

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETON, HARÇ VE ÇİMENTO HAMURUNDA
KIRILMA ENERJİSİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Kadir Vecihi ALDIKAÇTI**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2005

**BETON, HARÇ VE ÇİMENTO HAMURUNDA
KIRILMA ENERJİSİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Kadir Vecihi ALDIKAÇTI
(501021073)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2005**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Canan TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mehmet UYAN (İ.T.Ü.)
Y.Doç.Dr. Nabi YÜZER (Y.T.Ü.)**

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışmada kırılma mekaniğine dayanan modellerle beton, harç ve çimento hamurunun kırılma davranışları incelenmiştir.

Tüm tez çalışmam boyunca beni destekleyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR'e,

Çalışmam süresince ilgi ve yardımlarından dolayı da Sayın Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e, Dr. Fikret BAYRAMOV'a, İnşaat Müh. Cengiz ŞENGÜL'e; deneysel çalışmalarında bana yardımcı olan arkadaşlarıma ve emeği geçen İ.T.Ü Yapı Malzemesi Anabilim Dalı Laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederim.

Öğrenimimin bu aşamaya gelmesinde büyük katkısı olan ve beni hep destekliyen aileme ayrıca teşekkür ederim.

Aralık 2004

Kadir Vecihi ALDIKAÇTI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Çalışmanın Amacı	2
1.3. Çalışmanın Ana Hatları	2
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği	4
2.2. Kırılma Süreci Bölgesi	7
2.3. Betonun Kırılma Davranışı	8
2.4. Toklaşma Mekanizmaları	9
2.4.1. Ara yüzeylerin çatlaması (Mikro çatlak kalkanı)	10
2.4.2. Çatlak sapması mekanizması	12
2.4.3. Çatlak kapanı mekanizması	13
2.4.4. Agrega köprülenmesi mekanizması	15
2.5. Etkin Kırılma Tokluğu	16
2.5.1. Çimento hamurunun kırılma tokluğu	16
2.6. Üç Noktalı Eğilme Deneyi İle Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi	17
2.7. Kırılma Enerjisine Etki Eden Faktörler	19
2.7.1. Maksimum agrega boyutunun kırılma enerjisine etkisi	19
2.7.2. Çentik derinliği oranının kırılma enerjisine etkisi	21
2.7.3. Kırılma enerjisinde boyut etkisi	22
2.8. Gerçek Kırılma Enerjisi	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
3.1. Çalışmanın Amacı	25
3.2. Üretilen Betonun Ortak Özellikleri	25
3.3. Kullanılan Malzeme Özellikleri	25

3.3.1. Çimento	25
3.3.2. Silis dumanı	27
3.3.3. Agregalar	27
3.4. Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi	28
3.4.1. Glenium 51'in etki mekanizması ve teknik özellikleri	28
3.5. Üretim	29
3.6. Bileşenlerinin Hacimsel Değerleri	30
3.7. Taze Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deneyleri	32
3.8. Sertleşmiş Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deneyleri	33
4. DENEY SONUÇLARI	34
4.1. Taze Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deney Sonuçları	34
4.2. Sertleşmiş Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deney Sonuçları	34
4.2.1. Silindir basınç deneyi	34
4.2.2. Disk yarma-çekme deneyi	35
4.2.3. Üç noktalı eğilme deneyi	36
4.2.3.1. Kırılma enerjisi hesabı	37
4.2.3.2. Net eğilme dayanımı	38
4.2.3.3. Gerçek kırılma enerjisi hesabı	38
4.2.3.4. Karakteristik boyun belirlenmesi	39
4.2.4. Çimento hamurunun kırılma tokluğunun hesabı	40
4.3 Mezo-mekanik Modelleme	41
4.3.1. Harç ve betonun kırılma tokluğunun hesabı	41
4.3.2. Kırılma enerjisi	42
4.3.3. Tek eksenli çekme gerilmesi	45
4.3.4. Elastisite modülü	45
4.3.4.1. Çimento hamurunun elastisite modülü	45
4.3.4.2. Harcın elastisite modülü	46
4.3.4.3. Betonun elastisite modülü	47
5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	49
5.1. Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi	49
5.2. Yarma-Çekme Deneylerinin Değerlendirilmesi	49
5.3. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi	50
5.4. Kırılma Enerjilerin Değerlendirilmesi	51
5.5. Net Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi	51
5.6. Karakteristik Boyun Değerlendirilmesi	52
5.7. Mezo-mekanik Modelleme ile Bulunan Değerlerle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	52

6. GENEL SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	56
EKLER	59
ÖZGEÇMİŞ	66

KISALTMALAR

LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekanığı
LVDT	: Linear Variable Displacement Transducer
KSB	: Kırılma Süreci Bölgesi
RILEM	: Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherche sur les Matériaux et Constructions
SD	: Silis Dumanı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Üç noktalı eğilme deneyinde A_i katsayılarına ait değerler.....	6
Tablo 2.2. Kırılma süreci bölgesinin tipik değerleri	8
Tablo 2.3. Maksimum agrega boyutunun kırılma enerjisine etkisi.....	20
Tablo 2.4. Çentik derinliğinin kırılma enerjisine etkisi.....	21
Tablo 2.5. Kırılma enerjisinde boyut etkisi.....	22
Tablo 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri.....	26
Tablo 3.2. Çimentonun fiziksel özellikleri.....	26
Tablo 3.3. Çimentonun basınç dayanımı.....	26
Tablo 3.4. Agregaların fiziksel özellikleri.....	27
Tablo 3.5. Agregaların elek analizi sonuçları.....	27
Tablo 3.6. Beton, harç ve çimento hamuru bileşimleri ve taze haldeki özellikleri.....	30
Tablo 3.7. $1m^3$ beton, harç ve çimento hamurudaki bileşenlerin hacimsel değerleri.....	31
Tablo 3.8. Deney türü ve elde edilecek parametreler.....	33
Tablo 4.1. Taze beton, harç ve çimento hamuru deney sonuçları.....	34
Tablo 4.2. Elastisite modülü ve silindir basınç dayanımları.....	35
Tablo 4.3. Disk numunelerinin yarma dayanımları.....	36
Tablo 4.4. Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları.....	40
Tablo 4.5. Çimento hamurunun kırılma tokluğu.....	41
Tablo 4.6. Harç ve betonun kırılma tokluğu.....	42
Tablo 4.7. Mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kritik çatlak açılma değerleri ve kırılma enerjileri.....	44
Tablo 4.8. Mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modülleri.....	48
Tablo 5.1. Deneysel ve mezo-mekanik bağıntılarla elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	53
Tablo A.1. Silindir basınç deneyi sonuçları.....	64
Tablo A.2. Silindir basınç deneyinde hesaplanan elastisite modülleri.....	64
Tablo A.3. Disk yarma-çekme deneyi sonuçları.....	64
Tablo A.4. Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları.....	65

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Üniorm çekme altındaki levhada gerilme akım çizgileri.....	4
Şekil 2.2 : Çatlak önündeki gerilme konsantrasyonu.....	5
Şekil 2.3 : Üç noktali eğilme deneyi yardımıyla kırılma tokluğunun hesaplanması.....	6
Şekil 2.4 : Gevrek bir malzemede çatlak ucunda meydana gelen gerilme durumu.....	7
Şekil 2.5 : Değişik türdeki malzemelerin kırılma davranışları.....	8
Şekil 2.6 : Önceden çentik içeren beton numunesinin yük-deformasyon eğrisi.....	9
Şekil 2.7 : Kırılma süreci bölgesindeki bazı toklaşma mekanizmaları.....	10
Şekil 2.8 : Ara yüzey çatlaklarından dolayı oluşan toklaşma ve çatlak kalkanın şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.9 : Eğilme deneyinden sonra, stereo mikroskopla incelenen kırılmanın şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.10 : Çatlak sapması mekanizması ve çatlak sapmasından dolayı malzemede etkin tokluğun, agrega konsantrasyonu ile değişimi.....	13
Şekil 2.11 : Çatlak kapanı mekanizmasının şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.12 : Çatlak kapanı nedeni ile oluşan tokluğun agrega konsantrasyonu ile değişimi.....	15
Şekil 2.13 : Üç noktali eğilme deneyi ile kırılma tokluğunun belirlenmesi.....	17
Şekil 2.14 : Üç noktali eğilme deneyi.....	18
Şekil 2.15 : Yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.16 : Maksimum agrega boyu ile kırılma enerjisi arasındaki ilişki.....	21
Şekil 2.17 : Tek çentikli deney numunesinde enerji dağılımı.....	23
Şekil 3.1 : Agrega referans ve karışım eğrileri.....	28
Şekil 3.2 : 1m ³ betonu oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi.....	31
Şekil 3.3 : 1 m ³ betonda, harçta ve çimento hamurunda malzeme konsantrasyonlarının şematik gösterimi.....	32
Şekil 4.1 : Üç noktali eğilme deneyinin şematik gösterimi.....	37
Şekil 4.2 : Beton numulere ait yük-sehim eğrilerinin tipik gösterimi.....	37
Şekil 4.3 : Çimento hamuru, harç ve betonun etkin kırılma tokluğunun karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.4 : Betona ait çekme-şekil değiştirme eğrisi.....	43
Şekil 5.1 : Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama silindir basınç dayanımları.....	49
Şekil 5.2 : Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama disk yarma-çekme dayanımları.....	50
Şekil 5.3 : Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama elastisite modülleri.....	50

Şekil 5.4	: Kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 5.5	: Net eğilme dayanımlarının karşılaştırılması.....	52
Şekil 5.6	: Deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modüllerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 5.7	: Deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	54
Şekil A.1	: Sığ çentik açılmış beton numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	59
Şekil A.2	: Derin çentik açılmış beton numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	59
Şekil B.1	: Sığ çentik açılmış harç numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	60
Şekil B.2	: Derin çentik açılmış harç numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	60
Şekil C.1	: Sığ çentik açılmış çimento hamuruna ait yük-sehim eğrileri.....	61
Şekil C.2	: Derin çentik açılmış çimento hamuruna ait yük-sehim eğrileri....	61
Şekil D.1	: Mezo-mekanik bağıntılarla bulunan kırılma enerjisi değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.....	62
Şekil E.1	: Üç noktalı eğilme deneyi düzeneği.....	63
Şekil E.2	: Silindir basınç deneyi.....	63

SEMBOL LİSTESİ

B	: Kiriş numunenin genişliği
W	: Kiriş numunenin derinliği
a	: Çentik derinliği
S	: Üç noktalı eğilme deneyinde mesnetler arası mesafe
l_p	: Kırılma süreci bölgesi uzunluğu
E	: Elastisite modülü
f_t'	: Tek eksenli çekme dayanımı
V_{ag}	: Agreg a konsantrasyonu
K_{IC}	: Gerilme şiddet faktörü veya etkin kırılma tokluğu
K_{IC}^m	: Matrisin kırılma tokluğu
K_{IC}^{ay}	: Ara yüzeylerin mikro çatlaması mekanizmasının sağladığı etkin kırılma tokluğu
K_{IC}^{cs}	: Çatlak sapması mekanizmasının sağladığı etkin kırılma tokluğu
K_{IC}^k	: Çatlak kapanı mekanizmasının sağladığı etkin kırılma tokluğu
K_{IC}^{kp}	: Agreg a köprülenmesi mekanizmasının sağladığı etkin kırılma tokluğu
K_{IC}^{ch}	: Sertleşmiş çimento hamurunun kırılma tokluğu
$f_{t,a}$: Agreganın çekme dayanımı
g_{ort}	: Ortalama agreg a tane çapı
g	: En büyük agreg a boyutu
G_f	: Kırılma enerjisi
G_F	: Gerçek kırılma enerjisi
L	: Kiriş numunenin uzunluğu
W_0	: Yük-seğim eğrisinin altında kalan alan
m_1	: Kiriş numunenin mesnetler arasındaki ağırlığı
m_2	: Deney cihazına bağı olmayan yükleme aparatının ağırlığı
g	: Yer çekimi ivmesi
A_{lig}	: Etkin kesit alanı
δ_0	: Göçme sırasında kiriş ortasındaki sehim
a_1	: Geçiş ligamentinin uzunluğu
$m_{\text{Ç}}$: 1 m ³ betondaki çimentonun ağırlığı
m_{SD}	: 1 m ³ betondaki silis dumanı ağırlığı
m_{su}	: 1 m ³ betondaki suyun ağırlığı
m_{ak}	: 1 m ³ betondaki akışkanlaştırıcının ağırlığı
m_{KI}	: 1 m ³ betondaki kırmataş I'in ağırlığı
m_{Kk}	: 1 m ³ betondaki kırma kumun ağırlığı
m_{Dk}	: 1 m ³ betondaki deniz kumunun ağırlığı
$m_{s.unu}$: 1 m ³ betondaki silis ununun ağırlığı
$\rho_{\text{Ç}}$: Çimentonun özgül ağırlığı
ρ_{SD}	: Silis dumanının özgül ağırlığı

- ρ_{su} : Suyun özgül ağırlığı
 ρ_{ak} : Akışkanlaştırıcının özgül ağırlığı
 ρ_{KI} : Kırmataş I'ın özgül ağırlığı
 ρ_{Kk} : Kırmataş kumun özgül ağırlığı
 ρ_{Dk} : Deniz kumunun özgül ağırlığı
 $\rho_{S.unu}$: Silis ununun özgül ağırlığı
 V_{hava} : 1 m³ betondaki havanın hacmi
 V_{f1} : Betonda ince agreganın hacim oranı
 f_{st} : Disk yarma-çekme dayanımı
 P_{maks} : Disk yarma deneyinde numunenin kırılmasını sağlayan maksimum tepe yükü
 D : Disk numunenin çapı
 b : Disk numunenin yüksekliği
 P : Üç noktalı eğilme deneyinde elde edilen maksimum yük
 f_{st} : Tek eksenli çekme dayanımı
 $\frac{w}{c}$: Su/çimento oranı
 f_{net} : Net eğilme dayanımı
 l_{ch} : Karakteristik boy
 $G_F^{(1)}$: Çekme-şekil değiştirme yumuşaması eğrisinin $0 \leq \sigma \leq f_t'$ aralığındaki kırılma enerjisi
 $G_F^{(2)}$: Çekme-şekil değiştirme yumuşaması eğrisinin $0 \leq \sigma \leq \sigma_f$ aralığındaki, agregaların sıyrılmasından dolayı oluşan kırılma enerjisi
 σ_f, σ_c : Çatlak açılma deplasmanının kritik değerine uygun gelen gerilmeler
 K_f, K_c : Çatlak açılma deplasmanının kritik değerine uygun gelen gerilme şiddet faktörü
 τ^* : Agregata ile matris arayüzey kayma dayanımı
 η : Agregata yüzey alanı parametresi
 V : Dağılı fazın hacim oranı
 Θ : Dağılı fazın geometri fonksiyonu
 n : Dağılı fazın elastisite modülünün sürekli fazın elastisite modülüne oranı
 ρ_c : Çimentonun özgül ağırlığı
 ρ_w : Suyun özgül ağırlığı
 η_k : Kapiler boşlukların biçim faktörü
 h : Hidrotasyon derecesi
 η_u : Hidrate olmamış çimento tanelerinin biçim faktörü
 η_f : İnce agreganın biçim faktörü
 η_c : İri agreganın biçim faktörü
 E_u : Hidrate olmamış çimento tanelerinin elastisite modülü
 E_m : Hidrate olmuş çimento tanelerinin elastisite modülü
 E_p : Çimento hamurunun elastisite modülü
 E_r : Harcın elastisite modülü
 E_{ag} : İnce agreganın elastisite modülü
 E_f : İri agreganın elastisite modülü
 E_c : Agreganın elastisite modülü
 ρ_{ag} : Agreganın özgül ağırlığı
 A_f : İnce agreganın narinliği
 A_c : İri agreganın narinliği
 β : Kopan agreganın yüzey alanı

BETON, HARÇ VE ÇİMENTO HAMURUNDA KIRILMA ENERJİSİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Sertleşmiş çimento hamuru ile agrega fazlarının betonun kırılmasında önemli rol oynadıkları bilinmektedir. Ancak, literatürde bu fazların betonların kırılma özelliklerine etkileri üzerine çok az bilgi bulunmaktadır. Çalışmanın esas amacı, uygun deneyler ve bir mezo-mekanik yaklaşımla bu fazların etkisini daha iyi anlayabilmektir. Bu amaçla, normal beton, üretilen bu betonun harç sertleşmiş çimento hamuru fazları üretildi. Bütün karışımlarda etkin su-bağlayıcı oranı 0.30'da sabit tutuldu. RILEM 50-FMC Teknik Komitesinin önerilerine uygun, fakat çok sığ (çentik/kiriş derinliği oranı, $a/W=0.05$) ve derin çentik ($a/W=0.5$) kullanarak gerçek kırılma enerjisinin belirlenmesi için deneyler yapıldı. Sertleşmiş çimento hamurunda Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği geçerli olduğu kabul edildi. Kritik gerilme şiddet çarpanı, çentikli kiriş numuneler kullanılarak belirlendi. Betonun ve bunun harç fazının etkin gerilme şiddet çarpanı, mevcut mezo-mekanik bağıntılarda uygun toklaşma mekanizmaları kullanılarak hesaplandı. Sertleşmiş çimento hamurunun ve betonun gerçek kırılma enerjileri ve ayrıca betonun, harcın ve sertleşmiş çimento hamurunun elatisite modülleri mezo-mekanik bağıntılar kullanılarak hesaplandı. Beton ve onun çimento hamuru fazının süneklikleri karakteristik boy cinsinden bulundu.

Deneysel sonuçlara, gerçek kırılma enerjisi hesaplarına ve mezo-mekanik modele dayanarak şu sonuçlara varılabilir: i) Sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımının harcınkine göre daha yüksek çıktığı görüldü. ii) Betonun ve harç fazının ve ayrıca sertleşmiş çimento hamurunun elatisite modüllerinin deneysel ve tahmin edilen değerleri iyi uyum sağladı. iii) Farklı çentik türüne (sığ veya derin) sahip, aynı boyut ve biçimdeki çentikli kiriş numunelerden gerçek kırılma enerjisinin belirlenmesinde tatmin edici sonuçlar alındı. iv) Gevrek bir malzeme olan sertleşmiş çimento hamurundan yarı gevrek davranış sergileyen betona nasıl dönüştüğünün daha iyi anlaşılması için bu çalışmada toklaşma mekanizmaları ve mezo-mekanik bağıntılar kullanıldı.

DETERMINATION OF FRACTURE ENERGY OF CONCRETE, MORTAR AND CEMENT PASTE

SUMMARY

It is well known that both hardened cement paste and aggregate phases play an important role in the fracture of concrete. There is, however, little quantitative information available in the literature on the effect of these phases on the fracture properties of concrete. The main objective of the presented work is to gain a better understanding of this effect using appropriate experiment and a meso-mechanical approach. For this purpose, a normal concrete, its mortar and hardened cement paste (HCP) phase were prepared. In all mixtures, effective water-binder ratio was kept constant at 0.30. The test for determining the true fracture energy was performed according to the recommendation of RILEM 50-FMC Technical Committee with the only exception of using very shallow (notch to depth ratio, $a/W=0.05$) and deep notches ($a/W=0.5$). The critical stress intensity factor of the HCP, for which linear elastic fracture mechanics (LEFM) is valid, was determined from the notched beam specimens. The effective stress intensity factor of concrete and its mortar phase were calculated using appropriate toughening mechanisms in the available meso-mechanical relationships. The true fracture energies of HCP and concrete, and the moduli of elasticity of HCP, mortar and concrete were also calculated from the meso-mechanical relationships. The ductility of concrete and its hardened cement paste phase were calculated in terms of the characteristic length.

Based on the experimental results and the calculations of true fracture energy and meso-mechanical model, the following conclusions can be drawn: i) It is shown that the compressive strength of hardened cement paste is greater than that of mortar phase. ii) There is a good agreement between experimental and predicted values of Modulus of Elasticity of concrete, and its mortar phase, and also its HCP phase. iii) It is concluded that by conducting tests on single size specimens that differ in their notch characteristics (shallow or deep) satisfactory results are obtained in terms of determining the true fracture energy. iv) The meso-mechanical relations and toughening mechanisms used in this work are very useful tools for gaining a better understanding of how a brittle hardened cement paste progressively transforms into a quasi-brittle concrete.

GİRİŞ

1.1 Genel

Beton, yapı mühendisliğinde çok yaygın biçimde kullanılan bir malzeme olduğundan, betonda çatlak başlamasına ve yayılmasına sebep olacak etkenler hakkında yeterli bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Maliyeti yüksek ve iklim koşullarının altında yıpranmaya uğrayan bu tür yapılarda göçmenin nasıl, nereden ve hangi koşullarda oluşacağı; varolan bir çatlağın hangi koşullar altında kararlı ve kararsız ilerleyeceği, kırılma mekaniği bilim dalının konularıdır. Bu amaçla, Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) betona ilk uygulaması 1960'lı yıllarda yapılmasına rağmen, betonun yarı gevrek ve heterojen bir malzeme olması nedeni ile betonun kırılma parametrelerinin LEKM ile elde edilemeyeceği görülmüştür [1].

LEKM göre çatlak uçundaki gerilme sonsuza gitmektedir. Bu durum beton için geçerli değildir, çünkü betonda makro çatlak önünde elastik olmayan bir bölge vardır [2]. Oluşan gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin orantısız olduğu bu bölge Kırılma Süreci Bölgesi (KSB) olarak adlandırılır. Böyle bir bölgenin varlığı betonda oluşan toklaşma mekanizmalarına bağlıdır. Enerji harcanmasına sebep olan bu bölgenin boyutları betonun türü ve yapının boyutlarına bağlı olarak değişmektedir [1].

Daha sonraki yıllarda çatlak önündeki elastik olmayan bölgedeki davranışı, betonun kırılma parametrelerini ve gevrekliğini saptamak için yapılan çalışmalar, nonlinear kırılma mekaniğine dayandırıldı. Bu çalışmalar arasında başlıca bilinenleri Fiktif Çatlak Modeli, Boyut Etkisi Modeli ve İki Parametrelili modeldir. Fiktif Çatlak Modelinde bulunan kırılma enerjisi, betonun elastisite modülüne ve tek eksenli çekme dayanımına bağlı olarak hesaplanan karakteristik boy ($l_{ch} = EG_f / (f_t')$), betonun yapısının sayısal analizinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır [3].

Son zamanlarda yapılan araştırmalar, fiktif çatlak modeline dayanılarak bulunan özgül kırılma enerjisinin malzeme boyutuna bağlı olduğunu göstermiştir. Abdalla ve Karihaloo [4] ile Karihaloo ve diğ. [5] boyuttan bağımsız özgül kırılma enerjisini üç noktalı eğilme deneyi ile bulmaktadırlar. Bu yöntemde numunelerin birine derin

çentik, diğerine ise yüzeysel çentik açılmış iki adet aynı geometriye sahip deney numunesi kullanmak yeterli olmaktadır.

Oldukça gevrek bir malzeme olan çimento hamuru, dış yüklerin olmadığı durumda bile plastik rötrenin yarattığı gerilme etkisiyle kendiliğinden hasara uğrayabilir. Çimento hamuruna iri ve ince agreganın katılmasıyla rötreye azalır. Çimento hamuruna ince ve iri agrega katılmasıyla, kırılma tokluğu çimento hamuruna göre daha yüksek harç ve beton elde edilir. Betonun yapısal davranışının sadece basınç dayanımının kontrolü altında olmamasının anlaşılması; ayrıca kırılma tokluğu gibi bağımsız malzeme parametrelerinde de etkisinin olduğunun anlaşılmasından dolayı betona ait kırılma tokluğu üzerine yapılan araştırmalarda son on yılda bir artış vardır [6].

Yapılan çalışmalar toklaşma mekanizmalarının betonun kırılmasında önemli bir rol oynadığını açıklamıştır. Bu mekanizmaları içeren mezo-mekanik bağlantılar, sertleşmiş çimento hamurunun nasıl yarı-gevrek bir malzemeye dönüştüğü hakkında ve gerçek kırılma enerjisinin bulunmasında açıklayıcı bilgiler vermektedir [7].

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada uygun toklaşma mekanizmaları kullanılarak; betonun kırılma parametreleri, hamur ve harç fazlarının kırılma parametrelerinden itibaren hesaplanması amaçlanmıştır. Bunun için son yıllarda geliştirilmiş olan mezo-mekanik modellerden yararlanılmıştır. Çimento hamuru, agrega ve bu iki faz arasındaki arayüzeylerden oluşan beton kompozitinin kırılma davranışının daha iyi anlaşılması ve boyuttan bağımsız bir kırılma enerjisinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Çalışmanın Ana Hatları

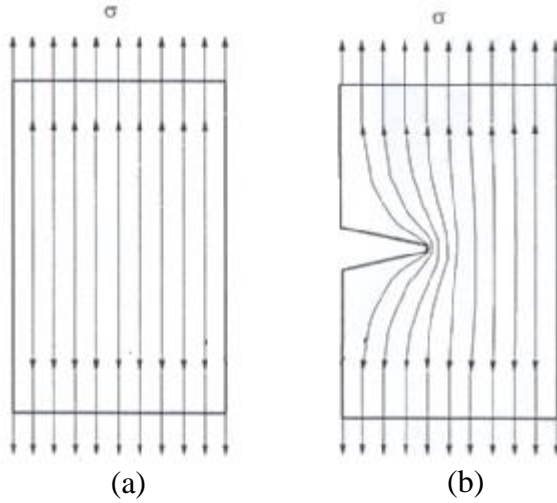
Bu çalışmada, ilk önce bir beton, sonra bu betonun harç ve hamur fazlarının üretimleri yapıldı. Üretimlerden sonra deney numuneleri deney gününe kadar su küründe bekledi. Deneyler sonunda üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen verilerle, Abdalla ve Karihaloo'nun [4] önerdiği metoda göre boyuttan bağımsız kırılma enerjisi bulundu. Ayrıca silindir basınç deneyinden basınç mukavemeti ve disk numunelerden yarma-çekme dayanımı bulundu. Daha sonraki aşamada uygun toklaşma mekanizmaları, agrega konsantrasyonu ve deneyler sonunda bulunmuş sertleşmiş çimento hamuruna ait kırılma tokluğu kullanarak, beton ve harç fazının

kırılma parametreleri mezo-mekanik bağıntılarla elde edildi. Daha sonra, deneysel ve mezo-mekanik bağıntılar kullanarak elde edilen değerler karşılaştırıldı ve çimento hamuruna agrega katılmasıyla; daha tok ve daha sünek malzeme olan, harç ile beton elde edildi.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

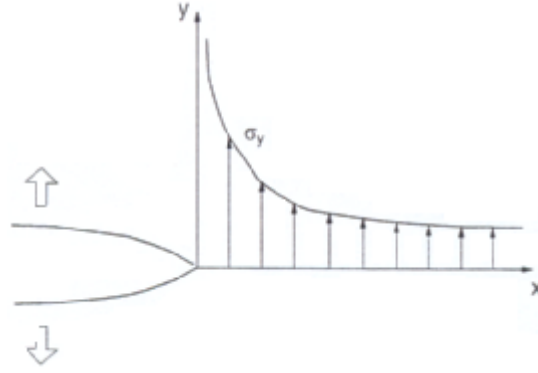
2.1 Linear Elastik Kırılma Mekaniği

İdeal elastik bir malzemedен yapılmış bir levhaya, düzgün yayılı yük uygulandığında; yükü bir noktadan başka bir noktaya taşıyan gerilme akım çizgileri, düz ve yükleme doğrultusuna paralel olmaktadır (Şekil 2.1a). Eğer Şekil 2.1b'deki gibi levha kesilirse, gerilme akım çizgileri çentiğin etrafında eğilmeye zorlanır ve bir gerilme konsantrasyonu meydana gelir [2].



Şekil 2.1 Üniorm çekme altındaki levhada gerilme akım çizgileri : (a) çentiksiz levha; (b) çentikli levha [2]

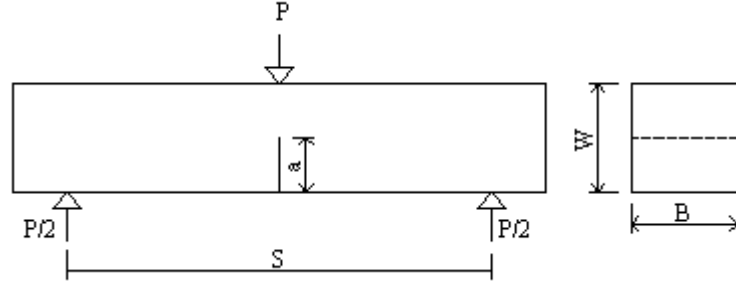
Yerel gerilme büyüklüğü en çok çentiğin biçimine bağlıdır. Eğer, yüzeysel bir çentik söz konusu ise gerilme daha büyük olmaktadır. Şekil 2.2'de çatlak önündeki gerilme konsantrasyonu verilmiştir. Bu şekilden de anlaşıldığı gibi LEKM'de çatlak uçunda gerilme sonsuza gitmektedir.



Şekil 2.2 Çatlak önündeki gerilme konsantrasyonu [2]

Aslında çatlak önünde gerilme sonsuza gitmez ve çatlak uçunda her zaman bir inelastik bölge mevcuttur. LEKM'nin kırılma süreci diye adlandırılan bu bölgede uygulanabilir olması için; kırılma süreci bölgesinin kısa olması gerekmektedir. Bu şarta uyan malzemeler cam, tabakalaşmış silikat, elmas, bazı yüksek mukavemetli metaller ve seramiklerdir [2]. LEKM sertleşmiş çimento hamuru gibi gevrek malzemelere uygulanabilmektedir. Gevrek malzemedeki çatlakın ilerlemesini ve kırılmayı tanımlamak için sadece bir malzeme parametresi, kırılma tokluğu (K_{Ic}) yeterlidir [1].

Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinde, gevrek malzeme için kırılma tokluğu, değişik geometriye sahip numunelerle başarılı bir şekilde hesaplanabilir. Kırılma tokluğunun belirlenmesinde, en çok kullanılan yöntem; önceden çentik açılmış kiriş numunelere uygulanan, üç noktalı veya dört noktalı eğilme deneyleridir. Üç noktalı eğilme deneyinde, çentikli kiriş numunenin kullanılmasının üstünlüğü; üretiminin ekonomik ve deney sürecinin diğer yöntemlere göre daha kolay olmasıdır. Üç noktalı eğilme deneyinde, numune çentik yayılmaya başlayıncaya kadar kademeli olarak yüklenir ve maksimum yük ($P_{maks.}$) mesnet ortasındaki eğilme momentini bulmak için hesaplanır. LEKM ile gevrek bir malzeme olan sertleşmiş çimento hamurunda, kırılma tokluğu denklem (2.1) kullanılarak bulunabilir [8].



Şekil 2.3 Üç noktalı eğilme deneyi yardımıyla kırılma tokluğunun hesaplanması

$$K_{IC} = 6YM_{maks} \cdot \sqrt{a} / (BW^2) \quad (2.1)$$

Burada:

Y= Geometri fonksiyonu

M= M₁+M₂

M₁= Maksimum yükten dolayı oluşan eğilme momenti (Üç noktalı eğilme deneyinde M₁=P_{maks}×S/4).

M₂= Kiriş numunenin kendi ağırlığından dolayı oluşan eğilme momenti

B= Kiriş numunenin genişliği

W= Kiriş numunenin derinliği

a= Çentik derinliği

S= Mesnetler arası mesafedir.

Geometri fonksiyonu olarak Brown ve Srawley'in önerdiği denklem (2.2) kullanılırsa ve M₂ ihmak edilirse K_{ic}'i veren ifade denklem (2.3) elde edilir [8].

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = A_0 + A_1\left(\frac{a}{W}\right) + A_2\left(\frac{a}{W}\right)^2 + A_3\left(\frac{a}{W}\right)^3 + A_4\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (2.2)$$

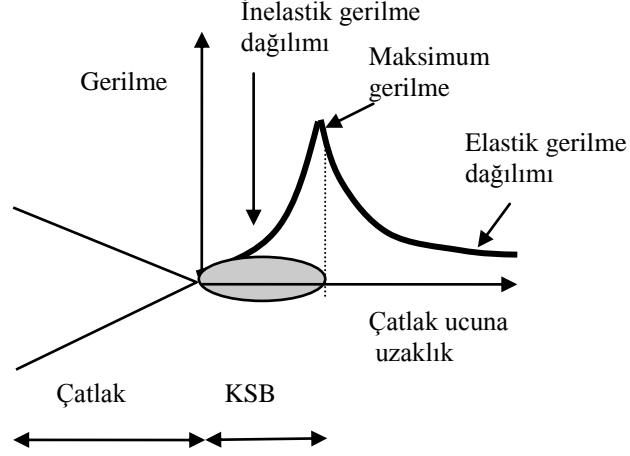
Tablo 2.1 Üç noktalı eğilme deneyinde A_i katsayılarına ait değerler [8]

S/W	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
8	+1,96	-2,75	+13,66	-23,98	+25,22
4	+1,93	-3,07	+14,53	-25,11	+25,80

$$K_{IC} = \frac{3PS}{2BW^{3/2}} \left[1,93\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 3,07\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 14,53\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 25,11\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 25,8\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2} \right] \quad (2.3)$$

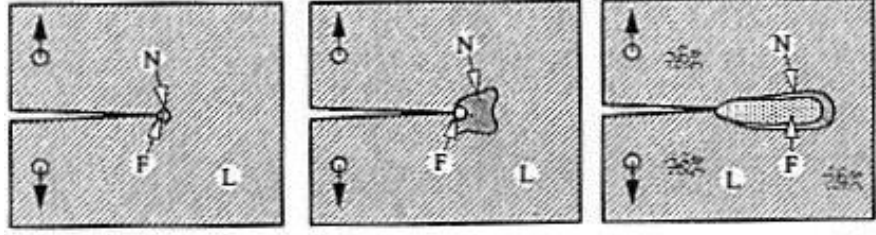
2.2 Kırılma Süreci Bölgesi

Beton gibi yarı gevrek bir malzemede çatlak ucunda önemli oranda kalıcı şekil değiştirmeler meydana gelir. Şekil değiştirmelerle gerilmelerin orantısız olduğu bu bölge Kırılma Süreci Bölgesi (KSB) olarak adlandırılır (Şekil 2.4) [1].



Şekil 2.4 Gevrek bir malzemede çatlak ucunda meydana gelen gerilme durumu [1]

Betonun davranışını belirleyen ifadelerde, kırılma süreci bölgesinde oluşan malzemenin yumuşama özelliği göz önünde tutulmalıdır. Malzemenin kırılma davranışını veren non-lineer ifadelerle bakıldığında, sünek malzeme olan metallere yapılan uygulamalarla, yarı gevrek malzeme olan beton ve seramiklere yapılan uygulamaları birbirinden ayrı değerlendirmek gerekmektedir. Metallerde, kısa olan kırılma süreci bölgesinin etrafı, lineer olmayan geniş plastik bölgeyle çevrilmiştir. Yarı gevrek malzemelerde ise, lineer olmayan şekil değiştirme bölgesi, geniş kırılma süreci bölgesiyle kuşatılmıştır. Şekil 2.5'de değişik malzemelere ait kırılma davranışları şematik olarak gösterilmiştir [8].



(a) Lineer elastik (b) Nonlineer plastik (c) Nonlineer yarı-gevrek

Şekil 2.5 Değişik türdeki malzemelerin kırılma davranışları: (a) lineer elastik malzeme, (b) sünek malzeme, (c) yarı gevrek malzeme [8]

Şekil 2.5’de L lineer elastik bölgeyi, N lineer olmayan bölgeyi ve F’de kırılma süreci bölgesini tanımlamaktadır. Kırılma süreci bölgesinin uzunluğunun tahmini (l_p); malzemenin kırılma enerjisine (G_F), elastisite modülüne (E) ve tek eksenli çekme dayanımına (f_t) bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$l_p \approx \frac{G_F E}{f_t^2} \quad (2.4)$$

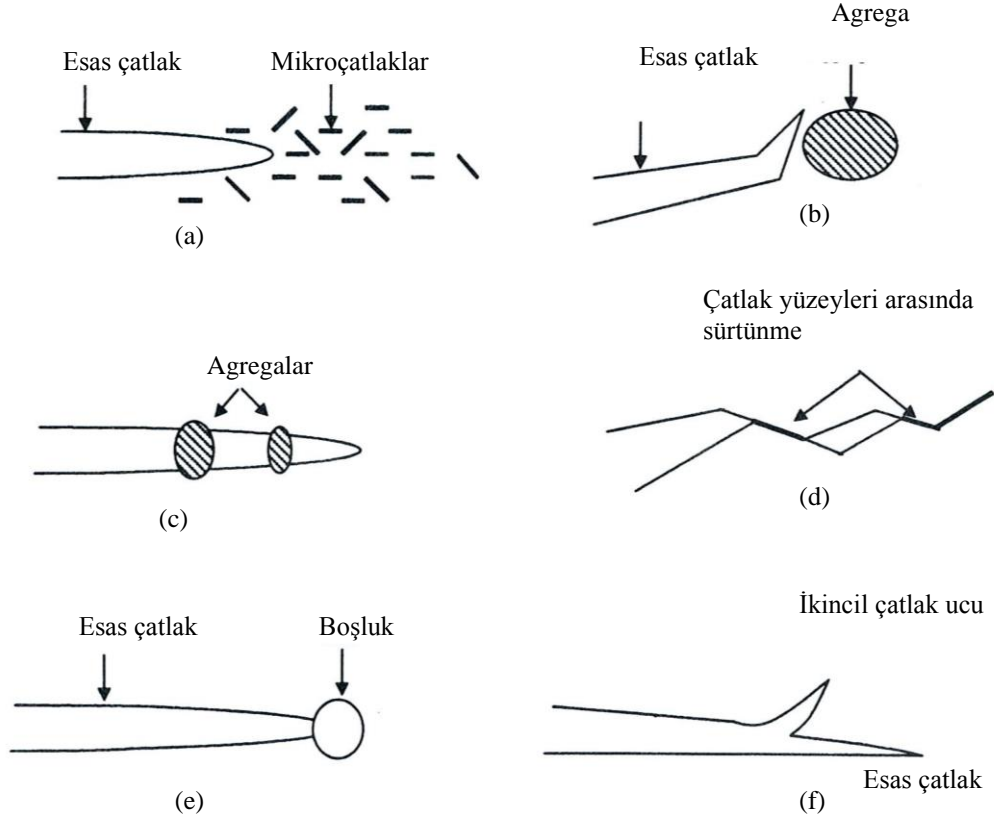
Betonda kırılma süreci bölgesi diğer malzemelere göre daha büyüktür (Tablo 2.2). Bu durum LEKM’nin neden cam gibi gevrek malzemelere uygulanabildiği halde betona uygulanamayacağını açıklamaktadır [8].

Tablo 2.2 Kırılma süreci bölgesinin tipik değerleri [9]

Malzeme	l_p (mm)
Cam	10^{-6}
Sertleşmiş çimento hamuru	5-15
Harç	100-200
Yüksek dayanımlı beton (50-100 Mpa)	150-300
Normal dayanımlı beton	200-500
Baraj betou (Maksimum agrega boyu =38mm)	700

2.3 Betonun Kırılma Davranışı

Şekil 2.6’da çentikli bir beton numuneye uygulanan, tek eksenli çekme deneyinden elde edilen yük-deformasyon eğrisi verilmiştir. Eğri üç bölgeden oluşmaktadır. (AB)



Şekil 2.7 Kırılma süreci bölgesindeki bazı toklaşma mekanizmaları: (a) çatlak kalkanı, (b) çatlak sapması, (c) agregat köprülenmesi, (d) çatlak yüzeyleri arasında sürtünme, (e) çatlak ucu bozulması, (f) çatlak dallanması [7]

Çatlak uçunda, beton dökümü sırasında oluşan hava boşlukları ve rötreten dolayı oluşan çatlaklar, çatlak kalkanı görevi yaparak çatlak ilerlemesini engellemektedir. Ayrıca dayanımı zayıf olan kısımda ilerleyen çatlağın daha dayanıklı bir bölgeye rastlamasıyla yön değiştirmesi, agregaların birbirine sürtünerek çatlağın ilerlemesini engellemesi, çatlağın agregayı geçtikten sonra bile agreganın iki parçaya ayrılincaya kadar çatlağın karşı tarafına yük aktarmaya devam etmesi, boşluğa rastlayan çatlak uçunun keskinliğinin azalması veya dallanması gibi mekanizmalar (şekil 2.7) betonda tokluk artışına neden olmaktadır [1,10]. Daha sonraki bölümlerde değinilecek meso-mekanik uygulamalar beton ve harçta oluşan bu toklaşma mekanizmalarını kapsamaktadır.

2.4.1 Ara Yüzeylerin Çatlama (Mikro Çatlak Kalkanı)

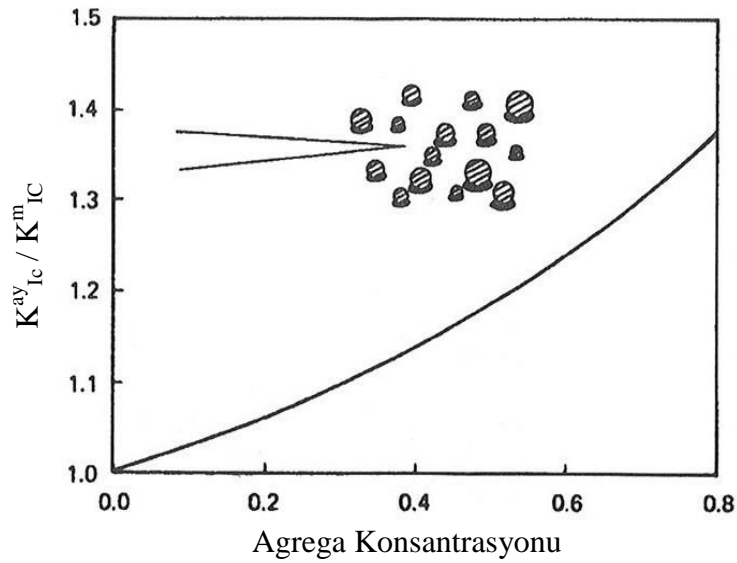
Mikro çatlama genellikle betonda zayıf bölge olan agregat-harç ara yüzeyinde meydana gelmektedir [6]. Çimento hamuru içindeki iri agreganın altında kalan boşluklar agreganın üstündeki boşluklardan daha fazladır. İri agreganın altında kalan bu büyük boşluklar, betondaki terleme sonucunda meydana gelmektedir ve betondaki

bu bölge malzemenin zayıf bölgesi sayılır [11]. Bu bölgeye ek olarak, rötre sonucu oluşan mikro çatlaklar çatlak uçunda oluşan yüksek gerilim alanının etkisiyle aktif duruma geçebilirler [6].

Esas çatlak uçunda oluşan yüksek gerilme alanı, ara yüzey çatlaklarını açmaya çalışacaktır. Bunun sonucu olarak, esas çatlak önündeki deformasyona uğrayan malzemenin elastisite modülü hasar görmemiş malzemeninkine göre azalmaktadır [12]. Elastite modülündeki bu azalma, çatlak uçundaki gerilme şiddet faktörünü azaltacak ve malzeme hasar görmemiş malzemedan daha tok bir davranış gösterecektir. Çatlak kalkanını, toklaşma mekanizması olarak kabul eden diğer bir yorum ise mikro çatlak oluşumunun ve yayılmasının dışardan ek bir enerjiye gerek duymasdır [6].

Denklem (2.5)'te ara yüzeylerin mikro çatlamasından doğan etkin kırılma tokluğunun (K_{IC}^{ay}), matris fazın kırılma tokluğuna oranı verilmiştir. K_{IC}^m matris fazın kırılma tokluğunu, V_{ag} agrega konsantrasyonu ve ν ise Poisson oranını ifade eder [12]. Şekil 2.8'de ara yüzey çatlaklarından dolayı malzemedeki etkin tokluğunun, agrega konsantrasyonu ile değişimi verilmiştir.

$$\frac{K_{IC}^{ay}}{K_{IC}^m} = \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{\pi^2}{16}\right) \times V_{ag} \times (1 - \nu^2)}} \quad (2.5)$$

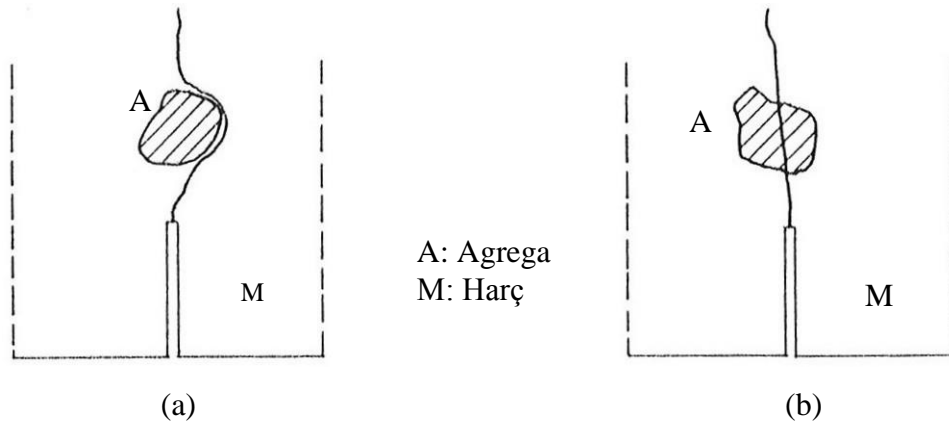


Şekil 2.8 Ara yüzey çatlaklarından dolayı oluşan toklaşma ve çatlak kalkanın şematik gösterimi [12]

2.4.2 Çatlak Sapması Mekanizması

Sertleşmiş çimento hamurunun tersine, normal dayanımlı betonda çatlak yolu daha dolambaçlı bir yol izler. Çatlak yolunun dolambaçlı yol çizmesi çatlak sapması mekanizmasının bir etkisidir [12]. Esas çatlak bir agregaya tarafından engellendiğinde; çatlağın yayılması için alternatif doğrultular kendini gösterebilir. Böyle bir durumda, çatlağın saparak agreganın etrafından ilerlemesi olasıdır. Bu durumun gerçekleşebilmesi için matris-agrega ara yüzey dayanımı agregaya dayanımından daha düşük olmalıdır. Bu durum genel normal dayanımlı betonlarda görünür [6,12]. Sapan çatlak ucu, uygulanan yüke dik kalamayacağından, çatlak ucunda gerilme şiddet faktörünü azaltacaktır. Böylece malzemede toklaşma oluşacaktır [12]. Bunun dışında, çatlak daha az kırılma yüzeyi oluşturacak şekilde, agreganın içinden de geçebilir. Harcın agregadan daha dayanıklı olduğu hafif betonlarda ve matris-agrega yüzey dayanımının agregaya dayanımından daha yüksek olduğu yüksek dayanımlı betonlarda; bu ikinci durum söz konusudur [6].

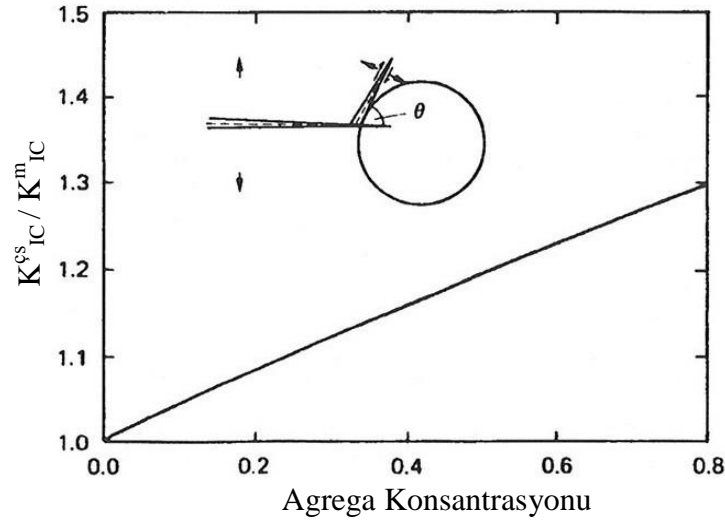
Taşdemir'in [13] silis dumanı içeren ve silis dumanı içermeyen betonlarda yaptığı çalışmada, eğilme deneylerinden sonra etkin kesit bölgesindeki kırılma yüzeyleri stereo mikroskop ile incelenmiştir. Silis dumanı içeren betonlarda, çatlaklar genelde agreganın içinden geçmekte ve malzeme daha gevrek kırılmaktadır. Bununla birlikte silis dumanı içermeyen betonlarda ise çatlaklar agrega civarında oluşmakta ve matriste yayılmaktadır (Şekil 2.9). Bu durum silis dumanı ile agrega-harç temas yüzeyinin güçlendirilerek daha rijit ve homojen bir temas yüzeyinin elde edilmesine bağlanabilir [13].



Şekil 2.9 Eğilme deneyinden sonra, stereo mikroskopla incelenen kırılmanın şematik gösterimi: (a) Silis dumanı içermeyen beton; (b) Silis dumanı içeren beton [13].

Değişik sapma açıları (Şekil 2.10) incelenerek, çatlak sapmasının sebep olduğu toklaşmanın değerlendirilmesi, Faber ve diğ.[14] tarafından incelenmiş ve aşağıdaki bağıntı önerilmiştir [12]. Aşağıdaki ifadede, K_{IC}^m matris fazın kırılma tokluğu ve V_{ag} ise agrega konsantrasyonudur.

$$\frac{K_{IC}^{cs}}{K_{IC}^m} = \sqrt{1,0 + 0,87 \times V_{ag}} \quad (2.6)$$



Şekil 2.10 Çatlak sapması mekanizması ve çatlak sapmasından dolayı malzemedeki etkin tokluğun, agrega konsantrasyonu ile değişimi [12]

2.4.3 Çatlak Kapanı Mekanizması

Agregaya yaklaşmakta olan matris çatlakları, bazen ne sapma gösterirler ne de agreganın içinden geçerler. Kuvvetli bağ yapmış parçacığa yaklaşan çatlak yayılması engellenecektir ve çatlak yüzü, sıfır açılma deplasmanına zorlanacaktır (Şekil 2.11) [6,15]. Şekil 2.11'de gösterilen kapan mekanizmasında, kapan alanı tarafındaki çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü; komşu çatlak uçunda oluşan yayılmanın (bowing) artmasıyla artacaktır. Çatlak ucu geri çekilme bölgesinde ise gerilme şiddet faktörü azalacaktır ve bunun sonucunda çatlak yayılması gecikecektir. İlerki çatlak yayılmaları için daha fazla yüke gerek duyulması, malzeme tokluğuna gözle görünür bir etki yapacaktır [15].

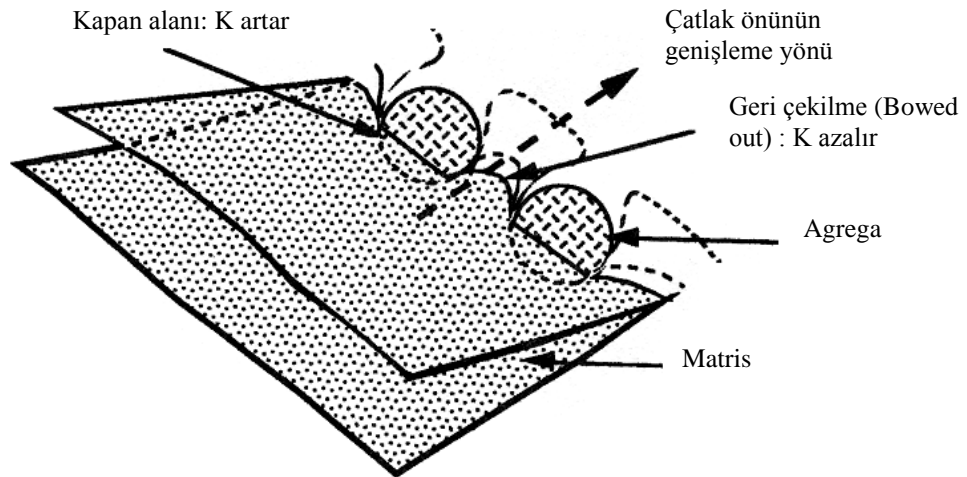
Eğer, betonda agrega dayanımı düşük ise, kapan mekanizması agreganın kırılması ile yok olacaktır. Ayrıca, matris-agrega ara yüzeyi zayıf olursa, çatlak kapanındaki

çatlak ucu süratle ara yüzey çatlağına dönüşecektir. Bu olay da çatlak kapanının kaybolmasına sebep olur [15].

Çatlak kapanı mekanizmasının oluşabilmesi için aşağıda verilen üç şartın aynı anda oluşması gerekmektedir [6].

- Agreganın tokluğu matrisinkinden büyük olmalıdır, böylece; çatlağın agregaya içinden ilerleyişi önlenecektir.
- Çatlak sapmasının ve bağ kopmasının oluşmaması için agregaya ile matris arasındaki bağ çok kuvvetli olmalıdır.
- Agreganın elastisite modülü matrisinkinden büyük veya eşit olmalıdır, böylece çatlak açılma deplasmanı çatlak ucu boyunca durdurulacaktır.

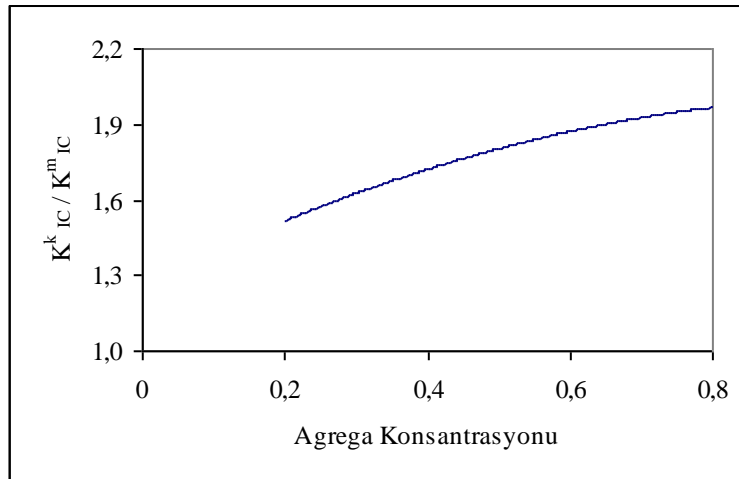
Çatlak kapanı mekanizmasının, yüksek dayanımlı betonların kırılma tokluğuna katkısı büyüktür. Küçük tane boyutuna sahip agregalar daha çok kapan alanı oluştururlar. Bu yüzden, genellikle normal betona göre daha dayanıklı ve daha ufak boyutta olan agreganın kullanıldığı yüksek dayanımlı betonların yapısı, çatlak kapanı mekanizmasının oluşmasına daha yatkındır. Bunun yanında, yüksek dayanımlı betonun güçlendirilmiş arayüzey bağları da bu mekanizma için uygun yapının oluşmasında etkilidir [15].



Şekil 2.11 Çatlak kapanı mekanizmasının şematik gösterimi [15]

Çatlak kapanı mekanizmasının, kırılma tokluğuna katkısı, agrega konsantrasyonu (V_{ag}) matris fazın kırılma tokluğu (K_{IC}^m) ile denklem (2.7) yardımıyla hesaplanır. Denklem (2.7)'nin grafiği çizildiğinde; çatlak kapanı nedeni ile oluşan tokluğun agrega konsantrasyonu ile değişimini gösteren, Şekil 2.12 elde edilir.

$$\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m} = \left\{ 1 - \frac{(1 - V_{ag}) \times (\pi / 4)}{\ln \left[\frac{1 + \cos\left(\pi \times \frac{V_{ag}}{2}\right)}{\sin\left(\pi \times \frac{V_{ag}}{2}\right)} \right]} \right\}^{-1} \quad (2.7)$$



Şekil 2.12 Çatlak kapanı nedeni ile oluşan tokluğun agrega konsantrasyonu ile değişimi

2.4.4 Agreganın Köprülenmesi Mekanizması

Önemli bir toklaşma mekanizması olan agreganın köprülenmesi; agregaların, çatlak bir tarafından diğer tarafına yük aktarmasıyla oluşmaktadır [1]. Agreganın köprülenmesi, betonun yumuşama özelliği göstermesinin sebeplerindedir. Agregaların köprülenme davranışı enerji sarfiyatına sebep olmakla beraber esas çatlak yayılmasını da geciktirmektedir. Çatlak, agreganın etrafından saptığı normal dayanımlı betonlardaki yumuşama davranışı; çatlak agreganın içinden geçtiği hafif betonlarınkine göre daha belirgindir. Normal dayanımlı betonlarda

agregalar hasar görmeyen kalmaktadır. Hasar görmemiş beton ligamentleri, gelişmekte olan çatlak yüzlerini köprülemektedir. Betondaki bu ligamentler, maksimum agrega boyutuna bağlıdır [6]. Agrega köprülenmesi mekanizması denklem (2.8) ile ifade edilmiştir.

$$\frac{K_{IC}^{kp}}{K_{IC}^m} = \sqrt{\left(\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m}\right)^2 + \frac{E \times (\pi / 2) \times f_{t,a}^2 \times g_{ort} \times V_{ag} \times (1 - \sqrt{V_{ag}}) \times (1 - V_{ag})(1 - \nu_m^2)}{E_m \times (1 - \nu^2) \times (K_{IC}^m)^2}} \quad (2.8)$$

Yukardaki denklemde V_{ag} , g_{ort} , $f_{t,a}$; sırasıyla agrega konsantrasyonu, ortalama agrega tane çapı, agreganın çekme dayanımıdır. Çatlak kapanının çalışmadığı durumlarda

$\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m} = 1$ kabul edilir. Betonun elastisite modülü ile matris fazın elastisite modülleri

arasındaki ilişki; $\nu = \nu_m$ koşulunda, agrega konsantrasyonuna bağlı olarak verilmiştir [7].

$$\frac{E}{E_m} = 1 - \frac{\pi^2}{16} (1 - \nu) V_{ag} \quad (2.9)$$

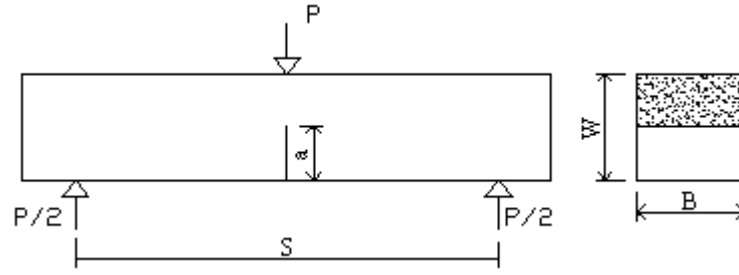
2.5 Etkin Kırılma Tokluğu

Beton ve harca ait etkin kırılma tokluğunun hesaplanmasında, kırılma sürecinde meydana gelen toklaşma mekanizmaları dikkate alınır. Etkin kırılma tokluğu, mevcut her bir kırılma mekanizmasının kırılma tokluğunun matris fazıninkine oranı ile matris fazın kırılma tokluğunun çarpımı olarak, aşağıdaki gibi bulunur.

$$K_{IC} = K_{IC}^m \cdot \left(\frac{K_{IC}^{kp}}{K_{IC}^m}\right) \cdot \left(\frac{K_{IC}^{ay}}{K_{IC}^m}\right) \cdot \left(\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m}\right) \quad (2.10)$$

2.5.1 Çimento Hamurunun Kırılma Tokluğu

Gevrek bir malzeme olan çimento hamurunda kırılma tokluğu üç noktalı eğilme deneyi ile belirlenmektedir. Önceden çentik açılmış $0,2 < a/W < 0,6$ koşulunu sağlayan prizmatik deney numunesinde, kırılma tokluğunu veren ifade denklem (2.11)'de verilmiştir [8].



Şekil 2.13 Üç noktalı eğilme deneyi ile kırılma tokluğunun belirlenmesi

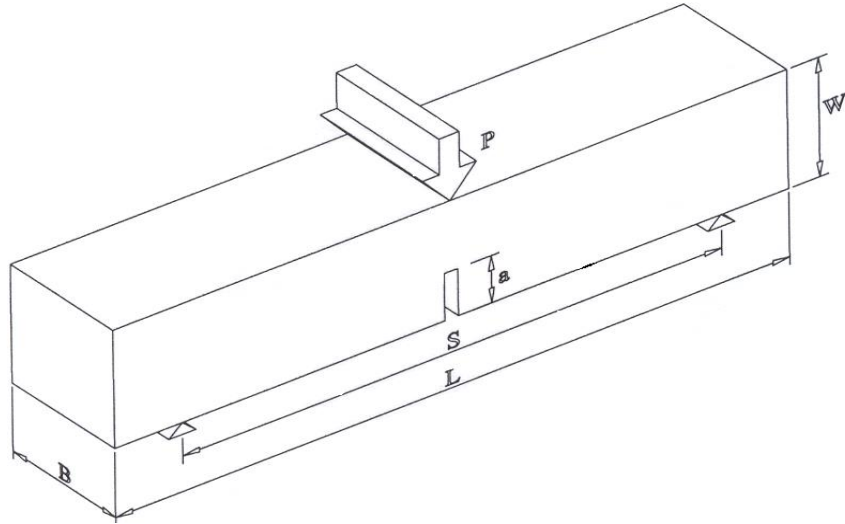
$$K_{IC}^{ch} = \frac{3PS}{2BW^{3/2}} \left[1,93 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 3,07 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 14,53 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 25,11 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 25,8 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (2.11)$$

Yukardaki denklemde S, W, B sırasıyla kiriş deney numunesine ait mesnetler arası genişliği, kiriş derinliği ve genişliği; a çentik derinliğini, P'de maksimum yükü ifade eder [8]. Çimento hamurunda kırılma tokluğunu tanımlamak için su-çimento oranına bağlı olarak aşağıdaki denklem önerilmiştir [3,16,17].

$$K_{IC}^{ch} = 0,6125 - 0,85 \frac{w}{c} \quad (2.12)$$

2.6 Üç Noktalı Eğilme Deneyi İle Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi

Kırılma enerjisi, birim alan başına çatlak oluşumu için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanır. Kırılma enerjisinin belirlenmesinde, RILEM 50- FMC [18] komitesi tarafından önerilen, üç noktalı eğilme deneyi kullanılmaktadır. Şekil 2.14'te, çentikli harç ve beton numunelere uygulanan üç noktalı eğilme deneyi şematik olarak gösterilmiştir. Kırılma enerjisi deneyinin amacı kiriş numunesinin kırılıp iki parçaya ayrılıncaya kadar harcanan enerjiyi ölçmektir.



Şekil 2.14 Üç noktalı eğilme deneyi

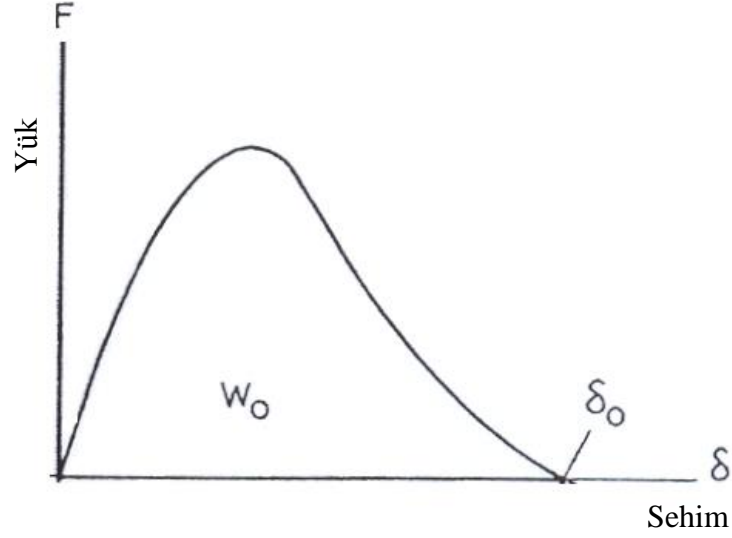
Şekil 2.14'te şematik olarak gösterilen deney numunesinde, L, B, W sırasıyla kiriş numunenin uzunluğunu, genişliğini ve derinliğini, S mesnetler arası uzunluğu, P ise kiriş numunenin ortasına uygulanan yükü ifade eder .

Kırılma enerjisinin değeri denklem (2.13)'ün yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$G_f = \frac{W_0 + mg \delta_0}{A_{lig.}}, \text{ N/m} \quad (2.13)$$

Yukarıdaki denklemde, W_0 yük-sehim grafiğinin altında kalan alanı (Şekil 2.15), g yerçekimi ivmesini, δ_0 göçme sırasında kiriş ortasındaki sehim, $A_{lig.}$ etkin kesit alanını ifade eder; m ise deney numunesinin mesnetler arasında kalan kısmının ağırlığı (m_1) ile deney cihazına bağlı olmayan yükleme aparatının ağırlığına (m_2) bağlı olarak hesaplanır.

$$m = m_1 + 2m_2, \text{ kg} \quad (2.14)$$



Şekil 2.15 Yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi [19]

2.7 Kırılma Enerjisine Etki Eden Faktörler

Kırılma enerjisi bir malzeme sabiti değildir. Shinohora ve diğ. [20] yaptıkları çalışmada kırılma enerjisinin yükleme hızı maksimum agrega boyutu ve numunenin yaşının artmasıyla arttığı ve çentik derinliği ile su çimento oranının artması ile azaldığı görülmüştür. Kırılma enerjisine etki eden etkenlerin bazıları aşağıda incelenmiştir.

2.7.1 Maksimum Agrega Boyutunun Kırılma Enerjisine Etkisi

Beton karışımında kullanılan maksimum agrega boyutunun, betonun kırılma enerjisine etkisi belirgindir. Tablo 2.3 ve Şekil 2.16'da , maksimum agrega boyutunun kırılma enerjisine etkisi görülmektedir. Genelde maksimum agrega boyutu arttığında kırılma enerjisi artmaktadır. Rao ve Prasad [21] bu konu üzerine yaptıkları çalışmada, dozajı $450 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ve su çimento oranı 0,325 olan beton karışımlarda kullanılan, maksimum agrega boyutunun 4,75 mm'den 20,0 mm'ye çıkmasıyla, kırılma enerjisinin $76,6 \text{ N/m}^2$ 'den 141 N/m^2 'ye çıktığını belirtmişlerdir. Taşdemir ve diğ.[22] ile Yan ve diğ.[23] ait çalışmalarda da maksimum agrega boyutundaki artma ile kırılma enerjisinin arttığı görülmektedir.

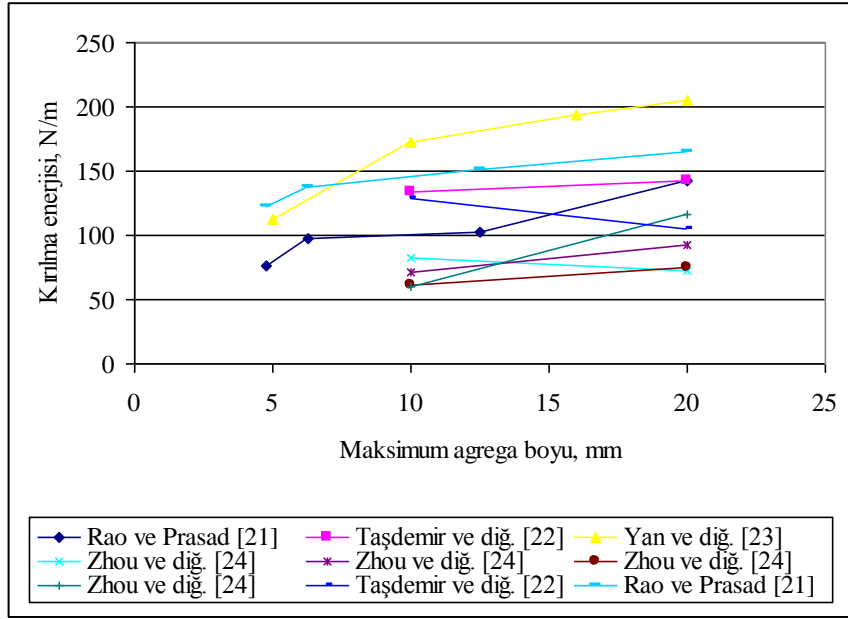
Maksimum agrega boyunun artması, çimento hamuru-agrega arasında yüksek bağ gerilmelerine sebep olur ve bu durum bağ kırılmalarıyla sonuçlanır. Buna karşın maksimum agrega boyunun daha küçük olduğu durumlarda, agreganın yüksek özgül yüzey alanından dolayı çimento hamuru-agrega arasındaki bağ kırılmalarında bir

azalma olur. Maksimum agrega boyutunun büyük olduğu durumlarda ortaya çıkan ara yüzey kırılmalarının daha fazla olması, çatlak yolunun daha dolaylı olmasını sağlar; bu durum kırılma enerjisinde bir artışa sebep olmaktadır [21].

Tablo 2.3 Maksimum agrega boyutunun kırılma enerjisine etkisi

Referans	Toplam bağlayıcı (kg/m ³)	C (%)	SD (%)	YFC (%)	Su/bağlayıcı	Kum (kg/m ³)	İri agrega (kg/m ³)	g (mm)	G _f (N/m)
Rao ve Prasad [21]	450	100	-	-	0,325	700	900	4,75	76,6
								6,30	97,8
								12,50	103
								20,00	142
	450	90	10	-	0,325	700	900	4,75	122
								6,30	137
								12,50	151
								20,00	165
Yan ve diğ. [23]	674	70	-	30	0,26	632	948	5	111,9
								10	172,2
								16	193,9
								20	205,3
Taşdemir ve diğ. [22]	402	100	-	-	0,36	732	1097	10	134
								20	142
	404	91	9	-	0,36	736	1104	10	129
								20	105
Zhou ve diğ. [24]	454	90	10	-	0,32	660	1105	10	82
								20	73
	454	85	15	-	0,32	660	1105	10	71
								20	93
	547	90	10	-	0,23	660	1105	10	61
								20	75
	547	85	15	-	0,23	660	1105	10	60
								20	116

*YFC: Yüksek Fırın Cürufu



Şekil 2.16 Maksimum agrega boyu ile kırılma enerjisi arasındaki ilişki

2.7.2 Çentik Derinliği Oranının Kırılma Enerjisine Etkisi

Çentik derinliğinin kırılma enerjisine etkisi Tablo 2.4’de verilmektedir. Malyar ve Warren [25] tarafından yapılan çalışmada; çatlak derinliği oranının (a/w) 0,3’ten 0,7’ye çıkmasıyla, kırılma enerjisinde % 35’e varan azalmalar görülmüştür. Shinohara ve diğ.[20] yaptıkları çalışmada ise, çentik derinliği oranının 0,10’dan 0,70’e çıkmasıyla kırılma enerjisi % 33 azalmıştır [6].

Tablo 2.4 Çentik derinliğinin kırılma enerjisine etkisi

Bileşim		Referans					
		Malvar ve Warren [25]		Shnohara ve diğ. [20]		Bayramov ve diğ.[3]	
Çimento (kg/m ³)		613		353		760	
Su/Çimento		0,40		0,55		0,46	
Kum (kg/m ³)		443		689		-	
İri agrega (kg/m ³)		1034		1054		-	
0-4 mm agrega (kg/m ³)		-		-		678	
4-12 mm agrega (kg/m ³)		-		-		416	
Çentik derinliği oranı (a/w)	Kırılma enerjisi (N/m)	0,3	77,3	0,1	139,3	0,05	103
				0,3	102		
		0,5	64,5	0,5	98,1	0,5	92
				0,7	93,2		
0,7	48,7	0,7	93,2				

a: Çentik derinliği w: kırış numunesinin derinliği

2.7.3 Kırılma Enerjisinde Boyut Etkisi

Yapılan araştırmalar ve deneyler, üç noktalı eğilme deneyi ile kırılma enerjisinin belirlenmesinde boyut etkisinin önemini ortaya koymuştur (Tablo 2.5). Mevcut deney sonuçları dikkate alındığında, kırılma enerjisi genellikle deney numunesi boyutunun artmasıyla artmaktadır. Ancak bununla birlikte, Jueshi ve Hui yaptıkları çalışmada; harçta bu etkinin tersi görülebilmektedir; yani kırılma enerjisi deney numunesi boyutunun artmasıyla azalmaktadır [26].

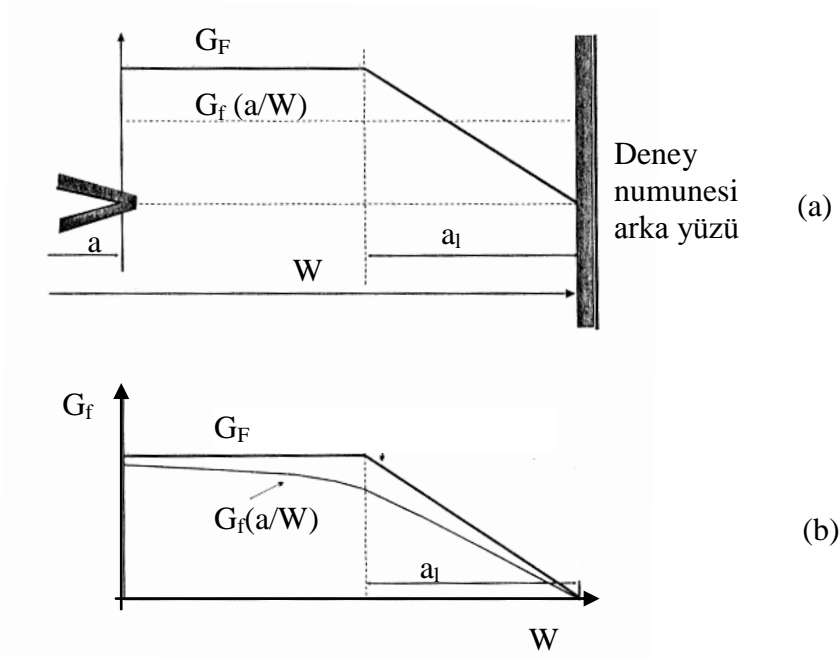
Tablo 2.5 Kırılma enerjisinde boyut etkisi

Referans		Numune boyutu	G_F (N/m)
Beton	Mindess [27]	100×100×840	80,6
		200×200×1680	82,6
		400×400×3360	115,3
	Malvrar ve Warren [25]	102×102×788	72,3
		102×216×788	89,3
Harç	Jueshi ve Hui [26]	40×40×160	94,2
		70×70×280	89,8
		100×100×400	76,6

2.8 Gerçek Kırılma Enerjisi

Özgöl Kırılma Enerjisi (G_f), betonun kırılma davranışının analizinde kullanılan en önemli parametredir. Kırılma enerjisinin deney numunesinin boyut ve biçimine bağılı olarak değişmesinden dolayı; G_f 'nin deneysel olarak tanımlanmasında kullanılan yöntem, araştırmacılar arasında araştırma ve tartışma konusu olmuştur. Daha sonra boyuttan bağımsız kırılma enerjisi elde etmek için bütün bu etkilerin göz önünde tutulmasının gerekliliğı anlaşılmış ve özgöl kırılma enerjisinin çatlak yolu boyunca sabit kalmadığı ifade edilmiştir [4].

Yakın zamanda yapılan çalışmalar, çatlak yolu boyunca çatlak oluşumu için gerekli enerjinin kırılma süreci bölgesinin etkisi altında olduğunu, kırılma süreci bölgesinin de deney numunesinin serbest yüzeyine bağılı olduğunu kabul etmişlerdir. Yeni çatlak oluşumu için gerekli enerji çatlak ilerlediğı zaman azalmaktadır. Başlangıçta çatlak oluşumu için gerekli enerjideki azalma düşük bir seviyede iken bu oran çatlağın serbest yüzeye (free boundary) yaklaşması ile artmaktadır. Özgöl enerjideki bu değişim, Şekil 2.17'de belirtildiğı gibi, bi-lineer bir yaklaşımla ifade edildi [4,5].



Şekil 2.17 Tek çentikli deney numunesinde enerji dağılımı [3]

Enerjideki azalmanın belirgin bir şekilde artmaya başlaması malzemenin geçiş ligamenti (a_1) kısmında meydana gelir; a_1 malzeme özellikleri ile deney numunesinin biçim ve boyutuna bağlı olarak değişmektedir ve ayrıca a_1 deney numunesinin çentiksiz kısmından $(w-a)$ ligamentten daha kısadır. Bi-lineer ifadelerle dayanarak boyuttan bağımsız kırılma enerjisi, deneyle bulunan özgül kırılma enerjisini kullanarak, denklem (2.15)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir [5]. Böylece boyuttan bağımsız kırılma enerjisini elde edilmektedir [4]. Boyut etkisinden bağımsız kırılma enerjisini ve a_1 'yi en doğru şekilde hesaplamak için, denklem (2.15)'in çözümünde en küçük kareler metodu kullanılmıştır [5]. Boyut etkisinden bağımsız kırılma enerjisi üzerine Karihaloo ve Abdalla'nın [4] yaptıkları diğer bir çalışmada; iki değişik çentik derinliği oranı ($\alpha=a/W$) kullanılarak elde edilen özgül kırılma enerjilerinin, G_F ve a_1 'nin hesaplanması için yeterli olacağını belirtilmiştir.

$$G_f(a/w) = \left\{ \begin{array}{l} G_F \left[1 - \frac{a_1/W}{2(1-a/W)} \right] ; \dots \dots 1 - a/W > a_1/W \\ G_F \cdot \frac{(1-a/W)}{2(a_1/W)} ; \dots \dots 1 - a/W \leq a_1/W \end{array} \right\} \quad (2.15)$$

Böylece en küçük kareler yöntemine gerek olmadan, G_F kolayca hesaplanabilmektedir. Karihaloo ve Abdallan'ın önerdiği yöntemde üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulacak numunelerin, birine çentik derinliği oranı ($\alpha=a/W$) 0,05 olan sığ çentik, diğerine ise çentik derinliği oranı ($\alpha=a/W$) 0,5 olan derin çentik açılmaktadır. Derin ve sığ çentik açılmış iki ayrı numuneden elde edilen özgül kırılma enerjisi boyut etkisinden bağımsız kırılma enerjisinin hesaplanması için yeterli olmaktadır [4,5].

Genellikle deney numunesinin çentiksiz kısmı ile geçiş ligamentinin uzunluğu arasında $(w-a) > a_l$ şartı sağlandığından, bu duruma ait gerçek kırılma enerjisini veren ifade denklem (2.16) ile, geçiş ligamentinin uzunluğu ise denklem (2.17) kullanılarak hesaplanabilir.

$$G_F = \frac{G_f(a/W)}{1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{a_l/W}{1 - a/w}} \quad (2.16)$$

$$a_l = \frac{2W(G_f(0,5) - G_f(0,05))}{\frac{G_f(0,5)}{1 - 0,05} - \frac{G_f(0,05)}{1 - 0,5}} \quad (2.17)$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Çalışmanın Amacı

Beton, harç ve çimento hamuru üretimleri yapılarak her bir fazın kırılma enerjileri incelenmiştir. Kırılma enerjisi üç noktalı eğilme deneyi yardımıyla bulunmuş, ayrıca sığ ve derin çentik durumlarına göre net eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra numunelerde silindir dayanımı, disk yarma dayanımı bulunmuş ve silindir numunelere uygulanan basınç deneyi sonunda, elastisite modülü hesaplanmıştır.

3.2 Üretilen Betonun Ortak Özellikleri

Tez çalışması kapsamında 3 seri üretim yapılmıştır. Üretimler İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Üretimlerde 45 dm³'lük hacme karşılık gelen malzeme miktarları kullanılmıştır.

Bağlayıcı madde olarak çimentonun yanında ek olarak silis dumanı ve akışkanlığı sağlamak için hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Silis dumanının miktarı çimento dozajının %10'u olarak belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı maddesinin miktarı üretim sırasında yapılan yayılma deneylerine bağlı olarak ve ayrışmayı dikkate alarak, her üretim için farklı miktarda belirlenmiştir.

3.3 Kullanılan Malzeme Özellikleri

3.3.1 Çimento

Deneylerde Akçansa Çimento Fabrikası'na ait CEM I 42,5 tipinde çimento kullanılmıştır. Çimentonun basınç dayanımı ve fiziksel özellikleri Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılan deneylerle bulunmuş, kimyasal özellikleri ise üretici firmadan elde edilmiştir. Çimentoya ait kimyasal, fiziksel özellikler ve basınç dayanımları sırasıyla Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal özellikleri

	Standartlar (%)	Analiz sonuçları
CaO		%65,08
SiO ₂		%20,41
Al ₂ O ₃		%4,72
Fe ₂ O ₃		%3,70
MgO	maks.% 0,5	%0,92
K ₂ O		%0,81
Cl	maks.% 0,1	%0,0305
Na ₂ O		%0,34
Çözünmez Kalıntı	maks.% 1,5	%0,49
SO ₃	maks.% 3,5	%2,56
Kızdırma Kaybı	maks.% 4,0	%1,39

Tablo 3.2 Çimentonun fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık (gr/cm ²)		3,13
Priz süresi	Başlangıç	2 st. 30dk.
	Bitiş	4 st.
Hacim sabitliği (mm)		2
İncelik	Özgül yüzey (cm ² /gr)	3560
	200 µm'luk elek üstünde kalan (%)	0,1
	90 µm'luk elek üstünde kalan (%)	1,1

Tablo 3.3 Çimentonun basınç dayanımı

Gün	Standartlar (N/mm ²)	Basınç dayanımı (N/mm ²)
7	20	40,3
28	42,5	54,5

3.3.2 Silis Dumanı

Deneyleerde çimentoya ek olarak, filler ve puzolanik etkisi olan silis dumanı da kullanılmıştır. Silis dumanının miktarı çimento dozajının %10'u olarak belirlenmiştir. Helyum piknometresi ile yapılan ölçümde silis dumanının özgül ağırlığı 2,24 gr/cm³ bulunmuştur.

3.3.3 Agregalar

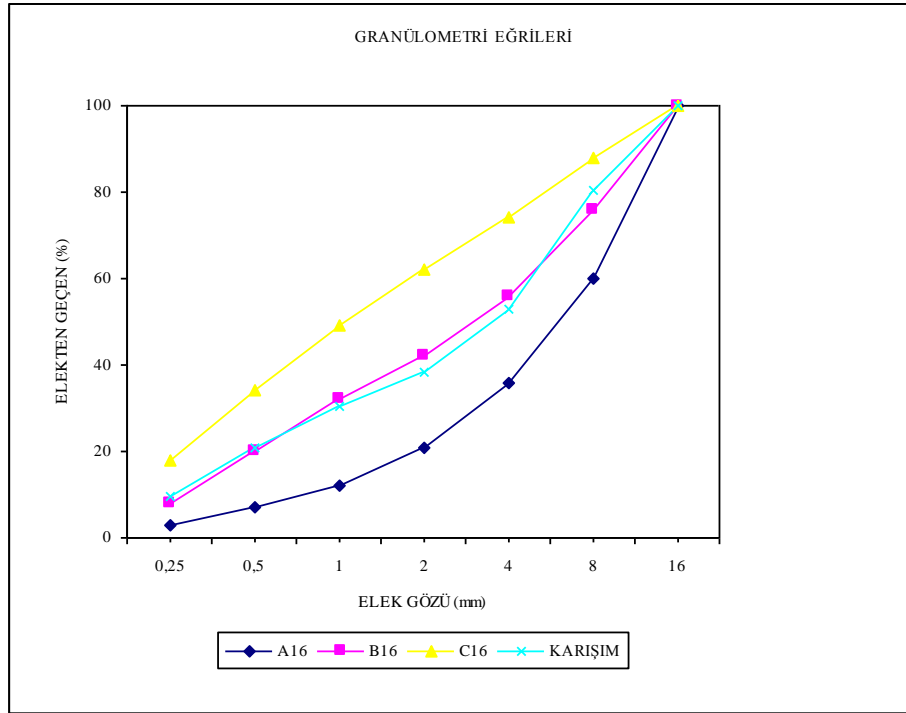
Deneyleerde iri agrega olarak I nolu kırmataş, ince agrega olarak deniz kumu, kırmakum ve silis unu kullanılmıştır. I nolu kırmataş 10 mm'lik elekten elenerek maksimum tane boyutu sınırlandırılmıştır. Agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 3.4'te, elek analizi Tablo 3.5'te verilmiştir. Beton üretiminde kullanılan agrega karışımı %50 kırmataş I, %20 kırmakum, %25 deniz kumu ve %5 silis unundan oluşmaktadır. Agrega karışımının granülometri eğrisi referans eğrileri ile birlikte Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega	Özgül ağırlık (%)	Su emme (%)
Kırmataş I	2,72	0,42
Kırmakum	2,70	2,03
Deniz kumu	2,61	0,90
Silis unu	2,62	0,33

Tablo 3.5 Agregaların elek analizi sonuçları

Elek boyutu (mm)	Elekten Geçen Yüzde			
	Kırmataş I	Kırmakum	Deniz kumu	Silis unu
16	100	100	100	100
8	61	100	100	100
4	5,6	100	100	100,0
2	0,4	67	78	100,0
1	0,4	48	62	100,0
0,5	0,4	31	39	100,0
0,25	0,4	14,4	7,3	96,6



Şekil 3.1 Agrega referans ve karışım eğrileri

3.4 Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi

Beton üretimleri sırasında su ihtiyacını yüksek oranda azaltan, prefabrik beton ve hazır beton endüstrisi için geliştirilmiş, yeni nesil hiperakışkanlaştırıcı katkı malzemesi olan Glenium 51 kullanılmıştır. Glenium 51, modifiye edilmiş polikarboksilik eter esaslı, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan, mükemmel yüzey görünümü elde etmek için kullanılan, klor içermeyen beton katkı maddesidir. Glenium 51'in özgül ağırlığı $1,11 \text{ gr/cm}^3$ olarak bulunmuştur.

3.4.1 Glenium 51'in Etki Mekanizması ve Teknik Özellikleri

Glenium 51'in geleneksel süperakışkanlık verici katkı maddelerinden (Naftalin Sülfonat Formaldehit veya Melamin Sülfonat Formaldehit esaslı) farkı, çimento dağılımının etkinliğini büyük ölçüde artıran, yeni etki mekanizmasıdır. Geleneksel, melamin ve naftalin sülfonatlar gibi süper akışkanlaştırıcılar, çimento granülleri tarafından emilen polimer esaslı katkılardır. Bu katkılardaki polimerler, beton karıştırma işleminin en erken aşamasında granüllerin yüzey alanlarının çevresini kuşatırlar. Polimer zincirlerinin sülfonik grupları, çimento partikül yüzeylerinin negatif yükünü artırır ve bu partikülleri elektriksel itme ile dağıtırlar. Bu elektrostatik

mekanizma, çimento hamurunun dağılmasına neden olur ve bunun olumlu bir sonucu da, belirli beton işlenebilirliğinin daha az su karışımı ile elde edilmesini sağlamasıdır. Glenium 51, geleneksel süper akışkanlık verici katkı maddelerine göre değişik bir kimyasal yapıya sahiptir. Glenium 51, uzun kenar zincirli karboksilik eter polimerlerinden oluşur. Karıştırma işleminin başlangıcında, geleneksel süperakışkanlaştırıcılarda olduğu gibi, elektrostatik dağılma mekanizmasını harekete geçirir. Bu işlemle su içeriği büyük ölçüde azalan akışkan bir beton elde edilir. Ancak polimer omurgasını bağlayan zincirler, çimento partiküllerinin dağılma ve yayılma yeteneğini büyük ölçüde stabilize eden bir engel oluşturur [28].

3.5 Üretim

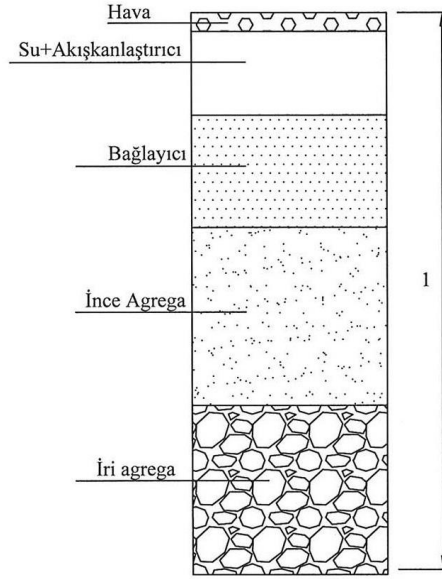
Deneylere beton üretimiyle başlanmış, bunu harç ve çimento hamurunun üretimleri izlemiştir. Harç ile çimento hamuru üretiminde kullanılan malzeme miktarları gerçek beton bileşiminden yararlanılarak bulunmuştur. Üretilen fazda bulunmayan agrega hacimleri, beton bileşiminden çıkarılmış ve geriye kalan malzeme hacmi 1 m³'e oranlanarak kullanılacak malzeme miktarları bu oran kadar arttırılmıştır. Üretimlerde etkin suyun toplam bağlayıcıya oranı sabit tutulmuş ayrıca her üretimde agregaların su emmesi ayrı ayrı bulunmuş ve bulunan miktar etkin suya eklenmiştir. Tablo 3.6'de üretimlerin 1m³ için gerçek bileşim değerleri verilmiştir.

Tablo 3.6 Beton, harç ve çimento hamuru bileşimleri ve taze haldeki özellikleri

	Beton	Harç	Çimento hamuru
Çimento (kg)	385	586	1416
Silis dumanı (kg)	39	59	142
Kırmataş I (kg)	922	-	-
Kırmakum (kg)	366	558	-
Deniz kumu (kg)	442	675	-
Silis unu (kg)	89	136	-
Katkı (kg)	8,5	4,4	2,8
Toplam su (kg)	141	210	463
Agregaların emdiği su (kg)	15,6	17,9	-
Etkin su (kg)	125,4	192,1	463
Etkin su / çimento	0,33	0,33	0,33
Etkin su / bağlayıcı	0,30	0,30	0,30
Hava (%)	3,3	5,5	1,9
Yayılma (cm)	52	47	37
Birim ağırlık (kg/m ³)	2390	2230	2020

3.6 Bileşenlerin Hacimsel Değerleri

Sıkıştırılmış taze beton; bağlayıcı, iri agrega, ince agrega, su, akışkanlaştırıcı ve havanın hacim oranlarının toplamından oluşmaktadır (Şekil 3.2) ve bu oranların toplamı 1'e eşittir (denklem (3.1)). Üretimlerde kullanılan çimento ile silis dumanı bağlayıcıyı, maksimum boyutu 10 mm olan kırmataş I iri agregayı; kırmakum, deniz kumu ile silis unu ise ince agregayı meydana getirmektedir.



Şekil 3.2 1m³ betonu oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi

$$\frac{m_{\zeta}}{\rho_{\zeta}} + \frac{m_{SD}}{\rho_{SD}} + \frac{m_{su}}{\rho_{su}} + \frac{m_{ak.}}{\rho_{ak.}} + \frac{m_{KI}}{\rho_{KI}} + \frac{m_{Kk}}{\rho_{Kk}} + \frac{m_{Dk}}{\rho_{Dk}} \frac{m_{S.unu}}{\rho_{S.unu}} + V_{hava} = 1 \quad (3.1)$$

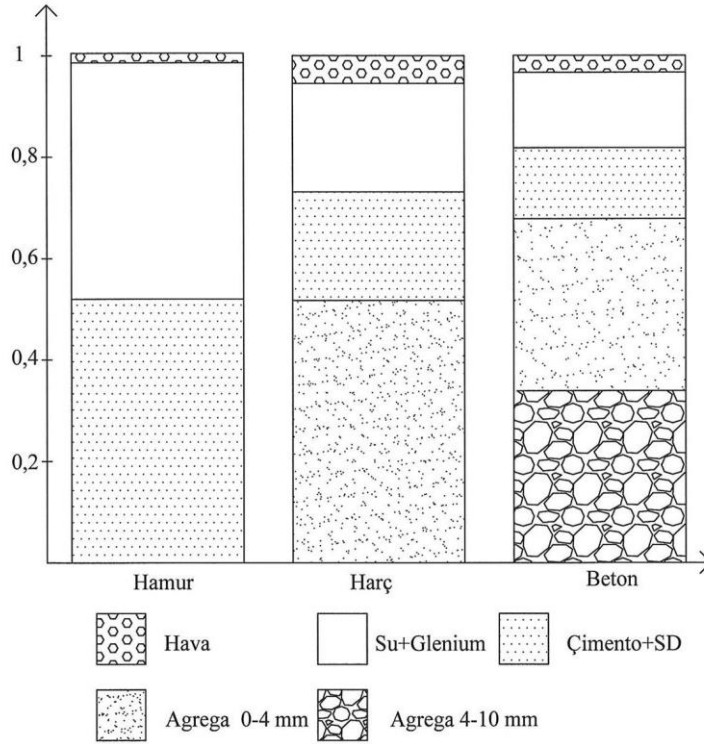
Yukardaki denklemde, m_{ζ} , m_{SD} , m_{su} , $m_{ak.}$, m_{KI} , m_{Kk} , m_{Dk} , $m_{S.unu}$ sırasıyla çimentonun, silis dumanının, suyun, akışkanlaştırıcının, kırmataş I'in, kırma kumun, deniz kumunun, silis ununun 1 m³ beton içindeki ağırlıklarını, V_{hava} 1m³ betondaki hava hacmini, ρ ile gösterilen semboller ise özgül ağırlıkları ifade etmektedirler. Tablo 3.7'de karışımlara ait bileşenlerin hacimsel değerleri verilmiştir; Şekil 3.3'te ise 1 m³ betonda, harçta ve çimento hamurunda malzeme konsantrasyonlarının şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.7 1m³ beton, harç ve çimento hamurudaki bileşenlerin hacimsel değerleri (m³)

Bileşen		Çimento hamuru	Harç	Beton
Çimento		0,4524	0,1872	0,1230
Silis dumanı		0,0634	0,0263	0,0174
İri agraga	Kırmataş I	-	-	0,3390
İnce agregata	Kırmakum	-	0,2067	0,1356
	Deniz kumu	-	0,2586	0,1693
	Silis unu	-	0,0519	0,0340
Su		0,4630	0,2100	0,1410
Katkı		0,0025	0,0040	0,0077
Hava		0,0190	0,055	0,033

Harç fazında ince agreganın toplam hacim oranı 0,517 ve betonda iri agreganın hacim oranı ise 0,339'dur. Hem iri agrega hem de ince agrega içeren betonda, ince agreganın hacim oranı (V_{f1}) denklem (3.2) kullanılarak 0,513 bulunmuştur.

$$V_{f1} = \frac{\frac{m_{Kk}}{\rho_{Kk}} + \frac{m_{Dk}}{\rho_{Dk}} + \frac{m_{S.unu}}{\rho_{S.unu}}}{1 - \frac{m_{Kl}}{\rho_{Kl}}} \quad (3.2)$$



Şekil 3.3 1 m³ betonda, harçta ve çimento hamurunda malzeme konsantrasyonlarının şematik gösterimi

3.7 Taze Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deneyleri

Her bir üretimde 45 dm³ karışım elde edilmiştir. Her seride işlenebilmenin belirlenmesi için yayılma deneyleri yapılmıştır. Yayılma deneyleri alt ve üst çapı sırasıyla 20 ve 13 cm, yüksekliği 13 cm olan yayılma konisi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 8 dm³'lük birim ağırlık kabı yardımıyla, taze haldeki birim ağırlıklar bulunmuş ve birim ağırlıklar yardımıyla gerçek malzeme ve hava miktarları değerlerine ulaşılmıştır.

3.8 Sertleşmiş Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deneyleri

Üç üretimden de 6 adet 10×10×50 cm boyutunda prizma, 3 adet 100×20 cm boyutunda silindir ve 6 adet 150×6 cm boyutunda disk deney numuneleri elde edilmiştir. Üretimden bir gün sonra kalıptan alınan numuneler 23±2°C'lik su küründe bekletilmiştir.

Prizmatik numunelerin 3 tanesine 5 mm'lik yüzeysel çentik diğer 3 tanesine 50 mm'lik derin çentik açılmış, daha sonra önceden çentik açılmış bu numunelere deformasyon kontrollü yükleme yapılarak kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları elde edilmiştir. Silindir numunelerden silindir basınç mukavemeti ve elastisite modülü, disk numunelerden ise yarma-çekme dayanımları elde edilmiştir. Tablo 3.8'de yapılan deneyler, deney numunesi tipleri ve boyutları ile deneyler sonunda elde edilen mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.8 Deney türü ve elde edilecek parametreler

Deney türü	Deney numunesi tipi	Numune boyutları (mm)	Mekanik özellikler
Basınç	Silindir	Ø100×200	→ Basınç dayanımı → Elastisite modülü
Yarma	Disk	Ø150×60	→ Yarma çekme-dayanımı
Üç noktalı eğilme	Prizma	500×100×100	→ Kırılma enerjisi → Net eğilme dayanımı

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deney Sonuçları

Taze betonda birim ağırlık ve yayılma deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık, darası alınmış 8 dm³'lük ölçü kabı yardımıyla; yayılma deneyi ise üst çapı 13 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 13 cm olan yayılma konisi ile düz bir zemin üzerinde yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Taze beton, harç ve çimento hamuru deney sonuçları

Deney numunesi	Birim ağırlık (kg/dm ³)	Yayılma (cm)
Beton	2,39	52
Harç	2,23	47
Çimento hamuru	2,02	37

4.2 Sertleşmiş Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deney Sonuçları

4.2.1 Silindir Basınç Deneyi

Basınç deneyinde çapı 100 mm, yüksekliği 200 mm olan silindir numuneler kullanılmıştır. 23±2°C'lik su küründe beklemiş silindir numuneler, 27 gün sonunda su havuzundan alınmış ve silindir numunenin üst tabanına başlık yapılmıştır. Başlık yapılan numuneler 28 gün sonunda tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Basınç deneyi, İ.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş ve 1000 kN'luk J.Amsler presi kullanılmıştır. Silindir basınç deneyinde ayrıca 0,001 mm hassasiyetli komparatör yardımıyla elastisite modülü de elde edilmiştir. Silindir numunelere uygulanan basınç deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Elastisite modülü ve silindir basınç dayanımları

Deney numunesi	Silindir basınç dayanımı (N/mm ²)	Elastisite modülü (N/mm ²)
Beton	91,1	44500
Harç	77,1	39500
Çimento hamuru	82,0	23400

4.2.2 Disk Yarma-Çekme Deneyi

23±2°C'lik su küründe beklemiş disk numunelere 28. günde yarma-çekme deneyi uygulanmıştır. Çapı 150 mm, yüksekliği 60 mm olan deney numunelerine yarma-çekme deneyi 1000 kN'luk J.Amsler presi ile yapılmıştır. Yarma deneyinde, 20 mm eninde ve 70 mm uzunluğunda çitalar kullanılarak tepe yükünün çizgisel olarak dağılması sağlanmıştır. Çizgisel yük boyunca basınç gerilmelerine dik yönde oluşan çekme gerilmeleri etkisiyle numune ortadan yarılarak kırılmaktadır.

Deney sırasında elde edilen tepe yükü denklem 4.1'de yerine konularak yatay çekme gerilmesi hesaplanır (Tablo 4.3).

$$f_{st} = \frac{2 \times P_{maks}}{\pi \times D \times b}, \text{ N/mm}^2 \quad (4.1)$$

f_{st} : Yarma-çekme dayanımı

$P_{maks.}$: Numunenin kırılmasını sağlayan maksimum tepe yükü

D : Disk numunenin çapı

b : Disk numunenin yüksekliği

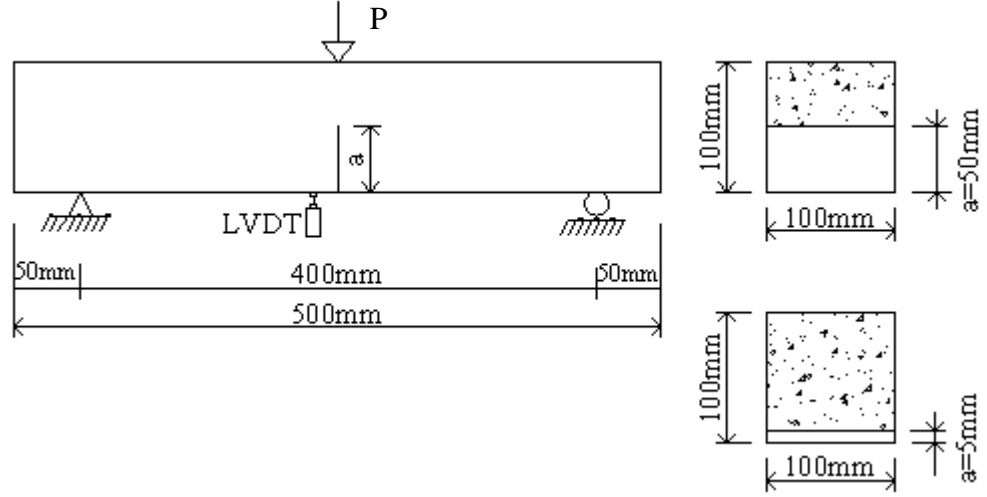
Tablo 4.3 Disk numunelerinin yarma dayanımları

Deney numunesi	D (mm)	b (mm)	Yarma-çekme dayanımı (N/mm ²)
Beton	150	60	6,9
Harç	150	60	5,1
Çimento hamuru	150	60	4,3

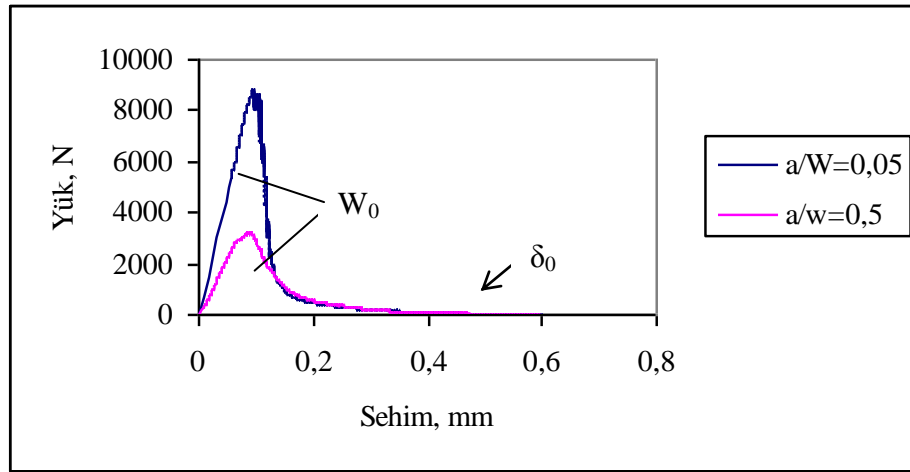
4.2.3 Üç Noktalı Eğilme Deneyi

500×100×100 mm boyundaki prizma numulelere 28 gün 23°C±2°C su kürü uygulanmış ve numuneler su havuzundan alındıktan sonra 5 ila 7 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Böylece eğilme deneyleri yaklaşık 33. günde gerçekleştirilmiştir. Numunelere elmas uçlu spiral testere yardımıyla 5 mm derinlikte yüzeysel çentik ve 50 mm derinlikte derin çentik açılmıştır. Deneyler Instron 5500R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneyden önce, numunelerin mesnetlere oturan kısımları ve yükün uygulandığı kısım eğelenerek düzgün mesnet oturması ile düzgün yük dağılımı sağlanmıştır. Üç noktalı eğilme deneyi düzeneği Şekil 4.1’de ve beton numunelere ait yük-sehim eğrilerinin tipik gösterimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Instron eğilme cihazına bağlı ve numunedeki çökme miktarını veren LVDT yardımı ile deformasyonlar ve bunlara karşı gelen yük değerleri elde edilmiştir. Bu değerler yardımıyla her bir deney numunesinin yük-sehim grafikleri çizilmiştir. Beton numunelere uygulanan üç noktalı eğilme deneyinde, yükleme hızı 0,0175 mm/dakika’dır. Üç noktalı eğilme deneyi sonunda, her iki çentik derinliği için kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları bulunmuştur. Daha sonra, Abdalla ve Karihalo ile Karihaloo ve diğ.’nin [4,5] önerdiği yöntem göre; aynı geometriye sahip, birine derin çentik diğerine sıg çentik açılmış iki adet deney numunesinin kırılma enerjisi değerlerinden, boyut etkisinden bağımsız gerçek kırılma enerjisi hesaplanmıştır. Hesaplanan kırılma enerjileri karakteristik boyun hesaplanmasında kullanılmıştır. Ayrıca derin çentik açılmış hamur numunelerin eğilme deneyinden, hamurun kırılma tokluğu bulunmuştur. Üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen tüm

değerler Tablo 4.4'de, ayrıca deney sonuçları ile deney sonunda elde edilen yük-sehim eğrileri ise ekler bölümünde verilmiştir (Ek F, Şekil A1, A2, B1, B2, C1 ve C2).



Şekil 4.1 Üç noktalı eğilme deneyinin şematik gösterimi



Şekil 4.2 Beton numulere ait yük-sehim eğrilerinin tipik gösterimi

4.2.3.1 Kırılma Enerjisi Hesabı

Birim alan başına çatlak oluşturmak için gereken enerji miktarı malzemenin kırılmaya karşı direncini belirler. Kırılma enerjisi hesabında, üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim grafiğinin altında kalan alan kullanılır. Hesaplanan bu alan RILEM tarafından önerilen denklemde (denklem (4.2)) yerine konularak kırılma enerjisi (G_f) bulunur [18,19].

$$G_f = \frac{W_0 + mg \delta_0}{A_{lig}} , \text{N/m} \quad (4.2)$$

W_0 : Yük sehım grafiği altında kalan alan (N/m)

m : m_1+2m_2 (kg)

m_1 : Kirişin mesnetlerarası kalan ağırlığı (kg)

m_2 : Yükleme aparatının ağırlığı (kg)

g : Yer çekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

δ_0 : Kirişin göçme anındaki deformasyonu (m)

$A_{lig.}$: Etkin kesit alanı (m^2)

4.2.3.2 Net Eğilme Dayanımı

Net eğilme dayanımı (f_{net}), üç noktalı eğilme dayanımında bulunan maksimum yükün kullanılmasıyla bulunur.

$$f_{net} = \frac{3PS}{2B(W - a)^2} , \text{MPa} \quad (4.3)$$

P : Maksimum yük

S : Mesnetler arası uzaklık (mm)

B : Deney numunesinin genişliği (mm)

W : Deney numunesinin derinliği (mm)

a : Çentik derinliği (mm)

4.2.3.3 Gerçek Kırılma Enerjisi Hesabı

Bölüm 2.8’de anlatılan ve çentikli betonun yük taşıma kapasitesi hakkında doğru yaklaşımlar elde edilecek, gerçek kırılma enerjisi (G_F); derin çentik ve yüzeysel çentik açılmış prizma numunelere ait kırılma enerjileri yardımıyla, denklem (4.4) kullanılarak hesaplanmıştır [4,5]. Denklem (4.4), a/W çentik oranını göstermektedir. Bu oran yüzeysel çentikte 0,05 ve derin çentikte 0,5’dir

$$G_F = \frac{G_f(a/W)}{1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{a_l/W}{1 - a/W}}, \text{ N/m} \quad (4.4)$$

$G_f(a/W)$: Eğilme deneyinde bulunan kırılma enerjisi (N/m)

a : Çentik derinliği (mm)

W : Deney numunesinin genişliği (mm)

a_l : Geçiş ligamenti uzunluğu (mm)

Denklem (4.4)'deki a_l değeri, derin çentik ve yüzeysel çentik açılmış numunelerin kırılma enerjilerini yardımıyla hesaplanır (Tablo 4.4).

$$a_l = \frac{2W(G_f(0,5) - G_f(0,05))}{\frac{G_f(0,5)}{1 - 0,05} - \frac{G_f(0,05)}{1 - 0,5}} \quad (4.5)$$

4.2.3.4 Karakteristik Boyun Belirlenmesi

Hillerborg [29] tarafından önerilen ve sünekliğin bir göstergesi olan karakteristik boy (l_{ch}), aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı.

$$l_{ch} = \frac{G_F E}{f_t'^2}, \text{ mm} \quad (4.6)$$

G_F : Kırılma enerjisi (N/m)

E : Elastisite modülü (kN/mm^2)

$f_t'^2$: Tek eksenli çekme dayanımı (N/mm^2)

Yapılan çalışmada, tek eksenli çekme dayanımı yerine yarma-çekme dayanımı; kırılma enerjisi olarak gerçek kırılma enerjileri kullanılmıştır.

Tablo 4.4 Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları

Karışım		Hamur	Harç	Beton
Kırılma enerjisi, G_f (N/m)	$a/W=0,05$	29	80	104
	$a/W=0,5$	26	104	104
Net eğilme dayanımı, f_{net} (MPa)	$a/W=0,05$	2,3	3,0	6,6
	$a/W=0,5$	2,6	5,6	8,7
Gerçek kırılma enerjisi, G_F (N/m)		33	-	104
Geçiş ligamenti uzunluğu, a_1 , (mm)		19,4	-	0
Karakteristik boy, l_{ch} , (mm)		41	-	98

4.2.4 Çimento Hamurunun Kırılma Tokluğunun Hesabı

Gevrek bir malzeme olan çimento hamurunun kırılma tokluğu (K_{IC}^{ch}), üç noktalı eğilme deneyi ile belirlenebilmektedir. $0,2 < a/w < 0,6$ koşulunu sağlayan deney numuneleri için çimento hamurunun kırılma tokluğu aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır [8]. Çalışmada, yukardaki koşulu sağlayan derin çentikli ($a/W=0,5$) numunelerin eğilme deneyinden elde edilen değer, çimento hamurunun kırılma tokluğunun hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$K_{IC}^{ch} = \frac{3PS}{2BW^{3/2}} \left[1,93 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 3,07 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 14,53 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 25,11 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 25,8 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (4.7)$$

Yukardaki denklemde S, W, B sırasıyla prizmatik deney numunesine ait mesnetler arası genişlik, derinliği ve genişliği; a çentik derinliğini, P' de maksimum yükü ifade eder.

Ayrıca, çimento hamurunun kırılma tokluğu, su-çimento oranına (w/c) bağlı olarak denklem (4.8) yardımıyla bulunabilir [3,16,17]. Su-çimento oranı olarak, etkin suyun toplam bağlayıcıya oranı olan 0,30 alınmıştır.

$$K_{IC}^{ch} = 0,6125 - 0,85 \frac{w}{c} \quad (4.8)$$

Tablo 4.5 Çimento hamurunun kırılma tokluğu

Çimento hamurunun	Deneysel	0,37
kırılma tokluğu ($MPa \sqrt{m}$)	Denk.(4.8)	0,36

4.3 Mezo-mekanik Modelleme

4.3.1 Harç ve Betonun Kırılma Tokluğunun Hesabı

Harç ve betonun kırılma toklukları hesaplanırken, harcın ve betonun yüksek basınç dayanımları dikkate alınmıştır. Harçta çatlak kapanı (denklem (4.9)) ile agrega köprülenmesi mekanizmalarının (denklem (4.10)); betonda ise sadece agrega köprülenmesi mekanizmasının çalıştığı varsayılmıştır ve etkin kırılma tokluğunu, K_{IC} , aşağıda ki gibi hesaplanmıştır.

$$K_{IC} = K_{IC}^m \cdot \left(\frac{K_{IC}^{kp}}{K_{IC}^m} \right) \quad (4.9)$$

$$\left(\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m} \right) = \left\{ 1 - \frac{(1 - V_{ag}) \frac{\pi}{4}}{\ln \left[\frac{1 + \cos\left(\frac{\pi \cdot V_{ag}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot V_{ag}}{2}\right)} \right]} \right\} \quad (4.10)$$

$$\left(\frac{K_{IC}^{kp}}{K_{IC}^m} \right) = \sqrt{\left(\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^{\phi h}} \right)^2 + \frac{E(\pi/2) f_{t,a}^2 g_{ort} V_{ag} (1 - \sqrt{V_{ag}})(1 - V_{ag})(1 - v_m^2)}{E_m (1 - v^2)(K_{IC}^m)^2}} \quad (4.11)$$

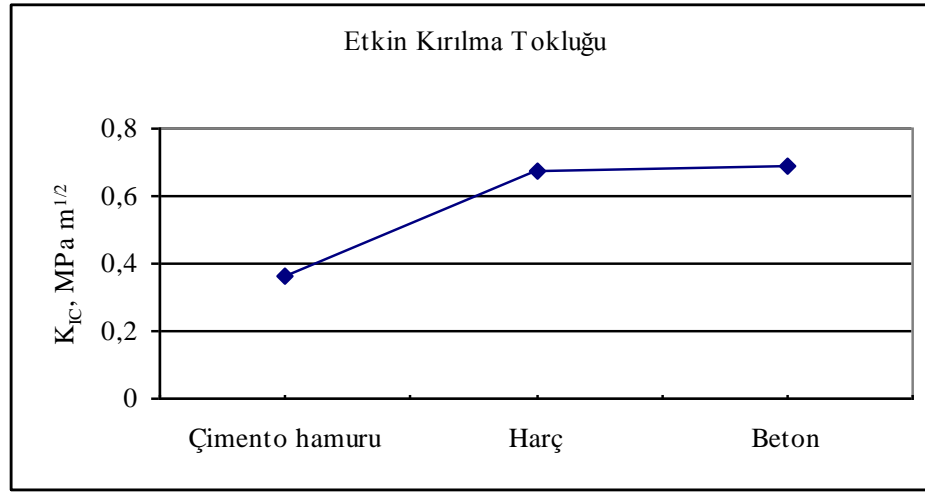
Denklem (4.11)'de Poisson oranları $v=v_m=0,2$, agregaların çekme dayanımı $f_{t,a}=10$ MPa alınmış ve ortalama agrega boyu maksimum agrega boyuna (g) bağlı olarak $g_{ort}=0,25 \times g$ şeklinde hesaplanmıştır.

Harç sadece ince agregadan oluştuğundan matris faz olarak çimento hamuruna ait değerler kullanılarak kırılma tokluğu hesaplanabilir. Betonun kırılma tokluğu

hesaplanırken önce ince agregenin hacim oranı kullanılarak harç fazının kırılma tokluğu, daha sonra iri agreganın hacim oranı dikkate alınarak harç fazından betonun kırılma tokluğuna geçilir. Betonda çalışmayan çatlak kapanının değeri 1 olarak alınır. Çatlak kapanı ve agrega köprülenmesi mekanizmalarının harç ve betonun kırılma tokluğuna etkileri Tablo 4.6'de; etkin kırılma tokluklarının karşılaştırılması Şekil 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.6 Harç ve betonun kırılma tokluğu

		g (mm)	g _{ort.} (mm)	V _{ag}	K_{IC}^k (MPa \sqrt{m})	K_{IC}^{kp} (MPa \sqrt{m})	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
Harç		4	1	0,517	1,816	1,832	0,671
Beton	Betonda ince agreg	4	1	0,513	1,813	1,829	0,669
	Betonda kırmataş I	10	2,5	0,339	1	1,026	0,687

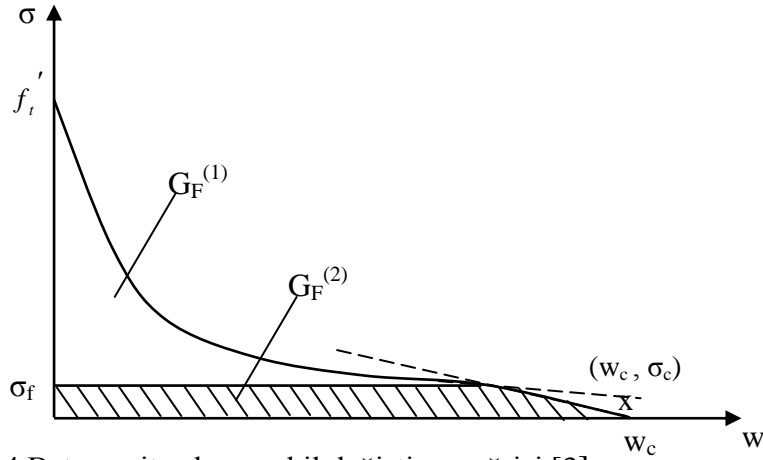


Şekil 4.3 Çimento hamuru, harç ve betonun etkin kırılma tokluğunun karşılaştırılması

4.3.2 Kırılma Enerjisi

Kırılma enerjisi için mezo-mekanik bağıntılar Huang ve Li [12] ve Karihaloo [8] tarafından geliştirilmiştir. Huang ve Li'nin kırılma enerjisi için geliştirdiği mikromekanik modelde çekme-şekil değiştirme yumuşaması eğrisi birbirinden ayrı iki yumuşama eğrisi ile açıklanmıştır. Şekil 4.4'de verilen çekme-şekil değiştirme

yumuşaması eğrisinde $0 \leq \sigma \leq \sigma_f$ arasında kalan ve $G_f^{(2)}$ ile gösterilen ikinci bölge çekme sonucunda kopan agregaların sürtünmesinden meydana gelmektedir [12,30].



Şekil 4.4 Betona ait çekme-şekil değiştirme eğrisi [3]

Kırılma enerjisi, Şekil 4.4'de verilen grafiğin altında kalan iki alanın toplamı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_F = G_F^{(1)} + G_F^{(2)} \quad (4.12a)$$

$$G_F^{(1)} = \int_{\sigma=\sigma_f}^{f_t'} w(\sigma) d\sigma \quad (4.12b)$$

$$G_F^{(2)} = \int_{\sigma=0}^{\sigma_f} w(\sigma) d\sigma \quad (4.12c)$$

$$G_F^{(1)} = \frac{(K_{IC})^2 (1-\nu^2)}{E(1-V_{ag})} \times \left\{ \frac{1}{3} \left[\left(\frac{K_f}{\sqrt{\frac{2}{\pi}} K_{IC}} \right)^3 - 1 \right] - \ln \left(\frac{K_f}{\sqrt{\frac{2}{\pi}} K_{IC}} \right) \right\} \quad (4.13)$$

$$G_F^{(2)} = \int_{\sigma=0}^{\sigma_f} \left(\sqrt{\eta g} - \frac{g}{3\tau^* V_{ag}} \sigma \right) d\sigma = \sqrt{\eta} K_f - \frac{K_f^2}{(6\tau^* V_{ag})} \quad (4.14)$$

Yukardaki denklemlerde ν etkin Poisson oranını, E etkin elastisite modülünü, K_{IC} etkin kırılma tokluğunu, η agrega yüzey alanı parametresini, τ^* agrega ile matris arayüzey kayma dayanımını ve g ile V_{ag} ise sırasıyla en büyük tane boyutu ile toplam

agrega konsantrasyonunu göstermektedir. $K_f, \sigma_f \in [\sigma_c, f_t']$ koşulunu sağlayan gerilmeye bağlı olarak bulunabilir [30].

$$K_f = \sqrt{g} \sigma_f \quad (4.15)$$

Eğer $G_F^{(2)}$ çözümü mevcut değilse, $K_f = K_c$ kabul yapılır ($K_c = \sqrt{g} \sigma_c$) ve kırılma enerjisini veren ifade aşağıdaki halini alır.

$$G_F = G_F^{(1)} + \sqrt{\eta} K_c \quad (4.16)$$

Denklem (4.17) verilen gerilme-çatlak açılımı bağıntısından [30] ve $w = w_c = \sqrt{\eta g}$ kabul yapılarak σ_c dolayısıyla K_c hesaplanabilir.

$$w = \frac{(K_{IC})^2}{E(1 - \nu_{ag})} \cdot \frac{1}{f_t' \left(\frac{\sigma}{f_t'} \right)} \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma}{f_t'} \right)^3 \right] \quad (4.17)$$

Kırılma enerjileri hesaplanırken $\nu=0,2$, $\eta=10 \times 10^{-6} \text{m}$ ve $\tau^*=2,5 \text{ MPa}$ alınmıştır ve bulunan sonuçlar Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7 Mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kritik çatlak açılma değerleri ve kırılma enerjileri

	Çimento hamuru	Harç	Beton
W_c (mm)	0,01	0,20	0,32
σ_f (MPa)	0,57	0,12	0,10
$G_F^{(1)}$ N/m	26,2	89,0	114,8
$G_F^{(2)}$ N/m	5,7	16,4	22,3
G_F N/m	31,9	105,4	137,1

4.3.3 Tek Eksenli Çekme Gerilmesi

Tek eksenli çekme gerilmesi, maksimum agrega boyu ve toklaşma mekanizmaları göz önünde tutularak bulunan etkin kırılma tokluğuna bağlı olarak (K_{IC}) hesaplanabilir [12].

$$f_t = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\frac{\pi \cdot g}{2}}} \quad (4.18)$$

4.3.4 Elastisite Modülü

4.3.4.1 Çimento Hamurunun Elastisite Modülü

Mezo-mekanik bağıntılara göre elastisite modülü hesapları Nielsen'in yalın beton için önerdiği modelle göre yapılmıştır. Bu modelde elastisite modülü denklem (4.19) kullanılarak bulunmuştur [30,31].

$$E = E_m \frac{n + \Theta + V\Theta(n-1)}{n + \Theta - V(n-1)} \quad (4.19)$$

Bu ifadede, E_m sürekli fazın elastisite modülü, V dağılı fazın hacim oranı, Θ dağılı fazın konfigürasyonunu tanımlamak için kullanılan geometri fonksiyonu, n ise dağılı fazın elastisite modülünün sürekli fazın elastisite modülüne oranıdır. Yukarıdaki denklemden de anlaşıldığı gibi çimento hamuru, harç ve betonun elastisite modülünü hesaplamak için kullanılan bu modelde, çimento esaslı malzeme iki fazlı olarak kabul edilmektedir.

Çimento hamurunda elastisite modülünün hesaplanmasında su/çimento oranının (w/c), suyun özgül ağırlığının çimentonun özgül ağırlığına oranının 1,2 katından ($1,2 \rho_w/\rho_c$) daha küçük veya daha büyük olmasına bağlı olarak iki farklı durum söz konusudur. Eğer, $w/c > 1,2\rho_w/\rho_c$ ise çimento hamuru; hidrate olmuş çimento jeli içinde dağılmış durumda bulunan kapiler boşluklardan oluştuğu kabul edilmektedir. Böyle bir durumda $n=0$ olur ve kapiler boşlukların hacim oranı (V), dağılı fazın geometri fonksiyonu (Θ) aşağıda verilen denklemler kullanılarak bulunabilir.

$$V = \frac{w/c - 1,2\rho_w/\rho_c}{w/c + \rho_w/\rho_c} \quad (4.20)$$

$$\Theta = \eta_k (1 - V) \quad (4.21)$$

Burada η_k kapiler boşlukların biçim faktörü, h hidrotasyon derecesi, ρ_w suyun özgül ağırlığı ve ρ_c ise çimentonun özgül ağırlığıdır.

İkinci durumda ($w/c < 1,2\rho_w/\rho_c$), çimento hamuru; hidrate olmuş çimento jeli içinde dağılmış hidrate olmamış çimento tanelerinden oluştuğu kabul edilir. Bu duruma ait V , Θ ve n değerleri aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır.

$$V = \frac{1 - 0,83(w/c)(\rho_c / \rho_w)}{1 + (w/c)(\rho_c / \rho_w)} \quad (4.22)$$

$$\Theta = 0,5 \cdot \left[\eta_u \sqrt{1 - V} \cdot (1 - n) + \sqrt{\eta_u^2 (1 - V)(1 - n)^2 + 4n} \right] \quad (4.23)$$

$$n = \frac{E_u}{E_m} \quad (4.24)$$

Yukardaki denklemlerde η_u hidrate olmamış çimento tanelerinin biçim faktörüdür. E_u ve E_m ise sırasıyla hidrate olmamış çimento tanelerinin elastisite modülü ve hidrate olmuş çimento jelinin elastisite modülüdür. Hidrate olmuş çimento jelinin elastisite modülü (E_m) hidrotasyon derecesi h 'a bağlı olarak bulunabilir. Çimento hamuru için elastisite modülü denklem (4.19)'de $E=E_p$ yazılarak bulunur.

$$E_m = 27200 \times h \quad (4.25)$$

$$E_p = E_m \frac{n + \Theta + V\Theta(n - 1)}{n + \Theta - V(n - 1)} \quad (4.26)$$

4.3.4.2 Harcın Elastisite Modülü

Harcın elastisite modülü (E_r) hesaplanırken, sürekli fazın elastisite modülü olarak daha önce hesaplanan çimento hamurunun elastisite modülü kullanılır ($E_m=E_p$). V yerine de V_s : yani ince agreganın hacim oranı kullanılır. Böylece, harç için denklem (4.19) aşağıdaki gibi düzenlenir ve bu denklemde n ince agreganın elastisite modülünün (E_r) çimento hamurunun elastisite modülüne oranıdır.

$$n = \frac{E_f}{E_p} \quad (4.27)$$

$$E_r = E_p \frac{n + \Theta + V_s \Theta (n - 1)}{n + \Theta - V_s (n - 1)} \quad (4.28)$$

Harç için dağılım fazın geometri fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Theta = \frac{1}{2} \left[q + \sqrt{q^2 + 4n} \right] \quad (4.29)$$

$$q = \eta_f (1 - V_s) + n \eta_f (V_s - 1) \quad (4.30)$$

$$\eta_f = \frac{3A_f (1 + A_f)}{1 + A_f + 4A_f^2} \quad (4.31)$$

Bu denklemlerde kullanılan η_f ve A_f sırasıyla ince agreganın biçim faktörü ile narinliğidir. Agregaya ait elastisite modülü, Müller-Rochholz formülü ile agreganın özgül ağırlığı (ρ_{ag}) kullanılarak bulunabilir [30].

$$E_{ag} = 8,1 \rho_{ag}^2 \quad (4.32)$$

4.3.4.3 Betonun Elastisite Modülü

Betonun elastisite modülü bulunurken, sürekli fazın elastisite modülü olarak yukarıda bulunan harcın elastisite modülü ($E_m=E_p$), dağılım fazın hacim oranı olarak iri agreganın hacim oranı ($V=V_c$) kullanılarak denklem (4.33) elde edilir.

$$E = E_r \frac{n + \Theta + V_c \Theta (n - 1)}{n + \Theta - V_c (n - 1)} \quad (4.33)$$

Betonda n değeri aşağıdaki gibi bulunur:

$$n = \frac{E_c}{E_r} \left(1 - \beta \frac{\frac{7,5}{5 + \frac{E_c}{E_r}}}{\frac{7,5}{5 + \frac{E_c}{E_r}}} \right) \quad (4.34)$$

Yukardaki denklemde E_c iri agreganın elastisite modülünü, E_r harçın elastisite modülünü ve β ise kopan agreganın yüzey alanıdır. Betonun elastisite modülünün hesaplanmasında kullanılan diğer parametreler aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunabilir.

$$\eta_c = \frac{3A_c(1+A_c)}{1+A_c+4A_c^2} \quad (4.35)$$

$$q = \eta_c(1-V_c) + n\eta_c(V_c-1) \quad (4.36)$$

$$\Theta = \frac{1}{2} \left[q + \sqrt{q^2 + 4n} \right] \quad (4.37)$$

Yukardaki denklemlerde η_c iri agreganın biçim faktörü ve A_c iri agreganın narinliğidir. İri agregaya ait elastisite modülü denklem (4.32) belirtilen Müller-Rochholz formülü kullanılarak hesaplanır. Çimento hamuru, harç ve beton için mezo-mekanik bağıntılar yardımıyla hesaplanan Elastisite Modülleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

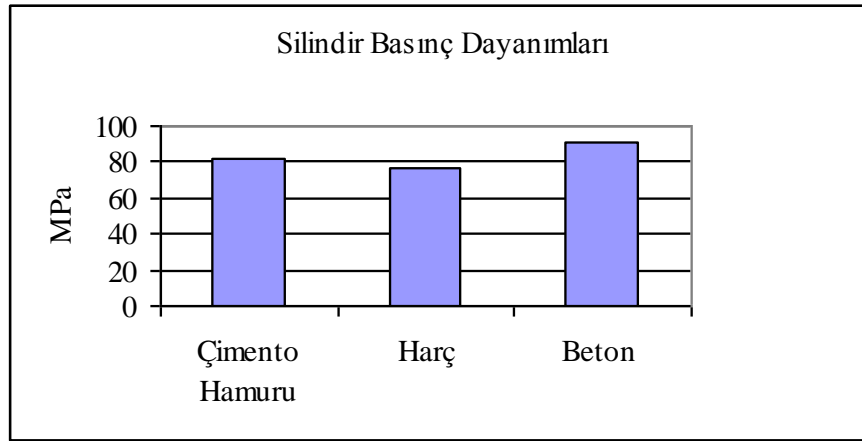
Tablo 4.8 Mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modülleri

Elastisite modülü hesaplanmasında kullanılan parametreler			Elastisite modülü (MPa)
Çimento hamuru	η_u : Hidrate olmamış çimento tanelerinin biçim faktörü	1	$E_p=23300$
	h : Hidratasyon katsayısı	0,75	
	E_u : Hidrate olmamış çimento tanelerinin elastisite modülü (GPa)	75	
Harç	V_f : İnce agreganın hacim oranı	0,517	$E_r=37200$
	A_f : İnce agreganın narinliği	1	
Beton	V_f : Betonda ince agrega hacim oranı	0,513	$E=41000$
	V_c : İri agreganın hacim oranı	0,339	
	A_c : İri agreganın narinliği	1	
	β : Agreganın toplam yüzey alanına bağlı olarak kopan agrega tanelerinin yüzey alanı	0,2	

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

5.1 Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi

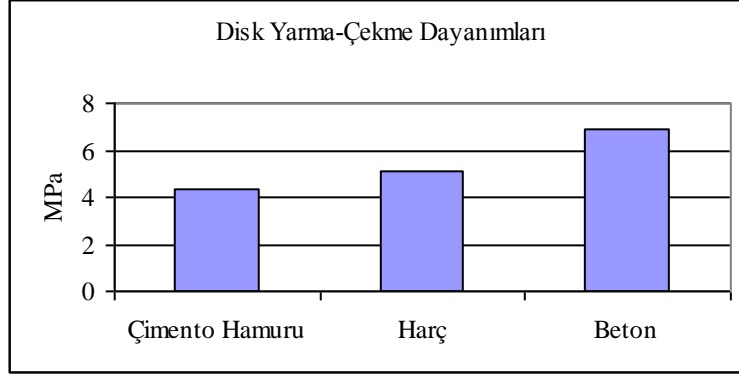
Tablo 4.2 ve Şekil 5.1'den görüldüğü gibi, beton ve çimento hamurunun basınç dayanımı harca göre daha yüksektir. Benzeri sonuçlar Yıldırım ve diğ. [32] ve Sarısu [33] tarafından da elde edilmiştir. Betonda agrega konsantrasyonu yüksektir, agrega konsantrasyonunun düşük olduğu harçta ise agregalar kusur etkisi yapmakta ve basınç dayanımı daha düşük çıkmaktadır.



Şekil 5.1 Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama silindir basınç dayanımları

5.2 Yarma-Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

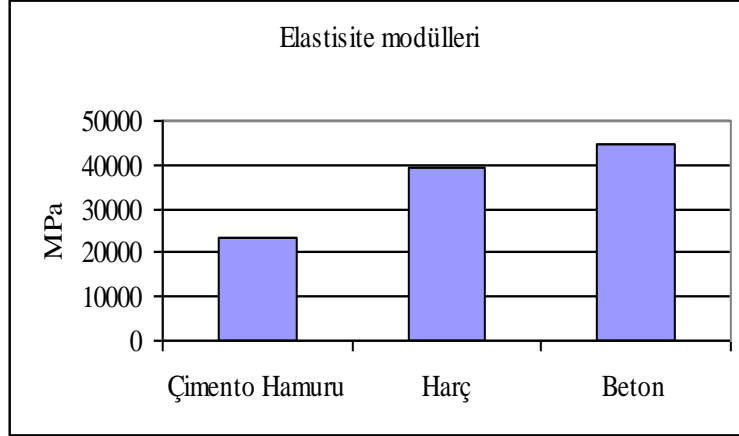
Disk yarma-çekme deneyine ait değerler Tablo 4.3 ve Şekil 5.2'de verilmiştir. Çimento hamurundan betona doğru disk yarma-çekme dayanımları artmaktadır. Benzer sonuçlar, Yıldırım ve diğ.'nin [32] agrega konsantrasyonunun betonun mekanik özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalarında da görülmüştür. Betonda düşey doğrultuda ilerleyen çatlaklar iri agregalar tarafından frenlenmektedir. Çünkü beton yüksek dayanımlıdır. Yüksek dayanımlı betonlarda, agrega ile çimento arasındaki temas yüzeyi normal betonunkine göre daha kuvvetlidir. Bunun sonucu olarak; temas yüzeyinde gelişen çatlaklar agreganın etrafında tur atmaktan çok agreganın içinden geçmeye zorlanır. Agreganın dayanımı da hamurun (veya harcın) dayanımından daha yüksek olduğundan, betonun dayanımında artış olur.



Şekil 5.2 Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama disk yarma-çekme dayanımları

5.3 Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi

Elastisite modüllerine ait değerler Tablo 4.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir. Çimento hamuruna agrega eklenmesiyle, elde edilen harç ve betonun elastisite modülleri, çimento hamuruna göre sırasıyla % 69 ve % 90 artmıştır. Böylece, çimento hamurudan, harca ve harçtan da betona doğru elastisite modüllerinde artış görülmektedir.



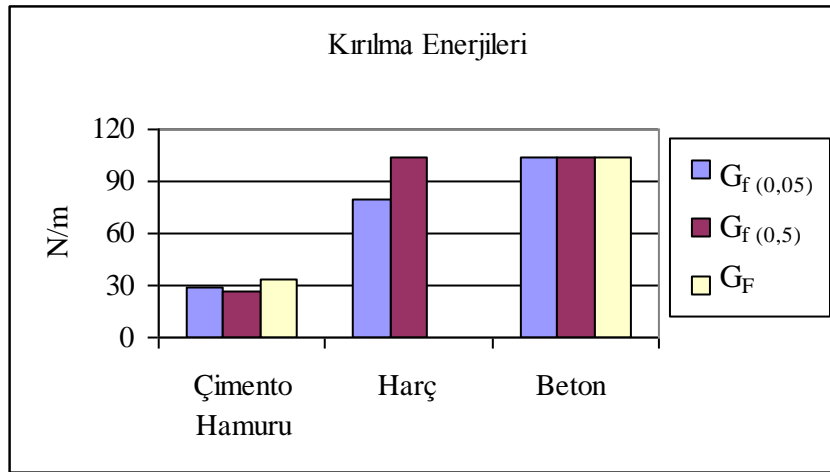
Şekil 5.3 Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama elastisite modülleri

5.4 Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi

Tablo 4.4 ve Şekil 5.4'te verilen üç noktalı eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde, betonda sığ çentik durumunda kırılma enerjisi 104 N/m'dir. Aynı şekilde derin çentik durumunda da kırılma enerjisi aynı elde edilmiştir. Ancak sığ çentik durumunda kırılma enerjisinin biraz daha yüksek çıkması beklenirdi. Her iki çentik derinliği oranının da kırılma enerjileri eşit olduğundan, gerçek kırılma enerjisi 104 N/m alınabilir.

Harç fazında derin çentikli numunelerin ortalama kırılma enerjileri, yüzeysel çentik açılmış numunelerden elde edilen ortalama kırılma enerjilerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu da deney sonuçlarındaki dağılımdan ileri gelmektedir.

Hamur fazına ait kırılma enerjileri incelendiğinde, beklendiği gibi derin çentik açılmış numunelerden elde edilen kırılma enerjileri, sığ çentik durumuna göre daha düşük çıkmıştır. Çimento hamuru için, gerçek kırılma enerjisi 33 N/m bulunmuştur. Böylece, çimento hamuruna ince ve iri agrega eklenerek elde edilen betonun kırılma enerjisi çimento hamurununkine göre %215 daha fazladır.

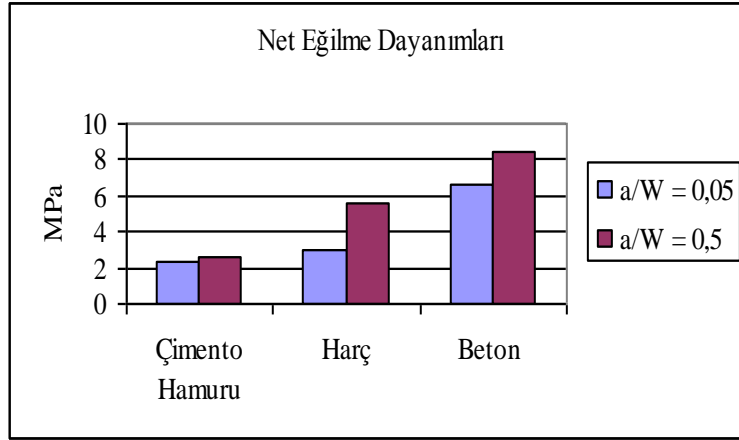


Şekil 5.4 Kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

5.5 Net Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen net eğilme dayanımları Tablo 4.4'de gösterilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, her iki çentik oranı için çimento hamurundan betona gidildikçe net eğilme dayanımlarında artış olmaktadır. Ayrıca Şekil 5.5 incelendiğinde, derin çentik açılmış numunelerden elde edilmiş net eğilme dayanımlarının, sığ çentikli numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Bunun nedeni; derin çentikli numunelerde etkin kesit alanını daha küçük olmasıdır, böylece bu numunelerde malzeme kusurları daha az olmaktadır.



Şekil 5.5 Net eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

5.6 Karakteristik Boyun Değerlendirilmesi

Sünekliğin bir ölçüsü olan karakteristik boy gerçek kırılma enerjilerine göre hesaplanmıştır. Karakteristik boy çimento hamurunda 41 mm, betonda ise 98 mm bulunmuştur (Tablo 4.4). Çimento hamuruna agrega eklenmesiyle karakteristik boyda % 140'lık bir artış olmuştur. Böylece gevrek bir malzeme olan çimento hamurundan daha sünek bir malzeme olan beton elde edilmiştir.

5.7 Mezo-mekanik Modelleme ile Bulunan Değerlerle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

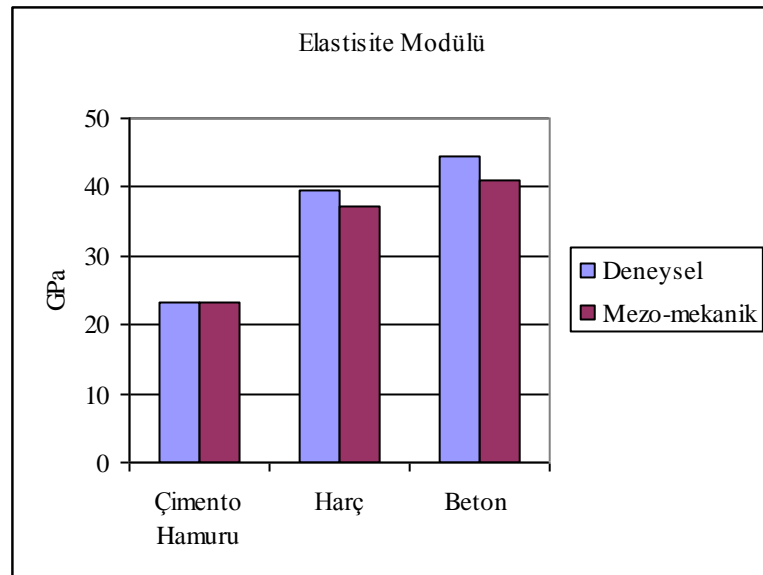
Betonun, harcın ve çimento hamurunun gerilme şiddet çarpanının kritik değerleri, elastisite modülleri ve kırılma enerjileri hesaplanmış ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır. Tablo 5.1'de mezo-mekanik bağıntılarla elde edilen sonuçlarla, deneysel yöntemlerle bulunmuş değerler verilmiştir.

Şekil 4.3 ve Tablo 5.4'ün incelenmesinden görüldüğü üzere çimento hamurundan, harca ve betona gidildikçe, kırılma tokluğu artmaktadır. Böyle gevrek bir malzeme olan çimento hamuruna, agrega katılarak daha tok bir davranış sergileyen, harç ve beton elde edilmektedir.

Tablo 5.1 Deneysel ve mezo-mekanik bağıntılarla elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Kırılma parametreleri		Çimento hamuru	Harç	Beton	
Elastisite modülü (GPa)	Deneysel	23,4	39,5	44,5	
	Teorik	23,3	37,2	41,1	
Etkin kırılma tokluğu (MPa m ^{1/2})	Deneysel	0,366	-	-	
	Teorik	0,358	0,671	0,687	
Kırılma enerjisi (N/m)	Deneysel	$\alpha=0,05$	29	80	104
		$\alpha=0,5$	26	104	104
		Gerçek	33	-	104
	Teorik	31,9	105,4	137,1	
Disk yarma-çekme dayanımı (MPa)	Deneysel	4,3	5,1	6,9	
Net eğilme dayanımı (MPa)	Deneysel	$\alpha=0,05$	2,3	3,0	6,6
		$\alpha=0,5$	2,6	5,6	8,7

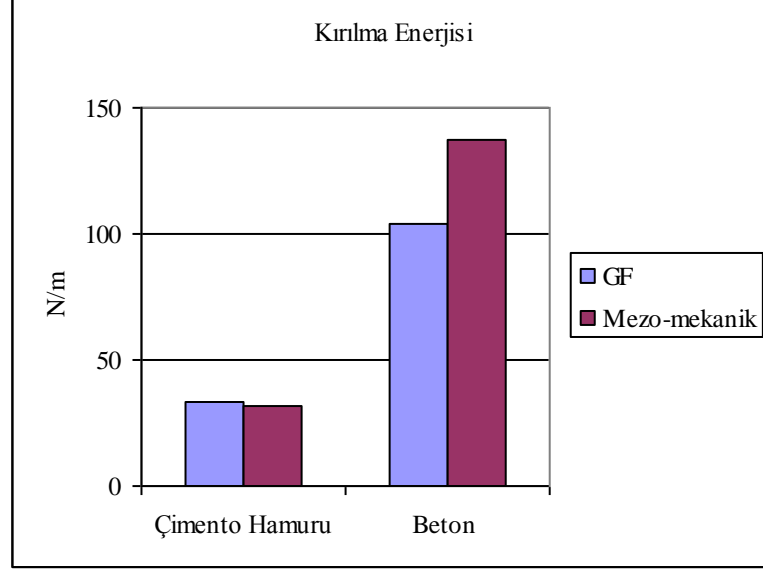
Tablo 5.1 ve Şekil 5.6'nın incelenmesinden görüldüğü üzere elastisite modülü mezo-mekanik modellerle iyi bir biçimde tahmin edilmektedir. Çimento hamuru için her iki yöntemle elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi çimento hamurunda elastisite modülü en düşük, betonda ise en yüksektir.



Şekil 5.6 Deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modüllerinin karşılaştırılması

Mezo-mekanik bağıntılarla bulunan kırılma enerjisinin ve gerçek kırılma enerjilerinin karşılaştırılması ise Şekil 5.7'de ve Tablo 5.1'de verilmiştir. Çimento hamuruna ait değerler birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Betonda ise mezo-mekanik

bağıntılarla bulunan kırılma enerjisi, deneyle hesaplanan değerden daha yüksek çıkmıştır. Yakın agrega konsantrasyonu için benzer bir sonuç, Bayramov ve diğ. [3] çalışmasında da görülmüştür (Şekil D1).



Şekil 5.7 Deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada betonun kırılması sırasında mevcut toklaşma mekanizmaları dikkate alınarak kırılma parametreleri hesaplanmıştır. Betonun kırılma süreci bölgesinde oluşan toklaşma mekanizmaları göz önünde tutularak yapılan mezo-mekanik hesaplarla, deneysel çalışmaların karşılaştırılmasından aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

- Gevrek malzeme olan çimento hamurundan, önce harç sonra betonun kırılma parametrelerinin elde edilmesinde mezo-mekanik modelleme, malzeme davranışının iyi anlaşılması bakımından yararlıdır.
- Betonun kırılma parametreleri saptanırken toklaşma mekanizmalarının göz önünde tutulması gereklidir.
- Yüksek basınç dayanımına sahip ve gevrek bir malzeme olan çimento hamuruna agrega eklendiğinde gevreklik azalmakta; böylece hamurdan harca sonra da betona varıldığında kırılma enerjisinde belirgin artış olmaktadır.
- Çimento hamurunun kırılma enerjisi ve elastisite modülü değerleri mezo-mekanik modelleme ile iyi bir biçimde tahmin edilmektedir.
- Betonun elastisite modülü mezo-mekanik modelleme ile iyi bir biçimde tahmin edilebilmekte, buna karşın kırılma enerjisi deney sonuçlarından daha yüksek çıkmaktadır.
- Gevrekliğin bir ölçüsü olan karakteristik boy çimento hamurunda düşük, betonda ise yüksek elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

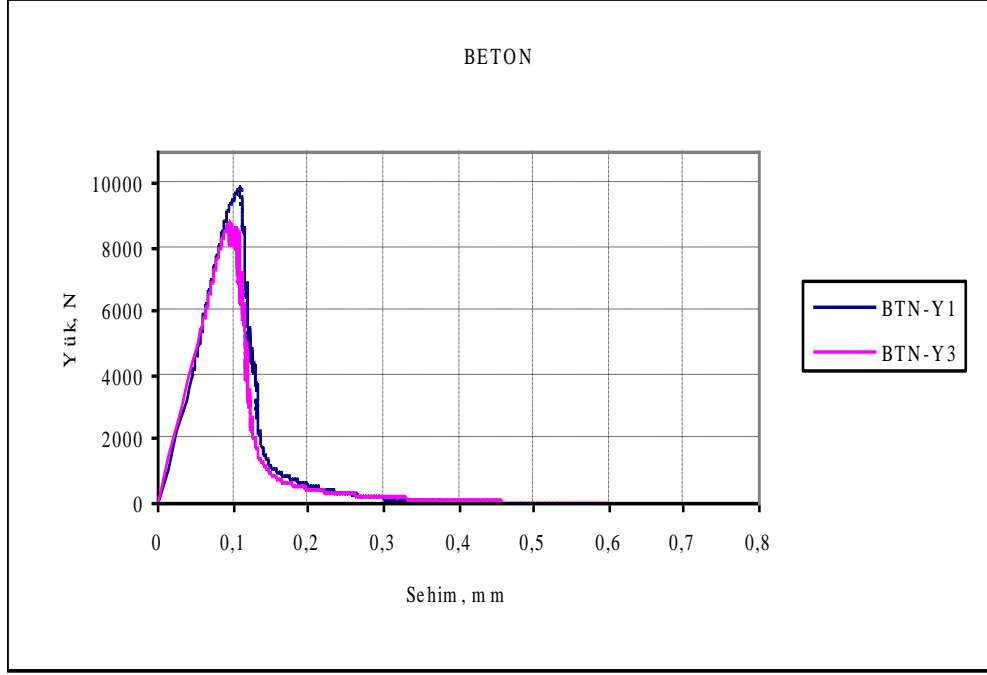
- [1] **Akkaya, Y., Bayramov, F. ve Taşdemir, M.A.**, 2003. Betonun kırılma mekaniği: tasarımda kullanılan mekanik özellikler ile kırılma parametreleri arasındaki bağıntılar, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, **426**, 70-75.
- [2] **Shah, S.P., Ahmad, S.H.**, 1994. High performance concrete and applications, Printed in Great Britain for Edward Arnold, pp. 161-166.
- [3] **Bayramov, F., Akçay, B., Açar, A.Ş., Atahan, H.N., Şengül, C. and Taşdemir, M.A.**, 2004. Determination of the true specific fracture energy of concrete, 6th International Congress on Advances in Civil Engineering, Boğaziçi University, Istanbul, Turkey, 6-8 October 2004.
- [4] **Abdalla, H.M. and Karihaloo, B.L.**, 2003. Determination of size-independent specific fracture energy of concrete from three-point bend and wedge splitting tests, *Magazine of Concrete Research*, **55**, 133-141.
- [5] **Karihaloo, B.L., Abdalla, H.M. and Imjai, T.**, 2003, A simple method for determining the true specific fracture energy of concrete, *Magazine of Concrete Research*, **55**, 471-481.
- [6] **Li, V.C. and Maalej, M.**, 1996. Toughening in cement based composite. Part I: cement, mortar, and concrete, *Cement and Concrete Composite*, **18**, 223-237.
- [7] **Taşdemir, M.A., Karihaloo, B.L.**, 2001. Effect of aggregate volume fraction on the parameters of concrete : a meso-mechanical approach, *Magazine of Concrete Research*, **53**, 405-415.
- [8] **Karihaloo, B.L.**, 1995. Fracture mechanics and structural concrete, , Longman Group Limited, Essex.
- [9] **Eser, F.Ö.**, 2002. Betonun kırılma parametrelerinin değişik yöntemlerle belirlenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Shah, S.P, Ouyang, C.**, 1995. Measurement and Modeling of Fracture Processes in Concrete, *Materials Science of Concrete*, Vol.3, pp.243-271, Edited by Skalny, Library of Congress Cataloging, J., The American Ceramic Society, Westerville, OH.
- [11] **Taşdemir, C.**, 2003. Combined effect of mineral admixture and curing condition on the sorptivity coefficient of concrete, *Cement and Concrete Research*, **33** (10), 1637-1642.
- [12] **Huang, J. and Li, V.C.**, 1989. A meso-mechanical model of the tensile behaviour of concrete. Part II: modelling of post-peak tension softening behaviour, *Composite*, **20**, 370-378.

- [13] **Taşdemir, C.**, 1995. Agrega-Çimento hamuru arayüzeyi mikroyapısının yüksek mukavemetli betonların kırılma parametrelerine etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Faber, K.T., Evans, A.G. and Dory, M. D.**, 1983. A statical analyse of crack deflection as a toughening mechanism in ceramic material, *In Fracture Mechanics of Ceramic*, **Vol.6**, eds R.C. Brant et al, 77-91.
- [15] **Li, V.C. and Huang, J.**, 1990. Crack trapping and bridging as toughening mechanisms in high strength concrete, *In Micromechancis of Failure of Quasi-Brittle Materials*, Eds. S.P. Shah, S.E. Swartz and M.L. Ming, Elsevier Applied Science, London, 579-588.
- [16] **Ohgishi, S., Ono, H., Takatsu, M. and Tanahashi, I.**, 1986. In fracture toughness and fracture energy of concrete, Wittmwn, F.H., ed. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 281-290.
- [17] **Nauss, D.J., and Lott, J.L.**, 1969. Fracture toughness of portland cement concrete, *ACI Journal*, **66 (6)**, 481-489.
- [18] **RILEM Technical Committee 50-FMC**, 1985, Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams, *Materials and Structure*, **18**, 287-291.
- [19] **Hillerborg, A.**, 1985. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete, *Matériaux et Constructions*, **18(106)2**, 291-296.
- [20] **Shinohara, Y., Furumura, F. and Abe, T.**, 1991. Softening behaviour of concrete in three-point bend tests on single edge notched beams, *Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics*, edited by J.G.M Van Mier, J.G. Rots and A.Bakker, RILEM, 523-532.
- [21] **Rao, G.A., and Prasad, B.K.R**, 2002. Fracture energy and softening behavior of high-strength concrete, *Cement and Concrete Research*, **32**, 247-252.
- [22] **Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Lydon, F.D. and Barr, B.I.G.**, 1996. Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete, *Cement and Concrete Research*, **26**, 63-68
- [23] **Yan, A., Wu, K.-R., Zhang, D. and Yao, W.**, 2001. Effects of fracture path on the fracture energy of high-strength concrete, *Cement and Concrete Research*, **31**, 1601-1606.
- [24] **Zhou, F.P., Barr, B.I.G. and Lydon, F.D.**, 1995. Fracture properties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates, *Cement and Concrete Research*, **25**, 543-552.
- [25] **Malvar, L.J. and Warren, G.E.**, 1988. Fracture energy for three-point bend tests on single-edge-notched beams, *Experimental Mechanics*, **28 (3)**, 266-272.
- [26] **Jueshi, Q. And Hui, Luo.**,1997. Size effect on fracture energy of concrete determined by three-point bending, *Cement and Concrete Research*, **27**, 1031-1036.

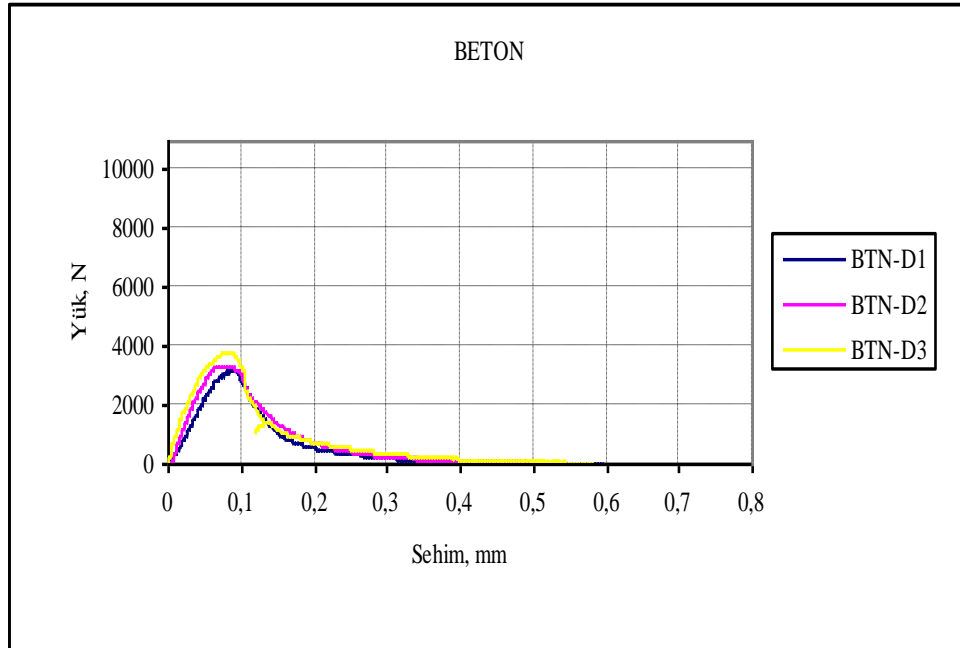
- [27] **Mindess, S.**, 1984. The effect of specimen size on the fracture energy of concrete, *Cement and Concrete Research*, **14**, 431-436.
- [28] http://www.yks-yapkim.com/MBTturkey/Products/Category_01
- [29] **Hillerborg, A.**, 1977. Report TVBM-3004. The Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [30] **Lange-Kornbak, D. and Karihaloo, B.L.**, 1999. Role of microstructural parameters in the properties of plain concrete, *Concrete Science and engineering*, **1**, 238-252.
- [31] **Nielsen, L.F.**, 1990. Tech. Rep. No.208 Build. Mat. Insst., Techn. Univ. Of Denmark.
- [32] **Yıldırım, H., Taşdemir, M.A. and Oktar, O.N.**, 1995. Efect of aggregate concentration on the strength and the tensile strain capacity of concrete, *ERMCO-95: 11th European Ready Mixed Concrete Congress*, Istanbul, 471-480.
- [33] **Sarısu, F.**, 1996. Betonun Mod I durumundaki göçmesine agrega konsantrasyonunun etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EKLER

EK A : Beton numunelere ait üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrileri.

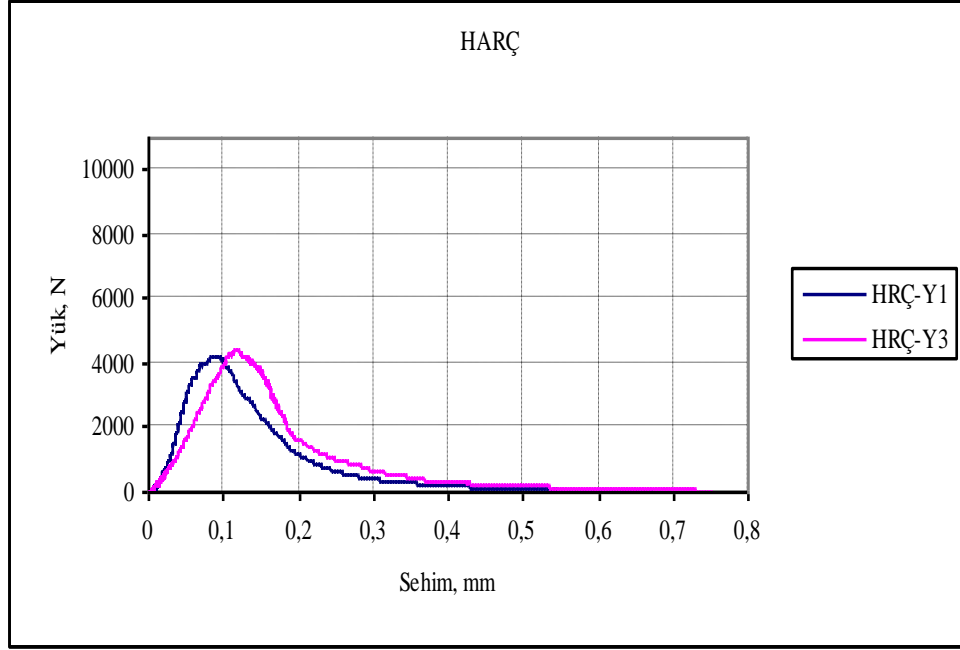


Şekil A.1 Sığ çentik açılmış beton numunelere ait yük-sehim eğrileri

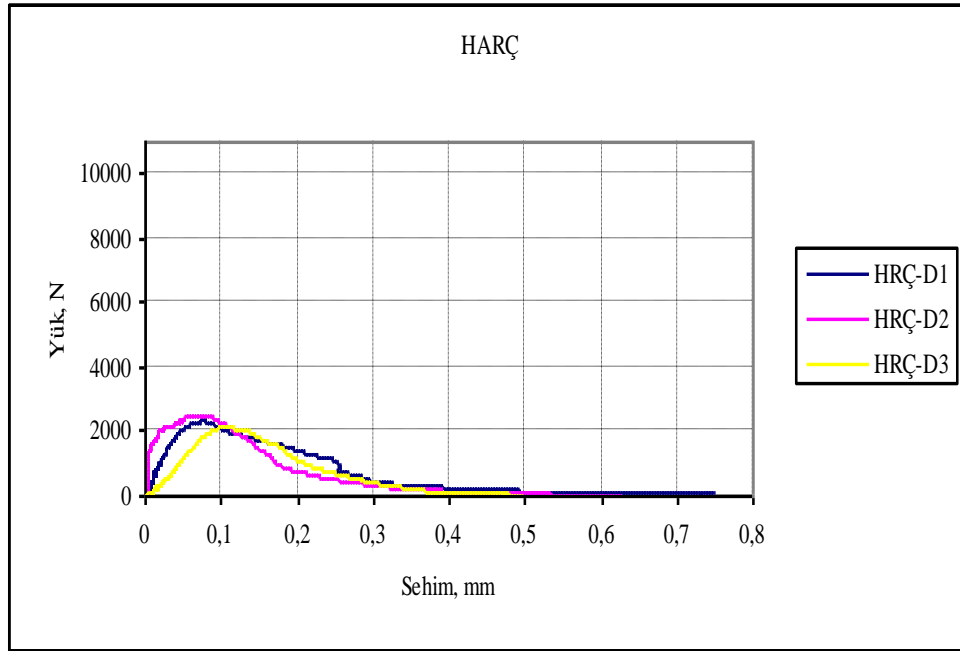


Şekil A.2 Derin çentik açılmış beton numunelere ait yük-sehim eğrileri

EK B : Harç numunelere ait üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrileri.

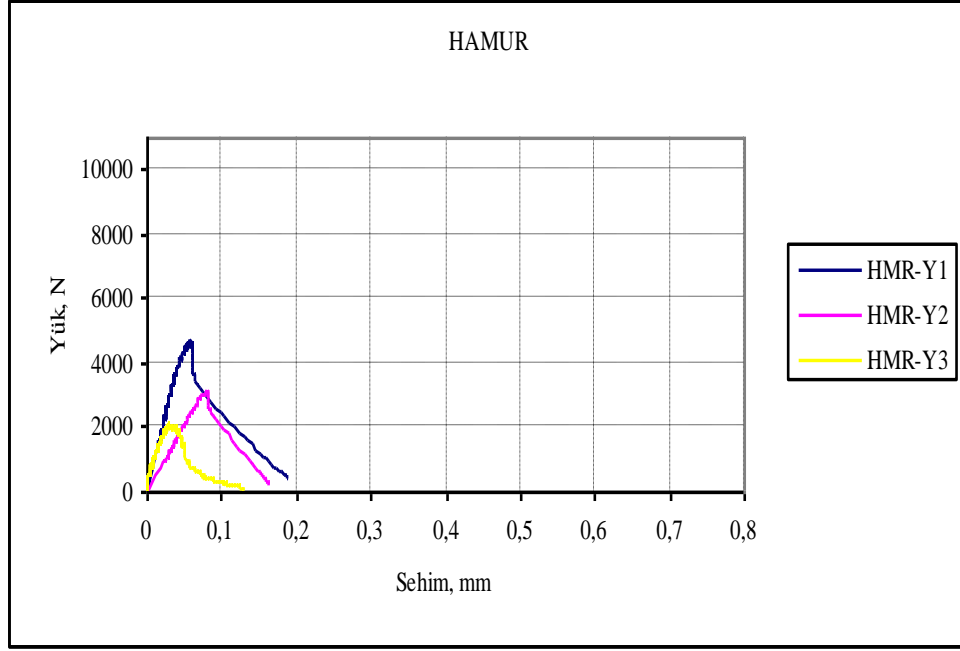


Şekil B.1 Sığ çentik açılmış harç numunelere ait yük-sehim eğrileri

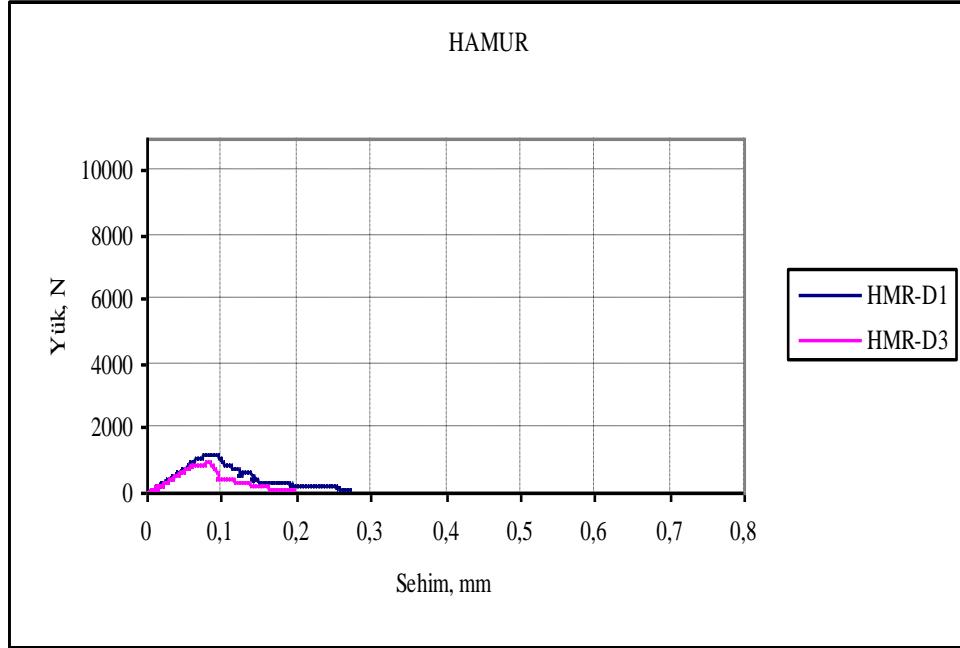


Şekil B.2 Derin çentik açılmış harç numunelere ait yük-sehim eğrileri

Ek C : Çimento hamuruna ait üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrileri.



Şekil C.1 Sığ çentik açılmış çimento hamuruna ait yük-sehim eğrileri



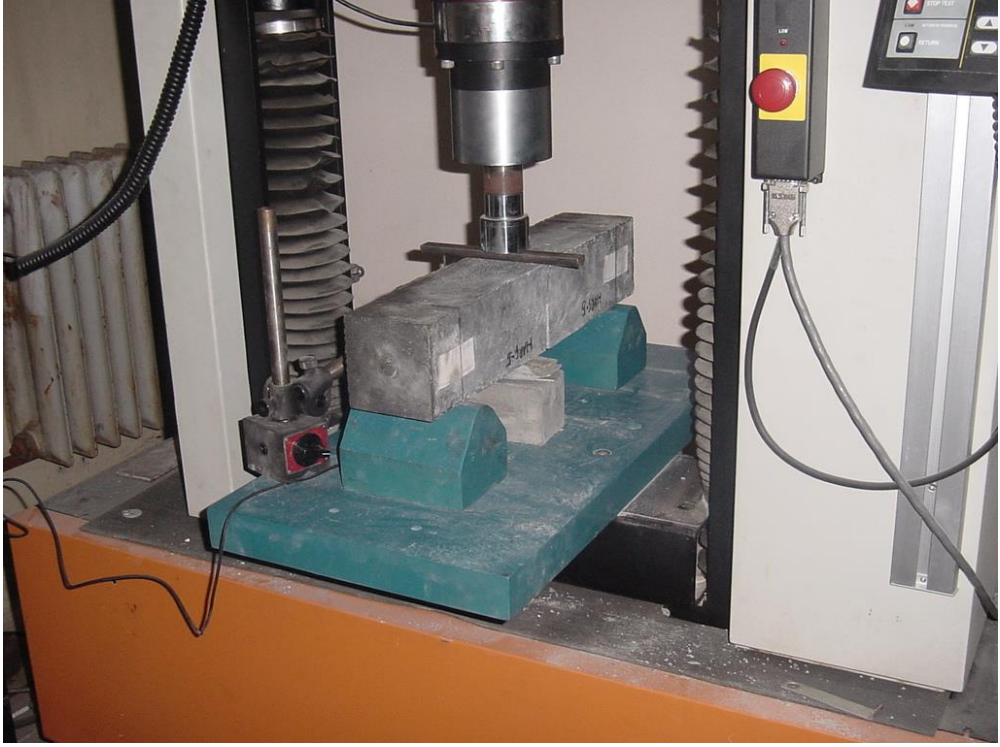
Şekil C.2 Derin çentik açılmış çimento hamuruna ait yük-sehim eğrileri

EK D Bayramov'un çalışmasına ait değerler [3].



Şekil D.1 Mezo-mekanik bağıntılarıyla bulunan kırılma enerjisi değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması [3]

EK E : Deney düzenekleri ve deney numunelerine ait fotoęraflar.



Şekil E.1   noktalı eğilme deneyi düzeneği



Şekil E.2 Silindir basınc deneyi

EK F : Deney sonuçlarıTablo A1 Silindir basınç deneyi sonuçları (N/mm²)

Numune	Beton	Harç	Çimento hamuru
1	86,5	81,5	81,7
2	90,0	-	81,5
3	96,7	72,6	82,9

Tablo A2 Silindir basınç deneyinde hesaplanan elastisite modülleri (N/mm²)

Numune	Beton	Harç	Çimento hamuru
1	42329	39637	24271
2	43738	42069	22004
3	47577	36805	23780

Tablo A.3 Disk yarma-çekme deneyi sonuçları (N/mm²)

Numune	Beton	Harç	Çimento hamuru
1	9,1	3,4	5,3
2	5,8	5,1	4,9
3	5,2	4,6	4,5
4	7,4	5,4	4,7
5	7,9	6,7	3,8
6	5,9	5,2	2,8

Tablo A.4 Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları

Numune adı	Kırılma enerjisi (N/m)	Net eğilme dayanımı (N/mm ²)
BTN-Y1	99,7	6,7
BTN-Y2	56,5	7,4
BTN-Y3	107,5	6,4
BTN-D1	92,0	8,1
BTN-D2	106,6	8,7
BTN-D3	114,7	9,2
HRÇ-Y1	74,1	2,9
HRÇ-Y2	-	-
HRÇ-Y3	85,8	3,1
HRÇ-D1	119,3	5,6
HRÇ-D2	103,8	6,0
HRÇ-D3	88,4	5,2
HMR-Y1	45,8	3,3
HMR-Y2	28,7	2,1
HMR-Y3	13,6	1,4
HMR-D1	33,0	3,0
HMR-D2	-	-
HMR-D3	19,8	2,2

ÖZGEÇMİŞ

Kadir Vecihi ALDIKAÇTI 10 Eylül 1977'de İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini İstanbul Nurettin Teksan İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimini İstanbul Saint Joseph Fransız Lisesi'nde tamamladı. 1997 yılında girdiği Y.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2002 yılında mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nün İnşaat Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği Programına başlayan K.V. ALDIKAÇTI, Yapı Malzemesi Tez Alanında çalışmalarını sürdürmektedir.