

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KOMPAKT YARMA-ÇEKME NUMUNELERİNİN
BETONUN KIRILMA MEKANİĞİNE GÖRE UYGULAMA
POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

Buhranur SAĞLAM

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Bilim Dalı

OCAK, 2023

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

KOMPAKT YARMA-ÇEKME NUMUNELERİNİN
BETONUN KIRILMA MEKANİĞİNE GÖRE UYGULAMA
POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

Tez Yazarı
Buhranur SAĞLAM

Danışman
Prof. Dr. Ragıp İNCE

OCAK, 2023
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Kompakt Yarma - Çekme Numunelerinin Betonun Kırılma Mekanikğine Göre Uygulama Potansiyelinin Araştırılması

Yazarı: Buhranur SAĞLAM

İlk Teslim Tarihi: 16.12.2022

Savunma Tarihi: 19.01.2023

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Ragıp İNCE Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Esen EREN Turgut Özal Üniversitesi, Darende Meslek Yüksek Okulu	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Kompakt Yarma-Çekme Numunelerinin Betonun Kırılma Mekanizmasına Göre Uygulama Potansiyelinin Araştırılması” yüksek lisans tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

19.01.2023

Buhranur SAĞLAM



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamda bana her konuda yardımcı olan, değerli vaktini ve bilgilerini esirgemeyen, daima destek olan ve yol gösteren değerli Tez Danışmanım Sayın Prof. Dr. Ragıp İNCE'ye sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen sayın Öğr. Gör. Abdullah Tevfik Bildik'e ve Yrd. Teknisyen Fethi Yetik'e teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan bana güvenen ve beni cesaretlendiren canım aileme sonsuz teşekkürler..

Buhranur SAĞLAM

ELAZIĞ, 2023



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. SERTLEŞMİŞ BETONUN ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Betonun Dayanımı	3
2.1.1. Betonun Basınç Dayanımı	3
2.1.2. Betonun Çekme Dayanımı	4
2.1.3. Betonun Kayma Dayanımı	10
3. KIRILMA MEKANIĞI	11
3.1. Kırılma	11
3.1.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihsel Gelişimi.....	11
3.1.2. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği.....	13
3.2. Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği.....	16
3.2.1. İki Parametrelili Model (İPM).....	17
3.2.2. Efektif Çatlak Modeli (EÇM).....	20
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
4.1. Karışım Oranları	21
4.1.1. $d_{max}=4\text{mm}$ için Beton Karışım Oranları.....	21
4.1.2. $d_{max}=8\text{mm}$ için Beton Karışım Oranları.....	23
4.1.3. $d_{max}=16\text{mm}$ için Beton Karışım Oranları.....	24
4.1.4. $d_{max}=25\text{mm}$ için Beton Karışım Oranları.....	26
4.2. Numunelerin Hazırlanması	28
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	31
5.1. Çentiksiz Numunelere Ait Deney Sonuçları ve Analizi.....	31
5.2. Çentikli Numunelere Ait Deney Sonuçları	33
5.2.1. Maksimum Agrega Çapı 4 ve 8 Mm Olan Numunelere Ait Deney Sonuçları	33

5.2.2. Maksimum Agrega apı 16 Ve 25 mm Olan Numunelere Ait Deney Sonuçları	36
5.3. Çentikli Numunelerin Lineer Olmayan Kırılma Mekanikine Göre Analizleri.....	39
5.3.1. Çentikli Kirişlerin Efektif atlak Yaklaşımına Göre Analizleri.....	39
5.3.2. Çentikli Numunelerin İki Parametrelı Model Yaklaşımına Göre Analizleri	40
6. SONUÇLAR.....	50
KAYNAKLAR.....	52
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Kompakt Yarma-Çekme Numunelerinin Betonun Kırılma Mekanikğine Göre Uygulama Potansiyelinin Araştırılması

Buhranur SAĞLAM

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ocak 2023, Sayfa xii+54

Yarı gevrek bir malzeme olan betonda çok sayıda çatlak, boşluk ve kusurlar bulunur ve çatlamış bir beton/betonarme yapı, ancak kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak gerçekçi bir şekilde analiz edilebilir. Bu amaçla birçok araştırmacı tarafından teknolojik ve nümerik alanlardaki gelişmelere paralel olarak, lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleri geliştirilmiştir.

Betonun kırılma mekaniğinde kiriş numuneler yaygın olarak kullanılmakla birlikte, merkezi çatlaklı küp ve silindir numunelerin taşınabilirlik ve hafiflik açısından bazı avantajlara sahip olduğu görülmüştür. Son yıllarda bu tip numunelerin betonun kırılma mekaniğinde başarılı uygulamalarına literatürde verilmektedir. Bu arayışın bir devamı niteliğindeki sınır çatlaklı kompakt yarma-çekme numuneler, kama yarma numunelerine alternatif olarak geliştirilmiş ve sınırlı da olsa bir deneysel çalışma ile başarıyla kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, önceki sınırlı çalışmanın kapsamı farklı maksimum agrega boyutlarına (4, 8, 16 ve 25 mm) sahip beton karışımlar kullanılarak genişletilmiştir. Deney verileri (numune tepe basınç değerleri, yani kırılma yükleri) elde edildikten sonra literatürdeki eşdeğer elastik çatlak modellerinden iki parametrelilik model ile deney sonuçları analiz edilmiştir. Sonuçların karşılaştırılması için aynı zamanda 4 ve 8 mm lik agregalı karışımlarda çentikli kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Kirişlerin pik yükleri hem iki parametrelilik hem de efektif çatlak modeline göre analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonuçların oldukça uyumlu olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Beton, Kırılma mekaniği, İki parametrelilik model, Efektif çatlak modeli

ABSTRACT

Investigation of the Applicability Potential of Compact Splitting Specimens According to the Concrete Fracture

Buhranur SAĞLAM

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering
January 2023, Page xii+54

As a quasi-brittle material, concrete has many cracks, voids, and defects, and a cracked concrete/reinforced concrete structure can only be realistically analyzed using the principles of fracture mechanics. For this purpose, nonlinear fracture mechanics principles are proposed by many researchers in parallel with developments in the technological and numerical fields.

Although beam specimens are widely used in the fracture mechanics of concrete, it has been observed that cube and cylinder specimens with major cracks have some advantages in terms of portability and lightness. In recent years, successful applications of this type of specimens in the fracture mechanics of concrete have been given in the literature. As a continuation of this search, compact square prismatic specimens with edge cracks have been developed as an alternative to splitting specimens and have been successfully demonstrated in an experimental study.

The scope of the previous limited study was expanded in this thesis by using concrete mixtures with varying maximum aggregate sizes (4, 8, 16 and 25 mm). The experimental data (specimen peak compressive values, i.e. fracture loads) were analyzed using the two-parameter model, one of the equivalent elastic crack models available in the literature. Three-point bending tests on notched beam specimens with 4 and 8 mm aggregate mixtures were also performed to compare the results. The peak loads of the beams were calculated using the two-parameter and effective crack models. The analyses revealed that the outcomes were quite consistent.

Keywords: Concrete, Fracture mechanics, Two-parameter model, Effective crack models.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Beton basınç dayanımı: küp ve silindir numuneler	4
Şekil 2.2.	a) Direkt çekme deneyleri için Kassas'ın kullandığı numune-başlık düzeni b) Rüşch'ün kullandığı eksenel çekme deney numune geometrisi	6
Şekil 2.3.	Yarma deneyi uygulaması.....	7
Şekil 2.4.	Yarma deneyi.....	7
Şekil 2.5.	Silindir yarma deneyi ve gerilme dağılımı.....	8
Şekil 2.6.	a) 3 noktalı eğilme deneyi b) 4 noktalı eğilme deneyi	9
Şekil 3.1.	a) Gevrek kırılma b) Sünek tek kristallerde gevrek kırılma c) Çok kristallerde sünek kırılma d) Çok kristallerde tam sünek kırılma	11
Şekil 3.2.	S.S. Schenectady adlı tankerin gevrek kırılması	13
Şekil 3.3.	a) Malzemenin çatlak veya boşluk içermemesi halinde oluşan gerilme akımı. b) Çatlak veya boşluk içermesi durumunda oluşan gerilme akımı ve süreksizlik ucunda oluşan gerilme yığılmalar.	14
Şekil 3.4.	Kırılma modları.....	15
Şekil 3.5.	a) Sünek bir malzemede çatlak ucunda ortaya çıkan gerilme hali ile plastik bölge, b) Yarı gevrek bir malzemede çatlak ucunda ortaya çıkan gerilme hali ile kırılma süreci bölgesi.	17
Şekil 3.6.	a) Kohezif çatlak modeli b) Eşdeğer elastik çatlak modeli	17
Şekil 3.7.	a) çentikli üç noktalı eğilme numunesi b) P-CMOD eğrisi	19
Şekil 3.8.	Pik-Yük metodunda kullanılan farklı tip numune şekilleri a) çentikli silindir yarma, b) boşluklu silindir yarma, c) eksantrik yüklü çentikli prizma.....	19
Şekil 3.9.	Efektif çatlak modelinin geometrik yorumu	20
Şekil 4.1.	Granülometri eğrisi $d_{max}= 4mm$	22
Şekil 4.2.	Granülometri eğrisi $d_{max}= 8mm$	23
Şekil 4.3.	Granülometri eğrisi $d_{max}= 16mm$	25
Şekil 4.4.	Granülometri eğrisi $d_{max}= 25mm$	26
Şekil 4.5.	Plastik ve metal kalıpların doluma hazır hale getirilmesi	28
Şekil 4.6.	Mikserde beton karışımının hazırlanması	28
Şekil 4.7.	Beton dökümü sonrası kalıpların görünümü	29
Şekil 4.8.	Numunelerin kür havuzunda görünümü.....	29
Şekil 4.9.	Çentikli numune oluşturma	30
Şekil 5.1.	Basınç deneyi	31
Şekil 5.2.	Yarma-çekme deneyi	31
Şekil 5.3.	Kare prizmatik yarma-çekme deneyi	33
Şekil 5.4.	Çentikli kiriş numunelerin deney düzeneği.....	34
Şekil 5.5.	Çentikli kare-prizmatik numunelerin deney düzeneği	35

Şekil 5.6.	4 mm lik karışımlarda kullanılan kırılmış numuneler	36
Şekil 5.7.	8 mm lik karışımlarda kullanılan kırılmış numuneler	36
Şekil 5.8.	16 mm dane çaplı çentikli kübik numunelerin deney düzeneği	37
Şekil 5.9.	Çentikli 150 mm'lik kare-prizmatik numunelerin deney düzeneği.....	37
Şekil 5.10.	16 mm'lik karışımlarda kullanılan kırılmış 100 mm lik küp numuneler	38
Şekil 5.11.	25 mm'lik karışımlarda kullanılan kırılmış numuneler.....	39
Şekil 5.12.	Maksimum agreg a çapı 4mm olan kırış numunelere pik-yük metodunun uygulaması.....	44
Şekil 5.13.	Maksimum agreg a çapı 4mm olan sınır çatlaklı kare prizmatik numunelere pik-yük metodunun uygulaması.....	45
Şekil 5.14.	Maksimum agreg a çapı 8mm olan kırış numunelere pik-yük metodunun uygulaması.....	46
Şekil 5.15.	Maksimum agreg a çapı 8mm olan sınır çatlaklı kare prizmatik numunelere pik-yük metodunun uygulaması.....	47
Şekil 5.16.	Maksimum agreg a çapı 16mm olan sınır çatlaklı kübik numunelere (100 mm) pik-yük metodunun uygulaması	48
Şekil 5.17.	Maksimum agreg a çapı 25mm olan sınır çatlaklı kare prizmatik numunelere pik-yük metodunun uygulaması	49

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. $d_{max}=4$ mm için bulunan değerler	22
Tablo 4.2. $d_{max}=4$ mm için 35 dm ³ ' lük sürekli granülometrilili beton karışım hesabı.....	23
Tablo 4.3. $d_{max}=8$ mm için bulunan değerler	23
Tablo 4.4. $d_{max}=8$ mm için 35 dm ³ ' lük sürekli granülometrilili beton karışım hesabı	24
Tablo 4.5. $d_{max}=16$ mm için bulunan değerler	24
Tablo 4.6. $d_{max}=16$ mm için 55 dm ³ ' lük sürekli granülometrilili beton karışım hesabı	26
Tablo 4.7. $d_{max}=25$ mm için bulunan değerler	26
Tablo 4.8. $d_{max}=25$ mm için 55 dm ³ ' lük sürekli granülometrilili beton karışım hesabı	27
Tablo 5.1. Karışımların basınç deneyine ait sonuçlar	32
Tablo 5.2. Karışımların yarma-çekme deneyine ait sonuçlar.....	32
Tablo 5.3. 4 ve 8 mm lik karışımların eğilme deneyine ait sonuçlar.....	34
Tablo 5.4. 4 ve 8 mm lik karışımların kare-prizmatik yarma-çekme deneyine ait sonuçlar	35
Tablo 5.5. 16 ve 25 mm'lik karışımların kare-prizmatik yarma-çekme deneyine ait sonuçlar	38
Tablo 5.6. Kiriş numunelerin efektif çatlak modeline göre analizi	40
Tablo 5.7. Çentikli numunelerin kırılma mekaniği analizi sonuçları	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

f_c	: Betonun silindir basınç mukavemeti
P	: Yük
A	: Kesit alanı
f_t	: Çekme mukavemeti
d_{max}	: Maksimum agrega çapı
L	: Silindir numunenin boyu
D	: Silindir numunenin çapı
b	: Numune kalınlığı
d	: Numune karakteristik boy
σ_e	: Eğilme-çekme mukavemeti
σ	: Gerilme
E	: Malzemenin elastisite modülü
γ	: Yüzey enerjisi yoğunluğu
τ	: Kayma mukavemeti
σ	: Gerilme
K	: Gerilme şiddet çarpanı
K_I, K_{II}, K_{III}	: Mod I, Mod II ve Mod III için gerilme şiddet çarpanı
G_c	: Enerji salıverme oranı
CTOD	: Çatlak ucu açılımı
σ_{Nc}	: Göçmedeki nominal dayanım
f_1, f_2 ve f_3	: Numunenin geometrisine ve yükleme durumuna bağlı fonksiyonları
f_{sp}	: Yarma- çekme mukavemeti
P_c	: Kırılma yükü (Pik yük)
f_r	: Eğilme- çekme mukavemeti

Kısaltmalar

LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği
TS	: Türk standartları
EN	: Avrupa Normu
ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
SPH	: Sıkı Paket Hegzagonal
KSB	: Kırılma Süreci Bölgesi
İPM	: İki Parametrelili Model
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
EÇM	: Efektif Çatlak Modeli
S/Ç	: Su/ Çimento Oranı
A/D	: Çentik Boy/ Karakteristik Boy
RILEM	: Uluslararası Bina Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Uzmanları ve Laboratuvarları Birliği

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun varlığından itibaren hayatını devam ettirmek, doğa olayları ve felaketlerden korunmak amacıyla beslenmeden sonra gelen ve karşılamak durumunda olduğu barınma ve yaşam alanları oluşturma ihtiyacı, uygarlık tarihindeki mühim gelişmelere ışık olmuştur [1].

İlkel zamanların mağaralarından, çağımızın devasa gökdelenlerine kadar gelen bu süreçte büyük gelişmeler kaydedilmesine öncülük eden ve en önemli buluşlardan biri olan beton; belirli hesaplamalar sonucu elde edilen çimento, agrega, su ve uygun katkı maddelerinin belirli üretim teknolojisine uygun olarak karıştırılmasıyla elde edilen, çimento hidrasyonu ile katılarak istenilen şekli alabilen kompozit bir yapı malzemesidir. Güncelliğini kaybetmeyen betonun; yüksek basınç dayanımına sahip olması, yapısını oluşturan bileşenlerin doğadan rahat bir şekilde temin edilebilmesi, diğer yapı malzemelerine göre daha ekonomik olması, şekil vermesinin kolay olması, kullanım ve üretimdeki pratikliği hayatımızın her alanında kullanımını artmakta ve yaygınlaştırmaktadır [2].

Beton, yük altında veya yük altında olmadan bile içerisinde çatlak ve boşluk içeren yarı gevrek bir yapı malzemesidir. Düşük yükler altında gerilme ve şekil değiştirmelerin orantılı olarak arttığı lineer elastik davranış sergilemektedir. Ancak yük artırılmaya devam edildiği takdirde, elastik sınır geçilerek betonun içerisindeki çatlaklar aktifleşerek yük- sehim eğrisinin sahip olduğu lineerlik kaybolurken nonlineer bir davranış ön plana çıkar. Bahsedilen kısımda varolan çatlakların büyümesiyle birlikte yeni çatlaklar da oluşmaya başlar [3].

Çatlamış bir yapıyı gerçek bir şekilde analiz edebilmek için Kırılma Mekanikliği Prensipleri kullanılmalıdır. Kırılma mekanikliği temelinde, malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yoğunluğunu arttıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. İlk olarak Griffith [4] tarafından temeli atılan Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği (LEKM) teorisi, 1960'lı yıllarda Kaplan [5] ve Glücklich [6] tarafından betona uygulanmıştır. Fakat betonda çatlağın yayılmacı şekilde gelişmesi, boyuta ve zamana bağlı olarak mukavemetinin değişmesi gibi nedenler LEKM kanunlarının beton için yetersiz olduğunu göstermiştir [7- 9]. Bu amaçla birçok araştırmacı tarafından teknolojik ve nümerik alanlardaki gelişmelere paralel olarak, lineer olmayan kırılma mekanikliği yaklaşımları geliştirilmiştir [10-15]. Bu yaklaşımlar esas olarak, çatlamış bir beton kesitte gerilme transferine imkan sağlayan kırılma süreci bölgesinin varlığını dikkate alır. Yapı şartnameleri ve LEKM'nin ihmal ettiği bu bölge, metallerde plastik bölgenin yanında çok küçük olmasına karşın, betonda 100 mm'nin üzerinde değerler alarak büyük yer işgal eder [10]. Aynı zamanda bu bölgedeki gerilmeler, metallerdeki plastik bölgeden farklı olarak (ki orada gerilme sabit kalır) çatlak ucundan itibaren azalmaktadır. Bu davranışı karakterize etmek için LEKM'nin aksine nonlineer kırılma mekanikliği yaklaşımları, betonu modellemek için en az iki parametre kullanırlar.

Betonun kırılma modelleri kohezif çatlak modelleri (Fiktif Çatlak Modeli [10]) ve eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları (İki Parametrelili Model [11], Efektif Çatlak Modeli [12], Boyut Etkisi Modeli [13] ve Çift-K Modeli [14]) 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, sürekli granülometriye sahip ve maksimum agrega çapı $d_{max}=4, 8, 16$ ve 25 mm olan betonlar TS802 (Beton Karışım hesapları) [16] prensipleri kullanılarak üretilmiştir. 100 mm lik küp numuneler ile hem beton numunelerin basınç mukavemeti hem de yarmada-çekme mukavemetleri tespit edilmiştir. Üretilen betonların kırılma parametrelerini tayin etmek için kalınlığı $b=50$ mm olan sınır çatlaklı kare prizmatik numuneler kullanılmış tek boyutlu kırılma mekaniği araştırmaları için numune karakteristik boyutu $d=100$ mm alınmıştır. Numuneler farklı çentik boylarında (çentik boyu/karakteristik boyut $=a_0/d= 0.1, 0.3$ ve 0.5) ön çatlaklı olarak dizayn edilmiştir. Bununla beraber kompakt yarma çekme numunelerinin betonun kırılma mekaniğinde kullanılabilirliği ve uygulama potansiyelinin tespiti için ayrıca kiriş numuneler ile hem deneysel hem de istatistiksel karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Tüm sertleşmiş beton özellikleri 28 günlük değerler üzerinden tayin edilmiştir. Deney verileri (numune tepe basınç değerleri, yani kırılma yükleri) elde edildikten sonra literatürdeki eşdeğer elastik çatlak modelleri (İki Parametrelili Model [11], Efektif Çatlak Modeli [12]) ile deney sonuçları analiz edilerek karışımların kırılma parametreleri tayin edilmiştir.

2. SERTLEŞMİŞ BETONUN ÖZELLİKLERİ

2.1. Betonun Dayanımı

Farklı boyutlara sahip agrega yığınlarından ve bu yığınların yüzeyini kaplayacak şekilde doldurulan çimento ile uygun oranda su karışımından oluşan beton yarı gevrek bir malzemedir. Değişik türden yapılarda kullanılan beton, üzerine farklı yönlerde etkiyen yükleri taşıyabilmek amacıyla direnç göstermektedir [17].

Etkiyen yüklerin sonucunda betonda bir miktar şekil değiştirme olmaktadır. Bu yüklerin büyüklüğü arttıkça betondaki şekil değiştirmenin miktarında artma görülürken beton bu yükleri taşıyabilmek için daha fazla direnç gösterecektir [17].

Eğer betona etkiyen yüklerin büyüklüğü betonun yüklere karşı koyma kapasitesini aşarsa çok büyük şekil değiştirmenin yanı sıra betonda kırılma meydana gelecektir. Betonda meydana gelen bu kırılma agrega ve/veya çimento hamurunun yeterli direnç gösterememesinden ya da agrega ile çimento hamuru arasındaki aderansın yeterince iyi olmamasından kaynaklanmaktadır [17].

Betona farklı doğrultularda etki eden kuvvetler, değişik tesirler oluşturabilmektedir. Basınç, çekme, eğilme ve kayma (kesme) etkisi yaratacak kuvvetler altında betonun şekil değiştirme ve kırılmaya karşı gösterdiği direnç; basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, kayma (kesme) mukavemeti ve eğilme mukavemeti olarak ifade edilmektedir. Tekrar eden yüklerin etkisindeki betonun, şekil değiştirme ile kırılmaya karşı gösterdiği direnme kabiliyeti ise yorulma dayanımı olarak adlandırılır. Betonun kullanıldığı yapılarda bu dayanımlar hesaplarda çok önemlidir [17,18].

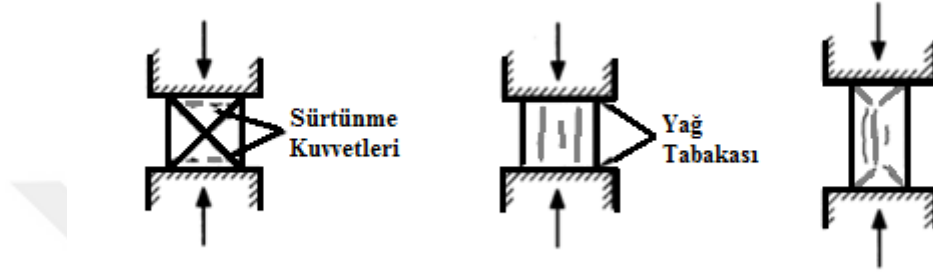
2.1.1. Betonun Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı, "eksenel basınç yükü etkisindeki betonun kırılma olmaması için göstereceği direnme yeteneği" şeklinde ifade edilmektedir [17].

Basınç mukavemetinin hesaplanabilmesi için uygulanan deney metotları diğer dayanım türlerinin bulunabilmesi için uygulanan metotlara nazaran kolay olması ve hemen hemen bütün yapı tasarımında betonun basınç mukavemetinin değeri dikkate alınması gibi sebepler basınç dayanımını mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan ve en popüler dayanım haline getirmektedir [17].

Betonun basınç mukavemeti ile diğer (çekme ve eğilme) mukavemetler arasında, bir ilişki vardır. Bu sebeple, basınç mukavemetinin bilinmesi halinde, diğer türdeki mukavemetlerin büyüklükleri hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir. Bunun yanı sıra betonun basınç dayanımının bilinmesi, halinde durabilite gibi özellikleri hakkında da bilgi sahibi olunabilmektedir [17].

Basınç dayanımı belirlenecek beton için numunelerin alınması, bakımı ve hazırlanması TS EN 12350-1 [19] ve TS EN 12390-2 [20] belirtilen koşullara uygun olmalıdır. Beton basınç dayanımında, şartnameye uygun olarak hazırlanan 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki standart silindir numunelerin ya da 150*150*150 mm³ boyutunda küp numuneler deneye tabi tutulmaktadır. Standartlara göre hazırlanan kalıplara dökülen taze beton, 28 gün uygun kür koşullarında bekletilmesinin ardından Şekil 2.1 deki gibi basınç yükü uygulanarak kırılma gerçekleştirilir. Basınç mukavemeti Denklem 2.1 den hesaplanır.



Şekil 2.1. Beton basınç dayanımı: küp ve silindir numuneler [21]

Burada;

$$f_c = P/A \quad (2.1)$$

f_c : Basınç dayanımını

P : Numunenin kırılmasına yol açan yük miktarını

A : Numunenin kesit alanını ifade etmektedir..

2.1.2. Betonun Çekme Dayanımı

Yapıların tasarım hesaplarında genellikle betonun basınç mukavemeti kullanılmaktadır. Ancak sıvı tutucu yapıların ve nükleer santrallerin tasarımında olduğu gibi çatlamanın son derece önemli olduğu durumlarda çekme dayanımı önemli rol oynamaktadır. Betonun çekme mukavemetinin hesaplanması, deney düzeneğinde kavrama sorununun ortaya çıkmasından ötürü, basınç mukavemetine kıyasla oldukça zor olmaktadır [17,22].

Betonun çekme mukavemetini bulmak için üç farklı deney yönteminden yararlanılmaktadır.

1. Çekme yüklerinin doğrudan (direkt) uygulanmasıyla çekme mukavemetinin hesaplandığı metot: doğrudan (direkt) çekme dayanımı deneyi
2. Çekme yüklerinin dolaylı bir şekilde uygulanmasıyla, çekme mukavemetinin hesaplandığı metot: yarmada-çekme dayanımı

3. Beton kirişlere eğilme yüklerinin uygulanmasıyla eğilme mukavemeti ve çekme mukavemetinin elde edildiği metot: eğilmede çekme dayanımı

Doğrudan Çekme Deneyi

Çekme yüklerinin doğrudan etki ettiği bu yöntemde çeşitli şekillere sahip numunelere merkezi çekme kuvveti uygulanarak çekme mukavemeti belirlenmektedir. Doğrudan çekmede malzemenin bütün kesiti direkt çekme gerilmesine çalıştırılmaktadır. Ancak uygulama sırasında yükün deney numunesine verilmesi konusundaki zorluklardan dolayı numune kesiti burulma momentine ve bazı durumlarda eksantrisiteden kaynaklanan momentin yarattığı ilave çekme gerilmelerine çalışmaktadır. Bundan dolayı numune gerçek çekme dayanımının altında kırılmaktadır [22,23].

Doğrudan çekme yükleri değişik boyutlardaki numuneler üzerinde uygulanabilirken beton numuneye direkt çekme yükünü etki ettirmek için özel şekilde hazırlanmış başlıklara ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılacak numunenin uçlarına yapıştırılan metal başlıklar ve bu başlıkların orta kısmına dik gelecek şekilde bağlanan metal çubuklar deney düzeneğine uygun biçimde yerleştirilmektedir. Deney makinesi çalıştırıldığında beton numuneye doğrudan çekme yükleri etki eder ve bu yük uygulaması beton numunesi kırılıncaya kadar sürer [17].

Betonun doğrudan çekme yükleri altındaki dayanımının bulunabilmesine yönelik çalışmalarda şekil 2.2'deki gibi numuneler kullanılmıştır.

Betonun çekme dayanımı (ft), kırılma yaratacak yükün (P) numune boyunun ortasındaki numune kesit alanına(A) bölünerek belirlenebilmektedir. Sonuçlar MPa veya kgf/cm² birimleriyle ifade edilir.

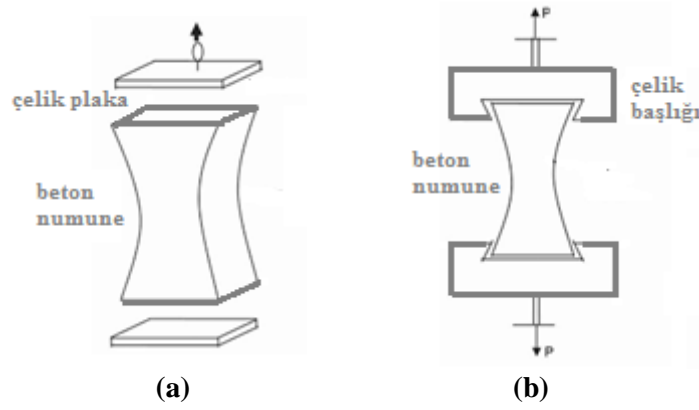
$$f_t = P/A \quad (2.2)$$

Yukarıda verilen bağıntıda;

f_t : Betonun çekme dayanımı

P : Kırılmaya sebep olacak yük

A : Numune boyunun ortasındaki kesit alanı

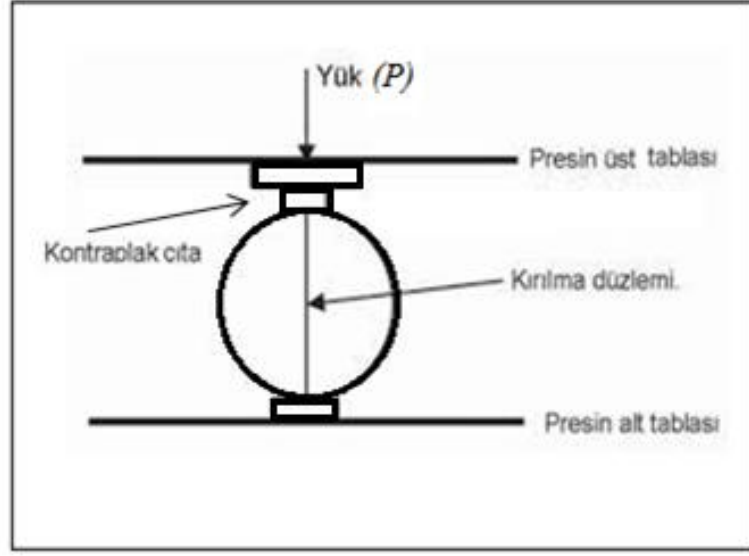


Şekil 2.2. a) Direkt çekme deneyleri için Kassas'ın kullandığı numune-başlık düzeni b) Rüşch'ün kullandığı eksenel çekme deney numune geometrisi [24].

Yarmada Çekme Dayanımı

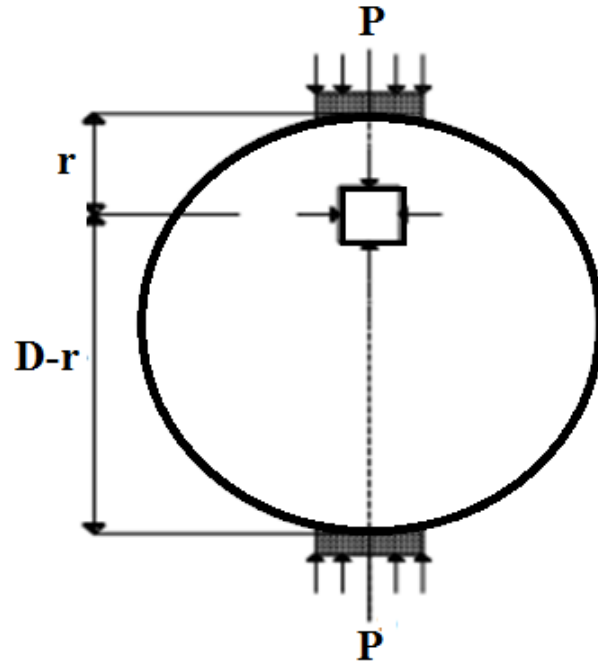
Betonun çekme mukavemetinin dolaylı bir yol olan yarma deneyi ile belirlenmesi, Brezilyalı Fernando Carneiro tarafından ortaya atılmıştır. Deney her ne kadar Brezilyada bulunmasından dolayı Brezilya Yarma Deneyi olarak adlandırılrsa da asıl olarak Japonlar tarafından geliştirilmiştir [25].

Dolaylı çekme yükleri etkisi altında betonun çekme dayanımının belirlenmesinde kullanılan deney yöntemi TS EN 12390-6 [26] ve ASTM 496 [27] standartlarında yer almaktadır. Dolaylı çekme dayanımı yönteminin uygulanmasıyla beton numune yarılarak ikiye ayrıldığından bu metod genellikle “yarma deneyi yöntemi” olarak ifade edilmektedir [17]. Bahsedilen deney metodunda çoğunlukla silindir şekilli deney numuneleri kullanılırken küp şekilli deney numunelerin kullanılması da mümkündür. Deneyin uygulanmasında numune Şekil 2.3’ de görüldüğü gibi deney presinin üzerine yatırıldıktan sonra basınç yükü uygulanmaktadır. Uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) hesaplanmaktadır.



Şekil 2.3. Yarma deneyi uygulaması [24].

Silindir şeklindeki numuneye Şekil 2.4 de gösterildiği gibi basınç yükü uygulandığı takdirde, betonda yük ekseninde kısılma meydana gelirken yük eksenine dik olan ekseninde ise uzama gerçekleşmektedir. Betonun içinde sonsuz küçük bir gerilme elemanı incelenmeye tabi tutulursa bu elemanın üzerinde basınç gerilmesi ve bu gerilme etkisiyle meydana gelen çekme gerilmeleri bulunduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.4 deki eleman üzerinde oluşan gerilmeler aşağıda gösterilen denklem 2.3 ve 2.4 deki değere eşittir [17];



Şekil 2.4. Yarma deneyi [18].

Şekil 2.3deki eleman üzerinde oluşan basınç ve çekme gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\text{Basınç gerilmesi} = \frac{2P}{\pi LD} \left[\frac{D^2}{r(D-r)} - 1 \right] \quad (2.3)$$

$$\text{Çekme gerilmesi} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.4)$$

Yukarıda verilen bağıntılarda;

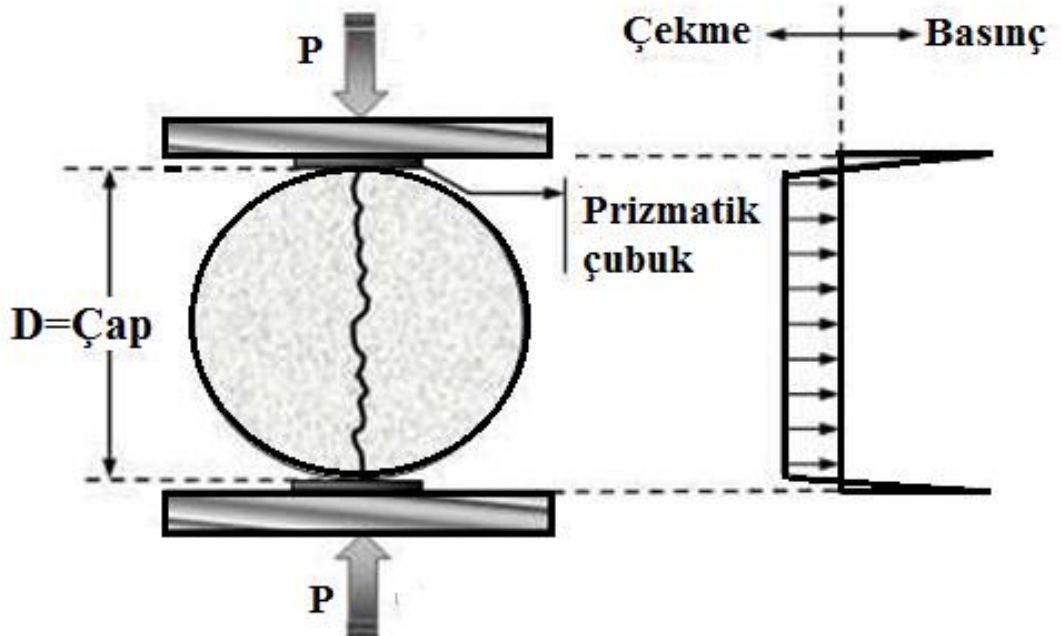
P : Kırılmaya neden olan basınç yükü

L : Silindir numunenin boyu

D : Silindir numunenin çapı

r ve (D-r) = Şekil 2.3’de gösterilen uzaklıklardır.

Beton silindir, elastik cisim gibi davranış gösterdiği takdirde düşey çap boyunca yatay gerilmelerin dağılımı Şekil 2.5’deki gibi olmakta ve yarma silindir çekme dayanımı denklem 2.4’deki gibi hesaplanmaktadır. Ancak beton için lineer elastik davranış pek uygun olmamaktadır. Bu yükleme etkisiyle oluşan çekme gerilmesi iki boyutlu olmaktadır. Dik yönde etkiyen yük çekme mukavemetinin merkezi çekmeye nazaran %50 daha büyük şekilde elde edilmesine sebep olduğundan TS 500’de [28] merkezi çekme mukavemetinin silindir yarma deneyinden elde edilen çekme mukavemetinin 1.5 e bölünmesiyle hesaplanacağı belirtilmektedir [22].

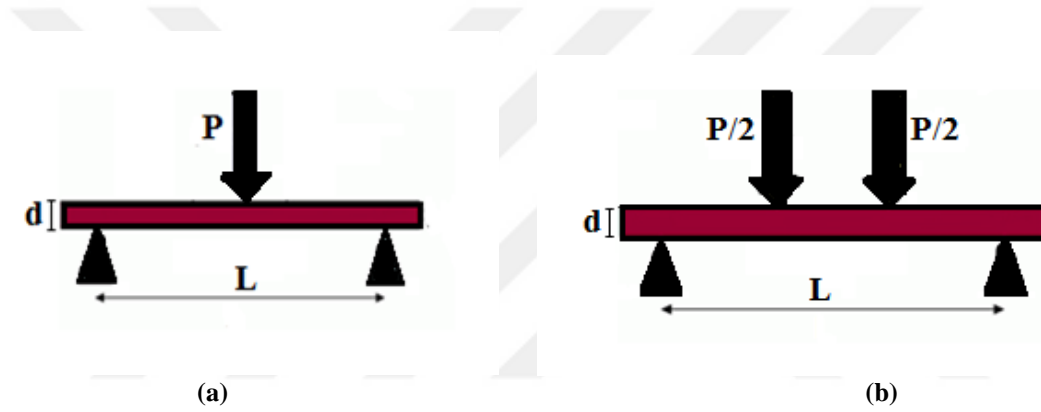


Şekil 2.5. Silindir yarma deneyi ve gerilme dağılımı [29]

Eğilmede Çekme Dayanımı

Betonun eğilme-çekme mukavemetini bulabilmek için TS EN 12390-5 [30], ASTM C 293 [31] ve ASTM C 78 [32] standartlarından yararlanılmaktadır. Eğilme-çekme mukavemetinin hesaplanmasında standartlara uygun olarak hazırlanan beton kiriş numuneler, mesnetlerin orta noktasından üç noktalı eğilme (Şekil 2.6a) veya mesnetlere $L/3$ uzaklıktaki iki ayrı noktadan dört noktalı eğilme (Şekil 2.6b) deneyine tabi tutulur.

Betonun eğilme dayanımının bulunmasında çoğunlukla kullanılan yükleme metodu, iki noktadan yükleme durumunda oluşan maksimum momentin kirişin oldukça uzun bir bölümünde (ortadaki $L/3$ bölgesinde) üniform etki göstermesi nedeniyle yükün mesnetlerden $L/3$ uzaklıktaki iki ayrı noktadan uygulandığı dört noktalı eğilme deneyi metodudur. [17,33].



Şekil 2.6. a) 3 noktalı eğilme deneyi b) 4 noktalı eğilme deneyi [34]

Ortadan yüklenen beton kiriş numunelerde eğilme dayanımı denklem (2.5) , yükün mesnetlerden $L/3$ uzaklıktaki iki ayrı noktadan etki ettiği beton kiriş numuneler de ise denklem (2.6) daki gibi hesaplanmaktadır

$$\sigma_e = 3PL / 2bd^2 \quad (2.5)$$

$$\sigma_e = PL / bd^2 \quad (2.6)$$

Yukarıda verilen bağıntıda ;

P : Uygulanan yük

b : Numune kalınlığı

d : Numune derinliği

Eğilme deneylerinde yalnızca eğilme etkisi incelendiği için yükün iki noktadan etkilediği deney yöntemiyle daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Deney yöntemleri arasında verdiği sonuç itibarıyla ideale en yakın olanı doğrudan çekme dayanımı olurken, bu deneyin laboratuvarlarda standart deney olarak yapılması pratik olmadığı için, hazırlanması ve yüklenmesi nispeten daha

kolay olan silindir/küp yarma deneyi veya eğilme deneyi standart çekme deneyleri olarak tercih edilmektedir [33].

2.1.3. Betonun Kayma Dayanımı

Betonun kesme mukavemetini belirlemek, basınç ve çekme mukavemetine nazaran daha zor olmaktadır. Deneylerde gerçek kesme kırılmasının elde edilmesi güç olduğu için betonun kesme mukavemeti için literatürde çok farklı değerler yer almaktadır [22].

Betonun kesme mukavemeti basınç dayanımının %35 ile %80'i arasında değişen değerler almaktadır. Kayma dayanımı için kesin bir değer belirlenemediğinden betonun eğik çekme gerilmeleri nedeniyle gevrek kırılmasını önlemek için kesme gerilmelerini çok küçük seviyelerde tutarak dikkatli davranılmalıdır. [22,35].

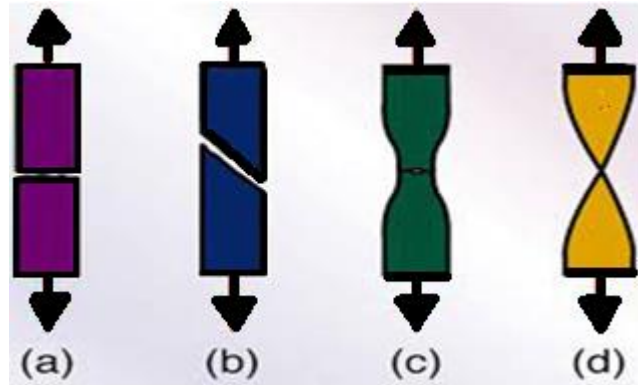
3. KIRILMA MEKANIĞI

3.1. Kırılma

Kırılma, gerilme etkisindeki bir cismin birden fazla parçaya bölünmesi veya parçalanması durumu olup çatlak oluşumu ile çatlak yayılımı şeklinde iki kademedeki incelenmektedir.

Kırılma, çoğunlukla sünek kırılma ve gevrek kırılma olarak iki şekilde meydana gelir. Sünek kırılma, kırılma yüzeylerinde de görülen, çatlak büyümeden önce veya çatlak ilerlemesi sırasında önemli ölçüde gerçekleşen şekil değiştirmeye ifade edilir. Kırılma yüzeyi mat ve lifli bir görünümde olan sünek kırılma birden fazla biçimde meydana gelebilir: Sıkı paket hegzagonal (SPH) yapıda olan tek kristallerde kimi ana düzlemlerde kayma sonucu kristal kayarak ayrılırken (Şekil 3.1b) altın gibi yüksek süneklik yapısında olan çok kristalli metallerde kırılma gerçekleşmeden önce bir nokta kadar incelmeye görülmektedir (Şekil 3.1d) [36,37].

Gevrek kırılma ise hızlı bir şekilde gerçekleşen çatlak ilerlemesi ve mikro-deformasyonla ifade edilir. Gevrek kırılmada göçme öncesi herhangi bir uyarı gerçekleşmediğinden ve büyük oranda felaketler doğurduğundan mutlaka önlem alınması gereken bir kırılma türüdür. Farklı metodlarla kırılma yüzeyi incelemeye tabi tutulduğunda ince bir tabaka deformasyon tespit etmek mümkünken dıştan bakıldığında herhangi bir deformasyon belirtisi yoktur. Çekme gerilmesine dik bir ayrılma şeklinde karakterize edilen (Şekil 3.1a) gevrek kırılmaya eğilim, artan deformasyon hızı, azalan sıcaklık ve üç eksenli gerilme durumlarında artar [36,37].



Şekil 3.1. a) Gevrek kırılma b) Sünek tek kristallerde gevrek kırılma c) Çok kristallerde sünek kırılma d) Çok kristallerde tam sünek kırılma [38].

3.1.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihsel Gelişimi

Kırılma mekaniği esas olarak malzemede bulunan ve gerilme yoğunluğunu arttıran çatlak, çentik ve boşluk benzeri kusurları ve bu kusurların oluşturduğu hasarları incelemektedir.

İlk kırılma araştırmaları birkaç yūzyıl ōnce Leonardo Da Vinci tarafından gerēekleřtirilmiřtir. Yaptığı deneylerle kırılmanın ana nedeni hakkında ipuēları yakalayan Da Vinci, demir tellerin dayanımını hesaplamış ve dayanım ile tel boyu arasındaki ilişkinin ters orantılı olarak değiştiğini bulmuştur. Bu sonuēlar mukavemeti, malzeme iēindeki hataların kontrol ettiği gōstermektedir: uzun bir tel daha būyūk numune hacmine dolayısıyla hata bulundurma olasılığının daha yūksek olduğu numune bōlgesine sahiptir. Ancak bu sonuēlar niteldir. Kırılma gerilmesi ile hata boyutu arasındaki sayısal bağıntı Griffith'in [4] 1920 yılında yayınlanan ēalıřmasıyla kurulmuştur [39].

Sistemin toplam enerjisindeki azalma ile ōnceden bulunan bir ēatlak ilerleyebileceğini ifade eden Griffith, aynı zamanda gerilme altındaki bir sistemde ēatlak ilerledikēe elastik gerilmeye bir azalma olacağını ve bu enerjinin de yeni ēatlak oluşması iēin ihtiyaē duyulan enerji olduğunu ifade ederek basit bir enerji dengesi ōngōrmūřtur [37]. Griffith yaklaşımı ilerleyen zamanlarda metalik malzemelerin gevrek kırılmasına da uygulanmıştır.

Irwin[40], Griffith tipi enerji dengesinin, depo edilen Őekil deęiřtirme enerjisi ile yūzey enerjisi ve plastik deformasyon sırasında yapılan iř arasında olması gerektięini irdelemiř ve sūnek malzemelerde yeni ēatlak yūzeylerinin meydana gelmesi iēin gereken enerjinin, plastik deformasyon sırasında yapılan iřin yanında genellikle ōnemli olmadıęını savunarak enerji yayılım hızı veya ēatlak itici gūcū Őeklinde ifade edilen G diye bir malzeme ōzellięi ileri sūrmūřtur. 1950'nin ortalarında ise enerji yaklařımının gerilme yoęunluęu yaklařımıyla denk olduęunu ifade ederek kırılma mekanięinde yeni bir dōnem aēımuřtur. Buna gōre kırılma; ēatlak ucunda kritik bir gerilme daęılımına ulařıldıęında meydana gelecektir [37].

Kırılma mekanięi alanının bir meraktan mūhendislik disiplini haline gelmesinde 2. Dūnya Savařı ōncesi ve sonrasına karřılık gelen yıllarda yařanan mūhendislik kazaları etkili olmuřtur. Bunlardan biri 1942 yılında ōnemli miktarda kaynak kullanılarak imal edilen Liberty tūrū gemilerdir. Bu dōnemde ōretilen gemilerin birēoęunda kırılmalar sonucu hasarlar oluřurken bazıları kırılarak ikiye ayrılmıřtır. Yapılan incelemelerde hasara soęuk havanın, kullanılan ēeliklerin dūřuk kırılma tokluęuna sahip olmasının ve ōretim ařamasında oluřan ēatlak benzeri bořlukların varlıęının sebep olduęu anlařılmıřtır. Bir dięer ōrnek ise Őekil 3.2'deki gibi Schenectady adlı tankerde gōrūlmūřtur. Tūm testleri bařarılı geēmesine raęmen ēıktığı sefer dōnūřū ortadan bōlūnerek ciddi bir felaket yařanmıřtır. Denizde gōrūlen bu tip gevrek kırılma hasarlarına birēok ūlkede rastlanması sonucu mūhendislik yapılarının tasarımında klasik yaklařımın yanında kırılma konusunu da iēerecek yeni yaklařımlara gereksinim duyulduęu anlařılmıřtır [41].

Feci mūhendislik kazaları olmadan ōnce yalnızca araştırmacıların ve bilim ēevrelerinin alakadar olduğu kırılma olayı bundan sonra uygulamacıların ve mūhendislerin de ilgilendirmeye başlamıştır [41].



Şekil 3.2. S.S. Schenectady adlı tankerin gevrek kırılması [42]

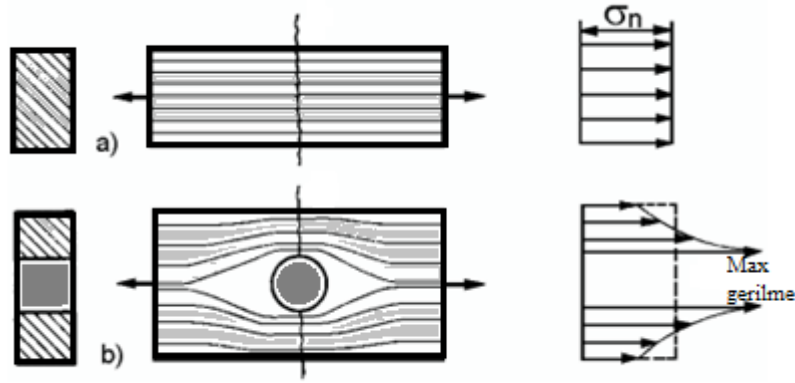
3.1.2. Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği

Lineer elastik kırılma mekanikliği (LEKM) kırılma mekanikliğinin incelemesinde kullanılan ve malzemelerdeki bütün davranışların elastik sınır dahilinde olması gerektiği ilkesinden yola çıkarak geliştirilen analitik tabirlerin bütünüdür. Bu metodun temel ilkesi çatlak uzunluğuna, yönüne ve parçaya uygulanan gerilmeye bağlı olarak çatlak ucunda oluşan gerilmelerin ifade edilmesidir [41].

Kırılmayla belirlenen hasarları incelemek için başlıca ‘Griffith Enerji Dengesi Yaklaşımı[4]’ ve ‘Irwin Teoremi[40]’ şeklinde iki yaklaşımı öngörmektedir.

Kırılma mekanikliğinin esaslarını meydana getiren ilk çalışmalar Griffith ile başlamıştır. Griffith 1920’lerde teorik mukavemet ile deneysel değerlerden elde edilen mukavemet arasındaki farkı açıklamaya çalışmıştır. Cam elyaf malzemelerde yaptığı deneylerde, elyaf çapı arttıkça elyaf mukavemet mukavemetinin azaldığını, çok küçük elyaf çaplarına inildiğinde elde edilen deneysel mukavemet değerlerinin teorik mukavemet değerine yaklaştığını görmüştür. Griffith bu düşük mukavemet değerine içlerinde buldukları ve boyutları moleküller arasındaki uzaklığa göre çok daha fazla olan süreksizliklerin ve kılcal çatlakların neden olduğunu ileri sürmüştür [41].

Yük altında olan ve bünyesinde boşluk bulunan bir malzemede, süreksizlik sebebiyle boşluk ucunda gerilme yığılması oluşur (Şekil 3.3). Yükleme etkisiyle ortaya çıkan gerilme akımı, çatlak etrafını dolanmak durumunda kaldığı için çatlak ucunda gerilme yığılmasında artış, çatlak üst ve alt yüzlerinde ise gerilme gevşemesi meydana getirecektir. LEKM’ne göre, çatlak ucunda oluşan bu gerilme yığılması çatlak keskinleştikçe sonsuza gitmektedir [3].



Şekil 3.3. a) Malzemenin çatlak veya boşluk içermemesi halinde oluşan gerilme akımı. b) Çatlak veya boşluk içermesi durumunda oluşan gerilme akımı ve süreksizlik ucunda oluşan gerilme yığılmaları [43].

Gerilme yığılması özellikle gevrek malzemelerde daha tehlikelidir. Çünkü sünek malzemelerde çatlak ucunda plastik şekil değiştirmenin gerçekleştiği bölgenin boyutu büyük olduğunda bu bölgede çatlak ucundaki kısımda gerilme üniform dağılırken sünek olmayan malzemeler plastik olarak deforme olmadıkları için gerilme yığılması sonucu çatlak ucunda meydana gelen gerilme teorik gerilme değerine yakın olmaktadır [41].

Griffith malzemeye etki eden gerilmenin oldukça küçük olmasına karşın gerilme yığılması nedeniyle bölgesel olarak teorik mukavemete ulaşabileceğini ifade etmiştir. Griffith, çatlak ilerlemesini gerilmelerin çatlak etrafında meydana getireceği elastik enerjinin, yeni oluşacak çatlak yüzeylerinin yüzey enerjisiyle aynı olduğunda başlayacağını ileri sürmüştür. Sonsuz genişlik ve birim kalınlığa sahip bir levhada bu koşulu sağlayan gerilmenin [37];

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (3.1)$$

olduğu gösterilmiştir. Yukarıda verilen bağıntıda;

σ : Gerilme

E : Malzemenin elastisite modülü

γ : Yüzey enerjisi yoğunluğu

a : Çatlak uzunluğu

Griffith, cam lifler üzerinde yaptığı deneylerle teorik dayanımın, elastisite modülünün %10'u (E/10) olduğunu ve buna malzemenin içerdiği kusurların sebep olduğunu ileri sürerken, Irwin seramik lifler üzerine gerçekleştirdiği deneylerde teorik mukavemetin E/10 civarında olmadığını ifade etmiş ve teoriyi metalleri de içine alıp daha da genişleterek genel kırılma modları olan ModI,

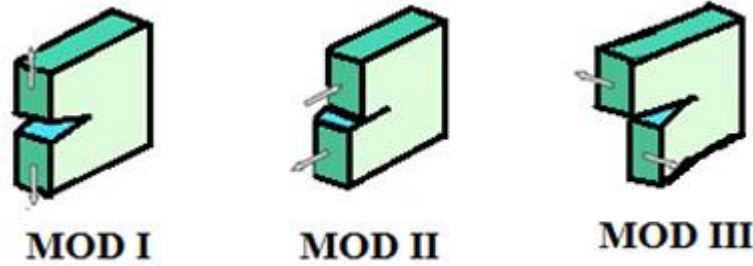
ModII, ModIII ve bu modların bir araya gelmesi ile ortaya çıkan karışık modun kanunları ile “K” olarak ifade edilen gerilme şiddet faktörünü bulmuştur [44].

Malzemelerdeki çatlaklar Şekil 3.4 de gösterildiği gibi yüklemeye bağlı olarak üç farklı biçimde ilerleyebilir. Bunlar; ModI (açılma modu), ModII (kayma modu) ve ModIII (makaslama modu) olarak gruplandırılmaktadır. Çatlak ilerlemesi yalnızca bir modla olabileceği gibi birden fazla modun bir araya gelmesiyle de oluşabilir [33,41].

Mod I : Bu tür çatlak ilerlemesi en fazla hasara sebep olan ve en sık rastlanan çatlak ilerleme modudur. *Mod I* durumunun açılma modu olarak ifade edilmesi kendi düzlemlerine dik yer değiştirme yapmasından kaynaklanmaktadır.

Mod II : Kesme ya da kayma modu olarak ifade edilen bu modda, çatlak yüzeyleri kendi düzlemlerinde birbirlerine göre yer değiştirme yapıp simetrik olmayan bir gerilme durumu oluşturmaktadır.

Mod III : Yırtılma veya makaslama modu olarak ifade edilen bu mod durumunda çatlak yüzeyleri düzlem dışında birbirlerine göre yer değiştirme yapmaktadır.



Şekil 3.4. Kırılma modları [45].

$$\text{Mod I} : \text{Açılma Modu } K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.2)$$

$$\text{Mod II} : \text{Kesme-Kayma Modu } K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (3.3)$$

$$\text{Mod III} : \text{Makaslama-Yırtılma Modu } K_{III} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (3.4)$$

Yukarıda verilen bağıntılarda;

σ : Malzemeye uygulanan çekme gerilmesi

τ : Kayma gerilmesi

a : Çatlak uzunluğu

Bünyesinde çatlak içeren malzemenin geometrisine, yükleme durumlarına ve sınır şartlara bağlı bir sabit olan gerilme şiddet çarpanı [K] 'nın bilinmesiyle çatlak ucundaki bütün gerilme ve

genlemenin (birim uzamalarının) büyüklüğü elde edilebilir. Bu gerilme ve birim uzamalar belirli bir kritik değere eriştiğinde çatlak ilerler. Bu kritik değere kırılma tokluğu veya kritik gerilme şiddet çarpanı (K_c) adı verilir. Tıpkı akma gerilmesi ya da elastisite modülü gibi bir malzeme parametresi olan bu büyüklüğün birimi $\text{MPa}\sqrt{m}$ dir [33,41].

Çatlak ucundaki gerilme kritik bir değeri aşması halinde kırılma meydana gelecektir. Matematiksel anlamda $K \geq K_c$ olduğunda kırılma başlar [33].

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.5)$$

$$K_c = \sqrt{EG_c} \quad (3.6)$$

Yukarıda verilen bağıntıda;

σ : Gerilme

a : Çatlak uzunluğu

K : Gerilme şiddet çarpanı

K_c : Kritik gerilme şiddet çarpanı

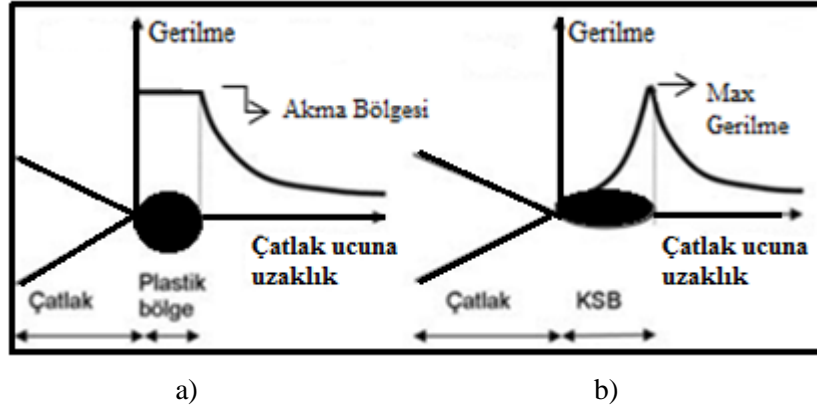
G_c : Enerji salıverme oranı

$\sigma\sqrt{\pi a}$ değeri $\sqrt{EG_c}$ ye ulaştığında çatlak ilerlerken $\sigma\sqrt{\pi a} < \sqrt{EG_c}$ olduğu zaman çatlak boyu kritik olmaz yani çatlak ilerlemez veya stabil şekilde ilerler.

3.2. Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekanikliği

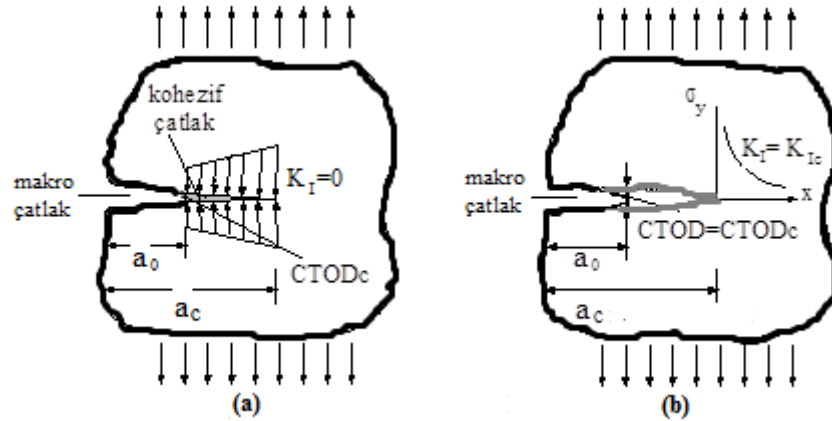
Beton, yük altında olmadığı durumlarda dahi bünyesinde mikroçatlaklar ve boşluklar içeren heterojen ve yarı gevrek bir yapı malzemesidir.

Sünek bir malzemede kırılma gerçekleşmeden önce akma meydana geleceği için çatlak ucunda oluşan gerilme artışı sonsuza gitmez, akmanın görüldüğü plastik bir bölge oluşur (Şekil 3.5a). Beton gibi yarı gevrek bir malzemede ise çatlak ucunda ciddi miktarda kalıcı şekil değiştirmeler meydana gelir. Oluşan gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin orantılı olmadığı, beton kesitte gerilme transferine imkan sağlayan bu bölge Kırılma Süreci Bölgesi (KSB) olarak adlandırılır. Yapı şartnameleri ve LEKM nin ihmal ettiği bu bölge, metallerde plastik bölgeye kıyasla oldukça küçük olmakla birlikte, betonda 100mm yi aşan değerler olarak büyük yer kaplar [10]. Diğer taraftan bu bölgedeki gerilmelerde, metallerdeki plastik bölgenin aksine azalma görülmektedir (Şekil 3.5b). Lineer olmayan kırılma mekanikliği yaklaşımları bu davranışı nitelemek için LEKM den farklı olarak betonu modellemek için en az iki parametre kullanır [3].



Şekil 3.5. a) Sünek bir malzemede çatlak ucunda ortaya çıkan gerilme hali ile plastik bölge, b) Yarı gevrek bir malzemede çatlak ucunda ortaya çıkan gerilme hali ile kırılma süreci bölgesi [3].

Betonun kırılma modellerini esas olarak iki madde halinde incelemek mümkündür. Bunlardan biri kohezif çatlak modelleri (Fiktif Çatlak Modeli [10]) bir diğeri ise eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları modeli (İki Parametrelili Model [11], Etketif Çatlak Modeli [12], Boyut Etkisi Modeli [13] ve Çift-K Modeli [14]) dir. Şekil 3.6.a da gösterildiği gibi, kohezif çatlak modelinde, kırılma süreci bölgesini çatlak ucunda azalma gösteren ve çatlağa basınç uygulayan bir gerilme bloğu ile biçimlendirirken eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları etketif bir çatlak uzunluğundan yararlanarak modellemektedir



Şekil 3.6. a) Kohezif çatlak modeli b) Eşdeğer elastik çatlak modeli [46].

3.2.1. İki Parametrelili Model (İPM)

Jeng ve Shah [11]'in önerdiği nonlinear kırılma mekaniği yaklaşımlarından İki Parametrelili Model, beton bir yapıda, gerilme şiddet çarpanı K_I (burada yalnızca Mod I durumu göz önüne 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 oluşacağını varsaymaktadır[47].

Bahsedilen değişkenleri bulmak için Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine (LEKM) ait denklemlerden yararlanılır [47].

$$K_{Ic}^s = \sigma_{Nc} \sqrt{\pi a_c} f_1 \quad (3.7)$$

$$CTOD_c = \frac{4\sigma_{Nc} a_c}{E} f_2 f_3 \quad (3.8)$$

Yukarıda verilen bağıntılarda;

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 ifade etmektedir.

(Bu fonksiyonlar herhangi bir kırılma mekaniği kitaplarında temin edilebilir [47,48])

Denklem (4.18) de, f'_c betonun silindirik basınç mukavemetini ifade etmek üzere malzemenin elastisite modülü İPM den aşağıda verilen bağıntı yardımıyla hesaplanabilir [11]:

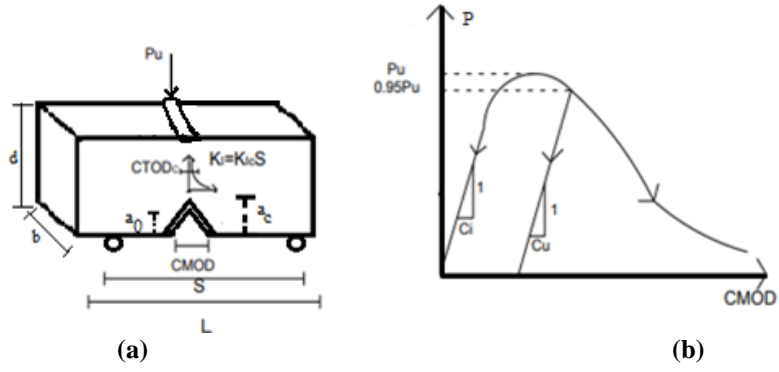
$$E_c = 4785 \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad (3.9)$$

Yaklaşım bu değişkenleri deneysel olarak iki yöntemle tayin edilebilir. Bunlardan biri pik yük metodu diğeri ise komplians metodudur.

Komplians metodu

Komplians metodunda kırılmaya ait değişkenleri kapalı devre deney ekipmanları yardımıyla, Şekil 3.7a'da gösterildiği gibi çentikli üç noktalı eğilme numunesinin yük - çatlak ağzı açılımı (P-CMOD) ilişkisinden yararlanarak bulunur. [47,49] Bu modelde kritik çatlak boyu değeri (a_c), başlangıç (C_i) ve pik yük sonrası pik yükün %95 değerinde ölçülen (C_u) şeklindeki iki komplians değerinden yola çıkarak hesaplanır (Şekil 3.7b) [47].

Komplians metodunda, ifade edilen parametrelere ilave olarak başlangıç ve pik yükteki komplians değerlerinden (C_i ve C_u) betonun elastisite modülü de bulunabilir [47].

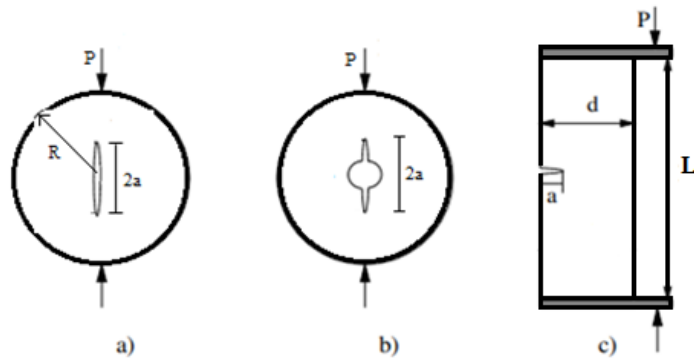


Şekil 3.7. a) çentikli üç noktalı eğilme numunesi b) P-CMOD eğrisi [47].

Pik Yük Metodu

Tang v.d. [50] tarafından önerilen pik yük metodunda komplians metoduna nazaran daha az kapasiteli deney ekipmanlarına ihtiyaç duyulurken bu yöntemde boyutları ve çentik uzunlukları farklı numunelere ait tepe yüklerinin belirlenmesi gerekir. Pik yük metodunda “ya aynı boyutta ancak farklı çentik boylu veya farklı boyutta ancak aynı çentik boyunda olan” iki ya da daha fazla numunenin pik yük değerinin belirlenmesi gerekirken [47,50,51] kırılma parametrelerini hesaplamak için K_{Ic}^s -CTOD_c ilişkisinden yola çıkarak standart sapmanın minimum olduğu değerden yararlanılır [47].

Komplians metodunda kırılma parametreleri yalnızca üç noktalı eğilme kirişleri yardımıyla bulunabilirken, pik-yük metodunda bu tip numunelere ek olarak Şekil 3.8 de görüldüğü gibi çentikli silindirik yarma, boşluklu silindirik yarma ve eksantrik basınca maruz prizmatik numunelerden de yararlanılabilmektedir. Özellikle silindirik şeklindeki numunelerin kullanımı, pik-yük metodunun mevcut yapıların kırılma mekaniğine göre analizini mümkün kılmaktadır [47,50].



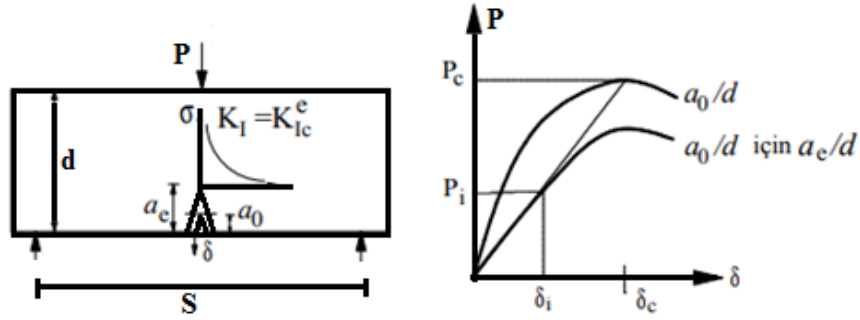
Şekil 3.8. Pik-Yük metodunda kullanılan farklı tip numune şekilleri a) çentikli silindirik yarma, b) boşluklu silindirik yarma, c) eksantrik yüklü çentikli prizma. [47].

3.2.2. Efektif Çatlak Modeli (EÇM)

Betonun kırılmasında efektif çatlak modeli, Nallathambi ve Karihaloo [1986] tarafından iki parametrelili modelin prensiplerine benzer olarak geliştirilmiştir fakat efektif çatlak uzunluğu a_e yükleme-boşaltma eğrisindeki komplanstan hesaplanmaz [52].

Efektif Çatlak Modelinde (EÇM), betonun kırılma parametrelerini hesaplamak için şekil 3.9 da görüldüğü gibi çentikli üç noktalı eğilme numunelerinin yük-deplasman (P - δ) ilişkisini kullanılmaktadır. Bu modelde, belirli bir a_0 başlangıç çatlak uzunluğuna sahip numunenin maksimum yüküne karşılık gelen sekant modülü, farklı bir a_0 başlangıç çatlak uzunluklu kirişin 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 [53].

$$K_I = K_{Ic}^e, a = a_e$$



Şekil 3.9. Efektif çatlak modelinin geometrik yorumu [53].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Arzu edilen nitelikte bir betona ulaşmak için yapılacak ilk iş, betonu oluşturan bileşenlerin seçilmesi, özelliklerin saptanması ve bu bileşenlerin hangi oranda kullanılacaklarının iyi bir şekilde tespit edilmesidir. Beton karışımının üretiminde agrega, çimento, su ve gerek duyulduğunda kullanılacak katkı maddeleri yer alır. Çimentonun beton karışımı içerisinde maliyeti en yüksek malzeme olmasından dolayı, gerekli işlenebilirlik, dayanım vb gibi özelliklerinin yerine getirilmesi şartıyla karışımındaki çimento hamuru ihtiyacının düşürülmesi gerekmektedir. Karışımında yer alacak agreganın dane boyutu dağılımı, işlenebilir bir beton için gerek duyulan çimento hamuru gereksiniminin belirlenmesi yönüyle önemli bir kriter olmaktadır [17,54].

İdeal granülometri: Taze betonun karıştırılması, taşınması, yerine yerleştirme ve sıkıştırılması işlemleri süresince, büyük ve küçük tanelerin ayrışmasına sebep olmayarak, amaçlanan işlenebilirlik ve yoğunluğa ulaşabilmek için gerek duyulan agrega tane boyutu dağılımı şeklinde ifade edilmektedir [54].

Yaptığımız çalışmada agrega dağılımı için Fuller bağıntısından yararlanılmıştır. Fuller parabolünde, p yüzde olarak elekten geçen malzemeyi, d_{max} agreganın en büyük boyutunu, d eleğin boyutunu, n istenen incelik ve kalınlığa göre katsayıyı ifade etmektedir. Fuller bağıntısında en büyük özgül ağırlığa ulaşabilmek amacıyla n katsayısının 0.5 alınmasının uygun olacağı ifade edilmiştir [54].

$$p=100*(d/d_{max})^n \Rightarrow p=\sqrt{\frac{d}{d_{max}}} * 100 \quad (4.1)$$

Agreganın iyi bir tane dağılımına (gradasyona) sahip olup, olmadığına bahsedilen karışımın beton içindeki verimi dikkate alınarak karar verilir

Sunulan tez çalışmasında, sürekli granülometriye sahip ve maksimum agrega çapı $d_{max}=4, 8, 16$ ve 25 mm olan betonlar TS802 (Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları) [16] prensipleri kullanılarak üretilip uygun kür şartlarında 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir.

Beton karışımlar için kullanılan çimento CEMI-42.5N tipi olup yoğunluğu, 3.1 gr/cm^3 tür.

4.1. Karışım Oranları

4.1.1. $d_{max}=4\text{mm}$ için Beton Karışım Oranları

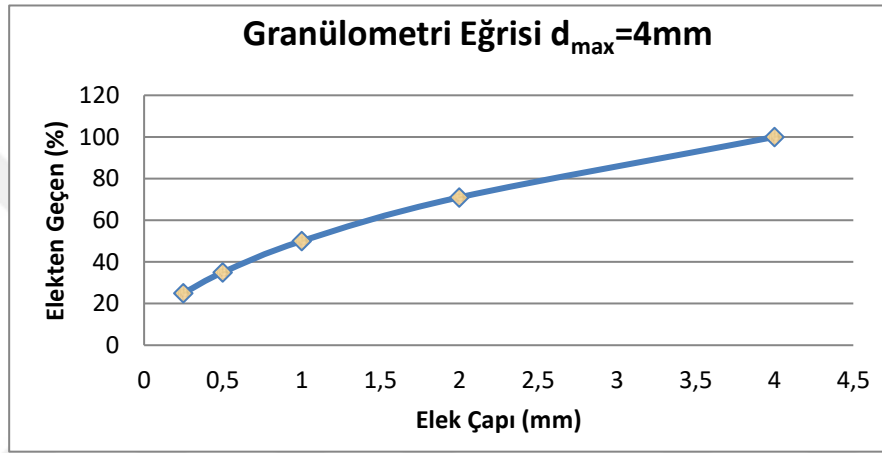
Agrega gradasyonu için denklem (4.2) de verilen fuller bağıntısından yararlanılmıştır.

Fuller bağıntısı yardımıyla $d_{max}=4\text{mm}$ için bulunan değerler tablo 4.1 de bu değerlere ait granülometri eğrisi şekil 4.1 de verilmiştir.

$$\%Geçen = \sqrt{\frac{d}{d_{max}}} * 100 \quad (4.2)$$

Tablo 4.1. $d_{max} = 4\text{mm}$ için bulunan değerler

Elek Açıklığı (mm)	% Geçen
4	100
2	71
1	50
0.5	35
0.25	25



Şekil 4.1. Granülometri eğrisi $d_{max} = 4\text{mm}$

$d_{max} = 4\text{mm}$ için [%70 (0-2)mm %30 (2-4)mm]

su/çimento (s/ç) oranı 0.54 alındı

Çimento dozajı 450kg/m^3 olarak kullanıldı. Hesaplama sonucu su miktarı 243kg/m^3 olarak bulundu.

Hava boşluğu %4, çimentonun yoğunluğu 3.1gr/cm^3 olarak hesaplarda kullanıldı.

Denklem 4.3 de verilen agrega mutlak hacim formülünden yararlanarak uygun granülometrik hesabın karışım oranları Tablo 4.2 de gösterilmiştir.

$$1000 = \frac{C}{\gamma_c} + Su + hava + V_a \quad (4.3)$$

$$1000 = 450/3.1 + 243 + 40 + V_a$$

1000dm^3 betondaki agrega hacmi 572dm^3 olarak bulunur. Özgül ağırlık denkleminde,

(0-2) mm % 70

$$2.74 = m/(572 \times (70/100)) \quad m(0-2) = 1097\text{kg}$$

(2-4) mm % 30

$$2.74 = m/(572 \times (30/100)) \quad m(4-8) = 470\text{kg}$$

Tablo 4.2. $d_{max}=4\text{mm}$ için 35dm^3 ' lük sürekli granülometrilili beton karışım hesabı

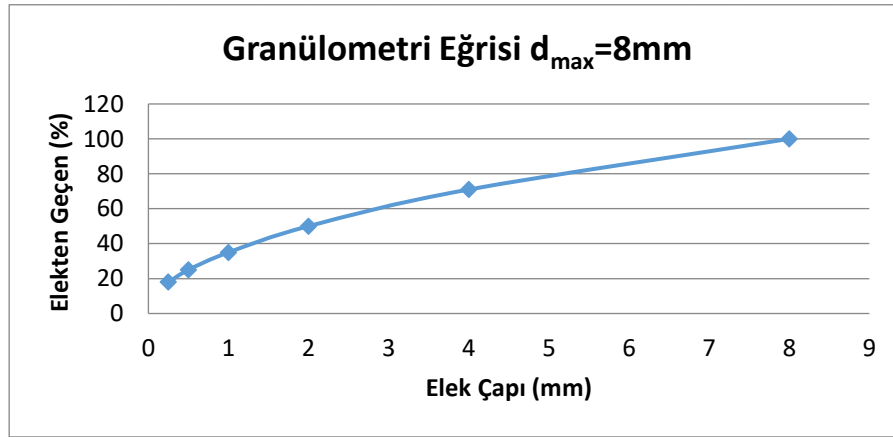
Malzeme Türü	1000 dm3	35 dm3
Çimento	450kg	15.75kg
Su	243kg	8.510kg
(0-2)mm %70	1097kg	38.40kg
(2-4)mm %30	470kg	16.45kg
Toplam	2260kg	79.11kg

4.1.2. $d_{max}=8\text{mm}$ için Karışım Oranları

Agrega gradasyonu için denklem 4.2 de verilen fuller bağıntısından yararlanılarak $d_{max}=8\text{mm}$ için bulunan değerler tablo 4.3 te bu değerlere ait granülometri eğrisi şekil 4.2 de verilmiştir.

Tablo 4.3. $d_{max}=8\text{mm}$ için bulunan değerler

Elek Açıklığı (mm)	% Geçen
8	100
4	71
2	50
1	35
0.5	25
0.25	18



Şekil 4.2. Granülometri eğrisi $d_{max}=8\text{mm}$

$d_{max}=8\text{mm}$ için;

su/çimento oranı 0.55 alındı.

Çimento dozajı $400\text{kg}/\text{m}^3$ olarak kullanıldı. Hesaplama sonucu su miktarı $218\text{kg}/\text{m}^3$ olarak bulundu.

Hava boşluğu %3, çimentonun yoğunluğu $3.1\text{gr}/\text{cm}^3$ olarak hesaplarda kullanıldı.

Denklem 4.3 de verilen agregaya mutlak hacim formülünden yararlanarak uygun granülometrik hesabın karışım oranları Tablo4.4 de gösterilmiştir.

$$1000 = \frac{C}{\gamma_c} + Su + hava + V_a$$

$$1000 = 400/3.1 + 218 + 30 + V_a$$

1000dm³ betondaki agregaya hacmi 623dm³ olarak hesaplanır. Özgül ağırlık denkleminde,

(0-2) mm % 50

$$2.74 = m / (623 \times (50/100))$$

$$m(0-2) = 854\text{kg}$$

(2-4) mm % 20

$$2.74 = m / (623 \times (20/100))$$

$$m(2-4) = 342\text{kg}$$

(4-8) mm % 30

$$2.74 = m / (623 \times (30/100))$$

$$m(4-8) = 512\text{kg}$$

Tablo 4.4. $d_{max} = 8\text{mm}$ için 35dm³ ' lük sürekli granülometrilili beton karışım hesabı

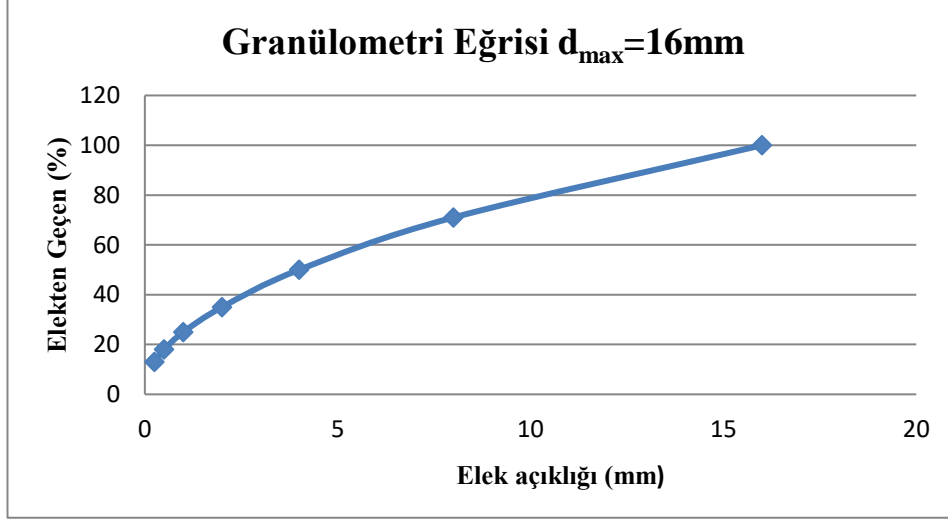
Malzeme Türü	1000 dm ³	35 dm ³
Çimento	400kg	15.75kg
Su	218kg	7.63kg
(0-2)mm %50	854kg	29.89kg
(2-4)mm %20	342kg	11.97kg
(4-8)mm %30	512kg	19.92kg
Toplam	2326kg	81.41kg

4.1.3. $d_{max} = 16\text{mm}$ için Beton Karışım Oranları

Agrega gradasyonu için denklem 4.2 de verilen fuller bağıntısından yararlanılarak $d_{max} = 16\text{mm}$ için bulunan değerler tablo 4.5 de bu değerlere ait granülometri eğrisi şekil 4.3 de gösterilmiştir.

Tablo 4.5. $d_{max} = 16\text{mm}$ için bulunan değerler

Elek Açıklığı	% Geçen
16	100
8	71
4	50
2	35
1	25
0.5	18
0.25	13



Şekil 4.3. Granülometri eğrisi $d_{max}= 16mm$

$d_{max}= 16mm$ için;

su/çimento oranı 0.55 alındı.

Çimento dozajı $350kg/m^3$ olarak kullanıldı. Hesaplama sonucu su miktarı $194kg/m^3$ olarak bulundu.

Hava boşluğu %2.4, çimentonun yoğunluğu $3.1gr/cm^3$ olarak hesaplarda kullanıldı.

Denklem 4.3 de verilen agrega mutlak hacim formülünden yararlanarak uygun granülometrik hesabın karışım oranları Tablo 4.6 da gösterilmiştir

$$1000 = \frac{C}{\gamma_c} + Su + hava + V_a$$

$$1000 = 350/3.1 + 194 + 24 + V_a$$

$1000dm^3$ betondaki agrega hacmi $669dm^3$ olarak bulunur. Özgül ağırlık denkleminde,

(0-2) mm % 35

$$2.74 = m/(669 \times (35/100))$$

$$m(0-2) = 642kg$$

(2-4) mm % 15

$$2.74 = m/(669 \times (15/100))$$

$$m(2-4) = 275kg$$

(4-8) mm % 20

$$2.74 = m/(669 \times (20/100))$$

$$m(4-8) = 367kg$$

(8-16) mm % 30

$$2.74 = m/(669 \times (30/100))$$

$$m(8-16) = 550kg$$

Tablo 4.6. $d_{max}=16\text{mm}$ için 55dm^3 ' lük sürekli granülometrilili beton karışım hesabı

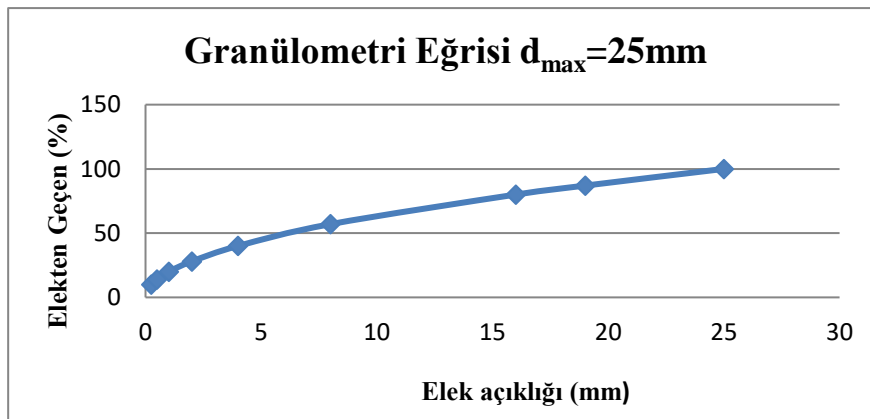
Malzeme Türü	1000 dm3	55 dm3
Çimento	350kg	19.25kg
Su	194kg	10.67kg
(0-2)mm %35	642kg	35.31kg
(2-4)mm %15	275kg	15.13kg
(4-8)mm %20	367kg	20.19kg
(8-16)mm %30	550kg	30.25kg
Toplam	2378kg	130.79kg

4.1.4. $d_{max}=25\text{mm}$ için Beton Karışım Oranları

Agrega gradasyonu için denklem 4.2 de verilen fuller bağıntısından yararlanılarak $d_{max}=25$ mm için bulunan değerler tablo 4.7 de bu değerlere ait granülometri eğrisi şekil 4.4 de sunulmuştur.

Tablo 4.7. $d_{max}=25\text{mm}$ için bulunan değerler

Elek Açıklığı	% Geçen
25	100
19	87
16	80
8	57
4	40
2	28
1	20
0.5	14
0.25	10



Şekil 4.4. Granülometri eğrisi $d_{max}=25\text{mm}$

$d_{max}=25$ mm için;

su/çimento oranı 0.56 alındı.

Çimento dozajı 340kg/m³ olarak kullanıldı. Hesaplama sonucu su miktarı 189kg/m³ olarak bulundu.

Hava boşluğu %1.6, çimentonun yoğunluğu 3.1gr/cm³ olarak hesaplarda kullanıldı.

Denklem 4.3 de verilen agrega mutlak hacim formülünden yararlanarak uygun granülometrik hesabın karışım oranları Tablo 4.8 de gösterilmiştir.

$$1000 = \frac{C}{\gamma_c} + Su + hava + V_a$$

$$1000 = 340/3.1 + 189 + 16 + V_a$$

1000dm³ betondaki agrega hacmi 685dm³ olarak hesaplanır. Özgül ağırlık denkleminde,

(0-2) mm % 30

$$2.74 = m/(685 \times (30/100))$$

$$m(0-2) = 563\text{kg}$$

(2-4) mm % 10

$$2.74 = m/(685 \times (10/100))$$

$$m(2-4) = 188\text{kg}$$

(4-8) mm % 17

$$2.74 = m/(685 \times (17/100))$$

$$m(4-8) = 319\text{kg}$$

(8-16) mm % 23

$$2.74 = m/(685 \times (23/100))$$

$$m(8-16) = 432\text{kg}$$

(16-19) mm % 7

$$2.7 = m/(685 \times (7/100))$$

$$m(16-19) = 129\text{kg}$$

(19-25) mm % 13

$$2.7 = m/(685 \times (13/100))$$

$$m(19-25) = 240\text{kg}$$

Tablo 4.8. $d_{max} = 25\text{mm}$ için 55dm³ ' lük sürekli granülometrilili beton karışım hesabı

Malzeme Türü	1000 dm ³	55 dm ³
Çimento	340kg	18.7kg
Su	189kg	10.4kg
(0-2)mm %30	563kg	31kg
(2-4)mm %10	188kg	10.34kg
(4-8)mm %17	319kg	17.55kg
(8-16)mm %23	432kg	23.76kg
(16-19)mm %7	129kg	7.1kg
(19-25)mm %13	240kg	13.2kg
Toplam	2400kg	132kg

4.2. Numunelerin Hazırlanması

Çalışmamıza uygun olarak hazırlanan plastik ve metal kalıplar (Şekil 4.5) döküm öncesi temizlenmiş ve betonun kalıba yapışmasını engellemek için doldurma öncesinde ince bir tabaka halinde sürülen yağ ile sökümü kolaylaştırılmıştır. Mikserde karıştırılmasının ardından hedeflenen yoğunluğa ulaşan karışımı (Şekil 4.6) kalıplara doldurulduktan sonra tokmak yardımıyla hava kabarcıkları alınmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.5. Plastik ve metal kalıpların doluma hazır hale getirilmesi



Şekil 4.6. Mikserde beton karışımının hazırlanması

Tokmak kullanılarak içerisinde bulunan hava kabarcıklarından arındırılan numuneler 48 saat kalıplarda bekletildikten sonra kalıplardan alınarak Şekil 4.8 de gösterildiği gibi 28 gün uygun kür koşullarında bekletilmiştir. Kırılmadan önce Şekil 4.9 daki gibi çentik açma işlemi uygulanarak çentikli numuneler elde edilmiştir.

28 gün kür havuzunda bekletilen çentikli ve çentiksiz numuneler, kırılmadan 1 saat önce kür havuzundan çıkarılarak kırıma hazır hale getirilen numunelerin yüzeylerine deney cihazına yerleştirilmeden önce numune boyutlarına uygun olarak duralit çubuklar yerleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Beton dökümü sonrası kalıpların görünümü



Şekil 4.8. Numunelerin kür havuzunda görünümü



Şekil 4.9. Çentikli numune oluşturma



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, maksimum agrega çapı 4mm, 8mm, 16mm ve 25mm olan dört farklı beton karışımlar hazırlanmıştır. 28 gün kür havuzunda bekletilen çentikli ve çentiksiz numuneler, kırılmadan 1 saat önce kür havuzundan çıkarılmıştır.

5.1. Çentiksiz Numunelere Ait Deney Sonuçları ve Analizi

Altı adet çentiksiz 100 mm lik küp numunelerin üç adeti basınç, üç adeti de yarma-çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Yarma-çekme deneylerinde, 10 mm genişliğinde ve 10 mm kalınlığında duralit malzemeden elde edilen çubuklarla numuneye yükleme yapılmıştır. Şekil 5.1 ve 5.2 de görüldüğü gibi, basınç ve yarma-çekme numuneleri, maksimum yük kapasitesi 2000 kN olan yük-kontrollü test presinde deneye tabi tutulmuştur. Basınç numunelerinde yükleme hızı 3 kN/s ve yarma-çekme numunelerinde yükleme hızı 0.47 kN/s olarak alınmıştır.



Şekil 5.1. Basınç deneyi



Şekil 5.2. Yarma-çekme deneyi

Tablo 5.1 de, her bir karışım için 100 mm lik küp basınç numunelerine ait kırılma yükleri (P_c), bu yüklere karşılık gelen basınç mukavemeti değerleri (f_{c100}) verilmiştir. Ancak kırılma mekaniği analizlerinde, standart silindir basınç dayanım değerleri kullanıldığından dolayı, 100 mm lik küp basınç mukavemetleri önce 150 mm lik küp mukavemeti değerlerine (f_{c150}) çevirmek için 0.97 çarpanı kullanılmıştır [55]. 150 mm lik küp basınç mukavemet değerlerinin standart silindir basınç mukavemeti (f'_c) değerlerine dönüştürmek için L'Hermite'in [55] aşağıdaki bağıntısı kullanılmıştır.

$$f'_c = \left[0.76 + 0.2 \log \left(\frac{f_{c150}}{19.58} \right) \right] f_{c150} \quad (5.1)$$

Tablo 5.1, de her bir karışım için yukarıda tanımlanan çevrimi yapılmış mukavemet değerlerinin üç numune değeri üzerinden ortalama değerleri verilmiştir. Tablo 5.2 de ise, her bir karışım için 100 mm lik küp yarma-çekme numunelerine ait kırılma yükleri (P_c), bu yüklere karşılık gelen yarma-çekme mukavemeti değerleri (f_{sp}) verilmiştir. Yarma-çekme mukavemet değerleri h küp boyutu olmak üzere Timoshenko [56] tarafından geliştirilen elastisite teorisi tabanlı aşağıdaki formülü kullanılmıştır:

$$f_{sp} = \frac{2P_c}{\pi h^2} \quad (5.2)$$

Tablo 5.1. Karışımların basınç deneyine ait sonuçlar

d_{max} (mm)	P_c (kN)			f_{c100} (MPa)			f_{c150} (MPa)	f'_c (MPa)
	1	2	3	1	2	3		
4	411.1	398.3	408.6	41.11	39.83	40.86	39.38	32.31
8	419.0	385.0	408.1	41.90	38.50	40.81	39.19	32.15
16	547.2	534.2	545.2	54.72	53.42	54.52	52.59	44.48
25	487.2	484.1	478.8	47.72	48.41	47.88	46.56	39.19

Tablo 5.2. Karışımların yarma-çekme deneyine ait sonuçlar

d_{max} (mm)	P_c (kN)			f_{sp} (MPa)
	1	2	3	
4	57.0	55.4	55.4	3.56
8	64.0	62.1	65.2	4.06
16	64.9	64.6	63.9	4.10
25	69.4	68.7	71.4	4.45

5.2. Çentikli Numunelere Ait Deneysel Sonuçları

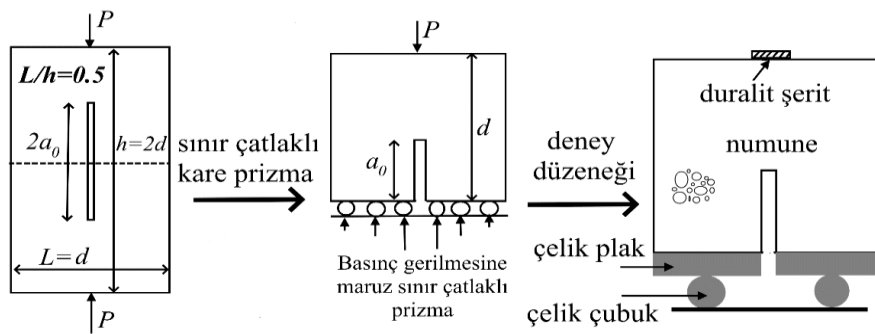
5.2.1. Maksimum Agrega Çapı 4 ve 8 mm Olan Numunelere Ait Deneysel Sonuçları

Son yıllarda betonun kırılma parametrelerini tayin etmek için, kübik veya silindirik kompakt numunelerin kullanımı artmaktadır. Sınır çatlaklı kompakt yarma-çekme deneyi, şimdiye kadar sadece İnce [57,58] tarafından maksimum agrega çapı 4 mm olan 100 mm kübik beton numuneler üzerine uygulanmıştır. Sunulan tez çalışmasının amacı, Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, bu tip numunelerin kare prizmatik numune şeklinde üretilmesi ve bunların uygulama potansiyelinin araştırılmasıdır. Dane çapı küçük olan karışımlarda (4 ve 8 mm), bu tip numunelerin uygulama potansiyelini tespit etmek için hem çentikli kiriş numuneler hem de genişliği 50 mm ve karakteristik boyu $d=100$ mm kare prizmatik numuneler kullanılmıştır.

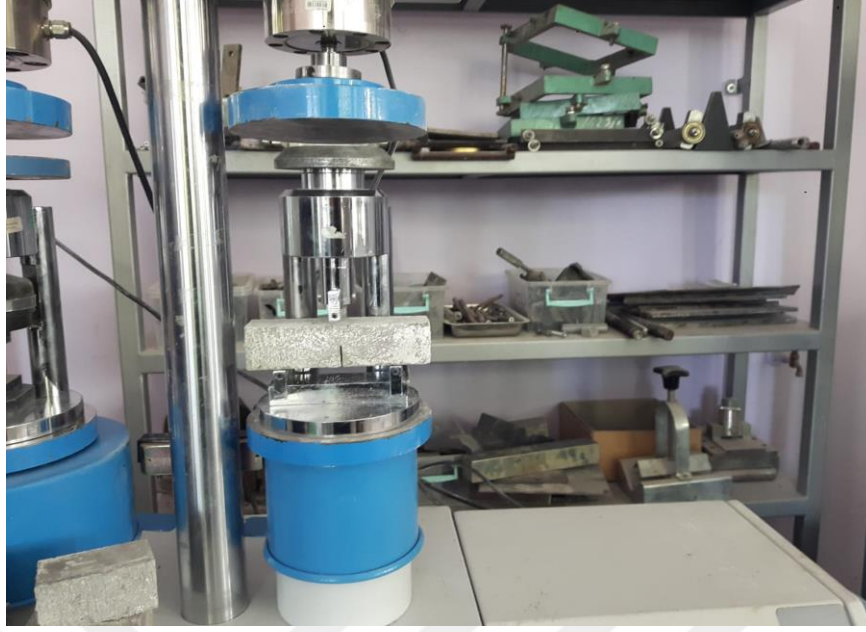
Kiriş numuneler için çimento kalıp numuneleri kullanılmıştır ($40 \times 40 \times 160$ mm³). Toplam dokuz adet dökülen kirişlere her birinden üçer adet olmak üzere çentik genişlikleri 1 mm kalınlığında ve 10, 15 ve 20 mm yüksekliğinde çentikler elmas testere ile açılmıştır. Kirişler tıpkı çimento eğilme numunelerinin testinde olduğu gibi yükleme açıklığı/karakteristik boyut= $S/d=2.5$ olacak şekilde Şekil 5.4'te detaylandırıldığı gibi teste tabi tutulmuştur. Numuneler, maksimum yükleme kapasitesi 20 kN olan yük-kontrollü deney presinde, maksimum yüke 3 dk. \pm 30 s de erişecek şekilde yüklenmiştir. Tablo 5.3'te, 4 ve 8 mm karışımlar için kiriş numunelerine ait kırılma yükleri (P_c), bu yüklere karşılık gelen eğilme-çekme mukavemeti değerleri (f_r) verilmiştir. Eğilme-çekme mukavemet değerleri d kiriş boyutu olmak üzere aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$f_r = 3.75 \frac{P_c}{d^2} \quad (5.3)$$

Tablo 5.3'te aynı zamanda kirişlerin ortalama eğilme-çekme dayanımları her bir agrega boyutu ve çentik boyu için son sütunda verilmiştir.



Şekil 5.3. Kare prizmatik yarma-çekme deneyi [57,58]



Şekil 5.4. Çentikli kiriş numunelerin deney düzeneği

Tablo 5.3. 4 ve 8 mm lik karışımların eğilme deneyine ait sonuçlar

d_{max} (mm)	a_0 (mm)	P_c (kN)			f_r (MPa)			Ort. f_r (MPa)
		1	2	3	1	2	3	
4	10	1.57	1.64	1.68	3.680	3.844	3.938	3.820
	15	1.72	1.29	1.25	4.031	3.023	2.930	3.328
	20	0.89	0.80	0.90	2.086	1.875	2.109	2.023
8	10	1.85	1.73	1.82	4.336	4.055	4.266	4.219
	15	1.23	1.44	1.33	2.883	3.375	3.117	3.125
	20	0.90	0.79	0.98	2.109	1.852	2.297	2.086

Kare prizmatik çentikli numuneler, toplam dokuz adet dökülmüş ve her birinden üçer adet olmak üzere çentik genişlikleri 2 mm kalınlığında ve 30, 40 ve 50 mm yüksekliğinde çentikler elmas testere ile açılmıştır. Numuneler Şekil 5.5'te detaylandırıldığı gibi yarma-çekme testine tabi tutulmuştur. Yarma-çekme deneylerinde, Şekil 5.5'te görüldüğü gibi 10 mm genişliğinde ve 10 mm kalınlığında duralit malzemeden elde edilen çubuklar kullanılarak numunelere yükleme yapılmıştır.

Şekil 5.3'te detaylandırıldığı gibi, numunelerin alt yüzündeki sınır koşulları temin etmek amacıyla her biri 4 adet rulmandan oluşan iki rijit kayarlı ekipman kullanılmıştır. Numuneler, maksimum yükleme kapasitesi 200 kN olan yük-kontrollü deney presinde maksimum yüke 3 dk.±30 s de erişecek şekilde yüklenmiştir. Tablo 5.4'te, 4 ve 8 mm karışımlar için kare prizmatik numunelerine ait kırılma yükleri (P_c), bu yüklere karşılık gelen yarma-çekme mukavemeti değerleri (f_{sp}) verilmiştir. Burada çentikli kare-prizmatik numunelerin yarmada çekme dayanımı için formül 5.2 kullanılmıştır. Tablo 5.4'te aynı zamanda numunelerin ortalama yarma-çekme dayanımları her bir agrega boyutu ve çentik boyu için son sütunda verilmiştir.

Şekil 5.6 ve 5.7 de, sırasıyla 4 ve 8 mm lik karışımlarda kullanılan basınç, çentiksiz yarma-çekme, çentikli kiriş ve çentikli yarma-çekme numunelerine ait kırılma yüzey detayları topluca verilmiştir. Çentiksiz yarma-çekme ve kiriş numunelerinde simetrik bir kırılma durumu gözlenirken, çentikli yarma-çekme deneylerinde nispeten simetrinin biraz bozulduğu bu şekillerden görülmektedir.



Şekil 5.5. Çentikli kare-prizmatik numunelerin deney düzeneği

Tablo 5.4. 4 ve 8 mm lik karışımların kare-prizmatik yarma-çekme deneyine ait sonuçlar

d_{max} (mm)	a_0 (mm)	P_c (kN)			f_{sp} (MPa)			Ort. f_{sp} (MPa)
		1	2	3	1	2	3	
4	30	8.40	8.00	-	1.680	1.600	-	1.640
	40	7.13	7.20	-	1.426	1.440	-	1.433
	50	5.01	6.33	-	1.002	1.266	-	1.134
8	30	7.50	8.90	8.20	1.500	1.780	1.640	1.640
	40	7.28	7.18	7.54	1.456	1.436	1.508	1.467
	50	6.38	5.53	7.09	1.276	1.106	1.418	1.267



Şekil 5.6. 4 mm lik karışımlarda kullanılan kırılmış numuneler



Şekil 5.7. 8 mm lik karışımlarda kullanılan kırılmış numuneler

5.2.2. Maksimum Agrega Çapı 16 Ve 25 mm Olan Numunelere Ait Deney Sonuçları

İri daneli karışımlarda, sadece çentikli kare prizmatik numuneler dökülmüştür. 16 mm lik karışımlarda 100 mm lik küpler kullanılırken, 25 mm lik karışımlarda 100 mm genişliğinde ve karakteristik boyutu $d=150$ mm olan numuneler kullanılmıştır. 100 mm lik küplerden toplam on iki adet dökülmüş ve her birinden dört adet olmak üzere çentik genişlikleri 2 mm kalınlığında ve 30, 40 ve 50 mm yüksekliğinde çentikler elmas testere ile açılmıştır. 25 mm dane çaplı karışımlarda ise, toplam altı adet dökülmüş ve her birinden iki adet olmak üzere çentik genişlikleri 3 mm kalınlığında ve 45, 60 ve 75 mm yüksekliğinde çentikler elmas testere ile açılmıştır.

Şekil 5.8 te görüldüğü gibi, 100 mm lik çentikli küplere, 10 mm genişliğinde ve 10 mm kalınlığında duralit malzemenen elde edilen çubuklar kullanılarak yükleme yapılmıştır. Diğer taraftan karakteristik boyutu $d=150$ mm olan kare-prizmatik çentikli numunelerde ise, Şekil 5.8 de görüldüğü gibi, 15 mm genişliğinde ve 3 mm kalınlığında duralit levhalar kullanılarak yarma-

çekme yüklemesi yapılmıştır. Yukarıda bahsedilen tüm yarma-çekme deneylerinde kullanılan duralit çubuk ve levhalar çentiği tam merkezleyecek şekilde numuneye monte edilmiş olup duralit boyları numune genişliğini her iki taraftan 10 mm taşacak şekilde sabitlenmiştir. Şekil 5.8 ve 5.9 da detaylandırıldığı gibi, numunelerin alt yüzündeki sınır koşulları temin etmek amacıyla her biri 4 adet rulmandan oluşan iki rijit kayarlı ekipman kullanılmıştır. Numuneler, maksimum yüklemeye kapasitesi 2000 kN olan yük-kontrollü deney presinde maksimum yüke 3 dk.±30 s de erişecek şekilde yüklenmiştir.



Şekil 5.8. 16 mm dane çaplı çentikli kübik numunelerin deney düzeneği



Şekil 5.9. Çentikli 150 mm'lik kare-prizmatik numunelerin deney düzeneği

Tablo 5.5 te, 16 ve 25 mm karışımlar için, sırasıyla küp ve kare prizmatik numunelerine ait kırılma yükleri (P_c), bu yüklere karşılık gelen yarma-çekme mukavemeti değerleri (f_{sp}) verilmiştir. Burada çentikli küp ve kare-prizmatik numunelerin yarmada çekme dayanımı için yine yukarıda

tanımlanan İfade 5.2 kullanılmıştır. Tablo 5.5 te aynı zamanda numunelerin ortalama yarma-çekme dayanımları her bir agrega boyutu ve çentik boyu için son sütunda verilmiştir

Tablo 5.5. 16 ve 25 mm'lik karışımların kare-prizmatik yarma-çekme deneyine ait sonuçlar

d_{max} (mm)	a_0 (mm)	P_c (kN)				f_{sp} (MPa)				Ort. f_{sp} (MPa)
		1	2	3	4	1	2	3	4	
4	30	24.8	30.3	23.0	21.2	2.480	3.030	2.300	2.120	2.483
	40	18.4	17.9	23.3	20.4	1.840	1.790	2.330	2.040	2.000
	50	12.1	12.9	11.8	12.0	1.210	1.290	1.180	1.200	1.220
8	45	43.9	42.7	-	-	2.927	2.847	-	-	2.887
	60	32.5	33.8	-	-	2.167	2.253	-	-	2.210
	75	23.5	19.2	-	-	1.567	1.280	-	-	1.423

Şekil 5.10 ve 5.11 de, sırasıyla 16 ve 25 mm lik karışımlarda kullanılan basınç, çentiksiz yarma-çekme ve çentikli yarma-çekme numunelerine ait kırılma yüzey detayları topluca verilmiştir. İnce daneli karışımlara benzer olarak, 16 mm ve 25 mm lik karışımlarda da çentiksiz yarma-çekme numunelerinde simetrik bir kırılma durumu gözlenirken, çentikli yarma-çekme deneylerinde nispeten simetrisinin biraz bozulduğu bu şekillerden görülmektedir



Şekil 5.10. 16 mm'lik karışımlarda kullanılan kırılmış 100 mm lik küp numuneler



Şekil 5.11. 25 mm'lik karışımlarda kullanılan kırılmış numuneler

5.3. Çentikli Numunelerin Lineer Olmayan Kırılma Mekanikğine Göre Analizleri

5.3.1. Çentikli Kirişlerin Efektif Çatlak Yaklaşımına Göre Analizleri

Efektif çatlak modelinin [12] ilk uygulamaları sadece kiriş numuneler üzerine olmuştur. Bununla beraber son zamanlarda, İnce ve Bildik [59] bu yaklaşımın aynı zamanda kompakt-çekme veya betonun kırılma mekaniğinde daha kullanışlı bir numune şekli olan kama-yarma numunelerine güvenilir bir şekilde uygulanabilirliği Abrams Kanunu tabanlı analizlerinde göstermişlerdir. Bu yöntem, orijinal olarak kapalı devre ekipmanı kullanılarak kiriş numunenin efektif çatlak boyunun (veya kritik çatlak boyu) hesabı yapılarak malzemenin kırılma tokluğunun hesabı üzerine dayanmaktadır. Bununla beraber bu yöntemin çok daha pratik bir yaklaşımı aşağıda tanımlanan relatif efektif çatlak boyu hesaplanarak ta bulunabilir:

$$\frac{a_e}{d} = 0.088 \left(\frac{\sigma_{Nc}}{E_c} \right)^{-0.208} \left(\frac{a_0}{d} \right)^{0.451} \left(1 + \frac{d_{max}}{d} \right)^{1.653} \quad (5.4)$$

Burada σ_{Nc} , nominal eğilme dayanımı olup bu tez çalışması için İfade (5.3) te tanımlanan f_t değeri ile aynıdır. İfade (5.4) deki E_c betonun elastisite modülü betonun basınç mukavemetine bağlı olarak ACI-318 e göre aşağıdaki gibi hesaplanabilir [60]:

$$E_c = 4734 \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad (5.5)$$

Sonuç olarak betonun lineer olmayan kırılma tokluğu parametresi aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$K_{Ic}^e = \sigma_{Nc} \sqrt{a_e} Y(\alpha_e = a_e/d) \quad (5.6)$$

Burada $Y(a_e)$ şekil kiriş numunenin şekil fonksiyonu olup yükleme açıklığı/karakteristik boyut= S/d oranı 2.5 olan numuneler için aşağıda gösterildiği şekilde tayin edilebilir [50]:

$$Y(\alpha) = \frac{1.83 - 1.65\alpha + 4.76\alpha^2 - 5.3\alpha^3 + 2.51\alpha^4}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \quad (5.7)$$

Tablo 5.3 deki verilere bağlı olarak bu çalışmada kullanılan kirişlerin efektif çatlak modeline göre analiz sonuçları Tablo 5.6 da verilmiştir.

Tablo 5.6. Kiriş numunelerin efektif çatlak modeline göre analizi

d_{max} (mm)	f'_c (MPa)	$\sigma_{Nc} = f_r$ (MPa)	a_0 (mm)	α_0	a_e (mm)	α_e	Y	K_{Ic}^e (MPa√m)
4	32.31	3.680	10	0.250	14.03	0.351	3.263	0.802
		3.844	10	0.250	13.90	0.348	3.251	0.831
		3.938	10	0.250	13.83	0.346	3.244	0.848
		4.031	15	0.375	16.53	0.413	3.562	1.042
		3.023	15	0.375	17.55	0.439	3.718	0.840
		2.930	15	0.375	17.66	0.442	3.737	0.821
		2.086	20	0.500	21.58	0.540	4.607	0.797
		1.875	20	0.500	22.07	0.552	4.752	0.747
		2.109	20	0.500	21.53	0.538	4.592	0.802
8	32.15	4.336	10	0.250	15.65	0.391	3.444	1.054
		4.055	10	0.250	15.87	0.397	3.473	1.001
		4.266	10	0.250	15.70	0.393	3.451	1.041
		2.883	15	0.375	20.45	0.511	4.305	1.001
		3.375	15	0.375	19.79	0.495	4.150	1.112
		3.117	15	0.375	20.12	0.503	4.226	1.054
		2.109	20	0.500	24.85	0.621	5.840	1.096
		1.852	20	0.500	25.53	0.638	6.193	1.034
		2.297	20	0.500	24.42	0.610	5.635	1.141

5.3.2. Çentikli Numunelerin İki Parametrelili Model Yaklaşımına Göre Analizleri

İki parametrelili kırılma modelinin [11] ilk uygulamaları sadece kiriş numuneler üzerine olmuştur. Bununla beraber son zamanlarda, aynı zamanda kübik veya silindirik yarma-çekme numuneleri, kompakt-çekme numunesi veya betonun kırılma mekaniğinde daha kullanışlı bir numune şekli olan kama-yarma numunelerine güvenilir bir şekilde uygulanabilirliği birçok araştırmada gösterilmiştir. Bu yöntem, orijinal olarak efektif çatlak modeline benzer olarak kapalı devre ekipmanı kullanılarak kiriş numunenin kritik çatlak boyunun hesabı yapılarak malzemenin

kırılma tokluğu ve kritik çatlak ucu açılımı gibi iki kritik parametrenin hesabına dayanmaktadır. Bununla beraber bu yöntemin çok daha pratik bir yaklaşımı pik-yük metodu olup tamamen istatistiksel çıkarımlara dayanan bir yol kullanılarak yukarıda bahsedilen kırılma parametrelerini tayin etmek mümkündür.

Pik-yük metoduna göre ilk önce, her bir başlangıç çatlak boyuna karşılık gelen ortalama gerilmeler kullanılarak farklı a_c kritik çatlak boyu değerleri için kırılma tokluğu ve kritik çatlak ucu açılımı değerlerine ait eğriler ($K_{Ic}^s - CTOD_c$) çizilir. Daha sonra bu eğrilerin ortalaması alınarak elde edilen her bir a_c değeri için ortalama $K_{Ic}^s - CTOD_c$ eğrisi çizilir. Ardından her bir bireysel numune değeri ile ortalama eğri arasında aşağıda tanımlanan standart sapma değerleri hesaplanır:

$$s(K_{Ic}^s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(CTOD_c)^{ort} - (CTOD_c)^i]^2}{n-1}} \quad (5.8)$$

Burada i , i . grup numuneyi ve n ise grup sayısını temsil etmektedir. Sonuç olarak standart sapmanın minimum olduğu s_{min} değerine karşılık gelen K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ değerleri betonun iki parametrelili modele göre kırılma parametreleri olduğu kabul edilir.

İki parametrelili kırılma modeline göre kırılma tokluğu ve kritik çatlak ucu açılımına ait formüller aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$K_{Ic}^s = \sigma_{Nc} \sqrt{\pi a_c} Y(\alpha_c = a_c/d) \quad (5.9)$$

$$CTOD_c = \frac{k \sigma_{Nc} a_c}{E_c} V_1(\alpha_c) M(\alpha_c) \quad (5.10)$$

Burada Y , V_1 ve M numuneye ait lineer elastik kırılma mekaniği fonksiyonları olup, ilgili literatürden temin edilebilir. İfade (5.10) daki k değeri kiriş numuneler için 4 yarma çekme numuneleri için π alınır. Elastisite modülü için yine İfade (5.5) tanımlanan ACI-318 in formülünü bu yöntemde de kullanmak mümkündür. Yukarıdaki bilgilerin ışığında bu çalışmada kullanılan numunelere ait şekil fonksiyonları aşağıda verilmiştir. Kirişler için [50]:

$$Y(\alpha) = \frac{1.83 - 1.65\alpha + 4.76\alpha^2 - 5.3\alpha^3 + 2.51\alpha^4}{\sqrt{\pi} (1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (5.11)$$

$$V_1(\alpha) = 0.65 - 1.88\alpha + 3.02\alpha^2 - 2.69\alpha^3 + \frac{0.68}{(1-\alpha)^2} \quad (5.12)$$

$$M = \frac{COD(y)}{CMOD} = \sqrt{\left(1 - \frac{y}{a}\right)^2 + (1.081 - 1.149\alpha) \left[\frac{y}{a} - \left(\frac{y}{a}\right)^2\right]} \quad (5.13)$$

Yükleme şerit genişliği/karakteristik boyut=0.05 olan çentikli kare prizmatik numuneler için [58,59]:

$$Y(\alpha) = 0.3731 + 0.6376\alpha + 0.727\alpha^2 + 3.2919\alpha^3 \quad (5.11)$$

$$V_1(\alpha) = 0.3739 + 2.6526\alpha - 8.4442\alpha^2 + 17.1878\alpha^3 \quad (5.12)$$

$$M = \frac{COD(y)}{CMOD} = \sqrt{\left(1 - \frac{y}{a}\right)^2 + (2.405 - 1.566\alpha) \left[\frac{y}{a} - \left(\frac{y}{a}\right)^2\right]} \quad (5.13)$$

Tablo 5.7 de, bu çalışmada yapılan çentikli numune deney sonuçlarının pik-yük metodunda kullanılacak verileri toplu olarak gösterilmiştir. Burada karışımlar C harfi ile ifade edilmiş yayınındaki rakamlar ise maksimum agrega çapını göstermektedir. Tablonun ikinci sütununda numune tipi (kiriş veya kare prizmatik numune) verilmiştir. Üçüncü sütununda betonun mukavemetine bağlı olarak İfade (5.5) e göre hesaplanan elastisite modülü (E_c) değerleri verilmiştir. Dördüncü sütunda numune karakteristik boyutu (d) belirtilmiştir. Bu çalışmada, her bir karışım ve numune tipi için 3 farklı çentik boyu dikkate alındığından Tablo 5.7 nin beşinci sütununda grup numarası (i) ve bunlara karşılık gelen relatif çentik boyları (α_0) ve ardından nominal dayanım değerleri (σ_{Nc}) sırasıyla verilmiştir. C4 ve C8 karışımlarının efektif çatlak modeline göre hesaplanan kırılma tokluğu değerlerinin aralıkları (K_{lc}^e) sekizinci sütunda karşılaştırma yapmak için özetlenmiştir.

Şekil 5.12 ve 5.13 te C4 karışımı için sırasıyla kiriş ve kare prizmatik numunelere ait pik-yük metodunun uygulaması verilmiştir. Benzer bir uygulama aynı zamanda C8 karışımı için Şekil 5.14 ve 5.15 te detaylandırılmıştır. C16 ve C25 karışımlarına ait kare-prizmatik numuneler için pik yük metodunun uygulaması sırasıyla Şekil 5.16 ve 5.17 de verilmiştir. Tablo 5.7 nin son iki sütununda pik-yük metodundan elde edilen iki parametrelili kırılma modeline ait kırılma parametrelerinin (K_{lc}^s ve $CTOD_c$) toplu sonuçları sunulmuştur.

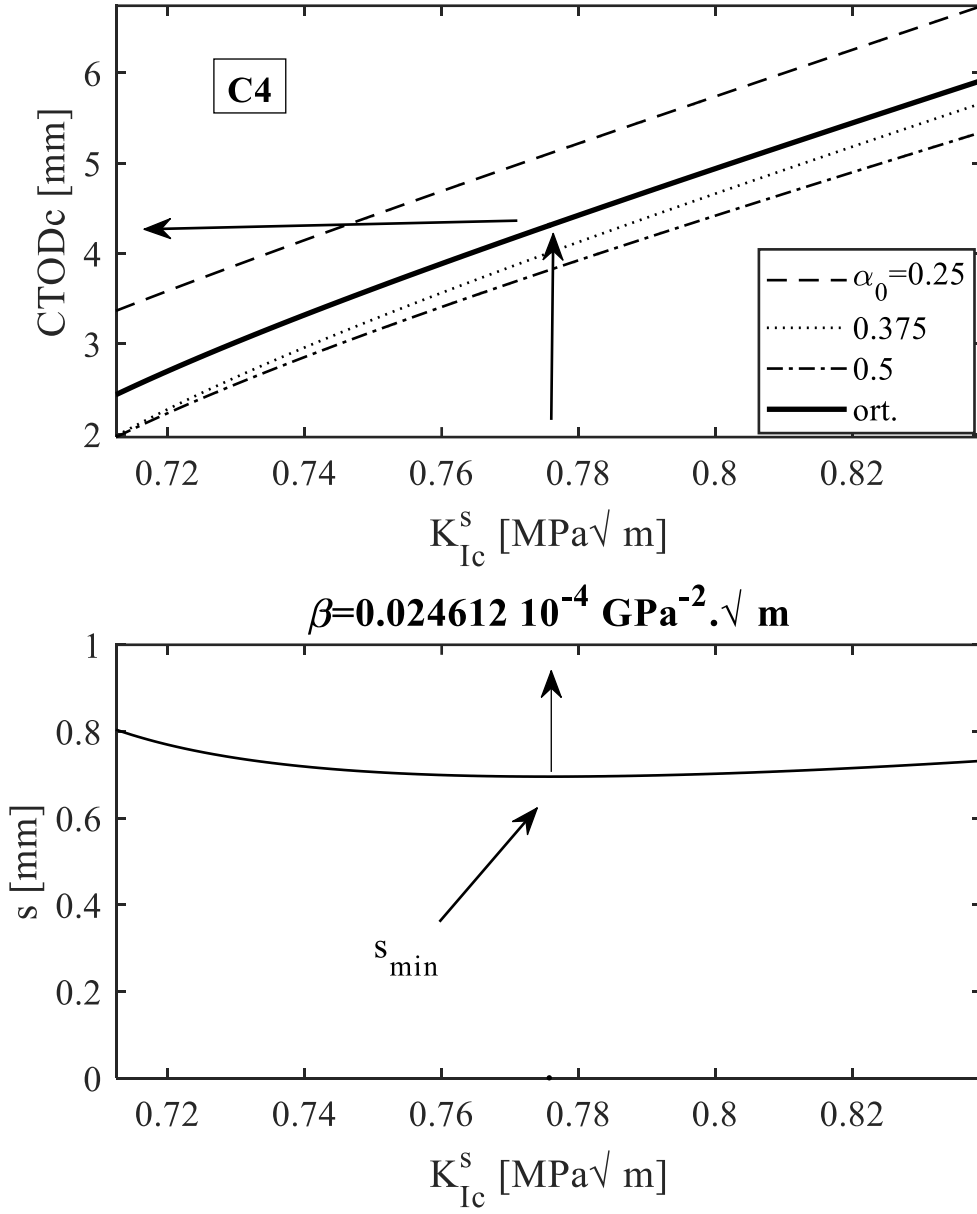
Tablo 5.7 de görüldüğü gibi literatürdeki verilere paralel olarak efektif çatlak çatlak modeline göre hesaplanan kırılma tokluğu değerleri (K_{lc}^e) iki parametrelili modele göre elde edilen kırılma tokluğu parametresinden (K_{lc}^s) biraz büyük olmaktadır. Diğer taraftan C4 ve C8 karışımları

dikkate alındığında, kiriş numunelerinin kırılma tokluk parametresi (K_{Ic}^s) kare-prizmatik numunelerinden biraz büyük olmakla beraber, kritik çatlak ucu açılımı değerleri ($CTOD_c$) için durum tam tersi olduğu gözlenmektedir. Buna beraber, numune karşılaştırmasında daha güvenilir sonuçlara varabilmek için daha kapsamlı deneylerin yapılması gereklidir.

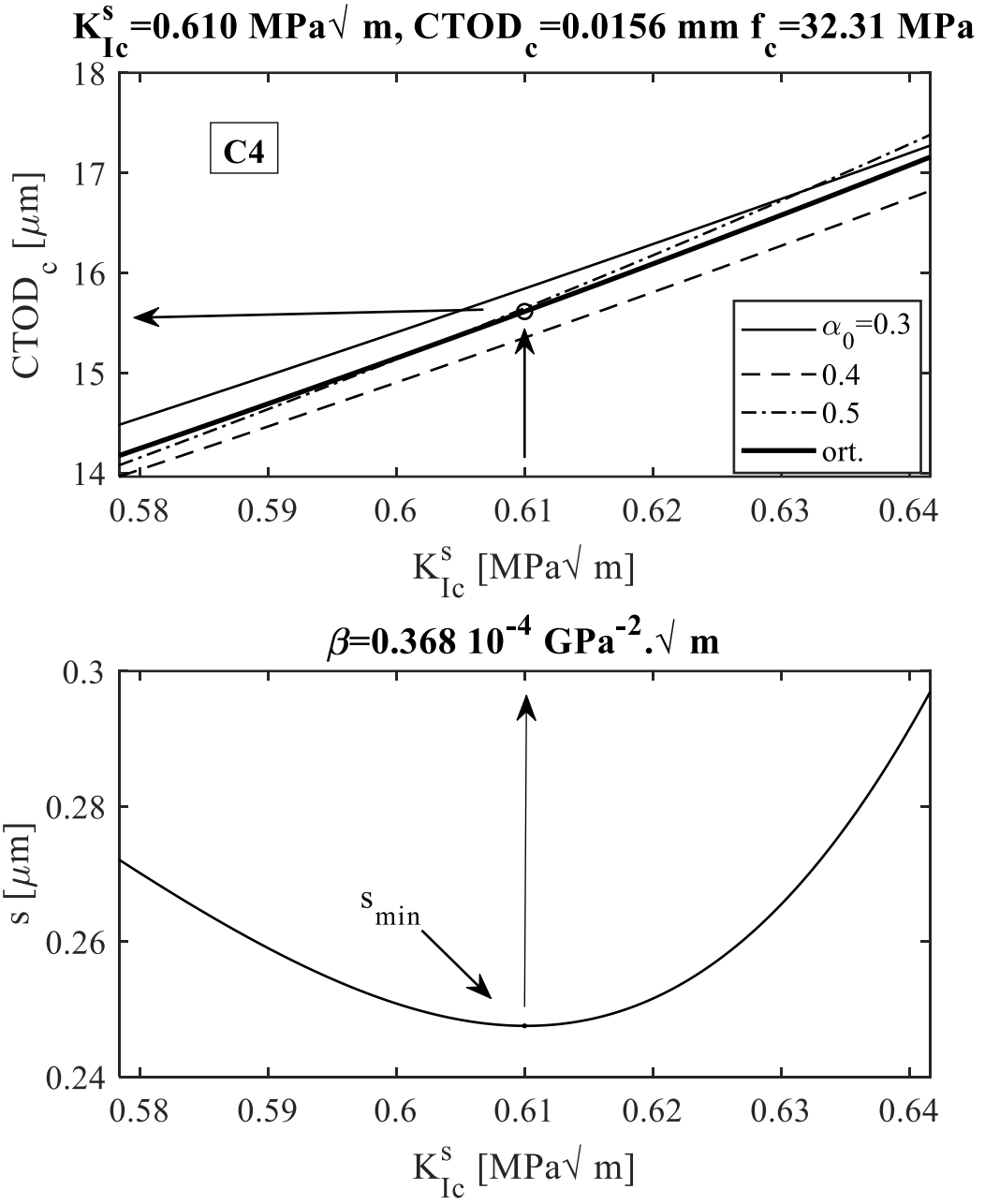
Tablo 5.7. Çentikli numunelerin kırılma mekaniği analizi sonuçları

Seri	Numune	E_c (GPa)	d (mm)	i	α_0	σ_{Nc} (MPa)	K_{Ic}^e (MPa \sqrt{m})	K_{Ic}^s (MPa \sqrt{m})	$CTOD_c$ (mm)
C4	Kiriş	26.91	40	1	0.250	3.867	0.747-1.042	0.776	0.0043
				2	0.375	3.094			
				3	0.500	2.003			
C8	Kiriş	26.84	40	1	0.250	4.180	1.001-1.141	0.842	0.0050
				2	0.375	3.206			
				3	0.500	2.078			
C4	Kare-priz.	26.91	100	1	0.3	1.640	-	0.610	0.0156
				2	0.4	1.433			
				3	0.5	1.134			
C8	Kare-priz.	26.84	100	1	0.3	1.640	-	0.808	0.0261
				2	0.4	1.467			
				3	0.5	1.267			
C16	Kare-priz.	31.57	100	1	0.3	2.483	-	0.930	0.0207
				2	0.4	2.000			
				3	0.5	1.220			
C25	Kare-priz.	29.64	150	1	0.3	2.887	-	1.273	0.0376
				2	0.4	2.210			
				3	0.5	1.423			

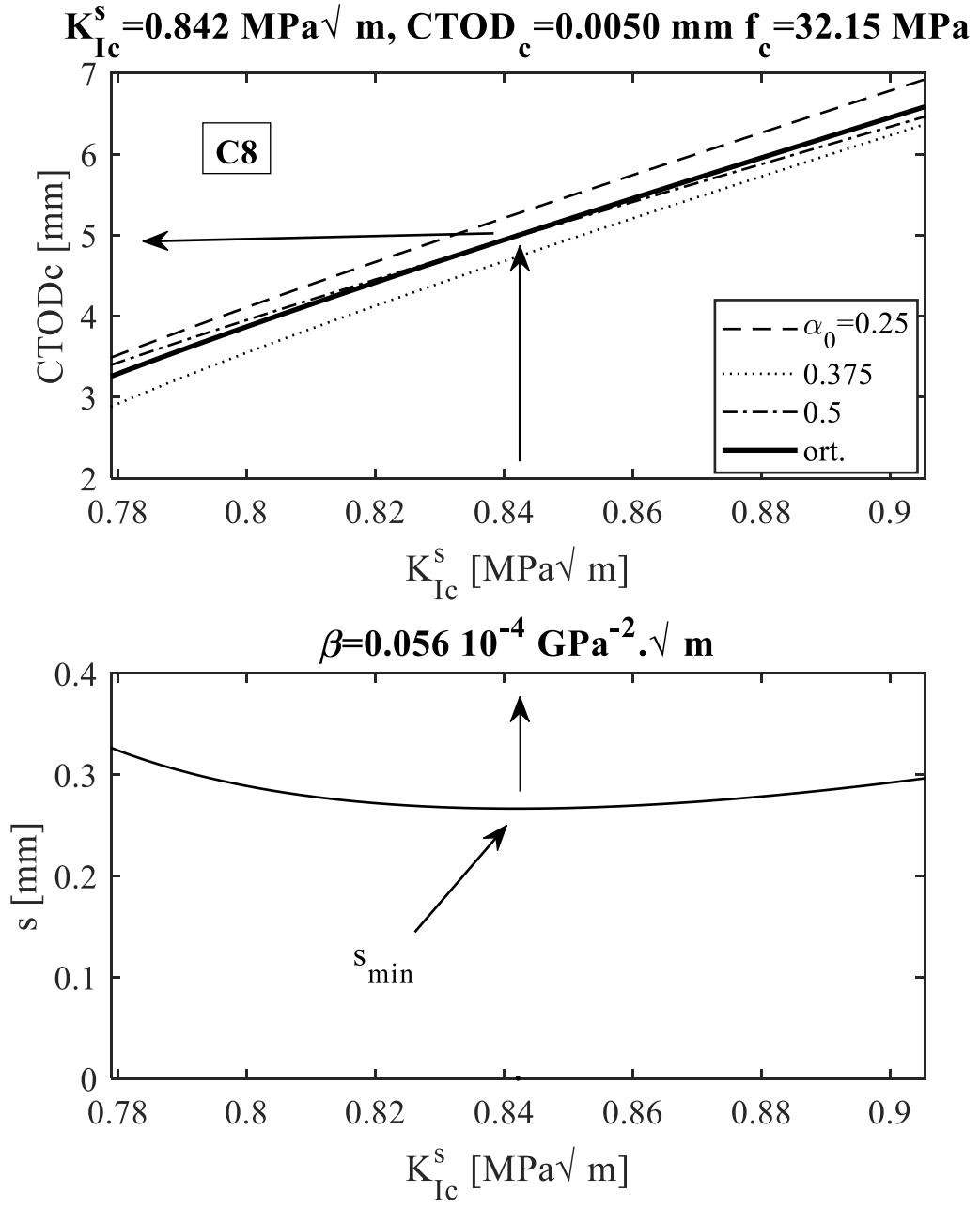
$K_{Ic}^s = 0.776 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $CTOD_c = 0.0043 \text{ mm}$ $f_c = 32.31 \text{ MPa}$



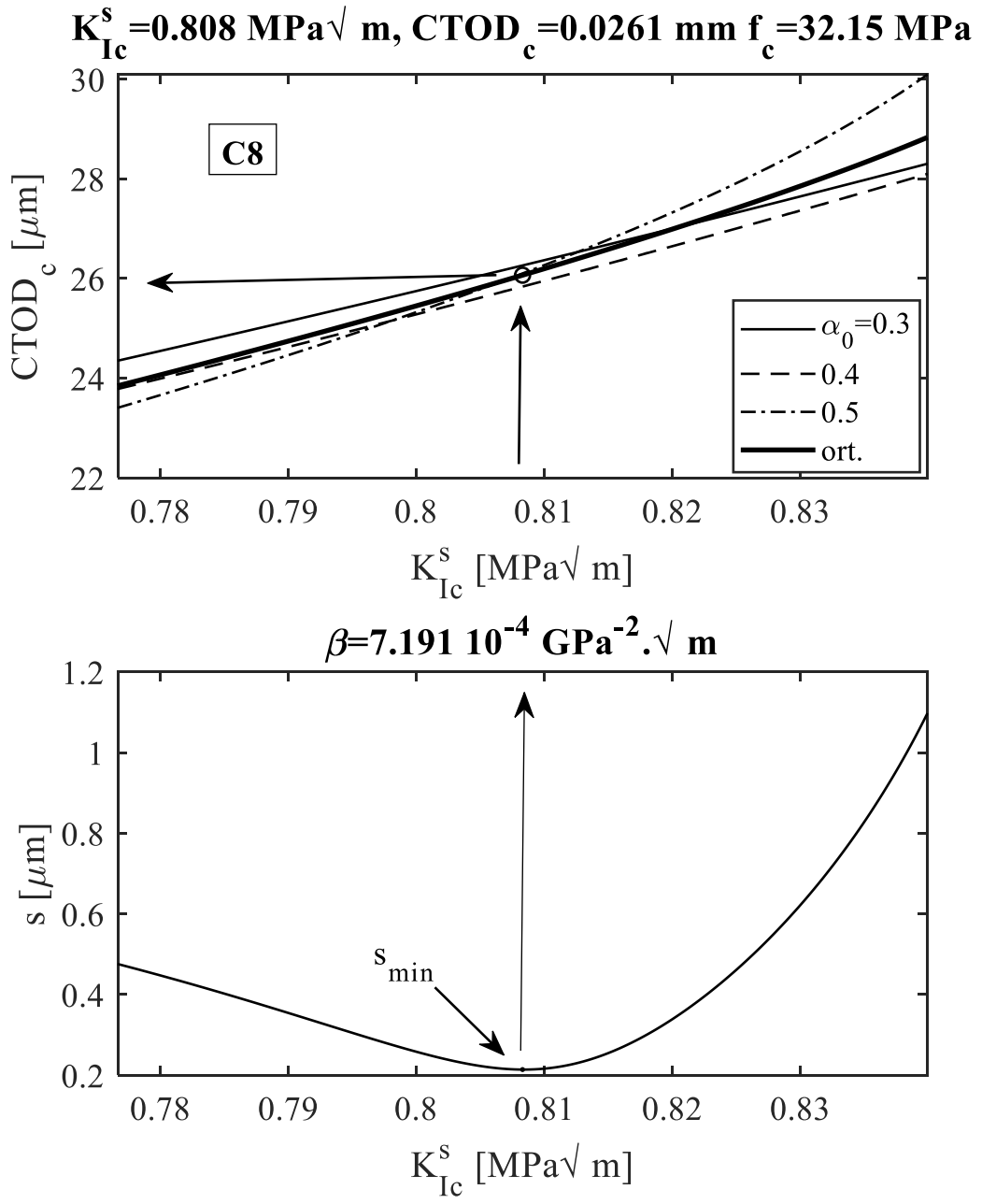
Şekil 5.12. Maksimum agrega çapı 4mm olan kiriş numunelere pik-yük metodunun uygulaması



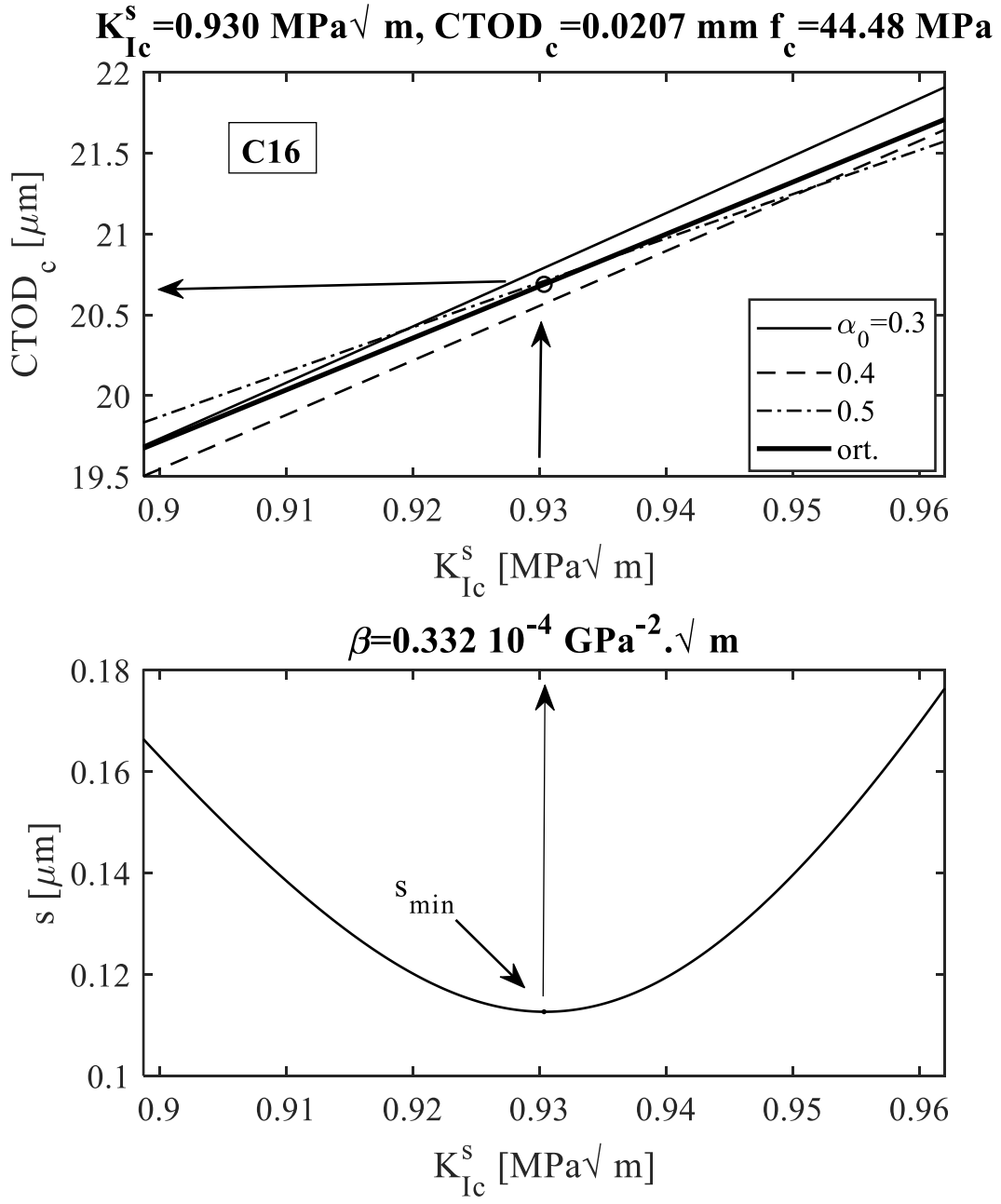
Şekil 5.13. Maksimum agrega çapı 4mm olan sınır çatlaklı kare prizmatik numunelere pik-yük metodunun uygulaması



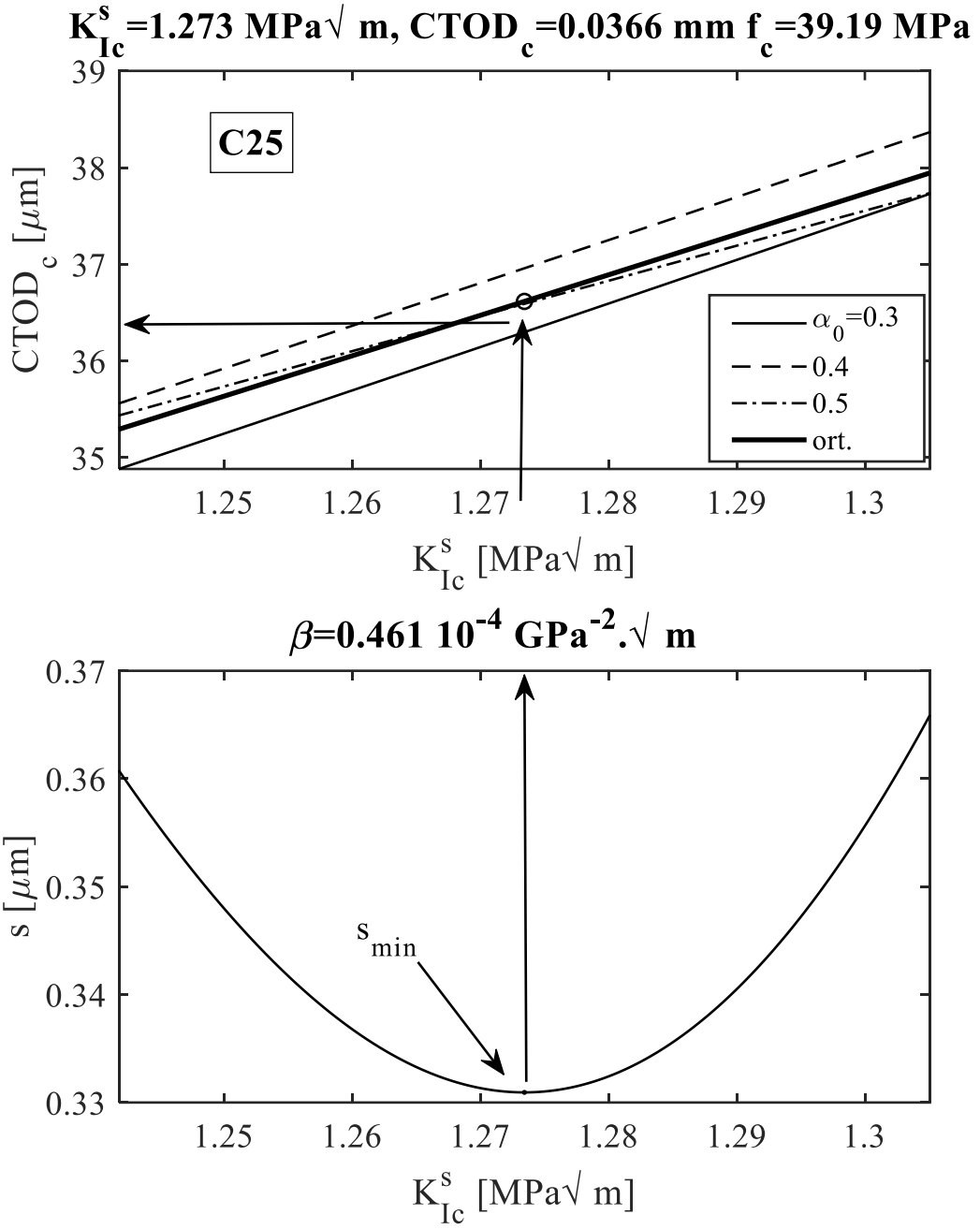
Şekil 5.14. Maksimum agrega çapı 8mm olan kiriş numunelere pik-yük metodunun uygulaması



Şekil 5.15. Maksimum agrega çapı 8mm olan sınır çatlaklı kare prizmatik numunelere pik-yük metodunun uygulaması



Şekil 5.16. Maksimum agrega çapı 16mm olan sınır çatlaklı kübik numunelere (100 mm) pik-yük metodunun uygulaması



Şekil 5.17. Maksimum agrega çapı 25mm olan sınır çatlaklı kare prizmatik numunelere pik-yük metodunun uygulaması

6. SONUÇLAR

Betonun kırılma mekaniği; savunma amaçlı yapılar, depreme dayanıklı binalar gibi özellikle ekonomik yönden yüksek yapılar için epeyce büyük önem taşımaktadır. Bu tür yapılarda hasarın nereden ve nasıl meydana geleceği, var olan bir çatlakın ilerleyip ilerlemeyeceği konularıyla ilgilenen kırılma mekaniği, çatlak içeren beton yapıların göçmesini önleyebilmek amacıyla farklı tür lineer olmayan yaklaşımlar sunmuştur.

Bu çalışmamızda $d_{max}= 4\text{mm}, 8\text{mm}, 16\text{mm}$ ve 25mm olan sürekli granülometrilili beton numuneler üretilmiştir. Elde edilen numuneler ile yapılan deneyler çentiksiz ve çentikli olacak şekilde ikiye ayrılmıştır. Üretilen çentikli numunelerin lineer olmayan kırılma mekaniğine göre analizleri yapılmıştır.

- Çentiksiz olarak üretilen altı adet 100 mm lik küp numuneler üzerinde, üç adeti basınç ve üç adeti de yarma-çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Kırılma mekaniği analizlerinde, standart silindir basınç dayanım değerleri kullanıldığından dolayı, 100 mm lik küp basınç mukavemetleri önce 150 mm lik küp mukavemeti değerlerine ($f_{c,150}$) ardından 150 mm lik küp basınç mukavemet değerlerini standart silindir basınç mukavemeti değerine dönüştürme işlemi yapılmıştır.

Elde edilen basınç deney sonuçlarına göre en yüksek silindir basınç dayanımının max agrega çapı 16mm , en düşük silindir basınç dayanımının max agrega çapı 8 mm numunelerine ait olduğu görülmüştür.

Yarma-çekme deneyinde ise agrega çapı arttıkça yarma-çekme mukavemeti değerleri (f_{sp})'nin arttığı gözlemlenmiştir.

- Çentikli olarak üretilen dane çapı 4mm ve 8mm olan numunelerin uygulama potansiyelini tespit etmek için hem kiriş numuneler hem de genişliği 50 mm ve karakteristik boyu $d=100\text{ mm}$ kare prizmatik numuneler kullanılmıştır. Kiriş numunelere eğilme deneyi uygulanırken kare prizmatik numuneler yarma-çekme testine tabii tutulmuştur.
- İri daneli karışımlarda, sadece çentikli kare prizmatik numuneler dökülmüştür. 16 mm lik karışımlarda 100 mm lik küpler kullanılırken, 25 mm lik karışımlarda 100 mm genişliğinde ve karakteristik boyutu $d=150\text{ mm}$ olan numuneler kullanılmıştır.

Eğilme ve yarma-çekme deneylerinde numunelerin ortalama dayanımının maksimum agrega çapıyla doğru, çentik boyuyla ters orantılı değiştiği görülmüştür.

- $4,8,16$ ve 25mm lik karışımlarda kullanılan basınç, çentiksiz yarma-çekme ve çentikli yarma-çekme numunelerine ait kırılma yüzeyleri incelendiğinde çentiksiz yarma-çekme numunelerinde simetrik bir kırılma durumu gözlenirken, çentikli yarma-çekme deneylerinde nispeten simetrisinin biraz bozulduğu bu şekillerden görülmektedir.

- Yapılan deneysel çalışmada agrega karakteristiklerin kırılma parametresi üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Agrega çapı küçüldükçe kırılma parametreleri azalmaktadır.
- Çentikli numunelerin lineer olmayan kırılma mekaniğine göre analizi yapıldığında, literatürdeki verilere paralel olarak efektif çatlak çatlak modeline göre hesaplanan kırılma tokluğu değerleri (K_{Ic}^e) iki parametrelili modele göre elde edilen kırılma tokluğu parametresinden (K_{Ic}^s) biraz büyük olduğu görülmüştür. Diğer taraftan C4 ve C8 karışımları dikkate alındığında, kiriş numunelerinin kırılma tokluk parametresi (K_{Ic}^s) kare-prizmatik numunelerinden biraz büyük olmakla beraber, kritik çatlak ucu açılımı değerleri (CTOD_c) için durum tam tersi olduğu gözlenmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] Şimşek, O., 2004. Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayınevi, Ankara.
- [2] Ünsal A., Şen, H., 2008. Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Lab. Şubesi Müdürlüğü, Ankara
- [3] Akkaya, Y., Bayramov F. ve Taşdemir M. A., 2003. Betonun Kırılma Mekanikliği : Tasarımda Kullanılan Mekanik Özellikler İle Kırılma Parametreleri arasındaki Bağlılıklar, Türkiye Mühendislik Haberleri, 426(4), 70-75.
- [4] Griffith. A.A., 1921. The Phenomena of Rupture and Flow İn Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society, A (221), 163 - 198.
- [5] Kaplan, M F., 1961. Crack propagation and the fracture of concrete, Journal of American Concrete Institute, 58, 591 – 610.
- [6] Glucklich, J., Fracture of plain concrete, ASCE J. Engng. Mech, 89, 127-138, 1963.
- [7] Swamy, R.N., Fracture phenomena of hardened paste, mortar and concrete, Soc Mater Sci(Japan), □IV,132-142,1972.
- [8] Swamy, R.N., and Rao C. K., Fracture mechanism in concrete systems under uniaxial loading, Cement Concr Res, 3, 413-427, 1973.
- [9] Alyamaç, K. E., 2004. Betonun Kırılma Parametreleri Üzerine Malzeme Parametrelerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [10] Hillerborg A., M. Modeer and P. E. Petersson, “Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements”, Cement & Concrete Research, 6 773-782, 1976.
- [11] Jenq Y. S. and S. P. Shah, “A two-parameter model for concrete”, Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 111 1227-1241, 1985.
- [12] Nallathambi P. and B. L. Karihaloo, “Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete”, Magazine of Concrete Research, 38 67-76, 1986. <https://doi.org/10.1680/mac.1986.38.135.67>
- [13] Bazant Z. P. 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, 44 (2) 111-131, 1990.
- [14] Xu S. and H. W. Reinhardt, “Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation”, International Journal of Fracture, 98 111-149, 1999.
- [15] Tang T, Shah SP, Ouyang C. Fracture mechanics and size effect of concrete in tension. ASCE Journal Structural Engineering 1992; 118:3169-3185.
- [16] TS 802, Ocak 1985. Beton karışımı hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [17] Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- [18] Gör, M., 2011. Beton Küp Numunelerinin Diyagonal Yarmada - Çekme Yükleme Altında Boyut Etkisinin Lineer Olmayan Kırılma Mekanikliği Prensipleriyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [19] TS EN 12350-1 , 2010. Beton- Taze Beton Deneyleri-Bölüm1: Numune Alma, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [20] TS EN 12390-2, 2010. Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [21] <https://www.sanalsantiye.com/wp-content/uploads/2021/02/basinc-dayanimi.png>
- [22] Doğangün, A., 2009. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- [23] Arıoğlu E., Girgin C., Arıoğlu N., 2012. Betonda çekme/basınç dayanımı oranının incelenmesi (58-63)
- [24] Çivici, F., Eren İ., 2004. Çelik Lifli Betonun Direkt Çekme Dayanımının Ölçülmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Türkiye Mühendislik Haberleri, 434(4), 49-53.
- [25] Yarmada çekme makale Tuğal, M., Arıcı, E., (2011). Beton Yarma Dayanımında Geometrik Şeklin Etkisinin İncelenmesi. e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences, 1A0218, 6, (4), 1086-1092.
- [26] TS EN 12390-6 Mart 2010. Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [27] ASTM C 496, 1994. Standard Test Method for Split Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards.
- [28] TS 500, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapı kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [29] <https://docplayer.biz.tr/docs-images/91/105304741/images/2-1.jpg>(silindir yarma çekme resmi ve gerilme dağılımı)
- [30] TS EN 12390-5 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinde eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [31] ASTM C 293, 1994. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), Annual Book of ASTM Standards
- [32] ASTM C 78, 1994. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), Annual Book of ASTM Standards.
- [33] Yılmaz Çetin, S., 2015. Kesikli Granülometriye Sahip Betonların Lineer Olmayan Kırılma Mekanığı Prensipleriyle İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [34] Çapık, M., Kaya, S., 2015 Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Laboratuvarı, Deney Adı: Eğilme (Bükülme) Dayanımı
- [35] Ersoy U., 1985. Betonarme- Temel İlkeler ve Taşıma Gücü, Bizim Büro Basımevi, Ankara
- [36] Aran, A., 1981.“ Kırılma Mekanığına Giriş”, Seminer notları, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, 1-27.
- [37] Agah, U., 1996. Kırılma Mekanığına Giriş, Uludağ Üniversitesi Yayinevi, Bursa
- [38] https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQI9TT5REWP_b7ZBBXKzTs3P3tPOvbqna76EQ&usqp=CAU
- [39] Anderson, T. L., 2014. Kırılma Mekanığı: Esaslar ve Uygulamalar, Orhan Yavuz Teknik Eğitim Vakfı İktisadi İşletmesi Yayını, İstanbul.
- [40] Irwin, G R., 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, Journal of Applied Mechanics, 24, 361-364
- [41] Yayla, P., 2007. Kırılma Mekanığı, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [42] <https://docplayer.biz.tr/docs-images/111/196277403/images/8-0.jpg>
- [43] Karakaş Ö., Gülsöz A. (). Kaynaklı Birleştirmelerin Statik ve Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler, Mühendis ve Makina, C.48, Sayı 573, 10-17.
- [44] Adanır, G.,2016. Geometrik Benzer Ve Benzer Olmayan Çentikli Beton Kirişlerin Kırılma Mekanığı Prensipleriyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [45] https://3.bp.blogspot.com/-87mIZ6__vs8/Wm9xln8zfeI/AAAAAAAAAb0/upMu0onBXYAQ-t-QJa5B8y3QWfFOh5bwFACLcBGAs/s1600/delaminasyon.jpg
- [46] Ince R. Determination of the Fracture Parameters of the Double-K Model Using Weight Functions of Split-Tension Specimens. Engng Fract Mech 2012; 96:416-432.
- [47] Alyamaç, K. E. ve İnce, R., 2007b. Farklı kür metotların betonun kırılma parametreleri üzerine etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 19(3), 347-355

- [48] Tada, H., Paris, P. C., Irwin, G. R. (1987). Stress Analysis of Cracks Handbook, St. Louis: Paris Productions. Makale atfı
- [49] RILEM Recommendation. (1990). Determination of the Fracture Parameters (s K_{Ic} and CTOD_c) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Tests. *Materials & Structures*, 23(138), 457-460.
- [50] Yang, S., Tang, T., Zollinger, D. G., Gurjar, A. (1997). Splitting Tension Tests to Determine Concrete Fracture Parameters by Peak-Load Method. *Advanced Cement Based Materials*, 5, 18-28.
- [51] İnce, R., Alyamaç, K. E. (2004). Agregatın Betonun Kırılma Parametreleri Üzerine Etkisi. İMO XVII. Teknik Kongre ve Sergisi, (15-16-17 Nisan 2004) Bildirileri, A. Ergin ve G. Özdemir (Editörler), İstanbul, 507-510.
- [52] İnce R., (1998). Betonarme yapı elemanlarında basınç-kesme kırılmasının ve boyut etkisinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. (Etkelif çatlak mod resmi)
- [53] İnce R., Demirkıran T., 2011. Betonun Başlangıç Gerilme Şiddet Çarpanı Parametresi Üzerine Malzeme Parametrelerin Etkisi, 9. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul. (610-620)
- [54] Yılmaz B., (2016) Beton Tek_web.pdf Erişim adresi:
http://barisyilmaz.yolasite.com/resources/Beton%20Tek_web.pdf
- [55] L' Hermite R.. Ideas actuelles sur la technologie du beton. Documentation Technique Du Batiment Et Des Travaux Publics, Paris, 1955.
- [56] Timoshenko SP, Godier JN. Theory of Elasticity. Third Edition, Mc-Graw Hill, New York, 1970.
- [57] Ince, R. Utilization of Splitting-Strips in Fracture Mechanics Tests of Quasi-Brittle Materials. *Archive of Applied Mechanics* (2021)
- [58] R. İnce, Yarı-Gevrek Malzemelerin Kırılma Parametrelerini Tayin Etmek İçin Deneysel Bir Metot, 22. Ulusal Mekanik Kongresi, Adana, 11-25, (2021).
- [59] R. Ince, A.T. Bildik, A preliminary concrete mixture design based on fracture toughness, *Mater. Struct.* 54 (2021) 11, <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01604-7>
- [60] ACI-318: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary for Structural Concrete, American Concrete Institute. Michigan: Farmington Hills. 2014

ÖZGEÇMİŞ

Buhranur SAĞLAM

[Redacted]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted]

- [Redacted]

[Redacted]

[Redacted]