

**BAZALT AGREGASIYLA ÜRETİLEN BETONUN KIRILMA
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

TAHİR AZAD ÇELİK

OCAK 2024

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZALT AGREGASIYLA ÜRETİLEN BETONUN KIRILMA
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

TAHİR AZAD ÇELİK

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV
YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
YAPI MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

OCAK 2024

DİYARBAKIR

BAZALT AGREGASIYLA ÜRETİLEN BETONUN KIRILMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Tahir Azad ÇELİK tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Yapı Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, Fen Bilimleri Enstitüsü

Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN
Danışman, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Halil GÖRGÜN (*)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN (**)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat DOĞRUYOL
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Siirt Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 23 / 02 / 2024

(*) Jüri Başkanı.

(**) Tez Danışmanı.

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Tahir Azad ÇELİK

İmza:

TEŞEKKÜR

Tez çalışma konusunu seçme sürecinden tezimin son aşamasına gelinceye kadarki süreçte, bana vakit ayıran teknik bilgisini benimle paylaşan tez danışmanım Dr. Öğr Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN'e bana kattıklarından dolayı teşekkür ederim. Jüri üyelerime de yaptıkları önerilerden dolayı teşekkür ederim.

Diyarbakır Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü Beton Laboratuvarından sorumlu Samet ERGÜN ve ekibine deneysel çalışmalarım sürecindeki katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak Yüksek Lisansa başlamama vesile olan Annem başta olmak üzere bu süreçte bana gösterdikleri sabır ve desteklerini hiç esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. AGREGA VE GRADASYON EĞRİSİ.....	7
4. SERTLEŞMİŞ BETONUN ÖZELLİKLERİ.....	10
4.1 Betonda Basınç Dayanımı	10
4.2 Betonda Çekme Dayanımı.....	11
4.2.1 Doğrudan (direk) çekme deneyi	11
4.2.2 Yarmada çekme deneyi	13
4.2.3 Eğilme çekme deneyi.....	15
4.3 Betonun Kayma Dayanımı	17
5. KIRILMA MEKANİĞİ	18
5.1 Kırılma.....	18
5.2 Kırılma Mekanizmasının Tarihsel Gelişimi	19
5.3 Lineer Elastik Kırılma Mekanizması.....	20
5.4 Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekanizması.....	24
5.4.1 İki parametrelili model.....	25
5.4.2 Efektif Çatlak Modeli	27
6. MATERYAL VE METOD	29

6.1	Agrega Malzemesiyle Yapılan Fiziksel Deneyler	29
6.1.1	Agrega kil oranının belirlenmesi	29
6.1.2	Agrega su emme ve özgül ağırlığının belirlenmesi	30
6.1.3	Elek analizi	33
6.2	Karışım Oranları	33
6.3	Deneyde Kullanılan Kalıplar ve Malzemeler	36
6.4	Basınç Küp Numune Deneyleri	38
6.5	Çentikli Küp Numune Deneyleri	39
7.	BULGULAR	45
7.1	Basınç Küp Numune Deney Sonuçları	45
7.2	Çentikli Küp Numune Deney Sonuçları	46
7.2.1	Çentikli Küp Numunelerinin İPM göre analizleri	49
7.2.2	Çentikli Küp Numunelerinin EÇM göre analizleri	53
8.	SONUÇLAR	56
	KAYNAKLAR	58
	ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 $d_{\max}=8$ mm için TS 802’de belirtilen ideal granülometri eğrisi.....	8
Şekil 3.2 $d_{\max}=16$ mm için TS 802’de belirtilen ideal granülometri eğrisi.....	8
Şekil 3.3 $d_{\max}=32$ (31.5) mm için TS 802’de belirtilen ideal granülometri eğrisi	9
Şekil 3.4 $d_{\max}=64$ mm için TS 802’de belirtilen ideal granülometri eğrisi.....	9
Şekil 4.1 Beton ve küp silindir numunelere basınç yükü uygulaması	11
Şekil 4.2 Rusch direkt çekme deney düzeneği.....	12
Şekil 4.3 Kassas ve Erdoğan direk çekme deneyi düzeneği	12
Şekil 4.4 a) Standart silindir numunelerde yükleme b) numunelerde gerilme dağılımları	14
Şekil 4.5 a) kenar küp yarma deneyi b) diyagonal küp yarma deneyi	14
Şekil 4.6 Eğilme mukavemeti, basınç mukavemeti ve çekme mukavemeti arasındaki bağıntı.....	16
Şekil 4.7 Beton çekme dayanımı kiriş numuneleri	16
Şekil 5.1 a) Gevrek Kırılma b) Sünek tek kristallerde gevrek kırılma c) Çok kristallerde sünek kırılma d) çok kristallerde sünek kırılma.....	18
Şekil 5.2 Schenectady adlı tankerin ağır hasarlı hali (1943).....	20
Şekil 5.3 a) çatlak veya boşluk içermeyen katı cisimde oluşan gerilme akımı b) çatlak veya boşluk içeren katı cisimde oluşan gerilme akımı ve süreksizlik ucunda oluşan gerilme yığılmaları.....	21
Şekil 5.4 Kırılma Modları	23
Şekil 5.5 a) sünek bir malzemede çatlak ucunda oluşan gerilme durumu ve plastik bölge b) yarı gevrek bir malzemede çatlak ucunda oluşan gerilme durumu ve kırılma süreci bölgesi.....	25
Şekil 5.6 a) kohezif çatlak modeli b) eşdeğer elastik çatlak modeli	25
Şekil 5.7 İki parametrelili modelde kırılma parametreleri tayini) Çentikli üç noktalı eğilme numunesi b) tipik bir CMOD diyagramı	26
Şekil 5.8 Kırılma numuneleri a) Çentikli standart silindir yarmada-çekme b) Boşluklu standart silindir yarmada-çekme c) Eksantrik yüklü çentikli prizma.....	27
Şekil 5.9 Efektif Çatlak Modelinin geometrik yorumu.....	28
Şekil 6.1 Metilen mavisi deneyi için hazırlanan 200 gr. agrega karışımı	30
Şekil 6.2 Deneyin gerçekleştirildiği filtre kâğıt	30

Şekil 6.3 Suya Tam Doygun Hale Gelmiş Agregalar	31
Şekil 6.4 Agregaların Yüzeyini Kuru Hale Getirme İşlemi	31
Şekil 6.5 Agregaların Etüve Alınması	32
Şekil 6.6 Su Banyosuna Konulan Agregalar.....	32
Şekil 6.7 Deneyde Kullanılan Elektrikli Elek Sallayıcı	33
Şekil 6.8 Küp merkezine sabitlenen çentik	36
Şekil 6.9 $\alpha=0.2, 0.35, 0.5$ Relatif Çentik Boyutlarının Kumpasla Ölçülmesi.....	37
Şekil 6.10 Deneylerde kullanılan Pan tip beton karışım mikseri	38
Şekil 6.11 Beton hamurunun kalıplara alındıktan sonraki görüntüsü	38
Şekil 6.12 Deney cihazına alınmış numunelerin görüntüsü.....	39
Şekil 6.13 Çentikli numunelerin kalıba alınmış görüntüleri	40
Şekil 6.14 Yarmada-çekme deneyine tabii tutulan numune.....	40
Şekil 6.15 300 dozaj ortadan ikiye ayrılmış numunelerin görüntüsü	41
Şekil 6.16 300 dozaj kırılan numunelerin görüntüsü	41
Şekil 6.17 300 dozaj numunenin kırıldıktan sonra yakından birleştirilmiş hali	42
Şekil 6.18 300 dozaj numunenin yakından kırılmış hali.....	42
Şekil 6.19 350 dozaj 12mm ortadan ikiye ayrılmış numunelerin görüntüsü	43
Şekil 6.20 350 dozaj 19 mm ortadan ikiye ayrılmış numunelerin görüntüsü	43
Şekil 6.21 350 dozaj numunenin kırıldıktan sonra yakından birleştirilmiş hali	44
Şekil 6.22 350 dozaj numunelerin yakından kırılmış halleri	44
Şekil 7.1 $d_{max}=12$ mm çekme mukavemetlerinin sütun grafiği.....	49
Şekil 7.2 $d_{max}=19$ mm çekme mukavemetlerinin sütun grafiği.....	49
Şekil 7.3 12 mm agrega çaplı 300 dozaj numune pik-yük analiz sonuçları.....	51
Şekil 7.4 19 mm agrega çaplı 300 dozaj numune pik-yük analiz sonuçları.....	52
Şekil 7.5 12 mm agrega çaplı 350 dozaj numune pik-yük analiz sonuçları.....	52
Şekil 7.6 19 mm agrega çaplı 350 dozaj numune pik-yük analiz sonuçları.....	53

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 6.1 Kullanılan Agrega Elek Analiz Sonuçları	33
Tablo 6.2 $d_{\max}=12$ mm 300 dozaj için 60 dm ³ 'lük beton karışım dizaynı	34
Tablo 6.3 $d_{\max}=12$ mm 350 dozaj için 60 dm ³ 'lük beton karışım dizaynı	34
Tablo 6.4 $d_{\max}=19$ mm 300 dozaj için 60 dm ³ 'lük beton karışım dizaynı	35
Tablo 6.5 $d_{\max}=19$ mm 350 dozaj için 60 dm ³ 'lük beton karışım dizaynı	36
Tablo 6.6 Çentikli küp numunelerin özellikleri	37
Tablo 6.7 Deneylerde tercih edilen Çimentonun Özellikleri	37
Tablo 7.1 $d_{\max}=12$ mm agrega 300 dozaj basınç deney sonuçları.....	45
Tablo 7.2 $d_{\max}=19$ mm agrega 300 dozaj basınç deney sonuçları.....	45
Tablo 7.3 $d_{\max}=12$ mm agrega 350 dozaj basınç deney sonuçları.....	46
Tablo 7.4 $d_{\max}=19$ mm agrega 350 dozaj basınç deney sonuçları.....	46
Tablo 7.5 $d_{\max}=12$ mm agrega 300 dozaj deney verileri	47
Tablo 7.6 $d_{\max}=19$ mm agrega 300 dozaj deney verileri	47
Tablo 7.7 $d_{\max}=12$ mm agrega 350 dozaj deney verileri	48
Tablo 7.8 $d_{\max}=19$ mm agrega 350 dozaj deney verileri	48
Tablo 7.9 Pik yük metoduna göre analiz sonuçları	53
Tablo 7.10 Küp numuneler için A_i sabitleri.....	54
Tablo 7.11 Efektif çatlak modeli analiz sonuçları	55

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
A	Numunenin Kesit Alanı
α_0	Başlangıçtaki Çentik Boyutu (mm)
α	Amprik Bir Sabit
β	Yük taşıyan şeritlerin relatif genişliği
c_f	sonsuz boyutlu numune için kırılma süreci bölgesi uzunluğu [mm]
D	Silindir Numunenin Çapı
d_{max}	Maksimum Agregat Çapı
E	Elastisite Modülü
E_c	Betonun Elastisite Modülü
f_c	Betonun Silindir Basınç Dayanımı
f_{sp}	Küp Yarma Mukavemeti
f_t	Betonun Çekme Dayanımı
G_c	Betonun Kırılma Enerjisi
γ	Yüzey enerjisi yoğunluğu
K	Gerilme Şiddet Çarpanı
K_c	Kritik Gerilme Şiddet Çarpanı
K_{Ic}^s	İPM için kırılma şiddet çarpanı
K_{Ic}^e	EÇM için kırılma şiddet çarpanı
L	Numune Boyutu
P	Yük
P_c	Numunenin kırılmasına yol açan maksimum kırılma yükü
σ	Nominal Gerilme
σ_{max}	Maksimum Gerilme
Q	Kırılma İndeksi

Kısaltma**Açıklama****BEM**

Boyut Etkisi Modeli

BEK

Boyut Etkisi Kanunu

CTOD

Çatlak Ucu Açılımı Deplasmanı

CTOD_c

Kritik Çatlak Ucu Açılımı Deplasmanı

EÇM

Efektif Çatlak Modeli

İPM

İki Parametrelili Model

KSB

Kırılma Süreci Bölgesi

LEKM

Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

TS

Türk Standartları

ÖZET

BAZALT AGREGASIYLA ÜRETİLEN BETONUN KIRILMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

ÇELİK, Tahir Azad

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN

Ocak 2024, 77 sayfa

İnsanoğlu yeme ve içme gibi temel ihtiyaçlarından sonra hayatını daha güvenli geçirebilmek için barınmaya ihtiyaç duyar. Nüfusun hızlı artması ve gelişen inşaat sektörüne bağlı olarak sürdürülebilir çözümlere her zaman ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüze kadar birçok yapı malzemesi kullanarak barınma ihtiyacını karşılamakta olan insanoğlu zamanla hazır beton üretmeye başlamıştır. Günümüzde hazır betona olan talebin artışı aynı zamanda agregaya olan talebin artmasına da sebep olmuştur. Hazır betonda kullanılan agregaların azalması hazır beton sektöründe agrega kaynaklarını araştırmaya ve alternatif agrega bulmaya yöneltilmiştir. Sert, yoğun bir volkanik kayaç olan bazalt dünyanın birçok bölgesinde bulunabilmektedir. Bu çalışmada, agrega malzemesi olarak Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde, Diyarbakır, Şanlıurfa ve Mardin il sınırları içerisinde yer alan Karacadağ'da bazalt türü olarak tanımlanan doğal kayalar kullanılmıştır. Doğal kaya bazalt agregasının özgül ağırlığı, su emme kapasitesi ve kil oranı belirlenmiştir. Daha sonra bazalt agregası ile üretilen betonun kırılma parametreleri analiz edilmiştir. Bazalt agregasına çimento, su ve katkı malzemesi ilave edilerek beton numuneleri üretilmiştir. Betonun mekanik dayanımları, kırılma mekaniği modellerinden İki Parametrelili Model ve Efektif Çatlak Modeli ile analiz edilmiştir. Maksimum agrega boyutu 12 mm ve 19 mm olan agregalarla karşılaştırmak için dört karışım oranı serisi kullanıldı. Çalışmada üretilen betonun su/çimento oranı 0.45 olup, seçilen çimento dozajları 300 ve 350 olarak belirlenmiştir. 150×150×150 mm çentikli küp numuneler kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bazalt, Beton, Agrega Çapı, Dozaj, Mekanik Özellikler, Kırılma Mekaniği

ABSTRACT

EXAMINATION OF THE FRACTURE PARAMETERS OF CONCRETE PRODUCED WITH BASALT AGGREGATE

ÇELİK, Tahir Azad

Master of Science in Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Senem YILMAZ ÇETİN

January 2024, 77 pages

After meeting basic needs such as food and drink, humans require shelter to lead a more secure life. The rapid increase in population and the evolving construction sector continually necessitate sustainable solutions. Over time, humans have met their housing needs by using various construction materials, and the demand for ready-mixed concrete has grown in parallel with the development of the construction industry. The increased demand for ready-mixed concrete has also led to a higher demand for aggregates. The decrease in the availability of aggregates used in ready-mixed concrete has prompted research into aggregate resources and the exploration of alternative aggregates. Basalt, a hard and dense volcanic rock, can be found in many regions of the world. In this study, natural rocks identified as basalt in the Karacadağ region within the Diyarbakır, Şanlıurfa, and Mardin provinces of Turkey's Southeastern Anatolia Region were used as aggregate materials. The specific gravity, water absorption capacity, and clay content of the natural basalt aggregate were determined. Subsequently, the fracture parameters of concrete produced with basalt aggregate were analyzed. Concrete samples were produced by adding cement, water, and admixture to the basalt aggregate. The mechanical strengths of the concrete were analyzed using the Two-Parameter Model and Effective Crack Model from fracture mechanics. Four mix ratio series were used to compare aggregates with maximum particle sizes of 12 mm and 19 mm. The water/cement ratio of the concrete produced in the study was 0.45, and the selected cement dosages were determined as 300 and 350. Notched cube specimens with dimensions of 150×150×150 mm were used in the experiments.

Keywords: Basalt, Concrete, Aggregate Size, Dosage, Mechanical Properties, Fracture Mechanics

1.GİRİŞ

Tarih boyunca, barınma insanlığın temel ihtiyaçlarındandır. İnsanlar göçebe hayattan yerleşik hayata geçinceye kadarki süreçte barınma için birçok malzeme kullanılmıştır. Beton da bu gelişmelerle ortaya çıkmış ve halen günümüzde yaygın olarak bilinmekte ve kullanılmaktadır. Günümüzün en popüler inşaat malzemelerinden biridir. İnşaat malzemesi olarak beton şu anda dünyada kullanım sayısı bakımından ilk sıralarda yer almaktadır. Gelecekte de bu durum dünya nüfusunun altyapı ihtiyaçlarını karşılamaya devam edecektir. Betonun pazar uygulamalarının birçok çeşidi vardır. Yapıda kullanılacak betonun teknik özellikleri betonarme yapıların tipi ve uygulamasına göre belirlenir [1].

Beton; su, çimento, agrega ve bazı mineral ya da kimyasal (akışkanlaştırıcı, geciktirici, hava sürükleyici gibi) katkı maddelerinin belirli oranlarda karışımından elde edilen kompozit bir malzemedir [2]. Çimento hamuru çimento ve sudan oluşur. İnce bir agreganın çimento hamuruna eklenmesi ile harç üretilir ve harca kaba agrega parçacıklarının eklenmesiyle beton elde edilir.

Beton kompozit bir malzeme olduğundan tahmin edilenden daha kompleks bir yapıya sahiptir. Kullanılacak malzemelerin fiziksel özelliklerinin uygunluğu ve kullanılacağı yere varış süresi gibi faktörler, betonun mekanik ve reolojik özellikleri üzerinde direkt olarak etkilidir. Beton katılaşma evresine geçmeden önce kullanılacağı yerde kalıbın içine iyice yerleştirildiğinden emin olunması gerekir. Bu sebeplerden dolayı betonun üretim ve döküm safhalarında uzmanlık alanı beton üzerine olan teknik elemanların yeri çok önemlidir. Teknik elemanların nezaretinde üretilmeli, taşınmalı ve dökümü gerçekleştirilmelidir.

Betonun kullanım sahasının çok geniş olması nedeniyle teknik özellikleri önemlidir. Fiziksel özellikleri; özgül ve hacimsel (görünür) yoğunluk, gözeneklilik, su emme, su direnci, donma direnci, termal iletkenlik ve büzülmedir. Betonun mekanik özellikleri; basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, kayma mukavemeti, burulma mukavemeti, yerel basınç mukavemeti ve aşınma direnci. Reolojik özellikleri; beton karışım hesaplarında kullanılan malzeme oranına göre (kullanılan su, çimento, agrega ve katkı malzemelerinin miktarları ve özellikleri) akışkanlığın,

işlenebilirliğin, dayanıklılığın ve sıkıştırılabilirliğin gözlenmesidir. [1]

Normal betonun çekme dayanımı düşüktür (basınç dayanımının yaklaşık sekizde biri ila onda biri) ve özellikle çekmede sınırlı süneklik sergiler [3]. Bu nedenle beton, hava boşlukları ve mikro çatlaklar şeklinde birçok doğal kusur içeren kırılgan bir malzeme olarak tanımlanabilir. Betonun kırılması, heterojenliği nedeniyle karmaşık bir süreçtir. Betonda kırılma, çimento hamurundan, agregadan, çimento hamuru-agrega bağından veya bu olayların herhangi bir kombinasyonu ile meydana gelebilir. Bileşenlerin boyutu, özellikle kaba agrega ve hava boşlukları gibi kusurlar, bir kırılma mekanizmasının tanımlanmasında problem yaratır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Ülkemizdeki mevcut yapıların büyük çoğunluğu betonarme yapılardan oluşmaktadır. Bu nedenle etkin bir deprem kuşağı altında olan ülkemizde depreme dayanıklı yapı tasarlarken betonun kalitesini yüksek tutmak gerekmektedir. Bunun için betonun iç yapısı ve mekanik davranışı arasındaki ilişkiyi doğru incelemek gerekmektedir. Betonda çatlama, kırılma gibi boşluk ve yapısal kusurlardan oluşan olumsuzluklar, maalesef yapılarının çoğunluğu betonarme olan ülkemizde büyük mal ve can kaybına neden olmaktadır.

Yarı gevrek bir malzeme olan betonda dış yüklerden bağımsız oluşan mikro çatlaklar gerilme arttıkça artar ve yayılır. Çok düşük gerilme seviyesinde bile betonun gerilme şekil değiştirme davranışı değişerek lineer olmayan bir hale dönüşür. Betonun yük altındaki lineer olmayan bu davranışı araştırmacıların ilgi odağı olmuştur [4].

Betondan yapılan yapıların hasar analizi için çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar vardır. Fakat yanal yüklemelere maruz kalan betonarme yapılarda hasar oluşmadan karkas yapıda kılcal yarıklar veya çatlaklar oluşur ve karkas yapının malzemesinde yumuşama olarak bilinen dayanım kaybı meydana gelmektedir. Kırılma mekaniğinin temel ilkeleri, çatlak yapılarının gerçekçi bir biçimde değerlendirilmesini sağlar.

Kırılma mekaniği, esasen malzemelerde bulunan çatlak ve boşluk gibi kusurları inceleyerek bu kusurlara neden olan gerilme yoğunluğunu artıran faktörleri ve bunun

sonucunda oluşan hasarları araştırmaktadır [5]. İlk kez Griffith'in [6] ortaya attığı Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) teorisi, 1960 yıllarında Kaplan [7] ve Glucklich [8] tarafından beton üzerinde uygulamaya konulmuştur. Fakat betonda çatlakların yayılmacı bir şekilde ilerlemesi, betonun boyutuna ve zamana bağlı olarak mukavemetinin değişmesi gibi nedenler Lineer Elastik Kırılma Mekaniği kanunlarının beton gibi kompozit bir malzeme açısından yetersiz olduğunu ortaya koymuştur [9-10]. Bundan dolayı, çok sayıda bilim insanı tarafından teknolojik ve sayısal gelişmelerdeki ilerlemeyle eş zamanlı olarak, Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği yaklaşımları geliştirilmiştir [11-12]. Bu yaklaşımlar esas olarak, çatlama bir beton kesitte gerilme transferine imkân sağlayan kırılma süreci bölgesinin varlığını dikkate alır. Yapı yönetmeliklerin ve LEKM'nin göz ardı ettiği bu bölge, metallerdeki plastik bölgeden çok daha küçük olmasına rağmen, betonda 1 cm'in üzerinde değerler alarak önemli bir alanı kaplar [11]. Aynı zamanda bu bölgedeki gerilmeler, metallerdeki plastik bölgeden farklı olarak (ki orada gerilme sabit kalır) çatlak ucundan itibaren azalmaktadır. Bu davranışı tanımlamak için LEKM'ye alternatif olarak, Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği yaklaşımları, betonu modellemek için en az iki parametre kullanır.

Betonun kırılma modelleri Kohezif Çatlak Modelleri (Fiktif Çatlak Modeli [11] ve Çatlak Bant Modeli [13]) ve Eşdeğer Elastik Çatlak yaklaşımları (İki Parametrelili Model [14], Efektif Çatlak Modeli [15], Boyut Etkisi Modeli [16], Çift-K Modeli [17] ve Çift-G Modeli [18]) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kohezif Çatlak yaklaşımları, kırılma süreci bölgesini çatlak ucundan itibaren azalan ve çatlağa basınç yapan bir gerilme bloğu ile modellerken, Eşdeğer Elastik Çatlak yaklaşımları başlangıç çatlak boyundan daha büyük olan efektif bir çatlak uzunluğu kullanarak modellemektedir.

Bu tez çalışmasında betonun dayanımını ve dayanıklılığını artırmak için beton agregası olarak Diyarbakır Karacadağ bölgesinden kırma bazaltının yarmada-çekme dayanımı ve basınç deneylerine tabii tutulan beton numuneleri ile kırılma parametreleri incelenmiştir. Tez çalışmasında TS 802 [19] kuralları göz önünde tutularak sürekli granülometrilili beton numuneler üretilmiştir. Beton karışımında 12 mm ve 19 mm olmak üzere iki farklı d_{max} seçilmiştir. Her d_{max} için 300 ve 350 olmak üzere iki farklı

Çimento dozajıyla dökümler gerçekleştirilmiştir. Tüm serilerde su/imento (s/) oranı 0.45 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Üretilen beton numunelerinin işlenebilirliğini arttırmak için süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deneye 28 günlük kr sürecinde bekletilen beton numunelerinin mekanik özellikleri ve kırılma parametreleri incelenmiştir. Deneylerde 150×150×150 mm’lik küp numuneler kullanılmıştır. entik boyutunun ykseklie oranı olan relatif çentik boyutları ($\alpha = a_0/d$) 0.2, 0.35 ve 0.5 olarak seçilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kırılma mekaniği yapı elamanlarındaki mevcut çatlakları inceleyerek yayılmasını hangi koşullar altında gerçekleştirdiğini saptamaya çalışan bilimdir [5]. Griffith [6] camların kırılma davranışı izlemiş ve sistemin toplam enerjisindeki azalmayı daha önceki mevcut çatlaktan kaynaklandığını belirtmiştir. Bu gevrek çatlakların ilerleyişini ve enerjideki azalmayı formüle etmiştir. Zener ve Hollomon [20] Griffith [6] teorisini metal malzemelere uygulamışlardır. Irwin ve ark. [21] gevrek olmayan malzemeler üzerinde Griffith'in [6] yaptığı çalışmayı araştırmışlardır. Griffith'in [6] teorisi, cam gibi kırılğan malzemeler için deneysel verilerle mükemmel bir uyum sağlarken metal gibi sünek malzemelerde kırılma için gereken enerji seviyesinin buna karşılık gelen yüzey enerjisinden çok daha yüksek olduğunu fark etmişlerdir. Aynı zamanda Irwin ve ark. [21] kırılma mekaniği üzerine çok geniş çalışmalarda bulunmuştur. Irwin ve ark. [21] çatlak ucundaki gerilmeyi hesaplamak için gerilme şiddet faktörü “K” parametresini bulmuşlardır. 1961'de Kaplan [7], LEKM modelini betona uygulamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, çatlağın yayılma hızının farklı çentik boylarında benzer değerlere sahip olduğu, üç noktalı eğilme testinde ise %15 daha büyük bir değere sahip olduğu ve betonun yüzey enerjisinden yaklaşık 12 kat daha büyük olduğu ortaya konmuştur. Shah ve Ouyang [12] Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) betona doğrudan uygulanamadığını fark etmişler ve bunun nedeni heterojen bir yapıya sahip betonun kırılma esnasında oluşan sürecin farklı olmasından kaynaklandığını öne sürmüşlerdir.

Yapılan araştırmalarda betonun gevrek kırılmasını açıklayabilmek ve önleyebilmek için Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği modelleri geliştirilmiştir. Hillerborg [11] da üç noktalı eğilme deneyini çentikli kirişler üzerinde incelemiştir. Yük-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alandandan kırılma enerjilerini incelemiştir. Bazant [22] betonun deterministik yaklaşım yöntemine göre boyut etkisi kanununu bulmuştur. Jeng ve Shah [14] üç noktalı eğilme deneyini çentikli kirişler üzerinde inceleyerek çatlak uzunluğunu 2 adet kırılma parametresiyle modellemişlerdir. Bunlar gerilme şiddet çarpanı kritik değeri ve çatlak ucu açılma deplasman kritik değerleridir. Bazant ve Kazemi [16] üç noktalı eğilme deneyini en az üç farklı boydaki kirişler üzerinde inceleyerek kırılma enerjisini araştırmışlardır. Kim ve Eo [23] tarafından geliştirilen Değiştirilmiş Boyut Etkisi Kanunu Bazant'ın Boyut Etkisi

Kanunun yetersiz kaldığı yerlerde önermişlerdir. Bazant ve Oh [24], üç noktalı eğilme deneyinde daha önce modeller modifiye ederek alternatif bir model geliştirmişlerdir. Nallathambi ve Karihaloo [15], betonun kırılma sürecini analiz etmek amacıyla İki Parametrelili Modelin temel prensiplerine benzer şekilde Efektif Çatlak Modelini önermişlerdir. Xu ve Reinhardt [17] Çift-K modeli yönteminde çatlağın yayılmaya başlama kriterini ilave olarak dikkate alır. Çatlağın yayılmasının ilerlemesi ve başlangıç kriterlerini dikkate almışlardır. Zhao ve Xu [18], betonun kırılma davranışıyla ilişkilendirilmiş enerji salınım miktarına odaklanan yeni bir analitik model sunmuşlardır. Bu model aynı zamanda Çift-K ile bağlantılıdır. Hu ve Duan [25] tarafından üç noktalı eğilme deneyleri önerilen Sınır Etkisi Modeli'nde numune sınır şartlarını dikkate alarak yarı gevrek kırılma üzerinde çalışmışlardır. İnce [26] çentikli küp numunelerin yarmada çekme deneyi yöntemi ile boyut etkisi ve kırılma parametrelerini araştırmıştır. Grassl vd. [27] üç noktalı eğilme deneyini çentikli ve çentiksiz kirişler üzerinde deneyerek KSB üzerindeki boyut etkisi analizini yapmıştır. İnce ve Alyamaç [28] mermer tozundan kendiliğinden yerleşen beton üreterek kırılma parametrelerini incelemiştir. İnce ve Yılmaz Çetin [4] kesikli granülometri ile ürettikleri beton numunelerinin kırılma etkisi araştırmışlardır. İnce ve Fenerli [29] farklı geometriye sahip çentikli ve çentiksiz kare prizmatik numunelerin kırılma parametrelerini araştırmışlardır.

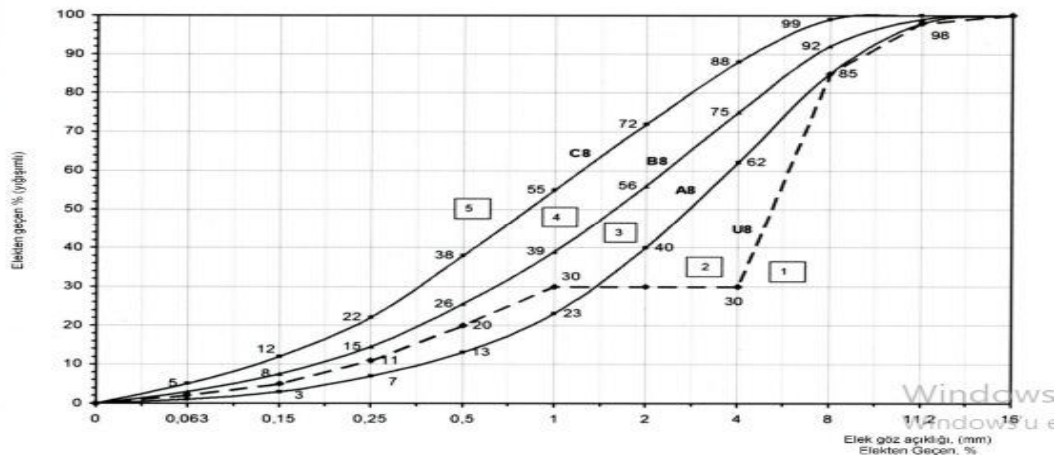
3. AGREGA VE GRADASYON EĞRİSİ

Betonu daha ekonomik hale getirebilmek için çimento ihtiyacının beton kalitesini bozmayacak şekilde minimuma indirilmesi gerekir. Bunu işlenebilirlik ve dayanıma etkisi olan agregalarla yapabiliriz. Agreganın işlenebilirlik üstündeki etkisi beton içindeki tane dağılımı ile ilgilidir. Granülometri eğrileri kullanılacak agreganın beton için nasıl bir tane dağılımına sahip olduğu hakkında bize genel bir bilgi verir. Agregalar beton hacminin yaklaşık %65-70'ini karşılar. Agregaların fiziksel özellikleri beton ekonomisine olduğu kadar dayanımına da doğrudan etkilidir. Agregalar ince agrega ve iri agrega olarak iki gruba ayrılır. Agregaları gruplara ayırırken tane boyutlarından faydalanırız. Nehir kumu, kırma kum gibi 0-4 mm çaplı agregalara ince; çakıl, kırmataş gibi 4mm'den büyük çaptaki agregalara iri agrega denir. Agreganın beton için uygunluğu TS 706 EN 12620'e [30] göre belirlenir. Agregalar çevre faktörlerine ve yapının tipine uygun şekilde seçilmelidir. Kullanılacak agregalar yassı ve uzun olursa işlenebilirlikte kayıp olacağından mümkün olduğunca yuvarlak agregalar kullanılmalıdır. Agrega içerisindeki silt ve kil oranının artması betonun su ihtiyacını artırarak beton sertleştikten sonra boşluklu bir yapı oluşmasına neden olarak dayanımın düşmesine sebep olacaktır bundan dolayı temiz agrega seçilmelidir.

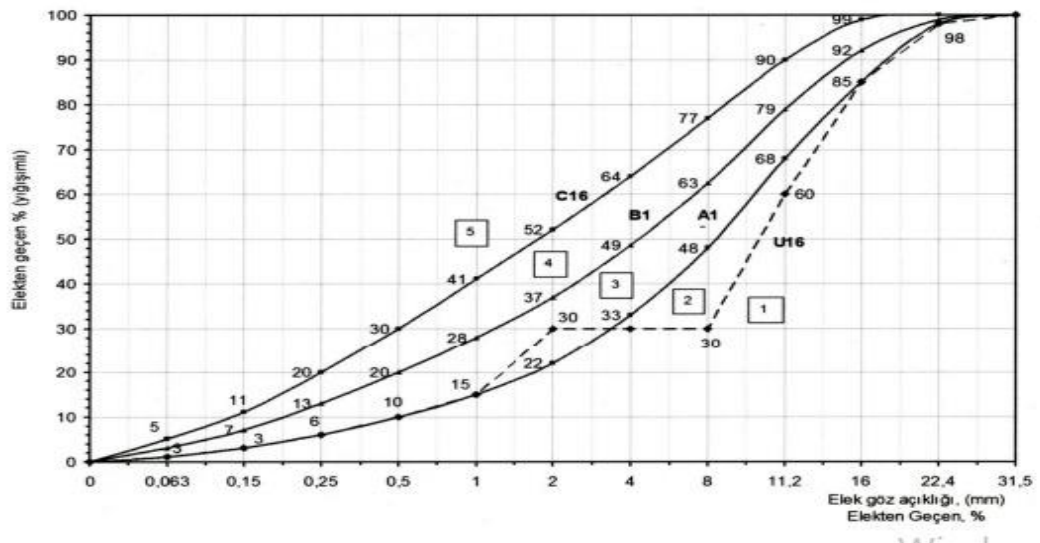
Beton agregalarının genel özellikleri, ideal granülometriye sahip olmalı, su ile reaksiyona girdikten sonra deformasyona uğramamalı, dağılmamalı ve çimentonun bileşenleri ile olumsuz bileşikler oluşturmamalıdır. Ayrıca, sert ve dayanıklı olmalı, su ile zararlı kimyasal bileşikler oluşturmamalı, kimyasal olarak zararlı maddeler içermemeli ve çimentonun yapışma özelliğine zarar vermemelidir. Agrega, kullanım yerine ve amacına bağlı olarak TSE'nin belirlediği kriterlere uygun granülometrik dağılıma, tane şekline, tane dayanımına, aşınma direncine, dona karşı dayanıklılığa ve zararlı maddeler açısından uygun olmalıdır

Çimento ve agreganın kimyasal reaksiyona girebilmesi için su gereklidir. Su olması gerekenden fazla kullanılırsa betonun dayanımı düşerken, olması gerekenden az kullanılırsa işlenebilirliği kötü etkiler. İdeal su/çimento oranı belirlendikten sonra beton hazırlanmalıdır.

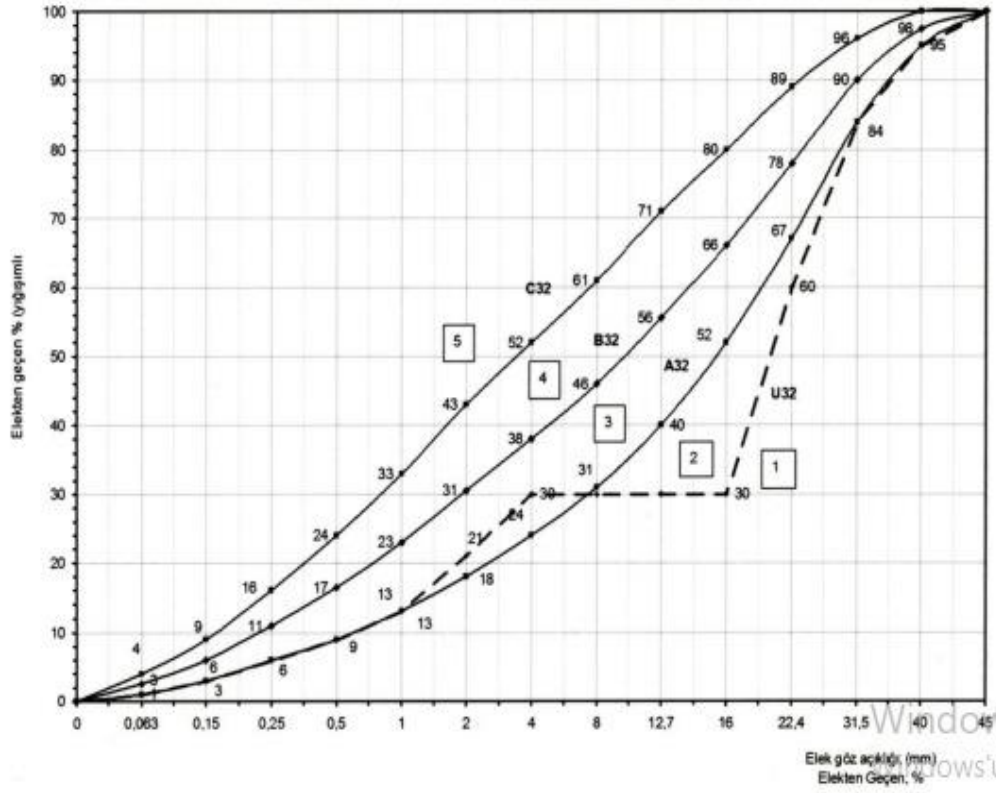
TS 802 [19] şartnamesinde 4 farklı ideal granülometri eğrisi vardır. Bu granülometri eğrileri Şekil 3.1-3.4'te gösterilmiştir. Şekillerde gösterilen grafiklerde x eksenı elek boyutlarını gösterirken, y eksenı agrega yüzdelerini göstermektedir. Karışımda kullanılan agregaların uygunluğu için karışım gradasyon eğrisinin grafiğın neresine denk geldiğine bakılmalıdır. A ve B eğrileri içinde kaldığı sürece ideale en yakın gradasyon, B ve C eğrileri içerisinde kaldığı zaman ise kullanıma elverişli agrega olarak ifade edilebilir. A eğrisinin üstüne düşen gradasyon eğrileri betonun su ihtiyacını arttıracığından idealden uzak eğri olarak kabul edilip kullanılmazken, C eğrisinin altına düşen eğrilerde ise işlenebilirlik çok kötü olacağından kullanılmaz. Kesikli çizgilerle gösterilen eğri ise kesikli granülometrelerin alt bölgesini göstermektedir.



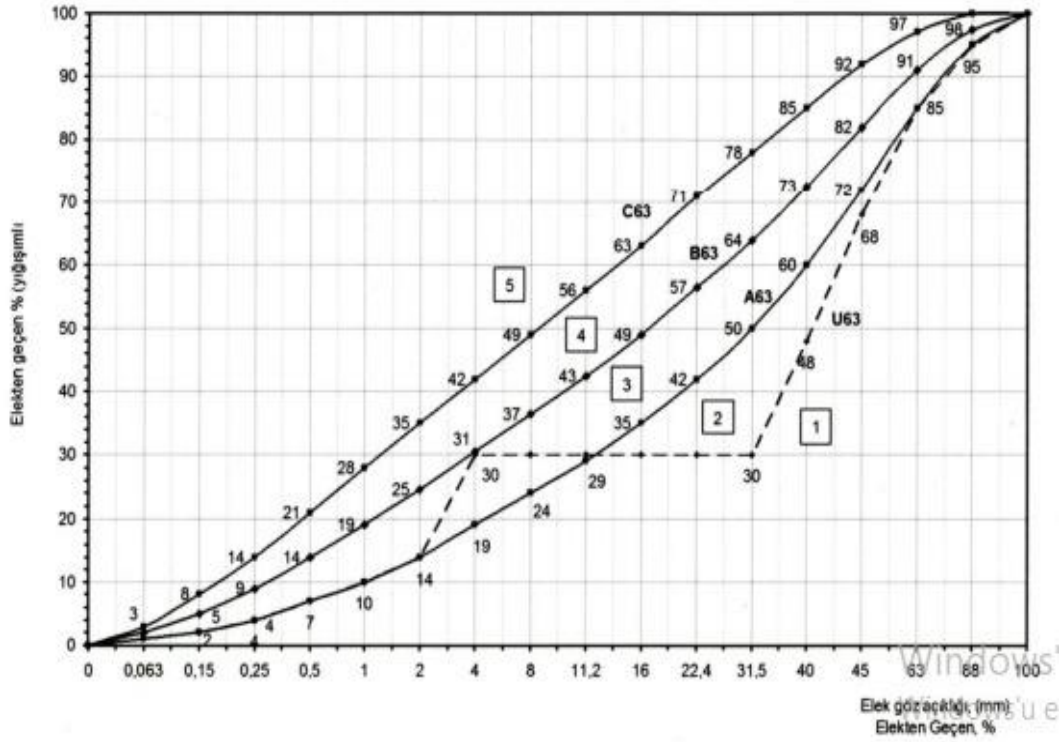
Şekil 3.1 $D_{max}=8$ mm için TS 802'de belirtilen ideal granülometri eğrisi [19]



Şekil 3.2 $D_{max}=16$ mm için TS 802'de belirtilen ideal granülometri eğrisi [19]



Şekil 3.3 $D_{max}=32$ (31.5) mm için TS 802’de belirtilen ideal granülometri eğrisi [19]



Şekil 3.4 $D_{max}=63$ mm için TS 802’de belirtilen ideal granülometri eğrisi [19]

4. SERTLEŞMİŞ BETONUN ÖZELLİKLERİ

Beton için gerekli olan malzemeler deney mikserine konulup karıştırıldığında, su ve çimento hidratasyonundan oluşan hamur, agregaların etrafındaki boşlukları doldurarak, betonu önce plastik bir malzeme haline getirir. Betonun plastik bir malzeme oluşu kalıplara yerleştirilip istenilen şeklin verilmesine olanak sağlar. Plastik kıvamdayken kalıba alınan betonda çimento hamuru 1 ile 10 saat arasında değişen süre zarfında katılaşmaktadır. Beton kısa bir sürede katılaşsa da, dayanımı düşüktür. Dayanım kazanması betonun zamanla sertleşmesiyle oluşur. Betonun dayanım kazanması katılaşmayla değil sertleşmeyle başlar. Beton dayanımı genel olarak basınç, çekme ve kesme gerilmelerinden oluşur.

4.1 Betonda Basınç Dayanımı

Betonda basınç mukavemeti, eksenel basınç yükü altında betonun göstermiş olduğu maksimum gerilme kuvvetidir. Beton da basınç dayanımı kontrol edilen ilk dayanımdır. Basınç dayanımı için genelde 300 mm yüksekliğinde, 150 mm çapında standart silindir numuneler veya 150×150×150 mm boyutlarında küp numuneler kullanılır. Alınacak numune sayısı TS EN 206 [31] uygulamasına yönelik tamamlayıcı standart olarak TS EN 13515'e [32] göre belirlenir. Basınç dayanımı için alınan numunelerin nasıl alınacağı, bakımı ve hazırlanışı için TS EN 12504-1'de [33] belirtilen hususlara uyulmalıdır. Alınan numuneler 28 gün su küründe bekletildikten sonra TS EN 12390-3'e [34] göre belirlenen şekilde test edilir. Basınç dayanımı Denklem 4.1 göre hesaplanır.

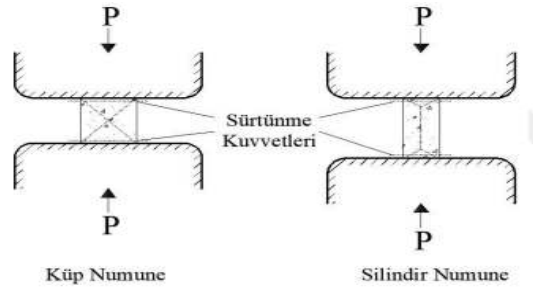
$$f_c = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Burada;

f_c : betonun basınç dayanımı

P: uygulanan yük

A: beton numunesinin kesit alanı



Şekil 4.1 Beton küp ve silindir numunelere basınç yükü uygulaması [29]

4.2 Betonda Çekme Dayanımı

Beton yapı elemanları tasarlanırken genellikle basınç dayanımı kullanılmaktadır. Yapı elemanlarının kullanım amaçlarına göre çekme dayanımı da önemlidir. Betonun çekme dayanımını bilmek çatlakları ve yapıları analiz etmek için önemlidir. Yarı gevrek bir malzeme olarak tanımlanan betonda çekme kuvvetlerine karşı dayanımın az olması çatlaklara sebebiyet verir bu çatlaklarda kırılmalara yol açar. Özellikle su depolarında, kütle betonlarda, nükleer santrallerde, hava alanlarında, yol inşaatlarında çatlak oluşumunu engellemek için çekme dayanımı bilinmelidir. Basınç mukavemeti çekme mukavemetinin yaklaşık olarak 10 katıdır.

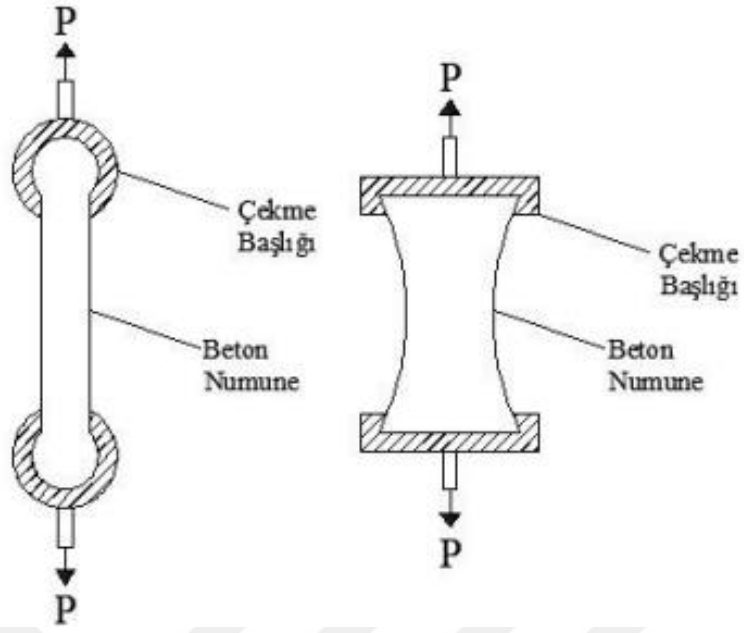
Beton çekme dayanımı deneyleri basınç dayanımları deneylerinden daha zordur. Bu nedenle basınç ve eğilme deneyleri yardımıyla belirlenir. Çekme dayanımı üç farklı yöntemle belirlenir.

Bunlar;

- Direkt (Doğrudan) Çekme Deneyi
- Yarmada Çekme Deneyi
- Eğilmede Çekme deneyi

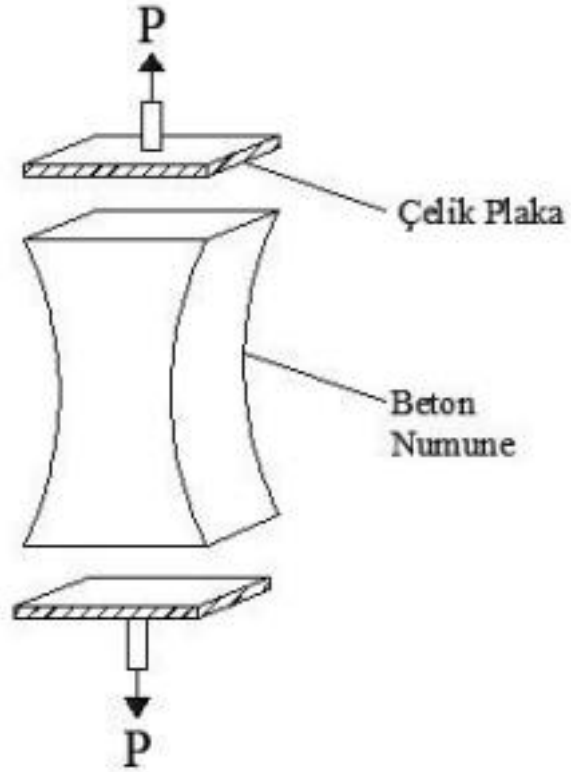
4.2.1 Doğrudan (direkt) çekme deneyi

Betonun direkt (doğrudan) çekme yükleri altındaki dayanımını belirlemek için belli bir boyut ve standardı yoktur. Bundan dolayı bilim insanları farklı metotlar denemişlerdir. Rusch [35] Şekil 4.2'deki gibi düzeneğe yerleştirilen numuneyle sonuç alınabileceğini savunmuştur. Rusch [35] özel olarak tasarladığı numune düzeneğinin çene kısmını büyüterek güçlü bir yapıştırıcı yardımıyla düzeneği numuneye kenetlemiştir.



Şekil 4.2 Rusch direkt çekme deney düzeneği [29,35]

Kassas ve Erdoğan [36] Şekil 4.3’de deney düzeneğini güçlü bir yapıştırıcıyla direk numuneye kenetleyerek uniform yük dağılımlı bir deney gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 4.3 Kassas ve Erdoğan direkt çekme deneyi düzeneği [29,36]

Doğrudan (direk) çekme deneylerinde, teoride numunenin kesitinin tamamı çekme gerilmelerine maruz kalır. Ancak pratikte deneyler uygulanırken çekme kuvvetinin numuneye uygulanmasında yaşanan bazı zorluklardan dolayı, kesitte burulma momentinden kaynaklanan ilave çekme gerilmeleri oluşur. Bu sebepten numune gerçek çekme kuvvetinin altındayken kırılmalar oluşur. Doğrudan çekme deneylerinde numune düzeneklerinin çenelerinin kırılması gibi aksilikler bilim insanlarını yarma ve eğilme deneyleri gibi alternatif çekme deneylerine yönlendirmiştir [29].

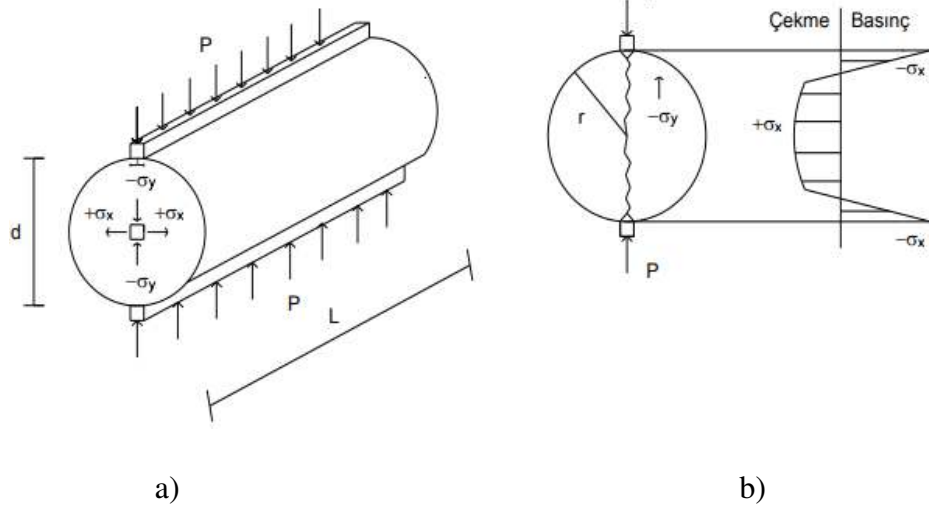
4.2.2 Yarmada çekme deneyi

Bu deney modelinde numune ortadan yarılarak ikiye ayrıldığı için “yarmada çekme deneyi” olarak adlandırılır. Çekme dayanımı deneylerinden yarmada çekme deneyi 1953 senesinde Brezilya Standardizasyon Konferansında Carniero ve Barcellos [37] tarafından önerilmiştir. Önerilen deney modeli silindir formda numuneler için yarmada çekme deney modelidir. Bu deney tipi zamanla küp ve prizma formdaki numunelerin çekme dayanımını belirlemek için kullanılmıştır. Yarmada Çekme deneyleri ile ilgili TS ve ASTM standardı vardır.

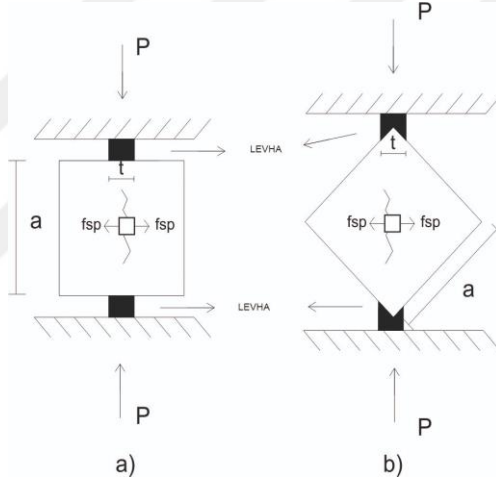
Bunlar;

- TS EN 12390-6 [38]
- ASTM C 496 [39]

Yarmada çekme deneyi Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterildiği gibi uygulanır Şekil 4.4’de gösterilen silindir formdaki deney numunesinin üst ve alt kenarlarına uzunlukları boyunca genişliği belirli standartlarca değişkenlik gösterebilen levhalar yerleştirilir. Bu şekilde yükleme noktaları ezilmez ve birden fazla çatlamanın önüne geçilmiş olur. Numuneye uygulanan doğrusal yük boyunca basınç gerilmelerine dik doğrultuda çekme gerilmeleri meydana gelir. Şekil 4.4 b’de kesitin üst ve alt kenarlarında çok yüksek basınç gerilmeleri meydana gelirken orta bölgede uniform çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Beton numunelerinde kuvvetin etki ettiği noktalarda kısalmalar, orta bölgedeki yatay eksenle uzama meydana gelir. Uygulama beton numunesini kırılıncaya kadar devam edilir. Kırılma esnasında yük (P_c) ölçülür.



Şekil 4.4 a) Standart silindir numunelerde yükleme b) Numunelerde gerilme dağılımları [4]



Şekil 4.5 a) Kenar küp yarma deneyi b) Diyagonal küp yarma deneyi

Yarmada çekme standart silindir numunelerin lineer elastik analizlerinde azami çekme gerilmesi Denklem 4.2'den hesaplanır. [40]

$$\sigma_{max} \left(\beta = \frac{t}{d} = 0 \right) = \frac{2P}{\pi L d} \quad (4.2)$$

Burada;

P: Beton numunesine uygulanan yük,

L: Beton numunesinin boyutu,

d: numune çapı,

β : (t/d) yük taşıyan şeritlerin relatif genişliğidir. Aynı zamanda bu formül prizmatik beton numuneleri için de kullanılabilir. Ancak Denklem 4.2'deki formül küp beton

numunelerinde Denklem 4.3'deki gibi kullanılabilir:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi a^2} \quad (4.3)$$

Burada;

a küp boyutudur. Diyagonal küp beton numuneler için Denklem 4.4'deki gibi hesaplanır:

$$f_{ct} = \frac{0.54P}{\pi a^2} \quad (4.4)$$

Tang'a göre yükleme düzlemindeki çentiksiz silindir beton numunelerinin azami yarmada-çekme dayanımı aşağıdaki Denkleme göre hesaplanır: [41]

$$\sigma_{max} = \frac{2P}{\pi bd} (1 - \beta^2)^{3/2} \quad (4.5)$$

Burada b beton numunesi genişliğidir. Rocco vd. [42] prizmatik numuneler için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak aşağıdaki Denklemi önermiştir:

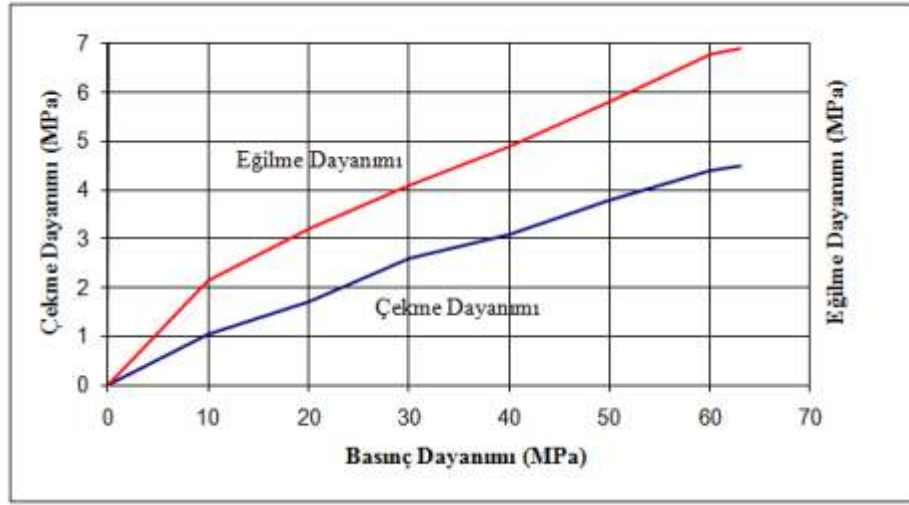
$$\sigma_{max} = \frac{2P}{\pi bd} (1 - \beta^2)^{5/3} - 0.015 \quad \beta \leq 0.20 \quad (4.6)$$

İnce [43] çentiksiz diyagonal küplerde yarmada-çekme mukavemeti için sınır elamanlar metodu ile aşağıdaki Denklemi önermiştir:

$$\sigma_{max} = \frac{2P}{\pi bd} \left(\frac{1}{0.931 + 38.931\beta^{4.778}} \right) \quad \beta \leq 0.25 \quad (4.7)$$

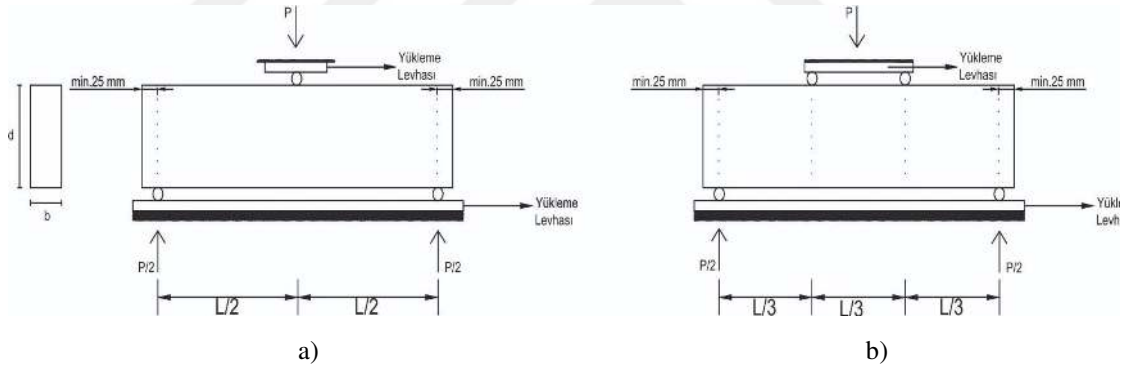
4.2.3 Eğilmede çekme deneyi

Eğilme deneyi kiriş numunelere uygulanan dolaylı çekme dayanımı deneylerinden bir diğeridir. Havaalanı, kaldırım vb. gibi eğilme çekme gerilmelerine maruz kalan yapıların tasarımında eğilme deneyinin yeri önemlidir. Eğilme mukavemetinin, basınç mukavemeti ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki aşağıdaki Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Eğilme mukavemeti, basınç mukavemeti ve çekme mukavemeti arasındaki bağıntı [44]

Betonun eğilme dayanımı için TS EN 12390-5'e [45] uygun olarak Şekil 4.7'da gösterildiği gibi kiriş numuneler hazırlanıp eğilme yükü altında kırılmaya tabii tutulmaktadır.



Şekil 4.7 beton çekme dayanımı kiriş numuneleri

Kiriş numunelerin, mesnetlerinin orta noktasından üç noktalı eğilme veya mesnetlere $L/3$ uzaklıktaki iki noktadan dört noktalı eğilme yükü uygulanır. Araştırmalarda genel olarak tercih edilen yöntem $L/3$ uzaklıktaki iki noktadan uygulanan yöntemdir. Bunun sebebi $L/3$ uzaklıktaki yükleme durumunda meydana gelen azami momentin kirişin uzun bir bölümünde (kirişin ortasında $L/3$ alanında) uniform etki gösteriyor olup bu alanın kesme kuvvetleri etkisinde olmamasıdır. Şekil 4.7 a'da orta noktadan yükleme için Denklem 4.8, Şekil 4.7 b'deki $L/3$ noktalarından yükleme için Denklem 4.9 kullanılır.

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4.8)$$

$$\sigma_e = \frac{PL}{bd^2} \quad (4.9)$$

4.3 Betonun Kayma Dayanımı

Betondan yapılan yapılar, farklı sebeplerden ötürü önemli kesme gerilmeleriyle karşılaşabilir ve bu durum önlenmezse, gevrek kırılmalar meydana gelebilir. Betonun kesme dayanımını belirlemek, çekme ve basınç dayanımını belirlemekten daha zordur. Kirişler kayma donatısı ve etriye ile donatılmışsa, Ritter ve Mörsch ortaya koyduğu kafes benzetme plastiklik alt sınır teorisi kullanılarak kayma dayanımı analiz edilebilir. Bu yöntem, çok kısa açıklıklı, birbirine yakın mesnetli ve yük uygulanmış kirişler üzerinde kesme mukavemetini belirlemek için kullanılır

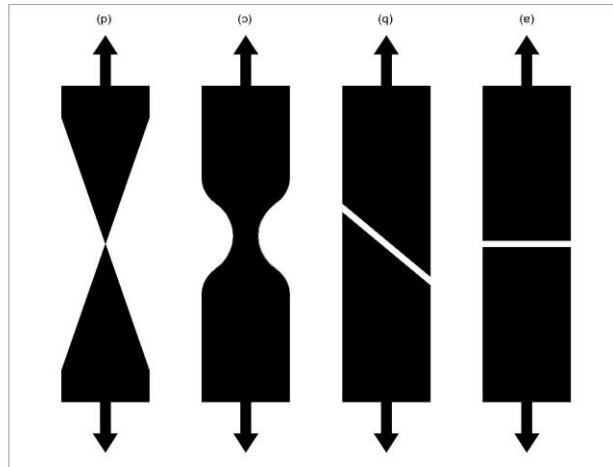
5. KIRILMA MEKANİĞİ

5.1 Kırılma

Gerilmeye maruz kalan bir cismin iki veya daha fazla parçaya bölünmesi veya parçalanması olayına kırılma denir. Çatlak oluşumu ve çatlak yayılımı olmak üzere iki aşamada incelenir.

Kırılmalar genellikle kendi içinde sünek veya gevrek kırılma olarak iki şekilde meydana gelir. Sünek kırılma çatlakların oluşması ve yayılmasında önemli denebilecek ölçüde şekil değişimlerinin meydana geldiği kırılma türüdür. Kırılan yüzeyin görünümü mat ve lifli bir görüntüye sahiptir. Sünek kırılma birden fazla türde kırılabilir. Sonuç olarak, gerçekleşen kırılmaya sünek kırılma tanımlamasına dahil edebilmek için plastik deformasyonun meydana gelmesi gerekir. Şekil 5.1’de kırılma türleri verilmiştir.

Gevrek kırılmalarda ise çatlak çok hızlı ilerler ve kalıcı şekil değişimleri gözlemlenmeden kırılma meydana gelir. Kırılma yüzeyi parlak ve taneli bir görüntüye sahiptir. Çok küçük veya plastik deformasyon gerçekleşmeden kırılma oluşur. Kırılma çok hızlı bir şekilde meydana geldiğinden gevrek kırılmalar ciddi felaketlere yol açabilir. Bu yüzden gevrek kırılmalar için tedbir alınmalıdır. Kuvvete dik doğrultuda ilerleyen çatlak neticesinde oldukça düz bir kırılma yüzeyi meydana gelir.



Şekil 5.1 a) Çok kristalde tam sünek kırılma b) Çok kristalde sünek kırılma c) Sünek tek kristalde gevrek kırılma d) Gevrek kırılma

5.2 Kırılma Mekanikinin Tarihsel Gelişimi

Kırılma mekaniği iki ana yönde aşama kaydetmektedir. İlki bütünüyle akademik çalışmalar üzerine yoğunlaşıp incelemeler yaparken, ikincisi pratikte mühendislik yapıtlarının sağlamlığını ve güvenilirliği sonucunda meydana gelen zorunluluklardır. Zaman içinde iki ilerleyiş arasında farklılıklar oluşabilmektedir [5].

Leonardo Da Vinci Kırılma Mekanikği üzerine çalışma yapan ilk bilim insanıdır. Gerçekleştirdiği araştırmalarla kırılmanın ana sebebi ile ilgili ipuçları bulan Leonardo, demir tellerin mukavemeti ile ilgili hesaplamalar yapmıştır. Bu hesaplamalar ışığında, tellerin mukavemetinin tel uzunluğuyla ters orantılı şekilde değiştirdiğini göstermiştir. Bu tespit, malzeme kusurlarının mukavemeti etkilediğini gösterir. Teller uzadıkça malzeme hacmi de büyüyerek içinde kusur barındırma ihtimalini artırmaktadır. Fakat bu tespit niteldir. Kırılma gerilmesiyle kusur boyutu arasındaki sayısal ilişki Griffith [6] tarafından 1920 senesinde yayımlanan araştırmayla tespit edilmiştir. Irwin [46] araştırmalarıyla sünek malzemeleri de kapsayacak şekilde kırılma mekaniği çalışma sahasını genişletmiştir. “Enerji yaklaşımı, gerilme şiddet çarpanı yaklaşımıyla eşdeğerdir” düşüncesiyle yeni bir düşünce yapısı oluşturmuştur. Bu düşünce doğrultusunda çatlak ucunda kritik bir gerilme yayılımı oluştuğunda kırılma olayı gerçekleşir. Kritik gerilme şiddet çarpanı Kc veya enerji terimleriyle Gc ’nin kritik değerleri, malzeme özelliği olarak ortaya koyulmuştur [21].

Sanayi devriminin başlamasıyla endüstrilerde makineleşme akımı başlamıştır. Makilerin demir ve çelikten üretiliyor olması demir ve çelik üretiminde bir artış meydana getirmiştir. Tasarımda yapılan hatalar malzeme kalitesizliği ve işçilik hataları sebebiyle üretimde beklenmedik sonuçlar ortaya çıkmıştır. Kırılma mekaniği alanındaki araştırmalar bu gelişmelerle birlikte artmaya başlasa da II. Dünya savaşı öncesi ve sonrası yaşanan olaylara kadar büyük bir ilerleme gözlemlenememiştir. Bu olaylardan biri önemli düzeyde kaynak harcanarak üretilen Liberty gemilerinin birçoğunda kırılmalar sonucu ağır hasarlar meydana gelirken bazıları ise kırılarak iki parçaya ayrılmıştır. Başka bir örnek ise Şekil 5.2’de gösterilen Schenectady tankerinde olmuştur. Üretim aşamasındaki testleri başarılı bir şekilde tamamlamasına rağmen çıktığı seferden geri dönerken ortadan kırılarak ağır hasar almıştır.

Karşılaşılan bu tarz gevrek kırılmalar neticesinde tasarımlarda sadece klasik bakış açısından ziyade kırılma konusunu da ele alarak tasarımlar yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Böylece sadece araştırmacıların üstünde durduğu kırılma mekaniği uygulamacılar ve mühendisler tarafından dikkate alınmaya başlamıştır.



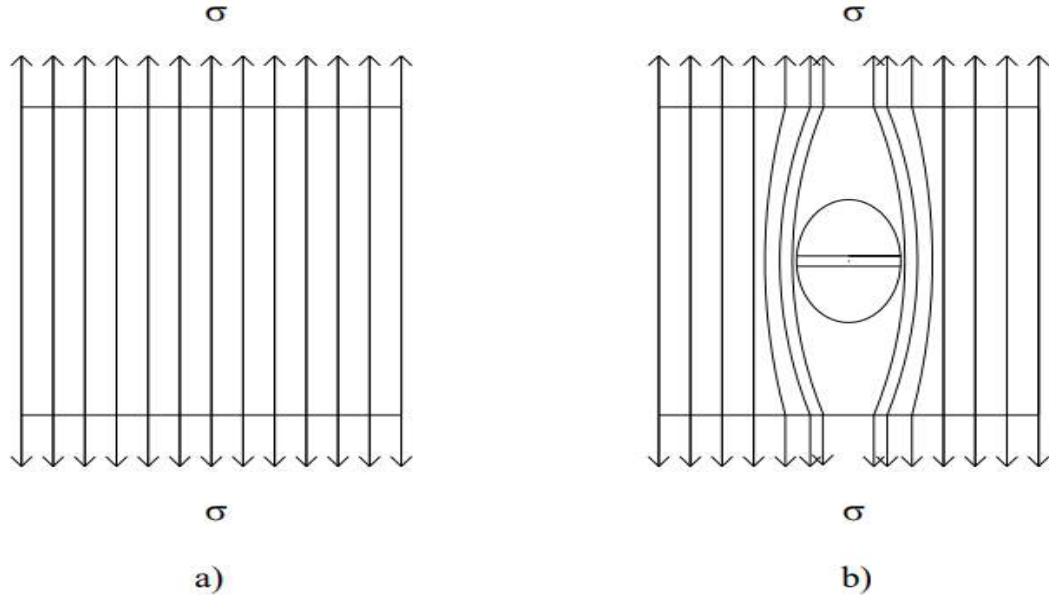
Şekil 5.2 Schenectady adlı tankerin ağır hasarlı hali [47]

5.3 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Mikro çatlaklar ve benzeri hatalar malzemedeki doğal kusurlardandır. Kırılma mekaniğinin araştırılmasında kullanılan ve katı cismin tüm davranışlarının elastik sınır içerisinde kalması ilkesiyle geliştirilen analitik ifadelerin hepsine Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) denir. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) metodunun ana prensibi çatlakın yönüne, uzunluğuna ve katı cisme uygulanan gerilmeye bağlı olarak çatlak ucunda meydana gelen gerilmelerin ifade edilmesidir. Kırılma hasarlarını belirlemek için iki yaklaşım vardır. Bunlar “Enerji Dengesi Yaklaşımı” ve “Gerilme Şiddeti Faktörü” şeklindedir.

Griffith [6] 1920 senelerinde kırılma mekaniği üzerine öncü çalışmalar yapmıştır. Cam malzemesi ile gerçekleştirdiği deneylerle, teorik dayanım ile deneysel değerlerle elde edilen dayanım arasındaki ilişkiyi açıklamayı hedeflemiştir. Cam lifler ile gerçekleştirdiği deneylerde cam liflerinin çapı arttıkça dayanım kaybı olduğu, çok küçük cam lifi çapıyla yapılan deneysel çalışmalarda ise teorik dayanım değerlerine yaklaşıldığını görmüştür. Griffith bu düşük dayanım değerlerinin ana sebebi olarak içlerinde bulundurdıkları ve boyutları moleküller arasındaki uzaklığa göre daha fazla olan süreksizlikler ve kılcal çatlakların meydana getirdiğini savunmuştur.

Yük altında bulunan ve boşluklu bir yapıya sahip katı cisimlerde, boşluk ucunda süreksizlik nedeniyle gerilme yığılması oluşmaktadır (Şekil 5.3). Yükleme sebebiyle meydana gelen gerilme akımı çatlakın etrafından ilerleme mecburiyetinde kaldığı için çatlak ucundaki gerilme yığılmasının artmasına neden olur, çatlakın alt ve üst yüzeylerindeyse gerilme gevşemesi oluşmaktadır. Çatlak ucunda oluşan gerilme yığılmaları LEKM'e göre çatlak keskinleştikçe sonsuza gider [48].



Şekil 5.3 a) Çatlak veya boşluk içermeyen katı cisimde oluşan gerilme akımı b) Çatlak veya boşluk içeren katı cisimde oluşan gerilme akımı ve süreksizlik ucunda oluşan gerilme yığılmaları [4]

Gerilme yığılması sünek olmayan malzemeler için daha büyük bir tehdittir. Bunu sebebi gevrek malzemeler plastik deformasyona uğramadıkları için gerilme yığılması sonucu çatlak ucunda oluşan gerilme teorik gerilmeye yakın bir değere sahiptir. Fakat sünek malzemelerde çatlak ucunda plastik şekil değiştirmenin gerçekleşeceği alanın boyutu büyük olduğundan bu alanda çatlak ucundaki kısımda gerilme üniform dağılır.

1920 senesinde Griffith [6] önerdiği teoride; gerilmelerin çatlak etrafında meydana getireceği elastik enerji, meydana gelecek yeni yüzeylerin enerjisine eşit olunca çatlak yayılması başlar. Griffith [6] önerdiği bu teori gevrek malzemelerde teorik mukavemetin tahminine yaradığı gibi kırılma dayanımıyla kusur boyutu arasındaki

bağıntısının bulunmasını da sağlar. Gevrek malzemede çatlak varsa, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilme bağıntısı Denklem 5.1’de verilmiştir: [4]

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (5.1)$$

Burada:

σ = Gerilme

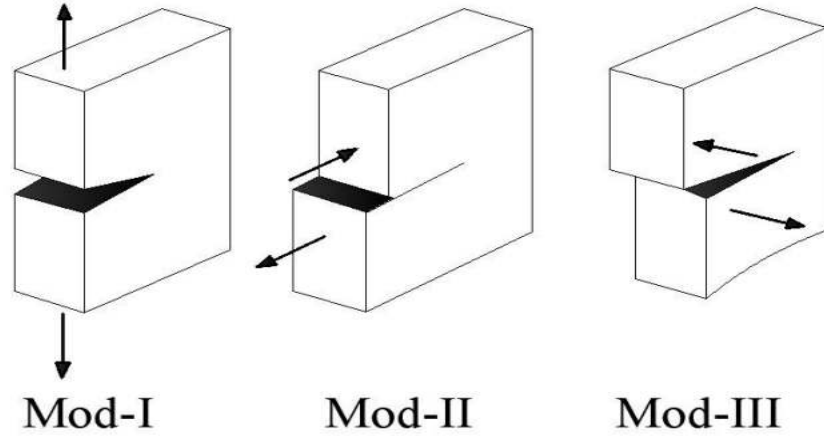
E = Elastisite modülü

γ = Yüzey Enerjisi Yoğunluğu

a = merkezi çatlaklı yapılarda yarı çatlak uzunluğu, sınır çatlaklı durumda tam çatlak uzunluğudur.

Griffith, cam lifler ile gerçekleştirdiği deneyler sonucunda teorik dayanımın, elastisite modülünün %10’u (E/10) olduğunu ve bu hataların malzeme hatalarından gerçekleştirdiğini savunmuştur. Irwin bu araştırmanın aksine seramik lifler ile gerçekleştirdiği deneylerin sonucunun teorik dayanımın E/10 civarında olmadığını savunmuştur. Irwin, araştırmalarında metal malzemeleri de kullanarak araştırma sahasını genişletip genel kırılma modları olan ModI, ModII, ModIII ve bunların kombinasyonu ile oluşan karışık modun yasalarını ve “K” simgesiyle gösterilen gerilme şiddet çarpanını bulmuştur.

Katı cisimlerdeki çatlaklar maruz kaldığı yüklemeye göre üç temel kırılma moduyla gerçekleşebilir. Bunlar; Şekil 5.4’de gösterildiği gibi ModI, ModII, ModIII olarak gruplandırılmıştır. Çatlak oluşumu bu modların herhangi biriyle olabileceği gibi kombinasyonlarıyla da oluşabilir [4-5].



Şekil 5.4 Kırılma Modları [29]

Mod I (açılma modu): Yük çatlak düzleme uygulanır. Çatlağı kendi düzlemlerine dik şekilde açma eğiliminde olmasından dolayı çatlak açılma modu olarak ifade edilir. [4]

Mod II (kayma modu): Kayma ya da kesme modu olarak tanımlanır. Çatlak yüzeyleri kendi düzlemleri içinde birbirlerine göre yer değiştirerek simetrik olmayan gerilme durumları meydana gelir. [4]

Mod III (yırılma modu): Çatlak yüzeyleri düzlem dışında birbirlerine göre yer değiştirme yaptığından yırılma modu olarak tanımlanır. [4]

$$\text{Mod I: } K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (5.2)$$

$$\text{Mod II: } K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (5.3)$$

$$\text{Mod III: } K_{III} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (5.4)$$

Burada;

σ : çekme gerilmesi,

τ : kayma gerilmesi

a : merkezi çatlaklı yapılarda yarı çatlak uzunluğu, sınır çatlaklı durumda tam çatlak uzunluğudur.

İçerisinde çatlak barındıran malzemenin geometrisine, yükleme şartlarına ve sınır durumlarına bağlı bir sabit değer olan gerilme şiddet çarpanı $[K]$ 'nın biliniyor olmasıyla çatlak ucundaki tüm gerilme ve birim uzamaların büyüklüğü tespit edilebilir. Bu birim uzamalar ve gerilmeler belli bir kritik değere vardığında çatlak ilerlemeye başlar. Bu değer kritik gerilme şiddet çarpanı (K_c) veya kırılma tokluğu olarak adlandırılır. [4-5]

Kırılma ancak çatlak ucundaki gerilme kritik bir değeri aşarsa gerçekleşir. Matematiksel olarak ifade etmek istersek $K \geq K_c$ durumu oluşursa kırılma başlar.

$$K = \sigma\sqrt{\pi\alpha} \quad (5.5)$$

$$K_c = \sqrt{EG_c} \quad (5.6)$$

Burada;

σ : Gerilme

α : Çatlak uzunluğu

K : Gerilme şiddet çarpanı

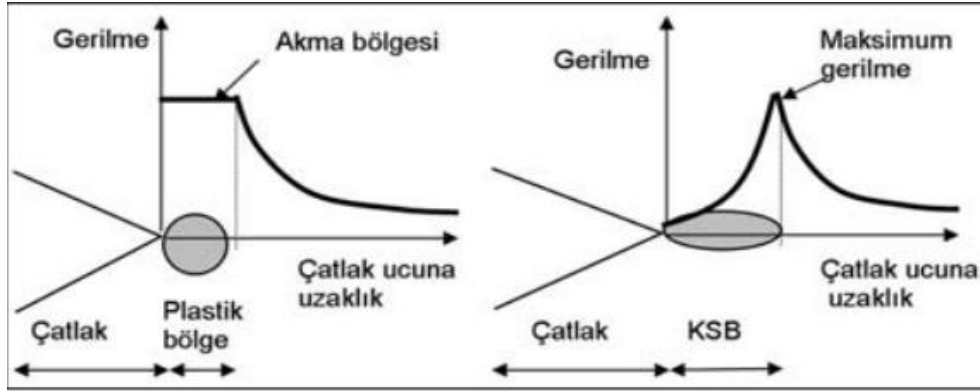
K_c : Kritik gerilme şiddet çarpanı

G_c : Enerji salıverme oranı

$\sigma\sqrt{\pi\alpha}$ değeri $\sqrt{EG_c}$ değerine vardığında çatlak ilerlemeye devam ederken, $\sigma\sqrt{\pi\alpha} < \sqrt{EG_c}$ şeklinde olursa çatlak boyu kritik olmaz çatlak ilerleyemez veya sabit bir değerle ilerler.

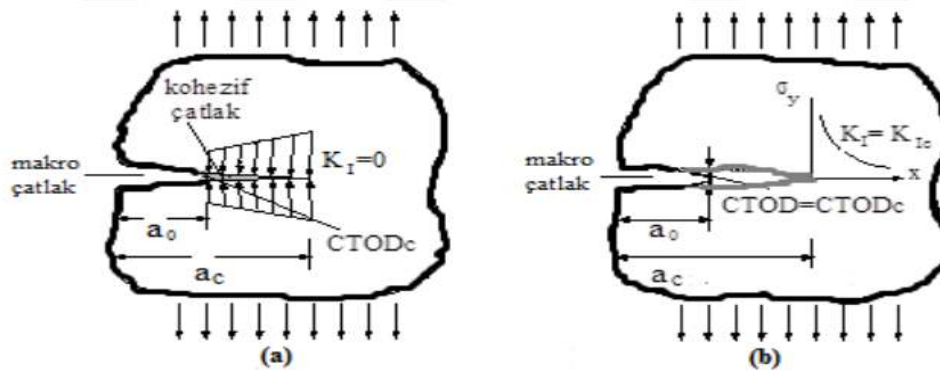
5.4 Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekanikliği

Yarı gevrek ve heterojen bir malzeme olan beton belli bir yüke maruz kalmadığı durumlarda da içerisinde mikro çatlaklar ve boşluklar bulundurulur. Metal gibi sünek malzemelerde kırılma gerçekleşmeden önce akma meydana geleceği için çatlak ucunda oluşan gerilme artışı sonsuza gitmez ve bununla birlikte akmanın meydana geldiği plastik bir bölge oluşur (Şekil 5.5a). Beton gibi yarı gevrek malzemede çatlak ucunda ciddi derece de kalıcı deformasyonlar oluşur. Meydana gelen gerilmelerin ve deformasyonların orantılı olmadığı bu bölgeye Kırılma Süreci Bölgesi (KSB) denir. LEKM araştırmacılarının göz önünde bulundurmadığı bu bölge, metallerdeki plastik bölgeyle kıyaslandığında göz ardı edilebilecek küçüklükte olmasına karşın, yarı gevrek beton malzemesinde 1 cm'i aşan değerlere ulaşabilmektedir. Oluşan deformasyonlar ve mikro çatlaklar enerjiyi yutarak çatlak ucunda oluşan gerilmeyi azaltıp sonsuzu gitmesini engellemiş olur (Şekil 5.5b). LEKM araştırmalarında farklı olarak betonu tasarlamak Lineer Olmayan Kırılma Mekanikliği yaklaşımlarından iki parametre kullanılır [11-48].



Şekil 5.5 a) Sünek bir malzemede çatlak ucunda oluşan gerilme durumu ve plastik bölge b) Yarı gevrek bir malzemede çatlak ucunda oluşan gerilme durumu ve kırılma süreci bölgesi [48]

Beton malzemesi kırılma parametreleri esas olarak iki yerde incelenebilir. Birincisi Elastik Çatlak yaklaşımları modelleri (İki Parametrel Model [14], Efektif Çatlak Modeli [15], Çift-K Modeli [17] ve Boyut Etkisi [16]), ikincisi ise Kohezif Çatlak Modelidir. Şekil 5.6 b’de gösterilen şekildeki gibi, eşdeğer elastik çatlak uzunluğundan faydalanarak tasarlanmaktayken Kohezif Çatlak Modelinde KSB’nin çatlak ucunda azalma gösteren ve çatlakla basınç uygulayan bir gerilme bloğu ile biçimlendirir.



Şekil 5.6 a) Kohezif çatlak modeli b) Eşdeğer elastik çatlak modeli [49]

5.4.1 İki parametrel model (İPM)

Jeng ve Shah’ın [14] araştırmalar yaparak sunduğu Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği önermelerinden İki Parametrel Model, beton malzemesinden yapılmış bir yapıda, gerilme şiddet çarpanı K_I (burada sadece Mod I koşulu dikkate alınmaktadır) ve çatlak ucu açılımı CTOD değerlerinin, kritik gerilme şiddet çarpanı K_{Ic}^s ve kritik çatlak ucu açılımı $CTOD_c$ olan kritik değerlerine ulaştığında göçmenin meydana geleceğini savunmuşlardır. Buradaki değerleri bulabilmek için LEKM’e ait Denklem 5.7 ve Denklem 5.8’ den faydalanılabilir [50].

$$K_{Ic}^S = \sigma_{Nc} \sqrt{\pi a_c} f_1 \quad (5.7)$$

$$CTOD_C = \frac{4\sigma_{Nc}\alpha_c}{E} f_1 f_2 \quad (5.8)$$

Burada;

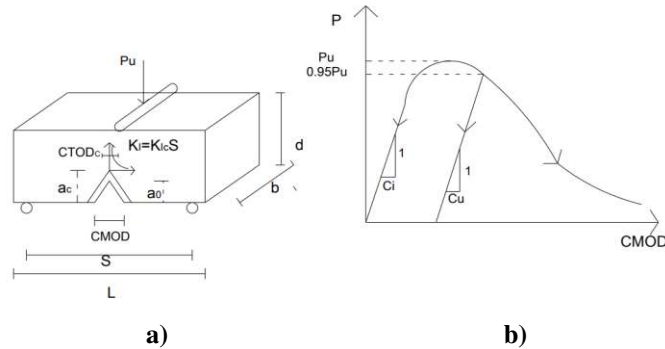
σ_{Nc} = Göçmedeki nominal dayanımı (maksimum yükün numune kesit alanına oranı)

E = Betonun elastisite modülünü

f_1, f_2 ve f_3 = Numunenin geometrisine ve yükleme durumuna bağlı fonksiyonları belirtmektedir.

5.4.1.1 Komplians metodu

Komplians metodunda, kırılmaya ait parametreler kapalı devre deney ekipmanları kullanılarak, Şekil 5.7a'da görüldüğü gibi çentikli üç noktalı eğilme numunesinin yük-çatlak ağzı açılımı (P-CMOD) bağıntısından faydalananarak hesap yapılır. Bu yaklaşımda kritik çatlak boyu olan a_c , başlangıç (C_i) ve pik yük sonrası pik yükün %95 değerinde ölçülen gibi iki komplians parametrelerinden yararlanılarak ölçüm yapılır. Bu yaklaşımla belirtilen değerlere ek olarak başlangıç ve pik yükteki komplians parametrelerinden (C_i, C_u) betonun elastisite modülü de hesaplanabilir [50-51].



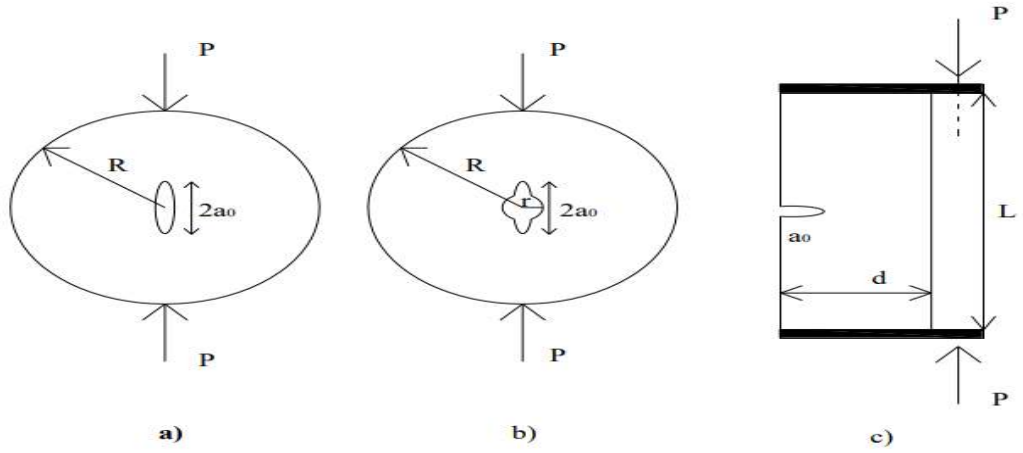
Şekil 5.7 İki parametrelili modelde kırılma parametreleri tayini) Çentikli üç noktalı eğilme numunesi b) tipik bir CMOD diyagramı [50].

5.4.1.2 Pik yük metodu

Pik yük metodunda, komplians metoduna kıyasla daha az kapasiteli deney ekipmanları kullanılır. Bu yaklaşıma göre numunelerin boyutları aynıysa farklı çentik uzunlukları kullanılmalı veya farklı boyutlarda numune kullanılıyorsa aynı relatif çentik boyuna sahip en az iki veya daha fazla numunenin pik yük değerinin hesabı yapılırken kırılma parametrelerinin hesabını belirlemek için K_{Ic}^S -CTOD_c

bağıntısından yararlanarak standart sapmanın en az olduğu değerden faydalanılır [50].

Komplians methodu yaklaşımıyla kırılma değerlerini sadece üç noktalı eğilme kırımları kullanarak bulabilirken, pik-yük metodu yaklaşımında bu tarz numunelere ilaveten Şekil 5.8’de gösterildiği gibi çentikli silindir yarma, eksantrik basınca maruz prizmatik ve boşluklu silindir yarma numunelerinden de faydalanabilmektedir [50-52].



Şekil 5.8 Kırılma numuneleri a) Çentikli standart silindir yarmada-çekme b) Boşluklu standart silindir yarmada-çekme c) Eksantrik yüklü çentikli prizma [4]

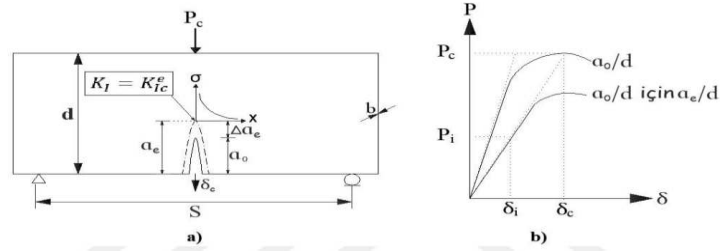
5.4.2 Efektif çatlak modeli (EÇM)

Betonda Efektif Çatlak Modeli, Nallathambi ve Karihaloo’nun [15] 1986 senesinde yapmış oldukları araştırmalar sonucunda İki Parametrelili Modelin koşullarına yakın prensiplerle geliştirmiş olmalarına karşın efektif çatlak uzunluğu (a_c) yükleme-boşaltma eğrisindeki komplanstan analiz edilemez.

Efektif Çatlak Modelinde (EÇM), beton numunesinin kırılma değerlerini hesaplamak için Şekil 5.9’da gösterildiği gibi çentikli üç noktalı eğilme numunelerinin yük deplasman ($P-\delta$) bağıntısından yararlanılmaktadır. Bu modelde, belirli bir a_0 başlangıç çatlak uzunluğuna sahip numunenin maksimum yüküne karşılık gelen sekant modülü, farklı bir a_0 başlangıç çatlak uzunluklu kırımların dinamik modülüne eşdeğer olduğu duruma karşılık gelen a_0 başlangıç çatlak uzunluğu değeri efektif

çatlak uzunluğu a_e şeklinde ifade edilir. Burada bu efektif çatlak uzunluğuna denk gelen gerilme şiddet çarpanının kritik değeri K_{Ic}^e dikkate alınırsa modelin iki parametrelili olduğu sonucuna varılır.

$$K_I = K_{Ic}^e \quad \alpha = \alpha_e \quad (5.9)$$



Şekil 5.9 Efektif Çatlak Modelinin geometrik yorumu [29,53]

6. MATERİYAL VE METOD

Betonun mekanik dayanım değerleri hesaplamalarında agrega özellikleri ve tipi (hafif veya ağır agrega), agreganın maksimum çapı (d_{max}), gradasyon eğrisi, su/çimento oranı, çimentonun kalitesi ve miktarı, kullanılan katkı malzemesinin özellikleri ve miktarı, kürleme şartları, yükleme hızı gibi malzeme değişkenleriyle bağlantılıdır. Bu tez çalışmasında, betonun mekanik dayanım değerleri hesaplamalarında agrega gradasyonu, su/çimento oranı ve maksimum bazalt agrega çapı (d_{max}) gibi yapı malzemesi değişkenlerinin kırılma özellikleri arasındaki bağıntı ilişkisi incelendi. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, sürekli gradasyon eğrisiyle üretilen çentikli küp numunelerin mekanik değerleri incelenip, Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği prensipleri ile kırılma parametreleri analiz edildi. Hazırlanan serilerde küp numunelerinin basınç deneyleri de incelendi. Çentikli üretilen beton küp numuneleri yarmada-çekme deneylerine tabii tutularak hesaplanan analiz değerlerine göre Eşdeğer Çatlak Modellerinden İki Parametrelili Model ve Efektif Çatlak Modeli ile analizleri gerçekleştirildi. Deneylerin tamamı Diyarbakır Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü beton laboratuvarında gerçekleştirildi. Beton karışım hesaplamalarında Yurt Çimento tarafından imal edilen CEM I 42.5 R tipi yüksek mukavemetli çimento kullanıldı. Karışım hesaplamalarında sürekli gradasyon olmak üzere $d_{max}=12$ mm ve $d_{max}=19$ mm iki farklı elek aralığı kullanıldı. Hesaplanan ve sonuca bağlanan deneysel değerlerin sonuçları tablo ve şekillerle verildi.

6.1 Agrega Malzemesiyle Yapılan Fiziksel Deneyler

Bu bölümde agreganın metilen deneyi ile kil oranı, elek analizleri, agrega su emme oranı, agrega özgül ağırlıkları incelendi.

6.1.1 Agrega kil oranı belirlenmesi

Deneyin yapılabilmesi için öncelikle 10 gr metilen mavisi ile 1000 gr saf su karıştırılarak hazırlanan çözelti 24 saat bekletildi. Hazırlanan çözelti 28 gün içinde kullanıldı. Şekil 6.1a ve 6.1b’de gösterildiği gibi 2mm’lik elekten geçen 200 gr. agrega karışımı hazırlandı.



a)



b)

Şekil 6.1 Metilen mavisi deneyi için hazırlanan 200 gr. agrega karışımı

Hazırlanan bu agrega karışımı 500 gr. saf suya katılmış ve 600 devir/dakika hızda 5 dakika boyunca karıştırıldı. Elde ettiğimiz agrega su karışımına 5 ml metilen mavisi çözeltisi eklenerek 1 dakika boyunca karıştırıldı. Bir dakika sonunda cam baget karışımı daldırılarak filtre kâğıda bir damla damlatıldı. Şekil 6.2’de gösterildiği gibi filtre kağıdının üstündeki damla koyu mavi merkezli haleli bir görüntü alana kadar 5 ml metilen mavisi çözeltisi ilave edilerek devam edildi. Hale elde edildikten sonra metilen mavisi eklenmeden 1 dk aralıklarla 3 dakika boyunca karıştırılmıştır ve hale kaybolmadığı için kil oranımız % 2 olarak tespit edildi.



Şekil 6.2 Deneyin gerçekleştirildiği filtre kâğıt

6.1.2 Agrega su emme oranı ve özgül ağırlığının belirlenmesi

Böl geç metodu yardımıyla TS EN 1097’ te belirtilen ağırlıklar kadar agrega özdeş tepsilere yerleştirildi. Yerleştirilen agregalar 24 saat suya doymun hale gelebilmesi için Şekil 6.3’te gösterildiği gibi tepsiler su ile dolduruldu.



Şekil 6.3 Suya tam doygun hale gelmiş agregalar

24 saat sonunda sudan çıkarılan agregaların yüzeyi havlu yardımıyla kurulandıktan sonra suya doygun ağırlıkları ölçüldü. Yüzeyi kuru suya doygun agregalar etüv ağırlıkları için Şekil 6.5'te gösterildiği gibi 24 saat fırında bekletildi.



Şekil 6.4 Agregaların yüzeyini kuru hale getirme işlemi



Şekil 6.5 Agregaların etüve alınması

Agregaların su içindeki ağırlıkları ölçebilmek için agregalar piknometrelerin içine yerleştirildi. Piknometrenin içinde hava boşlukları kalmaması için Şekil 6.6’te gösterildiği gibi piknometreler 24 saat su banyosunda bekletildi. 24 saat sonunda agregaların su içindeki ağırlıkları ölçüldü.

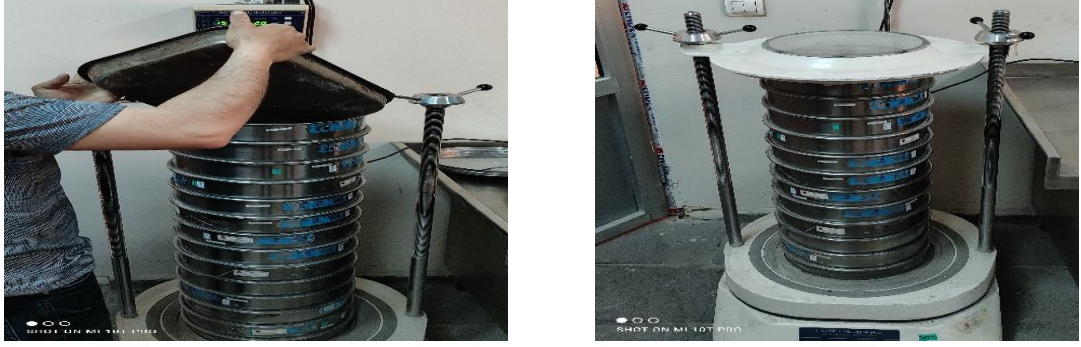


Şekil 6.6 Su banyosuna konulan agregalar

Deneyler sonucunda 0-5 mm çapında kırma bazalt kumunun özgül ağırlığı 2.71 g/cm^3 , su emme oranı % 2.46 olarak hesaplandı. 5-12 mm kırma bazalt taşının özgül ağırlığı 2.79 g/cm^3 , su emme oranı % 1.75 olarak hesaplandı. 12-19 mm kırma bazalt taşının özgül ağırlığı 2.81 g/cm^3 su emme oranı % 1.51 olarak hesaplandı.

6.1.3 Elek analizi

Şekil 6.7 da gösterildiği gibi elek sallayıcıda 15 dakika sallandıktan sonra eleklerin üzerinden geçen agrega yüzdelikleri Tablo 6.1’de verildi.



Şekil 6.7 Deneyde kullanılan elektrikli elek sallayıcı

Tablo 6.1 Kullanılan agrega elek analiz sonuçları

agrega tipi	ELEK GÖZ AÇIKLIĞI (mm)											
	31.5	22.4	16.0	12.7	8.0	4.0	2.0	1.0	0.5	0.25	0.15	0.063
12-19 mm	100	100	17.6	1.0	0.6	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-12 mm	100	100	96.6	56.6	0.6	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0-5 mm	100	100	100	100	100	94.4	63.2	40.2	26.5	17.3	11.5	6.7

6.2 Karışım Oranları

Karışım oranlarının hesaplamaları yapılırken $d_{\max}=12$ mm için çimento dozajı 300 kg/m^3 ve 350 kg/m^3 olmak üzere iki farklı dozaj seçilip iki seri şeklinde döküm gerçekleştirildi. Her iki seri için de su/çimento oranı 0.45 olarak sabitlendi. 300 kg/m^3 dozaj için kullanılan su 135 kg/m^3 , 350 kg/m^3 dozaj için ise kullanılan su 157.5 kg/m^3 bulundu. Hava boşluğu % 1.5 olarak alındı. Dizaynların tamamında işlenebilirliği artırabilmek için % 1 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanıldı. Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özgül ağırlığı $\gamma_k=1.18 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Çimento özgül ağırlığı $\gamma_c= 3.0 \text{ g/cm}^3$ 'dir. Beton karışım oranları hesaplamaları Denklem 6.1 verilen agrega mutlak hacim formülü ile hesaplandı. Hesaplanan karışım oranları Tablo 6.2-6.5'te verildi.

$$1000 = \frac{C}{\gamma_c} + Su + (Hava \times 10) + V\alpha + \frac{katkı}{\gamma_k} \quad (6.1)$$

$d_{\max}=12$ mm 300 dozaj çimento için dökülen seride 1000 dm^3 için bulunan agrega hacmi 747.45 dm^3 olarak hesaplandı. Özgül ağırlık formülü kullanılarak;

(0-5) kırma bazalt kum % 65

$$2.71 = \frac{m}{747.45x(\frac{65}{100})}$$

$$M_{(0-5)} = 1316.5 \text{ kg}$$

(5-12) kırma bazalt % 35

$$2.79 = \frac{m}{747.45x(\frac{35}{100})}$$

$$M_{(5-12)} = 730 \text{ kg}$$

Tablo 6.2 $d_{(\max)}=12$ mm 300 dozaj için 60 dm^3 'lük beton karışım dizaynı

Malzeme Türü	1000 dm^3	60 dm^3	Su emme	Düzeltilmiş değerler
Su	135	8.1		11.1
Çimento	300	18		
$d_{\max} (0-5)$ mm kırma bazalt kumu % 65	1316.5	79	2.46	77
$D_{\max} (5-12)$ mm kırma bazalt % 35	730	44	1.75	43

$d_{\max}=12$ mm 350 dozaj çimento için dökülen seride 1000 dm^3 için bulunan agrega hacmi 708 dm^3 olarak hesaplandı. Özgül ağırlık formülü kullanılarak;

(0-5) kırma bazalt kum % 65

$$2.71 = \frac{m}{708x(\frac{65}{100})}$$

$$M_{(0-5)} = 1247 \text{ kg}$$

(5-12) kırma bazalt % 35

$$2.79 = \frac{m}{708x(\frac{35}{100})}$$

$$M_{(5-12)} = 691 \text{ kg}$$

Tablo 6.3 $d_{(\max)}=12$ mm 350 dozaj için 60 dm^3 'lük beton karışım dizaynı

Malzeme Türü	1000 dm^3	60 dm^3	Su emme	Düzeltilmiş değerler
Su	157	8.5		11.5
Çimento	350	21		
$d_{\max} (0-5)$ mm kırma bazalt kumu % 65	1247	75	2.46	73
$D_{\max} (5-12)$ mm kırma bazalt % 35	691	41.5	1.75	41

$d_{\max}=19$ mm 300 dozaj çimento için dökülen seride 1000 dm^3 için bulunan agrega hacmi 747.45 dm^3 olarak hesaplandı. Özgül ağırlık formülü kullanılarak

(0-5) kırma bazalt kum % 50

$$2.71 = \frac{m}{747.45x(\frac{50}{100})}$$

$$M_{(0-5)} = 1013 \text{ kg}$$

(5-12) kırma bazalt % 25

$$2.79 = \frac{m}{747.45x(\frac{25}{100})}$$

$$M_{(5-12)} = 521.5 \text{ kg}$$

(12-19) kırma bazalt % 25

$$2.81 = \frac{m}{747.45x(\frac{25}{100})}$$

$$M_{(12-19)} = 525 \text{ kg}$$

Tablo 6.4 $d_{\max}=19$ mm 300 dozaj için 60 dm^3 'lük beton karışım dizaynı

Malzeme Türü	1000 dm^3	60 dm^3	Su emme	Düzeltilmiş değerler
Su	135	8.1		10.5
Çimento	300	18		
$d_{\max} (0-5)$ mm kırma bazalt kumu % 50	1013	61	2.46	59.5
$d_{\max} (5-12)$ mm kırma bazalt % 25	521.5	31	1.75	30.5
$d_{\max} (12-19)$ mm kırma bazalt % 25	525	31.5	1.51	31

$d_{\max}=19$ mm 350 dozaj çimento için dökülen seride 1000 dm^3 için bulunan agrega hacmi 708 dm^3 olarak hesaplandı. Özgül ağırlık formülü kullanılarak

(0-5) kırma bazalt kum % 50

$$2.71 = \frac{m}{708x(\frac{50}{100})}$$

$$M_{(0-5)} = 959 \text{ kg}$$

(5-12) kırma bazalt % 25

$$2.79 = \frac{m}{708x(\frac{25}{100})}$$

$$M_{(5-12)} = 494 \text{ kg}$$

(12-19) kırma bazalt % 25

$$2.81 = \frac{m}{708x(\frac{25}{100})}$$

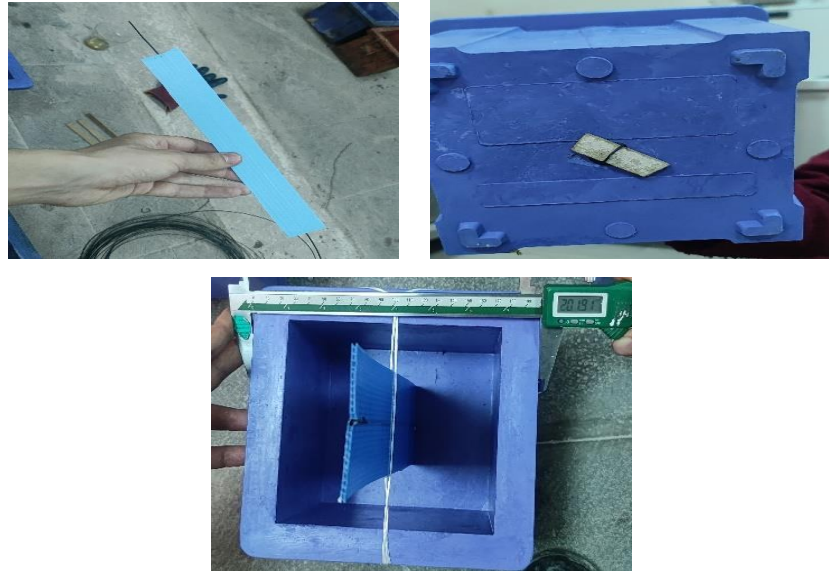
$$M_{(12-19)} = 497.5 \text{ kg}$$

Tablo 6.5 $d_{\max}=19$ mm 350 dozaj için 60 dm³'lük beton karışım dizaynı

Malzeme Türü	1000 dm ³	60 dm ³	Su emme	Düzeltilmiş değerler
Su	157.5	8.1		10.6
Çimento	350	18		
$d_{\max}$ (0-5) mm kırma bazalt kumu % 50	959	57.5	2.46	56
$d_{\max}$ (5-12) mm kırma bazalt % 25	494	30	1.75	29.5
$d_{\max}$ (12-19) mm kırma bazalt % 25	497.5	30	1.51	29.5

6.3 Deneyde kullanılan kalıplar ve malzemeler

Çentiksiz basınç deneyleri ve çentikli yarmada-çekme deneyi için standart plastik malzemeden üretilmiş 150 mm'lik küp kalıplar kullanıldı. Çentikler sert dosya klasörlerinden hazırlandı. 3 farklı relatif çentik ($\alpha = a_0/d = 0.2, 0.35, 0.5$) belirlendi. Hazırlan çentikler inşaat teliyle küp kalıpların merkezinde yerleştirildi. Çentikler ipler yardımıyla tamamen küp kalıplarının merkezine sabitlendi. Küp kalıpları ve hazırlanan çentiklerin yüzeyine, betonla herhangi bir reaksiyon göstermeyen ve yerleştirilen beton sertleştikten sonra küpten ayrılmasına yardımcı olacak yağ sürüldü.

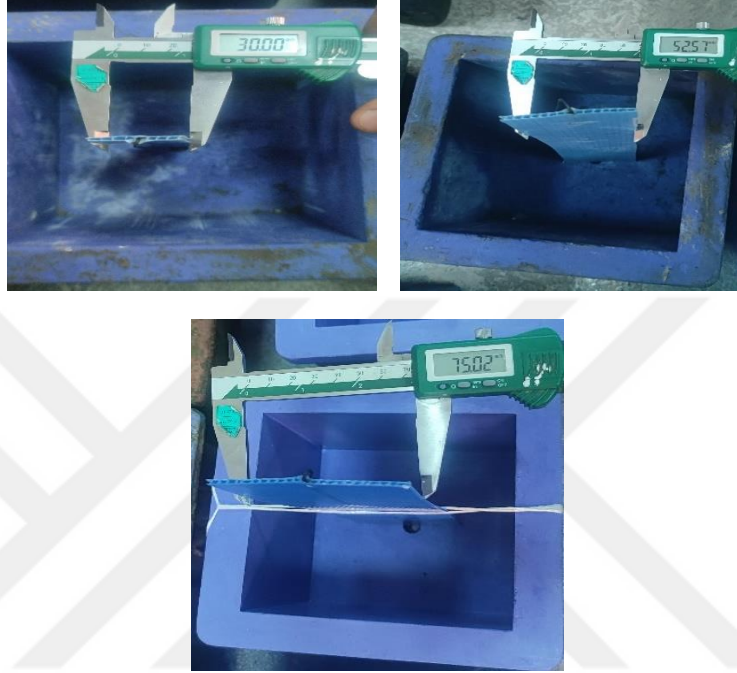


Şekil 6.8 Küp merkezine sabitlenen çentik

Numune ölçüleri, çentik boyutları mm cinsinden değerleri Tablo 6.6'da gösterildi. Küp içine sabitlenen çentik boyutları kumpasla ölçüm görüntüleri de Şekil 6.9'da verildi.

Tablo 6.6 Çentikli küp numunelerin özellikleri

Numune Ölçüsü (mm)	Çentik Boyutları		
	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.35$	$\alpha=0.5$
150×150×150	30 mm	52.5 mm	75 mm



Şekil 6.9 $\alpha=0.2, 0.35, 0.5$ relatif çentik boyutlarının kumpasla ölçülmesi

Beton karışımında kullanılan çimento malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.7’ da verildi.

Tablo 6.7 Deneylerde tercih edilen Çimentonun Özellikleri

Bileşenler	Kütlece (%)
SiO ₂ (%)	19.88
SO ₃ (%)	3.12
Al ₂ O ₃ (%)	5.43
Fe ₂ O ₃ (%)	4.17
CaO (%)	61.42
MgO (%)	1.47
K ₂ O (%)	0.88
Na ₂ O (%)	0.11
Kızdırma Kaybı (%)	3.51
Çözünmeyen Kalıntı (%)	2.77

Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	3.00
Özgöl Yüzey (cm ² /g)	39.66
Priz Başı (dk)	139
Priz sonu (dk)	209
Hacim Sabitliği (mm)	1
Basınç Dayanımı (N/mm ²)	
2 günlük	29.4
7 günlük	40.5
28 günlük	49.8

6.4 Basınç Küp Numune Deneyleri

Basınç deneyleri için sırasıyla 300 dozaj ve 350 dozaj $d_{max}=12$ mm ve $d_{max}=19$ mm olmak üzere dört seri döküm gerçekleştirildi. Önceden hesaplanan beton karışım oranlarıyla, Pan tipi beton karışım mikseri içinde beton hamuru hazırlanıp önceden yağlanan küp numuneler içine yerleştirildi. Yerleştirilen yaş beton numunelerinin içindeki hava kabarcıkları vibratör yardımıyla çıkarılıp beton hamurunun küp kalıbın içine tamamen yerleşmesi sağlandı. Döküm gerçekleştikten 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan beton numuneler kirece doymun su havuzuna alınarak 28 gün bekletildi. Su küründen çıkarılan beton numunelere sabit yükleme altında basınç deneyleri gerçekleştirildi.



Şekil 6.10 Deneylerde kullanılan Pan tipi beton karışım mikseri



Şekil 6.11 Beton hamurunun kalıplara alındıktan sonraki görüntüsü

Kırım için hazır hale gelen numuneler sudan çıkartılıp yüzeyleri bir havlu yardımıyla kurulandıktan sonra basınç cihazında kırılmaları gerçekleştirildi.



Şekil 6.12 Deney cihazına alınmış numunelerin görüntüsü

6.5 Çentikli Numune Deneyleri

Çentikli numune deneyleri için toplamda dört seri döküm yapıldı. Bunlar sırasıyla; 300 dozaj $d_{max}=12$ mm, 300 dozaj $d_{max}=19$ mm, 350 dozaj $d_{max}=12$ mm, 350 dozaj $d_{max}=19$ mm'dir. Önceden hazırlanan beton karışım hesaplarıyla beton dökümü deney mikserinde gerçekleştirildi. Üretilen beton karışımı, merkeze sabitlenen çentikli küp numunelere yerleştirildi. 24 saat sonunda küp kalıplar içinde sertleşen beton küp kalıplardan çıkarıldı. Çıkarılan çentikli beton numuneler kirece doymun su havuzunda 28 gün su küründe bekletildi. 28 gün sonunda çıkarılan küp numunelerin yüzeyleri kurulandıktan sonra; duralit çubuklar, beton numunelerin cihaza denk gelecek yüzeylerinin orta noktalarına sabitlendi. Cihazın uyguladığı yükü beton numunelere bir doğrultuda şerit halinde iletmesini sağlayan duralit çubuklar numunelerin kenarlarından 1 cm geçecek boyutlarda hazırlandı. Karşılıklı yüzeylerin merkezine yerleştirilen duralit çubuklar beton numunelerin tam ortadan ikiye ayrılacak şekilde kırılmasını sağlayarak cihazın uyguladığı yüklerden kaynaklı oluşabilecek ezilmelerinde önüne geçmiştir. Yarmada-çekme deneyleri için hazır hale gelen beton numuneler çelik başlıklara yerleştirilerek kırılmaları gerçekleştirildi. Ortadan ikiye kırılan numunelerin kırılma yük değerleri kaydedildi. Her bir beton

numunesinin kırılma süresi ortalama 3 ile 3.5 dakika arasında değişmiştir. Kırılan beton numuneleri detaylı bir şekilde incelendiği zaman agregalarda çok nadir kırılmalar meydana gelmiştir. Kırılmaların agregada oluşması agreganın mukavemetinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Kırılma çatlaklarının agreganın yanından ilerlemesi durumu ise agreganın mukavemetinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Kırılmalar genel olarak agreganın etrafında ilerlemiştir.



Şekil 6.13 Çentikli numunelerin kalıba alınmış görüntüleri



Şekil 6.14 Yarmada-çekme deneyine tabii tutulan numune



Şekil 6.15 300 dozaj ortadan ikiye ayrılmış numunelerin görüntüsü



Şekil 6.16 300 dozaj kırılan numunelerin görüntüsü



Şekil 6.17 300 dozaj numunenin kırıldıktan sonra yakından birleştirilmiş hali



Şekil 6.18 300 dozaj numunenin yakından kırılmış hali



Şekil 6.19 350 dozaj 12mm ortadan ikiye ayrılmış numunelerin görüntüsü



Şekil 6.20 350 dozaj 19 mm ortadan ikiye ayrılmış numunelerin görüntüsü



Şekil 6.21 350 dozaj numunenin kırıldıktan sonra yakından birleştirilmiş hali



Şekil 6.22 350 dozaj numunelerin yakından kırılmış halleri

7. BULGULAR

Son zamanlarda araştırmacıların gerçekleştirmiş olduğu çalışmalar göre silindir ve küp numuneleriyle yapılan deneylerin hacimsel ve kütleli olarak kırış numunelerden daha kolay uygulanabilir olduğu görülmüştür. Küp ve silindir numunelerle yapılan çalışmalar bu sebepten dolayı yaygınlaşmıştır. Betonda gerçekleşen kırılmaları incelerken betona etki eden tüm parametrelere bakılmalıdır. Betonun şartları, kullanılan çimentonun cinsi ve betonun bulunduğu ortam sıcaklık şartları gibi dikkate alınmayan parametrelerin de kırılma özellikleri üzerinde etkisi vardır. Gerçekleştirilen literatür çalışmalarında bazalt malzemesiyle üretilen bir betonun yarmada-çekme deneylerinin deneysel ve teorik çalışmalarının yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada bazalt agregasıyla üretilen betonun küp numuneleri ile yarma deneyleri gerçekleştirilerek kırılma parametreleri incelenmiştir.

7.1 Basınç Küp Numune Deneyleri Sonuçları

Basınç deney sonuçlarımız 150 mm'lik küp numuneler kullanılarak hesaplanmıştır. Ancak kırılma mekaniği analizlerinde silindir basınç dayanım değerleri kullanılır. Bu yüzden hesaplanan 150 mm'lik basınç dayanım sonuçlarını silindir basınç (f_c^l) dayanımına çevirmek için L'Hermite [55] tarafından geliştirilen Denklem 7.1' de gösterilen formül kullanılmıştır.

$$f_c^l = \left[0.76 + 0.2 \log \left(\frac{f_{c,150}}{19.58} \right) \right] f_{c,150} \quad (7.1)$$

Tablo 7.1 $d_{max}=12$ mm agrega 300 dozaj basınç deney sonuçları

Numune Numarası	f_{c150} (MPa)	f_c^l
1	47.85	40.07
2	49.50	41.60
3	47.62	39.86
Σ_{ort}	48.32	40.51

Tablo 7.2 $d_{max}=19$ mm agrega 300 dozaj basınç deney sonuçları

Numune Numarası	f_{c150} (MPa)	f_c^l
1	52.74	44.62
2	53.27	45.11
3	52.92	44.78
Σ_{ort}	52.97	44.83

Tablo 7.3 d_{max}=12 mm agrega 350 dozaj basınç deney sonuçları

Numune Numarası	$f_{c150} (MPa)$	f_c^t
1	54.78	46.52
2	52.94	44.80
3	53.85	45.65
Σ_{ort}	53.85	45.65

Tablo 7.4 d_{max}=19 mm agrega 350 dozaj basınç deney sonuçları

Numune Numarası	$f_{c150} (MPa)$	f_c^t
1	56.40	47.89
2	57.12	48.72
3	56.7	48.39
Σ_{ort}	56.71	48.33

7.2 Çentikli Küp Numune Deneyleri Sonuçları

Üretilen küp numunelerle yarmada-çekme deneyleri gerçekleştirildi. 4 farklı serinin dökümü 150 mm'lik küp numuneler yardımıyla gerçekleştirildi. Relatif çentik boyları ($\alpha=a_0/d$) 0.2, 0.35 ve 0.5 olarak seçildi. Sürekli granülometri eğrileriyle üretilmek üzere 4 seri hazırlandı. Gerçekleştirilen çekme deneylerinin sonuçları kaydedildi. Bu değerler Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği ilkeleriyle incelendi. Belirlenen agrega gradasyon ve maksimum agrega çapına göre kırılma değerleri incelendi. Gerilme şiddet çarpanı (K_{Ic}^s, K_{Ic}^e), kırılma süreci bölgesi uzunluğu (C_f), gevreklik indeksi (Q) ve kritik çatlak ağzı açılım deplasman değerleri İki Parametrelili ve Efektif Çatlak Modelleri yardımıyla hesaplandı. Hesaplamalar MATLAB ve Microsoft Office Excel yardımıyla gerçekleştirildi.

Üretilen dört seri beton dizaynının, küp numunesinin basınç deneylerinin sonuçları ve çentikli küp numunelerin yarmada-çekme numunelerine ait kırılma yük değerleri ve kırım sonrası çentik boyları verilmiştir. Verilen bu kırılma yüklerine karşılık gelen yarma-çekme dayanım sonuçları (f_{sp}) Denklem 7.2'de verilen formülle hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 7.5-7.8'de verilmiştir.

$$f_{sp} = \frac{2P_c \times 1000}{\pi h^2} \quad (7.2)$$

Tablo 7.5 $d_{\max}=12$ mm agrega 300 dozaj deney verileri

Numune numarası	$\alpha=a_0/d$	Ortalama Çentik Boyları (α) (mm)	P_c (kN)	f_{sp} (Mpa)
1	0.2	29.76	106.1	3.00
2	0.2	30.15	100.7	2.85
3	0.2	29.88	106.4	3.01
4	0.2	30.22	101.1	2.86
5	0.35	52.91	92.95	2.63
6	0.35	52.88	94.00	2.66
7	0.35	52.13	93.40	2.64
8	0.35	52.83	92.24	2.61
9	0.5	75.13	84.20	2.38
10	0.5	75.21	77.41	2.19
11	0.5	75.24	72.20	2.04
12	0.5	75.28	76.40	2.16

Tablo 7.6 $d_{\max}=19$ mm agrega 300 dozaj deney verileri

Numune numarası	$\alpha=a_0/d$	Ortalama Çentik Boyları (α) (mm)	P_c (kN)	f_{sp} (Mpa)
1	0.2	29.91	107.30	3.03
2	0.2	30.21	109.10	3.08
3	0.2	29.77	107.80	3.05
4	0.2	29.81	114.51	3.24
5	0.35	52.58	94.60	2.68
6	0.35	52.34	101.80	2.88
7	0.35	52.31	101.50	2.87
8	0.35	52.52	99.31	2.81
9	0.5	75.12	90.50	2.56
10	0.5	75.08	89.00	2.51
11	0.5	74.92	81.30	2.30
12	0.5	75.14	83.80	2.37

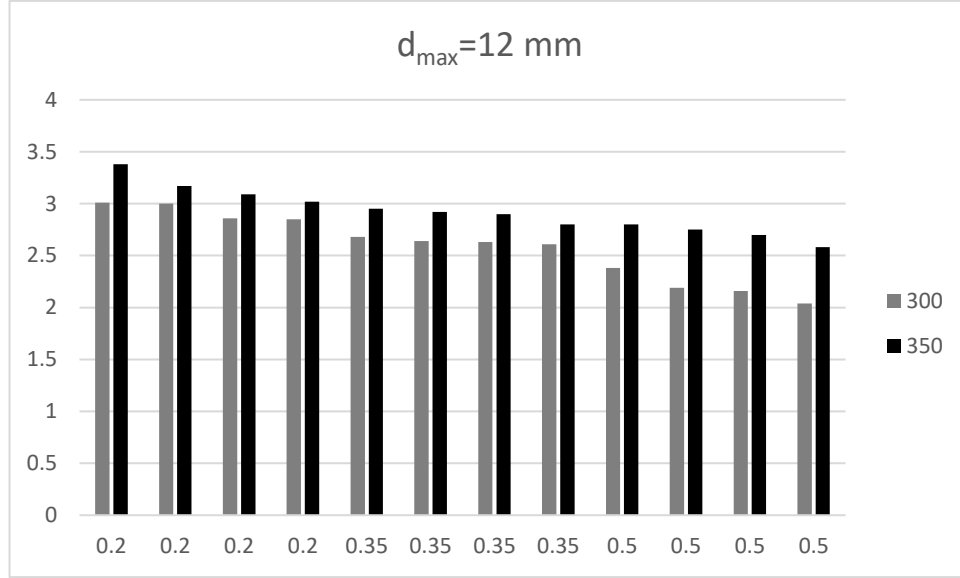
Tablo 7.7 $d_{\max}=12$ mm agregası 350 dozaj deney verileri

Numune numarası	$\alpha=a_0/d$	Ortalama Çentik Boyları (α) (mm)	P_c (kN)	f_{sp} (Mpa)
1	0.2	29.93	119.60	3.38
2	0.2	30.04	109.50	3.09
3	0.2	29.89	106.80	3.02
4	0.2	29.95	112.05	3.17
5	0.35	52.44	104.28	2.95
6	0.35	52.56	103.22	2.92
7	0.35	52.58	102.51	2.90
8	0.35	52.51	98.99	2.80
9	0.5	75.11	99.30	2.80
10	0.5	75.14	91.30	2.58
11	0.5	74.98	95.70	2.70
12	0.5	75.17	97.21	2.75

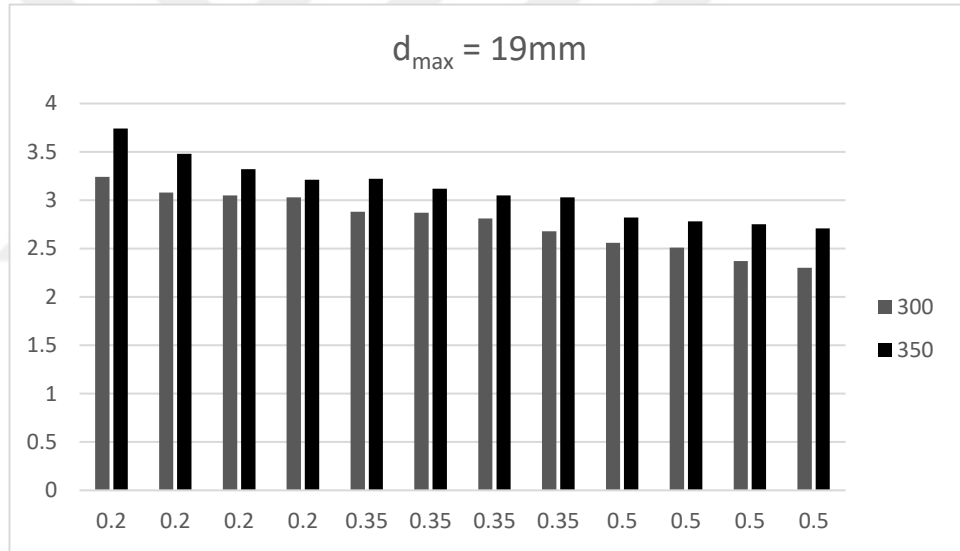
Tablo 7.8 $d_{\max}=19$ mm agregası 350 dozaj deney verileri

Numune numarası	$\alpha=a_0/d$	Ortalama Çentik Boyları (α) (mm)	P_c (kN)	f_{sp} (Mpa)
1	0.2	30.05	132.18	3.74
2	0.2	29.94	117.5	3.32
3	0.2	29.91	113.6	3.21
4	0.2	30.09	123.01	3.48
5	0.35	52.55	114.00	3.22
6	0.35	52.71	107.40	3.03
7	0.35	52.44	107.90	3.05
8	0.35	52.41	110.28	3.12
9	0.5	75.05	99.70	2.82
10	0.5	75.11	98.30	2.78
11	0.5	74.98	95.90	2.71
12	0.5	75.08	97.19	2.75

Maksimum agregası çapı, relatif çentik boyutu ve çimento dozajı gibi faktörlerin çekme mukavemeti üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek için Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de nominal çekme mukavemet sonuçları sütun grafikleriyle verilmiştir.



Şekil 7.1 $d_{max}=12$ mm çekme mukavemetlerinin sütun grafiği



Şekil 7.2 $d_{max}=19$ mm çekme mukavemetlerinin sütun grafiği

7.2.1 Çentikli küp numunelerin İPM modeline göre analizleri

İki Parametrelili Kırılma Modeli deneyleri başlangıçta yalnızca kiriş numuneleri üzerinde uygulanmaktaydı. Ancak, son dönemlerde, bu modelin başarılı bir şekilde kübik veya silindirik yarma-çekme numuneleri, kompakt-çekme numuneleri ve özellikle betonun kırılma mekaniği için daha uygun olan kama-yarma numunelerine de uygulanabileceğini gösteren bir dizi araştırma bulunmaktadır. Bu metot, kiriş numunesinin kritik çatlak boyunun hesaplanması için kapalı devre ekipmanını içeren Efektif Çatlak Modeline benzer bir yaklaşımı temel alır. Hesaplamalar, malzemenin kırılma tokluğu ile kritik çatlak ucu açılımı gibi iki önemli parametreye

dayanmaktadır. Ayrıca, bu yöntemin daha pratik bir yaklaşımı olan Pik-yük Metodu, yukarıda bahsedilen kırılma parametrelerini tamamen istatistiksel çıkarımlara dayanarak belirleme imkânı sunmaktadır.

Kırılma yükleri kaydedildikten sonra numune boyutları yardımıyla K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ değerleri aşağıdaki Denklem 7.3 ve Denklem 7.4 ile hesaplanır:

$$K_{Ic}^s = \sigma_{Nc} \sqrt{\pi a} Y(\beta, \alpha) \quad (7.3)$$

$$CMOD_c = \frac{\pi \sigma_{Nc}^2 a}{E} V_1(\beta, \alpha) \quad (7.4)$$

Burada Y ve V_1 numuneye ait LEKM fonksiyonları aşağıda gösterilen Denklem 7.5 ve Denklem 7.6'daki polinomlar yardımıyla hesaplanır.

$$Y(\beta, \alpha) = A_0(\beta) + A_1(\beta)\alpha + A_2(\beta)\alpha^2 + A_3(\beta)\alpha^3 \quad (7.5)$$

$$V_1(\beta, \alpha) = B_0(\beta) + B_1(\beta)\alpha + B_2(\beta)\alpha^2 + B_3(\beta)\alpha^3 \quad (7.6)$$

Hesaplanan kritik gerilme şiddet çarpanı (K_{Ic}^s) ve kritik çatlak ucu açılımı ($CTOD_c$) değerleri kullanılarak bir grafik çizilir. Bu grafik yardımıyla standart sapma (s^2) belirlenir. Standart sapma eğrisinin minimum olduğu nokta K_{Ic}^s değerini verir. Bulunan bu değer K_{Ic}^s ile $CTOD_c$ eğrisinde yerine konulduğunda $CTOD_c$ belirlenmiş olur.

$$s(K_{Ic}^s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(CTOD_c^{ort} - CTOD_c^i)]^2}{n-1}} \quad (7.7)$$

Burada n numune sayısını belirtirken i , i . grup numuneyi belirtmektedir. Son olarak, standart sapmanın minimum olduğu s_{min} sonucuna karşılık gelen K_{Ic}^s ile $CTOD_c$ sonuçları betonun İPM'ye göre kırılma parametresi olduğu tespit edilir.

Malzemenin elastisite modülü, birimi MPa olarak ACI-318 [54] standartlarına göre Denklem 7.8'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

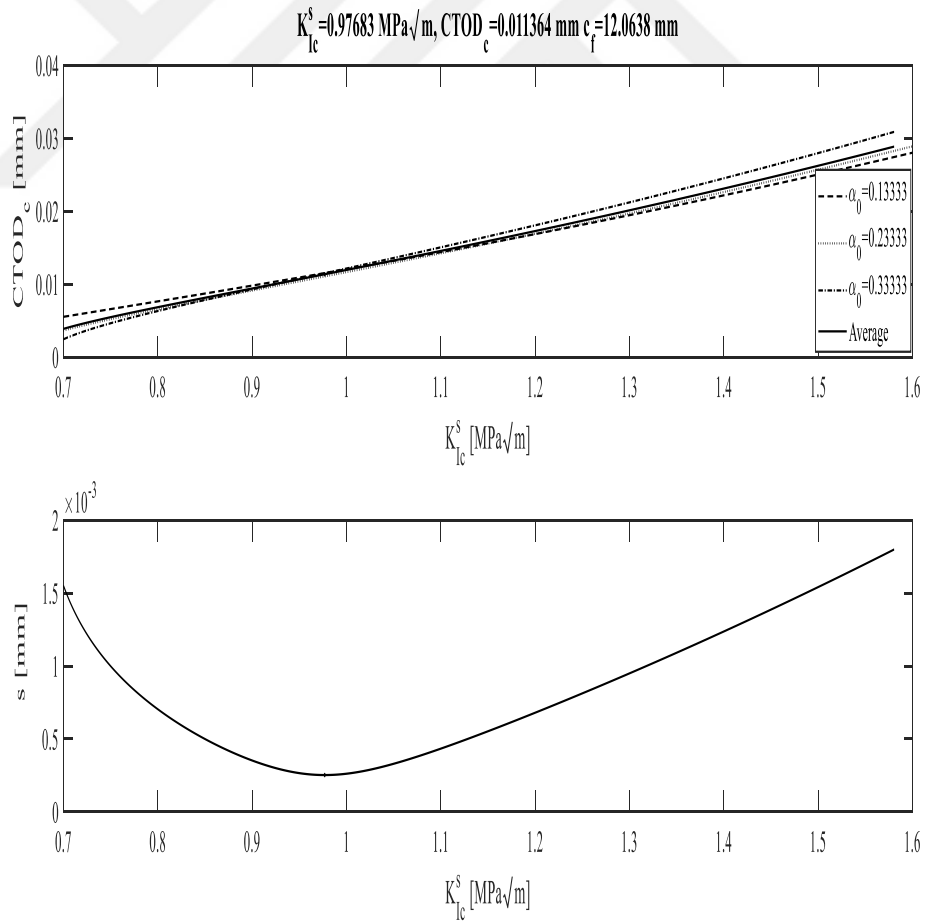
$$E_c = 4730 \sqrt{f_c^t} \quad (7.8)$$

Tablo 7.9'da üretilen numunelerin, Pik-yük Metoduna göre deney sonuçları

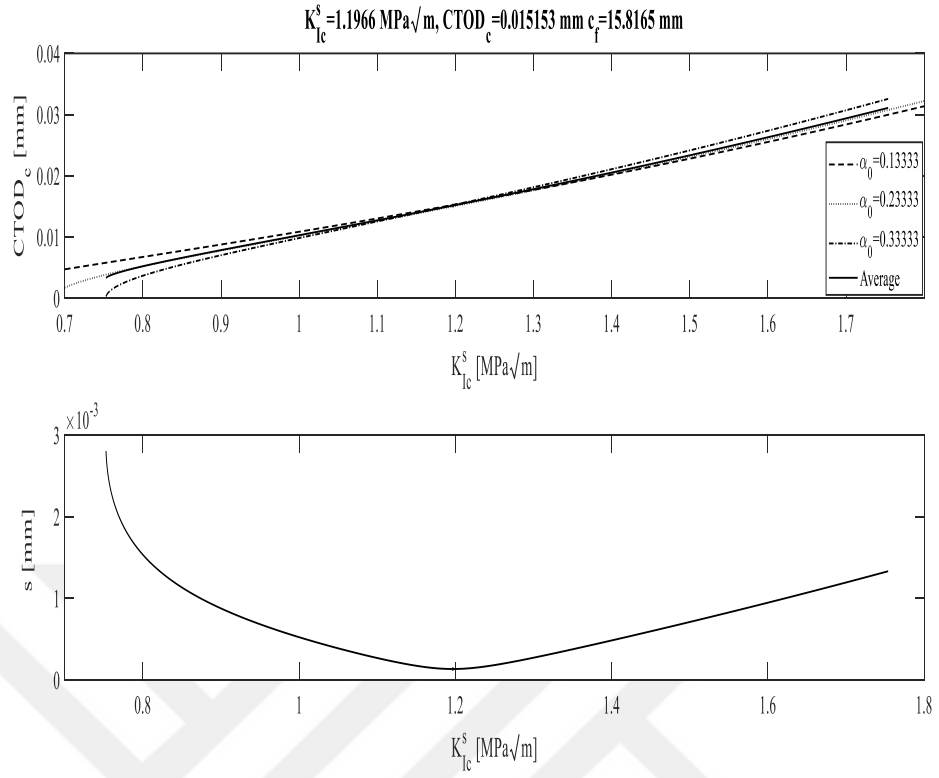
verilmiştir. Karışımlar S harfi ile simgelenmiştir. S harfinden sonra gelen ilk sayı çimento dozajını, kısa çizgiden sonra gelen sayı maksimum agregayı simgelenmektedir. Tablonun ikinci sütununda Denklem 7.8'den hesaplanan elastisite modülü verileri verilmiştir. Üçüncü sütunda çentik boyutları verilmiştir. Dördüncü sütunda ortalama çekme değerleri verilmiştir. Beşinci ve altıncı sütunlarda ise pik-yük metodu kullanılarak sonuçlanan kırılma verileri verilmiştir. Şekil 7.3-7.6'da üretilen numunelere ait Pik-yük Metoduna dair uygulamalar verilmiştir.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda analiz edilen K_{Ic}^S ve $CTOD_c$ kırılma değerleri ile E_c malzeme değerleri yardımıyla Denklem 7.9 'de verile ifade ile Q (gevreklik indeksi) değerleri bulundu.

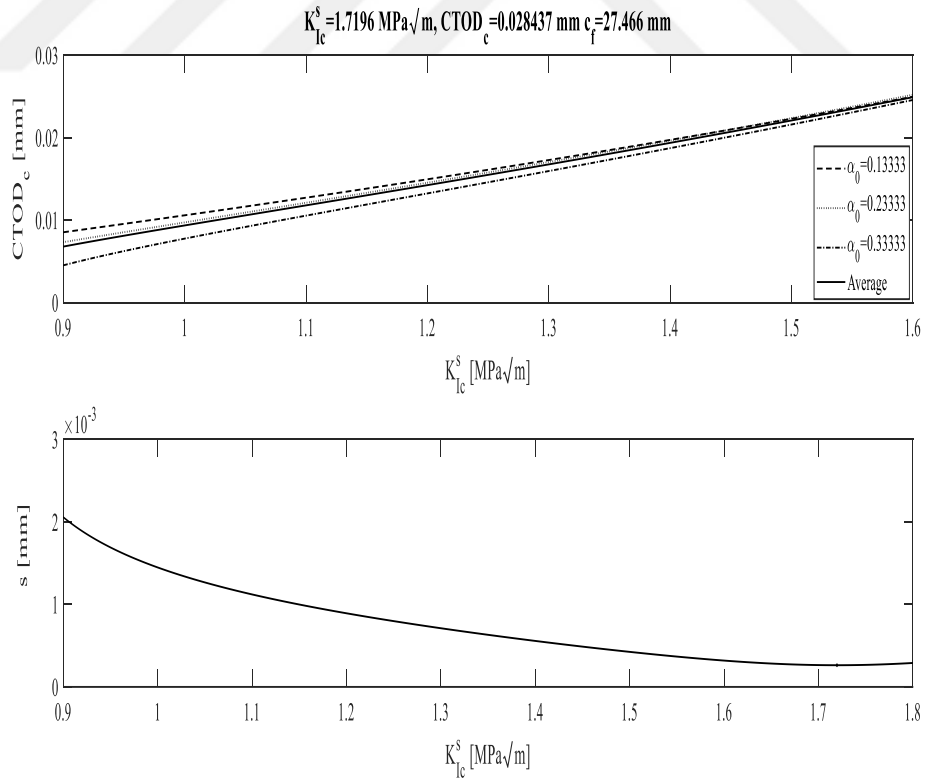
$$Q = \left[\frac{E_c \times CTOD_c}{K_{Ic}^S} \right]^2 \quad (7.9)$$



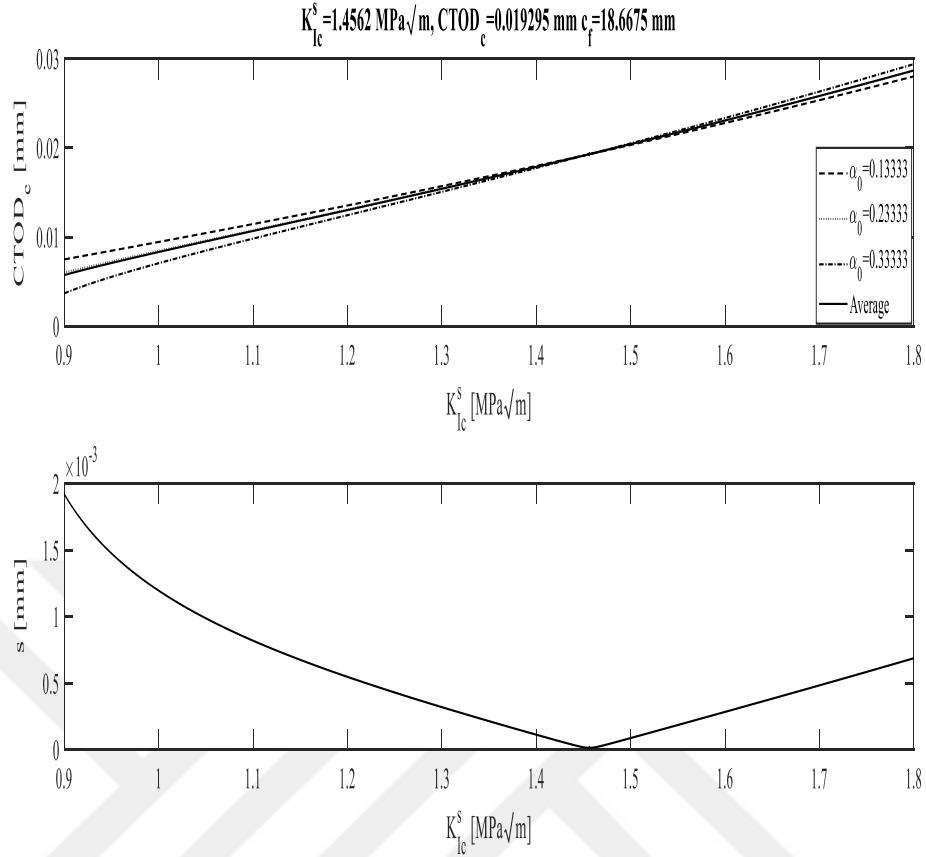
Şekil 7.3 12 mm agregâ çaplı 300 dozaj numune pik-yük analiz sonuçları



Şekil 7.4 19 mm agrega çaplı 300 dozaj numune pik-yük analiz sonuçları



Şekil 7.5 12 mm agrega çaplı 350 dozaj numune pik-yük analiz sonuçları



Şekil 7.6 19 mm agrega çaplı 350 dozaj numune pik-yük analiz sonuçları

Tablo 7.9 Pik yük metoduna göre analiz sonuçları

Seri İsmi	E_c (GPa)	K_{Ic}^S	CTOD_c	Q (mm)
S300-12	30.10	0.976	0.011	122.88
S300-19	31.67	1.196	0.015	161.10
S350-12	31.96	1.719	0.028	279.76
S350-19	32.88	1.456	0.019	190.14

7.2.2 Çentikli küp numunelerin EÇM göre analizleri

Nallathambi ve Karihaloo [15] Efektif Çatlak Modeli ile ilgili ilk uygulamaları kiriş numuneler ile gerçekleştirmişlerdir. İnce ve Bildik [53] yapmış oldukları çalışmalarda bu modelin, Kompakt-çekme ve deneysel çalışmalarda daha pratik olan kama-yarma numunelerine Abrams Kanunu yardımıyla uygulanabileceğini göstermişlerdir. Bu model orijinal halinde kapalı devre ekipmanları yardımıyla gerçekleştirilen deneylerde, kiriş numunenin efektif çatlak boyu hesapları ile

malzemenin kırılma tokluğunun hesabına dayandırılmaktadır. Ancak bu modelin daha uygulanabilir bir yaklaşımı, aşağıda açıklanan Denklem 7.10'da relatif efektif çatlak boyu hesaplanarak elde edilebilir.

$$\frac{a_e}{d} = 0.198 \left(\frac{\sigma_{Nc}}{E_c} \right)^{-0.131} \left(\frac{a_0}{d} \right)^{0.394} \left(1 + \frac{d_{max}}{d} \right)^{0.6} \quad (7.10)$$

Son olarak Efektif Çatlak Modeli yaklaşımına göre kırılma tokluğu (K_{Ic}^e) parametresi Denklem 7.11'e göre hesaplanabilir.

$$K_{Ic}^e = \sigma_{Nc} \sqrt{\pi a_e} Y(\beta, \alpha) \quad (a_e = \frac{a_e}{d}) \quad (7.11)$$

Denklem 7.11'de geçen $Y(\beta, \alpha)$ yüklemenin tipine ve geometriye bağlı şekil faktörüdür. Küp ve silindir numuneler için şekil faktörü Denklem 7.12'deki gibi ifade edilir. [56]

$$Y(\beta, \alpha) = A_0(\beta) + A_1(\beta)\alpha + A_2(\beta)\alpha^2 + A_3(\beta)\alpha^3 \quad (7.12)$$

Denklem 7.12 'de verilen şekil faktörü denklemi küp numuneler için A_i katsayıları, çeşitli β değerleri için Tablo 7.10'da sunulmuştur. Tabloda verilmeyen ara değerler için interpolasyon yapılabilir. Bu katsayılar, J-integrali metodu yardımıyla sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. [56]

Tablo 7.10 Küp numuneler için A_i sabitleri [56]

Sabitler	$\beta=t/d$					
	0	0.067	0.1	0.133	0.167	0.2
A_0	0.986	0.981	0.974	0.964	0.951	0.935
A_1	0.071	0.039	0.007	-0.037	-0.079	-0.118
A_2	0.979	1.097	1.218	1.371	1.514	1.638
A_3	0.252	0.041	-0.188	-0.479	-0.778	-1.068

Bu tez çalışmalarının deneyleri yapılırken β (t/d) 0.1 olarak seçilmiş A_i değerleri Tablo 7.10'dan alınmıştır. Küp numunelerine ait Efektif Çatlak Modeli analiz sonuçları Tablo 7.11'da verildi.

Tablo 7.11 Efektif çatlak modeli analiz sonuçları

Seri Adı	α_0 (mm)	α	α_c/d	Y	K_{Ic}^e (MPa $\sqrt{m}$)
S300-12	30	0.2	0.368	1.132	0.780
	52.5	0.35	0.466	1.223	0.852
	75	0.5	0.549	1.314	0.828
S350-12	30	0.2	0.367	1.131	0.841
	52.5	0.35	0.463	1.219	0.930
	75	0.5	0.537	1.300	1.001
S300-19	30	0.2	0.378	1.140	0.843
	52.5	0.35	0.478	1.235	0.929
	75	0.5	0.560	1.317	0.938
S350-19	30	0.2	0.374	1.137	0.927
	52.5	0.35	0.473	1.230	1.01
	75	0.5	0.553	1.318	1.05

8. SONUÇLAR

Kırılma mekaniği beton içindeki çatlakların birleşerek betonda yumuşamaya sebep olmasını önleyebilecek birden fazla lineer olmayan yaklaşımlar sunmaktadır. Günümüzde yapı tasarımlarında göz ardı edilen kırılma mekaniği yaklaşımları göz ardı edilmeyerek ülkemiz gibi deprem kuşağı bölgesindeki yapıların güvenliği arttırılabilir. Kırılma mekaniği deneyleri genelde kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalarda deneysel çalışmalarının daha rahat olduğu silindir ve küp numunelerle çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Literatürde, daha önce bazalt agregasıyla kırılma mekaniği yaklaşımlarının incelenmediği gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında bazalt agregasıyla üretilen $d_{max}=12$ mm 300, 350 dozaj; $d_{max}=19$ mm 300, 350 dozaj çentikli ve çentiksiz küp numuneler analiz edilmiştir. Çentiksiz numunelerle basınç dayanımı incelenmiştir. Çentikli numunelerle gerçekleştirilen yarmada-çekme deney sonuçlarıyla İki Parametrelili Model ve Efektif Çatlak Modeline göre analizler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Çentiksiz olarak her seriden 3 adet olmak üzere 12 adet 150 mm'lik standart küp numunelerine basınç deneyleri gerçekleştirildi. Kırılma mekaniği analizleri silindir basınç hesaplamalarına göre analiz edildiğinden basınç deneylerinden elde edilen küp mukavemet sonuçları silindir basınç dayanım değerlerine çevrilmiştir.

•

Yapılan hesaplamalar sonucunda agrega çapı ve çimento dozajı arttıkça silindir basınç mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

- Çentikli olarak her seride, üç farklı relatif çentik boyutundan dört numune üretilecek şekilde 12 adet numuneden toplam 48 adet numune üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde yarma-çekme deneyleri gerçekleştirildi.

Gerçekleştirilen yarma-çekme deneylerine göre agrega çapı ve çimento dozajı arttıkça nominal gerilme değerleri artarken, çentik boyutu arttıkça nominal gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

- Kırılan numuneler yakından incelendiğinde kırılmalar genellikle agrega etrafından dolanarak gerçekleşmiştir. Bu kırılma şekline göre agreganın

mukavemetinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

- Üretilen küp numunelerin Lineer Olmayan Elastik Kırılma Mekanikği metotlarına göre analiz edildiğinde İki Parametrelili Modele göre gerçekleştirilen analiz sonucunda hesaplanan kırılma tokluğu sonuçları (K_{Ic}^s), Efektif Çatlak Modeline göre analiz edilen kırılma tokluğu sonuçlarından (K_{Ic}^e) daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.
- Bazalt agregasının kirlilik oranının sınırda olmasından kaynaklı iri bazalt agregaları yıkanıp ince agrega olarak daha temiz bir malzeme kullanılarak mukavemet değeri biraz daha iyileştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1]T. Y. Erdoğan, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., Ankara, 2003
- [2]M. Arslan, "Beton," Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 2001.
- [3]U. Ersoy, "Betonarme Yapıların Deprem Davranışı İle İlgili Bir İrdeleme," presented at Beton 2004 Kongresi, İstanbul Bildiriler Kitabı, 2004, pp. 16–22.
- [4]S. Yılmaz Çetin, "Kesikli granülometriye sahip betonların lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2015.
- [5]P. Yayla, "Kırılma Mekaniği," Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 2007.
- [6]A. Griffith, "A crack energetical analysis," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, vol. 221, p. 163, 1920.
- [7]M. F. Kaplan, "Crack propagation and the fracture of concrete," Journal of the American Concrete Institute, vol. 58, pp. 591-610, 1961.
- [8]J. Glucklich, "Fracture of plain concrete," ASCE Journal of Engineering Mechanics, vol. 89, pp. 127-138, 1963.
- [9]R. N. Swamy, "Fracture phenomena of hardened paste, mortar and concrete," Society of Materials Science (Japan), vol. IV, pp. 132-142, 1972.
- [10]R. N. Swamy and C. K. Rao, "Fracture mechanism in concrete systems under uniaxial loading," Cement and Concrete Research, vol. 3, pp. 413-427, 1973.
- [11]A. Hillerborg, M. Modeer, and P. E. Petersson, "Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements," Cement and Concrete Research, vol. 6, pp. 773-782, 1976.
- [12]T. Tang, S. P. Shah, and C. Ouyang, "Fracture mechanics and size effect of concrete in tension," ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 118, pp. 3169-3185, 1992.
- [13]Z. P. Bazant and B. H. Oh, "Crack band theory for fracture of concrete," Materials and Structures, vol. 16, pp. 155-157, 1983.
- [14]Y. S. Jenq and S. P. Shah, "A two-parameter model for concrete," Journal of Engineering Mechanics, vol. 111, pp. 1227-1241, 1985.
- [15]P. Nallathambi and B. L. Karihaloo, "Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete," Magazine of Concrete Research, vol. 38, no. 136, pp. 67-76, 1986.
- [16]Z. P. Bazant and M. T. Kazemi, "Determination of fracture energy, process zone

- length, and brittleness number from size effect with application to rock and concrete," *International Journal of Fracture*, vol. 44, no. 2, pp. 111-131, 1990.
- [17]S. Xu and H. W. Reinhardt, "Determination of double-K criterion for crack propagation in quasibrittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation," *International Journal of Fracture*, vol. 98, no. 2, pp. 111-149, 1999.
- [18]Y. Zhao and S. Xu, "An analytical study on the energy in fracture process of concrete," PhD dissertation, Dalian University of Technology, 2002.
- [19]TS 802, 'Beton karışımı hesap esasları', Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Mar. 2016.
- [20]C. Zener and J. H. Hollomon, "Effect of strain rate upon plastic flow of steel," *Journal of Applied Physics*, vol. 15, no. 1, pp. 22-32, 1944.
- [21]G.R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate," *ASME Transactions, Journal of Applied Mechanics*, vol. 24, pp. 361-364, 1957.
- [22]Z. P. Bazant, "Size effect in blunt fracture: concrete, rock and metal," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 110, pp. 518-535, 1984.
- [23]J. K. Kim and S. H. Eo, "Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks," *Magazine of Concrete Research*, vol. 42, pp. 233-238, 1990.
- [24]Z. P. Bazant and B. H. Oh, "Crack band theory for fracture of concrete," *Materials and Structures*, vol. 16, pp. 155-157, 1983.
- [25]K. Duan and X. Hu, "Scaling of specimen boundary effect on quasi-brittle fracture," presented at SIF2004 Structural Integrity and Fracture, 2004.
- [26]R. İnce, "Basit Bir Yöntem İle Betonun Kohezif Gerilme Şiddet Çarpanının Hesabı," *Fırat University Journal of Engineering*, vol. 22, no. 2, 2010.
- [27]P. Grassl et al., "Meso-scale modelling of the size effect on the fracture process zone of concrete," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, no. 13, pp. 1818-1827, 2012.
- [28]K. E. Alyamaç, "Kendiliğinden yerleşen betonun lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [29]C. Fenerli, "Geometrik Benzer ve Benzer Olmayan Çetiki Beton Numunelerde Boyut Etkisinin İncelenmesi," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2022.

- [30]TS 706 EN 12620, 'Beton Agregaları', Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Nisan 2003.
- [31]TS EN 206, 'Beton-Özellik, performans, imalat ve uygunluk', Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Şubat 2014.
- [32]TS EN 13515, 'TS EN 206'nın uygulanmasına yönelik tamamlayıcı standart', Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2021
- [33]TS EN 12504-1, 'Beton- Yapıda beton deneyleri - Bölüm 1: Karot numuneler Karot alma, muayene ve basınç dayanımının tayini', Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Ocak 2011
- [34]TS EN 12390-3, 'Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini', Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Ocak 2010.
- [35]H. Rusch and G. Vigerust, "Discussion of Tensile Splitting Test and High Strength Concrete Test Cylinders, by Sven Thaulow," ACI Journal, Part 2, 1957.
- [36]A. A. Kassas, "Studies on the Tensile Strength of Concrete," Master's Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 1976.
- [37]F. L. L. B. Carneiro and A. Barcellos, "Concrete Tensile Strength," Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, vol. 13, pp. 97-123, 1953
- [38]TS EN 12390-6, 'Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini,' Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [39]ASTM C496, "Standard Test Method for Splitting Tensile of Cylindrical Concrete Specimens," Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, vol. 4, pp. 1-6, 2017.
- [40]S. Timoshenko and J. Goodier, Theory of Elasticity, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [41]T. Tang, "Effects of load-distributed width on split tension of unnotched and notched cylindrical specimens," Journal of Testing and Evaluation, vol. 22, no. 5, pp. 401-409, 1994.
- [42]C. Rocco, G. V. Guinea, J. Planas, and M. Elices, "Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view," Cement & Concrete Research, vol. 31, pp. 73-82, 2001.
- [43]R. İnce, "Determination of concrete fracture parameters based on peak-load

method with diagonal split-tension cubes," Engineering Fracture Mechanics, vol. 82, pp. 100-114, 2012.

[44]M. Gör, "Beton küp numunelerinin diyagonal yarmada-çekme yüklemesi altında boyut etkisinin lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2011.

[45]TS EN 12390-5, 'Beton- Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinde eğilme dayanımının tayini', Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Ocak 2010.

[46]Irwin, G. and Kies, J. (1935). Welding Journal, 33, Research Supplement (April 1954), 1985.

[47]https://en.wikipedia.org/wiki/SS_Schenectady#/media/File:TankerSchenectady.jpg.

[48]Y. Akkaya, F. Bayramov, and M. A. Taşdemir, "Betonun Kırılma Mekaniği: Tasarımda Kullanılan Mekanik Özellikler İle Kırılma Parametreleri arasındaki Bağlılıklar," Türkiye Mühendislik Haberleri, vol. 426, no. 4, pp. 70-75, 2003.

[49]R. Ince, "Determination of the Fracture Parameters of the Double-K Model Using Weight Functions of Split-Tension Specimens," Engng Fract Mech, vol. 96, pp. 416-432, 2012.

[50]K. E. Alyamaç and R. İnce, "Farklı kür metotların betonun kırılma parametreleri üzerine etkisi," Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, vol. 19, no. 3, pp. 347-355, 2007.

[51]RILEM Recommendation, "Determination of the Fracture Parameters (K_{Ic} and $CTOD_{c}$) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Tests," Materials & Structures, vol. 23, no. 138, pp. 457-460, 1990.

[52]S. Yang, T. Tang, D. G. Zollinger, and A. Gurjar, "Splitting Tension Tests to Determine Concrete Fracture Parameters by Peak-Load Method," Advanced Cement Based Materials, vol. 5, pp. 18-28, 1997.

[53]R. İnce and A. T. Bildik, "A preliminary concrete mixture design based on fracture toughness," Materials and Structures, vol. 54, no. 1, pp. 1-15, 2021.

[54]ACI-318, "Building code requirements for structural concrete and commentary," Michigan: Farmington Hills, 2002.

[55]R. L'Hermite, "Idées actuelles sur la technologie du béton," La Documentation technique du batiment et des travaux publics, 1955.

[56]R. İnce, "Determination of concrete fracture parameters based on two-parameter and size effect models using split-tension cubes," Engng Fract Mech, vol. 77, pp. 2233-2250, 2010.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

ÇELİK, Tahir Azad

Web sayfası

(Research Gate, Academia, vs.)

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	2024
Lisans	Gaziantep Üniversitesi	2020
Lise	Mardin Anadolu Öğretmen Lisesi	2015

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2020-...	NÇ Babil Yapı Denetim	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

Özel İlgiler

Tiyatro

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Tahir Azad ÇELİK		
Öğrenci No	21806009		
Ana Bilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☒	Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Dr. Öğr Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)			
Tez Başlığı	Bazalt Agregasıyla Üretilen Betonun Kırılma Parametrelerinin İncelenmesi		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	61		
Raporlama Tarihi	13.03.2024		
Benzerlik Oranı (%)	% 12		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 61 sayfalık kısmına ilişkin, 13/03/2024 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 12 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
☒Kaynaklar hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer (Açıklayınız)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Tez benzerlik oranı üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Tahir Azad ÇELİK

Tarih:13.03.2024

İmza:

Danışman Adı, Soyadı: Dr. Öğr Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN

İmza:

Tarih:13.03.2024

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr Zeynel Fuat TOPRAK

İmza:

Tarih:13.03.2024