66963

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOĞU KARADENİZ BÖLGESİ DOĞAL AĞIR AGREGALARINDAN BİRİYLE ÜRETİLEN AĞIR BETONUN GELENEKSEL BİR BETONLA KARŞILAŞTIRMALI OLARAK İNCELENMESİ

İnş. Müh. Yasemin GÜRSOY

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İnşaat Yüksek Mühendisi"
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03.01.1997
Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 03.02.1997

Tezin Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet DURMUŞ
Jüri Üyesi : Doç Dr. Yusuf AYVAZ
Jüri Üyesi : Yrd. Doç Dr. Şakir ERDOĞDU

Enstitü Müdürü : Doç. Dr. Asım KADIOĞLU

Şubat 1997
TRABZON

ÖNSÖZ

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

Doğu Karadeniz bölgesi doğal ağır agregalarından biriyle üretilen ağır betonun geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelenmesi konusundaki bu çalışmayı bana önererek, diğer önemli görevlerine rağmen, çalışmamı sürekli takip eden, çalışmalarım boyunca bana araştırma zevki veren ve bilimsel düşünce disiplinini kazanmamı sağlayan, tezimin her aşamasında geniş bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım yönetici hocam, Sayın Prof. Dr. Ahmet DURMUŞ' a minnet ve şükranlarımı sunmayı zevkli bir görev sayarım.

Çalışmam boyunca değerli yardımlarını gördüğüm ve moral destek aldığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Metin HÜSEM, Dr. Hasan KOLAYLI, Arş. Gör. Berkan MOROĞLU, Zeki KARACA' ya, araştırmacı arkadaşlarıma ve ayrıca çalışmama destek veren diğer tüm akademik ve idari personele teşekkürlerimi sunarım.

Burada, öğrenimim boyunca bana emeği geçen, tüm hocalarımı saygıyla andığımı ve kendilerine minnettar olduğumu da belirtmek isterim.

Bu vesileyle çahşmamda kullanılan doğal ağır agregaları sağlayan PET-MA Madencilik A.Ş yöneticilerine de teşekkür etmek isterim.

Çalışmam süresince beni sabır ve şefkatle destekleyen ailemin tüm fertlerine müteşekkir olduğumu belirtir, çalışmamın ülkemize yararlı olmasını gönülden dilerim.

Trabzon, Ocak 1997 Yasemin GÜRSOY

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ II
ÖZET VI
SUMMARY VII
ŞEKİL LİSTESİ VIII
TABLO LİSTESİ XI
SEMBOL LİSTESİ XIII

1. GENEL BİLGİLER
1.1. Giriş 1
1.2. Ağır Betonlar Üzerinde Daha Önce Gerçekleştirilmiş Olan Bazı Çalışmalar 1
1.3. Ağır Beton Üretiminde Kullanılan Ağır Agregalar 4
1.3.1. Doğal Ağır Agregalar 4
1.3.2.Yapay Ağır Agregalar 6
1.3.3. Ağır Agregaların Nakliyesi, Depolanması ve Betoniyerlere Yerleştirilmesi 7
1.4. Ağır Betonların Bileşim, Dayanım, Üretim ve Yerine Konulması 8
1.4.1. Ağır Betonların Bileşim ve Dayanımları 8
1.4.2. Ağır Betonların Üretimi ve Yerine Konması 10
1.5. Ağır Betonların Sınıflandırılması 12
1.6. Ağır Betonların Bazı Ortak Özelikleri 13
1.7. Ağır Betonlar Hakkında Bazı Yönetmelikler 14
1.8. Ağır Betonun Kullanım Alanları 14
1.9. Ağır Betonların Önemi ve Geleceği 15
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR 17
2.1. Giriş 17
2.2. Betonların Üretiminde Kullanılan Agrega, Çimento ve Karma Suyu Özelikleri 17
2.2.1. Ağır Agrega Özelikleri 17
2.2.1.1. Fiziksel Özelikler 17
2.2.1.2. Petrografik Özelikler 19
2.2.1.3. Mekanik Özelikler 20

Sayfa No

2.2.2. Geleneksel Agrega Özelikleri....21
2.2.2.1. Fiziksel Özelikler....21
2.2.2.2. Petrografik Özelikler....22
2.2.2.3. Mekanik Özelikler....24
2.2.3. Ağır ve Geleneksel Agregaların Granülometrik Bileşimi....25
2.2.4. Çimento Özelikleri....25
2.2.5. Karma Suyu Özelikleri....27
2.3. Betonların Bileşimleri....27
2.4. Betonların Üretimi....30
2.5. Deneylerde Kullanılan Standard Numunelerinin Hazırlanması, Saklanması ve Deney Anındaki Yaşları....31
2.6. Ağır ve Geleneksel Betonların Fiziksel, Mekanik ve Isıl Özelikleri....32
2.6.1. Fiziksel Özelikler....32
2.6.2. Mekanik Özelikler....33
2.6.3. Isıl Özelikler....36
2.7. Agrega Petrografik Yapısının Beton Kırılma Mekanizmaları Üzerindeki Etkisi....38
2.7.1. Betonun Yapısı, Davranışı ve Kırılma Mekanizmaları....38
2.7.1.1. Betonun Yapısı ve Davranışı....39
2.7.1.2. Betonun Kırılma Mekanizmaları....40
2.7.1.2.1. Merkazi Çekme Etkisindeki Kırılma Mekanizmaları....40
2.7.1.2.2. Merkezi Basınç Etkisindeki Kırılma Mekanizmaları....52
2.7.2. Betonların Kırılma Mekanizmalarının Açıklanması İçin Gerçekleştirilen Deneyler....69
2.7.2.1. Ağır ve Geleneksel Betonların Çimento Hamuru Fazlarının Mekanik Özelikleri....69
2.7.2.2. Ağır ve Geleneksel Agregaların Mekanik Özelikleri....72
2.7.2.3. Agregalarla Harç ve Çimento Hamuru Arasındaki Aderans Dayanımı....72
2.7.3. Betonların Kırılma Mekanizmalarının Açıklanması....76
2.8. Kirişlerin Eğilmedeki Davranışlarının Belirlenmesi İçin Gerçekleştirilen Deneyler....79
2.8.1. Deney Kirişlerinin Özelikleri, Üretimleri ve Saklanmaları....79
2.8.2. Ağır ve Geleneksel Betonların Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramları....82

Sayfa No

2.8.3. Kirişlerin Üretiminde Kullanılan Donatı Özeliği....83
2.8.4. Deney Düzeneği, Kirişlerin Yüklenmesi ve Ölçme Aletleri....85
2.8.5. Kirişlerin Çatlama Durumlarının İncelenmesi....87
2.8.5.1. Teorik Hatırlatmalar....87
2.8.5.1.1. Betonarmede Çatlama....87
2.8.5.1.2. Çatlak Genişliğinin Teorik Hesabı....88
2.8.5.1.3. Çatlak Genişlikleri İçin Standardlardaki Öneriler....90
2.8.5.2. Betonların Kiriş Çatlama Durumlarına Etkisi....91
2.8.5.3. İlk Çatlamayı Oluşturan Momentin Belirlenmesi....93
2.8.6. Kiriş Göçmelerinin İncelenmesi....94
2.8.6.1. Teorik Göçme ve Kullanım Momentleri....94
2.8.6.1.1. Teorik Göçme Momentinin Hesabı....94
2.8.6.1.1.1. Hesap Kabulleri....94
2.8.6.1.1.2. Hesap İlkesi....95
2.8.6.1.2. Yönetmeliğe Göre Göçme ve Kullanım Momentinin Hesabı....98
2.8.6.1.2.1. Hesap Kabulleri....98
2.8.6.1.2.2. Göçme Momentinin Hesap İlkesi....100
2.8.6.1.2.3. Kullanım Momentinin Hesabı....100
2.8.6.2. Deney ve Hesap Sonuçları....100
2.8.6.2.1. Deneysel Emniyet Katsayıları....101
2.8.6.2.2. Dengeli, Kritik ve Minumum Donatı Oranları....102
2.8.6.2.3. Ağır ve Geleneksel Beton ve Betonarme Kirişlerin Şekildeğiştirme ve Sehimlerinin Karşılaştırması....102
3. İRDELEMELER....107
4. SONUÇLAR....110
5. ÖNERİLER....114
6. KAYNAKLAR....115
7. EKLER....123
EK-1 KUM EŞDEĞERLİĞİ DENEYİ....123
EK-2 BİRİM ŞEKİLDEĞİŞTİRME ÖLÇERLERİ....128
EK-3 MERKEZİ BASINÇTA BETONUN KIRILMASI ESNASINDA ADERANS BÖLGESİNE UYGULANAN ÇEKME GERİLMESİ....135
8. ÖZGEÇMİŞ....136

ÖZET

Ağır betonlar önceleri kayma eğilimi gösteren ve devrilmeye karşı emniyetli olmayan yapıların inşaası ile dar bir alanda kullanılmış olmakla beraber asıl kullanım alanları nükleer endüstride olduğu gibi hastanelerin ışın tedavisi ve radyografi tesislerindeki radyoaktif maddelerin yaydığı zararlı nükleer ışınlardan korunmak için gerçekleştirilen koruyucu beton perdelerdir. Bu betonların geleneksel betonlardan en önemli farkı, üretimlerinde doğal ya da yapay ağır agregaların kullanılmış olmasından dolayı, birim kütlelerinin geleneksel betonlara göre daha büyük olmasıdır.

Bu çalışmanın temel amacı, agrega petrografik yapısını da dikkate alarak Doğu Karadeniz bölgesi doğal ağır agregalarından biriyle üretilen ağır betonu, geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelemektir. Çalışma toplam sekiz bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, ağır betonlar konusunda, daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan yararlanmak suretiyle hazırlanmış olan, bir sentez çalışması sunulmaktadır. İkinci bölümde, Doğu Karadeniz Bölgesi doğal ağır agregalarından biriyle üretilen ağır betonun fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri geleneksel bir betonunkilerle karşılaştırılmakta, agrega petrografik yapısının betonun kırılma mekanizmaları üzerindeki etkisi incelenmekte, ağır betonlarla üretilen beton ve betonarme kirişlerin eğilmedeki davranışlarının geleneksel beton ve betonarme kirişlerinkiyle deneysel ve teorik olarak karşılaştırılmasından elde edilen bulgular da bu bölümde verilmektedir. Üçüncü bölümde, bu çalışmadan elde edilen bulgular ayrıntılı bir şekilde irdelenmektedir. Dördüncü ve beşinci bölüm ise, çalışmanın bütününden çıkartılabilen başlıca sonuç ve önerilere ayrılmıştır. Son bölümü kaynaklar listesiyle "Kum Eşdeğerliği Deneyi", "Birim Şekildeğiştirme Ölçerleri" ve "Merkezi Basınçta Betonun Kırılması Esnasında Aderans Bölgesine Uygulanan Çekme Gerilmesi"' ne ilişkin üç ek bölüm izlemektedir.

Elde edilen sonuçlar, Doğu Karadeniz Bölgesi doğal ağır agregalarından biriyle üretilen ağır betonun özel yapılarda kullanımının birçok durumda geleneksel beton kullanımından daha uygun olacağını ortaya koymuş bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ağır agrega, ağır beton, geleneksel agrega, geleneksel beton, kırılma mekanizmaları, eğilme davranışları, deneysel ve teorik karşılaştırma

SUMMARY

COMPARATIVE STUDY OF HEAVYWEIGHT CONCRETE PRODUCED USING ONE OF THE NATURAL HEAVYWEIGHT AGGREGATES PRESENT IN THE EASTERN BLACKSEA REGION WITH TRADITIONAL CONCRETE

Although heavyweight concretes have been used as balancing weight in some special structures which are not safe against sliding and rotation, their main function is to prevent the effects of radioactive matters which emit harmful nuclear rays. The most important difference between heavyweight concrete and traditional concrete is their unit weights. The unit weights of heavyweight concretes are greater than traditional concretes. This study has eight chapters.

In the first chapter, a synthesis work is given on heavyweight concretes in the lights of the previous studies. In the second chapter, the properties of heavyweight concrete produced using one of the natural heavyweight aggregates present in the Eastern Blacksea Region are compared to those of the traditional concretes and the effects of the petrographic nature of the aggregates on the fracture mechanism of concrete are studied. Also, the bending behaviours of heavyweight and traditional concrete and reinforced concrete beams are investigated theoretically and experimantally by comparing with the results of each other. In the third chapter, the results obtained in this study are given and evoluated. In the fourth and fifth chapters, the general conclusions obtained from the study together with the recomendations are summarized. Following the fifth chapter, a list of the references and three supplementary chapters are given on "The Sand Equvalent Experiment", "The Strain-gauges", and "Tension Stress Applied to Bond Zone During the Fracture of Concrete Under Axial Force".

The main conclusion drawn from the study indicated that, in most cases, the use of heavyweight concrete in special structures is more appropriate compared to the use of a traditional concrete.

Keywords: Heavyweight aggregate, heavyweight concrete, traditional aggregate, traditional concrete, fracture mechanisms of concrete, bending behaviours of beams, experimental and theoretical comparison.

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1 : Kum eşdeğerliği deney düzeneği....18

Şekil 2 : Kullanılan ağır agreganın ince kesiti ve tipik bir ışınsal grup görünümü....19

Şekil 3 : Birim şekil değiştirme ölçerlerinin karotlar üzerindeki şematik konumu....20

Şekil 4 : Birim şekildeğiştirmelerin ölçülmesinde kullanılan ekstansometre....20

Şekil 5 : Üniversal deney aleti....21

Şekil 6 : Ağır agrega üretiminde kullanılan kayacın ortalama gerilme-şekildeğiştirme diyagramı....22

Şekil 7 : Ağır agrega üretiminde kullanılan kayaç enine şekildeğiştirmesinin, boyuna şekildeğiştirmeye bağlı olarak, değişimi....23

Şekil 8 : Geleneksel agreganın ince kesitlerinden tipik bir görünüm....23

Şekil 9 : Geleneksel agrega üretiminde kullanılan kayacın ortalama gerilme-şekildeğiştirme diyagramı....24

Şekil 10 : Geleneksel agrega üretiminde kullanılan kayaç enine şekildeğiştirmesinin, boyuna şekildeğiştirmeye bağlı olarak, değişimi....25

Şekil 11 : Ağır ve geleneksel agregaların granülometrik bileşimi....28

Şekil 12 : Betonların karılmasında kullanılan betoniyer....31

Şekil 13 : Betonun sarsma tablası üzerinde yerleştirilmesi anından bir görünüm....32

Şekil 14 : Betonlar üzerinde gerçekleştirilen merkezi basınç deneyinden bir görünüm....34.

Şekil 15 : Ağır betonların tipik gerilme-şekildeğiştirme diyagramları....34

Şekil 16 : Ağır betonların enine şekildeğiştirmelerinin, boyuna şekildeğiştirmeye bağlı olarak, değişimi....35

Şekil 17 : Geleneksel betonların tipik gerilme-şekildeğiştirme diyagramları....35

Şekil 18 : Geleneksel betonların enine şekildeğiştirmesinin, boyuna şekildeğiştirmeye bağlı olarak, değişimi....36.

Şekil 19 : Isıl iletkenlik deney düzeneği....37

Şekil 20 : Betonun, a ve v'nin sabit halleri için, teorik çekme dayanımı eğrileri....48

Şekil 21 : Aderansın zayıf ya da hiç olmaması durumunda, e ve v' nin sabit halleri için, teorik çekme dayanımı eğrileri....49

Şekil 22 : Aderansın yeterli olması durumunda, e ve v' nin sabit halleri için, teorik çekme dayanımı eğrileri....49

Sayfa No

Şekil 23 : Betonun, c ve v' nin sabit halleri için, teorik çekme dayanımı eğrileri.....51
Şekil 24 : Geleneksel betonun bir eksenli merkezi basınç altında şematik gerilme-birimşekildeğiştirme diyagramı.....53
Şekil 25 : Beklenen kırılma şekilleri.....54
Şekil 26 : Merkezi basınçta agrega ve çimento hamuru şekildeğiştirmeleri.....57
Şekil 27 : Merkezi basınçta bir beton numunenin ezilmesinden sonra agrega tanesinin durumu.....61
Şekil 28 : Betonun, e ve v' nin sabit halleri için, teorik basınç dayanımı eğrileri.....65
Şekil 29 : Standard,sertleşmiş çimento hamurundan, numunelerin, su/çimento oranlarına göre, gerilme-şekildeğiştirme diyagramları.....71
Şekil 30 : Standard, sertleşmiş çimento hamurundan, numunelerin, su/çimento oranlarıyla, elde edile enine şekildeğiştirmesinin, boyuna şekildeğiştirmeye bağlı, değişimi.....71
Şekil 31 : Michalis eğilme deney aleti.....74
Şekil 32 : Agrega üretiminde kullanılan kayaçların, betonların ve çimento hamurunun gerilme-şekildeğiştirme diyagramları (W/C=0.50).....78
Şekil 33 : Ağır ve geleneksel betonların kırılmaları.....79
Şekil 34 : Deney kirişlerinin kalıp planı ve tipik donatı şeması.....81
Şekil 35 : Deney kirişlerine ilişkin kalıpların plan ve kesiti.....82
Şekil 36 : ϕ 8' lik donatının görünen ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.....83
Şekil 37 : ϕ 12' lik donatının görünen ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.....84
Şekil 38 : Deney kirişlerinin yükleme düzeneği ve ölçme aletleri.....85
Şekil 39 : Eğilme deneyine tabi tutulan kirişler..... 86
Şekil 40 : Birim şekildeğiştirme ölçerlerinin deney kirişi üzerindeki konumu.....87
Şekil 41 : Beton-donatı aderansı 89
Şekil 42 : Ağır ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin kırılma yükleri altında şematik çatlama durumları.....93
Şekil 43 : Basit eğilme etkisindeki bir kesitte şekildeğiştirmeler, gerilmeler ve bileşkeleri.....95

Sayfa No

Şekil 44 : Betonarme bir kesitin şematik şekildeğiştirme diyagramı ve göçme anında kesitte oluşan iç kuvvetler....96.
Şekil 45 : Betonarme bir kesitin göçme anındaki şekildeğiştirme diyagramının araştırılması....97
Şekil 46: Bilgisayar programı akış diyagramı....99
Şekil 47 : Donatısız kirişlerin tipik şekildeğiştirme diyagramları ve göçme yükü altında şematik çatlama durumları....103
Şekil 48 : Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin tipik şekildeğiştirme diyagramları ve göçme yükü altında şematik çatlama durumları....104
Şekil 49 : Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin yük-sehim diyagramları....105
Ek Şekil 1: Kum eşdeğerliği deney sürecinin şematik gösterilimi....125
Ek Şekil 2: Beton dayanımının ES ile değişim şeması....127
Ek Şekil 3: Şekil değiştirme ölçeri şeması....129

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1: Enjeksiyon beton harcı kumunun granülometrisi....11
Tablo 2: Kullanılan ağır agreganın fiziksel özelikleri ve kum eşdeğerlikleri (ESV).....18
Tablo 3: Kullanılan ağır agreganın mekanik özelikleri....21
Tablo 4: Kullanılan geleneksel agreganın fiziksel özelikleri ve kum eşdeğerlikleri.....22
Tablo 5: Kullanılan geleneksel agreganın mekanik özelikleri....24
Tablo 6: Betonların üretiminde kullanılan çimento özelikleri....26
Tablo 7: Beton karma suyunun kimyasal özelikleri....27
Tablo 8: Betonların bileşimleri....29
Tablo 9: Betonların çökme konisi deney sonuçları....30.
Tablo 10: Betonların birim kütleleri....32
Tablo 11: Betonların mekanik özelikleri....33
Tablo 12: Betonların ısıl iletkenlik katsayıları ve birim kütleleri....38
Tablo 13: Sertleşmiş çimento hamurunun mekanik özelikleri....70
Tablo 14: Deneylerde kullanılan numuneler ve deney türleri....73
Tablo 15: Ağır ve geleneksel betonlardaki harç fazlarının bileşimleri....74
Tablo 16: Kayaç, çimento hamuru ve harç numunelerin (40mmx40mmx160mm) eğilme ve basınç dayanımları....75
Tablo 17 : Kayaç-harç ve kayaç-çimento hamuru aderans dayanımları....75
Tablo 18: Agrega üretiminde kullanılan kayaçların, betonların ve sertleşmiş çimento hamurlarının bazı özelikleri....77
Tablo 19 : Ağır ve geleneksel beton ve betonarme kiriş çiftlerinin donatı miktar ve oranları....80
Tablo 20: Deney kirişi çiftlerinin enkesit detayları....80
Tablo 21: Kiriş üretiminde kullanılan donatıların gerçek ve görünen bazı mekanik özelikleri....84
Tablo 22 : Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerde göçme yükü altında sabit moment bölgesinde oluşan çatlak mesafeleri, sayıları ve genişlikleri....92
Tablo 23: Ağır ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin deneysel ve teorik ilk çatlama momentleriyle, ilk çatlamayı oluşturan maksimum birim uzamalar...92

Sayfa No

Tablo 24: Kiriş üretiminde kullanılan ağır ve geleneksel betonların ortalama ve karakteristik basınç dayanımları ile göçme şekildeğiştirmeleri.....98
Tablo 25: Ağır ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin göçme ve kullanım momentleri.....101
Tablo 26: Ağır ve geleneksel betonarme kirişler için γ_s, γ_r, γ_r^* değerleri.....101
Tablo 27: Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin ρ_b, ρ_{min} ve ρ_c değerleri.....102
Tablo 28: Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin teorik ve deneysel maksimum ani sehimleri.....106
Ek Tablo 1: Kum eşdeğerliği deney sonuçlarının gösterilimine bir örnek.....126
Ek Tablo 2: Beton ve çelik üzerine yerleştirilmiş birim şekildeğiştirme ölçerlerinin karşılaştırılması.....134

SEMBOL LİSTESİ

A : Alan, Gerilme-şekildeğiştirme arasındaki Abrams bağıntısına ilişkin bir katsayı

A_{ct} : Betonarme elemanlarda çatlağa ilişkin beton alanı

A_s : Donatı alanı

a : Agrega, beton ya da harçta hacimce agrega miktarı

B : Gerilme-şekildeğiştirme arasındaki Abrams bağıntısına ilişkin bir katsayı

b : Çimento türüne bağlı bir katsayı

c : Beton ya da harçta hacimce çimento miktarı

E_a : Betonun kırılması anında agrega sekant modülü

E'_a : Agrega enine şekildeğiştirmesine ($\nu_a\varepsilon_a$) karşılık gelen sekant modülü

E_c : Betonun kırılması anında çimento hamuru sekant modülü, betonun başlangıç elastisite modülü

E'_c : Çimento enine şekildeğiştirmesine ($\nu_c\varepsilon_c$) karşılık gelen çimento hamuru sekant modülü

f_{at} : Agrega çekme dayanımı

f_{acp} : Agrega kayacı-çimento hamuru aderansı

f_{adt} : Aderans çekme dayanımı

f_c : Beton basınç dayanımı

f_{c1} : Birinci şekil kırılmada beton basınç dayanımı

f_{c2} : İkinci şekil kırılmada beton basınç dayanımı

f'_{c2} : Betonun kırılmasına agrega dayanım düşüklüğünün neden olması halinde basınç dayanımı

f_{ck} : Betonun, standard silindir, karakteristik basınç dayanımı

f_{ct} : Beton çekme dayanımı, Çimento hamuru çekme dayanımı

f_{cp} : Çimento hamuru basınç dayanımı

f_{ct1} : Birinci şekil kırılmada beton çekme dayanımı

f_{ct2} : İkinci şekil kırılmada beton çekme dayanımı

f'_{ct2} : Betonun kırılmasına agrega dayanım düşüklüğünün neden olması halinde çekme dayanımı

f_{ct3} : En genel bir cisim için, kırılmanın önce bağlayıcıda meydana gelmememsi halinde,

aderans sökülmesine bağlı çekme dayanımı

f'_{ct3} : En genel bir cisim için, kırılmanın önce bağlayıcıda meydana gelmememesi halinde, tanelerin kırılmasına bağlı çekme dayanımı

f_{ct4} : En genel bir cisim için bağlayıcı kırılmasının tüm cismin kırılmasına neden olması halinde çekme dayanımı

f_{yd} : Donatının hesap akma dayanımı

f_{yk} : Donatının karakteristik akma dayanımı

K : Agrega granülometrisine bağlı bir katsayı, Birim şekildeğiştirme ölçerlerinde duyarlılık katsayısı

K_B : Gerilme-şekildeğiştirme arasındaki Bolomey bağıntısına ilişkin bir katsayı

K_F : Gerilme-şekildeğiştirme arasındaki Feret bağıntısına ilişkin bir katsayı

K_G : Gerilme-şekildeğiştirme arasındaki Graf bağıntısına ilişkin bir katsayı

k : Çimento ve agrega yapısına bağlı bir katsayı, Doluluk oranı (Komposite)

m : Agrega granülometrisine bağlı bir katsayı

N_r : Kırılma yükü

$N_{r\omega}$: ω elemanının s alanındaki kırılma yükü

N_ω : Kesitin ω elemanındaki ortalama normal kuvvet

r_c : Gerilme-şekildeğiştirmeye ilişkin Bolomey bağıntısında çimento hamuru basınç dayanımı

s : ω elemanının 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 aderansla ilgili bir katsayı

t_c : Çimento yapısına ve muhafaza koşullarına bağlı bir katsayı

W_a : Bir metreküp betonda agrega kütlesi

W_c : Bir metreküp betonda çimento kütlesi

W_m : Ortalama çatlak genişliği

V_h : Bir metreküp betonda hapsedilmiş hava hacmi

V_w : Bir metreküp betonda su hacmi

α_i : Zamanla artan bir fonksiyon

γ : Çimento hamurundaki çimento oranı (çimento konsantrasyonu)

γ_a : Agreganın özgül kütlesi

γ_c : Çimentonun özgül kütlesi

γ_o : Hidratasyon için ancak yeterli olan çimento hamurundaki çimento oranı

γ_l : Aderans için ancak yeterli olan çimento hamurundaki çimento oranı

Δl : Çatlaklar arasındaki ortalama mesafe

ε : Birim şekildeğiştirme

ε_a : Agrega birim şekildeğiştirmesi

ε_c : Çimento hamuru birim şekildeğiştirmesi, Beton birim şekildeğiştirme

ε_{co} : Betondaki maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekildeğiştirme

ε_{cu} : Betonun maksimum birim şekildeğiştirmesi

ε_{oa} : Aderans olmaması halinde agrega enine şekildeğiştirmesi

ε_t : Betonun enine birim şekildeğiştirmesi

ε_{la} : Agrega ortalama birim şekildeğiştirmesi

ε_{lc} : Aderans olmaması halinde çimento hamuru birim şekildeğiştirmesi

ε_{oc} : Çimento hamuru enine birim şekildeğiştirmesi

ε_s : Donatı birim şekildeğiştirmesi

λ : Isıl iletkenlik katsayısı

μ : Sadece agrega şekline bağlı bir katsayı

ν : Betonun poisson oranı

ν_a : Agrega poisson oranı

ν_c : Çimento hamurunun poisson oranı

ρ : Donatı oranı

ρ_b : Dengeli donatı oranı

ρ_c : Kritik donatı oranı

ρ_r : Çatlağa ilişkin donatı oranı

σ : Normal gerilme

σ_a : Agregada çekme gerilmesi

σ_{adt} : Aderans bölgesinde çekme gerilmesi

σ_c : Çimento hamurunda çekme gerilmesi, Betonun basınç gerilmesi

σ_{ct} : Betonda ortalama çekme gerilmesi

τ_{bd} : Beton-donatı aderans gerilmesi

Δ_i : Ani sehim

l : Kiriş açıklığı

a : Tekil yüklerden birinin mesnete olan uzaklığı

F : Kuvvet, Göçme yükü

M_{cr} : Eğilme etkisindeki beton kesitin çatlama momenti

M_{max} : Elemana etkiyen maksimum moment

M_r : Direnme momenti, TS 500' göre hesaplanan göçme momenti

M_{re} : Deneysel göçme momenti

M_{rt} : Teorik göçme momenti

M_s : Kullanım momenti

I_c : Brüt beton kesitin ağırlık merkezine göre eylemsizlik momenti

I_{cr} : Çatlamış kesitin eylemsizlik momenti

I_{ef} : Etkili eylemsizlik momenti

Not: Bu listede verilmeyen bazı semboller çalışmada ilgili oldukları yerlerde açıklanmışlardır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bilindiği gibi dünyada, özellikle Türkiye'de ağır betonlar uzun zamandan beri üretilmekle beraber ilk zamanlar kullanımları, kayma eğilimi gösteren ve devrilmeye karşı emniyette olmayan bazı özel yapıların sözkonusu emniyetlerini sağlamak amacına yönelik dar bir alanda sınırlı kalmıştır. Ancak nükleer enerjinin gelişmesi özellikle nötron ve γ gibi cisimlerin içine girebilme yetenekleri yüksek olan öldürücü ışınlara karşı biyolojik koruyucu bir beton perde oluşturma zorunluluğu, bu beton perde kalınlığını minimuna indirgenmesine imkan veren, ağır betonlara yeni bir önem kazandırmıştır.

Ağır betonları geleneksel betonlardan ayırd eden en önemli husus; üretimlerinde kullanılan agregaların farklı oluşudur. Kullanılan agregaların birim kütlelerinin geleneksel agregalarınkine göre daha büyük oluşu (>3500 kg/m^3) bu betonların birim kütlelerinin geleneksel betonlarınkinden (2800 kg/m^3) daha büyük olmasına neden olmaktadır. Gerçekten teknik literatürde, birim kütleleri genellikle 2800 kg/m ^{3,} den daha büyük olan betonlar ağır beton olarak adlandırılmaktadır. Betonların birim kütleleri artıkça radyasyona karşı koruyucu etkinlikleride o oranda artmaktadır. Bu nedenledir ki; birim kütleleri 2300 kg/ m$^{3.}$ - 2400 kg/m^3 arasında değişen geleneksel betonlarla radyasyona karşı aynı derecede korunabilmek için koruyucu beton perde kalınlığının daha büyük olması gerekmektedir.

Bu bölümde, ağır betonlar konusunda daha önce gerçekleştirilen bazı araştırmalar, ağır beton üretiminde kullanılan agregalar, ağır beton üretimi, sınıflandırılması, yerine konması, bazı ortak özelikleri, kullanım alanları ile önemi ve geleceğini kapsayan bir sentez çalışması sunulmaktadır.

1.2. Ağır Betonlar Üzerinde Daha Önce Gerçekleştirilmiş Olan Bazı Çalışmalar

Bu başlık altında ağır betonlar konusunda daha önce gerçekleştirilmiş olan teknik literatürde mevcut bazı çalışmalar üzerinde durulmaktadır.

R.S Varshney [1] 10^{11} nötron/cm akım altında ağır betonda maksimum ısı ve ısı akımı eğiminin geleneksel betondakinden çok farklı olmadığı, barit betonu elastisite modülü ve poisson oranının geleneksel betonunkilerin yaklaşık aynı olduğu, fakat ağır betondaki büzülmenin (rötrenin) geleneksel betonunkinin 1/4 ile 1/3 oranında daha az olduğu sonucuna varmıştır. Aynı araştırmacı barit betonu ısı genleşme katsayısının geleneksel betonunkinin iki katı, buna karşılık özgül ısı, ısı iletkenliği ve yayılma hızının daha düşük olduğunu savunmaktadır.

Clendenning, Kellam ve Macinnis [2] Ferrophosphorous ve ferrosilicon gibi yapay ağır agregalar üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu malzemelerin özgül kütlelerinin 6000 kg/m^3 ya da daha fazla olduğunu, bu tür agregalar kullanmak süretiyle üretilen betonun birim kütlesinin ise 5000 kg/m^3'ü aşacağını ortaya koymuşlardır.

Komski ve Saakov [3] birbirinden çok farklı olan ağır ve hafif beton üzerinde püskürtme suretiyle gerçekleştirilen camsı kaplama ve kaplama altındaki betonların ısıl özeliklerini araştırmışlardır.

Zazula ve Tesch [4] çeşitli yöntemlerle ağır ve geleneksel beton üzerine gelen farklı enerjiye sahip hızlı nötronların toplam doz eşdeğerliklerini belirlemişlerdir. Zararlı dozların zayıflatma uzunluklarının geleneksel betonda 107 gcm^{-2}, ağır betonda ise 116 gcm^{-2} olduğunu ortaya koymuş ve ağır betonların nötron yavaşlatmada geleneksel betona göre daha etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Orchard [5] ağır betonların kalıplarında, birim kütlelerinin daha büyük olmasından dolayı, geleneksel betona göre daha yüksek basınçların olduğunu bu nedenle ağır beton kalıplarının daha rijit olması gerektiğini vurgulamış ve ağır agregaların betoniyerlerde oluşturacağı tahribatı önlemek amacıyla tane boyutlarının indirgenmesi gerektiğini savunmuştur.

Chang ve Cohen [6] New York' daki bir asma köprünün onarımında ağır beton denge ağırlığı olarak kullanılarak inceleme çalışmaları yapılmıştır.

Klink [7],[8] ve [9] ağır, geleneksel ve hafif agregalı beton numuneler üzerinde yaptığı bir eksenli merkezi basınç deneylerinde, numunelerin ortasına yerleştirdiği gömme tipi birim şekil değiştirme ölçerleri yardımıyla, elastisite modülü ve poisson oranlarını belirleyerek bunlarla ilgili bir takım bağıntılar vermiş, betonun elastik sabitlerinin basınç dayanımı ve birim kütlelerinin bir fonksiyonu olduğunu ileri sürmüştür.

Neville [10] basınç dayanımı yüksek olan betonların poisson oranlarının düşük olduğunu, Bergström ve Byfor [11] ise yaptıkları deneysel çalışmada, betonun basınç dayanımının artmasıyla poisson oranınında artış gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Meyer [12] 1989 yılında Almanya' da radyasyondan korunmak amacıyla ağır beton konusunda bir takım çalışmalar yapmıştır.

Toszegi, Hajmasi, Nagy, Vigh [13] Macaristan'da bir nükleer güç santralinin ana binasında ağır beton kullanmış ve kulandıkları bu betonun özeliklerini incelemişlerdir.

Erbe, Schulte [14] 1991 yılında Almanya'da bir hastanade ışın tedavileri için yeni bir yapı inşa etmiş ve bu yapıdaki insanları radyasyona karşı korumak amacıyla tavan ve duvarlar hazır ağır betonla gerçekleştirilmiştir.

ACI [15] 1991 yılında yapılarda kullanılan beton ve kütle betonu uygulamalarına ilişkin enjeksiyonla betonlama hakkında öneriler adı altında bir yönetmelik yayınlamış ve bu yönetmelikte geleneksel betondan farklı olarak ağır beton bileşiminde kullanılan malzeme özelikleri ve bazı tipik ağır beton uygulamalarına değinilmiştir.

Dusil, Beier [16] 1989 yılında Almanya' da nükleer santrallerin radyasyon emniyetleri için ağır betonlar hakkında bazı özel araştırmalar yapmıştır..

Tobin, Hall ve Artuso [17] 1975 yılında İngiltere'de ağır beton bileşimi, üretimi, taşıması ve yerine konması hakkında çalışmalar yapmıştır.

Bessiere [18] 1984 yılında Fransa'da hidrolik yapılarda ağır betonun kullanımına ilişkin bir takım çalışmalar yapmıştır.

Witte [19] 1985 yılında Berlin'de elektron depolama devresi olarak kulanılan özel bir yapıda ürettiği ağır betonu kullanmıştır.

Tschirf [20] 1976 yılında Avusturya' da x, γ ve nötron ışınlarının zararlı etkilerinden korunmak amacıyla geleneksel ve ağır beton üzerinde bir seri çalışma gerçekleştirmiştir.

Miller [21] 1983 yılında İngilter'de ağır beton üretiminde kullanılan agregaların birim kütleleri, beton bileşimleri, üretimleri, taşıma ve yerine konmaları, fiziksel ve mekanik özelikleri ile ilgili çalışmalar yapmıştır.

Clark [22] 1986 yılında İngiltere'de doğrusal elektron hızlandırıcıların özel boyutlarını belirleyerek ozon ve radyasyona karşı güvenliği sağlamaya yönelik ağır beton konusunda bir takım çalışmalar yapmıştır.

Kuenzel, Gertis [23] 1966 yılında Almanya'da ağır betonla inşa edilen boşluklu dolgu duvara sahip konutların dış duvarlarının nem içerikleri konusunda araştırmalar yapmışlardır.

Wandschneider, Pick [24] 1982 yılında Almanya'da yapısal radyasyona karşı korunmada sıva, kargir ve beton hakkında çalışmalar yapmışlardır.

Berlin'de 1970 yılında ACI [25] "Nücleer Reaktörler İçin Beton" konusunda bir seminer düzenlenmiştir ve bu seminerde nükleer reaktörlerde betonun yaygın kullanımı, proje hesapları için beton özeliklerinin birbiriyle ilişkisi, farklı gerilme durumları altında beton dayanımı, yükselen ısının beton dayanımına etkileri, nötron ışınlarının etkileri ve özel ağır beton konuları işlenmiştir.

Polivka ve Davis [26] hızlı, orta hızlı ve düşük hızlı nötronları yavaşlatmak için sırasıyla atom ağırlıkları yüksek ağır malzemeler, hidrojen ve oksijen gibi hafif element konularında araştırmalar yapmış ve zararlı ışınlara karşı boron içeren malzeme kullanılması gerektiğini savunmuştur..

Mather [27] magnetit ve ilmenit agregalarıyla 250-335 kg/m^3 portland çimento dozajlı ve kütlece su/çimento oranı 0.30-0.35 olan betonlar üretilmiştir. Bu betonların birim kütleleri 3700 kg/m^3 - 3780 kg/m^3 arasında değerler almıştır ve 7 günlük basınç dayanımları 535-660 kgf/cm^2 , 28 günlüklerinkiler ise 630-775 kgf/cm^2'lik basınç dayanımı vermişlerdir.

Postacıoğlu [28] daha çok ağır betonların üretiminde dikkat edilmesi gerekli hususlar üzerinde durmaktadır.

Akman [29] daha çok ağır betonların enjeksiyonla betonlanması konusunu işlemiştir.

Durmuş, Gürsoy ve Ayvaz [30] ağır betonun tanımı, kullanım alanı, kullanılan başlıca agregalar, ağır betonların bileşim, üretim, yerine konulması, bakımı ve dayanımları konularında bir sentez çalışması sunmuşlardır.

1.3. Ağır Beton Üretiminde Kullanılan Ağır Agregalar

1.3.1. Doğal Ağır Agregalar

Doğal ağır agrega sınıfına giren agregaların başlıcalarının barit, witerit, lepidokrosit, magnetit, hematit, limonit, geotit ve ilmenit olduğu bilinmektedir. Bunlardan barit, witerit hariç diğerleri çeşitli demir minerallerinden ibarettir. Aşağıda bu agregaların herbirine ilişkin bazı özelikler verilmektedir.

1.3.1.1. Barit

Barit doğada kristal ve amorf yapılı olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. Bileşiminin %94' ünü genellikle saf $BaSO_4$ geri kalan kısmını ise silis, demir oksit ve prit teşkil etmektedir. Teknik literatürde [31] bu agregalar bileşimlerinin %85' inden fazlasının $BaSO_4$ olması ve özgül kütlelerinin de (tane birim kütle) 4000 kg/m^3 - 4300 kg/m^3 arasında olması ile iyi barit olarak adlandırılmaktadır. Bu agregayla üretilen betonların birim kütleleri 2800 kg/m^3' ün üzerinde olmaktadır. Ağır beton üretiminde kullanılan barit bileşiminde prit ve kalsiyum sülfatın bulunmaması ancak, bu kayaca daha iyi bir dayanım kazandırdığından, %3 - %5 arasında değişen oranlarda silis' in bulunması tercih edilmektedir.

1.3.1.2. Witerit

Saf witerit bileşimi $BaCO_3$' dan ibarettir. Özgül kütlesi 4290 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 2450 kg/m^3' mertebesinde olmaktadır.

1.3.1.3. Lepidokrosit

Lepidokrosit, bileşiminde %8-12 arasında değişen oranlarda su bulunduran hidrate olmuş bir demir mineralinden ibarettir. Özgül kütlesi 3700 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 2340 kg/m^3' mertebesinde olmaktadır.

1.3.1.4. Magnetit

Saf magnetit bileşimi Fe_3O_4 demir mineralinden ibarettir.. Özgül kütlesi 4000 kg/m^3 - 5000 kg/m^3 arasında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 3500 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.1.5. Hematit

Saf hematit bileşimi Fe_2O_3 demir mineralinden ibarettir. Özgül kütlesi 5100 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 3800 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.1.6. Limonit

Saf limonit bileşimi $2Fe_2O_33H_2O$ demir mineralinden ibarettir. Özgül kütlesi 3750 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 2900 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.1.7. Geotit

Saf geotit bileşimi $2Fe_2O_3H_2O$ demir mineralinden ibarettir. Özgül kütlesi 3500 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 3000 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.1.8. İlmenit

Saf ilmenit bileşimi $FeTiO_3$ demir mineralinden ibarettir. Özgül kütlesi 4600 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 3300 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.2. Yapay Ağır Agregalar

Ağır beton üretiminde yaygın olarak kullanılan 3 çeşit yapay ağır agrega vardır. Bunlar supershot, demirshot ve kurşunshot'dır. Bunların dışındaki diğer yapay ağır agregalar ise ferrosilikon ve ferrofosfor'dur [21].

1.3.2.1. Supershot

Süpershot, cüruftan ayrılan, hurda demiri parçacıklarından ibarettir. Özgül kütlesi 7200 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 4500 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.2.2. Demirshot

Demirshot demir parçacıklarından ibarettir. Özgül kütlesi 7600 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi ise 5500 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.2.3. Kurşunshot

Kurşunshot kurşun parçacıklarından ibarettir. Özgül kütlesi 11300 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi ise 9000 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.2.4. Ferrosilikon

Ferrosilikon bileşimi %80 demir ve %17 silikondan ibarettir. Özgül kütlesi 6300 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 5000 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.2.5. Ferrofosfor

Ferrofosfor bileşimi Fe_3P, Fe_2P, FeP olan bir cüruftan ibarettir. Özgül kütlesi 6100 kg/m^3 civarında olan bu agregayla üretilen betonun birim kütlesi 5100 kg/m^3 mertebesinde olmaktadır.

1.3.3.Ağır Agregaların Nakliyesi, Depolanması ve Betoniyerlere Yerleştirilmesi

Ağır beton üretiminde kullanılan ağır agregaların nakliyesi, depolanması, saklanması ve betoniyerlere yerleştirilmesinde bir çok konuda geleneksel beton üretiminde kullanılan agregalarınkinden daha fazla özen göstermek gerekmektedir. Bu hususlar aşağıda verilmektedir [30],[32].

1) Taşıma ve depolama esnasında ağır agregaların geleneksel agregalarla karışmaması, yabancı maddeler tarafından kirletilmemesi, ince agrega kaybının olmaması önemli agrega kırılması ve/veya ayrışmasının meydana gelmemesi için yeterli özenin gösterilmesi gerekmektedir.

2) Demir mineral esaslı agregalar gerekli hallerde dışarıda da depolanabilir olmakla beraber yaygın olarak kullanılan ağır agregalardan biri olan barit' in mutlaka kirlenmeyecek şekilde depolanması, yapay ağır agregalar ise politen kaplı polipropilen torbalar içinde saklanmaları gerekmektedir.

3) Ağır beton bileşiminde kullanılan agrega ve betoniyer temizliğinin yeterli düzeyde olması sağlanmalıdır.

4) Ağır beton üretilirken kullanılan betoniyerleri aşırı yüklememek için, bunları kapasitelerinin %40 - %80 arasında çalıştırılması gerekmektedir. Bu gereksinim ağır beton üretiminde kullanılan agregaların geleneksel agregalardan çok daha ağır olmasından kaynaklanmaktadır.

5) Ağır beton üretiminde kullanılan doğal ağır agregaların doğal birinm kütlelerinin, birim kütle yönünden üniform beton üretebilmek amacıyla, sürekli denetim altında tutulması gerekmektedir.

1.4. Ağır Betonların Bileşim, Dayanım, Üretim ve Yerine Konması

1.4.1. Ağır Betonların Bileşim ve Dayanımları

Ağır betonlar ağır agrega kullanarak geleneksel betondan pek az farklı bir şekilde üretilmektedir. Bu amaçla kullanılan başlıca agregalar daha önce Madde 1.3' de verilmiştir. Diğer betonlarda olduğu gibi ağır betonların bileşimleride teknik literatürde [33] mevcut yöntemlerden biriyle gerçekleştirilmekle beraber Türkiye' de bu hesap için genellikle mutlak hacim yöntemi kullanılmaktadır [34]. Ağır agregaların muayene ve deneyleri de TS 706' ya göre yapılmaktadır. Beton üreticileri agregalara ilşkin deneyleri yeterliliği kanıtlanmış araştırma laboratuvarlarında yaptırmak zorundadır. Bu betonların üretiminde kullanılan ağır agrega granülometrilerinin boşluk oranını ve çatlama riskini minimum düzeyde tutacak özelikte olması gerekmektedir. Sözkonusu özelikte beton elde etme şansını yükseltmek için agreganın ince kısmının ayrılması ve betonun doğru olarak yerleştirilmesine imkan tanıyan minumum karma suyunun kullanılması gerekmektedir. Süperakışkanlaştırıcı gibi katkı maddelerinin kullanılması halinde kütlece su/çimento oranının 0.40' ın altına indirgenmesi durumunda da boşluk oranı ve çatlama riski minimum beton üretmek mümkün olabilmektedir. Çok sulu ağır betonların ayrışmaya karşı hassasiyetlerinin yüksek olması bu

betonlardaki su/çimento oranının 0.50' yi geçmemesini gerektirmektedir. Durum böyle olunca karma suyu miktarını azaltmak için üretimlerinde genellikle akışkanlaştırıcı ya da plastikleştirici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu betonların üretimlerinde yerine konmuş betondaki çimento dozajının 300 kg/m^3 - 350 kg/m^3 olması genellikle yeterli olmaktadır.

Betondaki boşluk oranının minimum olabilmesi için, kullanılan kumun da ağır olması durumunda, kütlece optimum harç/agrega oranının 0.70 olduğu bilinmektedir [35]. Bu oranın daha küçük olmasının ağır betonlar üzerinde yapmış olduğu olumsuz etki geleneksel betonlarınkinden daha fazladır. Durum böyle olunca harç/agrega oranını optimum değerinin (0.70) altında tutmak yerine üstünde tutmak, boşluk oranını azaltmak dolayısıyla da zararlı ışınlara karşı betonun koruyucu etkisini artırmak için, daha uygun olmaktadır.

Ağır beton üretimindeki zorluklardan biri ayrışmaya imkan vermeyen uygun bir işlenebilirlilik elde etmektir. Bunun için agrega granülometrik bileşimini özenle seçmek gerekmektedir.

Ağır betonların üretiminde geleneksel beton üretiminde kullanılan çimentoların tümü kullanılabilmekle beraber taze betonun işlenebilirliliğini artıran, radyasyona karşı korunumlu yapılarda, rötre çatlakları oluşturmayan, karma suyu ihtiyacı az olan çimentolar tercih edilmektedir. Radyasyona karşı koruyucu betonların üretiminde kullanılan çimentoların hidratasyon ısıları geleneksel betonlarda kullanılanlarınkinde daha büyük olduğundan kütle ağır betonlarının üretiminde düşük hidratasyon ısılı çimentolar kullanılması daha uygun olmaktadır. Katkısız puzolanlar, portland-puzolan karışımları, beton birim kütlelerini belirli bir değerin altına düşürmeyen hava kabarcığı yapan çimentoların ağır beton üretiminde kullanılmasının bir sakıncası bulunmamaktadır.

Ağır betonlar geleneksel betonlarla karşılaştırılabilecek düzeyde hatta, kullanılan karma suyunun miktarının azaltılması halinde, daha büyük dayanıma sahip olabilmektedirler. Örneğin; beton bileşiminin 300 kg/m^3 portland çimentosu, 3240 kg/m^3 barit agregası ve 120 kg/m^3 su şeklinde olması halinde 28 günlük basınç dayanımı 340 kgf/cm^2, çekme dayanımı ise 30 kgf/cm^2, 350 kg/m^3 çimento (KÇ 32.5), 2971 kg/m^3 barit agregası ve 140 kg/m^3 su şeklinde olması halinde ise; basınç dayanımı 470 kgf/cm^2, çekme dayanımı 40 kgf/cm^2 civarında olmaktadır.

Diğer beton üretimlerinde olduğu gibi, ağır beton üretiminde de, bileşim hesaplarında hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın istenen özeliklere sahip karışımlar elde edebilmek için laboratuvar çalışmalarını hassasiyetle yapabilecek deneyimli elemanlara ihtiyaç

bulunmaktadır. Bileşim hesapları için bazı yöntemler ACI 304 [17] ve TS 802 [34]'de mevcuttur.

1.4.2. Ağır Betonların Üretimi ve Yerine Konması

Geometrisi karmaşık olmayan yapılarda kullanılan ağır betonların üretimi, (ayrışmayı önlemek için, karma sürelerinin kısa tutulması, düşey eksenli betoniyer kullanımının tercih edilmesi ve bu betoniyerlerin tamamen doldurulmaması, ayrışma riskine karşı özel dikkat sarfedilmesi, güçlü vibrasyonun kısa süreyle yapılması, betonun en fazla 25 cm kalınlığında tabakalar halinde dökülmesi, iç vibratör daldırma yerleri arasındaki mesafenin 30 cm - 50 cm arasında olması, taze betondan doğan basınçları karşılayabilmek için kalıplarının daha rijit olması gereği dışında), geleneksel betonlarınkinden farklı değildir. Ancak, merdiven ve kanalizasyon boruları gibi geometrisi karmaşık olan yapı yada yapı elemanlarına ilişkin kalıplara ağır betonların iyi bir şekilde yerleştirilmesi genellikle kolay olamamaktadır. Bu gibi durumlarda önceleri onarım işlerinde kullanılan enjeksiyonla betonlama ya da prepakt beton tekniği adı verilen üretim tekniğine başvurulmaktadır. Bu teknik, genellikle geçirimsiz kalıplarla önceden yerine konan iri agregalar arasında bırakılan boşluklara reolojik karakteristikleri özenle üretilen (örneğin, yüksek hızla dönen iki döneçli bir karıştırıcıda üretilmiş yüksek türbülanslı harç) bir çimento harcı enjekte etmek esasına dayanmaktadır. Bu amaçla kullanılacak harçlar, diğer bir deyişle enjekte edilebilir yoğun harçlar genellikle kütlece kum/çimento oranı 3 - 3.5 arasında olan barit kumu ve kütlece yaklaşık 0.8 su/çimento oranıyla üretilebilmektedir. Enjeksiyon işi hidrostatik basınç altındaki bir tüp yardımıyla gerçekleştirilmektedir. [29], [36]. Bu teknik geleneksel beton üretiminde özellikle su altında beton dökümünde de tercih edilmektedir.

Granülometrisi kesikli agregalarla üretilen bu tür betonların iri agrega ve çimento harcı fazlarının özgün niteliklere sahip olması gerekmektedir. Agregalar doğal ya da yapay (kırmataş) olabilirler. En büyük agrega tane boyutunun, kalıp ve donatı sıklığının uygun olduğu ölçüde, büyük seçilmesinde yarar bulunmaktadır. Zira harç enjeksiyonu esnasında agrega tanelerinin yerlerinden oynamamaları için ağır olmaları tercih edilmektedir. Harcın boşluklara kolayca yerleştirilmesi için en büyük agrega tane boyutu, betonun yerleşeceği yapı elemanı genişliğinin 0.25' ini geçmemesi ve en küçük agrega tane boyutunun da belirli bir değerin altına düşmemesi uygun olmaktadır. En küçük agrega tane boyutunun 16 mm civarında tutulması önerilmekle beraber donatı sıklığı nedeniyle bazen bu sınır 8 mm' ye

kadar indirilmektedir. Harçla doldurulan iri agregaların yığın boşluk oranlarının 0.35 - 0.40 değerleri arasında bulunması uygun olmaktadır. Sözkonusu boşluk oranının bu düzeyde gerçekleştirilebilmesi için iri agrega granülometrisinin elverişli olmasıyla birlikte agregaların yerleştirilmeleri de önem taşımaktadır. Uygun granülometrili bileşenlerden oluşan ağır betonun sıkışma özeliği iyi, vibrasyon maliyeti geleneksel betonunkierden biraz daha büyük olup iç vibratörlerle sıkıştırma ve yerleştirme için TS 10326 [37]' daki vibratörler tavsiye edilmektedir. Agregaların yüksekten, genellikle hortumlar içinde, düşürülerek ve mümkünse vibrasyon uygulanarak yerleştirilmelerinin iyi olması gerekmektedir. Teknik literatürde, onarım işlerinde ve donatı problemi sözkonusu olduğunda agregaların el ile yerleştirilip sıkıştırıldıkları da belirtilmektedir [36]. Narin yapı elemanlarının vibrasyonu iç vibrasyon yerine kalıpların dıştan sarsılması suretiyle yapılmaktadır. Barit, magnetit, limonit gibi ağır agregaların enjeksiyon sırasında yerdeğiştirme riski daha az olduğundan enjeksiyonla betonlama tekniği ağır beton üretiminde daha uygun olmaktadır.

Enjeksiyon betonlarının harç fazı en iri tane boyutu 2 mm' yi geçmeyen kumla üretilen çok zengin çimento dozajlı ($C \geq 350$ kg/m^3) harçlardan olması gerekmektedir. Bunun için genellikle kütlece çimento/kum oranının 0.50 yada 1.00 olarak seçilmesi zorunlu olmaktadır. Kum granülometrisi için önerilen sınırlar aşağıdaki Tablo 1' de verilmektedir [36]. Kumun kütlece yaklaşık %20' sinin uçuçu külle değiştirilmesi kohezyonu daha yüksek bir harç elde edilmesine imkan vermektedir. Bu harca akışkanlaştırıcı ve genleştirici birer katkı ilave edilmesi, rötre yapan harcın iri agregalarla bağlantısının kesilmesini önlemek için, uygun olmaktadır. Devamlı su altında kalan betonlarda rötre oluşmayacağından bunlarda genleştirici katkı kullanmanın gerekli olmadığı açıktır.

Tablo 1: Enjeksiyon beton harcı kumunun granülometrisi [36].

Elek Gözenek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen	
	Minimum (%)	Maximum (%)
2.00	100	100
1.00	96	100
0.50	57	93
0.25	25	48
0.15	10	30
0.074	0	10

Harcın çok iyi bir şekilde karılması ve su ilavesi sırasında meydana gelen çimento topaklarının mutlaka ufalanması gerekmektedir. Bu işlem serbest düşmeli betoniyerlerde, sağlanamayacağından bunların karılmasında zorlamalı mikserlerin kullanılması gerekli olmaktadır.

Enjeksiyon betonlarının harçları sıkıştırılan agregalar arasına düşey olarak önceden yerleştirilen, 20 mm çapında, dipten itibaren 10 mm - 15 mm yükseklikte ve 1.0 m - 1.5 m aralıklarla batarya halinde tüm alanı kaplayan, borular yardımıyla enjekte edilmektedir. Bütün borulardan harç aynı anda, eşit debi ile verilmekte ve agrega boşluklarını aynı seviyeyi koruyacak şekilde doldurulmasının sağlanmasına çalışılmaktadır. Harç yükselme düzeyini ve homojenliğini denetlemek için ses hızları, düşey borular içine yerleştirilen, ultrasonik cihazlarla ölçülmektedir. Bu esnada sıkışan hava, beton döküm alanına yerleştirilmiş olan borular yardımıyla, dışarı atılmaktadır.

Burada bu betonların üretilip yerleştirilmesinde, önce harcın daha sonra agreganın yerleştirilmesine imkan veren tekniklerin varlığını da belirtmek uygun olmaktadır [38].

Ağır betonların yerine konmasında uygulanan iş derzlerinden mümkün oldukça kaçınmak gerekmektedir. Beton dökümü normal sıcaklıklarda 4 ile 8 saat boyunca yapıldığından bu süre sonunda döküme ara vermek gerekmektedir. Bu döküm süresi düşük sıcaklıklarda uzun, yüksek sıcaklıklarda daha kısa tutulmaktadır. Bu derzlerin eski betona ait yüzeylerinin, basınçlı su ile, iyice yıkanması uygun olmaktadır.

1.5. Ağır Betonların Sınıflandırılması

Türk Standardları Enstitüsü tarafından hazırlanan standard tasarısında [31] ağır betonların tek sınıf olduğu belirtilmekle beraber, bunlar da birim kütle, dayanım ve üretimlerinde kullanılan ağır agrega türlerine göre sınıflandırılabilmektedirler. Bilindiği gibi genellikle teknik literatür birim kütleleri ≤ 2350 kg/m^3 olan betonlar geleneksel, ≤ 1800 kg/m^3 olanlar hafif, ≥ 2800 kg/m^3 olanlar ise ağır beton olarak adlandırılmaktadır [39]. Gerçekten DIN1045 [39] birim kütlesi ≥ 2800 kg/m^3, ASTM C637 [40] 28 günlük basınç dayanımı ≥ 21 MPa, birim kütlesi ≥ 3000 kg/m^3, ACI 309 [38] ise birim kütlesi 2600 kg/m^3-4800 kg/m^3 olan betonları ağır beton sınıfına koymaktadır. Kulanılan ağır agregaların doğal ya da yapay oluşlarına göre bu betonlar doğal ağır agregalı ağır betonlar ve yapay ağır agregalı ağır betonlar olmak üzere de iki sınıfta toplanabilmektedir.

1.6. Ağır Betonların Bazı Ortak Özelikleri

Ağır betonlara ilişkin özeliklerin bazıları aşağıda kısaca özetlenmektedir.[30],[41],[42] :

1) Ağır betonların ortalama birim kütleleri geleneksel betonların ortalama birim kütlelerinden % 50 civarında daha büyük olmaktadır. Bu betonların geleneksel betonlardan daha ağır oluşları uygulamada, kalıp, kalıp payandaları ve temel gibi yapı elemanlarında problem yaratmaktadır.

2) Ağır betonların aşınma dayanımları geleneksel betonlarınkinden daha büyüktür.

3) Ağır betonların radyasyona karşı koruyucu özelikleri geleneksel betonunkilerden daha iyidir. Gerçekten betonun birim kütlesi ve bu betonla üretilen koruyucu perde kalınlığı arttıkça radyasyona karşı koruyuculuğu da o oranda artmaktadır.

4) Ağır betonların ısıl iletkenliği, birim kütle ve su içeriğine bağlı olarak değişmekle beraber, genellikle geleneksel betonlarınkinden yüksek olmaktadır. Literatürlerde de betonların birim kütleleri arttıkça ısıl iletkenliklerinin arttığı vurgulanmaktadır. Bu da bu betonların yangına karşı dayanımlarının geleneksel betonlarınkinden daha kötü olacağına işaret etmektedir.

5) Ağır betonların donma-çözünme olayına karşı dayanıklıkları geleneksel betonunkilerden daha azdır. Ancak bu betonlarda daha çok radyasyona karşı koruyuculuk özeliği arandığından, dayanıklılığının azlığı fazla önemli olmamaktadır.

6) Ağır betonların ortalama rötresi geleneksel betonlarınkinden %30 civarında daha azdır.

7) Standardlara göre (TS 3440) geleneksel betonların zararlı su, zemin ve gazlara karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Oysa sadece radyasyona karşı koruyucu olarak kullanılan ağır betonlarda böyle bir gereklilik bulunmamaktadır.

8) Doğal ağır agregalardan üretilerek yerine yerleştirilen ağır betonların boşluk oranları pratik olarak geleneksel betonlarınki kadar, yapay ağır agregalardan üretilenlerinki ise geleneksel betonlarınkinden daha büyük olmaktadır.

9) Belli bir beton kıvamı için gerekli olan su oranı doğal ağır agregaların kullanılması halinde geleneksel betonlarda kullanılan su oranından önemli bir sapma göstermemektedir.

10) Aynı su/çimento oranı için ağır betonların işlenebilirliliği genellikle geleneksel betonlarınkinden daha düşüktür.

11) Ağır betonların su kusma eğilimi geleneksel betonlarınkinden daha yüksektir. Tamamen önlenmesi imkansız denecek kadar zor olan bu özelik beton bileşim ve yerleştirmesinin uygun olmasıyla ancak minimize edilebilmektedir.

1.7. Ağır Betonlar Hakkında Bazı Yönetmelikler

Aşağıda ağır betonlara ilişkin bazı yönetmeliklerden sözedilmektedir.

1) ACI 304 [17]' de ağır betonların bileşim, taşıma ve yerine konmalarına ilişkin birtakım bilgiler verilmektedir.

2) ACI 211 [32]' de geleneksel ve ağır betonların bileşim ve yerine konmaları karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

3) ACI 311 [42]' de ağır betonların üretimine ve üretim sonrasına ilişkin denetimler hakkında bilgiler verilmektedir.

4) ASTM C637 [40] ve ASTM C638 [43]' da ağır betonların üretiminde kullanılan ağır agregalar üzerinde durulmaktadır.

5) CRD-C79 [44], CRD-C80 [45], CRD-C81[46] ve CRD-C84[47]' de ağır betonların yerine konmasında özel bir yöntem olan enjeksiyonla betonlama işleminde kulanılan harçların akıcılık, su tutma, birim kütle ve genleşme özelikleri ile enjeksiyon betonunun basınç dayanımına ilişkin bazı bilgiler verilmektedir.

6) TS 3068 [48] kıvam, TS 2941 [49] birim kütle, TS 388 [50] ısıl iletkenlik ve TS 3529 [51], TS 3114 [52], TS 10465 [53], TS 500 [54] kalite kontrol deneylerine ilişkin yönetmelikler geleneksel betonlar kadar ağır betonlara da uygulanabilmektedir.

1.8. Ağır Betonun Kullanım Alanları

Daha önce de belirtildiği gibi ağır betonlar kayma ve devrilmeye karşı emniyette olmayan bazı özel yapılarda koruyucu momenti arttırmak amacıyla kullanılmakla beraber asıl kullanım alanları, radyoaktif maddelerin yaydığı nükleer ışınlardan özellikle cisimlerin içine girebilen öldürücü nötron ve γ ışınlarına karşı korunmak için gerçekleştirilen koruyucu beton perdelerdir. Hastanelerin ışın tedavi ve radyografi tesisleri, nükleer enerji santrallerinin koruyucu perdeleri, elektron depolama devreleri, askeri mühimmat depo duvarları, köprü ayakları, beton ağırlık baraj gövdeleri, istinat duvarları, su altı petrol boru hatları, petrol

sondaj kuyusu çeperleri ve radyoaktif maddelerin saklandığı öngerilmeli beton reaktör siloları ağır betonların kullanım alanlarına birer örnek teşkil etmektedir.

En etkili radyasyonun hızlı nötronlar tarafından sağlandığı bilinmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi nötronlar α, β ve γ ışınlarının sert cisimlere çarpmasından meydana gelmektedir. Bunların zararlı etkilerinden korunmak için yavaşlatılmaları ya da uygun bir yerde depolanmaları gerekmektedir [55]. Yapılarda ağır beton kullanımı, nükleer ışınlara karşı, geleneksel beton kullanımından daha etkili olmaktadır[41]. Betona bir boron mineralinden ibaret olan kolomonitin ilave edilmesi hızlı nötronların tutulmasını sağlamakta ve böylece ikincil γ ışınlarının oluşmasını önlemektedir. Ancak bu mineral çimento hidratasyonunu önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Diğer taraftan kolomonitin beton dayanımını azaltan bir kirliliğe sahip olduğu da bilinmektedir [56].

Ağır betonların asıl kullanımları radyasyona karşı olmakla beraber beton ve betonarme elemanlardaki dayanımlarının da en az 14 MPa olması arzulanmaktadır [57]. Ancak, yüksek sıcaklık, nem ve gerilme etkisinde kalan öngerilmeli beton reaktör silolarında kullanılan betonların daha yüksek dayanımlı olması tercih edilmektedir. Gerçekten bu silolar genellikle 160 °F'' ın üzerinde beton sıcaklığıyla işletilmek üzere projelendirilmekle beraber işletme süresi boyunca umulmadık daha yüksek sıcaklıkların etkisinde kalabilmektedirler. Sıcaklıkta meydana gelen sık değişimler betonda önemli dayanım kayıpları meydana getirebilmektedir [41].

Teorik ve deneysel çalışmalar radyasyondan dolayı koruyucu beton perde ısısının arttığını ve bu nedenle betonda çekme gerilmelerinin meydana geldiğini göstermektedir. Burada bu gerilmelerin genleşme derzi kullanarak önlenebileceğini belirtmek uygun olmaktadır.

1.9. Ağır Betonların Önemi ve Geleceği

Son yıllarda nükleer endüstrinin gelişmekte olduğu ve bunun beraberinde radyasyondan korunmayı gerektirdiği bilinen bir gerçektir. Radyasyondan korunmak amacıyla, başka malzemelerden de yararlanmak mümkün olmakla beraber, daha çok hem nötron, hem de x ve γ ışınlarına karşı, iyi bir koruyucu olan betonlardan özellikle ağır beton kullanılmaktadır. Zira beton genellikle, diğer malzemelere göre, radyasyondan korunmak için aranan özeliklere sahip daha ekonomik bir malzemedir. Gerçekten betonun üretim kolaylığı, çeşitli

birim kütlelerde üretilebilir olması, bakım kolaylığı, zararlı nükleer ışınlara karşı koruyucu olması ve bazı durumlarda gerekli dayanıma da sahip olması kendisinden aranan özeliklerin başlıcalarını teşkil etmektedir. Birim kütle arttıkça koruyucu etkisinin artması radyasyona karşı korunma yönünden ağır betonun önemini ortaya koymaktadır.

Gelecekte meydana gelebilecek nükleer savaşlardan ve/veya nükleer santral kazalarından çevreye yayılan radyasyon etkisinden korunmak için sığınak gibi yapılar yapmak ve yapıların kayma-devrilme emniyetlerini daha ucuza sağlamak istekleri ağır betonların üretim ve kullanımının giderek yaygınlaşmasını gerektirmektedir. Oysa Türkiye'de ağır beton üretimine elverişli doğal ağır agrega yatakları, bunların genel jeolojik, petrografik, mineralojik özelikleri ve rezervleri iyi bilinmemektedir. Bu da gelecekte tüm dünyada olduğu gibi Türkiyede' de araştımaların bir kısmının bu alanda yapılmasının önemine işaret etmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1 Giriş

Bu bölümde çalışmanın amacı doğrultusunda Doğu Karadeniz Bölgesi doğal ağır agregalarından biriyle elde edilen ağır betonun fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri sadece agregası, mutlak hacmi aynı kalmak koşuluyla, ağır olmayan bir agregayla değiştirilerek elde edilen geleneksel betonunkilerle karşılaştırılmakta, agrega petrografik yapısına bağlı olarak betonların kırılma mekanizmaları açıklanmakta, ağır ve geleneksel betonla üretilen kirişlerin eğilmedeki davranışları incelenmekte ve bu suretle elde edilen bulgular üzerinde durulmaktadır.

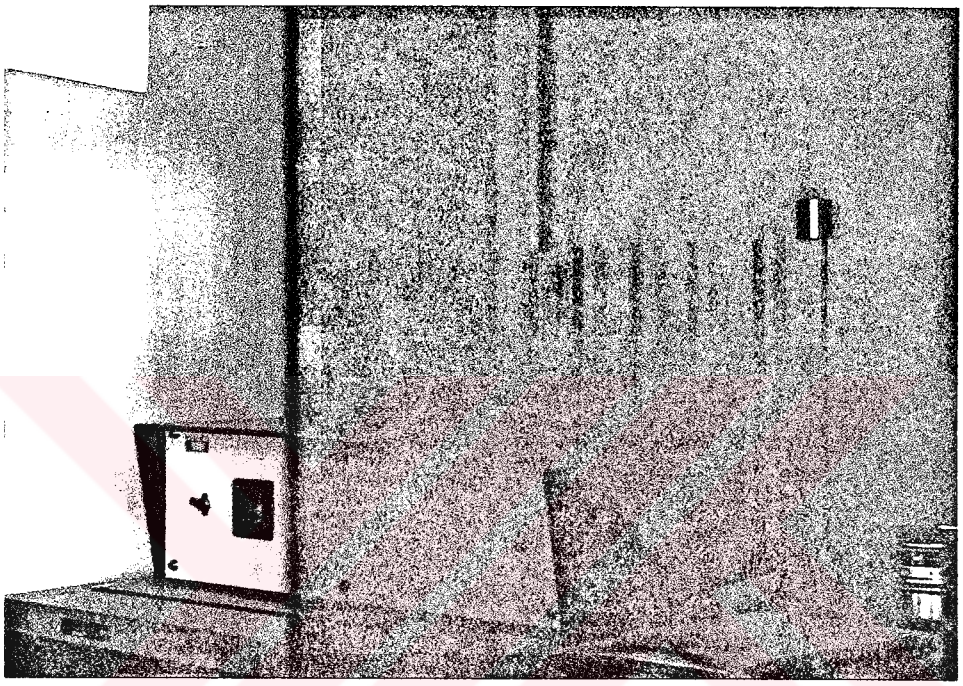
2.2. Ağır ve Geleneksel Beton Üretiminde Kullanılan Agrega, Çimento ve Karma Suyu Özelikleri

2.2.1. Ağır Agrega Özelikleri

2.2.1.1. Fiziksel Özelikler

Ağır beton üretiminde kullanılan agrega Doğu Karadeniz bölgesi, Giresun ili, Dereli ilçesi PET-MA Barit Entegre Tesislerinden, farklı tane çaplarında kırılmış olarak temin edilmiştir. Daha sonra bu agrega laboratuvarda, TS 1226 [58] ve TS 1227 [59]' da özelikleri verilen elek sistemiyle TS 706 [60]' ya uygun olarak, maksimum tane çapı 16 mm olacak şekilde sınıflandırılmıştır. Tane çaplarına göre sınıflandırılan agregaların ince (< 4mm) ve iri (>4mm) kısımları üzerinde, TS 3526 [61] ve TS 3529 [51]' ya uygun olarak hesaplanan gevşek birim kütle, doygun ve kuru özgül kütle ve su emme gibi fiziksel özelikleriyle, (KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarın' da mevcut, hassas, şaşmaz ve yarı otomatik Labotest marka bir deney düzeneğiyle (Şekil 1), TS

8536 [62] ve özellikle TS 8537 [63]' ye uygun olarak belirlenen) görünen kum eşdeğerlikleri (ESV) Tablo 2' de verilmektedir. Agrega kirliliğinin belirlenmesinde kullanılan deney hakkında ayrıntılı bilgi ise Ek-1' de sunulmaktadır [64].



Şekil 1: Kum eşdeğerliği deney düzeneği.

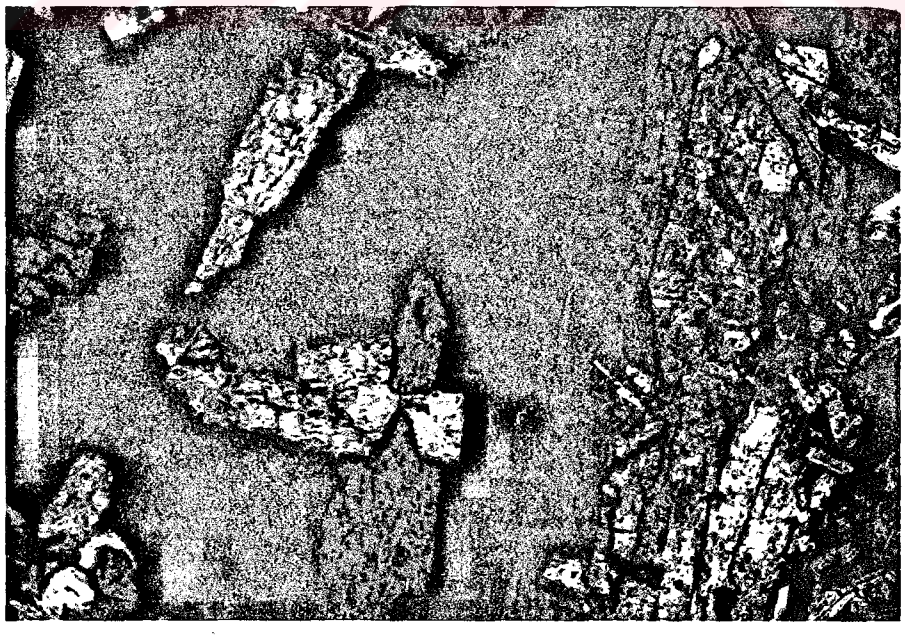
Tablo 2 : Kullanılan ağır agreganın fiziksel özelikleri ve kum eşdeğerlikleri (ESV).

Agrega tane boyutu (mm)	Gevşek birim kütle (kg/m^3)	Kuru özgül kütle (kg/m^3)	Doygun özgül kütle (kg/m^3)	Su emme (%)
İri (>4mm)	2250	4117	4128	0.0028
İnce (<4mm)	2200	4058	4096	0.0093
ESV	96			

2.2.1.2. Petrografik Özelikler

Bu çalışmada kullanılan ağır agrega barit kayaçlarından üretilmiştir. İnce kesitlerinin mikroskop altında incelenmesi bu kayacın iki tür kristalli saf barit minerallerinden ibaret olduğunu göstermektedir. Bunlardan birinci türü iri kristalli (1000-1500 mikron), ikinci türü ise ince kristalli (10-100 mikron) olanıdır. Kayacın prizmatik şekilli uzun kristalleri birbirine dik doğrultuda dilinimler içermektedir. İkinci tür mikrokristaller (barit kristalleri) birinci tür kristaller arasındaki çok köşeli boşlukları doldurmaktadırlar. Bütün minerallerin uzun elamanları çoğunlukla birbirleriyle açı oluşturacak şekilde dizilmiş olup bunlar genellikle birbirine paralel kristaller meydana getirmemektedir (α = 20°-90°). Şekildeğiştirmiş olduklarından sönüm, iri kristallerde, dalgalı olmaktadır. Gerçekten kesitte mikro fayların bulunuşu bu sonucu teyit etmektedir. Diğer taraftan mikro çatlaklarda çok ince ikincil kalsit dolguları mevcuttur. Birinci ve ikinci tür barit kristallerinde yerel ışınsal gruplar bulunmaktadır.

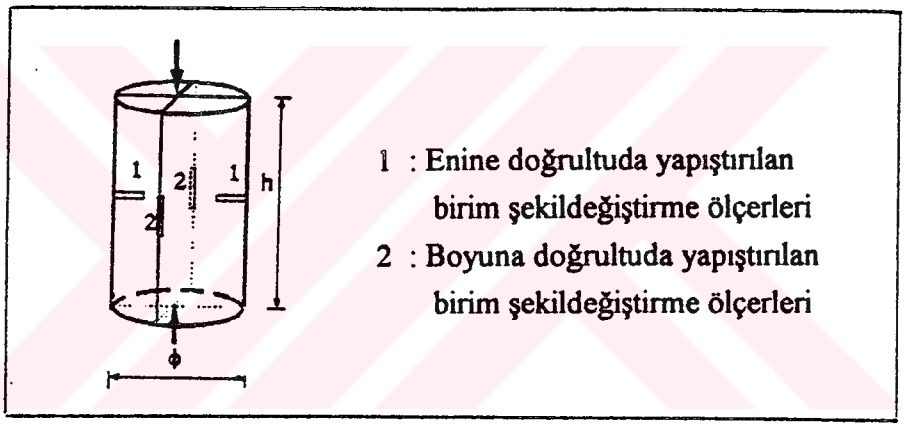
Ağır agreganın, KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında, petrografik yapısının belirlenmesinde kullanılan ince kesitlerden birinin mikroskop altındaki görünümü ile yukarıda adı geçen tipik bir ışınsal grup Şekil 2' de verilmektedir.



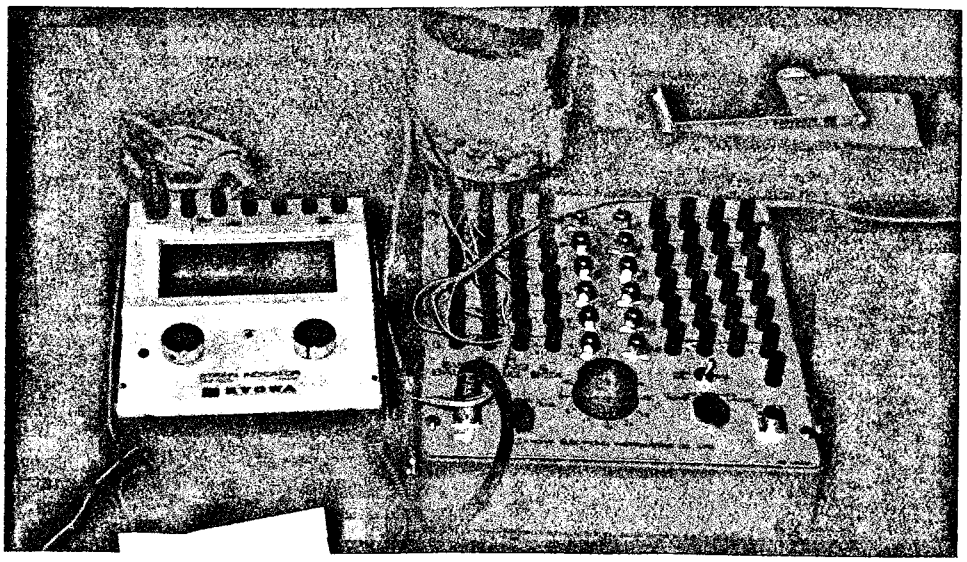
Şekil 2: Kullanılan ağır agreganın ince kesiti ve tipik bir ışınsal grup görünümü.

2.2.1.3. Mekanik Özelikler

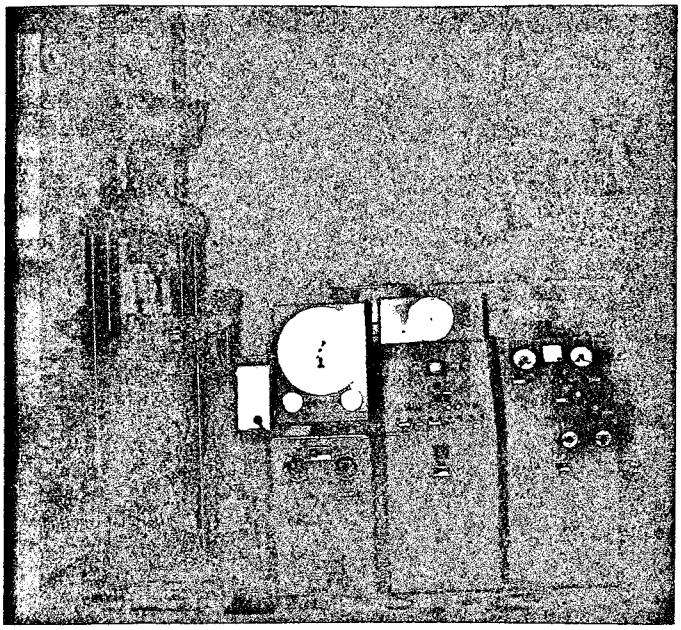
Ağır agrega üretiminde kullanılan kayaçların mekanik özelikleri (basınç dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı) çap ve yüksekliği sırasıyla 75 mm ve 150 mm olan karot numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerle belirlenmiştir. Bu belirleme esnasında, karotlar üzerine boyuna ve enine doğrultuda yapıştırılan aktif boyları 20 mm olan TML-PL20 tipi birim şekildeğiştirme ölçerleri (Şekil 3), Kyowa marka 12 kanallı, 30500x10^{-6} birim uzama 29500x10^{-6} birim kısalma ölçme kapasiteli ve 5x10^{-6} üstündeki boy değişimini ölçebilen Wheatstone köprüsü (Şekil 4), merkezi basıncın uygulanmasında ise Lausenhausen-Werk marka UHP-60 tipi 600 kN kapasiteli 5 skalalı Üniversal deney aleti kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 3: Birim şekil değiştirme ölçerlerinin karotlar üzerindeki şematik konumu.



Şekil 4: Birim şekildeğiştirmelerin ölçülmesinde kullanılan ekstansometre.



Şekil 5: Üniversal deney aleti.

Deneylerden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme diyagramı Şekil 6' da enine şekildeğiştirmenin, boyuna şekildeğiştirmeye bağlı olarak, değişimi Şekil 7' de, ortalama basınç dayanımı, karakteristik basınç dayanımı, başlangıç elastisite modülü ve poisson oranı Tablo 3' de verilmektedir.

Tablo 3: Kullanılan ağır agreganın mekanik özelikleri.

Karot boyutları (mm)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Standard sapma (MPa)	Karakteristik basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı
ϕ=75 h=150	35.71	5.26	28.98	113175	0.33

2.2.2. Geleneksel Agrega Özelikleri

2.2.2.1. Fiziksel Özelikler

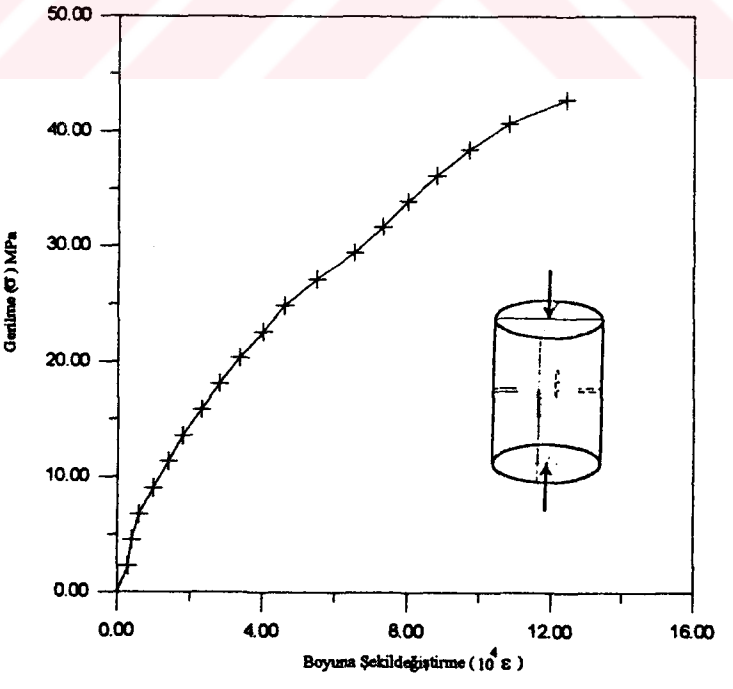
Geleneksel beton üretiminde kullanılan agrega, Doğu Karadeniz bölgesi Trabzon ili, Maçka ilçesi, Meryemana yöresinde işletilen taş ocaklarından hazır olarak temin edilmiştir. Madde 2.2.1.1.' de belirtildiği gibi sınıflandırılan bu agreganın ince ve iri kısımları üzerinde gerçekleştirilen fiziksel özelik deney sonuçları, görünen kum eşdeğerliği (ESV) değerleriyle birlikte Tablo 4' de verilmektedir.

Tablo 4 : Kullanılan geleneksel agreganın fiziksel özelikleri ve kum eşdeğerlikleri [65].

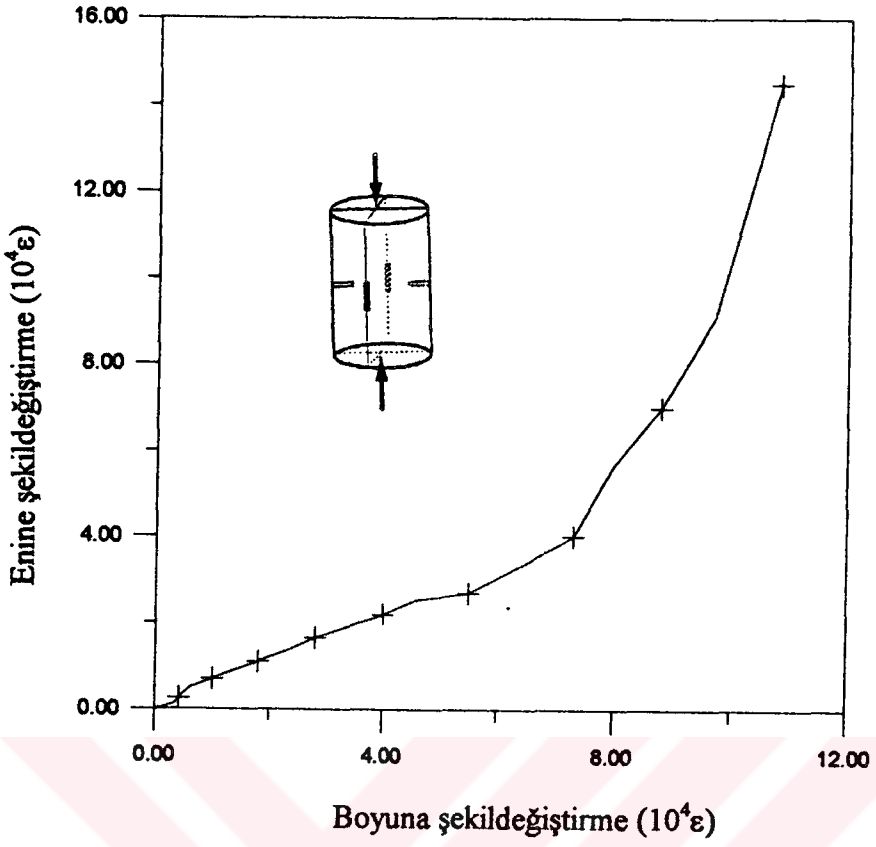
Agrega tane boyutu (mm)	Gevşek birim kütle (kg/m^3)	Kuru özgül kütle (kg/m^3)	Doygun özgül kütle (kg/m^3)	Su emme (%)
İri (>4mm)	1400	2658	2670	0.42
İnce (<4mm)	1450	2626	2640	0.52
ESV	95			

2.2.2.2. Petrografik Özelikler

Geleneksel agreganın petrografik yapısı da ağır agreganınkine benzer şekilde belirlenmiştir. (bkz. Madde 2.2.1.2) Buna göre, kod adı kalker olan geleneksel agreganın petrografik yapısı; kısmen yaşlı mikrofosil içeren, mikritik çimentolu kireçtaşı (mikritik boyutunda kalsit kristallerinden oluşmuştur.) ve %1' den az opak minerallerinden ibarettir. Bu yapının belirlenmesinde kullanılan bir ince kesitin mikroskop altındaki görünümü Şekil 8' de verilmektedir.



Şekil 6: Ağır agrega üretiminde kullanılan kayacın ortalama gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.



Şekil 7: Ağır agrega üretiminde kullanılan kayaç enine şekildeğiştirmesinin, boyuna şekildeğiştirmeye bağlı olarak, değişimi.

Şekil 8: Geleneksel agreganın ince kesitlerinden tipik bir görünüm.

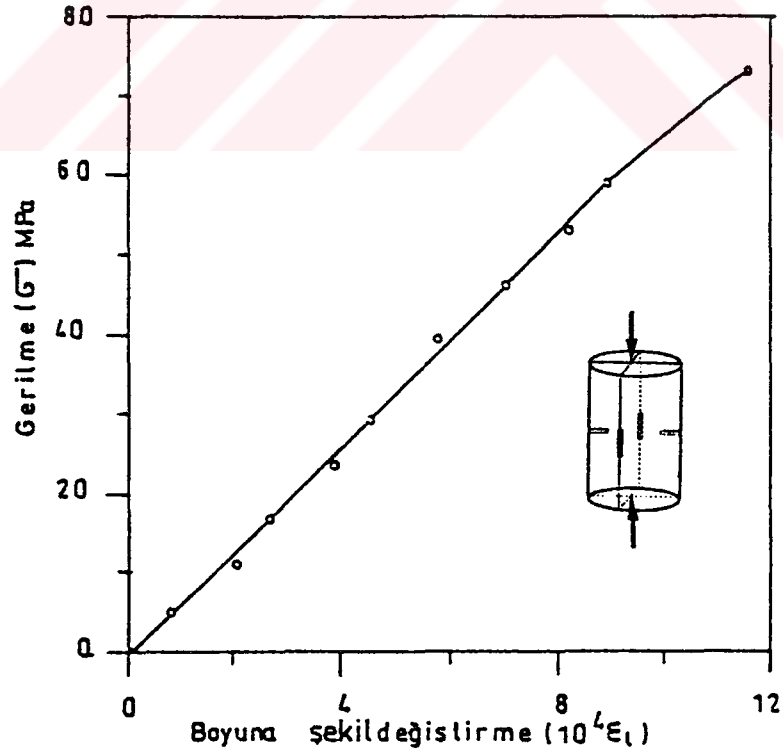
2.2.2.3. Mekanik Özelikler

Geleneksel agreganın mekanik özelikleri de ağır agreganınkilere benzer şekilde aynı boyutlardaki karotlar üzerinde gerçekleştirilen merkezi basınç deneyleriyle belirlenmiştir (bkz. Madde 2.2.1.3).

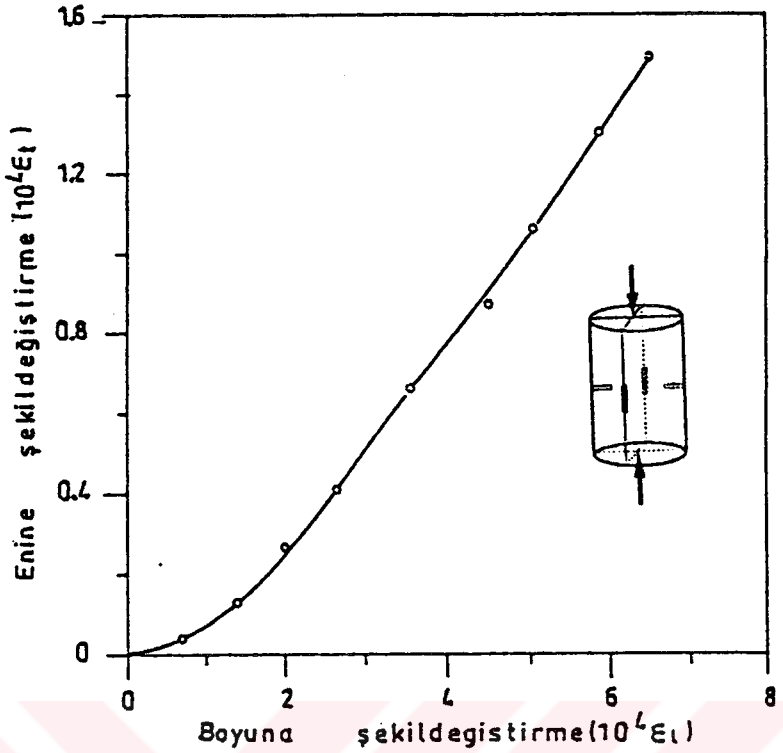
Bu deneylerden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme diyagramı Şekil 9' da enine şekildeğiştirmenin, boyuna şekildeğiştirmeye, bağlı olarak değişimi Şekil 10' da ortalama basınç dayanımı, karakteristik basınç dayanımı, başlangıç elastisite modülü ve poisson oranı ise Tablo 5 ' de verilmektedir.

Tablo 5 : Kullanılan geleneksel agreganın mekanik özelikleri [65].

Karot boyutları (mm)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Standard sapma (MPa)	Karakteristik basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı
ϕ=75 h=150	73.4	3.2	69.3	60000	0.17



Şekil 9: Geleneksel agrega üretiminde kullanılan kayacın ortalama gerilme-şekildeğiştirme diyagramı [65].



Şekil 10: Geleneksel agrega üretiminde kullanılan kayaç enine şekildeğiştirmesinin, boyuna şekildeğiştirmeye bağlı olarak, değişimi [65].

2.2.3. Ağır ve Geleneksel Agregaların Granülometrik Bileşimi

Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan ağır ve geleneksel agrega granülometrik bileşimleri bir birinin aynıdır. Bu ortak granülometrik bileşim Şekil 11' de verilmektedir.

2.2.4. Çimento Özelikleri

Ağır ve geleneksel betonların yapımında Ünye Çimento Fabrikasın'da TS10156 [66]'ya göre üretilmiş karakteristik basınç dayanımı 32.5 MPa olan KÇ 32.5 çimentosu kullanılmıştır. Özeliklerinin çalışma boyunca aynı kalmasını sağlamak için kapalı naylon torbalar içinde muhafaza edilen bu çimentonun fabrikasından alınan kimyasal, fiziksel ve mekanik özelikleri Tablo 6' da verilmektedir.

Tablo 6 : Betonların üretiminde kullanılan çimento özelikleri.

<table>
<tr><td colspan="6">Tipi : KÇ 32.5 (TS 10156)
Üretim Yeri : Ünye Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.</td></tr>
<tr><td>Kimyasal Özelikler</td><td>Analiz Sonuçları (%)</td><td colspan="4">Fiziksel Özelikler</td></tr>
<tr><td>Magnezyum oksit (MgO)</td><td>1,5</td><td colspan="3">Özgül kütle (g/cm^3)</td><td>3,05</td></tr>
<tr><td>Alüminyum oksit (Al_2O_3)</td><td>6,52</td><td rowspan="3">İNCELİK</td><td colspan="2">Özgül yüzey (Blaine)</td><td>3285</td></tr>
<tr><td>Silisyum dioksit (SiO_2)</td><td>29,4</td><td colspan="2">200 μ elek üzerinde kalan (%)</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Kalsiyum oksit (CaO)</td><td>52,5</td><td colspan="2">90 μ elek üzerinde kalan (%)</td><td>2,2</td></tr>
<tr><td>Demir oksit (Fe_2O_3)</td><td>3,08</td><td rowspan="2">Piriz süresi saat (Vicat)</td><td>Başlangıç</td><td></td><td>2,2</td></tr>
<tr><td>Kükürt trioksit (SO_3)</td><td>2,78</td><td>Bitiş</td><td></td><td>3,2</td></tr>
<tr><td>Potasyum oksit (K_2O)</td><td></td><td colspan="3">Toplam hacim genleşmesi (mm)</td><td>2</td></tr>
<tr><td>Sodyum oksit (Na_2O)</td><td></td><td colspan="4">Mekanik Özelikler</td></tr>
<tr><td>Kızdırma kaybı</td><td>3,05</td><td>Gün</td><td>Eğilme dayanımı (MPa)</td><td colspan="2">Basınç dayanımı (MPa)</td></tr>
<tr><td>Çözünmeyen kalıntı</td><td>10,77</td><td>2</td><td>3,3</td><td colspan="2">15,4</td></tr>
<tr><td>Serbest kireç</td><td>1,1</td><td>7</td><td>5,1</td><td colspan="2">27,7</td></tr>
<tr><td>Ölçülemeyen</td><td>1,17</td><td>28</td><td>6,5</td><td colspan="2">35,9</td></tr>
</table>

2.2.5. Karma Suyu Özelikleri

Betonların karılmasında kullanılan içme suyunun KTÜ Kimya Bölümü Laboratuvarlarında belirlenen, kimyasal analiz sonuçları Tablo 7' de verilmektedir.

Tablo 7 : Beton karma suyunun kimyasal özelikleri.

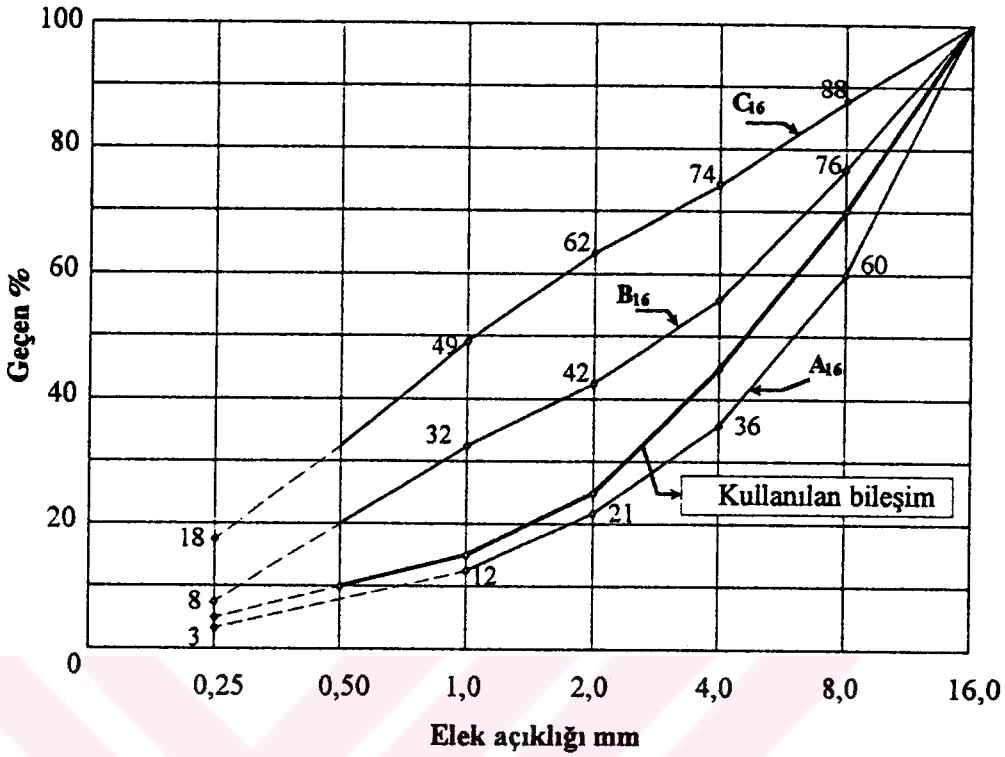
Bileşenler	Miktarlar
Na^{+}	50.00 mg/l
K^{+}	0.80 mg/l
Ca^{+2}	100.80 mg/l
Mg^{+2}	6.72 mg/l
Fe^{+3}	3.00 mg/l
Toplam katyon m.e.g. sayısı	7.9
Cl^{-}	125.00 mg/l
SO_4^{-2}	45.00 mg/l
HCO_3^{-}	210.00 mg/l
NO_3^{-}	9.50 mg/l
Toplam anyon m.e.g. sayısı	8.1

2.3. Betonların Bileşimleri

En iri agrega tane boyutu 16 mm olan ve agrega granülometrik bileşimi Şekil 11' de verilen agregalarla altı farklı su/çimento oranıyla yapılan ağır ve geleneksel betonların bileşim hesaplarında mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır [34]. Buna göre, W_c, W_a, V_w, V_h sırasıyla yerine konmuş bir metreküp betondaki çimento kütlesini (kg/m^3), agrega kütlesini (kg/m^3), su hacmini (dm^3), hapsedilmiş hava miktarını (dm^3), γ_c ve γ_a ise sırasıyla çimentonun özgül kütlesiyle, agreganın doygun kuru yüzeyli (DKY) özgül kütlesini (kg/dm^3) göstermek üzere mutlak agrega hacmi

$$\frac{W_a}{\gamma_a} = 1000 - (\frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h) \qquad (1)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu agreganın i adet ayrı agrega tane sınıfından meydana geldiği ve β_i ile γ_{ai} ' nin sırasıyla her bir tane sınıfının kütlece oranı ile birim kütlesini gösterdiği dikkate alındığında toplam agrega kütlesi (1) bağıntısı yerine ;



Granülometrik sınıflar	Toplam kütlenin (%) si
0,50 mm - 1,00 mm	10
1,0 mm - 2,0 mm	15
2,0 mm - 4,0 mm	20
4,0 mm - 8,0 mm	25
8,0 mm - 16,0 mm	30

Şekil 11:Ağır ve geleneksel agregaların granülometrik bileşimleri.

$$\sum\left(\frac{\beta_i W_a}{\gamma_{ai}}\right) = 1000 - \left(W_c/\gamma_c + V_w + V_h\right) \qquad (2)$$

bağıntısıyla daha hassas bir şekilde belirlemektedir. Bu şekilde belirlenen agrega kütlesi doygun kuru yüzeyli (DKY) agrega kütlesidir. Bundan doğal nemdeki agrega kütlesine geçmek için; SE ve DN sırasıyla agreganın kütlece su emme ve doğal nem oranlarını göstermek üzere,

$$DS = W_a\,(SE\text{-}DN) \qquad (3)$$

bağıntısıyla hesaplanan doyma suyu miktarı (kg/m^3), (1) bağıntısıyla belirlenen W_a değerinden çıkartmak gerekmektedir. Agrega kütlesi (2) bağıntısıyla hesaplandığı takdirde, doyma suyununda buna bağlı olarak her bir agrega tane sınıfi için hesaplanması dolayısıyla da toplam doyma suyu miktarını,

$$DS = \Sigma\,[(SE)_i - (DN)_i]\,W_{ai} \qquad (4)$$

bağıntısıyla hesaplanmasının gereği açıktır.

Yukarıda belirtilen esaslar doğrultusunda hesaplanan ağır ve geleneksel beton bileşimleri Tablo 8' de verilmektedir.

Tablo 8 : Betonların bileşimleri.

Betonlar	W/C	Katkı Miktarı (%)	Çimento (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	Toplam agrega (kg/m^3)	Doyma suyu (kg/m^3)
Ağır betonlar	0.30	3	350	105	3119	11.74
	0.35	2	350	123	3046	11.46
	0.40	1	350	140	2971	11.18
	0.50	-	350	175	2828	10.65
	0.55	-	350	193	2755	10.11
	0.60	-	350	210	2685	10.00
Geleneksel betonlar	0.30	3	350	105	2014	4.17
	0.35	2	350	123	1966	4.03
	0.40	1	350	140	1922	3.98
	0.50	-	350	175	1829	3.80
	0.55	-	350	193	1781	3.70
	0.60	-	350	210	1736	3.60

2.4. Betonların Üretimi

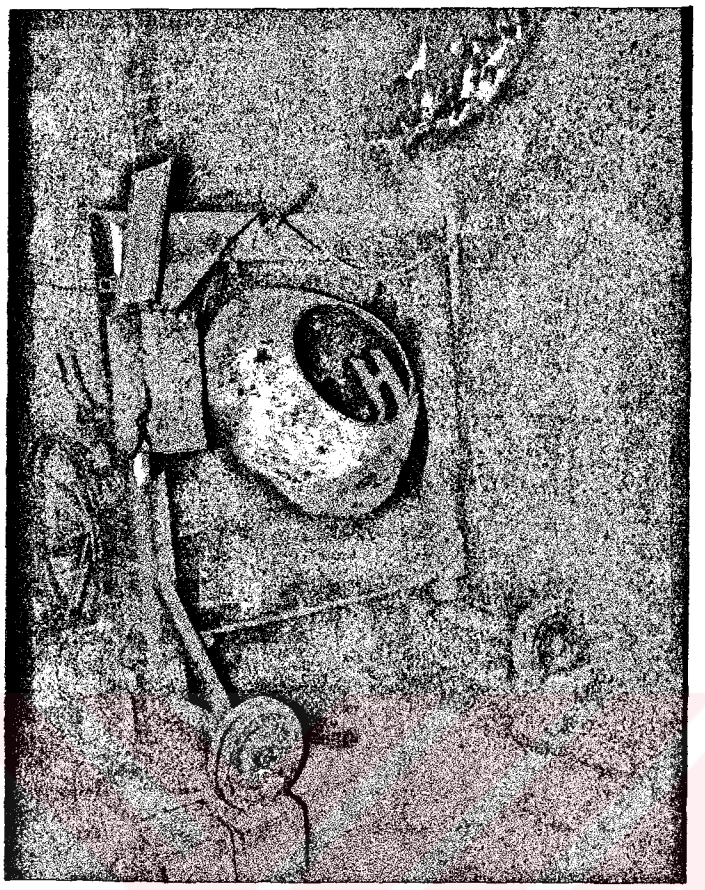
Ağır ve geleneksel betonların karılmasında 60 litre kapasiteli eğik eksenli bir betoniyer kullanılmıştır (Şekil 12).

Her bir sınıf agregalar tartılarak, önceden nemlendirilen betoniyere konmuş ve doyma suyu da ilave edilerek 5 dakika, daha sonra çimento ilavesiyle 3 dakika, bunu takiben betoniyer hiç durdurulmadan karma suyu ilave edilerek bir üç dakika daha karıştırılmıştır. Katkılı hazırlanan 0.30, 0.35 ve 0.40 su/çimento oranlarına sahip betonlarda katkı maddesi kullanılmış ve karma suyuna ilave edilerek bileşime katılmıştır. Doğal ağır agregayla üretilen ağır betonun mekanik özeliklerinin iyileştirilmesi amacıyla değişik oranlarda katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı maddesi "Sikament FF" ticari adıyla pazarlanan süperakışkanlaştırıcı olup özgül kütlesi 1200 kg/m^3 olan kahve renkli bir sıvıdır. Bu katkı maddesi, segregasyon riskini artırmadan ve su miktarını yükseltmeden işlenebilirliliği kolaylaştırmakta, yüksek dozajlı olarak kullanıldığında da beton normal sürede prizini tamamlamaktadır. Bu katkı maddesi, su oranının azaltılması amacıyla kullanılması durumunda, su/çimento oranını %20' lere kadar düşürebilmekte ve 28 günlük basınç dayanımında %40 'lara varan bir kazanç sağlanabilmektedir. Bu tür katkılar betonun geçirimsizliğini dolayısıyla da donma-çözülme olayına karşı dayanıklılığını arttırmaktadır.

Bu şekilde üretilen betonların çökme konisi deney sonuçları Tablo 9' da verilmektedir.

Tablo 9 : Betonların çökme konisi deney sonuçları.

Betonlar	W/C	Çökme (cm)
Ağır betonlar	0.30	10
	0.35	5
	0.40	3
	0.50	1.5
	0.55	2
	0.60	5
Geleneksel betonlar	0.30	7
	0.35	5
	0.40	2.5
	0.50	1
	0.55	1.5
	0.60	2

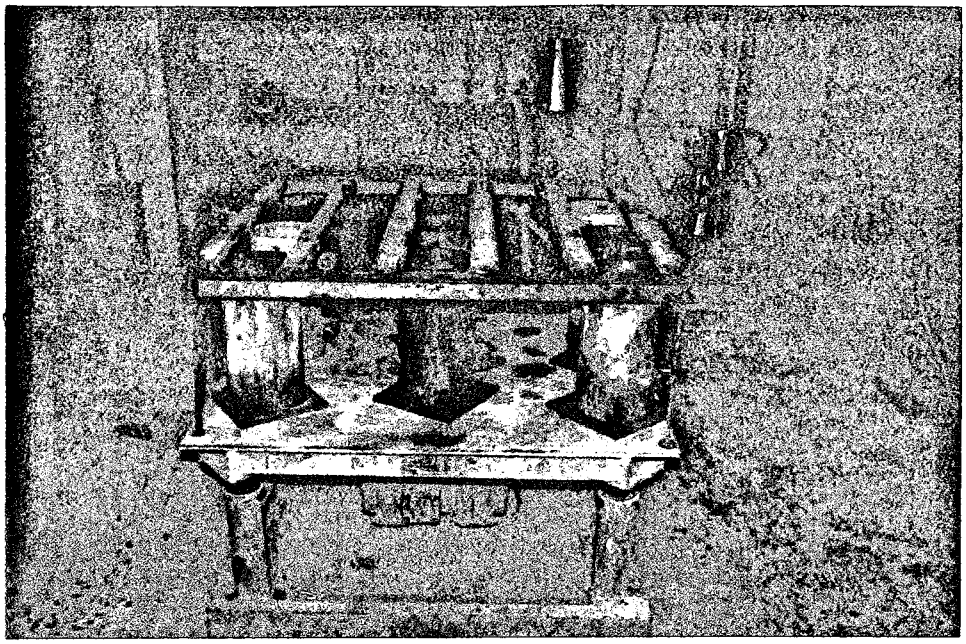


Şekil 12: Betonların karılmasında kullanılan betoniyer.

2.5. Deneylerde Kullanılan Standard Numunelerin Hazırlanması, Saklanması ve Deney Anındaki Yaşları

Deneylerde kullanılan standard numunelerin hazırlanmasında, 150mmx300mm ve 75mmx150mm boyutlarında silindirik kalıplarla 40mmx40mmx160mm boyutlarında üçlü çelik kalıplar kullanılmıştır. Frekansı 2800 devir/dakika olan sarsma tablası üzerine yerleştirilen bu kalıplara beton üç aşamada konmuş ve her bir aşamada bir müddet sarsılmıştır. Segragasyonu önlemek amacıyla bu süre su/çimento oranı 0.50, 0.55 ve 0.60 olan betonlar için 10sn, 0.30, 0.35 ve 0.40 olanlar içinse 15sn olarak seçilmiştir (Şekil 13).

Döküldüklerinden bir gün sonra kalıplarından çıkartılan numuneler, 21 gün sıcaklığı 23°c ± 2°c olan suda, bu süre sonunda sıcaklığı 24°c ± 2°c ve bağıl nemi %65 ± %5 olan bir ortamda saklanmıştır. Numuneler deney anında 28 günlüktü.



Şekil 13: Betonun sarsma tablası üzerinde yerleştirilmesi anından bir görünüm.

2.6. Ağır ve Geleneksel Betonların Fiziksel, Mekanik ve Isıl Özelikleri

2.6.1. Fiziksel Özelikler

Bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonların belirlenen kuru ve doygun birim kütleleri Tablo 10' da verilmektedir.

Tablo 10 : Betonların birim kütleleri (kg/m^3).

Betonlar	W/C	Doygun	Kuru
Ağır betonlar	0.30	3568	3554
	0.35	3565	3554
	0.40	3521	3516
	0.50	3485	3482
	0.55	3390	3345
	0.60	3377	3340
Geleneksel betonlar	0.30	2450	2430
	0.35	2435	2420
	0.40	2430	2420
	0.50	2415	2400
	0.55	2370	2350
	0.60	2357	2330

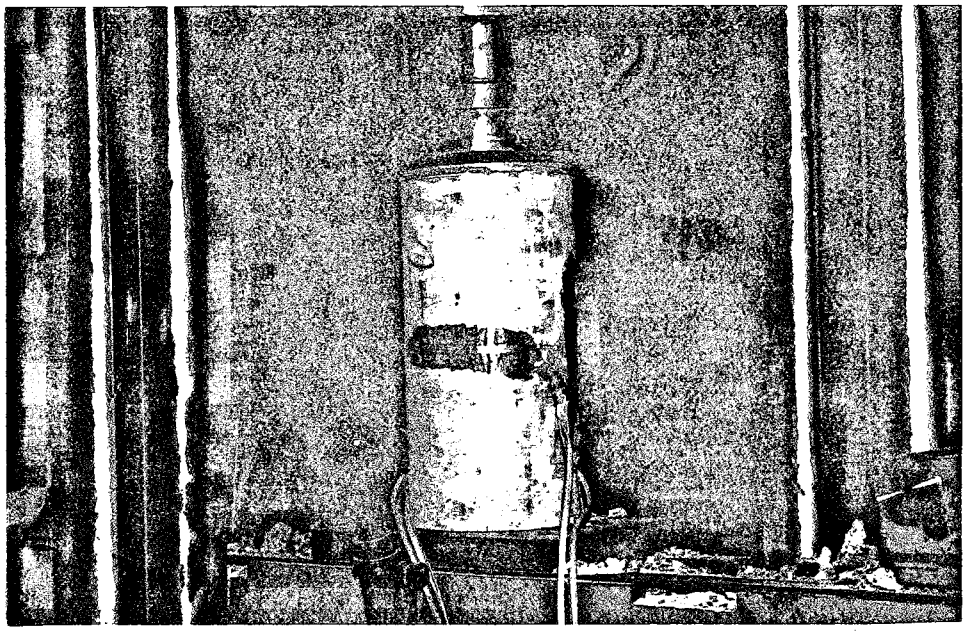
2.6.2. Mekanik Özelikler

Bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonların mekanik özelikleri (basınç dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı), pratik olarak 0.15 MPa/s yükleme hızıyla, standard silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler yardımıyla, kayaç karotların mekanik özeliklerinin saptanmasına benzer şekilde, belirlenmiştir (bkz. Madde 2.2.1.3). Ancak kayaç karotlarınkinden farklı olarak silindir beton numunelerde aktif boyu 90 mm TML-PL90 tipi birim şekildeğiştirme ölçerleri kullanılmıştır (Şekil 14).

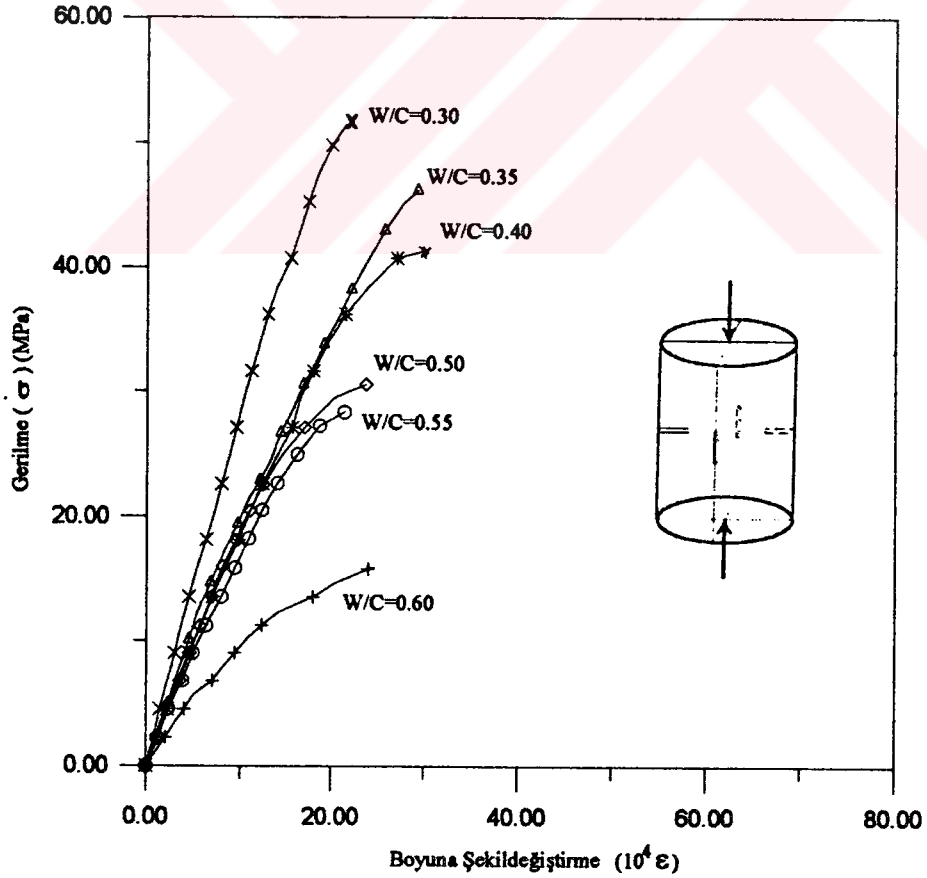
Standard silindir beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme diyagramları ve enine şekildeğiştirmelerin boyuna şekildeğiştirmelere bağlı olarak değişimi ağır betonlar için sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16' da, geleneksel betonlar için ise Şekil 17 ve Şekil 18' de verilmektedir. Bu betonların ortalama karakteristik basınç dayanımlarıyla, başlangıç elastisite modülleri, dayanımlarının %50' sine karşılık gelen teğet modülleri ve doğrusal davranış bölgesindeki poisson oranları Tablo 11' de verilmektedir.

Tablo 11 : Betonların mekanik özelikleri.

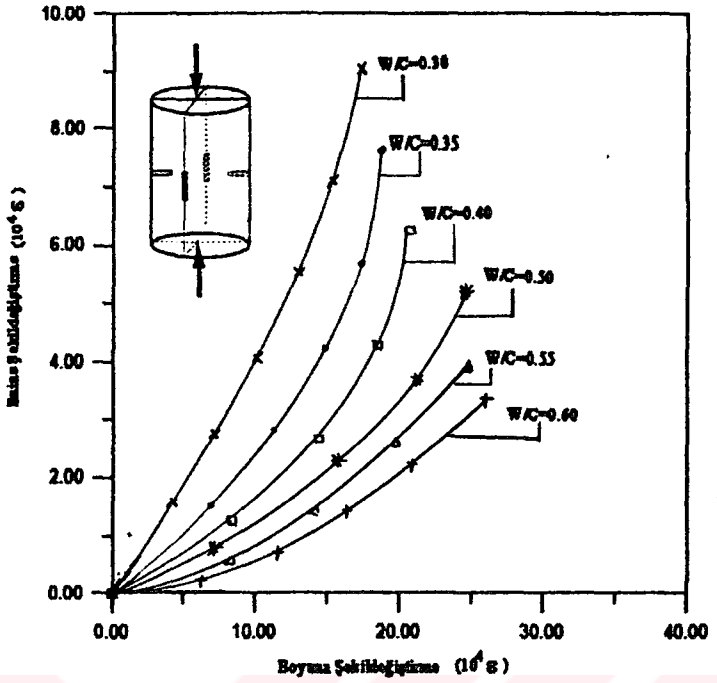
Betonlar	W/C	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Standart sapma (MPa)	Karak. basınç dayanımı (MPa)	Başlangıç elastisite modülü (MPa)	0.50 f_c için teğet mod. (MPa)	Poisson oranı
Ağır betonlar	0.30	58.2	3.39	53.8	35000	32500	0.30
	0.35	53.7	1.37	51.9	30300	28300	0.28
	0.40	47.1	3.26	42.9	22700	17800	0.18
	0.50	34.2	1.23	32.6	18800	17700	0.15
	0.55	28.9	0.90	27.7	17800	16160	0.13
	0.60	17.5	1.35	15.8	11300	9700	0.11
Geleneksel betonlar	0.30	46	1.90	44	46000	32300	0.28
	0.35	42	1.00	41	42100	29600	0.26
	0.40	42	2.00	39	42000	29400	0.25
	0.50	37	1.10	35.6	37000	26000	0.23
	0.55	30	1.40	28.2	32500	23700	0.22
	0.60	26	1.00	24.7	28000	16100	0.20



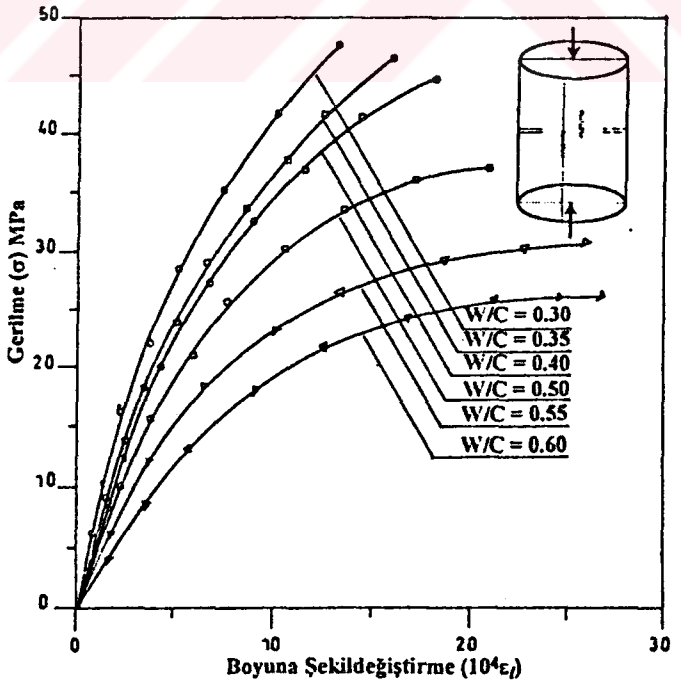
Şekil 14: Betonlar üzerinde gerçekleştirilen merkezi basınç deneyinden bir görünüm.



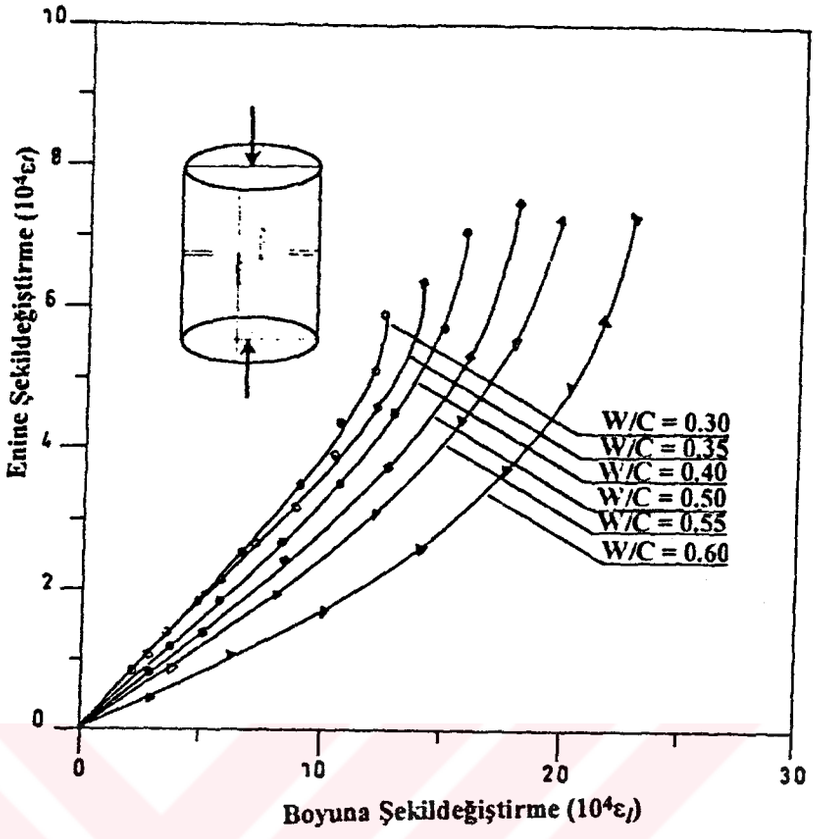
Şekil 15: Ağır betonların tipik gerilme-şekildeğiştirme diyagramları.



Şekil 16: Ağır betonların enine şekildeğiştirmelerinin, boyuna şekildeğiştirmeye, bağlı olarak değişimleri.



Şekil 17: Geleneksel betonların tipik gerilme-şekildeğiştirme diyagramları [65].

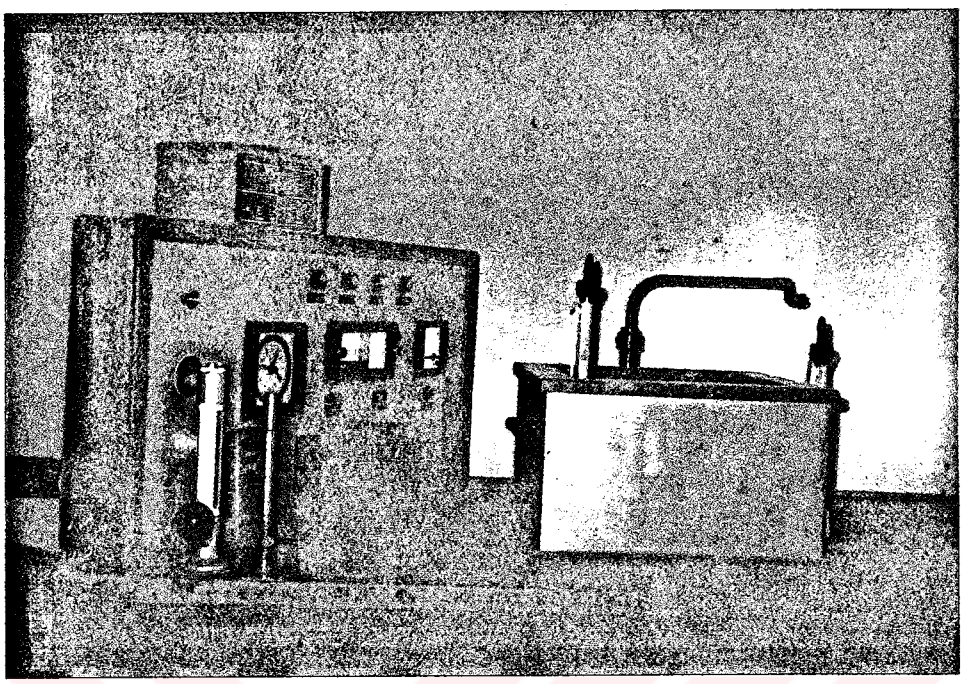


Şekil 18: Geleneksel betonların enine şekildeğiştirmesinin, boyuna şekildeğiştirmeye, bağlı olarak değişimleri [65].

2.6.3. Isıl Özelikler

Bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonların ısıl iletkenliklerinin belirlenmesinde TS 388 [50] ve TS 415 [67]' de önerilen plaka yöntemiyle, Dr. Bock tarafından geliştirilen 4110 tipi ısıl iletkenlik deney aleti kullanılmıştır (Şekil 19).

Isıl iletkenlik deneyi, standard silindir beton numunelerden kesilerek çıkartılan 25 mm kalınlığındaki elemanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, önce sıcaklığı 105 °c ± 5°c olan bir etüvde kütlesi sabit bir değer alıncaya kadar kurutulmuş ve daha sonra etüvden çıkartılarak bağıl nemi sürekli sabit tutulan bir ortamda, soğumaya bırakılmıştır. Bu şekilde soğutulan ve sabit nem oranına sahip numuneler, deney aletinin plakaları arasına yerleştirilmiştir. Deney aleti plakaları arasındaki sıcaklık farkı 10°c olacak şekilde, üç farklı sıcaklık kademesinde (25°c-35°c, 35°c-45°c ve 45°c-55°c) gerçekleştirilen deneylerde, her sıcaklık kademesinde harcanan eneji 30 dakika arayla kaydedilmiştir.



Şekil 19: Isıl iletkenlik deney düzeneği.

Bu kayıtlara göre, ΔE, ΔZ ve K sırasıyla harcanan enerji farkını, okumalar arasındaki zaman farkını ve güç basamağı adını taşıyan ve değeri bilinen bir sabiti göstermek üzere birim alandan geçen ısı miktarı q;

$$q = K \cdot \Delta E / \Delta Z \qquad (5)$$

bağıntısıyla ısıl iletkenlik katsayısı λ ise; d numune kalınlığını, Δt numune alt ve üst yüzeylerindeki sıcaklıklarının farkını, w kullanılan deney aleti için 0.0022 değerindeki bir katsayıyı göstermek üzere;

$$\lambda = q \cdot d / (\Delta t - q \cdot w) \qquad (6)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Bu şekilde, geleneksel ve ağır betonların altı farklı su/ çimento oranı için belirlenen ortalama ısı iletkenlik katsayıları, birim kütleleri ile birlikte Tablo 12' de verilmektedir.

Tablo 12 : Betonların ısıl iletkenlik katsayıları ve birim kütleleri.

Betonlar	W/C	Birim kütle (kg/m^3)	Isıl iletkenlik kat. λ (kcal/m/h/°c)
Ağır betonlar	0.30	3554	0.798
	0.35	3554	0.780
	0.40	3516	0.762
	0.50	3482	0.744
	0.55	3345	0.717
	0.60	3340	0.709
Geleneksel betonlar	0.30	2430	1.092
	0.35	2420	1.082
	0.40	2420	1.065
	0.50	2400	1.054
	0.55	2350	1.035
	0.60	2330	1.010

Bu tablodan ağır ve geleneksel beton birim kütlelerinin su/çimento oranı artıkça azaldığı ve ağır betonun ortalama ısıl iletkenlik katsayısının geleneksel betonunkinden %30 daha küçük olduğu görülmektedir.

2.7. Agrega Petrografik Yapısının Beton Kırılma Mekanizmaları Üzerindeki Etkisi

2.7.1. Betonun Yapısı, Davranışı ve Kırılma Mekanizmaları

Katılaşmış ve zamanla beklenen dayanımını kazanmış olan betonun tüm özeliklerinin, bileşiminde kullanılan malzemelerin özelikleriyle doğrudan ilişkili olması gerekmektedir. Oysa uzun bir süre bunun pek böyle olmadığı düşüncesi hakimdi. Bunun başlıca nedenini, betonun dış kuvvetler altında, kırılma mekanizmasının iyi bilinmemesi teşkil etmektedir. Gerçekten, homojen bir yapıya sahip katı cisimler için geliştirilmiş olan elastisite teorileri betonda gözlenen olaylara henüz kesin bir açıklama getirememiştir. Bunun temel nedeni homojen, izotrop ve sürekli malzemeler için geçerli olan elastisite teorisinin sürekli bir ortam olmayan, heterojen ve anizotrop yapıya sahip betona uygulanmış olmasıdır.

Bu başlık altında bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonların kırılma mekanizmalarını açıklayabilmek için betonun kırılma mekanizmaları üzerinde durulmaktadır.

2.7.1.1. Betonun Yapısı ve Davranışı

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

Viskoz akım teorisine göre, sertleşmiş çimento hamuru fazı yüksek vizkoziteli bir sıvı gibi dikkate alınmaktadır [68],[55]. Bu teoriyi, sertleşmiş çimento hamurunda, sabit gerilme altında doğal taşlardakinden çok ileri düzeyde, sünme adı verilen şekildeğiştirmelerin meydana gelmesi desteklemektedir. Diğer bir deyişle, bu teoriye göre, sertleşmiş çimento hamurunu viskoz bir cisim olarak dikkate almak mümkün gözükmektedir.

Yukarıda da belirtildiği gibi, heterojen bir yapıya sahip olan betonun sertleşmiş çimento hamuru fazında da rötre, sünme, şişme gibi şekildeğiştirmeler meydana geldiğinden, bu malzemenin dış kuvvetler altındaki davranışı klasik teorilerle açıklanamamaktadır. Gerçekten, beton üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar elastisite teorisiyle elde edilenlerden çok farklı olmaktadır. Bu farklar değişik yapıdaki iki cisimden meydana gelen, bağlantıları (aderansları) kendisini oluşturan cisimlerin yapısına, oranlarına, sertleşme süresine ve saklama koşullarına bağlı olan bu malzemenin, yukarıda belirtilmeye çalışılan, kendi özel heterojen yapısından ileri geldiği açıktır.

Bilim tarihinde uzun bir süre Feret'in çalışmaları [69] temel alındığından, agrega petrografik yapısının (bkz. Madde 2.2.1.2 ve Madde 2.2.2.2) beton kırılma mekanizması üzerinde etkisi olmadığı kabul edilmekteydi. Bugün de genellikle beton dayanımına etki eden en önemli faktörlerin;

- çimento türü ve miktarı,
- su/çimento oranı,
- agrega granülometrik bileşimi,
- agrega tane şekli, yüzey pürüzlülüğü,
- agrega yüzey temizliği,
- agrega birim kütlesi,
- betonda hapsedilmiş hava oranı,
- yapım ve saklama koşulları,
- sertleşme süresi

olduğu kabul edilmektedir. Oysa agrega petrografik yapısının da bu etkenler arasında olması akla daha uygun gelmektedir. Gerçekten, agrega petrografik yapısını belirlemek, beton içine yerleşmiş bulunan agrega taneleri ve bu tanelerin çimento hamuru ile olan bağlantılarının özeliklerini de belirlemek anlamına geldiğinden, bu düşünce daha mantıki gözükmektedir.

2.7.1.2. Betonun Kırılma Mekanizmaları

2.7.1.2.1. Merkezi Çekme Etkisinde Kırılma Mekanizmaları

2.7.1.2.1.1. 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 çatlaması, uzama kapasitesinin aşılmasıyla meydana gelmektedir[70]. Oysa, sırf betondan imal edilen pist ve yol 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 gerekmektedir.

Betonun merkezi çekme dayanımının deneysel olarak belirlenmesinde bir takım güçlükler bulunmaktadır. Bu nedenle betonun eğilme ya da yarmada çekme dayanımları belirlenerek bunlar, bir takım ampirik bağıntılarla, merkezi çekme dayanımına dönüştürülmektedir[71].

Betonun merkezi çekme ve merkezi basınç altında kırılma mekanizmasının incelenmesi için bir takım kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller aşağıda verilmektedir.

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

b) Yük altında davranışları için sadece ortalama gerilme ve şekildeğiştirmeler dikkate alınmaktadır.

c) Bu çalışmayı ilgilendiren kırılma anında E kırılmaya karşılık gelen sekant modülünü göstermek üzere, gerilmeler şekildeğiştirmelere, $\sigma = E\,\varepsilon$ ifadesiyle bağlıdır. Beton için, elasto-plastik bir cisim olmasına rağmen çatlama yükünden önceki aşamada gerilmelerle şekildeğiştirmeler arasında birebir tekabül olduğundan, bu varsayım oldukça geçerli sayılabilmektedir.

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

2.7.1.2.1.2. Merkezi Çekme Dayanımının İfadesi

Kesit alanı A olan bir beton ya da harç numune merkezi çekme kuvvetinin etkisinde ise, N_r kırılma yükünü göstermek üzere numunenin çekme dayanımının,

$$f_{ct} = N_r / A \qquad (7)$$

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.

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

$$s = s_a + s_c + s_v \tag{8}$$

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

Numunenin merkezi çekme etkisinde kırılması için genel bir varsayım olarak, hem karışımdaki çimento hamuru ve agrega oranlarına hem de aderans, çimento hamuru ve agrega 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,

$$N_{rw} = f_{ct}\, s_c \tag{9}$$

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

$$f_{ct1} = f_{ct} \cdot s_c / s \tag{10}$$

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.

σ_a ve σ_c sırasıyla agrega ve çimento hamuru tarafından taşınan ortalama normal gerilmeleri göstermek üzere ω kesit alanı içinde kırılma anına kadar ortalama normal kuvvet;

$$N_\omega = \sigma_a s_a + \sigma_c s_c \tag{11}$$

ve ortalama normal gerilme ise;

$$\sigma_{ct} = \frac{N_\omega}{s} = \sigma_a \frac{s_a}{s} + \sigma_c \frac{s_c}{s} \tag{12}$$

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

a) Betonun kırılmasına aderans sökülmesi neden olmaktadır. Bu durumda f_{adt} aderans dayanımını göstermek üzere (12) bağıntısı kırılma anında ;

$$f_{ct2} = f_{adt} \left(\frac{s_a}{s} + \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \frac{s_c}{s} \right) \tag{13}$$

şeklinde yazılabilmektedir.

b) Betonun kırılmasına agrega dayanım düşüklüğü neden olmaktadır. f_{at} agrega çekme dayanımını gösterme üzere (12) bağıntısı bu kez ;

$$f'_{ct2} = f_{at} \left(\frac{s_a}{s} + \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \frac{s_c}{s} \right) \tag{14}$$

şeklini almaktadır.

Ayrıca, bir bağlayıcı ile sarılmış çeşitli boyutlardaki tanelerden meydana gelen en genel bir cisim için kırılmanın önce bağlayıcı fazından 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;

$$f_{ct3} = f_{adt} \frac{s_a}{s} \tag{15}$$

$$f'_{ct3} = f_{at}\frac{s_a}{s} \qquad (16)$$

bağıntılarıyla belirlenebilmektedir.

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

$$f_{ct4} = f_{ct}\left(\frac{s_c}{s} + \frac{\sigma_a}{\sigma_c}\frac{s_a}{s}\right) \qquad (17)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

Yukarıdaki (15), (16) ve (17) bağıntıları, cismin içerdiği tanelerin şekildeğiştirme kapasitelerinin bağlayıcınınkinden daha büyük olması hali için geçerlidir. Dolayısıyla da geleneksel beton ya da harçlara uygulanamazlar. Diğer taraftan (15) ve (16) bağıntıları, iddiaların aksine, çekme dayanımının bağlayıcı içindeki tanelerin yapısından hiçbir zaman bağımsız olamayacağını, ancak bağlayıcı yapısından bağımsız olabileceğini göstermektedir.

2.7.1.2.1.2.1. f_{ct1}, f_{ct2} ve f'_{ct2}' nün Beton Bileşimine Bağlı İfadesi

Bu başlık altında f_{ct}, f_{adt}, σ_a/σ_c, s_a/s ve s_c/s ' nin betonun birer bileşeninin oranına (γ) bağlı olarak ifade edilmeleri üzerinde durulmaktadır.

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 ;

$$\gamma = c / (c+e+v) \qquad (18)$$

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

Bu durumda sertleşmiş çimento hamuru çekme dayanımı (f_{ct}), α_1 zamanla artan bir fonksiyonu ve t_c çimento yapısına ve saklama koşullarına bağlı bir katsayıyı göstermek üzere;

$$f_{ct} = \alpha_1 (\gamma - \gamma_o) t_c \qquad (19)$$

olarak ifade edilebilmektedir.

Burada çalışmanın bundan sonraki kısmında, basitleştirmek amacıyla, betonda hapsedilmiş hava olmadığı kabulüyle (v = 0), γ = c/(c+e) olarak dikkate alındığını belirtmek uygun olmaktadır.

2) f_{adt} nin ifadesi

Aderans dayanımının da zamanla ve bağlayıcı içindeki çimento konsantrasyonuyla değiştiği düşünülebilir. Bu durumda α_2 yine zamanla artan bir fonksiyonu, γ_1 çimento hamurunun bağlayıcı özelikte olabilmesi için ancak yeterli olan γ değerini, t_{ad} mevcut katı elemanların yapısına bağlı, aderansla ilgili bir katsayıyı göstermek üzere;

$$f_{adt} = \alpha_2(\gamma - \gamma_1) t_{ad} \qquad (20)$$

şeklinde ifade edilebilir.

3) σ_a / σ_c nin ifadesi

ε_a ve ε_c sırasıyla agrega ve çimento hamurunun ortalama birim boydeğişimlerini, E_a ve E_c ise betonun kırılması anında sırasıyla agrega ve çimento hamurunun sekant modülünü göstermek üzere ;

$$\sigma_a = E_a \varepsilon_a$$

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c$$

bağıntıları yazılabilmektedir. Daha önce çimento hamuru dayanımı için elde edilen hipotez (19 bağıntısı) dikkate alınır ve E_c nin zamanla ve çimento konsantrasyonuyla artan bir fonksiyon olduğu oysa, E_a nın bunlara bağlı olmadığı düşünülürse, a_3 zamanla artan bir fonksiyonu, k çimento ve agrega yapısına bağlı bir katsayıyı göstermek üzere ;

$$E_c / E_a = \alpha_3 k (\gamma - \gamma_o) \qquad (21)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. 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 $\varepsilon_c/\varepsilon_a$ şekildeğiştirme oranı dayanıma etki etmemektedir. Zira bu durumda agregalar arasında mesafe küçük olduğu için,

$$\varepsilon_c \cong \varepsilon_a$$

yazılabileceğinden ,

$$\sigma_c / \sigma_a = \alpha_3 \, k \, (\gamma - \gamma_o) \qquad (22)$$

olarak elde edilmektedir.

4) s_a / s nin ifadesi

Kesit alanı s olan bir beton küp numune dikkate alınsın. Bu hacimde karakteristik boyutu d_i olan agrega sınıfındaki tane sayısının n_i^3 olduğu düşünülsün. Eğer bu küpteki agrega dağılımının homojen olduğu ve şekillerinin boyutlarıyla değişmediği kabul edilirse, μ ve ξ sadece agrega şekline bağlı katsayıları göstermek üzere küpteki agrega hacmi ;

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

şeklinde ve kesitte agregalar tarafından işgal edilen yüzey ise;

$$s_a = \xi \sum n_i^3 \, d_i^3$$

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

$$\lambda_i = d_i \, n_i / d_1 \, n_1$$

olmak üzere s alanı içindeki agrega alanı;

$$s_a = \frac{\xi}{\mu^{2/3}} V_a^{2/3} \frac{\Sigma \lambda_i^2}{(\Sigma \lambda_i^3)^{2/3}} \qquad (23)$$

olarak ifade edilebilmektedir. Bu bağıntıda, sadece agrega geometrisine bağlı terim

$K = x / m^{2/3}$ ve sadece agrega granülometrisine bağlı terim ise,

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

olarak gösterilirse,

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

ve

$$s_a / s = m\, K_a^{2/3} \qquad (24)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Burada a betondaki agrega oranını göstermektedir.

5) s_c / s nin ifadesi

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

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

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

$$s_c / s = 1 - m\, K\, a^{2/3} - m' K' V^{2/3} \qquad (25)$$

olarak ifade edilebilmektedir.

Bu durumda (19), (20), (22), (24) ve (25) ifadeleri (10), (13) ve (14) bağıntılarında yerlerine konulursa, bağlı oldukları başlıca faktörlerin fonksiyonu olarak, betonun çekme dayanımı ;

$$f_{ct1} = \alpha_1 (\gamma - \gamma_o)\, t_c\, (1 - mK\, a^{2/3} - m' K' V^{2/3}) \qquad (26)$$

$$f_{ct2} = \alpha_2 (\gamma - \gamma_1)\, t_{ad}\, [mK\, a^{2/3} + \alpha_3 k(\gamma - \gamma_o)\, (1 - m\, K a^{2/3} - m' K' V^{2/3})] \qquad (27)$$

$$f'_{ct2} = f_{at}\, [mK a^{2/3} + \alpha_3 k(\gamma - \gamma_o)\, (1 - m\, K\, a^{2/3} - m' K' V^{2/3})] \qquad (28)$$

bağıntılarının biriyle elde edilmektedir.

Bu dayanım, $\gamma \leq \gamma_o$ için sıfır olup, $\gamma > \gamma_o$ 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.

Burada çalışmanın bundan sonraki kısmında ikinci şekil kırılmadan sadece aderans kırılması (27 nolu bağıntı) dikkate alınmaktadır.

2.7.1.2.1.3. Grafik Gösterilim

Bu incelemede belirli bir agrega şekline (α_i, m ve K sabit) ve granülometrik 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.

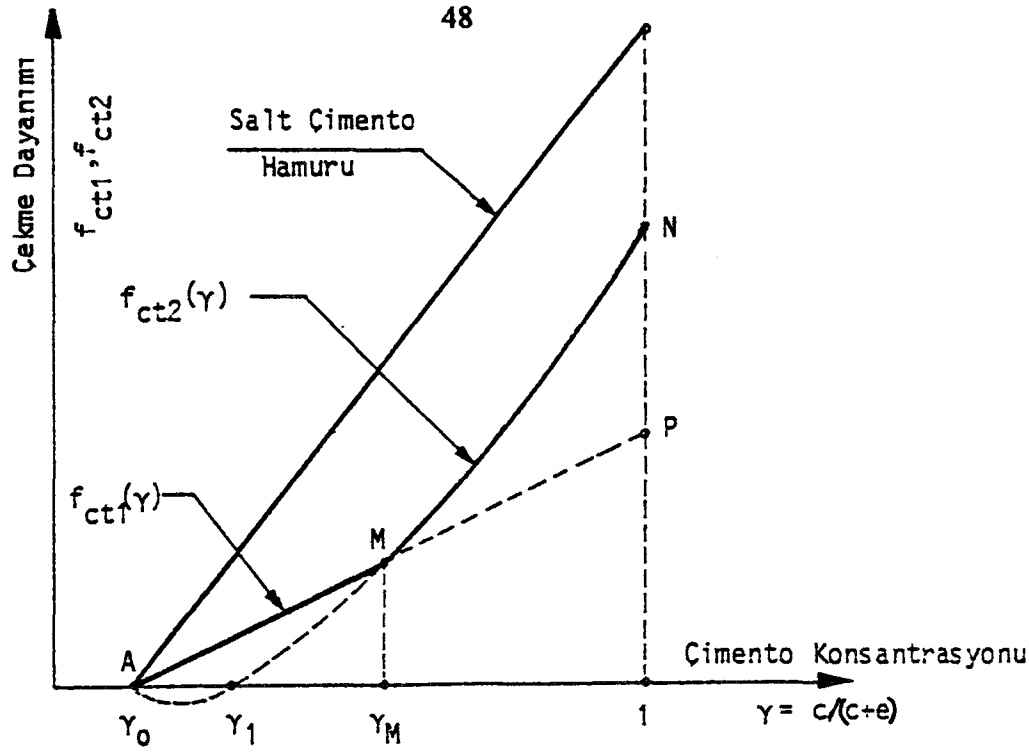
2.7.1.2.1.3.1. a ve v nin Sabit Hallerine Karşılık Gelen Eğriler

Bu eğriler, çimento konsantrasyonu (γ) değiştikçe sabit agrega ve sabit hapsedilmiş hava miktarına sahip bir betonun çekme dayanımının gelişimi gösterilmektedir (Şekil 20).

Bu şekilden görüldüğü gibi $f_{ct1}(\gamma)$ eğrileri doğrusal olup, a ve v değerleri sabit olduğundan aynı tür çimento ile üretilen tüm betonlar için sadece bir tane $f_{ct1}(\gamma)$ doğrusu söz konusu olmaktadır. $f_{ct2}(\gamma)$ eğrileri ise ekseni 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 (27) bağıntısındaki γ_1, t_{ad} ve k değerlerinin agrega petrografik yapısına bağlı olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.

Çimento konsantrasyonu γ_o 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 γ nın γ_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 iyileştikce artmaktadır.



Şekil 20: Betonun, a ve v' nin sabit halleri için, teorik çekme dayanımı eğrileri [68].

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

2.7.1.2.1.3.2 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 21 ve Şekil 22). Ayrıca, kolaylık açısından sadece $e=e_1$ =sabit ve v=0 durumu için inceleme yapılmakta ve böylece,

$$a + c + e = 1$$

olup, buradan

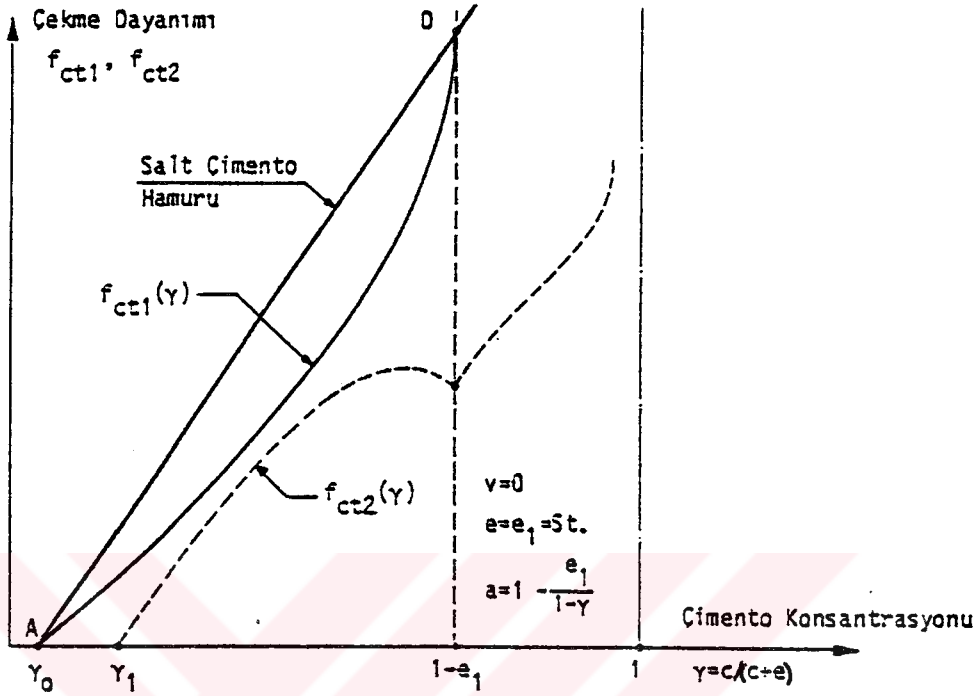
$$a = 1 - (e_1/1-\gamma)$$

olarak bulunur. Bu son bağıntı (26) ve (27) bağıntılarında yerine konursa ;

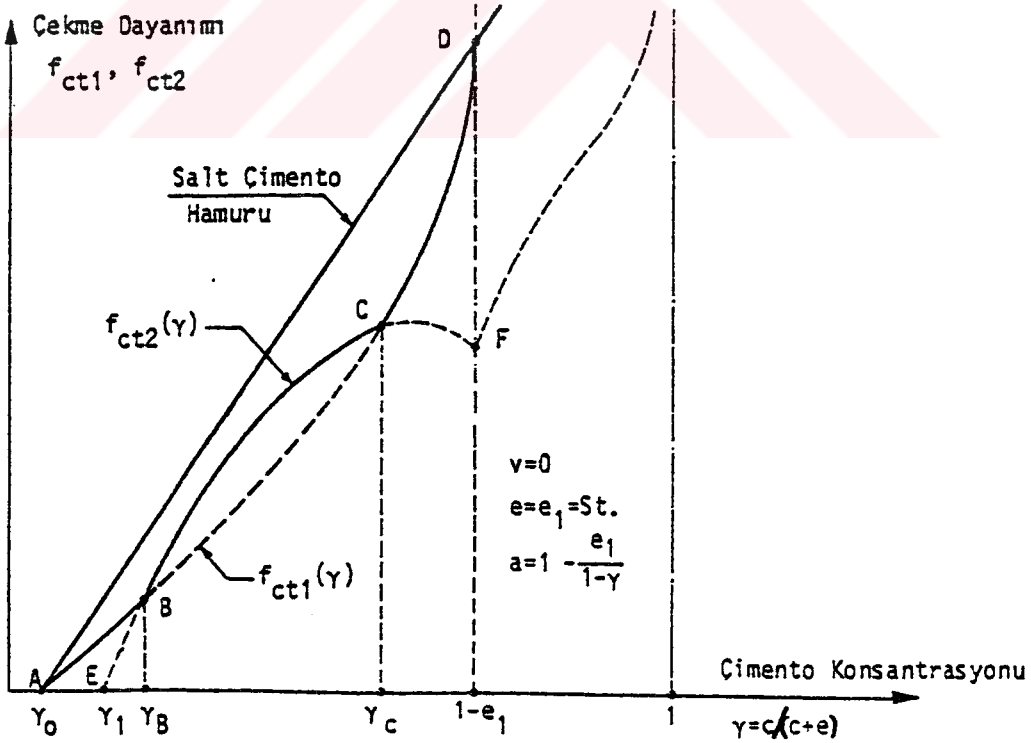
$$f_{ct1} = \alpha_1(\gamma - \gamma_o)t_c\left[1 - mK(1 - \frac{e_1}{1-\gamma})^{2/3}\right] \tag{29}$$

$$f_{ct2} = \alpha_2(\gamma - \gamma_1)t_{ad}\left[mK(1 - \frac{e_1}{1-\gamma})^{2/3} + \alpha_3 k(\gamma - \gamma_o)\left[1 - mK(1 - \frac{e_1}{1-\gamma})^{2/3}\right]\right] \tag{30}$$

bağıntıları elde edilmektedir. Burada $\gamma = 1-e_1$ değeri için $a = 0$ olduğundan beton sadece çimento hamurundan ibarettir. Ancak (30) bağıntısı beton bileşiminde agrega olması ve $\gamma<1-e_1$ hali için fiziksel bir anlam taşımaktadır. Bu nedenle f_{ct1}' in γ ' ya bağlı değişimi,



Şekil 21: Aderansın zayıf ya da hiç olmaması durumunda, e ve v nin sabit halleri için, teorik çekme dayanımı eğrileri [68].



Şekil 22: Aderansın yeterli olması durumunda, e ve v' nin sabit halleri için, teorik çekme dayanımı eğrileri [68].

$$\gamma_o < \gamma < 1\text{-}e_1$$

aralığında ve f_{ct2} nin γ ya bağlı değişimi ise,

$$\gamma_1 < \gamma < 1\text{-}e_1$$

aralığında incelenmekte ve böylece Şekil 21 ve Şekil 22 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(bkz. Şekil 21).

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 (bkz. Şekil 22). Bu da (30) bağıntısıyla tanımlanan beton çekme dayanımının , B ve C noktaları arasında, aderans dayanımına ve dolayısıyla agrega petrografik yapısına bağlı olduğunu göstermektedir.

2.7.1.2.1.3.3. 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 23).

e ve v nin sabit hallerinde olduğu gibi burada da basitleştirmek amacıyla sadece $c = c_1$ = sabit ve $v = 0$ olması haline karşılık gelen eğriler incelenmekte ve böylece,

$$a = 1 - (c_1/\gamma)$$

olduğundan; betonun çekme dayanımı ,

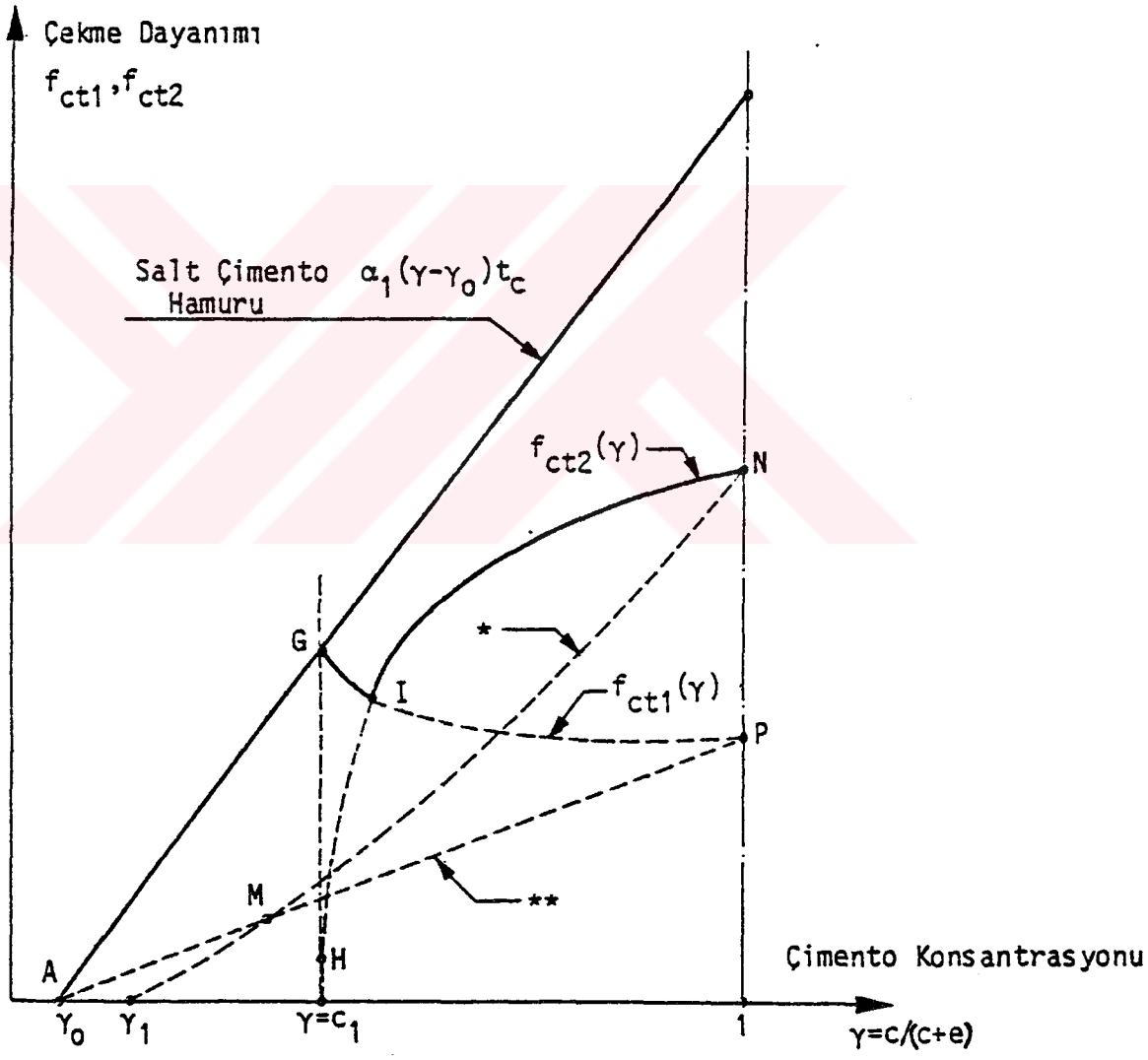
$$f_{ct1} = \alpha_1(\gamma - \gamma_o)t_c\left[1 - mK(1 - \frac{c_1}{\gamma})^{2/3}\right] \qquad (31)$$

$$f_{ct2} = \alpha_2(\gamma - \gamma_1)t_{ad}\left[mK(1-\frac{c_1}{\gamma})^{2/3} + \alpha_3 k(\gamma - \gamma_o)\left[1 - mK(1-\frac{c_1}{\gamma})^{2/3}\right]\right] \quad (32)$$

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.



* $a=1-c_1$=sabit hali için f_{ct2} parabolü

** $a=1-c_1$=sabit hali için f_{ct1} doğrusu

Şekil 23: Betonun, c ve v' nin sabit halleri için, teorik çekme dayanımı eğrileri [68].

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

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 γ, 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.

2.7.1.2.2. Merkezi Basınç Etkisindeki Kırılma Mekanizması

2.7.1.2.2.1. Betonun Merkezi Basınç Dayanımı

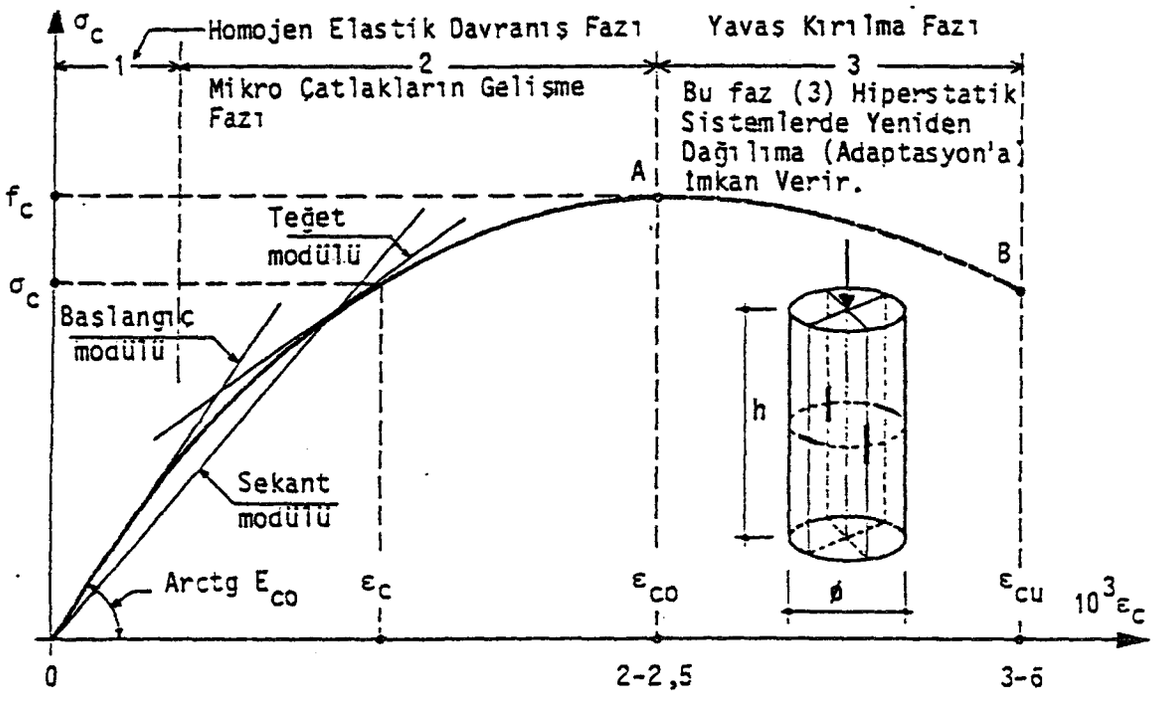
Bir betonda beklenen en önemli özeliklerden birinin yüksek bir basınç dayanımı olduğu bilinmektedir. Betonun basınç dayanımı, kemirici (agresif) ortam etkisinde kalmadığı sürece, zamanla artan bir mekanik özeliği olup, ilk 7 günde bu değerin yaklaşık %70 ' ine ve 28. gün sonunda da standard dayanım olarak 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°C ± 2°C sıcaklıktaki su içinde 28 gün boyunca saklanmış standard beton silindir numunelerin (ϕ= 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 standard numune olarak kullanılmakta ve bu dayanımlardan, istendiğinde yaklaşık bir takım bağıntılarla silindir dayanımına çevrilebilmektedir [70].

Bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonların bir eksenli merkezi basınç altındaki standard numuneler üzerinde, sabit gerilme hızıyla elde edilen gerilme-birim şekildeğiştirme diyagramları daha önce verilmiştir (bkz. Şekil 15, Şekil 17). Sabit şekildeğiştirme hızıyla, geleneksel betonlar üzerinde elde edilen gerilme-birim şekildeğiştirme diyagramının genel görünümü ise Şekil 24 ' de verilmektedir.

Betonların gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarını birçok parametre etkilediğinden, tüm betonları temsil edecek şekilde, analitik bir bağıntıyla ifade edilmesi imkansız denecek kadar zor olmaktadır. Bununla beraber bazı araştırmacılar bu eğrinin genel ifadesini analitik olarak vermeye çalışmıştır. Bununlara örnek olarak; sırasıyla Smith-Young, Voellmy, Torraja ve Sargın tarafından önerilen aşağıdaki (33), (34), (35) ve (36) bağıntıları verilebilir [71], [72].

$$\sigma_c = f_c \, (\varepsilon_c / \varepsilon_{co}) \, e \, [1 - (\varepsilon_c / \varepsilon_{co})] \qquad (33)$$



Şekil 24: Geleneksel betonun bir eksenli merkezi basınç altında şematik gerilme-birim şekildeğiştirme diyagramı [71].

$$\sigma_c = f_c \, (\varepsilon_c / \varepsilon_{co}) \, [\, 2-(\varepsilon_c / \varepsilon_{co})] \qquad (34)$$

$$\sigma_c = f_c \, [1-(1-(\varepsilon_c / \varepsilon_{co}))^{7/3} \,] \qquad (35)$$

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

$$y = [kx + (k' - 1) \, x^2] / [\, 1 + (k-2) \, x + k' \, x] \qquad (36)$$

şeklindedir. Bu teorik bağıntılar betonun davranışını yaklaşık olarak göstermektedirler.

Betonun 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 r_c çimento hamuru dayanımını göstermek üzere;

$$f_c = A / B^{W/C} \qquad (37)$$

Abrams,

$$f_c = K_B \, [(C/W) - 0.5] \qquad (38)$$

Bolomey,

$$f_c = r_c / K_G (C / W)^2 \quad (39)$$

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

$$f_c = K_F \gamma^2 \quad (40)$$

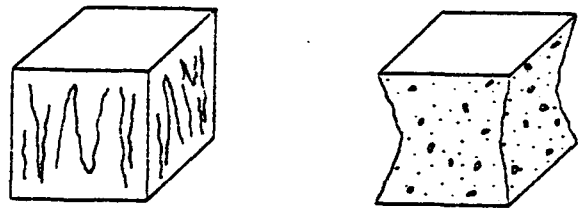
şeklindeki Feret bağıntısı verilebilir [73],[74],[75].

Bu bağıntıların en çarpıcı ortak özeliği, agrega petrografik yapısının etkisini içermemiş olmalarıdır.

2.7.1.2.2.2. Kırılma Mekanizması

Merkezi basınç yükü F olan, 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 25' deki gibi kırılmaktadır.

Kırılma mekanizmasına birçok faktörün etkidiği bilinen bir gerçektir. Ancak çekme ya da basınç etkisindeki beton ya da harç numunelerin kırılma yüzeyleri, agreganın dayanımı az olmamak koşuluyla, genellikle agrega çevresini kısmen takip etmektedir. Diğer bir deyişle, bağlantının katı-katı tipinde olması halinde kırılma çimento hamuru-agrega ara yüzeyindeki aderans bölgesinde meydana gelmektedir [76].



Şekil 25: Beklenen kırılma şekilleri.

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 olabilir.

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 [76]. 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 kalmakta, 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 kalmaktadır.

Ayrıca aderans bölgesinde yapılan mikroskopik gözlemler, burada çok sayıda boşluğun varlığını göstermektedir [77]. Bu boşlukların bir kısmı agregalara bağlı olan hava kabarcıklarından, bir kısmı da agrega yakınlarında çimento hamurunun katı eleman yönünden zayıf oluşundan ve bu bölgede hidrate olmuş tanecik konsantrasyonunun minumum 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 [76].

Diğer taraftan geleneksel agrega elastisite modüllerinin çimento hamurununkinden çok daha büyük olduğu da bilinmektedir [77]. 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 genellikle bu düzeyde meydana gelmektedir. Bunun tüm ağır agregalara genellemenin doğru olmayabileceği açıktır.

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 [76].

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 şekildeğiştirme 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 özelikleri ve dolayısıyla petrografik 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 [69]. 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 [78],[79],[80]. Durum böyle olunca, bunların sınırlı çalışmalarından genel bir kural çıkarmak zor olmaktadır.

2.7.1.2.2.3. Merkezi Basınç Dayanımının İfadesi

Madde 2.7.1.2.2.2 ' de kırılıncaya kadar, merkezi basınç etkisinde kalan bir beton numunede, serbest genleşmesi engellenmediği taktirde, dış yük doğrultusuna paralel çatlaklar oluştuğu belirtilmiştir. Bu durumda numunenin dış yüke dik doğrultuda çekme etkisinde kırılıyormuş gibi davrandığı düşünülebilir.

O halde, yüksüz durumda, ortak çevreleri U olan çimento hamuruyla sarılmış bir agrega tanesi basınç kuvveti etkisinde kaldığında, Poisson oranları birbirine yakın olduğu halde beton agregalarının elastisite modülleri genellikle çimento hamurununkinden büyük olduğundan [77], çimento hamuru agrega yanal yüzeyleri boyunca agregadan ayrılma

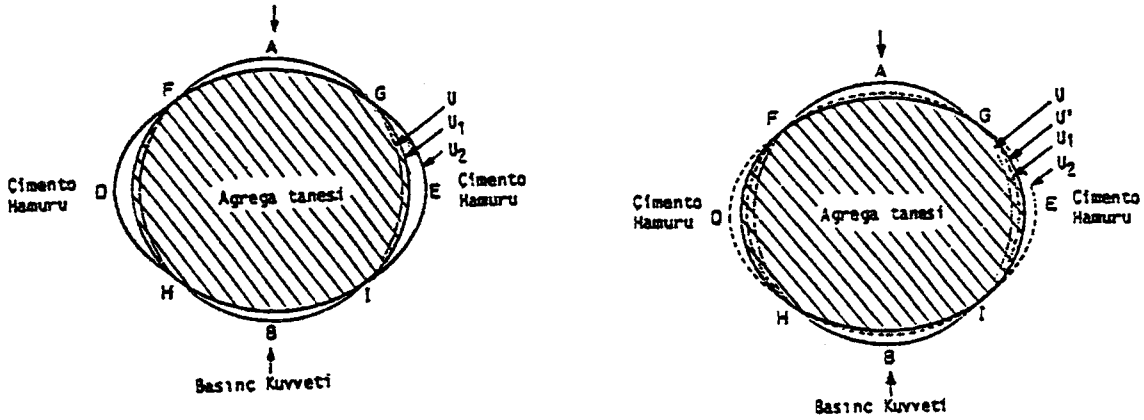
eğilimi gösterir. Şekil 26a ' dan görüldüğü gibi eğer çimento hamuruyla agrega arasında aderans yoksa U çevresi agrega için U_1 çevresinde dönüşmekte ve agrega yüzeyleri daima bazı pürüzler içerdiğinden, çimento hamurunun yanal genleşmesi A ve B noktaları etrafında engellenmektedir. Fretaj etkisi adı verilen bu etki, çimento hamurunun dış yüke dik doğrultuda serbestçe şekildeğiştirebildiği 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 [77].

Çimento hamuruyla agrega arasında aderans olması halinde, kırılma yüküne varılmadan önce aderans bölgesindeki ortak gerilmeden dolayı her ikisinin de yanal şekildeğiştirmeleri 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 26b).

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 genleşebilmektedir.

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



a) Aderans olmaması halinde

b)Aderans olması halinde

Şekil 26: Merkezi basınçta agrega ve çimento hamuru şekildeğiştirmeleri.

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 şekildeğiştirmelerin çimento hamurunun çekme kırılmasındaki şekildeğiştirmelerine 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:

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

$$\sigma_z = \sigma_a \frac{s_a}{s} + \sigma_c \frac{s_c}{s} \tag{41}$$

olarak yazılabilmektedir. Kırılma anında çimento hamuru ortalama enine şekildeğiştirmesinin çekme kırılmasındaki boyuna şekildeğiştirmesine eşitliğinden , f_{ct} çimento hamuru çekme dayanımını, ν_c çimento hamuru Poisson oranını ve E'_c , $\nu_c e_c$ şekildeğiştirmesine karşılık gelen sekant modülünü göstermek üzere ;

$$\nu_c \varepsilon_c = f_{ct} / E'_c \tag{42}$$

bağıntısı yazılabilmektedir. Buradan σ_z nin en büyük değeri olan beton basınç dayanımı f_{c1} ile gösterilirse;

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

ya da

$$f_{c1} = \frac{f_{ct}}{\nu_c}\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_c}\frac{s_a}{s} + \frac{s_c}{s}\right)\frac{E_c}{E'_c} \tag{43}$$

olarak elde edilmektedir.

2) Aderans ya da agrega 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, ε_{1c} aderans yokken çimento hamurunun yapacağı ortalama birim şekildeğiştirmeyi, ε_{oa} aderans yokken bir eksenli basınç etkisinde gerçek şekildeğiştirmeye eşit bir yanal şekildeğiştirme oluşturan agrega birim şekildeğiştirmesini, ν_a agrega Poisson oranını göstermek üzere ;

$$\sigma_{adt} = E'_c (\nu_c \varepsilon_{1c} - \nu_a \varepsilon_{oa}) \qquad (44)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Bu bağıntının elde edilişi Ek-3' de verilmektedir.

Böylece (44) bağıntısı f_{adt} aderans çekme dayanımını göstermek üzere;

$$f_{adt} = E'_c (\nu_c \varepsilon_{1c} - \nu_a \varepsilon_{oa}) \qquad (45)$$

şeklinde ve betonun basınç dayanımı ;

$$f_{c2} = \sigma_a s_a / s + \sigma_c s_c / s \qquad (46)$$

olarak yazılabilir.

Aderans yokken ε_{1a} agreganın yapacağı ortalama boyuna birim şekildeğiştirmeyi göstermek üzere σ_a ve σ_c nin ifadeleri,

$$\sigma_a = E_a \varepsilon_{1a} \qquad (47)$$

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_{1c} \qquad (48)$$

şeklindedir. Bu durumda (45) bağıntısından çekilen ε_{1c} değeri (46) bağıntısında yerine yazılır ve (48) bağıntısı dikkate alınırsa;

$$f_{c2} = \frac{E_c}{E_c} \frac{f_{adt}}{\nu_c - \nu_a \frac{\varepsilon_{oa}}{\varepsilon_{1c}}} \left(\frac{s_c}{s} + \frac{\sigma_a}{\sigma_c}\frac{s_a}{s}\right) \tag{49}$$

olarak elde edilmektedir.

b) Betonun kırılmasına agrega kırılması neden olmaktadır.

Kırılma anında agrega ortalama enine şekildeğiştirmesinin çekme kırılmasındaki boyuna şekildeğiştirmesine eşit olduğu varsayımıyla ; E'_a, $\nu_a\varepsilon_a$ şekildeğiştirmesine karşılık gelen agrega sekant modülünü ve f_{at} agrega çekme dayanımını göstermek üzere ;

$$\nu_a\varepsilon_a = f_{at} / E'_a \tag{50}$$

yazılabilir. Bu bağıntılardan ε_a çekilir ve elde edilen değer (46) bağıntısında yerine yazılırsa;

$$f'_{c2} = \frac{f_{at}}{\nu_a}\left(\frac{s_a}{s} + \frac{\sigma_c}{\sigma_a}\frac{s_c}{s}\right)\frac{E_a}{E'_a} \tag{51}$$

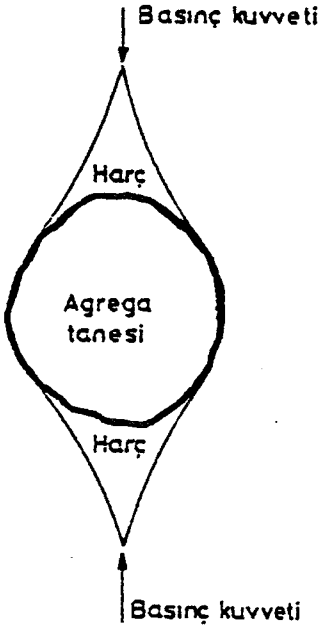
olarak elde edilir. Bu teori, Vile [81] tarafından geliştirilen varsayımlarla uyuştuğu gibi, merkezi basınç etkisinde kırılan numuneden çıkarılan bir agrega tanesinin genellikle Şekil 27 ' deki görünümü almasıyla da doğrulanmaktadır.

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

Diğer taraftan Dantu [82] 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 şekildeğiştirmelerin agregalardakinden daha büyük olduğunu,
- Harçta çok yüksek uzama yığılmaları oluşan noktaların bulunduğunu,
- Gerilme yığılması oluşan noktaların iri agregalarda bulunduğunu,

göstermiştir.



Şekil 27: Merkezi basınçta bir beton numunenin ezilmesinden sonra agrega tanesinin durumu [68].

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

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

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

$$\varepsilon_a \nu_a = f_{ct} / E'_c \qquad (52)$$

bağıntısı, yada basınç dayanımı cinsinden ;

$$f'_{c2} = \frac{f_{at}}{\nu_a}\left(\frac{s_a}{s} + \frac{\sigma_c}{\sigma_a}\frac{s_c}{s}\right)\frac{E_a}{E'_a} \qquad (53)$$

bağıntısı yazılabilir.

2.7.1.2.2.3.1. f_{c1} , f_{c2} ve f'_{c2}' nün Beton Bileşimine Bağlı İfadeleri

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

$$f_{c1} = \frac{\alpha_1(\gamma-\gamma_o)t_c}{\nu_c}\frac{E_c}{E_c'}\left(\frac{mKa^{2/3}}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_o)}\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_c} + 1 - mKa^{2/3} - m'K'v^{2/3}\right) \quad (54)$$

$$f_{c2} = \frac{\alpha_2(\gamma-\gamma_o)t_{ad}}{\nu_c - \nu_a\frac{\varepsilon_{oa}}{\varepsilon_{1c}}}\frac{E_c}{E_c'}\left(\frac{mKa^{2/3}}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_o)}\frac{\varepsilon_{1a}}{\varepsilon_{1c}} + 1 - mKa^{2/3} - m'K'v^{2/3}\right. \quad (55)$$

$$f_{c2}' = \frac{f_{at}}{\nu_a}\left(mKa^{2/3} + \alpha_4 k'(\gamma-\gamma_o)\frac{\varepsilon_{1c}}{\varepsilon_{1a}}(1 - mKa^{2/3} - m'K'v^{2/3})\right) \quad (56)$$

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

$$E'_c/E_a = \alpha_4 k'(\gamma-\gamma_o) \quad (57)$$

bağıntısıyla elde edilmektedir.

2.7.1.2.2.3.1.1. ν_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 azalmaktadır. $\gamma=0$ 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 γ büyüdükçe Poisson oranının azalmasını gerektirmektedir. Bu durumda V hacimli bir cimento hamuru için, b çimento türüne ve α_5 zamana bağlı birer katsayıyı göstermek üzere;

$$(\Delta V / V) / \varepsilon_c = \alpha_5 \, b \, \gamma$$

ifadesi yazılabilir. Buradan

$$1\text{-}2\,\nu_c = \alpha_5 \, b \, \gamma$$

bulunur ve

$$\nu_c = 1/2\ (1-\alpha_5\, b\, \gamma) \qquad (58)$$

olarak elde edilir.

2.7.1.2.2.3.2. E_c / E'_c nin ifadesi

Basınç ve çekmede E_c/E_a için verilen (21) ve (57) nolu ifadelerin karşılaştırılmasından,

$$E_c / E'_c = h = \text{sabit} \qquad (59)$$

yazılabilir. Bu çalışmada $\varepsilon_a / \varepsilon_c$, $\varepsilon_{1a} / \varepsilon_{1c}$ ve $\varepsilon_{oa} / \varepsilon_{oc}$ 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, $\gamma=\gamma_o$ civarında çimento hamuru çok az katı eleman içerdiğinden betondaki basınç dağılımı pratik olarak hidrostatiktir. Bu da ε_c değerlerinin bu koşullar altında ε_a değerlerinden çok daha büyük olduğunu ve çimento hamurunda katı eleman miktarı arttıkça $\varepsilon_c/\varepsilon_a$ oranının azalacağını göstermektedir.

Ancak, agrega taneleri arasındaki mesafe γ arttıkça artmakta ve böylece agregalar tarafından çimento hamuruna uygulanan fretaj etkisi de azaldığından $\gamma_o<\gamma<1-\varepsilon_1$ aralığında γ arttıkça $\varepsilon_c/\varepsilon_a$ oranı artmaktadır. Bu oranın geleneksel betonlar için, daima 1 den büyük bir minumuma sahip olduğu açıktır. Bu koşullar altında $f_{c1}(\gamma)$ ve $f_{c2}(\gamma)$ eğrilerinin şeklini belirlemek mümkündür. Bunun için (58) ve (59) bağıntıları (55) ve (56) bağıntılarındaki yerlerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında ;

$$f_{c1} = \frac{2\alpha_1(\gamma-\gamma o)t_c h}{1-\alpha_5 b\gamma}\left(\frac{mKa^{2/3}}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_o)}\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_c}+1-mKa^{2/3}-m'K'v^{2/3}\right) \qquad (60)$$

$$f_{c2} = \frac{2\alpha_2(\gamma-\gamma_o)t_{ad} h}{1-\alpha_5 b\gamma-2\nu_a\frac{\varepsilon_{oa}}{\varepsilon_{1c}}}\left(\frac{mKa^{2/3}}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_o)}\frac{\varepsilon_{1a}}{\varepsilon_{1c}}+1-mKa^{2/3}-m'K'v^{2/3}\right) \qquad (61)$$

olarak elde edilmektedir.

Bu bağıntılara göre $\gamma \leq \gamma_o$ için betonun basınç dayanımı sıfırdır. $\gamma > \gamma_o$ 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 (61) bağıntısıyla verilen ve agrega petrografik yapısıyla doğrudan ilişkili olan aderans kırılması üzerinde durulmaktadır.

2.7.1.2.2.4. 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 $e=e_1$ =sabit ve $v=v_1$= sabit halleri için;

$$a = 1 - (e_1 / 1-\gamma)$$

olduğundan ,

$$f_{c1} = \frac{2\alpha_1(\gamma-\gamma_o)t_c h}{1-\alpha_5 b\gamma}\left[\frac{mK}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_o}\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_c}(1-\frac{e_1}{1-\gamma})^{2/3}+1-mK(1-\frac{e_1}{1-\gamma})^{2/3}\right] \quad (62)$$

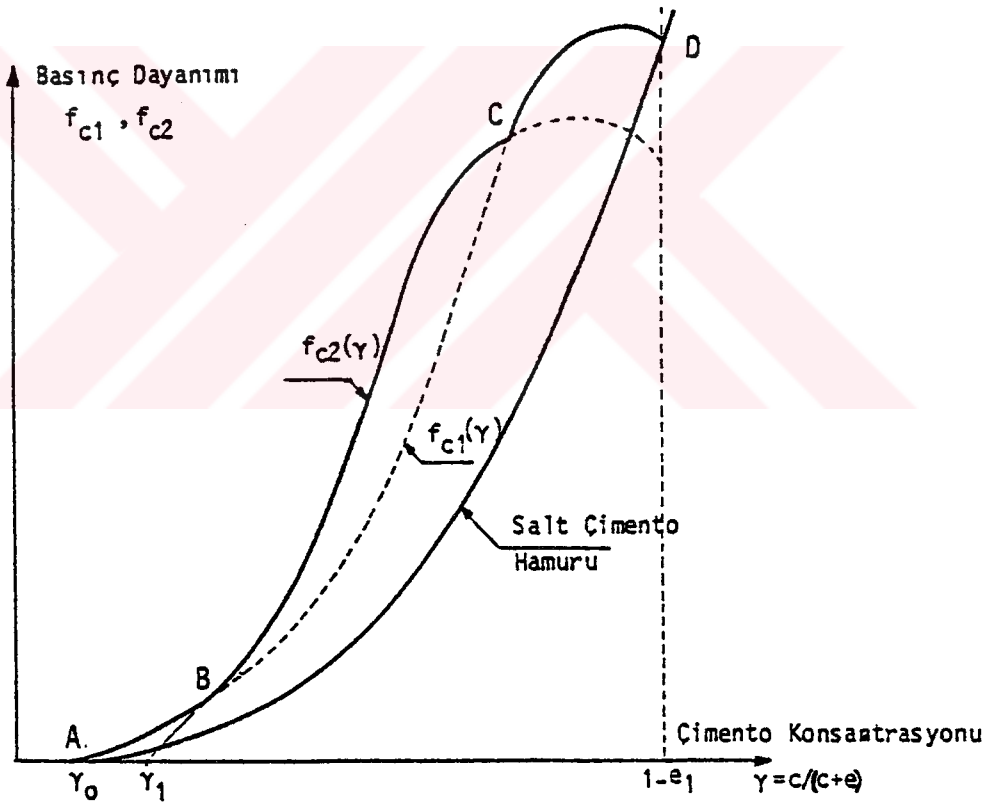
$$f_{c2} = \frac{2\alpha_2(\gamma-\gamma_1)t_{ad} h}{1-\alpha_5 b\gamma - 2v_a\frac{\varepsilon_{oa}}{\varepsilon_{1c}}}\left[\frac{mK}{\alpha_4 k'(\gamma-\gamma_o)}\frac{\varepsilon_{1a}}{\varepsilon_{1c}}(1-\frac{e_1}{1-\gamma})^{2/3}+1-mK(1-\frac{e_1}{1-\gamma})^{2/3}\right] \quad (63)$$

olarak elde edilebilir.

Bu bağıntılardan (62) bağıntısı, $\gamma=1$, $\gamma=0$ ve $\gamma=1/\alpha_5 b$ değerleri dışındaki tüm $\gamma_0<\gamma<1-e_1$ değerleri için , (63) bağıntısı ise $\gamma=1$, $\gamma=0$ ve

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

değerleri dışındaki tüm $\gamma 1<\gamma<1-e_1$ değerleri için matematikçe tanımlıdır. Bu bağıntılarla (62 ve 63) belirlenen $f_{c1}(\gamma)$ ve $f_{c2}(\gamma)$ eğrileri Şekil 28 'de verilmektedir.



Şekil 28: Betonun, e ve v' nin sabit halleri için, teorik basınç dayanımı eğrileri [75].

Aynı şekil üzerinde (43) bağıntısında $\sigma_a=\sigma_c$ yazmak suretiyle

$$f_c = \frac{\sigma_c}{\nu_c}\frac{E_c}{E_c}$$

ya da

$$f_c = \frac{2\alpha_i(\gamma-\gamma_o)f_a h}{1-\alpha_5 b} \qquad (64)$$

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, γ değeri ne olursa olsun, betonun kırılması aderanstan bağımsız olmaktadır.

Bu durumda betonun basınç dayanımını gösteren nokta γ, γ_o dan $1\text{-}e_1'$ 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 γ nın sıfırla γ_o arasındaki değerleri için dayanım yine sıfır olmaktadır.

γ nın γ_o 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. γ' 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 γ 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.

2.7.1.2.2.5. Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki Bağıntılar, Basınç Dayanımının Yaklaşıklığı ve Harçtan Betona Geçiş

2.7.1.2.2.5.1. Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki Bağıntılar

σ_a ve σ_c sırasıyla agrega ve çimento hamuruna etkiyen ortalama basınç gerilmelerini göstermek üzere, (10) ve (43) bağıntılarından, betonun çekme ve basınç dayanımları arasındaki ifade ;

$$f_{c1} = \frac{f_{ct1}}{\nu_c}\left(1+\frac{\sigma_a}{\sigma_c}\frac{s_a}{s}\right)\frac{E_c}{E_c'} \tag{65}$$

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, (13) ve (49) ifadelerinden, σ'_a ve σ'_c çekme etkisindeki gerilmelere karşılık gelmek üzere;

$$f_{c2} = \frac{f_{ct2}}{\nu_c - \nu_a \dfrac{\varepsilon_{oa}}{\varepsilon_{1c}}}\frac{\sigma_a}{\sigma_c}\frac{s_a + \dfrac{\sigma_c}{\sigma_a}s_c}{s_a + \dfrac{\sigma_c'}{\sigma_a'}s_c}\frac{E_c}{E_c'} \tag{66}$$

şeklinde elde edilir.

Böylece, aynı betonun basınç ve çekme dayanımları birbirine bağlanmış olmaktadır. $f_{ct1}/fc1$ ve $f_{ct2}/fc2$ oranlarının betonun gevrekliğini karakterize ettiği de bilinmektedir [83],[84].

2.7.1.2.2.5.2. Betonun Basınç Dayanımının Yaklaşıklığı

Pratikte, bir beton elemanın taşıyabileceği maksimum basınç yükünün o elemanın kesitine oranı basınç dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Oysa, çekmedekinin aksine, basınç kırılması yavaşça ve aşamalı olarak meydana gelmektedir[68],[85]. Gerçekten de basınç kırılması L' Hermite' in [86] *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 vermemektedir. 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.

2.7.1.2.2.5.3. 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 alınsın. Bu harç içine iri taneli agregaların ilave edilmesi durumunda c_2, e_2, a_2 ve v_2 miktarlarıyla tanımlanan bir beton elde edilmektedir. Buna göre ;

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

eşitliği yazılabilir. İri agrega 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 (γ) değişmediğinden ;

$$c_1 + e_1 = c_1 / \gamma$$

$$c_2 + e_2 = c_2 / \gamma$$

ya da

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

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

şeklinde yazılır ve bu durum genelleştirilirse;

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

ifadesi elde edilmektedir.

Bu bağıntıdan görüldüğü gibi, γ' nın sabit değeri için agrega 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 γ değeri için a nın artan birer fonksiyonu oldukları görülmektedir (bkz. (27), (28), (55) ve (56) nolu bağıntılar). Diğer bir deyişle, beton içindeki boşluk oranını artırmadan *agrega ilave edildikçe toplam hacme göre çimento oranı azaldığı halde* dayanımlar artmaktadır. Bu da, beton dayanımının sadece betondaki çimento oranına bağlanmasının hatalı olduğunu ortaya koymaktadır.

2.7.2. Betonların Kırılma Mekanizmalarının Açıklanması İçin Gerçekleştirilen Deneyler

2.7.2.1. Ağır ve Geleneksel Betonların Çimento Hamuru Fazlarının Mekanik Özelikleri

Bu çalışmadaki ağır ve geleneksel betonların çimento hamuru fazlarının mekanik özeliklerinin belirlenmesinde 40x40x160 mm' lik çelik üçlü kalıplarla üretilen numuneler kullanılmıştır.

Betonların bileşimindekiyle aynı özeliklere sahip olabilmesi için çimento hamurları, su/çimento oranı betonlardakine eşit olmak koşuluyla, bir metreküplük hacmi sadece çimento ve su dolduracak şekilde hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan çimento hamuru kalıplara bir tabaka halinde konularak sıkıştırılmıştır. Döküldüklerinden üç saat sonra, rötre etkisini azaltmak için, kalıpların üzerleri sürekli ıslak kalan bir çuvalla kapatılmış ve bir gün sonra kalıplarından çıkarılarak 21 gün süreyle sıcaklığı 23°c ± 2°c olan suda daha sonra sudan çıkartılarak sıcaklığı 24°c ± 2°c ve bağıl nemi %65 ± %5 olan bir ortamda saklanmışlardır. Deney anında numuneler 28 günlüktü.

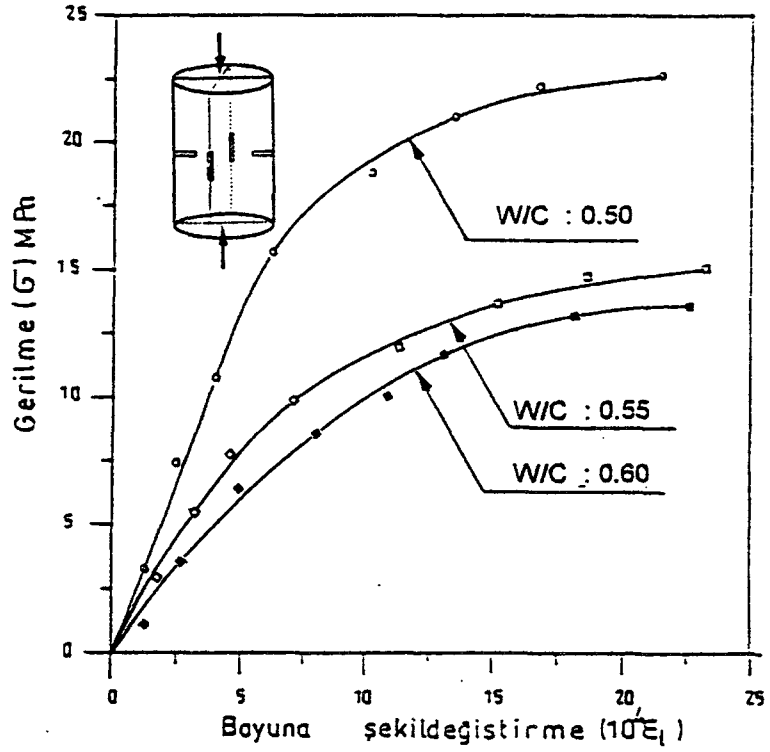
Bu çimento hamurlarıyla hazırlanan satndard silindir, karot (75mmx150mm) ve karot boyutlarında silindir numuneler üzerinde Madde 2.6.2' dekilere benzer deneylerden elde

edilen sonuçlar Tablo 13' de standard numuneler üzerine yapıştırılan birim şekildeğiştirme ölçerleri yardımıyla belirlenen gerilme-şekildeğiştirme diyagramları ve enine şekildeğiştirmelerin, boyuna şekildeğiştirmelere bağlı, değişimi sırasıyla Şekil 29 ve Şekil 30'da verilmektedir[65].

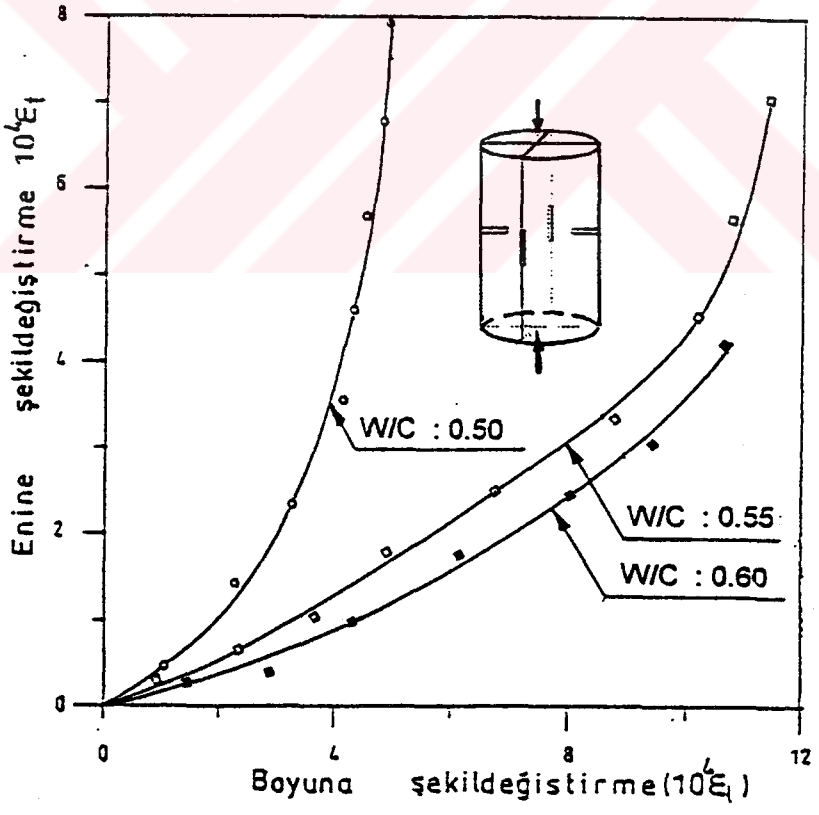
Tablo 13' den su/çimento oranındaki %20' lik bir artışa karşılık, basınç dayanımının %35, başlangıç elastisite modülünün %100 azaldığı, sertleşmiş çimento hamurundan alınan karot basınç dayanımlarının ise, aynı boyutlu silindir numunelerinkinden ortalama %16 daha küçük olduğu ve poisson oranının su/çimento oranının artmasıyla azaldığı görülmektedir [65].

Tablo 13: Sertleşmiş çimento hamurunun mekanik özelikleri [65].

W/C	Numune boyutları (mm)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Standard sapma	Karakt. basınç dayanımı (MPa)	Başlangıç elastisite modülü (MPa)	$0.50f_c$ için elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı
0.50	150/300 silindir	23	0.5	22	25600	15800	0.33
	75/150 silindir	27	0.7	26			
	75/150 karot	23	2.4	20			
0.55	150/300 silindir	22	0.3	21.6	17750	6900	0.26
	75/150 silindir	25	1.2	23.5			
	75/150 karot	22	1.5	20			
0.60	150/300 silindir	17	0.4	16.5	11600	5750	0.22
	75/150 silindir	19	0.8	18			
	75/150 karot	16	0.9	15			



Şekil 29: Standard, sertleşmiş çimento hamurundan, numunelerin, su/çimento oranlarına göre, gerilme-şekildeğiştirme diyagramları [65].



Şekil 30: Standard, sertleşmiş çimento hamurundan, numunelerin, su/çimento oranlarıyla elde edilen enine şekildeğiştirmesinin, boyuna şekildeğiştirmeye göre, değişimi [65].

2.7.2.2. Ağır ve Geleneksel Agregaların Mekanik Özelikleri

Ağır agreganın mekanik özelikleri Madde 2.2.1.3' de, geleneksel agreganınkiler ise Madde 2.2.2.3' de verilmektedir(bkz. Tablo 4 ve Tablo 6).

2.7.2.3. Agregalarla Harç ve Çimento Hamuru Arasındaki Aderans Dayanımları

Beton bir numunenin kırılması, daha önce de açıklandığı gibi, birkaç şekilde meydana gelmektedir. Gerçekten kırılma genellikle ya agrega dayanımının düşüklüğünden ya agrega-sertleşmiş çimento hamuru aderansının zayıflığından ya da sertleşmiş çimento hamuru dayanımının yetersizliğinden meydana gelmektedir. Bu kırılma çeşitlerinin birinin yada birkaçının aynı anda oluşma ihtimalininde mevcut olduğu açıktır. Bu durumda betonların kırılma mekanizmalarının açıklanabilmesi için bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel agregalarla üretilen ağır ve geleneksel betonların harç fazlarıyla aralarındaki aderansın belirlenmesi gerekli olmaktadır. Bu amaçla 40mmx40mmx160mm' lik kayaç, harç ve yarısı kayaç yarısı harçtan ibaret olan, prizmatik numuneler üzerinde eğilme deneyleri daha sonra eğilme de kırılan 40mmx40mmx160mm'lik numune parçaları üzerinde basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kayaç numuneler ağır ve geleneksel agrega üretiminde kullanılan kayaçlardan kesilerek, harç ve harç-kayaç numuneler ise üçlü çelik kalıplarda hazırlanmıştır. Kullanılan numuneler Tablo 14' de verilmektedir.

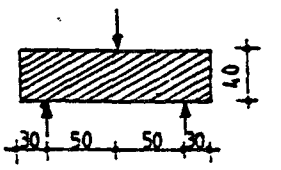
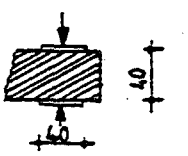
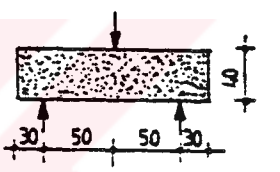
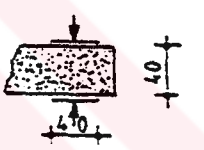
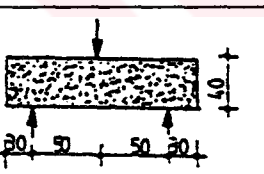
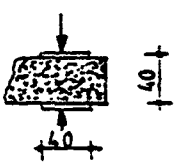
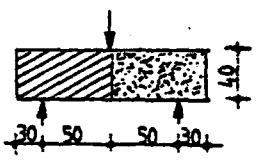
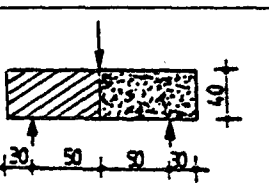
Ağır ve geleneksel betonlardaki harç fazını aynen elde edebilmek için beton üretiminde kullanılan su/çimento oranı 0.50, ağır betonlarda çimento / kum oranı 0.275, geleneksel betonlarda ise 0.425 şeklinde seçilmiştir. Bu harç bileşimleri Tablo15' de verilmektedir. Harç-kayaç numunelerinin harç kısmı, kayaç kısmı doygun duruma getirilerek kesilen yüzeyleri yıkanıp kalıplara yerleştirildikten, sonra dökülmüştür. Bunlarla birlikte harç numunelerinin hazırlanması, saklanması ve deney anındaki yaşları betonlarınkiyle aynı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir(bkz. Madde 2.5).

Yukarıda verilen yol aynen izlenerek ağır ve geleneksel agrega kayaçlarıyla çimento hamuru arasındaki aderans dayanımı belirlenmiştir.

Ağır ve geleneksel betonların çimento hamuruyla aynı özeliklere sahip olması için kayaç-çimento hamuru numunelerinin üretiminde kullanılan çimento hamurunun su/çimento oranı = 0.50 olarak alınmıştır(bkz. Madde 2.7.2.1). Kayaç çimento hamuru numuneleri

(40mmx40mmx160mm), kayaç-harç numuneleri gibi hazırlanmış ve deneylerde benzer şekilde gerçekleştirilmiştir.

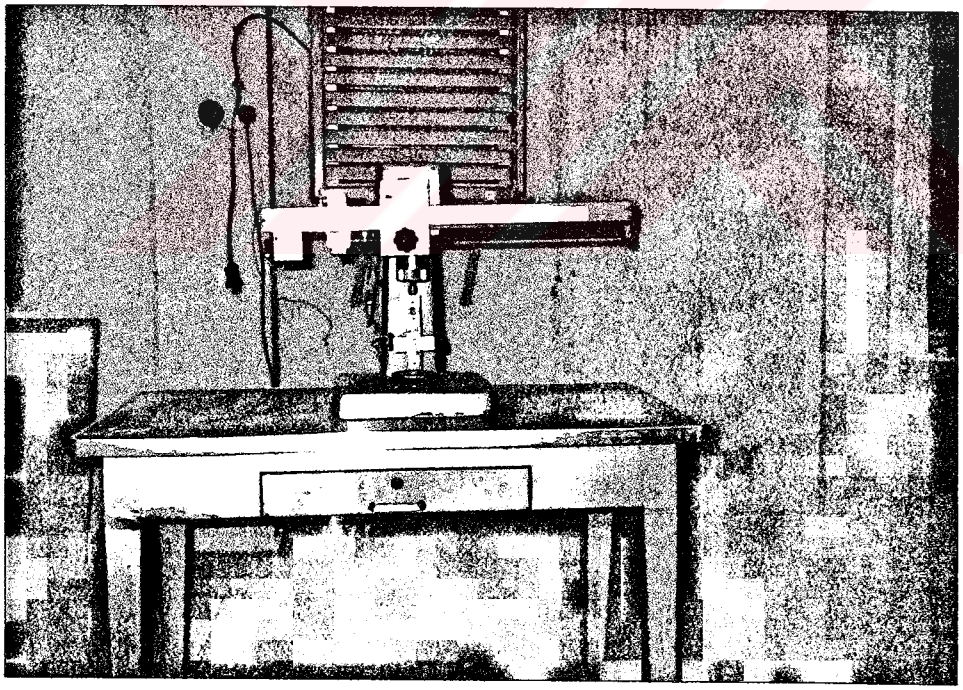
Tablo 14. Deneylerde kullanılan numuneler ve deney türleri.

Numunenin Yapısı	Ölçülen Dayanımlar	Eğilme ve Basınç Deneyleri (Boyutlar mm)
Ağır ve Geleneksel Agrega	Eğilme Dayanımı	
	Basınç Dayanımı	
Çimento Hamuru	Eğilme Dayanımı	
	Basınç Dayanımı	
Ağır ve Geleneksel Agregalı Harç	Eğilme Dayanımı	
	Basınç Dayanımı	
Ağır ve Geleneksel Kayaç-Çimento Hamuru	Aderans Dayanımı	
Ağır ve Geleneksel Agerag Kayacı-Harç	Aderans Dayanımı	

Tablo 15. Ağır ve geleneksel betonlardaki harç fazlarının bileşimleri.

Bileşenler	Ağır agregalı harç (kg/m^3)	Geleneksel agregalı harç (kg/m^3)
Çimento	571	572
Su	286	286
Kum	2075	1345

Eğilme deneylerinin gerçekleştirilmesinde Tonitechnick marka Michaelis deney aleti (Şekil 31), eğilme deneyinde kırılan numune parçaları üzerinde basınç deneyinin gerçekleştirilmesinde ise üniversal deney aleti (bkz. Şekil 5) kullanılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 16 ve Tablo 17' de verilmektedir.



Şekil 31: Michalis eğilme deney aleti.

Tablo 16. Kayaç, çimento hamuru ve harç numunelerin (40mmx40mmx160mm) eğilme ve basınç dayanımları.

Numuneler	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Standard sapma (MPa)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Standard sapma (MPa)
Ağır agrega kayacı	7.28	2.4	47.29	5.5
Geleneksel agrega kayacı	13	0.9	98	9.6
Çimento hamuru	4.9	0.9	35.8	3.23
Ağır agregalı harç	6.1	0.5	36.55	4.26
Geleneksel agregalı harç	5	0.4	35	2

Tablo 17. Kayaç-harç ve kayaç-çimento hamuru aderans dayanımları.

Numuneler	Aderans dayanımı (MPa)	Standard sapma (MPa)
Ağır agrega kayacı-harç	1.5	0.4
Geleneksel agrega kayacı-harç	1.1	0.2
Ağır agrega kayacı-çimento hamuru	2.9	0.4
Geleneksel agrega kayacı-çim. hamuru	0.4	0.1

Bu tablolardan, geleneksel agrega kayacının eğilme ve basınç dayanımı, ağır agrega kayaçlarınkinden sırasıyla %79 ve %100 oranlarında daha büyük, geleneksel agregalı harcın eğilme ve basınç dayanımı, ağır agregalı harcınkinden sırasıyla %18 ve %4 oranlarında daha küçük olduğu , ağır agrega kayacı-çimento hamuru aderans dayanımının geleneksel agrega kayacı-çimento hamurunkinden yaklaşık 7 kat daha büyük olduğu, buna karşılık ağır agrega kayacı-harç aderans dayanımının, geleneksel agrega kayacı-harçınkinden yaklaşık 1.5 kat daha büyük olduğu görülmektedir.

2.7.3. Betonların Kırılma Mekanizmalarının Açıklanması

Bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel agregaların, ve bu agregalarla değişik su/çimento oranlarında üretilen ağır ve geleneksel betonların mekanik özelikleri daha önce tablo ve diyagramlar halinde verilmiştir (bkz. Tablo 4, Tablo 6, Tablo 12, Şekil 6, Şekil 9, Şekil 15 ve Şekil 17).

Ağır betonların, kırılma mekanizmalarını açıklayabilmek amacıyla, çimento hamurlarının mekanik özelikleriyle, kayaç-çimento hamuru ve kayaç-harç aderans dayanımları da Tablo 13, Tablo 16 ve Tablo 17' de verilmiştir.

Bu başlık altında ise, betonların kırılma mekanizmalarının kolayca açıklanabilmesi için deneylerden elde edilen ve değişik tablolarda verilmiş olan agregaların, bu agregalarla yapılan betonların ve betonların çimento hamuru fazlarının 28 günlük ortalama ve karakteristik standard silindir basınç dayanımları, elastisite modülleri, poisson oranları, çimento konsantrasyonları ile 10 MPa' a karşılık gelen birim şekildeğiştirme değerleri daha önce verilen ilgili tablolardan derlenmek suretiyle Tablo 18' de birlikte verilmektedir.

Bu tablodan, ağır beton basınç dayanımıyla elastisite modülünün ağır agreganınkinden küçük, çimento hamurunun basınç dayanımından daha yüksek, elastisite modülünden ve ağır betonun poisson oranları ağır agrega ve çimento hamurununkinden daha küçük olduğu görülmektedir. Diğer taraftan aynı tablodan geleneksel beton basınç dayanımı ve elastisite modülünün geleneksel agreganınkinden daha küçük, çimento hamurununkinden ve poisson oranlarının da geleneksel agreganınkinden daha büyük çimento hamurununkinden ise daha küçük olduğu izlenmektedir.

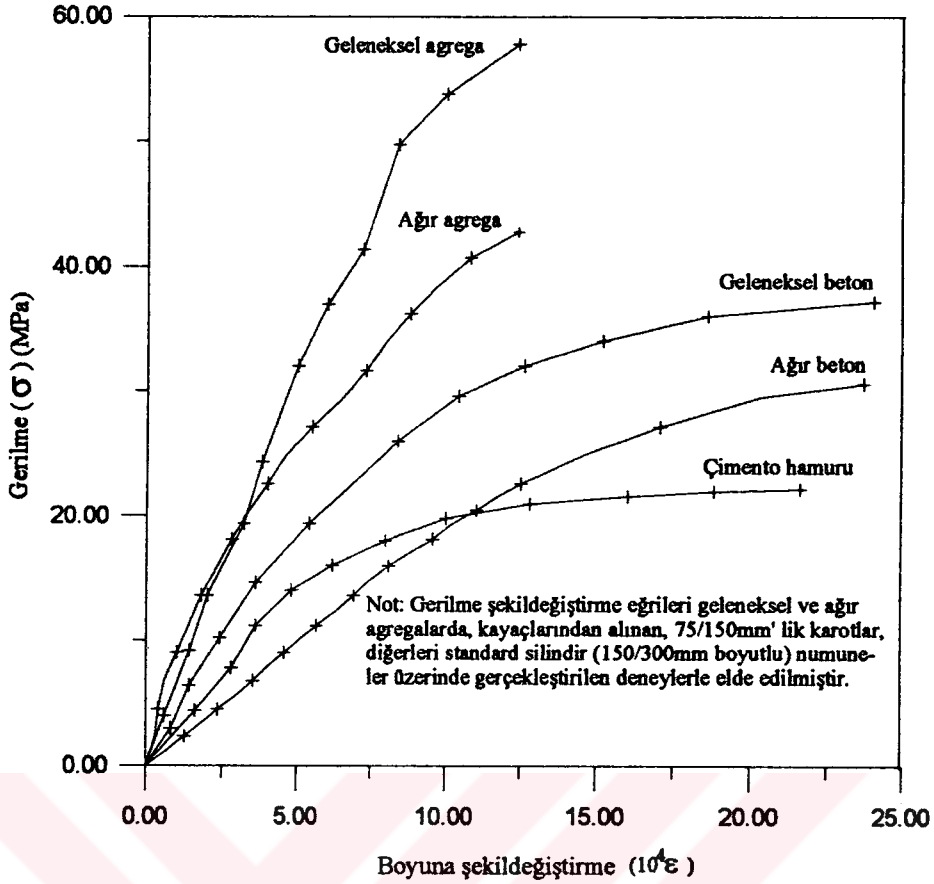
Ağır betonların 10 MPa' karşılık gelen birim şekildeğiştirmeleri, ağır agrega ve çimento hamurununkilerden, geleneksel betonlarınınki de geleneksel agreganınkinden büyük ancak çimento hamurununkinden daha küçük olmaktadır.

Bu çalışmaya konu olan agregaların üretildiği kayaçların, kütlece su/çimento oranı 0.50 olan betonların ve çimento hamurunun gerilme-şekildeğiştirme diyagramları Şekil 32' de verilmektedir. Bu şekilden geleneksel betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin ağır betonunki ile ağır agregaların üretildiği kayacınki arasında kaldığı, ağır betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin ise başlangıçta çimento hamurununkinin altında iken belirli bir değerinden sonra üzerine çıktığı görülmektedir.

Tablo 18. Agrega üretiminde kullanılan kayaçların, betonların ve sertleşmiş çimento hamurlarının bazı özelikleri.

Agregalar ve Betonlar	W/C	Ort. Bas. Dayanımı (MPa)	Karak. Bas. Day. (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson oranı	γ= c/(c+e)	σ=10(MPa) için $10^6\varepsilon$
Ağır agrega	–	35.71	28.98	113175	0.33	–	125
Geleneksel agrega	–	73.4	69.3	60000	0.17	–	177
Ağır Beton	0.50	34.2	32.6	18860	0.15	0.398	530
	0.55	28.9	27.7	17810	0.13	0.375	570
	0.60	17.5	15.8	11315	0.11	0.355	1070
Geleneksel Beton	0.50	37	35.6	37000	0.23	0.398	275
	0.55	30	28.2	32500	0.22	0.375	315
	0.60	26	24.7	28000	0.20	0.355	450
Çimento Hamuru	0.50	23	22	25600	0.33	0.398	375
	0.55	22	21.6	17750	0.26	0.375	765
	0.60	17	16.5	11600	0.22	0.355	940

Tüm bunlar betonun mekanik özeliklerinin dolayısıyla da kırılma mekanizmalarının agrega petrografik yapısından bağımsız olmadığını çok açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Zira betonun basınç ve çekmede kırılma mekanizmalarının incelenmesi gerçekten de iki şekil kırılmanın varlığını göstermektedir. Birinci şekil kırılmada, önce agregaların yada agregalarla çimento hamuru arasındaki aderansın sökülmesi betonun kırılmasına neden *olmamaktadır*. Bu durumda çekmede numunenin dayanımını sadece çimento hamuru sağlamaktadır. İşte sadece bu özel durumda agrega petrografik yapısı betonun kırılması üzerinde hiç bir rol oynamamaktadır. Basınçta ise, agregalar betonun dayanımı üzerinde elastisite modülleriyle etkili *olmaktadır*. Bu da beton basınç dayanımının dolayısıyla da kırılma mekanizmasının daima agrega petrografik yapısına bağlı olduğunu göstermektedir. İkinci şekil kırılmada, önce agregaların yada betonların çimento hamuruyla aderanslarının sökülmesi numunelerin kırılmasına neden *olmaktadır*. Bu durumda agrega petrografik yapısı basınçta olduğu gibi çekmede de beton dayanımı üzerinde başlıca etken olmaktadır.



Şekil 32: Agrega üretiminde kullanılan kayaçların, betonların ve çimento hamurunun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı (WC=0.50).

Ağır ve geleneksel betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar, bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonların kırılmalarının daha çok agrega dayanım yetersizliğinden ileri geldiğini düşündürmektedir. Gerçekten de Tablo 16, Tablo 17, Tablo 18' deki değerler, Şekil 32 ve Şekil 33' deki görünümler bu düşüncenin doğruluğunu teyit etmektedir. Burada, geleneksel beton üretiminde kullanılan agregaların kalker, ağır beton üretiminde kullanılan agregaların barit oluşu, bu iki tür agrega aderanslarının diğer agregalarınkinden yüksek olduğunu, dolayısıyla da bu sonuçları tüm betonlara genelleştirmenin doğru olmayabileceğini belirtmek uygun olmaktadır.

Özetle, gerçekleştirilen deneyler agrega petrografik yapısının ağır ve geleneksel betonların basınç ve çekmedeki kırılma mekanizmaları dolayısıyla da dayanımları üzerinde rol oynadığını ve daha önce bu konuda elde edilen teorik bağıntıların da oldukça gerçekçi olduğunu göstermektedir. Ancak, yukarıda da belirtildiği gibi bu sonucun bu çalışmaya konu olan özel petrografik yapıya sahip geleneksel (kalker) ve ağır (barit) agregalarla üretilen beton numuneler ve deney koşullarına ait olduğu açıktır. Bu nedenle, bu sonuçları tüm geleneksel ve ağır betonlara genelleme yapmadan önce, farklı geleneksel ve ağır agregalarla üretilen betonlar üzerinde çok sayıda deneysel çalışma gerçekleştirmenin de yararı bulunmaktadır.

a) Ağır betonun kırılması

b) Geleneksel betonun kırılması

Şekil 33: Ağır ve geleneksel betonların kırılmaları.

2.8. Kirişlerin Eğilmedeki Davranışlarının Belirlenmesi İçin Gerçekleştirilen Deneyler

2.8.1. Deney Kirişlerinini Özelikleri, Üretimleri ve Saklanmaları

Deney kirişlerinin üretiminde kullanılan agregaların fiziksel, mekanik ve petrografik özelikleri, agregaların granülometrik bileşimleri, çimento özelikleri, karma suyu özelikleri, betonun bileşimi ve üretimi daha önce Madde 2' de standard silindir numunelerin üretiminde belirtildiği gibidir.

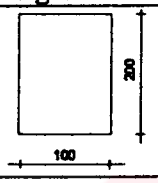
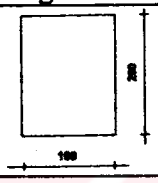
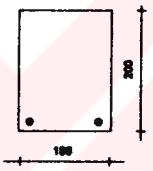
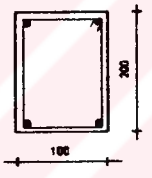
Deneyler, ağır ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemek amacıyla K.T.Ü. Yapı ve Malzeme Laboratuvarı' nda mevcut alet ve gereçlerden yararlanabilmek için, boyutları 100mmx200mmx2100mm olan kiriş çiftleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Betonarme olan kirişlerin asal çekme donatılar ve donatı oranları Tablo 19' da enkesit detayı Tablo 20' de tipik donatı planı ise Şekil 34' de verilmektedir.

Tablo 19: Ağır ve geleneksel beton ve betonarme kiriş çiftlerinin donatı miktar ve oranları.

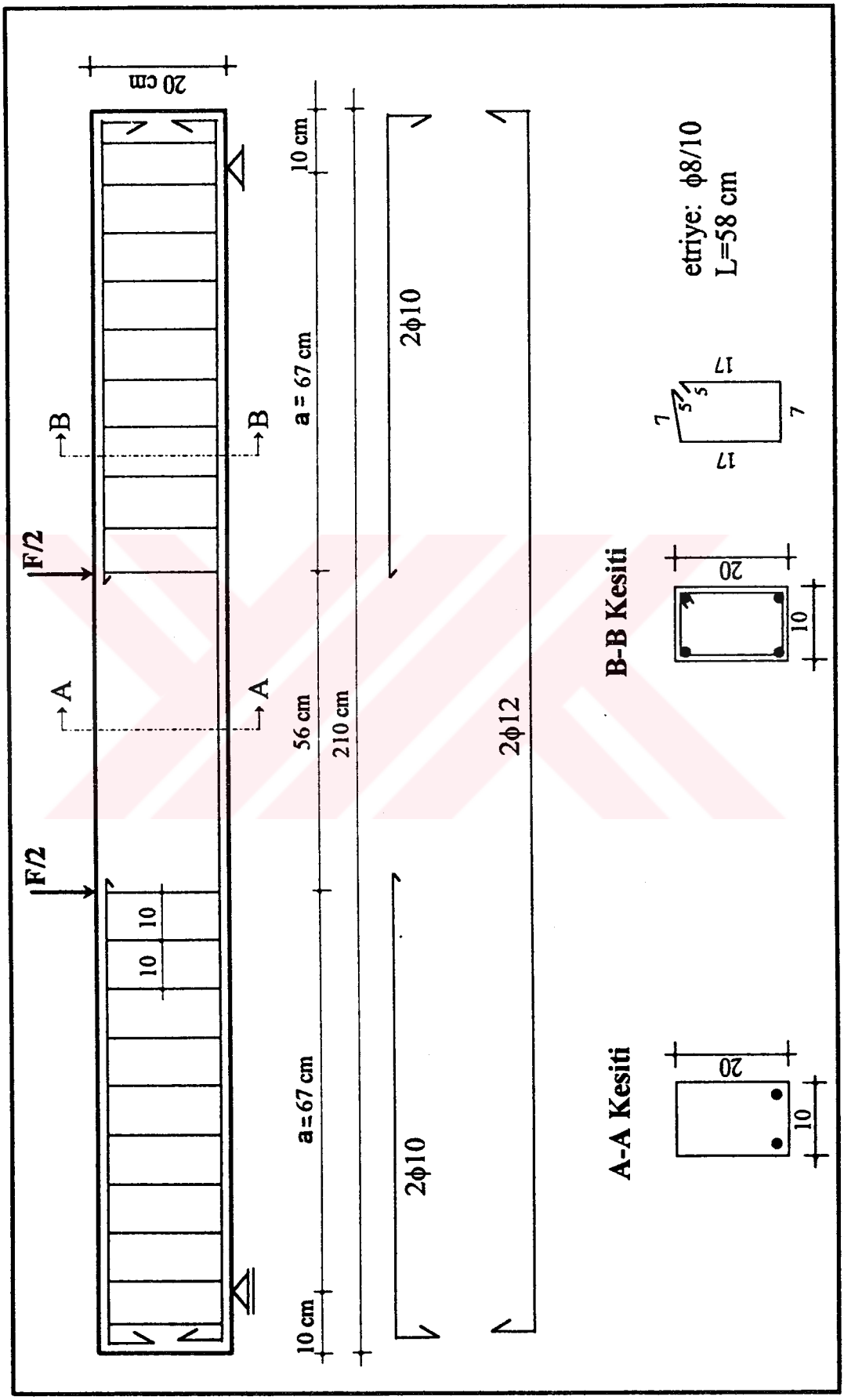
Ağır Kiriş	Geleneksel Kiriş	Asal Çekme Donatısı	Donatı Oranı (ρ)
AK-1	GK-1	Donatısız	Yok
AK-2	GK-2	2ϕ12	0.0113

Tablo 20: Deney kirişi çiftlerinin enkesit detayı.

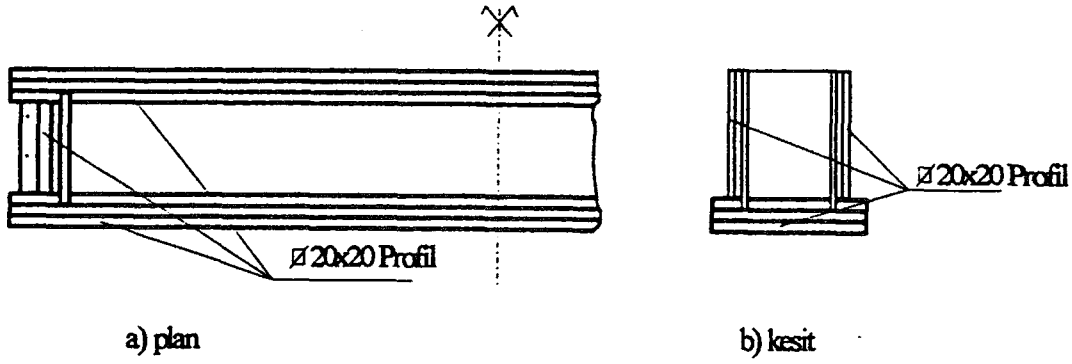
Kiriş türü	Sabit Moment Bölgesi Kesiti	Değişken Moment Bölgesi Kesiti	Asal Çekme Donatısı ve Etriye
AK-1 GK-1			Donatısız
AK-2 GK-2			2ϕ12 (ϕ8/10)

Daha önce verilmiş olan Tablo 19' dan da görüldüğü gibi birinci seri deneyler, ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin en çok zorlanan liflerindeki birim şekil değiştirmelerin uygulanan dış yükle değişimlerini, kirişleri oluşturan ağır ve geleneksel betonların birim uzama kapasiteleri ile ilk mikro çatlağı oluşturan eğilme momentinin değerini belirlemek için, donatısız kirişler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin temel amacı, beton kirişlerin eğilmedeki mekanik davranışlarını betonarme kirişlerin mekanik özelikleriyle karşılaştırmak suretiyle; donatının, ağır ve geleneksel betonların birim uzama kapasitelerini dolayısıyla da ilk çatlama momentini değiştirip değiştirmediğini belirlemektir.

Deney kirişlerinin üretiminde kullanılan, iki kalıp, metal profillerle takviye edilen beyopan plakların birbiriyle geçmeli olarak vida ve civatalarla birleştirmek suretiyle gerçekleşmiştir. Sökülüp takılabilir ve geçirimsizliği güvence altına alınmış olan bu kalıpların, geometrik özelikleri de birbirinin aynıdır (Şekil 35).



Şekil 34: Deney kirişlerinin kalıp planı ve tipik donatı şeması.



Şekil 35: Deney kirişlerine ilişkin kalıplarının plan ve kesiti.

Betonarme kirişlerin üretiminde kalıplara ilk aşamada, paspayı için altlarına belirli aralıklarla daha önce hazırlanmış 15mmx15mmx15mm boyutlarında harç takozlar bağlı, donatılar yerleştirilmiştir. Böylece beton dökümene hazır durumdaki kalıplara, su/çimento oranı 0.50 olan ve bileşimleri Madde 2.3.' de hesaplanan ve kirişlerin üretiminde kullanılan beton bileşimleri Tablo 8' de verilmektedir.

Ağır ve geleneksel betonlar kalıplara üç tabaka halinde yerleştirilmiş ve her bir tabaka daldırma tipi vibratörle kalıp uzunluğu boyunca her 300 mm' de bir 20 saniye sıkıştırılmıştır.

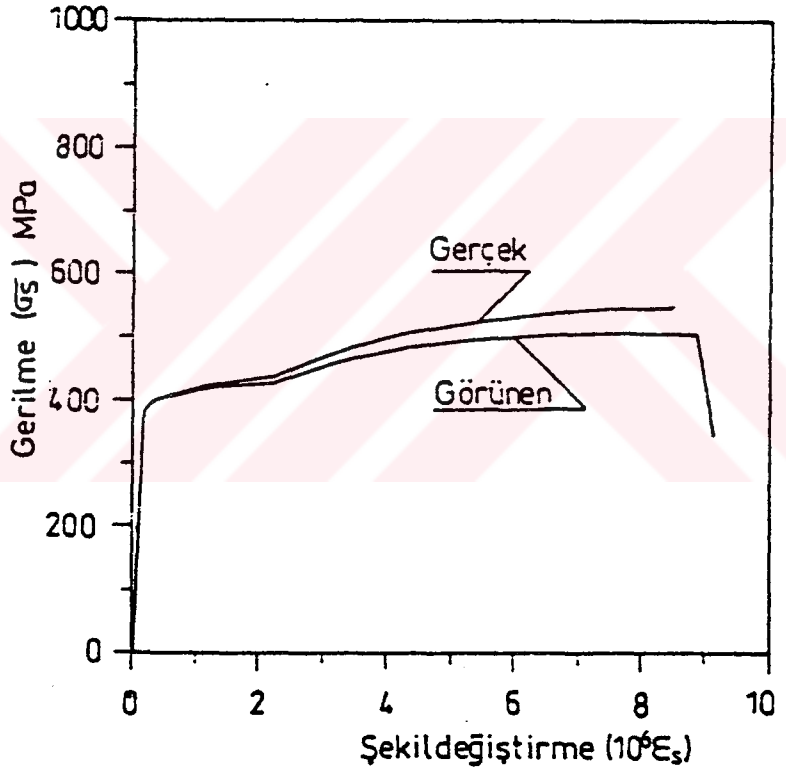
Beton döküldükten sonra kendi kalıplarında laboratuvar ortamında bir gün bekletilen kirişler, bu süre sonunda kalıplarından çıkartılarak 21 gün boyunca ıslak çuval altında saklanmışlardır. Daha sonra, birim şekildeğiştirme ölçerlerinin daha iyi yapışabilmesi için, sıcaklığı 24°c ± 2°c ve bağıl nemi %65 ± %5 olan bir ortama taşınmışlar ve kendi özağırlıkları altında alt ve üst liflerinde çekme gerilmesi oluşmayacak şekilde tüm uzunlukları boyunca düzlem bir yüzey üzerinde 7 gün daha bekletilmiş, üretimlerinden 28 gün sonra deneye tabi tutulmuşlardır.

2.8.2. Ağır ve Geleneksel Betonların Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramları

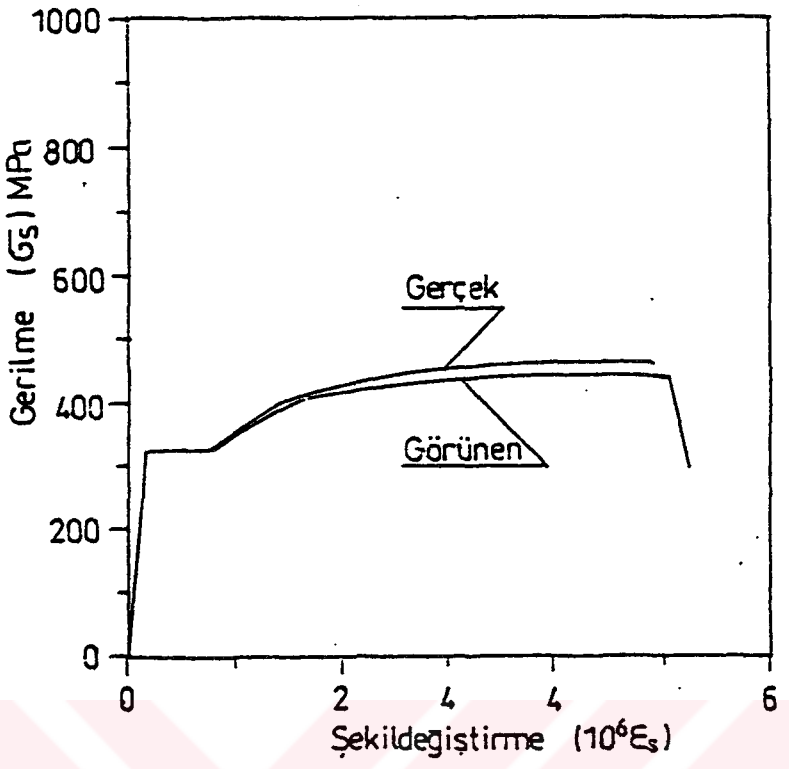
Ağır ve geleneksel betonların standard silindir numuneler üzerinde, merkezi basınç altında elde edilen, gerilme-şekildeğiştirme diyagramları Şekil 15 ve Şekil 17' de mekanik özelikleri ise Madde 2.6.2.' de verilmektedir.

2.8.3. Kirişlerin Üretiminde Kullanılan Donatı Özeliği

Betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan $\phi 8$ ve $\phi 12$'lik düz satıhlı donatılar üzerinde, standartlara [87],[88] uygun olarak merkezi çekme deneyi yapılmıştır.[65] Bu deneyde birim şekildeğiştirme ölçme kapasitesi % 20 olan TML-YL20 tipi birim şekildeğiştirme ölçeri kullanılmıştır. Kirişlerde kullanılan donatıların gerçek ve görünen gerilme-şekildeğiştirme diyagramları Şekil 36 ve Şekil 37' de, gerçek ve görünen bazı mekanik özelikleri ise Tablo 21' de verilmektedir.



Şekil 36: $\phi 8$' lik donatının gerçek ve görünen gerilme-şekildeğiştirme diyagramları.



Şekil 37: ϕ12' lik donatının gerçek ve görünen gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.

Tablo 21: Kiriş üretiminde kullanılan donatıların gerçek ve görünen bazı mekanik özelikleri.

Donatı anma çapı (mm)	Ortalama çekme dayanımı (MPa)		Ortalama akma dayanımı (MPa)		Ortalama kopma dayanımı (MPa)		Ortalama akma uzaması ($10^5\varepsilon_{sy}$)	
	Gör.	Ger.	Gör	Ger.	Gör.	Ger.	Gör.	Ger.
ϕ8	480	516	330	330.6	340	907	184	183.8
ϕ12	440	461	320	320.5	297	860	155	154.9

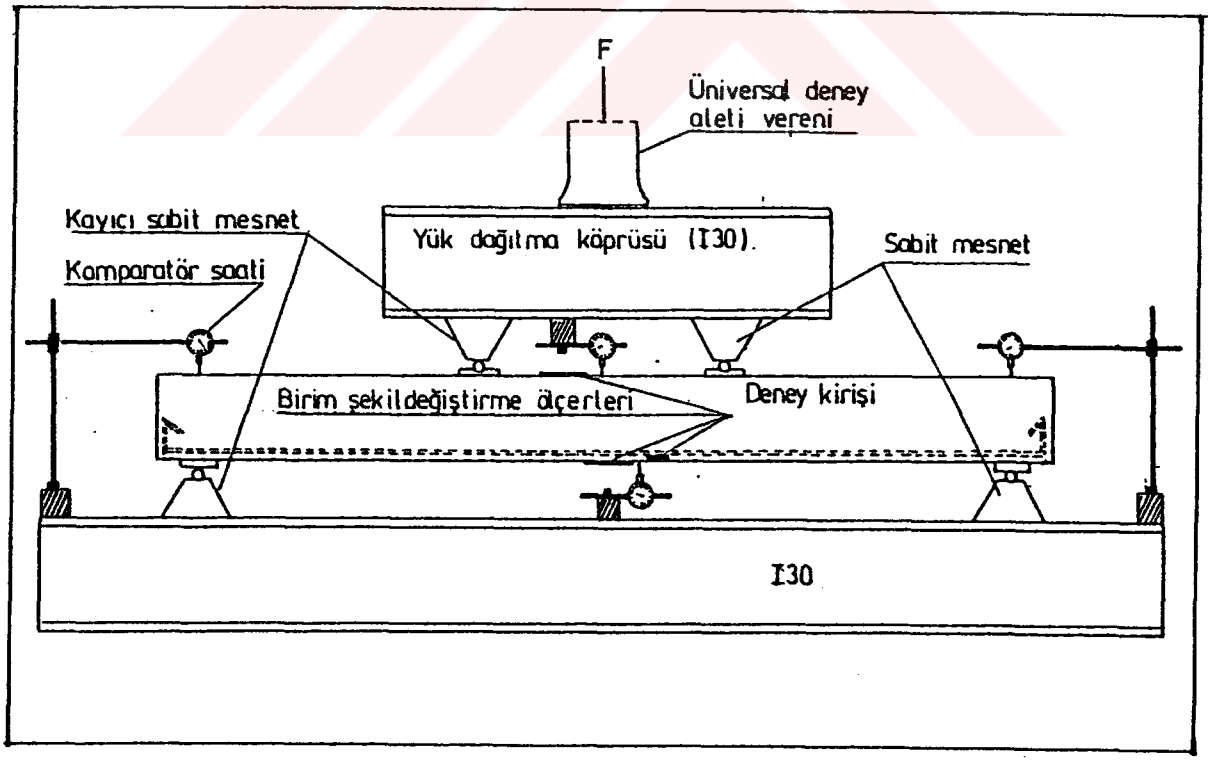
Gerilme-şekildeğiştirme diyagramından görüldüğü gibi, görünen ve gerçek gerilme değerleri akma sınırına kadar çakışmakta ancak bu sınırdan sonra birbirinden ayrılmaktadır. Bu diyagramlar ve Tablo 21' den donatı çapının ϕ8 mm ve ϕ12 mm olması halinde gerçek çekme dayanımlarının görünen çekme dayanımlarından sırasıyla %8 ve %5 daha büyük olduğu, gerçek şekildeğiştirmelerin ise akma sınırına kadar pratik olarak görünen

şekildeğiştirmelere eşit, bu sınırdan sonra görünenlerden %3 daha küçük olduğu görülmektedir.

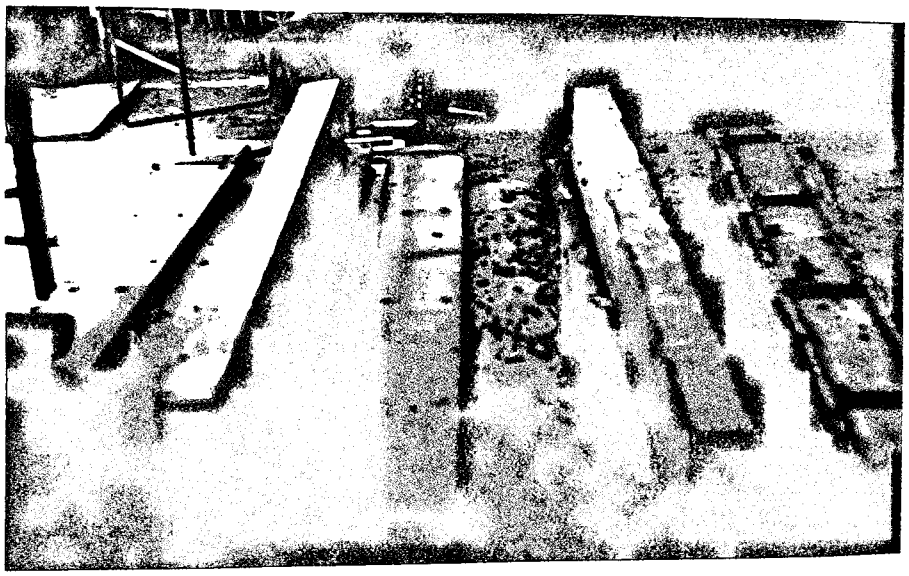
2.8.4. Deney Düzeneği, Kirişlerin Yüklenmesi ve Ölçme Aletleri

Kirişlerin yüklenmesinde kullanılan eğilme deney düzeneğinin ilke şeması Şekil 38' de verilmektedir. Tasarlanarak, hidrolik yükleme yapabilen HI-TECH MAGNUS marka yükleme çerçevesine uyarlanan bu düzenek; etkisini bir çelik yük dağıtma köprüsü (palonye) aracılığıyla, kirişe uygulanan bu yükleme çerçevesine ait 200 kN' luk verenle donatılmıştır. Kiriş ve yük dağıtma köprüsünün birer mesnetleri boyuna doğrultuda yatay yerdeğiştirmeye elverişli olduğundan yük dağıtım köprüsü mesnetleri arasında kalan kiriş orta bölgesindeki eğilme salt basit eğilme olmaktadır.

Eğilme deneyinde yükleme, donatısız kirişlerde her 1 kN' da donatılı kirişlerde ise her 2 kN' da bir ölçü alınmak suretiyle göçme yüküne kadar hiç boşaltma yapılmadan sabit bir yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyine tabi tutulan kirişler Şekil 39' da verilmektedir.



Şekil 38: Deney kirişlerinin yükleme düzeneği ve ölçme aletleri



Şekil 39: Eğilme deneyine tabi tutulan kirişler.

Deneylerde ölçme aleti olarak birim şekildeğiştirme ölçerleri ve komparatör saatleri kullanılmıştır (bkz. Şekil 38). Birim şekildeğiştirme ölçerleri, kirişin çekme bölgesinde beton ve donatı üzerine, basınç bölgesinde ise sadece beton üzerine boyuna doğrultuda yapıştırılmıştır (bkz. Şekil 40).

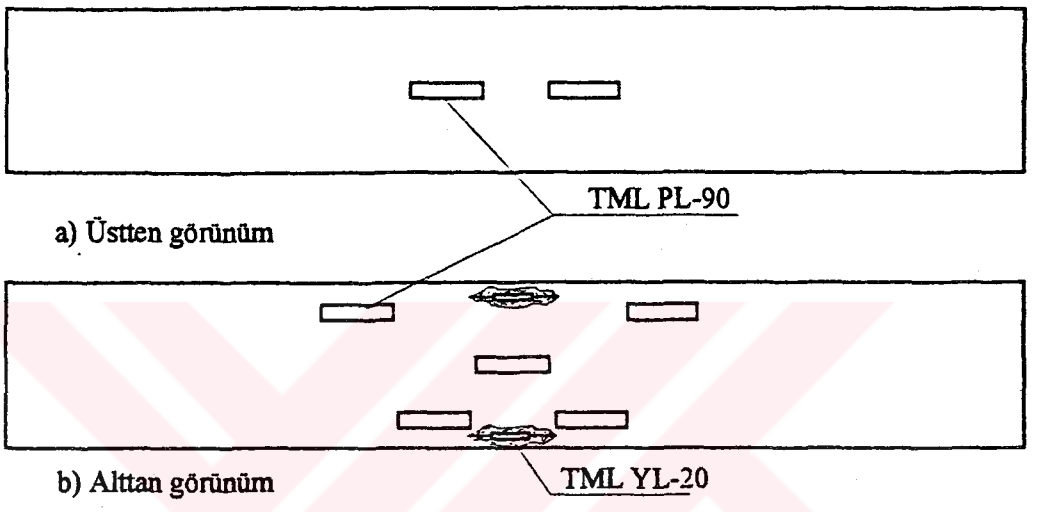
Her bir deneyde yükleme süresince en çok zorlanan liflerde beton ve donatıdaki birim boy değişimlerinin, sehimlerin, yükün dolayısıyla da eğilme momentinin çatlama ve göçme anındaki değerleri ölçülmektedir. Zira, ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin davranışlarının incelenmesi ve bu davranışların karşılaştırması sadece göçme ve çatlama yükleriyle değil, bütün yükleme boyunca şekildeğiştirme durumlarının karşılaştırılması suretiyle yapılmaktadır.

Beton süreksiz ve heterojen bir malzeme olduğundan, kiriş yüzlerine yapıştırılan birim şekildeğiştirme ölçerleriyle belirlenen birim boy değişimlerinin anlamlı olabilmesi için, aktif boylarının yapıştırılacakları beton bileşimindeki en iri agrega tane boyutundan yeterince büyük, farklı ölçme alma noktaları arasındaki birim şekildeğiştirmelerin ölçülmesi için de sözkonusu boyların yeterince küçük olması gerekmektedir. Betonda bu iki koşulu sağlamak için aktif boyları 90 mm olan TML-PL90 tipi, donatılarda ise aktif boyları 20 mm olan TML-YL20 tipi birim şekildeğiştirme ölçerleri kullanılmıştır. Bu konuda daha ayrıntılı bilgi Ek-2' de [89] verilmektedir.

Birim şekildeğiştirme ölçerleri, betonla temas yüzeylerindeki düzensizliklerin giderilmesi için yapıştırılacak yüzeyin zımpara kağıdıyla düzgün hale getirilmesinden sonra,

çabuk kuruyan TML-CN tipi bir yapıştırıcıyla betona yapıştırılmıştır. Birim şekildeğiştirmeler Wheatstone köprüsüne bağlı Kyowa marka 12 kanallı alet üzerinden doğrudan okunmuştur.

Karşılaştırmaların sağlıklı olarak gerçekleştirilebilmesi yönünden ağır ve geleneksel betonarme kirişler üzerine yapıştırılan birim şekildeğiştirme ölçerlerinin konumu ve sayılarının birbirine eşdeğer olması sağlanmıştır. İlk mikro çatlağı oluşturan maximum birim uzama değerini belirleyebilmek amacıyla, alt yüze üst yüzden daha fazla birim şekildeğiştirme ölçeri yapıştırılmıştır (Şekil 40).



Şekil 40: Birim şekildeğiştirme ölçerlerinin deney kirişi üzerindeki konumu.

2.8.5. Kirişlerin Çatlama Durumlarının İncelenmesi

Çatlama olayı, çatlama mekanizması ve çatlak çeşitlerine ilişkin temel bazı bilgiler [90]' nolu kaynakta verilmiştir. Bu başlık altında deney kirişlerinin göçme anında sabit moment bölgelerinde oluşan çatlak sayıları, çatlak mesafeleri, çatlak genişlikleri, çatlak durumları, deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri verilmektedir.

2.8.5.1. Teorik Hatırlatmalar

2.8.5.1.1. Betonarmede Çatlama

Bilindiği gibi betonarme yapılarda betonun çekme dayanımının düşük olması nedeniyle çatlama olayı genellikle kaçınılmaz olmakta ve bu husus betonarme hesaplarda dikkate alınmaktadır.

Uluslararası yayınlarda [91] önerilen çatlama sınır durumundaki hesap bağıntıları Ferry Borges[92],[93]' nin araştırmalarına dayanmaktadır. Bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin çatlamalarının incelenmesi de sözkonusu araştırma sonuçları yardımıyla yapılmaktadır.

2.8.5.1.2. Çatlak Genişliğinin Teorik Hesabı

Çatlağın teorik donatı ağırlık merkezi düzeyindeki teorik genişliği (W); Δl çatlaklar arasındaki ortalama mesafeyi, ε_s ve ε_{ct} ise sırasıyla donatı ve betondaki birim uzamaları göstermek üzere,

$$W = \Delta l\,(\varepsilon_s - \varepsilon_{ct}) \tag{67}$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Bu bağıntı ε_s' ye göre çok küçük olan ε_{ct}' nin ihmal edilmesi durumunda,

$$W = \Delta l.\varepsilon_s \tag{68}$$

şeklinde yazılabilmektedir.

a) Çatlaklar arasındaki mesafenin belirlenmesi

Çatlaklar arasındaki mesafe (Δl); beton örtü kalınlığı (c) ve donatı çubuğu çapının donatı oranına bölümü (ϕ/ρ_r) gibi iki parametrenin doğrusal bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir[71]. (Şekil 41). Burada çatlağı ilgilendiren donatı oranı, A_s ve A_{ct} sırasıyla asal çekme donatısı ve çatlağı ilgilendiren beton alanını göstermek üzere, $\rho_r = A_s/A_{ct}$ şeklinde hesaplanabilmektedir. Gerçekten betonla donatı arasındaki aderans mükemmelse, AC kesiti donatıdaki F_s çekme kuvvetinin etkisi altında düzlem kalmamaktadır. Böyle olunca da betonda AB boyunca oluşan ε_{ct} birim uzaması donatının ε_s birim uzamasından küçük kalmaktadır. Ancak, c' nin fonksiyonu olan x kadar uzakta $\varepsilon_{ct} = \varepsilon_s$ olabilmektedir. Bu da

yeni bir çatlağı, ancak bu x mesafesindeki kesitten sonra oluşabileceğini göstermektedir. Bu durumda çatlaklar arasındaki mesafe;

$$\Delta l = f(k_1 c) \tag{69}$$

olmaktadır. Diğer taraftan donatının birim boyundan betona intikal eden aderans kuvveti $\pi\phi\tau_{bd}$' dir. Bu aderans kuvveti donatıyı saran ve çekme dayanımı f_{ct} olan A_{ct} beton alanıyla karşılanmaktadır. Bu durumda çatlama tehlikesinin aderans kuvveti ile ise ($\pi\phi\tau_{bd}$) doğru, A_{ct} f_{ct} ile ters orantılı olması gerekmektedir. Bu koşul

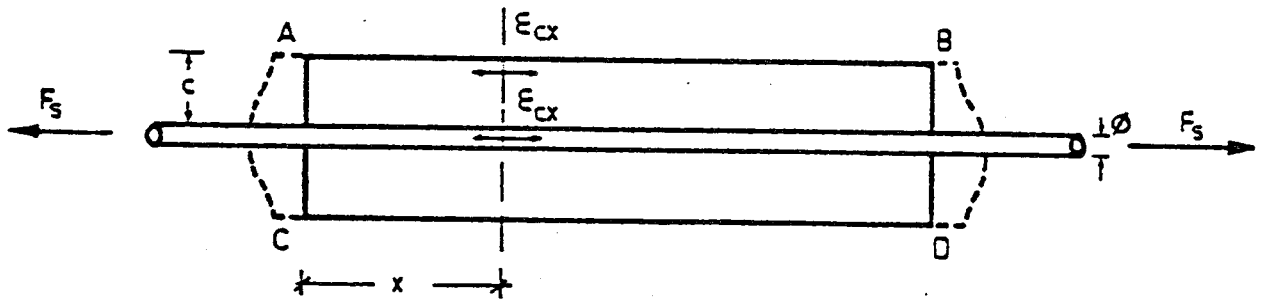
$$k''(A_{ct}/\pi\phi)\, f_{ct}/\tau_{bd} = k_2'(\pi\phi^2/4\pi\phi\rho_r) = k_2\phi/\rho_r \tag{70}$$

bağıntısıyla ifade edilebilmektedir. Buradaki k_2, f_{ct}/τ_{bd}' ye bağlı bir katsayıdır.

Betonların çekme dayanımları pratik olarak aderansları gibi değerlendirildiğinden belirli bir nitelikteki donatı için, k_2 yalnız donatı aderansının kalitesine bağlı olmaktadır. Bu durumda çatlaklar arasındaki mesafe,

$$\Delta l = k_1 c + k_2 \phi/\rho_r \tag{71}$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.



Şekil 41: Beton-donatı aderansı [77].

b) Donatı birim uzamasının (ε_s) belirlenmesi

Donatı birim uzaması, çatlamış iki kesit arasındaki donatıda oluşan gerilme ile orantılı olup, donatı çubuğunu saran beton tarafından alınan gerilmeyi hesaba katmak koşuluyla, çatlamış kesitteki σ_s gerilmesine, k_3 beton-donatı aderansına bağlı bir katsayıyı göstermek üzere,

$$\varepsilon_s = (\sigma_s - k_3 / \rho_r)\ 1/E_s \qquad (72)$$

şeklinde bağlanmaktadır.

c) Genel bağıntı

Bu durumda donatı ağırlık merkezi düzeyinde ortalama çatlak genişliğini veren bağıntı;

$$W_m = (k_1\, c + k_2\, \phi/\rho_r)\ (\sigma_s - k_3 / \rho_r)\ 1/E_s \qquad (73)$$

şeklinde yazılabilmektedir [71].

2.8.5.1.3. Çatlak Genişlikleri İçin Standardlardaki Öneriler

Bazı kaynaklar çatlamayı yaygın ve yerel çatlama diye iki sınıfa ayırmaktadır.[54], [94] Diğer taraftan yaygın çatlamada da donatı çubuklarının, çeşitli tipte, farklı çapta yada aynı tip ve aynı çapta olmalarına göre, maximum çatlak genişliklerinin hesabına ait aynı bağıntıları önermekte, yerel çatlama için ise farklı bir bağıntı vermektedir. Burada CEB' nin yaygın çatlamanın ancak yüksek aderanslı donatı kullanılması halinde oluşabileceğini vurguladığını belirtmek gerekmektedir.

Betonarme yapıların hesap ve yapım kurallarında [54], donatı ağırlık merkezi düzeyindeki ortalama çatlak genişliğinin (W_m), daha gerçekçi olanların bulunmaması durumunda, σ_s=9.5 $\sqrt{f_{ck}}$, MPa, çatlama anında donatıdaki gerilmeyi göstermek üzere;

Donatının düz yüzeyli olması durumunda;

$$W_m = 1.2\ (2\, c + 0.12\, \phi/\rho_r)\ \sigma_s/E_s \qquad (74)$$

bağıntısıyla, karakteristik çatlak genişliğinin ise;

$$W_k = 1.7\, W_m \qquad (75)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceğini ve bu bağıntılarla hesaplanan çatlak genişliklerinin izin verilen çatlak genişliklerini geçmemesi gerektiği belirtilmektedir. Burada bu bağıntıdaki sembollerin (73) bağıntısındakilerle aynı anlamı taşıdıklarını belirtmek uygun olmaktadır.

Daha önce de belirtilmiş olduğu gibi, bu çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesinde genellikle CEB' ce de benimsenmiş olan Ferry Borges' in teorisinden yararlanılmaktadır [91]. Bilindiği gibi, betonarmede çatlama konusunda çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir.[71],[95],[96]. Bu çalışmaların doğal sonucu olarak çatlak genişlikleri üzerine çok sayıda deneysel ya da teorik bağıntılar elde edilmiştir. Sonuç olarak yararlanılan çeşitli teorilerin temel ilkelerinde hiç bir çelişki bulunmamaktadır. Zira bu teorilerin tümünde dikkate alınan etkenler aynı olup, sadece katsayılar ve bazen de parametrelerin etkime dereceleri değişmekte ve bağıntıların tümündeki esas değişken çatlamış kesitdeki donatı gerilmesi σ_s olmaktadır.

Yukarıda verilen çatlaklara ilişkin bağıntılar, aderansın değişim kuralını dikkate almamış olmakla beraber, donatı oranı azaldıkça çatlaklar arasındaki mesafe ve çatlak genişliklerinin arttığını ve donatı oranı sabit kalmak koşuluyla, donatı çapı küçüldükçe, çatlak genişlikleri üzerindeki donatı etkisinin arttığını belirtmeye imkan tanımaktadır.

2.8.5.2. Betonların Kiriş Çatlama Durumlarına Etkisi

Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin göçme anında sabit moment bölgelerinde belirlenen çatlak sayıları, minumum, ortalama ve maximum çatlak mesafeleri ve çatlak genişlikleri Tablo 22' de çatlama durumları ise Şekil 42' de verilmektedir.

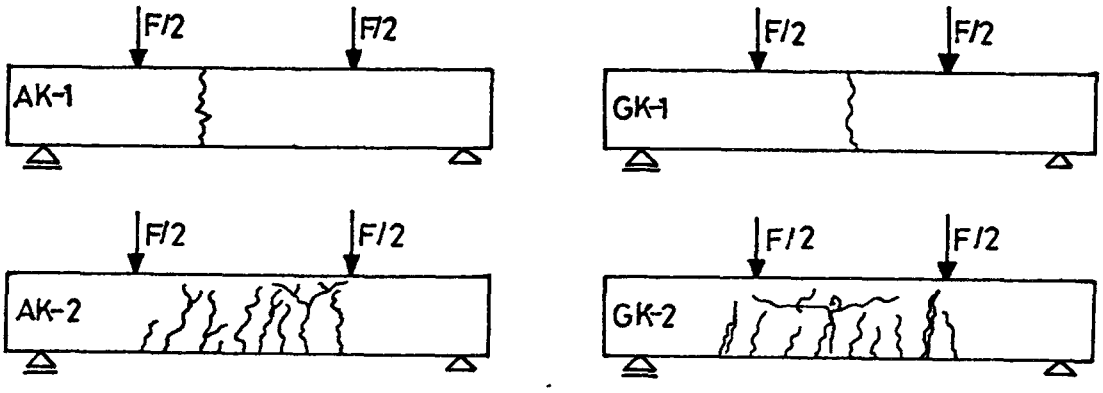
Bu tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi ağır betonarme kirişin sabit moment bölgesindeki kırılma yükü altında ortalama çatlak mesafeleri geleneksel betonarme kirişinkinden ortalama olarak %23 daha küçük çatlak sayısı ise %43 daha fazladır. Ağır betonarme kirişlerde, ortalama çatlak mesafesinin geleneksel betonarme kirişinkine göre küçük olmasına paralel olarak, çatlak genişlikleri de çoğunlukla daha küçük olmaktadır.

Tablo 22: Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerde göçme yükü altında, sabit moment bölgesinde, oluşan çatlak mesafeleri, sayıları ve genişlikleri.

Çatlak mesafe sayı ve genişlikleri	Ağır Betonarme Kiriş	Geleneksel Betonarme Kiriş
Minumum çatlak mesafesi (mm)	31	40
Ortalama çatlak mesafesi (mm)	74	96
Maksimum çatlak mesafesi (mm)	119	155
Çatlak sayısı	10	7
Çatlak genişliği (W_m) (mm)	0.0346	0.121

Tablo 23: Ağır ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin deneysel ve teorik ilk çatlama momentleriyle, ilk çatlamayı oluşturan maksimum birim uzamalar.

	Ağır Beton ve Betonarme Kiriş		Geleneksel Beton ve Betonarme Kiriş	
İlk çatlama momentleri ve ilk çatlamayı oluşturan max.birim uzamalar	AK-1	AK-2	GK-1	GK-2
Deneysel ilk çatlama momentleri (kN.m)	2.41	2.68	1.83	2.55
Teorik ilk çatlama momentleri (kN.m)	2.72	3.05	1.77	2.31
İlk çatlamayı oluşturan maks. birim uzamalar ($10^6\varepsilon_{ct}$)	50	50	85	85



Şekil 42: Ağır ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin kırılma yükleri altında şematik çatlama durumları.

2.8.5.3. İlk Çatlamayı Oluşturan Momentin Belirlenmesi

Deneysel ilk çatlama momentleri, kiriş alt yüzlerinde beton ve donatıya yapıştırılan birim şekildeğiştirme ölçerleri yardımıyla belirlenen maximum birim uzamalara bağlı olarak hesaplanmıştır. Zira betonda ilk mikro çatlak oluşur oluşmaz yük- şekildeğiştirme eğrileri ani olarak eğim değiştirmektedir (bkz. Şekil 48).

Kirişlerin deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri ve çatlamayı oluşturan maksimum birim uzamalar Tablo 23' de verilmektedir. Bu tablodan' da görüldüğü gibi geleneksel betonarme kirişlerin deneysel ilk çatlama momentlerinin, ağır betonarme kirişinkinden ortalama %18 daha küçük olmaktadır.

Burada, teorik ilk çatlama momentinin hesabında, deneylerde kullanılan betonların laboratuvarda belirlenen elastisite modüllerinin kullanılmasıyla bulunan modüler oranlarının, ağır betonarme kirişlerde 10.64, geleneksellerde ise 5 olarak alındığını, kesit itibari eylemsizlik momentinin,

$$I = (b_w h^3/12) + n A_s (d - h/2)^2 \qquad (76)$$

bağıntısıyla hesaplandığını, betonun çekmede plastikleşmediğini ve çekme- basınç bölgelerindeki betonun Hooke yasasına uyduğu kabullerinin yapıldığını ve eğilmede çekme

dayanımının (f_{ctf}) ağır betonda 2.58 MPa, geleneksel betonda ise 2.65 MPa olarak kullanıldığını belirtmek uygun olmaktadır.

2.8.6. Kiriş Göçmelerinin İncelenmesi

2.8.6.1. Teorik Göçme ve Kullanım Momentleri

Deney sonuçları incelenmeden önce, karşılaştırmak amacıyla, her bir kirişin teorik göçme momenti ve kullanım momenti hesaplanmaktadır. Teorik göçme momenti beton ve donatıların gerçek mekanik özelikleri dikkate alınarak, kullanım momenti ise TS 500 [54]' e göre hesaplanan pratik göçme momentinden elde edilmektedir.

2.8.6.1.1. Teorik Göçme Momentinin Hesabı

2.8.6.1.1.1. Hesap Kabulleri

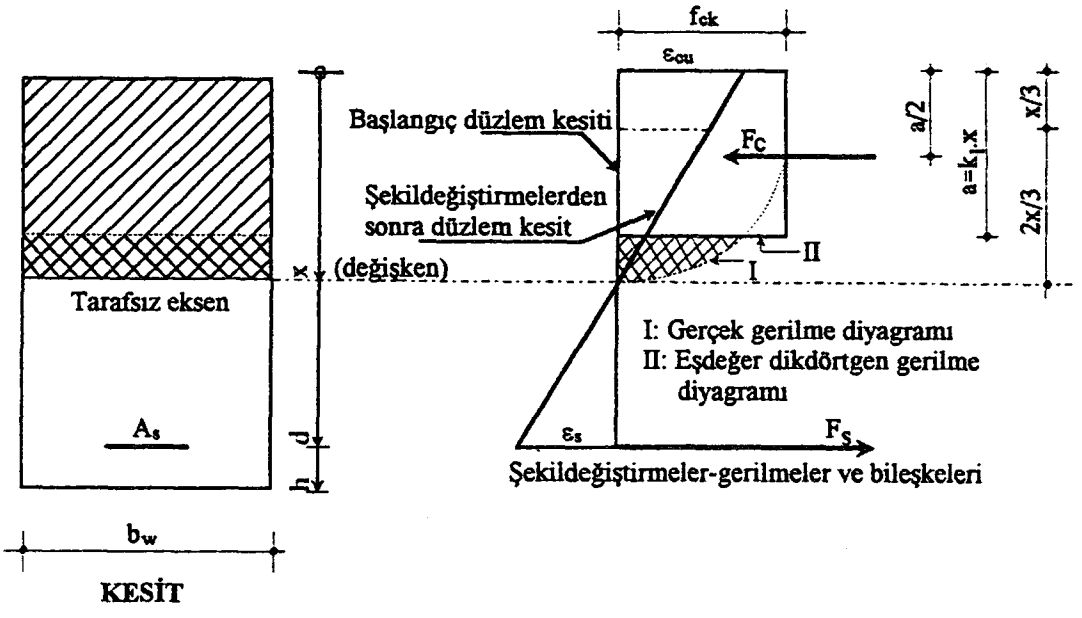
Göçme bir çatlak doğrultusunda meydana geldiğinden, sadece böyle bir kesite ilişkin kabullerle ilgilenilerek, teorik göçme momentinin hesabı için aşağıdaki basitleştirici kabuller yapılmaktadır.

1) Çatlaklara komşu kesitler, göçme anına kadar düzlem kalmaktadırlar. Dolayısıyla şekildeğiştirmeler de tarafsız eksene olan uzaklıkla orantılı olmakta ve donatı kendini saran betonla aynı şekildeğiştirmeyi yapmaktadır. Donatı- beton arasında aderansın olmaması halinde bu kabulün gerçekçi olmayacağı açıktır.

2) Göçme, betonun en üst lifindeki kısalma, ε_{cu} sınır değerine ulaştığında meydana gelmektedir.

3) Çekme bölgesindeki betonun kesit dayanımına etkisi yoktur.Dolayısıyla da kesit tarafsız eksen düzeyine kadar çatlamıştır.

4) Göçme anında betondaki basınç gerilmesi diyagramı, f_{ck} standard silindir karakteristik basınç dayanımını, b_w dikdötrgen kesitli kirişin genişliğini ve x tarafsız eksen derinliğini göstermek üzere, basınç bileşkesi $F_c = 0.85.f_{ck}.b_w.x$ olan diyagramdır (Şekil 43).



Şekil 43: Basit eğilme etkisindeki bir kesitte şekildeğiştirmeler, gerilmeler ve bileşkeleri [65].

2.8.6.1.1.2. Hesap İlkesi

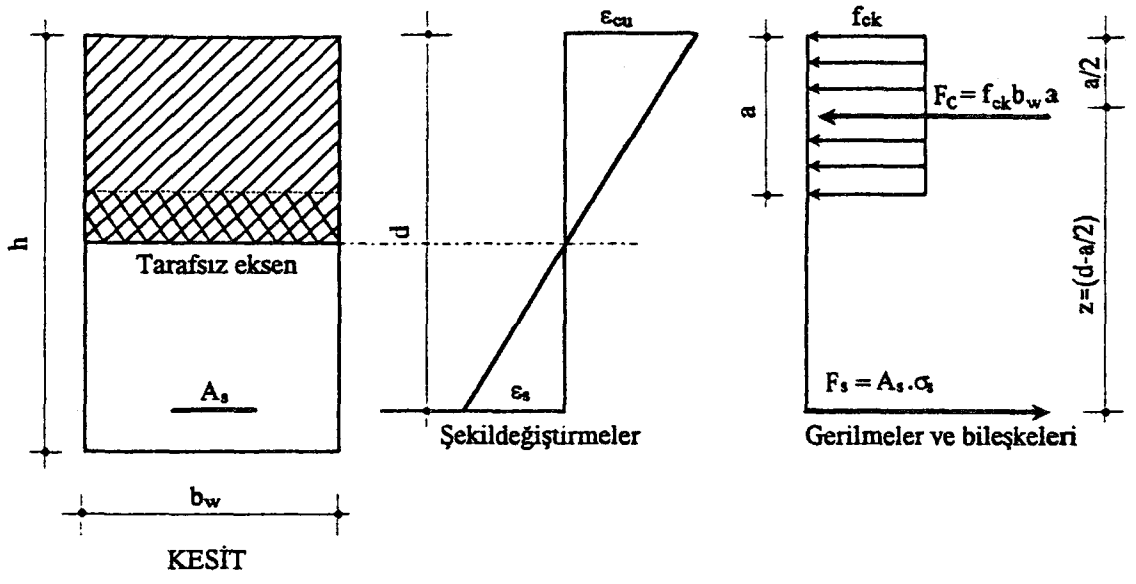
Göçme momentinin hesabı ilk aşamada kesitin göçme anındaki şekildeğiştirme diyagramının belirlenmesini gerektirmektedir. Zira bu diyagram belli olunca;

a) Basınç gerilmelerinin bileşkesi ve bunun tatbik noktası,

b) Donatılardaki uzamalar, uzamalara karşılık gelen donatı gerilmeleri ve bu gerilmelerin bileşkeleri kolayca hesaplanabilmektedir.

1) Şekildeğiştirme diyagramının belirlenmesi

Basit eğilme etkisindeki kirişlerde göçme kesitindeki şekildeğiştirme diyagramı Şekil 44' de verilmektedir.



Şekil 44: Betonarme bir kesitin şematik şekildeğiştirme diyagramı ve göçme anında kesitte oluşan iç kuvvetler [65].

2) Gerilme diyagramının belirlenmesi

Donatıdaki gerilmeler, gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarından şekildeğiştirmelere karşılık olarak elde edilmektedir (bkz. Şekil 36 ve Şekil 37). Betondaki gerilmeler ise Şekil 44' de gösterildiği gibidir.

3) Kesitin denge denklemlerinin belirlenmesi

Betonarme bir kesitin taşıma gücüne göre hesabında kullanılan bilinen uygunluk ve denge denklemleri aşağıda verilmektedir.

a) Uygunluk denklemi

$$\varepsilon_{cu} / \varepsilon_s = x / (d - x) \qquad (77)$$

b) Kuvvet denge denklemi

k_1, $f_{ck} < 25$ MPa için 0.85, $f_{ck} > 25$ MPa için $k_1 = 0.85\text{-}0.006\ (f_{ck} - 25)$ olmak ve $a = k_1.x$'i, $F_c = f_{ck}.b_w.$ a' yı ve $F_s = A_s.\ \sigma_s$' yi göstermek üzere,

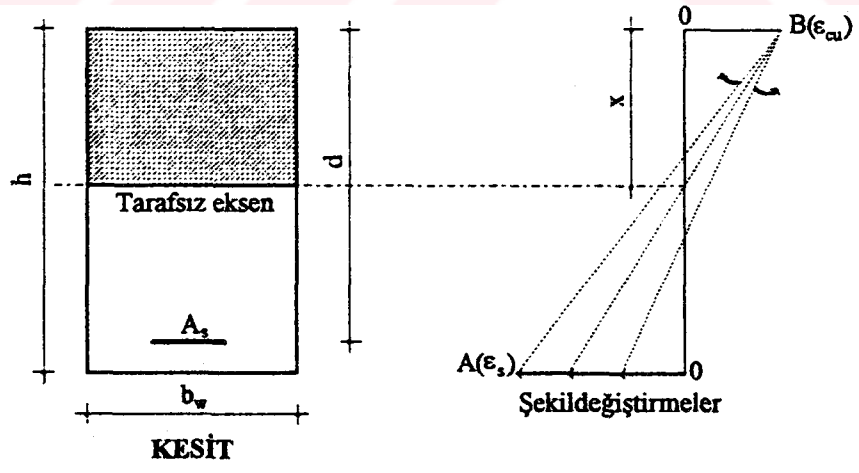
$$F_c = F_s \qquad (78)$$

c) Moment denge denklemi

$$M = F_s \,.\, z = F_c \,.\, z \qquad (79)$$

4) Hesap yöntemi

Kullanılan donatıların gerilme- şekildeğiştirme bağıntılarının karmaşıklığı nedeniyle alışılmış hesap yoluyla denge denklemlerinin yazımı, kesin göçme momentinin belirlenmesine imkan vermemektedir. Durum böyle olunca, göçme momenti ardışık yaklaşık yöntemiyle hesaplanmak zorundadır. Bunun için göçme anında betonun birim kısalması ε_{cu} belliyken, denge gerçekleşinceye kadar kesitin şekildeğiştirme diyagramını $B(\varepsilon_{cu})$ noktası etrafında döndürmek gerekmektedir (Şekil 45). Bu yöntemle, basit eğilme etkisindeki betonarme bir kesitin kırılma momentlerini hesaplamak için geliştirilen bir bilgisayar programının akış diyagramı Şekil 46' da verilmektedir.



Şekil 45: Betonarme bir kesitin göçme anındaki şekildeğiştirme diyagramının araştırılması [65].

Bu durumda esas parametre, betonun eğilmedeki göçme şekildeğiştirmesidir. Ön incelemelere göre belirlenen ve daha önce diğer birçok özelikle birlikte verilmiş olan ağır ve geleneksel betonlara ilişkin göçme şekildeğiştirmeleriyle beraber, karakteristik ve ortalama basınç dayanımları Tablo 24' de verilmektedir. Basit eğilme etkisindeki betonarme kirişlerin teorik göçme momentleri (M_{rt}),diğer momentlerle birlikte, Tablo 25' de verilmektedir.

Tablo 24 : Kiriş üretiminde kullanılan ağır ve geleneksel betonların ortalama ve karakteristik basınç dayanımları ile göçme şekildeğiştirmeleri.

Betonlar	Ortalama basınç dayanımı (f_{cm}) (MPa)	Karek. bas. dayanımı (f_{ck}) (MPa)	Göçme şekildeğiştirmesi (ε_{cu})
Ağır beton	34.2	32.6	$2{,}2.10^{-3}$
Geleneksel beton	37	35.6	$3{,}2.10^{-3}$

2.8.6.1.2. Yönetmeliğe Göre Göçme ve Kullanım Momentinin Hesabı [54]

2.8.6.1.2.1. Hesap Kabulleri

Düzlem kesitlerin düzlem kalma, çekme etkisindeki betonun rolü ve malzemenin gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarına ilişkin Madde 2.8.6.1.1.1' de belirtilen kabuller bu hesapta da yapılmaktadır. Ancak, bu tür hesapta göçme sınır durumu, gerçek taşıma kapasitesi yerine, üç dönme noktası gibi teorik bir kuralın uygulanmasıyla tanımlanmaktadır [71]. Bu çalışmaya konu olan kirişler salt eğilme etkisinde olduğundan sözkonusu üç dönme noktası kuralı, iki dönme noktası (A ve B) kuralına dönüşmekte (bkz. Şekil 45) ve aşağıdaki iki koşuldan biri ya da ikisi aynı anda sağlandığında göçme sınır durumuna ulaşılmaktadır:

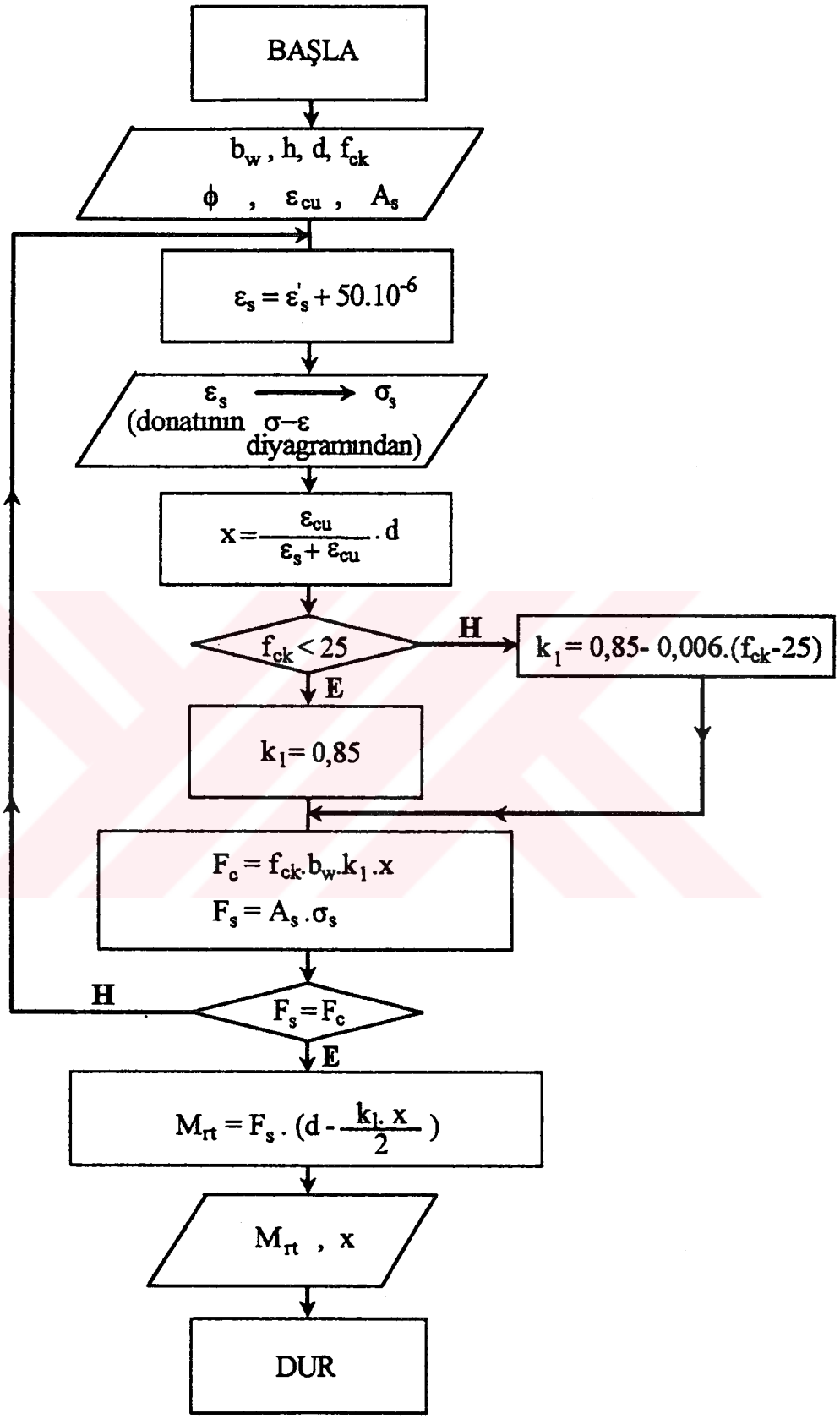
1) Betonun üst lifindeki birim kısalmanın $\varepsilon_{cu} = 3.10^{-3}$ olması.

2) Asal çekme donatısındaki birim uzamanın $\varepsilon_s = 10^{-2}$ ' e varması.

Diğer taraftan:

a) f_{ck} betonun karakteristik basınç dayanımını göstermek üzere, betonun nihai basınç dayanımı $f_{cu} = 0.85.f_{ck} / \gamma_c$ olarak sınırlıdır.

b) Donatının hesap dayanımı (f_{yd}), karakteristik dayanımın (f_{yk}), $\gamma_s = 1.15$' e bölünmesiyle elde edilmektedir [54].



Şekil 46: Bilgisayar programı akış diyagramı.

2.8.6.1.2.2. Göçme Momentinin Hesap İlkesi

Göçme momentinin TS 500 [54]' e göre hesabında, teorik göçme momentinin hesabındaki yol aynen izlenmektedir.

2.8.6.1.2.3. Kullanım Momentinin (M_s) Hesabı

Kullanım momenti (M_s) normal olarak bir taraftan kullanım sınır durumları, diğer taraftan da göçme sınır durumu dikkate alınarak belirlenmek zorundadır.

Eğer bu belirlemede sadece göçme sınır durumu dikkate alınıyor ve kullanım yükü altında başka hiçbir özel koşulun sağlanması istenmiyorsa kullanım momenti izostatik kirişlerde;

$$M_s = M_r/1.5 \qquad (80)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır [71].

Aksine çatlama ve şekildeğiştirme için başka sınırlar konmak isteniyor ve bu sınırlar yukarıda tanımlanan M_s' den daha küçük değerleri gerektiriyorsa, bu durumda kullanım momentinin bir kiriş çiftinden diğerine değişeceği açıktır. Durum böyle olmakla beraber, bu çalışmada kirişlerin maksimum kullanım yüküne karşılık gelen ve (80) bağıntısıyla hesaplanan kullanım momenti değerine kadar olan ağır ve geleneksel beton ve betonarme kiriş mekanik davranışlarının karşılaştırılmasıyla yetinilmektedir.

2.8.6.2. Deney ve Hesap Sonuçları

Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin deneysel göçme momentleri (M_{re}), hesaplanan teorik göçme momentleri (M_{rt}), TS 500' e göre belirlenen teorik göçme momentleri (M_r) ve kullanım momentleri (M_s) Tablo 25' de verilmektedir. Bu tablodan, bu çalışmaya konu olan ağır betonarme kirişin deneysel göçme momentinin (M_{re}) geleneksel betonarme kirişten %5 oranında daha küçük donatısız ağır beton kirişin deneysel göçme momenti ise geleneksel beton kirişten %32 daha büyük olduğu görülmektedir. Bu da yapılan ağır betonun en azından betonarme kirişlerde kullanılmasının dayanım yönünden bir sakıncası olmadığını

ortaya koymakla beraber sonuçları genellemeden önce deney sayısının artırılması gerektiğini de belirtmek uygun olmaktadır.

2.8.6.2.1. Deneysel Emniyet Katsayıları

Bu çalışmada deneysel göçme momentinin kullanım momentine oranı deneysel emniyet katsayısı olarak adlandırılmakta, Tablo 26' da, Tablo 25 yardımıyla hesaplanan $\gamma_s = M_{re} / M_s$, $\gamma_r = M_{re} / M_{rt}$ ve $\gamma_r^* = M_{re} / M_r$ oranları verilmektedir.

Tablo 25: Ağır ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin göçme ve kullanım momentleri.

Momentler (kN.m)	Ağır Beton ve Betonarme Kirişler		Geleneksel Beton ve Betonarme Kirişler	
	AK-1	AK-2	GK-1	GK-2
M_{re}	2.412	14.97	1.83	15.70
M_{rt}	-	14.3	-	15.20
M_r (TS 500)	-	9.85	-	6.98
M_s	-	6.56	-	4.65

Tablo 26 : Ağır ve geleneksel betonarme kirişler için γ_s, γ_r, γ_r^* değerleri.

γ değerleri	Ağır Betonarme Kirişler	Geleneksel Betonarme Kirişler
γ_s	2.28	3.38
γ_r	1.05	1.03
γ_r^*	1.52	2.25

Bu iki tablodan ağır betonarme kirişlerin deneysel göçme momentinin, teorik göçme momentinden %5, geleneksel betonarme kirişlerde ise %4 oranında daha büyük olduğu, deneysel emniyet katsayısının (γ_s) ağır betonarme kirişlerde 2.28, geleneksel betonarme kirişlerde ise 3.38 olduğu görülmektedir. Burada bu sonuçların yalnızca bu çalışmaya konu olan betonarme kirişler için ve çalışmanın gerçekleştiği koşullar altında geçerli olduğunu, sonuçların genellenebilmesi için daha çok sayıda kirişler üzerinde deney yapmanın yararlı olacağını belirtmek uygun olmaktadır.

2.8.6.2.2. Dengeli, Kritik ve Minumum Donatı Oranları

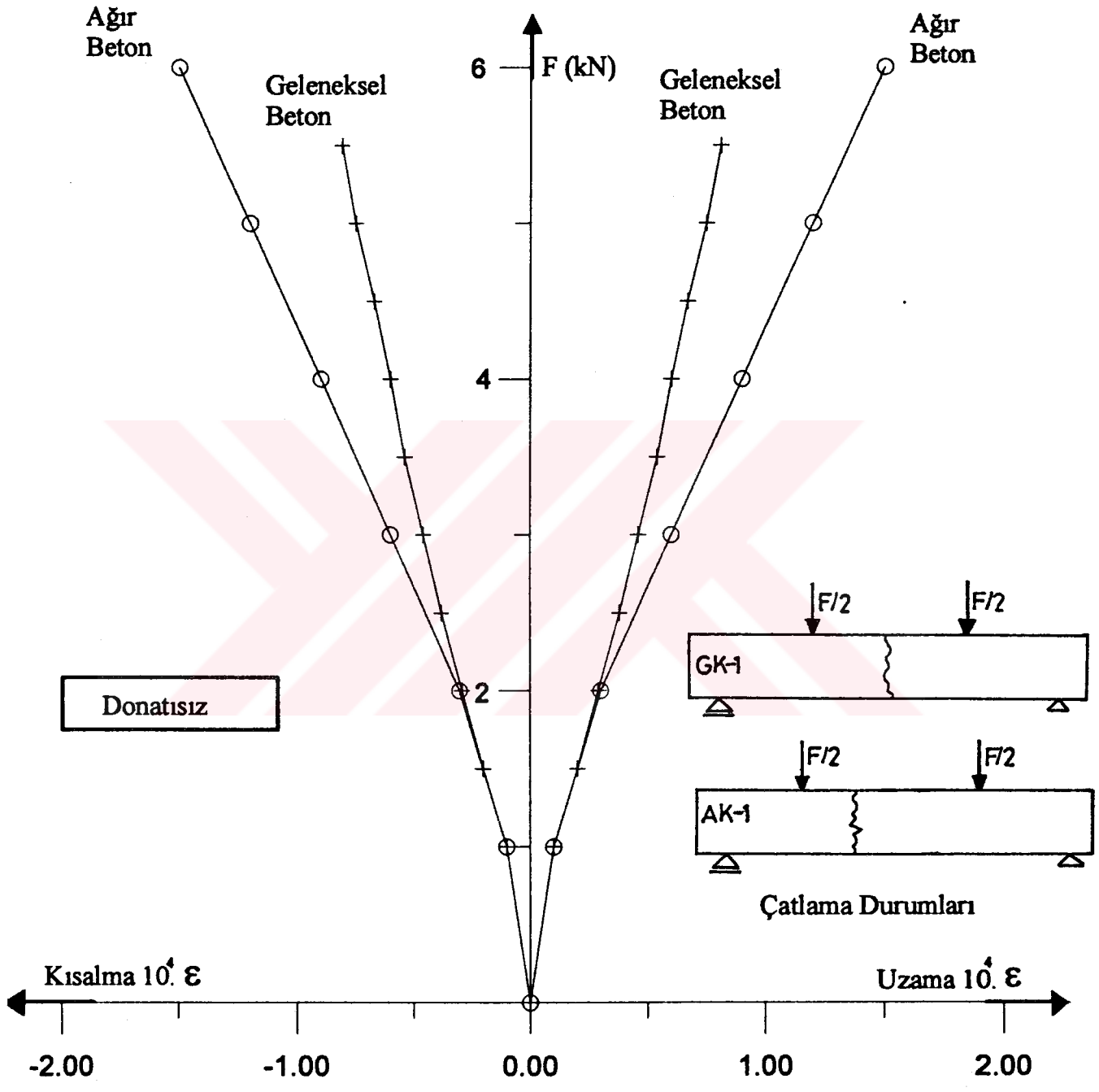
Kirişlerin davranışlarının değerlendirilmesinde dikkate alınmak üzere, ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin karakteristik dengeli donatı oranları, hesap dengeli donatı oranları, minumum ve kritik donatı oranları belirlenmiştir. Karakteristik dengeli donatı oranlarının belirlenmesinde, bu çalışmaya konu olan beton ve donatının karakteristik dayanımları, hesap dengeli donatı oranı, kritik ve minumum donatı oranlarının belirlenmesinde ise beton ve donatının hesap dayanımları kullanılmıştır. Hesaplanan bu donatı oranları aşağıdaki Tablo 27' de verilmektedir.

Tablo 27: Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin ρ_b, ρ_{min}, ρ_c değerleri.

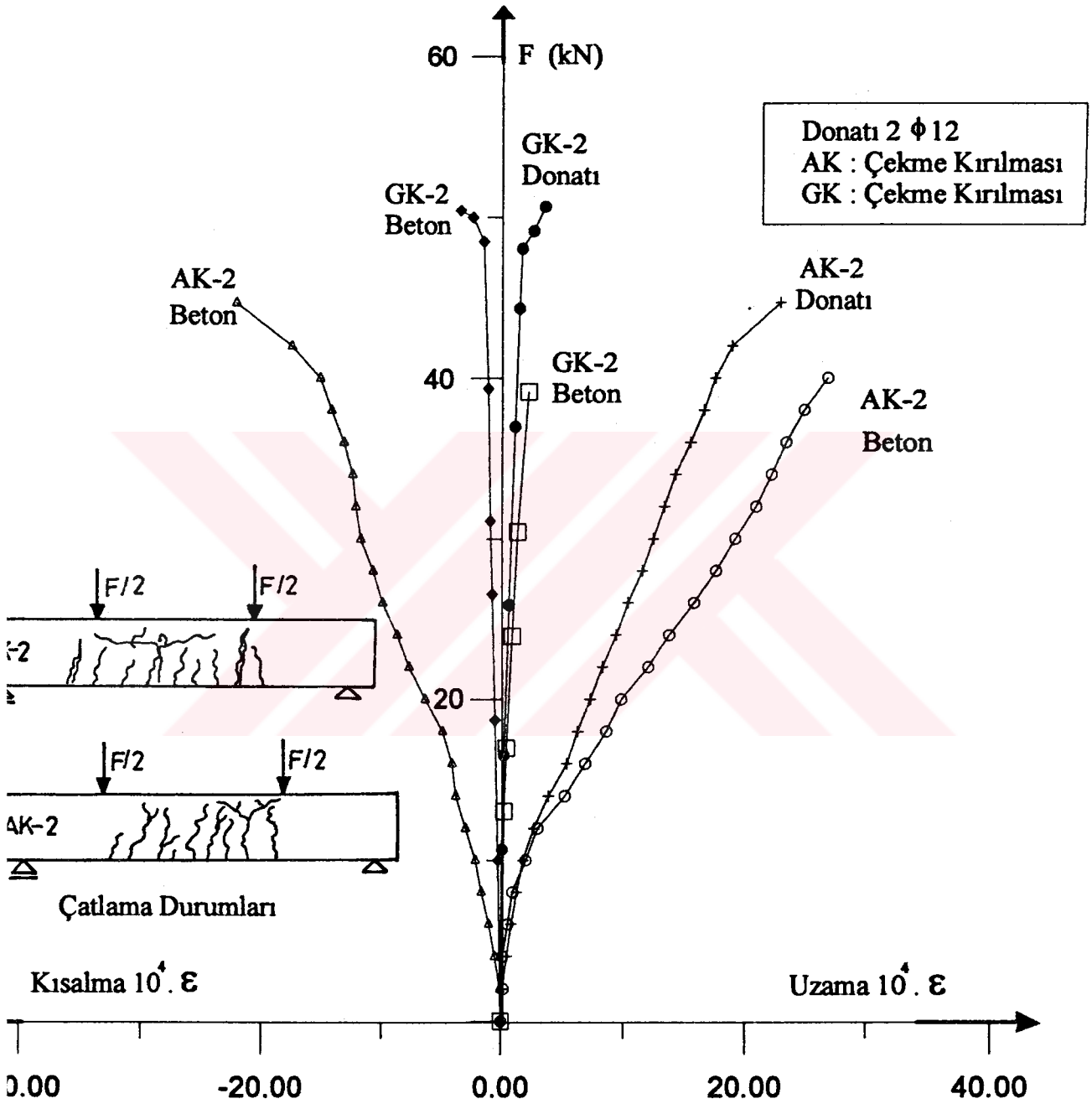
Kirişler	Donatı	Karakteristik dengeli don. oranı (ρ_b)	Hesap dengeli donatı oranı (ρ_b) (TS500)	Kritik donatı oranı (ρ_c) ($0.122\sqrt{f_{cd}}/f_{yd}$)	Minumum donatı oranı (ρ_{min}) ($1.2/f_{yd}$)
(AK)	2ϕ12	0.0025	0.00196	0.035	0.0043
(GK)	2ϕ12	0.055	0.042	0.0021	0.0043

2.8.6.2.3. Ağır ve Geleneksel Beton ve Betonarme Kirişlerin Şekildeğiştirme ve Sehimlerinin Karşılaştırması

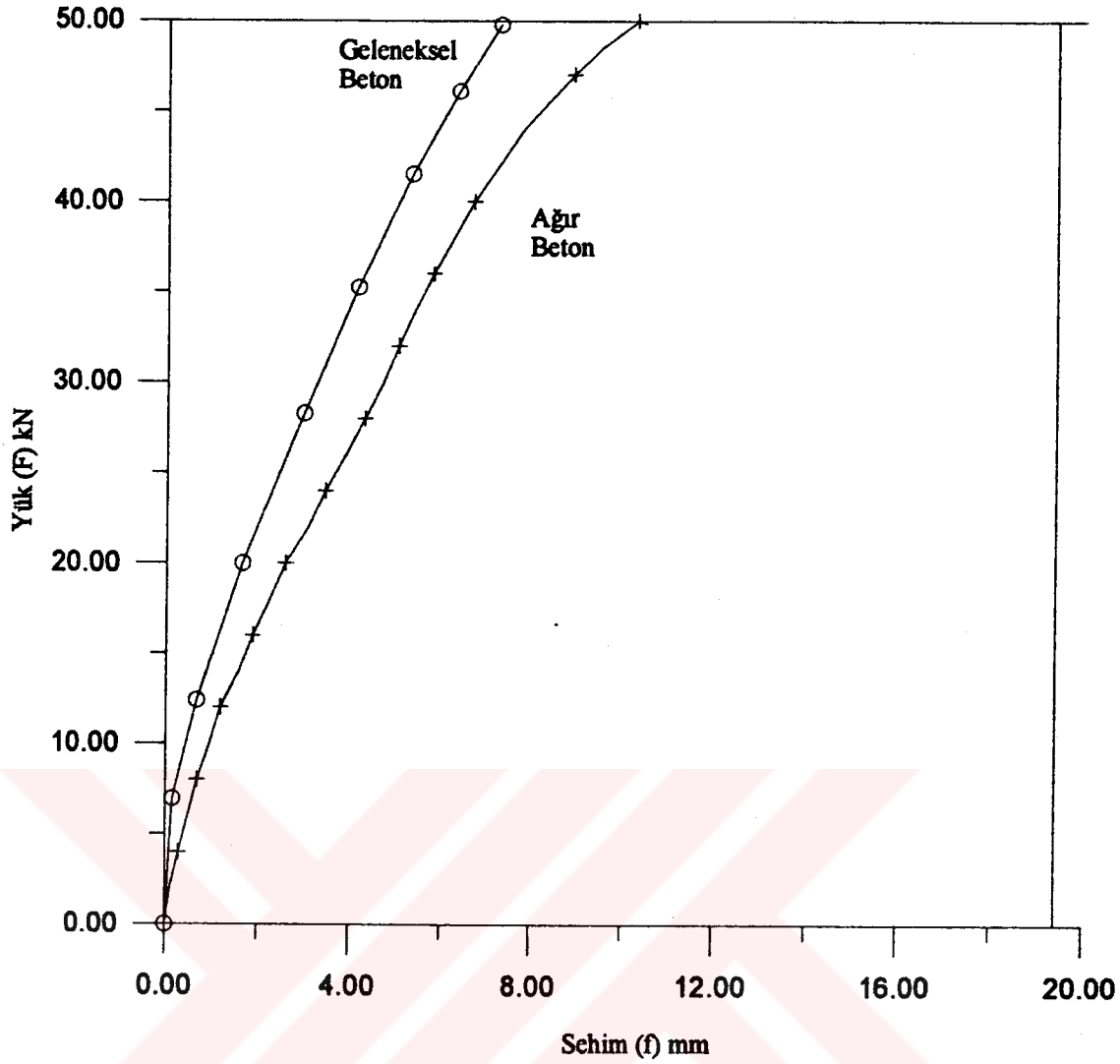
Donatısız olan birinci seri kirişlerin tipik şekildeğiştirme diyagramları Şekil 47' de, verilmektedir. Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin eğilme deneyinden elde edilen şekildeğiştirme ve sehim diyagramları Şekil 48 ve Şekil 49' da verilmektedir.



Şekil 47: Donatısız kirişlerin tipik şekildeğiştirme diyagramları ve göçme yükü altında şematik çatlama durumları.



Şekil 48: Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin tipik şekildeğiştirme diyagramları ve göçme yükü altında şematik çatlama durumları.



Şekil 49: Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin yük-sehim diyagramları.

Bu şekillerden ve Tablo 25' den ağır betonarme kirişlerin göçme yüklerinin geleneksel betonarme kirişlerden %5 daha küçük olduğu görülmekredir. Ağır betonarme kirişlerin göçme yüklerinin, şekildeğişebilirliliklerinin dolayısıyla da sünekliklerinin geleneksel betonarme kirişinkinden küçük olması, bunların adaptasyon yapma kapasitelerinin düşük ve depreme karşı performanslarının da daha kötü olacağına işaret etmektedir.

Donatılı betonarme kirişlerin maksimum ani sehimleri (Δ_i), F kirişin göçme yükünü, a tekil yükün mesnete uzaklığını (bkz. Şekil 34), *l* mesnetler arasındaki mesafeyi, I_{ef} TS 500' de önerilen etkili eylemsizlik momenti; I_c brüt beton kesitin ağırlık merkezine göre eylemsizlik momentini, y kesitin ağırlık merkezinin en çok çekme etkisinde bulunan life uzaklığını, M_{cr}= 1,3.f_{ctk}.I_c/y çatlama momentini, M_{max} elmana etkiyen maksimum momenti, I_{cr} betona dönüştürülmüş çatlamış kesitin eylemsizlik momentini göstermek üzere,

$$I_{ef} = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3 . I_c + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3\right] . I_{cr} \qquad (81)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu durumda E_c betonun elastisite modülünü göstermek üzere, ani sehim

$$\Delta_i = \frac{(F/2).a}{6.E_c I_{ef}} . \left(\frac{3}{4} . l^2 - a^2\right) \qquad (82)$$

bağıntısıyla belirlenerek [72] deneysel sehimlerle birlikte Tablo 28' de verilmektedir.

Tablo 28 : Ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin teorik ve deneysel maksimum ani sehimleri.

Yük	Kiriş türü	Sehimler	
F	Ağır betonarme	Teorik	0.79
		Deneysel	1.65
	Geleneksel betonarme	Teorik	0.74
		Deneysel	1.55
0,75.F	Ağır betonarme	Teorik	0.59
		Deneysel	0.52
	Geleneksel betonarme	Teorik	0.56
		Deneysel	0.50

Bu tablodan göçme yükü altında elde edilen teorik sehimlerin deneysel sehimlerden çok küçük olduğu, oysa göçme yükünün 3/4' ü için belirlenen sehimler deneysel sehimlere çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum göçme yükü altında sehim okumalarının diğer aşamalardaki kadar hassas olmamasından, diğer bir deyişle göçme yüküne yakın yük altında kiriş şekildeğiştirmelerinin sabit yük altında dahi stabilize olmadan devam etmesinden kaynaklanmaktadır. 0,75.F yükü altında teorik ve deneysel sehimlerin birbirine çok yakınoluşu, (82) bağıntısının ağır betonarme kirişler için de oldukça gerçekçi olduğunu göstermektedir.

3. İRDELEME

Bu çalışmanın başlıca amacı; agrega petrografik yapısını da dikkate alarak Doğu Karadeniz Bölgesi doğal ağır agregalarından biriyle (barit) üretilen ağır betonun, birim kütle yönünden farklı olan agregayla (kalker) üretilen geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelemektir. Bu amaçla ağır betonların fiziksel, mekanik, ısıl özelikleri, kırılma mekanizmaları ve bu betonla üretilen kirişlerin eğilmedeki davranışları geleneksel bir betonunkilerle karşılaştırılarak birçok özel yapıda ağır beton kullanımıyla elde edilebilecek yararlar gibi bazı yargılara varılmaktadır.

Ağır betonların birim kütlelerinin, geleneksel betonunkilerden, yüksek oluşu bu betonların üretimlerinde kullanılan agregaların birim kütlelerinin yüksek oluşundan ileri gelmektedir. Yapılan çalışmalarda bunun böyle olduğunu teyit etmektedir. Betonların birim kütleleri arttıkça ısıl iletkenliklerinin de arttığı literatürden bilinmektedir. Bununla beraber bu çalışmaya konu olan ağır betonun ısıl iletkenliği geleneksel betonunkinden daha düşüktür. Literatürdeki mevcut bilgilerle çelişen bu sonucu ancak ısıl iletkenliğin birim kütle ile birlikte agrega petrografik yapısına da bağlı olmasıyla açıklanabilmektedir. Bu açıklamanın doğruluğu ancak birim kütleleri eşit, petrografik ve mineralojik yapıları birbirinden farklı agregalarla üretilen aynı birim kütleli betonlar üzerinde gerçekleştirilecek deney sonuçlarıyla kanıtlanabilecak durumdadır. Bu durumda bu konuda merak sahibi araştırmacılara yeni bir araştırma konusu da, bu çalışmanın bir yan ürünü olarak, ortaya çıkmış bulunmaktadır.

İkinci bölümde incelenen kırılma mekanizmaları yardımıyla yapılan açıklamalar ve deneyler agrega petrografik yapısının betonun basınç ve çekme dayanımları üzerinde etkili olduğunu göstermekte ve bu suretle teorik inceleme sonucunda bu konuda elde edilen teorik bağıntıların da oldukça gerçekçi olduklarını ortaya koymaktadır. Ancak burada bu sonuçların bu çalışmaya konu olan özel petrografik yapıya sahip geleneksel (kalker) ve ağır (barit) agregalarla üretilen beton numuneler ve deney koşullarına ait olduğu da belirtilmelidir. Kırılma mekanizmaları ile ilgili bölümde betonun merkezi çekme ve basınç etkisi altında iki şekil kırılmanın sözkonusu olduğu ortaya çıkmıştır. Birinci şekil kırılmada, önce agregaların ya da agregalarla çimento hamuru arasındaki aderans sökülmesi betonun kırılmasına neden olmamaktadır. Bu durumda çekmede beton dayanımını sadece sertleşmiş çimento hamuru sağlamaktadır. Sadece bu özel durumda agrega petrografik yapısı betonun dayanımı üzerinde hiç bir rol oynamamaktadır. Bu tür kırılma, çekme dayanımı düşük ve

aderansı zayıf agrega içeren ya da çok az oranda çekme dayanımı ve aderansı yüksek agrega içeren betonlardaki kırılmaya karşılık gelmektedir. Basınçda ise agregalar beton dayanımı üzerinde elastisite modülleri vasıtasıyla etkili olmaktadır. 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 kırılsın her iki durum için de geçerli kalmaktadır. İkinci şekil kırılma da kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan birinde kırılmaya aderans sökülmesi diğerinde ise agrega kırılması neden olmaktadır. Daha sonra sonuçlar ve öneriler kısmında da değinileceği gibi bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar hem ağır, hem de geleneksel beton kırılmalarının genellikle agrega dayanım yetersizliğinden ileri geldiğini göstermektedir.

Yapılan çalışmalar beton kırılmalarının bazen agrega dayanım yetersizliğiyle beraber agrega çimento hamuru arasındaki aderansın sökülmesi sonucunda meydana geldiğine işaret etmektedir. Bu kırılma ikinci şekil kırılmaya karşılık geldiğine göre yukarıda da belirtildiği gibi agrega petrografik yapısının betonların çekme ve basınç dayanımlarının önemli derecede etkilediğini ortaya koymaktadır. Gerçekten agrega petrografik yapısını belirlemek, beton içinde hacimce %70 civarında olan, agrega taneleri ve bu tanelerin sertleşmiş çimento hamuru ile olan bağlantılarının özeliklerini de belirlemek anlamına geldiğinden agrega petrografik yapısının betonun kırılma mekanizmaları, dolayısıyla da dayanımları üzerinde önemli bir etkisinin olması gerektiği akla daha uygun gelmektedir.

Bilindiği gibi betonarme yapılarda betonun çekme dayanımının düşük olması, beton ve donatının uzama kapasitelerinin farklı olması nedeniyle çatlama olayı ve bunun sonucunda genellikle yapılarda birtakım hasarların meydana gelmesi kaçınılmaz olmakta ve bu nedenle betonarme hesaplarda ve detaylandırmalarda bu hususlar dikkate alınmaktadır.

Kirişlerin eğilmedeki davranışlarını belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerin herbirinde yükleme süresince en çok zorlanan liflerde beton ve donatıdaki birim boy değişimlerinin, sehimlerin, yükün dolayısıyla da eğilme momentinin çatlama ve göçme anındaki değerleri ölçülmüştür. Deneylerin bu şekilde gerçekleştirilmesinin nedeni ağır ve geleneksel betonarme kirişlerin davranışlarının incelenmesi ve davranışların karşılaştırılması sadece kırılma ve çatlama yükleriyle değil, bütün yükleme boyunca şekildeğiştirme durumlarının karşılaştırılması suretiyle yapılmak istendiğinden ileri gelmektedir.

Betonarmede çatlama konusunda çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların doğal sonucu olarak çatlak genişlikleri üzerinde çok sayıda deneysel ve teorik bağıntılar elde edilmiştir. Sonuç olarak yararlanılan çeşitli teorilerin temel ilkelerinde hiçbir çelişki bulunmamaktadır. Zira, bu teorilerin tümünde dikkate alınan etkenler aynı olup, sadece katsayılar bazen de parametrelerin etkime dereceleri değişmekte, esas değişken çatlamış kesitteki donatı gerilmesi σ_s olmaktadır. Kirişlerin çatlama durumlarının incelenmesinde çatlaklara ilişkin olarak Madde 2.8.5' de verilen bağıntılar, aderansın değişim kuralını dikkate almamış olmakla beraber, donatı oranı azaldıkça çatlaklar arasındaki mesafe ve genişliklerinin arttığını ve donatı oranı sabit kalmak koşuluyla, donatı çapı küçüldükçe, çatlak genişlikleri üzerinde donatı etkisinin arttığını belirtmeye imkan vermektedir. Çatlak genişliğinin teorik hesabında verilen bağıntılardan (75) ifadesindeki katsayının keyfi olarak seçilmiş olduğunu, oysa karakteristik çatlak genişliğinin belirlenebilmesi için, ortalama çatlak genişliğinin, çatlak genişlikleri dağılın kuralının, güvenlik katsayısının ve standard sapmanın bilinmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Kaynak (54)' de verilen donatı ağırlık merkezindeki ortalama çatlak genişliklerinin belirlenebilmesi için verilmiş olan (74) bağıntısı gerçekçi değerler vermektedir. Çatlak genişliklerine ilişkin bağıntılar daima paspayına, donatı çapına bağlı olduğu gibi, tüm kesit alanına göre belirlenen, donatı oranına da bağlı olmaktadır.

Bu çalışmada verilen (82) bağıntısı kirişin tüm açıklığı boyunca çatlamış olduğu, elastik şekildeğiştirmelerin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu ve kesitin çatlama momentinin sıfır olduğu kabulleriyle elde edilmiştir. Bu bağıntıdaki etkili eylemsizlik momentinin (81) bağıntısıyla hesaplanmasının öngörülmüş olması, bazı özel durumlarda gerekli olabileceği düşünülmekle beraber, çatlama momentinin maksimum moment yanında küçük kaldığı bu çalışmaya konu olan kirişlerde böyle bir hesaptan vazgeçerek, sözkonusu eylemsizlik momenti yerine, çatlamış kesit eylemsizlik momentini koymak, sonuçları pratik olarak değiştirmemektedir.

Geliştirilmesinde laboratuvarlarda gerçekleştirilen deneylerden yararlanılmış olan TS 500' de önerilen sehim hesabının, oldukça gerçekçi değerler verdiği, yapılar üzerinde güvenilir ölçümlerin çok az olduğu, yeterli sayıya ulaşıldığında sehim hesabı konusunda daha gerçekçi önerilerin yapılabileceği, bu çalışmada önerilen yöntemle hesaplanan sehimlerin yapıda gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilenlerle daima uyuşmayabileceği açıktır

4. SONUÇLAR

Bu çalışmanın temel amacı, Doğu Karadeniz Bölgesi doğal ağır agregalarından biriyle (barit) üretilen ağır betonun fiziksel, mekanik, ısıl özeliklerini geleneksel betonunkilerle karşılaştırmak, agrega petrografik yapısını da dikkate almak suretiyle betonların kırılma mekanizmalarını belirlemek ve bu betonlarla üretilen kirişlerin eğilmedeki davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemekten ibaretti.

Bu amaçla gerçekleştirilmiş olan deneysel ve teorik çalışmaların birlikte değerlendirilmesinden çıkartılabilecek bazı sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

1) Ağır betonlar (birim kütleleri >2800kg/m^3) kayma ve devrilmeye karşı emniyette olmayan bazı özel yapılarda dengeleyici ağırlık olarak kullanılmakla beraber asıl kullanım alanları radyoaktif maddelerin yaydığı nükleer ışınlardan özellikle, cisimlerin içine girebilen öldürücü, nötron ve γ ışınlarına karşı hastanelerin ışın tedavisi ve radyografi tesisleri, nükleer enerji santralleri gibi yapılarda zararlı ışınlara karşı koruyucu beton perde inşaasında kullanılmaktadır. Betonların radyasyona karşı etkinlikleri birim kütleleri arttıkça artmaktadır. Bu durum, radyasyona karşı geleneksel beton kullanmak da mümkün olmakla beraber, fazla yer işgal etmemek için, geleneksel beton yerine, koruyucu beton perde kalınlığını küçültmeye imkan veren ağır beton kullanımının tercih edilmesini sağlamaktadır.

2) Ağır betonların geleneksel betonlardan en önemli farkı üretimlerinde kullanılan agregaların barit, magnetit, limonit, demir ve çelik parçaları gibi ağır agregalar oluşudur. Bu agregaları kullanmak suretiyle üretilen ağır betonların birim kütleleri 6500 kg/m^3 kadar olabilmektedir.

3) Ağır betonların ayrışma riskinin fazlalığı, bunların homojenliğinin sağlanmasında gösterilen özenin geleneksel betonlarınkinden daha fazla olmasını gerektirmektedir. Bunun için kullanılan kütlece su/çimento oranının 0.50' yi geçmemesi, bu koşullarda üretilen

betonun arzulanan işlenebilirliliğe sahip olmaması durumunda akışkanlaştırıcı ya da plastikleştirici katkı maddelerinin kullanılması, karma süresinin kısa tutulması, güçlü vibrasyonun kısa süreyle yapılması, betonun en fazla 25 cm kalınlığında tabakalar halinde dökülmesi, iç vibratör daldırma yerleri arasındaki mesafenin 30 cm - 50 cm arasında olması gerekmektedir.

4) Taze betondan doğan basınçları karşılayabilmek için kalıpların da geleneksel beton kalıplarından daha rijit olması zorunlu olmaktadır.

5) Rötrenin büyük değerler almasının önlenmesi dolayısıyla da çatlama riskinin azaltılması için çimento dozajının 350 kg/m^3' ü geçmemesi uygun olmaktadır.

6) Geometrisi karmaşık olan yapılarda ağır betonun kalıplara yerleştirilmesinin enjeksiyon tekniğiyle gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

7) Bu çalışmada üretilen ağır betonun birim kütlesi geleneksel betonunkinden yaklaşık %45 daha büyüktür. Kütlece su/çimento oranı arttıkça betonların birim kütleleri azalmakta ve bu azalma ağır betonlarda, geleneksel betona göre, daha fazla olmaktadır (bkz. Tablo 10).

8) Su/çimento oranı 0.30-0.35 alınarak üretilen ağır betonlar BS50, 0.40 alınarak üretilen BS40, 0.50 alınarak üretilen BS30 , 0.55 alınarak üretilen BS25, 0.60 alınarak üretilen ise BS14 sınıfına girmektedir. Buna karşılık su/çimento oranı 0.30-0.35 alınarak üretilen geleneksel betonlar BS40, 0.40-0.50 alınarak üretilen BS35, 0.55-0.60 alınarak üretilenler ise BS25 sınıfına girmektedir. Bu da kütlece su/çimento oranları eşit olan betonlardan ağır betonların dayanımlarının daha yüksek olduğuna işaret etmektedir.

9) Betonlarda su/çimento oranı arttıkça doğal olarak basınç dayanımı ve elastisite modülü azalmaktadır. Bu çalışmaya konu olan ağır betonlarda su/çimento oranı arttıkça ayrışma artmakta ve bu nedenle ağır betonların dayanımı, aynı su/çimento oranına sahip, geleneksel betonlara göre düşmektedir. Beton karışımında katkı maddesi kullanıldığında

su/çimento oranı azaldığından ayrışma da azalmakta ve böylece ağır beton dayanımı geleneksel betonunkini geçmektedir.

10) Ağır betonların birim kütleleri geleneksel betonlarınkinden büyük olduğundan bu betonla inşa edilen yapılarda sabit yükler dolayısıyla da atalet kuvvetleri artmaktadır. Ancak ağır betonlarla inşa edilen yapı elemanlarının, elastisite modülünün büyük olması nedeniyle, yerdeğiştirmeleri küçülmekte ve enerji depolama kapasiteleri azalmaktadır. Yapının emniyeti için dayanım kadar sünekliğin de gerekli olduğu dikkate alındığında, ağır betonların, radyasyona karşı koruyucu beton perde ve ağırlık gerektiren özel yapılar hariç diğer yapılarda kullanılması uygun olmamaktadır.

11) Ağır ve geleneksel betonların doğrusal davranış bölgesindeki poisson oranları su/çimento oranının artmasıyla azalmakta ve bu azalma ağır betonlarda, geleneksel betonlarınkine göre, daha fazla olmaktadır (bkz. Tablo 11).

12) Bu çalışmaya konu olan ağır betonların ortalama ısıl iletkenlikleri geleneksel betonlarınkinden %30 daha küçük olduğu görülmektedir. Teknik literatürde birim kütle arttıkça ısıl iletkenliğin de arttığı vurgulanmaktadır. Literatürde mevcut bilgilerle çelişen bu sonucu ancak ısıl iletkenliğin birim kütle ile birlikte agrega petrografik yapısına da bağlı olmasıyla açıklanabilmektedir. Bu açıklamanın doğruluğu, daha önce irdeleme kımında da açıklandığı gibi, ancak birim kütleleri eşit petrografik ve mineralojik yapıları birbirinden farklı agregalarla üretilen aynı birim kütleli betonlar üzerinde gerçekleştirilecek deney sonuçlarıyla kanıtlanabilecek durumdadır (bkz. Tablo 12).

13) Betonların bileşimindeki sertleşmiş çimento hamurunun standard silindir basınç dayanımları, su/çimento oranına bağlı olarak, ağır betonunkinden %3-%49, geleneksel betonunkinden ise %36-%60 arasında daha küçüktür (bkz. Tablo11 ve Tablo 13).

14) Ağır agrega kayaçlarının eğilme dayanımı geleneksel agrega kayacınkinden %44, merkezi basınç dayanımları ise geleneksel agrega kayacınkinden %52 daha küçüktür (bkz. Tablo 16).

15) Su/çimento oranı 0.50 olan çimento hamurunun eğilme ve basınç dayanımları ağır agregalı harcınkinden sırasıyla %20, ve %2 daha küçüktür. Buna karşılık geleneksel agregalı harcın eğilme ve basınç dayanımları çimento hamurunkinden %2 daha büyüktür (bkz. Tablo 16).

16) Ağır agrega kayacı- çimento hamuru aderansı, ağır agrega kayacı- harç aderansından %90 civarında daha büyük, geleneksel agrega kayacı-çimento hamuru aderansı ise geleneksel agrega kayacı-harç aderansından %60 civarında daha küçüktür. Diğer taraftan, ağır agrega kayacı-çimento hamuru aderansı geleneksel agrega kayacı-çimento hamurununkinden 7 kat daha büyük, buna karşılık ağır agrega kayacı-harç aderansının geleneksel agrega kayacı-harcınkinden 1.5 kat daha büyüktür (bkz. Tablo 17).

17) Gerçekleştirilen deneyler agrega petrografik yapısının betonun basınç ve çekmedeki kırılma mekanizmaları dolayısıyla da dayanımları üzerinde etkili olduğunu ve bu suretle teorik incelemeler neticesinde bu konuda elde edilen teorik bağıntıların da oldukça gerçekçi olduklarını göstermektedir.

18) Bu çalışmaya konu olan ağır ve geleneksel betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler, bu betonların kırılmalarının genellikle agrega dayanım yetersizliğinden ileri geldiğine işaret etmektedir.

19) Ağır betonarme kirişlerin deneysel göçme momentleri teorik göçme momentlerinden %5, geleneksel betonarme kirişlerin deneysel göçme momentleri teorik göçme momentlerinden %4 oranında daha büyüktür. Deneysel emniyet katsayısıları ağır betonarme kirişlerde 2.28, geleneksel betonarme kirişlerde ise 3.38' dir. Ağır betonarme kirişin sabit moment bölgesindeki kırılma yükü altında ortalama çatlak mesafeleri geleneksel betonarme kirişinkinden %23 daha küçük, çatlak sayısı %43 daha fazla, çatlak genişlikleri de daha küçük olmaktadır.

5. ÖNERİLER

1) Zararlı nükleer ışınlara karşı koruyucu beton perde kalınlıklarının ışın cinsine göre hesaplanması için bir Türk Standardı mevcut değildir. Bu konuda bir standardın hazırlanmasında yarar bulunmaktadır.

2) Gelecekte meydana gelebilecek nükleer savaşlardan ve/veya nükleer santral kazalarından çevreye yayılan radyasyon etkisinden korunmak için sığınak gibi yapılar yapmak ve yapıların kayma-devrilme emniyetlerini daha ucuza sağlamak istekleri ağır betonların üretim ve kullanımının giderek yaygınlaşmasını gerektirmektedir. Oysa Türkiye'de ağır beton üretimine elverişli doğal ağır agrega yatakları, bunların genel jeolojik, petrografik, mineralojik özelikleri ve rezervleri iyi bilinmemektedir. Bu da gelecekte tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de araştırmaların bir kısmının bu alanda yapılmasının önemini ortaya koymaktadır.

3) Özellikle Türkiye' de bilinen doğal ağır agrega yataklarının azlığı ve yapay ağır agregaların da pahalı oluşu bu agregalarla üretilen ağır betonların kullanımına karar vermeden önce maliyetlerinin geleneksel betonlarınkiyle karşılaştırılmasını gerekli kılmaktadır.

6. KAYNAKLAR

1. Varshney, R.S., Concrete Technology, Second Edition, Oxford & IBH Publishing Co., New Delhi, 1982.

2. Clendenning, T.,G, Kellam, B. ve Macinnis, C., Hydrogen Evolution from Ferrophos phorous Aggregate in Portland Cement Concrete, ACI Journal, Proceedings 165, 12 (1968) 1021-1028.

3. Komski, G., Z. ve Saakov, A. G., Forming Decorative Coatings by Plasma Spraying, Glass and Seramics, 48, 3-4 (1991) 164-167.

4. Zazula, J. M. ve Tesch, K., Analysis of the transverse Shielding Problem at Proton Accelerators Using a Hadronic Cascade Code With Low Energy Particle Modules, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, (1990) 279-294.

5. Orchard, D. F., Concrete Technology, 4 th Edition, Mc Graw Hill Book Co., 139-144, 1974.

6. Chang, F. ve Cohen, E., Rebuilding Roebling Delaware Aqueduct Bridge, Journal of Structural Engineering, 115, 6 (1989) 1325-1341.

7. Klink, S. A., Actual Elastic Modulus of Concrete, Journal of ACI, 82 (1985) 630-633.

8. Klink, S. A., Actual Poisson Ratio of Concrete, Journal of ACI, 82 (1985) 813-817.

9. Klink, S. A., Aggregates, Elastic Modulüs and Poisson Ratio of Concrete, Journal of ACI, 83 (1986) 961-965.

10. Neville, A.,M., Properties of Concrete, Pitmann Publishing, London, 1975.

11. Bergström, S. G. ve Byfors, J., Function and Properties of Plain Concrete at on Early Age, CBI, Report of Activities, 84 (1977) 39-46.

12. Meyer, B., Heavyweight Concrete. A Structural Engineering Contrubition Towards Radiation Protection Almost Playful Dealings with Concrete Technology, Cement-Bulletin, 57, 23 (1989) 1-12.

13. Toszegi, T., Hajmasi, P. ve Nagy, P., Vigh, I., Operative Main Building, Magyar-Epitoipar, 37, 5-6 (1988) 218-232.

14. Erbe, M. ve Schulte, F., Heavyweight Concrete for the Duisburg Clinic. The Current Structure, Metall-Handwerk,und-Technik, 93, 2 (1991) 23.

15. Guide for the Use of Preplaced Aggregate Concrete for Structural and Mass Concrete Applications, ACI-Materials-Journal, 88, 6 (1991) 650-668.

16. Dusil, G. ve Beier, B., High-Density Concrete for Radition Shielding in Construction of Nuclear Power, Betontechnik, 10, 3 (1989) 84-87.

17. Tobin, R., Hall, D. ve Artuso, J., High-Density Concrete. Measuring, Mixing, Transporting and Placing., ACI 304 Current-Practise-Sheets, 8 (1975) 407-414.

18. Bessiere, C., Heavyweight Concrete and Its Use in Hydraulic Structures, Travaux, 586 (1984) 34-36.

19. Witte, B., Precision in Large Scale. The Berlin Electron Storage Circuit-BESSY, Beton, 35, 2 (1985) 49-53.

20. Tschirf, E., Concrete as a Shielding Material Against X-rays, Gamma and Neutron, Zement-und-Beton, 21, 5 (1976) 240-244.

21. Miller, E. W., High Density Concrete, Concrete, 17, 12 (1983) 33-34.

22. Clark, W.H.M., Electron Linear Accelerator Building, DOE-Construction, 28 (1986) 18-19.

23. Kuenzel, H. ve Gertis, K., Investigation on the Practical Moisture Content of the External Walls of Dwellings of Hollow Blocks of Heavyweight Concrete, Fraunhofer-Institut fuer Bauphysik-IBP, (1966).

24. Wandscheider, R. ve Pick, R., Concretes, Masonry, Screed and Plaster in Structural Radiation Protection, Beton Information, 5 (1982) 47-50.

25. Smith, E.C. ve Mather, K., Concrete for Nuclear Reactors, ACI Special Publication SP-34, (1970) 1766.

26. Polivka, M. ve Davis, H. S., The Shielding Ability of Concrete, ASTM STP 169B, Chap: 26, (1979) 420-434.

27. Mather, K., Heavyweight Concrete for Radiation Shielding, Journal of ACI, Proc., 62, (1965), 951-962.

28. Postacıoğlu, B., Beton (Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton) Cilt II., İTÜ İnşaat Fakültesi, 1987, 232.

29. Akman, M. S., Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Rektörlüğü, Sayı: 1481, İstanbul, 1992.

30. Durmuş, A., Gürsoy, Y. ve Ayvaz, Y., İnşaat Mühendisliğinde Ağır Betonlar, İMO Mühendislik Bülteni, Sayı: 49, (1996) 25-28.

31. Türk Standardı Tasarı I. Mütaalası, Beton - Ağır Beton - Radyasyona Dayanıklı, Türk Standardları Enstitüsü, ICS.91.100.30, Ankara, 1996.

32. Wilson, J.R. ve Mustard, J.N., Recomended Practice for Selecting Proportions for Normal and Heavyweight Concrete, ACI Standard 211.1-70, April, 1973.

33. Durmuş, A., Yapı Malzemesi Ders Notları, (Yayınlanmamış), K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 1994.

34. TS 802-Beton Karışım Hesapları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 1985.

35. Dreux, G., Guide Pratique du Béton, Societe de Diffusion des Téchniques du Batıment et des Travaux Publics, Paris, 1970.

36. Waddell, J.J., Concrete Construction Handbook, Second Edition, Mc Graw-Hill, New York, 1974.

37. TS 10326-İnşaat Makinaları-Vibratörler Beton Sıkıştırmak İçin, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Haziran, 1992.

38. Reading, T.J., Recomended Practice for Consolidation of Concrete, Unit-14, Heavyweight Concrete, ACI 309, 68,12 (1971) 925.

39. Çetmeli, E., Yeni Alman Betonarme Şartmamesi (DIN 1045, 1972) Betonarme Hesap Esasları, Kesitlerin Boyutlandırılması ve Donatının Yerleştirilmesi, Uluğ Kitapevi, İstanbul, 1974.

40. ASTM C637-73, Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete, American Society for Testing and Materials, 1973.

41. Mehta, P.K., Concrete Structure, Properties and Materials, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

42. ACI Committee 311, ACI Manual of Concrete Inspection, SP-2, 6th Edition, American Concrete Institute, Detroit, 1975, 268.

43. ASTM C638-73, Standard Descriptive Nomenclature of Constituents of Aggeragtes for Radiation-Shielding Concrete, American Society for Testing and Materials, 1973.

44. CRD-C79-58, Method of Test for Flow of Grout Mixtures, Corps of Engineers Standards, 1958.

45. CRD C80-64, Method of Test for Water Retentivity of Grout Mixtures, Corps of Engineers Standards, 1964.

46. CRD C81-74, Method of Test for Expansion of Grout Mixtures, Corps of Engineers Standards, 1974.

47. CRD C84-63, Method of Test for Compressive Strength of Preplaced-Aggregate Concrete, Corps of Engineers Standards, 1963.

48. TS 3068-Laboratuvarda Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Mart, 1978.

49. TS 2941-Taze Betonda Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi İle Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Ocak, 1978.

50. TS 388-Plaka Metodu İle Isıl İletlenliğin Tayini, Türk Standardları Enstitüsü Ankara, Nisan, 1977.

51. TS 3529-Beton Agregalarında Birim Ağırlıklarının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Aralık, 1980.

52. TS 3114-Beton Basınç Dayanımı Deney Metodu, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Aralık, 1990.

53. TS 10465-Beton Deney Metodları-Yapı ve Yapı Bileşenlerinde Sertleşmiş Betondan Numune Alınması ve Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Kasım, 1992.

54. TS 500-Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 1984.

55. Onaran, K., Malzeme Bilimi, 4. Baskı, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 1993.

56. Troxell, G.E., Davis, H.E. ve Kelly, J.W., Composition and Properties of Concrete, McGraw-Hill Civil Engineering Series, Second Edition, 1968.

57. Stewart, D.A., High Quality Concrete. The Design and Placing of High Quality Concrete, Second Edition, 1962, 142-157.

58. TS 1226-Deney Elekleri-Metal Levhalı, Yuvarlak veya Kare Delikli, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 1985.

59. TS 1227-Deney Elekleri-Tel Kafesli, Kare Göz Açıklıklı, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara 1985.

60. TS 706-Beton Agregaları, Türk Standardları Enstitüsü , Ankara, Aralık, 1980.

61. TS 3526-Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Aralık, 1980.

62. TS 8536-Kum Temizliğinin %10 İnce Eleman İhtiva Eden Kum Eşdeğerliğiyle Tayini Metodu, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Kasım, 1990.

63. TS 8537-Kum Eşdeğerliği Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Kasım, 1990.

64. Durmuş, A., Beton Nitelikleri Yönünden Optimum Kum Kirliliğinin Belirlenmesi (TS 853' e Uygun Olarak), Beton Prefabrikasyon, Türkiye Prefabrik Birliği, Sayı: 36, (1995) 29-37

65. Hüsem, M., Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Hafif Agregalarından Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.

66. TS 10156-Çimento-Katkılı Çimento, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 1985.

67. TS 415-Isıl İletkenliğin, Isıl Geçirgenlik Direncinin Yapıda Kullanılması İçin Hesap Değerlerinin Bulunması (Plaka Metodu İle), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Nisan, 1977.

68. Durmuş, A. ve Pul, S., Agrega Petrografik Yapısının Betonun Kırılma Mekanizmaları Üzerindeki Etkisi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1. Teknik Kongresi, Ekim 1993, Gazi Mağusa-KKTC, Cilt I. 673-684.

69. Feret, R., Annales des Ponts et Chaussées, Nov.-Déc., (1942).

70. Durmuş, A., Contribution a l' Etude des Criteres de Ruine d' Eléments de Structures en Béton-Application aux Piéce Armées, Thése de Docteur Ingénieur, Universite Paul Sabatier, Toulouse, 1976.

71. Durmuş, A., Döşemelerle Beraber Çalışan Öngerilmeli Beton ve Öngerilmeli Betonarme Kirişlerin Mekanik Davranışlarının Bu Sistemin Güvenliğine Etkileri, Doçentlik Tezi, K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 1982.

72. Postacıoğlu, B., Cisimlerin Yapısı ve Özelikleri, Cilt I, İTÜ Matbaası, İstanbul, 1981.

73. Akman , M.S., Yapı Malzemeleri, 1. Baskı, İTÜ Matbaası, İstanbul, 1987.

74. Cimilli, T., Yapı Malzemesi, İkinci Baskı, KTÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, Trabzon, 1986.

75. Pul, S., Agrega Petrografik Yapısının Betonun Dayanımı ve Akışkanlığı Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.

76. Farran, J., Contribution Minéralogique a l' Etude de l' Adhérence Entre les Constituants Hydratés des Ciments et les Matériaux Enrobés, Thése, Toulouse, 1956.

77. Maso, J.C., La Nature Minéralogique des Agrégats Facteur Essential de la Résistance des Bétons a la Rıpture et a l' Action du Gel, Thése de Docteur Ingénieur, Universite Paul Sabatier, Toulouse, 1967.

78. Arredi, A., Rapport no112 au 7 Congres Internatıonal des Grands Barrages, Rome, (1961).

79. Daniels, W., Béton de Calcite, Betong, Stockholm, 1948.

80. Stolnikov, V., Rapport no 110 au 7 Congres International des Grands Barrages, Rome, (1961).

81. Vile, G.W.D., Strenght of Concrete Under Short Term Static Biaxial Stress Paper F2, International Conference on the Structure of Concrete, London, (1965).

82. Dantu, H., Etude des Contraintes dans les Milieux Hétérogenes, Applications au Béton, ITBTP, 1 (1958).

83. Durmuş, A., Arnoud, M. ve Lorrain, M., Le Role des Effects Transvers aux Dans la Flexion des Planchers Nervurés en Béton Armé: Conséquencés Sur la Sécurité, Annales de l' ITBTP, No. 376, Série EM/173, 10 (1979).

84. Durmuş, A., Sur les Mécanismes de Ruine de Poutres en Béton, International Nazım Terzioğlu Symposium on Mathematics, Karadeniz University Mathematical Journal, 1, (1982).

85. Scholer, C. F., The Role of Mortar- Aggregate Bond in the Strenght of Concrete, Highway Research Record, 210 (1967) 108-117.

86. L Hermite, R., Idées Actuelles sur la Technologie du Béton, I' ITBTP, (1948).

87. TS 138-Çekme Deneyleri (Metalik Malzeme İçin), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 1978.

88. TS 708-Beton Çelik Çubukları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 1985.

89. Chatelain, J., L' Extensometrie Par Jauges a Fil Résistant, Bulletin De Liaison Des Laboratories Rouiters Ponts Et Chaussées, Paris, 1969.

90. Karaca, Z., Bir Sentez Çalışması Işığında Nervürlü Donatılı Hafif ve Geleneksel Betonarme Kiriş Davranışlarının Karşılaştırmalı olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.

91. Comission Fissuration du Comite Européen du Béton, Théorie Génerale de la Fissuration, Etude Expérimantale, Bulletin d'Information, CEB 12, (1972).

92. Borges, F.J., Cracking and Deformability of Reinforced Concrete Beams, International Association for Bridge and Structural Engineering, 26 (1966) 75-95.

93. Fons, G., Contrubition a l'etude de la Fissuration des Poutres Portiellement Pre contraintes, Thése de Docteur-Ingénieur, Toulouse, 1974.

94. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institue, 1983.

95. ACI Committee 224, Control of Cracking in Concrete Structure, Journal ACI, 69,12 (1972) 717-753.

96. Eren, I., Betonarme Çekme Elemanlarında Çatlak Genişliği, Doçentlik Tezi, İstanbul, 1980.

7. EKLER

EK-1 : KUM EŞDEĞERLİĞİ DENEYİ

1.1.GİRİŞ

Kumun çimento kadar betonun önemli bir bileşeni olduğu bilinmektedir. Çimento standartlaştırılmış olduğundan genellikle güvenilir ve düzgün bir şekilde üretilmektedir. Oysa kum için çimento üretimindeki gibi güvenilir bir üretim sözkonusu değildir. Kum kirlilik ve petrografik yapısının betonun nitelikleri üzerindeki etkisi şimdiye kadar birçok araştırmaya konu olmuştur[64]. Ancak , gözlemlerimiz bu araştırma sonuçlarının pratik hayata yeterli derecede yansıdığını söylemeye maalesef bugün de imkan verememektedir.

Burada, esas itibariyle kirlilikleri kum eşdeğerliği (ES) değeriyle karakterize edilen kumlarla üretilen betonlar üzerinde gerçekleştirilen çeşitli deneylerden elde edilen sonuçların eğrisel olarak gösterilimleri sistematik bir şekilde bu eğrilerin $75 \leq ES \leq 85$ değerleri için bir optimumdan geçtiğini göstermektedir.

Bu da, kumun belirli bir temizliğe sahip olması gerektiğini ancak, çok temiz olmasının da arzulanan bir durum olmadığını göstermektedir. Zira, bir agrega içinde ince elemanların varlığı betonun işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Bu nedenle kum eşdeğerliğinin çok büyük olması (kumun çok temiz olması) aynı miktardaki karma suyu için katı bir beton veren bir kuma karşılık gelmektedir. Bu durumda uygun bir işlenebilirlilik elde edebilmek için karma suyunu artırmak gerekmektedir. Bunun da kütlece su/çimento oranının (W/C) büyümesine dolayısıyla da mekanik dayanımının azalmasına neden olduğu bilinmektedir. İşlenebilirlilik için ilave edilen sudan dolayı meydana gelen dayanım kaybı, ince elmanların yokluğundan doğan kayıptan daha büyük olduğundan beton nitelikleri yönünden ES' nin maksimum değeri (kumun tam temiz olması) optimum değer olmamaktadır. Gerçekten de bu sonuç bu konuda laboratuvarda gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalrdan elde edilen sonuçlarla da doğrulanmaktadır[64].

Bugün Karadeniz Teknik Üniversitesi' nde Fransa ' dan satın alınan ve bu standardlara göre kum kirliliğinin belirlenmesinde de kullanılan kum eşdeğerliği deney düzeneği, sanayiye hizmet etmek ve araştırma çalışmalarında kullanılmak üzere kurulmuş bulunmaktadır. Bu düzenek, kendine özgü cihaz ve kimyasal maddeler yardımıyla kum kirliliğinin çok hassas olarak belirlenmesine imkan tanıyan özel bir düzenektir. Bu deney düzeneği mekanik ve kimyasal stabilizasyonda kullanılacak olan optimum zeminlerin, hidrolik ve hidrokarbonlu betonlar için kirlilik bakımından optimum kumların seçim ve denetiminde kullanılmaktadır.

Standardlaştırılmış olan ve şimdilik Türkiye' de sadece Karadeniz Teknik Üniversitesi' nde kurulmuş bulunan "Kum Eşdeğerliği Deney Düzeneği" İnşaat Mühendisliği Bölümü' nde DPT tarafından desteklenen 91.112.0015 kod nolu proje kapsamındaki araştırmalarda kullanıldığı gibi, şantiyelerde kullanılmakta olan kumların optimum kirliliklerinini belirlenmesi suretiyle üretilen beton kalitelerinin iyileştirilmesinde de kullanılabilecek durumdadır.

Burada bu deneyi, inşaatlarda kullanılacak olan kumu sipariş vermeden önce ve inşaat esnasında daha önce teslim alınmış olan kumu denetlemek için, yapmanın, en az beton üretimindeki diğer işlemler kadar, gerekli olduğunu belirtmekte yarar bulunmaktadır.

(Ek 1'in devamı)

1.2. KUM EŞDEĞERLİĞİ DENEYİNİN YAPILIŞI

Burada cihazlar, kimyasal maddeler ve elenmiş kumun hazır durumda olduğu varsayılmaktadır[63]:

-5 litrelik damacanada yıkama çözeltisi (deney kabının tabanından itibaren 1 m yükseklikte bulunan).

-Yıkama tüpüne bağlı çalışabilir durumda sifon tertibatı.

- İki temiz deney kabı (iki deneyin ortalaması alınacaktır).

Deney sürecinin tamamı şematik olarak Ek Şekil 1' de verilmektedir.

1) Deney kaplarını birinci yıkama çizgisine kadar yıkama çözeltisiyle doldur.

2) Bir deney için gerekli kum miktarını bu durumdaki deney kabına boşalt.

3) Silindirik deney kabının dibine el ayası ile birkaç kez kuvvetlice vurmak suretiyle hava kabarcıklarını yoket ve on dakika dinlenmeye bırak.

4) Deney kaplarının tıpalarını tak ve çalkala: Doğrusal hareket, yatay, sinüziodial, genliği 20 cm.,30 saniyede 90 gidiş- geliş.Çalkalama işi 90 çevrim sonunda kendiliğinden duran elektrikli bir aletle yapılabileceği gibi elle de yapılabilir. Elle çalkalama kritik akımı gerektirmediği için her zaman kullanılabilir ve daha ucuzdur. Çalkalamanın elle yapılması halinde bir kronometre düzgün bir hareket elde etmeye imkan vermektedir.

5) Yıkama tüpüyle deney kaplarını yıka ve doldur.

- Tıpayı deney kabının üzerine yıka.
- Parmaklar arasında döndürmek suretiyle, yıkama tüpünü deney kabına daldır. Böylece deney kabı cidarının iç yüzü yıkanmaktadır.
- Kumu yıka: Bunun için parmaklar arasında döndürülen yıkama tüpünü kum kütlesi içinde yavaşça indir ve kaldır. Böylece kumda bulunan ince elemanlar yükselmektedir.
- Yıkama çözeltisi seviyes, deney kabı üzerinde bulunan üst işaret çemberine ulaşınca yıkama tüpünü çıkar ve musluğu kapat.

6) 20 dakika süreyle dinlenmeye(durulmaya) bırak. Tüm titreşimlerden sakın. Tolerans ±10 s.' dir. Zira, flokülat (ince tane yumağı) dinlenme süresine bağlıdır.

7) h_1 ve h'_2 ' yü görerek ölç. Kum kirliliğinin belirli bir düzeyin üzerinde olması halinde yıkanmış kum flokülat arasındaki sınırı ayırt etmek güçleştiğinden h'_2' nün görerek ölçülmesi her zaman kolay olmadığından bu h'_2 ile hesaplanan ESV değeri de bir belirsizlik içermektedir. Bu belirsizliği ortadan kaldırmak aşağıda belirtilen daha hassas ölçümün yapılmasını gerektirmektedir.

8) Manşon deney kabının üst kısmına mesnetlenecek şekilde, daralı pistonu flokülattan geçecek şekilde yavaşça deney kabının içine daldır. Kuma değince durdur ve h_2' yi ölç.

9) Standardda öngörülenden (20°C) farklı olması halinde sıcaklığı kaydet.

- Doğal olarak iki deney kabı için bu işlemler özdeştir.
- Ölçümlerin hassasiyeti :

• h_1, h_2 ve h'_2 : En yakın mm' ye yuvarlatılır.

• Sıcaklık : En yakın santigrad dereceye yuvarlatılır.

10) Deney cihazlarını yıka.

11) Hesapları yap.

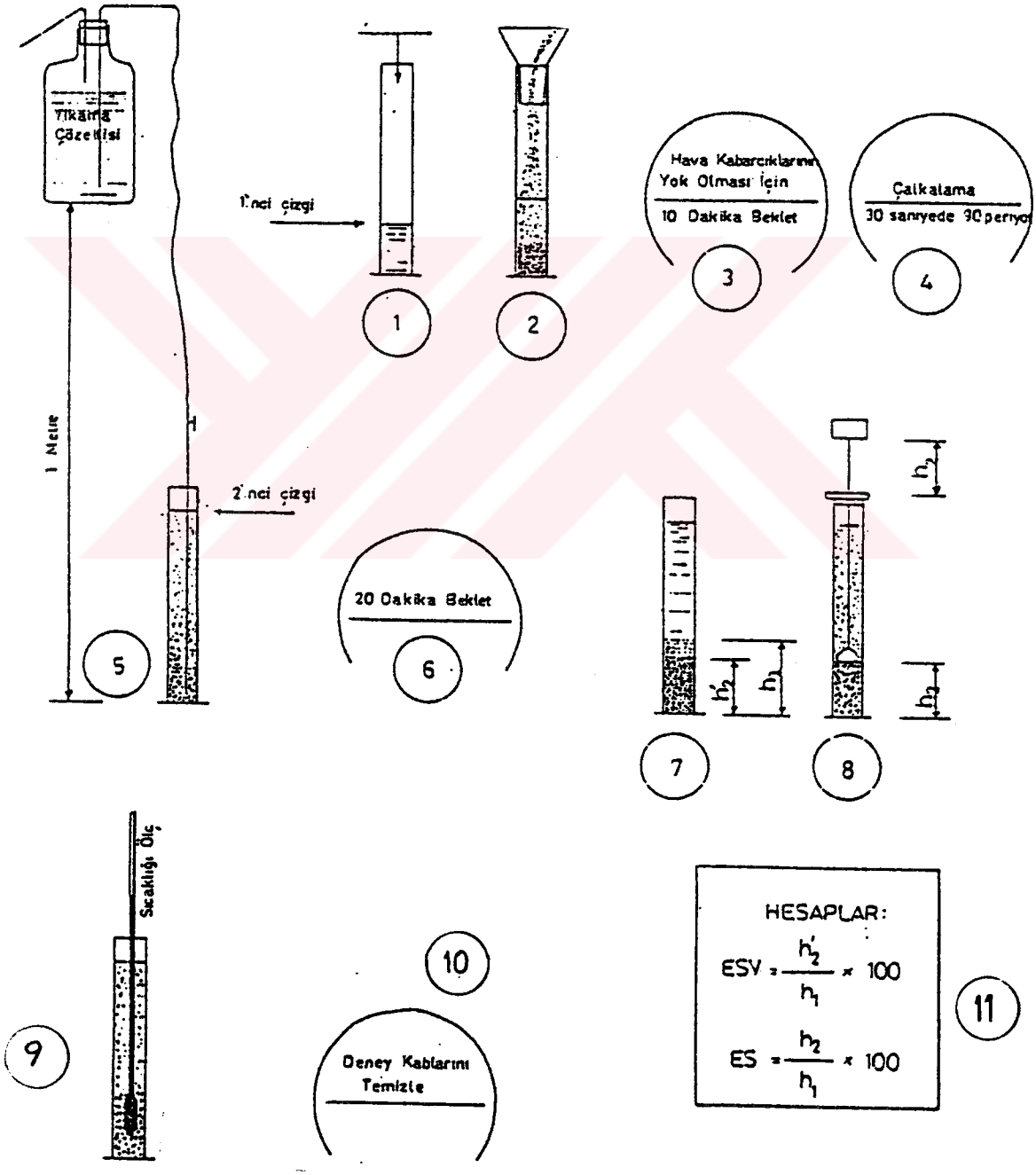
(Ek 1'in devamı)

1.3. HESAPLAMA VE SONUÇLARIN GÖSTERİLMESİ

Sonuçlar bir kum eşdeğerliği deney çizelgesine kaydedilerek, gerekli hesaplar yapılır (Ek Tablo 1). Her bir deney kabı için ESV ya da ES virgülden sonra bir basamak olacak şekilde hesaplanır. Numune ESV ya da ES değeri olarak her biri en yakın tamsayıya yuvarlatılan aritmetik ortalamalar kullanılır[64].

1.4. ÖNLEMLER

- Deney cihazları çok temiz ve yıkama çözeltisi yeni üretilmiş olmalıdır.
- Yıkama tüpünün küçük deliklerine dikkat edilmelidir.
- Deney esnasında deney kapları hiçbir sarsıntının etkisinde kalmamalıdır.



Ek Şekil 1. Kum eşdeğerliği deneyi sürecinin şematik gösterilimi.

(Ek 1'in devamı)

Ek Tablo 1. Kum eşdeğerliği deney sonuçlarının gösterilimine bir örnek.

Laboratuvar:		Tarih:		
Dosya:		Yapan:		
Deney kabının dibin den itibaren flokülat üst seviyesinin yüksekliği h1(cm)	1. Numune		2. Numune	
	1. Deney Numunesi	2. Deney Numunesi	1. Deney Numunesi	2. Deney Numunesi
	14.8	14.6	28.2	28.1
Pistonla ölçülen çökelti yüksekliği h_2 (cm)	9.3	8.9	7.7	7.5
Görerek ölçülen çökelti yüksekliği h'_2 (cm)	11.4	11.2	8.0	8.0
Deney numunesi üzerinde: Pistonla (ES)	62.8	61.0	26.3	26.7
Görerek (ESV)	77.0	76.8	28.4	28.5
Numune üzerinde: Pistonla (ES)	62.0		27.0	
Görerek (ESV)	77.0		28.0	
Sıcaklık (°C)	22		21	

1.5. SAYISAL DEĞERLER VE İRDELEME

Salt kil için ES=ESV=0 dır. Tam temiz bir kum için $h_1 = h'_2$ olduğundan ESV= 100' dür. Ancak, ES <100' dür. Zira piston kullanılması durumunda $h_2 < h'_2$ olduğundan pratikte ES ≤ 95 olmaktadır.

1.6. YÖNETMELİK KAYITLARI

a) ES ≥ 80 ise yüzey temizliği yönünden agrega iyi durumdadır.

b) 70 ≤ ES < 80 ise bu agrega sadece portland çimentosu kullanmak koşuluyla beton üretiminde kullanılabilir.

c) ES < 70 ise ince elemanları yok etmek için kumu yıkamak gerekmektedir.

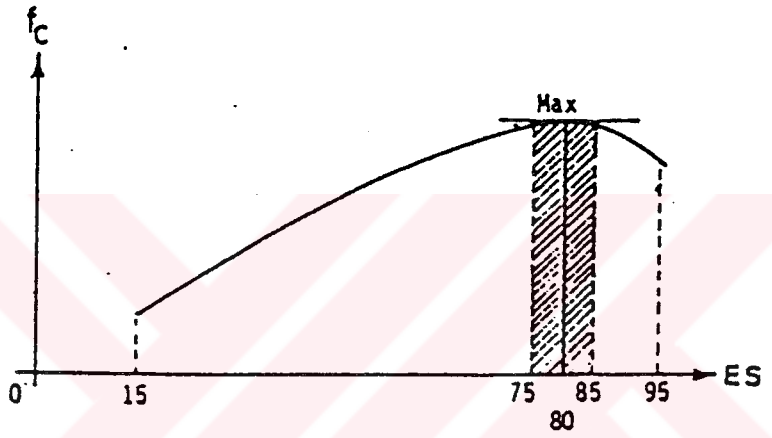
Burada, ES' yi petrografik yapı, çimento cinsi, deney sıcaklığı ve bölgenin iklimi etkilediğini dolayısıyla da yukarıdaki değerlerin ihtiyatla kullanmak gerektiğini belirtmek uygun olmaktadır.

1.7. ÖNEMLİ SIRALAMA

Bir agreganın içinde ince elemanların varlığı betonun işlenebilirliliğini iyileştirmektedir. Bu nedenle kum eşdeğerliğinin çok büyük olması (kumun çok temiz olması) katı bir beton (yerine konması zor) veren bir kuma karşılık gelmektedir. Bu durumda uygun bir işlenebilirlilik elde

(Ek 1'in devamı)
edebilmek için, karma suyunu artırmak gerekmektedir. Bu da kütlece su/ çimento oranının büyümesine, dolayısıyla da mekanik dayanımın azalmasına neden olmaktadır. İşlenebilirlilik için ilave edilen karma suyundan dolayı meydana gelen dayanım kaybı, ince elemanların yokluğundan doğan dayanım kaybından daha büyük olduğundan, ES' nin maksimum değeri (kumun tertemiz olması) optimum değer olmamaktadır. Bu sonuç, laboratuvarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla da doğrulanmıştır[64].

Bu deneylerde ES değerleri, beşer beşer, 15' ten 95' e kadar değişen kumlar kullanılmıştır. Üretilen tüm betonların işlenebilirlilikleri eşit idi. İşlenebilirliliğin ölçüsü olarak Abrams konisinin çökmesi esas alınmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre beton dayanımının ES ile değişimi Ek Şekil 2' de verilmektedir.



Ek Şekil 2. Beton dayanımının ES ile değişim şeması [64].

Görüldüğü gibi, eğrinin bir maksimumdan sonra uygun bir işlenebilirlilik sağlamak için karma suyu ilave edilmesi gereken bir faza karşılık gelen alçalan bir kolu bulunmaktadır. Diğer taraftan, maksimum dayanım genellikle 80' den belirli derecede küçük ES değerleri ile elde edilmektedir. Bu nedenle ES' nin 80' den büyük olmasını istemek yerine, petrografik yapısı Silis-Kalker' den ibaret olan kumlar için maksimum dayanıma karşılık gelen $75 \leq ES \leq 85$ değerlerini almasını sağlamak daha uygun olmaktadır.

EK - 2 : BİRİM ŞEKİLDEĞİŞTİRME ÖLÇERLERİ

2.1. GİRİŞ

Genellikle hesap yöntemleri yapının gerçek davranışını tam olarak dikkate alamamaktadır. Diğer taraftan bazı durumlarda hesap çok karmaşık bir durum almakta dolayısıyla da çözüm imkansız denecek kadar zor olmaktadır. Bu nedenle mühendisler bazen incelemelerini sürdürmek için deneylere dayalı amprik yöntemlere başvurmak zorunda kalmaktadırlar. Hatta gerçek boyutlu elemanlar ya da modeller üzerinde bazı deneyler de gerçekleştirmektedirler. Eğer hesap kabulleri isabetli yapılmamış ya da veriler sağlıklı bir şekilde bilinmiyorsa, mühendis bizzat yapı üzerinde taşıyıcı sistemini doğru seçip seçmediğini denetlemek gereğini de duyabilir. Bu durumda gerekli bilgi ancak ölçü yoluyla elde edilebilmektedir. Görüldüğü gibi böyle bir deneyde gerilmelerin belirlenmesi özel bir önem arz etmektedir. Şekildeğiştirme ölçerleri bu ölçüyü gerçekleştirmeye imkan vermektedir.

Laboratuvarlarda kullanılan şekildeğiştirme ölçerlerin kullanımları şantiyelerde de giderek yaygınlaşmaktadır. Bununla beraber kullanım alanlarının sınırlı olmadığı zannedilmemelidir. Bu başlık altında şekildeğiştirme ölçerleri kısaca tanıtmakta, üstünlük ve sakıncaları dikkate alınmak suretiyle kullanım sınırları belirtilmektedir.

2.2. HATIRLATMALAR

a) Şekildeğiştirme ölçerleri gerilmelerin doğrudan ölçülmesine imkan vermemektedir. Bunlar birim boy değişimlerini ($\varepsilon=\Delta l/l$) ölçen ekstanso-metrelerdir. Birim boy değişimleri yardımıyla gerilmelerin hesabı elastisite bağıntılarıyla gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle bunlara teknik literatürde bazen gerilme ölçer adının verilmesi doğru değildir.

b) Şekildeğiştirme ölçerleri sadece birim boy değişimlerinin ölçülmesinde değil aynı zamanda kaptörler (capteurs) içinde elektrik çeviricileri olarak da kullanılmaktadır.

2.3. ÇALIŞMA İLKELERİ

Uzunluğu l ve direnci R olan ince iletken bir tel dikkate alınsın. Eğer bu tel Δl kadar uzatılırsa elektrik direnci ΔR kadar değişir. Küçük boy değişimleri halinde birim direnç değişimiyle ($\Delta R / R$) birim boy değişimi ($\Delta l / l$) arasında, K genellikle 2 civarında bir değer alan bir katsayıyı göstermek üzere ;

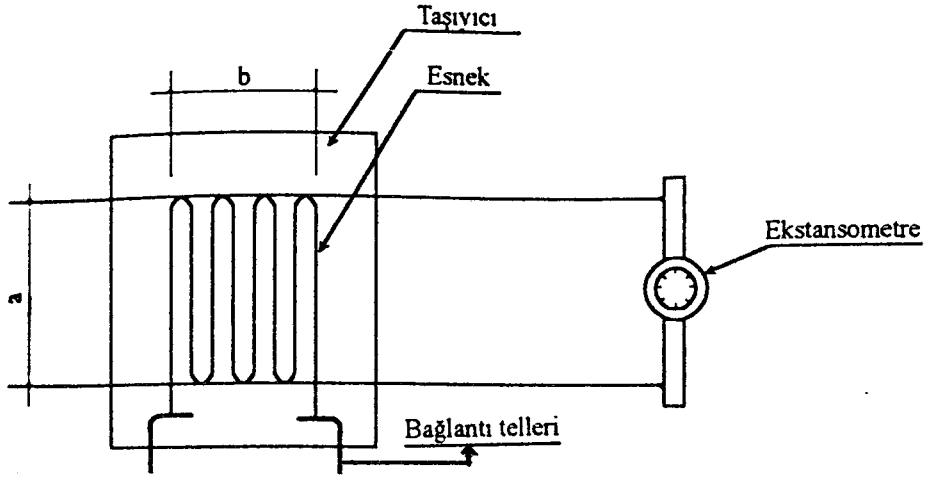
$$\Delta R / R = K \, \Delta l / l \qquad (E.1)$$

bağıntısı mevcuttur. Bu iletken telin bir yapıya tamamen yapışmış olduğu kabul edilirse (yapının iletken olması halinde elektrik yalıtkanlığına özen gösterilmeli) yapıyla aynı şekildeğiştirmeyi yapar. Bu durumda şekildeğiştirmeyi belirtmek için uygun bir elektrik aletiyle birim direnç ($\Delta R / R$) değişimini ölçmek yeterli olmaktadır. İşte şekildeğiştirme ölçerlerin çalışma ilkesi bundan ibarettir.

(Ek 2'nin devamı)

2.4 . BAŞLICA ŞEKİLLERİ

Şekildeğiştirme ölçerleri genellikle posta puluna benzetilmektedir. Gerçekten de yaygın kullanılan şekildeğiştirme ölçerlerin boyutları yaklaşık olarak posta pulu kadardır. Şekildeğiştirme ölçerleri bir yapının yüzeyine yapıştırılmak suretitle yerleştirilir. Klasik şemaları Ek-Şekil 3' de verilmektedir.



Ek-Şekil 3. Şekildeğiştirme ölçeri şeması.

Bu hassas tel yalıtkan malzemeden yapılmış iki ince yaprak arasında sandoviç şeklinde yerleştirilir. Bu tel yapraklar arasında bir ızgara görünümündedir. Bu ızgaranın a boyu, şekildeğiştirebilen aktif boydur. Bu boy (a), şekildeğiştirme ölçerinin başlıca geometrik özelliğidir.

Hassas telin çapından daha büyük çaplı iki birleştirme (connexion) teli şekildeğiştirme ölçerinin bağlantı kablolarını tutturmaya imkan vermektedir.

Dolambaçlı baskı tekniğinden türetilen, elektronikte yaygın olarak kullanılan bir imalat usulü, görünüşü klasik şekildeğiştirme ölçerlerinden biraz farklı olan şekildeğiştirme ölçerlerinin yapımına imkan vermektedir. Piyasada klasik telli ve basılı şekildeğiştirme ölçerlerinin çok değişik tipleri bulunmaktadır.

• Boyutlarına göre:

Piyasada bulunabilecek en küçük şekildeğiştirme ölçerlerinin aktif boyları 5-10 mm arasında değişmektedir. En uzun şekildeğiştirme ölçerinin aktif boyu ise 150 mm dir. Şekildeğiştirme gradyanının çok büyük olması halinde en küçük şekildeğiştirme ölçerleri kullanılmaktadır. Diğer taraftan zorunlu hallerde örneğin elemanın köşelerinde yine küçük boylu şekildeğiştirme ölçeri kullanılır.

Büyük boyutlu şekildeğiştirme ölçerleri ortalama bir şekildeğiştirme ölçmekte kullanılmaktadır. Örneği beton üzerinde agrega ve bağlayıcı çimento hamurunun şekildeğiştirmelerinin ortalama değerini elde etmek için oldukça uzun boylu şekildeğiştirme ölçerleri kullanmak gerekli olmaktadır. Aktif boyları 5-10 mm olan birim şekildeğiştirme ölçerleri ise metal yapılarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

(Ek 2'nin devamı)

• Şekillerine göre :

Şekildeğiştirme ölçerlerinin boyutlarının oranı değişik değerler alabilmektedir. Basım tekniği de çok değişik şekiller elde etmeye imkan vermektedir.

• Hassas ızgarayı oluşturan alaşım cinsine göre :

En yaygın kullanılan alaşım nikel-bakır (Ni - CuO) alaşımıdır. Ancak nikel-krom, nikel-krom-aliminyum-demir vb. alaşımlar da kullanılmaktadır.

• Taşıyıcı malzemesine göre :

Bu taşıyıcı polyester, epoksi reçinesi, akrilik, bakalit vb. malzemelerden yapılabilmektedir.

Şekildeğiştirme ölçerinin geometrisi, ızgara alaşımının yapımı ve taşıyıcı malzemesi seçimi şekildeğiştirme ölçerleriyle çözümlenecek problemin özellğine bağlıdır. Bunlar aşağıda belirtilmektedir.

- Şekildeğiştirme gradyanı, yapıştırılacak yerin özeliği,
- Ölçünün statik ya da dinamik oluşu,
- Deney sıcaklığı,
- Yapıyı oluşturan malzemenin cinsi,
- Ölçünün uzun süre takip edilip edilmemesi,
- Fiyatı.

Kataloglarda bulunmayan ancak gerekli olan şekildeğiştirme ölçerleri ısmarlama olarak da yaptırılabilmektedir. Diğer taraftan piyasada özel kullanımlı bir şekildeğiştirme ölçeri de mevcuttur. Bunlara daldırma tipi şekildeğiştirme ölçerleri adı verilmektedir Şekildeğiştirme ölçerleri beton dökümü esnasında betonun içine daldırmak amacıyla üretilmişlerdir.

2.5. YERLEŞTİRME

Daldırma tip şekildeğiştirme ölçerleri istisna olmak üzere şekildeğiştirme ölçerleri yapı üzerine yapıştırılmaktadır. Yapıştırmanın özenle yapılması şarttır. Zira alınan ölçülerin doğruluğu ancak yapıştırma işinin doğru olmasıyla mümkündür. Bu işlem vasıflı bir kişi tarafından gerçekleştirilmek zorundadır. Yapıştırmanın sağlıklı olabilmesi büyük ölçüde yapıştırılacak yüzeyin iyi bir şekilde hazırlanmasına bağlıdır. Örneğin, metal bir yapı için hazırlık işi beş aşamada gerçekleştirilmektedir. Bunlar; mekanik hazırlık (perdahlama), temizleme, kimyasal temizleme, damıtık su ile yıkama, nötürleştirme işlemleridir. Bu hazırlık işlemi beton için çok daha karmaşıktır.

Kullanılabilecek yapıştırıcılar çok çeşitli olmakla beraber, bunları dört sınfta toplamak mümkündür. Bunlar, selilozlu yapıştırıcılar, fenolik yapıştırıcılar, epoksitli yapıştırıcılar ve çabuk kuruyan (siyano-akrilik, polyester) yapıştırıcılardır.

Bu yapıştırıcıların özellikleri burada ayrıntılı bir şekilde irdelenmeyecektir. Diğer taraftan yapıştırıcının seçimi problemin türüne bağlıdır. Genellikle çok sayıda şekildeğiştirme ölçerini yerine yapıştırmadan önce yapıştırıcıyla ön denemelerin yapılması uygun olmaktadır.

(Ek 2'nin devamı)

Şekildeğiştirme ölçeri iyi bir şekilde yapıştırılıp bağlantı tellerine birleştirildikten sonra, ölçümleri almadan önce şekildeğiştirme ölçerinin korunması gereklidir. Gerçekten bu ölçerler neme ve bazı durumlarda mekanik darbelere ya da kimyasal etkilere karşı etkin bir şekilde korunmak zorundadır.

Laboratuvarda şekildeğiştirme ölçerinin üzerine ince bir vernik tabakasının konması yeterli olabilir. Şantiyelerde ise iki ya da üç kat farklı malzeme kullanmak gerekli olmaktadır. Eğer şekildeğiştirme ölçeri su içinde kalacaksa koruma işlemi 4-5 tabaka ile yapılabilmektedir.

Şekildeğiştirme ölçerinin yapıştırılması kolay bir iş değildir. Hassas olan bu işlem büyük özen gerektirmektedir. Şantiyelerde atmosfer koşullarından dolayı bu işlem çok daha zordur. Bir şekildeğiştirme ölçerinin yapıştırılması için gerekli zamanın mertebesi aşağıda verilmektedir.

- Laboratuvarda : Çelik üzerine yapıştırmak için 1/2 saat,
- Şantiyede : Bunun için iki örnekten söz edilebilir.

1) Metal bir yapıya bir asistan, iki operatör ve bir operatör yardımcısından oluşan dört kişilik bir ekip 45 şekildeğiştirme ölçerini ancak 5 günde yapıştırabilmektedir.

2) Aynı ekip öngerilmeli bir yapıya 60 şekildeğiştirme ölçerini 12 günde yapıştırabilmektedir.

2.6. GENEL ÖZELLİKLER

2.6.1. Ölçebilecekleri Şekildeğiştirme Sınırları

a) Ölçülebilen en küçük şekildeğiştirme

Duyarlı ve hassas bir ölçü aletiyle ideal şartlarda laboratuvar çalışmalarında 1 mikro deformasyonluk (1×10^{-6}) şekildeğiştirme ölçülebilmektedir. Şantiyede genellikle 5×10^{-6} değeri ölçülebilecek bir sınır değer olarak görülmektedir. Bu değerler gerilme cinsinden belirtilmek istenirse şantiyelerde beton ve çelik malzemesi için aşağıdaki değerleri almaktadır.

-Çelik için ;

$$\sigma_s = E_s \ \varepsilon_s \rightarrow \sigma_s = 2 \times 10^5 \ \times \ 5 \times 10^{-6} = 1 \text{ MPa}$$

-Beton için ;

$$\sigma_c = E_c \ \varepsilon_c \rightarrow \sigma_c = 40000 \ \times \ 5 \times 10^{-6} = 0.2 \text{ MPa}$$

b) Ölçülebilen en büyük şekildeğiştirme değeri normal sıcaklıkta yaygın kullanılan şekildeğiştirme ölçerleriyle $\varepsilon = 1 \times 10^{-2}$ (=0.01) dır.

2.6.2. Sınır Çalışma Frekansı

Küçük boyutlu boyutlu şekildeğiştirme ölçerleriyle 50000 Hz frekanslı dinamik etkileri ölçmek mümkün olmaktadır.

(Ek 2'nin devamı)

2.6.3. Kullanılabilecekleri Ortam Sıcaklıkları

Şekildeğiştirme ölçerlerinin 0°C dan 200°C hatta 300°C ye kadar kullanılmaları mümkündür. Bu konuda ayrıntıya girmeden normal sıcaklıktan uzaklaştıkça ölçü sonuçlarının yorumlanması ve teknolojik zorluklar çok daha karmaşık bir durum aldığını belirtmek uygun olmaktadır.

2.6.4. Zaman Etkisi

Bir şekildeğiştirme ölçerinin K duyarlılık katsayısı ($\Delta R/R = K \Delta l / l$) zamanla değişmez. Örneğin çok sayıda şekildeğiştirme ölçerli dinamometre pratik hayatta ayarı bozulmadan senelerce kullanılabilmektedir. Maalesef bir şekildeğiştirme ölçerinin katsayısının zamanla değişmez olması, bunlarla elde edilen ölçülerin zamanla değişmez olması için yeterli değildir. Gerçekten bir yapı üzerine yapıştırılmış bir şekildeğiştirme ölçerinin zamanla değişen bir şekildeğiştirmeye maruz kaldığı bilinmektedir. Bu değişimin büyük bir kısmı yapıştırıcının sünmesinden ileri gelmektedir. Bir nevi şekildeğiştirme ölçeri üzerine yapışık olduğu yapıya göre yavaş yavaş kaymaktadır.

Bu değişim (sapma) kısa süreli deneyler (örneğin bir sanat yapısının kabulu) ya da salt dinamik deneyler için çok önemli değildir. Bu değişimi azaltmak için yapıştırıcı kalınlığını mümkn olduğu kadar ince hale getirmek veya kararlılığı ile tanınan, ısıl işleme dayanıklı yapıştırıcılar kullanmak gerekir. Böylece bir kaç gün hatta bir kaç hafta süreli ölçümlere uygun düşen kararlılık elde edilebilir. Oldukça karmaşık olan bu yöntemler her zaman şantiyelerde doğrudan uygulanabilecek nitelikte değildir. Örneğin betonun sünmesinin ölçümü gibi çok uzun süreli ölçümlerin günümüzde şekildeğiştirme ölçerleriyle gerçekleştirilemeyeceği düşünülmektedir.

2.7. ÖLÇÜ ALETLERİ

Birim direnç değişiminin ($\Delta R / R$) ölçümü klasik elektrik ölçümleri ilkelerine dayanmaktadır. Ölçü aletlerinin temel şeması Wheatstone köprüsü gibidir. Bununla beraber çok küçük direnç değişimlerinin ölçülmesi gerektiğinden ekstansometre adı verilen özel aletlerin tasarlanmasını gerektirmektedir. Bu ölçülerde klasik Wheatstone köprüsü uygun olamamaktadır. Ölçü aletleri statik ve dinamik ölçü aletleri olarak iki grupta toplanabilir.

Statik ölçü aletleri, genellikle sıfır yöntemine göre çalışmaktadır. Köprü her ölçümde elle dengelenmektedir. En hassas yöntem budur. Bu aletlere, sadece bir aletle (n) adet şekildeğiştirme ölçerinin gösterdiği şekildeğiştirmelerin ölçülmesine imkan veren değişik organlar takılabilmektedir.

Dinamik ölçü aletleri, uzanım yöntemine göre çalışmaktadır. Yani Wheatstone köprüsünün diyagonalinde meydana gelen değişim akımı ölçülmektedir. Bu dengeyi bozan akım genellikle şekildeğiştirmeleri bir kaydedici organa nakletmek için yeterli değildir. Bu nedenle çıkış sinyallerini büyültmek gerekmektedir. Bu büyültme işi iki ayrı aletin kullanımını gerektiren farklı iki tekniğin uygulanmasını zorunlu kalmaktadır.

a) Sürekli akım aletleri :

Bu durumda şekildeğiştirme köprüsü sürekli akımla beslenir. Çıkış sinyalleri sürekli akımla çalışan bir büyütücü (amplifikatör) yardımıyla büyütülür. Bu tip aletin gerçekleştirilmesinde başlıca zorluk zamana göre iyi bir kararlılığın elde edilmesidir.

(Ek 2'nin devamı)

b) Alternatif akım aletleri :

Bunlarda şekildeğiştirme köprüsü alternatif akımla beslenir. Bu durumda büyültme işlemi alternatif büyütücülerle (amplifikatör) gerçekleştirilir.

Ölçü aletlerinin cinsi ne olursa olsun, bizzat şekildeğiştirme ölçerlerinde ya da şekildeğiştirme ölçerlerini alete birleştiren bağlantılarda ortaya çıkan parazit olayları azaltmak ya da tamamen bertaraf etmek için bazı önlemler almak gerekli olmaktadır. Burada başlıca hata sebeplerinin verilmesiyle yetinilmektedir.

- Bağlantı telleri ve şekildeğiştirme ölçeri üzerinde sıcaklık değişimi,
- Şekildeğiştirme ölçerinin elektrik yalıtkanlığının kaybolması,
- Parazit elektromotris kuvvetler (lehimlemeden doğan moment),
- Besleme akımının geçmesinden dolayı şekildeğiştirme ölçerinin ısınması,
- Kontak dirençleri,
- Kütle kusurları, bağlantı tellerinin kapasite değişimi (dinamik ölçümler için) vb.

2.8. ÜSTÜNLÜK VE SAKINCALARI

Şekildeğiştirme ölçerleri çok hassas ekstansometrelerdir. Şekillerinin, boyutlarının, teknolojilerin çok çeşitli oluşu bunların çok kolay kullanılabilir birer alet olmalarını sağlamaktadır. Yerine konmalarındaki incelik ve ölçümlerindeki hassasiyet vasıflı eleman gerektirmektedir. Bu vasıf çok kısa bir zamanda kazanılabilmektedir. Diğer taraftan bir kaç hata yapmadan bu beceri elde edilememektedir. Bu nedenle bu işe yeni başlayanların tecrübeli elemanlar yanında yetişmeleri kaçınılmazdır. Zira yapıştırma ve özellikle muhafaza şekli tatbikat alanında konuşulmakta fakat genellikle yayınlara konu olmamaktadır. Yapıştırıcı fiyatı, bağlantı tellerinin korunması, çıplak şekildeğiştirme ölçerinin fiyatını önemli derecede artırmaktadır. Ancak bu artışta ağırlıklı olan genellikle yerine koymada gerekli olan çalışma süreleridir.

2.9. KULLANIM ALANLARI

a) Laboratuvarda

- 15x30 cm beton silindir numuneler üzerinde elastisite modülü ölçümü,
- Kompozit (kirişler çelik tabliye betonarme) köprü tabliye modelleri üzerinde ölçüler,
- İki yol modeli üzerinde ölçüler,
- Otomatik direkli tıkaç modelleri üzerinde ölçüler,
- Kaptör üretiminde (zemin basınç kaptörü).

b) Yapılarda

- Betonarme (plak köprü üzerinde),
- Öngerilmeli beton (kabul deneyinde),
- Kompozit yapılar (kabul deneyinde),
- Çelik yapılarda (kabul deneyinde).

Özetle, İnşaat mühendisliği alanında şekildeğiştirme ölçerleri genellikle beton ve çelik malzeme üzerine yerleştirilmektedir. Ek Tablo 2' de, bu iki uygulama arasında bir karşılaştırma yapılmaktadır. Bu çizelgeden görüldüğü gibi çeliğe göre, beton üzerindeki ölçümler çok daha zor olmaktadır.

(Ek 2'nin devamı)

Ek Tablo 2 . Birim şekildeğiştirme ölçerlerinin beton ve çelik üzerine yapıştırılmasının karşılaştırılması.

MALZEMENİN YAPISI	ÇELİK HOMOJEN	BETON HETEROJEN
Ölçer seçimi	Her çeşit boyut uygundur.	Ortalama bir şekildeğiştirme ölçmek için ölçer yeteri kadar uzun olmalıdır. Bu büyüklük agrega tane boyutuna bağlıdır.
Ölçerlerin dağılımı	Malzemeden meydana gelen dağılım yoktur.	Belirli bir yerdeki ölçünün ortalama şekildeğiştirmeyi vermesinin garantisi yoktur. Bu nedenle ölçü noktalarının sayısını artırmakta yarar vardır. Bu dağılım sonuçların yorumlanmasında dikkate almak gerekmektedir.
YERLEŞTİRME Yüzeyin Hazırlanması	Genellikle problem yoktur.	Agrega yapısı ve bürüt beton yüzeyine bağlı olarak bazen zordur. Çok sert agrega için taşlamak gerekli olabilmektedir.
Yapıştırma	Geleneksel	Kurutmadan sonra birinci tabaka sürülür. Yeniden hazırlanan yüzeye ölçer yapıştırılır. Yerleştirme süresi: Çelik üzerine yerleştirmek için gerekli sürenin yaklaşık iki katıdır. Eğer yüzey çok boşluklu ise yerleştirmek bazen imkanzısdır.
Koruma	—	Havanın bağıl neminden ve bizzat betondan gelen suya karşı ölçerin korunması gerekmektedir.
DENGELEME	Dengeleme ölçerinin bir çelik plak üzerine yapıştırılarak yapı ile temas ettirilmesi etkin bir dengelemeye yetmektedir.	Dengeleme ölçeri yapıyı oluşturan aynı bir beton parçası üzerine yapıştırılır. örneğin yapıdan çıkartılmış karot üzerine ancak küçük boyutlu bir tanık numuneye göre yerine konmuş betonun ısıl eylemsizliği nedeniyle hiçbir zaman aktif ölçerle aynı ısıl koşullarda bulunan bir dengeleme ölçerinin yerleştirilmesi sağlanamaz.
BÜYÜKLÜK MERTEBELERİ	E=2.105 MPa, K=2 ve σ=10 MPa için $\Delta R/R=2\varepsilon=\sigma/E$ $\Delta R/R=2x10/2.105$ $\Delta R/R=1x10^{-5}$ in elde edilmesi 1 MPa'ya karşılık gelmektedir. Bu da bir yapı üzerindeki ölçümler için yeterlidir.	E=40 000 MPa, K=2 ve σ=0.1 MPa için $\Delta R/R=2x0.1/4.104=5.10^{-6}$ bulunur. Bu şantiyede mümkün mümkün olabilecek en yüksek hassasiyettir.
KULLANILABİLECEKLERİ AKIM	Ölçü köprüsü 120 Ω'luk ölçerlerle 3 Volt yada daha büyük gerilimler altında beslenebilir.	Ölçerlerin ısınması dikkate alınarak şekildeğiştirme ölçeri köprüsü 1.5V ya da daha küçük gerilim altında beslenir. Bu nedenle çelige göre bir duyarlılık kayıbı olmaktadır. Oysa Yukandaki uyarı beton üzerinde, çeliğe göre daha yüksek bir duyarlılığa ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

EK-3 : MERKEZİ BASINÇTA BETONUN KIRILMASI ESNASINDA ADERANS BÖLGESİNE UYGULANAN ÇEKME GERİLMESİ

Eksen doğrultusunda merkezi basınca maruz homojen izotrop bir numune dikkate alınsın. Bu numunenin boyuna doğrultudaki birim şekildeğiştirmesi ε_1 olsun. Buna karşılık gelen enine birim şekildeğiştirme ise $\nu\varepsilon_1$' dir.

Bu numune nihai enine şekildeğiştirmesi $\nu\varepsilon_0$ olacak şekilde ek bir üniform yanal gerilme etkisinde bırakılırsa, bu durumda enine birim şekildeğiştirme $\nu(\varepsilon_1-\varepsilon_0)$ olacağından, enine basınç gerilmesi,

$$\sigma = E\,\nu(\varepsilon_1-\varepsilon_0) \qquad (E.2)$$

olarak yazılabilir. Bu sonuç agrega ve çimento hamuruna uygulanabilir. Agrega için $\varepsilon_{1a} = \varepsilon_1$ ve $\varepsilon_{0a} = \varepsilon_0$; çimento hamuru için $\varepsilon_{1c} = \varepsilon_1$ ve $\varepsilon_{0c} = \varepsilon_0$ olarak kabul edilsin.

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

$$\nu_a\varepsilon_{0a} = \nu_c\varepsilon_c \qquad (E.3)$$

yazılabilir.

Agrega ve çimento hamurundaki yanal gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{at} = E'_a\,\nu_a(\varepsilon_{1a}-\varepsilon_{0a}) \qquad (E.4)$$
$$\sigma_{ct} = E'_c\,\nu_c(\varepsilon_{1c}-\varepsilon_{0c}) \qquad (E.5)$$

bağıntılarıyla hesaplanır. (E.4) ve (E.5) bağıntıları taraf tarafa çıkarılırsa, aderans bölgesine uygulanan çekme gerilmesi;

$$\sigma_{adt} = E'_c\,\nu_c(\varepsilon_{1c}-\varepsilon_{0c}) - E'_a\,\nu_a(\varepsilon_{1a}-\varepsilon_{0a}) \qquad (E.6)$$

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

(E.3) bağıntısından çekilen ε_{0c} değerini (E.5) bağıntısında yerine yazılırsa, aderans bölgesine uygulanan çekme gerilmesi;

$$\sigma_{adt} = E'_c\,(\nu_c\varepsilon_{1c} - \nu_a\varepsilon_{0a}) \qquad (E.7)$$

olarak elde edilir.

8. ÖZGEÇMİŞ

Yasemin GÜRSOY 1972 yılında Ordu' da doğdu. İlkokulu, 1., 2., ve 3. sınıfları İstanbul Gültepe İlkokulunda, 4. ve 5. sınıfları ise Bingöl Yenişehir 100. Yıl Temel Eğitim Okulunda okuyarak, 82-83 öğretim yılında tamamladı. Ortaokulu, 1. sınıfı Bingöl Merkez 100. Yıl İlköğretim Okulunda 2. ve 3. sınıfları Ankara Abdi İpekçi Ortaokulunda okuyarak, 85-86 öğretim yılında bitirdi. Liseyi Ankara' da Mustafa Kemal Lisesinde okudu ve 88-89 öğretim yılında bu okuldan mezun oldu. Aynı yıl, üniversite sınavını kazanarak, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne kayıt oldu ve bu bölümden 92-93 öğretim yılında mezun oldu. Aynı yıl, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Yüksek Lisans öğrenimine başladı. İngilizce bilen Yasemin GÜRSOY Lisansüstü öğrenimine devam etmekte ve Ordu Meslek Yüksekokulu İnşaat bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ