

**T.C.
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİYLE BETONDA
GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞININ
DEĞERLENDİRMESİ**

MAHFUZ PEKGÖZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADYAMAN, 2020

**T.C.
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİYLE BETONDA GERİLME-ŞEKİL
DEĞİŞTİRME DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRMESİ**

Mahfuz PEKGÖZ

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez 16/06/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Danışman

Prof. Dr. Hanifi ÇANAKCI
Üye

Prof. Dr. Murat PALA
Üye

Doç. Dr. Tayfun SERVİ
Enstitü Müdürü V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİYLE BETONDA GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRMESİ

Mahfuz PEKGÖZ

Adıyaman Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Yıl : 2020, Sayfa sayısı: 76

Jüri : Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Prof. Dr. Hanifi ÇANAKCI
Prof. Dr. Murat PALA

Beton taşıyıcı kompozit yapı malzemesidir. Taşıyıcı malzemelerin yük altındaki şekil değiştirme davranışları, içinde bulunduğu yapı sistemi için oldukça önemlidir. Özellikle gevrek ve yarı-gevrek davranış gösteren taşıyıcı yapı malzemelerinin çeşitli yük kademelerindeki davranış biçimlerinin araştırılması, mekanik özellik değerlendirmesinde avantaj sağlar. Bu amaçla, bu çalışmada; farklı gerilme-şekil değiştirme bölgesinde yer alan beton örneklerin bünyesinde meydana gelen deformasyonlara ait veriler görüntü işleme tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Deney örnekleri; elastik, plastik ve kırılma noktalarında 2 saat süresince elastik sınır yükü altında bekletilmişlerdir. Görüntü işleme yöntemi ile gerçekleştirilecek mikroyapı çalışmaları için örneklerle epoksi emdirilerek ince kesit yöntemine hazır hale getirilmişlerdir. Epoksi emdirilen beton deney örneklerinden her bir seri için ince kesit örnekleri alınarak, mikroskopta incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Çekilen fotoğrafların bilgisayar ortamına aktarılması sonrasında görüntü işleme yöntemi ile deformasyon araştırmaları yapılmıştır. Sonuç olarak; mikroyapı incelemelerinde artan gerilme ve şekil değiştirmelere bağlı olarak çatlak oluşumu ve tiplerinin değiştiği, çatlak oluşumlarının yükleme yönüne paralel şekilde beton içerisinde ilerlediği ve özellikle çimento hamuru-agrega ara yüzeyi bölgesini tercih ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton; Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı; İnce Kesit; Görüntü İşleme

ABSTRACT

MSc Thesis

EVALUATION OF STRESS-SHAPE BEHAVIOR IN CONCRETE BY IMAGE PROCESSING METHOD

Mahfuz PEKGÖZ

Adiyaman University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Year : 2020 , Number of pages: 76

Jury : Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Prof. Dr. Hanifi ÇANAKCI
Prof. Dr. Murat PALA

Concrete is composite load-bearing building materials. The deformation behavior of the load-bearing materials under load is very important for the building system in which it is located. Investigation of the behavior patterns of load-bearing building materials which exhibit brittle and quasibrittle behavior at various load levels provides an advantage in the evaluation of mechanical properties. For this purpose, in this study; the data of the deformations occurring within the concrete samples in different stress-strain regions were investigated using image analysis technique. Experimental examples; They were kept under elastic limit load for 2 hours at elastic, plastic and breaking points. For microstructure studies to be carried out by image analysis method, epoxy has been absorbed into samples and made ready for thin section method. Thin section samples were taken for each series from epoxy impregnated concrete test samples, examined under a microscope and photographed. After transferring the photographs to the computer, deformation researches were carried out by image analysis method. As a result of microstructure studies, it was determined that crack formation and types change due to increased stress and deformations, crack formations move in concrete parallel to the loading direction and especially prefer cement paste-aggregate interface area.

Key Words: Concrete; Stress-Strain Behavior; Thin Section; Image Analysis

DESTEKLER

Bu tez çalışması bilimsel araştırma projesi (BAP) koordinasyon birimi tarafından MÜFYL/2019-0004 numaralı proje ile desteklenmiştir.



BEYAN

“Görüntü İşleme Yöntemiyle Betonda Gerilme-Şekil Değişirme Davranışının Değerlendirmesi” başlıklı tezimde çalışmaların tamamen akademik kurallara ve etik değerlere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

Mahfuz Pekgöz

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli hocam Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN'a, ince kesitlerin değerlendirilmesinde ve tezdeki değerlendirmelerde yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Dr. Kadir GÜÇLÜER hocama, ilgisini ve önerilerini göstermekten kaçınmayan Prof. Dr. Murat PALA, Prof. Dr. Hanifi ÇANAKCI, Doç. Dr. İlker TEKİN ve Doç. Dr. İnan KESKİN hocalarıma, Çimko beton santrali ve çalışanlarına, Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Birimine sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme, eşime ve değerli arkadaşlarıma da sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	II
ABSTRACT.....	III
DESTEKLER.....	IV
BEYAN.....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
İÇİNDEKİLER	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
RESİMLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XIV
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
3. KIRILMA MEKANİĞİ	11
3.1. Kırılma	11
3.2. Kırılma Mekanîği ve Tarihsel Gelişimi	12
3.3. Betonun Kırılma Mekanîği.....	13
3.3.1. Betonda Lineer Elastik Kırılma Teorisi	14
3.3.2. Betonda Lineer Olmayan Kırılma Mekanîğinin Yaklaşımları.....	15
3.3.3. Gerilme Deformasyon Eğrisi	17
3.3.4. Göçme Agregası Etkisi	18
3.3.5. Çatlak Yayılımını Önleyici Etkiler.....	19
3.3.6. G_F Kırılma Enerjisi.....	21
4. MATERYAL ve METOD.....	22
4.1. Materyal	23
4.1.1. Beton Presi	24
4.1.2. Deney Kalıpları, Epoksi Malzemeleri ve Vakum Pompasının Hazırlanması	25
4.1.3. Etüv	26
4.1.4. Optik Mikroskop	27
4.1.5. Ultrasonik Test Cihazı.....	28
4.1.6. Dijital Fotoğraf Makinesi	29
4.2. Metod	29

4.2.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	37
4.2.2. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	37
4.2.3. Basınç Dayanımı Deneyi.....	38
4.2.4. Mikroyapı Çalışmaları.....	39
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	40
5.1. Birim Hacim Ağırlık Bulguları	40
5.2. Basınç Dayanımı Bulguları	41
5.3. Ultrases Geçiş Hızı Bulguları.....	45
5.4. Dinamik Elastisite Modülü Bulguları	47
5.5. Makroyapı Bulguları	48
5.6. Mikroyapı Bulguları	52
5.6.1. E.1-E.2 Beton Örnekleri.....	53
5.6.2. P.1-P.2 Beton Örnekleri	54
5.6.3. P.5-P.6 Beton Örnekleri	55
5.6.4. P.4 Beton Örneği	57
5.6.5. P.3 Beton Örneği	58
5.6.6. K.1-K.2 Beton Örnekleri.....	61
5.6.7. Belirgin Çatlakların Analiz Verileri ile Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisi Arasındaki İlişkinin Değerlendirilmesi	62
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	72
KİŞİSEL BİLGİLER	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 1 m ³ betonda kullanılan malzeme miktarları	24
Çizelge 4.2 Beton örneklerinin sınıflandırılması ve gerilme değerleri	32
Çizelge 5.1 Beton birim ağırlıkları (kg/m ³)	40
Çizelge 5.2 Çimko Beton Adıyaman Tesisinde üretilen beton bileşenlerinin miktarı	41
Çizelge 5.3 Birim ağırlıklarına göre betonların sınıflandırılması	41
Çizelge 5.4 Çalışmada kullanılan beton örneklerinin basınç dayanımı bulguları.....	42
Çizelge 5.5 Elastik, plastik ve kırılma bölgelerdeki değerler	45
Çizelge 5.6 Ultrases geçiş hızı bulguları.....	46
Çizelge 5.7 Beton örneklerin ultrases değerlerine göre sınıflandırılması	46
Çizelge 5.8 Dinamik elastisite modülü	47
Çizelge 5.9 Beton örneklerin nicel verileri	53
Çizelge 5.10 P.4 beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri.....	58
Çizelge 5.11 P.3.D beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri.....	59
Çizelge 5.12 P.3.B beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri	60
Çizelge 5.13 P.3.A beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri.....	61
Çizelge 5.14 K.1.A beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri	62
Çizelge 5.15 K.2.B beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri	62
Çizelge 5.16 Ortalama belirgin çatlak boyların nicel verilerini kullanılarak elde edilen parametreler.....	63
Çizelge 5.17 Ortalama belirgin çatlak genişliklerin nicel verilerini kullanılarak elde edilen parametreler.....	65
Çizelge 5.18 Ortalama belirgin çatlak alanların nicel verilerini kullanılarak elde edilen parametreler.....	66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Basınç altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi	3
Şekil 1.2 Betonun göçme etkisinde iken harç ve agrega dayanımlarından kaynaklı çatlakların oluşumu	4
Şekil 1.3 a) Gerilme-şekil değiştirme eğrisi b) Kırılma işlem bölgesi.....	5
Şekil 2.1 Basınç artışı ile çatlak ilerleyişinin açıklanması	6
Şekil 3.1 Kırılma mekaniğinde tarihi gelişim aşamaları	13
Şekil 3.2 Agrega, çimento ve betonun karakteristik gerilme-şekil değiştirme eğrisi	15
Şekil 3.3 a) Çekmeye maruz bir örneğin gerilme-şekil değiştirme eğrisi b) Kırılma süreci bölgesi.....	16
Şekil 3.4 Kırılma süreci bölgesinin gelişimi	17
Şekil 3.5 Tek eksenli basınç altında idealize edilmiş bir agrega partikülü	19
Şekil 3.6 Sünek ve yarı gevrek malzemede çatlak ucunda meydana gelen durumlar	20
Şekil 3.7 Betonda tokluk artışına neden olan mekanizmalar	21
Şekil 4.1 Beton örneklerinin yük kademelerindeki deformasyonları.....	22
Şekil 4.2 Beton örneklerin mikroyapı süreci.....	23
Şekil 5.1 Beton örneklerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri	42
Şekil 5.2 Ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	43
Şekil 5.3 Elastik bölgenin bulunması ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi arasındaki korelasyon	44
Şekil 5.4 Ortalama değerlerden oluşan gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki elastisite modülleri	44
Şekil 5.5 Birim hacim ağırlık bulguları ile ultrases geçiş hızı bulguları arasındaki ilişki.....	46
Şekil 5.6 Dinamik elastisite modülü ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki	48
Şekil 5.7 E.1-E.2 beton örneklerinin mikroyapısı (maksimum gerilme değerinin %40'lık kısmı).....	54
Şekil 5.8 P.1-P.2 beton örneklerinin mikroyapısı (maksimum gerilme değerinin %60'lık kısmı).....	55

Şekil 5.9 P.5-P.6 beton örneklerinin mikroyapısı (maksimum gerilme değerinin %85'lik kısmı).....	56
Şekil 5.10 P.4 beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi (maksimum gerilme değerinin %81'lik kısmı)	57
Şekil 5.11 P.3.D beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi (maksimum gerilme değerinin %85'lik kısmı)	59
Şekil 5.12 K.1.A beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi, K.2.B beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi	61
Şekil 5.13 Beton örneklerin gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak boyları aralarındaki ilişki.....	63
Şekil 5.14 Beton örneklerin gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak genişlikleri aralarındaki ilişki.....	64
Şekil 5.15 Beton örneklerin gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak alanları aralarındaki ilişki.....	66
Şekil 5.16 Gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile çatlaklar arasındaki ilişki.....	69

RESİMLER DİZİNİ

Resim 4.1 a) Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarındaki press cihazı b) Devlet Su İşleri Malzeme Laboratuvarındaki press cihazı.....	25
Resim 4.2 Devlet Su İşleri Malzeme Laboratuvarındaki a) Datalogger b) Straingage	25
Resim 4.3 Deneyde kullanılan a) Küp kalıp b) Ahşap kalıp c) Epoksi d) Vakum pompası	26
Resim 4.4 Deneyde kullanılan etüv	27
Resim 4.5 Deneyde kullanılan mikroskop	28
Resim 4.6 Ultrasonik test cihazı	28
Resim 4.7 28 günlük a) Kür havuzunda b) Beton örnekleri	30
Resim 4.8 a) Beton örneğinin orta nokta belirleme b) Strain gauge c) DSI'nin deformasyon kontrollü press cihazı d) Datalogger	30
Resim 4.9 Beton örneklerinin a) Hassas terazi ile birim ağırlıklarının belirlenmesi b) Ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi	31
Resim 4.10 Press uygulaması.....	32
Resim 4.11 75 °C sıcaklıktaki etüvde bekletilen beton örnekleri	33
Resim 4.12 a) 16×16×16 cm 10 adet özel ahşap kalıpların yapılması b) Hazırlanan epoksinin beton örneğinin üstüne döküm aşaması c) Vakum pompası düzeneğin hazır hale getirilmesi d) Kesim işlemi için hazır hale gelen epoksili beton örnekleri	34
Resim 4.13 Beton örneklerinin a) Sıra halinde dizilmesi b) Baş kesme makinesi ile kesilmesi c) 2 eşit parçaya bölünmesi d) 4 eşit parçaya bölünmesi ve isimlendirilmesi.....	34
Resim 4.14 Makro ölçüm için hazırlanan beton görünümü a) Cilasız b) Cilalı	35
Resim 4.15 İnce kesitlerin a) Mikroskopa yerleştirilmesi b) Görüntülerini bilgisayara aktarımı	35
Resim 4.16 Beton örneklerin çatlak analiz görüntüleri.....	36
Resim 5.1 E.1-E.2 beton örneklerin makroyapısı	49

Resim 5.2 P.1-P.2 beton örneklerin makroyapısı.....	50
Resim 5.3 P.4 beton örneğinin makroyapısı	50
Resim 5.4 P.5-P.6 beton örneklerin makroyapısı.....	51
Resim 5.5 P.3 beton örneğinin makroyapısı	51
Resim 5.6 K.1-K.2 beton örneklerin makroyapısı	52
Resim 5.7 P.3.B beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi	60
Resim 5.8 P.3.A beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi.....	60



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ε	: Birim deformasyon
σ	: Gerilme
E	: Elastisite modülü
G_F	: Kırılma enerjisi
kg	: Kilogram
mm	: Milimetre
Hg	: Cıva
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
MPa	: Megapaskal
GPa	: Gigapaskal
n	: Birim hacim ağırlık
w	: Ağırlık
v	: Numunenin hacmi
V	: Ses üstü dalga hızı
L	: Problar arası mesafe
t	: Zaman
P	: Uygulanan yük
A	: Yüzey alanı
E_d	: Dinamik elastiklik modülü
μ	: Poisson oran
m^3	: Metre küp
R^2	: Korelasyon katsayısı
V_p	: Ultrases geçiş hızı

Kısaltmalar

LEKM	: Lineer elastik kırılma mekaniği
CCD	: Görüntüler veren kamera türü
EPKM	: Elasto-plastik kırılma mekaniği
KSB	: Kırılma süreci bölgesi
DIC	: Dijital görüntü korelasyonu
DPIV	: Tanecik hızı görüntüleme
TS	: Türkiye standartları
DSİ	: Devlet Su İşleri
CEM	: EN 197 standart serisine göre çimento tipi
EN	: European Norm, Avrupa standartları
SDF	: Süper odak derinliği
B.H.A	: Birim hacim ağırlık
S.D	: Standart sapma

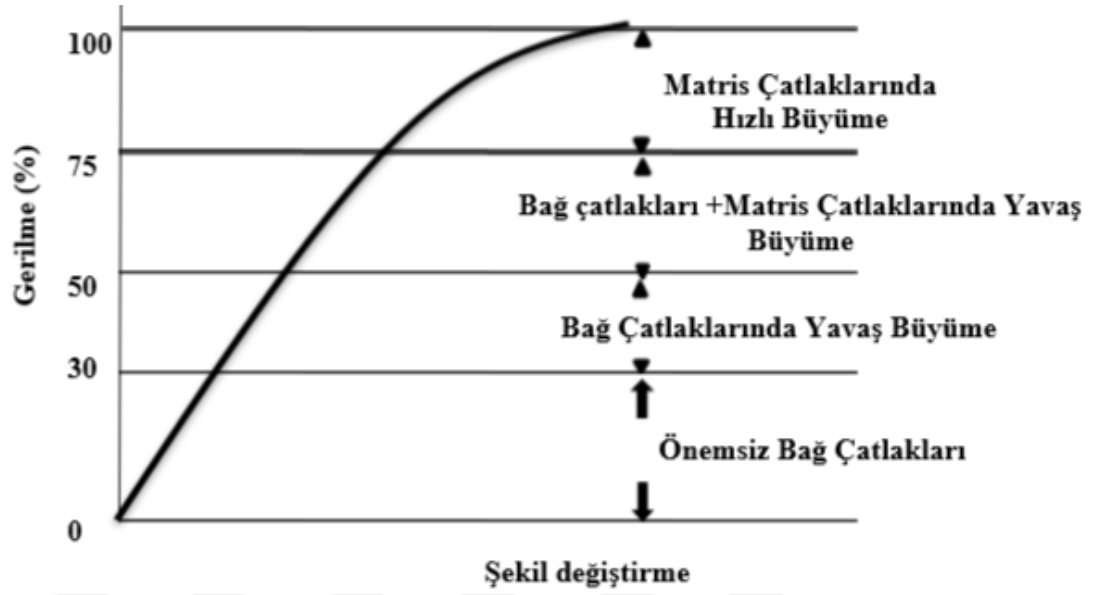
1. GİRİŞ

Beton ve betonarme yapıların hayatın çok değişik alanlarda gittikçe yaygınlaşarak kullanılması sonucu yapı mühendisleri ve malzemeciler betonu tanımlarken artık basınç dayanımı, elastisite modülü, çekme dayanımı, poisson oranı gibi bilinen karakteristik indeksler yerine betonun yük altındaki davranışı ile ilgili (elastik, plastik, elasto-plastik ve kırılma) tanımları geliştirilmeye çalışmaktadırlar. Beton, yük altında birçok hasara uğramaktadır. Betona verilen hasar genellikle çatlak oluşumu ile ilişkilidir ki bu da sadece malzemenin uzun süreli dayanıklılığında bozulmaya neden olmakla kalmaz aynı zamanda işlevselliğini yapısal açısından tehlikeye atar. Çatlama nedenine bakılmaksızın betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler bu da yüklemekten sonra betonun davranışında önemli bir rol oynar. Yüklemeden sonra betonun içyapısında meydana gelen hasarı sağlıklı bir şekilde değerlendirmek için mikro yapıda çatlakların başlaması, ilerlemesi ve düzensiz dağılması süreçlerini çok iyi anlamak hayati öneme sahiptir. Bu çalışmalar sonucunda da yük altında meydana gelen gerilmeler sonucu şekil değiştiren beton kompoziti için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi göz önüne alınarak çeşitli eğriler ve modeller elde edilmiştir.

Genel olarak gerilme, belli bir kesitteki birim alana gelen kuvvet olarak tanımlanabilir. Eğer malzememiz beton ise press altında gerilme daha çok önem kazanmaktadır.

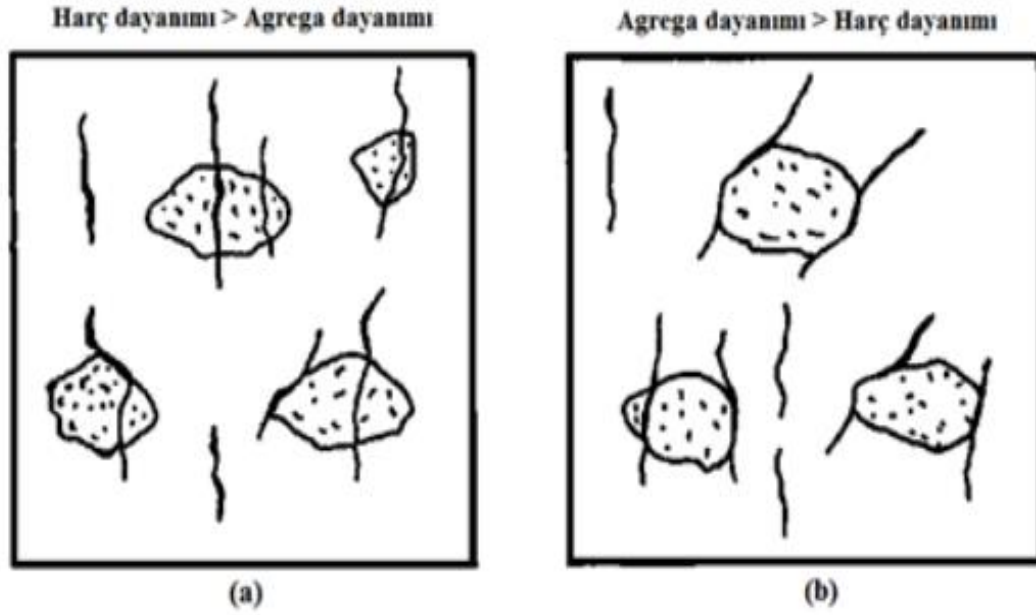
Betonun yükleme altındaki davranışını etkileyebilecek etkenlerin pek çok olması sebebiyle farklı özelliklere sahip betonlar üretilmiştir. Bu farklı özellikte üretilen betonlar basınç, çekme, darbe, vs. dayanımları bakımından birbirlerinden ayrılırlar. Dayanım farklılığından dolayı gerçek hayatta adına beton sınıfı dediğimiz ve betonları karakter itibarıyla birbirlerinden ayırt etmeye yarayan, statik hesaplamalarda esas alınan bir kavram geliştirilmiştir. Bundan dolayı beton için sadece bir tek gerilme-şekil değiştirme davranış tanımı mümkün değildir. Fakat kaba bir tabirle, eğer beton çimento hamuru ve agrega gibi iki malzemeden meydana geldiğini kabul edersek betonun kısa süreli yükleme altındaki davranışı açıklanabilir. Betonun kompozit davranışını meydana getiren iki önemli unsur vardır; kompoziti meydana

getiren malzemeler ve malzemelerin birbirleriyle olan etkileşimi. Bundan dolayı yük altındaki betonun davranışını çimento ve agrega özellikleri belirler. Bunların dışında farklı elastisite modülüne sahip malzemelerin de işin içine girince beton, tek eksenli yükleme altında çok büyük oranında doğrusal olmayan davranış gösterir. Genel anlamda, tek eksenli yükleme altındaki betonda kırılma işlemi üç basamakta gerçekleşir; başlangıç çatlakları, yavaş büyüyen çatlaklar ve çatlakların gelişimi. Şekil 1.1’de görülebileceği gibi kırılma yükünün ilk %30’luk kısmında gerilme-şekil değiştirme eğrisi oldukça doğrusaldır. %30’luk yükleme kısmında agrega ve harç bağ çatlakları meydana gelebilir ama yükleme az miktarda olması nedeniyle oluşan çatlakların ilerleme eğilimi çok azdır. Maksimum gerilmenin %30-%50 değerinde betonda oluşan çatlaklar bölgede yavaş yavaş ilerlemeye başlamaktadır. Bu değerde çatlakların en fazla olduğu yer çimento hamuru ve agreganın ara yüzeyleridir. Maksimum gerilmenin %50’i değerinden sonra çatlaklar düzenli olarak artmaya ve büyümeye başlamaktadır. Bu kısımda gerilme-şekil değiştirme eğrisi doğrusallıktan sapmaya başlamaktadır. Bu gerilme değerinde çimento hamurun içinde az da olsa çatlaklar oluşmaya başlayabilir. Maksimum gerilmenin %50-75’i değerinde gerilmenin arttırılmasıyla birlikte çatlaklar malzemenin ara yüzeylerinden çimento hamuru içerisine doğru ilerlemeye başlamaktadır. Bundan dolayı maksimum gerilmenin %50-75’i değerinden sonra mikro çatlaklar aniden ve önemli ölçüde artış göstermektedir. Maksimum gerilmenin %75’i değerine ulaşıldığında ise çimento hamuru içerisinde çatlak oluşumu ve ilerleme hızı artarak beton içerisinde sürekli bir mikro çatlak ağı meydana getirmektedir. Bu gerilme düzeyine kadar hacimsel olarak küçülen numune bu düzeyden sonra hacim artışı göstermektedir. Bu gerilme değeri küçülme sınırı olarak adlandırılır. Sonunda betonun içyapısı bozulur, göçme olayı başlar ve betonda kırılma meydana gelmektedir [1,2].



Şekil 1.1 Basınç altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi

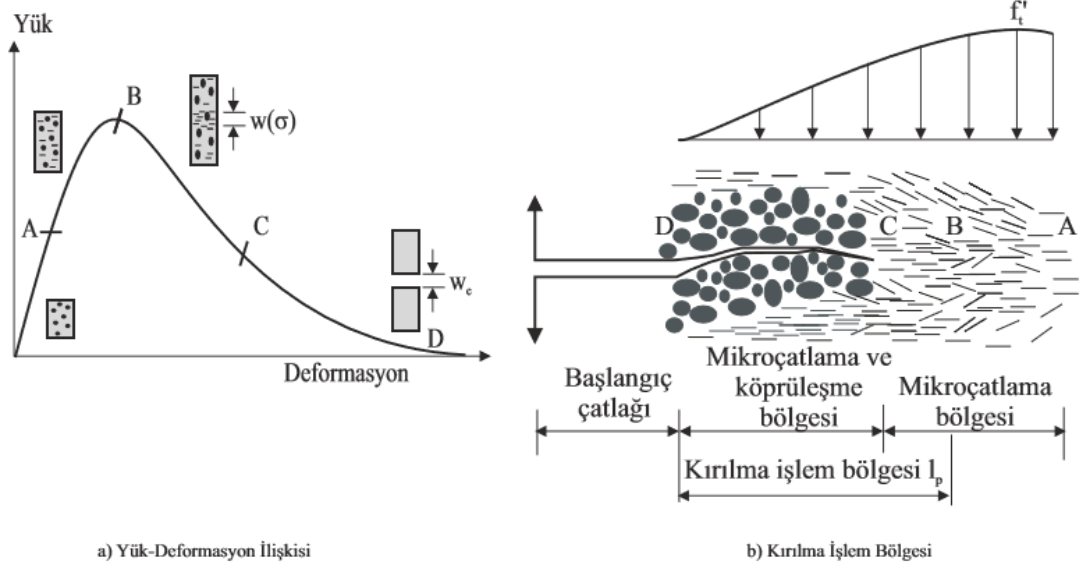
Şekil 1.2'deki birinci durumda (a), göçme anındaki betonda çatlakların oluşumunu gösterilmektedir. Başka bir deyişle agrega dayanımı harç dayanımından küçük olduğu durumlarda harçta oluşan çatlaklar agreganın içyapısına geçmiş olacak bununla beraber çatlaklar büyüyerek gelişecek ve beton numunesinde boyuna çatlaklar görülecektir. Beton numunesinde oluşan çatlaklar çekme dayanımının aşılması ile ilgili olduğundan betonun tam olarak dayanımına ulaşmadan beton numunesi kırılacaktır. İkinci durumda (b) ise çimento hamurunun dayanımı eğer agrega dayanımından küçükse çatlak matris ile agreganın ara kesit yüzeyinde ilerleme sağlayacak ve kırılma harçtan kaynaklanacaktır [3]. Birinci ve ikinci durumlarda ve şekillerde görüldüğü gibi agrega ve çimento hamurundaki bağ dayanım işlevleri farklıdır. Birinci durumda çatlama veya kırılma şeklindeki bağ dayanımı çok çok azdır. İkinci durumda ise bağ dayanım işlevi çok fazladır. Gerçek beton dayanımı altında beton numunesinin kırılabilmesi ve çatlak gelişiminin beton harcı içerisinde oluşması bakımından harcın dayanımının agrega dayanımından küçük olması gerekmektedir [3].



Şekil 1.2 Betonun göçme etkisinde iken harç ve agrega dayanımlarından kaynaklı çatlakların oluşumu [3]

Lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) hesaplamalarından, betonun kırılma davranışı önemli ölçüde saptığı gözlemlenmiştir. Ama buna rağmen büyük ölçekli beton yapıların kırılma davranışı LEKM'ye uymaktadır. Bu kısımda bunun nedenini açık bir şekilde ifade edilecektir. Yapılacak açıklamayla birlikte betona uygulanan lineer olmayan kırılma teorilerinde anlaşılması sağlanacaktır. LEKM hesaplamasında betonda görülen davranışın sapmasının nedeni çatlağın veya çentiğin önünde geniş bir kırılma işlem bölgesinin oluşmasıdır. Bu kısımdaki malzemede mikro çatlama oluşması nedeniyle adım adım yumuşamaktadır. Çekme yükü altına bırakılan çentikli bir numunede bu olay gösterilmektedir. Şekil 1.3'teki gibi betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki değişik noktalara karşılık gelen kırılma işlem bölgeleri gösterilmektedir. Buna rağmen önemli ve can alıcı yerlerini de tek tek açıklamaktadır. Maksimum yükleme yapılmadan önce oluşan AB bölgesi lineer olmayan kısımdır. Maksimum yükleme yapıldıktan sonra BC bölgesinin oluşmasına mikro kırılmalar neden olmaktadır. Öbür taraftan yumuşama eğrisinde agrega kilitlenmesi ve sürtünmeden dolayı CD kuyruk kısmı oluşmaktadır. Maximum yükleme oluşmadan önce oluşan lineer olmayan kısımdaki betona LEKM davranışı üzerinden az bir etkiye

sahip olmaktadır. Ama daha yüksek dayanımlı betonda bu olay tamamen ortadan kalkmaktadır [4].

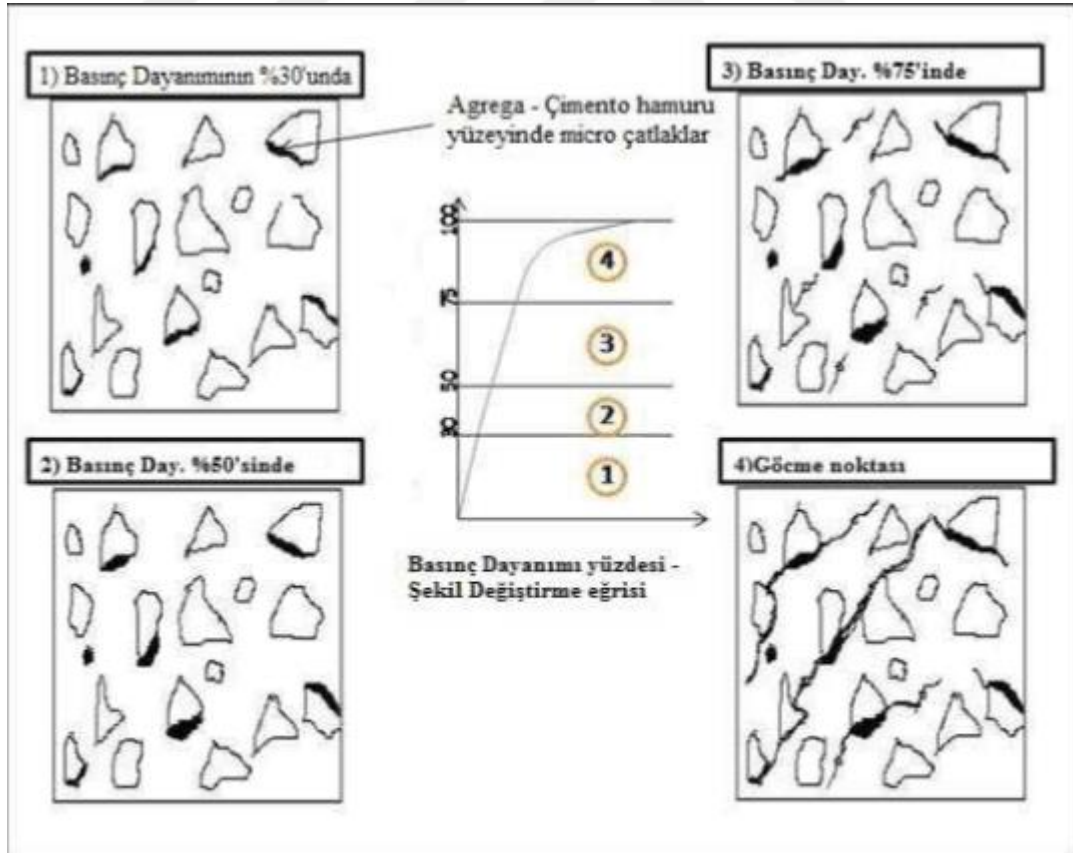


Şekil 1.3 a) Gerilme-şekil değiştirme eğrisi b) Kırılma işlem bölgesi [5]

Bu çalışmada optik mikroskop tekniği kullanılarak belirlenen yük altında bekletilen beton örneklerinde içyapıda oluşan mikro çatlaklar genişlik ve uzunluk olarak gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki her kademe için ayrıntılı bir şekilde ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Belirlenen gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerinde makro ve mikro ölçekte çalışmalar yapılarak deformasyonlar belirlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında deprem veya benzeri etkiler altında hasar görmüş yapılar için durum tespiti ve analizinde kullanılmak üzere bir abak geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu abak yardımıyla hasarlı yapıların hasar miktarı ve yapının kullanılmasında risklerin ortadan kaldırılması kademeleri değerlendirilecektir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Betonun göçmesi, hacimsel şekil değiştirme süresince absorbe edilen kayma şekil değiştirme enerjisine bağlıdır. Çimento hamurunun göçmesi, agrega-çimento hamurunun temas yüzeyinin göçmesi ve agreganın kırılması ile çatlama başlayacağını belirtmektedir [6]. Slate ve Meyers [7], beton içinde oluşan çatlakların maksimum gerilmenin %60'ı değerinde başladığını ve maksimum gerilmenin %60'ı değerinden sonra harç içinde birleşmeye başladığını belirtmektedirler. Bununla birlikte beton içinde yer alan çatlaklar maksimum gerilmenin %80'i değerinde dağınık bir şekilde oluştuğunu belirtmektedirler. Johnson [8], maksimum gerilmenin %50-70'i değerinde mikro çatlakların başladığını belirtmektedir. Çatlakların büyümesi bu gerilme değerinde çok kararlı olduğu ve maksimum gerilmenin %80-95'i değerinde çatlakların yayılması dağınık bir şekilde oluştuğunu belirtmektedir. Normal betonlarda basınç artışıyla, çatlak ilerleyişi Şekil 2.1'de açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 2.1 Basınç artışı ile çatlak ilerleyişinin açıklanması [9]

Christensen ve Bache [10], beton içerisinde oluşan çatlakların maksimum gerilmenin %85'i değerinde agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde oluştuğunu belirtmektedirler. Beton içerisinde meydana gelen çatlakların maksimum gerilmenin %85'i değerinde çimento hamurun içerisinde oluştuğunu ve maksimum gerilmenin %90'ı değerinde yükleme yönüne paralel doğrultusunda geliştiğini belirtmektedirler.

Tanigawa ve Yamadaka [11], beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %90'ı değerinde basınç yüklemesine paralel doğrultuda çimento hamurun içerisine doğru yayıldığını tespit etmişlerdir.

Zaitsev ve Wittmann [12], beton içerisinde meydana gelen çatlakların normal betonlarda maksimum gerilmenin %70'i değerinde iken çok daha yüksek dayanımlı betonlarda ise maksimum gerilmenin %90'ı değerinde belirgin olduğunu tespit etmişlerdir.

Lange ve arkadaşları [13] yaptıkları araştırmada, görüntü işleme teknikleriyle parlak kesitli saçılmış elektron görüntülerinde gözlenen gözenek yapısının doğası hakkında bilgiler tespit etmişlerdir. Yapılan görüntü işleme tekniklerinde iki nokta korelasyonu, boyutlandırma ve çatlak analizi yapıldığını belirtmektedirler.

Mora ve Kwan [14], dijital görüntü işleme tekniği ile yaptıkları çalışmaların sonucunda betonun şekil faktörü, küreselliği ve büyük agregaların dışbükeyleri ile ilgili bir ölçme yöntemi geliştirmişlerdir. Diğer kullanılan dijital görüntü işleme yöntemlerinden farklı bu yöntemle parçacıkların hacmi ve kalınlığı tahmin etme yeteneğine sahiptir. Bundan dolayı şekil parametrelerinin kalınlığına bağlı olarak ölçebilmişler ve agrega örneklerinde özel parçacıkların şekil parametrelerinin ağırlıklı ortalama değerlerini değerlendirmek için kullanmışlardır.

Schutter [15] çalışmasında, video mikroskobu ile otomatik görüntü analizinden oluşan bir sistem geliştirerek binalarda oluşan çatlakları izlemiştir. Geliştirilen yeni sistemle birlikte daha gelişmiş ve daha hassas bir analiz yöntemi geliştirmiştir. Laboratuvar testleri sırasında döşemeler ve beton kirişleri üzerinde yeni geliştirilmiş sistemi denemiştir. Aynı zamanda Belçika'nın Ghent kentinde bir bina üzerinde ölçümler yapılarak değerlendirmiştir. Bunların sonucundan video mikroskobu ve otomatik görüntü analizin ortak çalışmasıyla binalardaki çatlakların yerinde izlemiş ve bununla birlikte çok hassas bir yöntem olduğu söylenilebileceği belirtmiştir.

Soroushian ve arkadaşları [16], görüntü işleme ve analiz tekniklerini kullanarak ve geliştirerek betonun içyapısındaki boşlukları ve mikro çatlakları odak haline getirilerek betonun niceleyici yapısını araştırmışlardır. Floresan ve taramalı elektron mikroskobu sayesinde farklı numune hazırlama teknikleri kullanmışlardır. Otomatik eşik, mikro çatlakların/boşluklar ve bağlanan boşlukların kesişim gelişimini, boşlukların geometrik özelliklerine bakarak mikro çatlakların formlarını ayırt etmek ve gürültü filtreleme için özel olarak görüntü işleme ve analiz tekniklerini geliştirmişlerdir. Soroushian ve Elzafraney [17], formülasyonlar geliştirilerek betonun içyapısındaki mikro boşlukların ve çatlakların temel özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Betonun içyapısındaki mikro çatlakları dik kesitlerden elde ettikleri 2 boyutlu verilerden elde etmişlerdir. Betonun içyapısındaki boşluk sistemlerinin yapısını 3 boyutlu niceliksel bilgi gelişimi için stereolojik (3 boyutlu örneklerin 2 boyutlu kesitlerinden elde edilen verilere dayanarak, onların gerçekteki 3 boyutlu özellikleri ile ilgili yorumlar yapılmasını sağlayan bilim dalı) ilişkiler sunmuşlardır. Yeni geliştirilen bilgisayar yazılımından elde ettikleri algoritmaların sayesinde betonun mikro yapısının analizlerini görüntü işleme yöntemiyle elde etmişlerdir.

Öncü ve arkadaşları [18], görüntü işleme tekniğini kullanarak beton numunelerin üzerindeki gözeneklilik durumunu araştırmışlardır. Katkılı ve katkısız beton numuneleri hazırlanmış ve görüntü işleme tekniği kullanmışlardır. Bu yöntem sayesinde katkısız olarak hazırlanmış beton numunesinde gözeneklilik durumu daha yüksek seyrettiği tespit etmişlerdir.

Bal [19] yaptığı araştırmada, görüntü işleme tekniklerini kullanarak bir malzemenin içyapısında meydana gelen çatlakların özellikleri hakkında daha fazla nicel bilgi elde edileceğini belirtmektedir.

Özen [20] yaptığı araştırmada, dijital görüntü işleme ve analiz metotları kullanarak betonun basınç dayanımı ve agregâ şekil parametreleri arasındaki ilişkileri incelemiştir. Dijital görüntülerden elde edilen bilgiler doğrultusunda betonun basınç dayanımı ile olan ilişkilerinin incelenmesi amacıyla birçok agregâ şekil parametresi hesaplamıştır. Bunların sonucunda betonun basınç dayanımı ile agregâ tipi arasında ilişki olduğunu tespit etmiştir. Çalışmasında agregâ şekil parametreleri ve beton dayanımı arasındaki ilişkilerin agregâların numune kesit yüzeyi içerisindeki

dağılımlarının yaratacağı etkilerin de göz önüne alınarak tekrar incelenmesini önermektedir.

Yu ve arkadaşları [21], çatlakların ölçümünü ve kontrolünü objektif olarak yapabilmesi için beton yapılarda güvenlik değerlendirmesinde yeni bir sistem önermişlerdir. Çatlak tespit sistemi ve mobil bir robot sistemini önermişlerdir. Mobil sistem duvar üzerinde hareket ettirilerek bir CCD kamera (görüntüyü elektrik sinyallerine çeviren, görüntüde daha az gürültüye sahip daha kaliteli görüntüler veren kamera türü) sayesinde veriler tespit etmişlerdir. Çatlak tespit sistemi sayesinde görüntüyü işleyerek elde edilen görüntülerden çatlakları tespit etmişlerdir. Doğru çatlak tanısını sağlamak için, geometrik ve çatlak desenine görüntü işleyerek rutin olarak bakmışlardır. Önerilen sistemin laboratuvar ve arazi deneyleri için uygun olduğunu belirtmektedirler.

Öztürk ve Baradan [22] yaptıkları araştırmada, matematiksel bir model elde edilerek ve görüntü analiz sonuçlarıyla birlikte basınç dayanım değerleri ile çimento harçlarının gözenek yapısı arasındaki ilişkiyi belirlemeye çalışmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda betonun mikro yapısını görüntü analiz teknikleriyle belirlemişlerdir. Aynı zamanda harçların gözenek alanı oranları ile basınç dayanım değerleri arasındaki ilişkiyi tanımlamışlardır.

Lopez ve arkadaşları [23] yaptıkları araştırmada, görüntü analiz yöntemi ve birim şekil değiştirme haritalamasını kullanarak yüksek performanslı hafif betonda sünme, büzülme birim şekil değiştirme ve elastik doğasını incelemişlerdir. Birim şekil değiştirme haritalaması ile düzgün olmayan deformasyonların mikro yapısal özellikleri ile ilgili olduğunu göstermişlerdir.

Chang ve arkadaşları [24] yaptıkları araştırmada, foto elastik kaplama, ayırık dijital görüntü işleme ve delik delme sisteminden oluşan 3'lü sistemle birlikte kullanılarak üniform tek eksenli basınca maruz bırakılan ön gerilimli beton numune üzerindeki kalıcı gerilmeleri tespit etmişlerdir. Uygulanan gerilmenin büyüklüğünü hesaplamışlar ve beton numuneye başlangıçta uygulanan gerilme değerleri ile karşılaştırmışlardır.

Huon ve arkadaşları [25] yaptıkları araştırmada, yarı-statik yükler altında harç, beton ve yüksek performanslı beton numunelerin mekanik davranışını analiz etmek için kızılötesi termal görüntüleme ve dijital görüntü bağlantısını kullanmışlardır.

Chang ve arkadaşları [26] yaptıkları araştırmada, korozyon sonucu meydana gelen kısmi çatlama ve ilk çatlama aşamalarında ölçülen genleşme gerilme dağılımını dijital görüntü işleme teknikleri yardımıyla incelemişlerdir. Tahminler, deneysel tahminler ve sayısal sonuçların karşılaştırılması sonucunda kullandıkları yöntemin doğru olduğunu tespit etmişlerdir.



3. KIRILMA MEKANİĞİ

Mühendislik, malzemeyi insanlık yararına kullanmaktır. Günümüzde mühendislik yapılarında değişik türde birçok malzeme kullanılmaktadır ve bu malzemelerin mekanik özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Dayanım, malzemede bilinmesi gereken mekanik özelliklerin en önemlisinden biridir. Ancak malzemenin teorik olarak tahmin edilen dayanımı, pratikte elde edilmeyebilmektedir.

Bu sorun günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi olan beton için de geçerlidir. Özellikle betonarme yapılarda hasara yol açıp, can ve mal kaybına sebep olabilecek bu sorunun giderilebilmesi için birçok bilimsel çalışma yapılmaktadır. Lineer ve lineer olmayan yaklaşımlar betonda göçme analizi için kullanılmaktadır. Kırılma mekaniği kuramı malzemede mevcut olan çatlak, boşluk ve çentik gibi gerilme yığılmalarını artıran yapısal kusurları ve bu kusurlara bağlı olarak ortaya çıkan hasarları incelemektedir. İlk olarak 1950'li yıllarda metallere uygulanan kırılma mekaniği prensipleri 1960'lı yıllardan itibaren betona uygulanmaya başlanmıştır.

Beton heterojen bir malzemedir. Buna bağlı olarak da bünyesinde değişik sebeplerle oluşmuş farklı boyutlarda boşluklar ve mikro çatlaklar bulunmaktadır.

Kompozit bir malzeme olan betonda kırılma mekanizmasını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Su/çimento oranının değişmesi, agrega tipi, agrega geometrisi ve doğrultusu, kür süresi ve kritik çatlak boyu gibi parametreler betonun kırılma mekanizmasında etkili olan temel faktörlerden birkaçıdır.

3.1. Kırılma

Katı bir cismin gerilmeler altında parçalanması olayına kırılma denir. Çatlak ilerlemesi ve çatlak oluşumu olarak iki stepte ilerler ve gerçekleşmektedir. Gevrek ve sünek kırılma olarak ikiye ayrılır.

Sünek kırılma, çatlağın yavaş yavaş ilerlediği kırılma türüdür. Çatlağın oluşması ve büyümesinde önemli ölçüde beton numunesinde kalıcı şekil değiştirmeye yol açmaktadır. Çatlağın büyük bir hızla ilerlemesine gevrek kırılma denir. Hızlı bir

şekilde meydana geldiği için tehlikeli kırılma türlerinden biridir. Bu kırılma türünde kalıcı şekil değişimi önemsiz boyutta olmaktadır [5].

3.2. Kırılma Mekanîği ve Tarihsel Gelişimi

İnsanoğlunun yerleşik yaşama geçtiği tarihlerde büyük yapılar çoğunlukla kaya ve taş bloklardan inşa edilmiştir. Artan teknolojik imkânlar ile yapılar özellikle çelik ve betonarmeden inşa edilmeye başlanmıştır. Bu yapıların inşası esnasında beklenmedik durumlarla karşılaşmış ve oldukça büyük mühendislik kazaları meydana gelmiştir. Bu olaylar insanoğlunu malzemelerin özelliklerini daha ayrıntılı bir şekilde incelemeye sevk etmiştir.

Malzemede mevcut olan çatlak, boşluk, çentik gibi gerilme yoğunluğunu arttıran kusurlar Kırılma Mekanîğinin temelinde yatar. Aynı zamanda bu kusurlara bağlı olarak meydana gelen hasarları da inceler. Kırılma Mekanîği; çatlağın ilerleyip ilerlemeyeceği, kritik çatlak uzunluğunun belirlenmesi, çatlağın ilerlemesi için gereken enerjinin minimum değeri, verilen bir çatlağın ne kadar süre sonra kritik uzunluğa erişeceği, çatlağın hızlı mı yavaş mı ilerleyeceği, yavaş ve kararlı bir şekilde ilerleyecekse hangi hızda ilerleyeceği gibi soruların yanıtlanmasına yardımcı olmaktadır. Kırılma mekanîğinde tarihi gelişim aşamaları Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Kırılma mekaniğinde tarihi gelişim aşamaları [27]

3.3. Betonun Kırılma Mekaniği

Beton, çimento, su, ince ve iri agrega karışımından oluşan heterojen bir malzemedir. Ayrıca içerisinde farklı boyutlarda ve değişik nedenlerle meydana gelmiş gözenekler (boşluklar) ve mikro çatlaklar bulunmaktadır. Bu içyapıdaki karmaşıklığından dolayı betonun kırılma mekaniği açısından önemli düzeyde araştırma konusu olmuştur.

Kırılma mekaniğinin temelinde bulunan malzeme kusurlarının varlığı beton için de daima var olan bir gerçektir. Bu kusurlar;

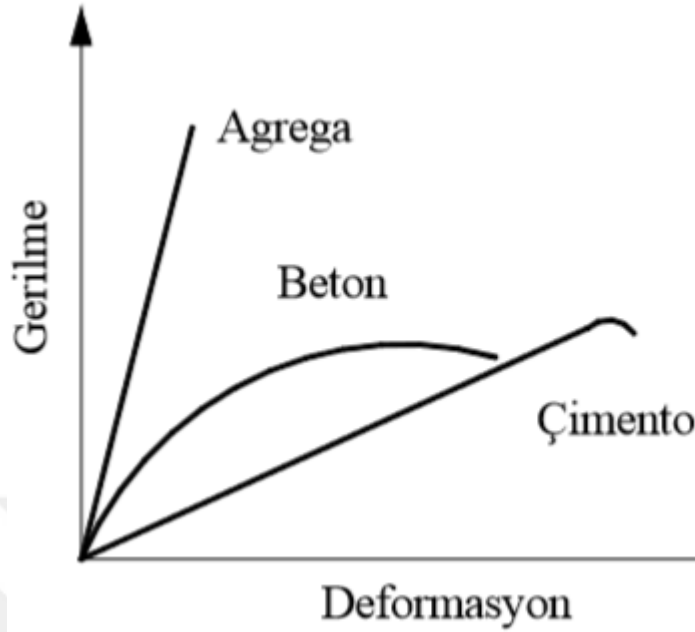
1. Çimentonun hidratasyonu sonucu, çimento hamurunda (matris) meydana gelen 15-20 A_0 boyutundaki jel gözenekleri,
2. Çimento hamurunda daha büyük boyutlarda kılcal gözenekler ve çapları 1 mm'ye kadar ulaşabilen uygun olmayan su/çimento oranından kaynaklanmış sıkıştırma boşlukları,
3. Sıcaklık ve hacim değişimlerinin neden olduğu özellikle agregası ile matris arasında yüzeyinde oluşan mikro çatlaklar,
4. Taze betonun kusması ve iri agregası danelerinin farklı çökme hızları sonucu oluşmuş ayrışma mikro çatlaklarıdır.

Tüm bu kusurlar dikkate alındığında; belirli bir gerilme altında kırılma mekaniği yaklaşımıyla betondaki göçme; bu kusurlardan en kritik olan/olanların, en kritik gerilme yığılması noktalarını seçerek, tek başına veya diğer çatlaklarla birleşerek dengesiz yayılması sonucu meydana gelmektedir.

3.3.1. Betonda Lineer Elastik Kırılma Teorisi

Betonun mikro yapısı gereği homojen olmayan bir malzemedir. Betonun içyapısında yükleme başlamadan önce mikro gözenek ve mikro çatlaklar mevcut olduğu tespit etmişlerdir [28,29]. Bundan dolayı betonda belirli bir gerilme durumu altında kırılma, bu mikro çatlaklardan en kritik olanlarının, en kritik gerilme yığılma noktalarını seçerek, tek başına veya diğer çatlaklarla birleşerek dengesiz yayılması sonucu oluşmaktadır.

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi beton bileşenleri içerisinde elastik malzeme agregasıdır. Çimento hamuru da oldukça elastik ve doğrusal bir gerilme-şekil değiştirme bağıntısı göstermektedir.



Şekil 3.2 Agreg, çimento ve betonun karakteristik gerilme-şekil değıştirme eğrisi [30]

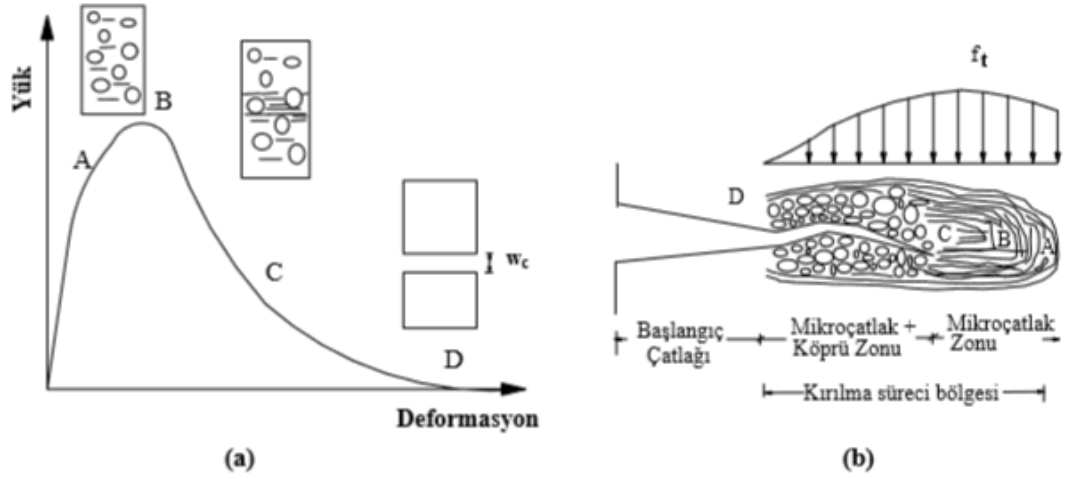
Betonda gerilme, maksimum gerilmenin %30'una ulaştığında önce iri agreg harç ara yüzeyindeki çatlaklar en büyük çekme gerilmesine dik olarak çoğalmaya ve büyümeye başlamaktadır. Basınç yükü altında önce ara yüzey çatlakları büyür ve hamur içinde yük doğrultusunda çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlaklar birleşerek kritik boya ulaşırlar ve hızlı yayılma ile yüke paralel veya eğik olarak cismi parçalarlar. Çekmeye oranla basınçta daha çok çatlak oluşması ve daha fazla yayılması görülmektedir. Bununla beraber eksenel yüke ek olarak yanal basınç uygulandığında hamur içindeki çekme gerilmelerinin azalması ve ara yüzeyde sürtünmenin artması dolayısıyla dayanım artışı gözlenmektedir [31].

3.3.2. Betonda Lineer Olmayan Kırılma Mekanizmasının Yaklaşımları

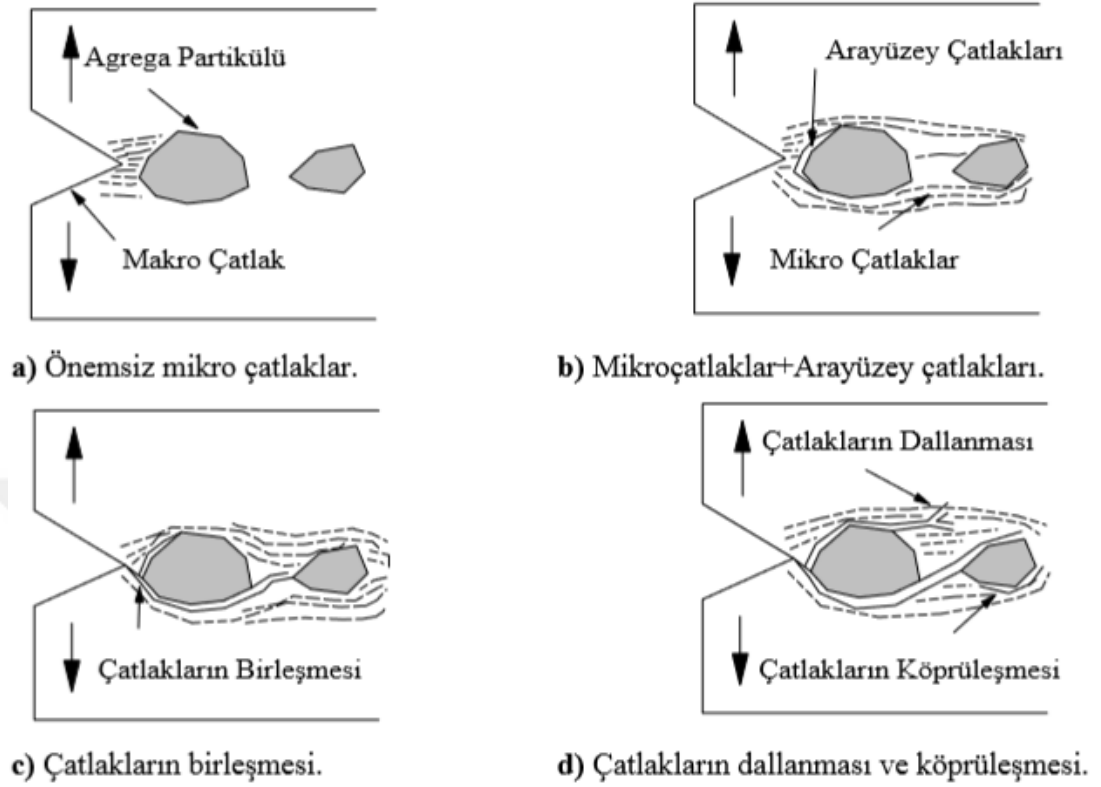
Betonun kırılma süreci bölgesi, betonun non-lineer davranışının açıklanmasında önemli bir kavramdır. Şekil 3.3'te çekmeye maruz çentikli bir numunenin gerilme-şekil değıştirme eğrisi gösterilmektedir. Burada AB pik yük öncesi non-lineer bölge, çekmede yumuşamaya sebep olan mikro çatlaklar sonucunda

AB bölgesi oluşmaktadır. CD kısmı ise bu eğrinin kuyruk kısmı olup agreganın kilitlenmesi ve yüzeyler arası sürtünmeden dolayı meydana gelen bölgedir.

Metalik ve seramik malzemeler için tanımlandığı kırılma süreci bölgesi beton için ise eğrinin BCD kısmında gelişmektedir (Şekil 3.3 b). Bu zon bölge ilk önce makro çatlağın yanındaki agregayı saran matris içerisindeki önemsiz mikro çatlaklarla başlamaktadır (Şekil 3.4 a). Daha sonra agreganın çevresindeki zayıf bölgede büyük çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 3.4 b). Bu çatlaklar matris içerisindeki mikro çatlaklarla birleşerek makro çatlağa erişir (Şekil 3.4 c) ve sonunda bu çatlaklar numune uzayı içerisinde birbirini keserek ve köprüler kurarak numuneyi parçalarlar (Şekil 3.4 d).



Şekil 3.3 a) Çekmeye maruz bir örneğin gerilme-şekil değiştirme eğrisi b) Kırılma süreci bölgesi [5]



Şekil 3.4 Kırılma süreci bölgesinin gelişimi [5]

3.3.3. Gerilme Deformasyon Eğrisi

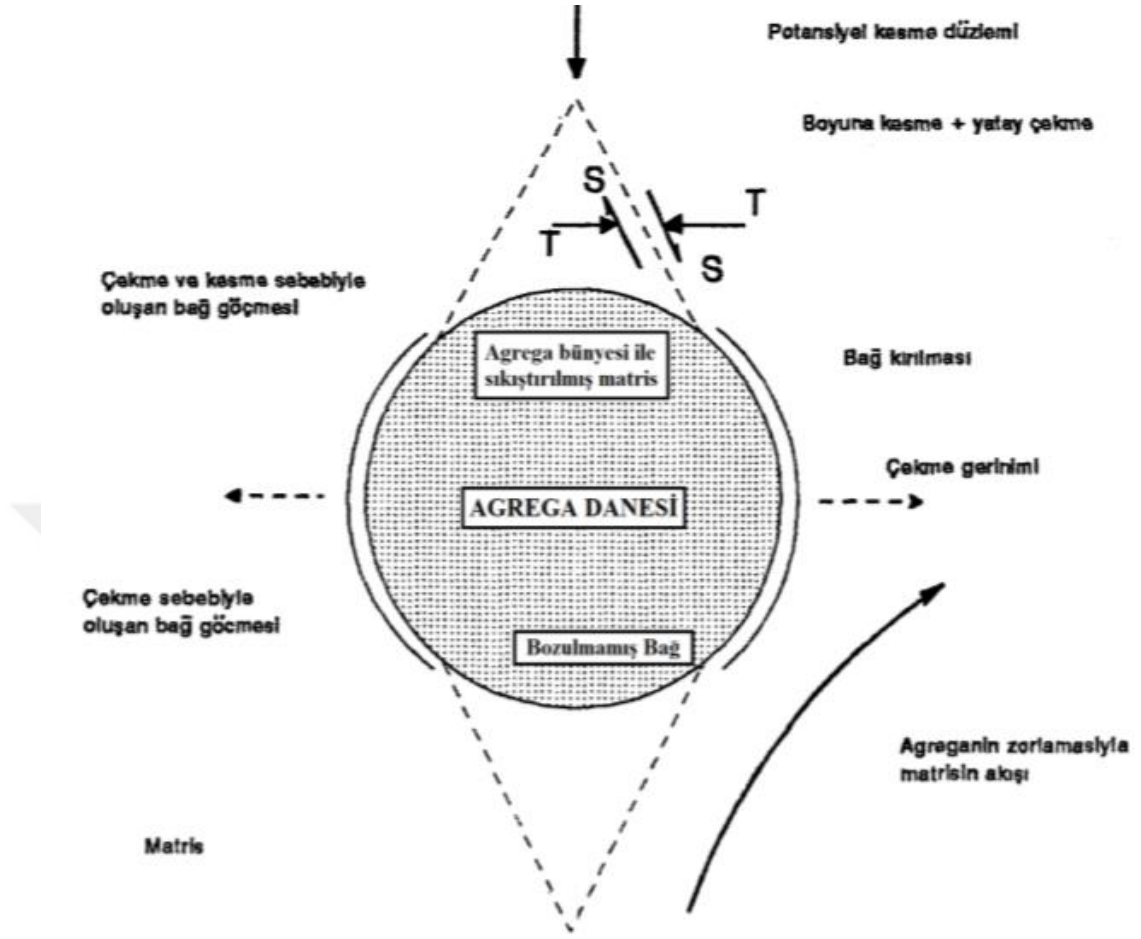
Kompozit bir malzeme olan betonda dayanımını etkileyen birçok fonksiyon bulunmaktadır. Çimento ve agreganın dayanımı ve aralarındaki etkileşim, betonun dayanımını etkileyen fonksiyonlardan birkaçıdır. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere iki ana malzemenin (agrega ve çimento) elastisite modülleri birbirinden ayrı olmasına rağmen pik gerilmeye kadar gerilme deformasyon eğrisinde lineer olarak kabul edilebilir. Beton bunlardan farklı olarak, uygulanan gerilmeler altında inelastik davranış sergiler ve gerilme deformasyon eğrisinde gerilme arttıkça non-lineerliğe doğru ilerlemektedir. Bu non-lineerlik yalnızca malzemenin kompozit yapısına bağlı değildir, aynı zamanda çimento ve agrega arasındaki bağ ile de alakalıdır [32].

3.3.4. Göçme Agregası Etkisi

Basınç altındaki bir beton numunedeki idealize edilmiş bir agregası parçacığı Şekil 3.5’te gösterilmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere gerilmeler agregası kenar kısımlarında maksimum değeri alırken agregası ortasında düşük değerde kalmıştır. Normal betonda parçacık matristen daha rijittir. Gerilme analizi ile göçme şöyle tasvir edilebilir;

1. Agregası ile matris ara yüzeyinde çekme gerilmelerinden dolayı oluşan bağın kaybolması sonucu göçme,
2. Agregası ile matris ara yüzeyinde kesme gerilmelerinden dolayı oluşan bağın kaybolması sonucu göçme,
3. Matriste meydana gelen kesme ve çekme deformasyonu sonucu göçmesi,
4. Nadir olarak meydana gelen agregası hasarı sonucu göçme.

Betonda agregasının varlığından dolayı düşük derece anizotropluk meydana gelmekte ve bu anizotropluk betonun karakteristik göçme ve deformasyonunun açıklanmasına yardımcı olmaktadır. Bu anizotropluk basınç etkisi altındaki agregada çekme gerilmeleri meydana getirmektedir. Gerilmeler bu bölgelerde teorik kohezif mukavemete ulaştığından, çatlak büyümeye başlamaktadır. Basınç göçmesi durumunda çatlaklar yükleme eksenine paralel olarak (deneysel bulgulara göre) ilerlemektedir [33].



Şekil 3.5 Tek eksenli basınç altında idealize edilmiş bir agrega partikülü [33]

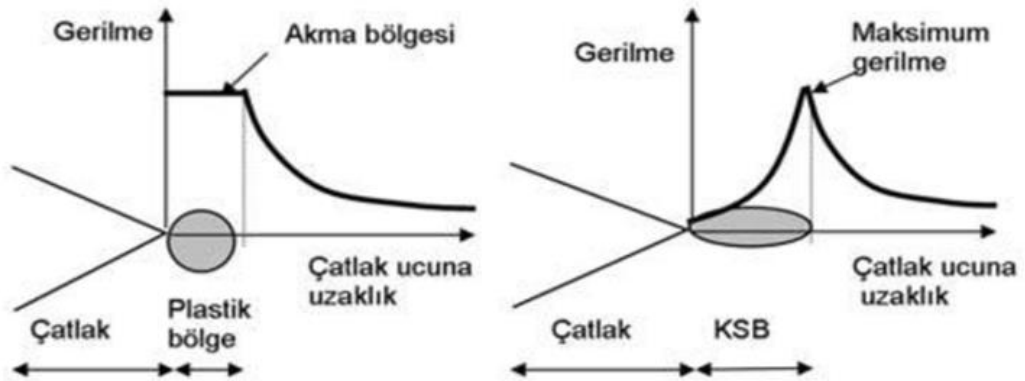
3.3.5. Çatlak Yayılımını Önleyici Etkenler

Akma, metalik bir malzemede kırılma olmadan önce oluşmaktadır. Bu akma oluştuğu için çatlak ucunda meydana gelen gerilme artışı sonsuza gitmemektedir. Aynı zamanda akmanın görüldüğü plastik bir bölge oluşmaktadır (Şekil 3.6). Yarı gevrek olarak bulunan beton malzemesinde kalıcı şekil değiştirmeler çatlak ucunda da oluşmaktadır. Kırılma süreci bölgesi (KSB), gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin orantılı olmadığı bölge olarak adlandırılmıştır.

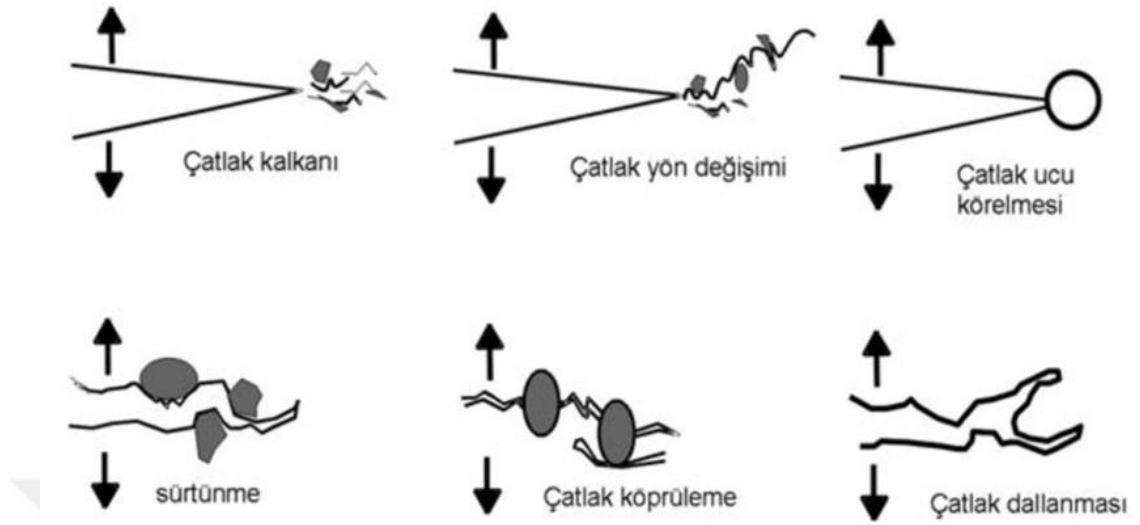
Mikro çatlaklar ve şekil değiştirmeler enerjiyi yutmakta ve yutulan enerjiden dolayı çatlak ucundan oluşan gerilmede azalmalar oluşarak çatlakların sonsuza gitmesini engellemektedir (Şekil 3.6). Araştırmacılar, betona LEKM'nin uygulanamayacağı görüşünde birleştiler çünkü betonda oluşan kırılma süreci

bölgesinin büyük olmasında kaynaklanmaktadır. Bu bölgenin oluşumu betonda oluşan toklaşma mekanizmalarıyla ilişkilidir. Betonun içinde bulunan agregalar, mikro çatlak ve boşluklar sayesinde birtakım mekanizmalar tarafından çatlak ilerleyişi durdurulur ve aynı zamanda betonda tokluk artışına sebep olmaktadır (Şekil 3.7). Betonda tokluk artışına sebep olan mekanizmalar;

- Çatlak ucundaki agregaların çatlak ilerlemesini engelleyerek çatlak kalkanı görevini yapması
- Çatlağın agregalara rast gelerek yön değiştirmesi
- Agregaların birbirlerine sürtünerek çatlağın ilerlemesini engellemesi
- Agregaların çatlağın bir tarafından diğer tarafına yük aktarımında bulunması
- Çatlak ucuna rastgelen boşlukların çatlak ucu keskinliğini azaltması ve çatlağın dallanmasına neden olması



Şekil 3.6 Sünek ve yarı gevrek malzemede çatlak ucunda meydana gelen durumlar [34]



Şekil 3.7 Betonda tokluk artışına neden olan mekanizmalar [34]

LEKM'in bir çatlağın ilerlemesi için ortaya koyduğu çatlak ucundaki gerilme yığılmalarını ifade eden kırılma tokluğu (gerilme şiddet çarpanının kritik değeri) parametresi, betonda bir çatlağın hangi şartlar altında ilerleyeceğinin tahmini konusunda yetersiz kalılabileceğini belirtilmektedir [34].

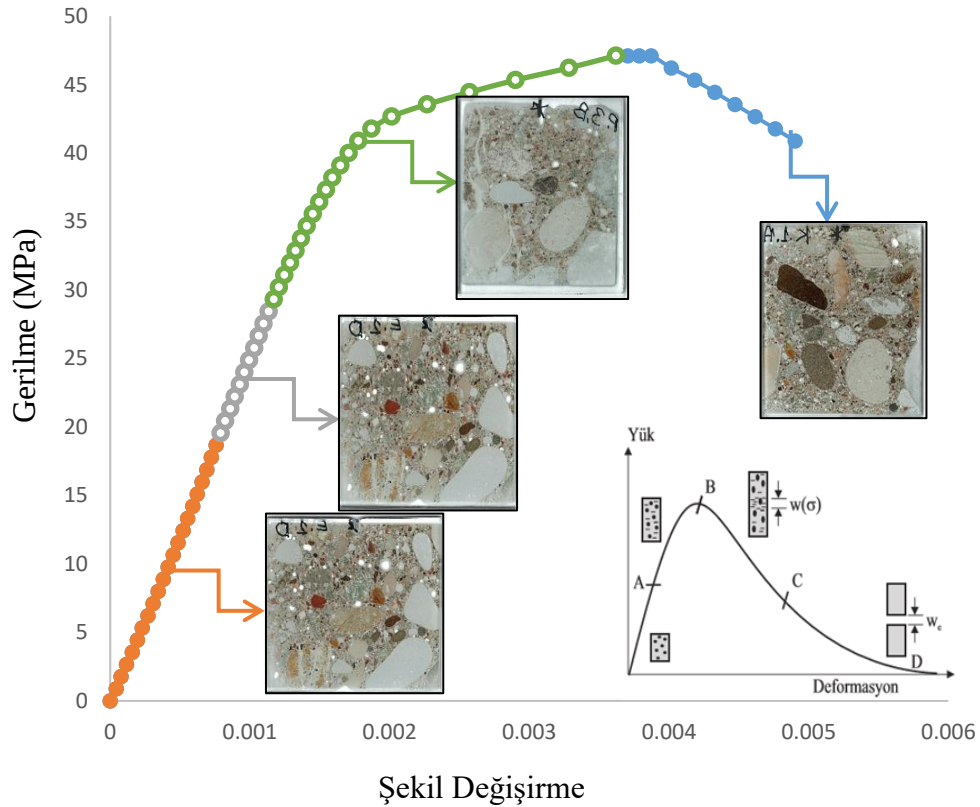
Çatlağın uzamasındaki enerji, dış yüklerin yaptığı işten veya betonda depo edilen gerinim enerjisi değişiminden kaynaklanmaktadır. Bu enerji kavramından hareketle, agrega beton içerisinde çatlağın yayılmasını engelleyen önemli etkenlerden biridir. Zira matris içerisinde ilerleyen çatlak bir agrega ile karşılaşırsa minimum enerji prensibine göre ya agrega içerisinden ya da agreganın çevresinden ilerlemektedir. Bu durum enerji gereksinimini arttırmakta ve hidrasyona uğramamış çimento parçacıkları agrega gibi davrandığını belirtilmektedir [35].

3.3.6. G_F Kırılma Enerjisi

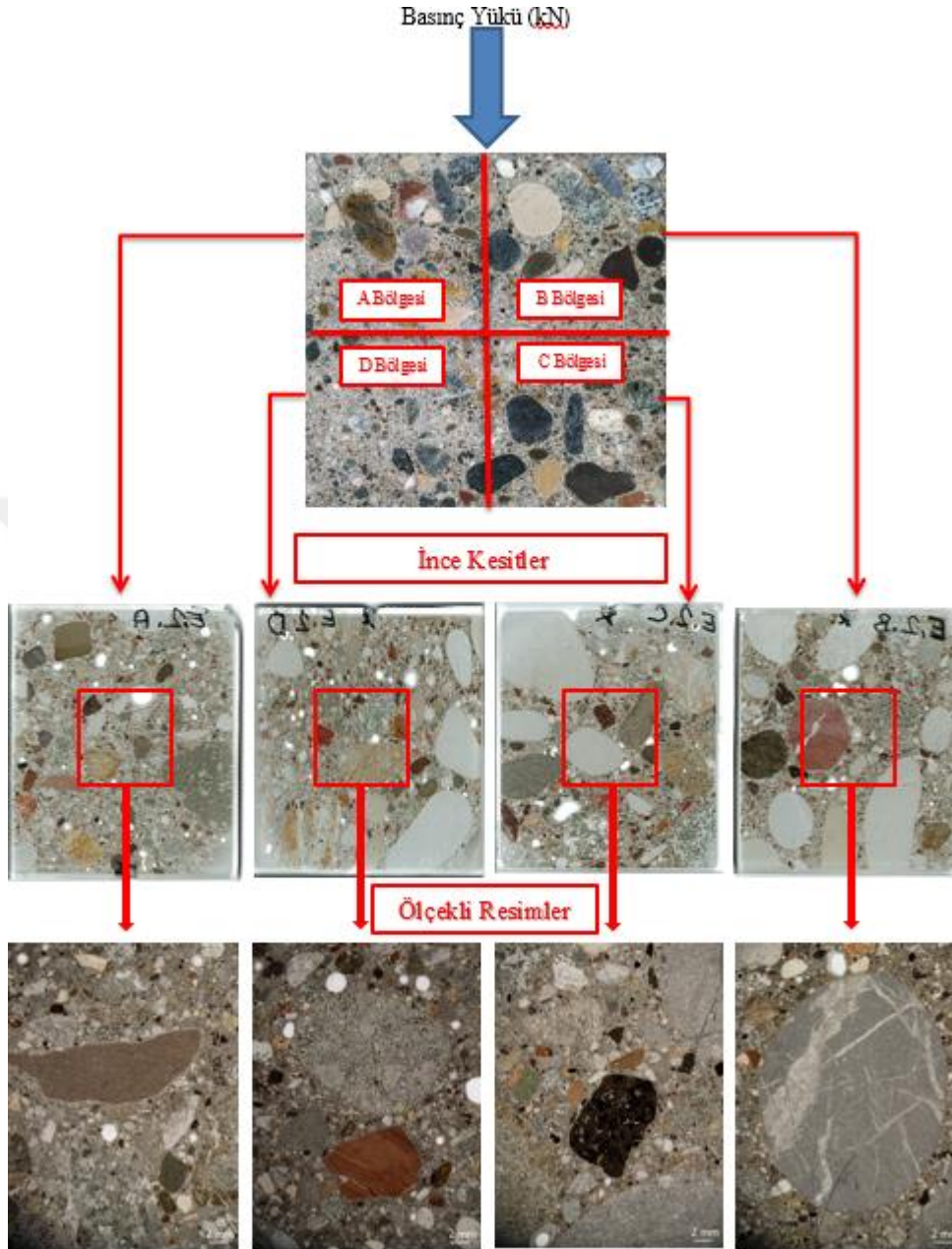
Beton çekme kuvveti altında diğer malzemelerden farklı davranış göstermektedir. Metaller kırılmadan önce çok büyük yanal deformasyonlar ve kayma deformasyonları gözlemlenmektedir. Betonun kırılması ise mikro çatlakların büyüyerek makro çatlaklar haline gelmesiyle meydana gelmektedir.

4. MATERİYAL ve METOD

Bu çalışmada DSİ TAK laboratuvarında bulunan deformasyon kontrollü press cihazı ile gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesi ve bu veriler ışığında gerilme-şekil değiştirme davranışının her kademesindeki deformasyonların görüntülerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla çimento, su ve agrega ile oluşturulan beton örnekleri standart deney kalıplarında (15×15×15 cm) 28 gün uygun kür şartlarında saklandıktan sonra birim hacim ağırlık deneyi, ultrases geçiş hızı deneyi, basınç dayanımı deneyi, makro ölçüm çalışmaları ve mikro ölçüm çalışmalarına tabi tutulmuştur (Şekil 4.1). Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde her kademedede belirlenen yük altında 2 saat bekletilen beton örneklerinin içyapısında meydana gelen mikro çatlakların boyları, enleri ve ilerleme yönlerini optik mikroskopta 40X büyütme altında incelenmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.1 Beton örneklerinin yük kademelerindeki deformasyonları



Şekil 4.2 Beton örneklerin mikroyapı süreci

4.1. Materyal

Deneylerde kullanılan beton TS 802 [36]'e göre tasarlanmış olup karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Beton üretiminde 3 farklı aralıkta (0-4 mm ince, 4-12 mm orta ve 12-22 mm iri) doğal dere agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregalar Adıyaman Göksu dere ocağından temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılan çimento, TS EN 206-1 [37] ile uyumlu normal Portland çimentosu (CEM I 42,5R) ve Adıyaman Çimko Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiştir. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilip, nem alarak topaklaşma göstermemesi için özel koruyucu kaplar içerisinde muhafaza edilmiştir. Beton üretiminde Adıyaman ilinin şehir şebeke suyu ve katkı maddesi olarak akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 4.1 1 m³ betonda kullanılan malzeme miktarları

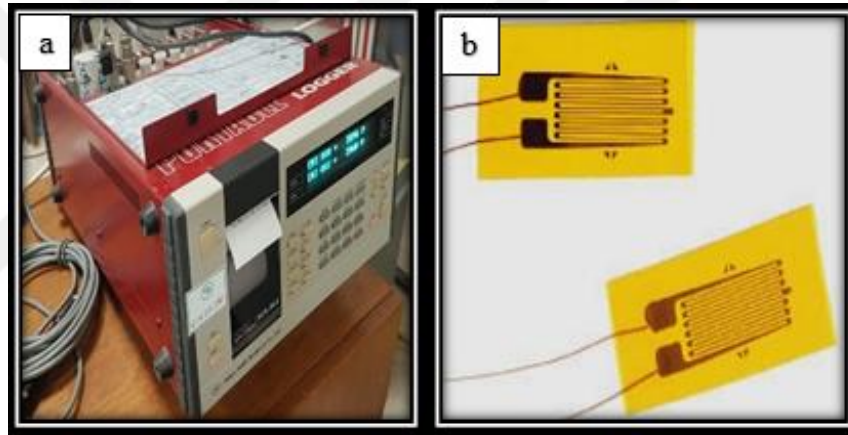
Kullanılan Malzeme Cinsi	Miktarı (kg)
Doğal Dere Agregası (0-4 mm ince)	1067
Doğal Dere Agregası (4-12 mm orta)	637
Doğal Dere Agregası (12-22 mm iri)	338
Çimento	280
Su	137
Akışkanlaştırıcı	3.22

4.1.1. Beton Presi

Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi Malzeme laboratuvarında mevcut olan ELE marka basınç press 6 kgf/cm².sn'lik sabit bir yükleme hızında yükleme yapılmakta ve yükleme aşamasında istenilen yükte dondurma (freezing) özelliğine sahiptir. Beton press diğer özelliği betonlar yükleme aşamasında beton mukavemetine ulaştığında (kırılmadan hemen önce) press göstergesinden sesli ve görüntü olarak uyarı vermektedir. Devlet Su İşleri Malzeme Laboratuvarında mevcut olan deformasyon kontrollü press kullanılarak gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilmesini amaçlanmaktadır (Resim 4.1 a ve b). Deneylerde DSİ laboratuvarında kullanılan datalogger (veri kayıt cihazı) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan strainage (gerinim ölçer) DSİ laboratuvarında mevcut olup, ölçüm yapılacak objeye gerinim ölçerler yapıştırıcılar ile yapıştırılır (Resim 4.2 a ve b).



Resim 4.1 a) Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarındaki press cihazı b) Devlet Su İşleri Malzeme Laboratuvarındaki press cihazı

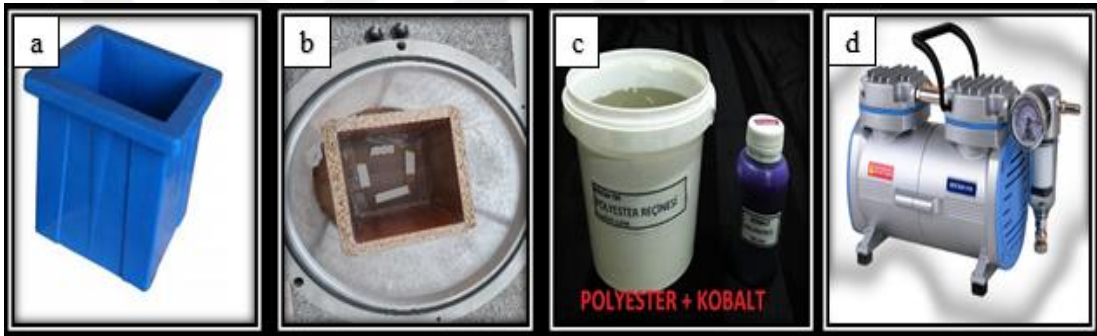


Resim 4.2 Devlet Su İşleri Malzeme Laboratuvarındaki a) Datalogger b) Strainage

4.1.2. Deney Kalıpları, Epoksi Malzemeleri ve Vakum Pompasının Hazırlanması

Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında mevcut 15x15x15 cm'lik standart küp kalıpları kullanılmıştır. Beton örneklerin kesme işlemi sırasında dağılmamasını önlemek amacıyla epoksi işlemi yapılmıştır. Epoksi, termosetler grubundan yapıştırıcı bir kimyasal reçinedir. Suya, aside ve alkaliye direnci çok iyidir ve zamanla direnç özelliğini yitirmez. Çatlağa doldurulmuş epoksi yapıştırıcısı, çatlağın yarattığı süreksizlik ortamını sürekli duruma dönüştürmektedir. Çatlağın her iki yüzünü çatlak boyunca sürekli olarak birbirine bağlar ve gerilme birikimlerini önlemektedir. Sertleştirici, polyesterin sağlıklı bir şekilde tam olarak

sertleşmesini sağlayan kimyasallardır. Hızlandırıcı ise sertleştiriciyi aktive ederek daha hızlı reaksiyona girmesini sağlayan kimyasallardır. Epoksi, hızlandırıcı ve dondurucu Adıyaman organize sanayisinde temin edilmiştir. Epoksi işlemi için 16×16×16 cm’lik ahşaptan yapılmış özel kalıplar Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında hazırlanılmıştır. Cam vanüsün içindeki havayı boşaltarak epoksinin betonun içyapısına girmesini sağlamak amacıyla vakum pompası 15 dk çalıştırılmıştır. Vakum pompası ise bir bölgede bulunan gazların veya oluşan sıvı buharlarının boşalmasını sağlayan, uygulama alanı oldukça geniş olan aletlerdir. Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında mevcut olan maksimum değeri atmosfer basıncın 650 mmHg olan vakum pompası kullanılmıştır (Resim 4.3 a, b, c ve d).



Resim 4.3 Deneyde kullanılan a) Küp kalıp b) Ahşap kalıp c) Epoksi d) Vakum pompası

4.1.3. Etüv

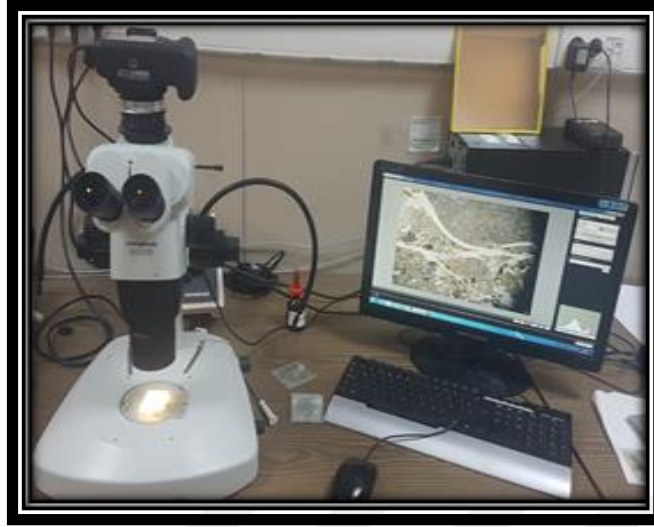
Beton örneklerinin içyapısındaki boşluklardaki suyu uzaklaştırmak amacıyla etüv cihazı kullanılmıştır. Etüv, belirli sıcaklıklarda mikrop üretme, sterilize etmekte, ısıtma, pişirme veya kurutma amaçlı kullanılan laboratuvar fırınıdır. Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında mevcut olan dijital termostat ile ayarlanabilen etüv kullanılmıştır (Resim 4.4).



Resim 4.4 Deneyde kullanılan etüv

4.1.4. Optik Mikroskop

Beton örneklerin içyapısında oluşan mikro çatlakların açık ve belirgin bir şekilde incelenmesi amacıyla optik mikroskop kullanılmıştır. SZX16'nın gözlem tüpleri, zoom gövdesi ve hedefleri içeren optikleri, tüm büyütme aralığında kromatik bulanıklığı azaltmak için üretilen mikroskoptur. SDF (Süper Odak Derinliği) hedefleri, hemen hemen her örneğin net ve yüksek kontrastlı görüntülerini sağlayabilir. Maksimum 0,3 NA, ince mikroskobik hücre ve hücre bileşeni yapılarının net bir şekilde görüntülenmesini sağlayan milimetre başına 900 satır çifti çözünürlüğü üretir. Böyle şaşırtıcı çözünürlük ve eşsiz büyütme, işi daha verimli, daha hassas hale getirir ve numunelerden çok daha fazla bilgi ortaya çıkarır. Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında mevcut olan OLYMPUS 8ZX16 markalı mikroskop kullanılmıştır (Resim 4.5).



Resim 4.5 Deneyde kullanılan mikroskop

4.1.5. Ultrasonik Test Cihazı

Beton örneklerin kalitesinin denetlenmesi ve değerlendirilmesi amacıyla ultrasonik test cihazıyla ölçümler yapılmıştır. Ultrasonik test cihazı, alıcı ve verici arasında oluşturulan ultrasonik ses dalgalarının beton içerisindeki geçiş süresinin belirlenmesi esasına dayanır. Bu hasarsız yöntem, çok sayıda nokta üzerinden okuma yapılabilmesi, zamandan tasarruf sağlanması ve taşıyıcı elemanlara zarar vermemesi açısından tercih edilir. Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında mevcut olan ultrasonik test cihazı kullanılmıştır (Resim 4.6).



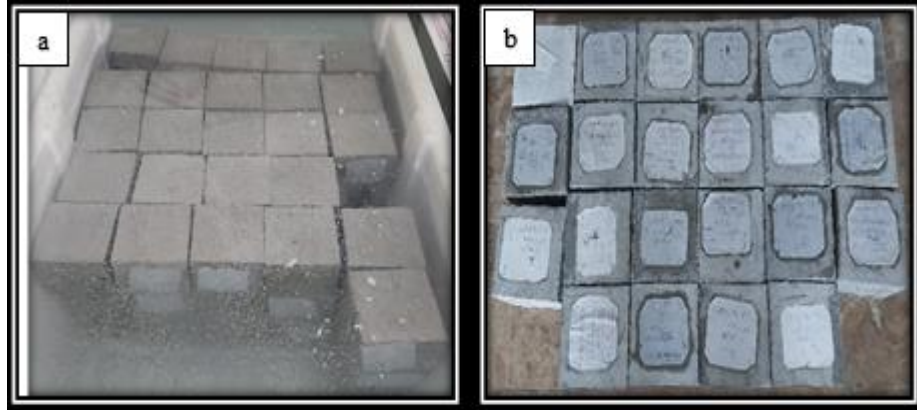
Resim 4.6 Ultrasonik test cihazı

4.1.6. Dijital Fotoğraf Makinesi

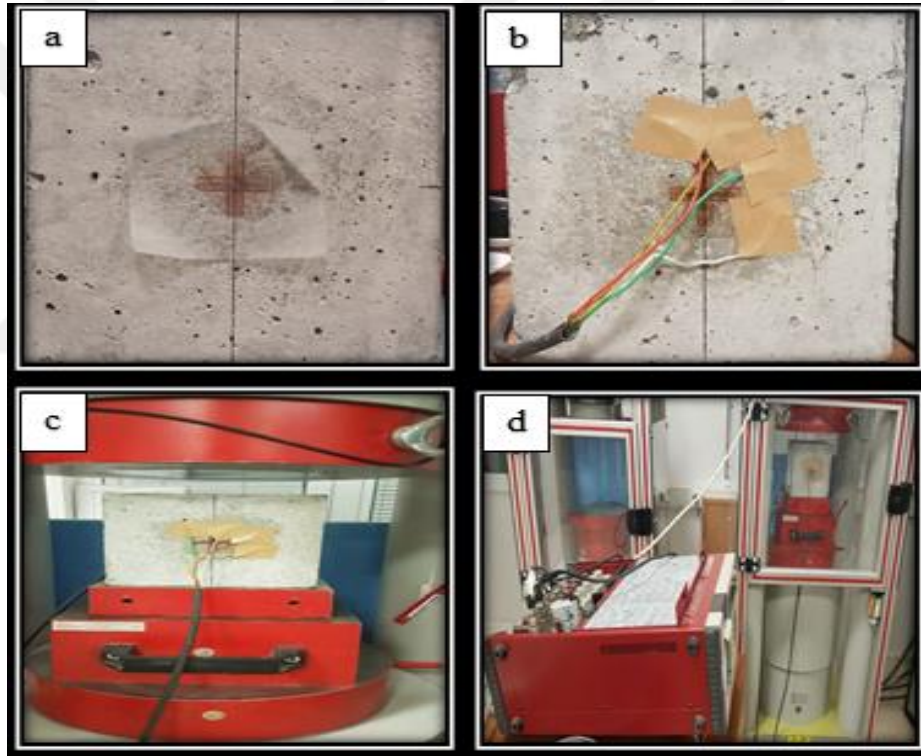
Beton örneklerin makroyapısında oluşan çatlakları tespit etmek amacıyla dijital fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Dijital fotoğraf makinesi, fotoğrafları elektronik olarak çeken ve saklayan elektronik bir cihazdır. Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında mevcut olan çözünürlüğü yüksek fotoğraf makinesi kullanılmıştır.

4.2. Metod

Tez kapsamında ilk aşama olarak TS 802 [36] ve TS EN 206-1 [37] standartları esas alınarak silindirik basınç dayanımı 35 MPa olan beton örnekleri için öncelikle gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için 3 adet, görüntü işleme yöntemiyle betonda gerilme-şekil değiştirme davranışının değerlendirilmesi için 10 adet, toplamda ise 13 adet beton örneği üretilmiştir. Beton örnekleri 28 günlük uygun kür şartlarında saklandıktan sonra kür havuzundan çıkartılmıştır (Resim 4.7 a ve b). Gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için 3 adet beton örneğini Ankara Devlet Su İşleri Laboratuvarına basınç dayanımı deneyi yapmak için gönderilmiştir. DSİ TAK laboratuvarında bulunan deformasyon kontrollü press cihazıyla basınç dayanımı deneyi yapılan beton örneklerinde datalogger ve strain gauge cihazları da kullanılarak gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir (Resim 4.8 a, b, c ve d). Elastik bölge maksimum gerilmenin %40'ı ve plastik bölge maksimum gerilmenin %60'ı değerinde alınmıştır [38,39]. Gerilme-şekil değiştirme eğrisini göz önünde bulundurularak non-lineere geçiş bölgesinden 2 değer daha alınarak işlemler yapılmıştır. Yapılan bu değerlendirmelerden sonra elastik bölge için 18.67 MPa değerini, plastik bölge için 28.44 MPa değeri, non-lineere geçişten önce 38.22 MPa ve 40.00 MPa değerleri alınmış ve kırılma bölgesi için ise 47.11 MPa değeri alınmıştır. Elde edilen bu değerlerden sonra gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerinde bulunan elastik, plastik ve kırılma bölgesinde bulunan deformasyon kademeleri belirlenmiştir.



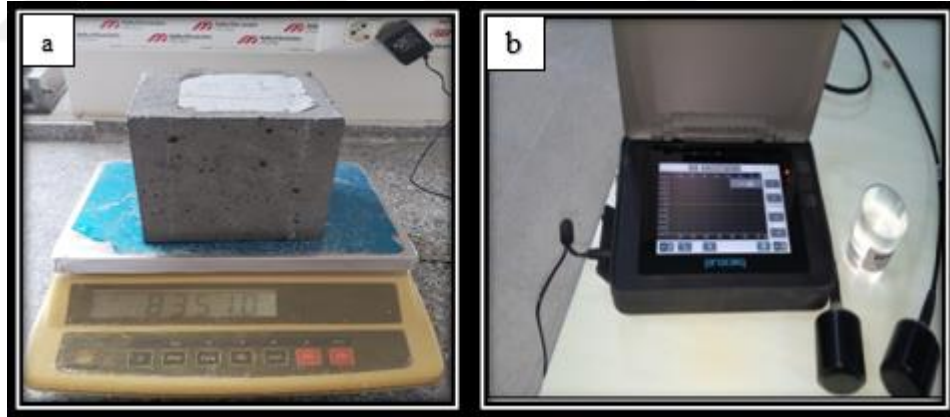
Resim 4.7 28 günlük a) Kür havuzunda b) Beton örnekleri



Resim 4.8 a) Beton örneğinin orta nokta belirleme b) Strain gauge c) DSI'nin deformasyon kontrollü press cihazı d) Datalogger

Tez kapsamında ikinci aşamada, Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında kür havuzundan bulunan beton örnekleri tek tek çıkartılarak hassas terazide ağırlıkları belirlendikten sonra ultrases geçiş hızı deneyi yapılmıştır (Resim 4.9 a ve b). Elastik bölge için 18.67 MPa değerini temel alınarak 2 adet beton örneğini, plastik bölge için 28.44 MPa değerini temel alınarak 2 adet beton

örneğini ve non-lineere geçişten önce 38.22 MPa ve 40.00 MPa değerleri temel alınarak birer adet beton örneği alınarak toplamda 6 adet beton örnekleri üzerinde deformasyonların kalıcı ve geçici oluşması için belirlenen yük kademelerinde beton pressi dondurularak 2 saat belirlenen yük altında bekletildikten sonra beton press yükü boşaltılmıştır (Resim 4.10). Böylece istenilen yük kademesinde ki deformasyonların betonda oluşmasını sağlanmıştır. Deneylerde meydana gelebilecek olağanüstü durumları göz önünde bulundurarak her kademe için 2 adet beton örneği ele alınmıştır. Plastik bölgede elde edilen 40.00 MPa değerinde yük altındaki beton örneği 1.5 saat geçtikten sonra kırılmıştır. Kırılmadan dolayı 40.00 MPa değerinde 2 adet beton örneğini press cihazında bekleme yapılmadan beton press yükü boşaltılmıştır. Kırılma bölgesi için 2 adet beton örneği kırılıncaya kadar beton press ile yüklenilmiştir. Çizelge 4.2’de gösterildiği gibi isimlendirilen 10 adet C35 beton örneklerinde basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamanın son kısmı ise basınç dayanımı deneyi yapılan 10 adet beton örneklerinin içyapısındaki boşluklardaki suyun uzaklaştırılması için 75 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde 24 saat bekletilmiştir (Resim 4.11).



Resim 4.9 Beton örneklerinin a) Hassas terazi ile birim ağırlıklarının belirlenmesi b) Ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi



Resim 4.10 Press uygulaması

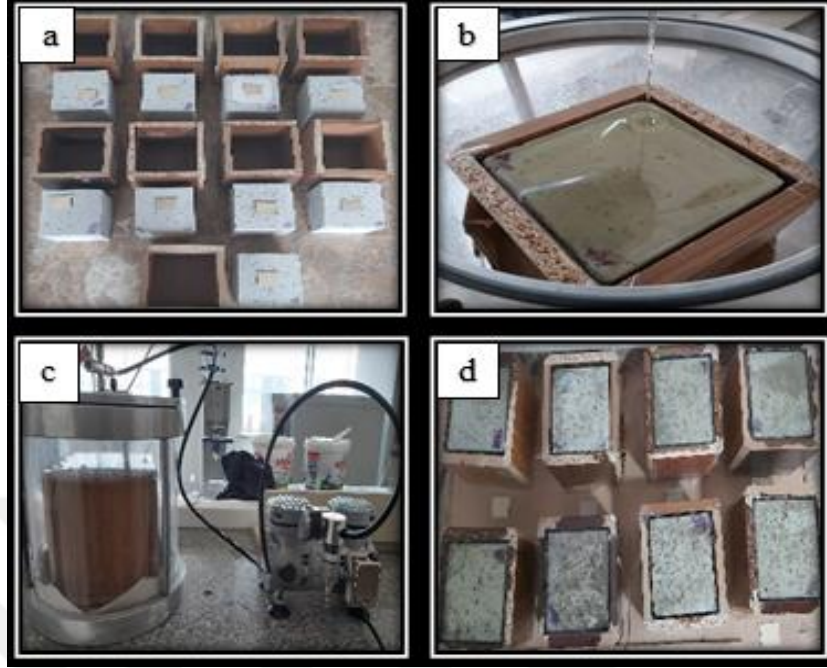
Çizelge 4.2 Beton örneklerinin sınıflandırılması ve gerilme değerleri

Beton Örnekleri	Mikro Ölçüm					Makro Ölçüm	
	Birinci Parça					İkinci Parça	Gerilme Değerleri
E.1	E.1.A	E.1.B	E.1.C	E.1.D	E.1	18.67 Mpa	*
E.2	E.2.A	E.2.B	E.2.C	E.2.D	E.2	18.67 Mpa	*
P.1	P.1.A	P.1.B	P.1.C	P.1.D	P.1	28.44 Mpa	*
P.2	P.2.A	P.2.B	P.2.C	P.2.D	P.2	28.44 Mpa	*
P.3	P.3.A	P.3.B	P.3.C	P.3.D	P.3	40.00 Mpa	*
P.4	P.4.A	P.4.B	P.4.C	P.4.D	P.4	38.22 Mpa	*
P.5	P.5.A	P.5.B	P.5.C	P.5.D	P.5	40.00 Mpa	
P.6	P.6.A	P.6.B	P.6.C	P.6.D	P.6	40.00 Mpa	
K.1	K.1.A	K.1.B	K.1.C	K.1.D	K.1	47.11 Mpa	
K.2	K.2.A	K.2.B	K.2.C	K.2.D	K.2	47.11 Mpa	
E = Elastik Bölge	P = Plastik Bölge		K = Kırılma Bölgesi		* = Press cihazında 2 saat bekletilenler		

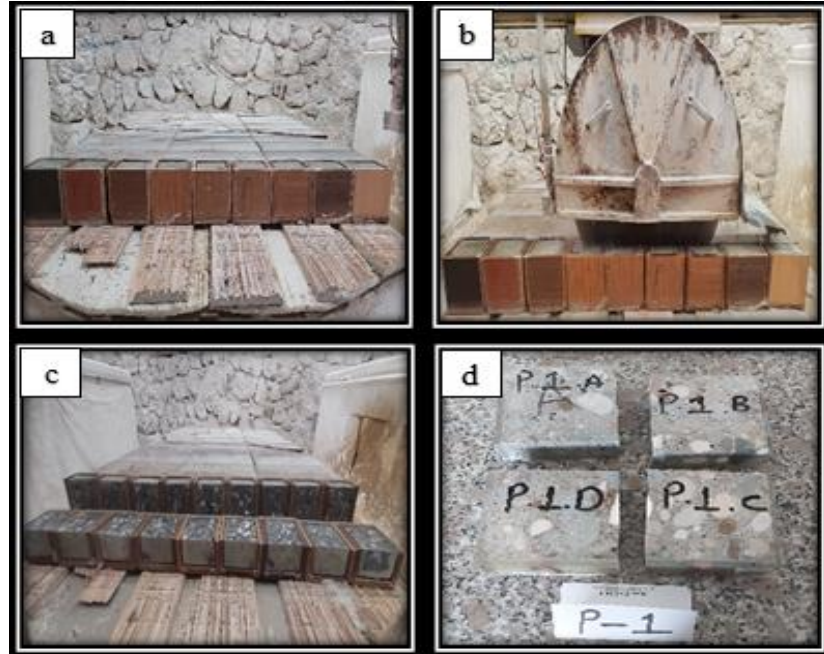


Resim 4.11 75 °C sıcaklıktaki etüvde bekletilen beton örnekleri

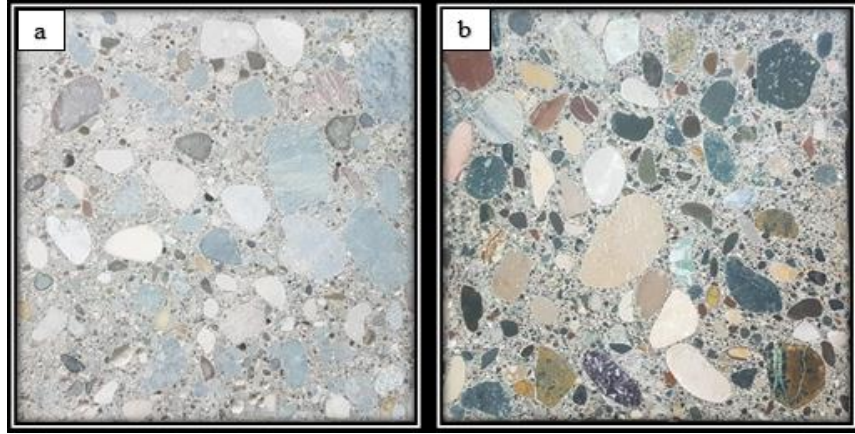
Tez kapsamında üçüncü aşamada 10 adet özel ahşap kalıplar yaptırılmıştır. Daha sonra belirli oranlarda hızlandırıcı ve dondurucu ilave ederek bir saatte sertleşecek epoksi karışımı hazırlanılmıştır. Beton örnekleri özel ahşap kalıplara yerleştirilerek üzerine epoksi karışımı eklenmiştir. Epoksi eklenen beton örnekleri özel cam vanüse konularak vakum pompası 15 dk çalıştırılmıştır. Cam vanüsün içindeki havayı emerek epoksinin betonun içyapısına girmesini sağlamak amacıyla vakum pompası işlemi 15 dk uygulanmıştır. Bu aşamalardan geçtikten sonra epoksili beton örnekler 3 gün boyunca Adıyaman Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi malzeme laboratuvarında bekletilmiştir (Resim 4.12 a, b, c ve d). Daha sonra beton örnekleri isimlendirilerek baş kesme makinesinde bulunan lazerle işaretleme ile yükleme yönüne paralel olacak şekilde 2 eşit parçaya bölünmüştür. Kesilen birinci parçadan mikro ölçümler yaptırmak için beton örneklerini 4 eşit parça halinde kesilmiştir (Resim 4.13 a, b, c ve d). Kesilen ikinci parçadan ise makro ölçüm yapmak için beton örneklerinin yüzeylerini parlatılmasından sonra dijital fotoğraf makinesi ile fotoğrafları çekilmiştir (Resim 4.14 a, b ve c). Tez kapsamında son kademe ise 4 eşit parça halinde kesilmiş beton örneklerinin 75×75×75 mm özel ebatlarda ve 3 mm kalınlıkta ince kesitler yapılarak alttan aydınlatmalı optik mikroskopta inceleme yapılmış. İncelemeler bilgisayara aktarılarak detaylı bir şekilde açıklanmıştır (Resim 4.15 a ve b ve Resim 4.16).



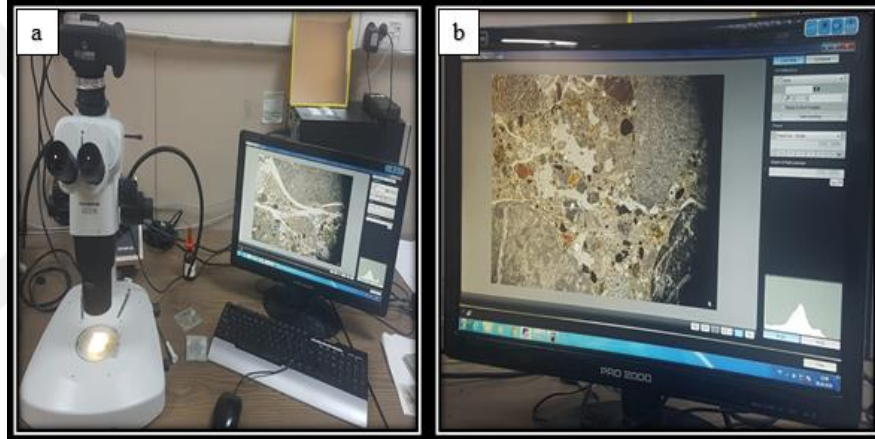
Resim 4.12 a) 16×16×16 cm 10 adet özel ahşap kalıpların yapılması b) Hazırlanan epoksinin beton örneğinin üstüne döküm aşaması c) Vakum pompası düzeneğin hazır hale getirilmesi d) Kesim işlemi için hazır hale gelen epoksili beton örnekleri



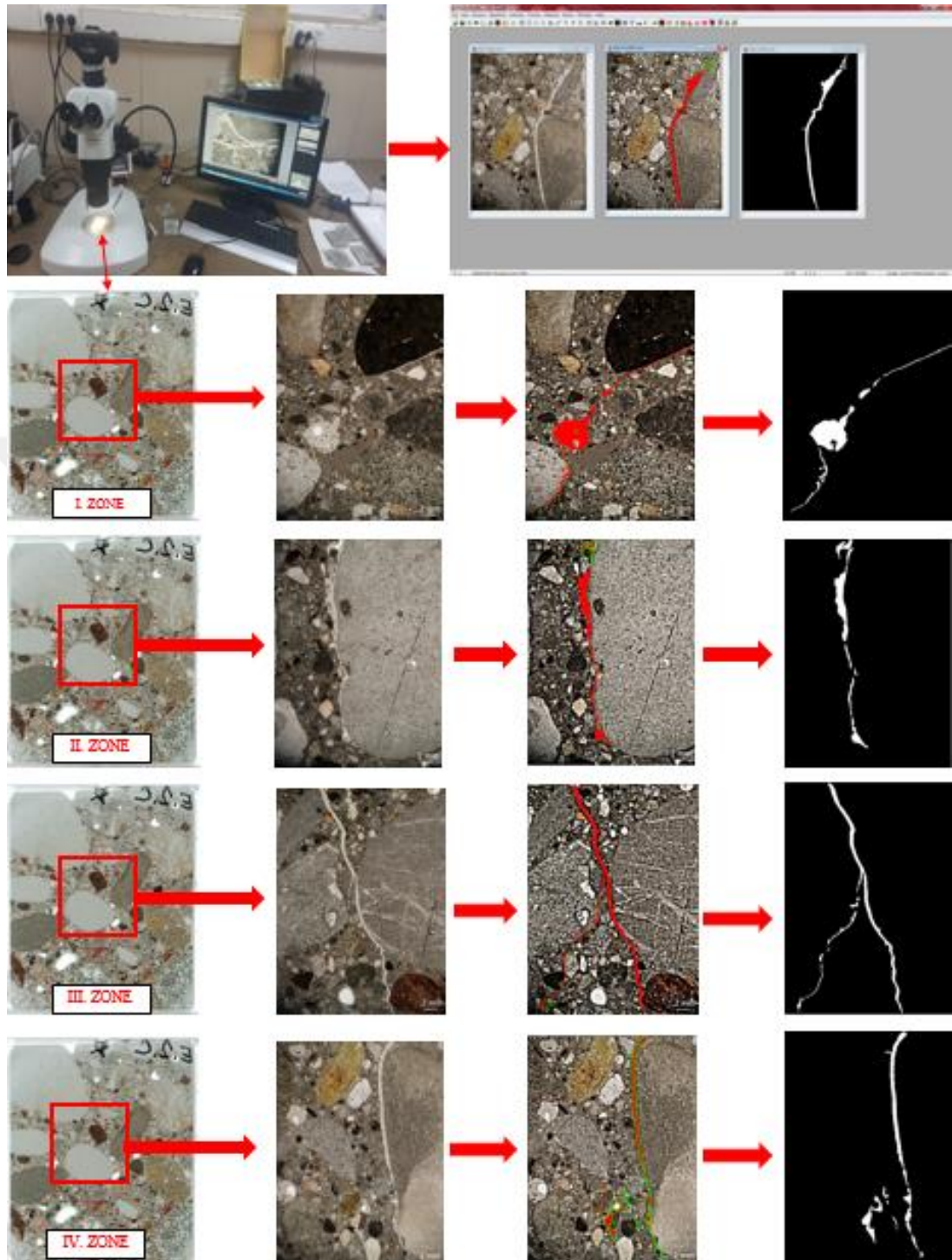
Resim 4.13 Beton örneklerinin a) Sıra halinde dizilmesi b) Baş kesme makinesi ile kesilmesi c) 2 eşit parçaya bölünmesi d) 4 eşit parçaya bölünmesi ve isimlendirilmesi



Resim 4.14 Makro ölçüm için hazırlanan beton görünümü a) Cilasız b) Cilalı



Resim 4.15 İnce kesitlerin a) Mikroskopa yerleştirilmesi b) Görüntülerini bilgisayara aktarımı



Resim 4.16 Beton örneklerin çatlak analiz görüntüleri

4.2.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi için 28 günlük havuz küründen sonra 15×15×15 cm'lik ebatlarda beton örneklerini hassas terazide tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Beton örneklerinin birim hacim ağırlık değerleri aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır.

$$n = \frac{w}{v} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

n: Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)

w: Ağırlık (kg)

v: Numunenin Hacmi (m³)

4.2.2. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases cihazı ile beton malzeme içine iletilen ses dalgalarının deney örneğinin bir yüzeyinden diğer bir yüzeyine geçiş süresi ölçülerek, dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplaması yapılan ses dalgasını hızı ile beton malzemenin basınç dayanım değeri ve başka özellikleri arasında ilişki kurulabilmektedir. Ultrases cihazı, ses üstü dalgaların, probalar arasında kalan ve belli bir uzunluğu olan açıklığı ne kadar zamanda geçtiklerini mikrosaniye biriminde belirtmekte ve cihazda bulunan ekrana aktarmaktadır. Ses üstü dalganın geçiş süresi makine üzerinde okunduktan sonra aşağıdaki formül yardımıyla dalga hızı hesap edilmektedir.

$$V = \frac{L}{t}$$

V = Ses üstü dalga hızı (km/sn) L = Problar arası mesafe (km) t = Zaman (sn)

Dinamik elastisite modülü, genelde laboratuvar çalışmalarında betonların durabilite davranışı hakkında fikir tahmininde bulunmak için kullanılır. Beton

malzemenin elastisite modülü ve dayanımı arasında bir ilişki vardır. Betonun kalitesine etki edebilecek her türlü etken elastisite modüllü değerinde de değişiklik yapacaktır. Bu durumu statik elastisite modülü yöntemi ile takip edebilmek için çok miktarda deney numunesi üretmek ve farklı etkenlere maruz bırakarak gerilme-birim deformasyon eğrilerini oluşturmak gerekmektedir. Böyle bir durumda bile, aynı özellikler göstermesi beklenerek üretilen örneklerin üniformalılarında farklılık gözlenebilir. Fakat dinamik elastisite modülünü bulurken kullanılan ultrasonik yöntem hasarsız deney yöntemlerindendir. Bu deney yönteminin uygulanmasıyla beton malzemede deformasyon oluşumuna engel olunmaktadır. Böylece malzeme herhangi bir tahribata uğramadan dinamik elastisite modülü değerini belirleyebilmek ve malzemenin kalitesi hakkında fikir yürütebilmek gerçekleştirilebilmektedir. Dinamik elastiklik modülünün hesaplanabilmesi için aşağıdaki formül yardımı ile hesap edilmektedir.

$$E_d = \frac{V^2 n (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} (10^{-6})$$

E_d = Dinamik elastiklik modülü, MPa

V = Puls hızı, m/saniye

n = Betonun birim ağırlığı, kg/m³

μ = Poisson oranı

4.2.3. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri, Devlet Su İşlerine ait tek eksenli basınç presinde 2.5 kgf/cm².sn yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin basınç dayanımları aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmiştir.

$$\sigma = \frac{P}{A} (MPa)$$

σ = Basınç dayanımı (MPa) P = Uygulanan yük (N) A = Yüzey alanı (mm²)

4.2.4. Mikroyapı Çalışmaları

Petrografi biliminde mineraller ışığı geçiren şeffaf mineraller ve ışığı geçirmeyen opak mineraller olmak üzere iki gruba ayrılır. Işığı geçiren minerallerin analizinde optik mikroskop adı verilen alttan aydınlatmalı mikroskop kullanılır. Optik mikroskop günümüzde doğal ve endüstriyel minerallerin analizi başta olmak üzere çimento sektörü, seramik endüstrisi, mineral lifleri, ağaç endüstrisi gibi malzeme mühendisliğini ilgilendiren birçok alanda anizotrop numunelerin sayısal ve doku analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı yönlerde titreşen normal ışık polarizatörden geçtikten sonra 0.030 mm kalınlıkta inceltilmiş numuneden geçer, analizörden geçtikten sonra tek bir yönde titreşim yapan ışık göze ulaşır. Göze gelen ışık içinden geçtiği numunenin optik özelliklerine göre farklı renk ve dokuda gözlenir. Optik ışığın bu özelliği kullanılarak malzemelerin mineral ve doku özellikleri analiz edilir. Bu çalışmada optik mikroskop yardımıyla ince kesitlerden deformasyonların belirlenmesi için görüntüler alınmıştır. Elde edilen görüntüler ölçeklendirildikten sonra İmage-Pro Plus programı kullanılarak çatlak analizleri yapılmıştır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Beton örneklerine ait birim ağırlık değerleri, ultrases geçiş hızı deneyi beton basınç dayanımı deneyi, makro ve mikro görüntüleri neticesinde elde edilen bulgular ayrıntılı bir şekilde bu bölümde değerlendirilmiştir.

5.1. Birim Hacim Ağırlık Bulguları

Kür havuzunda 28 gün kür edilen 10 adet beton örneğine ait birim hacim ağırlıkları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çimko Beton Adıyaman Tesisinde üretilen beton bileşenlerinin miktarları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Beton örneklerinin birim hacim ağırlıklarının ortalaması 2471 kg/m^3 olarak bulunmuştur. Beton örneklerin birim hacim ağırlıkların değerleri ile ortalama birim hacim ağırlık değeri birbirine yakın olduğu yani beton örneklerin birim hacim ağırlıkların değerleri ortalamadan çok uzaklaşmadığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda beton örneklerin birim hacim ağırlıkların standart sapmasının değeri 14 kg/m^3 olarak tespit edilmiş ve standart sapmanın sıfıra çok yakın olması sebebiyle ihmal edilecek düzeyde olduğu bulgusuna varılmıştır. Bulgular neticesinde beton örneklerinin homojen bir şekilde hazırlandığı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.1 Beton birim ağırlıkları (kg/m^3)

Küp Örnekleri	Yaş Ağırlıkları (kg)	Numune Hacmi (m^3)	Birim Ağırlıkları (kg/m^3)	Standart Sapma (kg/m^3)
E.1	8.351	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2474	± 14
E.2	8.298	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2458	
P.1	8.332	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2468	
P.2	8.371	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2480	
P.3	8.305	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2460	
P.4	8.449	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2503	
P.5	8.271	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2450	
P.6	8.322	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2465	
K.1	8.348	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2473	
K.2	8.354	$0.15 \times 0.15 \times 0.15$	2475	

Çizelge 5.2 Çimko Beton Adıyaman Tesisinde üretilen beton bileşenlerinin miktarı

Kullanılan Malzeme Cinsi	Miktarı (kg)
Doğal dere agregası (0-4 mm ince)	1067
Doğal dere agregası (4-12 mm orta)	637
Doğal dere agregası (12-22 mm iri)	338
Çimento	280
Su	137
Akışkanlaştırıcı	3.22
Toplam Ağırlık	2462

Birim ağırlıklarına göre sınıflandırılması

Çalışmalarda kullanılan betonun birim hacim ağırlıklarını tespit edilerek betonun Çizelge 5.3'e göre "normal beton" sınıfına girdiğini tespit edilmiştir.

Çizelge 5.3 Birim ağırlıklarına göre betonların sınıflandırılması

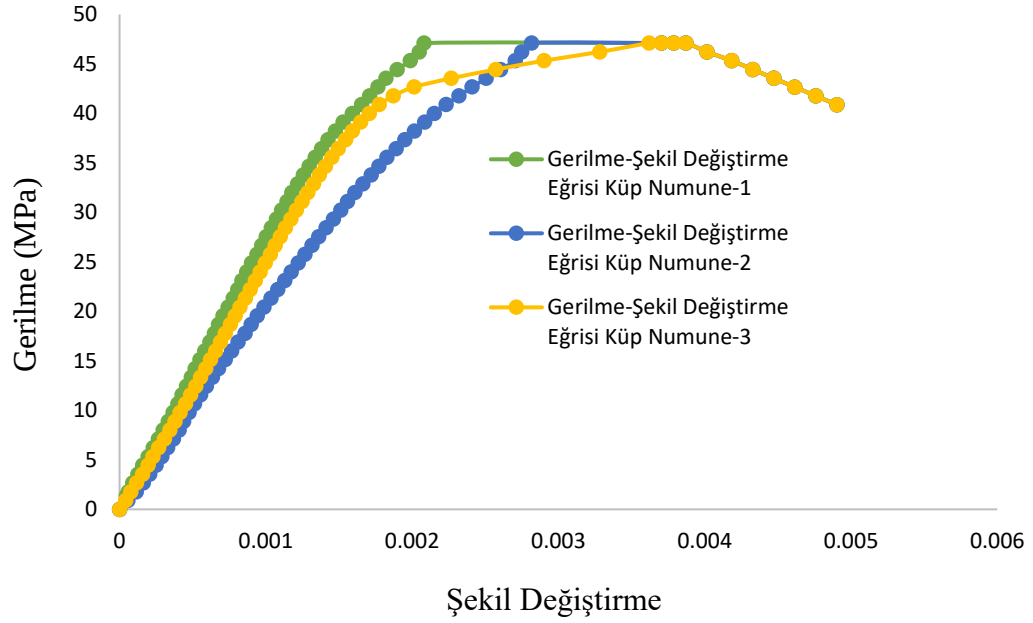
Beton Sınıfı	Birim Ağırlık (kg/m ³)
Hafif beton	Birim ağırlık<2000
Normal beton	2000<Birim ağırlık<2600
Ağır beton	2600<Birim ağırlık

5.2. Basınç Dayanımı Bulguları

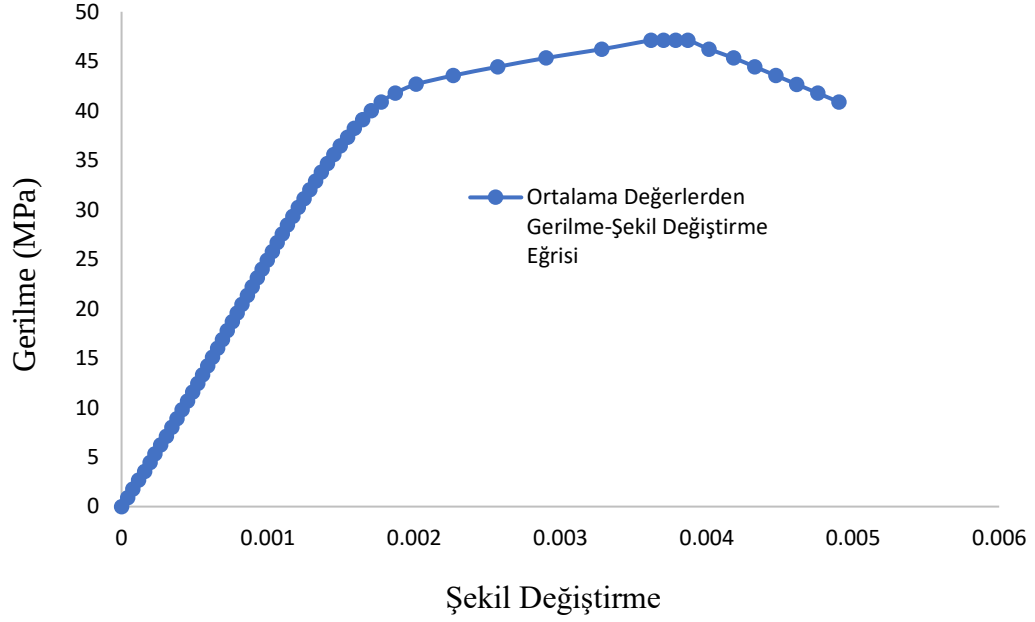
Deneyssel çalışma kapsamında üretilen 3 küp örneğe ait kırılma yükü, basma dayanımı, maksimum gerilme, doğrusal bölge eğimi, sekant modülü ve poisson oranları gibi değerler Çizelge 5.4'te verilmiştir. Basınç dayanımı deneyinde elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve değerleri Şekil 5.1'de verilmiştir. Ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 5.2'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Çizelge 5.4 Çalışmada kullanılan beton örneklerinin basınç dayanımı bulguları

Küp Örnekler	Kırılma Yüğü (kN)	Basma Dayanımı (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)	Doğrusal Bölge Eğimi (GPa)	Sekant Modülü (GPa)	Poisson Oranı
1	1133.0	50.4	40.0	27.22	27.45	0.28
2	1144.9	50.9	44.4	19.25	20.86	0.12
3	1152.0	51.2	47.1	25.71	24.44	0.16

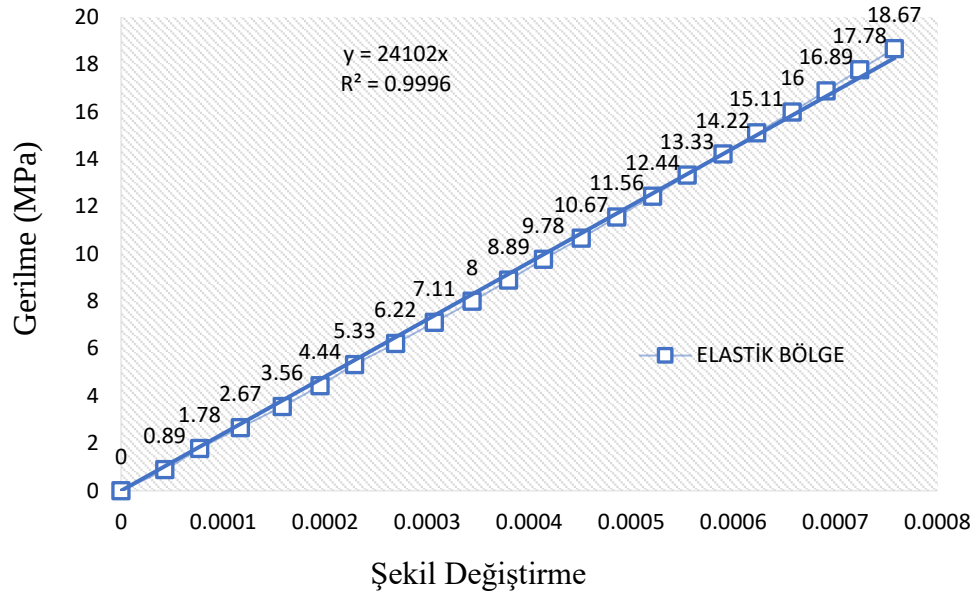


Şekil 5.1 Beton örneklerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri

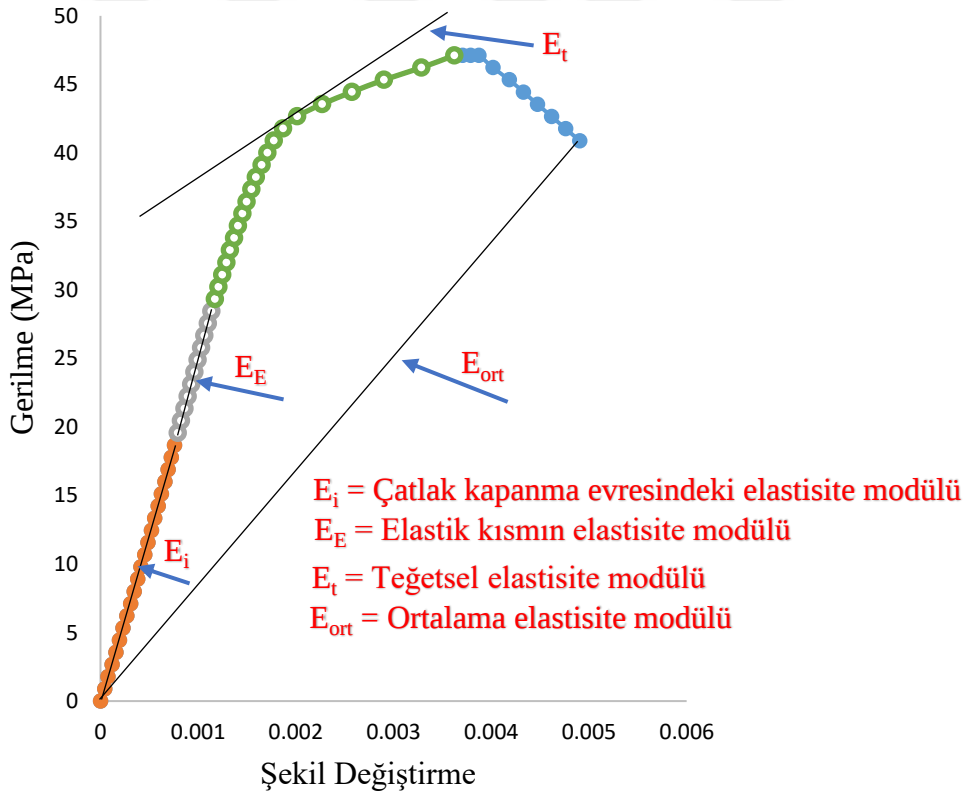


Şekil 5.2 Ortalama gerilme-şekil değişirme eğrisi

Gerilme-şekil değişirme eğrisinde regresyon analizi yapılarak elastik bölgenin değerini ve eğrisini Şekil 5.3'te verilmiştir. Elastik bölge için korelasyon katsayısını R^2 0.99 bulunmuştur. Elasto-plastik bölgesi için gerilme değerini elde edilmesine rağmen press cihazın o değerde dondurulmadığı için elasto-plastik kademesi ele alınmamıştır. Kırılma bölgesi için ise kırıldığı değer alınmıştır. Ortalama gerilme-şekil değişirme eğrisi üzerinde elastik, plastik ve kırılma bölgeleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Elde edilen kademelerdeki değerler Çizelge 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Elastik bölgenin bulunması ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi arasındaki korelasyon



Şekil 5.4 Ortalama değerlerden oluşan gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki elastisite modülleri

Çizelge 5.5 Elastik, plastik ve kırılma bölgelerdeki değerler

Bölgeler	Gerilme Değerleri (MPa)	Kuvvet Değerleri (kN)
Elastik bölge	18.67	420
Plastik bölge	28.44	640
Plastik bölge (Alınan Değer)	38.22	860
Plastik bölge (Alınan Değer)	40.00	900
Kırılma bölgesi	47.11	1060

5.3. Ultrases Geçiş Hızı Bulguları

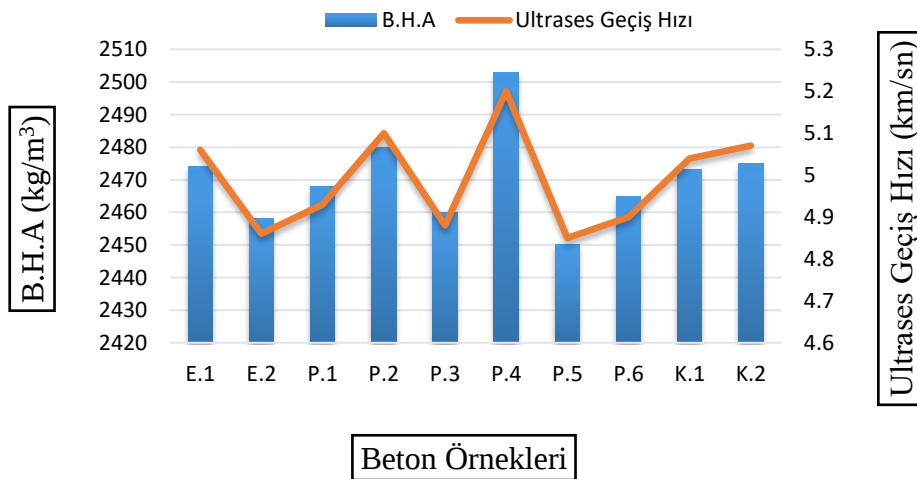
Beton örneklerinde, ultrases geçiş hızı ölçümleri dijital ultrases geçiş hızı ölçme aleti ile belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızı belirlenirken numunenin ölçüm yapılacak yüzeyleri temizlenmiştir. Diğer taraftan okumaların daha sağlıklı olabilmesi ve temasın tam sağlanması için test cihazının başlıkları ultrases jeli ile jellenmiş ve bu cihazın alıcı ve verici probaları her bir numunenin karşılıklı yüzeylerine tutularak bir numunede üç okuma yapılarak ortalaması alınmıştır. Okumalar mikrosaniye olarak kaydedildikten sonra probalar arası mesafe kullanılarak km/sn değerine çevrilmiştir. Beton örneklerine ait ultrases geçiş hızı bulguları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Beton örneklerinin ultrases geçiş hızı bulgularından ortalama 4.99 km/sn olarak bulunmuş ve Çizelge 5.7'e göre beton kalitesinin "çok iyi" sınıfına dâhil olduğu tespit edilmiştir. Beton örneklerin ultrases geçiş hızı bulguları ile ortalama ultrases geçiş hızı değeri birbirine yakın olduğu yani beton örneklerin ultrases geçiş hızı bulguları ortalamadan çok uzaklaşmadığı tespit edilmiştir. Ultrases geçiş hızı bulgularından standart sapmasının değeri 0.12 km/sn olarak tespit edilmiş ve standart sapmanın sifıra çok yakın olması sebebiyle ihmal edilecek düzeyde olduğu bulgusuna varılmıştır. Bulgular neticesinde beton örneklerinin homojen bir şekilde hazırlandığı ve sağlıklı bir ortamda ultrases geçiş hızı ölçümü yapıldığı tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlık değeri yüksek olan beton örnekleri daha yoğun yapıda olmasından dolayı ultrases geçiş hızının da yüksek olması beklenmektedir. Deneylerden elde edilen bulgular bu bilgileri doğrular niteliktedir (Şekil 5.5).

Çizelge 5.6 Ultrases geçiş hızı bulguları

Küp Örnekler	V _p (km/sn)	Ortalama V _p (km/sn)	Standart Sapma (km/sn)
E.1	5.06		
E.2	4.86		
P.1	4.93		
P.2	5.10		
P.3	4.88	4.99	±0.12
P.4	5.20		
P.5	4.85		
P.6	4.90		
K.1	5.04		
K.2	5.07		

Çizelge 5.7 Beton örneklerin ultrases değerlerine göre sınıflandırılması

Ultrases Geçiş Hızı	Beton Kalitesi
>4.5	Çok iyi
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Orta
<3.5	Kötü



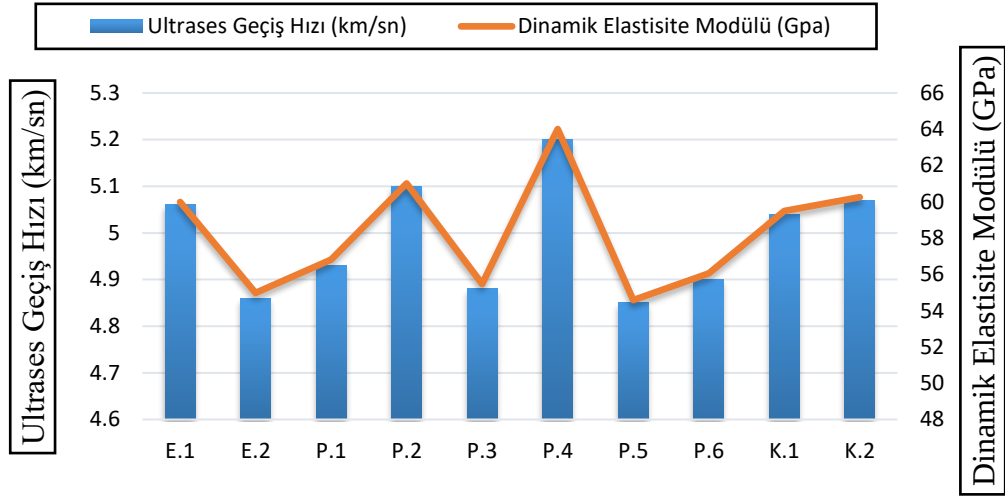
Şekil 5.5 Birim hacim ağırlık bulguları ile ultrases geçiş hızı bulguları arasındaki ilişki

5.4. Dinamik Elastisite Modülü Bulguları

Dinamik elastisite modülünün tayininde kullanılan ultrasonik yöntem hasarsız yöntemlerdir. Bu yöntemlerin kullanılmasıyla betona yük uygulanmamakta ve betonda çatlama, kırılma oluşmamaktadır. Bu bakımdan, aynı beton üzerinde, beton henüz kimyasal etkenlere maruz kalmadan ve bu etkenlere maruz kaldıktan sonraki belirli zamanlarda dinamik elastisite modülünü tayin edebilmek ve böylece beton kalitesindeki değişikliği izleyebilmek mümkün olabilmektedir. Bu sebeple ultrasonik yöntemle betonun dinamik elastiklik modülü Çizelge 5.8’de verilmiştir. Ortalama dinamik elastisite modülün değeri 58.29 GPa olarak hesaplanmıştır. Elde ettiğimiz bulgular neticesinde statik elastisite modülün değeri yaklaşık olarak dinamik elastisite modülün %40’ına eşittir. Kumar [40] yaptığı çalışmada, statik elastisite modülün değeri dinamik elastisite modülü değerinin %20-40 arasında olduğu belirlemiştir. Deneylerdeki bulgular, Kumar [40]’ın tespitini destekler niteliktedir. Aynı zamanda dinamik elastisite modülü ile ultrases geçiş hızı arasında doğru orantı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.6). Elde edilen bulgular neticesinde statik elastisite modülünün belirlenemediği durumlarda ultrases cihazıyla belirlenen dinamik elastisite modülünün hesaplarda kabul edilebilir bir doğrulukla kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Çizelge 5.8 Dinamik elastisite modülü

Küp Örnekler	Ed (MPa)	Ortalama Ed (MPa)
E.1	59989	58283
E.2	54983	
P.1	56808	
P.2	61089	
P.3	55481	
P.4	64098	
P.5	54579	
P.6	56051	
K.1	59492	
K.2	60251	



Şekil 5.6 Dinamik elastisite modülü ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

5.5. Makroyapı Bulguları

E.1-E.2, P.1-P.2, P.3, P.4, P.5-P.6 ve K.1-K.2 beton örnekleri için dijital makinede fotoğraflar çekilerek makroyapı çalışmaları yapılmıştır. Yapılan incelemelerde E.1-E.2, P.1-P.2, P.4 ve P.5-P.6 beton örneklerinde gözle görülür belirgin makro çatlak tespit edilmemiştir (Resim 5.1, Resim 5.2, Resim 5.3 ve Resim 5.4). Yük altında 1.5 saat bekletildikten sonra yüke dayanamayıp kırılan P.3 beton örneğinde epoksi olan bölgenin parçalanıp döküldüğü Resim 5.5'te gösterilmiştir. K.1-K.2 beton örneklerinde gözle görülebilir uzunlukta makro çatlaklar tespit edilmiştir (Resim 5.6). P.3 ve K.1-K.2 beton örneklerinde makro çatlaklarda incelemeler yapıldıktan sonra aşağıdaki yargılara ulaşılabilir:

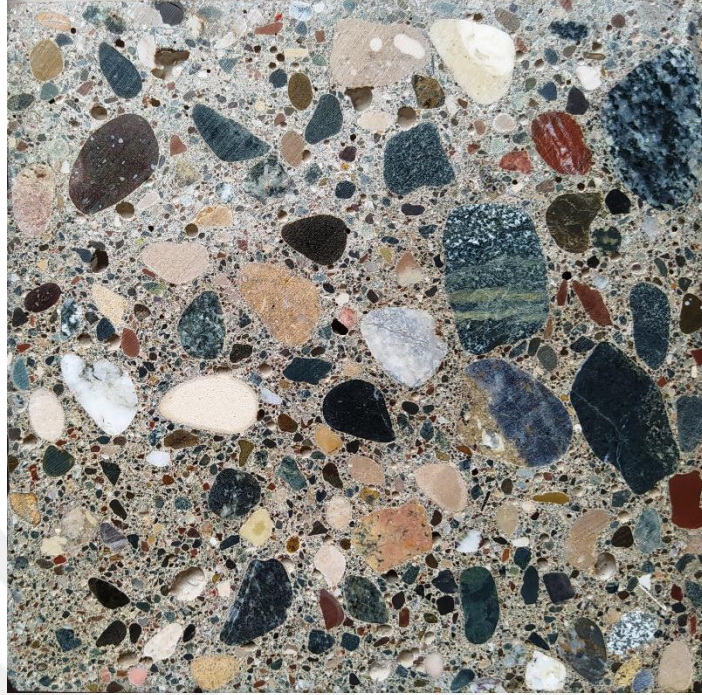
- P.3 ve K.1-K.2 beton örneklerinde yükleme yönüne paralel olacak şekilde boyuna yaklaşık 15 cm makro çatlaklar oluştuğu tespit edilmiştir. Tanigawa ve Yamadaka [11], çatlakların basınç yüklemesine paralel doğrultuda geliştiğini belirtmektedirler. Literatürdeki bu bulgular, P.3 ve K.1-K.2 beton örneklerinde elde edilen verileri destekler niteliktedir.
- P.3 ve K.1-K.2 beton örneklerinde meydana gelen makro çatlaklar düzensiz ve dağınık bir şekilde betonun içine yayıldığını tespit edilmiştir. Johnston [8],

basınç dayanımı altında oluşan çatlakların kararsız ve dağınık şekilde oluştuğunu belirtmektedir. Literatürdeki bu bulgular, P.3 ve K.1-K.2 beton örneklerinde elde edilen verileri destekler niteliktedir.

- Çatlaklar genellikle beton içerisinde en zayıf bölgelerden geçerek ilerlemeye çalışırlar. P.3 ve K.1-K.2 beton örneklerinde meydana gelen makro çatlaklar özellikle agregaların temas yüzeyinde geçerek ilerlemişlerdir. Yapılan deneyler ve incelemeler neticesinde betonun içyapısında en zayıf halkanın agregaların temas yüzeyi olduğu söylenilebilir. Literatürdeki bu bulgular, P.3 ve K.1-K.2 beton örneklerinde elde edilen verileri destekler niteliktedir.
- P.3 ve K.1-K.2 beton örneklerin kırılan yüzeyleri incelediğinde çok sayıda yerlerinden sökülmüş agrega tanesi, az sayıda da kırılmış agrega görülmüştür. Bu durum çimento-agrega ara yüzeyindeki bağın zayıflığına işareti olabilir.



Resim 5.1 E.1-E.2 beton örneklerin makroyapısı



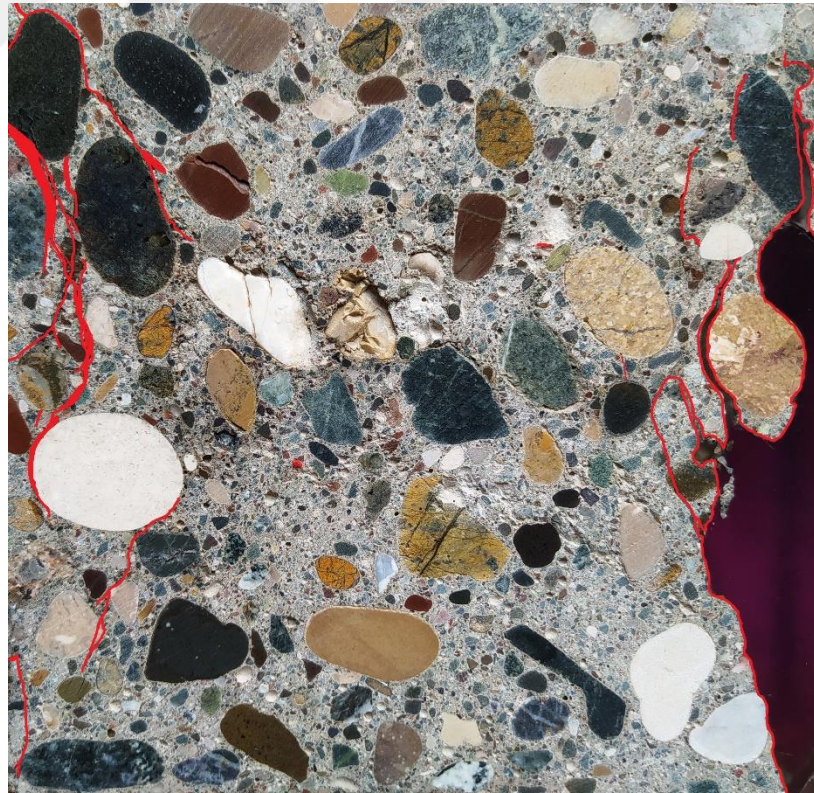
Resim 5.2 P.1-P.2 beton örneklerin makroyapısı



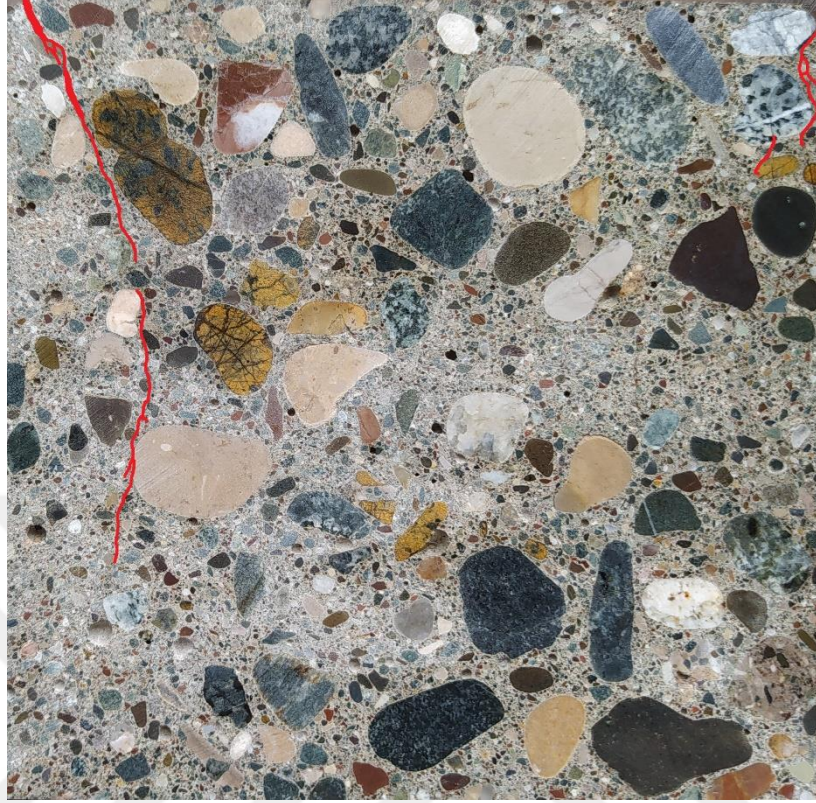
Resim 5.3 P.4 beton örneğinin makroyapısı



Resim 5.4 P.5-P.6 beton örneklerin makroyapısı



Resim 5.5 P.3 beton örneğinin makroyapısı



Resim 5.6 K.1-K.2 beton örneklerin makroyapısı

5.6. Mikroyapı Bulguları

P.3 beton örneğinin gerilme değeri, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin non-lineer olarak harekete geçtiği yerden seçilmiştir. P.3 beton örneğinin gerilme değeri maksimum gerilmenin %81'ine denk gelmektedir. Çizelge 5.9'da gösterilen beton örnekleri ince kesitleri mikroskopta incelenmiştir. İncelemeler sonucunda tespit edilen belirgin çatlakların deformasyon ölçümleri yapılmıştır.

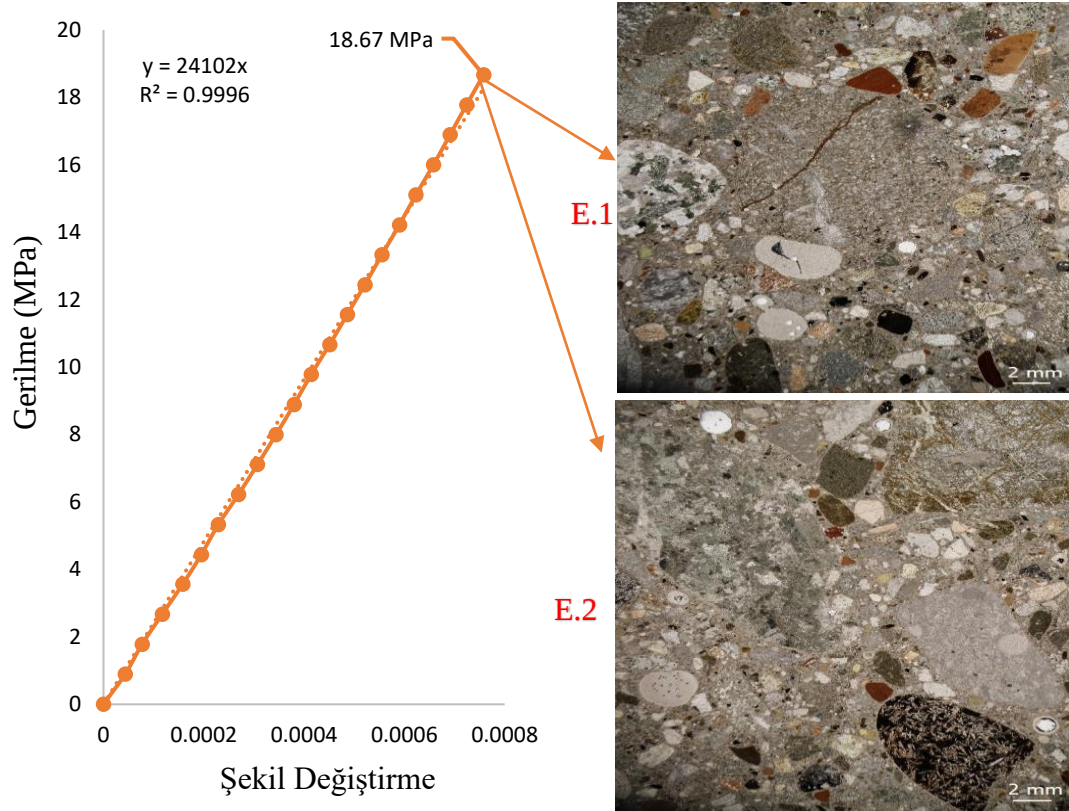
Çizelge 5.9 Beton örneklerin nicel verileri

Beton Örnekleri	Gerilme Değerleri (MPa)	Şekil Değiştirme Değerleri	Maksimum Gerilmeyle Olan Yüzdelikleri	Yük Altında Bekleme Süreleri (saat)
E.1-E.2	18.67	0.000758	%40	2
P.1-P.2	28.44	0.001135	%60	2
P.3	40.00	0.001708	%85	2
P.4	38.22	0.001592	%81	2
P.5-P.6	40.00	0.001708	%85	-
K.1-K.2	47.11	0.003621	%100	-

E = Elastik Bölge, P = Plastik Bölge, K = Kırılma Bölgesi

5.6.1. E.1-E.2 Beton Örnekleri

E.1-E.2 beton örneklerinin elastiklik modülü “sekant” yöntemi kullanılarak, betonun maksimum gerilme değerinin %40’ına karşılık gelen gerilme değeri temel alınmıştır. Maksimum gerilme değerinin %40’ıyla yük altında 2 saat bekletilen E.1-E.2 beton örneklerinde belirgin çatlaklar tespit edilmemiştir (Şekil 5.7). E.1-E.2 beton örneklerin ince kesitlerinde incelemeler sonucu bu yargıya varılabilir; gerilme-şekil değiştirme eğrisinde elastik bölgede yer alan beton örneklerinde yükleme yapıp boşaldıktan sonra beton malzemesinde şekil değiştirmeler meydana gelmiş ama belirgin çatlaklar tespit edilmemiştir. Maksimum gerilmenin %50 değerine kadar beton malzemede lineer elastik davranış görülebilir, yani yük kaldırıldığı zaman deformasyon tersinir olabilmektedir [2]. Elastik bölgede (maksimum gerilmenin %40’lık olan kısım) çatlakların belirgin olmadığı ve yük kaldırıldığı zaman da deformasyonun tersinir olduğu yargısı çıkarılabilir.



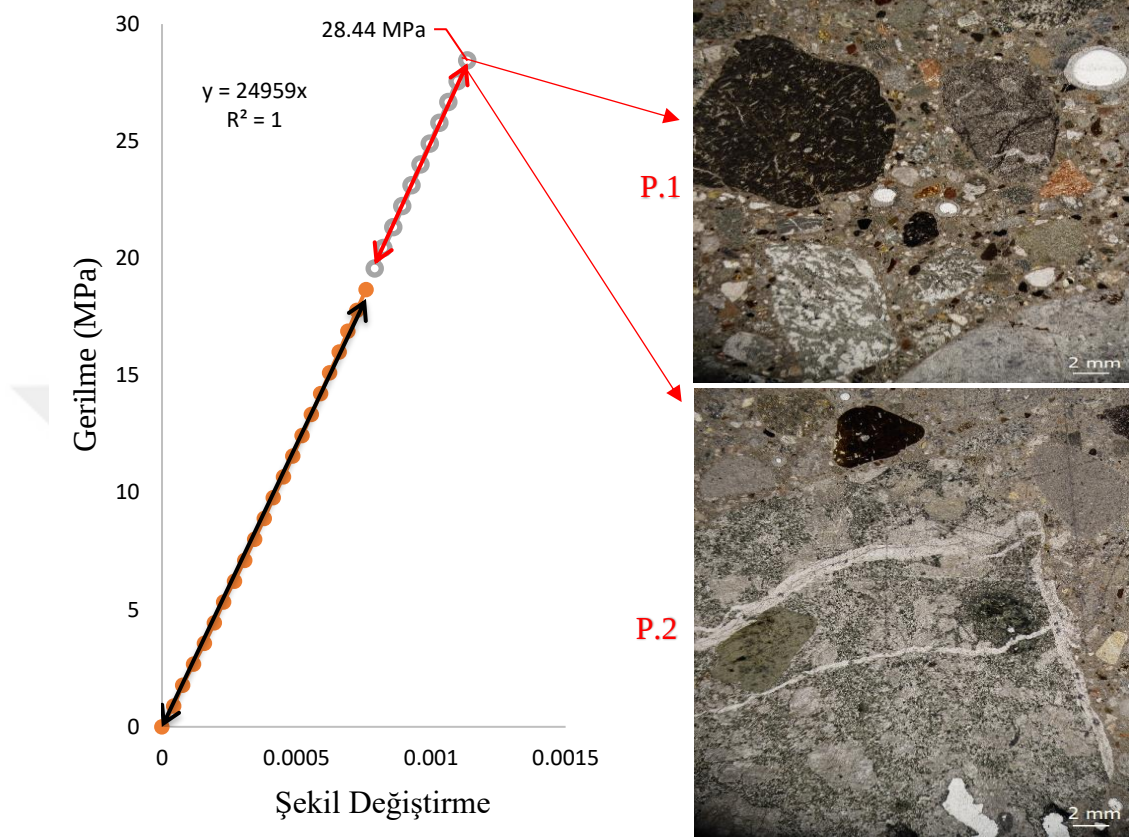
Şekil 5.7 E.1-E.2 beton örneklerinin mikroyapısı (maksimum gerilme değerinin %40'lık kısmı)

5.6.2. P.1-P.2 Beton Örnekleri

P.1-P.2 beton örneklerinin elastiklik modülü “sekant” yöntemi kullanılarak, betonun maksimum gerilme değerinin %60'ına karşılık gelen gerilme değeri temel alınmıştır. P.1-P.2 beton örneklerin ince kesitleri mikroskopta incelenmiştir. İncelemelerden sonra belirgin çatlaklar tespit edilmemiştir (Şekil 5.8). Maksimum gerilmenin %60'ı değerinde yük altında 2 saat bekletilen beton örneklerinde agregaların etrafında ve üzerinde şekil değiştirmeler meydana gelmiş fakat ince kesit görüntülerinde belirgin çatlaklar tespit edilmemiştir.

Literatürde, elastik bölgede beton malzemesinde belirgin çatlakların çimento hamurun içinde oluşmadığını belirtmektedirler [1,2]. Liliu ve Von Mier [41], 2007'de yaptıkları çalışmada maksimum gerilmenin %35'i değerinde beton malzemesinde belirgin çatlakların oluşmadığını tespit etmişlerdir. Maleka vd. [42], 2017'de yaptıkları çalışmada elastik bölgede beton malzemesinde oluşan çatlakların belirgin

olmadığı tespit etmiştir. Literatürdeki bu bulgular, elastik bölgede elde edilen verileri destekler niteliktedir.



Şekil 5.8 P.1-P.2 beton örneklerinin mikroyapısı (maksimum gerilme değerinin %60'lık kısmı)

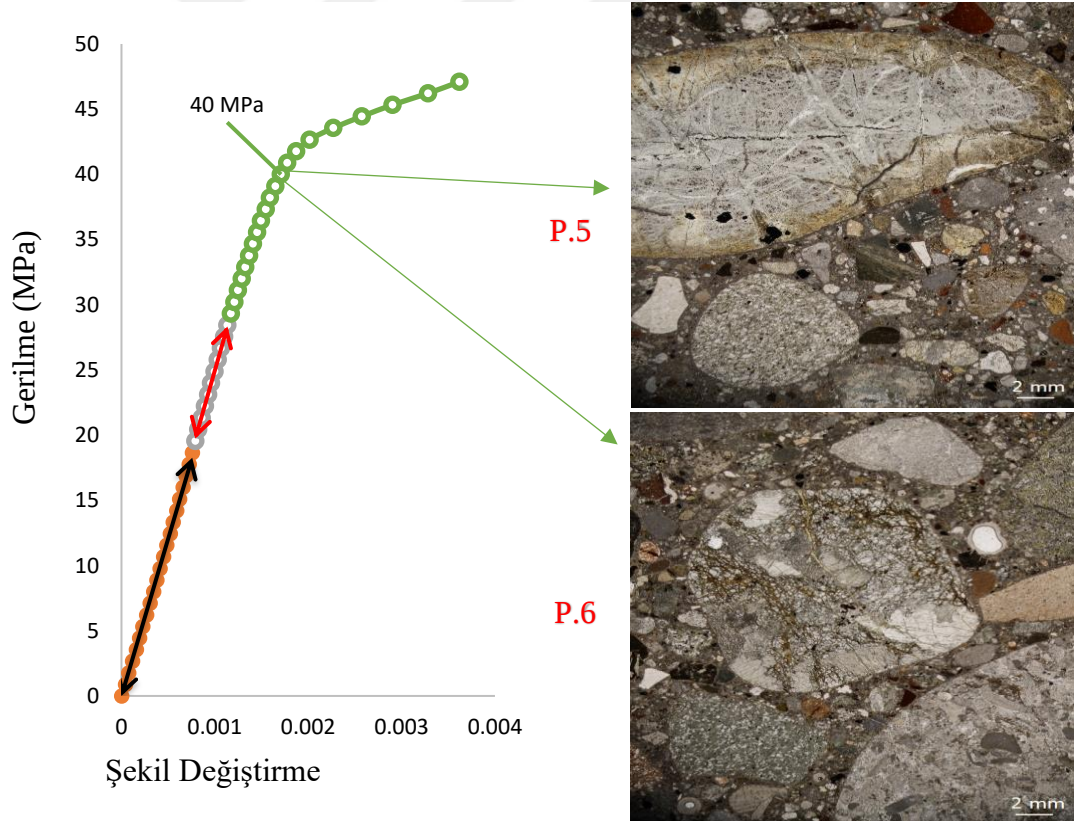
5.6.3. P.5-P.6 Beton Örnekleri

P.5-P.6 beton örneklerin ince kesitleri mikroskopta incelenmiş ve belirgin çatlaklar tespit edilmemiştir (Şekil 5.9). Maksimum gerilmenin %85'i değerinde yüklenilen beton örneklerinde agregaların etrafında ve üzerinde şekil değiştirmeler ve deformasyonlar meydana gelmiş ama ince kesit incelemelerinde belirgin çatlaklar tespit edilmemiştir.

Beton içerisinde yer alan çatlakların en fazla olduğu yerin maksimum gerilmenin %40'ı değerinde çimento hamuru ve agrega ara yüzeyi bölgesinde bulunduğu, %60'ı değerinde aniden ve önemli ölçüde artış gösterdiği ve %80'i değerinde ise sürekli mikro çatlak ağı meydana geldiği belirtilmektedir [1,2]. Johnson

[8], beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %60'ı değerinde çimento hamurunda kararlı bir şekilde yayıldığını ve %80'i değerinde ise çimento hamurun içine doğru kararsız bir şekilde yayıldığını belirtmektedir. Bache and Christensen [10], beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %90'ı değerinde çimento hamurun içine doğru yayıldığını belirtmektedirler. Maksimum gerilmenin %70-90'ı değerinde yüklenen beton malzemesinde agreganın ara yüzeyinde oluşan çatlaklar matrise doğru kararlı bir şekilde yayıldığını belirtmektedir [43].

P.5-P.6 beton örneklerin ince kesitlerinde yapılan incelemeler göz önünde bulundurularak şu yargıya varılabilir; maksimum gerilmenin %85'i değerinde yüklenen beton malzemesinde agregalarda şekil değiştirmeler olmuş ama belirgin bir şekilde çatlaklar tespit edilmemiştir. Bu örneklerde çimento agrega ara fazının muhtemelen kuvvetli oluşu bu durumu engellemiş olabileceği düşünülmektedir.

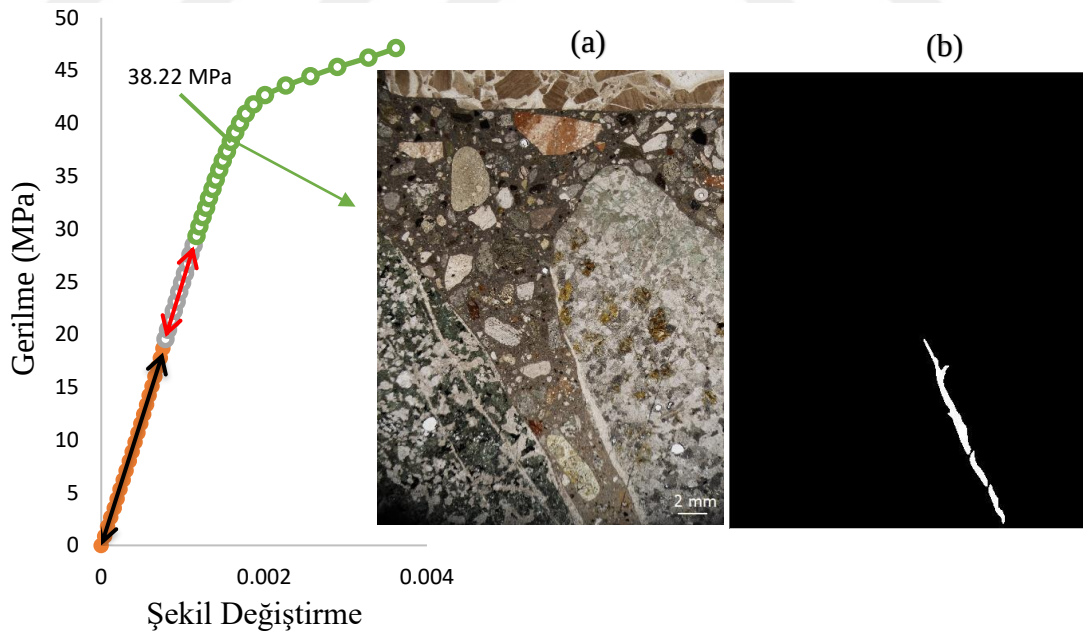


Şekil 5.9 P.5-P.6 beton örneklerinin mikroyapısı (maksimum gerilme değerinin %85'lik kısmı)

5.6.4. P.4 Beton Örneği

P.4 beton örneğinin ince kesitleri mikroskopta incelenmiş ve belirgin çatlakların analizi yapılmıştır (Şekil 5.10). Belirgin çatlakların analiz verileri Çizelge 5.10'da verilmiştir. Maksimum gerilmenin %81'i değerinde yük altında 2 saat bekletilen beton örneğinde agregaların etrafında ve üstünde şekil değişiklikler olmuştur ve bununla birlikte belirgin çatlaklar tespit edilmiştir. P.4 beton örneğinin gerilme değeri, P.5-P.6 beton örneklerine kıyasla daha düşük değerde olmasına rağmen belirgin çatlaklar görülmüştür. Bu tespitle birlikte maksimum gerilme değerinin %80'i aşıldıktan sonra beton örneklerin yük altında bekletme ya da bekletmeme durumu etkili olabileceği düşünülmektedir.

P.4 beton örneğinin ince kesitlerinde yapılan incelemeler göz önünde bulundurularak şu yargıya varılabilir; maksimum gerilme değerinin %80'iyle yüklenen beton malzemesinin içyapısındaki şekil değiştirmelerle birlikte belirgin bir şekilde çatlakların tespiti yapılmıştır. Bu bölgede çatlaklar kararlı bir şekilde çimento hamurun içine doğru yayılmıştır.



Şekil 5.10 P.4 beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi (maksimum gerilme değerinin %81'lik kısmı)

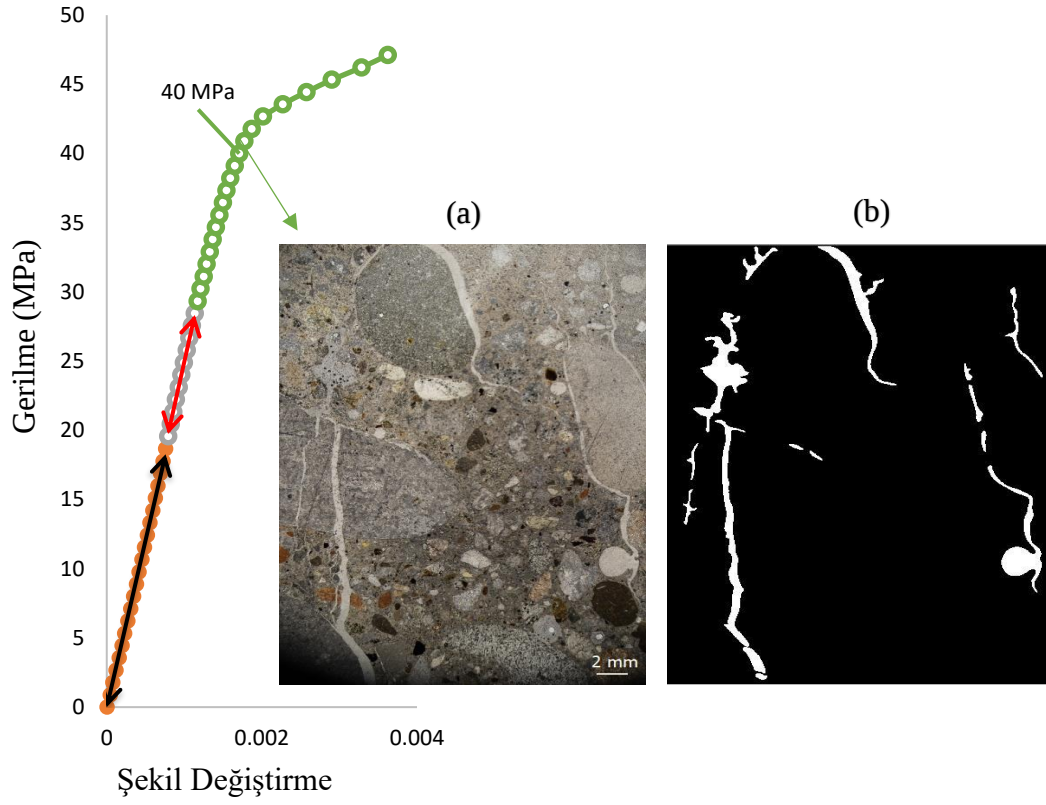
Çizelge 5.10 P.4 beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri

	Alan (mm ²)	Boy (mm)	Genişlik (mm)
Max.	3.554	8.457	1.147
Min.	0.881	2.569	0.444
Ort.	1.781	4.612	0.723

5.6.5. P.3 Beton Örneği

P.3 beton örneğinin ince kesitleri mikroskopta incelenip değerlendirildikten sonra belirgin çatlakların analizi yapılmıştır (Şekil 5.11, Resim 5.7 ve Resim 5.8). Maksimum gerilme değerinin %85'iyle yükleme altında 2 saat bekletilen P.3 beton örneği yüke dayanamayıp kırılmıştır. P.3 beton örneğinin içyapısında şekilsel olarak değişiklikler meydana gelmiş ve bu şekilsel değişikliklerle birlikte belirgin çatlaklar da oluşmuştur. Belirgin çatlakların agregaların temas yüzeyinde dolanarak çimento hamurun içine doğru dengesiz ve dağınık bir şekilde yayılmıştır. Bu yargıyla birlikte betonun içyapısında en zayıf halkanın agregaların temas yüzeyi olduğu kanıtına varılabilir. Belirgin çatlakların analiz verileri Çizelge 5.11, Çizelge 12 ve Çizelge 13'te verilmiştir. P.3 beton örneğinde meydana gelen belirgin çatlaklar düzensiz ve dağınık bir şekilde yayılmış ve basınç yüklemesine paralel doğrultuda çimento hamurun içine doğru yayılmıştır.

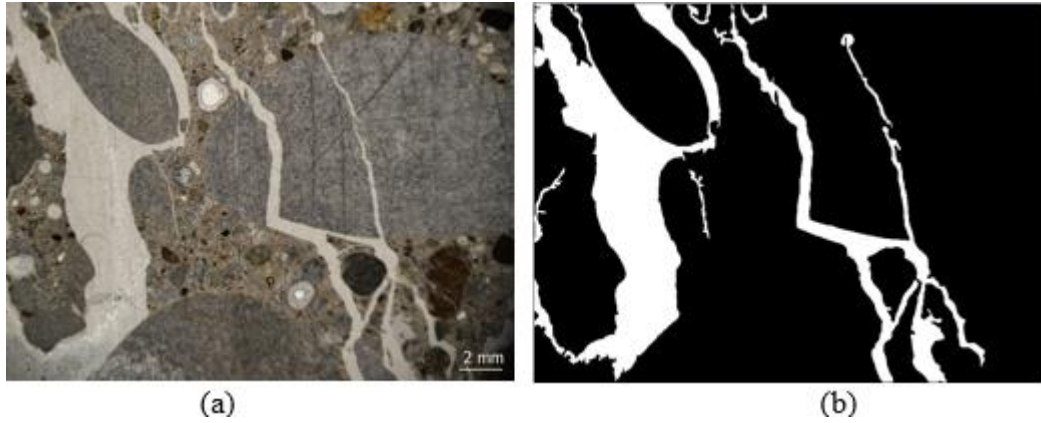
Literatürde, maksimum gerilmenin %85'i değerinde beton malzemesinde belirgin çatlakların çimento hamurun içinde yükleme yönüne paralel ve düzensiz bir şekilde yayıldığını belirtmektedirler [1,2,7,8,10,11]. Liliu ve Von Mier [41], 2007'de yaptıkları çalışmada maksimum gerilmenin %81'i değerinde çimento hamurunda derin çatlakların oluştuğu tespit etmişlerdir. Literatürdeki bu bulgular, maksimum gerilmenin %85'i değerinde elde edilen verileri destekler niteliktedir.



Şekil 5.11 P.3.D beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi (maksimum gerilme değerinin %85'lik kısmı)

Çizelge 5.11 P.3.D beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri

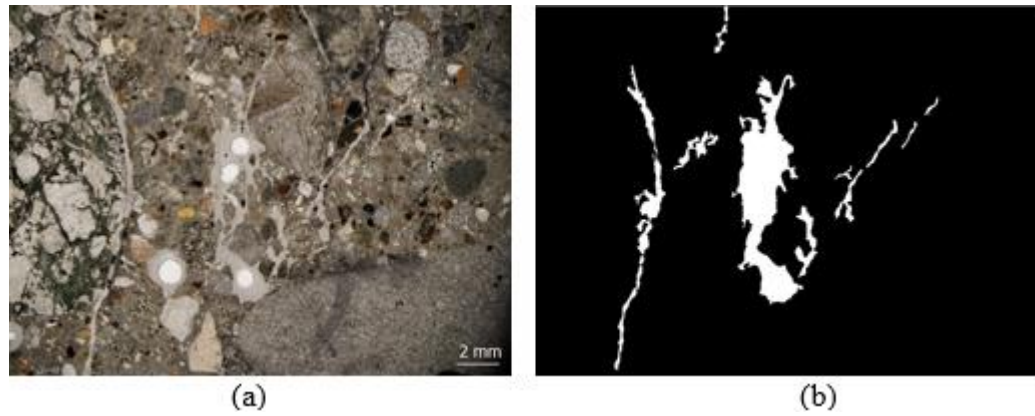
	Alan (mm ²)	Boy (mm)	Genişlik (mm)
Max.	7.946	18.328	3.054
Min.	0.177	0.871	0.223
Ort.	2.326	4.968	1.188



Resim 5.7 P.3.B beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi

Çizelge 5.12 P.3.B beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri

	Alan (mm ²)	Boy (mm)	Genişlik (mm)
Max.	158.640	36.550	15.321
Min.	1.105	2.049	0.897
Ort.	29.499	12.548	4.413



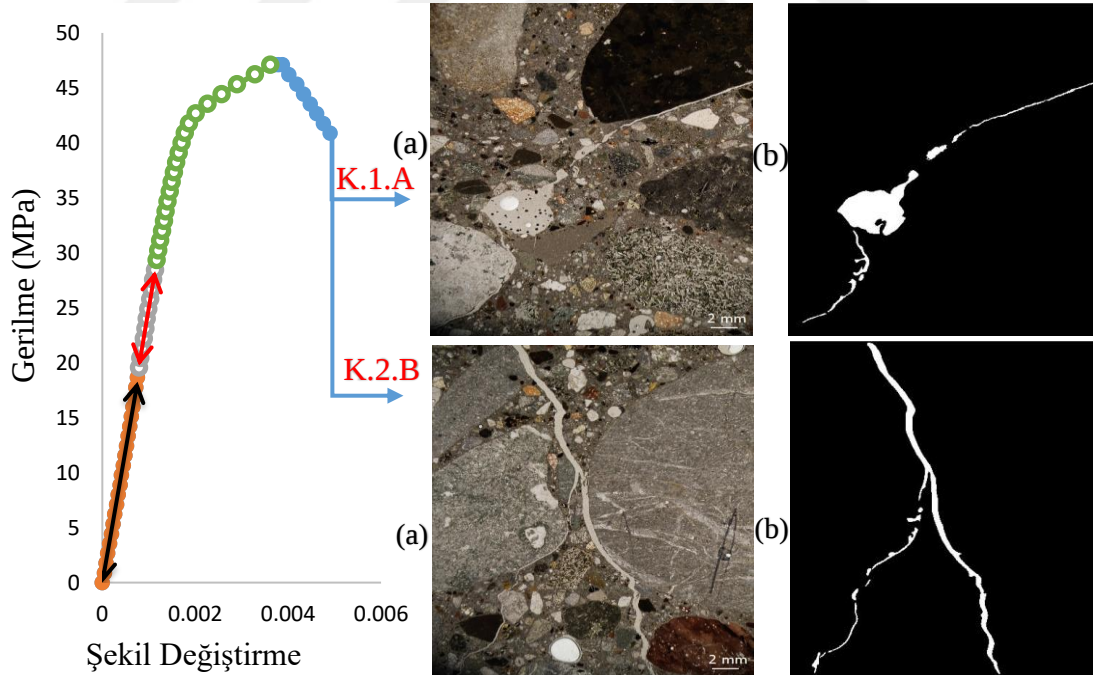
Resim 5.8 P.3.A beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi

Çizelge 5.13 P.3.A beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri

	Alan (mm ²)	Boy (mm)	Genişlik (mm)
Max.	17284	369.401	111.035
Min.	80	13.872	5.892
Ort.	1894	102.277	26.288

5.6.6. K.1-K.2 Beton Örnekleri

K.1-K.2 beton örneklerinin ince kesitleri mikroskopta incelenerek belirgin çatlakların analizi yapılmıştır (Şekil 5.12). Belirgin çatlaklar beton içerisinde düzensiz ve dağınık bir şekilde çimento hamurun içine doğru yayılmıştır. Belirgin çatlakların analiz verileri Çizelge 5.14 ve Çizelge 5.15’te verilmiştir. K.1-K.2 beton örneklerinde şekil değiştirmelerle birlikte belirgin çatlaklar tespit edilmiştir.



Şekil 5.12 K.1.A beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi, K.2.B beton örneğinin a) Mikroyapı resmi b) Çatlak ölçüm resmi

Çizelge 5.14 K.1.A beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri

	Alan (mm ²)	Boy (mm)	Genişlik (mm)
Max.	5957	198.703	87.649
Min.	58	11.704	3.134
Ort.	974.625	74.691	20.085

Çizelge 5.15 K.2.B beton örneğinin belirgin çatlakların analiz verileri

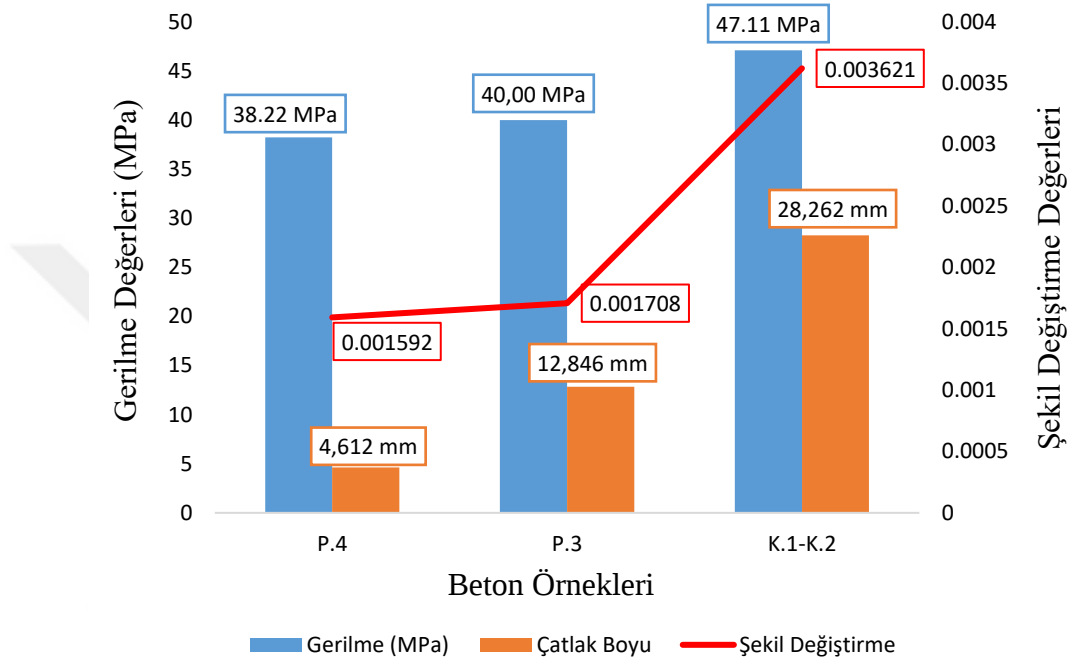
	Alan (mm ²)	Boy (mm)	Genişlik (mm)
Max.	14.701	32.688	2.331
Min.	0.044	0.305	0.106
Ort.	1.641	4.497	0.583

5.6.7. Belirgin Çatlakların Analiz Verileri ile Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi Arasındaki İlişkinin Değerlendirilmesi

P.3, P.4 ve K.1-K.2 beton örneklerin gerilme değerleri ile belirgin çatlakların analiz verileri ve şekil değiştirme değerleri ile belirgin çatlakların analiz verileri arasında iyi bir ilişki olduğu düşünülmektedir. Bu ilişki aşağıda ifade edilmeye çalışılmıştır:

- Beton örneklerin gerilme ve şekil değiştirme değerleri arttıkça belirgin çatlakların ortalama boyları da artmaktadır. Üçlü arasında (gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak boyu) iyi bir ilişki olduğu söylenilebilir (Şekil 5.13). Çizelge 5.16’da verildiği gibi beton örneklerin gerilme değerleri ile ortalama çatlak boyları arasındaki standart sapma değeri 16.666, şekil değiştirme değerleri ile ortalama çatlak boyları arasındaki standart sapma değeri 11.283’tür. Beton örneklerin gerilme değerleri ile ortalama çatlak boyları arasındaki korelasyon değeri R^2 0.99, şekil değiştirme değerleri ile ortalama çatlak boyları arasındaki korelasyon değeri R^2 0.96’dır. R^2

değerlerinin yüksek çıkması çatlak boyların uzaması-gerilme-şekil değiştirme değerleri aralarında iyi korelasyon olduğu söylenilebilir. Standart sapma değerleri göz önüne alındığında; beton örneklerinde oluşan belirgin çatlak boylarının uzamasında şekil değiştirme değerlerin etkisi olduğu söylenilebilir.

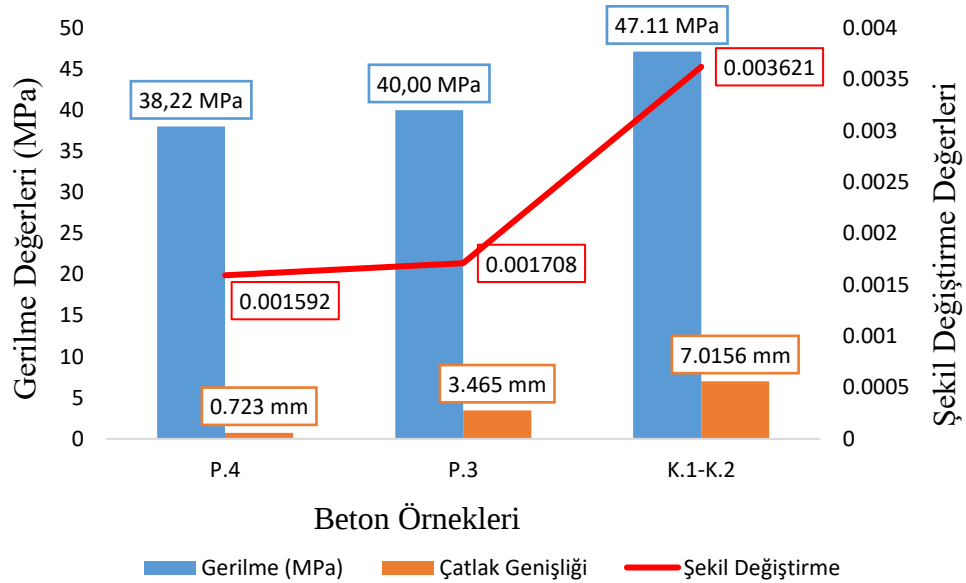


Şekil 5.13 Beton örneklerin gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak boyları aralarındaki ilişki

Çizelge 5.16 Ortalama belirgin çatlak boyların nicel verilerini kullanılarak elde edilen parametreler

	Gerilme Değerleri (MPa)	Şekil Değiştirme Değerleri	Çatlak Boy (mm)	Gerilme Değerleri- Çatlak Boy Arasındaki S.D	Şekil Değiştirme Değerleri- Çatlak Boy Arasındaki S.D	Gerilme Değerleri- Çatlak Boy Arasındaki Korelasyon	Şekil Değiştirme Değerleri- Çatlak Boy Arasındaki Korelasyon
P.4	38.22	0.001592	4.612				
P.3	40.00	0.001708	12.846	16.666	11.283	0.99	0.96
K.1- K.2	47.11	0.003621	28.262				

- Beton örneklerin gerilme ve şekil değiştirme değerleri arttıkça ortalama çatlak genişlikleri de artmaktadır. Üçlü arasında (gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak genişliği) iyi bir ilişki olduğu söylenilebilir (Şekil 5.14). Çizelge 5.17’de gösterildiği gibi beton örneklerin gerilme değerleri ile ortalama çatlak genişlikleri arasındaki standart sapma değeri 21.111, şekil değiştirme değerleri ile ortalama çatlak genişlikleri arasındaki standart sapma değeri 2.857’dir. Beton örneklerin gerilme değerleri ile ortalama çatlak genişlikleri arasındaki korelasyon değeri R^2 0.97, şekil değiştirme değerleri ile ortalama çatlak genişlikleri arasındaki korelasyon değeri R^2 0.92’dir. R^2 değerlerinin yüksek çıkması çatlak genişlikleri-gerilme-şekil değiştirme değerleri aralarında iyi korelasyon olduğu söylenilebilir. Standart sapma değerleri göz önünde bulundurularak, beton örneklerinde oluşan belirgin çatlakların ortalama genişlikleri ile şekil değiştirme değerleri arasında iyi bir bağ oluşturduğunu; betonun kırılmasında şekil değiştirmenin etkisi olduğu yargısına varılabilir.

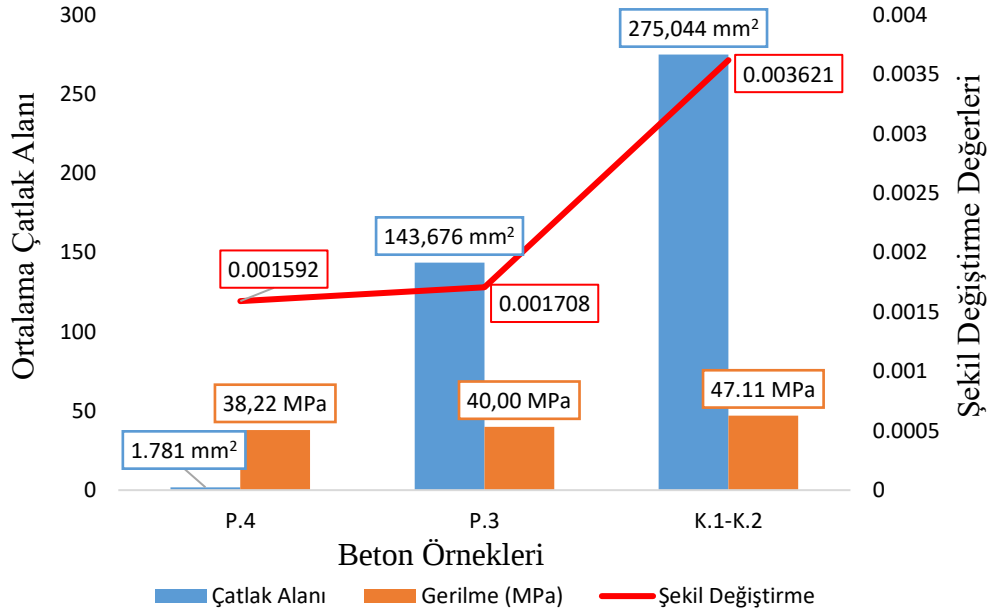


Şekil 5.14 Beton örneklerin gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak genişlikleri aralarındaki ilişki

Çizelge 5.17 Ortalama belirgin çatlak genişliklerin nicel verilerini kullanılarak elde edilen parametreler

	Gerilme Değerleri (MPa)	Şekil Değiştirme Değerleri	Çatlak Genişliği (mm)	Gerilme Değerleri- Çatlak Genişliği Arasındaki S.D	Şekil Değiştirme Değerleri- Çatlak Genişliği Arasındaki S.D	Gerilme Değerleri- Çatlak Genişliği Arasındaki Korelasyon	Şekil Değiştirme Değerleri- Çatlak Genişliği Arasındaki Korelasyon
P.4	38.22	0.001592	0.723				
P.3	40.00	0.001708	3.465	21.111	2.857	0.97	0.92
K.1- K.2	47.11	0.003621	7.016				

- Beton örneklerin gerilme ve şekil değiştirme değerleri arttıkça ortalama çatlak alanları da artmaktadır. Üçlü arasında (gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak alanları) iyi bir ilişki olduğu söylenilebilir (Şekil 5.15). Çizelge 5.18’de gösterildiği gibi beton örneklerin gerilme değerleri ile ortalama çatlak alanları arasındaki standart sapma değeri 101.925, şekil değiştirme değerleri ile ortalama çatlak alanları arasındaki standart sapma değeri 115.606’dır. Beton örneklerin gerilme değerleri ile ortalama çatlak alanları arasındaki korelasyon değeri R^2 0.94, şekil değiştirme değerleri ile ortalama çatlak alanları arasındaki korelasyon değeri R^2 0.88’dir. R^2 değerlerinin yüksek çıkması çatlak alanları-gerilme-şekil değiştirme değerleri aralarında iyi korelasyon olduğu söylenilebilir.



Şekil 5.15 Beton örneklerin gerilme-şekil değiştirme-ortalama çatlak alanları aralarındaki ilişki

Çizelge 5.18 Ortalama belirgin çatlak alanların nicel verilerini kullanılarak elde edilen parametreler

	Gerilme Değerleri (MPa)	Şekil Değişirme Değerleri	Çatlak Alanı (mm²)	Gerilme Değerleri-Çatlak Alanı Arasındaki S.D	Şekil Değişirme Değerleri-Çatlak Alanı Arasındaki S.D	Gerilme Değerleri-Çatlak Alanı Arasındaki Korelasyon	Şekil Değişirme Değerleri-Çatlak Alanı Arasındaki Korelasyon
P.4	38.22	0.001592	1.781				
P.3	40.00	0.001708	143.676	101.925	115.606	0.94	0.88
K.1-K.2	47.11	0.003621	275.044				

Yapılan incelemelerle birlikte beton örneklerin gerilme ve şekil değiştirme değerleri arttıkça belirgin çatlakların uzunlukları, alanları ve genişlikleri arttığı söylenilebilir. Belirgin çatlakların analiz verileri ile şekil değiştirme değerleri arasındaki standart sapma değerleri göz önüne alınarak “betonun kırılmasında, betonun içyapısındaki şekil değiştirmelerin etkisi olduğu düşünülebilir” yargısı tespit edilmiştir. Şekil değiştirme değerleri arttıkça belirgin çatlakların özellikleri de arttığını söylenilebilir (Şekil 5.16).

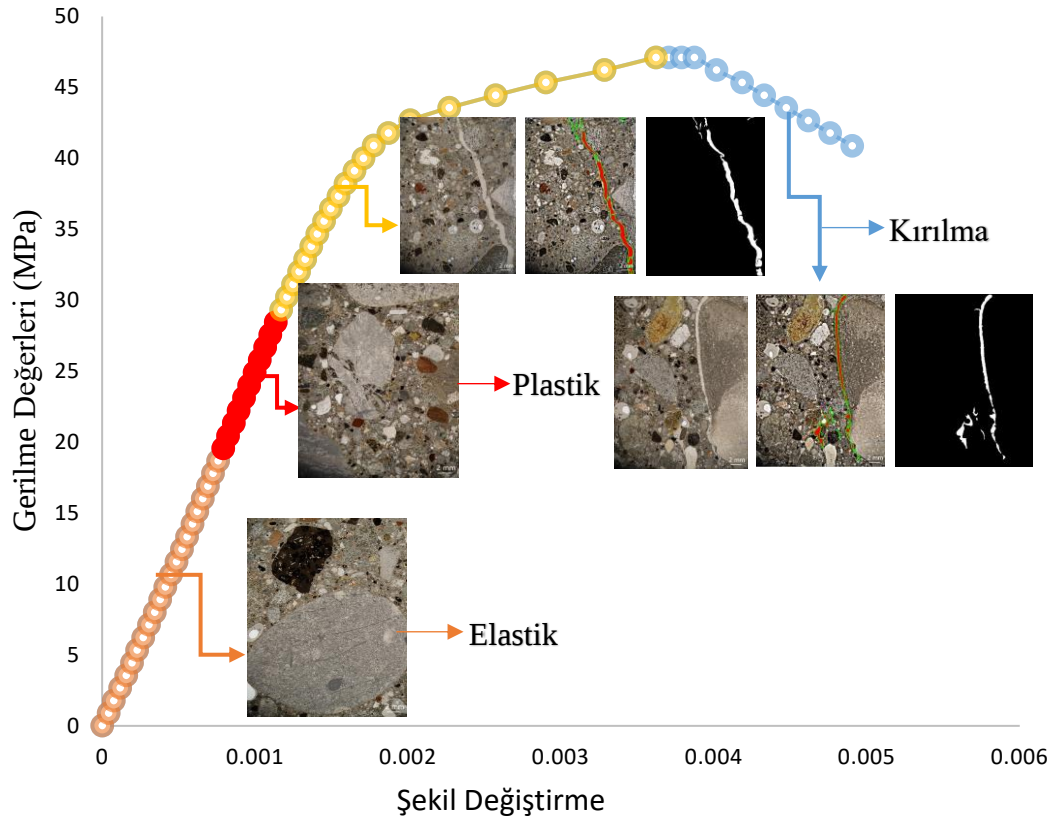
Beton içerisinde yer alan çatlakların en fazla olduğu yerin maksimum gerilmenin %40'ı değerinde çimento hamuru ve agrega ara yüzeyi bölgesinde bulunduğu, %60'ı değerinde aniden ve önemli ölçüde artış gösterdiği ve %80'i değerinde ise sürekli mikro çatlak ağı meydana geldiği belirtilmektedir [1,2]. Aynı şekilde, literatürdeki verilerde beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %80'i değerinde çimento hamurunda kararlı bir şekilde yayıldığı tespit edilmiştir [7,43]. Johnson [8], beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %60'ı değerinde çimento hamurunda kararlı bir şekilde yayıldığını ve %80'i değerinde ise çimento hamurun içine doğru kararsız bir şekilde yayıldığını belirtmektedir. Bache ve Christensen [10], ise beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %90'ı değerinde çimento hamurun içine doğru yayıldığını belirtmektedirler. Bu bilgiyi destekleyici olarak Tanigawa ve Yamadaka [11], beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %90'ı değerinde basınç yüklemesine paralel doğrultuda çimento hamurun içerisine doğru yayıldığını tespit etmişlerdir. Yapılan diğer deneysel çalışmalarda ise, beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %70'i değerinde çimento hamurun içine doğru yayıldığı tespit edilmiştir [12]. Aynı amaçla yapılan diğer bir çalışmada, beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %50'i değerinde belirgin şekilde gözlenmediği, maksimum gerilmenin %70'i değerinde çimento hamurunda görüldüğü ve %90'ı değerinde ise sürekli mikro çatlak ağına dönüşerek çimento hamurun içine doğru yayıldığı belirlenmiştir [42]. Liliu ve Von Mier [41] farklı olarak, beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %35'i değerinde belirgin olmadığını, %51'i değerinde çimento hamuru ve agrega ara yüzeyi bölgesinde bulunduğunu ve %81'i değerinde çimento hamurun içine doğru yayıldığını belirtmektedirler. Zhang vd. [44] ise beton içerisinde yer alan çatlakların maksimum gerilmenin %67-71'i değerinde çimento hamurun içine doğru ilerlediğini tespit etmişlerdir.

Elde edilen verilerle önceden yapılmış çalışmaların verileri kıyaslanarak aşağıdaki yargılara ulaşılabilir:

- Maksimum gerilme değerinin %40'ı değerindeki yük altında 2 saat bekletilen beton örneklerinin 4 bölgeden alınmış ince kesit örnekleri incelenmiştir.

İncelemeler sonucunda, beton deney örnekleri içerisinde bulunan çimento hamuru-agrega ara yüzeyi bölgesinin stabilitesini koruduğu, meydana gelen gerilme-şekil değiştirme davranışının bu bölgede belirgin ve derin çatlaklar oluşturmadığı ve özellikle iri agreganın çevresindeki hamur fazının halen kohezif etkisini koruduğu tespit edilmiştir.

- Maksimum gerilme değerinin %60'ı değerindeki yük altında 2 saat bekletilen beton örneklerinin 4 bölgeden alınmış ince kesit örnekleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, elastik bölge bulgularına benzer şekilde beton deney örnekleri içerisinde bulunan çimento hamuru-agrega ara yüzeyi bölgesinin stabilitesini koruduğu, meydana gelen gerilme-şekil değiştirme davranışının bu bölgede belirgin ve derin çatlaklar oluşturmadığı ve özellikle iri agreganın çevresindeki hamur fazının halen kohezif etkisini koruduğu tespit edilmiştir
- Maksimum gerilme değerinin %85'iyle yükleme altında 2 saat bekletilen beton deney örneğinin mikroyapısı %60'luk yük yapısından oldukça farklıdır. Maksimum gerilme değerinin %85'i ile yüklenen deney örneklerinin mikroyapısında belirgin ve derin çatlaklar tespit edilmiştir. Bu noktada beton içerisinde meydana gelen birim deformasyonların oluşan gerilmeden daha hızlı artış gösterdiği söylenebilir.
- Yapılan deneyler ve incelemeler neticesinde betonun kırılmasında şekil değiştirmelerin etkisi fazla olduğu yargısına varılabilir.



Şekil 5.16 Gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile çatlaklar arasındaki ilişki

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada betonun farklı yük kademelerinde ki davranışlarını incelemek maksadıyla deformasyon kontrollü press ile betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilmiş ve elde edilen eğrinin her bir kademesi (elastik, plastik ve kırılma) için 2 saat yükleme yapılarak bekletilen beton örneklerinden makro ve mikro çalışmalar yapılarak deformasyonların görüntüleri ile literatür dikkate alınarak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla beton örneklerinden ince kesitler yapılarak mikroskop altında incelenmiştir. İncelemeler neticesinde belirgin çatlakların analizi yapılarak nicel veriler elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda betonun mikroyapısal sisteminde oluşan belirgin çatlakların özellikleri ile gerilme-şekil değiştirme eğrisi arasında ilişkiler kurulmuştur. Ayrıca bu çalışmalarla birlikte her bir beton örneği için birim hacim ağırlık deneyi, ultrases geçiş hızı deneyi ve basınç dayanım deneyin sonuçları da elde edilmiştir. Çalışmalardan elde edilen mekanik sonuçlara göre:

- Beton örneklerin ortalama birim hacim ağırlığı $2471 \pm 14 \text{ kg/m}^3$ olarak bulunmuştur.
- Beton örneklerin ortalama ultrases geçiş hızı $4.99 \pm 0.12 \text{ km/sn}$ olarak bulunmuştur.
- Gerilme altında bekletilen beton örneklerin gerilme değerleri; E.1-E.2 = 18.67 MPa, P.1-P.2 = 28.44 MPa, P.3 = 40 MPa, P.4 = 38.22 MPa, P.5-P.6 = 40 MPa ve K.1-K.2 = 47.11 MPa olarak bulunmuştur.
- Beton örneklerin poisson oranları 0.28, 0.12, 0.16 ve ortalama poisson oranı 0.19 olarak bulunmuştur.
- Beton örneklerin statik elastisite modülü 27.45 GPa, 20.86 GPa, 24.44 GPa, ortalama statik elastisite modülü 24.25 GPa ve ortalama dinamik elastisite modülü 58.29 GPa olarak bulunmuştur. Ortalama statik elastisite modülün değeri, ortalama dinamik elastisite modülün değerinin %40'ı olarak bulunmuştur.

Çalışmalardan elde edilen makro ve mikro ölçüm sonuçlarına göre:

- Çatlaklar, agrega-çimento hamurun arayüzeyinde basınç yüklemesine paralel olacak şekilde çimento hamurun içine doğru yayıldığı tespit edilmiştir.

- Beton örneklerin şekil değiştirme değerleri arttıkça belirgin çatlakların uzunlukları, genişlikleri ve alanları arttığı görülmektedir. Beton örneklerin kırılmasında şekil değiştirme değerlerin etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Maksimum gerilmenin %40'ı değerinde elastik bölgede beton örneklerin içyapısında değişimler olmasına rağmen belirgin çatlakların oluşmadığı tespit edilmiştir.
- Maksimum gerilmenin %60'ı değerinde olan plastik bölgede betonun içyapısında değişimler görülmesine rağmen belirgin çatlakların oluşmadığı tespit edilmiştir.
- Maksimum gerilmenin %85'i değerinde betonun içyapısında değişimlerle birlikte belirgin çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir.
- Betonun kırılmasında gerilme değerlerin yanı sıra betonun içyapısındaki şekil değiştirmelerin sebep olduğu tespit edilmiştir.

Özellikle çimento-agrega ara yüzeyinin kuvvetlendirilmesine ilişkin nano katkılarla yapılacak deneysel çalışmaların çatlak oluşumu ile ilişkilendirileceği metodların kullanımı sonucu ortaya çıkacak bilimsel verilerin faydalı olabileceği ve bu anlamda farklı metodların uygulanabilirliği önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Mindess ve J.F. Young, *Concrete*. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- [2] O.N. Oktar, “Bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli inelastik davranışındaki işlevi”, Doktora tezi, İTÜ, 1977.
- [3] E. Arıoğlu, O.S. Köylüoğlu, A. Dondurmacı ve O. Manzak, “Yapı merkezi prefabrikasyon A.Ş.’nde beton agrega kalite denetimi ve değerlendirilmesi”, *I. ulusal kırmataş sempozyumu*, İstanbul, 1996.
- [4] P. Turgut, *Betonda Kırılma Mekaniği*. Şanlıurfa: Ders Notu, 2005.
- [5] G. Adıvar, “Geometrik benzer ve benzer olmayan çentikli beton kırışların kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, 2016.
- [6] M.A. Taylor, M.K. Tai ve M.R. Ramey, "Biaxial compressive behaviour of fibre reinforced mortar", *ACI Journal*, pp. 496-501, 1975.
- [7] O.F. Slate ve L.B. Meyers, "Deformation of plain concrete", *paper for the fifth international symposium on the chemistry of cement*, Tokyo, 1968.
- [8] C.D. Johnston, "Strength and deformation of concrete in uniaxial tension and compression", *Magazine of Concrete Research*, vol. 22, no. 70, 1970.
- [9] P. K. Mehta ve P.J.M. Monteiro, *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. McGraw-Hill, Thirt Edition, 2006.
- [10] H.H. Bache ve P.N. Christensen, "Observations on strength and fracture in lightweight and ordinary concrete", *proceedings of and internatiol conference on the structure of concrete and its behaviour under load*, London, 1965.
- [11] L. Tanigawa ve K. Yamadaka, "Size effect in compressive strength of concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 8, 1978.
- [12] J.W. Zaitsev ve F.H. Wittmann, "Fracture of porous viscoelastic materials under multiaxial state of stress", *Cement and Concrete Research*, vol. 3, 1973.
- [13] D.A. Lange, H.M. Jennings ve S.P. Shah, “Image analysis techniques for characterization of pore structure of cement - based materials”, *Cement and Concrete Research*, vol. 24, no. 5, pp. 841-853, 1994.

- [14] C.F. Mora ve A.K.H. Kwan, “Sphericity, shape factor and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing”, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 351-358, 2000.
- [15] G.D. Schutter, “Advanced monitoring of cracked structures using video microscope and automated image analysis”, *NDT&E International*, vol. 35, pp. 209-212, 2002.
- [16] P. Soroushian, M. Elzafraney ve A. Nossioni, “Specimen preparation and image processing and analysis techniques for automated quantification of concrete microcracks and voids”, *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1949–1962, 2003.
- [17] P. Soroushian ve M. Elzafraney, “Morphological operations, planar mathematical formulations and stereological interpretations for automated imageanalysis of concrete microstructure”, *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, pp. 823–833, 2005.
- [18] M.E. Öncü, A.S. Karakaş ve M.T. Kavak, “Production of high performance concrete using admixtures”, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 76, 2006.
- [19] H. Bal, “Kamera ile görüntü işleme teknikleriyle malzeme tane büyüklüğü Analizi”, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, 2006.
- [20] M. Özen, “Investigation of relationship between aggregate shape parameters and concrete strength using imaging techniques” , Yüksek lisans tezi, ODTÜ, 2007.
- [21] S.N. Yu, J.H. Jang ve C.S. Han, “Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel”, *Automation in Construction*, vol. 16, pp. 255-261, 2007.
- [22] A.U. Ozturk ve B. Baradan, “A comparison study of porosity and compressive strength mathematical models with image analysis”, *Computational Materials Science*, vol. 43, pp. 974–979, 2008.
- [23] M. Lopez, L.F. Kahn ve K.E. Kurtis, “Characterization of elastic and time-dependent deformations in high performance lightweight concrete by image analysis”, *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 610–619, 2009.

- [24] C. Chang, P.H. Chen ve H.S. Lien, “Evaluation of residual stress in prestressed concrete material by digital image processing photoelastic coating and hole drilling method”, *Measurement*, vol. 42, pp. 552–558, 2009.
- [25] V. Huon, B. Cousin, B. Wattrisse ve O. Maisonneuve, “Investigating the thermo-mechanical behaviour of cementitious materials using image processing techniques”, *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 529–536, 2009.
- [26] C.W. Chang, H.S. Lien ve C.H. Lin, “Determination of the stress intensity factors due to corrosion cracking in ferroconcrete by digital image processing reflection photoelasticity”, *Corrosion Science*, vol. 52, pp. 1570–1575, 2010.
- [27] O. Yörük, “Yüksek dayanımlı betonlarda agrega geometrisinin ve doğrultusunun kırılma mekanizmasına etkisinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, 2015.
- [28] G.L. Golewski, “Evaluation of morphology and size of cracks of the interfacial transition zone (ITZ) in concrete containing fly ash (FA)”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 357, pp. 298 – 304, 2018.
- [29] T. Profant, M. Hrstka ve J. Klusák, “An Asymptotic analysis of crack initiation from an interfacial zone surrounding the circular inclusion”, *Compos. Struct.*, vol. 208, pp. 479 – 497, 2019.
- [30] K.E. Alyamaç, “Betonun kırılma parametreleri üzerine malzeme parametrelerinin etkisi”, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, 2004.
- [31] A. Yeğınobalı ve M. Toksoy, “Betonun kırılma mekaniği konusundaki çalışmaların değerlendirilmesi”, *birinci ulusal kırılma konferansı*, Ankara, 1981.
- [32] P.K. Mehta, *Concrete*. USA: Prentice-Hall Inc., 2006.
- [33] G.W.D. Vile, “Idealization of stresses around a single aggregate particle at the discontinuity point under uniaxial compression”, *The Structure of Concrete*, pp. 275-288, 1968.
- [34] Y. Akkaya, F. Bayramov ve M.A. Taşdemir, “Betonun kırılma mekaniği: tasarımda kullanılan mekanik özellikler ile kırılma parametreleri arasındaki bağıntılar”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, vol. 426, no. 4, pp. 70-75, 2003.

- [35] H. Tada, P.C. Paris ve G.R. Irwin, “The stress analysis of cracks handbook”, *ASME Press*, 2000.
- [36] TS 802, *Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2009.
- [37] TS EN 206-1, *Beton - Özellik, Performans, İmalât ve Uygunluk*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2014.
- [38] T.Y. Erdoğan, *Beton*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık, Beşinci baskı, 2010.
- [39] A.M. Neville, *Properties of concrete*. London: Pitman Books Limited, 1981.
- [40] M. Kumar, *Concrete Structure Propertie Sand Materials*. New Jersey: Englewood Cliffs, 1986.
- [41] G. Lilliu ve J.G.M. Van Mier, “On the relative use of micro-mechanical lattice analysis of 3-phase particle composites”, *Engng. Fract. Mech.*, vol.74, pp. 1174-1189, 2007.
- [42] A. Maleka, A. Scatta, S. Pampanie ve G. MacRae, “Post-event damage assessment of concrete using the fluorescent microscopy technique”, *Cement and Concrete Research*, vol. 102, pp. 203-211, 2017.
- [43] S.D. Santiago ve H.K. Hilsdorf, “Fracture Mechanisms of Concrete Under Compressive Loads”, *Cement Concrete Research*, vol. 3, no.4, pp. 363-388, 1973.
- [44] X. Zhang, S. Xu ve S. Zheng, “Experimental measurement of double-K fracture parameters of concrete with small-size aggregates”, *Frontiers Archit. Civ. Eng.*, vol.1, pp. 448-457, 2007.

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mahfuz Pekgöz

Doğum Yeri : Kurtalan

Doğum Tarihi : 01.01.1995

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : mahfuzpekgoz@karabuk.edu.tr

Eğitim Durumu

Derece	Alan	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Yapı malzemeleri	Adıyaman Üniversitesi	2020
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Gaziantep Üniversitesi	2016
Lise	Sayısal	Kurtalan Anadolu Lisesi	2011

