

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO HAMURU, HARÇ VE BETONUN
KIRILMA PARAMETRELERİNİN
MEZOMEKANİK MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Önder MEŞE**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR

EYLÜL 2005

**ÇİMENTO HAMURU, HARÇ VE BETONUN
KIRILMA PARAMETRELERİNİN
MEZOMEKANİK MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Önder MEŞE
(501021098)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.09.2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 27.09.2005**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY (M.S.Ü.)
Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL**

EYLÜL 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışmada çimento hamuru, harç ve betonda boyut etkisi ve kırılma davranışları incelenmiştir.

Tüm tez çalışmam boyunca beni destekleyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e,

Üretimleri yaptığım BetonSA Büyükçekmece Hazır Beton Tesisi çalışanlarına, üretimlerde bana yardım eden AkçanSA Teknoloji Merkezi'nden Hükmü AĞAÇ ve Hakan EKİM'e,

Deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan İnşaat Yüksek Mühendisi Cengiz ŞENGÜL, İnşaat Yüksek Mühendisi Burcu AKÇAY ve emeği geçen İ.T.Ü Yapı Malzemesi Anabilim Dalı Laboratuvar çalışanlarına,

Öğrenimim sırasında bana destek olan firma çalışanlarına ve Proje Müdürüm Baise ESENDEMİR'e,

Öğrenimimin bu aşamaya gelmesinde büyük katkısı olan ve beni hep destekleyen aileme ve yeğenim Ozan'a ayrıca teşekkür ederim.

Mayıs, 2005

Önder MEŞE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Çalışmanın Amacı	4
1.3. Çalışmanın Ana Hatları	4
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	6
2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekanîği	6
2.2. Boyut Etkisi Kuralı ve Kırılma Parametreleri	9
2.2.1. Malzeme ve Numune Geometrisi	10
2.2.2. Boyut Etkisi Kuralında B ve d_0 sabitlerinin bulunması	11
2.3. Kırılma Süreci Bölgesi	13
2.4. Betonun Kırılma Davranışı	15
2.5. Toklaşma Mekanizmaları	16
2.5.1. Ara Yüzeylerin Çatlaması (Mikro çatlak kalkanı)	17
2.5.2. Çatlak Sapması Mekanizması	18
2.5.3. Çatlak Kapanı Mekanizması	19
2.5.4. Agreg a Köprülenmesi Mekanizması	21
2.6. Etkin Kırılma Tokluğu	22
2.6.1. Çimento Hamurunun Kırılma Tokluğu	22
2.7. Üç Noktalı Eğilme Deneyi İle Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi	23
2.8. Kırılma Parametrelerine Etki Eden Faktörler	24
2.8.1. Su/çimento Oranının Betonun Kırılma Parametrelerine Etkisi	24
2.8.2. Maksimum Agreg a Boyutunun Kırılma Parametrelerine Etkisi	29
2.8.3. Çentik Derinliği Oranının Kırılma Enerjisine Etkisi	31
2.8.4. Kırılma Enerjisinde Boyut Etkisi	32
2.9. Gerçek Kırılma Enerjisi	32

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	35
3.1.1. Agregaların özellikleri	35
3.1.2. Çimentonun özellikleri	36
3.1.3. Katkının özellikleri	37
3.2. Malzeme Bileşimleri	38
3.3. Beton, Harç ve Çimento Hamuru Bileşenlerinin Hacimsel Oranları	39
3.4. Numunelerin Hazırlanması ve Taze Beton Deneyleri	41
3.5. Deney Türü, Numune Tipleri ve Şekilleri, Elde Edilecek Parametreler	41
4. DENEY SONUÇLARI	43
4.1. Taze Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deney Sonuçları	43
4.2. Sertleşmiş Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deney Sonuçları	43
4.2.1 Boyut Etkisi Kuralının Kiriş Numunelere Uygulanması	43
4.2.2. Küp ve Silindir Basınç Deneyi	52
4.2.3. Disk Yarma-Çekme Deneyi	53
4.2.4. Üç Noktalı Eğilme Deneyi	53
4.2.4.1. Kırılma Enerjisi Hesabı	55
4.2.4.2. Net Eğilme Dayanımı	56
4.2.4.3. Gerçek Kırılma Enerjisi Hesabı	56
4.2.4.4. Karakteristik Boyun Belirlenmesi	57
4.2.5. Çimento Hamurunun Kırılma Tokluğunun Hesabı	58
4.3 Mezo-mekanik Modelleme	60
4.3.1 Elastisite Modülü	60
4.3.1.1. Çimento Hamurunun Elastisite Modülü	60
4.3.1.2 Harcın Elastisite Modülü	61
4.3.1.3. Betonun Elastisite Modülü	62
4.3.2 Harç ve Betonun Kırılma Tokluğunun Hesabı	64
4.3.3. Kırılma Enerjisi	65
4.3.4. Tek Eksenli Çekme Gerilmesi	68
5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENME VE DEĞERLENDİRİLMESİ	69
5.1. Basınç Dayanımı	69
5.2. Yarma-Çekme Dayanımı	70
5.3. Elastisite Modülü	71
5.4. Net Eğilme Dayanımı	71
5.5. Kırılma Enerjisi	72
5.6. Karakteristik Boyun Değerlendirilmesi	73
5.7. Mezo-mekanik Modelleme ile Bulunan Değerlerle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	74

6. GENEL SONUÇLAR	78
KAYNAKLAR	80
EKLER	85
ÖZGEÇMİŞ	114

KISALTMALAR

BEK	: Boyut Etkisi Kuralı
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
FÇM	: Fiktif Çatlak Modeli
LVDT	: Linear Variable Displacement Transducer
KSB	: Kırılma Süreci Bölgesi
RILEM	: Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherche sur les Matériaux et Constructions

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Üç noktalı eğilme deneyinde A_1 katsayılarına ait değerler.....	9
Tablo 2.2. Kırılma süreci bölgesi uzunlukları.....	15
Tablo 2.3. Su/çimento oranının betonun kırılma parametrelerine etkisi.....	25
Tablo 2.4. Maksimum agrega boyutunun kırılma enerjisine etkisi.....	29
Tablo 2.5. Çentik derinliği oranının kırılma enerjisine etkisi.....	31
Tablo 2.6. Kırılma enerjisinde boyut etkisi.....	32
Tablo 3.1. Üretimde kullanılan agregaların granülometrik bileşimleri ve özgül ağırlıkları.....	35
Tablo 3.2. Çimentonun fiziksel özellikleri.....	36
Tablo 3.3. Çimentonun kimyasal özellikleri.....	37
Tablo 3.4. Çimentonun basınç dayanımı.....	37
Tablo 3.5. Glenium 51'in teknik özellikleri.....	38
Tablo 3.6. Beton, harç ve çimento hamuru bileşimleri.....	38
Tablo 3.7. 1m ³ beton, harç ve çimento hamurundaki bileşenlerin hacimsel değerleri.....	40
Tablo 3.8. Deney türü ve elde edilecek parametreler.....	42
Tablo 4.1. Taze beton, harç ve çimento hamuru deney sonuçları.....	43
Tablo 4.2. Çentik – yükseklik oranı 0.1 olan beton numunelerde elde edilen tepe yükleri ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri.....	44
Tablo 4.3. Çentik – yükseklik oranı 0.5 olan beton numunelerde elde edilen tepe yükleri ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri.....	44
Tablo 4.4. Çentik – yükseklik oranı 0.1 olan harç numunelerde elde edilen tepe yükleri ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri.....	45
Tablo 4.5. Çentik – yükseklik oranı 0.5 olan harç numunelerde elde edilen tepe yükleri ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri.....	45
Tablo 4.6. Çentik – yükseklik oranı 0.1 olan çimento hamuru numunelerde elde edilen tepe yükleri ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri.....	46
Tablo 4.7. Çentik – yükseklik oranı 0.5 olan çimento hamuru numunelerde elde edilen tepe yükleri ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri.....	46
Tablo 4.8. Kiriş numunelerden elde edilen sabitler ve kırılma parametreleri...	51
Tablo 4.9. Boyut Etkisi Kuralı sabitleri ve malzeme kırılma parametreleri.....	52
Tablo 4.10. Küp ve Silindir basınç dayanımları ile Elastisite modülü.....	52
Tablo 4.11. Disk numunelerinin yarma dayanımları.....	53
Tablo 4.12. Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları.....	58
Tablo 4.13. Çimento hamurunun kırılma tokluğu.....	59
Tablo 4.14. Mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modülleri.....	63
Tablo 4.15. Harç ve betonun kırılma tokluğu.....	65

Tablo 4.16.	Mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kritik çatlak açılma değerleri ve kırılma enerjileri.....	67
Tablo 5.1.	Deneysel ve mezo-mekanik bağıntılarla elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	75
Tablo A.1.	Basınç deneyine tabi tutulan küp numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerleri	85
Tablo A.2.	Basınç deneyine tabi tutulan silindir numunelerden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri	86
Tablo A.3.	Yarma deneyine tabi tutulan disk numunelerden elde edilen yarma çekme dayanımı değerleri	87
Tablo A.4.	70X70X280 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin ebat, çentik – kırış derinliği oranı, etkin yükseklik ve ağırlık değerleri.....	88
Tablo A.5.	100X100X500 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin ebat, çentik – kırış derinliği oranı, etkin yükseklik ve ağırlık değerleri	89
Tablo A.6.	150X150X750 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin ebat, çentik – kırış derinliği oranı, etkin yükseklik ve ağırlık değerleri	90
Tablo A.7.	70X70X280 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları	91
Tablo A.8.	100X100X500 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları	92
Tablo A.9.	150X150X750 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları	93

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	: Beton deformasyonunun çeşitli karakteristiklerini tanımlayan gerilme – şekil değiştirme diyagramı.....	1
Şekil 2.1	: Üniform çekme altındaki levhada gerilme akım çizgileri : (a) çentiksiz levha; (b) çentikli levha.....	6
Şekil 2.2	: Çatlak ucunda elastik olmayan bölge.....	7
Şekil 2.3	: LEKM'nin mukavemet kriterine karşın gösterdiği boyut etkisi...	8
Şekil 2.4	: Üç noktalı eğilme deneyi ile kırılma tokluğunun hesaplanması...	8
Şekil 2.5	: Bazant'ın önerdiği boyut etkisi kuralı.....	13
Şekil 2.6	: Gevrek bir malzemede çatlak ucunda meydana gelen gerilme durumu.....	14
Şekil 2.7	: Değişik türdeki malzemelerin kırılma davranışları : (a) lineer elastik malzeme, (b) sünek malzeme, (c) yarı gevrek malzeme....	14
Şekil 2.8	: Önceden çentik içeren beton numunenin tipik yük-deformasyon eğrisi.....	16
Şekil 2.9	: Kırılma süreci bölgesindeki bazı toklaşma mekanizmaları: (a) çatlak kalkanı, (b) çatlak sapması, (c) agrega köprülenmesi, (d) çatlak yüzeyleri arasında sürtünme, (e) çatlak ucu körelmesi, (f) çatlak dallanması	17
Şekil 2.10	: Ara yüzey çatlaklarından dolayı oluşan toklaşma ve çatlak kalkanın şematik gösterimi	18
Şekil 2.11	: Çatlak yolunun agreganın kenarından (a) ve içinden (b) geçmesi durumu	19
Şekil 2.12	: Çatlak sapması mekanizmasından sapmasından dolayı malzemede etkin tokluğun agrega konsantrasyonu ile değişimi	19
Şekil 2.13	: Çatlak kapanı mekanizmasının şematik gösterimi	20
Şekil 2.14	: Çatlak kapanı nedeni ile oluşan tokluğun agrega konsantrasyonu ile değişimi	21
Şekil 2.15	: Yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.16	: Karakteristik boy ve basınç dayanımının su/çimento oranındaki değişime duyarlılığı	26
Şekil 2.17	: Su/çimento oranı – karakteristik boy ilişkisi	26
Şekil 2.18	: Su/çimento oranı – Basınç dayanımı ilişkisi	27
Şekil 2.19	: Su/çimento oranı – Çekme dayanımı ilişkisi	27
Şekil 2.20	: Su/çimento oranı – Elastisite Modülü ilişkisi.....	28
Şekil 2.21	: Basınç dayanımı – Çekme dayanımı ilişkisi	28
Şekil 2.22	: Maksimum agrega boyutu ile karakteristik boy arasındaki ilişki	30
Şekil 2.23	: Maksimum agrega boyutu ile kırılma enerjisi arasındaki ilişki....	30
Şekil 2.24	: Çentik derinliği oranı (a/w) – kırılma enerjisi ilişkisi	31
Şekil 2.25	: Tek çentikli deney numunesinde enerji dağılımı	33
Şekil 3.1	: Elekten geçen agrega yüzdelelerini gösteren eğriler.....	35

Şekil 3.2	: Beton üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi.....	36
Şekil 3.3	: 1m ³ betonu oluşturan bileşenlerin tipik şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.4	: 1 m ³ beton, harç ve çimento hamurunda malzeme konsantrasyonlarının şematik gösterimi.....	40
Şekil 3.5	: Numune şekil ve boyutları: (a) Silindir, (b) Disk, (c) Küp, (d) Kirişler.....	42
Şekil 4.1	: Çentik – yükseklik oranı 0.1 olan beton numunelerde kırış yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki.....	47
Şekil 4.2	: Çentik – yükseklik oranı 0.5 olan beton numunelerde kırış yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki.....	47
Şekil 4.3	: Çentik – yükseklik oranı 0.1 olan harç numunelerde kırış yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki.....	48
Şekil 4.4	: Çentik – yükseklik oranı 0.5 olan harç numunelerde kırış yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki.....	48
Şekil 4.5	: Çentik – yükseklik oranı 0.5 olan çimento hamuru numunelerde kırış yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki.....	49
Şekil 4.6	: Çentik – yükseklik oranı 0.1 olan harç numunelerde $\log(d / d_0)$ ile $\log(\sigma_N / Bf_t')$ arasındaki ilişki.....	49
Şekil 4.7	: Çentik – yükseklik oranı 0.5 olan harç numunelerde $\log(d / d_0)$ ile $\log(\sigma_N / Bf_t')$ arasındaki ilişki.....	50
Şekil 4.8	: 100X100X500 mm ölçülerindeki prizma üzerinde uygulanan üç noktalı eğilme deneyinin şematik gösterimi.....	54
Şekil 4.9	: Beton numulere ait yük-sehim eğrilerinin tipik gösterimi.....	55
Şekil 4.10	: Çimento matrisi tokluğunun su/çimento oranı ve numune yaşı ile değişimi	59
Şekil 4.11	: Çimento hamuru, harç ve betonun etkin kırılma tokluğunun karşılaştırılması.....	65
Şekil 4.12	: Betona ait çekme-şekil değiştirme eğrisi.....	66
Şekil 5.1	: Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama küp basınç dayanımları.....	69
Şekil 5.2	: Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama silindir basınç dayanımları.....	69
Şekil 5.3	: Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama küp ve silindir basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	70
Şekil 5.4	: Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama disk yarma-çekme dayanımları.....	70
Şekil 5.5	: Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama elastisite modülleri.....	71
Şekil 5.6	: Net eğilme dayanımlarının karşılaştırılması.....	72
Şekil 5.7	: Kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 5.8	: Çimento hamurunun karakteristik boy değerleri.....	73
Şekil 5.9	: Harcın karakteristik boy değerleri.....	74
Şekil 5.10	: Betonun karakteristik boy değerleri.....	74
Şekil 5.11	: Deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modüllerinin karşılaştırılması.....	75

Şekil 5.12	: Çimento hamurunun deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.13	: Harcın deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.14	: Betonun deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	77
Şekil B.1	: Çimento hamuru numunelere ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri.....	94
Şekil B.2	: Harç numunelere ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri.....	94
Şekil B.3	: Beton numunelere ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri.....	95
Şekil C.1	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	96
Şekil C.2	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	96
Şekil C.3	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	97
Şekil C.4	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	98
Şekil C.5	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	98
Şekil C.6	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	99
Şekil C.7	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	99
Şekil C.8	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	100
Şekil C.9	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	100
Şekil C.10	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	101
Şekil C.11	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	101
Şekil C.12	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	102
Şekil C.13	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	102

Şekil C.14	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	103
Şekil C.15	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	103
Şekil C.16	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	104
Şekil C.17	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri	104
Şekil D.1	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri	105
Şekil D.2	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri	105
Şekil D.3	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri	106
Şekil D.4	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri	106
Şekil D.5	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri	107
Şekil D.6	: Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri	107
Şekil E.1	: Küp numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi.....	108
Şekil E.2	: Silindir numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi.....	109
Şekil E.3	: Silindir numuneler üzerinde yapılan elastite modülü deneyi	110
Şekil E.4	: Disk numuneler üzerinde yapılan yarma çekme deneyi	111
Şekil E.5	: Prizma numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyi	112
Şekil E.6	: Prizma numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyi	113

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
U	: 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_{etkin}	: Etkin kesit alanı
δ_0	: Göçme sırasında kiriş ortasındaki sehim
a_l	: Geçiş ligamentinin uzunluğu
$m_{\text{Ç}}$	: 1 m ³ betondaki çimentonun 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'ın ağırlığı
m_{Kk}	: 1 m ³ betondaki kırma kumun ağırlığı
m_{Dk}	: 1 m ³ betondaki doğal kumun ağırlığı
$\rho_{\text{Ç}}$	: Çimentonun özgül ağırlığı
ρ_{su}	: Suyun özgül ağırlığı
$\rho_{ak.}$	: Akışkanlaştırıcının özgül ağırlığı

ρ_{KI}	: Kırmataş I'in özgül ağırlığı
ρ_{Kk}	: Kırmataş kumun özgül ağırlığı
ρ_{Dk}	: Doğal kumunun özgül ağırlığı
V_{hava}	: 1 m ³ 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
V_c	: İri agreganın 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
ν	: Poisson oranı
A	: Regresyon eğrisinin eğimi

B : Boyut Etkisi kuralı deney sabiti
C : Regresyon eğrisine ait bir katsayı
 d_0 : Boyut Etkisi kuralı deney sabiti
 $F(\alpha)$: Geometri faktörü
 $g(\alpha_0)$: Boyutsuz enerji salınım oranı
CMOD: Çatlak ağzı açılma deplasmanı
CTOD_C: Kritik çatlak ucu açılma deplasmanı
 c_f : Kırılma süreci bölgesinin uzunluğu

ÇİMENTO HAMURU, HARÇ VE BETONUN KIRILMA PARAMETRELERİNİN MEZOMEKANİK MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, geometrik olarak benzer fakat boyutları farklı normal beton, betonun harç ve sertleşmiş çimento hamuru fazlarında numuneler üretildi. Bütün karışımlarda etkin su-bağlayıcı oranı 0.30'da sabit tutuldu. Boyut Etkisi Kuralı ile Kırılma Enerjisi ve Kırılma Süreci Bölgesi Uzunluğu hesaplandı. RILEM 50-FMC Teknik Komitesinin önerilerine uygun, çok sığ (çentik/kiriş derinliği oranı, $a/W=0.1$) ve derin çentik ($a/W=0.5$) açılmış aynı geometriye sahip numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyleri ile boyuttan bağımsız kırılma enerjisi hesaplandı. Sertleşmiş çimento hamurunda, Lineer Elastik Kırılma Mekaniği'nin geçerli olduğu kabul edildi. Kritik gerilme şiddet çarpanı, çentikli kiriş numuneler kullanılarak belirlendi. Betonun ve söz konusu betonun 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 söz konusu betonun çimento hamuru fazının süneklikleri karakteristik boy cinsinden bulundu.

Betonun kırılma süreci bölgesinde oluşan toklaşma mekanizmaları göz önünde tutularak yapılan mezo-mekanik hesaplarla, deneysel çalışmaların karşılaştırılmasından aşağıdaki sonuçlara varılabilir: i) Gevrek bir malzeme olan sertleşmiş çimento hamurunun yarı gevrek davranış sergileyen betona nasıl dönüştüğünün daha iyi anlaşılması için bu çalışmada toklaşma mekanizmaları ve mezo-mekanik bağıntılar kullanıldı. ii) Betonun ve harç fazının ve ayrıca sertleşmiş çimento hamurunun elatisite modüllerinin deneysel ve tahmin edilen değerleri iyi bir uyum sergiledi. iii) Farklı çentik türüne (sığ veya derin) sahip, aynı boyut ve biçimdeki çentikli kiriş numunelerden gerçek kırılma enerjisinin belirlenmesinde tatmin edici sonuçlar alındı. iv) Kiriş numune sayısının yeterli olmamasından dolayı; kirişler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deney sonuçlarının (harç ($a/W=0.5$) hariç), Boyut Etkisi Kuralı ile uyumlu olmadığı görüldü. v) Çentik- yükseklik oranı 0,1 ve 0,5 olan beton numunelerde ve 0,5 olan çimento hamuru numunelerinde C katsayıları negatif bulundu. Benzer şekilde, çentik- yükseklik oranı 0,1 olan harç numunelerde negatif $g'(\alpha_0)$ değerleri elde edildi.

MESO-MECHANICAL MODELLING OF FRACTURE PARAMETERS OF CEMENT PASTE, MORTAR AND CONCRETE

SUMMARY

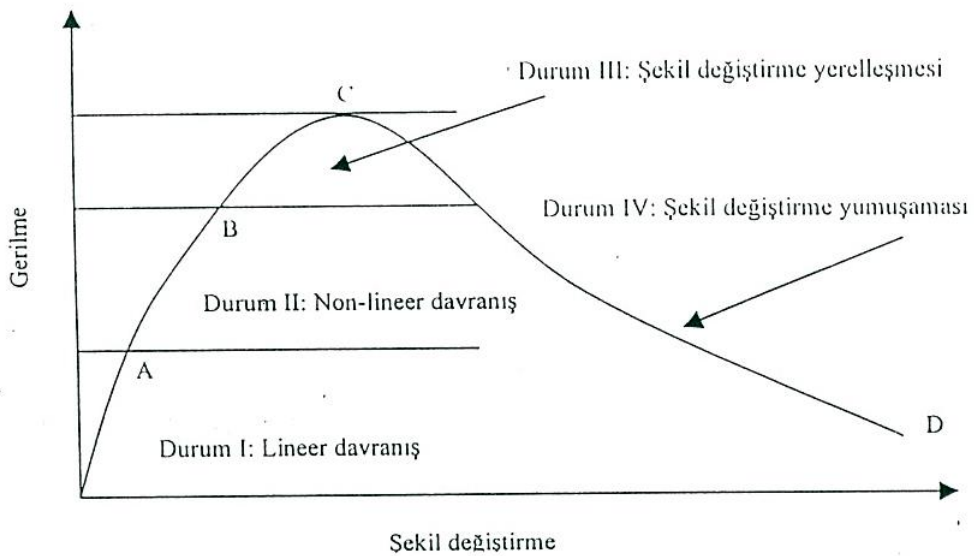
In this study, samples with similar shapes but different sizes were produced from concrete, mortar or cement paste. In all mixtures, effective water-binder ratio was kept constant at 0.30. The Fracture Energy and the Effective Process Zone Length were calculated using the Size Effect Rule. The test for 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, $a/W=0.1$) or 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 using 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) 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. 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) It was observed that, due to the small sample size, the results of three point bending tests were not compatible with the Size Effect Rule, except for the mortar ($a/W=0.5$) samples. v) Concrete samples with notch/height ratios of 0.1 and 0.5 and cement paste samples with the notch/height ratio of 0.5 yielded negative C values. Similarly, mortar samples with the notch/height ratio of 0.1 yielded negative $g'(\alpha_0)$ values.

GİRİŞ

1.1 Genel

Beton, heterojen ve anizotrop bir malzeme olup; çimento, su, ince agreg a ve kaba agregadan oluşmaktadır. Çimentonun su ile hidratasyonu sonucunda zamanla meydana gelen matris, sertleşirken agreg a ile bağ yaparak monolitik bir yapı ve matris ile agreg a arasında bir ara yüzey oluşturur. Taze betondaki matris ve agreg anın, birbirinden oldukça farklı elastisite modüllerine sahip olması, termal genleşme katsayılarının farklı olması ve nem içeriği değişimlerine verdikleri yanıtın farklı olmasının bir sonucu olarak; betonun sertleşmesi esnasında; bu ara yüzey çimento hamuruna göre daha zayıf olduğundan bazı çatlaklar meydana gelir (Mehta ve Monteiro,1993). Beton, sertleşirken çimento hamurunun nem kaybetmesinden dolayı bir büzülme oluşur. Bu büzülme nedeniyle meydana gelen şekil değiştirme, üniform değildir. Agregalar, matristeki büzülmeye engel olmaya çalışır ve bundan dolayı beton bir yüklemeye maruz kalmadan betonda bir miktar çekme gerilmesi meydana gelir. Aynı şekilde, sertleşme esnasında açığa çıkan sıcaklıktan dolayı oluşan farklı sıcaklık dağılımları ısıl çatlamalara neden olur.



Şekil 1.1 Beton deformasyonunun çeşitli karakteristiklerini tanımlayan gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Eksenel çekme altında, yarı gevrek bir malzeme olan çimento esaslı malzemelerden betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Uygulanan yük altında betonda dört bölgenin olduğu görülür:

1. I. Bölge (Lineer Davranış) : Tepe yükünün %30-40’lık değerine kadar olan, 0-A noktası arasında kalan bölgedir.
2. II. Bölge (A-B arası, Non-lineer Davranış) : Yükleme doğrultusu boyunca oluşan çekme-şekil değiştirmeleri numune boyunca uniformluğunu koruduğu bölgedir. Bu bölgede çatlaklar rastgele dağılır.
3. III. Bölge (B-C arası, Şekil Değiştirme Yerelleşmesi) : Yükleme doğrultusu boyunca çekme şekil değiştirmelerinin uniform olmadığı, çatlak yayılmasının kararlı olduğu bölgedir.
4. IV. Bölge (C-D arası (inen kol), Şekil Değiştirme Yumuşaması) : Kırılmadan sonra oluşan, çatlak yayılmasının kararsız olduğu, çatlak boyutunun yük düşmesine rağmen; sürekli arttığı bölgedir.

Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği’nin betona uygulanamayacağı bu gerilme-şekil değiştirme davranışından anlaşılmaktadır. Betonun yarı gevrek davranışı, tepe yükünden önceki non-lineer gerilme-şekil değiştirme davranışı (çatlak yayılmasının kararlı olduğu bölge) tarafından belirlenir. Kararlı çatlak yayılması, çimento esaslı yarı gevrek malzemelerin heterojenlik özelliğinden ortaya çıkan kırılma süreci bölgesinde meydana gelir. Birçok araştırmacı, betonda kırılma süreci bölgesinin boyutunun önemli derecede büyük olduğunu; böylece betonun kırılma davranışının karakterize edilmesinde LEKM’nin kullanışsız olduğunu ortaya koymuşlardır (Mindess ve Diamond, 1982).

Normal çalışma koşullarında kırılan yapı elemanları üzerinde yapılan incelemelerde, kırılmanın başlıca kaynağının malzemede üretim veya montaj sırasında oluşan çatlak türündeki kusurların yük etkisinde zamanla büyüyerek kritik değerlere ulaşmalarının olduğu sonucuna varılmıştır. Başlangıçta önemsiz görünen veya gözden kaçan bu kusurlar zamanla büyüyerek kritik bir değere ulaşmakta ve ani kırılmalara neden olmaktadır.

Yapılarda, en çok kullanılan yapı malzemesi beton olduğundan; betonun mekanik davranışının tam olarak anlaşılması gerekmektedir. Baraj, nükleer reaktör, yüksek katlı binalar ve savunma amaçlı yapılarda kullanılan betonlarda hasarın meydana

gelmesi; çok büyük maddi ve insani kayıplara neden olması; betonun çatlama davranışının incelenmesine olan ilgiyi artırmıştır (Shah ve Taşdemir, 1994).

Kırılma mekaniğinin ana konusu; gerilme altındaki bir yapı elemanında çatlak ve gerilme konsantrasyonunu arttırıcı faktörleri göz önüne alarak mevcut bir çatlağın hangi koşullar altında yayılarak kırılma oluşturacağını saptamaktır.

Kırılma mekaniği ile ilgili ilk çalışmalar, 1920'li yıllarda Griffith'in homojen ve gevrek olan cam üzerinde yaptığı çalışmalarla başlamıştır. Daha sonraki yıllarda, Orowan ve Irwin gevrek olmayan malzemeler üzerinde çalışmışlardır (Irwin, 1957). Kaplan (1961), beton üzerinde ilk çalışmaları başlatmış ve betonun yarı gevrek ve çok geniş bir kırılma süreci bölgesi gösteren heterojen bir malzeme olmasından dolayı kırılma parametrelerinin Lineer Elastik Kırılma Mekaniği ile elde edilemeyeceğini göstermiştir (Mindess ve Diamond, 1982). Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) betona uygulanamamasının esas nedeni betonda mevcut olan toklaşma mekanizmalarıdır (Taşdemir ve Karihaloo, 2001a).

Betonun kırılmasının LEKM esasına göre bulunan Mod I (açılma modu), gerilme şiddet çarpanının kritik değeri ile birlikte çatlak ucu açılma deplasmanının kritik değeri, kırılma enerjisi ve karakteristik boyunu da bulabilmek için LEKM modifiye edildi ve non-lineer kırılma mekaniği modelleri geliştirilmeye çalışıldı. Bu amaçla günümüze dek aşağıdaki üç model önerildi:

1. Çentikli kiriş numune kullanarak kırılma enerjisinin saptanmasına yönelik Fiktif Çatlak Modeli (FÇM) (Hillerborg ve diğ., 1976).
2. Çentikli kirişte, betonun kırılmasını iki parametre ile ifade eden İki Parametrelili Model (Jenq ve Shah, 1985).
3. Betonun kırılma enerjisi ve kırılma süreci bölgesinin boyut etkisi yöntemiyle saptanması esasına dayanan Boyut Etkisi Modeli (Bazant ve Kazemi, 1990).

Her bir model gevrekliğin bir ölçüsünü verir. Fiktif Çatlak Modelinde bulunan kırılma enerjisi ile betonun elastisite modülüne ve tek eksenli çekme dayanımına bağlı olarak hesaplanan karakteristik boy (l_{ch}), betonun sayısal analizinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Bayramov ve diğ., 2004). Karakteristik boy, nominal dayanımı, kırılma modunu ve çatlak büyümesini kontrol ettiğinden beton karışım tasarımında göz önüne alınması gerekir (Lange-Kornbak ve Karihaloo, 1998).

Kırılma mekaniği üzerinde son yıllarda yapılan çalışmalar, fiktif çatlak modeline dayanılarak bulunan özgül kırılma enerjisinin malzemeye bağlı olduğunu göstermiştir. Abdalla (2003) ile Karihaloo ve diğ (2003) boyuttan bağımsız özgül kırılma enerjisini üç noktalı eğilme deneyi ile saptamışlardır. Bu yöntemde numunelerin birine derin çentik, diğerine ise sıg çentik açılmış iki adet aynı geometriye sahip deney numunesi kullanmak yeterli olmaktadır.

Gevrek bir malzeme olan sertleşmiş çimento hamuru hiçbir dış yükleme olmadan plastik rötrenin yarattığı gerilme etkisiyle kendi kendine hasara uğrayabilir. İnce ve iri agregaların çimento hamuruna eklenmesiyle rötire gerilmeleri azalmakta, kırılma tokluğu çimento hamuruna göre daha yüksek olan harç ve beton elde edilmektedir. Agregas konsantrasyonu betonun eğilme ve çekme özelliklerine önemli katkıda bulunmakta, karakteristik boy, kırılma enerjisi, tek eksenli çekme dayanımı ve elastisite modülünde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır (Bayramov, 2004).

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, Boyut Etkisi Kuralı ile kritik enerji salıverme hızı ile kırılma süreci bölgesi uzunluğunu ve ayrıca; mezo-mekanik modellerle uygun toklaşma mekanizmalarını kullanarak betonun kırılma parametrelerinin hamur ve harç fazlarının kırılma parametrelerinden hesaplanmasına çalışılmıştır. Derin ve sıg çentik açılmış aynı geometriye sahip numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyleri ile boyuttan bağımsız kırılma enerjisinin hesaplanması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda bulunan elastisite modülü ve kırılma enerjisi değerleri, kırılma enerjisinin mezo-mekanik modelleme ile hesaplanan değerleri ile karşılaştırılacaktır.

1.3 Çalışmanın Ana Hatları

İlk yapılan beton faz üretiminden agregas çıkarılarak betonun harç ve hamur üretimleri yapıldı. Çimento hamuru, beton ve çimento harcından birer adet üretim yapılmıştır. Her üretimde, 70X70X280 mm prizma (8'er adet), 100X100X500 mm prizma (8'er adet), 150X150X750 mm prizma (8'er adet), ϕ 100X200 mm silindir (6'şar adet), 150X150X150 mm küp (6'şar adet), ϕ 150X60 mm disk (12'şer adet) numune üretimi yapıldı. Küp numunelerden basınç mukavemeti, silindir

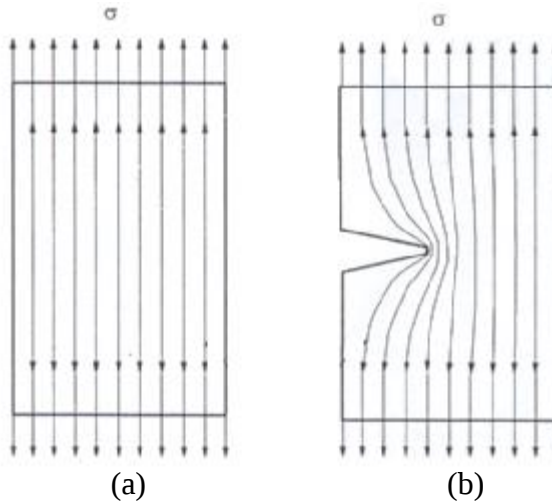
numunelerden basınç dayanımı ve elastisite modülü, disk numunelerden yarılmada çekme dayanımı ve prizma numunelerden kırılma enerjisi ile net eğilme dayanımı bulundu. Abdalla ve Karihaloo'nun (2003) önerdiği metoda göre boyuttan bağımsız kırılma enerjisi bulundu. Mezo-mekanik bağıntılarla sertleşmiş çimento hamurunun kırılma tokluğu kullanılarak, beton ve harç fazının kırılma parametreleri hesaplanarak; deneysel değerler ile bağıntılarla bulunan değerler karşılaştırıldı.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

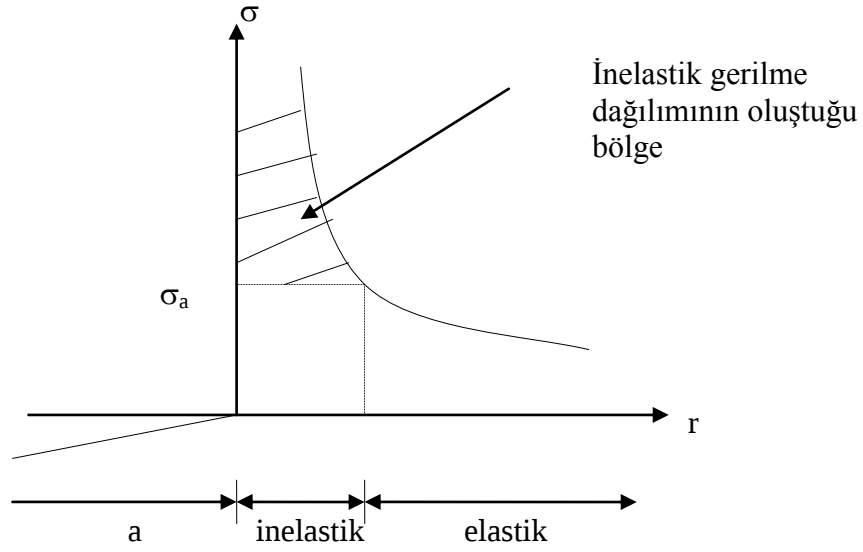
2.1 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Griffith (1921), kırılma mekaniğiyle ilgili yaptığı çalışmalarda; gevrek malzemelerin çatlak ve kusur içermesinden dolayı, gerçek çekme dayanımlarının tahmini teorik dayanımlarının çok altında olduğunu göstermiştir. Yaptığı çalışmalarda, ince cam liflerinin çekme dayanımının kalın cam liflerinin çekme dayanımından daha büyük olduğunu görmüştür. Bunun da; camın yüzey hatalarından ileri geldiğini düşünmüş ve malzeme boyutu büyüdükçe yüzey kusurlarının bulunma olasılığının arttığını belirlemiştir.

Elastik gevrek bir malzemeden yapılmış çatlak içermeyen bir levhada gerilme akımı düz ve yükleme yönüne paralel olmasına rağmen (Şekil 2.1a); çentik içeren bir levhada ise gerilme akımı çatlağın kenarından geçmek zorunda kalarak çentiğin ucunda gerilme konsantrasyonunun artmasına, çentiğin ucunda ise gerilme gevşemesine neden olmaktadır (Shah ve Ahmad, 1994). Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM)'ne göre, çentik ucunda meydana gelen bu gerilme yığılması çentik keskinleştikçe sonsuza gider.



Şekil 2.1 Üniorm çekme altındaki levhada gerilme akım çizgileri : (a) çentiksiz levha; (b) çentikli levha (Shah ve Ahmad, 1994)



Şekil 2.2. Çatlak ucunda elastik olmayan bölge

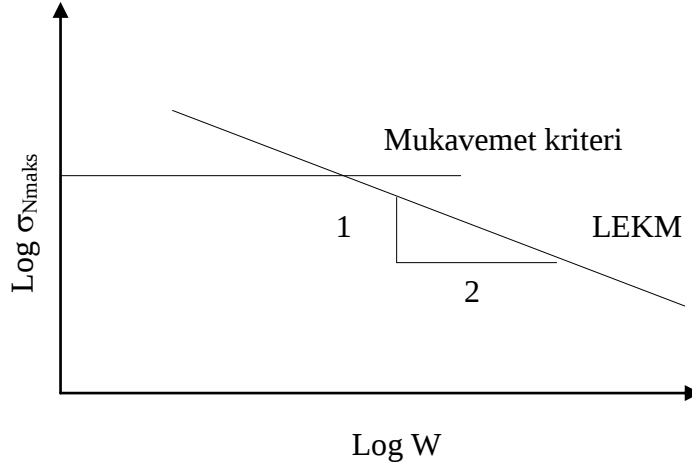
Şekil 2.2’de görüldüğü üzere; gerçek malzemeler içerisinde sonsuz gerilme oluşmayacağı için çatlak ucunda, kırılma süreci bölgesi olarak adlandırılan elastik olmayan bir bölge mevcuttur. LEKM’nin bu bölgede uygulanabilmesi, kırılma süreci bölgesinin kısa olmasıyla mümkündür. Gevrek malzemede, çatlağın ilerlemesini ve kırılmayı tanımlamak için kırılma parametresi olarak sadece kırılma tokluğu (K_{Ic}) yeterlidir (Akkaya ve diğ., 2003). Kritik gerilme şiddet çarpanı ile ilgili genel bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$K_{IC} = \sigma_{maks} \sqrt{a} f\left(\frac{a}{W}\right) = \sigma \sqrt{W} f'\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.1)$$

Burada; $f(a/W)$ ve $f'(a/W)$, boyutsuz fonksiyonlar, a , çentik boyu ve W ise; yapı karakteristik boyutunu göstermektedir, bu değer kiriş için yüksekliktir. K_{Ic} değeri, LEKM’ne göre malzeme özelliği olup; sabit bir sayıdır. Şekil 2.3’teki gibi; $\text{Log} \sigma_{maks}$ ’ın $\text{Log} W$ ’ye göre grafiği çizilirse boyut etkisi $-1/2$ eğimli bir eğri ile gösterilebilir.

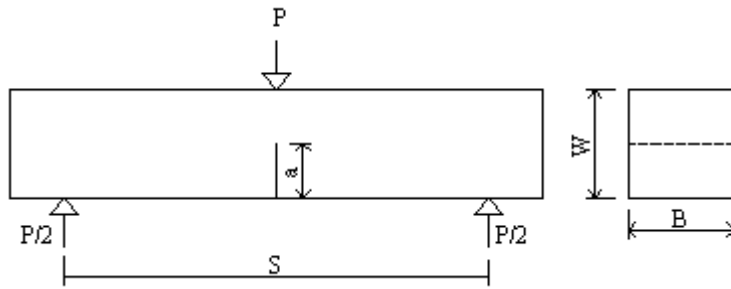
$$\log \sigma_{maks} = -\frac{1}{2} \log W + \text{sabit} \quad (2.2)$$

Denklemdaki sabit terim numune şekli ve yükleme durumuna bağlıdır. Walsh (1972, 1976), çentikli beton kirişlerde yaptığı deneylerde çok büyük boyutlardaki numunelerin, LEKM'in belirttiği güçlü bir boyut etkisini takip ettiğini, küçük kirişlerin ise pratik olarak boyut etkisi göstermediğini yatay bir çizgiyi takip ederek klasik dayanım kriterine uyduğunu belirlemiştir.



Şekil 2.3. LEKM'nin mukavemet kriterine karşı gösterdiği boyut etkisi

Kırılma tokluğunun belirlenmesinde, en ekonomik, yaygın ve kolay uygulanan yöntem şekil 2.4'te gösterilen çentikli kiriş numunelere uygulanan üç noktalı eğilme deneyidir. Bu deneyde, çentikteki çatlak yayılmaya başlayıncaya kadar kiriş numuneye yük uygulanmakta; maksimum yük kullanılarak mesnet ortasındaki eğilme momenti hesaplanarak kritik gerilme şiddet çarpanı bulunmaktadır.



Şekil 2.4 Üç noktalı eğilme deneyi ile kırılma tokluğunun hesaplanması

$$K_{IC} = 6YM_{maks} \cdot \sqrt{a} / (BW^2) \quad (2.3)$$

Bu denklemde:

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 uzunluğu

S = Mesnet açıklığıdır.

Geometri fonksiyonu olarak Brown ve Srawlwy'in önerdiği denklem (2.4) kullanılırsa ve M₂ ihmal edilirse K_{ic}'yi veren denklem (2.5) elde edilir (Karihaloo, 1995).

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = A_0 + A_1(a/W) + A_2(a/W)^2 + A_3(a/W)^3 + A_4(a/W)^4 \quad (2.4)$$

$$K_{ic} = \frac{3PS}{2BW^{3/2}} \left[1,93\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 3,07\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 14,53\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 25,11\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 25,8\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2} \right] \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'te kullanılan A_i katsayılarına ait değerler Tablo (2.1)'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Üç noktalı eğilme deneyinde A_i katsayılarına ait değerler (Karihaloo, 1995)

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

Gevrek bir malzeme olan sertleşmiş çimento hamuru (SÇH)'na LEKM uygulanabilmekte ve SÇH'nın kırılma tokluğu (K_{ic}) ise $0,2 < a/W < 0,6$ durumları için denklem (2.5) ile hesaplanabilmektedir.

2.2 Boyut Etkisi Kuralı ve Kırılma Parametreleri

Bazant tarafından geliştirilen boyut etkisi kuralında (RILEM 89-FMT) geometrik olarak benzer, farklı boyutta ve orantılı çentikli numuneler öngörülmektedir. Bu modelin en büyük üstünlüğü sadece tepe yükünün ölçülmesiyle iki kırılma parametresinin birden belirlenebilmesidir. Bunlardan ilki, sonsuz büyüklükteki bir

numunede çatlak ilerlemesi için gerekli kırılma enerjisi (G_f), ikincisi ise; maksimum yükte çentik ucundan çatlak ucuna uzaklık olan kırılma süreci bölgesi uzunluğu (C_f)'dir.

2.2.1 Malzeme ve Numune Geometrisi

Boyut etkisi kuralının uygulanabilmesi için en az üç adet aynı geometriden fakat farklı boyutta numunelere ihtiyaç vardır. Numune üretiminde dikkat edilmesi gereken noktalar ise şöyle sıralanabilir:

- a) Bütün numunelerde beton karışımı sabit olmalı,
- b) Üretilen beton, numunelere homojen olarak dağıtılmalı,
- c) Numuneler, deney gününe kadar aynı kür ve ortam koşullarında bekletilmelidir.

Bu metod, birkaç farklı geometri için uygun olmasına karşın, standardizasyon için üç noktalı eğilme deneyi uygulanan kirişler önerilmektedir. Şekil 2.4'teki; L kiriş uzunluğu, B kiriş genişliği, W kiriş derinliği, S mesnet açıklığı, a çentik derinliği, P ise çizgisel yüküdür.

Önerilen kiriş numune geometrisinde ise şu kurallara uyulmalıdır:

- Mesnet açıklığı S'in kiriş derinliği W'ye oranı en az 2.5 olmalıdır.
- Çentik derinliği a'nın kiriş derinliği W'ye oranı 0.15 ile 0.50 arasında olmalıdır.
- Çentik genişliği mümkün olduğunca küçük olmalı ve maksimum agrega boyutu d_a 'nın 0.5 katından büyük olmalıdır.
- Kiriş genişliği B ve kiriş derinliği W, $3d_a$ 'dan az olmamalıdır.
- Numuneler, aynı geometride fakat en az üç değişik boyutta olmalıdır.
- En küçük kiriş derinliği W_1 , $5d_a$ 'dan büyük olmamalıdır. En büyük kiriş derinliği W_n 'de $10 d_a$ 'dan küçük olmamalıdır.
- Sıralı W_n/W_1 en az 4 olmalıdır.
- Sıralı numuneler arasındaki oranlar sabit olmalıdır. Ayrıca boyut aralığı da mümkün olduğunca geniş tutulmalıdır.
- Bütün numuneler, iki boyutta geometrik olarak benzer olmalı ve üçüncü boyutta eşit olmalıdır. Yani, S/W, a/W ve L/W oranı aynı olmalıdır.

2.2.2 Boyut Etkisi Kuralında B ve d₀ sabitlerinin bulunması

Eğilme deneyi yapılan çentikli numunelerde, nominal gerilmenin ifadesi şu şekilde tanımlanabilir:

$$\sigma_N = \frac{P}{b.d} \quad (2.6)$$

Bu formülde;

- σ_N : normal gerilme,
- P : maksimum yük,
- b : numune kiriş genişliği,
- d : numune kiriş derinliğidir.

Yapılan çeşitli araştırmalar sonucunda kırılma mekanizmasına dayalı boyut etkisi kuralı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\sigma_N = \frac{B \cdot f_t'}{(1 + \beta)^{0.5}}, \quad \beta = \frac{d}{d_0} \quad (2.7)$$

Bu formülde;

- f_t' : malzeme çekme dayanımını,
- B ve d₀ : deney sonuçlarından bulunabilecek sabitleri,
- β : gevreklik sayısını göstermektedir.

Bu denklemin her iki tarafının karesini alırsak,

$$\sigma_N^2 = \frac{(B \cdot f_t')^2 d_0}{(d + d_0)} \quad (2.8)$$

şeklinde bir ifade elde edilebilir. Daha sonra bu denklemin tersi alınıp, düzenlenirse;

$$\frac{1}{\sigma_N^2} = \frac{1}{(B f_t')^2 d_0} d + \frac{1}{(B f_t')^2} \quad (2.9)$$

olur. Bu denklemde σ_N ve d değerleri bilinmektedir. Yukarıdaki formülde;

$$\frac{1}{\sigma_N^2} = Y, \quad \frac{1}{(B f_t')^2 d_0} = A, \quad d=X \text{ ve } \frac{1}{(B f_t')^2} = C$$

denilirse, $Y = AX+C$ şeklinde bir ifade bulunur. X 'in değişik değerlerine karşın, deneylerden elde edilen Y değerleri bir eksen takımında gösterilirse lineer regresyonla bulunman A ve C katsayılarından Bf_t' ve d_0 değerleri bulunmuş olur. Sonuç olarak A ve C katsayıları,

$$Y_j = \frac{1}{\sigma_{N_j}^2}, \quad X_j = d_j$$

$$A = \frac{\sum_j (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_j (X_j - \bar{X})^2}, \quad C = \bar{Y} - A\bar{X} \quad (2.10)$$

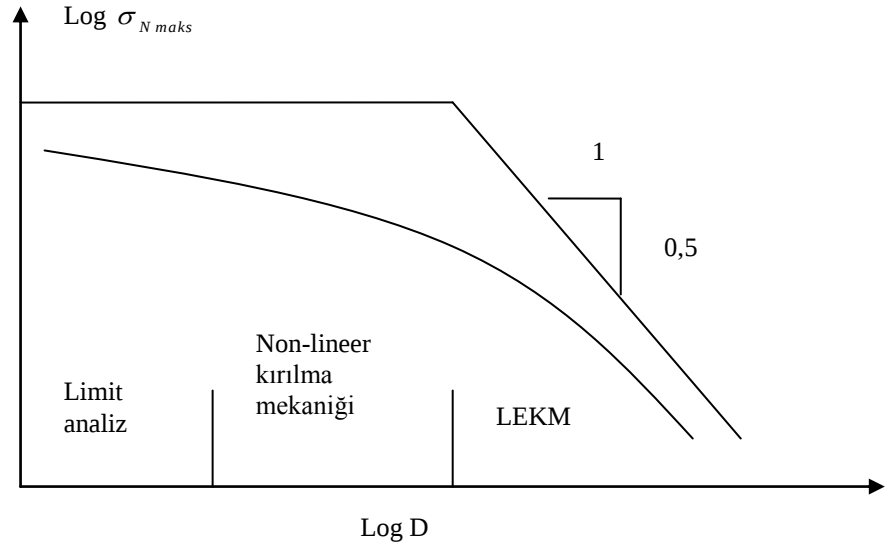
şeklinde hesaplanabilir. Bu ifadede,

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_j X_j \quad \text{ve} \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_j Y_j \quad (2.11)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Bu yöntemin iyi bir sonuç verebilmesi için, X ve Y eksen takımı üzerinde işaretlenen verilerin yaklaşık olarak bir doğruyu ifade ettiği kontrol edilmelidir. Aksi taktirde deneyde bazı hatalar olduğu düşünülebilir. Bundan dolayı, deney verilerini deney gruplarının bir ortalaması olarak değil, tek tek ele almak yüksek korelasyon elde etmek bakımından daha sağlıklı olacaktır.

Denklem (2.7)'de d 'nin çok küçük değerleri için denklemin ikinci kısmı ihmal edilebilir ve $\sigma_N = B.f_t'$ değerine eşit olur. Bu durumda malzemede dayanım kriteri geçerlidir. $\log \sigma_N$ ve $\log d$ arasındaki ilişki yatay bir doğru halini alır. Numune boyutu d 'nin çok büyük olduğu durum söz konusu olursa $\log \sigma_N$ ve $\log d^{-1/2}$ arasındaki bir ilişkiden bahsedilebilir. Bu durumda LEKM geçerlidir. Mühendislik yapıları genellikle bu iki durum arasındadır. Böylece aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi Boyut Etkisi Kuralı dayanım kriteri ile LEKM arasındaki geçişi göstermektedir (Bazant, 1984).

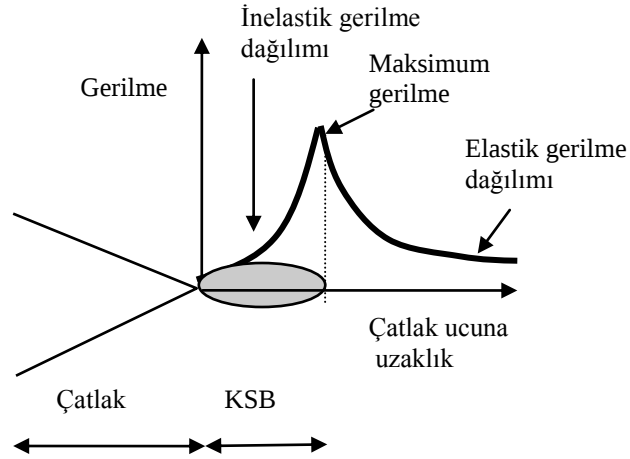


Şekil 2.5 Bazant'ın önerdiği boyut etkisi kuralı

A ve C'yi dolayısıyla Bf_t' ve d_0 'ı bulduktan sonra bir grafik üzerinde apsiste $\log(d / d_0)$ değerleri ve ordinatta $\log(\sigma_N / Bf_t')$ değerleri gösterilerek noktalar işaretlenir ve bu noktalardan en uygun şekilde geçen eğri belirlenir. Daha sonra çizilen bu eğri dayanım kriterine ve LEKM'e göre mukayese edilir.

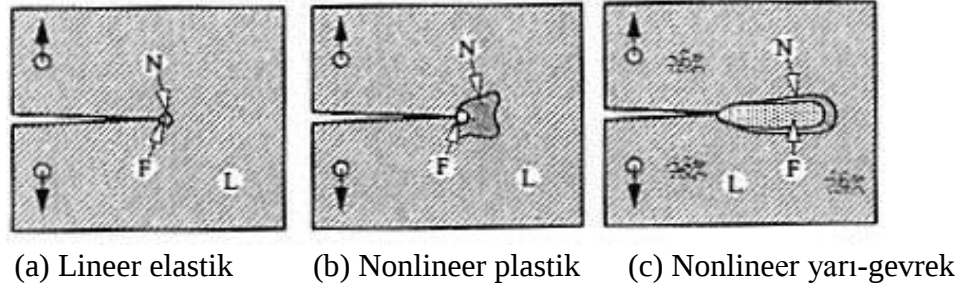
2.3 Kırılma Süreci Bölgesi

Malzemelerde çatlak ucunda daima elastik olmayan bir bölge mevcut olduğundan gerilme o bölgede sonsuz olamaz. Bu bölge de genellikle şekil 2.6'da gösterilen kırılma süreci bölgesi (KSB) olarak adlandırılır. Shah ve McGarry (1971), betonda varolan büyük bir kırılma süreci bölgesinden dolayı, LEKM'nin betona doğrudan uygulanamayacağını ortaya koymuşlardır. LEKM, kırılma süreci bölgesi yapı boyutuna göre çok küçük olması durumunda uygulanabilir.



Şekil 2.6 Gevrek bir malzemede çatlak ucunda meydana gelen gerilme durumu

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 2.7’de değişik malzemelere ait kırılma davranışları şematik olarak gösterilmiştir (Karihaloo, 1995).



Şekil 2.7. Değişik türdeki malzemelerin kırılma davranışları: (a) lineer elastik malzeme, (b) sünek malzeme, (c) yarı gevrek malzeme (Karihaloo, 1995)

Şekil 2.7’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 (Karihaloo, 1995):

$$l_p \approx \frac{G_F E}{f_t'^2} \quad (2.12)$$

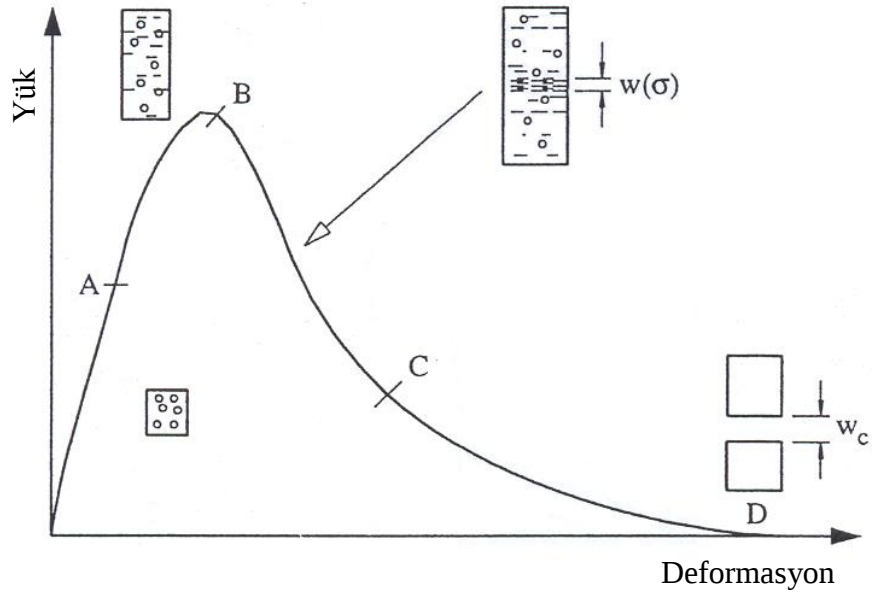
Tablo 2.2’den görüleceği üzere; betonda, kırılma süreci bölgesi diğer malzemelere göre daha büyüktür. Bu durum LEKM’nin neden cam gibi gevrek malzemelere uygulanabildiği halde betona uygulanamayacağını açıklamaktadır (Karihaloo, 1995).

Tablo 2.2 Kırılma süreci bölgesinin uzunlukları (Karihaloo, 1995)

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 betonu (Maksimum agrega boyu =38mm)	700

2.4 Betonun Kırılma Davranışı

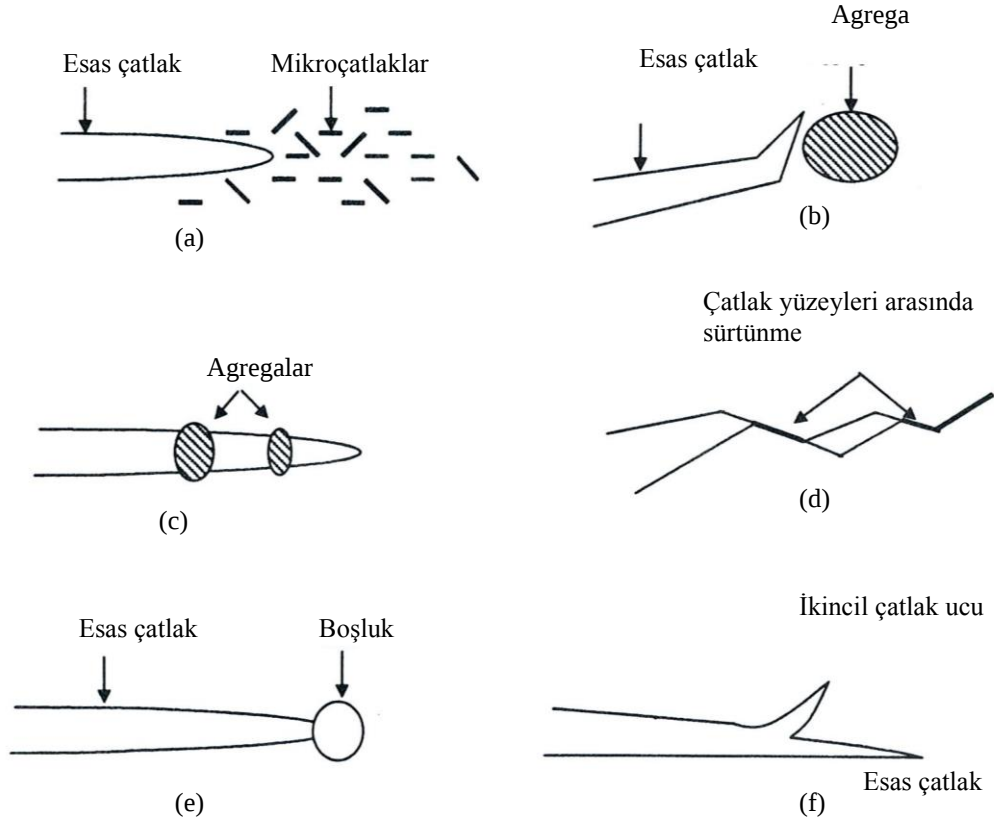
Betonda önceden var olan çatlak veya çentik önündeki geniş kırılma süreci bölgesi, LEKM kriterlerin betona uymamasına neden olmaktadır. Yumuşama davranışı gösteren çentikli bir beton numuneye uygulanan tek eksenli çekme deneyinden elde edilen tipik yük-deformasyon eğrisi Şekil 2.8’de verilmiştir. Eğri üç bölgeden oluşmaktadır. A ve B noktaları arasındaki birinci bölgede şekil değiştirme sertleşmesi, B ve C noktaları arasındaki ikinci bölgede mikro çatlaklar nedeniyle şekil değiştirme yumuşaması, C ve D noktaları arasında üçüncü bölgede ise, agrega kilitlenmeleri ve diğer sürtünme etkilerinin sonucunda uzama ve süreklilik bölgesi oluşmaktadır. Bu şekilde davranış gösteren malzemelere yarı-gevrek malzemeler denir (Karihaloo, 1995).



Şekil 2.8 Önceden çentik içeren beton numunenin tipik yük-deformasyon eğrisi (Karihaloo, 1995).

2.5 Toklaşma Mekanizmaları

Betonda çatlak ucunda oldukça büyük bir değere ulaşan gerilme, kırılma sırasında; betonun içinde bulunan su dolu boşluklarda, döküm esnasında oluşan hava boşluklarında, kür sırasında meydana gelen büzülme ve termal kusurlarda mikro çatlaklara neden olur. Bu olayda, uygulanan yüklerle bir miktar dış enerji tüketimine neden olur (Kachanov, 1986) ve Şekil 2.9.(a)'da görüldüğü gibi mikro çatlak kalkanı olarak adlandırılır. İkincisi, Şekil 2.9 (b)'deki çatlağın agregadan geçemeyip etrafından dolaşarak matris içinde yayıldığı çatlak sapması mekanizmasıdır (Faber ve Evans, 1983). Çatlak, agregaların etrafında ilerlerken girintili çıkıntılı bir yol izler ve sonuçta çatlak yüzeyleri arasında kenetlenme olur. Bu mekanizma da agrega köprülenmesi (Şekil 2.9 (c)) olup; çatlak boyunca köprülenme ve sürtünmeyle enerji harcamasını gerekli kılar (Mindess, 1991). Daha sonraki bölümlerde değinilecek mezo-mekanik uygulamalar, beton ve harçta oluşan bu toklaşma mekanizmalarını kapsamaktadır.

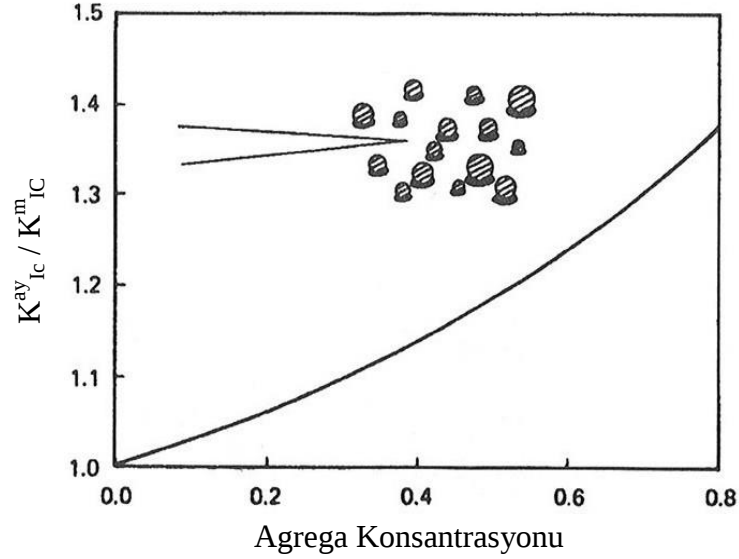


Şekil 2.9 Kırılma süreci bölgesindeki bazı toklaşma mekanizmaları: (a) çatlak kalkanı, (b) çatlak sapması, (c) agregalar köprülenmesi, (d) çatlak yüzeyleri arasında sürtünme, (e) çatlak ucu körelmesi, (f) çatlak dallanması (Taşdemir ve Karihaloo, 2001b).

2.5.1 Ara Yüzeylerin Çatlaması (Mikro Çatlak Kalkanı)

Genelde, mikro çatlama betondaki fiziksel çatlak ucunun önünde zayıf bölge olan agregalar-harç ara yüzeyinde meydana gelmektedir. Bunun dışında, beton rötreden dolayı mikro çatlak ve kusurlar da içerir. Çatlak ucu önündeki mikro çatlaklar hasar görmemiş malzemenin etkin elastisite modülünü azaltırken; çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörünün azalmasına da sebep olur, malzeme hasar görmemiş malzemeye göre daha tok davranış gösterir. Bu toklaşmaya mikro çatlak kalkanı denir. Denklem (2.13)'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} agregalar konsantrasyonu ve ν ise Poisson oranını ifade eder. Şekil 2.10'da ara yüzey çatlaklarından dolayı malzemedeki etkin tokluğunun, agregalar konsantrasyonu ile değişimi verilmiştir.

$$\frac{K_{IC}^{ay}}{K_{IC}^m} = \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{\pi^2}{16}\right) \times V_{ag} \times (1 - \nu^2)}} \quad (2.13)$$



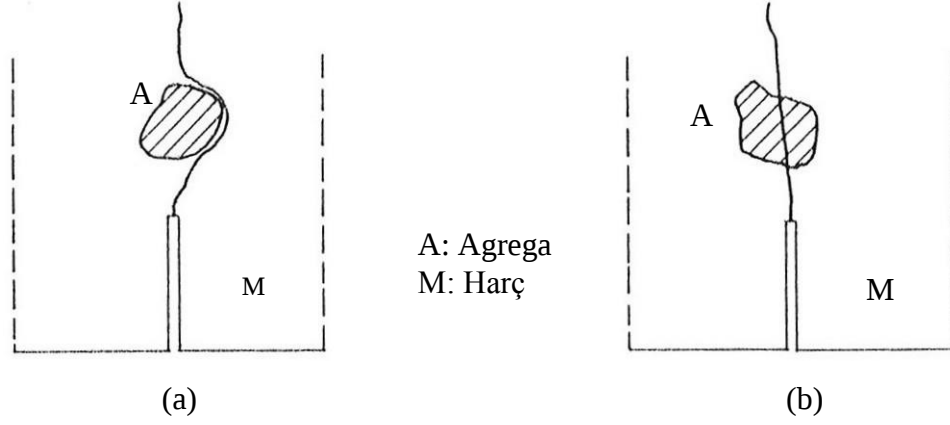
Şekil 2.10 Ara yüzey çatlaklarından dolayı oluşan toklaşma ve çatlak kalkanın şematik gösterimi (Huang ve Li, 1989; Li, 1989).

2.5.2 Çatlak Sapması Mekanizması

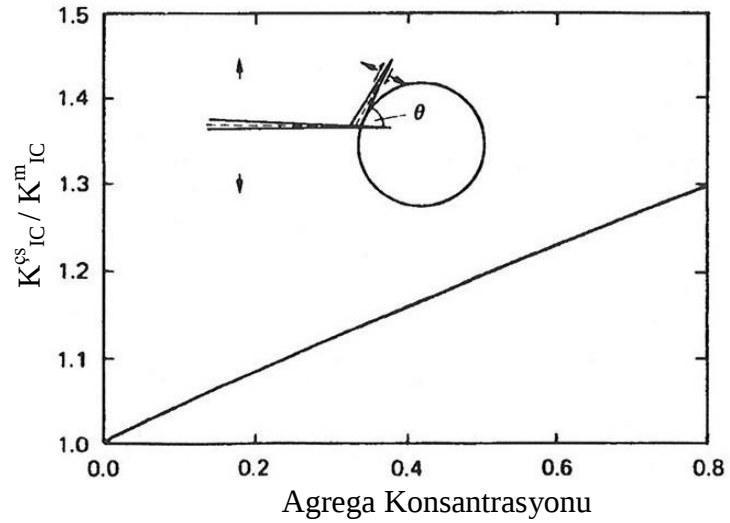
Normal dayanımlı betonda çatlak yolunun, sertleşmiş çimento hamurunun tersine daha dolambaçlı olmasının nedeni çatlak sapması mekanizmasıdır. Normal dayanımlı betonlarda; agreganın dayanımı ve elastisite modülü matrisinkinden fazla olduğundan, matris-agrega ara yüzeyi dayanımı düşük ise Şekil 2.11a'da görüldüğü gibi; agregaya matris çatlağının önünü keser, çatlak agreganın kenarından sapmaya ve yayılmaya başlar. Harcın agregadan daha dayanıklı olduğu hafif betonlarda ve matris-agrega yüzey dayanımının agregaya dayanımından daha yüksek olduğu dayanımlarda Şekil 2.11b durumu söz konusudur. Çatlak sapması mekanizmasının betonun etkin kırılma tokluğuna sağladığı katkı değişik sapma açıları incelenerek Faber ve diğ. (1983)'nce önerilen aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$\frac{K_{IC}^{cs}}{K_{IC}^m} = \sqrt{1,0 + 0,87 \times V_{ag}} \quad (2.14)$$

Bu denklemdeki; K_{IC}^m , matris fazın kırılma tokluğu ve V_{ag} ise agrega konsantrasyonudur. Çatlak sapmasından dolayı malzemedeki etkin tokluk artışının agrega konsantrasyonu ile değişimi Şekil 2.12’de verilmektedir (Huang ve Li, 1989).



Şekil 2.11. Çatlak yolunun agreganın kenarından (a) ve içinden (b) geçmesi durumu



Şekil 2.12. Çatlak sapması mekanizmasından sapmasından dolayı malzemedeki etkin tokluğun agrega konsantrasyonu ile değişimi (Huang ve Li, 1989).

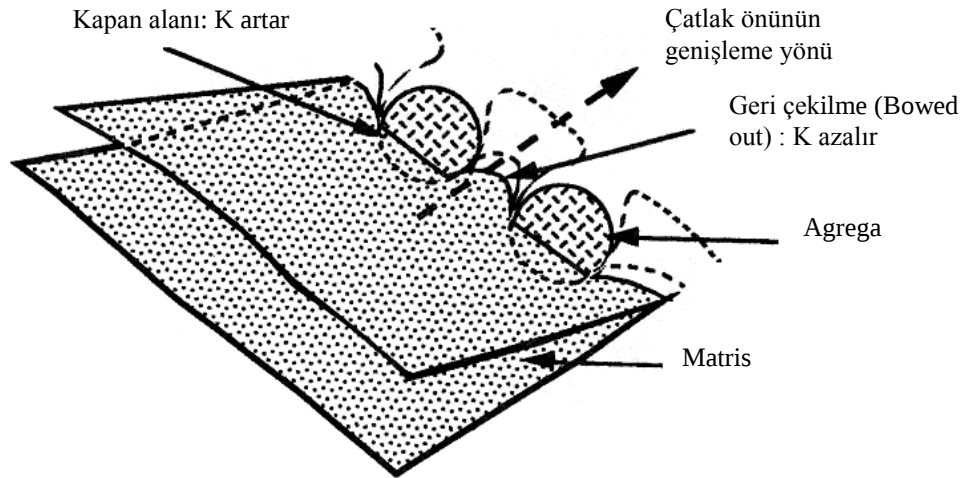
2.5.3 Çatlak Kapanı Mekanizması

Matris içindeki çatlaklar, agregaya yaklaştığı zaman bazen agregadan sapmaz veya agreganın içinden geçmez ve diğer yandan çatlak yayılmasına karşın kapan bölgesi oluşturur. Bu mekanizmaya çatlak kapanı mekanizması denir. Çatlak kapanı

mekanizması aşağıda verilen üç şartın aynı anda sağlanması durumunda meydana gelebilir (Li ve Maalej, 1996).

1. Agreganın tokluğu matrisinkinden büyük olmalıdır, bu şekilde; çatlağın agrega içinden ilerleyişi önlenmektedir.
2. Matris – agrega arasındaki bağ kopmasının ve çatlak sapmasının oluşmaması için agrega matrise çok kuvvetli bağlanmalıdır.
3. Çatlak açılma deplasmanının çatlak ucu boyunca durdurulmasını sağlayacak şekilde agreganın elastisite modülü matrisinkine eşit veya ondan daha büyük olmalıdır.

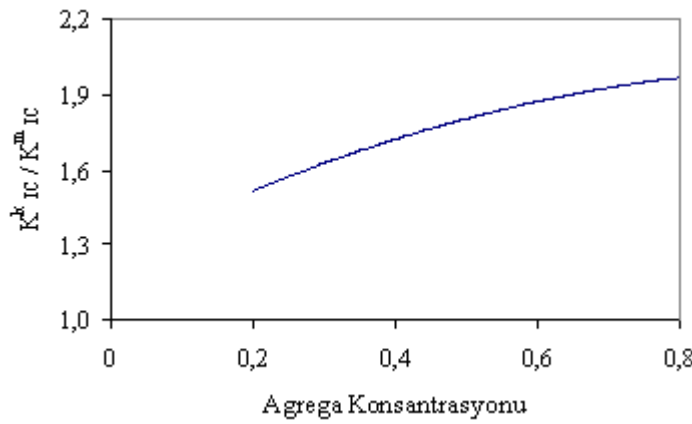
Çatlak kapanı mekanizması (Şekil 2.13), yüksek dayanımlı betonun ara yüzey bağlarının çok güçlü olması ve daha çok kapan alanı oluşturan küçük tane boyutuna sahip agregalardan oluşması nedeniyle; yüksek dayanımlı betonlarda oluşabilecek bir toklaşma mekanizmasıdır (Li ve Huang, 1990).



Şekil 2.13 Çatlak kapanı mekanizmasının şematik gösterimi (Li ve Huang, 1990)

Yüksek dayanımlı betonların kırılma tokluğuna katkısı büyük olan çatlak kapanı mekanizması, denklem (2.15)'ten görüleceği üzere; agrega konsantrasyonu (V_{ag}) ve matris fazın kırılma tokluğu (K_{IC}^m)'ye bağlıdır (Li ve Huang, 1990). Denklem (2.15)'ten elde edilen agrega konsantrasyonu ile çatlak kapanı nedeni ile oluşan tokluğun değişimini gösteren grafik Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

$$\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m} = \left\{ 1 - \frac{(1 - V_{ag}) \times (\pi / 4)}{\ln \left[\frac{1 + \cos(\pi \times \frac{V_{ag}}{2})}{\sin(\pi \times \frac{V_{ag}}{2})} \right]} \right\}^{-1} \quad (2.15)$$



Şekil 2.14 Çatlak kapanı nedeni ile oluşan tokluğun agrega konsantrasyonu ile değişimi (Li ve Huang, 1990).

2.5.4 Agreganın Köprülenmesi Mekanizması

Agregaların, çatlakın bir tarafından diğer tarafına yük aktarmasıyla agreganın köprülenmesi oluşmaktadır (Akkaya ve diğ., 2003). Agreganın köprülenmesi, betonun yumuşama özeliği göstermesinin sebeplerindendir. Agregaların köprülenme davranışı çatlak yayılmasını geciktirir ve enerji harcanmasına sebep olur. Normal dayanımlı betonlarda hasar görmemiş beton bağları (ligament), maksimum agreganın boyutuna bağlı olup (Li ve Maalej, 1996); gelişen çatlak yüzlerini köprülemektedir. Agreganın köprülenmesi mekanizması denklem (2.16) ile ifade edilmiştir.

$$\frac{K_{IC}^{kp}}{K_{IC}^m} = \sqrt{\left(\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m}\right)^2 + \frac{E \times (\pi / 2) \times f_{t,a}^2 \times g_{ort} \times V_{ag} \times (1 - \sqrt{V_{ag}}) \times (1 - V_{ag}) \times (1 - \nu_m^2)}{E_m \times (1 - \nu^2) \times (K_{IC}^m)^2}} \quad (2.16)$$

Yukarıdaki denklemde; V_{ag} agreganın konsantrasyonu g_{ort} ortalama agreganın tane çapı, $f_{t,a}$ agreganın çekme dayanımıdır. Çatlak kapanı mekanizmasının çalışmadığı

durumlarda $K_{IC}^k / K_{IC}^m = 1$ kabul edilir. Betonun elastisite modulünün matris fazın elastisite modülüne oranı, $\nu = \nu_m$ koşulunda, agrega konsantrasyonuna bağlı olarak aşağıda verilmiştir (Taşdemir ve Karihaloo, 2001a):

$$\frac{E}{E_m} = 1 - \frac{\pi^2}{16}(1 - \nu)V_{ag} \quad (2.17)$$

2.6 Etkin Kırılma Tokluğu

Çimento hamurunun kırılma tokluğu (K_{IC}^{ch}), kiriş numune deneylerinden LEKM'e göre bulunmaktadır. Harç veya betona ait etkin kırılma tokluğu (K_{IC}) ise mikro çatlak kalkanı, çatlak sapması, çatlak kapanı ve agrega köprülenmesi gibi toklaşma mekanizmalarının bağımsız çalışması şartıyla; mevcut her bir kırılma mekanizmasının kırılma tokluğunun matris fazıninkine oranı ile çimento esaslı matris fazın kırılma tokluğunun (K_{IC}^{ch}) çarpımı olarak bulunur.

$$K_{IC} = K_{IC}^m \cdot \left(\frac{K_{IC}^{kp}}{K_{IC}^m} \right) \cdot \left(\frac{K_{IC}^{ay}}{K_{IC}^m} \right) \cdot \left(\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m} \right) \quad (2.18)$$

2.6.1 Çimento Hamurunun Kırılma Tokluğu

Gevrek bir malzeme olan çimento hamurunun kırılma tokluğu çentik(a) / kiriş derinliği(W) oranı $0,2 < a/W < 0,6$ şartını sağlayan prizmatik deney numunesinde, üç noktalı eğilme deneyi ile aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir (Karihaloo, 1995).

$$K_{IC}^{ch} = \frac{3PS}{2BW^{3/2}} \left[1,93 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 3,07 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 14,53 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 25,11 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 25,8 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (2.19)$$

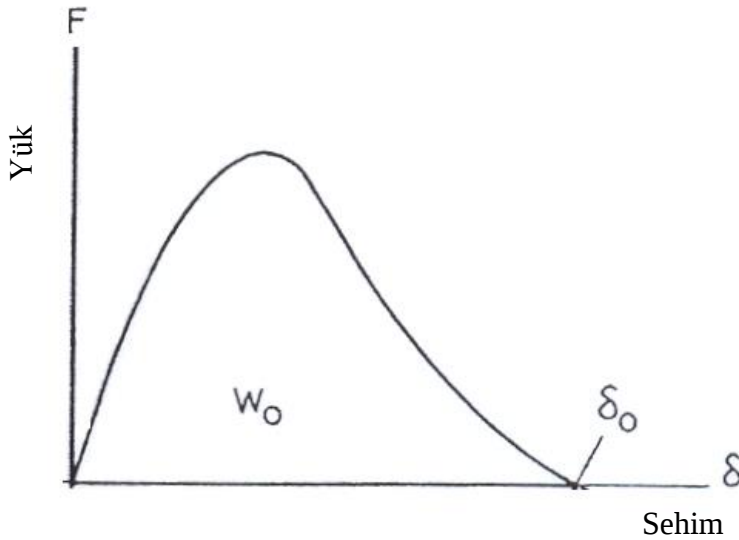
Denklemdaki; S, W, B sırasıyla kiriş deney numunesine ait mesnetler arası açıklığı, derinliği ve genişliği; a çentik derinliğini, P'de maksimum yükü ifade etmektedir (Karihaloo, 1995). Diğer yandan Nauss ve Lott (1969), Ohgishi ve diğ. (1986), çimento hamurunun kırılma tokluğunu, deneysel verilere dayanarak geliştirdikleri aşağıdaki denklemle ifade etmişlerdir (Şekil 2.4).

$$K_{IC}^{ch} = 0,6125 - 0,85 \frac{W}{c} \quad (2.20)$$

2.7 Üç Noktalı Eğilme Deneyi İle Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi

Birim alan başına çatlak oluşturmak için gerekli enerji miktarına kırılma enerjisi denir. Çentikli bir numune üzerinde eğilme veya çekme deneyi yapıldığında, numune kırılıp iki parçaya ayrılıncaya kadar yapılan iş harcanan toplam enerjiyi verir. Kırılma enerjisi, RILEM 50 - FMC RILEM (1985) komitesi tarafından önerilen, çentikli harç veya beton kiriş numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyinde kullanılmaktadır (Şekil 2.4). Kırılma enerjisi (G_F), yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla bulunur (Şekil 2.15). G_F , bir malzeme sabiti değildir.

Bu şekilde, L, B, W sırasıyla kiriş numunenin uzunluğu, genişliği, derinliği, S mesnetler arası açıklığı, P ise kiriş numunenin ortasına uygulanan maksimum yüküdür.



Şekil 2.15. Yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi (Hillerborg, 1985)

Kırılma enerjisinin değeri aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A_{etkin}}, \text{ N/m veya J/m}^2 \quad (2.21)$$

Yukarıdaki denklemde, W_0 yük-sehim grafiğinin altında kalan alanı (Şekil 2.15), g yerçekimi ivmesini ($g=9,81 \text{ m/s}^2$), δ_0 göçme anında kiriş ortasındaki sehim, A_{etkin}

etkin kesit alanını, m ise deney numunesinin mesnetler arasında kalan kısmının ağırlığı (m_1) ile deney cihazına bağlı olmayan yükleme aparatının ağırlığıdır (m_2).

$$m=m_1+2m_2, \text{ kg} \quad (2.22)$$

2.8 Kırılma Parametrelerine Etki Eden Faktörler

Su/çimento oranı, maksimum agrega boyutu, agrega tipi ve agrega konsantrasyonu betonun kırılma parametrelerine etki eder. Lange-Kornbak ve Karihaloo (1996), su/çimento oranı, maksimum agrega boyutu, ince ve iri agregaların hacim oranı gibi mikro yapısal parametreler ile basınç dayanımı, elastisite modülü, tek eksenli çekme dayanımı, kırılma enerjisi ve karakteristik boy gibi mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi ifade eden mezo-mekanik bağıntılara dayanarak “uygun yön” ve “altın kesitler” yöntemlerini kullanan ardıl doğrusal programlama ile beton karışımlarının optimum tasarımını belirlemişlerdir. Shinohara ve diğ. (1991) yaptıkları çalışmada ise; kırılma enerjisinin yükleme hızı, maksimum agrega boyutu ve numunenin yaşının artmasıyla arttığını, diğer yandan çentik derinliği ile su çimento oranının artması ile azaldığını görmüşlerdir. Kırılma enerjisine etki eden etkenlerin bazıları aşağıda incelenmiştir.

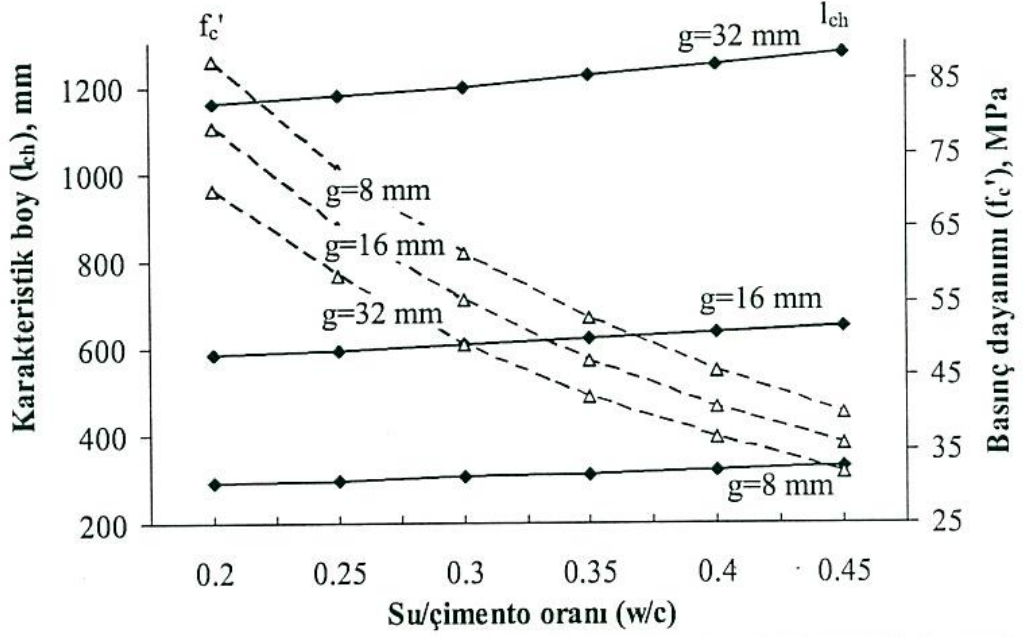
2.8.1 Su/çimento Oranının Betonun Kırılma Parametrelerine Etkisi

Bayramov ve diğ. (2001), su/çimento oranının artmasıyla karakteristik boy (l_{ch}) 'un çok az miktarda arttığını, basınç dayanımının (f_c') 'nin ise belirgin bir şekilde azaldığını ve beton basınç dayanımının değişimi ile karakteristik boyun değişiminin ters orantılı olduğunu göstermiştir (Şekil 2.16).

Tablo 2.3'te, su/çimento oranının betonun kırılma parametrelerine etkisi ile ilgili bağlayıcının çimento olduğu deneysel çalışmaların sonuçları verilmektedir. Bu tablo, agrega tipi, su/çimento oranı, maksimum agrega boyutu, basınç dayanımı, çekme dayanımı, kırılma enerjisi, elastisite modülü, karakteristik boy ve kaynağı gösteren sütunlardan oluşmaktadır.

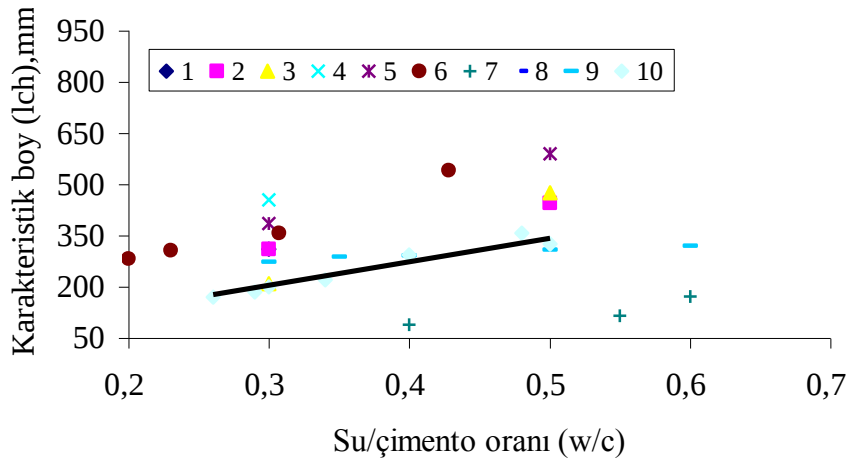
Tablo 2.3 Su/çimento oranının betonun kırılma parametrelerine etkisi

Seri No	Agrega Tipi	w/c	g, mm	Basınç Dayanımı (f_c') MPa	Çekme Dayanımı (f_t) MPa	Kırılma Enerjisi (G_F) N/m	Elastisite Modülü (E) GPa	Karakt. boy (l_{ch}) mm	Kaynak
1	Granit	0,30	20	86,6	5,1	195	41,4	310	Giaccio ve diğ. (1993)
		0,40		70,8	4,1	175	40,0	415	
		0,75		22,7	2,3	135	28,8	735	
2	Granit kırmataş	0,30	19	74,6	5,7	215	48,4	310	Giaccio ve Zerbino (1998)
		0,50		30,1	3,8	165	39,1	445	
3	Kuars kırmataş	0,30		79,4	5,0	135	38,8	210	
		0,50		33,1	3,0	130	33,0	475	
4	Silisli çakıl	0,30		61,4	4,3	170	49,7	455	
		0,50		29,6	2,8	140	46,4	830	
5	Nehir çakılı	0,30		60,9	4,6	180	45,5	385	
		0,50		31,0	3,2	140	43,0	590	
6	Çakıl	0,20	14,9	73,1	4,3	146	35,8	282	Lange-Kornbak ve Karihaloo (1999)
		0,23	32	65,1	4,8	203	34,2	306	
		0,307		50,5	3,9	198	27,6	358	
		0,428		29,7	3,1	233	22,4	542	
7	Çakıl	0,40	10	58,9	4,2	65	24,5	90	Malvar ve Warren (1988)
		0,55		33,1	3,5	72	19,7	116	
		0,60		29,0	3,1	76	21,7	172	
8	Çakıl	0,45	20	50,3	-	104	32,4	-	Shinohara ve diğ. (1991)
		0,55		39,2	-	98	28,7	-	
		0,65		29,4	-	81	28,5	-	
9	Çakıl	0,30	15	88,3	4,1	140	33,4	273	Phillips ve Binsheng (1993)
		0,35		78,3	3,9	135	32,9	288	
		0,40		60,4	3,5	109	32,6	292	
		0,50		51,1	3,2	96	32,2	309	
		0,60		38,5	2,9	91	31,1	320	
10	Kırma bazalt	0,26	25	85,5	6,0	146	42,1	170	Zhang ve Wu (2001)
		0,29		70,2	5,6	133	42,8	185	
		0,30		83,6	5,9	154	44,9	200	
		0,34		60,5	4,7	137	34,9	220	
		0,40		58,0	4,2	160	33,0	293	
		0,48		45,8	4,0	165	34,7	357	
		0,50		43,4	3,7	158	28,9	326	

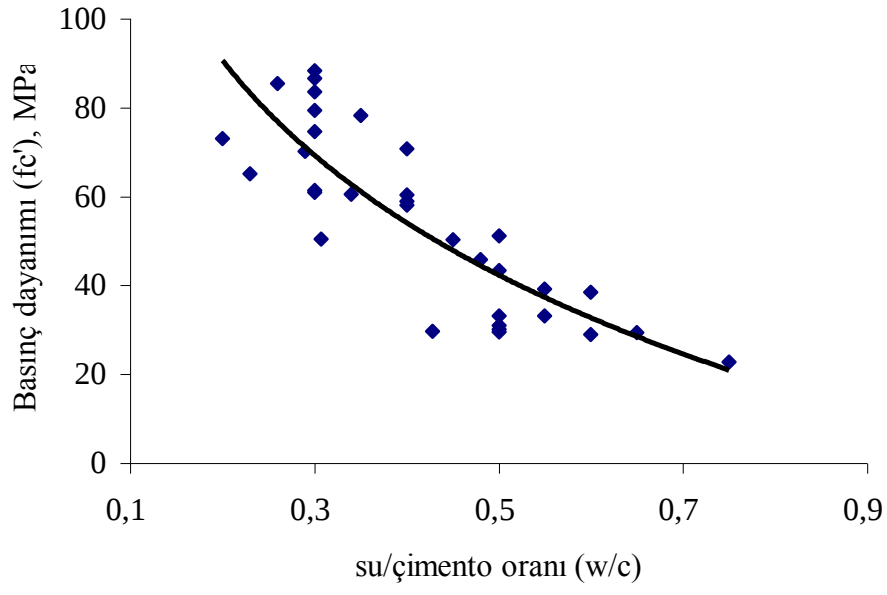


Şekil 2.16. Karakteristik boy ve basınç dayanımının su/çimento oranındaki değişime duyarlılığı (Bayramov ve diğ., 2001)

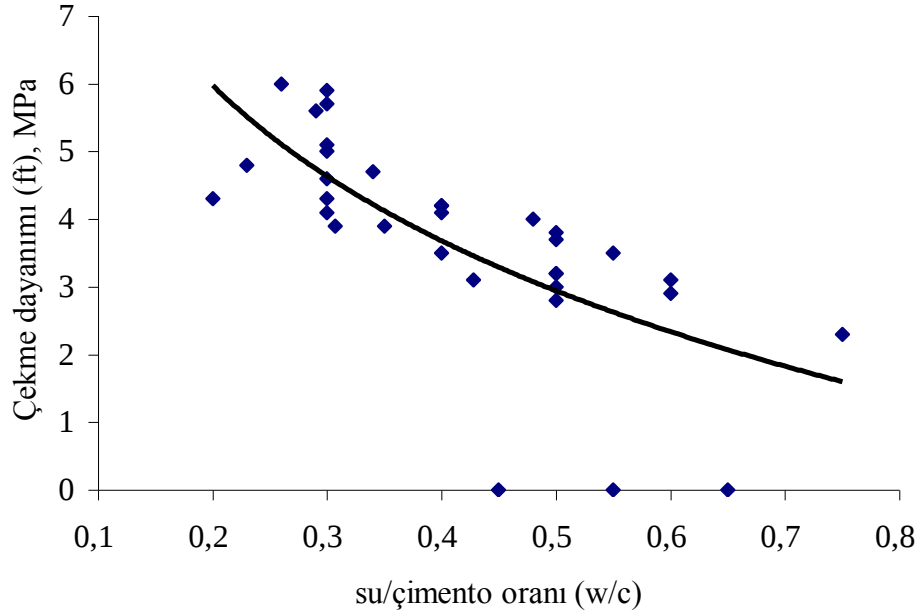
Tablo 2.3'ten görüldüğü gibi, su/çimento oranının artmasıyla kırılma enerjisi (G_F) azalmakta, karakteristik boy (l_{ch}) ise artmaktadır (Şekil 2.17). Basınç dayanımı, elastisite modülü ve çekme dayanımında ise belirgin bir azalma görülmektedir (Şekil 2.18, 2.19, 2.20). Şekil 2.21'den görüldüğü üzere; basınç dayanımı arttıkça, çekme dayanımı da artmaktadır.



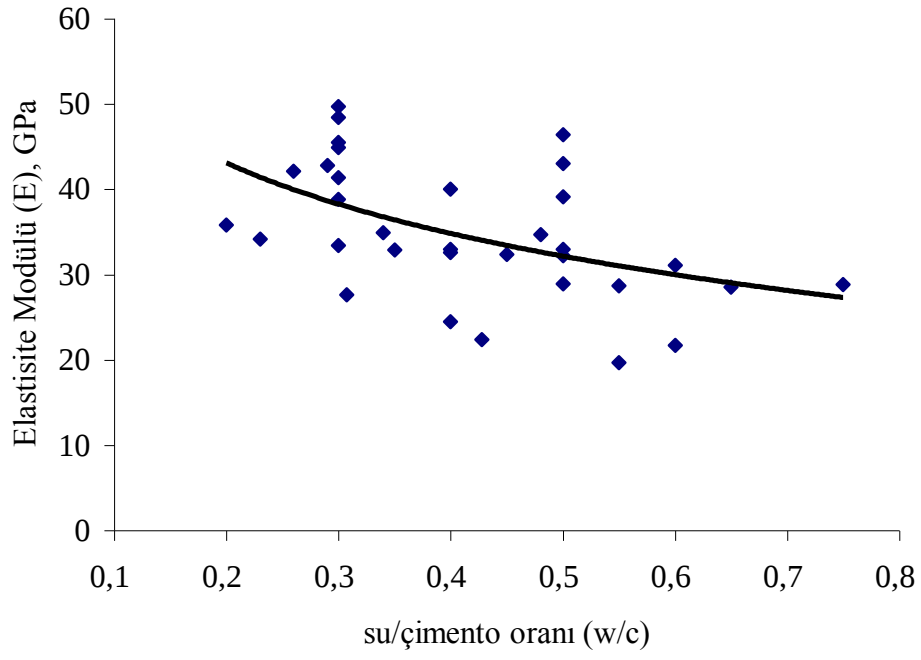
Şekil 2.17. Su/çimento oranı – karakteristik boy ilişkisi (Tablo 2.3)



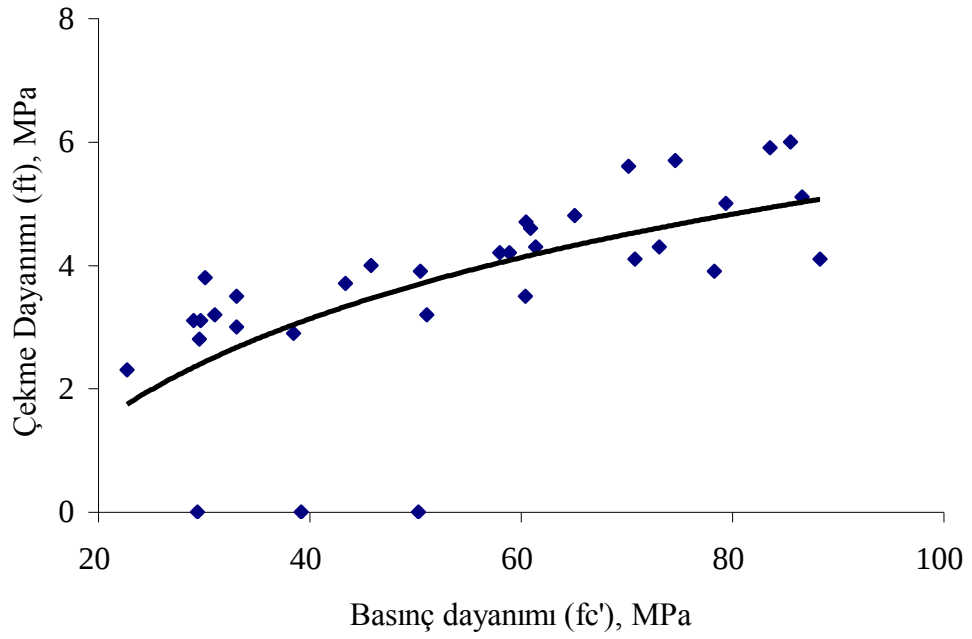
Şekil 2.18. Su/çimento oranı – Basınç dayanımı ilişkisi (Tablo 2.3).



Şekil 2.19. Su/çimento oranı – Çekme dayanımı ilişkisi (Tablo 2.3).



Şekil 2.20. Su/çimento oranı – Elastisite Modülü ilişkisi (Tablo 2.3).



Şekil 2.21. Basınç dayanımı – Çekme dayanımı ilişkisi (Tablo 2.3).

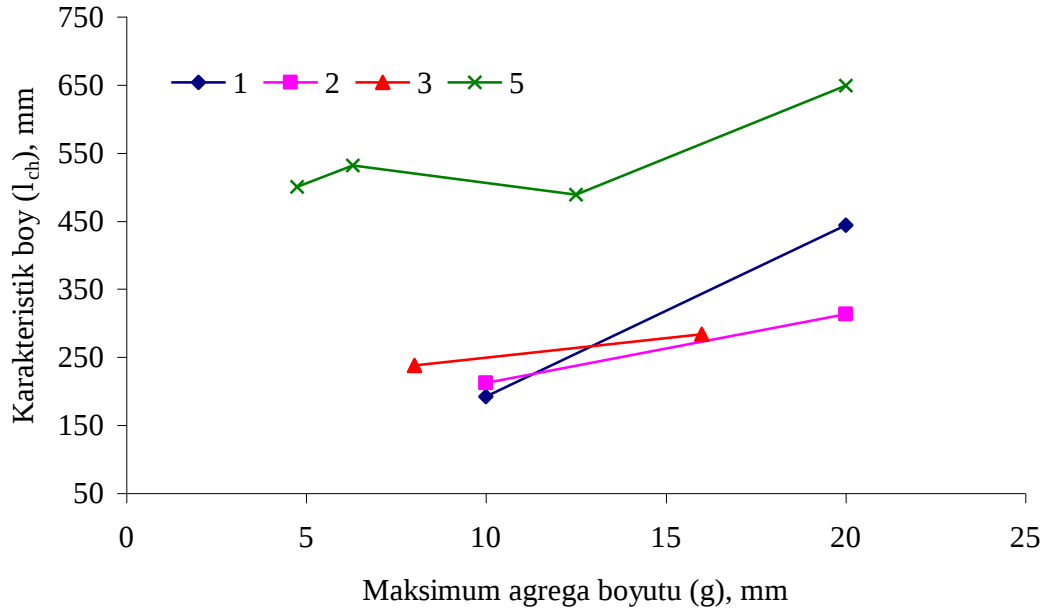
2.8.2 Maksimum Agregâ Boyutunun Kırılma Parametrelerine Etkisi

Beton karışımında kullanılan maksimum agregâ boyutunun, betonun kırılma enerjisine ve karakteristik boyuna etkisi belirgindir. Tablo 2.4'te bağlayıcısı çimento olan literatürden alınan deneysel veriler bulunmaktadır. Bu tablodan görüleceği üzere, maksimum agregâ boyutu arttıkça kırılma enerjisi ve karakteristik boy belirgin biçimde artmakta (Şekil 2.22, 2.23), basınç dayanımı ve çekme dayanımı ise azalmaktadır.

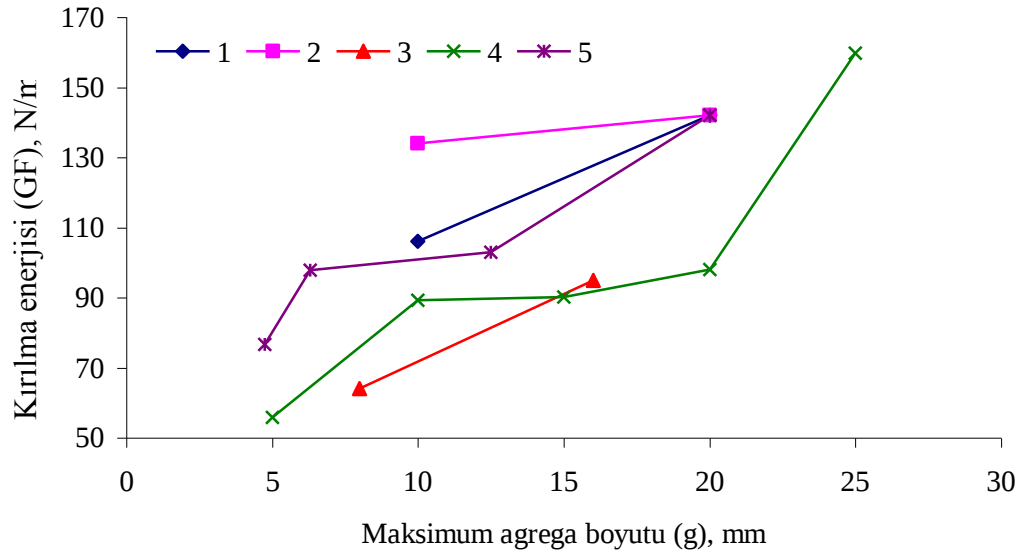
Maksimum agregâ boyutunun artması, çimento hamuru-agrega arasında daha az zayıf bölge oluşturur. Buna karşın, maksimum agregâ boyutunun daha küçük olduğu durumlarda, agreganın yüksek yüzey alanından dolayı, çimento hamuru-agrega arasındaki bağ kırılmalarında bir azalma olur. Maksimum agregâ boyutunun 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 (Rao ve Prasad, 2002).

Tablo 2.4 Maksimum agregâ boyutunun kırılma enerjisine etkisi

Seri No	Agregâ Tipi	w/c	g, mm	Basınç Dayanımı (f_c' , MPa)	Çekme Dayanımı (f_t , MPa)	Kırılma Enerjisi (G_F , N/m)	Elastisite Modülü (E, GPa)	Karakt. boy (l_{ch} , mm)	Kaynak
1	Kırma-Taş	0,36	10	72,7	4,58	106	38,0	192	Tasdemir (1995); Tasdemir ve diğ. (1996); Tasdemir ve diğ. (1999)
			20	72,0	3,45	142	37,2	444	
2	Çakıl	0,36	10	75,0	4,70	134	35,0	212	Tasdemir ve diğ. (1999)
			20	67,7	4,02	142	35,7	313	
3	Çakıl	0,30	8	78,3	3,79	64	40,0	238	Tasdemir ve diğ. (1995)
			16	81,5	4,44	95	42,7	284	
4	Çakıl	0,55	5	48,0	-	55,9	23,7	-	Shinohara ve diğ. (1991)
			10	41,3	-	89,2	29,1	-	
			15	39,0	-	90,2	30,3	-	
			20	39,2	-	98	28,7	-	
			25	36,7	-	159,7	30,7	-	
5	Beyaz kırma granit	0,33	4,75	40,0	2,39	76,6	37,3	500	Rao ve Prasad (2002)
			6,3	57,8	2,70	97,8	39,5	532	
			12,5	58,7	2,90	103	39,7	489	
			20	61,0	3,06	142	42,1	649	



Şekil 2.22 Maksimum agregat boyutu ile karakteristik boy arasındaki ilişki (Tablo 2.4)



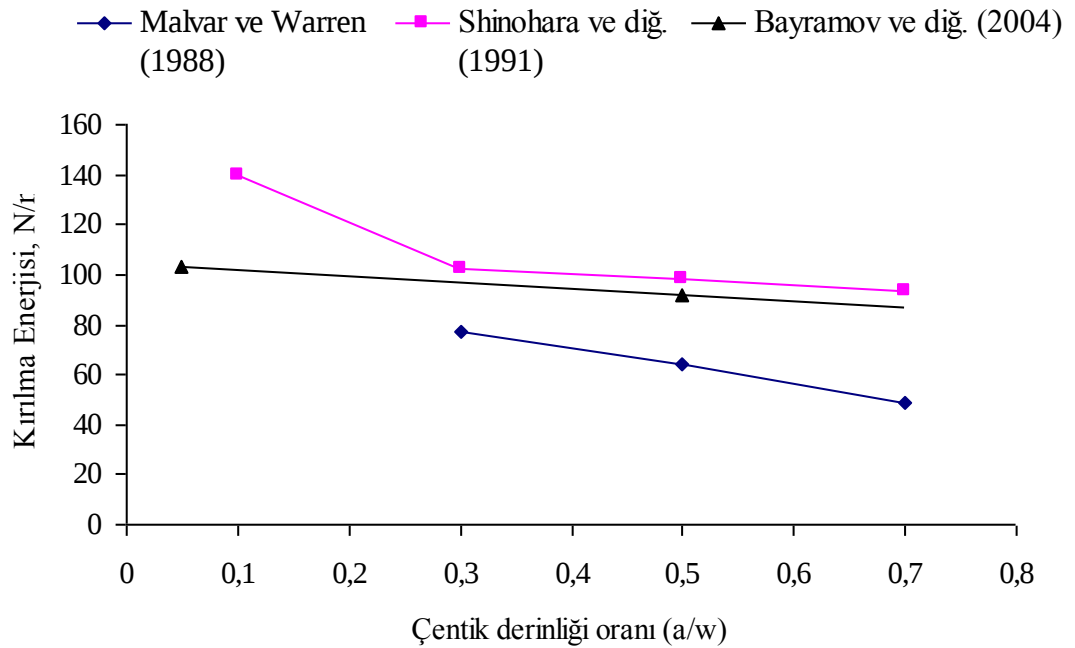
Şekil 2.23 Maksimum agregat boyutu ile kırılma enerjisi arasındaki ilişki (Tablo 2.4)

2.8.3 Çentik Derinliği Oranının Kırılma Enerjisine Etkisi

Çentik derinliği oranının kırılma enerjisine etkisi Tablo 2.5'te ve Şekil 2.24'te verilmektedir. Çentik derinliği oranı arttıkça, kırılma enerjisi azalmaktadır.

Tablo 2.5 Çentik derinliği oranının kırılma enerjisine etkisi

Çentik derinliği oranı (a/w)	Kırılma enerjisi (N/m)		
	Malvar ve Warren (1988)	Shinohara ve diğ. (1991)	Bayramov ve diğ. (2004)
0,05	--	--	103,0
0,10	--	139,3	--
0,30	77,3	102,0	--
0,50	64,5	98,1	92,0
0,70	48,7	93,2	--



Şekil 2.24 Çentik derinliği oranı (a/w) – kırılma enerjisi ilişkisi (Tablo 2.5)

2.8.4 Kırılma Enerjisinde Boyut Etkisi

Yapılan araştırmalar ve deneyler, üç noktalı eğilme deneyi ile kırılma enerjisinin belirlenmesinde boyut etkisinin önemini ortaya koymuştur (Tablo 2.6). Mevcut deney sonuçları dikkate alındığında, kırılma enerjisi genellikle deney numunesi boyutunun artmasıyla artmaktadır. Bununla birlikte, Jueshi ve Hui (1997) yaptıkları çalışmada; harçta bu etkinin tersi görülebilmektedir; yani kırılma enerjisi deney numunesi boyutunun artmasıyla azalabilmektedir.

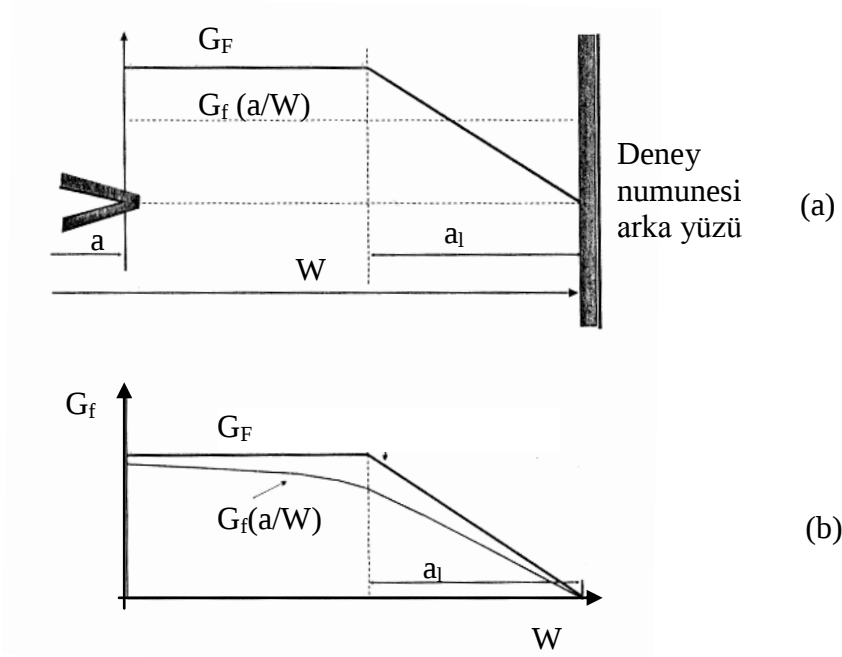
Tablo 2.6 Kırılma enerjisinde boyut etkisi

Referans		Numune boyutu	G_F (N/m)
Beton	Mindess (1984)	100×100×840	80,6
		200×200×1680	82,6
		400×400×3360	115,3
	Malvar ve Warren (1988)	102×102×788	72,3
		102×216×788	89,3
Harç	Jueshi ve Hui (1997)	40×40×160	94,2
		70×70×280	89,8
		100×100×400	76,6

2.9 Gerçek Kırılma Enerjisi

Özgül Kırılma Enerjisi (G_F), betonun kırılma davranışının analizinde kullanılan en önemli parametredir. Kırılma enerjisinin deney numunesinin boyut ve biçimine bağlı olarak değişmesinden dolayı; G_F 'nin deneysel olarak tanımlanmasında kullanılan yöntemler, araştırmacılar arasında tartışma konusu olmuştur. Daha sonra boyuttan bağımsız kırılma enerjisi elde etmek için bütün bu etkilerin göz önünde tutulmasının gerekliliği anlaşılmış ve özgül kırılma enerjisinin çatlak yolu boyunca sabit kalmadığı ifade edilmiştir (Abdalla ve Karihaloo, 2003).

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 bağlı olduğunu kabul etmişlerdir. Yeni çatlak oluşumu için gerekli enerji çatlak ilerlediği zaman azalmaktadır. Başlangıçta çatlak oluşumu için gerekli enerjideki azalma düşük bir seviyede iken bu oran çatlakın serbest sınıra (free boundary) yaklaşması ile artmaktadır. Özgül enerjideki bu değişim, Şekil 2.25'te belirtildiği gibi, bi-lineer bir yaklaşımla ifade edilmiştir (Abdalla ve Karihaloo, 2003; Karihaloo ve diğ., 2003).



Şekil 2.25 Tek çentikli deney numunesinde enerji dağılımı (Hu ve Wittman, 2000)

Enerjideki azalmanın belirgin bir şekilde artmaya başlaması malzemenin geçiş ligamenti (a_l) kısmında meydana gelir; a_l malzeme özellikleri ile deney numunesinin biçim ve boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, a_l deney numunesinin çentiksiz kısmından ($w-a$) daha kısadır. Boyuttan bağımsız kırılma enerjisi, bi-lineer ifadelerle dayanarak deneyle bulunan özgül kırılma enerjisini kullanarak, denklem (2.23)'te gösterildiği gibi hesaplanabilir (Karihaloo ve diğ., 2003). Böylece boyuttan bağımsız kırılma enerjisi elde edilebilmektedir (Abdalla ve Karihaloo, 2003). Boyut etkisinden bağımsız kırılma enerjisini ve a_l 'yi en doğru şekilde hesaplamak için, denklem (2.23)'ün çözümünde en küçük kareler metodu kullanılmıştır (Karihaloo ve diğ., 2003). Boyut etkisinden bağımsız kırılma enerjisi üzerine Karihaloo ve Abdalla'nın (2003) yaptıkları diğer bir çalışmada; iki değişik çentik derinliği oranı ($\alpha=a/W$) kullanılarak elde edilen özgül kırılma enerjilerinin (G_F) ve a_l 'nin hesaplanması için yeterli olacağı belirtilmiştir. $G_f(a/W)$ aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$G_f(a/w) = \begin{cases} G_F \left[1 - \frac{a_l/W}{2(1-a/W)} \right]; \dots\dots\dots 1-a/W > a_l/W \\ G_F \cdot \frac{(1-a/W)}{2(a_l/W)}; \dots\dots\dots 1-a/W \leq a_l/W \end{cases} \quad (2.23)$$

En küçük kareler yöntemine gerek olmadan, G_F kolayca hesaplanabilmektedir. Karihaloo ve Abdalla'nın 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 (Abdalla ve Karihaloo, 2003; Karihaloo ve diğ., 2003).

Genellikle deney numunesinin çentiksiz kısmı ile geçiş ligamentinin uzunluğu arasında $(w-a) > a_l$ şartı sağlandığından, bu duruma ait gerçek kırılma enerjisini veren denklem (2.24) ile, geçiş ligamentinin uzunluğu ise denklem (2.25) kullanılarak hesaplanabilir.

$$G_F = \frac{G_f(a/W)}{1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{a_l/W}{1 - a/w}} \quad (2.24)$$

$$a_l = \frac{2W(G_f(0,5) - G_f(0,05))}{\frac{G_f(0,5)}{1 - 0,05} - \frac{G_f(0,05)}{1 - 0,5}} \quad (2.25)$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

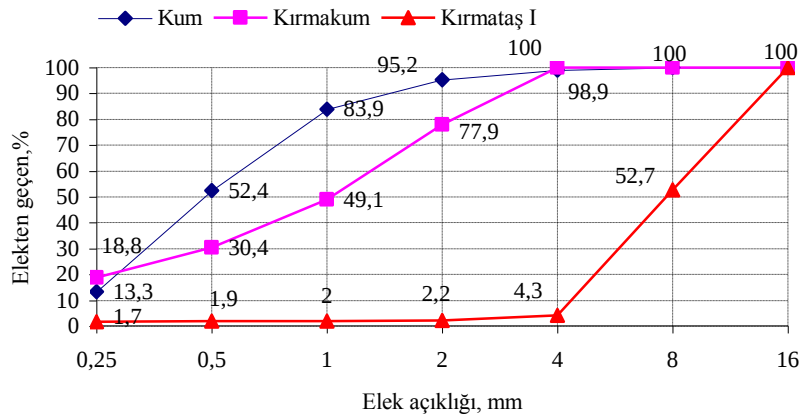
3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1 Agregaların özellikleri

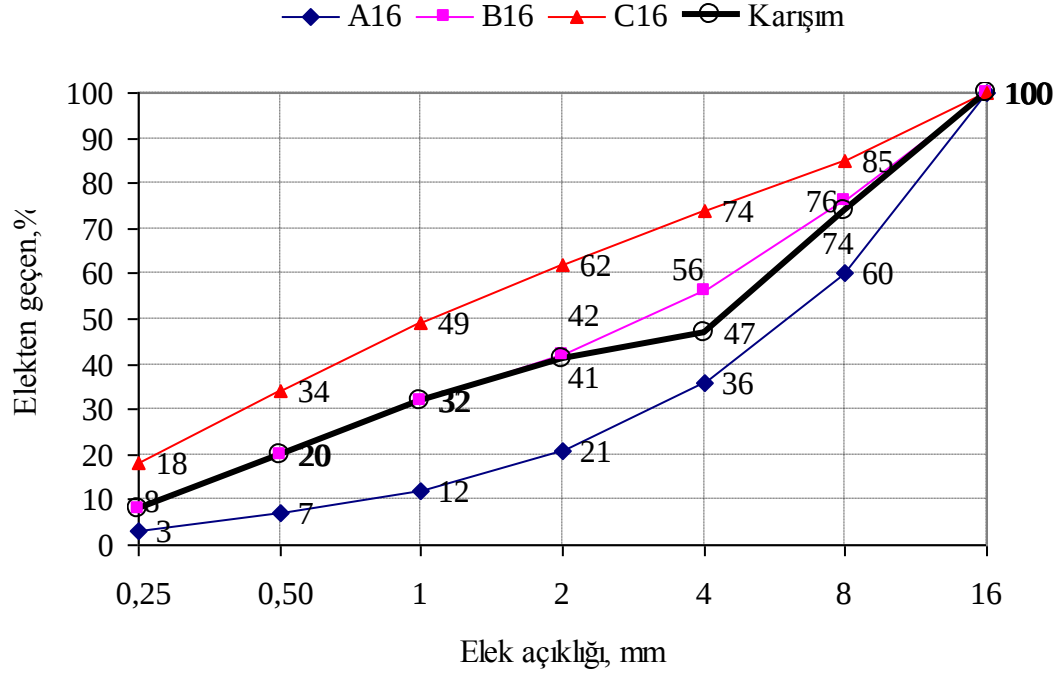
Üretilen harçlarda doğal kum ve kırma kum olmak üzere iki sınıf agrega, betonlarda ise doğal kum, kırmakum ve kırmataş I olmak üzere üç sınıf agrega kullanıldı. Kullanılan agregaların granülometrik bileşimleri ve özgül ağırlıkları Tablo 3.1’de, granülometri eğrisi ise Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Karışım granülometrisi, A16, B16, C16 eğrileri granülometrisi Şekil 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Üretimde kullanılan agregaların granülometrik bileşimleri ve özgül ağırlıkları

Agrega Sınıfı	Elek Göz Boyutu (mm)								Özgül Ağırlık (kg/dm ³)
	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	
Kum	100	100	100	98,9	95,2	83,9	52,4	13,3	2,60
Kırmakum	100	100	100	100	77,9	49,1	30,4	18,8	2,60
Kırmataş I	100	100	52,7	4,3	2,2	2	1,9	1,7	2,60



Şekil 3.1 Elekten geçen agrega yüzdelerini gösteren eğriler



Şekil 3.2 Beton üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi

3.1.2 Çimentonun özellikleri

Tüm hamur, harç ve beton üretimlerinde Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ait PÇ 42.5 cinsi çimento kullanıldı. Çimento üzerinde TS 12143/Mart 1997'ye göre yapılan kimyasal, fiziksel ve mekanik deneylerin sonucu Tablo 3.2, 3.3 ve 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.2 Çimentonun fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık (gr/cm ³)		3,17
Priz Süresi	Başlangıç	2 st. 29 dk.
	Bitiş	3 st. 06 dk.
Hacim sabitliği (mm)		1
İncelik	Özgül yüzey (cm ² /gr)	3620
	0.045 mm elekte kalıntı (%)	7,9
	0.09 mm elekte kalıntı (%)	0,4

Tablo 3.3 Çimentonun kimyasal özellikleri

	Standartlar (%)	Analiz sonuçları
MgO	maks.% 5	%1,18
Cl	maks.% 0,1	%0,0435
Çözünmez Kalıntı	maks.% 1,5	%0,30
SO ₃	maks.% 3,5	%2,74
Kızdırma Kaybı	maks.% 4,0	%1,31

Tablo 3.4 Çimentonun basınç dayanımı

Gün	Standartlar (N/mm ²)	Basınç dayanımı (N/mm ²)
2	20	30,9
7	31,5	41,3
28	42,5	50,0

3.1.3 Katkının özellikleri

Harç ve beton üretimlerinde YKS Firması'nın Gilenium 51 marka süper akışkanlaştırıcı katkısı kullanıldı. Gilenium 51, modifiye edilmiş polikarboksilik eter esaslı, erken ve nihai yüksek mukavemet ve dayanıklılığa gereksinim duyulan, mükemmel yüzey görünümü elde etmek için kullanılan, klor içermeyen beton katkı maddesidir. Tablo 3.5'de, Glenium 51'in üretici fabrika tarafından verilen teknik özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.5 Glenium 51'in teknik özellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³)	1,07-1,012
Klor % (EN 480-10)	< 0,10
Toplam Alkali Miktarı (Na ₂ O eqv (EN 480-12)	Maks. 1
Renk	Amber
Homojenite	Homojen
Kimyasal İçeriği	Polikarboksilik Eter Zincirleri

3.2 Malzeme Bileşimleri

İlk üretimlere çimento hamuruyla başlanmış, daha sonra hamurun harç ve beton üretimleri izlemiştir. Harç ve çimento hamuru üretimlerinde kullanılan malzeme miktarları, gerçek beton bileşimindeki malzeme miktarları kullanılarak bulunmuştur. Harç üretiminde kullanılacak malzeme miktarları bulunurken, beton bileşiminden iri agregası (kırmataş I) çıkartılmıştır. Üretimlerde, su-çimento oranı sabit tutulmuş ve üretimlerde agregaların su emmesi bulunarak su düzeltilmesi yapılmıştır. Beton, harç ve çimento hamuru bileşimleri ve özellikleri Tablo 3.6'da verilmektedir.

Tablo 3.6 Beton, harç ve çimento hamuru bileşimleri (1 m³ için)

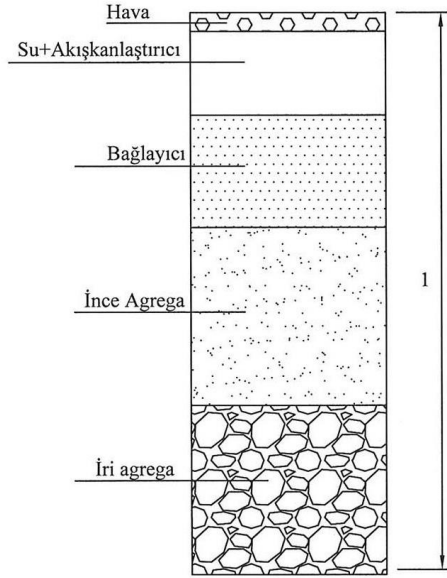
		Beton	Harç	Çimento Hamuru
Kum	Kg	401	604	-
Kırma kum	Kg	321	484	-
Kırmataş I	Kg	882	-	-
Çimento	Kg	600	904	1574
Kimyasal katkı	Kg	7,20	10,85	-
Su	Kg	180	271	472
Su / çimento		0,30	0,30	0,30
Birim Ağırlık	Kg/m ³	2330	2225	2078
Hava	%	0,7	1,5	3,1

3.3 Beton, Harç ve Çimento Hamuru Bileşenlerinin Hacimsel Oranları

Sıkıştırılmış taze beton, iri agregası, ince agregası, çimento, katkı, su ve havanın hacim oranları toplamından meydana gelmekte olup; hacim toplamı 1'e eşittir. Bu toplam, denklem (3.1) ve Şekil (3.3) ile aşağıda gösterilmektedir. Şekil (3.3)'te çimento bağlayıcısı, kırmataş I iri agregayı, doğal kum ve kırma kum ince agregayı göstermektedir.

$$\frac{m_{\text{Ç}}}{\rho_{\text{Ç}}} + \frac{m_{\text{su}}}{\rho_{\text{su}}} + \frac{m_{\text{ak}}}{\rho_{\text{ak}}} + \frac{m_{\text{KI}}}{\rho_{\text{KI}}} + \frac{m_{\text{Kk}}}{\rho_{\text{Kk}}} + \frac{m_{\text{Dk}}}{\rho_{\text{Dk}}} + V_{\text{hava}} = 1 \quad (3.1)$$

Denklemdaki, $m_{\text{Ç}}$, m_{su} , m_{ak} , m_{KI} , m_{Kk} , m_{Dk} sırasıyla çimentonun, suyun, akışkanlaştırıcının, kırmataş I'in, kırma kumun, doğal kumun 1 m^3 beton içindeki ağırlıklarını, V_{hava} 1 m^3 betondaki hava hacmini, $\rho_{\text{Ç}}$, ρ_{su} , ρ_{ak} , ρ_{KI} , ρ_{Kk} , ρ_{Dk} ise çimentonun, suyun, akışkanlaştırıcının, kırmataş I'in, kırma kumun, doğal kumun özgül ağırlıklarını göstermektedir.

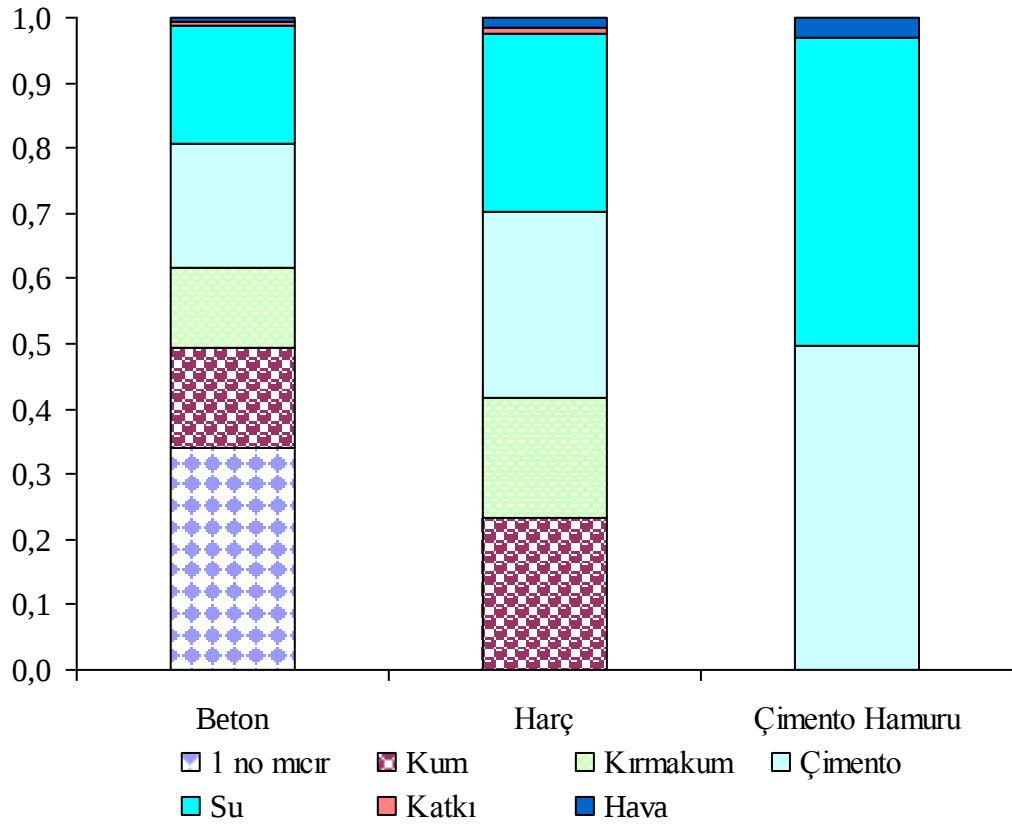


Şekil 3.3 1 m^3 betonu oluşturan bileşenlerin tipik şematik gösterimi

1 m^3 beton, harç ve çimento hamuru bileşenlerinin hacimsel değerleri Tablo 3.7, malzeme konsantrasyonları ise Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir.

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

Bileşen		Beton	Harç	Çimento Hamuru
İri Agrega	Kırmataş I	0,339	-	-
İnce agrega	Kum	0,154	0,232	-
	Kırma kum	0,123	0,186	-
Çimento		0,189	0,285	0,497
Su		0,180	0,271	0,472
Katkı		0,007	0,010	-
Hava		0,007	0,015	0,031



Şekil 3.4 1 m³ beton, harç ve çimento hamurunda malzeme konsantrasyonlarının şematik gösterimi.

3.4 Numunelerin Hazırlanması ve Taze Beton Deneyleri

Çimento, doğal kum, kırma kum ve kırmataş I, su ve yeterli miktarda hiper akışkanlaştırıcı eklenerek elde edilen beton, çimento, doğal kum, kırma kum, su ve yeterli miktarda hiper akışkanlaştırıcı eklenerek elde edilen harç, çimento ve su karıştırılarak elde edilen çimento hamuru çelik kalıplara döküldü. 24 saat sonra kalıplarından çıkarılan numuneler $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kür havuzuna konuldu. Üretilen beton, harç ve çimento hamuru kalıplara yerleştirilmeden önce, birim ağırlık kabına yerleştirildi, vibrasyona tabi tutulduktan sonra taze betonun gerçek birim ağırlığı bulundu (Tablo 3.6).

3.5 Deney Türü, Numune Tipleri ve Şekilleri, Elde Edilecek Parametreler

Çimento hamuru, beton ve çimento harcından birer adet üretim yapılmıştır. Her üretimde,

70X70X280 mm kiriş (8'er adet),

100X100X500 mm kiriş (8'er adet),

150X150X750 mm kiriş (8'er adet),

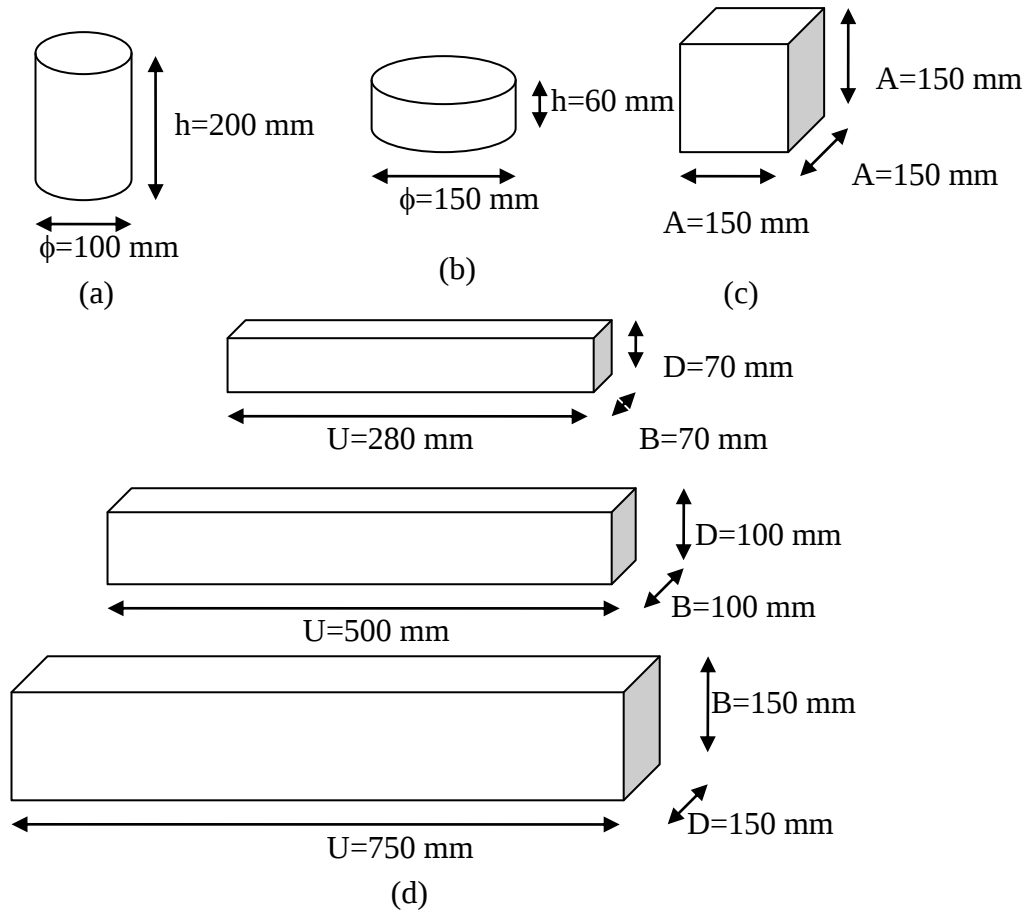
$\phi 100 \times 200$ mm silindir (6'şar adet),

150X150X150 mm küp (6'şar adet),

$\phi 150 \times 60$ mm disk (12'şer adet) numune üretimi yapıldı. Her üretimden bir gün sonra kalıptan alınan numuneler, $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik su havuzunda 2 gün bekletilmiş ve daha sonra su havuzundan alınarak aynı ortamda tutulmuştur. Beton, harç ve çimento hamurunun basınç mukavemetleri küp ve silindir numuneler, elastisite modülü silindir numuneler, yarma-çekme dayanımları disk numuneler, kırılma enerjisi ise üç farklı boyuttaki kiriş numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilmiştir. Deney türü, numune türü ve numune boyutları ile deney sonunda elde edilen parametreler Tablo 3.8'de verilmekte olup; numunelerin şekilleri Şekil 3.5'te verilmektedir.

Tablo 3.8 Deney türü ve elde edilecek parametreler

Deney türü	Numune tipi	Numune boyutları (mm)	Parametreler
Basınç	Küp	150X150X150	- Basınç dayanımı (f_c), MPa
Basınç	Silindir	$\phi = 100$, $h=200$	- Basınç dayanımı (f_c), MPa - Elastisite Modülü (E), GPa
Yarılma	Disk	$\phi = 150$, $h=60$	- Yarma çekme dayanımı (f_{st}), MPa
Üç Noktalı Eğilme	Kiriş	70X70X280 100X100X500 150X150X750	- Kırılma enerjisi (G_F), N/m - Yük-sehim eğrisinin altında kalan alan (W_0), Nmm - Maksimum yük (P), kN - Maksimum sehim (δ_0), mm - Net eğilme dayanımı (f_{net}), MPa - SÇH'nun kırılma tokluğu, (K_{IC}^{ch}), MPa



Şekil 3.5. Numune şekil ve boyutları: (a) Silindir, (b) Disk, (c) Küp, (d) Kirişler

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deney Sonuçları

Taze beton, harç ve çimento hamurunda birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık, darası alınmış $3,375 \text{ dm}^3$ 'lük ölçü kabı yardımıyla bulunmuştur. 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)
Beton	2,33
Harç	2,23
Çimento hamuru	2,08

4.2 Sertleşmiş Beton, Harç ve Çimento Hamuru Deney Sonuçları

4.2.1 Boyut Etkisi Kuralının Kiriş Numunelere Uygulanması

Üretilen kiriş numuneler için Bf_t' ve d_0 sabitleri bulunarak aranan G_f ve c_f değerlerini hesaplayabilmek için $1/\sigma_N^2$ 'ye karşı d numune boyutu grafiğinin çizilmesi ve bulunan noktalardan geçen en uygun eğriye ait denklemin elde edilmesi gerekmektedir. Bunun içinde çentik – yükseklik oranı 0,1 ve 0,5 olan numunelerin tepe yükü ve $1/\sigma_N^2$ değerleri Tablo 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Çentik – yükseklik oranı 0,1 olan beton numunelerde elde edilen yükler ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri

Uzunluk (mm)	Yüks.	Gen.	Kütle (kg)	Maks. Yük (N) (Pcr)	$(2l_j-L_j)/2l_j$ Xm_jg	P (toplam) (N)	Y
280,00	70,00	70,00	3,32	-	-	-	-
280,00	70,00	70,00	3,29	5389	9,7	5399	0,82384233
280,00	71,00	71,00	3,36	4932	9,9	4942	1,04062924
280,00	70,00	70,00	3,29	4522	9,7	4532	1,16896404
510,00	100,00	100,00	11,35	5940	40,4	5980	2,79609751
510,00	100,00	101,00	11,35	6883	40,4	6924	2,12804749
510,00	101,00	99,00	11,50	7620	40,9	7661	1,70335602
510,00	100,00	100,00	11,45	5292	40,7	5332	3,51682594
750,00	150,00	149,00	39,50	11432	145,3	11577	3,72681799
750,00	150,00	150,00	39,50	9843	145,3	9988	5,07452088
748,00	150,00	150,00	39,50	12629	146,0	12775	3,10186622
750,00	150,00	150,00	39,70	10008	146,0	10154	4,90983703

Tablo 4.3 Çentik – yükseklik oranı 0,5 olan beton numunelerde elde edilen yükler ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri

Uzunluk (mm)	Yüks.	Gen.	Kütle (kg)	Maks. Yük (N) (Pcr)	$(2l_j-L_j)/2l_j$ Xm_jg	P (toplam) (N)	Y
280,00	69,00	71,00	3,22	1975	9,5	1984	6,09573164
280,00	70,00	70,00	3,22	1923	9,5	1932	6,43176998
280,00	71,00	70,00	3,28	2040	9,7	2049	5,88225222
280,00	70,00	70,00	3,25	1631	9,6	1641	8,91576724
510,00	101,00	100,00	12,10	2248	43,0	2291	19,44105925
510,00	102,00	100,00	12,18	2261	43,3	2304	19,59376660
510,00	101,00	100,00	12,20	2622	43,4	2665	14,36404531
510,00	100,00	100,00	12,10	2415	43,0	2458	16,55300483
750,00	150,00	150,00	39,70	4490	146,0	4636	23,55461719
750,00	150,00	150,00	39,50	5290	145,3	5436	17,13427141
750,00	150,00	150,00	39,85	4988	146,6	5135	19,19868980
746,00	150,00	150,00	39,60	4410	147,0	4557	24,37554269

Tablo 4.4 Çentik – yükseklik oranı 0,1 olan harç numunelerde elde edilen yükler ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri

Uzunluk (mm)	Yüks.	Gen.	Kütle (kg)	Maks. Yük (N) (Pcr)	$(2l_j-L_j)/2l_j$ $X_{mj}g$	P (toplam) (N)	Y
280,00	71,00	70,00	3,08	3313	-	3313	2,25015257
280,00	70,00	70,00	3,08	3626	9,1	3635	1,81682349
280,00	71,00	70,00	3,10	-	-	-	-
280,00	71,00	70,00	3,12	3739	9,2	3748	1,75832617
510,00	100,00	100,00	11,75	5445	41,8	5487	3,32133553
510,00	100,00	100,00	11,60	6071	41,3	6112	2,67712261
510,00	100,00	100,00	11,56	5335	41,1	5376	3,46038812
510,00	100,00	100,00	11,61	5875	41,3	5916	2,85694020
750,00	150,00	149,00	38,30	10241	140,9	10382	4,63433553
750,00	150,00	150,00	38,10	13528	140,2	13668	2,70992714
750,00	149,00	149,00	38,10	-	-	-	-
748,00	150,00	150,00	38,00	-	-	-	-

Tablo 4.5 Çentik – yükseklik oranı 0,5 olan harç numunelerde elde edilen yükler ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri

Uzunluk (mm)	Yüks.	Gen.	Kütle (kg)	Maks. Yük (N) (Pcr)	$(2l_j-L_j)/2l_j$ $X_{mj}g$	P (toplam) (N)	Y
280,00	71,00	70,00	3,10	1519	9,1	1528	10,57374635
280,00	70,00	70,00	3,09	1270	9,1	1279	14,66790249
280,00	71,00	70,00	3,18	1468	9,4	1477	11,31652829
280,00	71,00	71,00	3,14	1653	9,2	1662	9,19532379
510,00	100,00	100,00	11,35	2102	40,4	2143	21,77859336
510,00	100,00	100,00	11,35	1749	40,4	1789	31,24644926
510,00	102,00	101,00	11,50	1806	40,9	1847	31,12473694
510,00	101,00	100,00	11,45	1730	40,7	1771	32,51859334
750,00	151,00	150,00	37,70	3323	138,7	3462	42,81557195
746,00	150,00	150,00	37,50	5319	139,2	5458	16,99486843
750,00	150,00	150,00	37,80	3857	139,1	3996	31,69661213
750,00	150,00	150,00	37,40	4219	137,6	4357	26,67097604

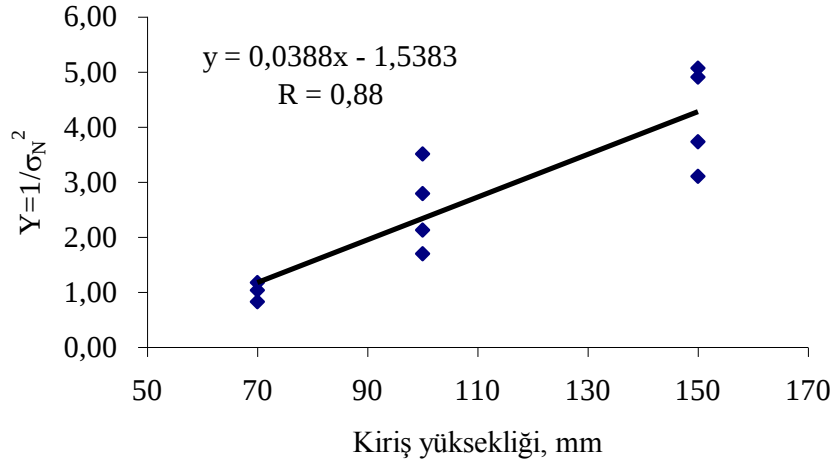
Tablo 4.6 Çentik – yükseklik oranı 0,1 olan çimento hamuru numunelerde elde edilen yükler ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri

Uzunluk (mm)	Yüks.	Gen.	Kütle (kg)	Maks. Yük (N) (Pcr)	$(2l_j-L_j)/2l_j$ X_{mjg}	P (toplam) (N)	Y
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
280,00	70,00	70,00	2,84	1471	8,4	1479	10,97780839
280,00	70,00	70,00	2,86	2172	8,4	2181	5,04975637
510,00	100,00	101,00	10,64	-	-	-	-
510,00	101,00	100,00	10,72	-	-	-	-
510,00	99,00	100,00	10,52	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
750,00	149,00	149,00	35,20	-	-	-	-
750,00	149,00	150,00	34,60	5768	127,3	5895	14,37232128
746,00	150,00	150,00	34,60	4953	128,4	5082	19,60424125
750,00	150,00	148,00	34,50	5793	126,9	5920	14,06418254

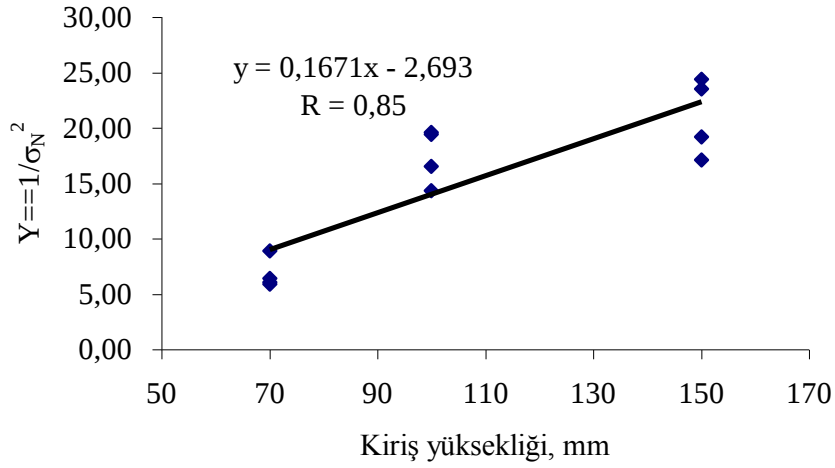
Tablo 4.7 Çentik – yükseklik oranı 0,5 olan çimento hamuru numunelerde elde edilen yükler ve bu değerlere karşı gelen $Y=1/\sigma_N^2$ değerleri

Uzunluk (mm)	Yüks.	Gen.	Kütle (kg)	Maks. Yük (N) (Pcr)	$(2l_j-L_j)/2l_j$ X_{mjg}	P (toplam) (N)	Y
280,00	68,00	69,00	2,80	601	8,2	609	59,30949393
280,00	70,00	70,00	2,80	-	-	-	-
280,00	71,00	71,00	2,87	732	8,4	740	46,36400312
280,00	71,00	69,00	2,88	798	8,5	806	36,91165874
510,00	102,00	100,00	10,74	1075	38,2	1114	83,90112969
510,00	102,00	100,00	10,76	1008	38,3	1046	95,09666509
510,00	100,00	102,00	10,66	1023	37,9	1061	92,39354616
510,00	99,00	100,00	10,55	1085	37,5	1123	77,71486202
750,00	150,00	150,00	34,50	1729	126,9	1856	146,97605659
750,00	150,00	150,00	34,40	1374	126,5	1500	224,94331071
750,00	150,00	150,00	34,40	1938	126,5	2065	118,73442750
-	-	-	-	-	-	-	-

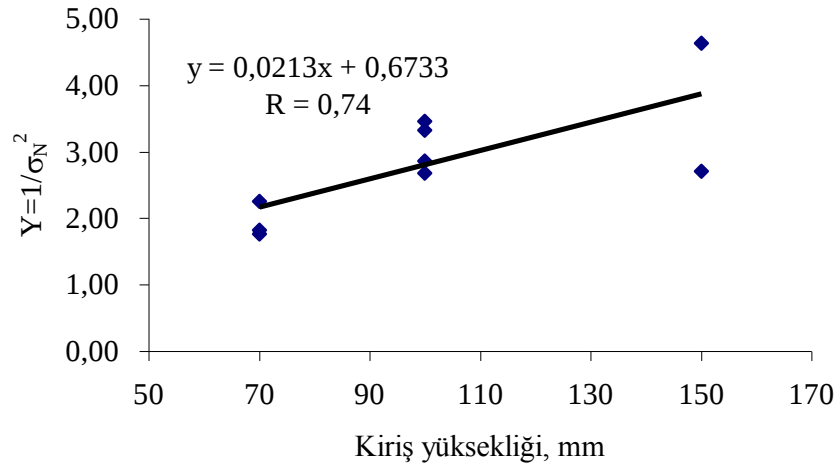
Daha sonra bu değerler kullanılarak elde edilen kiriş yüksekliği (d) ve $1/\sigma_N^2$ grafikleri de Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'te gösterilmiştir.



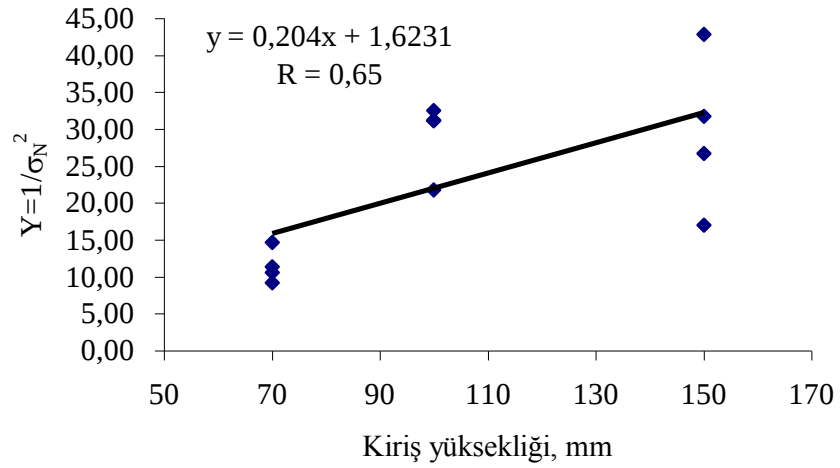
Şekil 4.1 Çentik – yükseklik oranı 0,1 olan beton numunelerde kiriş yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki



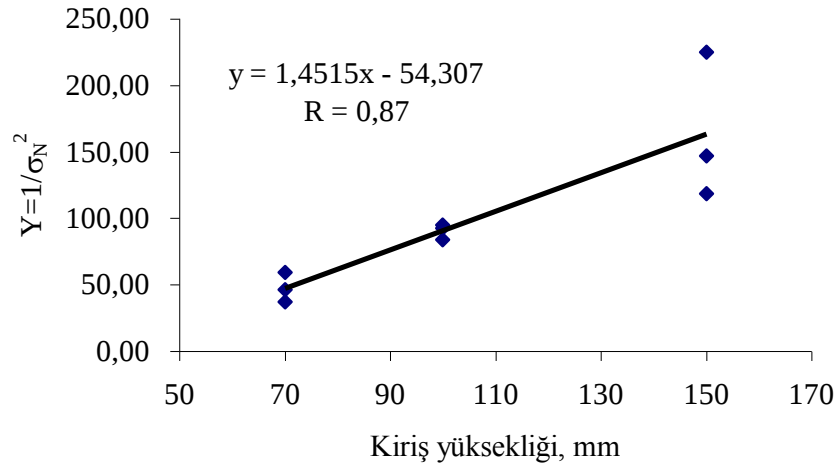
Şekil 4.2 Çentik – yükseklik oranı 0,5 olan beton numunelerde kiriş yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki



Şekil 4.3 Çentik – yükseklik oranı 0,1 olan harç numunelerde kiriş yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki

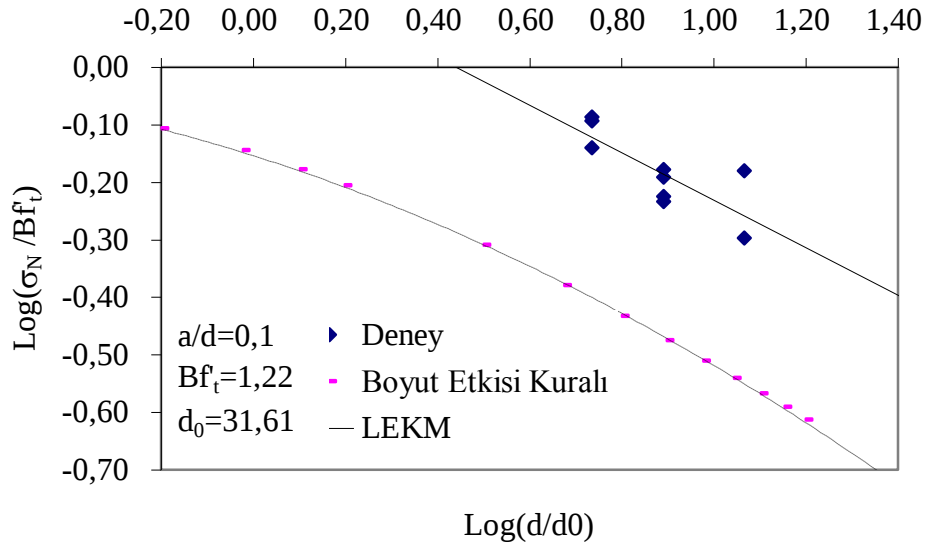


Şekil 4.4 Çentik – yükseklik oranı 0,5 olan harç numunelerde kiriş yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki

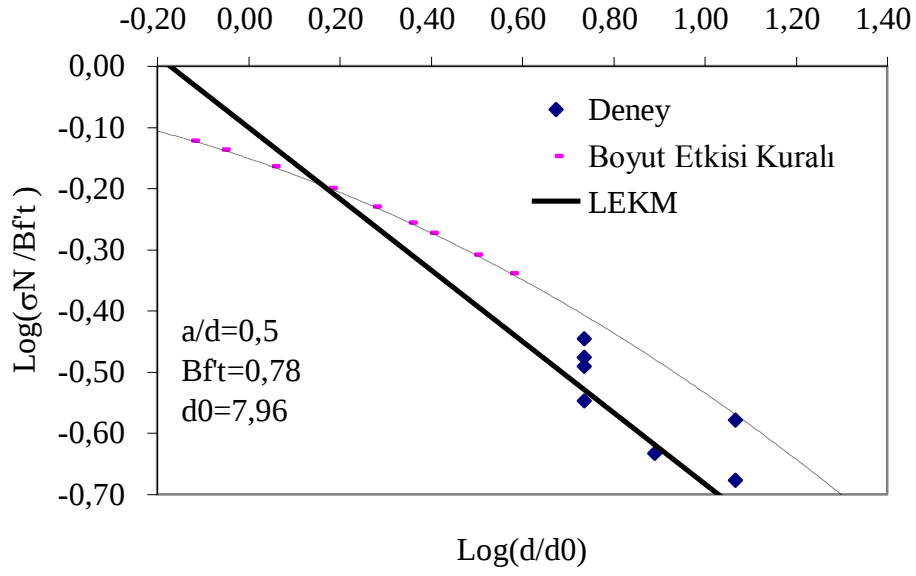


Şekil 4.5 Çentik – yükseklik oranı 0,5 olan çimento hamuru numunelerde kiriş yüksekliği (d) ile $Y=1/\sigma_N^2$ arasındaki ilişki

Lineer regresyon sonucu bulunan A ve C katsayılarından formül sabitleri olan Bf_t' ve d_0 değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra boyut etkisi kuralı gereği $\log(\sigma_N / Bf_t')$ 'ye karşı $\log(d / d_0)$ grafikleri numuneler için çizilmiştir.



Şekil 4.6 Çentik – yükseklik oranı 0,1 olan harç numunelerde $\log(d / d_0)$ ile $\log(\sigma_N / Bf_t')$ arasındaki ilişki



Şekil 4.7 Çentik – yükseklik oranı 0,5 olan harç numunelerde $\log(d / d_0)$ ile $\log(\sigma_N / Bf_t)$ arasındaki ilişki

Üretilen kiriş numunelerdeki Kırılma enerjisi;

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{E \cdot A} \quad (4.1)$$

formülü ile hesaplanabilir. Bu formüldeki;

$g(\alpha_0)$: boyutsuz enerji salınım oranı,

E : üretilen betonun elastisite modülü

A : regresyon eğrisinin eğimidir.

Boyutsuz enerji salıverme hızı ise;

$$g(\alpha_0) = \left(\frac{l}{d}\right)^2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot [1.5 \cdot F(\alpha)]^2 \quad (4.2)$$

formülüyle bulunur.

Kirişlerde yapılan deneyler esnasında mesnet arası açıklığın (l) kiriş yüksekliğine (d) oranından $F(\alpha)$ enterpolasyon yardımı ile bulunur.

$l/d=2.5$ için,

$$F(\alpha) = \frac{1.0 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (4.3)$$

$l/d=4.0$ için,

$$F(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{\pi^{1/2}(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (4.4)$$

Burada α değeri çentik-kiriş yüksekliği oranıdır. Aradaki l/d değerleri için $F(\alpha)$ değeri lineer enterpolasyon yardımıyla bulunur.

Kırılma süreci bölgesi uzunluğu olan c_f ise aşağıdaki formülle gösterilmektedir.

$$c_f = \frac{g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \cdot \frac{C}{A} \quad (4.5)$$

Buradaki $g'(\alpha)$, $g(\alpha)$ 'nin α 'ya göre türevi, C ise regresyon eğrisine ait bir katsayıdır. Yukarıdaki eşitlik $g'(\alpha)$ 'nin pozitif değerleri için geçerlidir.

Gerilme şiddet çarpanının kritik değeri olan K_{IC} ve çatlak açılma deplasmanının kritik değeri olan $CTOD_c$ aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$K_{IC} = \sqrt{g(\alpha_0) \cdot d_0 \cdot B \cdot f_t'} = \sqrt{E \cdot G_f}$$

$$CTOD_c = \sqrt{\frac{32 \cdot G_f \cdot c_f}{\pi \cdot E}} \quad (4.6)$$

Tablo 4.8 Kiriş numunelerden elde edilen sabitler ve kırılma parametreleri

	$\alpha = a/d$	$F_{3.95}(\alpha_0)$	$G(\alpha_0)$	$g'(\alpha_0)$	A	C	$G_f, J/m^2$	c_f, mm
Çimento Hamuru	0,10	-	-	-	-	-	-	-
	0,50	1,42	110,51	663,16	1,4515	-54,3075	-	-
Harç	0,10	1,01	11,19	-82,85	0,0213	0,6733	-	-
	0,50	1,42	110,51	663,16	0,2040	1,6231	19,43	1,33
Beton	0,10	1,01	11,19	-82,85	0,0388	-1,5383	-	-
	0,50	1,42	110,51	663,16	0,1671	-2,6930	-	-

Tablo 4.9 Boyut Etkisi Kuralı sabitleri ve malzeme kırılma parametreleri

	$\alpha = a/d$	$g(\alpha_0)$	d_0 , mm	$B f'_t$, MPa	R	G_f , J/m ²	c_f , mm	K_{IC} , N/mm ² m ^{1/2}	CTOD _C , mm
Harç	0,50	110,51	7,96	0,78	0,6485	19,43	1,33	0,74	0,0031

4.2.2 Küp ve Silindir Basınç Deneyi

Basınç deneyinde, ölçüleri 150X150X150 mm³ olan küp ile çapı 100 mm, yüksekliği 200 mm olan silindir numuneler kullanılmıştır. 23±2°C'lik su küründe beklemiş küp ve silindir numuneler, su havuzundan alınmış ve basınç deneyi yapılmadan 1 hafta önce silindir numunelerin üst tabanına başlık yapılmıştır. Başlık yapılan silindir numuneler ile küp numuneler, 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. Elastisite modülünün hesaplanması için gerilme-şekil değiştirme eğrisinde maksimum yükün 1/3'ü arasında kalan gerilme-şekil değiştirme değerleri kullanıldı. Küp ve Silindir numunelere uygulanan basınç deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Küp ve Silindir basınç dayanımları ile Elastisite modülü

	Ortalama Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)
Çimento Hamuru	60,4	54,6	19,6
Harç	66,6	62,1	27,8
Beton	73,8	61,4	31,0

4.2.3 Disk Yarma-Çekme Deneyi

Beton, harç ve çimento hamurundan yapılmış çapı 150 mm, yüksekliği 60 mm olan onikişer adet disk numunede, yarma-çekme deneyi 1000 kN'luk J.Amsler presi ile yapılmıştır. Yarma deneyinde, ahşap çıtalar kullanılarak tepe yükünün çizgisel olarak dağılması sağlanmıştır. Çizgisel yük boyunca basınç gerilmelerine dik yönde oluşan çekme gerilmeleri etkisiyle numune ortadan yarılarak kırılmaktadır. Disk numuneler üzerinde yapılan yarma-çekme deneyi ile elde edilen en büyük yük kullanılarak, yarma-çekme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$f_{st} = \frac{2 \times P_{maks}}{\pi \times D \times b}, \text{ N/mm}^2 \quad (4.7)$$

f_{st} : Yarma-çekme dayanımı

P_{maks} : Maksimum tepe yükü

D : Disk numunenin çapı, 150 mm

B : Disk numunenin yüksekliği, 60 mm

Beton, harç ve çimento hamurundan yapılmış disk numunelere ait yarma çekme dayanımı sonuçları Tablo 4.11'de, yarma çekme deney düzeneği ekte verilmektedir.

Tablo 4.11 Disk numunelerinin yarma dayanımları

Deney Numunesi	D (mm)	b (mm)	Ortalama Yarma-çekme dayanımı (MPa)
Çimento hamuru	150	60	2,82
Harç	150	60	4,45
Beton	150	60	4,49

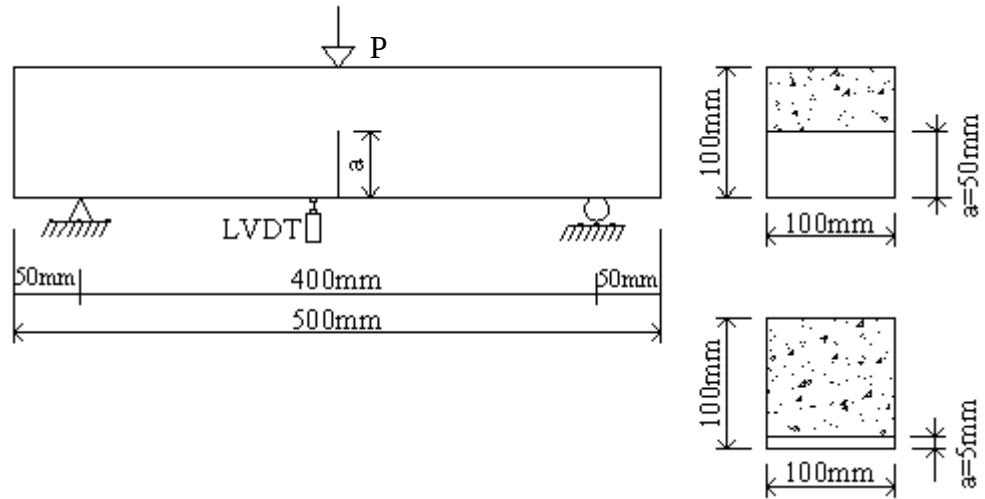
4.2.4 Üç Noktalı Eğilme Deneyi

70X70X280, 100X100X500, 150X150X750 mm boyutundaki prizma numunelere, elmas uçlu spiral testere yardımıyla yüksekliklerinin 1/10'u oranında yüzeysel çentik ve 1/2'si oranında derin çentik açılmıştır. Deneyler Instron 5500R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneyden önce,

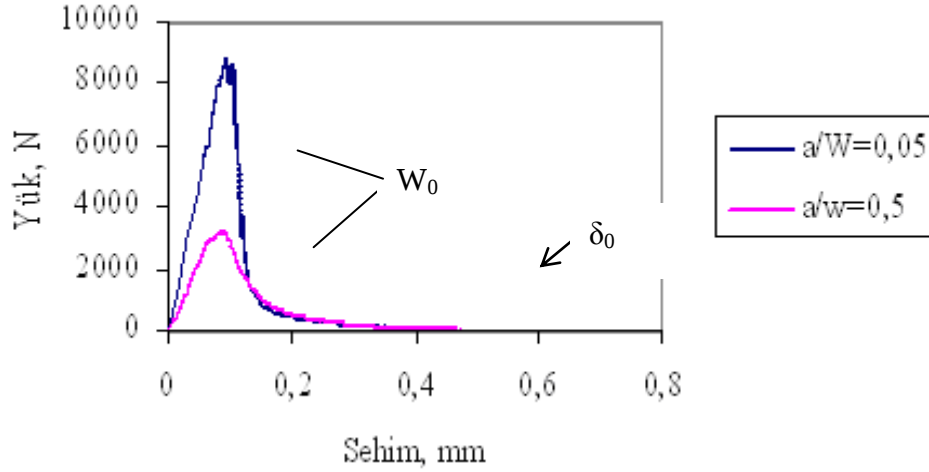
numunelerin mesnetlere oturan kısımları ve yükün uygulandığı kısım düzeltilerek; numunelerin mesnetlere düzgün oturması ile düzgün yük dağılımı sağlanmıştır. Üç noktalı eğilme deneyi düzeneği Şekil 4.8’de ve beton numunelere ait yük-sehim eğrilerinin tipik gösterimi Şekil 4.9’da verilmiştir. Instron eğilme cihazına bağlı, numunedeki sehim miktarını veren LVDT yardımı ile deformasyonlar, çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD) ve bunlara karşı gelen yük değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerle, her bir deney numunesinin yük-sehim ile yük-CMOD grafikleri çizilmiştir.

Üç noktalı eğilme deneyi sonunda, farklı iki çentik derinliği için kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları bulunmuştur. Daha sonra, Abdalla ve Karihalo (2003) ile Karihaloo ve diğ. (2003)’nin önerdiği yöntemle göre; aynı geometriye sahip, birine derin çentik diğerine sıg çentik açılmış iki adet deney numunesinin kırılma enerjisi değerlerinden, gerçek kırılma enerjisi hesaplanmıştır. Hesaplanan kırılma enerjileri karakteristik boyun hesaplanmasında kullanılmıştır.

Derin çentik açılmış çimento hamuru numunelerin eğilme deneyinden, çimento hamurunun kırılma tokluğu bulunmuştur. Üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen tüm değerler Tablo 4.12’de, ayrıca deney sonuçları ile deney sonunda elde edilen yük-sehim eğrileri ise ekler bölümünde verilmiştir.



Şekil 4.8. 100X100X500 mm ölçülerindeki prizma üzerinde uygulanan üç noktalı eğilme deneyinin şematik gösterimi



Şekil 4.9. Beton numunelere ait yük-sehim eğrilerinin tipik gösterimi

4.2.4.1 Kırılma Enerjisi Hesabı

Malzemenin kırılmaya karşı direncini, birim alan başına çatlak oluşturmak için gereken enerji miktarı belirler. Kırılma enerjisinin belirlenebilmesi için 70X70X280, 100X100X500, 150X150X750 mm'lik kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapıldı. Kirişin ortasına yerleştirilen LVDT ile sehim, çatlak ağzına yerleştirilen LVDT ile çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD) ölçüldü ve her kiriş numunesi için yük-sehim grafiği elde edildi. Yük-sehim eğrisinin altında kalan alan (W_0) yardımıyla, beton, harç ve çimento hamurunun kırılma enerjisi RILEM TC 50-FMC'nin önerdiği denklem (4.8) ile hesaplandı (RILEM, 1985; Hillerborg, 1985).

$$G_f = \frac{W_0 + m \frac{S}{U} g \delta_0}{B(D - a)}, \text{ N/m} \quad (4.8)$$

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

M : $m_1 + 2m_2$ (kg)

M_1 : Kiriş ağırlığı (kg)

M_2 : Yükleme aparatının ağırlığı (0,3115 kg)

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

δ_0 : Kirişin göçme anındaki açıklığın ortasındaki son sehim (m)

S : Mesnetler arası açıklık (m)

- U : Kiriş uzunluğu (m)
- B : Kiriş numunenin genişliği (m)
- D : Kiriş numunenin derinliği (m)
- a : çentik uzunluğu (m)

4.2.4.2 Net Eğilme Dayanımı

Net eğilme dayanımı (f_{net}), çentikli kirişler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen maksimum yükün denklem (4.9)'da kullanılmasıyla bulunur.

$$f_{net} = \frac{3PS}{2B(D-a)^2}, \text{ MPa} \quad (4.9)$$

- P : Maksimum yük
- S : Mesnetler arası açıklık (mm)
- B : Deney numunesinin genişliği (mm)
- D : Deney numunesinin derinliği (mm)
- a : Çentik derinliği (mm)

4.2.4.3 Gerçek Kırılma Enerjisi Hesabı

Çentikli betonun gerçek kırılma enerjisi (G_F); derin çentik ve yüzeysel çentik açılmış prizmatik numunelere ait kırılma enerjileri yardımıyla, denklem (4.10) kullanılarak hesaplanmıştır (Abdalla ve Karihaloo, 2003; Karihaloo ve diğ., 2003). Denklem (4.10)'da, a/W çentik oranını göstermektedir. Bu oran yüzeysel çentikte 0,1 ve derin çentikte 0,5'dir

$$G_F = \frac{G_f(a/W)}{1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{a_l/W}{1 - a/W}}, \text{ N/m} \quad (4.10)$$

- $G_f(a/W)$: Eğilme deneyinde bulunan kırılma enerjisi (N/m)
- a : Çentik derinliği (mm)
- W : Deney numunesinin derinliği (mm)

a_l : Geçiş ligamenti uzunluğu (mm)

Denklem (4.10)'daki a_l değeri, Tablo 4.12'de hesaplanan derin çentik ve yüzeysel çentik açılmış numunelerin kırılma enerjileri kullanılarak aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$a_l = \frac{2W (G_f (0,5) - G_f (0,1))}{\frac{G_f (0,5)}{1 - 0,1} - \frac{G_f (0,1)}{1 - 0,5}} \quad (4.11)$$

4.2.4.4 Karakteristik Boyun Belirlenmesi

Sünekliğin bir göstergesi olan ve Hillerborg (1977) tarafından önerilen karakteristik boy (l_{ch}), aşağıdaki denklemle hesaplanabilir.

$$l_{ch} = \frac{G_F E}{f_t^2}, \text{ mm} \quad (4.12)$$

G_F : Kırılma enerjisi (N/m)

E : Elastisite modülü (GPa)

f_t' : Tek eksenli çekme dayanımı (MPa) (Bu çalışmada yarma-çekme dayanımı)

Karakteristik boyun hesaplanmasında, tek eksenli çekme dayanımı (f_t') yerine disk numunelerden bulunan yarma-çekme dayanımı (f_{st}); kırılma enerjisi olarak gerçek kırılma enerjileri kullanılmıştır.

Tablo 4.12. Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları

		Çimento Hamuru			Harç			Beton		
Mekanik ve Kırılma özellikleri		7X7 X28	10X10 X50	15X15 X75	7X7 X28	10X10 X50	15X15 X75	7X7 X28	10X10 X50	15X15 X75
Basınç dayanımı (f_c'), MPa		54,56			62,10			61,41		
Elastisite Modülü (E), GPa		19,55			27,88			30,97		
Yarma çekme dayanımı (f_{st}), MPa		2,82			4,45			4,49		
Net eğilme dayanımı (f_{net}), MPa	a/W=0.1	2,10	-	1,73	4,21	4,40	4,44	5,67	5,28	4,10
	a/W=0.5	2,47	2,35	1,80	5,26	4,09	4,39	6,94	5,24	5,50
Kırılma enerjisi (G_f), N/m	a/W=0.1	28,79	43,00	45,02	52,89	83,21	119,60	66,03	101,25	112,60
	a/W=0.5	17,23	-	41,02	51,92	54,91	113,28	58,66	87,51	106,24
Gerçek Kırılma Enerjisi (G_F), N/m		43,2	-	50	54,1	118,6	127,5	75,2	118,4	120,5
Geçiş ligamenti uzunluğu (a_l), mm		42,1	-	27	2,8	53,7	16,7	15,4	26,1	17,8
Karakteristik boy (l_{ch}), mm		106	-	123	76	167	180	116	182	185

4.2.5 Çimento Hamurunun Kırılma Tokluğunun Hesabı

Gevrek bir malzeme olan çimento hamurunun kırılma tokluğu (K_{IC}^{ch}), çentikli kiriş numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyi ile belirlenebilmektedir. $0,2 < a/w < 0,6$ koşulunu sağlayan deney numuneleri için çimento hamurunun kırılma tokluğu aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir (Karihaloo, 1995). Yukarıdaki koşulu sağlayan derin çentikli ($a/W=0,5$) numunelerin eğilme deneyinden elde edilen değer, çimento hamurunun kırılma tokluğunun hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$K_{IC}^{ch} = \frac{3PS}{2BW^{3/2}} \left[1,93 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 3,07 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 14,53 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 25,11 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 25,8 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (4.13)$$

Yukarıdaki denklemde S, W, B sırasıyla kiriş deney numunesine ait mesnetler arası genişlik, kirişin derinliği ve genişliği; a çentik derinliğini, P’de maksimum yükü ifade eder.

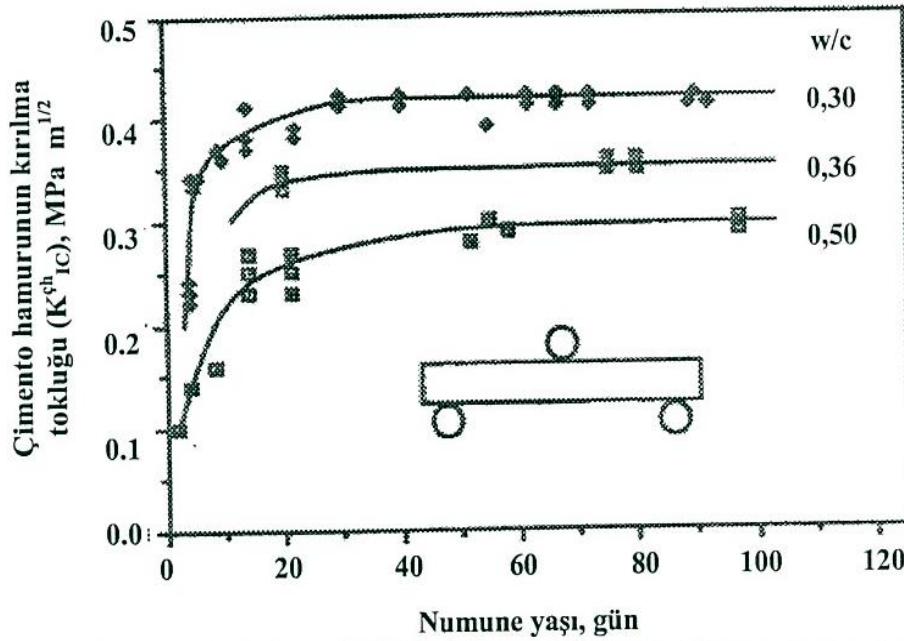
Ayrıca, çimento hamurunun kırılma tokluğu, su-çimento oranına (w/c) bağlı olarak Nauss ve Lott (1969) ve Ohgishi ve diğ. (1986) tarafından deneysel verilere dayanarak denklem (4.14) yardımıyla da bulunabilir.

$$K_{IC}^{ch} = 0,6125 - 0,85 \frac{w}{c} \quad (4.14)$$

Tablo 4.13 Çimento hamurunun kırılma tokluğu

Çimento hamurunun kırılma tokluğu	Denklem (4.14)	0,325
	Deneysel	0,327

Higgins ve Bailey (1976), üç noktalı kiriş numunelerin su/çimento oranı ve numune yaşına bağlı olarak (K_{IC}^{ch}) 'nin değişimini gösterdikleri grafikte, (K_{IC}^{ch}) 'nin su/çimento oranına bağlı olduğunu, belli bir süreden sonra numunenin yaşına bağlı olmadığını göstermişlerdir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Çimento matrisi tokluğunun su/çimento oranı ve numune yaşı ile değişimi (Higgins ve Bailey, 1976; Li ve Huang, 1990)

4.3 Mezo-mekanik Modelleme

4.3.1 Elastisite Modülü

Nielsen (1990) tarafından geliştirilen model (denklem (4.15)), iki fazlı sistem olarak kabul edilen çimento hamuru, harç ve beton gibi çimento esaslı kompozit malzemelerin elastisite modülünü hesaplamak için kullanılabilir. Bu modelde elastisite modülü denklem (4.15) kullanılarak bulunmuştur (Lange-Kornbak ve Karihaloo, 1999; Nielsen, 1990).

$$E = E_m \frac{n + \Theta + V\Theta(n-1)}{n + \Theta - V(n-1)} \quad (4.15)$$

- E_m : Sürekli fazın elastisite modülü,
 V : Dağılı fazın hacim oranı,
 Θ : Dağılı fazın konfigürasyonunu tanımlamak için kullanılan geometri fonksiyonu,
 n : Dağılı fazın elastisite modülünün sürekli fazın elastisite modülüne oranı.

4.3.1.1 Çimento Hamurunun Elastisite Modülü

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.

$$V = \frac{w/c - 1,2 \rho_w / \rho_c}{w/c + \rho_w / \rho_c} \quad (4.16)$$

$$\Theta = \eta_k (1 - V) \quad (4.17)$$

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

İkinci durumda ($w/c < 1,2\rho_w/\rho_c$), yani $0,30 < 0,38$ olduğundan 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.

$$V = \frac{1 - 0,83(w/c)(\rho_c / \rho_w)}{1 + (w/c)(\rho_c / \rho_w)} \quad (4.18)$$

$$\Theta = 0,5 \cdot \left[\eta_u \sqrt{1 - V} \cdot (1 - n) + \sqrt{\eta_u^2 (1 - V)(1 - n)^2 + 4n} \right] \quad (4.19)$$

$$n = \frac{E_u}{E_m} \quad (4.20)$$

Denklemlerdeki;

η_u : Hidrate olmamış çimento tanelerinin biçim faktörü,

E_u : Hidrate olmamış çimento tanelerinin elastisite modülü,

E_m : Hidrate olmuş çimento jelinin elastisite modülü.

Hidrate olmuş çimento jelinin elastisite modülü (E_m) hidrasyon derecesi h 'ye bağlı olarak bulunabilir. Çimento hamuru için elastisite modülü denklem (4.15)'te $E=E_p$ yazılarak bulunur.

$$E_m = 27200 \times h, \text{ GPa} \quad (4.21)$$

$$E_p = E_m \frac{n + \Theta + V\Theta(n-1)}{n + \Theta - V(n-1)} \quad (4.22)$$

4.3.1.2 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 (4.15) aşağıdaki gibi düzenlenir ve bu denklemde n ince agreganın elastisite modülünün (E_f) çimento hamurunun elastisite modülüne oranıdır.

$$n = \frac{E_f}{E_p} \quad (4.23)$$

$$E_r = E_p \frac{n + \Theta + V_s \Theta(n-1)}{n + \Theta - V_s(n-1)} \quad (4.24)$$

Harç için dağılı fazın geometri fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Theta = \frac{1}{2} \left[q + \sqrt{q^2 + 4n} \right] \quad (4.25)$$

$$q = \eta_f (1 - V_s) + n \eta_f (V_s - 1) \quad (4.26)$$

$$\eta_f = \frac{3A_f (1 + A_f)}{1 + A_f + 4A_f^2} \quad (4.27)$$

Bu denklemlerdeki;

η_f : İnce agreganın biçim faktörü,

A_f : İnce agreganın narınlığıdır.

Agregaya ait elastisite modülü, Müller-Rochholz formülü ile agreganın özgül ağırlığı (ρ_{ag}) kullanılarak bulunabilir (Lange-Kornbak ve Karihaloo, 1999):

$$E_{ag} = 8,1 \rho_{ag}^2 \quad (4.28)$$

4.3.1.3 Betonun Elastisite Modülü

Betonun elastisite modülü bulunurken, sürekli fazın elastisite modülü olarak yukarıda bulunan harcın elastisite modülü ($E_m=E_p$), dağılı fazın hacim oranı olarak iri agreganın hacim oranı ($V=V_c$) kullanılarak denklem (4.29) elde edilir.

$$E = E_r \frac{n + \Theta + V_c \Theta (n - 1)}{n + \Theta - V_c (n - 1)} \quad (4.29)$$

Betonda n değeri aşağıdaki gibi bulunur:

$$n = \frac{E_c}{E_r} \left(1 - \beta^{\frac{7,5}{5 + \frac{E_c}{E_r}}} \right) \quad (4.30)$$

Yukarıdaki denklemdeki;

E_c : İri agreganın elastisite modülü,

E_r : Harcın elastisite modülü,

β : Kopan agreganın yüzey alanıdır.

Betonun elastisite modülünün hesaplanmasında kullanılan diğer parametreler aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunabilir.

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

$$q = \eta_c(1 - V_c) + n\eta_c(V_c - 1) \quad (4.32)$$

$$\Theta = \frac{1}{2} \left[q + \sqrt{q^2 + 4n} \right] \quad (4.33)$$

Yukarıdaki denklemlerdeki;

η_c : İri agreganın biçim faktörü,

A_c : İri agreganın narinliğidir.

İri agregaya ait elastisite modülü denklem (4.28)'de belirtilen Müller-Rochholz formülü kullanılarak hesaplanır. Çimento hamuru, harç ve beton için mezo-mekanik bağıntılar yardımıyla hesaplanan Elastisite Modülleri Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14 Mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modülleri

Elastisite modülü hesaplanmasında kullanılan parametreler			Elastisite modülü (GPa)
Çimento hamuru	η_u : Hidrate olmamış çimento tanelerinin biçim faktörü	1	$E_p=21,7$
	h : Hidratasyon katsayısı	0,75	
	E_u : Hidrate olmamış çimento tanelerinin elastisite modülü (GPa)	75	
Harç	V_f : İnce agreganın hacim oranı	0,418	$E_r=31,5$
	A_f : İnce agreganın narinliği	1	
Beton	V_f : Betonda ince agreganın hacim oranı	0,419	$E=35,7$
	V_c : İri agreganın hacim oranı	0,339	
	A_c : İri agreganın narinliği	1	
	β : Agreganın toplam yüzey alanına bağlı olarak kopan agreganın yüzey alanı	0,2	

4.3.2 Harç ve Betonun Kırılma Tokluğunun Hesabı

Harç ve betonun kırılma toklukları hesaplanırken, harcın ve betonun yüksek basınç dayanımları dikkate alınmıştır. Harçta çatlak kapanı (denklem (4.35)) ile agrega köprülenmesi mekanizmalarının (denklem (4.36)); betonda ise sadece agrega köprülenmesi mekanizmasının (denklem (4.36)) çalıştığı varsayılmıştır ve etkin kırılma tokluğunu, K_{IC} , aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$K_{IC} = K_{IC}^m \cdot \left(\frac{K_{IC}^{kp}}{K_{IC}^m} \right) \quad (4.34)$$

$$\left(\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^m} \right) = \left\{ 1 - \frac{(1 - V_{ag}) \frac{\pi}{4}}{\ln \left[\frac{1 + \cos\left(\frac{\pi \cdot V_{ag}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot V_{ag}}{2}\right)} \right]} \right\}^{-1} \quad (4.35)$$

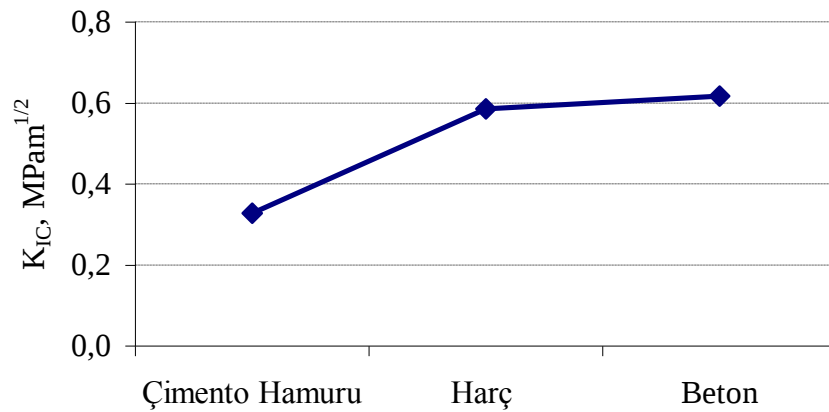
$$\left(\frac{K_{IC}^{kp}}{K_{IC}^m} \right) = \sqrt{\left(\frac{K_{IC}^k}{K_{IC}^{ch}} \right)^2 + \frac{E (\pi / 2) f_{t,a}^2 g_{ort} V_{ag} (1 - \sqrt{V_{ag}}) (1 - V_{ag}) (1 - v_m^2)}{E_m (1 - v^2) (K_{IC}^m)^2}} \quad (4.36)$$

Denklem (4.36)'de Poisson oranları $v=v_m=0,2$, agregaların çekme dayanımı $f_{t,a}=10$ MPa alınmış ve ortalama agrega boyutu maksimum agrega boyutuna (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 agreganın 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 4.15'de; etkin kırılma tokluklarının karşılaştırılması Şekil 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.15 Harç ve betonun kırılma tokluğu

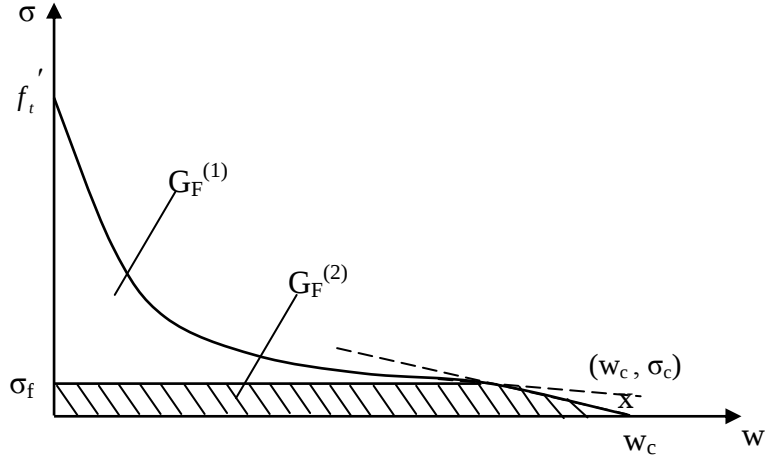
		g (mm)	g _{ort} (mm)	V _{ag}	K _{IC} ^k (MPa√m)	K _{IC} ^{kp} (MPa√m)	K _{IC} (MPa√m)
Harç		8	2	0,418	1,737	1,791	0,585
Beton	İnce agregata	8	2	0,419	1,738	1,792	0,586
	Kırmataş I	16	4	0,339	1,000	1,054	0,617



Şekil 4.11. Çimento hamuru, harç ve betonun etkin kırılma tokluğunun karşılaştırılması

4.3.3 Kırılma Enerjisi

Kırılma enerjisi için mezo-mekanik bağıntılar Huang ve Li (1989) ve Karihaloo (1995) 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 4.12'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 (Huang ve Li 1989; Lange-Kornbak ve Karihaloo, 1999).



Şekil 4.12. Betona ait çekme-şekil değiştirme eğrisi (Huang ve Li 1989; Lange-Kornbak ve Karihaloo, 1996)

Kırılma enerjisi, Şekil 4.12’de verilen grafiğin altında kalan iki alanın toplamı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_F = G_F^{(1)} + G_F^{(2)} \quad (4.37a)$$

$$G_F^{(1)} = \int_{\sigma=\sigma_f}^{f_t'} w(\sigma) d\sigma \quad (4.37b)$$

$$G_F^{(2)} = \int_{\sigma=0}^{\sigma_f} w(\sigma) d\sigma \quad (4.37c)$$

$$G_F^{(1)} = \frac{(K_{IC})^2 (1 - \nu^2)}{E(1 - V_{ag})} \times \left\{ \frac{1}{3} \left[\left(\frac{K_f}{\sqrt{\frac{2}{\pi}} K_{IC}} \right)^3 - 1 \right] - \ln \left(\frac{K_f}{\sqrt{\frac{2}{\pi}} K_{IC}} \right) \right\} \quad (4.38)$$

$$G_F^{(2)} = \int_{\sigma=0}^{\sigma_f} \left(\sqrt{\eta g} - \frac{g}{3\tau^* V_{ag}} \sigma \right) d\sigma = \sqrt{\eta} K_f - \frac{K_f^2}{(6\tau^* V_{ag})} \quad (4.39)$$

Yukarıdaki 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,
 g : En büyük tane boyutunu,
 V_{ag} : Toplam agreg a konsantrasyonunu göstermektedir.

$K_f, \sigma_f \in [\sigma_c, f_t']$ koşulunu sağlayan gerilmeye bağı olarak bulunabilir (Lange-Kornbak ve Karihaloo, 1999).

$$K_f = \sqrt{g} \sigma_f \quad (4.40)$$

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.

$$G_F = G_F^{(1)} + \sqrt{\eta} K_c \quad (4.41)$$

Denklem (4.42)'de verilen gerilme-çatlak açılımı bağıntısından (Lange-Kornbak ve Karihaloo, 1999) ve $w = w_c = \sqrt{\eta g}$ kabul yapılarak σ_c dolayısıyla K_c hesaplanabilir.

$$w = \frac{(K_{IC})^2}{E(1 - V_{ag})} \cdot \frac{1}{f_t' \left(\frac{\sigma}{f_t'} \right)} \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma}{f_t'} \right)^3 \right] \quad (4.42)$$

Kırılma enerjileri hesaplanırken $\nu=0,2$, $\eta=10 \times 10^{-6} \text{m}$ ve $\tau^*=2,5 \text{ MPa}$ alınmış ve bulunan sonuçlar Tablo 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.16 Mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kritik çatlak açılma değerleri ve kırılma enerjileri

	Çimento Hamuru	Harç	Beton
w_c (mm)	0,01	0,28	0,40
σ_f (MPa)	0,52	0,07	0,07
$G_F^{(1)}$ (N/m)	22,6	72,4	98,5
$G_F^{(2)}$ (N/m)	4,9	13,1	19,4
G_F (N/m)	27,6	85,5	117,9

4.3.4 Tek Eksenli Çekme Gerilmesi

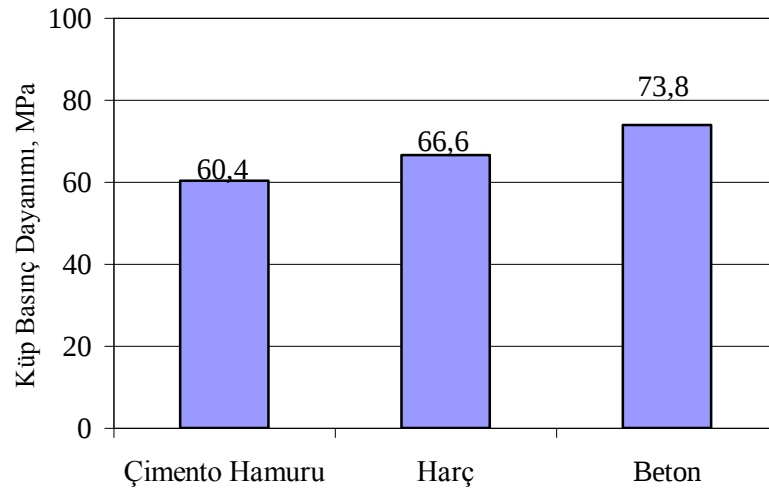
Tek eksenli çekme gerilmesi, maksimum agrega boyutu ve toklaşma mekanizmaları göz önünde tutularak bulunan etkin kırılma tokluğuna bağlı olarak (K_{IC}) hesaplanabilir (Huang ve Li, 1989).

$$f_t' = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\frac{\pi \cdot g}{2}}} \quad (4.43)$$

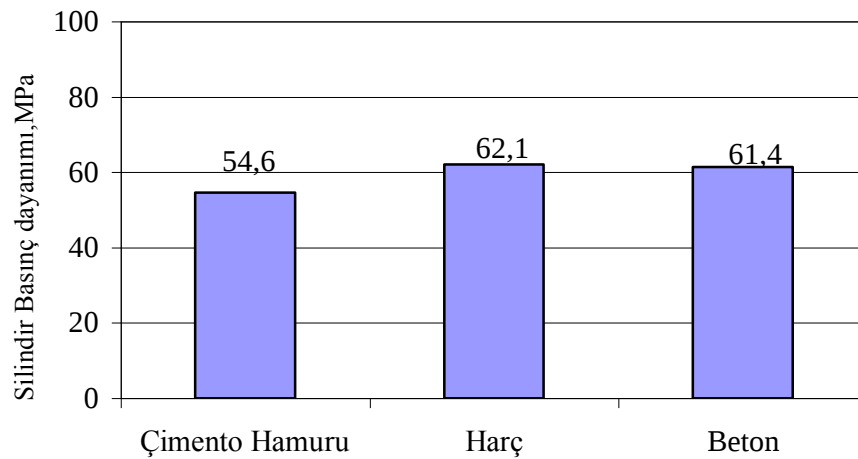
5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENME VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Basınç Dayanımları

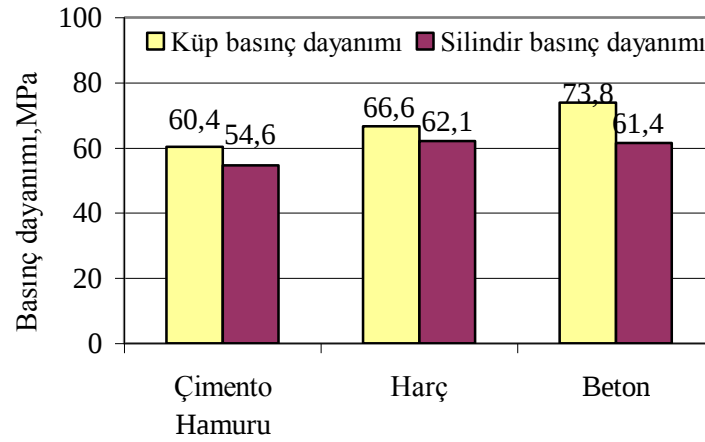
Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü üzere; beton ve harcın küp ve silindir basınç dayanımları çimento hamurundan daha yüksektir. Çünkü çimento hamuru fazına daha rijit agrega taneleri katarak elde edilen harç ve beton kompozitlerinin dayanımı artmaktadır.



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



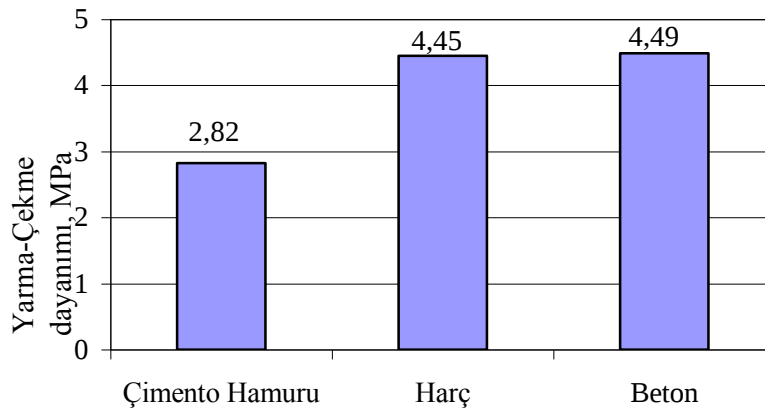
Şekil 5.2 Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama silindir basınç dayanımları



Şekil 5.3 Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama küp ve silindir basınç dayanımlarının karşılaştırılması

5.2 Yarma-Çekme Dayanımı

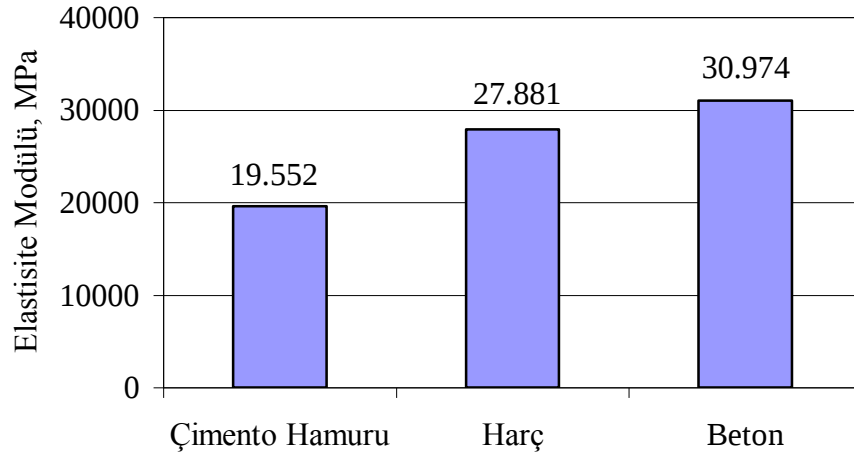
Disk yarma-çekme deneyine ait sonuçlar, Şekil 5.4'te verilmiştir. Çimento hamurundan betona doğru disk yarma-çekme dayanımları artmaktadır. Betonda düşey doğrultuda ilerleyen çatlaklar iri agregalar tarafından frenlenmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda, agrega ile çimento arasındaki temas yüzeyi normal betonunkine göre daha kuvvetlidir. Bunun sonucu olarak; temas yüzeyinde gelişen çatlaklar agreganın etrafında tur atmaktan çok agreganın içinden geçmeye zorlanır. Sonuçta, agreganın dayanımı da hamurun (veya harcın) dayanımından daha yüksek olduğundan, betonun dayanımında artış olur (Yıldırım ve diğ.,1995). Böylece, harç ve betonda yarma dayanımı artar.



Şekil 5.4 Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama disk yarma-çekme dayanımları

5.3 Elastisite Modülü

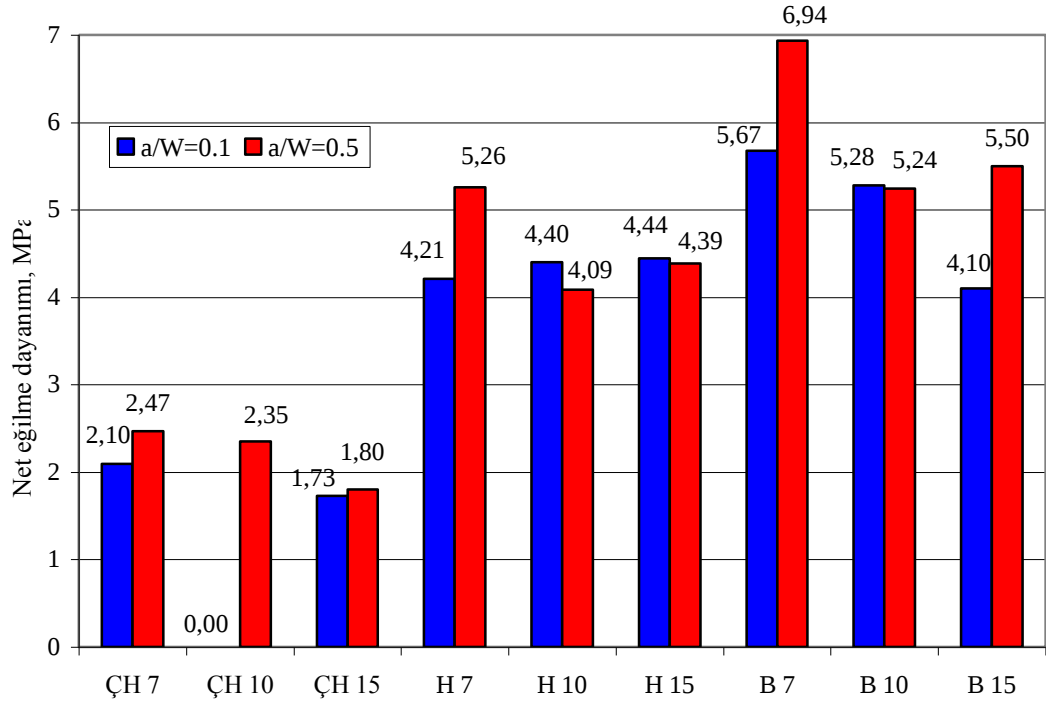
Elastisite modüllerine ait sonuçlar, Şekil 5.5'te verilmiştir. Çimento hamuruna agrega eklenmesiyle, elde edilen harç ve betonun elastisite modülleri, çimento hamuruna göre sırasıyla % 43 ve % 58 artmıştır. Böylece, çimento hamurundan harca ve harçtan da betona doğru elastisite modüllerinde artış görülmektedir.



Şekil 5.5 Çimento hamuru, harç ve betonun ortalama elastisite modülleri

5.4 Net Eğilme Dayanımı

Üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen net eğilme dayanımları, Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Şekil 5.6 incelendiğinde, her iki çentik oranı için çimento hamurundan betona gidildikçe net eğilme dayanımlarında artış olmakta, derin çentik açılmış numunelerden elde edilmiş net eğilme dayanımlarının, sığ çentik açılmış numunelere göre genellikle daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; derin çentikli numunelerde etkin kesit alanının daha küçük olmasından dolayı; bu numunelerde malzeme kusurların daha az olmasıdır. Şekildeki 7, 70X70X280 boyutlarındaki numuneleri, 10, 100X100X500 boyutlarındaki numuneleri, 15, 150X150X750 boyutlarındaki numuneleri ifade etmektedir.



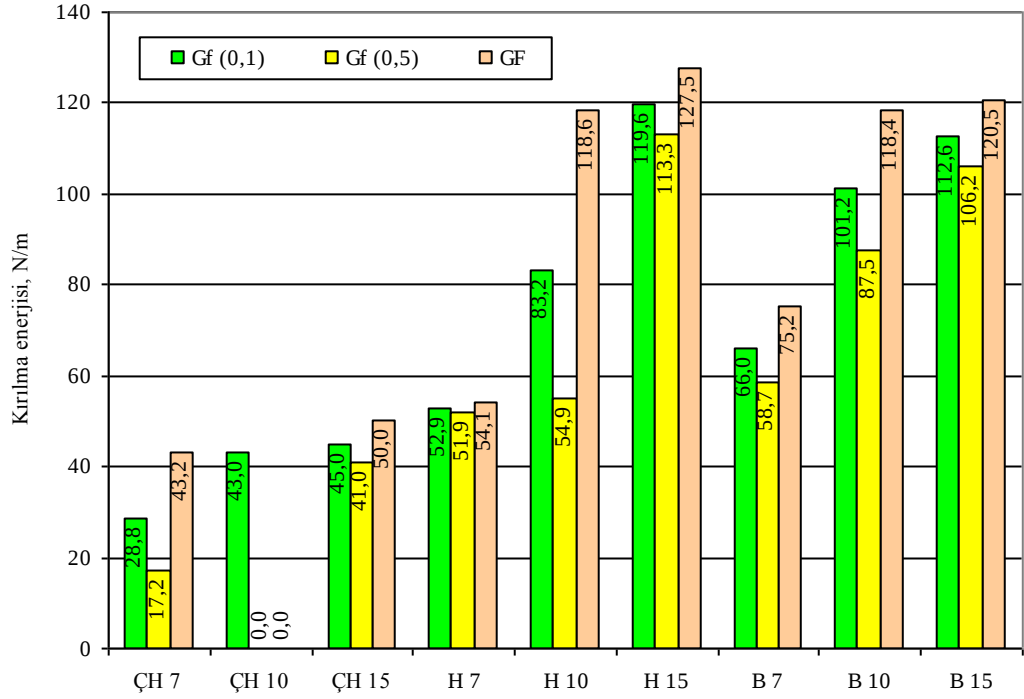
Şekil 5.6 Net eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

5.5 Kırılma Enerjisi

Şekil 5.7’de verilen üç noktalı eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde, harç ve betonda 100X100X500 ile 150X150X750 boyutlarındaki numunelerin gerçek kırılma enerjilerinin birbirine yakın, 70X70X280 boyutlarındaki numunelerin gerçek kırılma enerjilerinden daha büyük çıktığı görülmektedir.

Çimento hamurunun kırılma enerjisi, harç ve betonun kırılma enerjilerinden daha düşüktür.

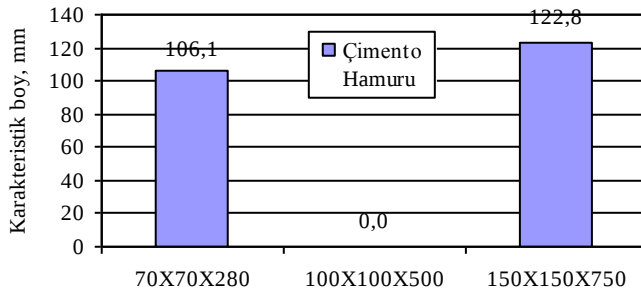
Çimento hamuru, harç ve beton fazlarına ait kırılma enerjileri incelendiğinde, derin çentik açılmış numunelerden elde edilen kırılma enerjileri, sıg çentik durumuna göre daha düşük çıkmıştır.



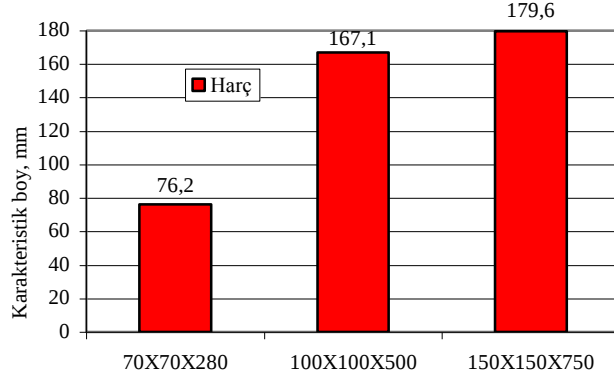
Şekil 5.7 Kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

5.6 Karakteristik Boyun Değerlendirilmesi

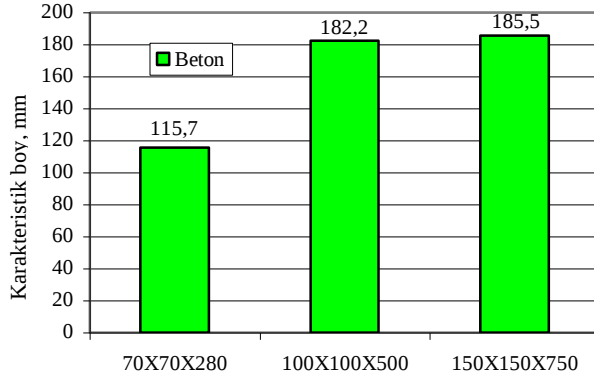
Sünekliğin bir ölçüsü olan karakteristik boy gerçek kırılma enerjilerine göre hesaplanmıştır. Şekil 5.8’de çimento hamurunun, Şekil 5.9’da harcın, Şekil 5.10’da betonun farklı boyutlardaki numunelerin gerçek kırılma enerjileri kullanılarak hesaplanan karakteristik boy değerleri görülmektedir. Çimento hamuru, harç ve betonda, numune boyutu arttıkça karakteristik boy da artmaktadır. Ayrıca, gevrek bir malzeme olan çimento hamuruna, agrega eklenmesiyle elde edilen harç ve betonun karakteristik boyunun arttığı görülmektedir.



Şekil 5.8 Çimento Hamurunun karakteristik boy değerleri



Şekil 5.9 Harcın karakteristik boy değerleri



Şekil 5.10 Betonun karakteristik boy değerleri

5.7 Mezo-mekanik Modelleme ile Bulunan Değerlerle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

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

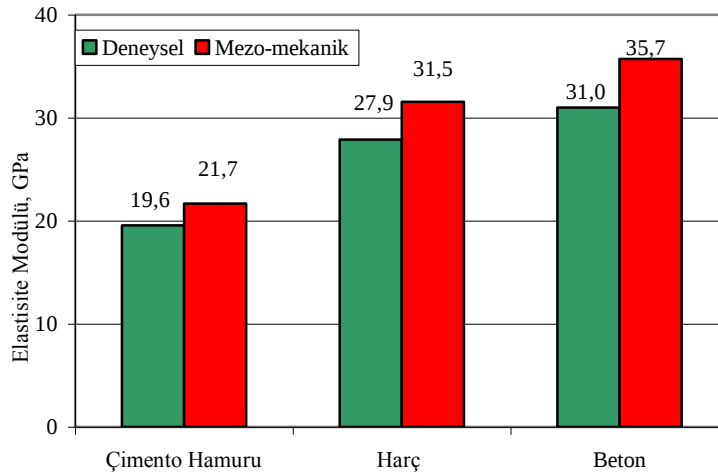
Tablo 5.1’in incelenmesinden görüldüğü üzere çimento hamurundan, harca ve betona gidildikçe, kırılma tokluğu artmaktadır. Böylece gevrek bir malzeme olan çimento hamuruna, agrega katılarak daha tok bir davranış sergileyen, harç ve beton elde edilmektedir.

Tablo 5.1 ve Şekil 5.11’in incelenmesinden görüldüğü üzere elastisite modülü mezo-mekanik modellerle 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

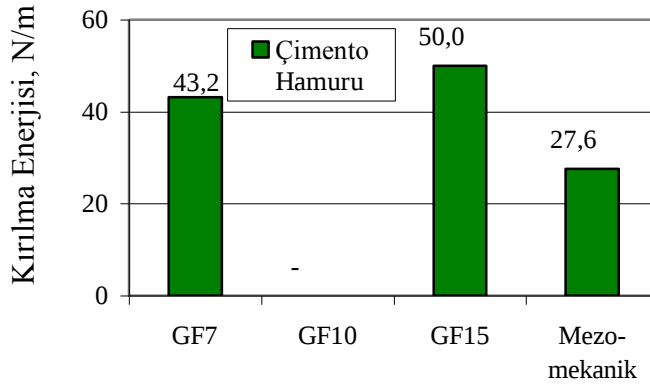
Tablo 5.1 Deneysel ve mezo-mekanik bağıntılarla elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Kırılma parametreleri			Çimento hamuru			Harç			Beton		
			7X7 X28	10X10 X50	15X15 X75	7X7 X28	10X10 X50	15X15 X75	7X7 X28	10X10 X50	15X15 X75
Elastisite modülü (GPa)	Deneysel		19,55			27,88			30,97		
	Teorik		21,67			31,53			35,71		
Etkin kırılma tokluğu (MPa m ^{1/2})	Deneysel		0,327			-			-		
	Teorik		0,325			0,585			0,617		
Kırılma enerjisi (N/m)	Deneysel	$\alpha=0,1$	28,79	43,00	45,02	52,89	83,21	119,60	66,03	101,25	112,60
		$\alpha=0,5$	17,23	-	41,02	51,92	54,91	113,28	58,66	87,51	106,24
		Gerçek	43,20	-	50,00	54,10	118,60	127,50	75,20	118,40	120,50
	Teorik		27,57			85,49			117,94		
Disk yarma-çekme dayanımı (MPa)	Deneysel		2,82			4,45			4,49		
Net eğilme dayanımı (MPa)	Deneysel	$\alpha=0,1$	2,10	0,00	1,73	4,21	4,40	4,44	5,67	5,28	4,10
		$\alpha=0,5$	2,47	2,35	1,80	5,26	4,09	4,39	6,94	5,24	5,50

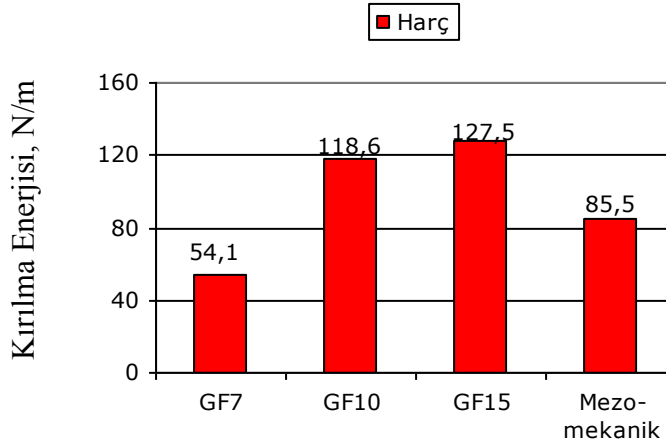


Şekil 5.11 Deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan elastisite modüllerinin karşılaştırılması

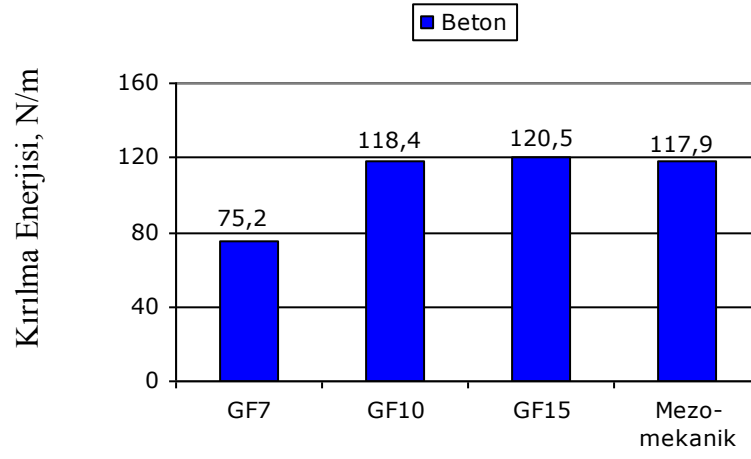
Mezo-mekanik bağıntılarla bulunan kırılma enerjisinin ve gerçek kırılma enerjilerinin karşılaştırılması ise Tablo 5.1, Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14'te verilmiştir. Betonda 100X100X500 ve 150X150X750 boyutlarındaki numunelere ait değerler; mezo-mekanik bağıntılarla bulunan değerlere yakın çıkmıştır. Çimento hamuru ve harçta ise mezo-mekanik bağıntılarla bulunan kırılma enerjisi, deneyle hesaplanan değerden daha düşük çıkmıştır. Yakın agrega konsantrasyonu için benzer bir sonuç, Bayramov ve diğ. (2004)'nin çalışmasında da görülmüştür.



Şekil 5.12 Çimento hamurunun deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kırılma enerjilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.13 Harcın deneysel çalışmalarla ve mezo-mekanik bağıntılarla hesaplanan kırılma enerjilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.14 Betonun 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 hamuru, harç ve betonun elastisite modülleri, mezo-mekanik modelleme ile bulunan değerlerden daha düşüktür.
- 70X70X280 boyutlarındaki numuneler hariç, çimento hamuru ve harcın gerçek kırılma enerjileri mezo-mekanik modelleme ile bulunan değerlerden yüksek olmasına rağmen, betonun gerçek kırılma enerjileri hesaplanan teorik kırılma enerjilerine yakın çıkmıştır.
- Gevrekliğin bir ölçüsü olan karakteristik boy çimento hamurunda düşük, betonda ise yüksek çıkmıştır. Numune boyutu arttıkça karakteristik boy da artmaktadır.
- Kiriş numune sayısının yeterli olmamasından dolayı; kirişler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deney sonuçlarının (harç ($a/W=0,5$) hariç), Boyut Etkisi Kuralı ile uyumlu olmadığı görüldü.

- Çentik – yükseklik oranı 0,1 ve 0,5 olan beton numunelerde, 0,5 olan çimento numunelerde C katsayıları, 0,1 olan harç numunelerde $g'(\alpha_0)$ negatif değerli bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- 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.
- 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.
- Bayramov, F., Mestanzade, N., Taşdemir C. ve Taşdemir, M.A.**, 2001. Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *XII. Ulusal Mekanik Kongresi*, Konya Selçuk Üniversitesi, Konya, 10-14 Eylül, 157-168
- Bayramov, F.**, 2004. Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayramov, F., Akçay, B., Ağar, 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
- Bazant Z.P. and Kazemi, M.T.**, 1990. Determination of Fracture Energy, Process Zone Length, and Brittleness Number from Size Effect with Application to Rock and Concrete, *International Journal of Fracture*, **44**, 111-131.
- Eser, F.Ö.**, 2002. Betonun kırılma parametrelerinin değişik yöntemlerle belirlenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Faber, K.T. and Evans, A.G.**, 1983. Crack Deflection Processes-I. Theory, *Acta Metallurgy*, **31**, 565-576.
- 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.
- Giaccio, G., Rocco, C. and Zerbino, R.**, 1993. Fracture Energy of high –strength concretes, *Materials and Structures*, **26(161)**, 381-386.
- Giaccio, G. and Zerbino, R.**, 1998. Failure mechanism of concrete, *Advanced Cement Based Materials*, **7**, 41-48.
- Griffith, A.A.**, 1921. The Phenomena of Rupture and flow in solids, *Phil Trans Roy Soc Lond*, A221, 163-198.
- Higgins, D.D. and Bailey, J.E.**, 1976. Fracture measurements on cement paste, *Journal of Material Science*, **11**, 1995-2003.

- Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P.E.,** 1976. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, *Cement and Concrete Research*, **6**, 773-782.
- Hillerborg, A.,** 1977. Report TVBM-3004. The Lund Institute of Technology, Lund, Sweden
- 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.
- Hu, X.Z. and Wittman, F.H.,** (2000). Size Effect on Toughness Induced by Crack Close to Free Surface, *Engineering Fracture Mechanics*, **65**, 209-211.
- 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(4)**, 370-378.
- Irwin, G.R.,** 1957. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Transversing a Plate, *Journal of Applied Mechanics*, **24**, 361-364.
- Jeng, Y.S. and Shah, S.P.,** 1985. Two parameter Fracture Model For Concrete, *Journal Engineering Mechanics*, **4**, 1227-1241.
- 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.
- Kachanov, M.,** 1986, Interaction of a Crack With Some Microcrack Systems, *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*, Amsterdam, p. 3-10, Edited by F.H. Wittmann, Elsevier Science.
- Kaplan, M.E.,** 1961. Crack Propagation and Fracture of Concrete, *Journal of American Concrete Institute*, **58**, 591-610.
- Karihaloo, B.L.,** 1995. Fracture mechanics and structural concrete, , Longman Group Limited, Essex.
- 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.
- Lange-Kornbak, D. and Karihaloo, B.L.,** 1996. Design of concrete mixes for minimum brittleness, *Advanced Cement Based Materials*, **3(3-4)**, 124-132. Elsevier Science Inc. New York.
- Lange-Kornbak, D. and Karihaloo, B.L.,** 1998. Design of fibre-reinforced DSP mixes for minimum brittleness, *Advanced Cement Based Materials*, **7**, 89-101.
- 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.
- Li, V.C.,** 1989. Toughening mechanisms in plain and fiber reinforced concrete, MRS Int'l Mtg. on Adv. Materials, **Vol.5**, Fracture Mechanics and Structural Ceramics, Ed. T. Kishi and M. Sakai. Published by Materials Research Society, 405-418.

- Li, V.C. and Huang, J.**, 1990. Crack trapping and bridging as toughening mechanisms in high strength concrete, *In Micromechanics of Failure of Quasi-Brittle Materials*, Eds. S.P. Shah, S.E. Swartz and M.L. Ming, Elsevier Applied Science, London, 579-588.
- 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.
- 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.
- Mehta, P.K. ve Monteiro, P.J.M.**, 1993. Concrete, 2nd edition, pp. 36-41, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632.
- Mindess, S.**, 1984. The effect of specimen size on the fracture energy of concrete, *Cement and Concrete Research*, **14**, 431-436.
- Mindess, S.**, 1991. The Fracture Process Zone in Concrete, Toughening Mechanisms in Quasi-Brittle Materials, The Netherlands, p.271-286, Edited by Shah, S.P., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Mindess, S. ve Diamond S.**, 1982. The Cracking and Fracture of Mortar, *Materials and Structures*, **15**, 107-113.
- Nauss, D.J., and Lott, J.L.**, 1969. Fracture toughness of portland cement concrete, *ACI Journal*, **66 (6)**, 481-489.
- Nielsen, L.F.**, 1990. Tech. Rep. No.208 Build. Mat. Insst., Techn. Univ. Of Denmark.
- Ohgishi, S., Ono, H., Takatsu, M. and Tanahashi, I.**, 1986. In fracture toughness and fracture energy of concrete, Wittmann, F.H., ed. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 281-290.
- Phillips, D.V. and Binsheng, Z.**, 1993. Direct tension tests on notched and un-notched plain concrete specimens, *Magazine of Concrete Research*, **45(162)**, 25-35.
- 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.
- 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 Structures*, **18**, 287-291.
- RILEM 89-FMT**, 1990, Size Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete, *Materials and Structures*, **23**, 461-465.
- RILEM 89-FMT**, 1990, Determination of Fracture Parameters (K_{IC}^s and $CTOD_c$) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Tests, *Materials and Structure*, **23**, 457-460.
- Sarısu, F.**, 1996. Betonun Mod I durumundaki göçmesine agrega konsantrasyonunun etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Shah, S.P. and Ahmad, S.H.**, 1994. High performance concrete and applications, Printed in Great Britain for Edward Arnold, pp. 161-166.
- Shah, S.P. and McGarry F.J.**, 1971. Griffith Fracture Criterion and Concrete, *Journal of Engineering Mechanics Division*, **97**, 1663-1676.
- Shah, S.P. and 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.
- Shah, S.P. and Taşdemir, M.A.**, 1994. Role of Fracture Mechanics in Concrete Technology, *Advances in Concrete Technology*, p. 161-202, Ed. V.M.Malhotra, CANMET, Second Edition,.
- 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.
- Taşdemir, C.**, 1995. Agregat-Çimento hamuru arayüzeyi mikroyapısının yüksek mukavemetli betonların kırılma parametrelerine etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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.
- Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Grimm, R. and König G.**, 1995. Microstructural effects on the brittleness of high strength concretes, in *Fracture Mechanics of Concrete Structures (Framcos-2)*, Wittmann, F.H.(Ed.), Aedificatic Publishers, Freiburg, **1**, 125-134.
- 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
- Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Mills, N., Barr, B.I.G. and Lydon, F.D.**, 1999. Combined effects of silica fume, aggregate type, and size on post peak response of concrete in bending, *ACI Materials Journal*, **96**, 74-83.
- Taşdemir, M.A., Karihaloo, B.L.**, 2001a. Effect of aggregate volume fraction on the parameters of concrete : a meso-mechanical approach, *Magazine of Concrete Research*, **53(6)**, 405-415.
- Taşdemir, M.A., Karihaloo, B.L.**, 2001b. Effect of Type and Volume Fraction of Aggregate on the Fracture Properties of Concrete, *Framcos 4*, Paris, p. 123-129.
- Walsh, P.F.**, 1972. Fracture of Plain Concrete, *Indian Concrete Journal*, **46**, 469-470.
- Walsh, P.F.**, 1976. Crack Initiation in Plain Concrete, *Magazine of Concrete Research*, **28**, 37-41.
- 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.

Yıldırım, H., Taşdemir, M.A. and Oktar, O.N., 1995. Effect of aggregate concentration on the strength and the tensile strain capacity of concrete, *ERMCO-95: 11th European Ready Mixed Concrete Congress*, Istanbul, 471-480.

Zhang, D. and Wu, K., 2001. Fracture properties of high-strength concrete, *Journal of Materials in civil Engineering*, **127(1)**, 86-88.

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.

http://www.yks-yapkim.com/MBTturkey/Products/Category_01

.

EKLER

EK A : Deney sonuçları

Tablo A.1. Basınç deneyine tabi tutulan küp numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerleri.

	Numune No	Maksimum Yük (kN)	Küp Dayanımı (MPa)
Beton	Beton 1-1	1.625	72,22
	Beton 1-2	1.910	84,89
	Beton 1-3	1.820	80,89
	Beton 2-1	1.470	65,33
	Beton 2-2	1.520	67,56
	Beton 2-3	1.680	74,67
Harç	Harç 1-1	1.540	68,44
	Harç 1-2	1.560	69,33
	Harç 1-3	1.595	70,89
	Harç 2-1	1.250	55,56
	Harç 2-2	1.340	59,56
	Harç 2-3	1.460	64,89
Çimento Hamuru	Hamur 1-1	2.000	88,89
	Hamur 1-2	2.125	94,44
	Hamur 1-3	1.925	85,56
	Hamur 2-1	1.490	66,22
	Hamur 2-2	1.325	58,89
	Hamur 2-3	1.260	56,00

Tablo A.2. Basınç deneyine tabi tutulan silindir numunelerden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri.

	Numune No	Maksimum Yük (kN)	Silindir Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Beton	Beton 1-1	525,0	66,9	29199
	Beton 1-2	450,0	57,3	34209
	Beton 1-3	515,0	65,6	-
	Beton 2-1	470,0	59,9	38104
	Beton 2-2	507,5	64,6	29375
	Beton 2-3	425,0	54,1	31112
Harç	Harç 1-1	417,5	53,2	29620
	Harç 1-2	502,5	64,0	24784
	Harç 1-3	472,5	60,2	24282
	Harç 2-1	437,5	55,7	28268
	Harç 2-2	567,5	72,3	29239
	Harç 2-3	572,5	72,9	-
Çimento Hamuru	Hamur 1-1	440,0	56,1	16962
	Hamur 1-2	560,0	71,3	18417
	Hamur 1-3	395,0	50,3	-
	Hamur 2-1	450,0	57,3	20671
	Hamur 2-2	325,0	41,4	19568
	Hamur 2-3		-	-

Tablo A.3. Yarma deneyine tabi tutulan disk numunelerden elde edilen yarma çekme dayanımı değerleri.

	Numune No	Kalınlık (mm)	Maksimum Yük (kN)	Çap (mm)	Yarma-Çekme Dayanımı (MPa)
Beton	Beton 1-1	61,0	80,0	150	5,57
	Beton 1-2	61,0	51,7	150	3,60
	Beton 1-3	61,0	64,6	150	4,50
	Beton 1-4	61,0	67,7	150	4,71
	Beton 1-5	61,0	60,6	150	4,22
	Beton 1-6	61,0	62,3	150	4,34
	Beton 2-1	61,0	66,8	150	4,65
	Beton 2-2	60,0	77,2	150	5,46
	Beton 2-3	60,0	72,2	150	5,11
	Beton 2-4	59,0	56,7	150	4,08
	Beton 2-5	61,0	67,3	150	4,68
	Beton 2-6	60,0	60,8	150	4,30
Harç	Harç 1-1	60,0	54,3	150	3,84
	Harç 1-2	60,0	66,4	150	4,70
	Harç 1-3	61,0	59,5	150	4,14
	Harç 1-4	60,0	70,9	150	5,02
	Harç 1-5	60,0	47,5	150	3,36
	Harç 1-6	60,0	54,3	150	3,84
	Harç 2-1	60,0	71,7	150	5,07
	Harç 2-2	60,0	64,6	150	4,57
	Harç 2-3	60,0	59,0	150	4,18
	Harç 2-4	60,0	80,4	150	5,69
	Harç 2-5	60,0	73,8	150	5,22
	Harç 2-6	61,0	66,9	150	4,66
Çimento Hamuru	Hamur 1-1	59,0	26,2	150	1,89
	Hamur 1-2	59,0	43,9	150	3,16
	Hamur 1-3	59,0	24,0	150	1,73
	Hamur 1-4	60,0	34,3	150	2,43
	Hamur 1-5	60,0	41,5	150	2,94
	Hamur 1-6	60,0	40,8	150	2,89
	Hamur 2-1	60,0	39,2	150	2,77
	Hamur 2-2	60,0	32,0	150	2,26
	Hamur 2-3	60,0	38,0	150	2,69
	Hamur 2-4	60,0	52,0	150	3,68
	Hamur 2-5	60,0	48,0	150	3,40
	Hamur 2-6	60,0	54,2	150	3,84

Tablo A.4. 70X70X280 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin ebat, çentik – kiriş derinliği oranı, etkin yükseklik ve ağırlık değerleri.

	Numune Adı	Ebatlar (cm)	a/W	H _{etkin} (cm)	Prizma Ağırlığı (kg)
Beton	B1-1	6,90X7,10X28,00	0,5	3,50	3,22
	B1-2	7,00X7,00X28,00	0,5	3,40	3,22
	B1-3	7,10X7,00X28,00	0,5	3,40	3,28
	B1-4	7,00X7,00X28,00	0,5	3,40	3,25
	B2-1	7,00X7,00X28,00	0,1	6,10	3,32
	B2-2	7,00X7,00X28,00	0,1	6,10	3,29
	B2-3	7,10X7,10X28,00	0,1	6,10	3,36
	B2-4	7,00X7,00X28,00	0,1	6,10	3,29
Harç	Ç1-1	7,10X7,00X28,00	0,5	3,40	3,10
	Ç1-2	7,00X7,00X28,00	0,5	3,45	3,09
	Ç1-3	7,10X7,00X28,00	0,5	3,45	3,18
	Ç1-4	7,10X7,10X28,00	0,5	3,50	3,14
	Ç2-1	7,10X7,00X28,00	0,1	6,15	3,08
	Ç2-2	7,00X7,00X28,00	0,1	6,10	3,08
	Ç2-3	7,10X7,00X28,00	0,1	6,05	3,10
	Ç2-4	7,10X7,00X28,00	0,1	6,10	3,12
Çimento Hamuru	H2-1	6,80X6,90X28,00	0,5	3,40	2,80
	H2-2	7,00X7,00X28,00	0,5	3,30	2,80
	H2-3	7,10X7,10X28,00	0,5	3,40	2,87
	H2-4	7,10X6,90X28,00	0,5	3,40	2,88
	H1-1	7,10X7,10X28,00	0,3	3,10	2,83
	H1-2	7,00X7,00X28,00	0,3	3,10	2,90
	H1-3	7,00X7,00X8,00	0,1	6,10	2,84
	H1-4	7,00X7,00X28,00	0,1	6,10	2,86

Tablo A.5. 100X100X500 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin ebat, çentik – kiriş derinliği oranı, etkin yükseklik ve ağırlık değerleri.

	Numune Adı	Ebatlar (cm)	a/W	H _{etkin} (cm)	Prizma Ağırlığı (kg)
Beton	B1-1	10,10X10,00X51,00	0,5	5,20	12,10
	B1-2	10,20X10,00X51,00	0,5	5,20	12,18
	B1-3	10,10X10,00X51,00	0,5	5,20	12,20
	B1-4	10,00X10,00X51,00	0,5	5,30	12,10
	B2-1	10,00X10,00X51,00	0,1	9,10	11,88
	B2-2	10,00X10,10X1,00	0,1	9,10	12,06
	B2-3	10,10X9,90X51,00	0,1	9,10	11,99
	B2-4	10,00X10,00X51,00	0,1	9,05	12,05
Harç	Ç1-1	10,00X10,00X51,00	0,5	5,20	11,35
	Ç1-2	10,00X10,00X51,00	0,5	5,20	11,35
	Ç1-3	10,20X10,10X51,00	0,5	5,20	11,50
	Ç1-4	10,10X10,00X51,00	0,5	5,20	11,45
	Ç2-1	10,00X10,00X51,00	0,1	9,00	11,75
	Ç2-2	10,00X10,00X51,00	0,1	9,05	11,60
	Ç2-3	10,00X10,00X51,00	0,1	9,05	11,56
	Ç2-4	10,00X10,00X51,00	0,1	9,00	11,61
Çimento Hamuru	H1-1	10,20X10,00X51,00	0,5	5,20	10,74
	H1-2	10,20X10,00X51,00	0,5	5,20	10,76
	H1-3	10,00X10,20X51,00	0,5	5,30	10,66
	H1-4	9,90X10,00X51,00	0,5	5,20	10,55
	H2-1	10,00X10,10X51,00	0,1	9,00	10,64
	H2-2	10,10X10,00X51,00	0,1	9,00	10,72
	H2-3	9,90X10,00X51,00	0,1	9,10	10,52
	H2-4	-	0,1	-	-

Tablo A.6. 150X150X750 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin ebat, çentik – kiriş derinliği oranı, etkin yükseklik ve ağırlık değerleri.

	Numune Adı	Ebatlar (cm)	a/W	H _{etkin} (cm)	Prizma Ağırlığı (kg)
Beton	B1-1	15,00X15,00X75,00	0,5	7,60	39,70
	B1-2	15,00X15,00X75,00	0,5	7,60	39,50
	B1-3	15,00X15,00X75,00	0,5	7,60	39,85
	B1-4	15,00X15,00X74,60	0,5	7,70	39,60
	B2-1	15,00X14,90X5,00	0,1	13,60	39,50
	B2-2	15,00X15,00X75,00	0,1	13,60	39,50
	B2-3	15,00X15,00X74,80	0,1	13,60	39,50
	B2-4	15,00X15,00X75,00	0,1	13,60	39,70
Harç	Ç1-1	15,10X15,00X75,00	0,5	7,70	37,70
	Ç1-2	15,00X15,00X74,60	0,5	7,60	37,50
	Ç1-3	15,00X15,00X75,00	0,5	7,60	37,80
	Ç1-4	15,00X15,00X75,00	0,5	7,60	37,40
	Ç2-1	15,00X14,90X5,00	0,1	13,60	38,30
	Ç2-2	15,00X15,00X75,00	0,1	13,60	38,10
	Ç2-3	14,90X14,90X75,00	0,1	13,60	38,10
	Ç2-4	15,00X15,00X74,80	0,1	13,60	38,00
Çimento Hamuru	H1-1	15,00X15,00X75,00	0,5	7,70	34,50
	H1-2	15,00X15,00X75,00	0,5	7,60	34,40
	H1-3	15,00X15,00X75,00	0,5	7,60	34,40
	H1-4	-		-	-
	H2-1	14,90X14,90X75,00	0,1	13,60	35,20
	H2-2	14,90X15,00X75,00	0,1	13,60	34,60
	H2-3	15,00X15,00X74,60	0,1	13,60	34,60
	H2-4	15,00X14,80X75,00	0,1	13,60	34,50

Tablo A.7. 70X70X280 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları

	Numune Adı	Maksimum Yük (kN)	Göçme anındaki sehim (mm)	Yük-sehim eğrisi altında kalan alan (Nmm)	Kırılma Enerjisi (N/mm)	Net Eğilme Dayanımı (MPa)
Beton	B1-1	1,97	0,30	141,04	61,79	7,01
	B1-2	1,92	0,19	123,53	54,10	7,13
	B1-3	2,04	0,29	152,57	67,47	7,56
	B1-4	1,63	0,29	114,25	51,30	6,05
	B2-1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	B2-2	5,39	0,42	302,11	73,44	6,21
	B2-3	4,93	0,33	266,35	63,65	5,60
	B2-4	4,52	0,40	249,44	60,99	5,21
Harç	Ç1-1	1,52	0,30	119,32	52,70	5,55
	Ç1-2	1,27	0,25	85,07	37,95	4,57
	Ç1-3	1,47	0,36	125,17	55,01	5,21
	Ç1-4	1,65	0,32	145,66	62,02	5,70
	Ç2-1	3,31	0,27	173,80	42,02	3,75
	Ç2-2	3,63	0,28	246,65	59,44	4,18
	Ç2-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ç2-4	3,74	0,26	193,87	46,34	4,25
Çimento Hamuru	H2-1	0,60	0,17	37,16	17,57	2,26
	H2-2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	H2-3	0,73	0,14	37,36	16,89	2,68
	H2-4	0,80	0,35	89,10	40,52	2,92
	H1-1	1,53	0,16	80,68	23,34	2,48
	H1-2	1,31	0,17	64,49	19,62	2,25
	H1-3	1,47	0,08	78,27	18,80	1,69
	H1-4	2,17	0,06	163,98	38,77	2,50

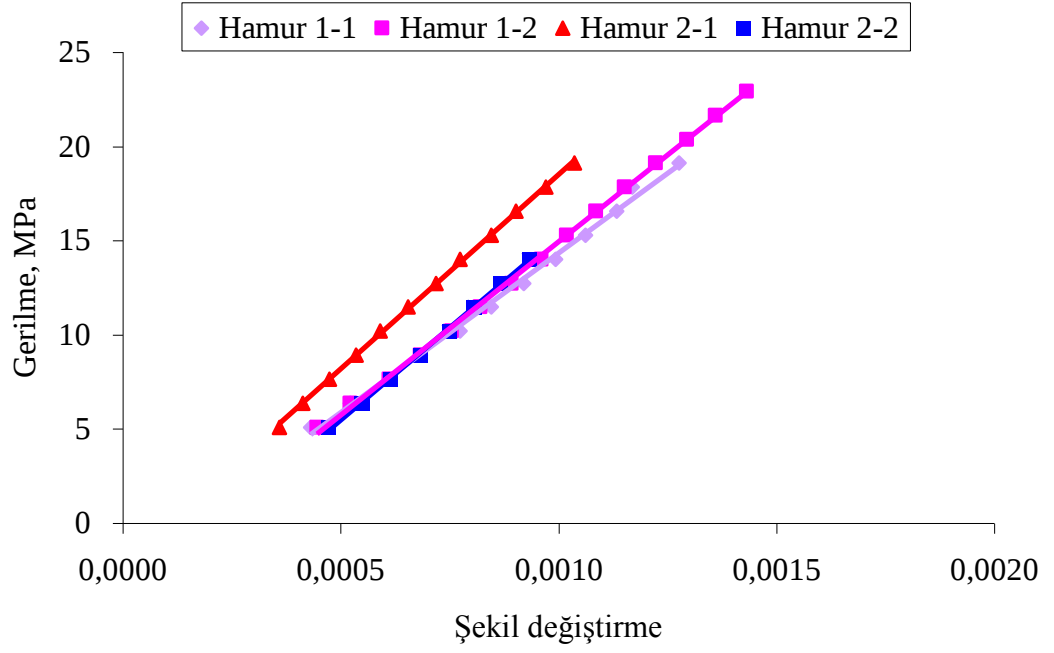
Tablo A.8. 100X100X500 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları

	Numune Adı	Maksimum Yük (kN)	Göçme anındaki sehim (mm)	Yük-sehim eğrisi altında kalan alan (Nmm)	Kırılma Enerjisi (N/mm)	Net Eğilme Dayanımı (MPa)
Beton	B1-1	2,25	0,65	380,55	85,38	4,99
	B1-2	2,26	0,61	424,83	93,30	5,02
	B1-3	2,62	0,58	377,83	83,65	5,82
	B1-4	2,41	0,71	395,15	87,73	5,16
	B2-1	5,94	0,94	1215,45	143,46	4,30
	B2-2	6,88	0,60	924,43	107,98	4,99
	B2-3	7,62	0,72	782,09	94,51	5,58
	B2-4	5,29	0,74	904,53	107,96	3,88
Harç	Ç1-1	2,10	0,36	229,98	50,62	4,67
	Ç1-2	1,75	0,60	243,71	57,47	3,88
	Ç1-3	1,81	0,75	246,67	60,22	3,97
	Ç1-4	1,73	0,48	222,13	51,33	3,84
	Ç2-1	5,45	1,39	803,12	103,89	4,03
	Ç2-2	6,07	0,76	701,31	85,39	4,45
	Ç2-3	5,33	0,75	501,98	63,24	3,91
	Ç2-4	5,88	0,55	677,70	81,03	4,35
Çimento Hamuru	H1-1	1,08	0,65	181,83	45,90	2,39
	H1-2	1,01	0,34	115,70	27,93	2,24
	H1-3	1,02	0,99	234,53	60,49	2,19
	H1-4	1,09	0,53	151,87	38,41	2,43
	H2-1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	H2-2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	H2-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	H2-4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

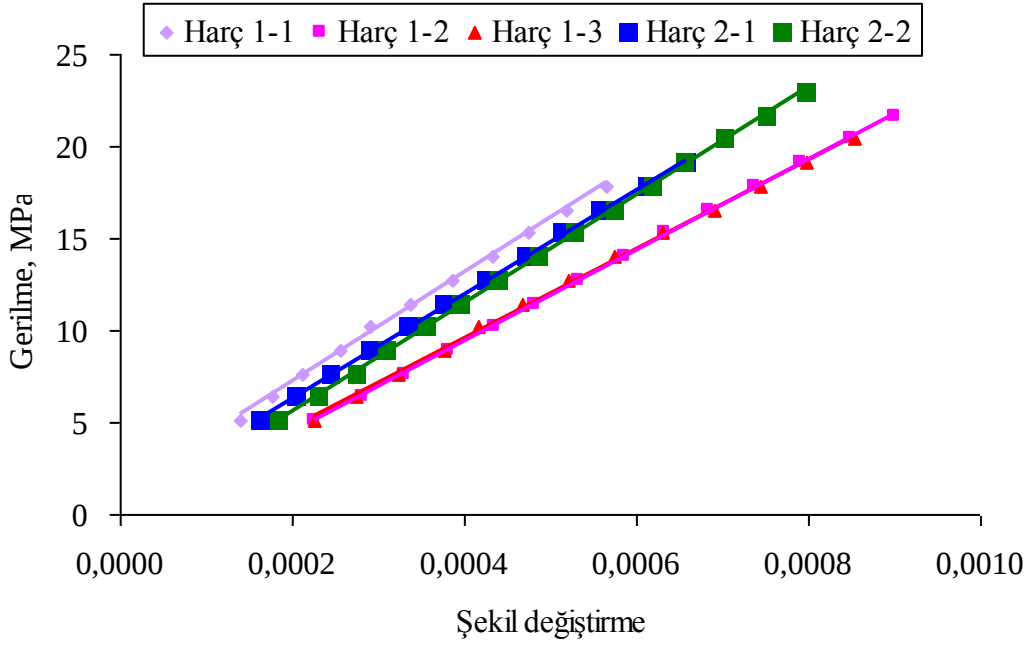
Tablo A.9. 150X150X750 mm. boyutlarındaki prizma numunelerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları

	Numune Adı	Maksimum Yük (kN)	Göçme anındaki sehim (mm)	Yük-sehim eğrisi altında kalan alan (Nmm)	Kırılma Enerjisi (N/mm)	Net Eğilme Dayanımı (MPa)
Beton	B1-1	4,49	1,24	1040,55	125,70	4,66
	B1-2	5,29	0,96	907,85	106,24	5,50
	B1-3	4,99	1,37	1206,14	144,09	5,18
	B1-4	4,41	1,33	984,57	121,72	4,46
	B2-1	11,43	0,91	1827,24	104,40	3,76
	B2-2	9,84	1,28	1820,48	108,96	3,19
	B2-3	12,63	0,97	1991,05	112,60	4,10
	B2-4	10,01	1,25	1611,55	98,37	3,25
Harç	Ç1-1	3,32	1,06	820,26	98,52	3,36
	Ç1-2	5,32	1,44	1026,03	128,05	5,52
	Ç1-3	3,86	1,58	1383,16	163,11	4,01
	Ç1-4	4,22	1,40	1303,55	150,89	4,38
	Ç2-1	10,24	0,93	1832,77	104,48	3,34
	Ç2-2	13,53	0,36	2331,46	119,60	4,39
	Ç2-3	0,45	0,39	91,32	10,34	0,15
	Ç2-4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Çimento Hamuru	H1-1	1,73	0,55	287,04	37,96	1,75
	H1-2	1,37	0,54	224,16	32,78	1,43
	H1-3	1,94	0,75	391,13	52,33	2,01
	H1-4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	H2-1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	H2-2	5,77	0,79	904,20	55,34	1,88
	H2-3	4,95	0,19	706,27	37,27	1,61
	H2-4	5,79	0,63	681,48	42,44	1,90

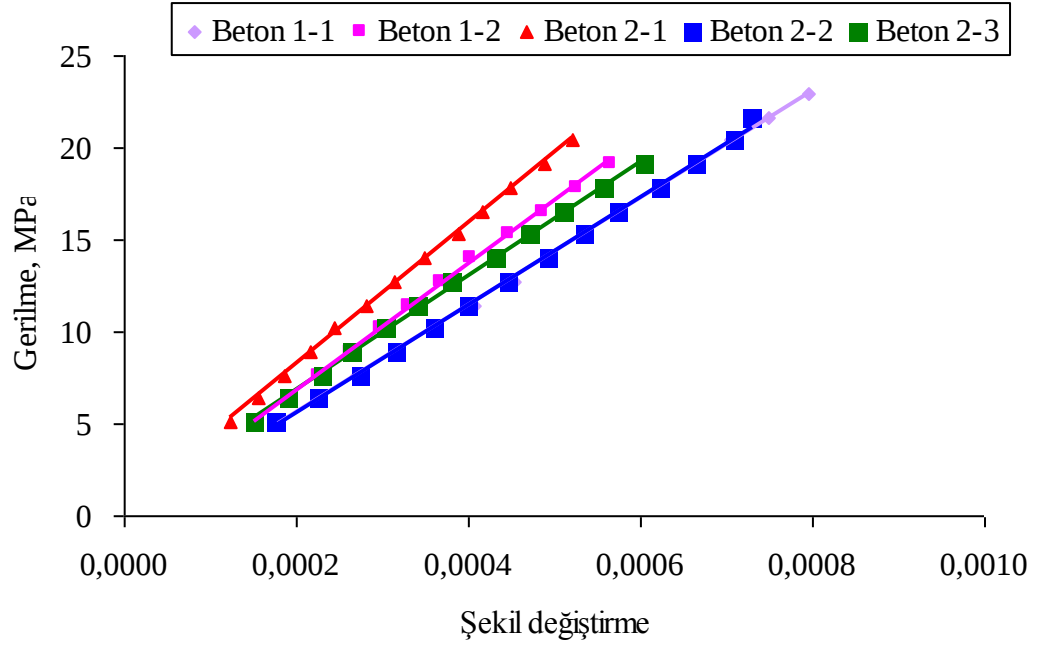
EK B : Çimento hamuru, harç ve beton numunelere ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri.



Şekil B.1 Çimento hamuru numunelere ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri.

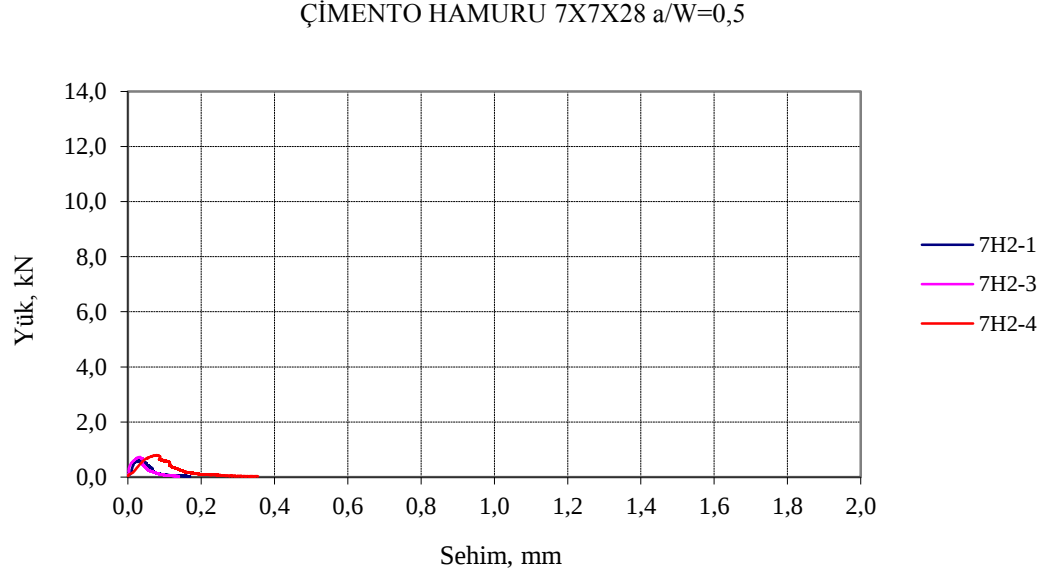


Şekil B.2 Harç numunelere ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri.

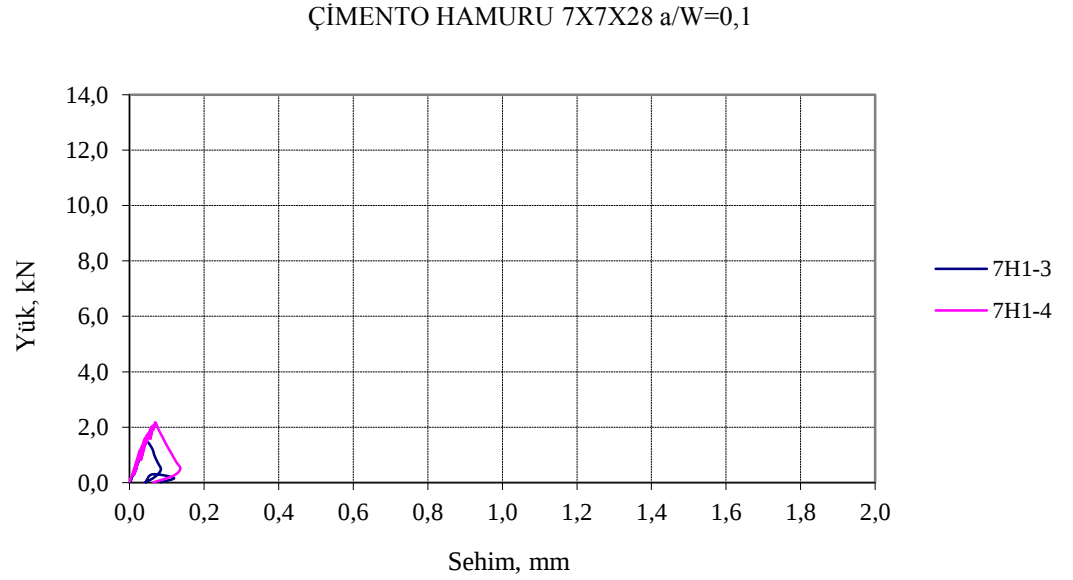


Şekil B.3 Beton numunelere ait gerilme – şekil değıştirme grafikleri.

EK C : Çimento hamuru, harç ve beton numunelere ait üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrileri.

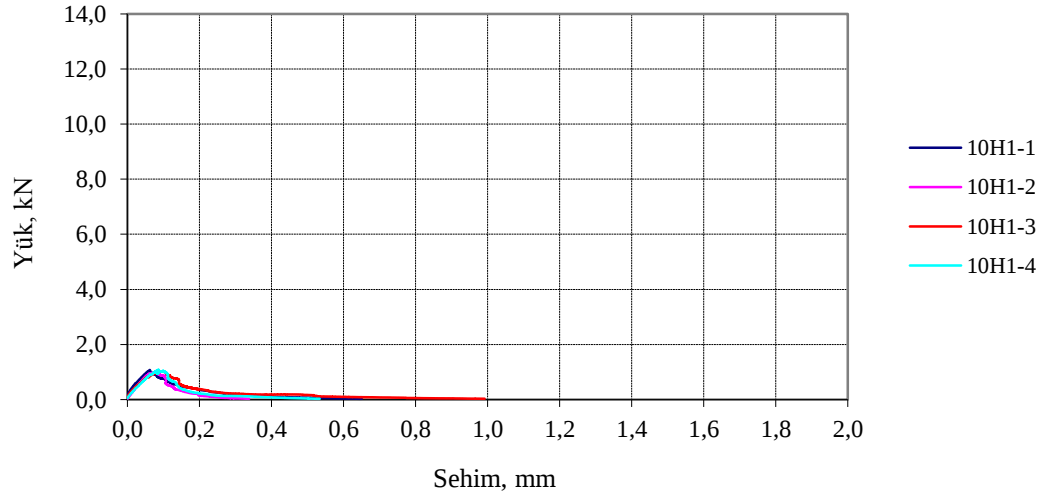


Şekil C.1 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri



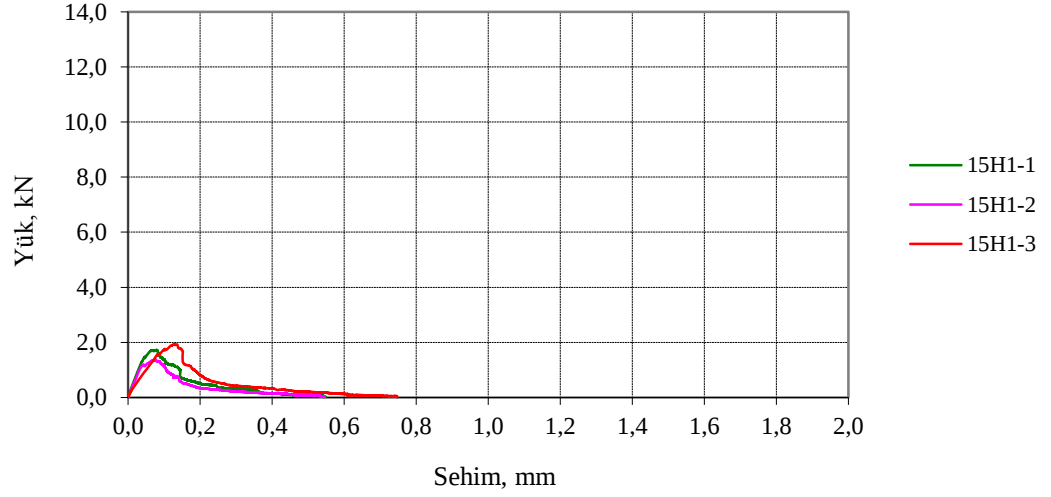
Şekil C.2 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 70X70X280 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

ÇİMENTO HAMURU 10X10X50 a/W=0,5



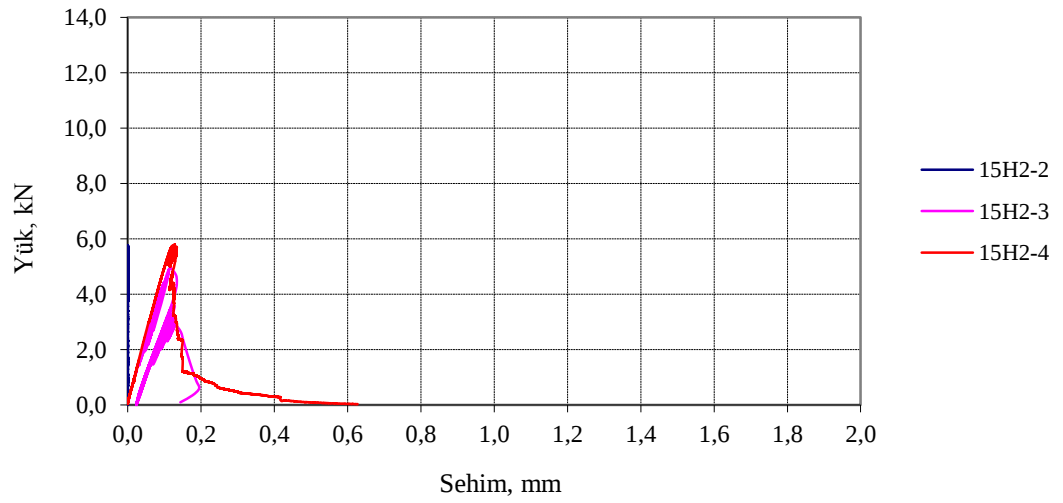
Şekil C.3 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

ÇİMENTO HAMURU 15X15X75 a/W=0,5

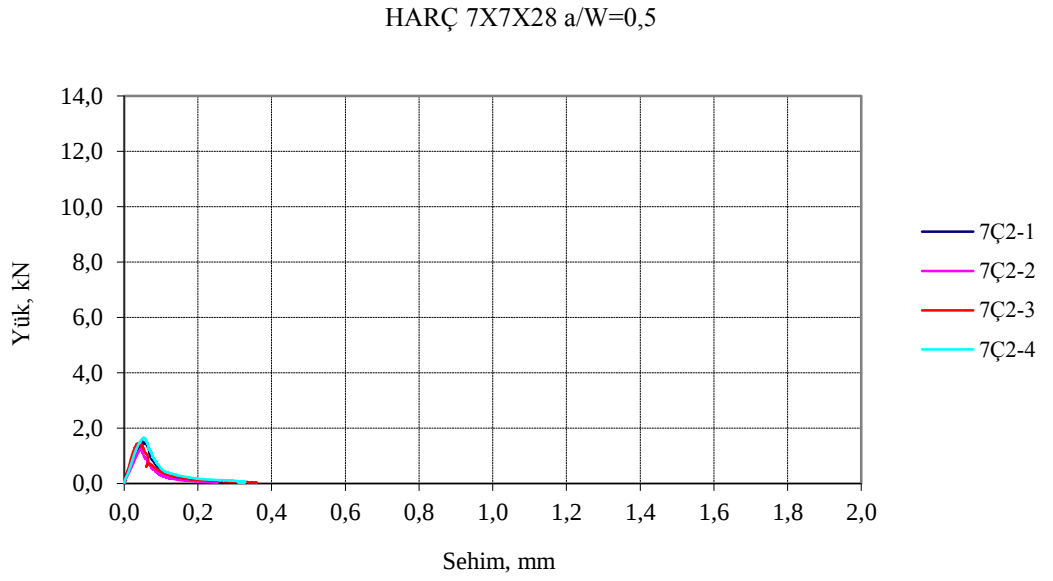


Şekil C.4 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

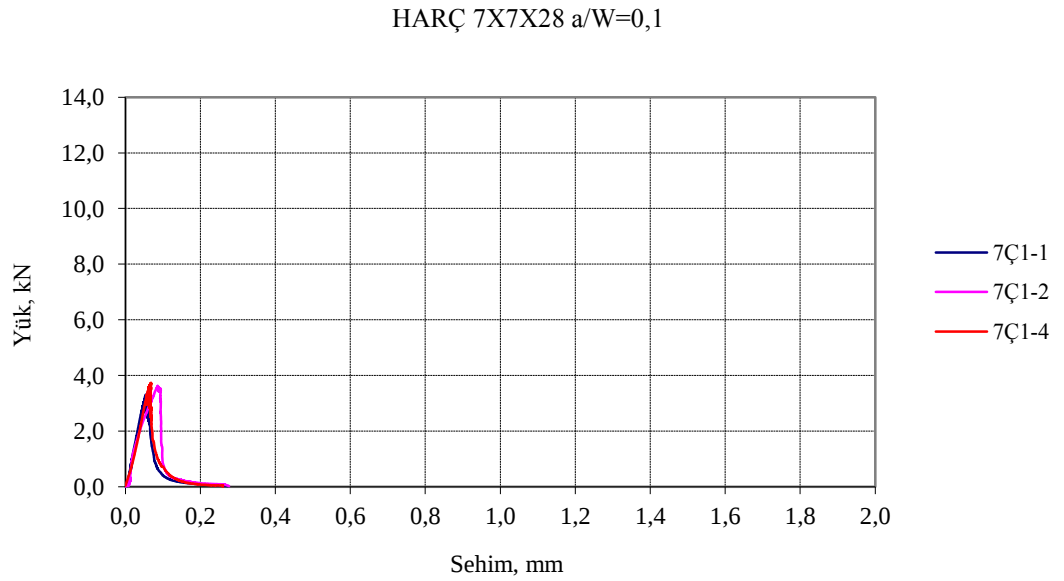
ÇİMENTO HAMURU 15X15X75 a/W=0,1



Şekil C.5 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

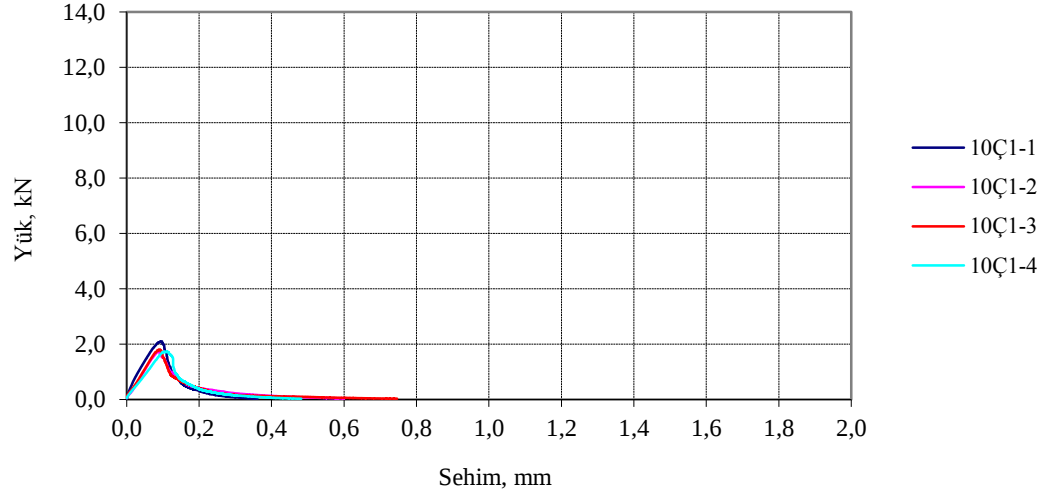


Şekil C.6 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri



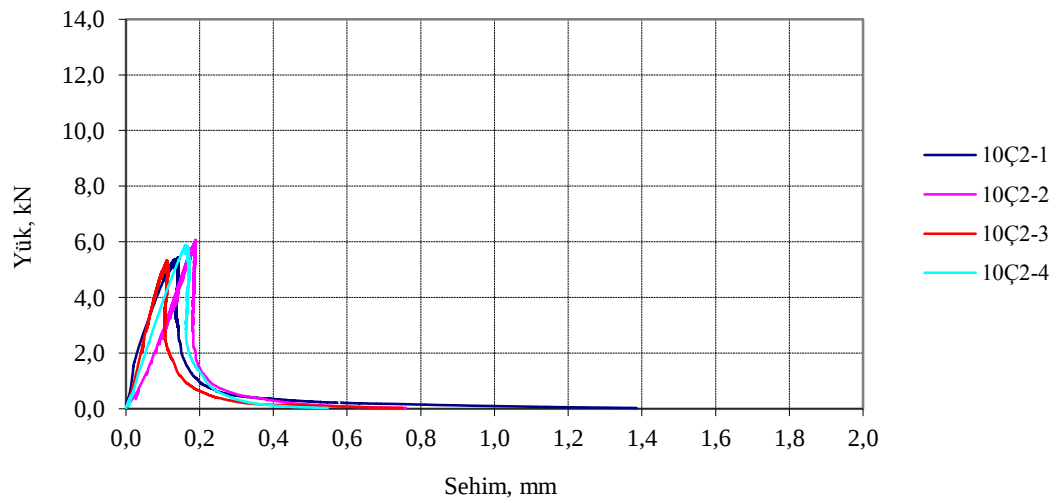
Şekil C.7 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

HARÇ 10X10X50 a/W=0,5



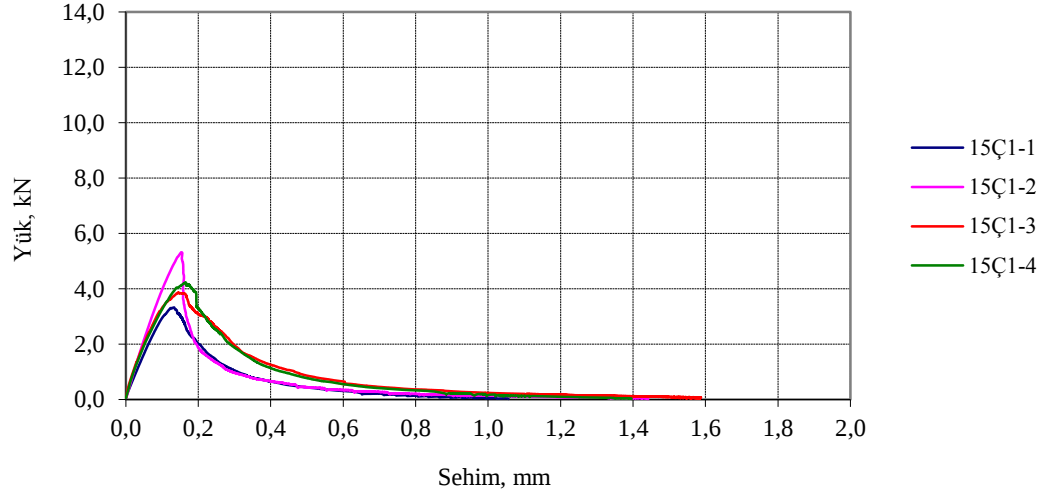
Şekil C.8 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

HARÇ 10X10X50 a/W=0,1



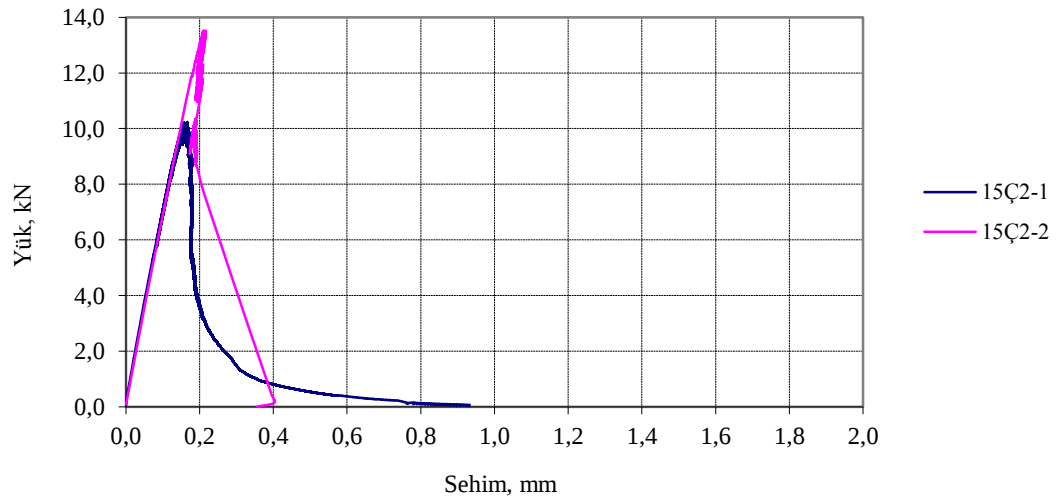
Şekil C.9 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

HARÇ 15X15X75 a/W=0,5

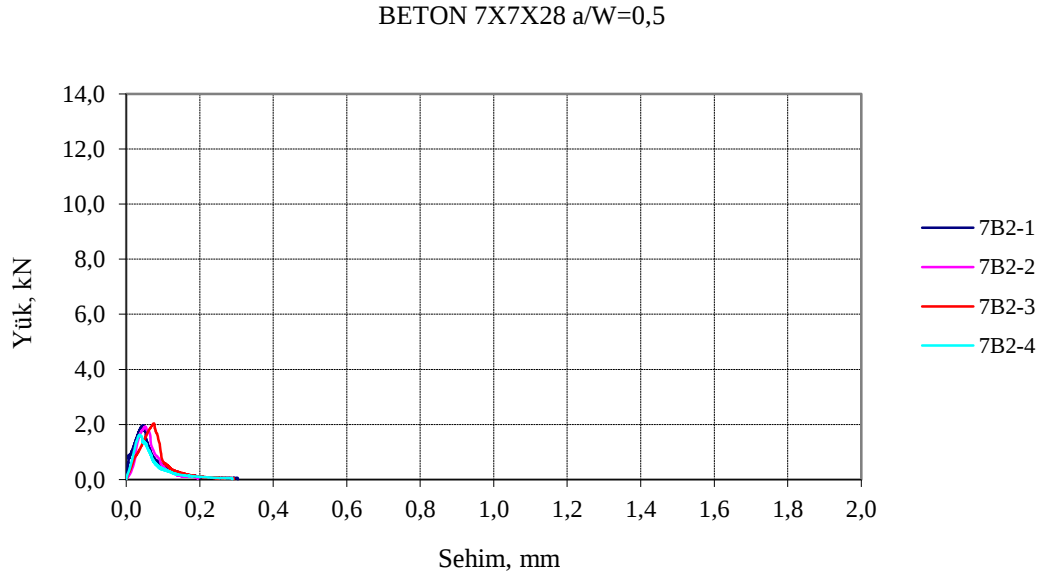


Şekil C.10 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

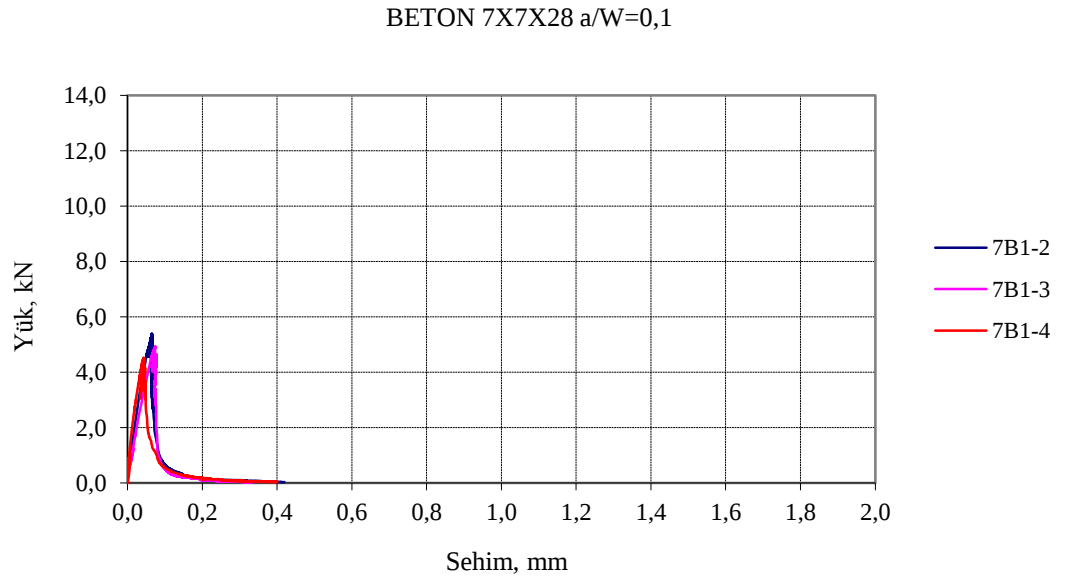
HARÇ 15X15X75 a/W=0,1



Şekil C.11 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

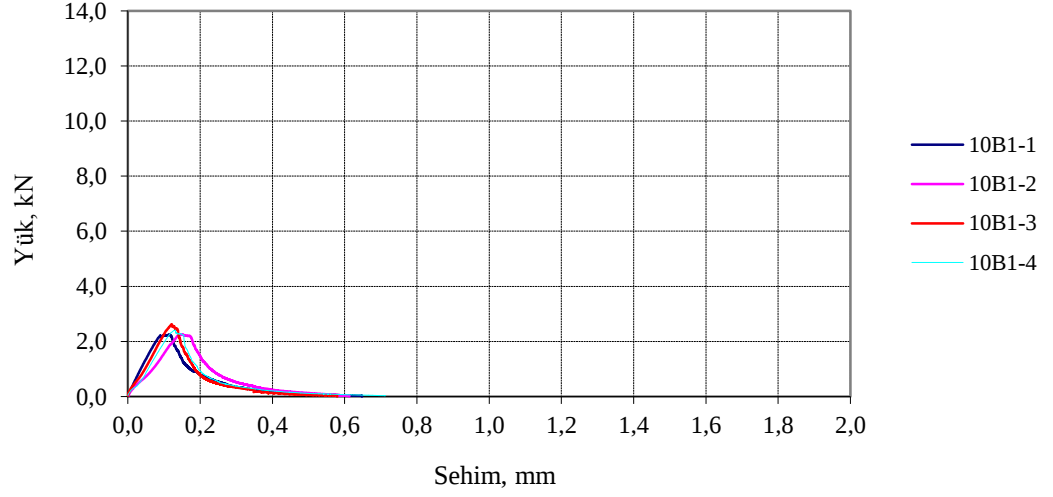


Şekil C.12 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri



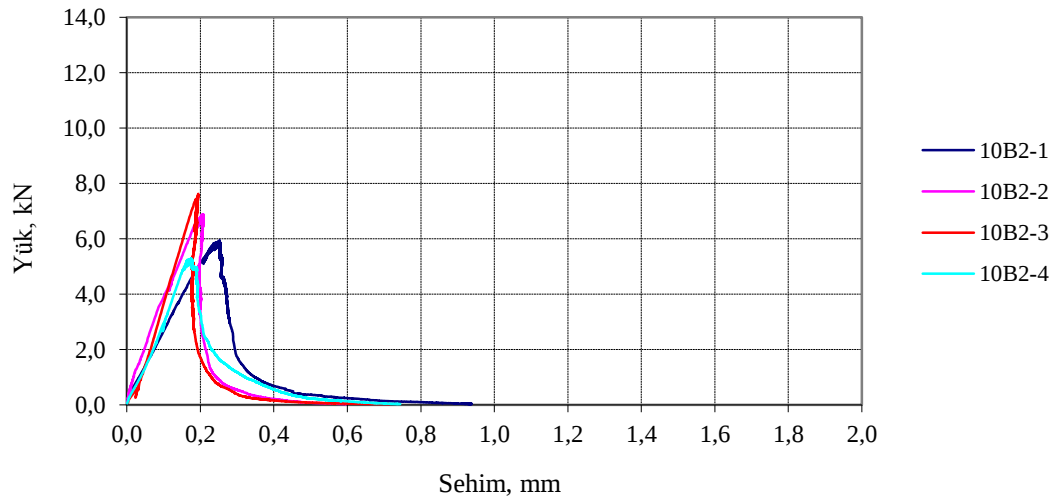
Şekil C.13 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 70X70X280 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

BETON 10X10X50 a/W=0,5



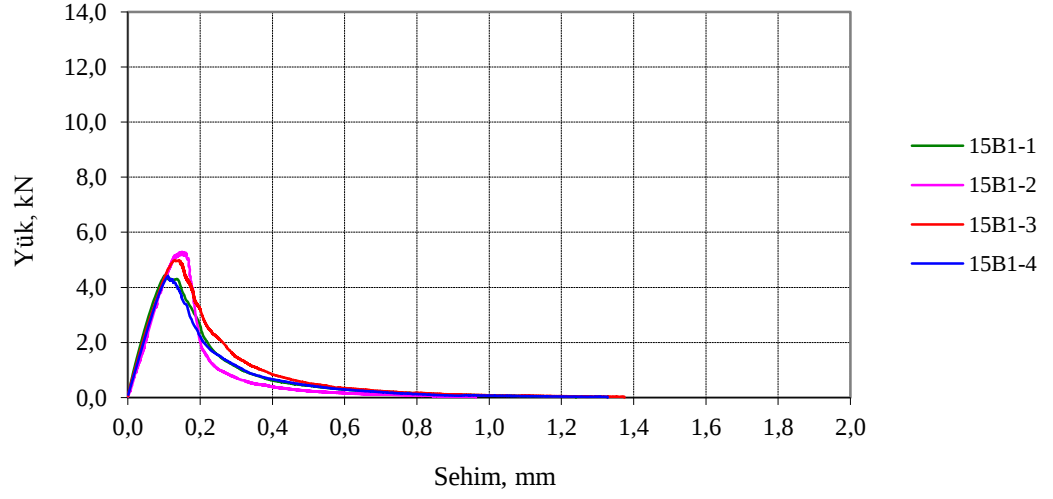
Şekil C.14 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

BETON 10X10X50 a/W=0,1



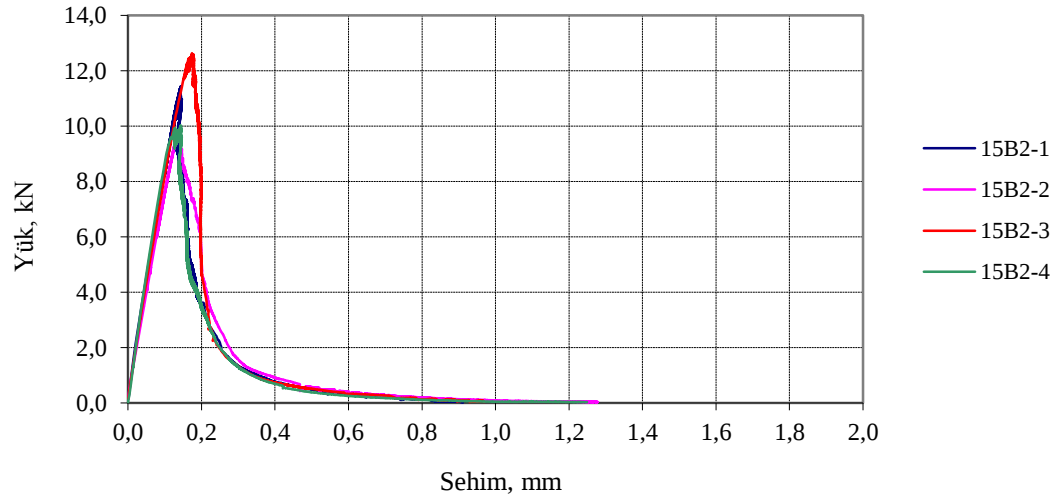
Şekil C.15 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 100X100X500 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

BETON 15X15X75 a/W=0,5



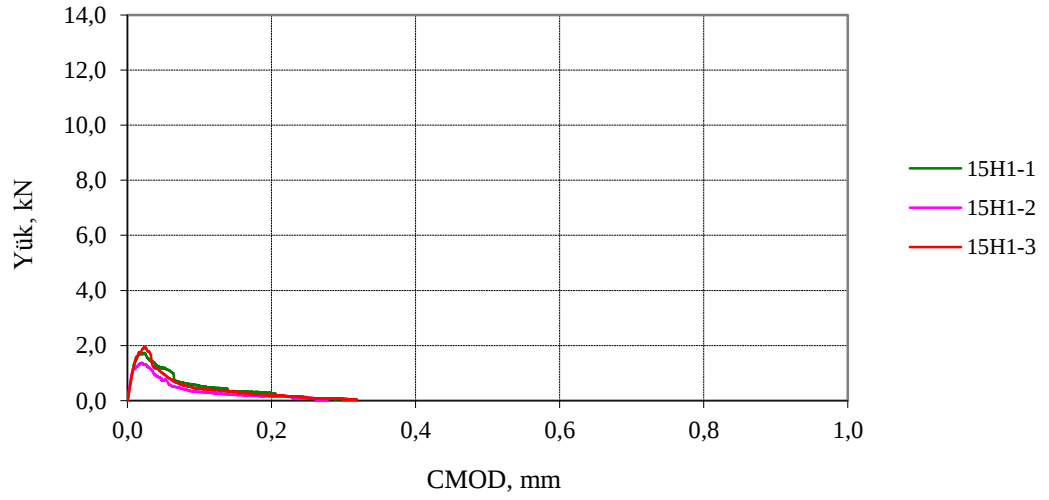
Şekil C.16 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

BETON 15X15X75 a/W=0,1



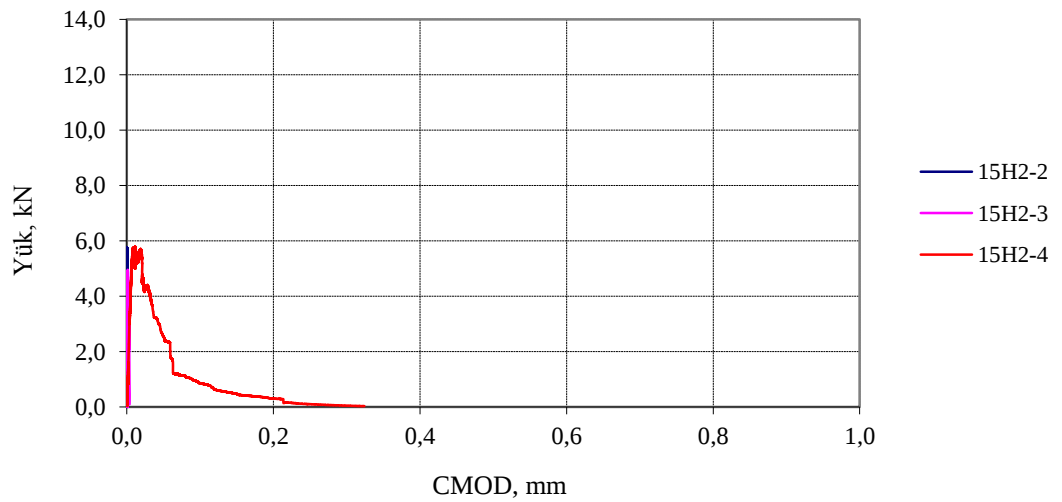
Şekil C.17 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-sehim eğrileri

ÇİMENTO HAMURU 15X15X75 a/W=0,5



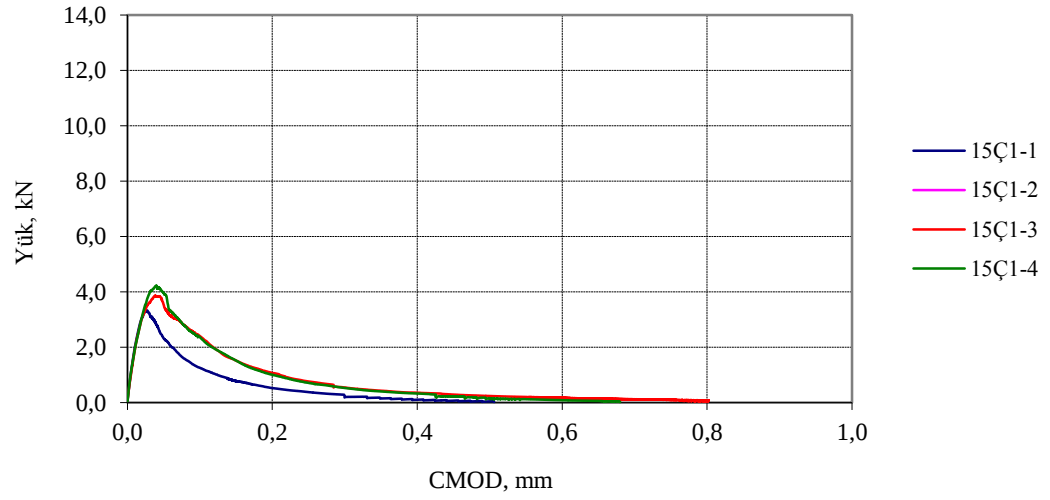
Şekil D.1 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri

ÇİMENTO HAMURU 15X15X75 a/W=0,1



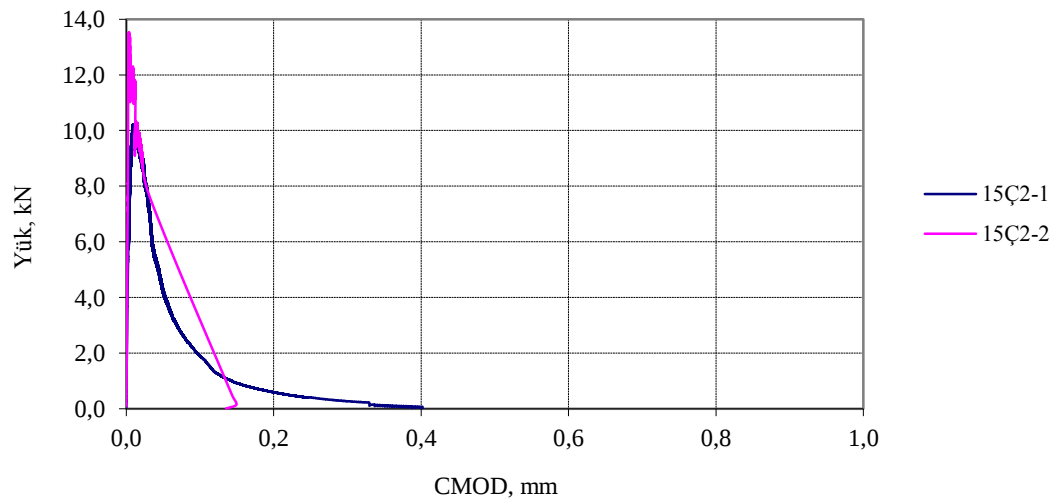
Şekil D.2 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki çimento hamurundan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri

HARÇ 15X15X75 a/W=0,5



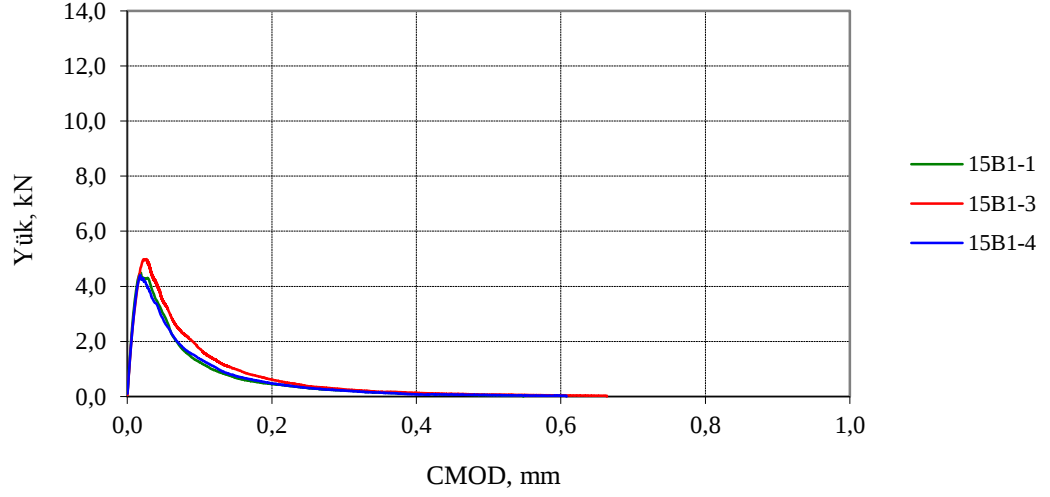
Şekil D.3 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri

HARÇ 15X15X75 a/W=0,1



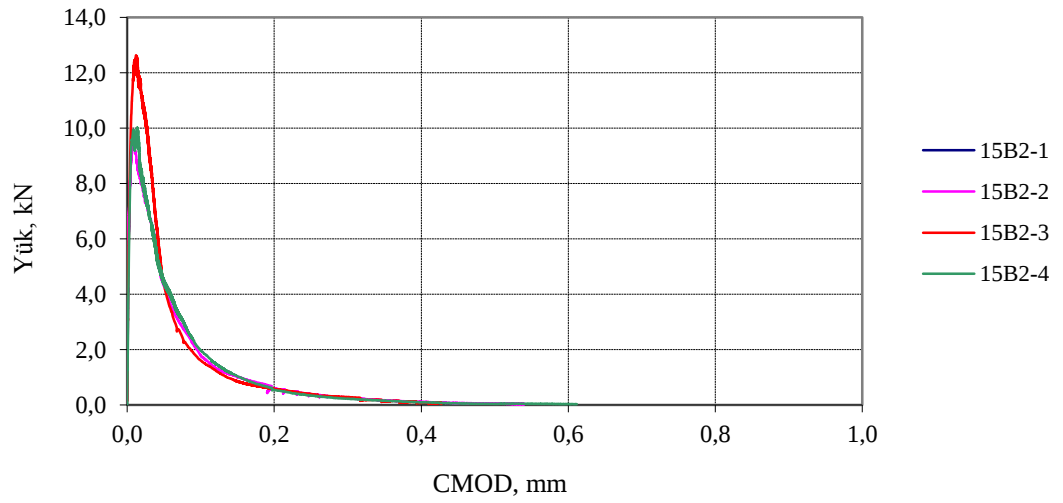
Şekil D.4 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,1 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki harçtan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri

BETON 15X15X75 a/W=0,5



Şekil D.5 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri

BETON 15X15X75 a/W=0,1



Şekil D.6 Çentik derinliği – kiriş derinliği =0,5 olan 150X150X750 mm boyutlarındaki betondan yapılmış prizma numunelere ait yük-CMOD eğrileri



Şekil E.1 Küp numuneler üzerinde yapılan basıncı deneyi



Şekil E.2 Silindir numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi



Şekil E.3 Silindir numuneler üzerinde yapılan elastisite modülü deneyi



Şekil E.4 Disk numuneler üzerinde yapılan yarma çekme deneyi



Şekil E.5 Prizma numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyi



Şekil E.6 Prizma numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyi

ÖZGEÇMİŞ

Önder MEŞE, 20 Eylül 1976'da Muş'un Varto İlçesi'nde doğdu. Lise öğrenimini Konya Meram Gazi Lisesi'nde tamamladı. 1993 yılında girdiği ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1998 yılında mezun oldu. 1999 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nün İnşaat Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği Programına başlayan Önder MEŞE, Yapı Malzemesi Tez Alanında çalışmalarını sürdürmektedir.