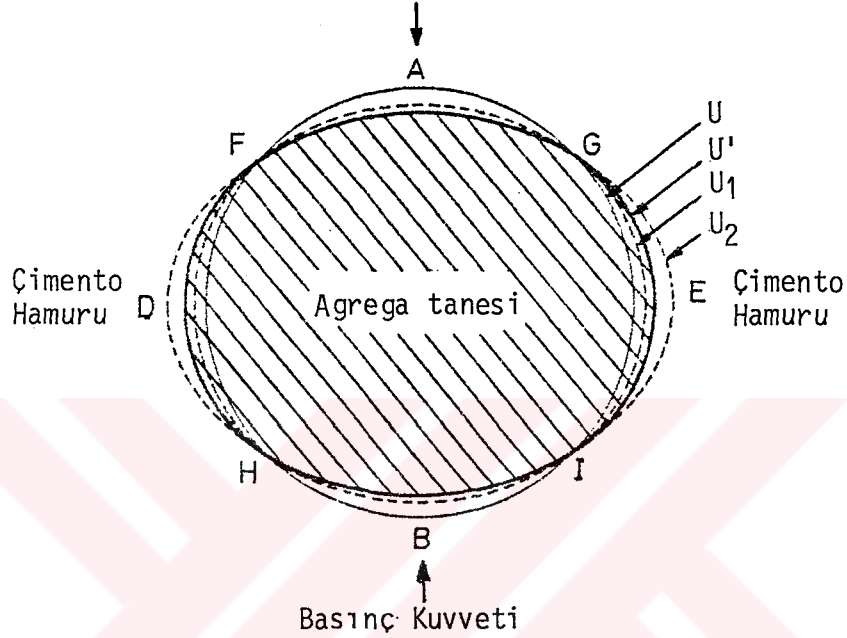
0 halde, yüksüz durumda, ortak çevreleri U olan çimento hamuruyla sarılmış bir agregatanesi basınç kuvveti etkisinde kaldığında, poisson oranları birbirine yakın olduğu halde beton agregalarının elastisite modülleri genellikle çimento hamurununkinden büyük olduğundan (11), çimento hamuru agregaya yanıl yüzeyleri boyunca agregadan ayrılma eğilimi gösterir. Şekil 7'den görüldüğü gibi eğer çimento hamuruyla agregaya arasında aderans yoksa U çevresi agregaya için  $U_1$  çevresine dönüşmekte ve agregaya yüzeyleri daima bazı pürüzler içerdiğinden, çimento hamurunun yanıl genişmesi A ve B noktaları etrafında engellenmektedir. Fretaj etkisi adı verilen bu etki, çimento hamurunun dış yüke dik doğrultuda serbestçe şekil değiştirebildiği FG ve HI paralelleri boyunca ortadan kalkmaktadır. Bu durumda çimento hamurunun gerçek çevresi FDH-GEI bölgesinde  $U_2$ , FAG ve HBI boyunca ise  $U_1$  olmaktadır (11).



Şekil 7. Merkezi basınçta aderans olmaması halinde agregatanesi ve çimento hamuru şekil değiştirmeleri



Çimento hamuruyla agrega arasında aderans olması halinde, kırılma yüküne varılmadan önce aderans bölgesindeki ortak gerilmeden dolayı her ikisinin de yanal şekildeğişimleri aynı kalmaktadır. Bu durumda başlangıçtaki U çevresi, önceki  $U_1$  ve  $U_2$  çevrelerinin arasından geçen  $U'$  agrega ve çimento hamuru ortak çevresine dönüşmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Merkezi basınçta aderans olması halinde agrega ve çimento hamuru şekildeğişimleri

Aderans bölgesi bu durumda agrega yüzeyindeki FAG-HBI bölgelerinde basınç gerilmesi, F, G, H ve I noktaları sıfır gerilme ve FDH-GEI bölgelerinde ise çekme gerilmesi etkisinde kalmaktadır.

İlk kırılmanın agregada oluşmaması halinde, aderans bölgesine etkiyen çekme gerilmesi aderans dayanımını yendiği anda aderans kırılması meydana gelmekte ve bu durumda çimento hamuru, agrega ya da aderans kırılması meydana gelir gelmez, yanal doğrultuda serbestçe genişleyebilir.

Eğer agreganın FDH ve GEI yüzeyleri boyunca yaptığı enine şekil değiştirme çimento hamurunun çekmede kırılma şekildeğişiminden küçükse, agrega ya da aderans kırılması betonun kırılmasına neden olmamaktadır. Aksi halde agrega ya da aderans kırılması meydana gelir gelmez beton kırılmaktadır.

Bu durum, daha önce çekme için açıklanan iki türlü kırılma şeklinin merkezi basınç durumunda da mevcut olduğunu göstermektedir:

1) Aderans ya da agrega kırılması betonun kırılmasına neden olmamaktadır.

Betonun kırılması sadece agrega kırılma çizgisi boyunca ya da FG ve HI paralelleri doğrultusunda meydana gelen enine şekildeğişikliklerin çimento hamurunun çekme kırılmasındaki şekildeğişikliğine eşit olması halinde meydana gelmektedir. Bu eşitlik sağlandığında çimento hamuru içinde oluşan ilk mikroçatlak, aynı kaynaklı başka bir çatlak oluşuncaya kadar gelişmekte ve olay, benzer şekilde ardarda meydana gelen çatlaklarla, beton tamamen kırılıncaya kadar, devam etmektedir. Buna göre beton basınç dayanımının ifadesi aşağıdaki yolla belirlenebilir:

$\sigma_z$ , dış yüke dik bir s yüzey elemanına etkiyen ortalama normal gerilmeyi göstermek üzere, betonun çekme dayanımının incelenmesinde kullanılan aynı sembollerle;

$$\sigma_z = \sigma_a \frac{s_a}{s} + \sigma_c \frac{s_c}{s} \quad (35)$$

olarak yazılabilir. Kırılma anında çimento hamuru ortalama enine şekildeğişikliğinin çekme kırılmasındaki boyuna şekildeğişikliğine eşitliğinden,  $f_{ct}$  çimento hamuru çekme dayanımını,  $\nu_c$  çimento hamuru poisson oranını ve  $E'_c$ ,  $\nu_c \epsilon_c$  şekildeğişikliğine karşılık gelen sekant modülünü göstermek üzere;

$$\nu_c \epsilon_c = \frac{f_{ct}}{E'_c} \quad (36)$$

bağıntısı yazılabilir. Buradan  $\sigma_z$  nin en büyük değeri olan beton basınç dayanımı  $f_{c1}$  ile gösterilirse;

$$f_{ct} = E'_c \nu_c \epsilon_c = \nu_c \frac{E'_c}{E_c} \frac{f_c}{\frac{s_c}{s} + \frac{\sigma_a}{\sigma_c} \frac{s_a}{s}}$$

ya da

$$f_{c1} = \frac{f_{ct}}{\nu_c} \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_c} \frac{s_a}{s} + \frac{s_c}{s} \right) \frac{E_c}{E'_c} \quad (37)$$

olarak elde edilir.

2) Aderans ya da agregaya kırılması betonun kırılmasına neden olmaktadır. Burada iki durum söz konusu olabilir:

a) Betonun kırılmasına aderans kırılması neden olmaktadır.

Bu durumda aderans bölgesine uygulanan çekme gerilmesi,  $\epsilon_{1c}$  aderans yokken çimento hamurunun yapacağı ortalama birim şekildeğiştirmeyi,  $\epsilon_{0a}$  aderans yokken bir eksenli basınç etkisinde gerçek şekildeğiştirmeye eşit bir yanıl şekildeğiştirme oluşturan agregaya birim şekildeğiştirmesini,  $\nu_a$  agregaya poisson oranını göstermek üzere;

$$\sigma_{adt} = E'_c (\nu_c \epsilon_{1c} - \nu_a \epsilon_{0a}) \quad (38)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu bağıntının elde edilişi Ek 1 de verilmektedir.

Böylece (38) bağıntısı  $f_{adt}$  aderans çekme dayanımını göstermek üzere;

$$f_{adt} = E'_c (\nu_c \epsilon_{1c} - \nu_a \epsilon_{0a}) \quad (39)$$

şeklinde ve beton basınç dayanımı;

$$f_{c2} = \sigma_a \frac{s_a}{s} + \sigma_c \frac{s_c}{s} \quad (40)$$

olarak yazılabilir.

Aderans yokken  $\epsilon_{1a}$  agreganın yapacağı ortalama boyuna birim şekildeğiştirmeyi göstermek üzere  $\sigma_a$  ve  $\sigma_c$  nin ifadeleri,

$$\sigma_a = E_a \epsilon_{1a} \quad (41)$$

$$\sigma_c = E_c \epsilon_{1c} \quad (42)$$

şeklindedir. Bu durumda (39) bağıntısından çekilen  $\epsilon_{1c}$  değeri (40) bağıntısında yerine yazılır ve (42) bağıntısı dikkate alınır;

$$f_{c2} = \frac{E_c}{E'_c} \frac{f_{adt}}{\nu_c - \nu_a} \left( \frac{s_c}{s} + \frac{\sigma_a}{\sigma_c} \frac{s_a}{s} \right) \quad (43)$$

olarak elde edilmektedir.

b) Betonun kırılmasına agreganın kırılması neden olmaktadır.

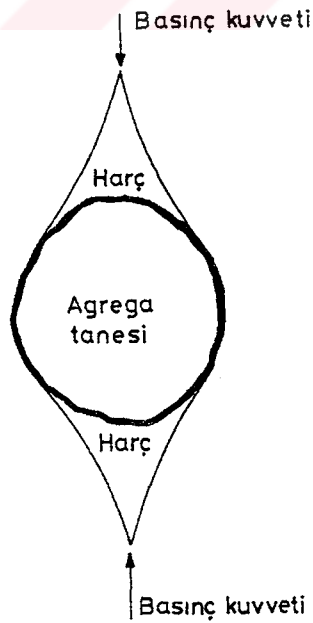
Kırılma anında agreganın ortalama enine şekil değiştirmesinin çekme kırılmasındaki boyuna şekil değiştirmesine eşit olduğu varsayımıyla;  $E'_a$ ,  $\nu_a \epsilon_a$  şekil değiştirmesine karşılık gelen agreganın sekant modülünü ve  $f_{at}$  agreganın çekme dayanımını göstermek üzere;

$$\nu_a \epsilon_a = \frac{f_{at}}{E'_a} \quad (44)$$

yazılabilir. Bu bağıntıdan  $\epsilon_a$  çekilir ve elde edilen değer (40) bağıntısında yerine yazılırsa;

$$f'_{c2} = \frac{f_{at}}{\nu_a} \left( \frac{s_a}{s} + \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \frac{s_c}{s} \right) \frac{E_a}{E'_a} \quad (45)$$

olarak elde edilir. Bu teori, VILE (15) tarafından geliştirilen varsayımlarla uyduğu gibi, merkezi basınç etkisinde kırılan numuneden çıkarılan bir agreganın genellikle Şekil 9'deki görünümü almasıyla da doğrulanmaktadır.



Şekil 9. Merkezi basınçta bir beton numunenin ezilmesinden sonra agreganın durumu

Bu şekilde görülen, agregaya yapışık, konik şekilli iki çimento hamuru elemanı, agreganın çimento hamuruna uyguladığı fretaj etkisinden dolayı meydana gelmektedir. Bu fretaj etkisi agregadan uzaklaştıkça azalmaktadır.

Diğer taraftan Dantu (16) elastik teoriye dayanarak, çimento hamurunda dış basınç kuvvetine dik doğrultuda çekme gerilmelerinin varlığını ortaya koymuş ve içinde iri agregalar da bulunan harç numuneler üzerinde yaptığı deneyler sonucunda;

- \* Çimento hamurundaki ortalama boyuna şekildeğişikliklerin agregalardakinden daha büyük olduğunu,
  - \* Harçta çok yüksek uzama yığılmaları oluşan noktaların bulunduğunu,
  - \* Gerilme yığılması oluşan noktaların iri agregalarda bulunduğunu,
- göstermiştir.

Dantu'nun yapmış olduğu deneylere göre maksimum gerilme ve şekildeğişiklikler daima, FAG ve HBI olarak adlandırılan, çimento hamuru ve agregat temas yüzeylerinde meydana gelmektedir.

Burada bir bağlayıcı ile sarılmış tanelerden meydana gelen en genel bir cisim için tanelerin yanıl şekildeğişikliklerinin bağlayıcıyı patlatabileceğini de belirtmek uygun olmaktadır.

Pratikte üretilen betonların davranışını yansıtmamakla birlikte, kırılma anında tanelerin ortalama enine şekildeğişikliğinin bağlayıcının çekmede boyuna şekildeğişikliğine eşitliğinden;

$$\epsilon_a v_a = \frac{f_{ct}}{E_c} \quad (46)$$

bağıntısı, ya da basınç dayanımı cinsinden;

$$f_c = \frac{f_{ct}}{v_a} \left( \frac{s_a}{s} + \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \frac{s_c}{s} \right) \frac{E_a}{E_c} \quad (47)$$

bağıntısı yazılabilir.

### 2.4.3.1 $f_{c1}$ , $f_{c2}$ ve $f'_{c2}$ nün beton bileşimine bağlı ifadeleri

Betonun, çekme etkisi altında kırılması için yapılan varsayımlar ve bunlardan elde edilen ifadeler kullanılarak, basınç dayanımı;

$$f_{c1} = \frac{\alpha_1(\gamma-\gamma_0)t_c}{\nu_c} \frac{E_c}{E'_c} \left( \frac{mKa^{2/3}}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_0)} \frac{\epsilon_a}{\epsilon_c} + 1 - mKa^{2/3} - m'k'v^{2/3} \right) \quad (48)$$

$$f_{c2} = \frac{\alpha_2(\gamma-\gamma_1)t_{ad}}{\nu_c - \nu_a} \frac{E_c}{E'_c} \left( \frac{mKa^{2/3}}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_0)} \frac{\epsilon_{1a}}{\epsilon_{1c}} + 1 - mKa^{2/3} - m'k'v^{2/3} \right) \quad (49)$$

$$f'_{c2} = \frac{f_{at}}{\nu_a} \left( mKa^{2/3} + \alpha_4 k'(\gamma-\gamma_0) \frac{\epsilon_{1c}}{\epsilon_{1a}} (1 - mKa^{2/3} - m'k'v^{2/3}) \right) \quad (50)$$

olarak ifade edilebilir. Bu bağıntılarda geçen  $k'$ , kırılma anı için

$$\frac{E_c}{E_a} = \alpha_4 k'(\gamma-\gamma_0) \quad (51)$$

bağıntısıyla elde edilmektedir.

#### 2.4.3.1.1 $\nu_c$ nin ifadesi

Çimento hamurunun su ve hidrate olmuş çimento kristallerinden meydana geldiği bilinmektedir. Fakat reaksiyonlar tamamen gerçekleşmemişse (genellikle durum böyledir) çimento hamurunda anhidrit taneler bulunur. Su biraz sıkışabilir olmakla birlikte, betonda, maruz kaldığı basınçları fazla sıkışmadan her doğrultuda iletmektedir. Böylece beton bileşimindeki katı eleman oranı arttıkça poisson oranı da o nispette azalacaktır.  $\gamma=0$  sınır durumunda  $\nu_c = 0,5$  ( $=\nu_e$ ) olmak zorundadır. Diğer taraftan hidratasyonla

birlikte çimento hamurunda çok sayıda gaz kabarcığının oluşturduğu boşluklar meydana gelmekte ve bu boşlukların sayısı katılaşma başlangıcında  $\gamma$  büyüdükçe poisson oranının azalmasını gerektirmektedir. Bu durumda  $V$  hacimli bir çimento hamuru için,  $b$  çimento türüne ve  $\alpha_5$  zamana bağlı birer katsayıyı göstermek üzere;

$$\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\epsilon_c} = \alpha_5 b \gamma$$

ifadesi yazılabilir. Buradan

$$1 - 2 \nu_c = \alpha_5 b \gamma$$

bulunur ve

$$\nu_c = \frac{1}{2} (1 - \alpha_5 b \gamma) \quad (52)$$

olarak elde edilir.

#### 2.4.3.1.2 $E_c/E'_c$ nin ifadesi

Basınç ve çekmede  $E_c/E_a$  için verilen (15) ve (51) nolu ifadelerin karşılaştırılmasından,

$$\frac{E_c}{E'_c} = h = \text{sabit} \quad (53)$$

yazılabilir. Bu çalışmada  $\epsilon_a/\epsilon_c$ ,  $\epsilon_{1a}/\epsilon_{1c}$  ve  $\epsilon_{0a}/\epsilon_{0c}$  oranlarını beton bileşimine bağlayan ifadeler elde edilmemiş olmakla beraber bunlar ilgili oldukları bağıntılarda muhafaza edilmektedir. Bununla birlikte, sabit su oranı için bunların ne yönde değiştiği tahmin edilebilir. Gerçekten,  $\gamma = \gamma_0$  civarında çimento hamuru çok az katı eleman içerdiğinden betondaki basınç dağılımı pratik olarak hidrostatiktir. Bu da  $\epsilon_c$  değerlerinin bu koşullar altında  $\epsilon_a$  değerlerinden çok daha büyük olduğunu ve çimento hamurunda katı eleman miktarı arttıkça  $\epsilon_c/\epsilon_a$  oranının azalacağını göstermektedir.

Ancak, agrega taneleri arasındaki mesafe  $\gamma$  arttıkça artmakta ve böylece agregalar tarafından çimento hamuruna uygulanan fretaj etkisi de azaldığından  $\gamma_0 \leq \gamma \leq 1 - e_1$  aralığında  $\gamma$  arttıkça  $\epsilon_c / \epsilon_a$  oranı artmaktadır. Bu oranın geleneksel betonlar için, daima 1 den büyük bir minimuma sahip olduğu açıktır. Bu koşullar altında  $f_{c1}(\gamma)$  ve  $f_{c2}(\gamma)$  eğrilerinin şeklini belirlemek mümkündür. Bunun için (52) ve (53) bağıntıları (49) ve (50) bağıntılarındaki yerlerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında;

$$f_{c1} = \frac{2\alpha_1(\gamma - \gamma_0)t_c h}{1 - \alpha_5 b \gamma} \left( \frac{mKa^{2/3}}{\alpha_4 k'(\gamma - \gamma_0)} \frac{\epsilon_a}{\epsilon_c} + 1 - mKa^{2/3} - m'K'v^{2/3} \right) \quad (54)$$

$$f_{c2} = \frac{2\alpha_2(\gamma - \gamma_1)t_{ad} h}{1 - \alpha_5 b \gamma - 2v_a \frac{\epsilon_{oa}}{\epsilon_{1c}}} \left( \frac{mKa^{2/3}}{\alpha_4 k'(\gamma - \gamma_0)} \frac{\epsilon_{1a}}{\epsilon_{1c}} + 1 - mKa^{2/3} - m'K'v^{2/3} \right) \quad (55)$$

olarak elde edilmektedir.

Bu bağıntılara göre  $\gamma \leq \gamma_0$  için betonun basınç dayanımı sıfırdır.  $\gamma > \gamma_0$  için ise eğer  $f_{c1}$ ;  $f_{c2}$  ve  $f'_{c2}$  den daha büyükse (birinci şekil kırılma) bu dayanım  $f_{c1}$  e,  $f_{c1} < f_{c2} < f'_{c2}$  ise  $f_{c2}$  ye ya da  $f_{c1} < f'_{c2} < f_{c2}$  ise  $f'_{c2}$  ne eşit olmaktadır ki bu son iki kırılma şekli, daha önce de belirtilmiş olduğu gibi ikinci şekil kırılma olarak adlandırılmaktadır.

Çalışmanın bundan sonraki kısmında ikinci şekil kırılmalardan sadece (55) bağıntısıyla verilen ve agrega petrografik yapısıyla doğrudan ilişkili olan aderans kırılması üzerinde durulmaktadır.

#### 2.4.4 Grafik Gösterilim

Bu başlık altında sadece çok ilginç sonuçların çıkarılmasına imkan veren,  $e$  ve  $v$  nin sabit hallerine karşılık gelen  $f_{c1}(\gamma)$  ve  $f_{c2}(\gamma)$  eğrileri incelenmekle beraber,  $e$  ve  $v$  nin değişken olması durumunda karşılık gelen eğriler de bu eğri ailesinden kolayca elde edilebilir.

Bu incelemede  $e = e_1 = \text{sabit}$  ve  $v = v_1 = \text{sabit}$  halleri için;

$$a = 1 - \frac{e_1}{1 - \gamma}$$

olduğundan,



$$f_{c1} = \frac{2\alpha_1(\gamma-\gamma_0)t_c h}{1-\alpha_5 b \gamma} \left[ \frac{mK}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_0)} \frac{\epsilon_a}{\epsilon_c} \left(1 - \frac{e_1}{1-\gamma}\right)^{2/3} + 1 - mK \left(1 - \frac{e_1}{1-\gamma}\right)^{2/3} \right] \quad (56)$$

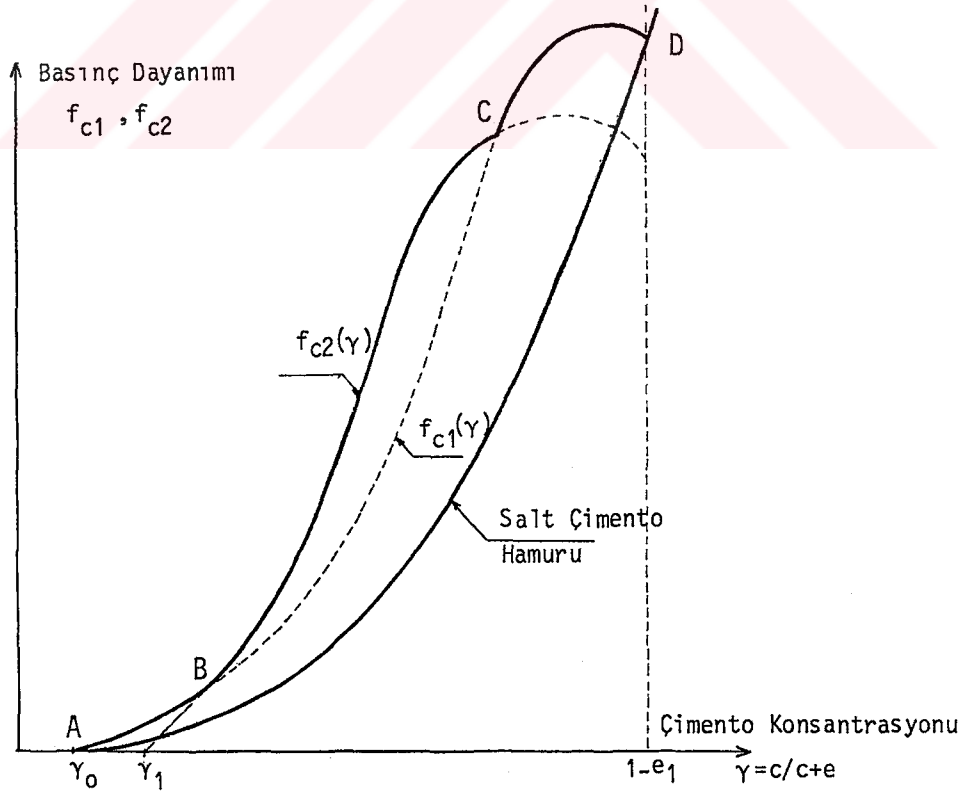
$$f_{c2} = \frac{2\alpha_2(\gamma-\gamma_1)t_{ad} h}{1-\alpha_5 b \gamma - 2\nu_a \frac{\epsilon_{oa}}{\epsilon_{1c}}} \left[ \frac{mK}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_0)} \frac{\epsilon_{1a}}{\epsilon_{1c}} \left(1 - \frac{e_1}{1-\gamma}\right)^{2/3} + 1 - mK \left(1 - \frac{e_1}{1-\gamma}\right)^{2/3} \right] \quad (57)$$

olarak elde edilirler.

Bu bağıntılardan (56) bağıntısı,  $\gamma=1$ ,  $\gamma=0$  ve  $\gamma = \frac{1}{\alpha_5 b}$  değerleri dışındaki tüm  $\gamma_0 < \gamma < 1-e_1$  değerleri için, (57) bağıntısı ise  $\gamma=1$ ,  $\gamma=0$  ve

$$\gamma = \frac{1-2\nu_a \frac{\epsilon_{oa}}{\epsilon_{1c}}}{\alpha_5 b}$$

değerleri dışındaki tüm  $\gamma_1 < \gamma < 1-e_1$  değerleri için matematikçe tanımlıdır. Bu bağıntılarla (56 ve 57) belirlenen  $f_{c1}(\gamma)$  ve  $f_{c2}(\gamma)$  eğrileri Şekil 10 da verilmektedir.



Şekil 10.  $e$  ve  $v$  nin sabit halleri için teorik basınç dayanımı eğrileri

Aynı şekil üzerinde (37) bağıntısında  $\sigma_a = \sigma_c$  yazmak suretiyle

$$f_c = \frac{\sigma_c}{\nu_c} \frac{E_c}{E'_c}$$

ya da

$$f_c = \frac{2\alpha_i(\gamma - \gamma_0)f_{ct}h}{1 - \alpha_5 b} \quad (58)$$

olarak elde edilen salt çimento hamuru dayanımını veren eğri de gösterilmiştir.

Bu şekilden de görüldüğü gibi,  $f_{c2}(\gamma)$  eğrisi  $f_{c1}(\gamma)$  eğrisinin ya devamlı üstünde kalmakta ya da onu kesmektedir. Eğer  $f_{c2}(\gamma)$  eğrisi  $f_{c1}(\gamma)$  eğrisini kesmiyorsa,  $\gamma$  değeri ne olursa olsun, betonun kırılması aderans-tan bağımsız olmaktadır. Bu durumda betonun basınç dayanımını gösteren nokta  $\gamma$ ,  $\gamma_0$  dan  $1 - e_1$  e kadar arttıkça, sadece  $f_{c1}(\gamma)$  eğrisi üzerinde A dan D ye kadar yerdeğiştirmektedir. Burada agrega petrografik yapısı beton dayanımı üzerinde sadece elastisite modülüyle etkili olmaktadır. Oysa çekme kırılmasındaki  $f_{ct1}(\gamma)$  eğrisi agrega petrografik yapısından bağımsızdır. Bu da, merkezi basınç durumunda agrega petrografik yapısı türü kadar  $f_{c1}(\gamma)$  eğrisi olduğunu göstermektedir. Aksine eğer  $f_{c2}(\gamma)$  eğrisi  $f_{c1}(\gamma)$  eğrisini B ve C gibi iki noktada kesiyorsa betonun iki kırılma şekli ortaya çıkmaktadır. Ayrıca  $\gamma$  nın sıfırla  $\gamma_0$  arasındaki değerleri için dayanım yine sıfır olmaktadır.

$\gamma$  nın  $\gamma_0$  ile B noktasının absisi arasındaki değerleri için beton basınç dayanımını gösteren nokta  $f_{c1}(\gamma)$  eğrisi üzerinde A dan B ye yerdeğiştirir ve bu birinci şekil kırılmayı gösterir.  $\gamma$  nın B ve C noktalarının absisleri arasındaki değerleri için kırılma aderansın fonksiyonu olmakta ve beton basınç dayanımını gösteren nokta  $f_{c2}(\gamma)$  eğrisi üzerinde B den C ye yerdeğiştirmektedir. Bu kırılma ise ikinci şekil kırılma olarak adlandırılmaktadır.

Son olarak  $\gamma$  nın C noktasının absisinden büyük değerleri için aderans hala yeterli olmakla beraber, kırılmanın artık aderans sökülmesiyle meydana gelebilmesi için yeterli miktarda agrega bulunmamaktadır. Bu durumda beton basınç dayanımı yeniden  $f_{c1}$  e eşit olmakta ve bu dayanımı gösteren nokta  $f_{c1}(\gamma)$  eğrisi üzerinde C den D ye yerdeğiştirmektedir.

Bu kırılma da tekrar birinci şekil kırılma olmaktadır.

Burada betonun basınç dayanımının daima bu betona karşılık gelen salt çimento hamuru dayanımından daha büyük olduğunu ve aradaki farkın agrega elastisite modülüyle arttığını belirtmek mümkün olmaktadır.

## 2.5 Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki Bağlılıklar, Basınç Dayanımının Yaklaşıklığı ve Harçtan Betona Geçiş

### 2.5.1 Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki Bağlılıklar

$\sigma_a$  ve  $\sigma_c$  sırasıyla agrega ve çimento hamuruna etkiyen ortalama basınç gerilmelerini göstermek üzere, (4) ve (37) bağıntılarından, betonun çekme ve basınç dayanımları arasındaki ifade;

$$f_{c1} = \frac{f_{ct1}}{v_c} \left( 1 + \frac{\sigma_a}{\sigma_c} \frac{s_a}{s} \right) \frac{E_c}{E'_c} \quad (59)$$

olarak elde edilir. Bu bağıntı, birinci şekil kırılma durumunda sözkonusu olmaktadır. Betonun çekme ve basınç dayanımları arasında ikinci şekil kırılma durumunda geçerli olan bağıntı ise, (7) ve (43) ifadelerinden,  $\sigma'_a$  ve  $\sigma'_c$  çekme etkisindeki gerilmelere karşılık gelmek üzere;

$$f_{c2} = \frac{f_{ct2}}{v_c - v_a} \frac{\frac{\sigma_a}{\sigma_c} \frac{s_a + \frac{\sigma_c}{\sigma_a} s_c}{\frac{\epsilon_{0a}}{\epsilon_{1c}}}}{\frac{\sigma'_a}{\sigma'_c} \frac{s_a + \frac{\sigma'_c}{\sigma'_a} s_c}} \frac{E_c}{E'_c} \quad (60)$$

şeklinde elde edilir.

Böylece, aynı betonun basınç ve çekme dayanımları birbirine bağlanmış olmaktadır.  $f_{ct1}/f_{c1}$  ve  $f_{ct2}/f_{c2}$  oranlarının betonun gevrekliğini karakterize ettiği de bilinmektedir (17,18).

### 2.5.2 Beton Basınç Dayanımının Yaklaşıklığı

Pratikte, bir beton elemanın taşıyabileceği sınır basınç yükünün o elemanın kesitine oranı basınç dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Oysa,

çekmedekinin aksine, basınç kırılması yavaşça ve aşamalı olarak meydana gelmektedir (4,18). Gerçekten de basınç kırılması L'Hermite'in (19) betonun önkırılması olarak adlandırdığı ilk boyuna çatlakların oluşmasıyla başlamakta ve kırılma bu çatlakların gelişimini takiben meydana gelmektedir.

İlk yaklaşım olarak beton, önkırılmaya kadar çatlaksız bir malzeme olarak dikkate alınabilirse de, bu sınır durumdan sonraki aşamalarda böyle bir kabul geçersiz kalmaktadır. Zira beton numune artık merkezi basınç durumuyla bağdaşmayan iç etkiler altında tüm gerçekleriyle göçerek, parçalara ayrılmaktadır. Bu da tam (son) kırılma dayanımının halen uygulanan deney yöntemiyle belirlenemediğini, belirlenen dayanımın gerçek dayanım olmadığını göstermektedir.

Kırılma mekanizmasının incelenmesi, her bir agregayı tekil olarak düşünmeye imkan vermektedir. Oysa, aynı tür mineral için bile aderans da agrega dayanımı gibi bir taneden diğerine değişebilmektedir. Diğer taraftan, gerilme dağılımı eşit yayılı olmadığı gibi, aderans bölgesi de her noktada eşit gerilme altında değildir.

Buradan, kırılmaların aderans bölgesinde ya da agregalarda aynı anda ve aynı dış yük değeri altında meydana gelmediği sonucuna varılmaktadır. En çok yüklü ve en zayıf aderans bölgeleri ya da agregalar ilk olarak kırılmakta ve böylece meydana gelen ilk çatlaklar tüm numune boyunca agregadan agregaya gelişmektedir.

Bu durumda önkırılmanın aderansı karakterize eden  $f_{adt}$  nin en küçük değerine karşılık gelen  $f_{c2}$  ya da  $f_{at}$  değerinin en küçüğüne karşılık gelen  $f'_{c2}$  ile belirlenebileceği söylenebilir.

Tam kırılma, bu faktörlerin en büyüğüne karşılık getirilebilir. Ancak, bu durumda sonuçların önemli derecede dağılım göstereceği açıktır. Diğer taraftan, bir numuneden diğerine farklı olabilecek ilk çatlama nedeniyle bu dağılım daha da artmaktadır.

### 2.5.3 Harçtan Betona Geçiş

Burada  $c_1$ ,  $e_1$ ,  $a_1$  ve  $v_1$  sırasıyla çimento, su, agrega ve hapsedilmiş hava miktarlarını göstermek üzere bu miktarlarla tanımlanan bir harç dikkate alınır. Bu harç içine iri taneli agregaların ilave edilmesi durumunda  $c_2$ ,  $e_2$ ,  $a_2$  ve  $v_2$  miktarlarıyla tanımlanan bir beton elde edilir.

Buna göre;

$$c_1 + e_1 + a_1 + v_1 = c_2 + e_2 + a_2 + v_2 = 1$$

eşitliği yazılabilir. İri agregaya ilavesinden sonra  $v_1 = v_2 = v$  olduğu kabul edilirse;

$$c_1 + e_1 = 1 - v - a_1$$

$$c_2 + e_2 = 1 - v - a_2$$

olarak yazılır. Çimento konsantrasyonu ( $\gamma$ ) değişmediğinden;

$$c_1 + e_1 = \frac{c_1}{\gamma}$$

$$c_2 + e_2 = \frac{c_2}{\gamma}$$

ya da

$$c_1 = \gamma(1 - v - a_1)$$

$$c_2 = \gamma(1 - v - a_2)$$

şeklinde yazılır ve bu durum genelleştirilirse;

$$c = \gamma(1 - v - a)$$

ifadesi elde edilir.

Bu bağıntıdan görüldüğü gibi,  $\gamma$  nın sabit değeri için agregaya oranı ( $a$ ) arttıkça, çimento oranı ( $c$ ) azalmaktadır. Betonun basınç ya da çekme dayanımını veren bağıntılar dikkate alındığında  $f'_{ct2}$ ,  $f'_{c2}$ ,  $f_{ct2}$  ve  $f_{c2}$  nin, sabit  $\gamma$  değeri için  $a$  nın artan birer fonksiyonu oldukları görülmektedir (bkz. (21), (22), (49), (50) nolu bağıntılar). Diğer bir deyişle, beton içindeki boşluk oranını artırmadan agregaya ilave edildikçe toplam hacme göre çimento oranı azaldığı halde dayanımlar artmaktadır. Bu da, beton dayanımının sadece betondaki çimento oranına bağlanmasının hatalı olduğunu ortaya koymaktadır.

## BÖLÜM 3

### AGREGA PETROGRAFİK YAPISININ BETONUN DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

#### 3.1 Giriş

Beton dayanımına etki eden diğer faktörler yanında agrega petrografik yapısının da bu dayanım üzerindeki etkisinin belirlenmesi gereklidir. Zira, agrega petrografik yapısı demek, aynı zamanda agreganın doğası demek olduğundan, fiziksel ve mekanik özelliklerinden çimento hamuru ile olan adrensine kadar betonun yapısıyla doğrudan ilgili olması gereken bu durumu gözardı etmenin gerçekçi olması beklenemez. Diğer bir deyişle, bir beton agrega petrografik yapısı dikkate alınmadan bilinen kurallara uygun olarak üretilse bile, agrega petrografik yapısının neden olduğu dayanım sapmalarıyla karşılaşılması mümkündür. Gerçekten, 13 Mart 1992 Erzincan Depreminde meydana gelen yapı hasarlarında beton dayanım düşüklüğünün önemli derecede bir payı olduğu, bu dayanım düşüklüğüne, yapılan genel hatalar yanında, kullanılan Fırat Nehri agregası petrografik yapısının da etkidiği görülmüştür (20,21).

Bu bölümde agrega petrografik yapısının beton dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla üretilen, sadece agrega petrografik yapıları bakımından birbirinden farklı, bir dizi mikrobeton numune üzerinde gerçekleştirilen eğilme ve merkezi basınç deneyleri ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

#### 3.2 Deney Yöntemi

Bu çalışmada uygulanan deney yöntemi, granit, bozulmuş granit, mermer, kuvars ve granülometrisinin bir kısmı mermerle değiştirilmiş agregalarla üretilen mikrobeton numunelerin eğilme ve merkezi basınç dayanımlarını, beton bileşim parametreleri, üretim, muhafaza ve deney koşulları aynı kalmak

üzere sadece agregaya petrografik yapısının değişimine bağlı olarak, karşılaştırmaktan ibarettir.

Üretim ve deney koşullarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ön çalışmalar ışığında deneylerin aşağıda belirtilen üç grupta yapılması kararlaştırılmış ve böylece;

1. Çimento konsantrasyonunun (c, e ve v sabit olmak üzere)  
 $\gamma = 0.335$  değeriyle 3 seride 22 üretim,
2. Çimento konsantrasyonunun (c ve v sabit, e değişken olmak üzere)  
 $\gamma = 0.278, 0.304, 0.335$  ve  $0.373$  değerleri ile 8 seride 32 üretim,
3. Çimento konsantrasyonunun (e ve v sabit, c değişken olmak üzere)  
 $\gamma = 0.06, 0.105, 0.190, 0.260, 0.319$  ve  $0.369$  değerleri ile 4 seride 24 üretim

olmak üzere toplam 15 seride 78 üretimle, her birinde üçer numune bulunan  $3 \times 78 = 234$  adet deney numunesi hazırlanmıştır. Böylece bu numuneler üzerinde 234 'ü eğilme,  $2 \times 234 = 468$  'i merkezi basınç deneyi olmak üzere toplam 702 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu üretimler toplu olarak Çizelge 1 de verilmektedir.

Bir kısım deneyler, en küçük agregaya boyutunun adersans dolayısıyla dayanımlar üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla, granülometrisinde taşunu (0-0.075 mm) bulunan mikrobeton numuneler üzerinde tekrarlanmıştır.

### 3.3 Agregaların Temini ve Petrografik Yapıları

Üretimlerde kullanılan agregalardan granit ve bozulmuş granit Trabzon ili Çaykara-Uzungöl karayolu 12. km'sinin sol şevinden; dasit, Of-Çaykara karayolu Çaykara girişi sağ şevinden alınmıştır. Trabzon ve yöresinde bilinen, belli bir kuvars damarına rastlanmadığından bu kayalık Arsin-Araklı arasında bulunan Yeşilyalı (Falkoz) deresinin denize kavuştuğu yerde biriken sürüntü maddesi içinden seçilerek; mermer ise piyasada Marmara Mozayığı olarak adlandırılan mozaikten satın alınmak suretiyle temin edilmiştir.

Bu şekilde laboratuvara getirilen agregalar en büyük tane boyutu 4-6 mm olacak şekilde, bir kısmı el tokmağıyla, bir kısmı da küçük çeneli kırıcıda özenle kırıldıktan sonra, TS 1226 ve TS 1227 (22,23)'ye uygun olarak imal edilen elek takımıyla (4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm) elenip 5 sınıfa ayrılmıştır. 0.25 mm'lik eleğin altında kalan kısımlar da 0.075

Çizelge 1. Gerçekleştirilen üretimlerin toplu olarak gösterilimi

ÜRETİM (NUMUNE) NO	SERİ NO	AGREGA	ÇİMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	SU (kg/m <sup>3</sup> )	γ	AÇIKLAMA
01-07	1	B.GRANİT+MERMER				Taşunsuz
08-15	2	B.GRANİT+MERMER	400	260	0.335	Taşunlu
16-22	3	GRANİT+MERMER				Taşunsuz
23-26	4	B.GRANİT				Taşunlu
27-30	5	B.GRANİT		220	0.373	Taşunsuz
31-34	6	B.GRANİT+MERMER		260	0.335	Taşunlu
35-38	7	B.GRANİT+MERMER	400	300	0.304	Taşunsuz
39-42	8	GRANİT		340	0.278	Taşunlu
43-46	9	GRANİT				Taşunsuz
47-50	10	GRANİT+MERMER				Taşunlu
51-54	11	GRANİT+MERMER				Taşunsuz
55-60	12	GRANİT	50		0.06	
61-66	13	GRANİT+MERMER	100		0.105	
67-72	14	MERMER	200	280	0.190	Taşunsuz
73-78	15	KUVARS	300		0.260	
			400		0.319	
			500		0.369	



(No: 200) ve 0.15 mm (No:100) 'lik eleklerle kendi arasında 3 sınıflı ayrılmıştır. Böylece agregalar 0-0.075 mm 'lik kısmı taşunu olmak üzere; 0-0.075 mm, 0.075-0.15 mm, 0.15-0.25 mm, 0.25-0.50 mm, 0.50-1 mm, 1-2 mm ve 2-4 mm'lik sınıflara ayrılmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Deneylerde kullanılan agregalar

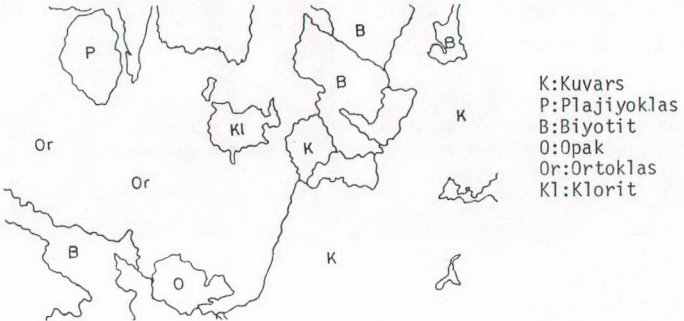
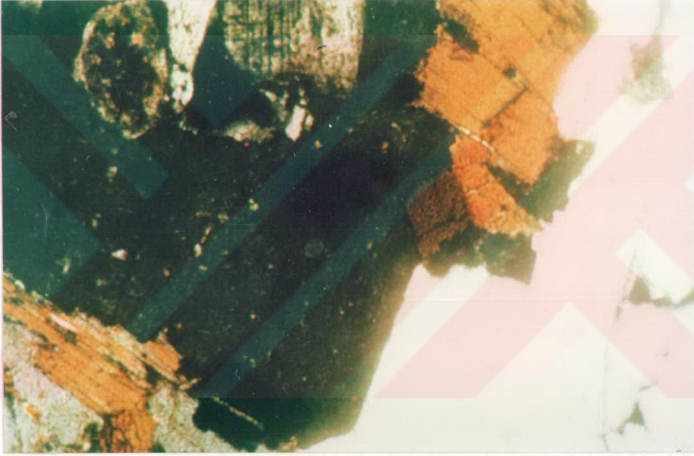
Daha sonra her cins agreganın 2-4 mm lik kısımları üzerinde, TS3526 (24) ya uygun olarak yapılan deneylerle mikrobeton bileşim hesaplarında kullanılmak üzere agrega özgül kütlesi, su emme yüzdesi, doğal nem yüzdesi ve doyma suyu değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar Çizelge 2 de verilmektedir.

Çizelge 2. Kullanılan agregalara ait bazı fiziksel özellikler

AGREGA	Doğal Nem (%)	Su Emme (%)	Doyma Suyu (%)	DKY Birim Kütle (gr/cm <sup>3</sup> )
GRANIT	0.298	0.862	0.564	2.626
BOZUL. GRANIT	0.598	1.461	0.863	2.572
MERMER	0.545	0.920	0.375	2.800
KUVARS	0.125	0.834	0.709	2.588
DASIT	1.560	2.49	0.93	2.612

Agregaların depolandığı yerin bağıl nemi bir higrometre yardımıyla sürekli olarak denetim altında tutulmuştur.

Eğilme ve merkezi basınç deneyleri için mikrobeton numunelerin üretiminde agrega olarak granit, bozulmuş granit, mermer, kuvars ve mikrobetonların akışkanlık deneylerinde ise bu kayalara ek olarak dasit de kullanılmıştır. Kayaların petrografik yapısının belirlenmesi için lam üzerinde ince kesitleri çıkarılarak bu kesitlerin, petrograf mikroskobu ile, % olarak mineralojik bileşimleri tayin edilmiştir. Bu kayaların ince kesit fotoğrafları Şekil 12, 13 ve 14 de, mineralojik bileşimleri ise Çizelge 3 de verilmektedir.



Şekil 12. Granit'in ince kesiti



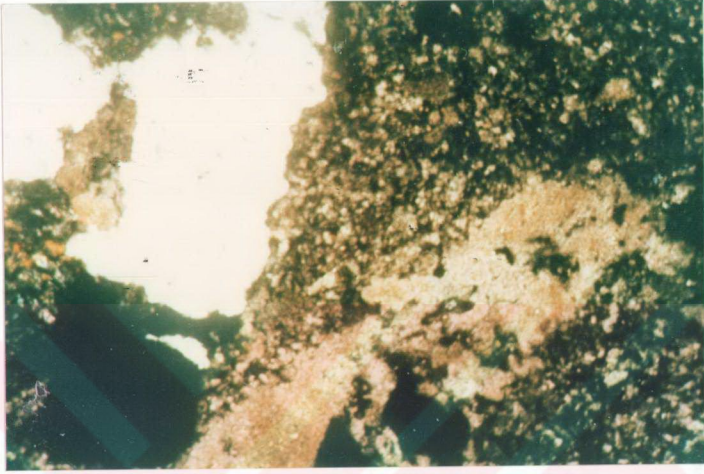
K: Kuvars

KI: Klorit

P: Plajiyoklas

KO: Kaolenleşmiş Ortoklas

Şekil 13. Bozulmuş granitin ince kesiti



K: Kuvars      O: Opak      P: Plajiyoklas

Şekil 14. Dasit'in ince kesiti

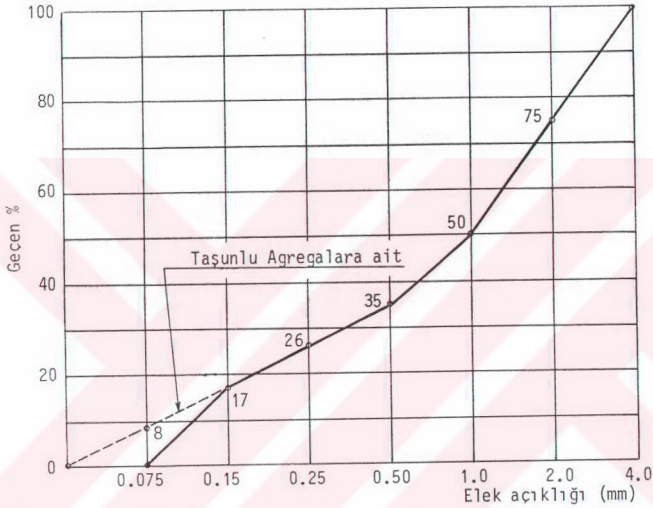


Çizelge 3. Kullanılan agregaların mineralojik bileşimleri

Kayacın Adı : Biotitli GRANİT		
Yapısı	Taneli (Yer yer yazı)	
Mineral	Oran (%)	Açıklama
Plajiyoklas	30	Çok az serisitleşmiş
Kuvars	30	Ksenomorf, Bol çatlaklı, kısmen dalgalı sönmeli
Ortoklas	30	Ksenomorf. Çok az bozulmuş
Biyotit	7	Subotomorf
Hornblend	3	---
Kayacın Adı : Biotitli BOZULMUŞ GRANİT		
Yapısı	Taneli	
Mineral	Oran (%)	Açıklama
Kuvars	45	Ksenomorf. Bolca kırıklı, çatlaklı, Dalgalı sönmeli
Ortoklas	25	Bolca kaolenleşmiş
Plajiyoklas	20	Orta derecede serisitleşmiş
Biyotit	10	Kısmen kloritleşmiş
Epidot	-	Plajiyoklasın ayrışma ürünü şeklinde ve çok az
Kayacın Adı : DASİT		
Yapısı	Mikrogronü Porfirik	
Mineral	Oran (%)	Açıklama
Plajiyoklas	50	Kısmen bozulmuş
Kuvars	50	Genelde mikrotaneler var Kısmen iri kristalli
Epidot	-	Plajiyoklasın ayrışma ürünü şeklinde ve çok az
Kayacın Adı : MERMER		
Mineral	Oran (%)	Açıklama
Kalsit	100	İri kristalli
Kayacın Adı : KUVARS		
Mineral	Oran (%)	Açıklama
Kuvars	96	%4 oranında Klorit ve Zeolitli

### 3.4 Agregaların Granülometrik Bileşimi

Mikrobetonların üretiminde kullanılan agrega granülometri eğrileri Şekil 15'de verilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada tane boyutu 0-0,075 mm arasında olan agrega sınıfı taşunu olarak adlandırılmıştır.



Granülometrik Sınıflar (mm)	Toplam Ağırılığın Yüzdesi	
	Taşunlu	Taşunsuz
0 - 0.075	8	-
0.075 - 0.15	9	17
0.15 - 0.25	9	9
0.25 - 0.50	9	9
0.50 - 1.0	15	15
1.0 - 2.0	25	25
2.0 - 4.0	25	25

Şekil 15. Agregaların granülometrik bileşimi

## 3.5 Kullanılan Çimento

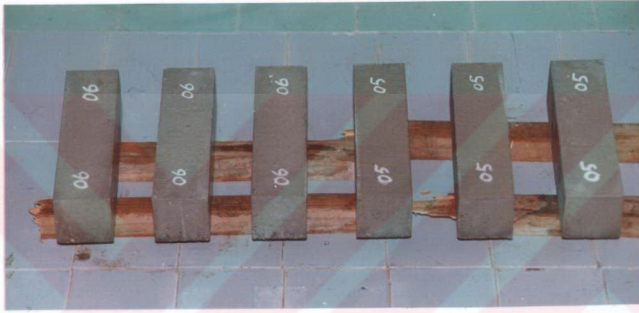
Bütün üretimlerde Ünye Çimento Fabrikası'nda TS10156 (25) ya göre üretilmiş, karakteristik basınç dayanımı  $325 \text{ kgf/cm}^2$  olan, KÇ 32.5 çimentosu kullanılmıştır. Çimento, üretim tarihinden 1 gün sonra satın alınarak, özelliklerinin tüm üretimler boyunca aynı kalmasını sağlamak için kapalı naylon torbalar içinde muhafaza edilmiştir. Bu çimentonun özellikleri Çizelge 4 'de verilmektedir.

Çizelge 4. Kullanılan çimentonun özellikleri

Türü : KÇ 32.5 (TS 10156) Üreten : Ünye Çimento San. ve Tic. A.Ş. Analiz Tarihi : 28.08.1993					
KİMYASAL ANALİZLER		%	FİZİKSEL DENEYLER		
Silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ )	20.78		Özgül Ağırlık ( $\text{g/cm}^3$ )	3.03	
Alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	5.54	İNCELİK	Özgül Yüzey (Blaine)( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	3349	
Demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	2.56		200 $\mu$ elek üzerinde kalan %	0.0	
Kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ )	65.74		90 $\mu$ elek üzerinde kalan %	3.2	
Mağnezyum oksit ( $\text{MgO}$ )	1.40		Priz Süresi Saat (Vicat)	Başlangıç	$2^{00}$
Kükürt trioksit ( $\text{SO}_3$ )	3.13			Bitiş	$3^{15}$
Sodyum oksit ve Potasyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}+0,658 \text{ K}_2\text{O}$ )	0.91				
Serbest Kireç ( $\text{CaO}$ )	0.59		Toplam Hacim Genleşmesi (mm)		0.0
Kızdırma kaybı	3.56	MEKANİK DENEYLER			
Çözünmeyen kalıntı	11.72	Gün	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	
Ölçülemeyen	1.27				
Trikalsiyum silikat ( $\text{C}_3\text{S}$ ) ( $3\text{CaO-SiO}_2$ )	59.82	2	3.80	19.30	
Dikalsiyum silikat ( $\text{C}_2\text{S}$ ) ( $2\text{CaO-SiO}_2$ )	14.53	7	5.30	29.30	
Trikalsiyum alüminat ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ( $3\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ )	10.35	28	7.30	41.30	
Tetrakalsiyum alüminoferrit ( $4\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) ( $\text{C}_4\text{AF}$ )	7.78	Not: Potansiyel bileşim Bogue denklemleri ile hesaplanmıştır.			

### 3.6 Deney Numuneleri ve Üretimleri

Bu çalışmanın ilgilendiği alanda geleneksel betonlar üzerinde yapılan deneyler, mikrobetonlar için de geçerli olmaktadır (11,18). Bu nedenle deneyler, laboratuvarın mevcut araç-gereç ve diğer koşulları da dikkate alınarak, araştırma kolaylığı için 40 mm x40 mm x160 mm boyutlarında üretilen prizmatik harç numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. Deney numuneleri

Agrega, çimento ve su, TS802 (26) de belirtilen, mutlak hacimler yöntemine göre önceden hesaplanan miktarlarda 0.1 g hassasiyetli terazi-de tartılarak hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan beton bileşenlerinden önce agregaya, otomatik karıştırıcının (Şekil 17) her üretimden önce kuru ve temiz oluşuna dikkat edilen kovasına konarak 1 dakika, karıştırıcı durdurulmadan çimento ilavesinden sonra homojen karışım elde etmek amacıyla 2 dakika, bunun ardından karışıma yavaşça su ilave edilerek 2 dakika daha karıştırılmıştır. Bu şekilde elde edilen mikrobeton, bekletilmeden daha önce temizlenip yağlanmış halde sarsma tablasının üzerinde bulunan TS24 (27) 'e göre imal edilmiş üçlü çelik kalıba (Şekil 18) her bir tabaka 30-40 s süreyle sarsılmak suretiyle dört tabaka halinde yerleştirilmiştir.

Kalıplara yerleştirilen mikrobetonlar, yüzeyleri düzeltilerek 24 saat kalıplarında saklanmıştır. Bu süre sonunda kalıplarından mikroçatlak oluşumuna imkan vermeyecek şekilde özenle çıkarılan numuneler üzerine



üretim numaraları yazılmış ve hemen ardından bunların hava içerikleri kontrol edilerek farklı olan numuneler deney harici tutulmuştur.



Şekil 17. Otomatik karıştırıcı



Şekil 18. Sarsma tablası ve üçlü çelik kalıp

### 3.6.1 Farklı Hava İçeriğine Sahip Numunelerin Ayıklanması

Agrega petrografik yapısının beton ya da mikrobetonların dayanımları üzerindeki etkisi araştırıldığından, tüm üretimlerde dayanıma etkiyen faktörlerden sadece petrografik yapının değiştiğinden emin olmak gerekmektedir. Zira bileşime giren agregası, su ve çimentonun oranlarını; üretim, muhafaza ve deney koşullarını, hatta yapıları farklı olduğu halde özgül kütleleri birbirine çok yakın olan agregaları belirleyip, bunların her üretimde aynı kalmasını sağlamak güç değildir. Ancak, aynı hapsedilmiş hava içeriğine sahip numuneler üretmek ise pek kolay değildir. Gerçekten, bunu agregası petrografik yapısı ve uygulanan vibrasyon enerjisi son derece etkilemektedir.

Bu nedenle, yukarıda belirtildiği gibi, agregası petrografik yapısının betonun özellikleri üzerindeki etkisini belirleyebilmek için numunelerin aynı hapsedilmiş hava içeriğine sahip olması da zorunludur.

Kalıplara yerleştirilmesi esnasında aynı vibrasyon enerjisi uygulanan numunelerin kompasitesi akışkanlık arttıkça artmaktadır. Bu durumun dikkate alınmaması halinde agregası petrografik yapısı değiştikçe meydana gelen dayanım değişimlerini bu yapıya atfetmek doğru olmaz.

Bununla beraber sadece akışkanlığın ölçülmesi de aynı hapsedilmiş hava miktarına sahip numunelerin üretimi için döküm koşullarının belirlenmesine imkan vermediğinden, bu amacı gerçekleştirmek için başka bir yöntem kullanmak gerekmektedir. Böylece, üretim çeşitliliğinin çok fazla olması nedeniyle çimento hamurunun katılaşmasından önce her numune için hava miktarının tayini zor ve zaman alıcı işlemleri gerektirdiğinden bu ölçümleri katılaşma sonrasında yapmak, bu deneyler için, daha uygun olmaktadır. Zira, bağlayıcının katılaşmasından önce bu amaçla gerçekleştirilen deneyler numunelerdeki hapsedilmiş hava miktarı hakkında yeterli bilgi vermemektedir.

Başka bir yol olarak, tahripkâr ölçümler uygun gözükse de bu ölçümler, mekanik işlemleri gerektirdiğinden, uzun zaman almakta ve ölçülmesi istenen kompasiteyi değiştirebilmektedir.

Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada, farklı hava içeriğine sahip numunelerin ayıklanması için daha basit ve hassas bir yöntem uygulanmıştır.

Bu yöntem, numunelerin kompasitesini tayin etmekten ibarettir. Bunun için de numunelerin özgül ve birim kütlelerini belirlemek yeterli olmaktadır. Özgül kütle ( $\delta$ ) numune kütlelerinin dolu hacmine ( $V_d$ ) oranı olduğundan;

$m_a$ ,  $m_c$  ve  $m_e$  sırasıyla bu hacimdeki agrega, çimento ve su kütlelerini göstermek üzere bu oran;

$$\delta = \frac{m_a + m_c + m_e}{V_d} \quad (61)$$

bağıntısıyla belirlenmiştir. Birim kütle ( $\Delta$ ) ise, kalıplarından çıkarılan numunelerin havada ve suda tartılması suretiyle,  $M_1$  ve  $M_2$  sırasıyla numunelerin havadaki ve sudaki kütlelerini göstermek üzere;

$$\Delta = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \quad (62)$$

bağıntısıyla hesaplanmış ve numune kompasitesi

$$k = \frac{\Delta}{\delta} \quad (63)$$

ifadesiyle belirlenmiştir. Bu bağıntıdan da görüldüğü gibi, numunelerin kompasitesi ( $k$ ), sadece hava içeriklerine bağlı olmaktadır. Bunun için, üretilen numunelerden sadece  $k$  değerleri %94 civarında pratik olarak birbirine eşit olanlar eğilme ve merkezi basınç deneylerine tabi tutulmuş, farklı olanlar ise atılmıştır. Bu eşitlik, kompasitesi %94 olan referans numunesine göre  $\pm\%3$  hassasiyetle sağlanabilmiştir.

### 3.7 Numunelerin Muhafaza Koşulları ve Deney Anındaki Yaşları

Madde 3.6.1 de belirtilen yöntemle kompasiteleri belirlenen numuneler, içindeki su sıcaklığı  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  olan bir kür tankına yerleştirilmiştir (Şekil 19). Bu tankta 27 gün bekleyen numuneler sudan çıkarılıp, 1 gün laboratuvar atmosferinde bekletildikten sonra deneylere tabi tutulmuştur.

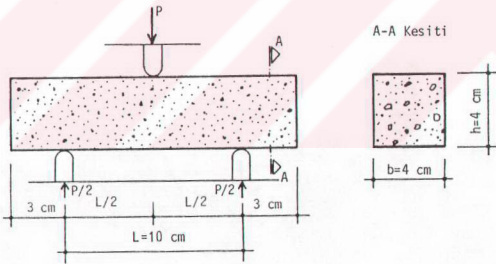
### 3.8 Deneylerin Yapılması ve Kullanılan Aletler

Üretimlerinden 28 gün sonra, deneyler için hazır hale gelen numuneler üzerinde önce eğilme deneyleri yapılmıştır.

Eğilme dayanımlarının belirlenmesi için 10 cm açıklıklı iki sabit mesnet üzerine döküm doğrultusuna dik ve simetrik olarak yerleştirilen numuneler, açıklığın ortasından tekil yükü yüklenerek kırılmışlardır (Şekil 20).



Şekil 19. Kür tankındaki numuneler



Şekil 20. Numunelerin eğilme deneyi

Eğilme dayanımlarının belirlenmesinde, skalasından doğrudan okuma yapılabilen 630 kgf kapasiteli Tonitechnik marka Michaelis deney aleti kullanılmıştır (Şekil 21).

Bildiği gibi,  $F$  kırılma yükünü (kgf),  $L$  numune mesnetleri arasındaki açıklığı (cm),  $b$  ve  $h$  sırasıyla numunenin genişlik (cm) ve yüksekliği (cm) göstermek üzere eğilme dayanımı;





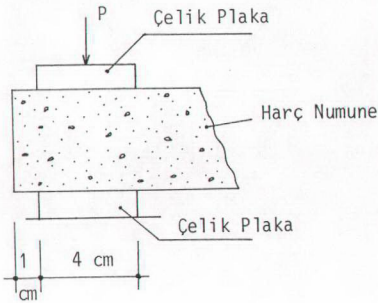
Şekil 21. Michaelis deney aleti

$$f_{ct} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada ise bu değerler doğrudan aletin skalasından alınmıştır.

Merkezi basınç deneyleri ise, eğilme deneyleri sonucunda elde edilen numune parçaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler de döküm doğrultusuna dik olarak, 40 mm x 40 mm boyutlarında çelik plakalar yardımıyla yapılmıştır (Şekil 22 a).



(a)



(b)

Şekil 22. Merkezi basınç deneyi ve yükleme çerçevesi

Merkezi basınç dayanımlarının belirlenmesinde yükleme çerçevesi (Şekil 22 b) ile 60 ton kapasiteli Losenheimwerk marka üniversal deney aleti kullanılmıştır (Şekil 23).

Merkezi basınç dayanımı,  $F$  kırılma yükünü (kgf) ve  $a$  kare plakaların bir boyutunu göstermek üzere;

$$f_c = \frac{F}{a^2} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır.



Şekil 23. Üniversal deney aleti

### 3.9 Sabit Çimento Konsantrasyonuna ( $c$ , $e$ ve $v$ sabit) Sahip Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

Betonun karma suyu oranı arttıkça aderans dayanımının azaldığı bilin-  
diğinden, numune üretimleri önce  $\gamma=0,421$  ( $E/C=0,45$ ) değeri için yapılmıştır.  
Ancak, bu durumda mikrobetonun işlenebilirliği azaldığından, numune içinde-  
ki hapsedilmiş hava miktarı artmakta dolayısıyla kompozitleri arasındaki  
fark büyümektedir. Bu farkı ortadan kaldırmak, diğer bir deyişle hapsedil-  
miş hava içeriği referans numunelerinkine eşit numuneler üretmek için  
 $\gamma=0,335$  ( $E/C=0,65$ ) değeri kullanılmıştır.

Mermer agregasının numune dayanımları üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla yönelik bu deneyler, mikrobeton bileşimindeki bozulmuş granit agregasının, granülometrik sınıflara göre giderek artan bir şekilde, mermerle değiştirilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bu üretimler ve elde edilen deney sonuçları Şekil 24 a, b ve c de verilmektedir.

Birinci seri olarak gerçekleştirilen deneylerde, önce taşunsuz bozulmuş granit agregası ile  $260 \text{ kg/m}^3$  su ve  $400 \text{ kg/m}^3$  çimento kullanılarak bir üretim yapılmıştır. Bu üretimden sonra, bozulmuş granit agregasının granülometri eğrisinde  $0.075-0.15 \text{ mm}$  arasında bulunan kısmı yerine mermer konarak ikinci bir üretim yapılmış ve bu işlem, bozulmuş granitin tümü mermerle değiştirilinceye kadar, bileşimlerdeki çimento ve su miktarları sabit kalacak şekilde tekrarlanmıştır (Şekil 24 a).

Taşunun mikrobetonların dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için aynı su ve çimento miktarları ile sabit çimento konsantrasyonlu numuneler üreterek gerçekleştirilen deneyler ise Şekil 24 b de verilmektedir. İkinci seri olarak gerçekleştirilen bu üretimlerin yukarıda anlatılan birinci seri üretimlerden farkı, granülometri eğrisinde  $0-0.075 \text{ mm}$  lik kısmın (taşunu) bulunmasıdır.

Üçüncü seri deneyler ise, aynı şekilde taşunsuz granit agregasının mermerle değiştirilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler de Şekil 24 c de verilmektedir.

Bu şekillerden görüldüğü gibi, bileşimde bulunan bozulmuş granit mermerle değiştirildikçe, diğer bir deyişle granülometrideki mermer oranı arttıkça, numunelerin eğilme ve merkezi basınç dayanımları artmaktadır. Granülometride taşunu kullanılması durumunda ise bu dayanımlar daha da artmaktadır.

### 3.10 Değişken Çimento Konsantrasyonuna Sahip Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

Burada, sırasıyla çimento ya da su miktarlarının sabit olması hallerinde, değişken çimento konsantrasyonu için gerçekleştirilen deneyler verilmektedir.

Numune	Agrega Tane Boyutları (mm)							Eğilme Dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )	Basınç Dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
	0,075	0,15	0,25	0,5	1	2	4		
1								49,86	251,25
2								52,60	254,38
3								50,73	259,38
4								55,12	268,75
5								58,00	295,63
6								61,20	292,50
7								68,88	306,88



Mermer



Bozulmuş Granit

(a)

Numune	Agrega Tane Boyutları (mm)								Eğilme Dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )	Basınç Dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
	0	0,075	0,15	0,25	0,5	1	2	4		
1									57,83	265,16
2									57,17	278,75
3									60,50	269,38
4									61,70	288,13
5									63,76	283,65
6									69,23	306,88
7									71,00	312,10
8									72,60	310,10



Mermer



Bozulmuş Granit

(b)

Numune	Agrega Tane Boyutları							Eğilme Dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )	Basınç Dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
	0,075	0,15	0,25	0,5	1	2	4		
1								66,33	320,00
2								68,23	298,13
3								69,80	286,25
4								70,17	275,63
5								71,67	280,00
6								69,50	295,40
7								69,83	298,13



Mermer



Granit

(c)

Şekil 24. Agregası mermerle değiştirilen numune dayanımlarındaki artış



### 3.10.1 Değişken Su Miktarıyla Deneyler (c ve v sabit)

Agrega petrografik yapısının betonun dayanımı üzerindeki etkisinin karma suyu oranına bağlı olup olmadığının incelenmesi uygun olmaktadır. Bu amaçla deneyler, sabit çimento miktarı ( $C=400 \text{ kg/m}^3$ ) ve sabit hava içeriği için, su miktarının değiştirilmesi suretiyle, çimento konsantrasyonunun 0.278, 0.304, 0.335 ve 0.373 değerleri ile gerçekleştirilmiştir.

Agrega olarak granit ve bozulmuş granit kullanılan bu üretimler, agregaların 0.5 mm den küçük olan kısımları mermerle değiştirilerek tekrarlanmış, taşunun dayanımlar üzerindeki etkisini görmek için de tüm üretimler taşunlu ve taşunsuz olarak gerçekleştirilmiştir.

Sekiz seri halinde gerçekleştirilen bu deneylerin sonuçları Çizelge 5 de ve bu sonuçlardan elde edilen eğriler Şekil 25 de verilmektedir.

Bu şekillerden görüldüğü gibi, karma suyu oranı ne olursa olsun, granülometrisinde bir kısmı mermer agregalarla değiştirilen numune dayanımları, granit veya bozulmuş granit agregalarla üretilenlerin dayanımından daha büyük olmaktadır. Bozulmuş granit agregalı numunelerin dayanımları ise granit agregalı numunelerinkinden daima daha küçük olmaktadır.

Böylece deneysel inceleme, karma suyu oranından bağımsız olarak, agrega petrografik yapısının beton dayanımları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermeye imkan vermektedir.

### 3.10.2 Değişken Çimento Miktarıyla Deneyler (e ve v sabit)

Bu deneyler granit, mermer, kuvars ve granülometri eğrisinde 0.075-0.5 mm arasındaki kısmı mermerle değiştirilen granit agregalarla üretilen taşunsuz numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bileşimlerdeki çimento miktarları sırasıyla 50, 100, 200, 300, 400 ve 500  $\text{kg/m}^3$ , su miktarları ise her üretimde 280  $\text{kg/m}^3$  olarak seçilmiştir. Bu çimento miktarlarına karşılık gelen çimento konsantrasyonları ( $\gamma$ ) sırasıyla 0.06, 0.105, 0.190, 0.260, 0.319 ve 0.369 dur.

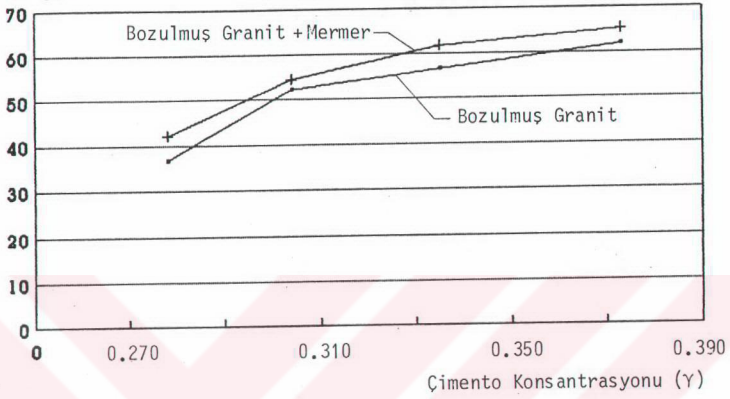
Dört seri halinde gerçekleştirilen bu deneylerin sonuçları Çizelge 6 da ve bu sonuçlardan elde edilen eğriler Şekil 26 da verilmektedir.

Çizelge 5. Agregasının bir kısmı mermerle değiştirilen numune dayanımlarındaki artış

SERİ NO	AGREGA	$\gamma$	EĞİLME DAYANIMI (kgf/cm <sup>2</sup> )	BASINÇ DAYANIMI (kgf/cm <sup>2</sup> )	AÇIKLAMA
4	BOZULMUŞ GRANİT	0.278	36.50	122.92	Taşunlu
		0.304	52.30	220.31	
		0.335	56.57	298.96	
		0.373	61.83	313.75	
5	BOZULMUŞ GRANİT	0.278	40.33	141.25	Taşunsuz
		0.304	50.07	201.25	
		0.335	54.83	248.75	
		0.373	52.67	259.38	
6	MERMER (≤0.5 mm)	0.278	42.03	141.88	Taşunlu
		0.304	54.57	226.25	
		0.335	61.67	305.21	
		0.373	65.23	403.23	
7	+ BOZULMUŞ GRANİT (0.50-4 mm)	0.278	37.67	129.48	Taşunsuz
		0.304	50.17	211.67	
		0.335	54.40	288.65	
		0.373	64.40	368.13	
8	GRANİT	0.278	41.30	150.21	Taşunlu
		0.304	54.57	241.98	
		0.335	62.33	323.75	
		0.373	60.50	352.81	
9	GRANİT	0.278	38.77	137.60	Taşunsuz
		0.304	51.93	198.44	
		0.335	59.50	264.38	
		0.373	63.93	333.96	
10	MERMER (≤0.5 mm)	0.278	36.33	161.88	Taşunlu
		0.304	51.60	239.69	
		0.335	65.86	360.31	
		0.373	71.83	434.06	
11	+ GRANİT (0.5-4 mm)	0.278	46.57	129.79	Taşunsuz
		0.304	57.00	225.21	
		0.335	66.60	328.33	
		0.373	70.40	390.94	

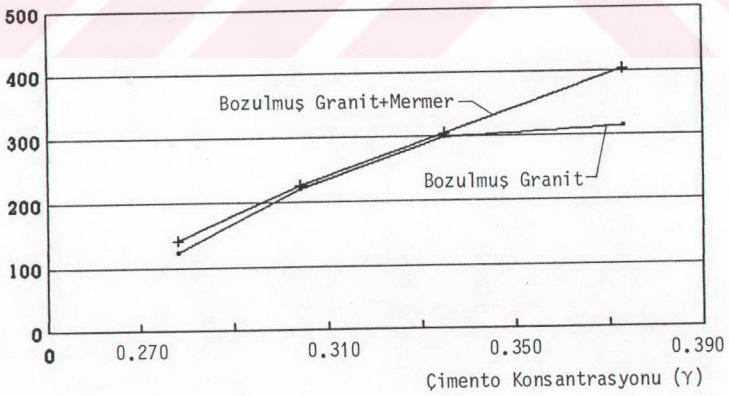
Eğilme Dayanımı  
 $f_{ct}$ , kgf/cm<sup>2</sup>

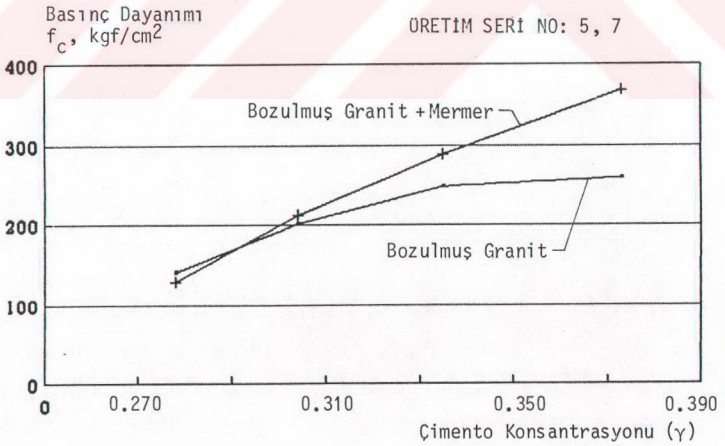
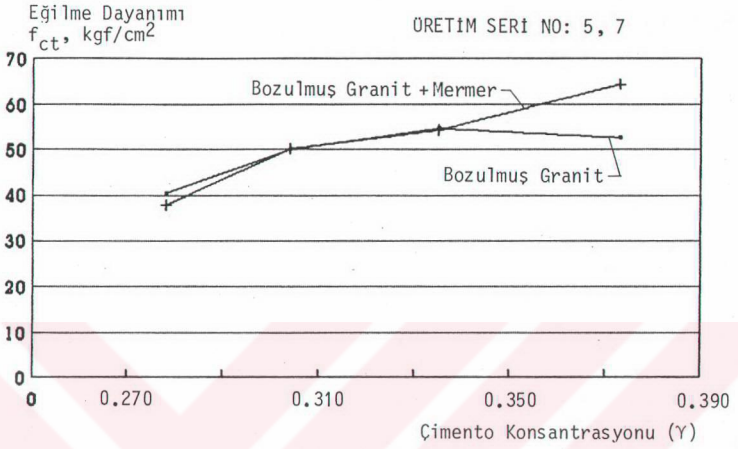
ÖRETİM SERİ NO: 4, 6

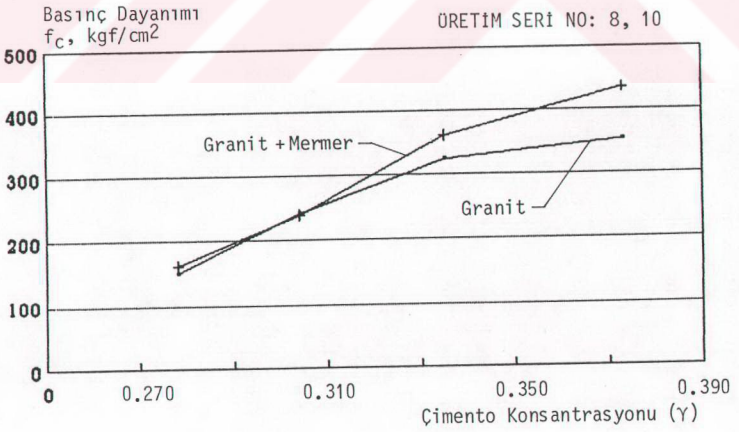
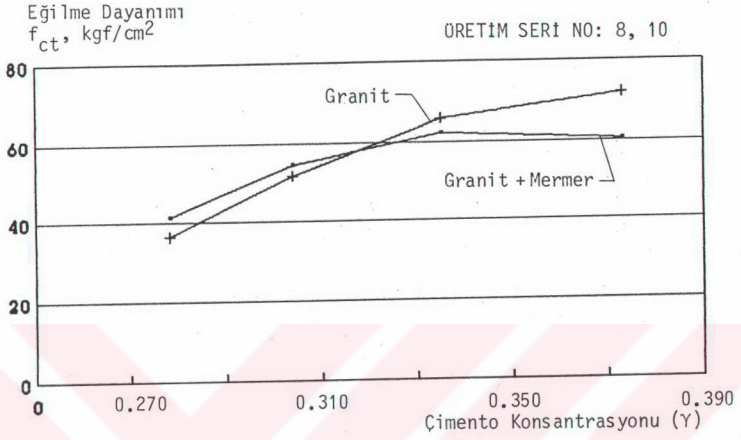


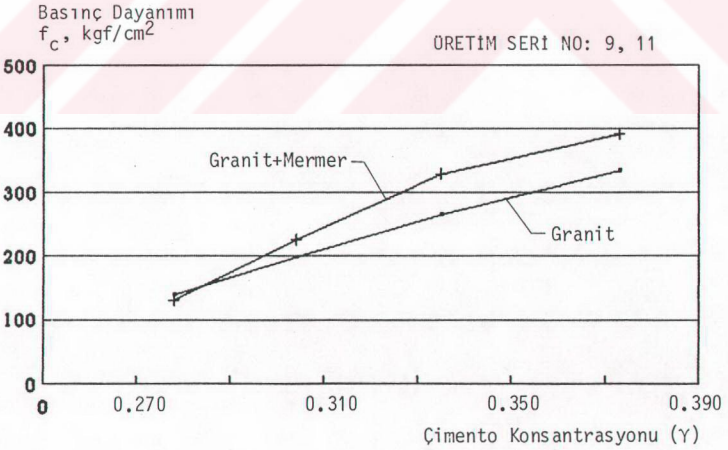
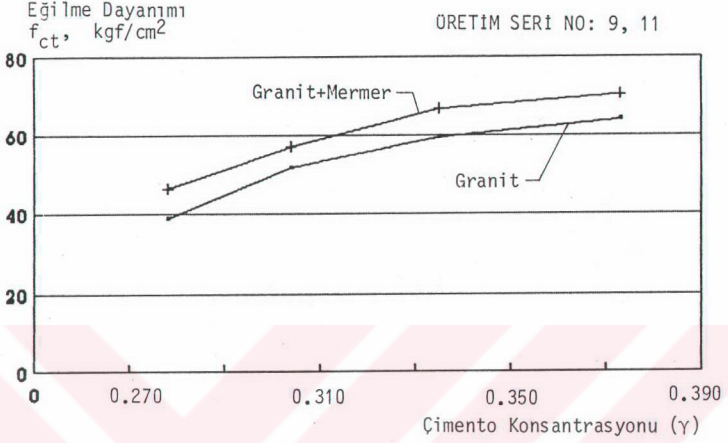
Basınç Dayanımı  
 $f_c$ , kgf/cm<sup>2</sup>

ÖRETİM SERİ NO: 4, 6









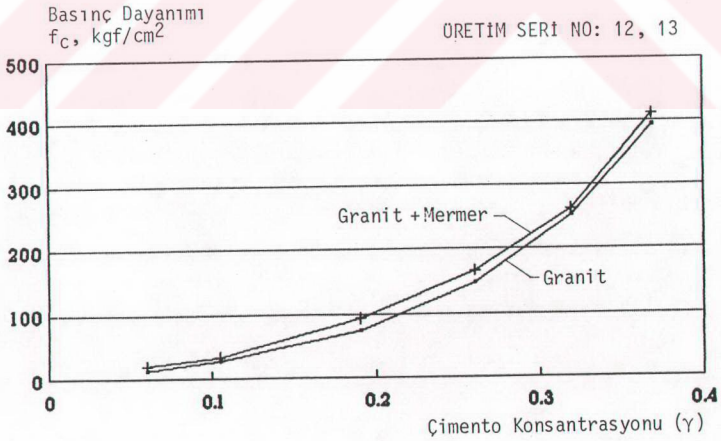
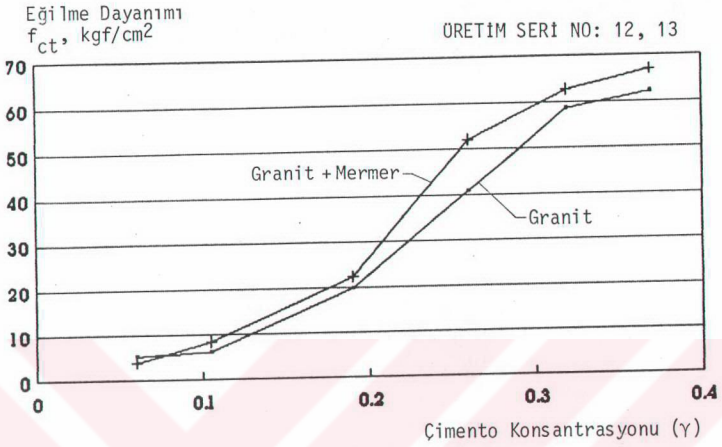
Şekil 25. Agregasının bir kısmı mermerle değiştirilen numune dayanımlarındaki artış



Çizelge 6. Taşunsuz numune dayanımları

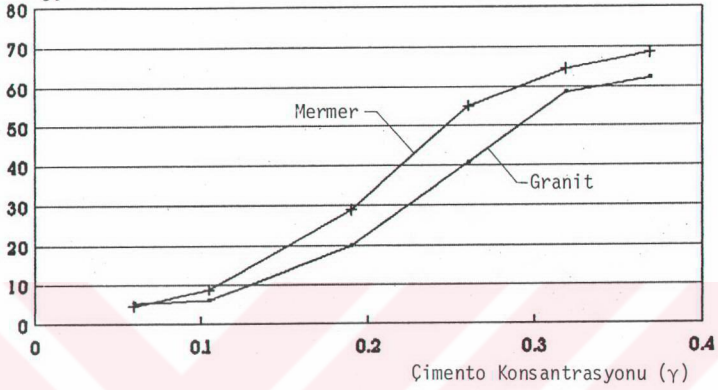
SERİ NO	AGREGA	$\gamma$	EĞİLME DAYANIMI (kgf/cm <sup>2</sup> )	BASINÇ DAYANIMI (kgf/cm <sup>2</sup> )
12	GRANİT	0.06	5.33	13.23
		0.105	6.00	28.02
		0.190	19.83	74.17
		0.260	40.67	146.30
		0.319	58.53	251.03
		0.369	62.17	393.23
13	MERMER (0.075-0.50 mm) + GRANİT (0.5-4 mm)	0.06	3.83	20.63
		0.105	8.33	33.50
		0.190	22.33	92.62
		0.260	51.96	165.70
		0.319	62.60	261.88
		0.369	66.87	410.94
14	MERMER	0.06	4.50	24.69
		0.105	8.73	41.15
		0.190	28.90	83.13
		0.260	55.13	158.77
		0.319	64.35	271.25
		0.369	68.50	421.02
15	KUVARS	0.06	5.00	19.60
		0.105	7.14	30.79
		0.190	24.83	81.50
		0.260	48.20	152.29
		0.319	59.60	253.44
		0.369	69.37	383.96





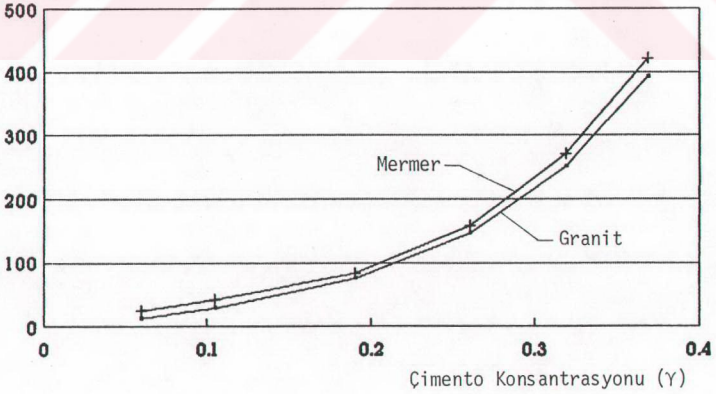
Eğilme Dayanımı  
 $f_{ct}$ , kgf/cm<sup>2</sup>

ÖRETİM SERİ NO: 12, 14



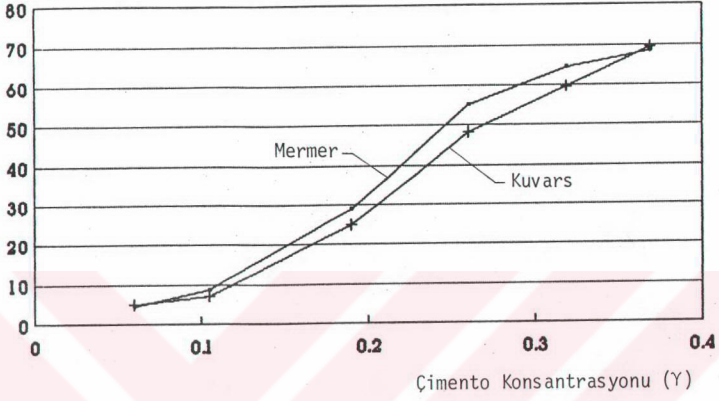
Basınç Dayanımı  
 $f_c$ , kgf/cm<sup>2</sup>

ÖRETİM SERİ NO: 12, 14



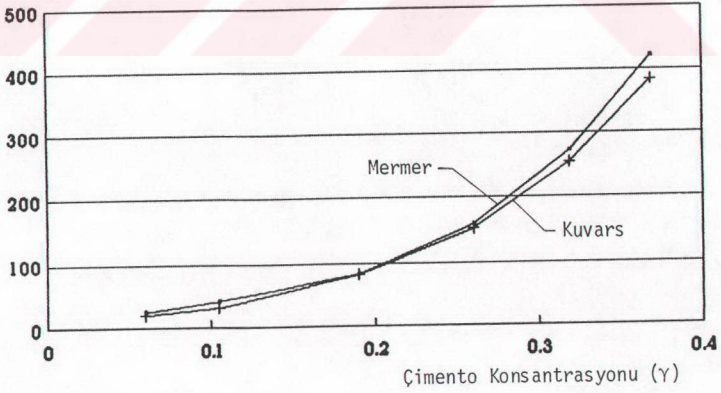
Eğilme Dayanımı  
 $f_{ct}$ , kgf/cm<sup>2</sup>

ÖRETİM SERİ NO: 14, 15



Basınç Dayanımı  
 $f_c$ , kgf/cm<sup>2</sup>

ÖRETİM SERİ NO: 14, 15

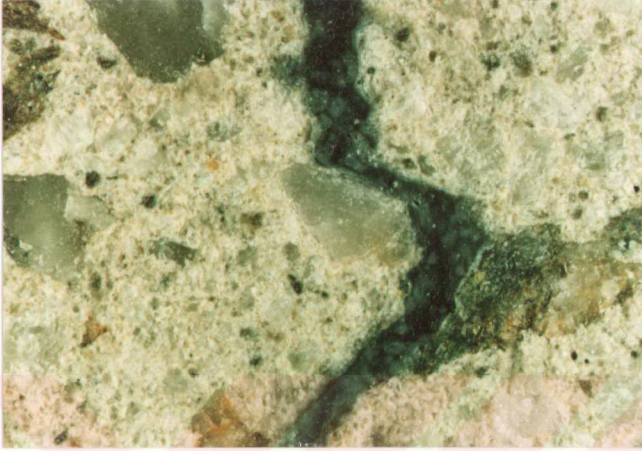


Şekil 26. Taşunsuz numune dayanımları

Bu şekillerden görüldüğü gibi, numune bileşiminde bulunan çimento miktarının (dozajının) değişmesi durumunda da mermer agregalı numuneler en yüksek dayanım değerlerini vermektedir. Bunu sırasıyla kuvars ve granit agregalı numune dayanımları takip etmekte ve granulometrisinde bir kısmı mermerle değiştirilen granit agregalı numunelerin dayanımlarında ise sadece granitle üretilenlere göre belirgin bir artış meydana gelmektedir.

Elde edilen bu sonuçlardan, en yüksek numune dayanımları veren agregadan başlamak üzere, yapılacak bir sıralamanın, mermer, kuvars, granit ve bozulmuş granit olduğu görülmektedir.

Numunelerdeki kırılmanın tipini belirlemek amacıyla, eğilme deneyleri sonucunda iki parçaya ayrılan numuneler kırılma yüzeylerinden güçlü bir plastik çelik yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Tam yapışma sağlanınca, numune yüzeyleri taşlanarak düzeltilmiş ve yapışma bölgesi mikroskop altında incelenerek fotoğraflanmıştır (Şekil 27 a,b,c,d,e,f). Bu şekillerden görüldüğü gibi kırılmaların aderans sökülmesi sonucunda meydana geldiği (ikinci şekil kırılma), kırılma çizgisinin rastladığı agregaların çevresini kısmen takip etmesiyle kendini göstermekte ve bu durum teorik inceleme sonuçlarını desteklemektedir.



Üretim Seri No:7      Agregası: BOZULMUŞ GRANİT +MERMER

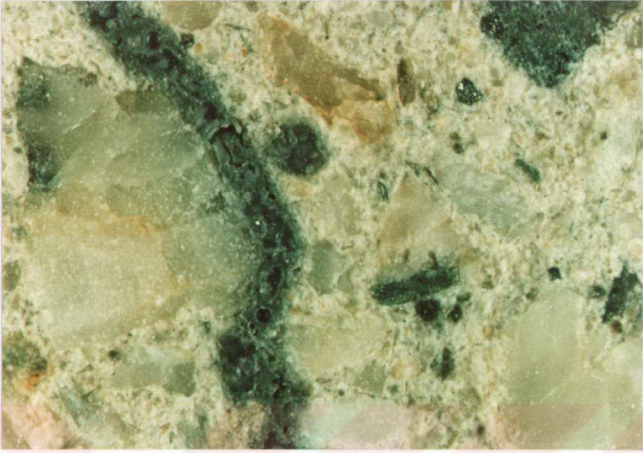
(a)



Üretim Seri No:8      Agregası: GRANİT

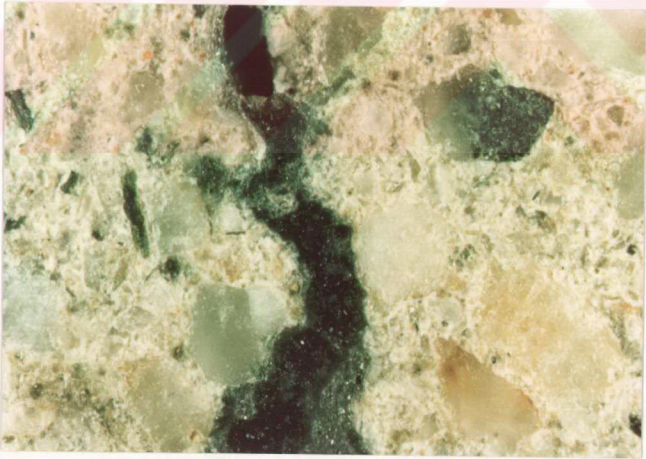
(b)





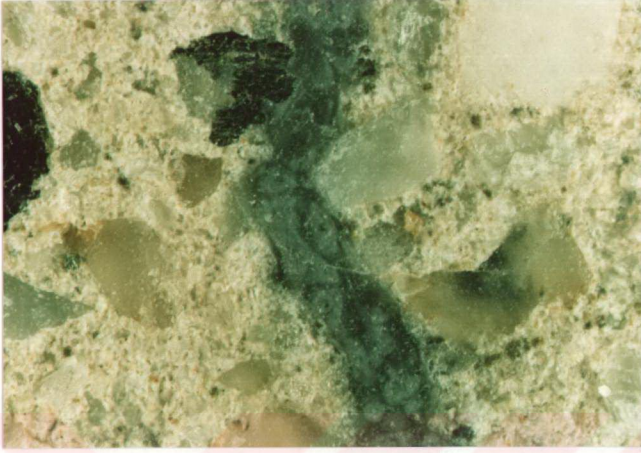
Üretim Seri No: 8      Agregası: GRANİT

(c)



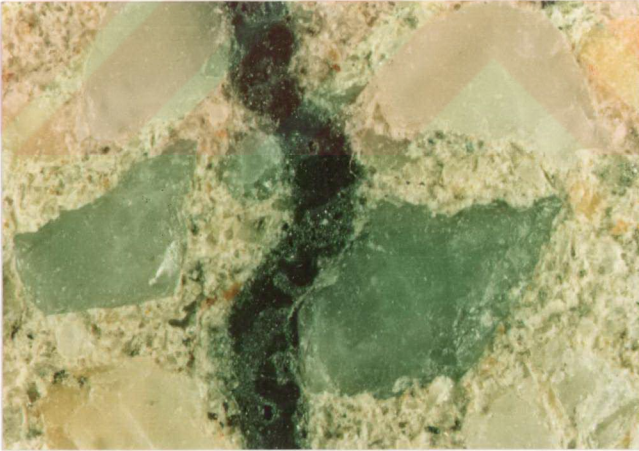
Üretim Seri No: 9      Agregası: GRANİT

(d)



Üretim Seri No: 13      Agregası: GRANİT + MERMER

(e)



Üretim Seri No: 15      Agregası: KUVARS

(f)

Şekil 27. Eğilme etkisindeki numunelerde kırılma



## BÖLÜM 4

### AGREGA PETROGRAFİK YAPISININ BETONUN AKIŞKANLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

#### 4.1 Giriş

Betonun vazgeçilmez özelliklerinden birinin işlenebilirlik, dolayısıyla da akışkanlık olduğu bilinmektedir. Zira, yerine konması güç olan bir betonun dayanım ve diğer özelliklerinin istenen düzeyde sağlanması mümkün değildir.

Beton akışkanlığının artırılması için su/çimento oranını değiştirmek pratik bir yol olarak düşünülebilir. Gerçekten de pratikte betonun kalıba kolayca yerleşmesi, düzgün bir yüzey elde edilmesi ve yeterli olmayan beton örtü kalınlıklarının (pas payı) kamufle edilmesi amacıyla dayanımı önemli derecede düşürebilen bu tür uygulamalara sıkça rastlanmaktadır. Buna karşılık, E/C oranının çok düşük tutulması, uygun sıkılama yapılamaması halinde beton içinde büyük boşluklara neden olacağından, bu durum bazen, beton dayanımı yönünden, E/C oranının yüksek olmasından daha tehlikeli olabilmektedir.

Beton akışkanlığını artırmak için akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanmak mümkün olmakla beraber, pahalı ve kullanımları çok özen gerektiren bu katkılarla da bileşimi uygun olmayan bir betonun kalitesini yükseltmek mümkün değildir.

Bu bölümde, agrega petrografik yapısının mikrobetonların, dolayısıyla da betonların akışkanlığına etkisinin geliştirilen bir aletle yapılan deneysel incelenmesi ve bu incelemeden elde edilen sonuçlar üzerinde durulmaktadır.

#### 4.2 Deney Yöntemi

Bu çalışmada uygulanan deney yöntemi, petrografik yapısı farklı agregalarla üretilmiş betonların (mikrobeton) akışkanlıklarını, bu amaca

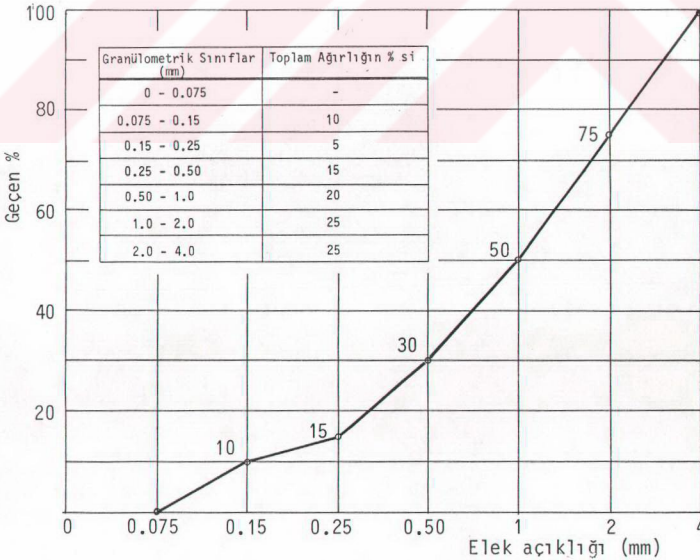
uygun olarak projelendirilip imal edilen, bir deney aleti ile belirleyip karşılaştırmaktan ibarettir.

Deneyler, su/çimento oranının 0.60, 0.65 ve 0.70 değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çimento miktarı tüm üretimlerde sabit olup,  $400 \text{ kg/m}^3$  dür. Böylece, E/C oranının yukarıdaki değerleri kullanılarak 6 ayrı bileşim için hazırlanan betonlar üzerinde 18 adet akışkanlık deneyi yapılmış ve bu deneyler üçer kez tekrarlanmıştır.

#### 4.3 Kullanılan Agregalar ve Granülometrik Bileşim

Bu deneylerde, eğilme ve merkezi basınç deneylerinde kullanılanlarla birlikte dasit agregası da kullanılmıştır. Böylece deneyler mermer, granit, bozulmuş granit, kuvars, dasit ve ve granülometri eğrisinde 0.075-0.50 mm arasındaki kısmı mermerle değiştirilen bozulmuş granit agregalarla üretilen betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deneyler için hazırlanan betonların üretiminde kullanılan agregaların granülometrik bileşimi Şekil 28 de verilmektedir.



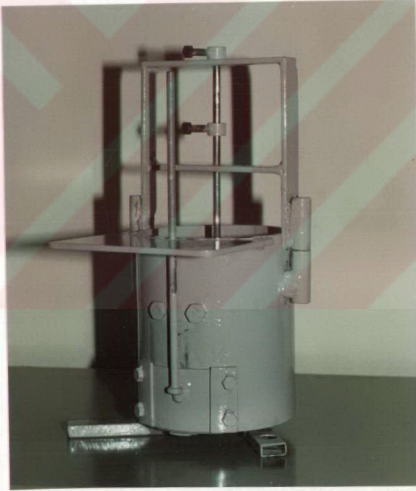
Şekil 28. Agregaların granülometrik bileşimi

#### 4.4 Kullanılan Çimento

Bu deneylerde, mikrobeton numunelerin üretiminde kullanılan ve özellikleri Çizelge 4'de verilen KÇ 32.5 çimentosu kullanılmıştır.

#### 4.5 Deney Aleti

Agrega petrografik yapısının betonların akışkanlığı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla araştırmacı tarafından projelendirilen deney aleti, 600 g ağırlığındaki portatif seviyeölçer ve 3900 g ağırlığındaki kapaklı hazne olmak üzere toplam 4500 g ağırlığında çelik iki ana bölümden oluşmaktadır. Bu deney aletinin fotoğrafı Şekil 29 da teknik resmi ise Şekil 30 a ve b de verilmektedir.



Şekil 29. Akışkanlık deney aleti

İki yanında bulunan silindirik yataklar (11) sayesinde hazneye kolayca takılıp çıkarılabilen portatif seviyeölçer çerçevesi (2) üzerinde, iki enleme ile yataklanmış ve betona gömülmeyi önlemek için plastik şamandıra (14) olan, aşağı yukarı hareketli seviye kontrol çubuğu (13) bulunmaktadır. Seviye kontrol çubuğunun hareket boyu, üzerinde bulunan iki bileziğin (8) vida ile (9) ayarlanması suretiyle, 50 mm olarak sınırlandırılmıştır.

İç çapı 115 mm ve yüksekliği 150 mm olan silindirik haznenin (1) alt yanısında bir kenarı hazne tabanı seviyesinde ve 40 mm x30 mm boyutlarında dikdörtgen çıkış ağızı bulunmaktadır. Betonun çıkışı, iki taraftan yataklanmış kayıcı kapak (4) tarafından kontrol edilmekte ve bu kapak bir kumanda çubuğu (3) ile hareket ettirilmektedir. Kapağın hareket boyu 35 mm olup, çıkış ağızının hemen altında ve üst tarafında bulunan frenler (10), (15) ile bu hareketi sınırlandırılmıştır. Ayrıca, kayıcı kapağın alt kenarı betonun akışını rahatça kesebilmesi için ön tarafından keskinleştirilmiştir.

Sarsma tablasına (7) haznenin altındaki ayaklardan (6) çift somunlu iki civata (12) ile tespit edilen deney aletinin projelendirilmesinde; 2500 dev/dak frekansa sahip titreşimin gevşetici etkisinden kurtulmak için, civatalı birleşim yerine çoğunlukla kaynaklı birleşim kullanılmıştır.

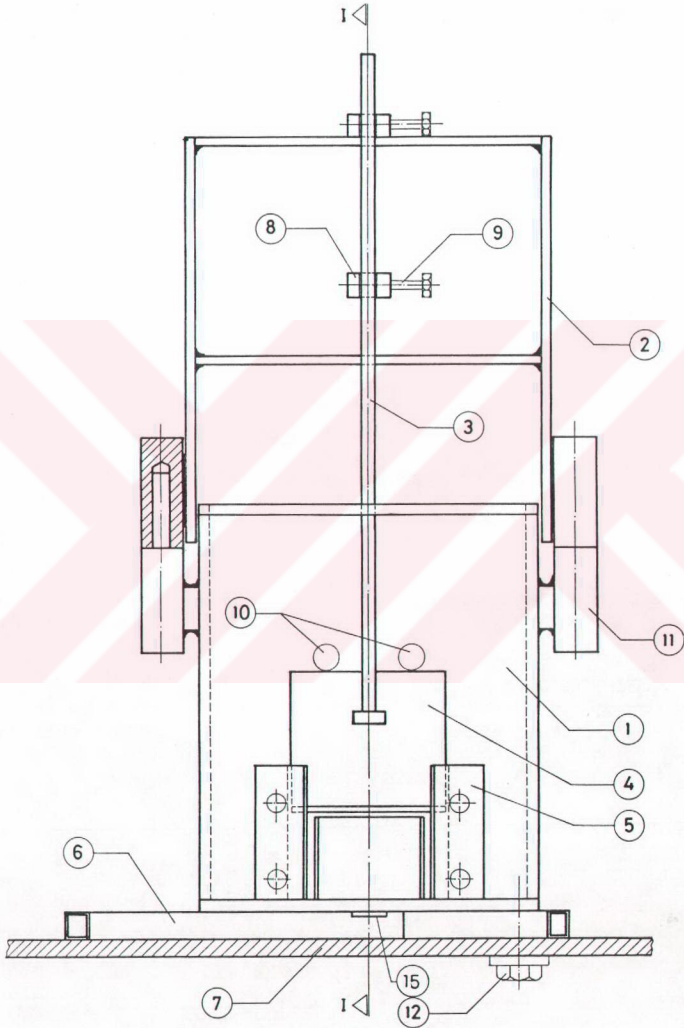
Daha ileride otomatik kontrollü elektromekanik hale dönüştürülebi-lecek şekilde tasarlanan deney aleti, bu haliyle tamamen elle kumanda edilmektedir.

#### 4.5.1 Deney Aletinin Çalışma Prensibi ve Deneylerin Yapılması

Deney aletinin temel prensibi, titreşim altındaki taze betonun belli bir miktarının hazneden boşalması için geçen zamanın belirlenmesinden ibarettir. Böylece agrega petrografik yapısının betonların akışkanlığı üzerindeki etkisi boşalma zamanlarının farklı olmasıyla kendini göstermektedir.

Bu deneyler için biri sarsma tablasını, diğeri ise deney aletini ve kronometreyi kumanda etmek üzere iki operatör gerekmektedir. Deneylerin yapılmasında aşağıdaki işlem sırası takip edilmiştir:

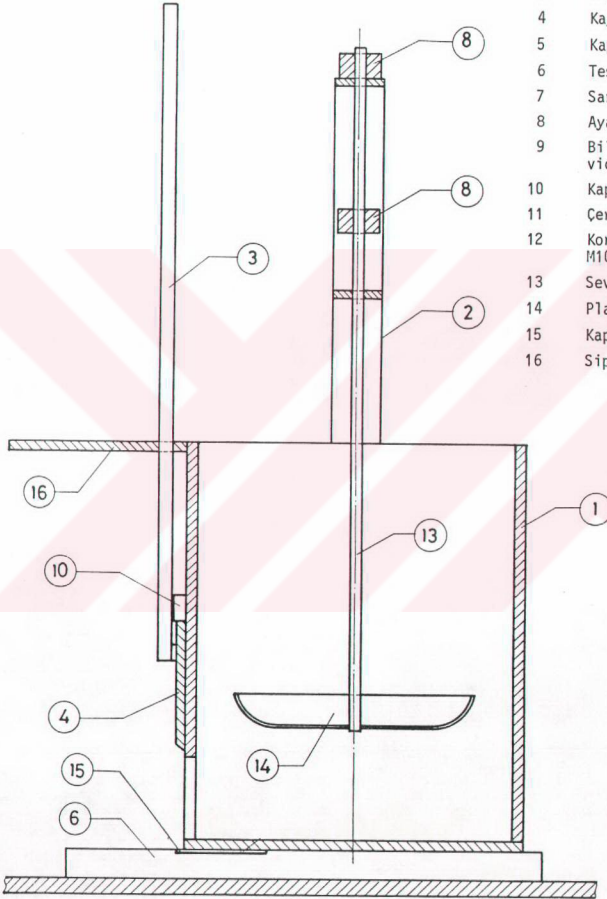
1. Sarsma tablasına monte edilen deney aleti kuru ve temiz hale getirildi,
2. Beton, önceden belirlenen oranlarda hazırlandı,
3. Portatif seviyeölçer çerçevesi hazneden söküldü,
4. Taze beton, kapak kapalı iken üç tabaka halinde, seviye çizgisine kadar hazneye dolduruldu,
5. Portatif seviyeölçer çerçevesi hazneye takılıp, kronometre sıfırlandı,



a) Deneş aletinin önden görünüşü



Parça No	Parçanın Adı
1	Silindirik hazne
2	Portatif seviyeölçer çerçevesi
3	Kapak kumanda çubuğu
4	Kayıcı kapak
5	Kapak yatakları
6	Tespit ayakları
7	Sarsma tablası
8	Ayar bilezikleri
9	Bilezik sıkma vidaları
10	Kapak üst frenleri
11	Çerçeve yatakları
12	Kontra somunlu M10 civata
13	Seviye kontrol çubuğu
14	Plastik şamandra
15	Kapak alt freni
16	Siperlik



I-I KESİTİ

b) Deney aletinin kesiti

6. Sarsma tablası harekete geçirildikten 2-3 s. sonra diğer operatör kapağı açıp, aynı anda, kronometreyi çalıştırdı,
7. Betonun çıkışıyla birlikte aşağı doğru inen seviye kontrol çubuğunun üst bileziği çerçeveye değdiği anda kronometre durduruldu,
8. Deneysel aleti, haznede kalan beton temizlenerek, sonraki deney için hazır hale getirildi.

#### 4.6 Değişken E/C Oranına Sahip Betonlar Üzerinde Deneyler

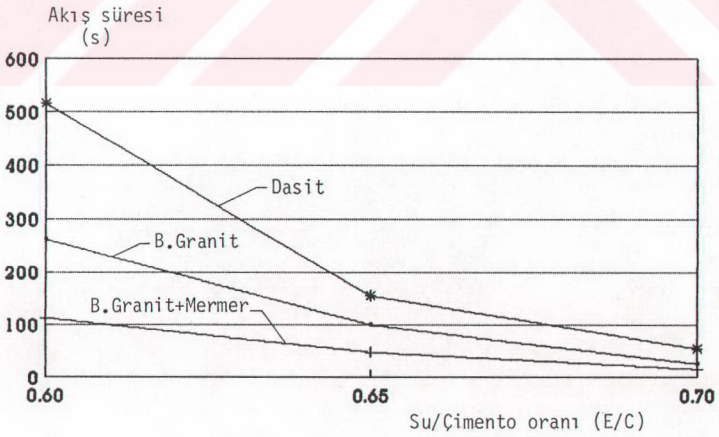
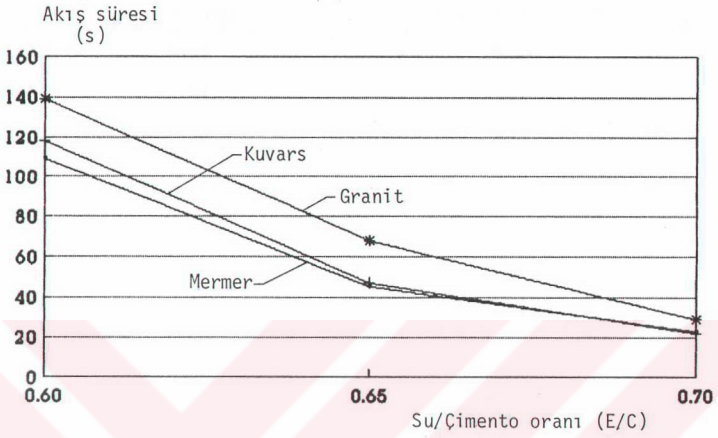
Üretim koşulları önceden belirlenen (bkz.madde 3.6) betonlar üzerinde asıl deneylerden önce, deney aletinin istenen şekilde çalıştığından emin olmak ve üretilecek betonlara ait E/C oranının anlamlı sonuçlar verebilecek değişim aralığını belirlemek için bir seri hazırlık deneyi yapılmıştır. Bu deneyler, E/C oranı 0.50 olan betonların deney aleti haznesine kolay yerleşmediğini ve çıkış ağzından akmadığını, E/C oranı 0.55 olan betonların ise hazneye daha iyi yerleştiğini ancak, haznede bulunan taze betonun içerdiği boşlukların her deneyde aynı olmasının, diğer bir deyişle sıklıkların eşit tutulmasının çok zor olduğunu göstermiştir. Deneylerin bu su/çimento oranına sahip betonlar üzerinde yapılması halinde farklı kompoziteye sahip betonların akışkanlıklarını agrega petrografik yapı değişiminden çok daha fazla etkilemesi mümkün olduğundan, bu sıklığın ortadan kaldırılması için deneylerin E/C oranı 0.60, 0.65 ve 0.70 olan betonlar üzerinde yapılması tercih edilmiştir.

Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 7 ve Şekil 31'de verilmektedir.

Çizelge 7. Akışkanlık deney sonuçları

Kullanılan Agrega	E/C=0.60 için akış süresi (s)	E/C=0.65 için akış süresi (s)	E/C=0.70 için akış süresi (s)
MERMER	109	45	23
KUVARS	118	47	22
GRANİT	139	68	29
BOZULMUŞ GRANİT	262	100	26
BOZULMUŞ GRANİT+MERMER	113	49	16
DASİT	516	156	55





Şekil 31. Akışkanlık deneylerinden elde edilen eğriler

Bu sonuçlardan görüldüğü gibi, mermer agregalı betonların akışkanlığı diğer agregalarla üretilenlerinkinden daha fazladır. Bozulmuş granitli betonların akışkanlığı ise mermer agregalarla üretilen betonların akışkanlığının yaklaşık olarak yarısı olmasına rağmen, granülometrisinde 0.5 mm ye kadar olan kısmı mermerle değiştirilen bozulmuş granitli betonların akışkanlıklarında sadece mermer agregalarla üretilen betonlarınkine yaklaşacak kadar önemli bir artış meydana gelmektedir.

Kuvars agregalı betonların akışkanlığı mermer agregalı betonlarınkine çok yakındır. Dasit agregalı betonlar ise en az akışkanlık değerini vermektedir.

Granit ve bozulmuş granit agregalarla üretilen betonların akışkanlıkları arasında ortaya çıkan farkın, bozulmuş granitteki feldispatın kaolenleşerek (bozularak) kile dönüşmesi sonucu agregatanelerinin yüzey pürüzlülüğünün artmasına, hatta fazla etkili olmasa bile killeşmenin betonun kohezyonunu artırmasına da atfetmek mümkündür. Zira petrografik yapısı farklı, hacimleri aynı olan iki agregatanesinin birine bazen bir tek mineral kristali rastlarken (örneğin mermer, granit, kuvars), diğerine çok daha fazla kristal rastlayabilmektedir (örneğin dasit). Bunun sonucu olarak agregatanelerinin sahip olduğu yüzey pürüzlülüğü de çok farklı olmakta ve bu durum betonların akışkanlığını etkilemektedir.

Sadece Trabzon yöresinden temin edilen ve petrografik yapıları daha önceki bölümde verilmiş olan (bkz.Çizelge 3) agregalar ve deney koşulları için geçerli olan beton akışkanlıklarına ilişkin bu sonuçların, kod adı aynı olan tüm kayalara genellenmesinin doğru olmayabileceği de açıktır.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, agrega petrografik yapısının betonun dayanım ve akışkanlığı üzerindeki etkilerini teorik ve deneysel olarak incelemektir.

Eskiden olduğu gibi günümüzde de betonun özelliklerine etki eden başlıca faktörler arasında genellikle agrega granülometrik bileşimi, tane şekli, yüzey temizliği ve pürüzlülüğü, tane birim kütlesi (özgül kütle), çimento dozajı, su/çimento oranı, hapsedilmiş hava içeriği, çimento cinsi, üretim ve muhafaza koşulları, sertleşme süresi gibi etkenlerin bulunduğu ve bunların gereğini yapmanın, kaliteli bir beton elde etmek için yeterli olduğu görüşü hakimdir. Oysa agrega petrografik yapısının da betonun özelliklerine yansımaları daha mantıklı gözükmektedir. Gerçekten, agrega petrografik yapısını belirlemek, beton içinde hacim oranı %70 civarında olan agrega taneleri ve bu tanelerin sertleşmiş çimento hamuru ile olan bağlantılarının özelliklerini de belirlemek anlamına geldiğinden, agrega petrografik yapısının betonun kırılma mekanizmaları, dolayısıyla dayanımları ve akışkanlıkları üzerinde bir etkisinin olması gerektiği akla daha uygun gelmektedir.

Bu düşünce doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmanın birinci bölümünde verilen giriş bilgilerinden sonra ikinci bölümde betonun merkezi çekme ve merkezi basınç etkisi altında kırılma mekanizmaları üzerinde durulmuş ve iki şekil kırılmanın varlığı ortaya konmuştur.

Birinci şekil kırılmada, önce agregaların ya da agregalarla çimento hamuru arasındaki bağların kırılması (aderans sökülmesi) betonun kırılmasına neden olmamaktadır. Bu durumda çekmede beton dayanımını sadece sertleşmiş çimento hamuru sağlamaktadır. Sadece bu özel durumda agrega petrografik yapısı betonun dayanımını üzerinde hiçbir rol oynamamaktadır. Bu tür kırılma, çekme dayanımı düşük ya da aderansı zayıf agrega içeren ya da çok az oranda çekme dayanımı ve aderansı yüksek agrega içeren betonlardaki kırılmaya karşılık gelmektedir. Basıncıta ise agregalar beton dayanımını üzerinde elastisite modülleri vasıtasıyla etkili olmaktadır. Bu nedenle

çekmede meydana gelen birinci şekil kırılmaya ait dayanım eğrisi  $[f_{ct1}(\gamma)]$  sadece bir adet olduğu halde, basınç durumunda bu eğri  $[f_{c1}(\gamma)]$  agrega petrografik yapı adetine ulaşmaktadır (bkz. Şekil 1,2,3 ve 4).

İkinci şekil kırılmada ise, önce agregaların ya da agregalarla çimento hamuru arasındaki bağların kırılması betonun kırılmasına neden olmaktadır. Bu durumda agrega petrografik yapısı, basınçta olduğu gibi çekmede de beton dayanımına etki eden başlıca faktör olmaktadır. Diğer bir deyişle, beton ister basınç etkisinde, isterse çekme etkisinde kırılırsa, bu ikinci kırılma şekli her iki durum için de geçerli kalmaktadır. Bu kırılma şekli de kırılmaya önce aderans sökülmesinin ya da agrega kırılmasının neden olmasına göre iki ayrı tipte meydana gelmektedir.

Kırılmanın önce aderans sökülmesi nedeniyle meydana gelmesi halinde agrega petrografik yapı türü kadar, aderans dayanımına ( $f_{adt}$ ) bağlı, çekme dayanımı eğrisi  $[f_{ct2}(\gamma)]$  ve basınç dayanımı eğrisi  $[f_{c2}(\gamma)]$  elde edilmektedir.

Kırılmanın önce agrega kırılması nedeniyle meydana gelmesi halinde de agrega dayanımına ( $f_{at}$ ) dolayısıyla petrografik yapısına bağlı çekme dayanımı eğrisi  $[f'_{ct2}(\gamma)]$  ve basınç dayanımı eğrisi  $[f'_{c2}(\gamma)]$  elde edilmektedir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde gerçekleştirilen deneyler, teorik incelemelerde yapılan varsayımları doğrularak, kırılmaların çoğunlukla agrega ile sertleşmiş çimento hamuru arasındaki aderansın sökülmesi sonucunda meydana geldiğini göstermiştir. Bu da, geleneksel betonlarda ikinci şekil kırılmanın  $[f_{ct2}(\gamma)]$  ya da  $[f_{c2}(\gamma)]$  hakim olduğunu, dolayısıyla da agrega petrografik yapısının bu tür betonların çekme ve basınç dayanımlarını önemli derecede etkilediğini göstermektedir.

Diğer taraftan taşunlu ve taşunsuz agregalarla üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler; taşunluların dayanımlarının daha yüksek olduğunu, dolayısıyla agrega özgül yüzeyinin artmasıyla aderans dayanımının yükseldiğini, granülometri eğrisinde bir kısmı mermer agregalarla değiştirilen numune dayanımlarında önemli derecede bir artış meydana geldiğini, mermer agregalı numunelerin en yüksek dayanımlara sahip olduğunu ve bu agregayı sırasıyla granit, kuvars ve bozulmuş granitin takip ettiğini ortaya koymuştur.

Dördüncü bölümde, agrega petrografik yapısının betonların akışkanlığı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Değişken su/çimento oranına sahip taze betonlar üzerinde gerçekleştirilen bu incelemede, agrega petrografik yapısının betonların akışkanlığını belirleyen önemli bir faktör



olduğu ortaya koymuştur. Bu deneyler, mermer agregalarla üretilen betonların akışkanlıklarının en yüksek olduğunu, bunu sırasıyla kuvars, granit, bozulmuş granit ve dasit agregalarla üretilen betonların takip ettiğini göstermiştir.

Özetle deneyler, agrega petrografik yapısının betonun çekme ve basıncı dayanımları üzerinde önemli derecede etki ettiğini ortaya koyduğu gibi, akışkanlığı üzerinde de aynı derecede etkili olduğunu göstermiş ve teorik düşünceleri doğrulamıştır. Ancak, bu sonuçların bu çalışmaya konu olan betonlar ve deney koşullarına ait olduğu açıktır. Bu nedenle bu sonuçları tüm betonlara genellemeden önce benzer çalışmaların daha farklı betonlar üzerinde sürdürülmesinin yararlı olacağına inanıldığı gibi, bu sonuçların da temel bir değişikliğe uğramayacağına ve agrega petrografik yapısının betonun donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığının incelenmesinin gerekliliğine de inanılmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Feret, R., Annales des Ponts et Chaussées, Nov.-Déc. (1942).
2. Durmuş, A., Contribution à l'Etude des Critères de Ruine d'Éléments de Structures en Béton-Application aux Pièces Armées, Thèse de Docteur Ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse, (1976).
3. Türk Standartları, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (TS 500), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (1984).
4. Durmuş, A., Malzeme Dersleri Laboratuvar Çalışmaları, (Yayınlanmamış).
5. Durmuş, A., Betonarme Yapıların Taşıma Gücüne Göre Hesabı, Türkiye Mühendislik Haberleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, sayı 305, Tem.-Ağus. (1983), 3-11.
6. Postacıoğlu, B., Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt 1, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, (1981).
7. Akman, S., Yapı Malzemeleri, Birinci Baskı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul (1987)
8. Cimilli, T., Yapı Malzemesi, İkinci baskı, KTO Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, Trabzon (1986).
9. Postacıoğlu, B., Yapı Malzemesi Dersleri, İkinci baskı, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul (1975).
10. Farran, J., Contribution Minéralogique à l'Etude de l'Adhérence Entre les Constituants Hydratés des Ciments et les Matériaux Enrobés, Thèse de Docteur Ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse (1956).
11. Maso, J.C., La Nature Minéralogique des Agrégats Facteur Essentiel de la Résistance des Bétons à la Rupture et à l'Action du Gel, Thèse de Docteur Ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse (1967).
12. Arredi, A., Rapport no 112 au 7 Congrès International des Grands Barrages, Rome (1961).
13. Daniels, W., Béton de Calcite, Betong, Stockholm (1948).
14. Stolnikov, V., Rapport no 110 au 7 Congrès International des Grands Barrages, Rome (1961).
15. Vile, G.W.D., Strengh of Concrete Under Short Term Static Biaxial Strees, Paper F 2, International Conference on the Structure of Concrete, London, (1965).
16. Dantu, H., Etude des Contraintes dans les Milieux Hétérogènes, Applications au Béton, ITBTP, Janv., (1958).

17. Durmuş, A., Arnoud, M., Lorrain, M., Le Role des Effects Transversaux Dans la Flexion des Planchers Nervurés en Béton Armé: Conséquences Sur la Sécurité, Annales de l'ITBTP, No.376, série EM/173, Paris, Ekim (1979).
18. Durmuş, A., Sur Les Mécanismes De Ruine De Poutres En Béton, International Nazım Terzioğlu Symposium On Mathematics, Karadeniz University Mathematical Journal, Vol.V, No.1, (1982).
19. L'Hermite, R., Idées Actuelles sur la Technologie du Béton ITBTP, Paris (1948).
20. Durmuş, A., 13 Mart 1992 Erzincan Depreminde Betonarme Yapıların Davranışlarının Değerlendirilmesi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, 1. Teknik Kongresi, G.Mağusa, Ekim (1993), 93-101.
21. Durmuş, A., 13 Mart 1992 Erzincan Depreminin Mühendislik Açısından Değerlendirilmesi, Teknik Rapor, KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Temmuz (1992), (52 sayfa).
22. Türk Standartları, Deney Eleklere-Metal Levhalı, Yuvarlak veya Kare Delikli (TS 1226), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (1985).
23. Türk Standartları, Deney Eleklere-Tel Kafesli, Kare Göz Açıklıklı (TS 1227), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (1985).
24. Türk Standartları, Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini (TS 3526), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (1980).
25. Türk Standartları, Çimento-Katkılı Çimento (TS 10156), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (1992).
26. Türk Standartları, Beton Karışım Hesap Esasları (TS 802), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (1985).
27. Türk Standartları, Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deney Metodları (TS 24), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (1985).



EK 1: MERKEZİ BASINÇTA BETONUN KIRILMASI ESNASINDA ADERANS BÖLGESİNE UYGULANAN ÇEKME GERİLMESİ

Ekseni doğrultusunda merkezi basınca maruz homojen izotrop bir numune dikkate alınır. Bu numunenin boyuna doğrultudaki birim şekildeğiştirilmesi  $\epsilon_1$  olsun. Buna karşılık gelen enine birim şekildeğiştirme ise  $\nu\epsilon_1$  dir.

Bu numune nihai enine birim şekildeğiştirilmesi  $\nu\epsilon_0$  olacak şekilde ek bir üniform yanal gerilme etkisinde bırakılırsa, bu durumda enine birim şekildeğiştirme  $\nu(\epsilon_1 - \epsilon_0)$  olacağından, enine basınç gerilmesi,

$$\sigma = E \nu (\epsilon_1 - \epsilon_0)$$

olarak yazılabilir. Bu sonuç agrega ve çimento hamuruna uygulanabilir. Agrega için  $\epsilon_{1a} = \epsilon_1$  ve  $\epsilon_{0a} = \epsilon_0$ ; çimento hamuru için  $\epsilon_{1c} = \epsilon_1$  ve  $\epsilon_{0c} = \epsilon_0$  olarak kabul edilsin.

Aderans olduğu sürece agrega ile çimento hamurunun aynı çevre üzerindeki enine şekildeğiştirmeleri eşit olmak zorunda olduğundan;

$$\nu_a \epsilon_{0a} = \nu_c \epsilon_{0c} \quad (1)$$

yazılabilir.

Agrega ve çimento hamurundaki yanal gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{at} = E'_a \nu_a (\epsilon_{1a} - \epsilon_{0a}) \quad (2)$$

$$\sigma_{ct} = E'_c \nu_c (\epsilon_{1c} - \epsilon_{0c}) \quad (3)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

(2) ve (3) bağıntıları taraf tarafa çıkarılırsa, aderans bölgesine uygulanan çekme gerilmesi;

$$\sigma_{adt} = E'_c \nu_c (\epsilon_{1c} - \epsilon_{0c}) - E'_a \nu_a (\epsilon_{1a} - \epsilon_{0a}) \quad (4)$$

olur. Bu bağıntıdaki  $E'_a$ ,  $\nu_a (\epsilon_{1a} - \epsilon_{0a})$  birim uzamasına karşılık gelen agrega sekant modülünü,  $E'_c$  ise  $\nu_c (\epsilon_{1c} - \epsilon_{0c})$  birim uzamasına karşılık gelen

çimento hamuru sekant modülünü göstermektedir.

(1) bağıntısından çekilen  $\epsilon_{oc}$  değeri (3) bağıntısında yerine yazılırsa, aderans bölgesine uygulanan çekme gerilmesi;

$$\sigma_{adt} = E_c' (\nu_c \epsilon_{1c} - \nu_a \epsilon_{0a})$$

olarak elde edilir.



## ÖZGEÇMİŞ

Selim Pul, 1966 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini 1972-1980 yılları arasında Akçaabat'ta tamamladıktan sonra 1984 yılında Trabzon Teknik Lisesi Makina-Fen Bölümünü bitirdi. 1985-1986 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girerek, bu bölümden Haziran 1989 döneminde mezun oldu. Aynı yıl açılan sınavla, mezun olduğu bölümde Yüksek Lisans öğrenimine kayıt oldu. Bu sırada açılan sınavla girdiği (Eylül 1989) Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 12. Bölge Müdürlüğü (Erzurum) emrinde Etüt-Ekip Mühendisliği ve Köprü Kontrol Mühendisliği görevlerinde bulunduktan sonra Genel Müdürlük tarafından açılan Karayolu 36. Temel Kursu'nu bitirdi. Aynı dönemde açılan sınavı kazanarak, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün verdiği olurla, mezun olduğu bölümün Yapı Anabilim Dalı'na Şubat 1991'de Araştırma Görevlisi olarak atandı. Karayolları teşkilatında iken izin verilmemesi nedeniyle kaydının silindiği Yüksek Lisans öğrenimine Eylül 1991'de açılan yeni bir sınavı kazanarak tekrar başladı. Bekar olan Arş.Gör. Selim PUL, İngilizce bilmekte ve halen KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görevine devam etmektedir.

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**