

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN LİNEER OLMAYAN
KIRILMA MEKANİĞİ PRENSİPLERİYLE İNCELENMESİ**

Kürşat Esat ALYAMAÇ

Tez Yöneticisi:
Doç.Dr. Ragıp İNCE

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN LİNEER OLMAYAN
KIRILMA MEKANİĞİ PRENSİPLERİYLE İNCELENMESİ**

Kürşat Esat ALYAMAÇ

Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, **30/05** 2008 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile başarılı / ~~başarısız~~ olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Ragıp İNCE

Üye: Prof. Dr. Ragıp ERDÖL

Üye: Prof. Ali Sayıl ERDOĞAN

Üye: Prof. Dr. Mehmet ÜLKER

Üye: Yrd. Doç. Dr. Erdiñç ARICI

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun// tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Doktora tezimle ilgili çalışmaların başından sonuna takipçisi olup, bana her konuda yardımcı olan Danışman Hocam Sayın Doç.Dr. Ragıp İNCE'ye, manevi gücünü her an yanımda hissettiğim Yapı Anabilim Dalı Başkanı Hocam Sayın Prof. Ali Sayıl ERDOĞAN'a, deneysel çalışmalara değeri ölçülemez katkılarından dolayı Yapı Laboratuvarı Teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e, tez projesi ve enstitü ile ilgili tüm işlemlerin en kısa zamanda yapılarak çalışmaların aksamamasını önleyen Sayın Doç.Dr. M. Emin EMİROĞLU'na (F.Ü.M.F. İnşaat Müh. Böl. Hidrolik Ana Bilim Dalı Başkanı), literatür çalışmalarına katkısından dolayı Sayın Yrd.Doç.Dr. Erdinç ARICI'ya (F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü), deneysel çalışmaların bir bölümünün aksamamasını yedek teçhizatlarıyla önleyen Sayın Yrd.Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU'na (F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü), kimyasal katkıların çok kısa zamanda elimize ulaşmasını sağlayan Sayın İnş. Yük. Müh. Zülfü ER'e, yine kimyasal katkı temininde göstermiş olduğu kolaylık ve incelikten dolayı Sayın İnş. Müh. Dr. Ali Raif SAĞLAM'a ve SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye, farklı ocaklardan agrega temininde eşsiz yardım gösteren; Sayın İnş. Müh. Dr. Erhan YALÇIN'a, Sayın İnş. Müh. Ramazan GÜRGÖZE'ye ve Dilek İnşaat A.Ş. Elazığ Yetkilileri'ne, çimento deneylerinin yapılmasında verdikleri emek ve gösterdikleri sabırdan dolayı Elazığ Altınova Çimento Sanayi Ticaret A.Ş.'ye, deneysel çalışmaların çok önemli bir bölümüne fiilen yardımcı olan Sayın İnş. Müh. Mustafa ÇETİN'e, deneysel çalışmalar sırasında gösterdikleri iyi niyet ve yardımlardan dolayı Sayın Mümtaz YENTÜR'e (F.Ü. İnş. Müh. Bölüm Şefi) ve Sayın Mehmet CİPLİ'ye (F.Ü. İnş. Müh. Bölüm Sekreteri), mermer tozu temininde gösterdiği yardım ve iyi niyet için Bayraklar Mermer A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Yılmaz BAYRAK'a, bu tez çalışmasını proje ile destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (FÜBAP), bir şekilde emeği geçmiş tüm arkadaşlarıma ve öğrencilerime, hayatımın tüm güzelliklerini borçlu olduğum iki koca çınara; anne ve babama, varlığıyla, ilgisiyle ve sonsuz sabrıyla sınırsız güç bulduğum eşime, en derin saygı ve sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
ÇİZELGELER (TABLOLAR) LİSTESİ	VII
EKLER LİSTESİ	VIII
SİMGELER	IX
KISALTMALAR	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ	1
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON.....	4
2.1. Tanım.....	4
2.2. Tarihi Gelişimi.....	4
2.3. Kendiliğinden Yerleşen Beton Kullanımı.....	5
2.3.1. Kullanım Alanları.....	6
2.3.2. Avantajları.....	6
2.3.3. Dezavantajları.....	6
2.3.4. KYB'nin Geleceği.....	7
2.4. KYB'nin Mühendislik Özellikleri.....	7
2.4.1. Basınç Dayanımı.....	7
2.4.2. Çekme Dayanımı.....	8
2.4.3. Elastisite Modülü.....	8
2.4.4. Sünme.....	8
2.4.5. Rötire.....	8
2.4.6. Termal Genleşme Katsayısı.....	9
2.4.7. Betonarme ve Öngerilmeli Sistemde Aderans.....	9
2.4.8. Kesme Kuvveti Kapasitesi.....	9
2.4.9. Yangın Dayanımı.....	9
2.4.10. Durabilite.....	9
2.5. Taze Beton Reolojisi ve KYB.....	10
2.6. KYB Karışım Bileşenleri.....	11
2.6.1. Çimento.....	12

2.6.2. Toz Malzeme (Filler).....	12
2.6.3. Agrega.....	13
2.6.4. Kimyasal Katkı.....	14
2.6.5. Pigmentler.....	15
2.6.6. Lifler.....	15
2.6.7. Karışım Suyu.....	15
2.7. KYB Tasarım Esasları ve Yöntemleri.....	15
2.7.1. Tasarım Esasları.....	16
2.7.2. Tasarım Yöntemleri.....	16
2.8. KYB Taze Beton Özellikleri ve Deney Yöntemleri.....	17
2.8.1 Doldurma Kabiliyetini Ölçen Taze Beton Deneyleri.....	17
2.8.1.1. Çökme-Yayıma Deneyi.....	18
2.8.1.2. Orimet Deneyi.....	19
2.8.1.2. V-hunisi Deneyi.....	19
2.8.2 Geçiş Kabiliyetini Ölçen Taze Beton Deneyleri.....	20
2.8.2.1 L-kutusu Deneyi.....	21
2.8.2.2 J-halkası Deneyi.....	22
2.8.2.3 U-kutusu Deneyi.....	23
2.8.3 Ayrışma Direnci Deneyleri.....	23
2.9. Sertleşmiş KYB Özellikleri ve Durabilite.....	25
2.9. KYB Uygulamaları.....	25
3. BETONUN LİNEER OLMAYAN KIRILMA MEKANİĞİ.....	27
3.1. Kırılma Mekanizmasının Tarihsel Gelişimi.....	28
3.1.1. Betonun Kırılma Mekanizmasının Tarihsel Gelişimi.....	32
3.2. Lineer Olmayan Kırılma Mekanizması Metotları.....	34
3.2.1 Kohezif Çatlak Modelleri.....	36
3.2.1.1 Kırılma İş Enerjisi (KIE).....	36
3.2.1.2 Boyut Etkisi Modeli (BEM).....	37
3.2.1.3 Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu.....	42
3.2.2 Efektif Çatlak Modelleri.....	43
3.2.2.1 İki Parametrelili Model (İPM).....	43
3.2.2.2 Efektif Çatlak Modeli.....	48
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	50
4.1. Malzemeler.....	50

4.1.1. Çimento.....	50
4.1.2. Toz Malzemeler.....	50
4.1.3. Agrega.....	55
4.1.4. Kimyasal Katkı.....	55
4.1.4. Karma Suyu.....	56
4.2. Deneyler ve Karışım Oranları.....	56
4.2.1. Mermer Tozuyla KYB Üretilmesi.....	57
4.2.2. Mermer Tozuyla Üretilen KYB’lerin Çentikli Numune Deneyleri.....	57
4.2.3. Farklı Toz Malzemelerle Üretilen KYB’lerin Çentikli Numune Deneyleri.....	60
4.2.4. KYB’lerin Zaman Bağlı Çentikli Numune Deneyleri.....	61
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMELER.....	62
5.1. Mermer Tozuyla KYB Üretilmesi.....	62
5.2. Mermer Tozuyla Üretilen KYB’lerin Çentikli Numune Deneyleri.....	68
5.3. Farklı Toz Malzemelerle Üretilen KYB’lerin Çentikli Numune Deneyleri.....	74
5.3. KYB’lerin Zamana Bağlı Çentikli Numune Deneyleri.....	82
5.4. Gözlemler.....	88
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	
EKLER	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 a) Reolojik modeller, b) Normal beton ve KYB arasındaki farklılıklar.

Şekil 2.2 Reometre ve viskozimetreler.

Şekil 2.3 KYB ve normal beton karışım oranları [31].

Şekil 2.4 Avrupa ve Japonya’da KYB hacimsel karışım oranları [32].

Şekil 2.5 KYB karışım kompozisyonu [62].

Şekil 2.6 Çökme-yayılma deneyi ekipmanları ve deneyin yapılışı.

Şekil 2.7 Orimet deney düzeneği.

Şekil 2.8 V-hunisi deney düzeneği ve deneyin yapılışı.

Şekil 2.9 a) L-kutusu deney düzeneği b) deneyin yapılışı.

Şekil 2.10 J-halkası deney düzeneği.

Şekil 2.11 U-kutusu deney düzeneği.

Şekil 2.12 Elek ayırma direnci deney düzeneği.

Şekil 2.13 Prefabrik KYB öngerilmeli giriş [77]

- a) Giriş donatıları b) Kalıp içerisindeki donatılar c) Beton dökümünden önce kalıp genel görünümü d) KYB dökümü e) Öngerilme uygulanmış giriş

Şekil 2.14 Prefabrik KYB kabuk eleman [78]

- a) Kalıpların hazırlanması b) KYB ile pürüzsüz yüzeyli beton üretimi

Şekil 3.1 Basit çekme durumunda çentikli kısımlarda oluşan gerilme yığılmaları [82].

Şekil 3.2 Kırılma Modları

Şekil 3.3 Kırılma Süreci Bölgesi [82].

Şekil 3.4 Beton ve bileşenleri için tipik gerilme-deformasyon eğrileri.

Şekil 3.5 a) Çekmeye maruz bir numunenin yük-deformasyon diyagramı.

- b) Kırılma süreci bölgesi [114].

Şekil 3.6 Kırılma süreci bölgesinin gelişimi [114].

Şekil 3.7 Değişik malzeme sınıfları için L:lineer, N:non-lineer ve K:kırılma süreci bölgeleri.

Şekil 3.8 Boyut etkisi teorileri.

Şekil 3.9 Boyut Etkisi Metodunda önerilen numune geometrisi.

Şekil 3.10 Farklı tip numunelerin $g(\alpha)/g'(\alpha)$ değerleri.

Şekil 3.11 İki parametrelili modelde kırılma parametrelerinin tayini.

- a) Çentikli üç noktalı eğilme numunesi b) Tipik bir P-CMOD diyagramı.

Şekil 3.12 Pik-Yük metodunda kullanılan farklı numune tipleri a) çentikli silindirik yarma

- b) boşluklu silindirik yarma c) eksantrik yüklü çentikli prizma.

Şekil 3.13 Efektif çatlak modeli.

Şekil 3.14 Efektif çatlak modeli numune ölçüm düzeneği.

Şekil 4.1 15-20 tonluk mermer blokları.

Şekil 4.2 Mermerlerin çeşitli boyutlarda kesilmesi.

Şekil 4.3 Atık mermer çamuru ve doğa.

Şekil 4.4 Vişne mermer tozu SEM fotoğrafları.

Şekil 4.5 Beyaz mermer tozu SEM fotoğrafları.

Şekil 4.6 Sarı traverten mermer tozu SEM fotoğrafları.

Şekil 4.7 Agreganın granülometrisi.

Şekil 4.8 MTV, MTB, MTS, MTVSB, MTREF serilerinin görünüşü.

Şekil 4.9 Boyut etkisi numunelerinin genel görünüşü.

Şekil 5.1 Çimento=300 kg/m³ için V-hunisi ile T_{50} ilişkisi.

Şekil 5.2 Çimento=400 kg/m³ için V-hunisi ile T_{50} ilişkisi.

Şekil 5.3 Çimento=500 kg/m³ için V-hunisi ile T_{50} ilişkisi.

Şekil 5.4 28 günlük KYB ve referans beton dayanımları.

Şekil 5.5 f_c – beton yaşı ilişkisi.

Şekil 5.6 f_t – beton yaşı ilişkisi.

Şekil 5.7 Mermer tozu çeşidi-yayılma ilişkisi.

Şekil 5.8 Mermer tozu çeşidi-basınç dayanımı ilişkisi.

Şekil 5.9 Mermer tozu miktarı-basınç dayanımı ilişkisi.

Şekil 5.10 MTV, MTS, MTB, MTVSB serilerinin kırılma parametresi: K_{IC}^S .

Şekil 5.11 MTV, MTS, MTB, MTVSB serilerinin kırılma parametresi: $CTOD_c$.

Şekil 5.12 MTV, MTS, MTB, MTVSB serilerinin grafik çözümleri.

Şekil 5.13 Mermer tozlu KYB'lerin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri.

Şekil 5.14 MTV, MTS, MTB ve MTVSB serileri $G_f - f_c$ ve $c_f - f_c$ ilişkileri.

Şekil 5.15 MT(K1-K6) serileri $G_f - f_c$ ve $c_f - f_c$ ilişkileri.

Şekil 5.16 Boyut etkisi numuneleri çeşitli görünüşler.

Şekil 5.17 Boyut etkisi eğrileri.

Şekil 5.18 SD16, UK16, MT16, REF16 (sol sütun yukarıdan aşağıya), SD8, UK8, MT8 ve REF8 (sağ sütun yukarıdan aşağıya) serilerinin grafik çözümleri.

Şekil 5.19 d_{max} 'ı farklı betonların K_{IC}^S 'lerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.20 d_{max} 'ı farklı betonların $CTOD_c$ 'lerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.21 Farklı d_{max} 'a sahip KYB'lerin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri

Şekil 5.22 $d_{max}= 16$ mm betonların G_f ve c_f kırılma parametreleri.

Şekil 5.23 $d_{max}= 8$ mm betonların G_f ve c_f kırılma parametreleri.

Şekil 5.24 Beton yaşı-dayanım ilişkileri

Şekil 5.25 SD1(28), UK1(28), MT1(28) ve REF1(28) serilerinin (IPM) grafik çözümleri.

Şekil 5.26 Zaman serilerinin İPM kırılma parametreleri

Şekil 5.27 Zaman serilerinin G_f ve c_f kırılma parametreleri.

Şekil 5.28 Toz malzemeler.

Şekil 5.29 Üç noktalı eğilme deneyi.

Şekil 5.30 Üç noktalı eğilme deneyinden sonra genel görünüş.

Şekil 5.31 Numune kesitleri.

ÇİZELGELER (TABLOLAR) LİSTESİ

- Tablo 2.1** Çökme-yayıma deneyinin genel değerlendirilmesi [18].
- Tablo 2.2** Orimet deneyinin genel değerlendirilmesi [18].
- Tablo 2.3** V-hunisi deneyinin genel değerlendirilmesi [18].
- Tablo 2.4** L-kutusu deneyinin genel değerlendirilmesi [18].
- Tablo 2.5** J-halkası deneyinin genel değerlendirilmesi [18].
- Tablo 2.6** U-kutusu deneyinin genel değerlendirilmesi.
- Tablo 2.7** Elek ayırma direnci deneyinin genel değerlendirilmesi [18].
- Tablo 4.1** CEM I 42.5 N çimentonun özellikleri.
- Tablo 4.2** Kullanılan puzolan malzemelerin özellikleri.
- Tablo 4.3** Mermer tozlarının özellikleri.
- Tablo 4.4** Agregaların fiziksel özellikleri.
- Tablo 4.5** KYB karışım bileşenleri uygun sınırları [2].
- Tablo 4.6** Kendiliğinden yerleşen taze beton kullanışlı deney limit sınıfları [2].
- Tablo 4.7** Mermer tozu ile üretilmiş KYB'lerin karışım oranları.
- Tablo 4.8** Mermer tozu ile üretilmiş KYB serilerinin karışım oranları.
- Tablo 4.9** Farklı tozlarla üretilmiş KYB serilerinin karışım oranları.
- Tablo 4.10** Zaman-KYB serilerinin karışım oranları.
- Tablo 5.1** Mermer tozu ile üretilen KYB'lerin özellikleri.
- Tablo 5.1 (devamı)** Mermer tozu ile üretilen KYB'lerin özellikleri.
- Tablo 5.2** Mermer tozlu KYB'lerin taze beton ve dayanım özellikleri.
- Tablo 5.3** Mermer tozlu KYB'lerin kırılma yükleri ve diğer ölçümleri.
- Tablo 5.4** Farklı karışımlı mermer tozlu KYB'lerin kırılma parametreleri.
- Tablo 5.5** Mermer tozlu KYB'lerin G_f ve c_f kırılma parametreleri
- Tablo 5.6** Farklı toz malzemelerle üretilen KYB'lerin özellikleri.
- Tablo 5.7** Boyut etkisi numuneleri kırılma yükleri ve kırılma parametreleri.
- Tablo 5.8** Farklı tozlarla üretilen aynı boyuttaki KYB kirişlerin kırılma yükleri.
- Tablo 5.9** d_{max} 'ı farklı serilerin kırılma parametreleri.
- Tablo 5.9** Kırılma parametrelerinin karşılaştırılması.
- Tablo 5.10** Zaman serileri taze beton ve dayanım özellikleri.
- Tablo 5.11** Zaman serileri kırılma özellikleri.
- Tablo 5.12** Zaman serilerinin G_f ve c_f kırılma parametreleri.

EKLER LİSTESİ

EK 1

Tablo 1. Zaman serileri kırılma yükleri.

Tablo 2. Zaman serileri kırılma yükleri.

Tablo 3. Zaman serileri kırılma yükleri.

EK 2

Şekil 1. Zaman serilerinin İPM grafik çözümleri.

Şekil 2. Zaman serilerinin İPM grafik çözümleri.

Şekil 3. Zaman serilerinin İPM grafik çözümleri.

Şekil 4. Zaman serilerinin İPM grafik çözümleri.

EK 3

Şekil 5. Zaman serilerinin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri.

Şekil 6. Zaman serilerinin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri.

Şekil 7. Zaman serilerinin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri.

SİMGELER LİSTESİ

- A: Regresyon doğrusunun eğimi
a : Eliptik boşluğun kısa boyutu
 a_0 : Başlangıç çatlak boyu
 a_c : Kritik çatlak boyu
 Δa : Yüke bağlı olarak çatlakta meydana gelen artma miktarı
 a_e : Efektif çatlak uzunluğu
 a_g : Çatlak genişliği
b: Eliptik boşluğun uzun boyutu
C: Regresyon doğrusunun sabiti
 C_i : Başlangıç komplians değeri
 C_u : Maksimum yükteki komplians değeri
 c_f : Kırılma süreci bölgesi uzunluğu
 c_n : Nominal dayanıma bağlı sabit
CMOD : Çatlak ağzı açılımı
CTOD: Çatlak ucu açılım deplasmanı
 $CTOD_c$: Kritik çatlak ucu açılım deplasmanı
 $CTOD_c^{ort}$: Ortalama kritik çatlak ucu açılım deplasmanı
d: Numune yüksekliği
 d_{max} : Maksimum agrega çapı
E : Elastisite modülü
 E_c : Betonun elastisite modülü
 f_t : Malzemenin çekme dayanımı
 f_c : Betonun silindir basınç mukavemeti
 f_{cc} : Betonun küp basınç mukavemeti
 G_c : Çatlak yayılma hızı
 G_f : Kırılma enerjisi
 h_1 : L-kutusu bitiş noktasındaki taze beton yüksekliği
 h_2 : L-kutusu başlangıç noktasındaki taze beton yüksekliği
 K_I : Gerilme şiddet çarpanı
 K_{Ic}^S : Kritik gerilme şiddet çarpanı
 $\overline{K_{Ic}}$: Ortalama kritik gerilme şiddet çarpanı

K_{Ic}^e : Efektif çatlak uzunluğuna karşılık gelen K_{Ic} değeri

K_t : Gerilme yığılma faktörü

l_{ch} : Karakteristik uzunluk

L : Numune uzunluğu

m : Numune kütlesi

NB: Normal beton

P_u : Maksimum kırılma yükü

r_p : Kırılma süreci bölgesi uzunluğu

Q : Gevreklik Katsayısı

S : Mesnet aralığı

s : standart sapma

SG: Segregasyon oranı (%)

T_v : Taze betonun V-henisinden akma süresi (s)

T_{50} : Taze betonun 50 cm çapa yayılma süresi (s)

Y : Lineer regresyon sonucu elde edilen doğru denklemi

W/C : Su/çimento oranı

w_c : Kritik çatlak ucu açılım değeri

α : Relatif çentik boyu

σ_N : Nominal dayanım

σ : Normal gerilme

σ_m : Eliptik boşluk çevresindeki maksimum gerilme

ε : Şekil değiştirme

γ : Kayma şekil değiştirmesi

τ : Kayma gerilmesi

τ_0 : Başlangıç kayma gerilmesi

KISALTMALAR LİSTESİ

ACI : Amerika Beton Standartları Enstitüsü

BEM : Boyut Etkisi Modeli

EÇM : Efektif Çatlak Modeli

EFNARC: Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Uzmanları Federasyonu

EPKM : Elasto-Plastik Kırılma Mekanîği

İPM: İki Parametrelili Model

KİE: Kırılma İşi Enerjisi

KYB: Kendiliğinden Yerleşen Beton

LEKM: Lineer Elastik Kırılma Mekanîği

RILEM: Uluslararası Bina Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Uzmanları ve
Laboratuarları Birliği

SA: Süper Akışkanlaştırıcı

ÖZET

Doktora Tezi

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN LİNEER OLMAYAN KIRILMA MEKANİĞİ PRENSİPLERİYLE İNCELENMESİ

Kürşat Esat ALYAMAÇ

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2008, Sayfa: 129

Beton yüzyılı aşkın süredir tüm dünyada yapı malzemesi olarak kullanılmakta ve her geçen gün kullanım alanları artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Bununla beraber betondan, kullanım alanı veya kullanılan yapıya göre farklı performanslar beklenmektedir. Bu beklentiler ancak özel betonlarla karşılanabilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan özel beton çeşitlerinden biri kendiliğinden yerleşen betondur (KYB).

KYB, sık donatılı dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile yerleşen, herhangi bir vibrasyona gerek kalmadan sıkışan, dayanım veya dayanıklılık özellikleri ve performansları yüksek, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür. Geleneksel betondan en önemli farkı, karışımında toz malzeme ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmasıdır. KYB, geleneksel betondan daha yoğun olmasına rağmen, onun gibi boşluk ve çatlak gibi kusurlar içermektedir.

Kırılma Mekanik Bilimi malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yığılmasını artıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. Bu hasarlar beton ve betonarme yapılar için de geçerlidir. Beton heterojen bir yapıya sahip olduğu için Lineer Elastik Kırılma Mekanik (LEKM) Prensipleriyle incelenemeyeceği belirlenmiştir. Bu nedenle araştırmacılar, kırılma süreci bölgesini dikkate alan lineer olmayan kırılma mekanik modelleri geliştirmişlerdir. Bu modelleri, Kohezif Çatlak Modelleri (Kırılma İş Enerjisi, Boyut Etkisi Modeli ve Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu) ve Efektif Çatlak Modelleri (İki Parametrelili Model, Pik Yük Metodu ve Efektif Çatlak Modeli) olmak üzere gruplandırmak mümkündür.

Bu tez çalışmasında, mermer tozu, silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak, farklı karışımlara sahip KYB'ler elde edilmiştir. Çentikli ve çentiksiz üretilen KYB kirişler, üç noktalı eğilme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen numune kırılma yükleri yardımıyla, Boyut Etkisi Modeli ve Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu kullanılarak G_f ve c_f , Pik Yük Metodu ve İki Parametrelili Model kullanılarak K_{Ic}^S ve $CTOD_c$ kırılma parametreleri belirlenmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, toz malzeme çeşidinin (puzolanik veya inert) KYB'nin kırılma parametreleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, farklı toz malzemelere aynı karışım oranına sahip KYB'lerin, kırılma parametrelerinin beton yaşına göre değiştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Beton, Kırılma Mekanik, İki Parametrelili Model, Pik Yük Metodu, Boyut Etkisi Metodu.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF SELF-COMPACTING CONCRETE BY USING NON-LINEAR FRACTURE MECHANICS METHODS

Kürşat Esat ALYAMAÇ

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

2008, Page : 129

Over a century, concrete has been used as a construction material all over the world, and its application areas increases and becomes commonplace each day. Moreover, concrete is expected to have distinct performances according to application area or the construction used. These expectations could be met only by special concretes. Today, one of the mostly used special concrete types is self-compacting concrete (SCC).

SCC is a special concrete type which places itself in densely-equipped narrow and deep sections with its own weight, tightens without any vibrations, has high resistance or durability characteristics and performances, and has a very fluid- consistency. Its most important difference from conventional concrete is that powder materials and super plasticizer are used in its compound. Although SCC is denser than the conventional concrete, it includes such defects as cavity and fracture as it has.

Fracture Mechanics Science searches for defects like notch, fracture and cavity available in the material increases strain mass and the damage caused by these. These damages are also valid for concrete and reinforced concrete constructions. As concrete has a heterogenic structure, it has been determined that it could not be analyzed by Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) Principles. Therefore, researchers have developed nonlinear fracture mechanics models that attend to fracture process zone. It is possible to classify these models as Cohesive Crack Models (Work-of-fracture Method, Size Effect Model and Variable-Notch One-Size Specimen Method) and Effective Crack Models (Two-Parameter Model, Peak-load Method and Effective Crack Model).

In this thesis, self-compacting concretes which have different compounds has been obtained by using marble powder, silica fume, fly ash. Self-compacting concrete beams produced as notched or unnotched were subjected to three-point bending tests. With the aid of sample maximum loads obtained, by using Size Effect Model G_f ve c_f , by using Variable-Notch One-Size Specimen Method G_f ve c_f , by using Peak-load Method K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ fracture parameters were determined. When the results of the tests were evaluated, it was seen that powder material types (puzolanic or inert) are effective on SCC's fracture parameters. In addition, it was determined that fracture parameters of SCCs that have the same compound level as different powder materials vary according the age of the concrete.

Keywords: Self-Compacting Concrete, Fracture Mechanics, Two-Parameter Model, Peak-Load Method, Size Effect Method.

1. GİRİŞ

Beton yüzyılı aşkın süredir tüm dünyada yapı malzemesi olarak kullanılmakta ve her geçen gün kullanım alanları artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Portland çimentosunun imal edilmesiyle inşaat hayatına başlayan beton sektörü her gün gelişmektedir. Betonun en büyük zafiyeti çekme dayanımının ihmal edilebilecek kadar düşük olmasıdır. Bunun yanında kullanım alanı veya kullanılan yapıya göre betondan farklı performanslar beklenmektedir. Bu beklentiler ancak özel betonlarla karşılanabilmektedir.

Özel betonlar, farklı ihtiyaçlardan dolayı farklı yöntemlerle üretilirler. Betonun içine belli oranlarda katılan lifler, betonun çekme dayanımını artırır, agrega çeşidi, miktarı ve cinsi değiştirilerek ağır ve hafif betonlar üretilirler, yüksek dayanımlı çimentolar veya puzzolanlar kullanılarak yüksek dayanımlı betonlar üretilirler. Özel beton çeşitlerini ihtiyaca göre artırmak teknolojinin de desteğiyle mümkündür.

Bu tez çalışmasında, günümüzde en çok kullanılan özel beton çeşitlerinden olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) konusu incelenmiştir. Betonun dayanımı üzerine etkili olan en önemli faktörlerden biri su/çimento (W/C) oranıdır. W/C oranının düşük olması beton basınç dayanımının artışı sağlayacaktır. Fakat bu oranın gereğinden düşük olması, betonun istenilen şekilde yerleşmesini engellemektedir. Yeni nesil kimyasal akışkanlaştırıcıların sayesinde W/C oranı azaltılmakta bununla birlikte taze betonun akıcılığı artırılmaktadır [1].

Özellikle gelişmiş ülkelerde KYB kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Betonun sık donatılı dar kesitlere rahat yerleşmesinin yanı sıra, KYB, yerleştirme sırasında vibratör kullanılmasına ihtiyaç duymaz. Durabilitesi yüksek bir yapı malzemesidir. Uygun karışımlar hazırlandığında ayrışma ve terleme gibi problemleri olmayan bir betondur. Çalışmada EFNARC'ın (Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Uzmanları Federasyonu) kendiliğinden yerleşen beton hakkında yayınladığı standarttan faydalanılmıştır [2]. Deney alet ve yöntemleri bu rapor esas alınarak düzenlenmiştir.

Mühendislik yapılarında kullanılacak olan malzemelerin özelliklerini çok iyi bilmek gerekir. Bu özelliklerin en önemlilerinden biri de dayanımdır. Malzemelerin dayanımları, kullanıldıkları yapı birimi için yeterli olmalıdır. Fakat malzemelerde teorik olarak hesaplanan dayanım, pratikte elde edilememektedir. Bu da önemli bir sorun olan, malzemelerin akma yoluyla değil, kırılma diye bilinen gevrek davranış sonucu dayanımlarını yitirmelerinin bir sonucudur.

Bu sorun beton ve betonarme yapılar için de geçerlidir. Özellikle beton ve betonarme yapılarda hasara yol açıp, yüksek oranlarda can ve mal kaybına sebep olabilecek bu sorunun

giderilebilmesi için konunun ayrıntılı bir şekilde incelenip, analiz edilmesi gerekir. Beton ve betonarme yapıların göçme analizi için birçok lineer ve lineer olmayan yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak özellikle sismik yüklemelere maruz beton ve betonarme yapılarda göçme meydana gelmeden taşıyıcı sistemlerde yerleşen çatlak veya çatlaklar oluşabilmekte ve malzeme yumuşama adı verilen dayanım kaybına uğrayabilmektedir. Çatlamış bir yapı, ancak Kırılma Mekanîği Prensipleri kullanılarak gerçekçi bir şekilde analiz edilebilir.

Metalik malzemelerin kırılma davranışlarını inceleyen Lineer Elastik Kırılma Mekanîği Kanunları betona uygulanmış ancak betonun kırılma davranışının tek bir parametre ile belirlenemeyeceği sonucuna varılmıştır. 1980'li yılların başından itibaren bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle betonun kırılma davranışının incelenmesi amacıyla Lineer Olmayan Kırılma Mekanîği Prensipleri ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasında, Pik Yük Metodu [3, 4], Boyut Etkisi Metodu [5] ve Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu [6, 7] gibi lineer olmayan kırılma mekanîği prensipleri kullanılarak, KYB'nin kırılma parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yukarıda belirtilen bu metotların özelliği, literatürde mevcut diğer kırılma parametrelerinin aksine çok gelişkin laboratuarlara ihtiyaç duymaması ve kırılma parametrelerinin hesabı için sadece maksimum (kırılma) yüklerin yeterli olmasıdır.

Betonun kırılma parametreleri ile ilgili değerler özel yapı şartnamelerinde yerini almaya başlamıştır. KYB'nin uygulamadaki kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Özel bir beton türü olan KYB'nin kırılma özellikleri üzerine yapılmış çalışmalar şu ana kadar birkaç adedi geçmemiştir. Bu amaçla, basınç dayanımı, W/C oranı, toz malzeme miktarı ve çeşidi gibi birçok farklı parametre dikkate alınarak üretilen KYB'lerin kırılma parametreleri, lineer olmayan kırılma mekanîği prensipleriyle tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, ilk önce toz malzeme çeşidi belirlenmiştir. KYB üretiminde literatürdeki çalışmalarda, genellikle uçucu kül, kireçtaşı tozu ve silis dumanı gibi atık malzemeler kullanılmaktadır. Çevreye ve ülke ekonomisine faydalı olacak başka bir atık malzeme kullanılabilir mi? sorusu çalışmanın başlangıç noktası olmuştur. Araştırmalar sonucunda Türkiye için henüz gündeme gelmeyen, ancak ilerleyen yıllarda büyük bir çevre problemi teşkil edecek olan mermer atığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, mermer tozu KYB üretiminde kullanılmıştır.

Mermer tozu ile 68 farklı karışıma sahip KYB ve 5 farklı karışıma sahip referans betonları üretilmiştir. Beton numuneler 150×150×150 mm standart küp numuneler şeklinde hazırlanmıştır. Bu deneme karışımları sayesinde mermer tozunun KYB de kullanılabilirliği görülmüş ve malzeme karışım oranları için pratik yaklaşık diyagramlar elde edilmiştir.

Karışım oranları belirlendikten sonra farklı mermer tozları ve farklı karışım oranlarına sahip numuneler üretilmiştir. Her numune serisi, farklı bir karışım özelliğine sahiptir ve her bir

seri: 2 adet 150×150×450 mm çentiksiz kiriş, 6 adet 150×150×450 mm çentikli kiriş ve 3 adet standart küp numuneden oluşmaktadır. Kirişlerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları ve küplerin basınç dayanımı deneyi sonuçlarından faydalanılarak, Pik Yük Metodu [3, 4] ve Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu [6, 7] kullanılarak, KYB'lerin kırılma parametreleri tespit edilmiştir.

Mermer tozunun, kireçtaşı tozu gibi atık malzemelerle benzer kimyasal özellik göstermesinden dolayı beton karışım oranları ve beton kırılma parametrelerinin yaklaşık aynı olacağı kabul edilebilir. Ancak uçucu kül ve silis dumanı gibi silis oranı yüksek, pozolanik aktivitesi olan malzemelerle farklılık gösterecektir. Bu nedenle, aynı karışım oranlarına sahip, çimento+toz malzeme miktarı sabit ancak toz tipi mermer tozu, uçucu kül ve silis dumanı olan KYB'ler üretilmiştir. Her bir seri, 3 adet 50×50×150 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×100×300 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×200×600 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×400×1200 mm çentikli kiriş, 2 adet 150×150×450 mm çentiksiz kiriş, 6 adet 150×150×450 mm çentikli kiriş ve 3 adet standart küp numuneden oluşmuştur. Kirişlerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları ve küplerin basınç dayanımı deneyi sonuçlarından faydalanılarak, Boyut Etkisi Metodu [5], Pik Yük Metodu [3, 4] ve Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu [6, 7] kullanılarak, KYB'lerin kırılma parametreleri tespit edilmiştir.

KYB tasarımları yapılırken, çimento+toz malzeme miktarı esas alınmakta veya toz malzeme miktarı çimento ile belirli miktarlarda yer değiştirilmektedir. Çalışmada ayrıca çimento miktarı sabit tutulmuş ve toz malzemeler (mermer tozu, uçucu kül ve silis dumanı), %10, %15, %20 ve %25 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. Her bir seri, 6 adet 150×150×450 mm çentiksiz kiriş, 18 adet 150×150×450 mm çentikli kiriş ve 9 adet standart küp numuneden oluşmuştur. Seriler 3 gruba ayrılarak, 7, 28 ve 90. günlerde deneylere tabi tutulmuşlardır. Kirişlerin üç noktalı eğilme deneyi sonuçları ve küplerin basınç dayanımı deneyi sonuçlarından faydalanılarak, Pik Yük Metodu [3, 4] ve Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu [6, 7] kullanılarak, KYB'lerin kırılma parametreleri tespit edilmiştir. Bütün bunlara ilave olarak, kırılma parametreleri-toz tipi-zaman ilişkisi belirlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, KYB tasarımı ile ilgili pratik esaslar belirlenmiş ve farklı malzemelerle elde edilen KYB'lerin kırılma parametreleri lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle tespit edilmiştir. Ayrıca kırılma mekaniği metodlarının sonuçları deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

2.1. Tanım

Kendiliğinden Yerleşen Beton, sık donatılı dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile yerleşen, herhangi bir vibrasyona gerek kalmadan sıkışan, dayanım veya dayanıklılık özellikleri ve performansları yüksek, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür.

Bu özel beton türü literatür de farklı isimlerle anılmaktadır. Bu isimleri kısaca, kendiliğinden yerleşen beton (self-consolidating concrete-SCC), kendiliğinden sıkışan beton (self-compacting concrete-SCC) ve kendiliğinden yüzeylenen beton (self-levelling concrete-SLC) olarak ifade edebiliriz [8-10]. Ülkemizde yaygın olarak kendiliğinden sıkışarak yerleşen beton olarak adlandırılmaktadır. Ülkelere ve bölgelere göre değişiklik gösteren isimlendirme sonuçta aynı özellikteki betonlar için kullanıldığından, birbirlerinin yerlerine kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, kendiliğinden yerleşen beton adı ve KYB kısaltması kullanılmıştır.

2.2. Tarihi Gelişimi

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), ilk olarak Prof. Hajime Okamura tarafından 1986 da önerilmiştir. 1988 de ise ilk uygulamaları gerçekleştirilmiştir. O tarihten beri KYB ile ilgili araştırmalar ve uygulamalar yoğun bir şekilde devam etmektedir [11].

KYB ile ilgili çalışmalar, bireysel ve ortak çalışmalar şeklinde özellikle 1990'lı yılların sonlarında büyük bir hız kazanmıştır. Sempozyumlar, projeler ve bilimsel araştırmalar bu hızlı gelişime önemli katkıda bulunmuştur. RILEM (Uluslararası Bina Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Uzmanları ve Laboratuvarları Birliği) bu konuda öncü kuruluşlardan biri olmuştur. KYB konusunda raporlar düzenlemiş ve teknik bir komite oluşmasını sağlamıştır. Bu komite dünyanın her yerinde, Japonya'da, Çin'de, Avrupa'da ve Amerika'da yapılan çalışmaların değerlendirilmesi ve bilgi alış-verişi için sempozyumlar düzenlemiştir. 1999 yılında Dr. A. Skarendahl başkanlığında İsveç'in başkenti Stokolm'de, 2001 yılında Prof. H. Okamura başkanlığında Japonya'nın başkenti Tokyo'da, 2003 yılında Dr. O. Wallevik başkanlığında İzlanda-Reykjavik'te, 2005 yılında Prof. S. P. Shah başkanlığında Chicago-ABD'de ve son olarakta 2007 yılında Prof. Geert De Schutter başkanlığında Belçika'nın Ghent Şehrinde düzenlenen Kendiliğinden Yerleşen Beton Sempozyumları ile karışım oranları, taze beton özellikleri, karıştırma, reoloji, döküm, hidrasyon, mikroyapı, mekanik davranış, tamir harcı, durabilite, özel kendiliğinden yerleşen betonlar ve uygulamalar konularında yapılmış olan

alışmalar değerdendirilmiştir [12]. Bu platform dünyada bu konu ile ilgili çalışan araştırmacıları bir araya getirdiğı için büyük önem arz etmektedir.

Avrupa Birliğı, ereve programları dahilinde KYB ile ilgili önemli bir proje gerçekleştirilmiştir. Brite EuRam BE96-3801 nolu, KYB ile ilgili tüm alanları kapsayan bu proje 1997 yılının başında başlamıştır. İsveç, Fransa, İskoçya, İspanya ve Belçika'nın katıldığı bu çok uluslu proje 2000 yılının sonlarına doğıru tamamlanmıştır [13]. Projenin sonuçları EFNARC'ın KYB ile ilgili temel prensiplerini oluşturmaktadır. Bu alışma ve daha sonra Avrupa da yapılan çalışmalardan sonra KYB konusunda EFNARC 2002, EFNARC 2003 ve EFNARC 2005 standartları geliştirilmiştir. Yine Avrupa'da bu konuda "EN" standartlarını geliştirme çalışmaları devam etmektedir [14-16]. Diğerdan KYB tasarımı ve uygulaması konusunda Japonya ve Amerika'daki çalışmalarda devam etmektedir. Japonya'da uygulamaya, Amerika da ise ACI standardı hazırlanmasına yönelik çalışmaların devam ettiğı bilinmektedir [17].

Türkiye'de ise KYB konusunda bireysel çalışmalar yürütülmektedir. Araştırmacılar, çalışmalarını ilgili kongrelerde sunmakta ve uluslar arası dergilerde yayınlamaktadırlar. Bu araştırmalar neticesinde elde edilen bilgiler ışığında KYB uygulamaları her geçen gün artmaktadır.

Geleneksel betonun tarihi dikkate alındığında, KYB'nın yeni olarak ifade edilebilecek bir gemişı vardır. KYB'nin üretilmeye başlanıldığı ilk yıllarda bilgi paylaşımının günümüzdeki kadar hızlı olmaması ve birçok ülke yönetmeliğindeki beton çökme-kıvam değeri st limiti sınırlayıcıları KYB'nin hızlı yayılmasını engellemiştir. Ancak günümüzde inşaat sektöründeki hızlı gelişmeler ve yeni ihtiyaçlar KYB'nin uygulama alanlarını her geçen gün genişletmektedir [18].

2.3. Kendiliğinden Yerleşen Beton Kullanımı

Geleneksel beton yüzyılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Avantaj ve dezavantajlarıyla çok önemli bir yapı malzemesidir. Özel betonların gelişmesi, geleneksel betonun dezavantaja sahip özelliklerini azaltma veya ortadan kaldırma ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Bu amaçla üretilen özel betonlar yeni bir malzeme özelliğı taşımaktadır. Bu nedenle KYB gibi özel beton türlerinin kendilerine has kullanım alanları, avantajları ve dezavantajları mevcuttur. KYB kullanılacak yapı veya yapı elemanlarında, bu özellikler dikkate alınarak, üretim ve uygulama ortamı belirlenmelidir.

2.3.1. Kullanım Alanları

KYB, yüksek akıcılık, yüksek dayanım, geçirimsizlik ve pürüzsüz yüzey özellikleri ile yapıların mimari anlamda da önemli bir malzemesidir. Özellikle renk pigmentleri veya beyaz çimento kullanılarak elde edilen renkli KYB'lerle mimari olarak vazgeçilmez düzgün yüzeyler elde edilmektedir. Bunun yanında kütle betonlarında, prekast hafif beton yapı elemanlarında ve prefabrik elemanlarda oldukça verimli bir şekilde kullanılmaktadır [19].

KYB kullanılarak yapımı devam eden beton yollar mevcuttur. Doldurma, akış ve geçiş yetenekleri ve vibrasyonsuz yerleşme özellikleri sayesinde şu anda en çok dar-derin kesitli ve sık donatılı köprüler ve prefabrik gibi yerlerde kullanılmasına rağmen, uygulama alanları her geçen gün büyük oranda artmaktadır [20].

2.3.2. Avantajları

KYB'nin en önemli avantajının vibrasyonsuz yerleşme olarak ifade etmek doğru olacaktır. KYB'de betonun kalıba yaptığı basınç optimum karışımlarla ayarlandığında, vibrasyonda olmadığından kalıp maliyetleri azalmaktadır. Vibrasyonsuz beton dökümü, enerji ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Gürültü kirliliği önlenecek ve işçilikte tasarruf sağlanacaktır.

Sık donatılı dar ve derin kesitlere geleneksel betonu vibrasyon yardımı ile bile standartlara uygun yerleştirilemezken, KYB ile bu üretim verimli bir şekilde yapılmaktadır. Eğer pas payı aparatları kullanılmış ise KYB kullanılan yapılarda pürüzsüz bir yüzey elde etmek mümkündür. Bu durum donatı korozyonunu önlemekte ve sıva-kaplama maliyetlerini azaltmaktadır [21].

2.3.3. Dezavantajları

KYB, içeriği bakımından geleneksel betondan farklıdır. Özellikle toz malzeme ve kimyasal katkıları KYB'nin maliyetini artırmaktadır. Ancak kullanım kolaylıkları, yararları ve gelecekte kullanımı arttıkça malzeme fiyatlarının düşme ihtimali bu dezavantajı önleyebilir.

KYB üretilen ve uygulanan yerlerde profesyonel bir kalite kontrol sistemi gerekmektedir. Çünkü bu beton türünün üretimi ve dökümü geleneksel betondan zordur. Malzeme çeşidi ve özellikleri (çimento türü, agrega tipi, agrega granülometrisi, en büyük agrega tane çapı, agrega nem oranı, toz malzeme tipi, kimyasal katkı tipi vs.) değiştikçe, kendiliğinden yerleşebilirlik ve sertleşmiş beton özellikleri değişecektir. Bu nedenle beton üretimi ve uygulaması çok ciddi bir kontrol süreci gerektirmektedir [20].

KYB ile ilgili araştırmalar devam etmektedir. Karışım oranları, karışımdaki malzemelerin miktarı ve özellikleri, taze beton deneyleri, taze betonu taşıma, döküm sonrası bakım (kür) ve durabilite konusundaki gelişmeler yenidir. Bu nedenle KYB uygulanacak her yapı için özel KYB üretmek yani karışım oranlarını ve taze beton özelliklerini belirlemek gerekir. Bu durumlar uygulama öncesi önemli bir zamanı kapsamaktadır [22].

2.3.4. KYB'nin Geleceği

Günümüzde KYB özel bir beton türü olarak tanımlanmaktadır. Dezavantajları giderildikçe ve avantajları yapılacak çalışmalarla daha ileri seviyelere taşındıkça kullanım alanları her geçen gün genişleyecek ve kullanım miktarı artacaktır. İnşaat sektörünün çok büyük bir bölümünü teşkil eden konut inşaatlarında, kalıpların sızdırması nedeniyle KYB kullanılamamaktadır. Özellikle bu konudaki gelişmelerle bu betonun kullanım miktarının artacağı bir gerçektir.

2.4. KYB'nin Mühendislik Özellikleri

Bütün özel betonları geleneksel betonun bir türevi olarak düşünmek gerekir. Bu nedenle özel bir beton türünün özellikleri belirlenirken, geleneksel beton referans kabul edilmektedir. KYB içinde aynı durum söz konusudur. Örneğin, sertleşmiş betonun özelliklerinin tespiti ve durabilite özellikleri için geleneksel beton ve KYB aynı standartlara tabidir [23].

KYB tasarlanırken, betondan beklenen özellikler belirlenmelidir. Baskın olması istenen özellikler doğrultusunda mühendis, karışım oranları, döküm ve bakım şartları gibi özellikleri belirleyecektir. KYB konusunda yapılan sempozyumlarda sunulan bildirilerde, projelerde ve makalelerde, bu betonun sadece yüksek dayanımlı beton olarak düşünülmemesinin doğru olacağı kanaatine varılmıştır. KYB karışım oranları belirlenirken istenen özellikleri (taze veya sertleşmiş halde) doğrultusunda yüksek performans gösteren betondur [2, 24].

2.4.1. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı, geleneksel betonda olduğu gibi KYB'de de tanımlayıcı en önemli özelliktir. Tespiti geleneksel betonda olduğu gibidir. Dayanımı yüksek olan betonların, performanslarının da yüksek olacağı bilinmektedir. Ancak belirli bir beton özelliğini iyileştirmek için sürekli beton dayanımını çok yüksek tutmaya çalışmak ekonomik kayıplara yol açacaktır. Bu nedenle inşa edilecek yapı için yeterli dayanım sınıfı ve istenen diğer özellikler

belirlenmeli, bu beklentileri karşılayacak şekilde beton karışım oranları düzenlenmeli ve uygulanmalıdır [2].

2.4.2. Çekme Dayanımı

KYB büyük çoğunlukla basınç dayanımı kullanılarak sınıflandırılır. Bu durumda da geleneksel betonda olduğu gibi çekme dayanımının önemi yoktur ve ihmal edilir. Zaten KYB'nin çekme dayanımı, geleneksel betonda olduğu gibi oldukça küçüktür. Betonarme elemanlardaki çatlak genişliklerini kontrol altında tutmak, erken yaştaki termal etkilerden betonu korumak ve başka diğer sebeplerle betonun çekme dayanımının artırılması gerektiği durumlarda, bu özellik KYB'de lif kullanılarak betona kazandırılır [2].

2.4.3. Elastisite Modülü

Yapı elemanlarının sehimlerinin hesaplanmasında, levha elemanlarda kontrol parametresi olarak ve öngerilmeli elemanlarda elastisite modülünün bilinmesi gerekir. Agregas elastisite modülü, tipi ve miktarı, betonun elastisite modülü üzerinde direkt etkilidir. Artan toz miktarı nedeniyle, KYB'nin elastisite modülünde geleneksel betona oranla değişiklikler olacaktır. Bu durum tasarım ve uygulamalarda göz önünde bulundurulmalıdır [2].

2.4.4. Sünme

Zamanla oluşan deformasyonun hesabı, beton için bilinmesi gereken önemli bir özelliktir. Sünme dayanımı azaltan ve yük transferini olumsuz etkileyen bir durumdur. Sünme, betonun çimento harcında meydana gelir ve poroziteden W/C oranına birçok parametre ile çok yakın ilişkilidir. Özellikle betonarme taşıyıcı elemanlarda sünme, davranış ve miktar olarak bilinmesi gereken önemli bir özelliktir [25]. KYB, bu konuda normal betondan daha olumlu davranışlar göstermektedir.

2.4.5. Rötire

Bu durum genellikle kuruma rötresi şeklinde oluşmaktadır. Kullanılan agrega ve çimento tipi ve miktarı bu özelliği önemli ölçüde etkilemektedir. Geleneksel betondan farklı olarak KYB de kullanılan toz malzeme ve kimyasal katkının bu özelliği etkileyeceği bilinmesi gereken bir durumdur [25].

2.4.6. Sıcaklık Genleşme Katsayısı

Beton genellikle çelik ile birlikte kullanılmaktadır. Beton ve çelik donatının termal genleşme katsayıları yaklaşık aynı oldukları için betonarme adı verilen yapı malzemesi doğmuştur. KYB'nin de termal genleşme katsayısı, geleneksel betonunki ile yaklaşık aynıdır.

2.4.7. Betonarme ve Öngerilmeli Sistemde Aderans

Betonarmeden ve öngerilmeli betondan bahsedebilmek için beton ve donatı arasında aderans olmalıdır. Özel beton türleri kullanıldığında aderans özellikleri belirlenmelidir. Çünkü bu özellikler sayesinde kenetlenme boyları tespit edilmektedir.

2.4.8. Kesme Kuvveti Kapasitesi

KYB vibrasyonsuz olarak kalıba yerleşmektedir. Döküm sürekli ve soğuk derz oluşmayacak şekilde yapılmalıdır. İki tabaka arasında oluşacak bir ara kesit kesme dayanımını olumsuz yönde etkileyecektir. Tasarım ve döküm planlarında bu durum da göz önünde bulundurulmalıdır [2].

2.4.9. Yangın Dayanımı

Beton yanıcı bir malzeme değildir. Agrega özellikleri, beton kalitesi, nem içeriği ve gözeneklilik durumu yangın dayanımını etkileyen önemli unsurlardır. KYB ve geleneksel beton yangın dayanım özellikleri birbirine benzerdir.

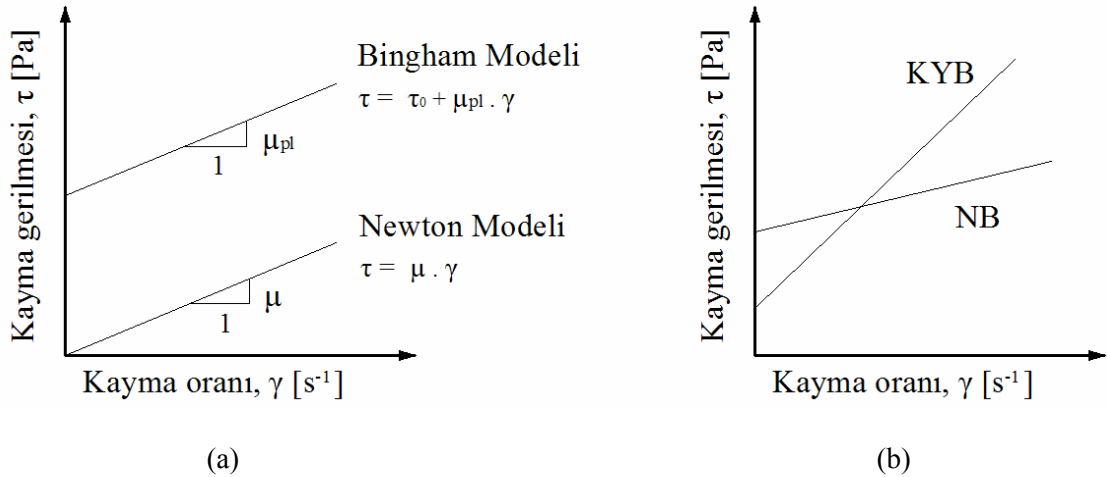
2.4.10. Durabilite

Günümüzde beton dayanımı kadar beton dayanıklılığının da önemli olduğu araştırmacılar tarafından kabul görmüştür. Karbondioksit, klor, sülfat, su, oksijen, alkali ve asit özelliklerine betonun dayanıklı olması gerekmektedir. Bu özelliklerin olumlu olmasındaki en önemli faktör geçirimsizliktir. Özellikle toz malzeme kullanımı KYB geçirimsizlik özelliğini olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle KYB'deki durabilite özellikleri olumlu olmakta fakat değişkenlik göstermektedir. Durabilite test metotları standartlarda ve araştırma makalelerinde detaylı bir şekilde yer almaktadır.

2.5. Taze Beton Reolojisi ve KYB

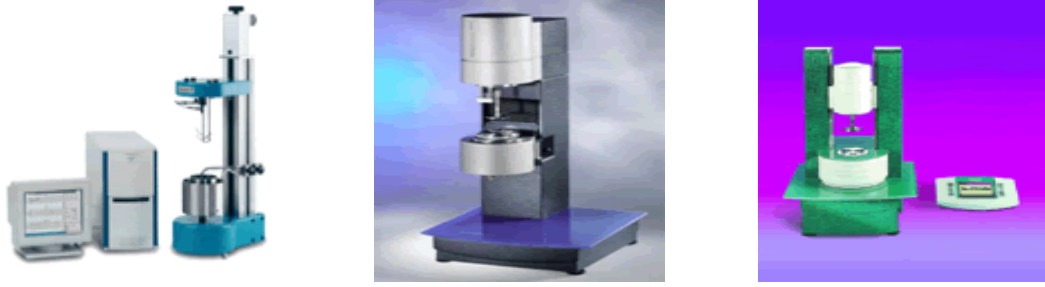
Reoloji, maddenin akışı ve deformasyonu ile ilgilenen bir bilim dalı olarak ifade edilebilir. Özellikle mühendislik uygulamalarında reoloji kavramı, ideal katılara, basit akışkanlara ve gazlara uymayan malzemelerin davranışını incelemeye kullanılır. Davranışları ideal malzeme kanunlarına uyan malzemelerin özellikleri arasında önemli farklılıklar yoktur. Mühendislik uygulamalarında reoloji, genellikle karmaşık davranışlar gösteren malzemeler için incelenmektedir. Beton söz konusu olduğunda, taze betonun reolojik davranışları göz önüne alınır.

Taze betonun akıcılık özelliği dikkate alındığında, matematiksel olarak modellenmesi için, sıvı olarak incelenmesi gerekir. Bu modellemeye betonun, yerleşme, yüzeyinin düzelmesi, ayrışma ve kalıp basıncı gibi konuların özelliklerinin belirlenmesi için ihtiyaç duyulur. Tüm beton çeşitlerinde reoloji ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. KYB, Bingham Modeli kullanılarak, yüzey gerilmesi ve plastik viskozite olarak iki parametre ile modellenir. Ancak KYB de çoğu zaman yüzey gerilmeleri küçük olduğu için Newton sıvısı olarakta modellenebileceği vurgulanmaktadır (Şekil 2.1a-2.1b). Normal betonda oluşan yüzey gerilmeleri, KYB'den daima büyüktür. Bu durum, KYB'de hidrostatik basıncın daha büyük olması, dolayısıyla kalıpların daha büyük basınçlara maruz kaldığı anlamına gelmektedir. Bu durum uygulamalarda dikkate alınması gereken önemli bir özelliktir [21].



Şekil 2.1 a) Reolojik modeller, b) Normal beton ve KYB arasındaki farklılıklar.

Betonda reolojik özelliklerin belirlenmesi için 60'ın üzerinde test metodu kullanılmaktadır. Bunların %70'inden fazlası tek parametre ölçen metotlardır. Bu parametreler, yüzey gerilmesi veya plastik viskozitedir [26-27]. Farklı reometreler ve viskozimetreler Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2 Reometre ve viskozimetreler.

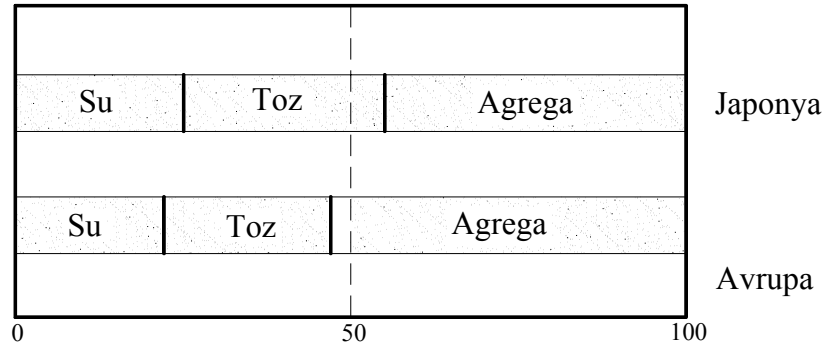
Normal beton; kum, çakıl, su ve çimento ana bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin miktarları, türleri ve şekilleri gibi birçok özellik, taze beton reolojisini etkileyen parametrelerdir. Bu nedenle KYB gibi özel bir betonunda reolojik özellikleri farklı olmaktadır. KYB üretiminde kullanılan toz madde miktarı ve tipi, kimyasal katkının özellikleri taze betonun karakteristikleri üzerinde etkili olmaktadır [28]. Bu özellikler dikkate alınarak, kendiliğinden yerleşen taze betonun reolojik özellikleri ile taze beton deneyleri arasında bağıntılar kurulmakta ve bunlar yardımıyla karışım metotları belirlenmektedir [29].

2.6. KYB Karışım Bileşenleri

KYB karışımının normal betondan en büyük farkı, toz ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların kullanılmasıdır. Kullanılan bu malzemelerle, taze betona kendiliğinden yerleşebilirlik, sertleşmiş betona ise yüksek performans özellikleri kazandırılmaya çalışılır [30]. Normal beton (geleneksel beton) ile KYB'nin karışım oranları bakımından karşılaştırılması Şekil 2.3'de görülmektedir. Karışım oranları ülke ve bölge farklılıkları gösterebilmektedir. Bu durumun örneği Şekil 2.4'de verilmiştir. Farklılığın nedeni ise kullanılan toz malzeme ve agrega tipi olarak ifade edilebilir.

(Kimyasal Katkı: Süper akışkanlaştırıcı)					Kendiliğinden Yerleşen Beton
Hava	Su	Toz	Kum	Çakıl	
Hava	Su	Çimento	Kum	Çakıl	Normal Beton

Şekil 2.3 KYB ve normal beton karışım oranları [31].



Şekil 2.4 Avrupa ve Japonya'da KYB hacimsel karışım oranları [32].

KYB'nin taze ve sertleşmiş beton özellikleri, karışımда yer alan malzemelerin miktarına ve tipine göre önemli değişiklikler gösterir. Bu hassasiyet, KYB üretiminin, dökümünün ve bakımının daha dikkatli yapılmasını gerektirmektedir. Karışımда yer alacak her malzeme farklı bir özellik göstereceğinden, KYB üretiminde kullanılacak malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu özelliklerin bilinmesi ile ancak optimum karışım oranları belirlenebilir [11].

2.6.1. Çimento

Çimento betonun ana bileşenlerindendir. Beton dayanımı üzerine direkt etkili bir unsurdur. Çimentonun tipi, karma oksit bileşenlerinin miktarı ve katkı malzemeleri ile ilgilidir. Örneğin, katkı maddesi kalker esaslı bir çimentonun hidrasyon ısısının, uçucu kül katkılı çimentoya göre daha düşük olacağı bilinmektedir [33]. Aynı kimyasal bileşime sahip çimentolarda, incelik miktarı önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. İncelik miktarı, kullanılması gereken su miktarı ile doğru orantılı, su miktarı ise dayanım ile ters orantılıdır. Burada optimum değer çimento özellikleri veya çeşidi ile belirlenecektir.

Çimentoların, farklı toz malzemelerle (uçucu kül, silis dumanı vb.) ve farklı kimyasal katkılarla farklı uyumlar gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle, aynı karışım oranlarına sahip KYB'lerde sadece çimento tipi değiştirilerek daha başarılı KYB'ler elde edilebilir [34].

2.6.2. Toz Malzeme (Filler)

KYB'nin tüm özellikleri üzerinde etkili parametrelerin başlıcaları toz malzeme türü ve miktarıdır. Silis dumanı, uçucu kül ve taş tozu gibi toz malzemeler KYB üretiminde kullanılmaktadır [35]. Uçucu kül, termik santrallerden elde edilen, atık bir malzemedir. Küresel mikro yapısı nedeniyle KYB üretiminde kullanılması uygundur. Bilindiği gibi uçucu küllerin

kimyasal bileşen oranları ve fiziksel özellikleri farklılıklar göstermektedirler. Birçok uçucu kül tipinin KYB üretiminde olumlu özellikler gösterdiği bilinmekle birlikte, deneme karışımları ile ayrıca özellikleri belirlenmelidir [36-38].

KYB üretiminde kullanılan toz malzemelerden biride taş tozudur. Özellikle taş ocaklarında elde edilen atık tozlar kullanılmaktadır. Kireçtaşı tozu bunlar içinde en yaygın olanıdır. Ancak tebeşir tozu gibi özel tozlarda kullanılabilir [39-41].

Bazı malzemeler ülkeye hatta bölgeye özel olabilmektedir. Bazen madenler çıkarılırken, maddi değeri olmayan toz malzemeler elde edilir. Bunların uygunluğu kanıtlanıp, KYB üretiminde kullanılması mümkündür. Bazen de Çin de olduğu gibi, püskürtülerek oluşturulmuş çelik cüruf agregası gibi malzemeler elde edilir. Bu tür atıklarda KYB üretiminde kullanılmaktadır [42-43].

2.6.3. Agreg

Agrega betondaki önemli malzeme gruplarından biridir. Bu nedenle beton karışımında agreg

Agrega oranına bağlı olarak KYB'nin döküm sırasında kalıplara yaptığı basınç değişmektedir. Bu hidrostatik basınç, karışım

Granülometri, KYB de daha fazla önem kazanmaktadır. Çünkü sertleşmiş betondan çok, taze beton özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca agreg

Agrega tipide KYB özellikleri ve ekonomisi üzerinde direk etkilidir. Nehir agregası, kırmataş agregasına göre daha az suya ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca kırmataş yüzey özelliklerinden dolayı taze betonun viskozite özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Nehir agregasına üretim için herhangi bir işlem uygulanmadığı için bu agreg

2.6.4. Kimyasal Katkı

Kimyasal katkılar, betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi sırasında betona, çimento miktarının %5'ini geçmemek üzere eklenen maddeler olarak tanımlanmaktadır. KYB'yi normal betondan farklı kılan en önemli farklardan biri de karışımında kullanılan farklı kimyasal katkılardır. Bu katkıların en çok kullanılanı yüksek oranda su azaltıcı veya süper akışkanlaştırıcı olarak ifade edilen katkılardır. Betonların diğer özelliklerini iyileştirmek için kullanılan katkılarda mevcuttur. Süper akışkanlaştırıcıları kısaca şöyle özetlemek mümkündür:

1. Sülfone edilmiş sentetik polimerler
 - a. Sülfone Naftalin Formaldehit
 - b. Sülfone Melamin Formaldehit
2. Polikarbonatlar
3. Karma işlevli sentetik polimerler
 - a. Aminosülfat
 - b. Modifiye Linyosülfonat

Katkı sektöründeki gelişmeler büyük bir hızla devam etmektedir. Özellikle birkaç katkı çeşidinin bir arada kullanılmasıyla, betonun birçok özelliğinin iyileştirilmesi hedefler arasındadır. Özellikle süper akışkanlaştırıcılarla birlikte hava sürükleyici katkı ve viskozite artırıcı katkı kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır [50-52].

Beton karışımında bulunan malzeme özellikleri ve miktarları, beton-katkı performansını önemli ölçüde etkilemektedir [53]. Bu nedenle, özel yapılarda bu durum dikkate alınarak, karışım oranları hesaplanmaktadır. Bu özellik ve farklı katkıları bir arada kullanılarak, Çin'de Nan He Köprüsü, Ning-Hang ve Yan-Tang Karayolları, KYB kullanılarak başarılı bir şekilde inşa edilmişlerdir [54].

KYB üretiminde polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasının, taze beton özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaptığı tespit edilmiştir [55]. KYB'nin kullanıldığı her alana göre katkı çeşitleri farklılık göstermektedir. Su altı tünelleri, okyanus sondaj platformları ve rıhtımlar gibi özel deniz yapılarının üretiminde kullanılacak KYB'lerde metilseliloz ve poliakrilamit türü kimyasal katkıların kullanımı olumlu sonuçlar vermiştir [56].

KYB'de yüksek dayanım ve/veya yüksek performans için kimyasal katkı kullanımı vazgeçilmezdir. Kimyasal katkıların taze beton reolojisi üzerine etkileri incelenerek, karışım oranları belirlenirken bu durumlarında dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır [57].

2.6.5. Pigmentler

KYB birçok özelliği ile mimari beton olarak da kullanılmaktadır. Bu kullanımlardaki en önemli özelliği pürüzsüz yüzey elde edilebilmesidir. Renkli ve pürüzsüz yüzeyler mimari elemanlarda vazgeçilmez özelliklerdir. Betona istenilen rengin verilmesi amacıyla çeşitli yapıdaki renk pigmentleri kullanılabilir. Karışımda kullanılacak renk pigmentlerinin uygun miktarı deneme karışımları ile tespit edilmelidir [58].

2.6.6. Lifler

Betonun en önemli dezavantajlarından biri çekme dayanımının, basınç dayanımının yanında ihmal edilecek kadar düşük olmasıdır. Bu dezavantaj KYB içinde geçerlidir. Betonun çekme dayanımının artırılmak istenmesi, lifli beton çalışmalarını gündeme getirmiştir. Milattan önceki yıllardan günümüze kadar kullanılmış olan, saman takviyeli kil harcı (kerpiç) ve at saçından sıva harcı da, lifli beton çalışmalarına esin kaynağı olmuştur. Lifler çeşitli şekillerde ve boyutlarda çelik, plastik, cam ve doğal malzemelerden üretilen, uzunluğu, bükülebilirliği, esnekliği ve dayanıklılığı olan malzemelerdir. Bu malzemeler KYB'nin taze ve sertleşmiş beton özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, betondan beklenen performansa uygun lif çeşidi belirlendikten sonra deneme karışımları yardımıyla uygun lifli KYB karışım değerleri bulunmalıdır [59].

2.6.7. Karışım Suyu

Beton karışım suyu TS EN 1008 uygun olmalıdır. Eğer beton endüstrisinden elde edilen atık sular karma suyu olarak kullanılacaksa, bu suların konsantrasyonuna dikkat edilmeli ve mutlaka deneme karışımları ile önceden KYB özellikleri tespit edilmelidir [60].

2.7. KYB Tasarım Esasları ve Yöntemleri

KYB, yüksek dayanımlı ve/veya yüksek performanslı özel bir beton türüdür. KYB üretiminden önce bu betondan beklenen taze ve sertleşmiş beton özellikleri belirlenmeli, karışımda kullanılacak malzemeler daha sonra tespit edilmelidir. Özellikle kimyasal katkı tipi, çeşidi, miktarı, toz malzeme çeşidi ve miktarı betonun tüm özellikleri üzerinde etkili olacaktır. Bu nedenle karışım oranları belirlenirken ilk önce tasarım esasları belirlenmeli daha sonra uygun yöntemlerden biri kullanılmalıdır.

2.7.1. Tasarım Esasları

İnsanoğlu artan ihtiyaçlarını karşılamak için özel yapılara ihtiyaç duymuştur. Çok katlı yapılar, köprüler ve deniz yapıları gibi aşırı yükler altında zorlanan yapıların inşası, sık donatılı dar kesitleri gündeme getirmiştir. Kimya endüstrisindeki gelişmeler sayesinde, özel yapılarda kullanılmak üzere, KYB gibi özel bir beton türü elde edilmiştir. KYB taze halde iken aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır:

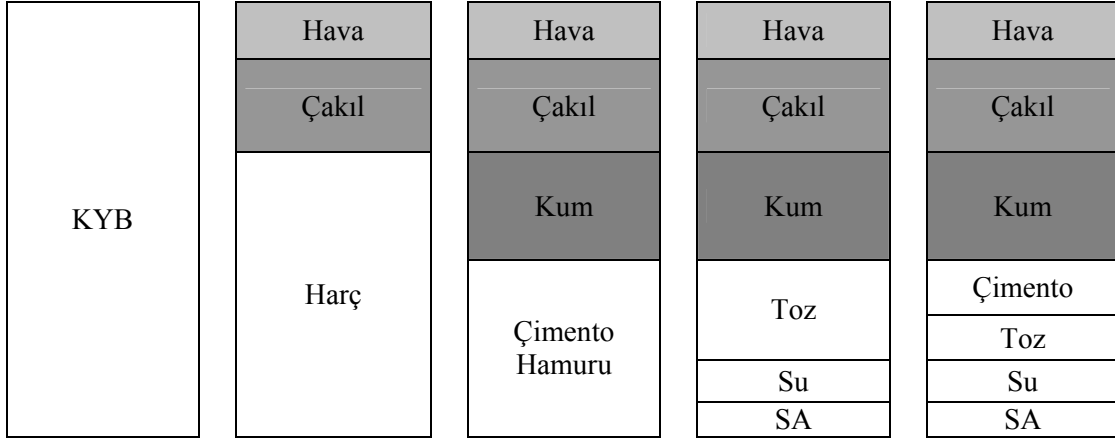
1. Akıcılık,
2. Geçiş kabiliyeti (Sık donatılı dar kesitler açısından),
3. Doldurma kabiliyeti,
4. Ayrışma direnci.

Bu özelliklerin tespiti çeşitli taze beton deneyleri ile yapılmaktadır. KYB kullanılacak yapı için bu özelliklerin değerlerinin ne olması gerektiği belirlenmelidir. Bundan sonra betondan beklenen dayanım değeri ve dayanıklılık (durabilite) özellikleri belirlenir. Bu özellikler doğrultusunda beton maliyetini minimum düzeyde tutacak malzeme çeşitleri ve özellikleri tespit edilir. Taze ve sertleşmiş betondan beklenen performans değerlerine karar verdikten sonra çeşitli yöntemler kullanılarak, beton karışımında kullanılacak malzeme miktarları bulunur [61].

2.7.2. Tasarım Yöntemleri

Üretilecek tüm KYB'ler için tek bir karışım yöntemi vermek mümkün değildir. Çünkü kendiliğinden yerleşen taze beton karakteristikleri, malzeme özelliklerine oldukça bağlıdır. Bu nedenle, özellikle toz madde çeşidi ve miktarına göre tasarım yöntemleri oluşturulmuştur. Tasarım yöntemleri, kendiliğinden yerleşen beton karışım kompozisyonundaki bileşenleri belirleme amacı içerisindedir (Şekil 2.5'de görüldüğü gibi) [62]. Bileşenlerin bir veya birkaçı için deneysel ve teorik çalışmalar sonucu bulunmuş uygun oranlar diğer çalışmalara ışık tutmaktadır.

Aynı tür toz malzeme kullanılan KYB'de bile karışım oranları farklı olabilmektedir. Uçucu kül kullanılarak oluşturulan KYB'ler için normal uçucu kül kullanılmışsa Sonebi'nin [63] tasarım esası, ultra ince uçucu kül kullanılmışsa Xie'nin [64] tasarım esası kullanılabilir. Bunun yanında, genetik programlama gibi yapay zekâ yöntemleriyle de karışım oranları belirlenebilmektedir [65].



Şekil 2.5 KYB karışım kompozisyonu [62].

Bölüm 2.6.6.'da KYB de lif kullanımından bahsedilmişti. Kendiliğinden yerleşen lifli taze beton karakteristikleri, KYB ile aynı olmadığından bu beton türü içinde karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla tasarım yöntemleri geliştirilmiştir [66]. Kendiliğinden yerleşen hafif betonlar için özellikle hava sürükleyici katkıları kullanılarak beton tasarım yöntemleri belirlenmiştir [67]. Sadece beton karışımında yer alan malzeme özellikleri değil, beton çeşidi değiştiğinde de (özel betonlarda olduğu gibi) KYB tasarım yöntemleri değişmektedir.

Tasarım yöntemlerinin tamamı yaklaşık değerlerin tespiti içindir. Kesin sonuçlar ancak deneme karışımları ile bulunabilir.

2.8. KYB Taze Beton Özellikleri ve Deney Yöntemleri

KYB alanında standart oluşturma çalışmaları, uluslararası düzeyde devam etmektedir. Bu çalışmalar taze beton için, doldurma kabiliyeti, geçiş kabiliyeti ve ayırma direnci üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Taze beton deneyleri tasarlanırken, pratik olması ve diğer deney çeşitleriyle uygun sonuç vermesi, göz önüne alınan temel esastır. Bu bölümde, dünyaca kullanımı kabul görmüş taze beton deneylerine yer verilmiştir.

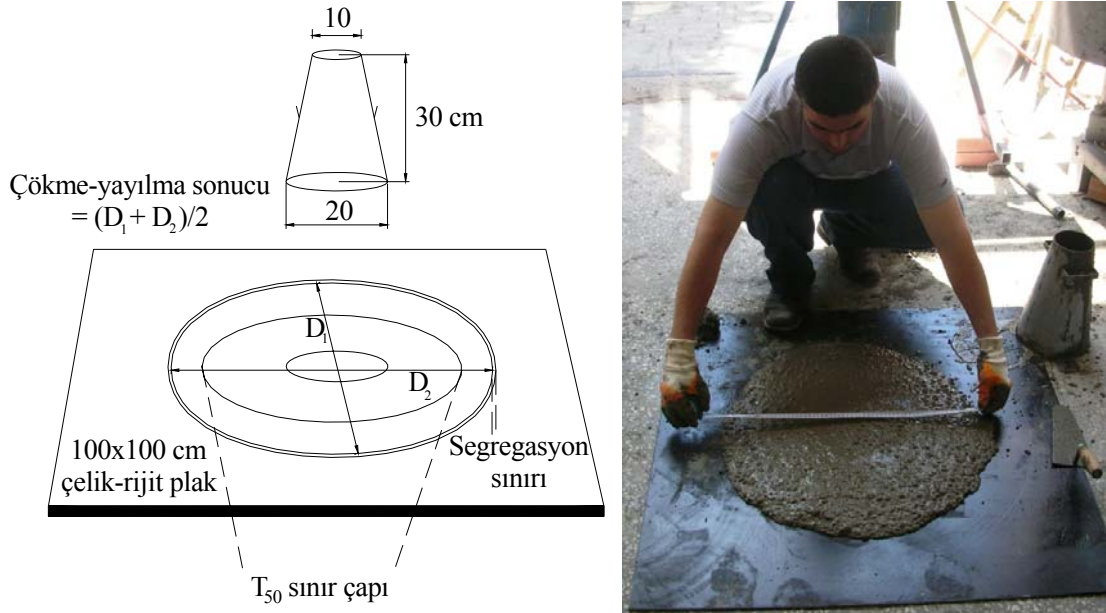
2.8.1 Doldurma Kabiliyetini Ölçen Taze Beton Deneyleri

Doldurma kabiliyetini belirleyen deneylerin temel amacı, KYB'nin kendi ağırlığı altında ne kadar uzağa akabildiğinin tespitidir. Deneyler sonucunda, uygun karışımlara sahip olan KYB'ler, işlenebilirliği ve homojenliği bozulmadan mümkün olan en kısa zamanda kalıba yerleşme özelliği gösterenler olarak belirlenebilir.

2.8.1.1. Çökme-Yayılma Deneyi

Bu deney geleneksel çökme (slump) hunisi ile yapılır. Bu deney sonucunda betonun yayıldığı maksimum çap olarak ve 50 cm çapa yayılma süresi (T_{50}) saniye olarak tespit edilir. Çökme yayılma testi ekipmanı ve deneyin yapılışı Şekil 2.6’da görülmektedir.

Betonun kendiliğinden yerleşebilirlik özelliği gösterip, doldurma yeteneğinin olması için yayılma değerinin en az 55 cm olması gerekmektedir. Bu değer büyük olması, doldurma yeteneğinin gittikçe artması manasına gelmektedir. Ancak yayılma değeri arttıkça segregasyon riskinin de artacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Betondaki segregasyon yaklaşıktı olsa, yayılma sınır bölgesinde gözle tespit edilebilir. Betondaki fazla su bu bölgede birikecektir. T_{50} süresinin kısa olması, betonun doldurma yeteneği hakkında fikir verir ve taze betonun viskozitesi ile direkt ilişkilidir. Çökme-yayılma deneyi genel değerlendirilmesi Tablo 2.1’de verilmiştir [2].

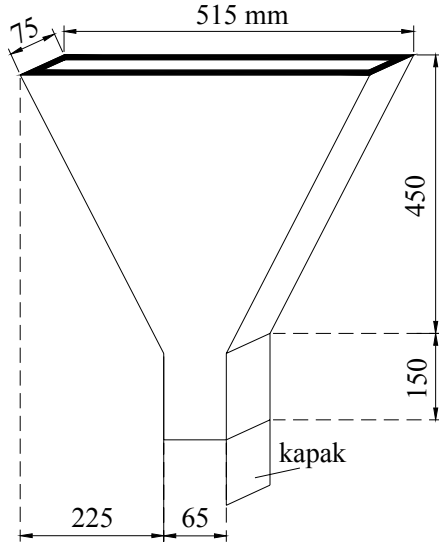


Şekil 2.6 Çökme-yayılma deneyi ekipmanları ve deneyin yapılışı.

Tablo 2.1 Çökme-yayılma deneyinin genel değerlendirilmesi [18].

Deney	Avantajları	Dezavantajları
Yayılma (Çökme-yayılma)	Pratik ve tüm ortamlarda yapılmaya uygundur. Bir kişiyle deney yapılabilir. Su oranına hassastır.	Çelik plaka nemi sonuçları etkiler. En az 1x1 m ² çelik plaka gereklidir Tek başına KYB özelliklerinin belirlenmesi için yeterli değildir.
T_{50} (Çökme-yayılma)	Doldurma özelliğinin iyi bir göstergesidir. Viskoziteyi tanımlama özelliğine sahiptir.	Çelik plaka nemi sonuçlar üzerinde oldukça çok etkilidir. Kesinlikle deney için deneyimli 2 kişiye ihtiyaç vardır.

boyutları ve deneyin yapılışı Şekil 2.8’de görülmektedir [2]. V-hunisi deneyi genel değerlendirilmesi Tablo 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.8 V-hunisi deney düzeneği ve deneyin yapılışı.

Tablo 2.3 V-hunisi deneyinin genel değerlendirilmesi [18].

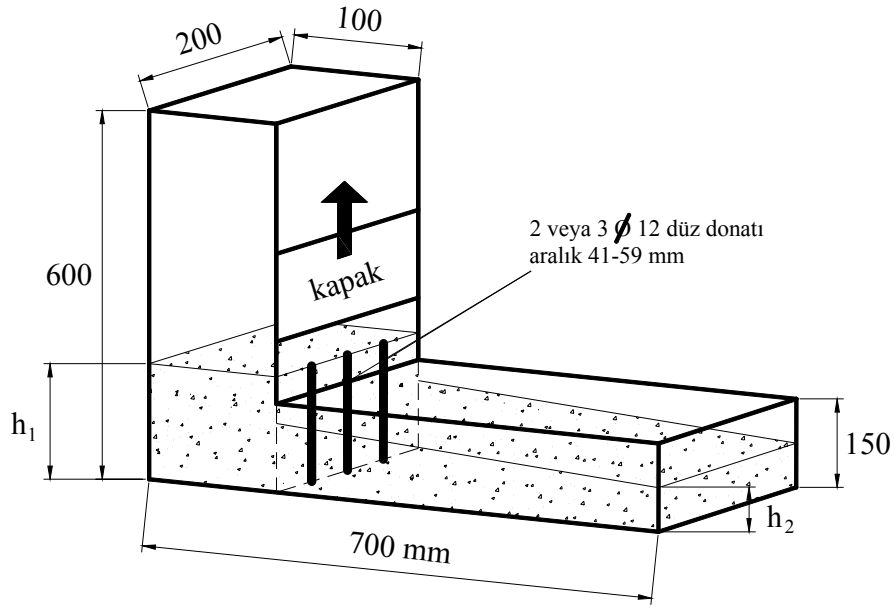
Deney	Avantajları	Dezavantajları
V-hunisi	Taze betonun viskozitesi için uygun sonuçlar verir.	Bir kişiyle deneyin yapılması oldukça zordur. Deney için büyük miktarda karışıma ihtiyaç vardır. Sonuçlar için pratik limitler ortaya koymak oldukça zordur.

2.8.2 Geçiş Kabiliyetini Ölçen Taze Beton Deneyleri

Geçiş kabiliyetini ölçen deneyler yardımıyla taze betonun kalıp içerisindeki donatılar arasındaki geçişinin nasıl olacağı belirlenir. Bu testlerin amacı, taze betonun donatılar arasından rahatça geçecek ve yerleşecek uygun karışım oranlarına sahip numunelerin belirlenmesidir. Taze betonun doldurma ve geçiş kabiliyetleri arasında sıkı bir ilişki vardır. Doldurma kabiliyeti düşük bir betonun, geçiş kabiliyeti yetersiz kalabilir ve beton istenen şekilde yerleşmez. Donatılar arasında biriken çakıllar betonun ilerlemesine engel olurlar. Bu nedenle KYB olarak uygulanacak karışımların taze betonların, hem doldurma hem de geçiş kabiliyetinin yeterli olması gerekir.

2.8.2.1 L-kutusu Deneyi

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi L-kutusunun kapağı açıldığında beton donatıları geçerek ilerler. Akış tamamlandıktan sonra kutunun başındaki ve sonundaki yükseklikler ölçülür ve bunlara bağlı bir oran elde edilir [2]. Bu oran (h_2/h_1), betonun geçiş yeteneğini belirleyen bir değerdir. L kutusunun boyutları farklılık gösterebilmektedir. Deneyin genel değerlendirilmesi Tablo 2.4’de verilmiştir.



(a)



(b)

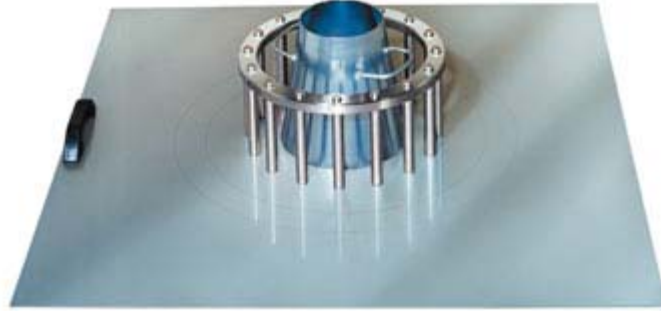
Şekil 2.9 a) L-kutusu deney düzeneği b) deneyin yapılışı.

Tablo 2.4 L-kutusu deneyinin genel değeriendirilmesi [18].

Deney	Avantajları	Dezavantajları
L-kutusu	Sadece h_2 yüksekliğinin ölçülmesi yeterli olabilir. Kutunun yapımında farklı tür malzemeler kullanılabilir. Çökme-yayılma deneyi ile uyum içerisindedir.	Yüksek çökme-yayılma değeriine sahip betonlarda sonuçlar hassas değildir. Deney yapılan ortamın temizliği problemlidir ve bir kişiyle çok zor yapılacak bir deneydir. Yüksek doldurma özelliğine sahip betonlarda, $h_2/h_1 > 1$ olabilmektedir.

2.8.2.2 J-halkası Deneyi

J-halkası deneyi yardımıyla taze betonun geçiş kabiliyeti ölçülmektedir. Slump hunisinin içerisine doldurulan beton, huni kaldırılınca, çubukların arasından akmaya ve yayılmaya başlar. Deney sonucunda yayılma miktarı uzunluk cinsinden ve T_{50} süresi saniye cinsinden ölçülebilir. Halka merkezden merkeze 30 cm çapındadır. Üzerinde 18 adet 125 mm uzunluğunda düz demir çubuk bulunur (Şekil 2.10). Bu demirlerin çapları çalışmaya göre farklılık gösterebilir [18]. Bu deneyi Orimet deneyi ile entegre yapmak mümkündür. Bu deneyin genel değeriendirilmesi Tablo 2.5’de verilmiştir.



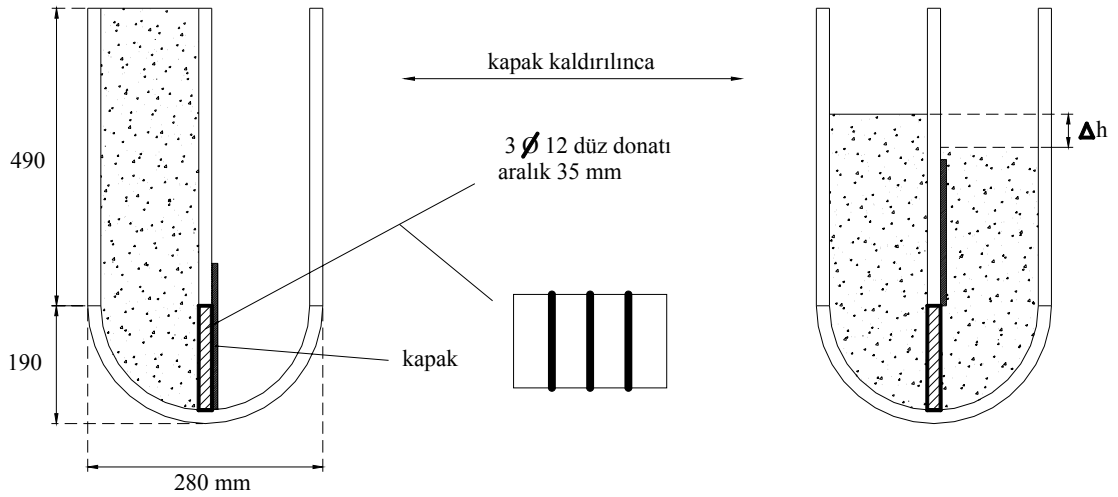
Şekil 2.10 J-halkası deney düzeneği.

Tablo 2.5 J-halkası deneyinin genel değeriendirilmesi [18].

Deney	Avantajları	Dezavantajları
J-halkası (Yayılma)	Basit ve pratik kullanışlı bir alettir. Ölçümleri yapmak kolaydır. Doldurma kabiliyeti hakkında da fikir verir. Segregasyon hakkında gözlemsel düzeyde fikir verir.	---

2.8.2.3 U-kutusu Deneyi

Okamura tarafından geliştirilen bu deney sistemi, betonun geçiş kabiliyetini ölçmede oldukça etkilidir. Kutunun bir tarafına beton doldurulduktan sonra aradaki kapak açılır ve iki seviye arasındaki fark veya oran geçiş kabiliyetini tanımlamaktadır. Şekil 2.11’de boyutları ve kullanım şekli görülmektedir. U-kutusu deneyinin genel değerlendirilmesi Tablo 2.6’da verilmiştir [54].



Şekil 2.11 U-kutusu deney düzeneği.

Tablo 2.6 U-kutusu deneyinin genel değerlendirilmesi.

Deney	Avantajları	Dezavantajları
U-kutusu	Pratik ve kullanışlıdır. Bir kişiyle deneyler sürdürülebilir.	Deney numunesi fazla kullanılmaktadır. Deneyden sonra ortam temizliği gerekmektedir.

2.8.3 Ayırışma Direnci Deneyleri

KYB’nin ayırışma (segregasyon) direnci, taze betonun yerleşmesi ve sertleşmiş betonun yüzey düzgünlüğü açısından çok önemlidir. Normal betonda en fazla 1.5 m yüksekten döküm yapılırken, KYB de bu mesafe artmaktadır. Ayırışma direnci, doldurma ve geçiş kabiliyeti üzerinde direkt etkilidir. Ayırışma, granülometri, toz malzeme çeşidi ve miktarı, W/C oranı ve süper akışkanlaştırıcı (SA) gibi birbiri ile ilişkili olan birçok parametreye bağlıdır. Ayırışmanın olmaması için, uygulama ve döküm şartlarına uygun karışım elde edilmelidir. Ayırışma belirli

bir seviyeye kadar kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Bu sınırlar, KYB'nin kullanılacağı yapıya göre belirlenmelidir. Ayırışma olup olmadığı ve yaklaşık olarak ayırışma düzeyinin ne olduğu, doldurma ve geçiş kabiliyeti deneylerinde de gözlemsel olarak belirlenir. Ancak kesin sonuçlar ayırışma direnci deneyleri ile bulunabilir. Bu bölümde genel kabul görmüş EFNARC'da yer alan elek ayırışma deneyinden bahsedilmiştir. Bu konu ile ilgili literatürde daha pratik deney çalışmaları devam etmektedir [2, 18, 69].

Elek segregasyon deneyi için 5-10 lt hacminde taze betona ihtiyaç vardır. Çapı 300 mm, derinliği 40 mm ve elek göz açıklığı 5 mm olan paslanmaz çelikten imal edilmiş elek bu deneyde kullanılmaktadır. Ayrıca en az 10 kg kapasiteli ve 20 g hassasiyetli elektronik bir terazi ve iki adet kova gereklidir.

Taze beton elde edildikten sonra 10 ± 0.5 kg taze beton, 15 ± 0.5 dk bir kovada bekletilir. Bu arada elek ve eleğin altına konulacak kovanın ağırlıkları belirlenir. Daha sonra 4.8 ± 0.2 kg beton eleğin üzerine dökülür. Betonun elekten geçmesi için 120 ± 5 s beklenir. Eleğin altına geçen betonun, toplam betona oranı ayırışma miktarını vermektedir. Bu oran EFNARC'da [2] maksimum 0.20 olarak verilmiştir. Deneyin genel yapılışı Şekil 2.12'de, genel değerlendirilmesi ise Tablo 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.12 Elek ayırışma direnci deney düzeneği.

Tablo 2.7 Elek ayırışma direnci deneyinin genel değerlendirilmesi [18].

Deney	Avantajları	Dezavantajları
Elek ayırışma direnci	Avrupa da uygulanan güncel bir deneydir. Uygulamalardaki sonuçlardan kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.	Elektronik deney ekipmanına ihtiyaç duymaktadır. Pahalı elektronik ekipmanına sahiptir. Uzun süre almaktadır ve hassaslığı yapan kişiye göre değişmektedir. Statik durumdaki ayırışmayı ölçmektedir.

2.9. Sertleşmiş KYB Özellikleri ve Durabilite

Normal ve yüksek dayanım sınıfında KYB elde etmek mümkündür. Dayanım sınıfı, betonun kullanılacağı yapı çeşidi ve yapının maruz kalacağı dış ortam etkilerine göre belirlenir. Dayanım arttıkça betonun dış ortam etkilerine dayanıklılığının artacağı bilinen bir durumdur. KYB, sadece dayanım artışı ile değil, kendisini normal betondan farklı kılan SA ve toz malzeme yardımıyla da farklı durabilite özelliklerine sahip olabilir. KYB'ler yaklaşık basınç dayanımı aynı normal betonlar (NB) ile karşılaştırıldığında rötire, sünme ve elasite modüllerinin benzer olduğu belirtilmiştir [70]. Ancak bu durum üzerinde toz malzeme çeşidi çok etkilidir. NB ile yaklaşık aynı özellik gösteren KYB'ler genellikle kireç taşı tozu gibi inert malzeme ile elde edilenlerdir. Uçucu kül ve silis dumanı gibi puzzolanik malzemelerle üretilen KYB'lerin basınç dayanımı ve durabilite özellikleri NB'lere göre önemli farklılıklar gösterebilmektedir.

NB'ler aynı kür şartlarına sahip Kireçtaşı tozu ile üretilen KYB'lerle yaklaşık aynı dayanım özelliklerine sahipken, silis dumanı kullanılan KYB'lerle farklı özelliklere sahiptir. Ayrıca kür sıcaklığının KYB numuneleri üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu bilinmektedir. NB de olduğu gibi KYB'lerde de W/C oranı dayanım ve durabilite üzerinde etkili en önemli parametredir [71-73].

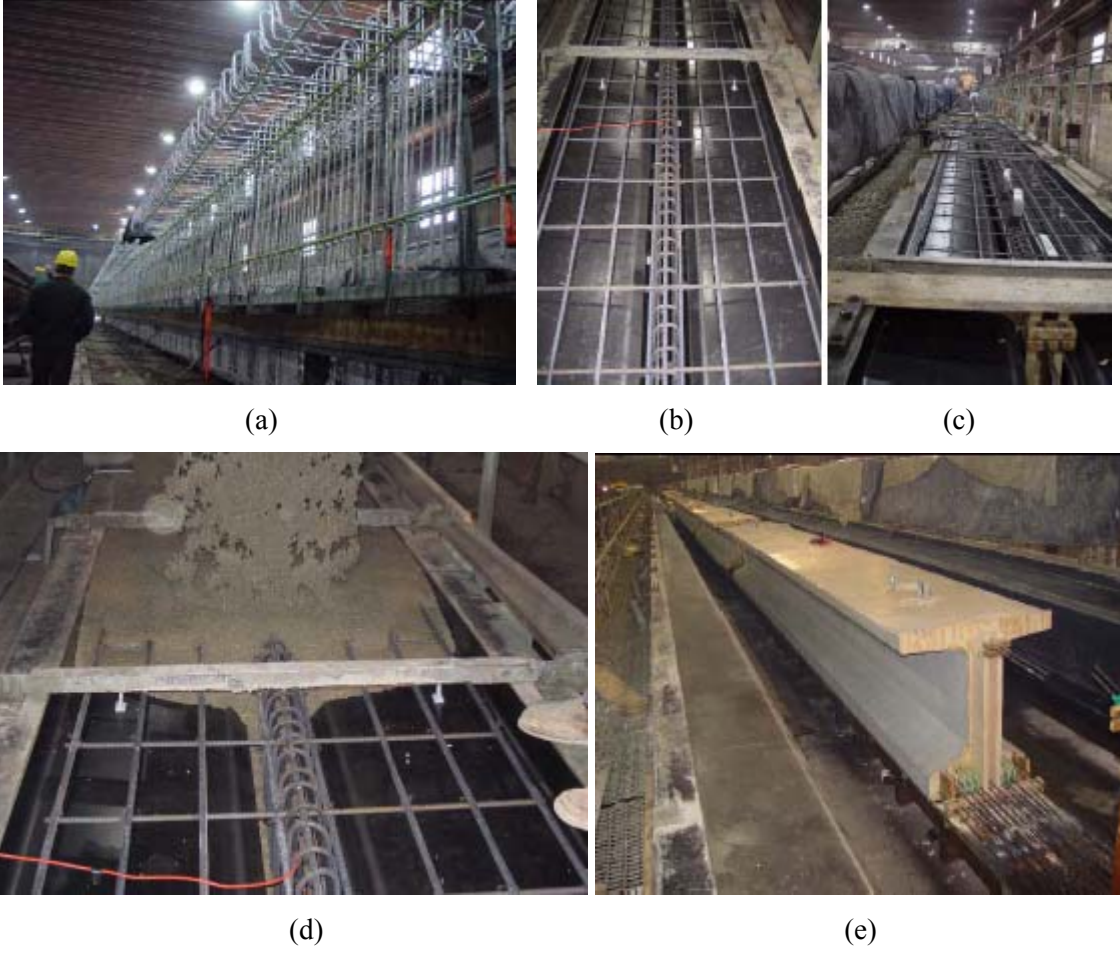
Dayanım ve durabilite özellikleri açısından KYB, NB'ye oranla tavsiye edilmektedir. Avantajlar, betonun uygulanacağı yapı sınıfı ve maliyet gibi durumlar göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir [74].

2.9. KYB Uygulamaları

Türkiye'deki ve dünyadaki yapıların çok önemli bir çoğunluğu için NB kullanımı yeterlidir. KYB daha çok köprü, su altı yapıları ve prefabrik yapılar gibi özel yapılarda kullanılmaktadır. Bu yapıların ekonomik değerlerinden dolayı, KYB maliyeti önemsiz duruma gelmektedir. Ayrıca bu yapılarda NB'nin birçok olumsuzluğunun önüne KYB kullanımı ile geçilmektedir.

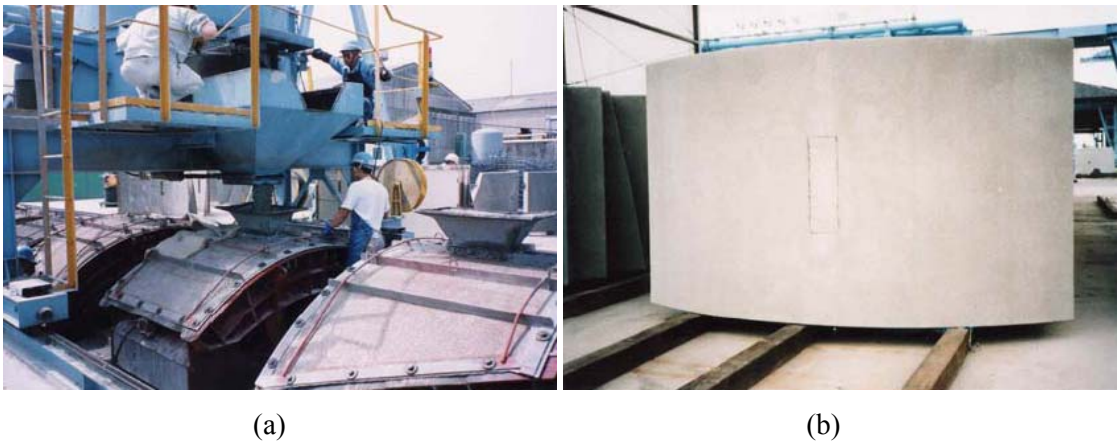
KYB'nin yapılarda kullanılması bu malzemenin donatılı özelliklerinin de bilinmesini gerekli kılmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmalarda, giriş ve kolon gibi elemanlar oluşturularak, deneysel olarak incelenmiş ve uygun özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir [75, 76].

Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'de KYB uygulamaları görülmektedir. Sık donatılı ve dar kesitlere sahip prefabrik ve öngerilmeli elemanların üretiminde KYB önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Pürüzsüz beton yüzeyi görünüşü ve kaplama maliyetlerini belirli miktarlarda etkilemektedir.



Şekil 2.13 Prefabrik KYB öngerilmeli kiriş [77]

- a) Kiriş donatıları b) Kalıp içerisindeki donatılar c) Beton dökümünden önce kalıp genel görünümü
d) KYB dökümü e) Öngerilme uygulanmış kiriş



Şekil 2.14 Prefabrik KYB kabuk eleman [78]

- a) Kalıpların hazırlanması b) KYB ile pürüzsüz yüzeyli beton üretimi

3. BETONUN LİNEER OLMAYAN KIRILMA MEKANİĞİ

İnsanların yerleşik hayata geçtikleri ilk zamanlarda önemli veya büyük yapılar genellikle taş veya kaya bloklarla inşa edilmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle yapılar özellikle betonarme ve çelikten inşa edilmeye başlanılmıştır. Bu yapılar inşa edilirken, beklenmedik durumlarla karşılaşmış, büyük mühendislik kazaları meydana gelmiştir. Hatta İkinci Dünya Savaşı'nda yapılan gemiler hiç kullanılmadan tahrip olmuş, füzeler hedeflerine ulaşmadan havada infilak etmiştir. Bu olaylar insanları malzemenin özelliklerini ayrıntılı bir şekilde araştırmaya yöneltmiştir. Ayrıca meydana gelen bu feci mühendislik kazaları ve daha önce olan olaylar bilimimin malzeme kusurları konusunda ciddi bir eğilim göstermesine sebep olmuştur.

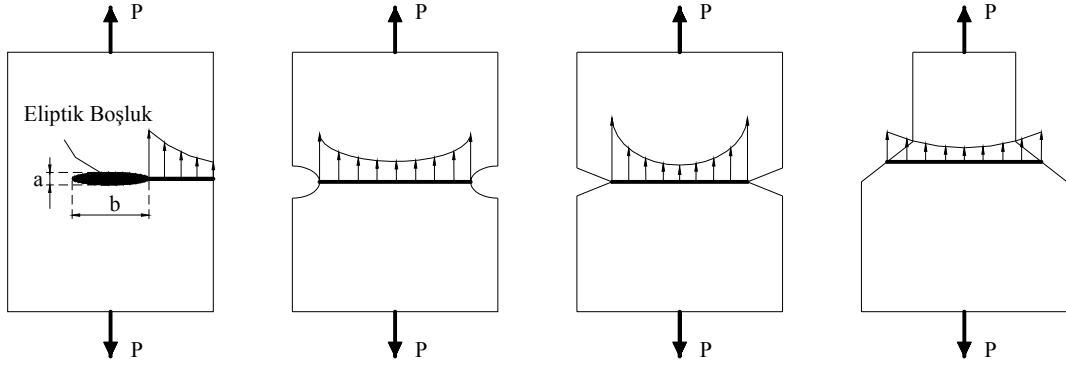
Tarih boyunca insanlar karşılaştıkları problemler neticesinde akıllarında soru işaretleri oluşmuş ve bu problemleri çözerek, günümüz teknolojisine gelinmiştir. Eski zamanlarda yaşayan insanlar yapılarını genellikle taş bloklarla inşa ettiklerinden, taş ve kayaların yük altındaki davranışı konusunda bazı problemler yaşamışlardır. İlk olarak Galilei tarafından, “niçin cisimler kırılır?”, sorusuna cevap aranmıştır. Galilei'nin bu düşünceleri aynı zamanda boyut etkisi teorisinin ilk adımlarıdır. Daha sonra Coulomb basınç altındaki kayaların kırılması konusunda araştırmalarıyla, malzeme kusurlarını dikkate almasından dolayı Kırılma Mekaniğine öncülük etmiştir [79, 80].

Kırılma Mekaniği Bilimi malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yığılmasını artıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. Bu sorun beton ve betonarme yapılar içinde geçerlidir. Özellikle beton ve betonarme yapılarda hasara yol açıp, yüksek oranlarda can ve mal kaybına sebep olabilecek bu sorunun giderilebilmesi için konunun ayrıntılı bir şekilde incelenip, analiz edilmesi gerekir. Beton ve betonarme yapıların göçme analizi için birçok lineer ve lineer olmayan yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak özellikle sismik yüklemelere maruz beton ve betonarme yapılarda göçme meydana gelmeden taşıyıcı sistemlerde yerleşen çatlak veya çatlaklar oluşabilmekte ve malzeme yumuşama adı verilen dayanım kaybına uğrayabilmektedir. Çatlamış bir yapı, ancak Kırılma Mekaniği Prensipleri kullanılarak gerçekçi bir şekilde analiz edilebilir.

Beton ve betonarme yapıların kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak analiz edilebilmeleri için, yapıyı oluşturan ve önemli bir malzeme olan betonun özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Heterojen bir yapıya sahip olan ve dayanım-kırılma özellikleri birçok farklı parametreye bağlı olan bu malzeme gerçeğe ne kadar yakın modellenirse, yapılardaki hasarların tespiti de o ölçüde gerçeğe yakın olacaktır.

3.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihsel Gelişimi

Coulomb'un 1776 yılındaki yaklaşımı [80], araştırmacıları malzeme kusurları düşüncesine yönlendirmiştir. 1913 yılında English, sonsuz bir levhada eliptik bir boşluk çevresindeki gerilme durumunu incelemiştir. English'in teorisi elastisite teorisi tabanlıdır [81]. Kuvvet etkisi altındaki elemanlarda, iç kısımlarda veya kenarlarda süreksizlikler bulunabilir. Gerek bu gibi durumlarda gerekse imalat sırasında malzemede boşluk, çatlak gibi kusurların oluşmasından dolayı kesit boyunca gerilme üniform dağılmayabilir. Kesit üzerinde ortalama gerilmelerden (P/A) farklı, maksimum gerilmeler meydana gelmektedir (Şekil 3.1). Bu farklı gerilme durumu gerilme yığılması veya çentik etkisi olarak adlandırılır.



Şekil 3.1 Basit çekme durumunda çentikli kısımlarda oluşan gerilme yığılmaları [82].

English σ gerilmesi altındaki sonsuz bir levhanın sahip olduğu eliptik boşluk etrafındaki maksimum gerilmeyi aşağıda tanımlandığı gibi formüle etmiştir.

$$\sigma_m = K_t \cdot \sigma \quad (3.1)$$

$$K_t = 1 + 2 \cdot \left(\frac{a}{b} \right) \quad (3.2)$$

Verilen bu matematiksel modelde a ve b eliptik boşluğun boyutları, σ_m eliptik boşluk çevresindeki maksimum gerilme, σ sonsuz levhaya uygulanan gerilme, K_t ise gerilme yığılma faktörüdür. English teorisinde tanımladığı matematiksel modelin tüm malzemeler için geçerli olduğunu düşünmüştür. Gevrek veya sünek olması fark etmemektedir.

English'in çalışmaları kırılma mekaniğine temel teşkil etmiştir. 1920'li yıllarda Griffith, English'in teorisini daha da geliştirmiş ve LEKM'nin temellerini atmıştır. Griffith cam lifler

üzerinde yapmış olduğu deneylerde, teorik mukavemetin, elastisite modülünün %10'u (E/10) civarında olduğunu ve malzemenin gerçek mukavemeti ile arasındaki bu uçurumun bünyesindeki kusurlardan kaynaklandığını tespit etmiştir [83]. Malzemeye uygulanan gerilmenin oldukça düşük olmasına rağmen, gerilme yığılması nedeni ile teorik kohezif dayanıma erişilebilir. Nitekim Griffith 'in cam liflerin dayanımlarının, normal plaka camlarına nazaran çok mukavemetli olduğunu ortaya koyması bunun açık ıspatıdır.

$$\sigma^2 \geq \frac{2\gamma E}{\pi a} \quad (3.3)$$

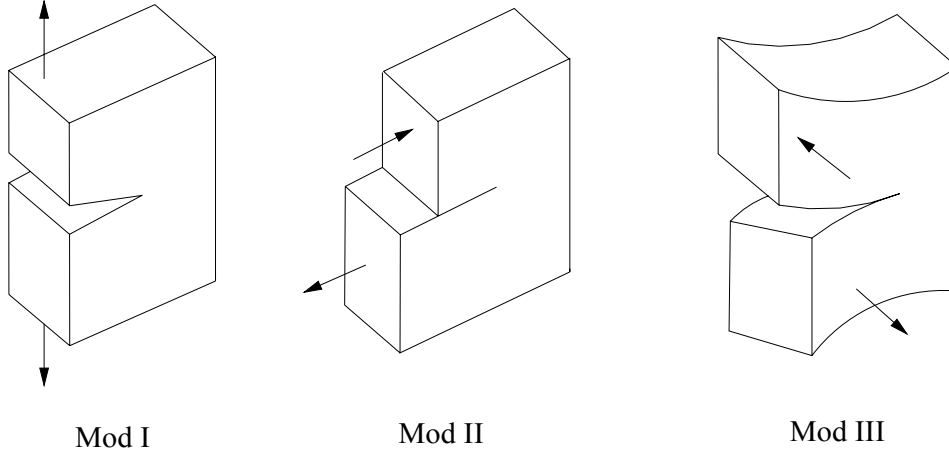
İfade 3.3 de γ yüzey enerjisi, E elastisite modülü, a çatlak boyu ve σ levhaya uygulanan gerilmedir. Griffith kırılmaya devrine göre çok ilgi gören bir konu olan enerji ile yaklaşmıştır, gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik şekil değiştirme enerjisinde bir azalma olur, bu da yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjidir. Bu teori gevrek katılarda teorik dayanımın tahminine yaradığı gibi kırılma mukavemetiyle kusur boyutu arasındaki ilişkiyi de verir.

Griffith yaklaşımı, 1944 de Zener ve Hollomon tarafından metalik malzemelerin gevrek kırılmasına da uygulanmıştır [84].

1950'lerin ortalarında Irwin kırılma mekaniğinde yeni bir dönem başlatmıştır [85]. Griffith'in teorisi cam gibi tam gevrek malzemelerde çatlak yayılması için gerekli olan gerilmenin değerini vermektedir. Çatlak yayılmadan öncesi veya sonrası hakkındaki herhangi bir bilgiyi içermemektedir. Irwin, seramik lifler üzerinde yapmış olduğu deneylerde teorik mukavemetin E/10 civarında olmadığını görmüş ve teoriyi metalleri de (plastik şekil değiştirme yeteneğine sahip malzemeler) içine alarak genişletmiştir. Daha sonra sırasıyla açılma (çekme), kesme ve burulma durumlarına karşılık gelen üç yükleme durumu mod I, mod II, mod III, genel kırılma modlarını (Şekil 3.2) ve bunların kombinasyonundan oluşan karışık modun kanunlarını ve K adı verilen gerilme şiddet çarpanını (İfade 3.4) ortaya koymuştur [86].

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma \sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= \tau \sqrt{\pi a} \\ K_{III} &= \tau \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Denklemlerde σ , malzemeye uygulanan çekme gerilmesi τ , kayma gerilmesi ve a, yarı çatlak uzunluğudur.



Şekil 3.2 Kırılma Modları

Gerilme şiddet çarpanı, geometriye ve yükleme durumuna bağlı bir sabittir. Yani her malzeme aynı geometriye ve yükleme durumuna maruz kalırsa, bu değer sabit olacaktır. Dolayısıyla gerilme şiddet çarpanı bir malzeme sabiti değildir. K , belirli bir kritik değer olan K_c değerine ulaştığında kırılma tokluğu veya kritik gerilme şiddet çarpanı adını alır ve her malzeme için farklı bir değer alır. Mod I durumu için b numune genişliği, d numune yükseklik boyutu ve P kırılma yükü olarak alınırsa, nominal dayanım $\sigma_N = P/(b.d)$ olmak üzere kritik gerilme şiddet çarpanının ifadesi, İfade 3.5’de verilmiştir.

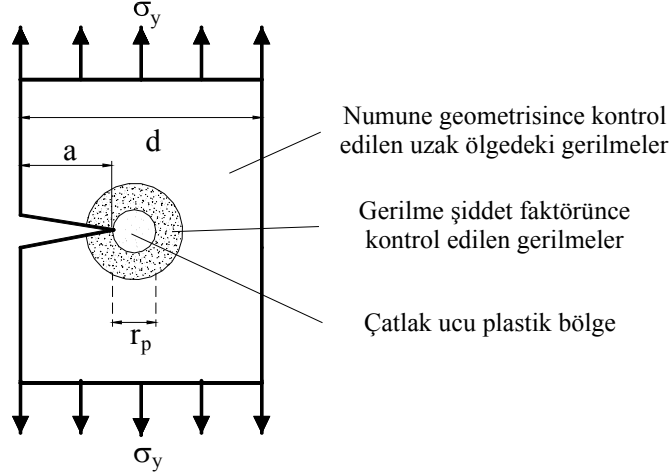
$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{d}\right) \quad (3.5)$$

Ancak, çatlakın başlangıcı ve yayılma hızı mühendislik açısından daha önemli olduğundan, Irwin, G_c çatlak yayılma hızı kavramını ortaya koymuş ve K_c ile arasındaki bağıntıyı İfade 3.6 ile ifade etmiştir.

$$G_c = \frac{K_c^2}{E} \quad (3.6)$$

Irwin sünek malzemelerde yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjinin, plastik deformasyon sırasında yapılan iş yanında genellikle önemsiz derecede olduğunu savunmuştur. Böylece çatlak yayılma hızı kavramını tanımlamıştır. Şekil 3.3’de r_p , plastik bölge uzunluğu d , levhanın genişliği a , çentik boyunu ifade etmektedir. Irwin, çatlakın hemen ucunda

plastik bölgede gerilme dağılımının sabit ve değerinin malzemenin akma dayanımına eşit olduğunu kabul etmiştir.



Şekil 3.3 Kırılma Süreci Bölgesi [82].

Formül 3.7’de f_t , malzemenin çekme dayanımı E , elastisite modülüdür. Irwin’in, “enerji yaklaşımı, gerilme yoğunluğu yaklaşımıyla eşdeğerdir”, teoremi diğer birçok araştırmacıya da başlangıç noktası olmuştur.

$$r_p = \frac{1}{\pi} \frac{K_{Ic}^2}{f_t^2} = \frac{1}{\pi} \frac{E G_c}{f_t^2} \quad (3.7)$$

LEKM, çatlak ucunda sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ucunda önemli ölçüde plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) devreye girer.

1960’lı yılların başında Irwin’in aksine Dugdale ve Barenblatt gibi bazı araştırmacılar, çatlağın ucundaki kırılma süreci bölgesindeki gerilme dağılımının, bir fonksiyon olduğunu kabul edip, matematiksel olarak probleme yaklaşmışlardır [87, 88].

EPKM, Wells’in 1961 yılında çatlak açılması (*COD*) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar. Daha sonra Billby, Cotrell, Swindon ve Dugdale, Barenblatt’ın teorisini ince elastik-plastik levhalara uygulamışlar ve çatlak ucunda Çatlak Ucu Açılım Deplasmanı (*CTOD*) terimini ortaya atmışlardır [89].

Çatlak açılım deplasman metodlarından biride Rice tarafından geliştirilen *J* integrali yaklaşımıdır [90]. Ana prensip iki boyutlu bir çatlak durumu için çatlağı çevreleyen bir yol boyunca hesaplanan şekil değiştirme enerjisinin yoğunluğunu bulmak üzere oluşturulmuştur.

Green fonksiyonu (bu fonksiyon kapalı bir alanı, alanı çevreleyen eğri üzerinden giderek bulur.) ana prensiptir.

1970’li yıllardan sonra ise Hillerborg [91] ve Carpinteri’nin [92] yaptığı çalışmalar sonucu CTOD, kritik bir değeri olan w_c ’ye ulaştığında ise çatlakın ani olarak ilerleyeceğini ve bunun bir malzeme sabiti olarak kullanılabileceğini ispatlamışlardır. G_c ile w_c arasındaki ilişkide İfade 3.8’de olduğu gibi tanımlanmıştır. İfade de σ_y akma dayanımıdır.

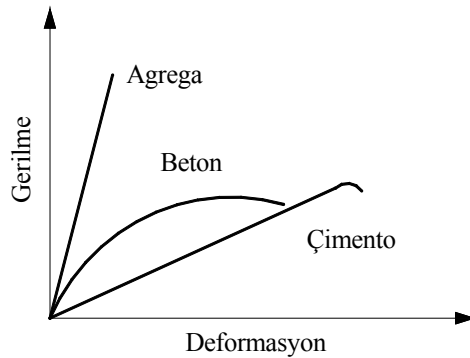
$$G_c = \sigma_y w_c \quad (3.8)$$

1980’li yıllardan itibaren bilgisayarların işlem yeteneklerinin gelişmesi ve dolayısıyla sonlu elemanlar yönteminin yaygın olarak kullanılmasıyla, lineer olmayan hesap yöntemleri kullanılarak kırılma mekaniği problemlerine yaklaşılmıştır. Bu gelişmeler, yeni metotların bulunmasına ve kırılma mekaniğinin ilerlemesine çok büyük katkıda bulunmuştur.

3.1.1. Betonun Kırılma Mekaniğinin Tarihsel Gelişimi

Betonun içyapısının farklı düzeylerde heterojen olduğu ve herhangi bir yük uygulamasından önce bile bünyesinde bazı mikro çatlaklar ve gözenekler bulunduğu bilinmektedir. Dolayısıyla betonda belirli bir gerilme durumu altında kırılma, bu mikro çatlaklardan en kritik olanlarının, en kritik gerilme yığılma noktalarını seçerek, tek başına veya diğer çatlaklarla birleşerek dengesiz yayılması sonucu olacaktır. Bu sırada diğer çatlaklar oluşmaya ve yayılmaya devam edecektir.

Beton bileşenleri içerisinde en elastik malzeme agregadır (Şekil 3.4). Çimento hamuru da oldukça elastik ve doğrusal bir gerilme-birim deformasyon bağıntısı göstermekte, ancak bağıntı harçta biraz daha fazla doğrusallıktan sapmaktadır.



Şekil 3.4 Beton ve bileşenleri için tipik gerilme-deformasyon eğrileri.

Betonda gerilme, kırılma dayanımının %30'una ulaştığında önce iri agrega harç ara yüzeyindeki çatlaklar en büyük çekme gerilmesine dik olarak çoğalmaya ve büyümeye başlar. Basınç yükü altında da önce arayüz çatlakları büyür ve hamur içinde yük doğrultusunda çatlaklar oluşturur. Bu çatlaklar birleşerek kritik boya ulaşırlar ve hızlı yayılma ile yüke paralel veya eğik olarak cismi parçalarlar. Çekmeye oranla basınçta daha çok çatlak oluşması ve daha yavaş çatlak yayılması görülür. Bununla beraber eksenel yüke ek olarak yanal basınç uygulandığında hamur içindeki çekme gerilmelerinin azalması ve ara yüzeyde sürtünmenin artması dolayısıyla dayanım artışı gözlenmektedir [93].

Betonda çatlak önleyici bölgelerin çoğunlukla yük uygulanmadan önce mikro çatlakların olduğu bölgeler olması ilginçtir. Genelde beton özelliklerini belirleyen malzeme özellikleri ve karışım oranları, taze betonun homojen olarak karılıp yerleştirilmesi, yeterince sıkıştırılması ve kür edilmesi gibi faktörlerde doğal olarak çatlak oluşması ve yayılmasını yakından etkileyecektir.

Betonun kısaca özetlenen bu karmaşık içyapısı, kırılma mekanizması ve heterojenliği dolayısıyla betonda kırılmanın, kırılma mekaniği prensipleri ile incelenmesi 1961 yılına kadar gecikmiş ve bu konuda ilk çalışma Kaplan tarafından yapılmıştır [94].

Kaplan, betondan yaptığı, farklı boyutlarda ve değişik çentik boylarına sahip olan kirişlere üç ve dört noktalı eğilme deneyi yaparak, G_c değerlerini hesaplamıştır. Hesaplarında deneysel ve analitik yöntemler kullanılmıştır. Kaplan çalışmalarının sonucunda Griffith [83] teorisinin betona uygulanabileceğini savunmuştur.

Glucklich [95], Griffith'in teorisinin, homojen bir malzeme için geçerli olduğunu, beton gibi heterojen bir malzemeye değiştirilerek uygulanması gerektiğini savunmuştur.

Kaplan ve Glucklich'in çalışmalarından sonraki yıllarda kırılma mekaniğinin betona uygulanması ilgi kazanmıştır. Çeşitli araştırmacılar Kaplan'ın çalışmasına benzer olarak kırılma mekaniği parametrelerini belirlemişlerdir. Kullanılan numune tiplerine ve deney metoduna bağlı olarak analitik bağıntılar ile parametrelerin hesaplanma yöntemleri farklılık göstermiş, bu arada su/çimento oranı, agrega büyüklüğü ve miktarı gibi beton değişkenlerinin etkileri de araştırılmıştır.

Romualdi ve Baston [96], Zaitsev [97], Swamy [98] tarafından da çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda kritik kırılma parametresi olarak K_{Ic} 'yi (veya G_{Ic}) kullanmışlardır. Bu parametreleri çentikli paneller ve kirişler üzerinde yapmış oldukları deneylerde tespit etmişlerdir. Bu araştırmalar ve daha sonraki, Brown [99], Shah ve McGarry [100], Walsh [101], Higgins ve Bailey [102], Mindess ve Nadeau [103], Walsh [104], Gjorv vd.[105], Rossi vd. [106] tarafından yapılan araştırmalarda, deney numunesinin boyutları, şekli ve başlangıçtaki çentik uzunluğuna bağlı olarak K_{Ic} değerinin sürekli olarak değişmesinden, bu

sabit değerin beton gibi heterojen bir malzeme için tutarlı bir malzeme sabiti olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca numune kalınlığı ve çentik genişliğinin, K_{Ic} üzerine etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir.

Ancak maksimum agrega çapının numune karakteristik boyutuna oranının küçük olduğu durumlarda (~ 0.01) davranışın LEKM e daha çok yaklaştığını ve K_{Ic} 'nin sabit bir değer etrafında çok küçük salınımlar yaptığı Ohgishi vd. [107] ve Tian vd. [108] tarafından tespit edilmiştir.

Beton üzerinde kırılma mekaniği ile ilgili çalışmalar aynı noktada birleşmiştir. Beton gibi heterojen bir malzemeyi tek bir parametre ile ifade etmek mümkün değildir. Çalışmalar bu noktadan itibaren lineer olmayan metotların gelişmesi şeklinde devam etmiştir.

3.2. Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği Metotları

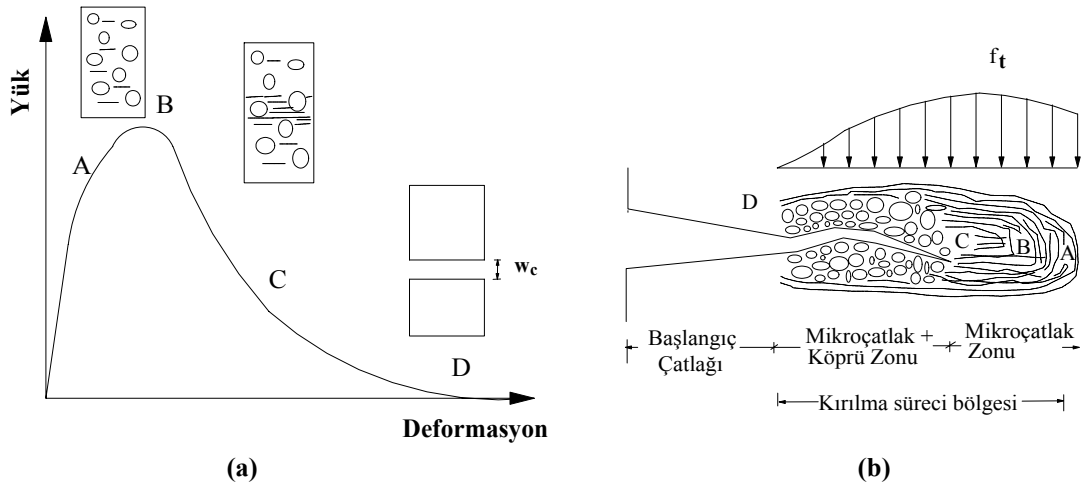
Betonun heterojen yapısı kırılma mekaniğinin temel kavramlarına tam olarak uygunluk göstermediği açık olarak görülmektedir. Bu sebeple ilk defa Nakayama [109] ve Tattersall [110] ve Tappin [111] tarafından seramikler üzerine uygulanan kırılma enerjisi yaklaşımından hareketle Hillerborg vd. [112, 113], betonun kırılma enerjisinin ölçümünde G_f 'in etkili bir metot olduğunu göstermiştir. G_f , en genel kullanımı ile, çekme yüklemesine maruz bir numunede betonda oluşan hasar bölgesinde absorbe edilen enerjinin çatlamış kesite oranı şeklinde tarif edilebilir. Ancak direkt çekme deneyini stabil olarak yapmak çok zordur ve sadece çok iyi donatılmış laboratuarlarda bu test yapılabilir. Çentikli numuneler üzerinde eğilme deneyleri yapmak çok daha kolaydır. Bu tip bir deneyin genel fikri, numune iki eşit parçaya bölündüğü zaman absorbe edilen enerji miktarıdır. Bu enerji kırılma kesit alanına bölündüğü zaman G_f kırılma enerjisi tayin edilir.

Irwin'in tanımladığı betonun kırılma süreci bölgesi betonun nonlineer davranışının açıklanmasında önemli bir kavramdır. Şekil 3.5'de de çekmeye maruz çentikli bir numunenin gerilme şekil değiştirme eğrisi görülmektedir [115]. Burada AB pik yük öncesi nonlineer bölge, BC mikroçatlaklar sonucu oluşan çekmede yumuşama bölgesini temsil etmektedir. CD kısmı ise bu eğrinin kuyruk kısmı olup agrega kilitlemesi ve yüzeyler arası sürtünmeden dolayı meydana gelen bölgedir.

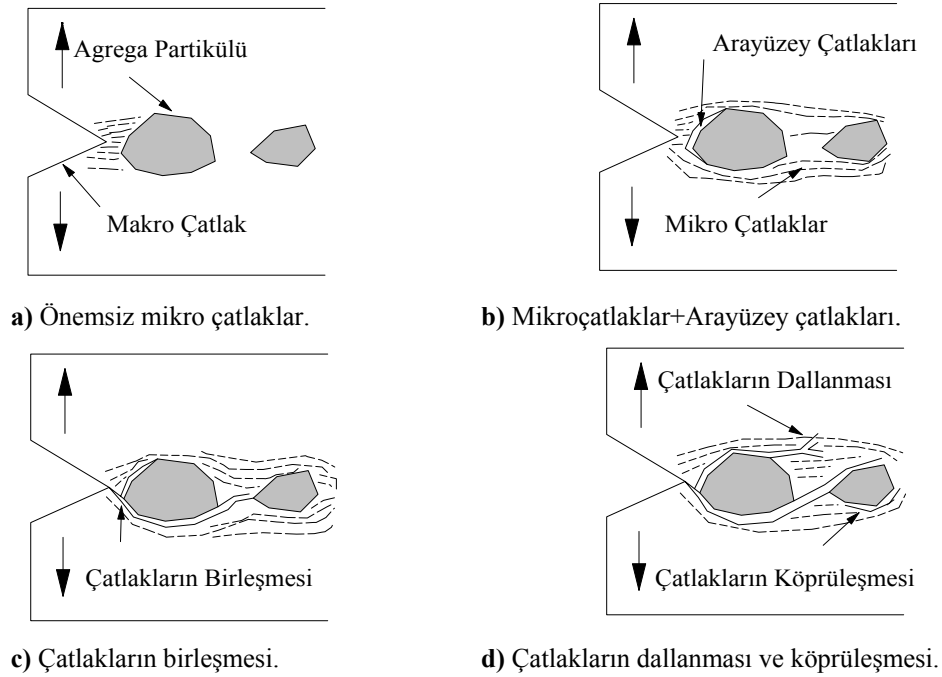
Irwin, metalik ve seramik malzemeler için tanımladığı kırılma süreci bölgesi beton için eğrinin BCD kısmında gelişir (Şekil 3.5b). Bu zon ilk önce makroçatlağın yanındaki agregayı saran matris içerisindeki önemsiz mikroçatlaklarla başlar (Şekil 3.6a). Daha sonra agrega çevresindeki zayıf bölgede büyük çatlaklar oluşur (Şekil 3.6b), bu çatlaklar matris içerisindeki mikroçatlaklarla birleşerek makroçatlağa erişir (Şekil 3.6c) ve sonunda bu çatlaklar numune

uzayı içerisinde birbirini keserek ve köprüler kurarak numuneyi parçalarlar (Şekil 3.6d) [116]. Beton için Gettu ve Shah [116], Irwin'in Formül (3.7)'deki tanımına benzer olarak kırılma süreci bölgesi uzunluğunu İfade 3.9 şeklinde tanımlamışlardır:

$$l_p = \frac{E G_F}{f_t^2} \quad (3.9)$$

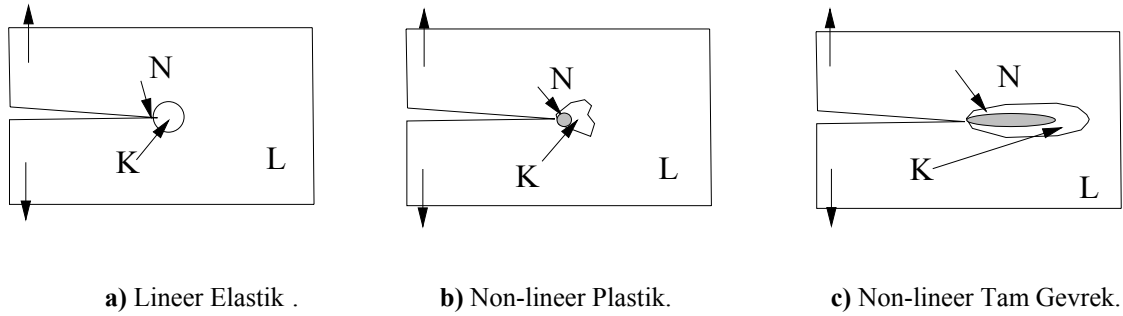


Şekil 3.5 a) Çekmeye maruz bir numunenin yük-deformasyon diyagramı. b) Kırılma süreci bölgesi [114].



Şekil 3.6 Kırılma süreci bölgesinin gelişimi [114].

Bununla beraber kırılma süreci bölgesinin uzunluğu malzemenin granüler yapısı ile yakından ilgilidir. Örneğin cam gibi tam gevrek bir malzemede 10^{-6} mm [117] olan bu zon, normal beton için 200-500 mm [113] ve $d_{max}=38$ mm (maksimum agrega çapı) olan baraj betonlarında 700 mm [118] mertebesinde olmaktadır. Görüldüğü gibi betonun lineer olmayan kırılma teorileri temelde, çatlamış bir beton kesitte gerilme transferini mümkün kılan, kırılma süreci bölgesinin varlığını dikkate almaktadırlar. LEKM tarafından ihmal edilen Şekil 3.7’de görüldüğü gibi bu bölge, metallerde plastik zonun yanında çok küçük olmasına karşın, betonda 100 mm’nin üzerinde değerler alarak büyük yer işgal etmektedirler [91].



Şekil 3.7 Değişik malzeme sınıfları için L:lineer, N:non-linear ve K:kırılma süreci bölgeleri.

Betonun lineer olmayan kırılma davranışını karakterize etmek için önerilen metotlar, Kohezif Çatlak Modelleri ve Efektif Çatlak Modelleri olarak iki kategoride sınıflandırılmaktadır. Bu tez çalışmasındaki deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan, Pik Yük Metodu, Boyut Etkisi Metodu ve Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu gibi lineer olmayan kırılma mekaniği yöntemleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

3.2.1 Kohezif Çatlak Modelleri

3.2.1.1 Kırılma İşi Enerjisi (KİE)

KİE yaklaşımı, kırılma enerjisi G_f ve kritik çatlak ucu açılımı w_c gibi iki parametre içermektedir ve bu parametreler betonu sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesinde kullanılır. KİE modeli, sonsuz boyutlu bir numunede geçerli olan kırılma enerjisi G_f ve efektif çatlak uzunluğu c_f olmak üzere iki parametre içermektedir. Bu parametreleri tesbit etmek için geometrik olarak birbirine benzer en az üç farklı boyda numunelere ait göçme yüklerinin bulunması gerekir [91].

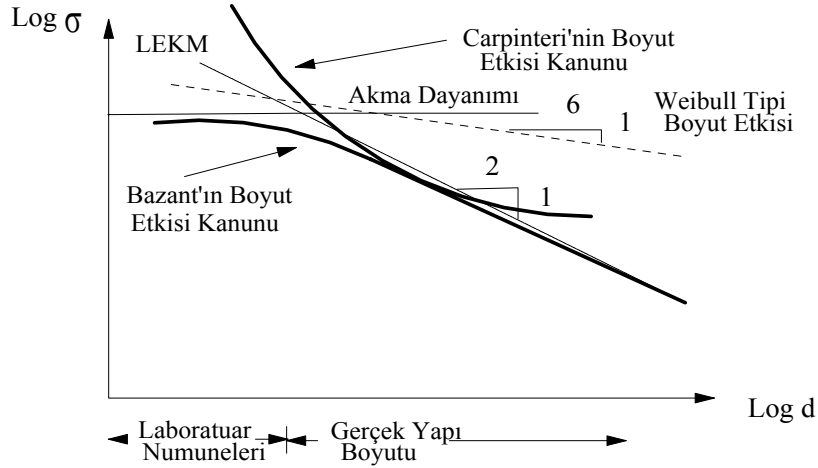
3.2.1.2 Boyut Etkisi Modeli (BEM)

Griffith [83], boyutları mikron mertebesinde olan cam lifler üzerine yapmış olduğu deneylerde teorik mukavemetin $E/10$ civarında olduğunu tespit etmiştir. Ancak elemanter düzeyde dayanımın böyle olmadığını gören Griffith aradaki farkın cam numune üzerindeki çentiklerden kaynaklandığını açıklamıştır. Weibull hiçbir malzemenin kusursuz olamayacağı görüşünden hareket ederek konuya istatistiksel yöntemlerle yaklaşmış ve numune boyutunun büyümesi ile içerisindeki kusurların bulunma olasılığının arttığını ortaya koymuştur [119]. Diğer taraftan Şekil 3.8’de görüldüğü gibi Weibull tipi boyut etkisi, logaritmik ölçekte nominal dayanım ile numune boyutu arasındaki lineer bağıntı $-1/6$ ’lık bir eğime sahip olurken, LEKM de ise bu eğim İfade 2.5’in türetilmesi ile,

$$\text{Log } \sigma_N = -\frac{1}{2} \text{Log } d + C \quad (3.10)$$

$-1/2$ ’lik bir değer almaktadır.

Ancak betonun heterojen yapısı yukarıda tanımlanan iki teoriye tam olarak uymamaktadır. Bu sebeple Bazant [120] ve Carpinteri [121] tarafından betonun mekanik davranışına ve doğasına daha uygun deterministik yöntemler geliştirilmiştir.



Şekil 3.8 Boyut etkisi teorileri.

Bazant [120], numunede pik yükte global serbest kalan enerji ve boyut analizi (Buckingham pi teoremi) kavramlarını kullanarak nominal dayanım ile numune boyutu arasındaki ilişkiyi İfade 3.3’de vermiştir.

$$\sigma_N = B \left(1 + \frac{d}{d_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

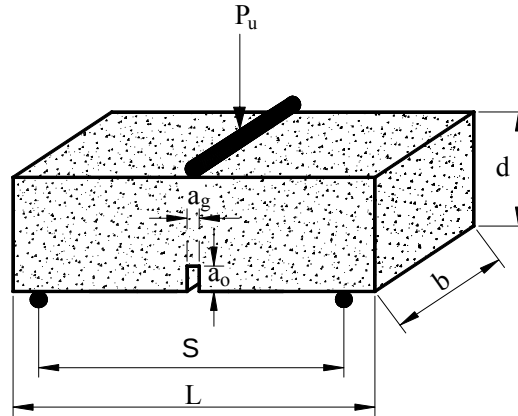
Burada B ve d_0 ampirik sabitlerdir. İfade 3.11'de B ve d_0 deney verilerinin , $Y = 1/\sigma_N^2$ ve $X = d$ olmak üzere lineer regrasyon sonucu elde edilen $Y = AX + C$ doğrusunun sabitlerinden $B = 1/\sqrt{C}$ ve $d_0 = C/A$ şeklinde elde edilir. Carpinteri, pik yükteki çatlak yüzeyinde meydana gelen hasarı fraktal geometrisi ile açıklayarak boyut etkisi teorisine geometrik olarak yaklaşmıştır. Nominal dayanım ile numune boyutu arasındaki ilişkiyi:

$$\sigma_N = f_t \left(1 + \frac{l_{ch}}{d} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

şeklinde tanımlamıştır. Burada f_t ve l_{ch} ampirik sabitlerdir. İfade 3.12 f_t ve l_{ch} deney verilerinin , $Y = \sigma_N^2$ ve $X = 1/d$ olmak üzere lineer regrasyon sonucu elde edilen $Y = AX + C$ doğrusunun sabitlerinden $f_t = \sqrt{A}$ ve $l_{ch} = C/A$ şeklinde elde edilir.

Şekil 3.8'den görüldüğü gibi Bazant'ın boyut etkisi teorisi küçük boyutlarda, akma dayanım kriterine ve büyük boyutlarda ise LEKM boyut etkisine asimtot almakta ve sınırlı bir boyut aralığında geçerli olmaktadır. Diğer taraftan Carpinteri'nin boyut etkisi teorisi orta ölçekte Bazant'ın boyut etkisi teorisi ile çakışmakta ve diğerinin aksine sınırsız bir boyut aralığında geçerli olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, geometrik olarak benzer ancak farklı boyutlarda kiriş numuneler üretilmiş, bu numunelerin kırılma özellikleri, boyut etkisi metodu kullanılarak incelenmiştir. Bu metot, belirli sınırlamalar çerçevesinde kullanılmaktadır. Bu sınırlamalar ve hesap sırası Şekil 3.9 göz önüne alınarak açıklanmıştır.



Şekil 3.9 Boyut Etkisi Metodunda önerilen numune geometrisi.

Boyut Etkisi Metodu kullanılarak deneyler yapılmak istendiğinde deney numuneleri bazı sınırlamalar dikkate alınarak tasarlanmalıdır. İfade 3.13 - 3.22'ler de bu sınırlamalar verilmiştir.

$$\frac{S}{d} \geq 2.5 \quad (3.13)$$

$$0.15 \leq \frac{a_o}{d} \leq 0.5 \quad (3.14)$$

$$a_g \leq 0.5d_{\max} \quad (3.15)$$

$$b, d \geq 3d_{\max} \quad (3.16)$$

Burada $d_{\max}$: maksimum agrega çapı ve a_g , çatlak genişliği olup, mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Deneyler için en az üç farklı boyutta numune hazırlanmalıdır.

$d = d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$, $L = L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$, $b = b_1 = b_2 = b_3 = b_n$, d_1 : en küçük giriş derinliği olmak üzere,

$$d_1 \leq 5d_{\max} \quad (3.17)$$

$$d_n \geq 10d_{\max} \quad (3.18)$$

$$\frac{d_n}{d_1} \geq 4 \quad (3.19)$$

$$\frac{d}{d_{\max}} = 4, 8, 16 \text{ (kabul edilebilir)} \quad (3.20)$$

$$\frac{d}{d_{\max}} = 3, 6, 12, 24 \text{ (tercih edilir)} \quad (3.21)$$

$$\frac{S}{d} = \frac{a_o}{d} = \frac{L}{d} = \text{sabit} \text{ (tüm numunelerde)} \quad (3.22)$$

Numunelerin kırılma işlemleri gerçekleştirilirken, yüksek rijitlikli ve tüm numuneleri ölçme yeteneğine sahip deney makinesi gereklidir. Kırma işlemi sırasında maksimum yüke 5 dakika ± 30 sn içerisinde erişilmelidir.

Deney numuneleri hazırlanıp, deneyler tamamlandıktan sonra işlem sırası takip edilerek, gerekli hesaplar yapılır.

Hesaplar için işlem sırası:

1) Gerçek yükler belirlenir.

$$P_i^o = P_1 + \frac{1}{2} m_i g \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3.23)$$

2) Eğer $L > l$ ise yükler İfade 3.24 yardımıyla bulunur.

$$P_i^o = \frac{2S_i - L_i}{2S_i} m_i g \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3.24)$$

3) Lineer regrasyon uygulanır.

$$Y_i = \left(\frac{bd_i}{P_i^o} \right)^2, \quad X_i = d_i \quad (3.25)$$

4) Eğim belirlenir ve Y eksenini kestiği nokta bulunur.

$Y = AX + C$ doğru denklemi ve $(\bar{X}, \bar{Y})$: Tüm veri noktalarının kütle merkezidir.

$$A = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.26)$$

$$C = \bar{Y} - A\bar{X} \quad (3.27)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_i X_i \quad (3.28)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_i Y_i \quad (3.29)$$

Verilerin X ve Y değerleri grafikte belirlendikten sonra veri noktaları kontrol edilmelidir. Eğri yaklaşık lineer olmalıdır. Değilse yani büyük dağılımlar söz konusu ise, gelinen seviyeye kadar olan deney bölümünde bir yerde hata vardır.

5) LEKM'deki boyutu çok büyük olan numunelerin enterpolasyonu için yardımcı değerler hesaplanır. Relatif çentik boyu $\alpha = a_o / d$, a : çatlak uzunluğudur.

$S / d = 2.5$ için,

$$F(\alpha) = \frac{1.0 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (3.30)$$

6) Kırılma parametreleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$g(\alpha) = \left(\frac{l}{d}\right)^2 \pi \alpha [1.5F(\alpha)]^2 \quad (3.31)$$

$$G_f = \frac{g(\alpha_o)}{E_c A} \quad (3.32)$$

$$c_f = \frac{g(\alpha_o)}{g'(\alpha_o)} \left(\frac{C}{A}\right) \quad (3.33)$$

Laboratuarlarda üretilen küçük numunelerin, yapı elemanlarının tam özelliğini temsil etmesi mümkün değildir. Mesela, hidratasyon ısı gibi önemli bir özellik numunede ve yapıda çok farklıdır. Bu nedenle bu teori kullanılırken, bu tür konulara dikkat edilmelidir [5].

Boyut Etkisi Modeli kiriş, silindir, disk ve çift konsol elemanlara uygulanabilmektedir. Bu şekilde farklı özelliklere sahip betonlar test edilmişlerdir. Betonun dayanım ve malzeme özelliklerinin kırılma özellikleri ile ilişkisi bu yöntemle sağlıklı bir şekilde incelenmektedir. Bu nedenle oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir [122-126].

Bu tez çalışmasında, beton basınç dayanımlarının tespiti için küp numuneler kullanılmıştır. Bu küp numune değerlerinin silindir numune değerleri elde edilirken İfade 3.34 kullanılmıştır [1].

$$f_c = \left[0.76 + 0.2 \log \left(\frac{f_{cc}}{19.58} \right) \right] f_{cc} \quad (3.34)$$

Ayrıca betonun çekme dayanımının tespiti için İfade 3.35'den faydalanılmıştır [127].

$$f_t = 0.5 \sqrt{f_c} \quad (3.35)$$

Pik Yük Metodu ile tespit edilen $CTOD_c$ 'lerin karşılaştırılması amacıyla Boyut Etkisi Modeline ait $CTOD_c$ değerleri İfade 3.36'dan elde edilmiştir [128].

$$CTOD_c = \sqrt{\frac{32G_f c_f}{\pi E_c}} \quad (3.36)$$

3.2.1.3 Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu

Boyut Etkisi Modeli tabanlı bir metottur. Kiriş ve silindir gibi farklı numune tipleri kullanılabilmektedir. Ancak numune boyutları değişmemektedir. Her numune farklı çentik boyuna sahiptir. Temel mantığı maksimum kırılma yükünün bulunmasına dayanır. Diğer metotlardan önemli bir farkı çentiksiz numunelerinde analizlerde kullanılmasıdır. Hesaplarla ilgili işlem sırası İfade 3.37 - 3.47'de verilmiştir [6-7].

$$\sigma_N = c_n \left(\frac{\frac{EG_f}{g'(\alpha_o)}}{c_f + \frac{g(\alpha_o)}{g'(\alpha_o)}d} \right)^{1/2} \quad (3.37)$$

$$\sigma_N = c_n \frac{P_u}{bd} \quad (3.38)$$

$$g(\alpha) = f^2(\alpha) = \pi \alpha c_n^2 F^2(\alpha) \quad (3.39)$$

$$K_I = \sigma_N \sqrt{\pi a} F(\alpha) \quad (3.40)$$

$$K_{If} = \sqrt{EG_f} \quad (3.41)$$

$$Y = AX + C \quad (3.42)$$

$$Y = \frac{c_n^2}{g'(\alpha)\sigma_N^2}, \quad X = D = \frac{g(\alpha_o)}{g'(\alpha_o)}d \quad (3.43)$$

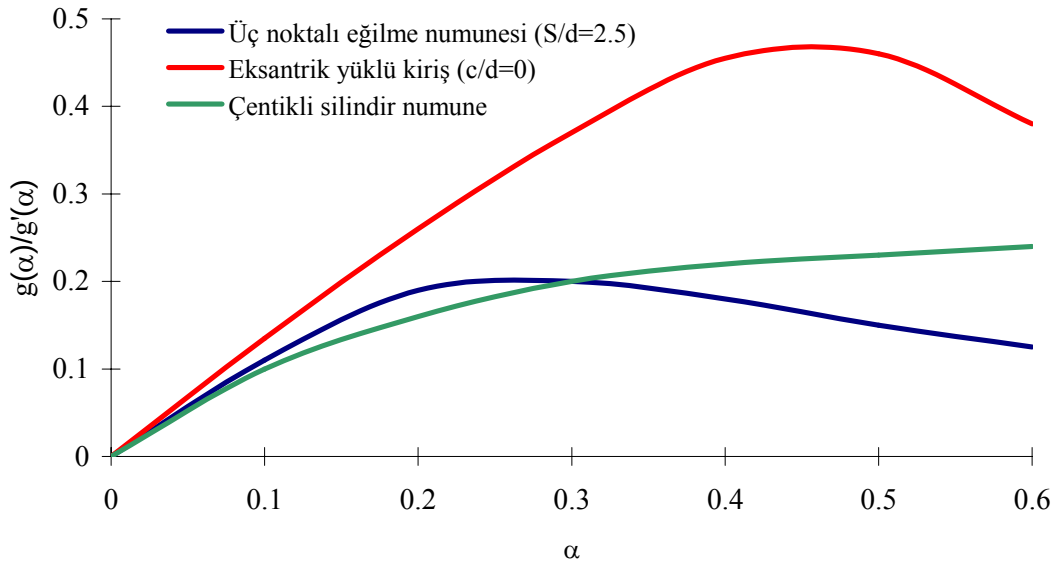
$$EG_f = \frac{1}{A}, \quad c_f = \frac{C}{A} \quad (3.44)$$

D , etkili yapı boyutu olarak adlandırılır. Bu metotta boyutlar sabit olduğundan $g(\alpha)$ ve $g'(\alpha)$ değişkendir.

$$Y^* = A^* X^* + C^* , \quad Y^* = \frac{c_n^2}{\sigma_N^2} , \quad X^* = d \quad (3.45)$$

$$EG_f = \frac{g(\alpha)}{A^*} , \quad c_f = \frac{g(\alpha_o)}{g'(\alpha_o)} \frac{C^*}{A^*} \quad (3.46)$$

Bu metotta dikkat edilmesi gereken konulardan biri, boyut değişim aralığını ifade eden maksimum ve minimum D arasındaki orandır. Geçerli bir sonuç elde etmek için, bu oran BEM de olduğu gibi minimum 4 olmalıdır. Ancak $g(\alpha)/g'(\alpha)$ değerinin kullanılması (Şekil 3.10'da görüldüğü gibi) küçük oranlar için yeterli yaklaşım sağlayabilir [6-7].



Şekil 3.10 Farklı tip numunelerin $g(\alpha)/g'(\alpha)$ değerleri.

3.2.2 Efektif Çatlak Modelleri

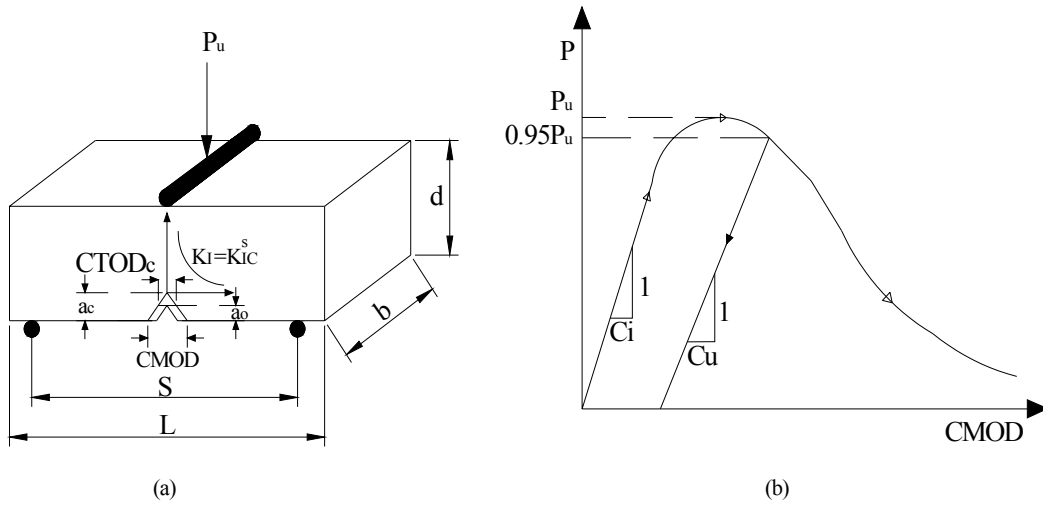
3.2.2.1 İki Parametrelî Model (İPM)

Jenq ve Shah [129] tarafından geliştirilen betonun iki parametrelî modeli, çentik uzunluğu a_0 olan gerçek bir yapının pik yük öncesi nonlineer davranışı çatlakın efektif uzunluğu

a_e ($a_e > a_0$) olan eşdeğer elastik bir yapı vasıtası ile kurulur. İki parametrelili modelde çözüme iki yoldan ulaşılmaktadır. Bunlar komplians metot ve pik yük metodudur.

a) Komplians metot

Kritik çatlak uzunluğu Şekil 3.11’de görüldüğü gibi pik yük P_u komşuluğunda ölçülen C_u kompliansı ile hesaplanabilir. Bu değer pik yükten sonra yaklaşık olarak $0.95P_{max}$ değerine karşılık gelir. Bu modele göre gerçek bir yapıda kırılmanın başlangıcı kritik gerilme şiddet çarpanı K_{Ic}^s veya kritik çatlak ucu açılımı deplasmanı $CTOD_c$ ’nin tespiti ile mümkün olabileceğini kabul edilir.



Şekil 3.11 İki parametrelili modelde kırılma parametrelerinin tayini.
a) Çentikli üç noktalı eğilme numunesi b) Tipik bir P - $CMOD$ diyagramı.

$$K_I = K_{Ic}^s, \quad CTOD = CTOD_c \quad (3.47)$$

Yani $\partial K_I / \partial a < 0$ ise çatlak stabil olarak büyür, $\partial K_I / \partial a \geq 0$ ise çatlak hızlı olarak yayılır. Şekil 3.11’deki diyagramda başlangıç elastisite modülü aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$E = 6Sa_0V_1(\alpha) / (C_i b d^2) \quad (3.48)$$

$$V_1 = 0.76 - 2.28\alpha + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + 0.66/(1-\alpha)^2 \quad (S/d=4 \text{ için}) \quad (3.49)$$

Burada a_0 başlangıçtaki çentik uzunluğu, C_i başlangıç kompliansı ve $\alpha=a_0/d$ dir. Kritik gerilme şiddet çarpanı ve kritik çatlak ucu açılımı deplasmanı ise:

$$K_{Ic}^s = \sigma_N \sqrt{\pi a} F(\alpha) \quad (3.50)$$

$$F(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (S/d=4i\text{çin}) \quad (3.51)$$

$$CTOD_c = \frac{6P_u S a_c}{E b d^2} V_1(\alpha) \left\{ (1 - \beta^2) + (-1.149\alpha + 1.081)(\beta - \beta^2) \right\}^{1/2} \quad (3.52)$$

şeklindedir. Burada $\alpha=a_c/d$ ve $\beta=a_0/a_c$ dir.

Bu yöntemde kırılma parametreleri, kapalı devre deney ekipmanı kullanarak, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi çentikli bir üç noktalı eğilme numunesinin (ki bu çalışmada da bu tip numuneler kullanılmıştır) Yük-Çatlak Ağzı Açılımı ($P-CMOD$) ilişkisinden faydalanarak hesaplanır. Modeldeki kritik çatlak boyu a_c , başlangıç (C_i) ve pik yük sonrası pik yükün %95 değerinde ölçülen (C_u) gibi iki komplians değerinden faydalanarak hesaplanır (Şekil 3.10b).

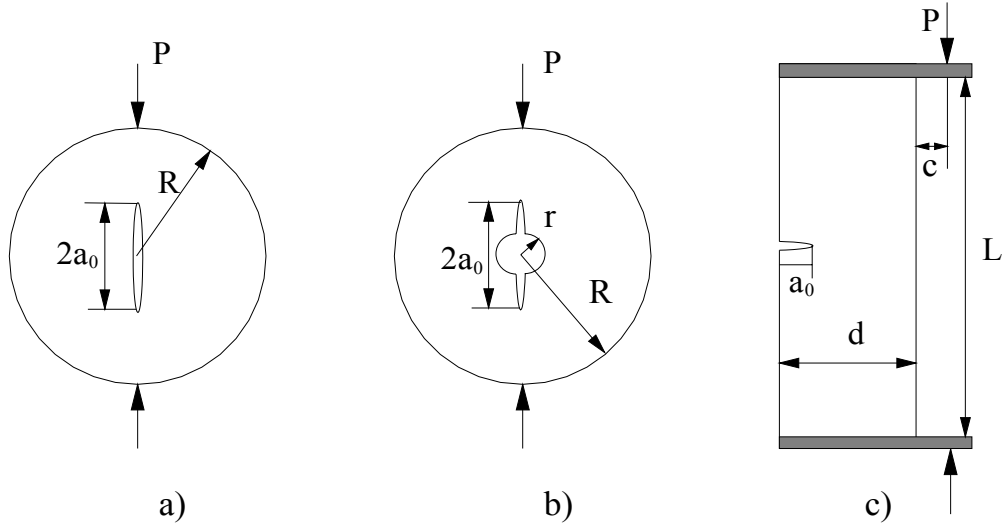
Kapalı devre deney ekipmanının kullanılması oldukça ayrıntılı bir işlem gerektirir. Fakat bir sonraki bölümde anlatılacak olan pik yük metodunda bu tip gereçlere ihtiyaç duyulmaz.

b) Pik yük metodu

Bu yaklaşımda, Komplians Metodun nazaran daha az kapasiteli deney ekipmanına gerek duyulmasına rağmen, “ya aynı boyutta farklı çentik boyulu yada farklı boyutta aynı relatif çentik boyuna sahip” en az iki numunenin pik yük değerinin belirlenmesi gereklidir [130]. Bu tez çalışmasında da kullanılan bu metot, Şekil 3.12’de görüldüğü gibi hem üç noktalı eğilmeye maruz kirişlerin yanında hem silindir numunelere hem de eksantrik basınç numunelerine uygulanabilir [3]. Gerçekte bir yapıdan kiriş örnekleri alıp, incelemek teknik bakımdan imkânsızdır. Bunun için bina yapımında kullanılan malzemenin kırılma davranışını incelemek için farklı geometrideki modeller geliştirmek gerekir. Kırılma mekaniğinde kullanılan en çok üç noktalı eğilmeye maruz kiriş numuneler kullanılır. RILEM tarafından da bu deneylere standart getirilmiştir [131]. Daha sonra Brühwiller ve Wittman tarafından silindir numuneler kırılma mekaniği deneylerinde kullanılmıştır [118]. Silindirler, silindir yarma deneyine tabi tutularak, kırılma yükleri bulunmuş ve yine analizlerle malzeme kırılma parametreleri elde edilmiştir.

Tang, vd. [3] çalışmalarında silindir ve kiriş numunelerle yapılan deneyler sonucunda malzeme (beton) kırılma parametrelerini tespit etmişlerdir.

İki Parametrelilik Pik Yük Metodu diğer tüm kırılma mekaniği prensipleri içerisinde en az ekipman gerektiren ve sonuca oldukça hızlı ulaşılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu nonlineer yöntem a_c , kritik çatlak boyu ve σ_N , nominal gerilme değerlerinin parametrik denklemlere dönüşmesiyle başlar. Hesapta kullanılan işlemler İfade 3.53 - 3.62’de belirtilmiştir.



Şekil 3.12 Pik-Yük metodunda kullanılan farklı numune tipleri a) çentikli silindir yarma b) boşluklu silindir yarma c) eksantrik yüklü çentikli prizma.

$$K_I^1(\sigma_N^1, a_c^1) = K_{Ic}^s \quad (3.53)$$

$$CTOD^1(\sigma_N^1, a_c^1) = CTOD_c \quad (3.54)$$

$$K_I^2(\sigma_N^2, a_c^2) = K_{Ic}^s \quad (3.55)$$

$$CTOD^2(\sigma_N^2, a_c^2) = CTOD_c \quad (3.56)$$

En az iki farklı geometrinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Ya aynı boyuta, farklı çentik uzunluklarına sahip iki numune ya da farklı boyuta aynı çentik uzunluğuna sahip

numuneler kullanılmalıdır. Denklemlerden elde edilen K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ değerleri modelin boyut ve geometrisine göre birer ayırt edici malzeme parametresidir.

Gerilme şiddet çarpanı,

$$K_I = \sigma_N \sqrt{\pi a} F(\alpha, \beta) \quad (3.57)$$

σ_N , nominal dayanım (α, β) , fonksiyon sabitleri olarak ifade edilebilir. Üç noktalı eğilmeye maruz giriş numuneler gerekli fonksiyon $F(\alpha)$ olarak ifade edilirse,

$$F(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1.83 - 1.65\alpha + 4.76\alpha^2 - 5.3\alpha^3 + 2.51\alpha^4}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{1.5}} \quad (S/d=2.5 \text{ için}) \quad (3.58)$$

kiriş numuneler için kritik gerilme yoğunluk faktörü,

$$K_{Ic}^s = \sigma_N \sqrt{\pi a_c} F(\alpha) \quad (3.59)$$

olarak ifade edilir. Nominal dayanım ise P_u , kırılma yükü s , mesnet aralığı b , numune kalınlığı ve d , numune karakteristik boyutu (yüksekliği) olmak üzere,

$$\sigma_N = \frac{3P_u S}{2bd^2} \quad (3.60)$$

hesaplanır. Kritik çatlak ucu açılım deplasmanı değeri de denklem 3.52 ve 3.54 yardımıyla hesaplanır $(\alpha = a_c / d)$. Kritik çatlak ucu açılımı için, İfade 3.52'deki $V_1(\alpha)$ fonksiyonu $S/d=2.5$ için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_1(\alpha) = 0.65 - 1.88\alpha + 3.02\alpha^2 - 2.69\alpha^3 + \frac{0.68}{(1 - \alpha)^2} \quad (3.61)$$

İfade 3.59, 3.57 ve 3.58, İfade 3.52 ise İfade 3.60 ve 3.61 yardımıyla elde edilmişlerdir. Bu denklemler sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla bulunmuşlardır. Deney numunelerinde analiz yapılırken bu denklemlerin kullanılabilmesi için $S/d = 2.5$ olmalıdır.

Boyutları belli olan numuneler üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulduğunda P_u , kırılma yükleri (pik yükler) belirlenir. Daha sonra numune boyutları ve P_u değeri yardımıyla K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ değerleri hesaplanır. Hesaplanan K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ değerleri ile bir grafik elde edilir. Daha sonra İfade 3.61 yardımıyla standart sapma bulunur. Standart sapma eğrisinin minimum olduğu nokta K_{Ic}^s değerini verir. Bu noktadan hareketle, ortalama kritik çatlak ucu açılımı $CTOD_c^{ort}$ yardımıyla $CTOD_c$ değeri hesaplanır. Böylece kırılma parametreleri tespit edilir.

$$s(K_{Ic}^s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CTOD_c^{ort} - CTOD_c^i)^2}{n-1}} \quad (3.62)$$

Tang, vd. yapmış oldukları çalışmada kiriş ve silindirik numunelerin kırılma parametrelerini kompiyans metot ve pik yük metoduna göre tespit etmişlerdir. Birbirine yaklaşık olarak eşit olan sonuçlar, pik yük metodunun da betonun kırılma parametrelerinin tespitinde kullanılabileceğini açıkça ortaya koymuştur [3].

İki Parametrelilik Modelde Q gevreklik indeksi İfade 3.62 ile tespit edilmektedir. Uzunluk boyutunda bir sayıdır. Yapılan deneysel araştırmalar Q değerlerinin sertleşmiş çimento harcı için 12.5-50 mm, harç betonu için 50-150 mm ve beton için 150-350 mm aralığında değiştiğini göstermektedir [129].

$$Q = \left[\frac{E_c \cdot CTOD_c}{K_{Ic}^s} \right]^2 \quad (3.63)$$

3.2.2.2 Efektif Çatlak Modeli

Betonun kırılmasında efektif çatlak modeli iki parametrelilik modelin prensiplerine benzer olarak Nallathambi ve Karihaloo tarafından geliştirilmiştir [132]. Ancak efektif çatlak uzunluğu a_e yükleme-boşaltma eğrisindeki kompiyanstan hesaplanmaz. Şekil 3.13'den görüldüğü gibi, belirli bir a_0 başlangıç çatlak uzunluğuna sahip numunenin pik yüke karşılık gelen sekant modülü, farklı bir a_0 başlangıç çatlak uzunluklu kirişin dinamik modülüne eşdeğer olduğu duruma karşılık gelen a_0 başlangıç çatlak uzunluğunun değeri efektif çatlak uzunluğu olarak kabul edilir. Burada efektif çatlak uzunluğuna karşılık gelen K_{Ic}^e nin kritik değeri esas alınır

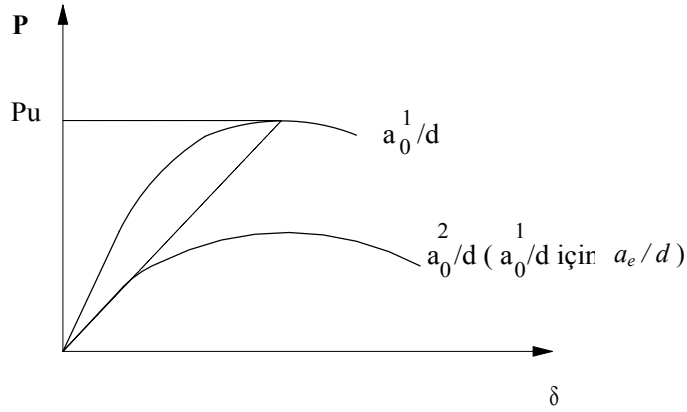
modelin iki parametrelili olduğu ortaya çıkar. Deney numunesi ölçüm düzeneği Şekil 3.14’de gösterilmiştir.

$$K_I = K_{Ic}^e, \quad a = a_e \quad (3.64)$$

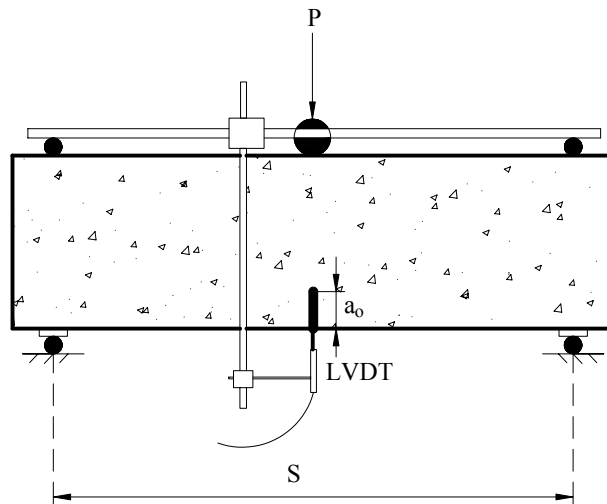
Buradan boyutsuz efektif çatlak uzunluğunun ifadesi:

$$\frac{a_e}{d} = \gamma_1 \left(\frac{\sigma_N}{E} \right)^{\gamma_2} \left(\frac{a_0}{d} \right)^{\gamma_3} \left(1 + \frac{d_{\max}}{d} \right)^{\gamma_4} \quad (3.65)$$

şeklindedir. Burada $\gamma_1 = 0.088 \pm 0.004$, $\gamma_2 = -0.208 \pm 0.010$, $\gamma_3 = 0.451 \pm 0.013$ ve $\gamma_4 = 1.653 \pm 0.109$ dur.



Şekil 3.13 Efektif çatlak modeli.



Şekil 3.14 Efektif çatlak modeli numune ölçüm düzeneği.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, öncelikle deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin ayrıntılı özellikleri verilmiştir. Daha sonra deneylerin yapılış amaçları ve karışım miktarlarından bahsedilmiştir.

4.1. Malzemeler

4.1.1. Çimento

Deneysel çalışmaların tamamında Elazığ Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42.5 N tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Her deneyin amacına uygun olarak hesaplanan numune sayısına yetecek kadar çimento fabrikadan bir seferde satın alınmıştır. Böylece çimentonun özelliklerinde meydana gelebilecek standart değişimlerin önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Tablo 4.1 CEM I 42.5 N çimentonun özellikleri.

Özellik	CEM I 42.5 N	Özellik	CEM I 42.5 N
SiO ₂ (%)	21.12	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.09
Al ₂ O ₃ (%)	5.62	Priz başı (dk)	155
Fe ₂ O ₃ (%)	3.24	Priz sonu (dk)	210
CaO (%)	62.94	İncelik (cm ² /g)	3490
Cl (%)	0.0044	Basınç dayanımı, 3 gün	25.8
Ç. Kalıntı (%)	0.64	7 gün	38.1
K. Kaybı (%)	3.52	28 gün (MPa)	49.1

4.1.2. Toz Malzemeler

Bu tez çalışmasında, silis dumanı, uçucu kül ve mermer tozu olmak üzere 3 çeşit toz malzeme kullanılmıştır. Silis dumanı Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinden, uçucu kül Tunçbilek Termik Santrali'nden ve mermer tozu Elazığ Bayraklar Mermer A.Ş.'den temin edilmiştir. Silis dumanının 1970'lerden, uçucu külün ise 1940'lardan beri betonda kullanımı görülmektedir. Bu nedenle literatürde oldukça geniş yer tutmaktadır. Bu malzemelerin özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Mermer tozunun KYB de kullanımı bu çalışmaya mahsus olmakla birlikte, genel olarak çimento esaslı malzemelerde kullanımı oldukça yenidir ve gelişmektedir.

Tablo 4.2 Kullanılan puzolan malzemelerin özellikleri.

Özellikler	Silis Dumanı	Uçucu Kül
SiO ₂ (%)	91	58.82
Al ₂ O ₃ (%)	0.58	19.65
Fe ₂ O ₃ (%)	0.24	10.67
CaO (%)	0.71	2.18
MgO (%)	0.33	3.92
SO ₃ (%)	-	0.48
Kızdırma kaybı (%)	1.84	0.91
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.04	2.25
Özgül Yüzey (cm ² /g)	--	3812
45µm geçen	%98 < 45µm	--

Ülkemizde doğal taş rezervi yaklaşık 7 milyar m³ olarak tahmin edilmektedir. Yüksek sıcaklık ve basınç altında başkalaşıma uğramış kalkerler mermer olarak tanımlanmaktadır. Endüstriyel anlamda ise işlenebilen, cilalanabilen, parlayan ve boyutlandırılabilen veya dekoratif amaçlı kullanılan tüm doğal taşlara mermer denilmektedir [133]. Şu anda 33 ilimizde işletilen mermer ocakları bulunmaktadır. Bu ocaklardan yaklaşık 50 çeşit mermer elde edilmektedir. Mermercilik sektöründe ocak işletmecisi ve mermer imalatçısı olan 200’ü aşkın firma bulunmaktadır ve bu sayı her geçen gün artmaktadır [134].

Mermer yeryüzüne yakın bölgelerde bulunan bir maden türüdür. Ocaklarda çeşitli yöntemlerle, 15–20 tonluk bloklar halinde kesilen mermerler işlenmek üzere atölyelere ve fabrikalara taşınırlar (Şekil 4.1). İşleme tesislerinde çeşitli boyut ve kalınlıklarda kesilirler. Kesilme işlemi, kesicinin ısınmasını ve toz olmasını önlemek amacıyla su yardımıyla yapılır (Şekil 4.2). Böylece toz ile birleşen su atık mermer çamurunu oluşturur. Bu atık malzeme ilk haliyle veya arıtma tesisinde suyu alındıktan sonra çevreye bırakılır (Şekil 4.3). Bilinçsizce çevreye terk edilen bu malzemenin sebep olacağı zararlar, çevre sağlığını olumsuz yönde etkileyecektir.



Şekil 4.1 15-20 tonluk mermer blokları.



Şekil 4.2 Mermerlerin çeşitli boyutlarda kesilmesi.



Şekil 4.3 Atık mermer çamuru ve doğa.

Yıllık ortalama 1.000.000 ton mermer atığı oluşmaktadır. Bu atık nedeniyle İtalya gibi bazı ülkeler mermer üretimlerini sınırlamak zorunda kalmışlardır. Ülkemizde de çevre kuruluşlarıyla, mermer işletmecileri arasında bu konu ile ilgili problemler başlamıştır [135]. Sürekli arttığı için depolanması işletmeler için mümkün olmayan bu atığın değerlendirilmesi; çevre sağlığı, çevre temizliği ve ekonomik açıdan büyük bir kazanç olacaktır. Beton, birçok avantajı olan ve dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. Bu özellik dikkate alındığında, büyük miktarlardaki atık mermer tozunun, beton ve çimento esaslı diğer ürünlerde kullanılması, çevreye ve ekonomiye katkı sağlayacağı bir gerçektir.

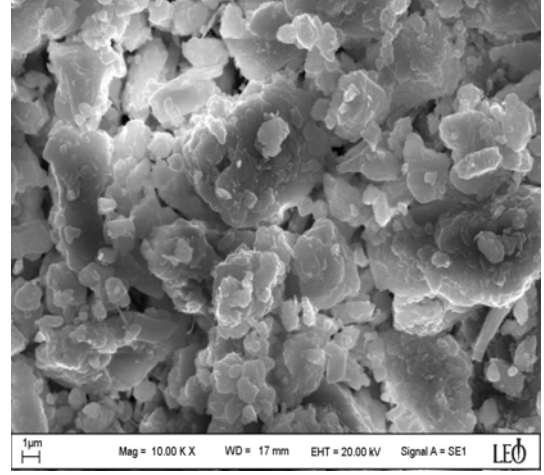
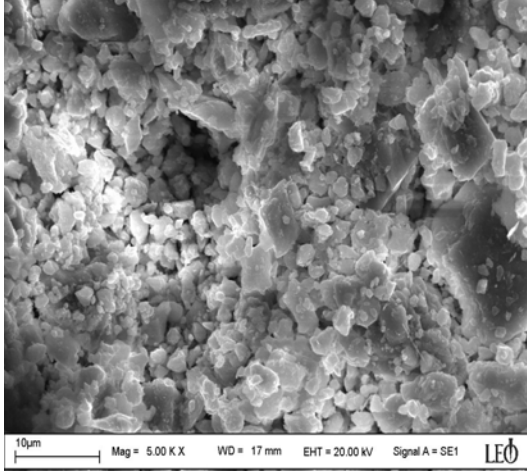
Mermer tozu, kâğıt sanayi, boya sanayi, plastik sanayi, seramik endüstrisi, cam sanayi, tarım sektörü, hayvan yemi üretimi, kireç ve çelik üretimi gibi birçok alanda kullanılabilmektedir [136]. Ancak bu alanlarda, mermer tozu genellikle bazı fiziksel ve kimyasal işlemler uygulanarak kullanılmaktadır. Bu da üreticiye ekonomik bir yük getirmektedir. Ancak mermer tozu çimento esaslı ürünlerde kullanılmadan önce sadece kurutulacak ve az bir fiziksel kuvvetle toz haline getirilerek, inşaat sektöründe kullanımı daha ekonomik olmaktadır. Mimari amaçlı kullanılan karo gibi elemanlarda mermer tozu kullanımı oldukça olumlu sonuçlar vermiştir [137]. Ayrıca mermer tozu kullanılarak, standartlara uygun KYB elde edileceği belirlenmiştir [138].

Mermer tozları genellikle benzer fiziksel ve kimyasal özellikler göstermektedir. Elazığ İl sınırları içerisinde farklı ocaklardan elde edilmiş 3 çeşit mermer tozunun özellikleri Tablo 4.3 de sunulmuştur. Elazığ vişne, yöreye has dünyaca ünlü bir mermer çeşididir. Beyaz mermer ve sarı traverten hemen hemen tüm Türkiye'nin tüm bölgelerinde çıkarılmakta ve yaklaşık aynı özellikteki mermer çeşitleridir. Nadir ve çok bulunan türler çalışmada kullanılarak bir genelleme yapılması amaçlanmıştır.

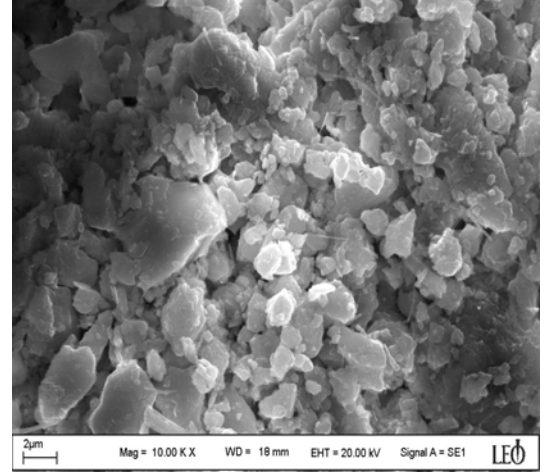
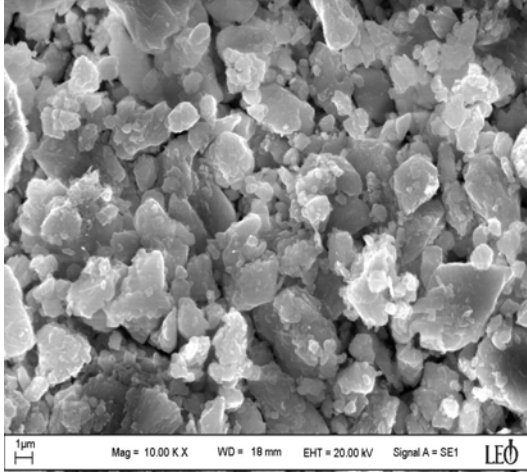
Tablo 4.3 Mermer tozlarının özellikleri.

Özellik	Elazığ vişne	Beyaz	Sarı traverten
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2.71	2.71	2.71
Özgül yüzey (cm^2/g)	3924	4372	5106
SiO_2 (%)	28.35	0.94	1.25
Fe_2O_3 (%)	9.70	0.46	0.32
CaCO_3 (%)	60.48	97.35	96.12

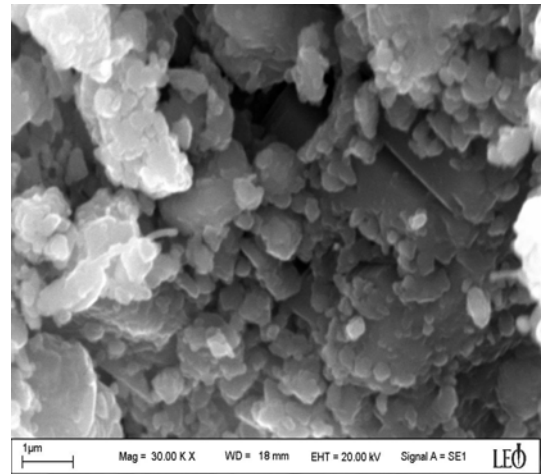
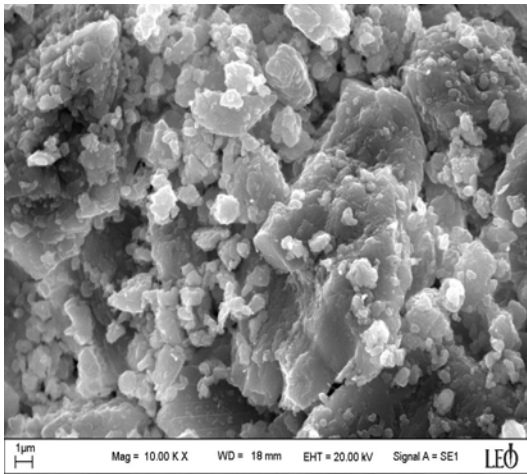
Mermer tozlarının mikroskobik yapısı, uçucu küller gibi küresel değil, köşeli ve düzensiz bir yapıya sahiptir. Her 3 mermer tozu çeşidinin de elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.4 Vişne mermer tozu SEM fotoğrafları.



Şekil 4.5 Beyaz mermer tozu SEM fotoğrafları.



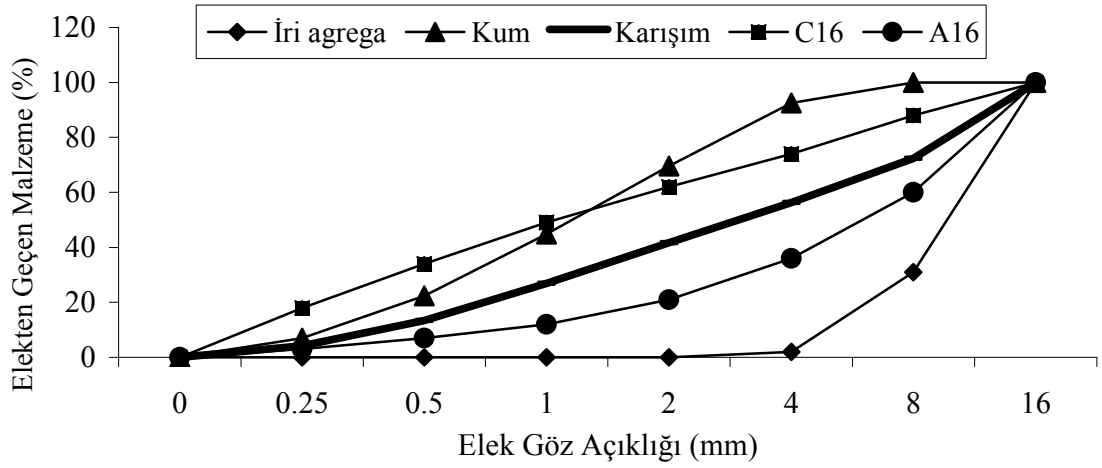
Şekil 4.6 Sarı traverten mermer tozu SEM fotoğrafları.

4.1.3. Agreg

Deneylerin tamamında Elazığ İli Palu İlçesi'nden elde edilen en büyük dane çapı (d_{max}) 8 ve 16 mm olan nehir agregası kullanılmıştır. Çakıl ve kumun fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 4.4'de, granülometrisi ise Şekil 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.4 Agregaların fiziksel özellikleri.

Özgöl ağırlık (gr/cm ³)	Los Angeles Aşınma [139] (500 devir) (%)	Donma-çözülme kayı [140] (%)	Kil miktarı (%)	Su emme miktarı (%)
2.66	13	9	--	2.0
2.61	--	--	3	2.3



Şekil 4.7 Agreg granülometrisi.

4.1.4. Kimyasal Katkı

Deneysel çalışmaların ilk bölümünü mermer tozu ile hazırlanan KYB'ler oluşturmaktadır. Bu çalışmalarda, SİKA ViscoCrete-3075 3. nesil süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Çalışmaların diğer bölümlerinde ise firma tarafından önceki katkı yerine çıkarılan ViscoCrete-3080 kullanılmıştır.

4.1.4. Karma Suyu

Deneyisel çalışmaların tamamında TS EN 1008'e [60] uygun Elazığ İli şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Karma suları herhangi bir depoda bekletilmeden, içme suyu şebekesinden alındığı anda kullanılmıştır.

4.2. Deneyler ve Karışım Oranları

Deneylerin tamamı, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. Beton dökümleri için 120 ve 500 dm³'lük karıştırıcılar kullanılmıştır. KYB karışım oranları, mutlak hacim yöntemi kullanılarak ve EFNARC 2005 [2] standartları dikkate alınarak hazırlanmıştır. EFNARC 2005, toz malzeme miktarı, su oranı, kum miktarı gibi bazı parametrelerin belirli sınırlar arasında kalmasını gerekli kılmaktadır (Tablo 4.5). Bu sınırlamalar ışığında hazırlanan karışımların, belirlenen taze beton özelliklerini sağlaması gerekir. Tablo 4.6'da verilen özellikleri sağlayan karışımlar KYB olarak kabul edilmektedir.

Tablo 4.5 KYB karışım bileşenleri uygun sınırları [2].

Bileşen	Ağırlıkça sınırlar (kg/m ³)	Hacimce sınırlar (lt/m ³)
Toz malzeme	380-600	---
Toz+Çimento	---	300-380
Su	150-210	150-210
Çakıl	750-1000	270-360
Kum	Daha uygun bir miktar kanıtlanmadıkça, toplam agreganın %48-55'i arasında olmalıdır.	
Su/(Toz+Çimento)	---	0.85-1.10

Tablo 4.6 Kendiliğinden yerleşen taze beton kullanışlı deney limit sınıfları [2].

Sınıf	Yayılma çapı <i>d</i> (cm)	Yayılma süresi <i>T</i> ₅₀ (s)	V-hunisi <i>T</i> _v (s)	L-kutusu (%)	Segregason SG (%)
1	55-65	≤2	≤8	≥0.8	≤20
2	66-75	>2	9-25	≥0.8	≤15
3	76-85	-	-	-	-

4.2.1. Mermer Tozuyla KYB Üretilmesi

Mermer tozu ile 68 farklı karışıma sahip KYB ve 5 farklı karışıma sahip referans betonları üretilmiştir. Beton numuneler, 150×150×150 mm standart küp numuneler şeklinde hazırlanmıştır. Her bir seri, en az 12 en fazla 18 adet numuneden oluşmaktadır. Numuneler, beton dökümünden yaklaşık 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. 7 günlük numunelere 7 gün, 28 ve 90 günlük numunelere 28 gün boyunca 23 ± 2 °C su kürü uygulanmıştır. Bu deneme karışımlarının amacı, mermer tozunun KYB de kullanılabilirliğinin tespiti ve malzeme karışım oranları için pratik yaklaşık diyagramlar elde etmektir. Bu deneylerde 3 çeşit mermer tozu kullanılmıştır. Böylece mermer tozu çeşidinin taze ve sertleşmiş beton üzerine etkileri tespit edilmiştir. Karışım oranları Tablo 4.7’de sunulmuştur. Karışımlarda tüm alternatiflere yer vermeye çalışılmıştır. Bu nedenle çimento ve toz miktarı, çimento+toz olarak sabit tutularak incelenmiştir. W/C oranı 0.36-0.70 gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. Kimyasal akışkanlaştırıcı miktarı değiştirilerek, taze beton özelliklerini en olumlu etkileyen değer, üretici sınırlamaları da dikkate alınarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bazı seriler EFNARC 2005’in verdiği karışım sınırlarının dışında kalmaktadır. Bu karışımlar, malzemenin karışımındaki limitlerinin belirlenmesi açısından özellikle hazırlanmıştır. Karışım isimlerinin yanında yer alan harfler, mermer tozu çeşitlerini göstermektedir (V:Vişne, B:Beyaz, S:Sarı). İsmi yanında işaret bulunan karışımlar KYB özelliği göstermişlerdir. Referans betonlar, çimento miktarları ve yaklaşık W/C oranları KYB ile aynı, toz ve SA kullanılmadan, dayanımların karşılaştırılması için üretilen beton numunelerdir.

4.2.2. Mermer Tozuyla Üretilen KYB’lerin Çentikli Numune Deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde ilk önce tüm karışım oranları aynı alınmış, sadece farklı mermer tozları kullanılmıştır. Mermer tozu çeşidinin dayanım üzerindeki etkisinin standart sapmalar içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Bundan sonra yapılan deneylerde ise karışık mermer tozu kullanılmıştır. Bu bölümde 10 çeşit KYB ve 1 çeşit referans normal beton üretilmiştir. Serilerin karışım oranları Tablo 4.8’de görülmektedir. Tablodaki ilk 5 seriye ait fotoğraf Şekil 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.7 Mermer tozu ile üretilmiş KYB'lerin karışım oranları.

Seri Adı	C	Toz	W/C	SA	Çakıl	Kum	Seri Adı	C	Toz	W/C	SA	Çakıl	Kum
	(kg/m ³)	(kg/m ³)		(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)		(kg/m ³)	(kg/m ³)		(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
C1V	300	100	0.55	1	722	1095	C32V*	400	0	0.5	2	690	1047
C2V*	300	100	0.55	2	722	1095	C33V*	400	50	0.51	2	667	1013
C3V*	300	100	0.55	3	722	1095	C34V*	400	100	0.45	2	672	1020
C4V	300	100	0.6	1	706	1071	C35V*	400	100	0.48	2	662	1004
C5V*	300	100	0.6	2	706	1071	C35B*	400	100	0.48	2	662	1004
C6V*	300	100	0.63	2	696	1055	C35S*	400	100	0.48	2	662	1004
C7C*	300	100	0.67	2	685	1039	C36V*	400	100	0.53	2	641	972
C7B*	300	100	0.67	2	685	1039	C37V*	400	100	0.55	2	630	956
C7S*	300	100	0.67	2	685	1039	C38V*	400	150	0.45	2	653	990
C8V	300	100	0.7	2	675	1023	C38B*	400	150	0.45	2	653	990
C9V	300	200	0.58	1	672	1020	C38S*	400	150	0.45	2	653	990
C10V	300	200	0.58	2	672	1020	C39V	400	150	0.5	1	632	958
C11V*	300	200	0.6	2	667	1012	C40V*	400	150	0.5	2	632	958
C12V*	300	200	0.63	2	657	996	C41V*	400	150	0.5	3	632	958
C12B*	300	200	0.63	2	657	996	C42V*	400	150	0.53	2	621	942
C12S*	300	200	0.63	2	657	996	C43V*	400	150	0.55	2	611	926
C13V*	300	200	0.63	3	657	996	C43B*	400	150	0.55	2	611	926
C14V*	300	200	0.67	2	646	980	C43S*	400	150	0.55	2	611	926
C15V*	300	200	0.7	2	636	964	C44V	400	150	0.58	2	600	910
C16V	300	250	0.57	2	658	999	C45V	400	400	0.53	2	524	795
C17V*	300	250	0.6	2	648	983	C46V*	450	50	0.44	2	654	992
C18V	300	250	0.63	1	637	967	C47V*	450	100	0.44	2	634	962
C19V*	300	250	0.63	2	637	967	C48V*	500	0	0.42	2	646	979
C20V*	300	250	0.63	3	637	967	C49V	500	50	0.36	2	658	998
C21V	300	250	0.67	1	627	951	C50V*	500	50	0.38	2	647	982
C22V*	300	250	0.67	2	627	951	C50B*	500	50	0.38	2	647	982
C23V*	300	250	0.67	3	627	951	C50S*	500	50	0.38	2	647	982
C24V*	300	250	0.7	2	616	935	C51V*	500	50	0.4	2	637	966
C24B*	300	250	0.7	2	616	935	C52V*	500	50	0.42	2	626	950
C24S*	300	250	0.7	2	616	935	C53V	500	50	0.44	2	616	934
C25V*	300	250	0.7	3	616	935	C54V	500	300	0.42	2	529	802
C26V	300	500	0.7	2	519	787	REF1	300	0	0.65	0	729	1106
C27V*	350	50	0.6	2	677	1027	REF2	350	0	0.6	0	697	1057
C28V*	350	150	0.6	2	638	968	REF3	400	0	0.53	0	680	1031
C29V*	350	200	0.6	2	619	938	REF4	450	0	0.47	0	663	1005
C30V*	400	0	0.45	2	711	1079	REF5	500	0	0.42	0	646	979
C31V*	400	0	0.48	2	701	1063							

Tablo 4.8 Mermer tozu ile üretilmiş KYB serilerinin karışım oranları.

Seri Adı	C (kg/m ³)	Toz (kg/m ³)	Toz (%)	C+T	Katkı (%)	W/C	W/ (C+T)	Çakıl (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)
MTV	350	150	30	500	2	0.57	0.40	791	791
MTS	350	150	30	500	2	0.57	0.40	791	791
MTB	350	150	30	500	2	0.57	0.40	791	791
MTVSB	350	150	30	500	2	0.57	0.40	791	791
MTREF	350	0	30	500	2	0.57	0.57	838	838
MTK1	500	100	17	600	2	0.47	0.39	706	706
MTK2	400	200	33	600	2	0.59	0.39	700	700
MTK3	300	300	50	600	2	0.83	0.42	674	674
MTK4	400	100	20	500	2	0.56	0.45	761	761
MTK5	300	100	25	400	2	0.67	0.50	837	837
MTK6	300	200	40	500	2	0.73	0.44	762	762



Şekil 4.8 MTV, MTB, MTS, MTVSB, MTREF serilerinin görünüşü.

Her numune serisi farklı bir karışım özelliğine sahiptir ve her bir seri 2 adet 150×150×450 mm çentiksiz kiriş, 6 adet 150×150×450 mm çentikli kiriş ve 3 adet standart küp numuneden oluşmuştur. VSB isimli seride, vişne, beyaz ve sarı mermer tozları eşit miktarda kullanılmıştır. Her bir seri tek harmanda dökülmüştür. Numunelere 7 gün boyunca 23±2 °C su kürü uygulanmıştır.

4.2.3. Farklı Toz Malzemelerle Üretilen KYB'lerin Çentikli Numune Deneyleri

Mermer tozunun, kireçtaşı tozu gibi atık malzemelerle benzer kimyasal özellik göstermesinden dolayı beton karışım oranları ve beton kırılma parametreleri benzer kabul edilebilir. Ancak uçucu kül ve silis dumanı gibi silis oranı yüksek, pozolanik aktivitesi olan malzemelerle farklılık gösterecektir. Bu nedenle, aynı karışım oranlarına sahip, çimento+toz malzeme miktarı sabit ancak toz tipi mermer tozu, uçucu kül ve silis dumanı olan KYB'ler üretilmiştir. Çimento+toz miktarı, uygun taze beton özellikleri deneme karışımları ile gözlemlendikten sonra 450 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Bu bölümde, d_{max} 'ları 8 ve 16 mm olan toplam 8 çeşit numune serisi üretilmiştir. Bu serilerin beton karışım oranları Tablo 4.9 ve genel görünüşleri Şekil 4.9'da görülmektedir.

Tablo 4.9 Farklı tozlarla üretilmiş KYB serilerinin karışım oranları.

Seri Adı	C (kg/m^3)	Toz (kg/m^3)	Toz (%)	C+T	Katkı (%)	W/C	W/ (C+T)	Çakıl (kg/m^3)	Kum (kg/m^3)
SF16	350	100	22	450	2	0.60	0.47	785	785
FA16	350	100	22	450	2	0.60	0.47	792	792
MP16	350	100	22	450	2	0.60	0.47	802	802
REF16	350	0	22	450	2	0.60	0.60	825	825
SF8	350	100	22	450	2	0.71	0.56	724	724
FA8	350	100	22	450	2	0.71	0.56	731	731
MP8	350	100	22	450	2	0.71	0.56	741	741
REF8	350	0	22	450	2	0.71	0.71	763	763



Şekil 4.9 Boyut etkisi numunelerinin genel görünüşü.

d_{max} 'ı 16 mm olan her bir seri; 3 adet 50×50×150 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×100×300 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×200×600 mm çentikli kiriş, 3 adet 50×400×1200 mm çentikli kiriş, 2 adet 150×150×450 mm çentiksiz kiriş, 6 adet 150×150×450 mm çentikli kiriş ve 3 adet standart küp numuneden oluşmuştur. d_{max} 'ı 8 mm olan her bir seri; 2 adet 150×150×450 mm çentiksiz kiriş, 6 adet 150×150×450 mm çentikli kiriş ve 3 adet standart küp numuneden oluşmuştur. Numunelere 7 gün boyunca 23±2 °C su kürü uygulanmıştır.

4.2.4. KYB'lerin Zaman Bağlı Çentikli Numune Deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde çimento miktarı sabit tutulmuş ve toz malzemeler (mermer tozu, uçucu kül ve silis dumanı), %10, %15, %20 ve %25 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. Beton karışım oranları Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10 Zaman-KYB serilerinin karışım oranları.

Seri Adı	C (kg/m ³)	Toz (kg/m ³)	Toz (%)	C+T	Katkı (%)	W/C	W/ (C+T)	Çakıl (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)
SD1	315	35	10	350	2	0.63	0.57	856	856
SD2	298	52	15	350	2	0.67	0.57	852	852
SD3	280	70	20	350	2	0.71	0.57	848	848
SD4	263	87	25	350	2	0.76	0.57	844	844
UK1	315	35	10	350	2	0.63	0.57	858	858
UK2	298	52	15	350	2	0.67	0.57	856	856
UK3	280	70	20	350	2	0.71	0.57	853	853
UK4	263	87	25	350	2	0.76	0.57	850	850
MT1	315	35	10	350	2	0.63	0.57	862	862
MT2	298	52	15	350	2	0.67	0.57	861	861
MT3	280	70	20	350	2	0.71	0.57	860	860
MT4	263	87	25	350	2	0.76	0.57	859	859
REF1	350	0	0	350	0	0.57	0.57	864	864
REF2	350	0	0	350	2	0.57	0.57	864	864

Her bir seri, 6 adet 150×150×450 mm çentiksiz kiriş, 18 adet 150×150×450 mm çentikli kiriş ve 9 adet standart küp numuneden oluşmuştur. Seriler 3 gruba ayrılarak, 7, 28 ve 90. günlerde deneylere tabi tutulmuşlardır. Numunelere 7 gün boyunca 23±2 °C su kürü uygulanmıştır. Böylece KYB'lerde kırılma parametreleri-zaman ilişkisi incelenmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMELER

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen küp numunelerin basınç ve silindir yarma deneyleri için 200 tonluk hidrolik pres, kiriş numunelerin üç noktalı eğilme deneyleri için ise 250 tonluk hidrolik pres kullanılmıştır. Numuneler kırılmadan önce hepsinin ultrasonik test cihazı (PUNDİT) ile ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerle özellikle betonun homojenliği hususunda bilgi sahibi olunmuştur. Ayrıca tüm küp numunelerin 100 kN yük altındaki yüzey sertlikleri tespit edilmiştir [141-143]. Tüm test sonuçları tablolarla ifade edilmiştir.

Elde edilen test sonuçları, Bölüm 3’de açıklanan lineer olmayan kırılma mekaniği modelleriyle incelenmiştir. Elde edilen kırılma parametreleri ile ilgili değerler, tablolar ve grafikler yardımıyla ifade edilmiştir. Bölüm 4’de kullanılan deney başlıkları adı altında, değerlendirmeler sırasıyla aşağıda verilmiştir.

5.1. Mermer Tozuyla KYB Üretilmesi

Türkiye ve dünya için çevresel anlamda önemli bir tehlike olabilecek atık mermer tozu kullanılarak, KYB elde edilmiştir. Elde edilen KYB’lerin taze beton ve dayanım özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Tabloda isminin yanında (*) işaret bulunan karışımlar KYB özelliği göstermişlerdir. Parantez içerisinde verilen değerler yayılma göstermeyen karışımların çökme değerleridir. Ayırışma oranı, SG olarak ifade edilmiştir. Basınç ve yarma dayanımlarının değerleri 7, 28 ve 90 günlük olarak ifade edilmiştir.

Çimento miktarı sabit olmak şartıyla, toz miktarı ile KYB’nin taze haldeki özellikleri arasında bir uyum olduğu Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’de görülmektedir. bu durum göz önüne alındığında, KYB’nin taze beton özellikleri ile toz malzeme miktarı arasında doğrudan bir ilişki olduğu sonucuna varılmaktadır.

KYB’ler ile referans betonlar karşılaştırıldıklarında KYB dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum $f_c - W/C$ karşılaştırılmasının yapıldığı Şekil 5.4’de, aynı şekilde dayanım-yaş ilişkileri de Şekil 5.5 ve 5.6’da görülmektedir.

Şekil 5.7 ve 5.8’den görüleceği gibi mermer tozu çeşidinin taze beton özellikleri ve dayanım üzerinde önemli bir rolü bulunmamaktadır. Aynı karışım oranlarına, farklı toz malzeme çeşitlerine sahip karışımların dayanımları arasındaki fark standart oranlar içinde kalmaktadır. Çimento miktarı sabit kalmak şartıyla sadece toz miktarının değişimi dayanımı etkiler ve bu toz miktarının dayanımı maksimum yapan optimum bir miktarı vardır. Bu miktar karışım tipine göre değişiklik gösterecektir. Örnek Şekil 5.9’da görülmektedir.

Tablo 5.1 Mermer tozu ile üretilen KYB'lerin özellikleri.

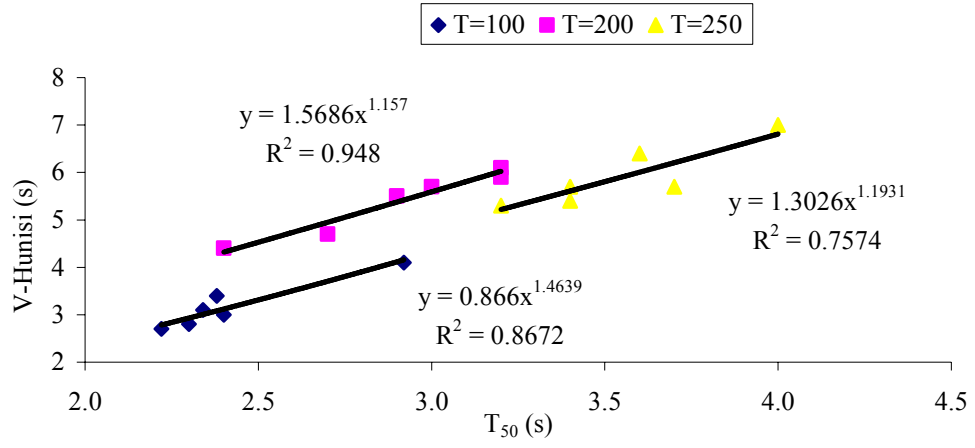
Seri Adı	d_m^{**}	T_{50}	T_v	h_2/h_1	SG	f_{cc} (MPa)			f_t (MPa)		
	(cm)	(s)	(s)	(%)	(%)	7g	28g	90g	7g	28g	90g
C1V	30	-	-	-	-	25.8	35.6	38.7	2.19	2.94	3.19
C2V*	57	2.92	4.1	0.89	1	30.7	39.1	41.8	2.63	3.19	3.47
C3V*	58	2.45	3.5	0.91	1	22.2	29.3	32.9	1.9	2.45	2.7
C4V	43	-	-	-	-	25.8	33.3	36	2.19	2.8	3.01
C5V*	60	2.38	3.4	0.95	7	28.9	37.8	41.3	2.41	3.12	3.44
C6V*	66	2.34	3.1	0.96	12	27.6	36.4	39.6	2.34	3.05	3.26
C7V*	68	2.22	2.7	0.98	16	26.2	34.2	36.9	2.27	2.87	3.01
C7B*	66	2.4	3	0.93	12	25.7	34	36.5	2.21	2.72	2.97
C7S*	68	2.3	2.8	0.96	15	25.2	33.7	36.3	2.09	2.6	2.72
C8V	71	1.8	2.3	0.99	33	23.1	31.6	33.8	1.98	2.63	2.87
C9V	[2]	-	-	-	-	29.3	40	45.8	2.48	3.33	3.71
C10V	51	3	-	-	-	28.4	38.2	42.7	2.45	3.16	3.54
C11V*	62	3.2	6.1	0.91	4	29.3	40.9	44.9	2.45	3.33	3.75
C12V*	68	2.9	5.5	0.94	7	28	38.7	41.8	2.37	3.16	3.5
C12B*	65	3.2	5.9	0.91	5	27.8	38.5	41.4	2.21	2.97	3.34
C12S*	67	3	5.7	0.94	6	27.2	38.4	41.3	2.21	2.85	3.1
C13V*	69	2.5	5.2	0.93	7	28	37.8	41.3	2.37	3.16	3.37
C14V*	71	2.7	4.7	0.96	9	26.7	37.3	40.4	2.23	3.09	3.33
C15V*	73	2.4	4.4	0.97	13	25.3	34.7	38.2	2.19	2.91	3.19
C16V	50	5.4	-	-	-	24	35.6	37.3	2.01	2.94	3.12
C17V*	58	4	7	0.89	2	25.3	37.8	39.1	2.16	3.16	3.23
C18V	[2]	-	-	-	-	23.6	34.7	36.4	2.05	2.87	2.98
C19V*	65	3.6	6.4	0.91	4	24.4	37.3	39.6	2.09	3.09	3.33
C20V*	66	3	6.2	0.92	5	25.8	37.3	39.1	2.16	3.05	3.3
C21V	[4]	-	-	-	-	24	35.6	37.8	2.05	2.94	3.19
C22V*	66	3.4	5.7	0.94	7	24.4	35.6	38.2	2.09	2.98	3.12
C23V*	68	2.9	5.4	0.94	7	23.6	35.1	36.4	1.98	2.91	3.01
C24V*	69	3.2	5.3	0.97	10	23.1	33.8	35.6	2.01	2.84	2.94
C24B*	67	3.7	5.7	0.93	7	22.8	33.5	35.4	1.83	2.85	2.97
C24S*	68	3.4	5.4	0.96	9	22.6	33	35.1	1.83	2.72	2.72
C25V*	71	2.7	5.2	0.97	16	21.8	32	33.8	1.9	2.7	2.8
C26V	[20]	-	-	-	-	18.2	25.3	26.7	1.57	2.12	2.3
C27V*	63	2.2	3.6	0.96	8	27.6	38.7	41.3	2.3	3.16	3.44
C28V*	66	2.9	4.2	0.93	5	29.3	40.9	43.6	2.48	3.37	3.54
C29V*	62	3.3	4.9	0.92	4	25.3	36.4	39.1	2.16	3.01	3.19
C30V*	62	2.75	5.4	0.92	9	38.7	55.6	61.8	3.26	4.47	5.01
C31V*	67	2.1	5.1	0.95	12	34.7	52	60	2.91	4.23	4.81
C32V*	68	1.5	4.5	0.97	14	33.8	49.3	54.7	2.8	4.06	4.4
C33V*	66	1.8	5	0.94	11	35.1	50.2	56	2.91	4.06	4.6
C34V*	55	2.69	6.5	0.88	8	42.7	53.8	64.4	3.57	4.37	5.25

Tablo 5.1 (devamı) Mermer tozu ile üretilen KYB'lerin özellikleri.

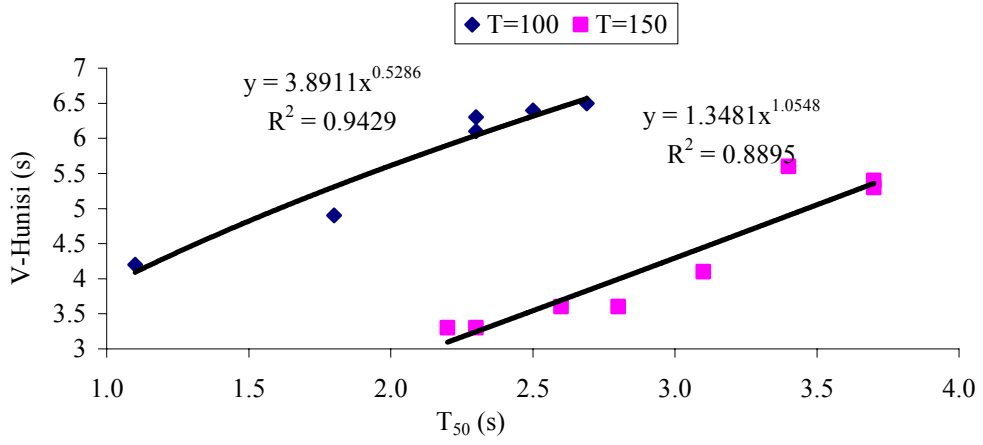
Seri Adı	d_m^{**}	T_{50}	T_v	h_2/h_1	SG	f_{cc} (MPa)			f_t (MPa)		
	(cm)	(s)	(s)	(%)	(%)	7g	28g	90g	7g	28g	90g
C35V*	58	2.3	6.1	0.91	12	40.9	50.7	63.1	3.4	4.13	5.08
C35B*	56	2.5	6.4	0.93	9	40.7	50.4	62.7	3.1	3.96	4.8
C35S*	57	2.3	6.3	0.91	11	40.5	50.3	62.1	3.1	3.83	4.68
C36V*	69	1.8	4.9	0.97	14	36.9	46.2	56.9	3.12	3.82	4.6
C37V*	73	1.1	4.2	0.99	17	30.7	39.6	43.6	2.55	3.23	3.61
C38V*	58	3.7	5.3	0.88	2	42.7	57.3	65.8	3.54	4.64	5.31
C38B*	55	3.4	5.6	0.87	1	42.7	57	65.4	3.47	4.44	5.16
C38S*	58	3.7	5.4	0.88	1	42.4	56.9	65.2	3.22	4.32	4.92
C39V	44	-	-	-	-	29.3	40	45.8	2.45	3.26	3.82
C40V*	66	3.1	4.1	0.93	4	41.3	54.2	61.3	3.44	4.4	5.01
C41V*	71	2.2	3.9	0.94	5	39.1	52	58.7	3.3	4.26	4.71
C42V*	68	2.8	3.6	0.94	9	38.2	51.1	57.8	3.16	4.2	4.67
C43V*	72	2.2	3.3	0.96	14	37.3	48.9	52.9	3.12	3.95	4.3
C43B*	72	2.6	3.6	0.93	12	36.8	48.3	52.4	3.1	3.83	4.2
C43S*	69	2.3	3.3	0.95	13	36.4	47.9	52.2	2.97	3.83	4.08
C44V	76	1.7	2.7	0.99	23	32	42.7	45.8	2.63	3.5	3.75
C45V	51	6.6	-	-	-	20.9	30.7	33.3	1.76	2.52	2.84
C46V*	67	2.4	5.9	0.95	13	39.6	52.4	61.8	3.23	4.2	5.05
C47V*	70	3.1	6.4	0.93	10	42.2	55.1	64.4	3.47	4.43	5.15
C48V*	70	1.13	3.5	0.96	14	43.6	57.8	67.1	3.64	4.64	5.42
C49V	52	4.47	-	-	11	54.7	67.1	73.8	4.47	5.38	5.88
C50V*	68	2.03	4.6	0.93	13	52	65.3	71.1	4.3	5.28	5.65
C50B*	65	2.6	5	0.9	12	51.5	64.5	70.3	4.08	4.92	5.4
C50S*	68	2.2	4.7	0.92	13	50.9	63.9	69.8	3.96	4.92	5.16
C51V*	71	1.56	4.3	0.96	16	50.7	62.2	67.6	4.13	5.01	5.48
C52V*	73	1.37	3.9	0.97	18	46.7	60	64.4	3.85	4.88	5.15
C53V	77	0.8	3.3	0.99	27	39.1	49.8	53.3	3.19	4.09	4.3
C54V	56	5.6	-	-	-	31.6	44.4	48.4	2.63	3.61	3.95
REF1	[15]	-	-	-	-	20.4	30.2	32.4	1.76	2.52	2.73
REF2	[13]	-	-	-	-	23.1	33.3	36.4	1.94	2.73	3.05
REF3	[9]	-	-	-	-	27.1	37.3	39.1	2.23	3.01	3.3
REF4	[5]	-	-	-	-	29.8	43.1	46.7	2.48	3.5	3.82
REF5	[2]	-	-	-	-	37.8	48.9	54.7	3.16	3.99	4.37

* KYB özelliği gösteren karışımlardır.

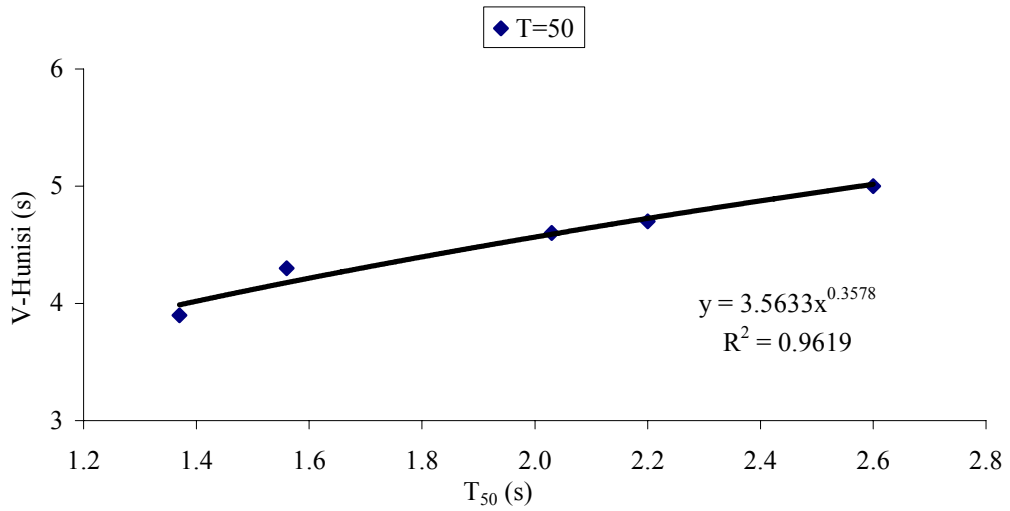
** Beton çökme değerleridir.



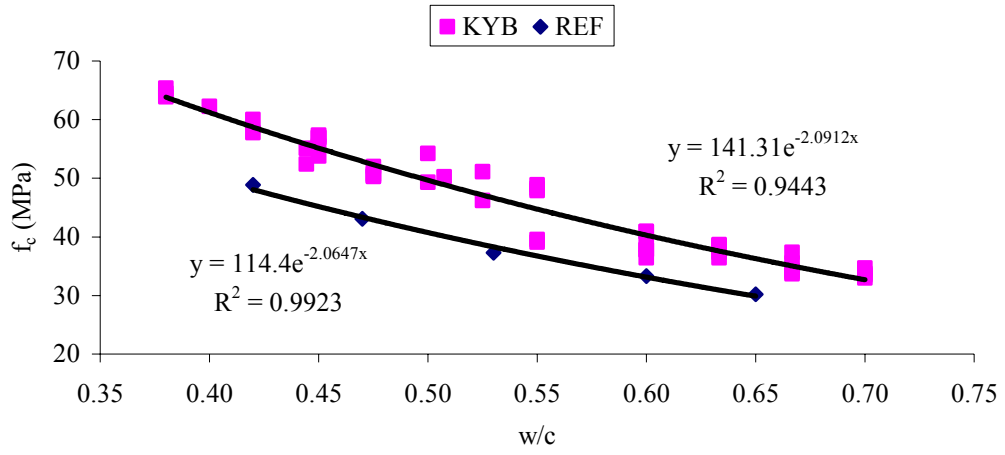
Şekil 5.1 Çimento=300 kg/m³ için V-hunisi ile T_{50} ilişkisi.



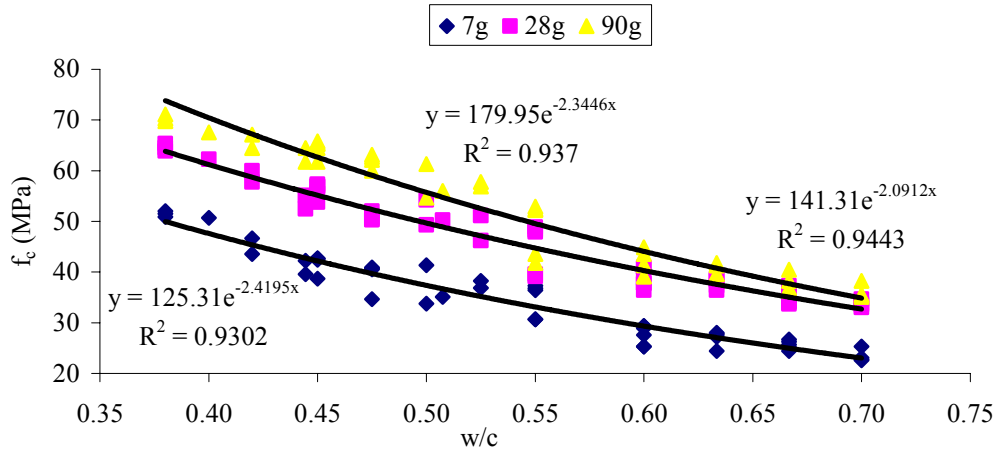
Şekil 5.2 Çimento=400 kg/m³ için V-hunisi ile T_{50} ilişkisi.



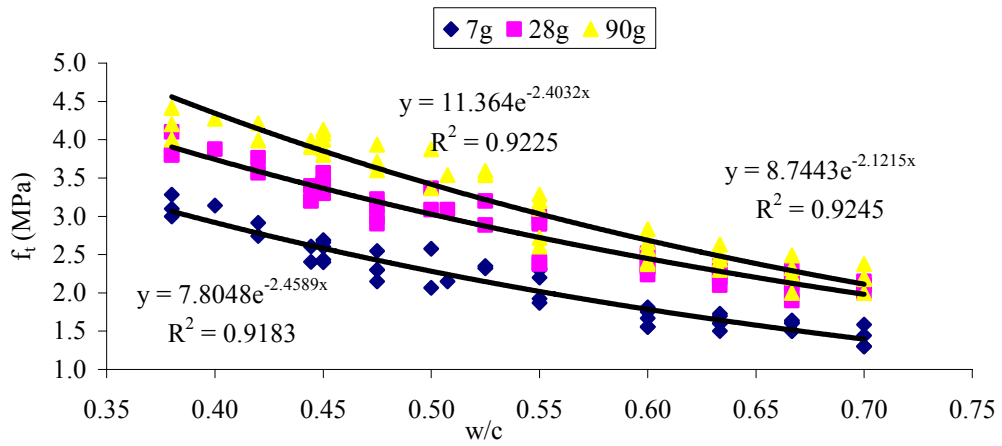
Şekil 5.3 Çimento=500 kg/m³ için V-hunisi ile T_{50} ilişkisi.



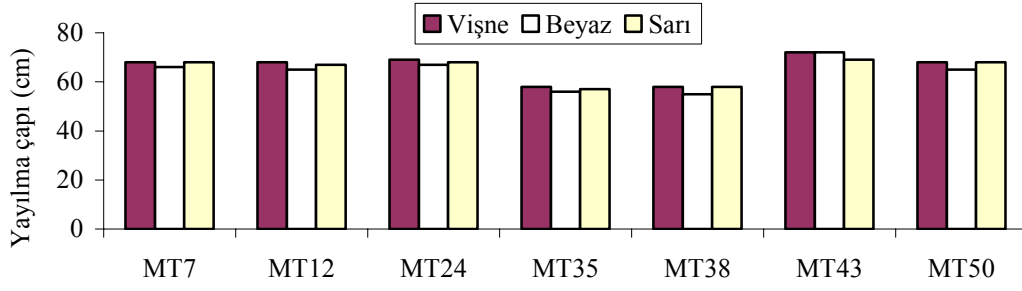
Şekil 5.4 28 günlük KYB ve referans beton dayanımları.



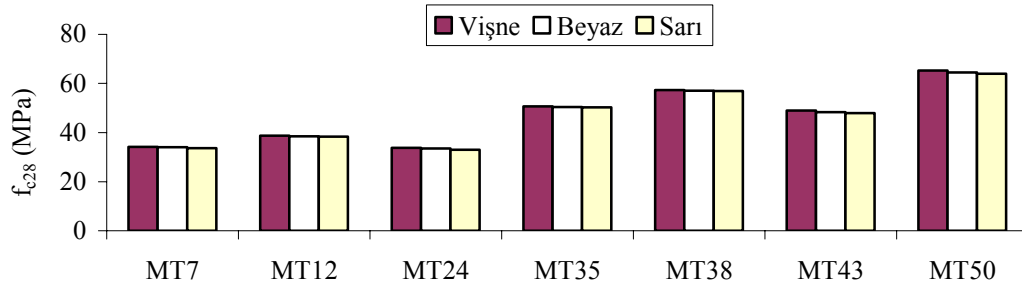
Şekil 5.5 f_c – beton yaşı ilişkisi.



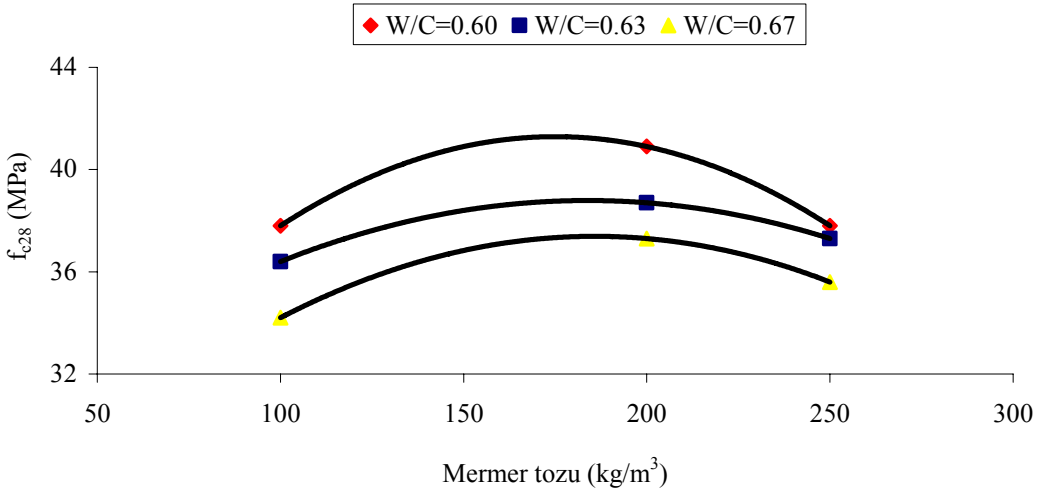
Şekil 5.6 f_t – beton yaşı ilişkisi.



Şekil 5.7 Mermer tozu çeşidi-yayılma ilişkisi.



Şekil 5.8 Mermer tozu çeşidi-basınç dayanımı ilişkisi.



Şekil 5.9 Mermer tozu miktarı-basınç dayanımı ilişkisi.

Mermer tozu ile KYB elde edilen bu tez çalışmasında, istenilen her özelliğe sahip KYB'nin mermer tozu ile elde edilebileceği görülmüştür. Tablo 5.1'de görüldüğü gibi hemen her çeşit karışım oranı kullanılarak beton üretilmiştir. Tablodaki karışım değerleri kullanılarak, başka çalışmalar ve uygulamalar için yaklaşık karışım oranları belirlenebilir.

5.2. Mermer Tozuyla Üretilen KYB'lerin Çentikli Numune Deneyleri

Bu bölümde hazırlanan betonların taze beton deney sonuçları ve dayanımları Tablo 5.2'de verilmiştir. Beton test çekici ve ultrases sonuçları küp numunelere aittir.

Tablo 5.2 Mermer tozlu KYB'lerin taze beton ve dayanım özellikleri.

Seri Adı	T_{50} (s)	Yayılma (cm)	SG (%)	h_1/h_2 (%)	T_v (s)	f_{cc} (MPa)	R	Vs (km/s)
MTV	1.8	64	0	0.96	6.9	47.85	43	4.4
MTS	2.1	61	0	0.93	7.5	50.37	44	4.6
MTB	1.9	62	0	0.94	7.1	45.48	43	4.6
MTVSB	2.0	62	0	0.95	7.0	46.07	43	4.5
MTREF	-	[13-15]	0	-	-	40.15	40	4.2
MTK1	1.1	71.0	17	0.95	3.5	60.89	47	4.2
MTK2	2.1	70.0	8	0.96	3.2	50.07	43	4.2
MTK3	2.2	60.0	2	0.85	9.3	21.93	34	3.7
MTK4	1.2	72.0	14	0.93	4.5	37.04	41	4.2
MTK5	2.6	64.0	13	0.94	3.2	54.37	45	4.3
MTK6	2.3	73.0	9	0.95	4.7	38.22	39	4.3

Eşit karışım oranlarına sahip ancak farklı mermer tozlarıyla üretilmiş betonların taze beton özelliklerinin yaklaşık aynı olduğu görülmektedir. Özellikle yayılma değerlerinin yaklaşık aynı olması, mermer tozu çeşidinin betonun doldurma kabiliyeti üzerinde dikkate değer bir değişiklik yapmadığı görülmektedir.

Karışımlarda yer alan toz ve su miktarı orantılı bir şekilde kullanılırsa, istenilen tüm özellikteki KYB'leri elde etmek mümkündür.

Kiriş numuneler kırılmadan önce ultrases ölçümleri yapılmış, daha sonra üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Kirişler genellikle tam ortadan kırılmışlardır. Kırılan parçalardan, başlangıçta $\alpha = 0.1$, 0.2 ve 0.25 olarak hazırlanan çentiklerin gerçek boyları hassas olarak kumpasla ölçülmüştür.

Kirişlerin maksimum kırılma yükleri, çentik boyları ve ultrases ölçümleri Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3 Mermer tozlu KYB’lerin kırılma yükleri ve diğer ölçümleri.

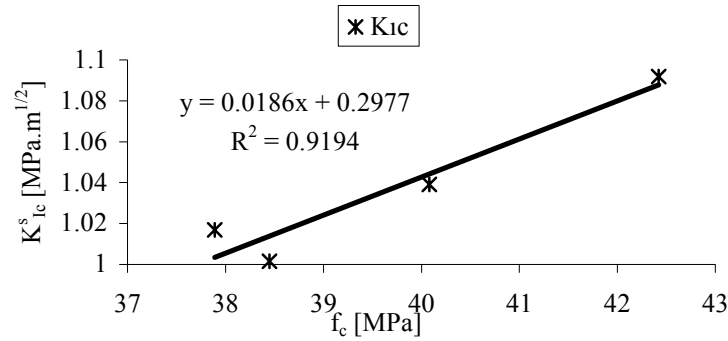
MTV			MTS			MTB			MTVSB		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
25.0	0.0	4.4	24.5	0.0	4.5	24.1	0.0	4.6	24.9	0.0	4.6
25.0	0.0	4.3	25.5	0.0	4.6	28.6	0.0	4.6	28.0	0.0	4.5
17.2	16.0	4.3	18.8	15.5	4.6	17.8	15.5	4.5	18.4	16.0	4.4
17.0	16.5	4.3	17.1	15.5	4.6	18.4	15.6	4.5	16.7	16.2	4.4
13.9	30.5	4.3	14.0	30.0	4.4	14.0	30.0	4.4	14.9	31.0	4.3
14.8	31.5	4.3	15.0	30.8	4.5	15.2	30.8	4.4	14.0	31.1	4.3
12.7	38.0	4.3	12.9	38.0	4.4	14.2	38.5	4.4	13.1	38.6	4.3
13.7	38.5	4.3	13.5	38.0	4.4	13.1	38.5	4.4	13.0	39.6	4.3
MTREF			MTK1			MTK2			MTK3		
23.2	0.0	4.2	23.7	0.0	4.6	20.6	0.0	4.5	16.0	0.0	3.7
23.9	0.0	4.2	24.1	0.0	4.6	24.0	0.0	4.5	18.8	0.0	3.7
16.1	16.1	4.3	16.8	14.6	4.6	15.4	15.0	4.3	11.2	15.5	3.8
14.2	16.2	4.2	15.7	16.0	4.5	14.7	15.5	4.4	13.5	15.6	3.8
14.2	30.8	4.3	14.2	31.0	4.5	12.0	30.5	4.3	8.7	30.0	3.8
12.6	32.0	4.2	15.2	31.0	4.5	12.2	30.5	4.3	9.4	30.8	3.8
11.0	38.1	4.3	14.5	37.0	4.4	10.0	37.5	4.4	8.0	38.5	3.8
12.7	38.4	4.2	13.0	39.0	4.5	10.5	39.0	4.4	8.1	38.5	3.8
MTK4			MTK5			MTK6					
23.4	0.0	4.3	29.9	0.0	4.6	20.0	0.0	4.4			
26.2	0.0	4.3	29.9	0.0	4.6	26.1	0.0	4.5			
16.8	16.0	4.3	19.1	16.0	4.4	13.1	16.5	4.4			
18.4	16.5	4.3	22.4	16.0	4.4	15.7	16.5	4.4			
13.6	31.0	4.3	16.6	30.0	4.4	12.4	30.0	4.4			
14.2	31.0	4.3	17.6	31.3	4.4	11.9	30.5	4.4			
12.6	38.0	4.3	14.8	38.4	4.4	13.1	38.0	4.4			
11.8	39.0	4.4	14.7	39.0	4.4	9.7	40.0	4.3			

Deneyler sonucunda elde edilen değerler Pik Yük Metodu ile değerlendirilmiş ve kırılma parametreleri ve gevreklik indeksleri elde edilmiştir (Tablo 5.4). Mermer tozu çeşidinin kırılma parametreleri üzerinde önemli bir etki yapmadığı Şekil 5.10 ve 5.11’de görülmektedir. K_{Ic}^S ’deki değişim en fazla %9, $CTOD_c$ ’deki değişim %16 civarındadır. Bu değişim beton gibi heterojen bir malzeme için kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Genel olarak KYB’lerin

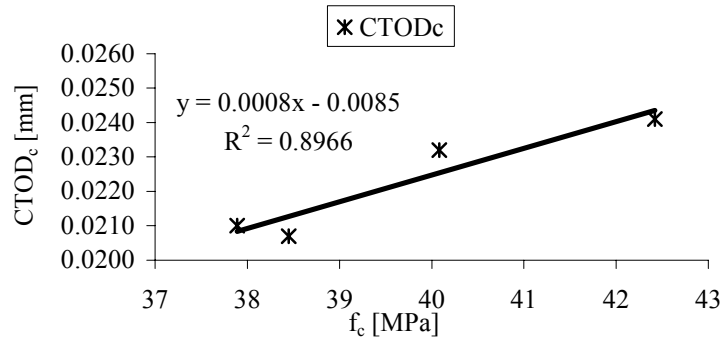
kırılma parametrelerinin, referans betonun kırılma parametrelerinden yüksek oluşu dikkat çekicidir. Ayrıca yaklaşık dayanımları aynı olan mermer tozu ile üretilmiş KYB'lerin kırılma parametreleri birbirinden oldukça farklıdır. Buda betonun yalnızca basınç dayanımı özelliği dikkate alınarak K_{Ic}^s ve $CTOD_c$ kırılma parametrelerinin yeterince hassas belirlenemeyeceğini doğrulamaktadır.

Tablo 5.4 Farklı karışımlı mermer tozlu KYB'lerin kırılma parametreleri.

Seriler	f_c (MPa)	K_{Ic}^s (MPa.m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm)	Q (mm)
MTV	40.08	1.039	0.0232	350
MTS	42.42	1.092	0.0241	342
MTB	37.89	1.017	0.0210	300
MTVSB	38.45	1.002	0.0207	300
MTREF	33.02	0.850	0.0176	301
MTK1	52.28	0.963	0.0188	268
MTK2	42.14	0.825	0.0172	305
MTK3	16.88	0.684	0.0157	370
MTK4	30.20	0.996	0.0220	343
MTK5	46.14	1.230	0.0275	351
MTK6	31.27	0.882	0.0189	323

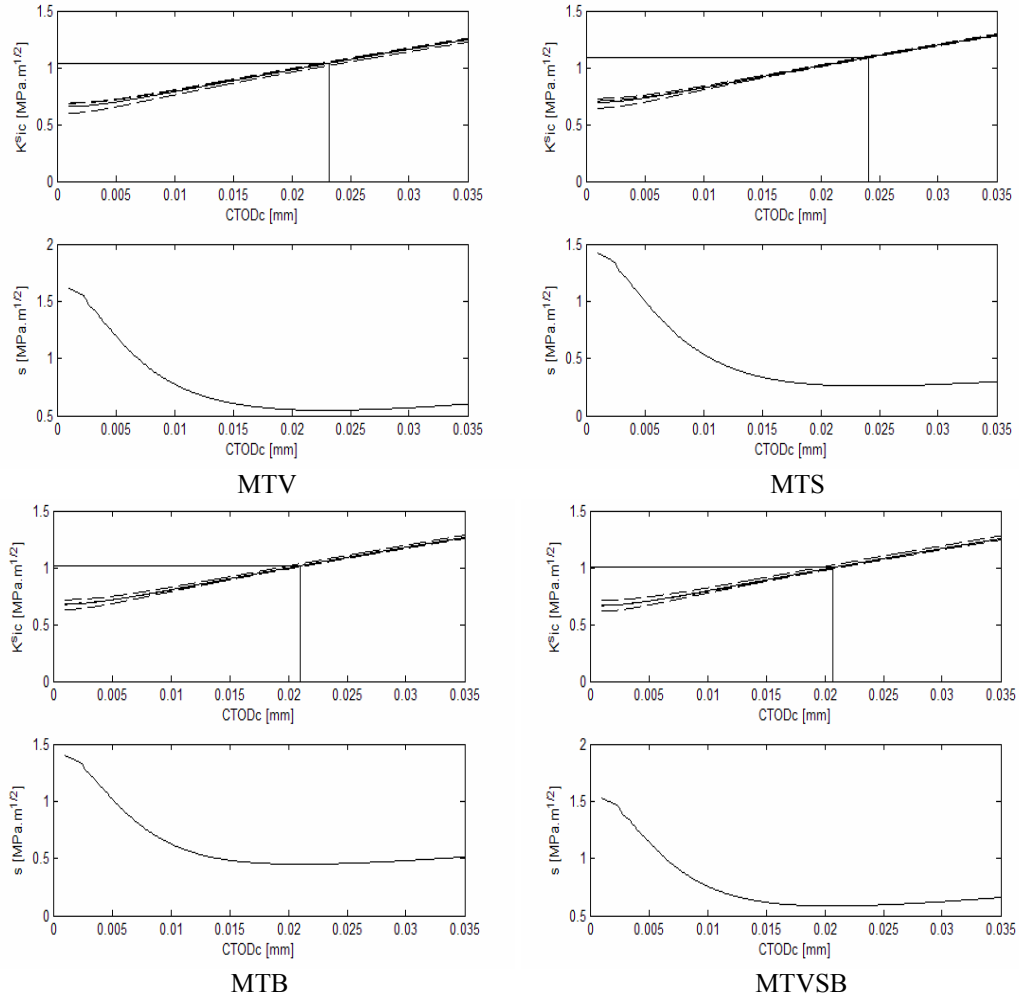


Şekil 5.10 MTV, MTS, MTB, MTVSB serilerinin kırılma parametresi: K_{Ic}^s .



Şekil 5.11 MTV, MTS, MTB, MTVSB serilerinin kırılma parametresi: $CTOD_c$.

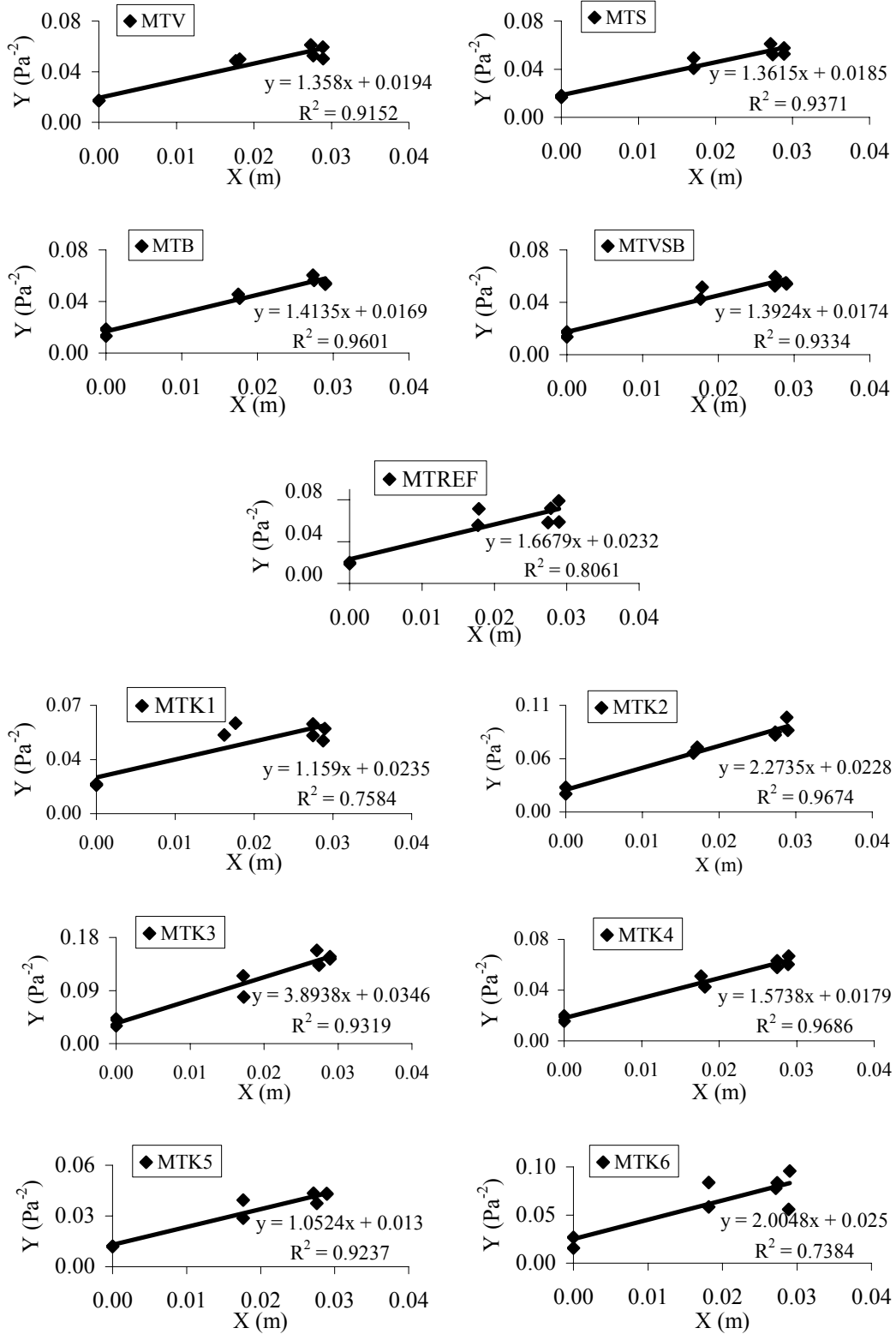
Kırılma parametreleri elde edilirken kullanılan programın grafik çıktıları Şekil 5.12’de verilmiştir. Örnek olarak sadece ilk dört serinin grafikleri şekilde sunulmuştur. Standart sapmanın minimum olduğu nokta $CTOD_c$ değerini, $CTOD_c$ ile ortalama K_{Ic}^S değerlerinin kesişimim K_{Ic}^S değerini vermektedir.



Şekil 5.12 MTV, MTS, MTB, MTVSB serilerinin grafik çözümleri.

Elde edilen deney sonuçları, aynı zamanda Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu kullanılarak G_f ve c_f kırılma parametreleri belirlenmiştir. Bu metotta, kırılma parametreleri bulunmadan önce kırılma yükleri ve çentik boylarından faydalanılarak doğrular elde edilir. Bu doğru denklemindeki katsayılar çözüm için gereklidir. Şekil 5.13’de yer alan R^2 değerlerinin büyük olması deneylerin güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Doğru denkleminin katsayıları kullanılarak elde edilen kırılma parametreleri Tablo 5.5’de sunulmuştur.

MTV, MTS, MTB, MTVSB ve REF serilerinin, G_f ve c_f değerlerinin grafikleri Şekil 5.14’de verilmiştir. NB’ de G_f değeri KYB’lerden daha düşüktür.

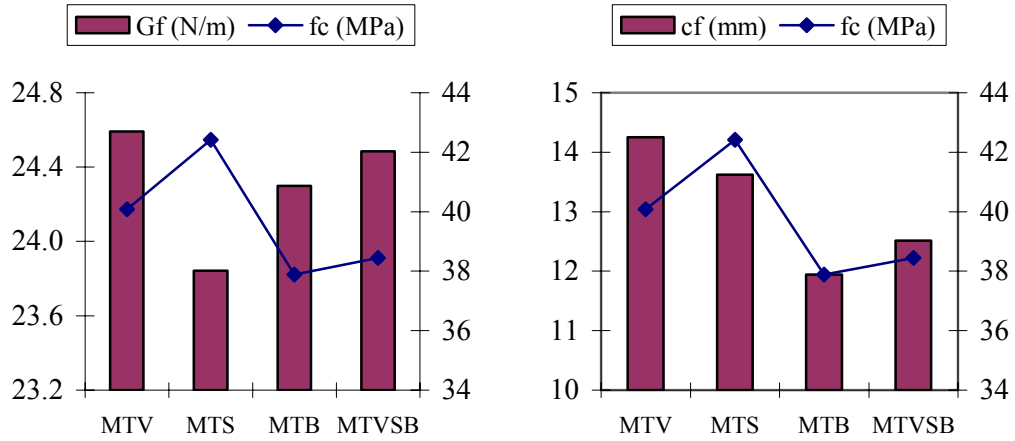


Şekil 5.13 Mermer tozlu KYB’lerin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri.

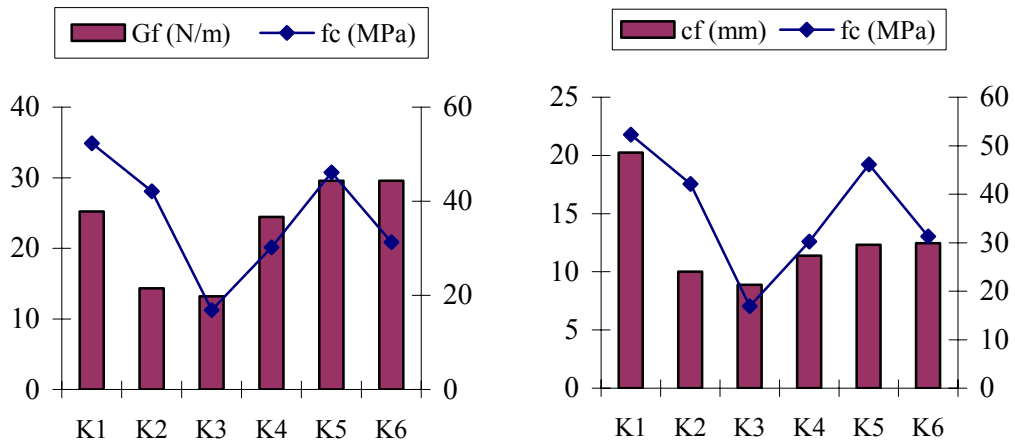
Karışım oranları birbirinden tamamen farklı MTK serilerinde ise bazı serilerin yaklaşık dayanımları aynı olsa da kırılma parametrelerinin farklı olduğu görülmektedir. Şekil 5.15’de karışık mermer tozu kullanılan KYB’lerin kırılma parametreleri görülmektedir.

Tablo 5.5 Mermer tozlu KYB’lerin G_f ve c_f kırılma parametreleri

Seriler	G_f (N/m)	c_f (mm)	Seriler	G_f (N/m)	c_f (mm)
MTK1	25.2	20.24	MTV	24.6	14.25
MTK2	14.3	10.02	MTS	23.8	13.62
MTK3	13.2	8.89	MTB	24.3	11.94
MTK4	24.4	11.38	MTVSB	24.5	12.52
MTK5	29.6	12.32	MTREF	22.1	13.91
MTK6	18.9	12.46			



Şekil 5.14 MTV, MTS, MTB VE MTVSB serileri $G_f - f_c$ ve $c_f - f_c$ ilişkileri.



Şekil 5.15 MT(K1-K6) serileri $G_f - f_c$ ve $c_f - f_c$ ilişkileri.

5.3. Farklı Toz Malzemelerle Üretilen KYB'lerin Çentikli Numune Deneyleri

Deneyisel çalışmaların bu bölümünde hazırlanan betonların taze ve sertleşmiş beton özellikleri Tablo 5.6'da verilmiştir. Yayılma sütununda bulunan ve parantez içinde verilen değerler çökme değerleridir. Maksimum agreg a çapı değıştiğinde, kendiliğinden yerleşen taze beton özellikleri de değışmiştir.

Tablo 5.6 Farklı toz malzemelerle üretilen KYB'lerin özellikleri.

Seri Adı	T_{50} (s)	Yayılma (cm)	SG (%)	h_1/h_2 (%)	T_v (s)	f_{cc} (MPa)	R
SD16	1.0	56	0	0.87	2.6	54.1	47
UK16	1.3	66	10	0.88	4.8	46.3	46
MT16	1.6	66	7	0.92	6.2	45.3	45
REF16	-	[13-15]	-	-	-	36.4	42
SD8	0.9	57	-	0.90	1.9	52.3	45
UK8	0.7	69	-	0.99	2.1	40.4	41
MT8	0.8	70	-	0.95	2.3	36.4	42
REF8	-	[16-18]	-	-	-	32.3	38

Bu çalışmada, boyut etkisi numuneleri, laboratuvar imkânları ve ACI 446'da açıklanan kiriş numunelerdeki sürtünme etkisinin daha küçük olması durumu dikkate alınarak, $S/d = 2.5$ olan kiriş numuneler olarak seçilmiştir [145]. Bu çalışmada sadece $d_{max} = 16$ mm KYB ile boyut etkisi numuneleri oluşturulmuştur. Numuneler hazırlanırken boyut değışim aralığı 1:8 esas alınmış, relatif çentik boyu $\alpha = 0.2$ olarak seçilmiş ve tüm çalışmalarda olduğu gibi çentik önceden yerleştirilmiştir. Boyut etkisi numunelerinin kırılma yükleri Tablo 5.7'de verilmiştir.

Bölüm 3'de açıklanan Boyut Etkisi Kanunu kullanılarak elde edilen G_f ve c_f değerleri yine Tablo 5.7'de verilmiştir. Ayrıca serilerin genel görünüşleri Şekil 5.16, her serinin boyut etkisi eğrisi Şekil 5.17'de verilmiştir. Tüm serilerin karışım oranları ve saklama şartları aynı olsa da kullanılan toz malzeme çeşidi beton basınç dayanımını etkilemiştir. Bununla birlikte beton basınç dayanımı azaldıkça G_f ve c_f artmıştır. Bu durum kırılma parametreleri değışiminin beton basınç dayanımı ile yakından alakalı olduğunu ancak bunun temelinde de malzeme özelliklerinin etkili olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

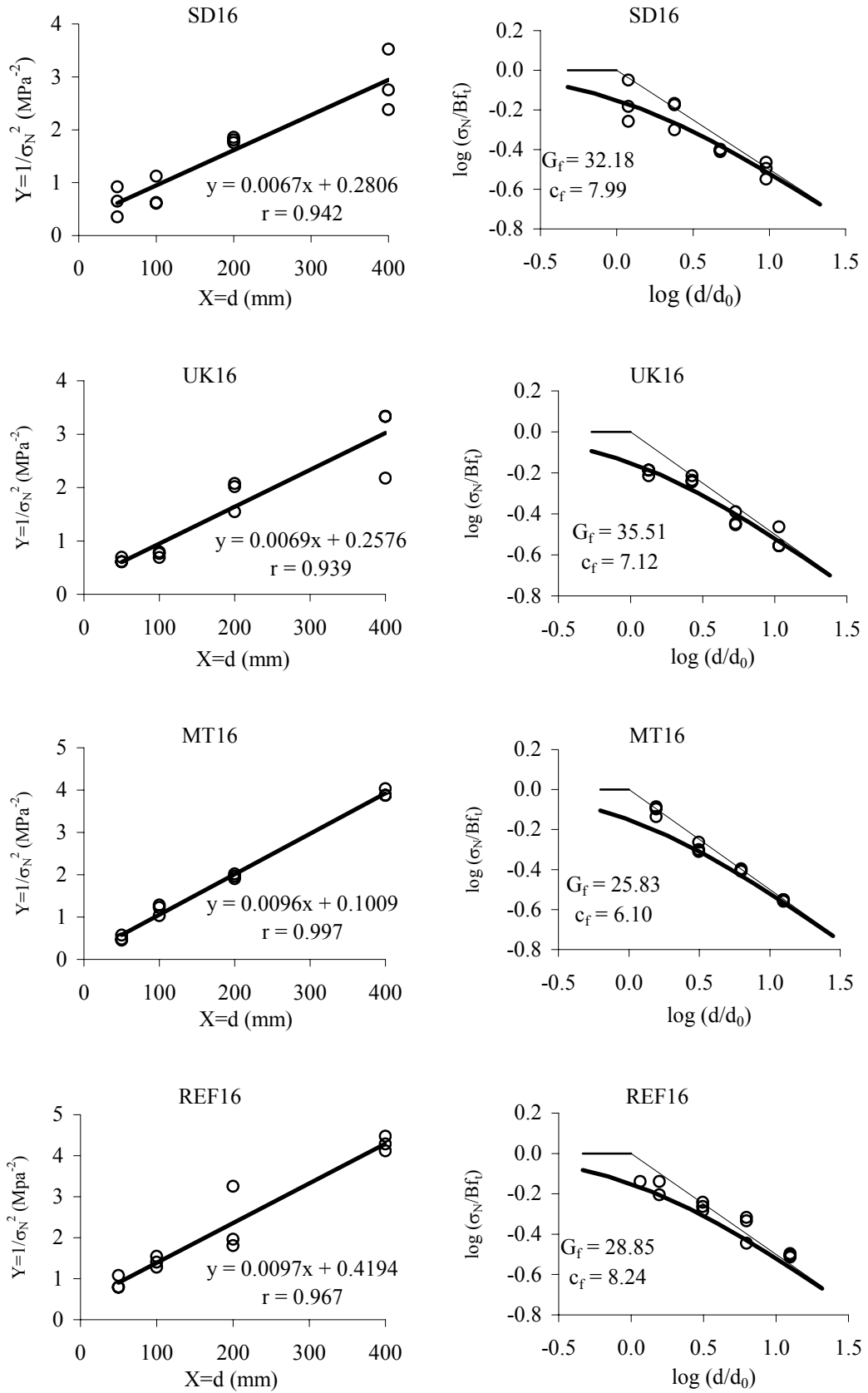
Sonuçta $G_f - f_c$ ve $c_f - f_c$ değışimleri göz önünde bulundurulduğunda kırılma bölgesi uzunluğunun daha büyük oranlarda değışim gösterdiği görülmektedir. Bundan c_f değerinin betonun içyapısına ve malzeme parametrelerine daha hassas olduğu sonucuna varılabilir. Bu nedenle KYB'de kullanılan toz malzeme çeşidi önem kazanmaktadır.

Tablo 5.7 Boyut etkisi numuneleri kırılma yükleri ve kırılma parametreleri.

Seri Adı	b (mm)	d (mm)	L (mm)	P_u^1 (kN)	P_u^2 (kN)	P_u^3 (kN)	a (mm)	G_f (N/m)	c_f (mm)
SD16	50	50	150	3100	4200	2600	10	32.18	7.99
	50	100	300	4700	6400	6300	20		
	50	200	600	7200	7300	7400	40		
	50	400	1200	10300	11700	12600	80		
UK16	50	50	150	3200	3200	3000	10	35.51	2.63
	50	100	300	5700	6000	5600	20		
	50	200	600	6800	6900	7900	40		
	50	400	1200	13200	10600	10600	80		
MT16	50	50	150	3600	3300	3700	10	25.83	6.10
	50	100	300	4400	4500	4900	20		
	50	200	600	6900	7000	7100	40		
	50	400	1200	9600	9800	9800	80		
REF16	50	50	150	2800	2400	2800	10	28.85	8.24
	50	100	300	4400	4000	4200	20		
	50	200	600	7000	7300	5400	40		
	50	400	1200	9300	9100	9500	80		



Şekil 5.16 Boyut etkisi numuneleri çeşitli görünüşler.



Şekil 5.17 Boyut etkisi eğrileri.

Boyutları aynı (150×150×450 mm) çentik boyları farklı numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları Tablo 5.8’de sunulmuştur.

Tablo 5.8 Farklı tozlarla üretilen aynı boyuttaki KYB kirişlerin kırılma yükleri.

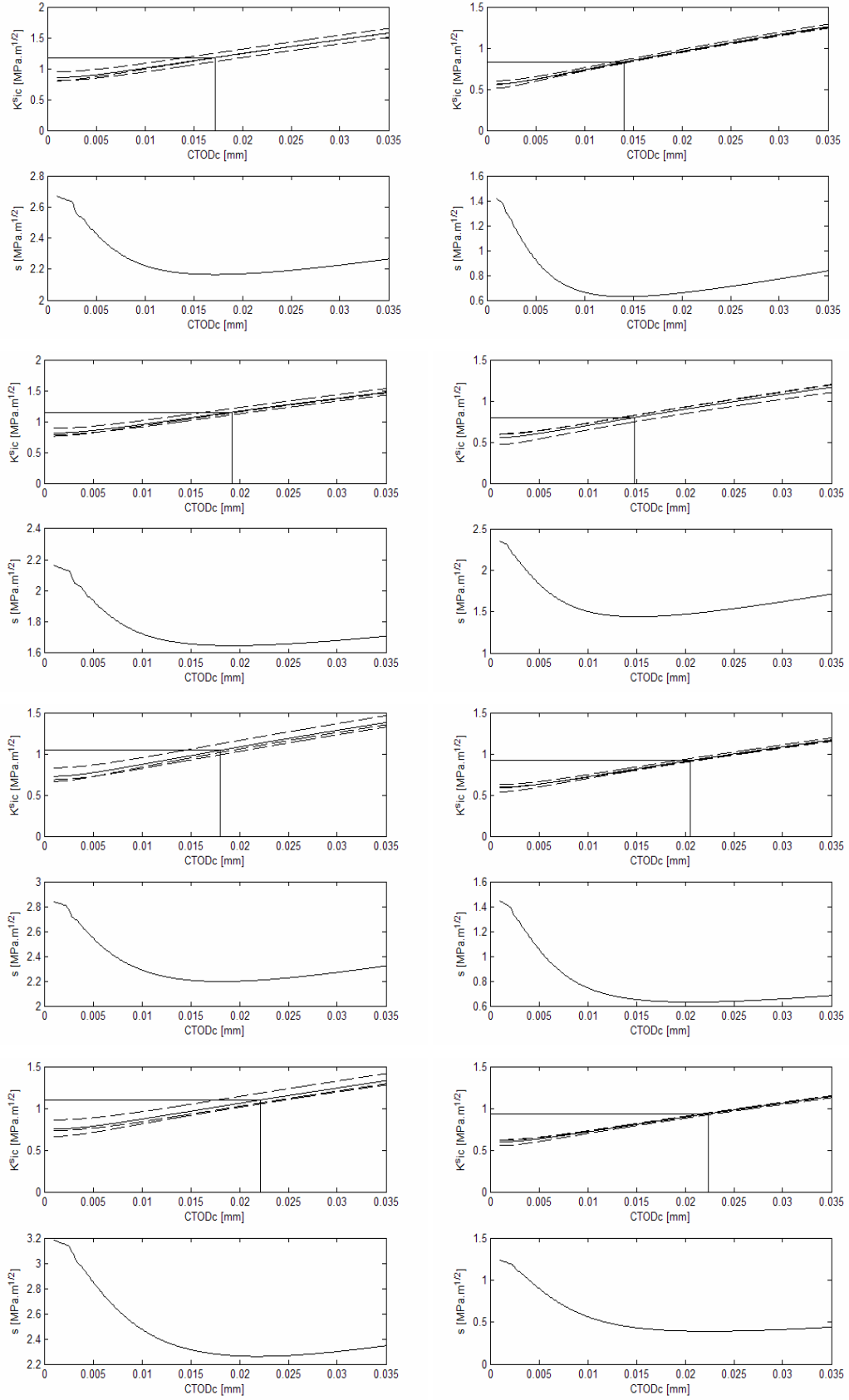
SD16			UK16			MT16			REF16		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
35	0	4.3	25.1	0	4.5	25.6	0	4.4	24.5	0	4.4
36	0	4.3	26.9	0	4.5	23.6	0	4.5	25.9	0	4.4
21.7	16.5	4.3	21.2	15.5	4.6	16.8	18	4.3	17.1	16	4.4
22.8	17	4.3	21.8	18	4.5	17.7	19	4.3	18.6	17	4.4
19.1	31	4.2	19	30	4.5	15.2	32	4.5	13.9	32.5	4.5
21.1	30	4.3	16.5	30.6	4.6	14	30.7	4.3	14.9	33	4.4
13.5	40	4.2	13.9	37.8	4.6	10.5	40.5	4.3	13	39	4.5
17.2	38	4.2	12.9	39	4.5	12.4	41.5	4.4	12.6	40	4.5
SD8			UK8			MT8			REF8		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
20.3	0.0	3.9	19.6	0.0	3.9	23	0.0	3.9	20.1	0.0	3.9
23.8	0.0	3.9	21.8	0.0	3.9	23.7	0.0	3.9	30.5	0.0	3.9
14.1	15.8	4.0	12.6	15.5	3.8	14	15.8	3.9	16.3	16.3	3.9
14.7	16.0	3.9	13.6	16.8	3.8	16.4	15.9	3.9	17	17.5	3.9
12.4	31.4	3.9	12.4	30.0	3.8	16.4	31.0	3.9	12.7	31.0	3.9
10.3	31.5	4.0	11.8	32.4	3.9	12.8	31.2	3.9	13.5	31.2	3.9
11.8	37.6	4.0	10.2	38.8	3.8	10.4	38.0	4.0	12.6	38.0	3.8
9.8	39.0	3.9	11.1	39.0	3.8	12.7	38.9	3.9	12.7	38.5	3.9

Elde edilen deney sonuçları, Pik Yük Metodu ile değerlendirildiğinde Tablo 5.9’deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 5.9 d_{max} ’ı farklı serilerin kırılma parametreleri.

Seriler	f_c (MPa)	K_{Ic}^s (MPa.m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm)	Q (mm)
SD16	45.89	1.180	0.0172	223
UK16	38.65	1.153	0.0192	246
MT16	37.73	1.043	0.0180	258
REF16	29.62	1.100	0.0221	274
SD8	44.21	0.832	0.0141	291
UK8	33.25	0.799	0.0148	261
MT8	29.62	0.920	0.0205	337
REF8	25.95	0.937	0.0224	340

Bu bölümdeki tüm seriler için program grafik çıktıları Şekil 5.18’de sunulmuştur. Grafikler sayısal çözümün görsel elemanlarıdır.



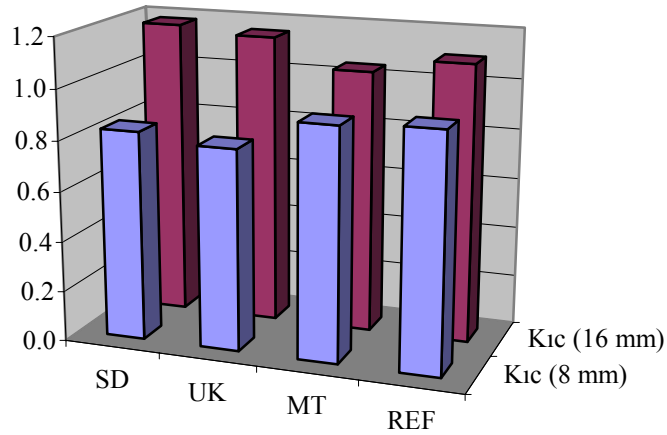
Şekil 5.18 SD16, UK16, MT16, REF16 (sol sütun yukarıdan aşağıya), SD8, UK8, MT8 ve REF8 (sağ sütun yukarıdan aşağıya) serilerinin grafik çözümleri.

Betonun kırılma parametreleri üzerinde en etkili parametre basınç dayanımı olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle betonun kırılma parametrelerini basınç dayanımı yardımıyla belirleyen İfade 5.1 ve 5.2’de yer alan ifadeler mevcuttur. Ancak bu durumun oldukça genel bir yaklaşım olduğu Şekil 5.19 ve 5.20’de görülmektedir [144].

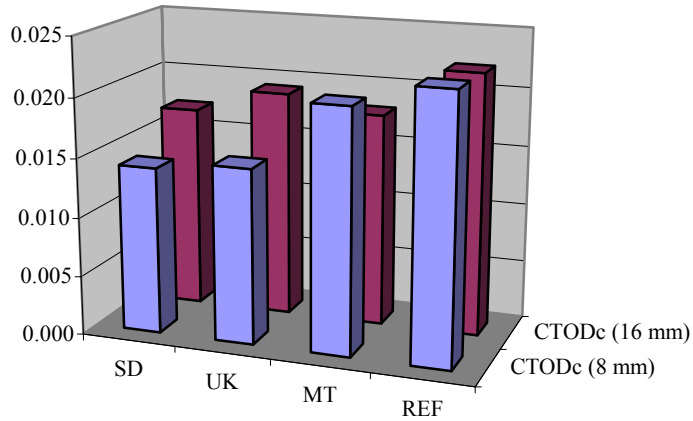
$$K_{Ic}^s = 0.06 f_c^{0.75} \quad (5.1)$$

$$CTOD_c = 0.00602 f_c^{0.13} \quad (5.2)$$

SD nolu seriden REF isimli seriye gittikçe basınç dayanımı azalmıştır. Kırılma parametrelerinin azalması gerekirken betonlar farklı davranışlar göstermişlerdir. Malzeme parametrelerinin etkili olduğunu gösteren bu durum küçük d_{max} değerlerinde kendini daha çok göstermiştir.

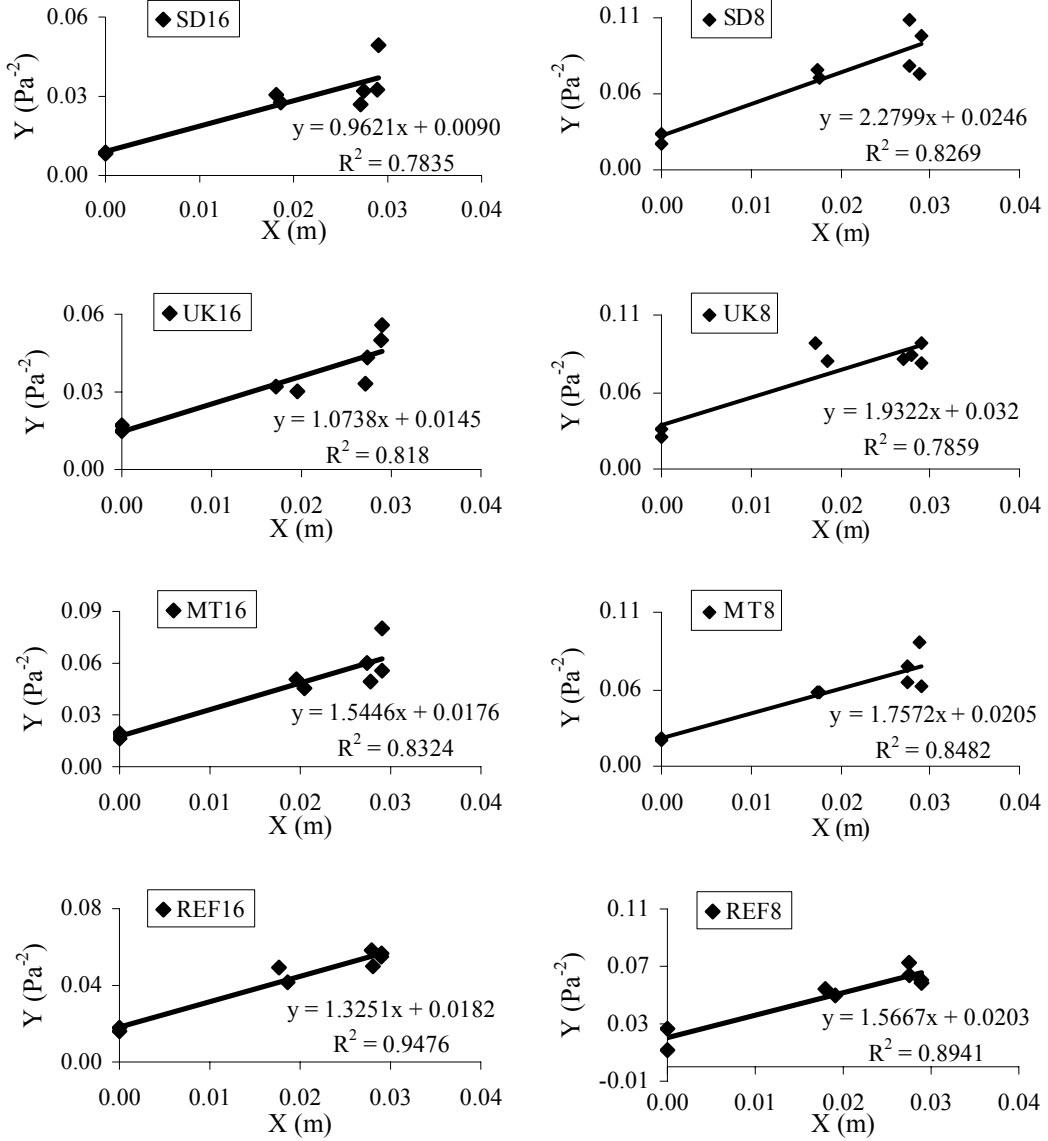


Şekil 5.19 d_{max} ’ı farklı betonların K_{Ic} ’lerinin karşılaştırılması.



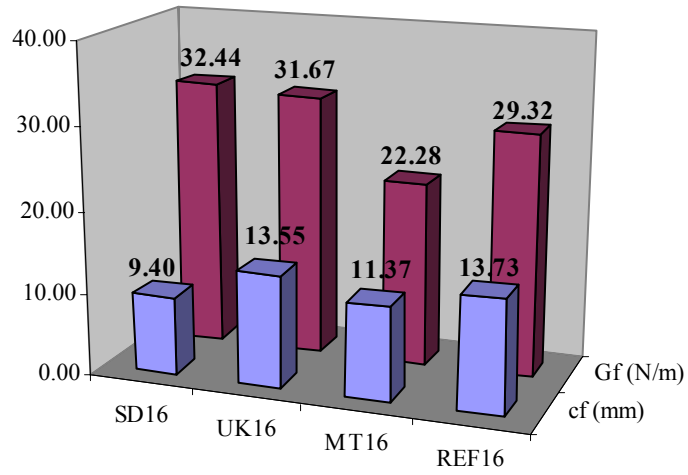
Şekil 5.20 d_{max} ’ı farklı betonların $CTOD_c$ ’lerinin karşılaştırılması.

Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu kullanılarak kırılma parametreleri hesaplanırken, elde edilen doğru grafikleri Şekil 5.21’de görülmektedir.

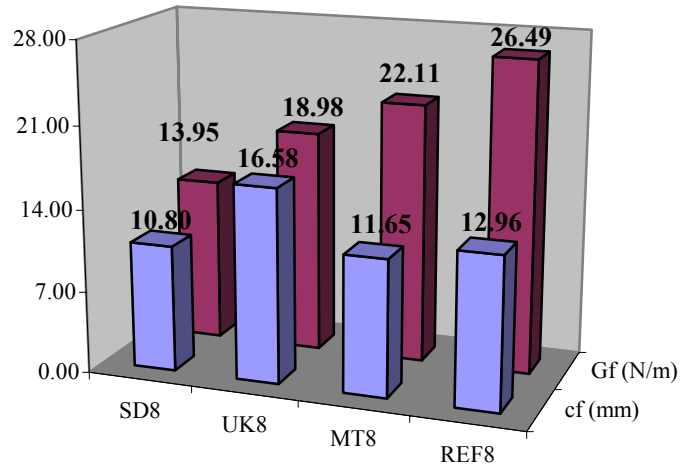


Şekil 5.21 Farklı d_{max} 'a sahip KYB'lerin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri

Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodunda da Pik Yük Metodunda olduğu gibi beton sadece basınç dayanımı esaslarına göre davranmamıştır. Agrega tane çapı değiştiğinde kırılma özelliklerinin de değişmesi dikkat çekicidir. Agrega dane çapı küçüldükçe beton basınç dayanımından daha çok malzeme özellikleri kırılma parametreleri üzerinde etkili olmaktadır. Bu durum Şekil 5.22 ve 5.23’de görülmektedir. KYB de toz malzeme çeşidi kırılma parametreleri üzerinde etkilidir. Çünkü toz malzemelerin dane şekilleri ve beton içerisinde üstlendikleri roller değişmektedir.



Şekil 5.22 $d_{max} = 16$ mm betonların G_f ve c_f kırılma parametreleri.



Şekil 5.23 $d_{max} = 8$ mm betonların G_f ve c_f kırılma parametreleri.

Aynı seri ve karışım olduğu için Boyut Etkisi ve Pik Yük Metodundan elde edilen kırılma parametreleri Tablo 5.10'da karşılaştırılmıştır. K_{Ic}^s değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. $CTOD_c$ değerleri farklılık gösterebilmektedir.

Tablo 5.9 Kırılma parametrelerinin karşılaştırılması.

Seriler	Boyut Etkisi		Pik Yük		Fark (%)	
	K_{If} (MPa.m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm)	K_{Ic}^s (MPa.m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm)	K_{Ic}^s (MPa.m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm)
SD16	1.0430	0.0088	1.1800	0.0172	13	95
UK16	1.0278	0.0093	1.1526	0.0192	12	106
MT16	0.8713	0.0074	1.0426	0.0180	20	143
REF16	0.8668	0.0097	1.0995	0.0221	27	123

5.3. KYB'lerin Zamana Bağlı Çentikli Numune Deneyleri

Betonun yaşı, basınç dayanımı üzerinde direkt etkiye sahip bir özelliktir. Dolayısıyla betonun yaşı ile kırılma parametreleri arasında da önemli bir ilişki olmalıdır. Bu bölümde aynı karışım oranlarına ancak farklı toz malzemelere sahip karışımlar kullanılmıştır. Bu serilerin farklı taze beton özelliklerine ve farklı dayanımlara sahip oldukları görülmüştür. Bu durum Tablo 5.10'da açıkça görülmektedir. Tablodaki ultrases (V_s) ve beton test çekici ölçümleri (R) küp numunelere aittir.

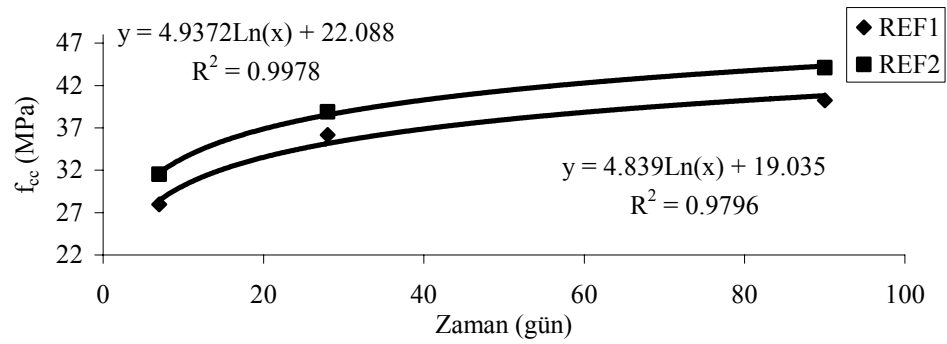
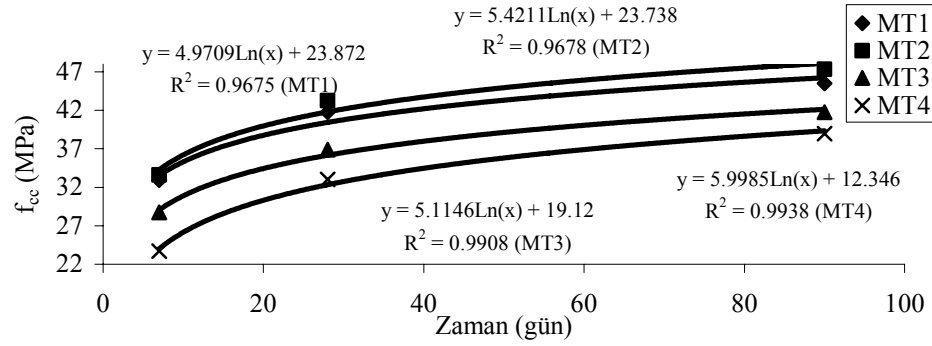
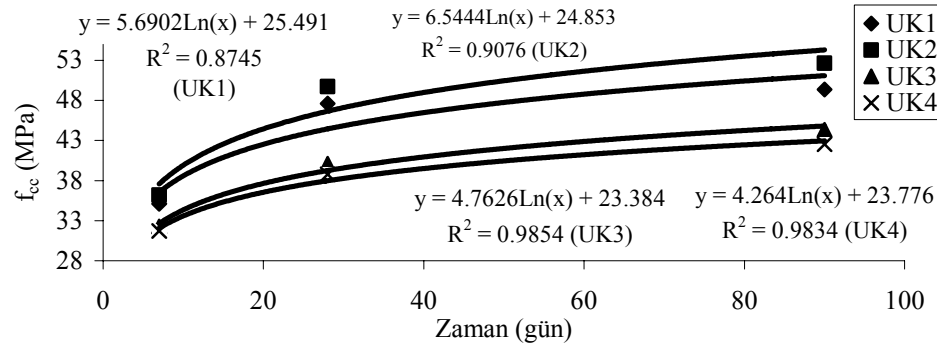
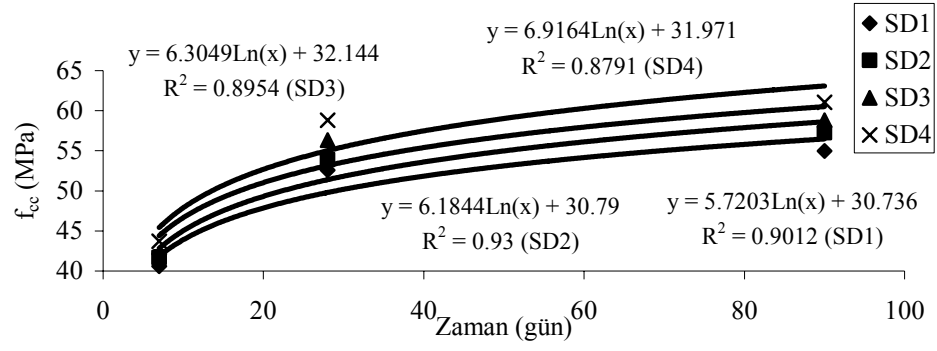
Tablo 5.10 Zaman serileri taze beton ve dayanım özellikleri.

Seri Adı	T_{50} (s)	Yayılma (cm)	SG (%)	h_1/h_2 (%)	T_v (s)	$f_{cc,7}$ (MPa)	R	V_s (km/s)	$f_{cc,28}$ (MPa)	R	V_s (km/s)	$f_{cc,90}$ (MPa)	R	V_s (km/s)
SD1	1.1	66	0	0.88	5.8	40.6	40	4.4	52.6	45	4.5	55.0	46	4.4
SD2	1.0	65	0	0.89	5.3	41.7	41	4.4	53.9	45	4.6	57.3	48	4.5
SD3	0.8	64	0	0.92	4.7	43.0	41	4.4	56.3	45	4.5	58.8	48	4.4
SD4	0.7	60	0	0.94	3.0	43.7	41	4.4	58.8	46	4.4	61.0	48	4.4
UK1	1.2	70	6	0.85	7.0	35.1	37	4.3	47.6	43	4.5	49.4	45	4.2
UK2	1.1	70	4	0.86	6.6	36.2	38	4.3	49.7	43	4.4	52.6	45	4.2
UK3	1.1	69	4	0.89	5.9	32.3	37	4.5	40.1	42	4.4	44.4	44	4.1
UK4	1.1	68	3	0.92	5.6	31.7	36	4.1	38.8	41	4.2	42.5	42	4.1
MT1	0.8	70	5	0.86	7.2	32.9	40	4.5	41.8	42	4.6	45.5	45	4.6
MT2	0.8	69	4	0.86	7.2	33.6	41	4.4	43.3	42	4.6	47.3	45	4.5
MT3	0.8	68	3	0.88	7.0	28.7	39	4.4	36.9	42	4.4	41.7	44	4.5
MT4	0.8	68	3	0.88	7.0	23.7	38	4.5	33.0	41	4.3	39.0	42	4.4
REF1	1.0	60.0	2	0.94	4.1	28.0	40	3.9	36.2	41	4.0	40.3	41	4.1
REF2	-	[15]	-	-	-	31.5	39	4.0	38.9	40	4.0	44.1	41	4.2

Betonun yaşı arttıkça, beton numunelerinde dayanımında artış gözlenmiştir. Şekil 5.24'de bu artış oranları görülmektedir. Toz malzeme çeşidi ve beton içerisindeki kullanım miktarları dayanımı değiştirmiştir.

Kiriş numuneler kırılmadan önce ultrases ölçümleri yapılmış, daha sonra üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Kirişler genellikle tam ortadan kırılmışlardır. Kırılan parçalardan, başlangıçta $\alpha = 0.1$, 0.2 ve 0.25 olarak hazırlanan çentiklerin gerçek boyları hassas olarak kumpasla ölçülmüştür. Elde edilen tüm değerler, EK 1'de yer alan tabloda sunulmuştur.

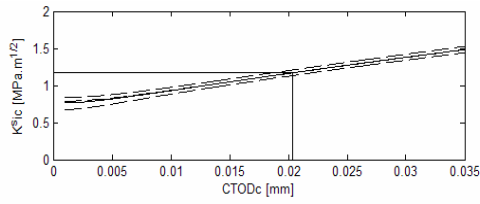
Pik Yük Metodu ile bulunan kırılma parametreleri ve gevreklik indeksi Tablo 5.11'de verilmiştir. Çözümlere ilişkin grafik çıktısı Şekil 5.25'de örnek olarak verilmiştir. Daha ayrıntılı karşılaştırmalar için grafikler EK 2'de yer almaktadır. Kırılma parametreleri grafik şeklinde Şekil 5.26'da sunulmuştur.



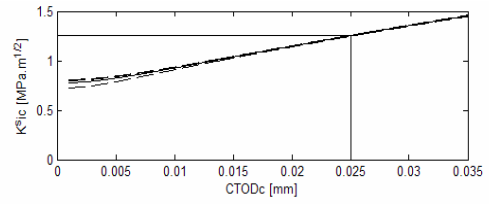
Şekil 5.24 Beton yaşı-dayanım ilişkileri

Tablo 5.11 Zaman serileri kırılma özellikleri.

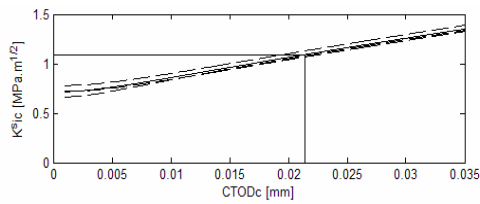
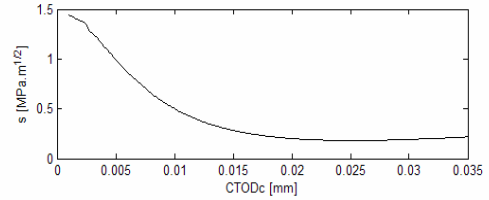
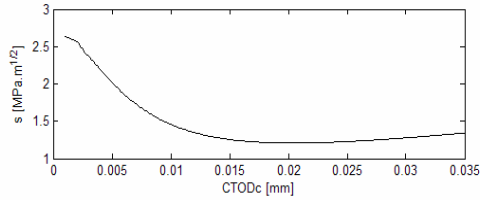
Seri Adı	7 günlük				28 günlük				90 günlük			
	f_c (MPa)	K_{Ic}^s (MPa.m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm)	Q (mm)	f_c (MPa)	K_{Ic}^s (MPa.m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm)	Q (mm)	f_c (MPa)	K_{Ic}^s (MPa.m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm)	Q (mm)
SD1	33.42	1.299	0.0260	307	44.48	1.172	0.0204	309	46.7	1.223	0.0208	310
SD2	34.41	1.291	0.0267	337	45.71	1.101	0.0177	270	48.86	1.243	0.0205	304
SD3	35.58	1.298	0.0261	330	47.98	1.118	0.0191	321	50.29	1.239	0.0202	306
SD4	36.26	1.385	0.0248	266	50.3	1.232	0.0217	357	52.42	1.113	0.0186	335
UK1	28.47	0.993	0.0209	289	39.88	1.253	0.0250	363	41.49	1.315	0.0254	354
UK2	29.43	0.990	0.0203	283	41.83	1.136	0.0191	271	44.52	1.303	0.0226	307
UK3	25.92	1.087	0.0259	337	32.98	1.088	0.0210	281	36.86	1.350	0.0271	340
UK4	25.42	1.032	0.0241	317	31.79	1.135	0.0224	284	35.18	1.359	0.0277	335
MT1	26.51	1.119	0.0274	364	34.5	1.164	0.0241	339	37.92	1.176	0.0225	318
MT2	27.13	1.052	0.0233	305	35.86	1.089	0.0232	373	39.61	1.207	0.0231	333
MT3	22.8	0.941	0.0244	351	30.07	1.088	0.0253	372	34.47	1.141	0.0219	291
MT4	18.4	0.883	0.0258	360	26.6	1.091	0.0202	269	31.94	1.075	0.0214	290
REF1	22.13	1.050	0.0227	237	29.44	1.154	0.0259	339	33.11	1.285	0.0262	315
REF2	25.28	1.097	0.0194	224	31.87	1.334	0.0259	316	36.65	1.334	0.0259	316



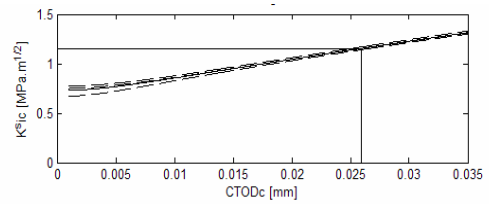
SD1



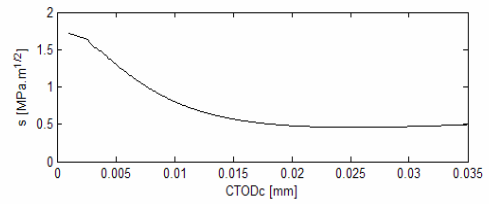
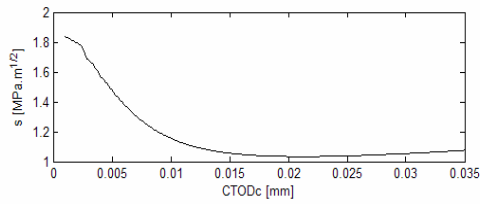
UK1



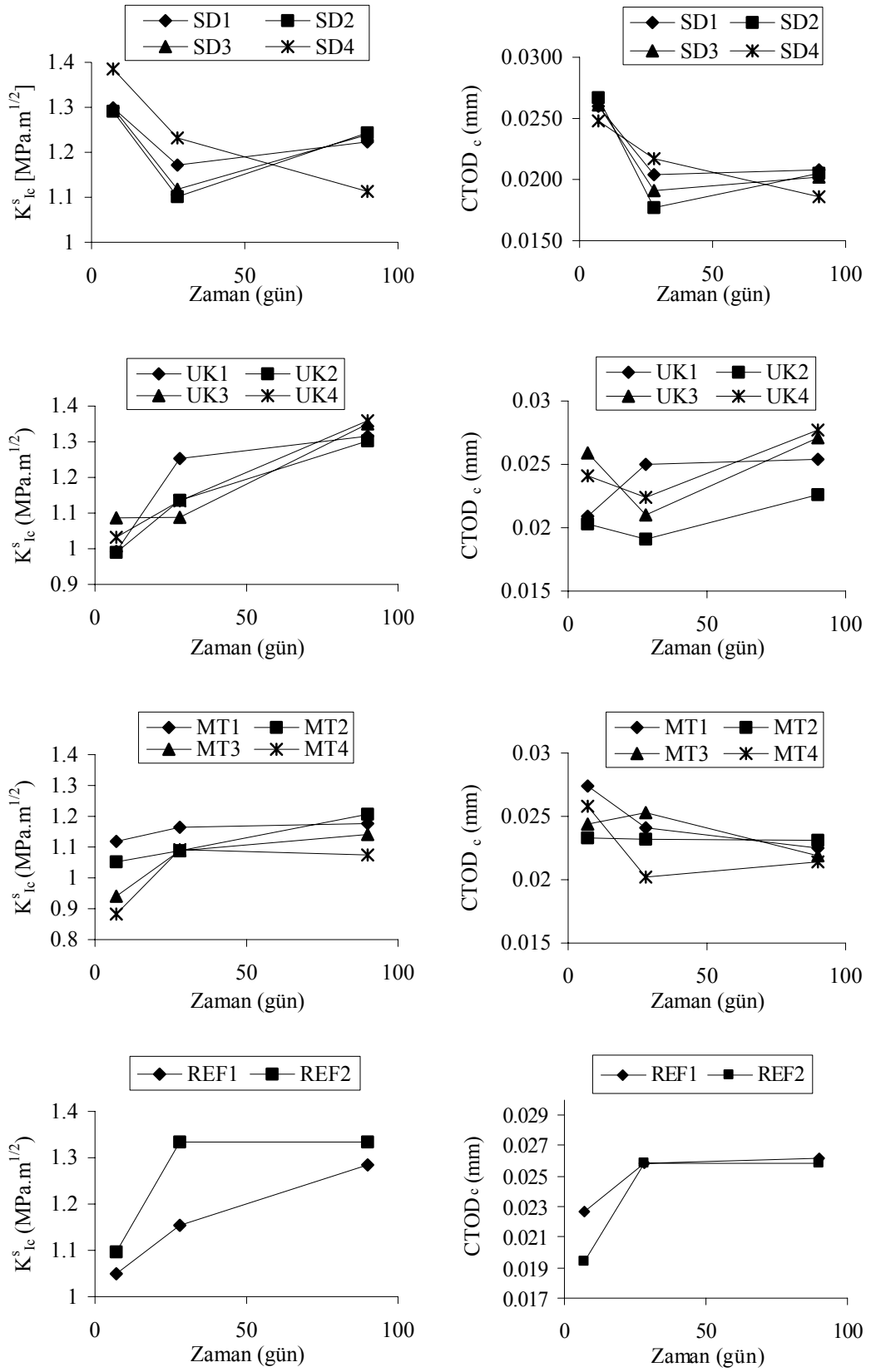
MT1



REF1



Şekil 5.25 SD1(28), UK1(28), MT1(28) ve REF1(28) serilerinin (İPM) grafik çözümleri.



Şekil 5.26 Zaman serilerinin İPM kırılma parametreleri

Betonun kırılma parametreleri sadece dayanımla ilişkilendirilirse, beton sertleştikten sonra dayanım kazandığı her gün kırılma parametrelerinin de artması beklenir. Ancak özellikle silis dumanı ile üretilen SD kodlu KYB serilerine dikkat edilirse, 7. günden 28. güne dayanım artarken kırılma parametreleri azalmıştır. Bu sonuç, toz çeşidinin betonun kırılma parametreleri üzerine olan önemli etkisini ortaya koymaktadır.

Kırılma parametrelerindeki zamana göre artış ve azalışlar toz miktarına göre de değişiklik göstermektedir. Bu durum kırılma parametreleri konusunda toz çeşidi kadar oranının da önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

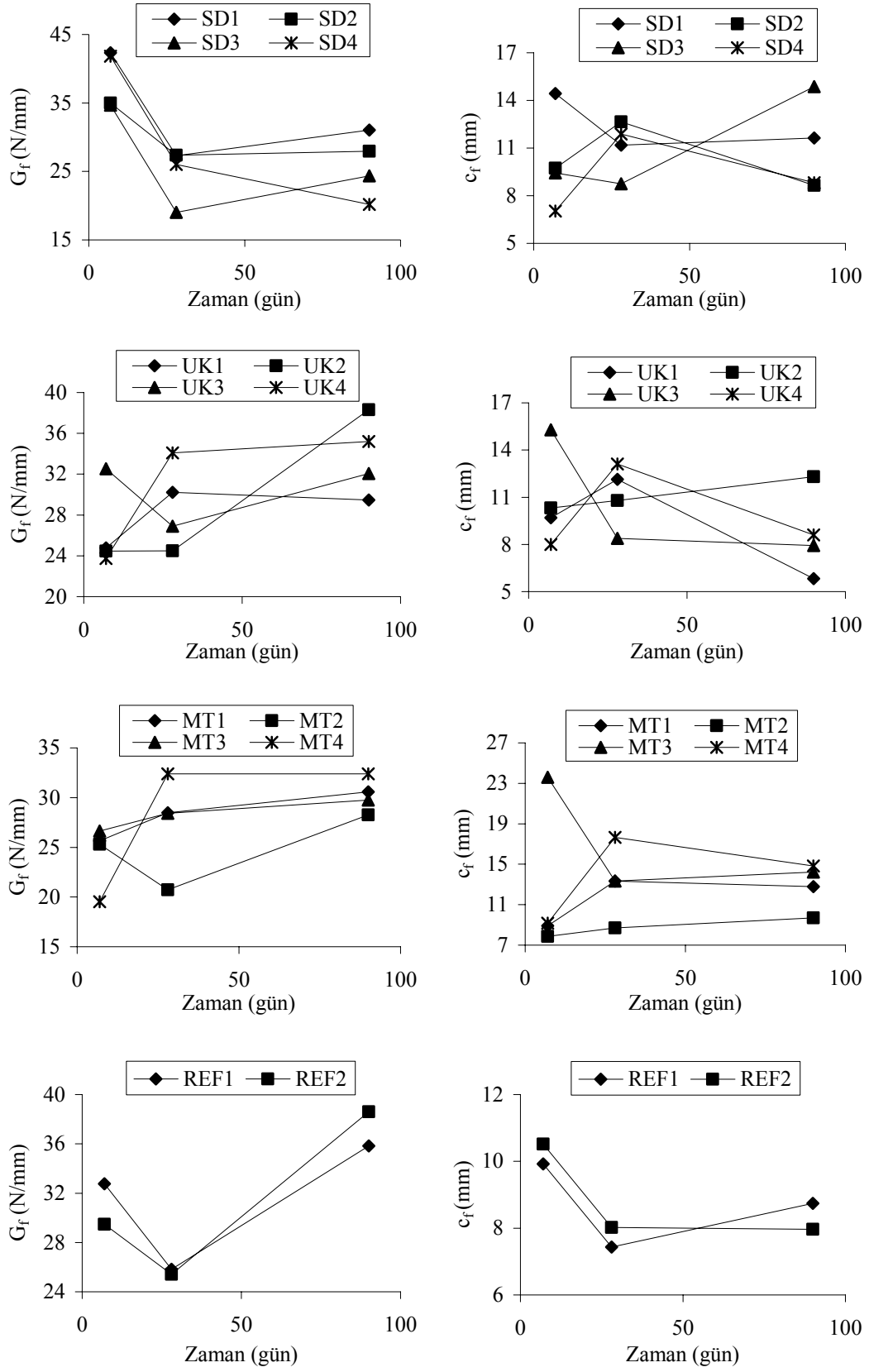
7, 28 ve 90 günlük tüm numuneler, dayanım-kırılma parametreleri açısından karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlar ortaya çıkmamaktadır. Çünkü kırılma mekaniği açısından, toz çeşidi ve miktarı dayanım kadar etkin bir parametre olduğu görülmektedir.

Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu kullanılarak kırılma parametreleri hesaplanırken, elde edilen doğru grafikleri EK 3’de verilmiştir. Kırılma parametreleri Tablo 5.12’de, bunların karşılaştırmaları ise Şekil 5.27’de yer almaktadır.

Tablo 5.12 Zaman serilerinin G_f ve c_f kırılma parametreleri.

Seri Adı	7 günlük		28 günlük		90 günlük	
	G_f (N/m)	c_f (mm)	G_f (N/m)	c_f (mm)	G_f (N/m)	c_f (mm)
SD1	42.3	14.44	27.3	11.18	31.0	11.64
SD2	35.0	9.73	27.4	12.65	27.9	8.66
SD3	34.7	9.44	19.0	8.76	24.4	14.87
SD4	41.8	7.03	26.0	11.89	20.2	8.82
UK1	24.8	9.70	30.2	12.14	29.5	5.82
UK2	24.5	10.32	24.5	10.78	38.3	12.30
UK3	32.5	15.28	26.9	8.38	32.1	7.93
UK4	23.7	8.00	34.1	13.11	35.2	8.61
MT1	25.7	8.92	28.5	13.34	30.6	12.79
MT2	25.3	7.85	20.7	8.71	28.3	9.71
MT3	26.6	23.60	28.4	13.32	29.8	14.22
MT4	19.5	9.17	32.4	17.66	32.4	14.83
REF1	32.8	9.92	25.8	7.43	35.8	8.74
REF2	29.5	10.52	25.4	8.02	38.6	7.97

Bu yöntemde de basınç dayanımı ve toz malzeme çeşidi kırılma parametreleri üzerine etkili olmuştur. Özellikle c_f sonuçları oldukça değişkendir. Bu durum c_f ’nin betonun içyapısına bağlı olduğunun göstergesidir. Bu durumda betonun sadece basınç dayanımı ile modellenemeyeceğinin açık ispatıdır.



Şekil 5.27 Zaman serilerinin G_f ve c_f kırılma parametreleri.

5.4. Gözlemler

Bu tez çalışmasında, silis dumanı, uçucu kül ve mermer tozu olmak üzere üç tip toz malzeme kullanılmıştır. Şekil 5.28’da görülen bu malzemelerin kullanıldığı taze beton özelliklerinin karakteristikleri oldukça farklıdır. Silis dumanı yayılma hareketini çok çabuk tamamlamakta, akma süresi oldukça düşmektedir. Ancak bunun yanında ayrışma direnci en yüksek karışımlar silis dumanı ile elde edilmiştir. Uçucu kül ve mermer tozunun yayılma özelliği birbirine yakındır fakat toz miktarı belirli değerlerin üzerine çıktığında mermer tozlu karışımların su ihtiyacı artmaktadır. Mermer tozlu karışımların ayrışma direnci uçucu küllü karışımlara oranla daha iyidir. Bu durum malzemelerin tane yapılarından kaynaklanmaktadır. KYB için hedeflenen basınç dayanım değerleri bu malzemelerle sağlanabilir.



Şekil 5.28 Toz malzemeler.

Betonun kırılma mekaniği çalışmaları, beton basınç dayanımına endeksli gelişmiştir. Ancak çalışmalar, betonun kırılma parametrelerini sadece beton basınç dayanımına dayandırmakla sadece genel sonuçlara ulaşılabileceğini göstermektedir. Özellikle bazı kırılma parametrelerinin betonun içyapısına bağlı olabileceği ifade edilmektedir [145]. Başka bir çalışmada, betonun kırılma parametreleri W/C tabanlı olarak ifade edilmiştir [4]. Görülmektedir ki, W/C oranı da basınç dayanımı kadar kırılma parametreleri üzerinde etkilidir.

Betonun kırılma özellikleri betonu etkileyen tüm parametreler dikkate alınarak incelenmelidir. Çünkü kür çeşidi, kür süresi, çimento tipi ve beton nemi gibi göz ardı edilen

birçok parametre betonun kırılma özelliklerini etkilemektedir [146-148]. Bu nedenle betonun kırılma özelliklerinin belirlenmesi için kontrollü deneyler gerekmektedir.

Deneyler yapılırken malzeme özelliklerinin kırılma parametreleri üzerinde etkili oldu açıkça görülmektedir [149]. Özellikle üç noktalı eğilme deneyinde Şekil 5.29'da görüldüğü gibi kırılma yörüngesini agrega özellikleri tayin etmektedir.



Şekil 5.29 Üç noktalı eğilme deneyi.

Kırılmalar genellikle çentikten itibaren düz bir şekilde oluşmakta ve numuneler hemen hemen iki eşit parçaya bölünmektedir. Ancak genellikle çentiksiz numunelerde olmak üzere bölünmeler eşit olmayan parçalar şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 5.30).



Şekil 5.30 Üç noktalı eğilme deneyinden sonra genel görünüş.

Kırılma yüzeylerine dikkat edildiğinde bazı agregalar kırılırken bazıları kırılmamış ve çatlak agreganın etrafından ilerlemiştir. Bu durum çatlağın aldığı yolu dolayısıyla kırılma enerjisini etkilemektedir. Şekil 5.31’de görülen bu durum agreganın dayanımı ile ilgilidir. Bu tez çalışmasında kullanılan agreganın dayanımı yüksek olduğundan, agregalar genellikle kırılmamış ve çatlak etraflarından dolaşmıştır. Numunelerde çatlağın önceden yerleştirildiği de görülmektedir.



Şekil 5.31 Numune kesitleri.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, günümüzde en çok kullanılan özel beton türü olan kendiliğinden yerleşen beton kullanılmıştır. Her geçen gün mevcut özellikleri araştırılan ve geliştirilen bu beton türü, kırılma mekaniği açısından henüz önemli ölçüde incelenmemiştir. KYB'nin kırılma özelliklerinin araştırılması için bu tez çalışmasında 1300'ü aşkın 150x150x150 mm standart küp numune, 122 adet 150x150x450 mm çentiksiz kiriş ve 366 adet 150x150x450 mm çentikli kiriş numune üretilmiştir. Ayrıca Boyut Etkisinin incelenmesi için farklı boyutlarda toplam 12 adet kiriş numune üretilmiştir. Elde edilen numunelerin hazırlıkları sırasında ve numunelere uygulanan deneylerin lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesinden sonra kazanılan bilgilerin değerlendirilmesi ve sonuçları maddeler halinde ifade edilmiştir:

- KYB özellikle taze beton özellikleri açısından karışım oranlarına oldukça hassastır. Özellikle W/C oranı dikkatle tayin edilmeli, betondaki ayrışmalara izin verilmemelidir. Deneme karışımları mümkün olduğu kadar büyük miktarlarda yapılmalıdır. Küçük miktardaki deneme karışımlarında KYB gerçek özellikleri tespit edilemeyebilir ve uygulamada istenmeyen sonuçlarla karşılaşılabilir. Bu nedenle, en az taze beton deneylerinin tamamını, ayrı ayrı yapabilecek kadar beton üretilmesi tavsiye edilir.
- KYB'nin geleneksel betondan farklı temel iki malzemesi toz ve 3. nesil süper akışkanlaştırıcı katkıdır. Tozun fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak çeşidi değişikçe, taze ve sertleşmiş beton üzerine etkisi değişmektedir. Aynı şekilde teknolojik ilerlemeyle birlikte gelişen kimyasal katkı teknolojisi farklı katkıların üretilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle toz ve katkı çeşidi ve miktarı değişikçe deneme karışımları yardımıyla KYB'nin yeni özellikleri tespit edilmelidir.
- Türkiye mermer rezervi ve üretimi konusunda dünyada önemli bir yere sahiptir. Üretim beraberinde atık malzemede getirmektedir. Türkiye de yaklaşık 33 İlde, 200'ü aşkın firma ile ocaklardan elde edilen mermer işlenmektedir. Bu işlemin sonucunda yılda yaklaşık 1.000.000 ton mermer tozu oluşmaktadır. Bu miktar, Türkiye'de oluşan uçucu külün yaklaşık 1/10'u kadardır. Mermer tozu şu anda bile çevre için potansiyel bir tehlikedir. Depolanamayacak kadar çok olan bu atığın KYB üretiminde kullanılabileceği görülmüştür. KYB'de kullanılan mermer tozu ile olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan değerler dikkate alınarak, istenilen özellikte mermer tozlu KYB'ler elde edilebilir. Bu şekilde atık bir malzeme kullanılması çevre açısından çok önemli bir gelişmedir. Henüz çevreye vereceği zararlar bile tam olarak

bilinmeyen bu tozun, beton gibi çok kullanılan bir malzemede kullanılması büyük bir avantaj teşkil etmektedir. Ayrıca atık malzeme kullanıldığı için beton maliyeti azalacak ve ülke ekonomisine olumlu katkıda bulunulacaktır. Mermer tozu ile çevreye duyarlı ve ekonomik bir KYB elde etmek mümkün olduğu belirlenmiştir.

- Mermer tozu KYB’de ilk defa kullanıldığı için farklı mermer tozlarıyla aynı karışım oranlarına sahip numuneler üretilmiştir. Bunun sonucunda toz çeşidinin basınç dayanımı ve dolayısıyla kırılma parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle karışık mermer tozu ile KYB üretiminde ön dizayn çalışmaları için bir sakınca olmadığı ifade edilebilir. Beton içerisindeki mermer tozu miktarı basınç dayanımını dolayısıyla kırılma parametrelerini etkilemektedir. Mermer tozunun az kullanılması özelliğini gösterememesine, çok kullanılması ise basınç dayanımını önemli miktarda azaltmasına sebep olmaktadır. Bu malzeme boşluk doldurma kabiliyetinden dolayı optimum değerde kullanılmalıdır.
- KYB’de toz çeşidi oldukça önemlidir. Puzolanik aktivitesi olan malzemeler betonun daha yüksek dayanımlara ulaşmasını sağlamakta ve kırılma parametrelerini değiştirmektedirler. Boyut Etkisi ve Pik Yük Metodu ile bulunan kırılma parametreleri toz çeşidine göre farklılık göstermişlerdir. Mermer tozlu KYB’lerin her iki yöntemde de daha sünek davrandığı gözlemlenmiştir. Betonun kırılma parametreleri sadece basınç dayanımı değeri kullanılarak tespit edilmeye çalışılırsa beklenmeyen sonuçlarla karşılaşılabilir. Bu nedenle KYB’de, kullanılan toz malzeme çeşidine göre betonlar sınıflandırıldıktan sonra kırılma parametreleri-basınç dayanımı ilişkisinden söz edilebilir.
- Agrega karakteristikleri de betonun kırılma parametreleri üzerinde büyük etkiye sahiptir. Agrega çapı küçüldükçe betonun kırılma parametreleri azalmakta ve gevreklik indeksi artmaktadır. Deneysel çalışmalardan sağlıklı sonuçlar elde edilmesi için agrega granülometrisinin tüm numunelerde yaklaşık aynı olması gerekmektedir.
- Betonun kırılma mekaniğinde en önemli etkenlerden biride betonun yaşıdır. Beton dayanımı gün geçtikçe artmaktadır. Genel prensip dayanım arttıkça betonun kırılma parametrelerinin artacağı yönündedir. Ancak KYB de malzeme özellikleri bu prensibi doğrulamamaktadır. Silis dumanı kullanılan karışımlarda 7. günden 28. güne kırılma parametreleri azalırken, 28. günden 90. güne artmaktadır. Ancak uçucu kül ve mermer tozu kullanılan karışımlarda sürekli bir artış gözlenmiştir. Sonuçlardan kritik gerilme şiddet faktörünün, kritik çatlak ucu açılım deplasmanına göre daha düzenli hareket ettiği görülmektedir. bu durum çatlak ucu açılım deplasmanının betonun iç yapısı ile daha

ilgili olduğunu düşündürmektedir. KYB’de sadece toz çeşidi değil, kullanılan toz miktarının da kırılma parametrelerini açıkça etkilediği görülmektedir.

- KYB’de toz malzeme kullanımı iki şekilde olabilir. Çimento miktarı sabit tutularak toz miktarı değiştirilir veya toz malzeme belirli oranlarda çimento ile ikame edilir. Her iki durumda elde edilen betonların dayanım değerleri denk olsa da kırılma parametreleri farklılık göstermektedir.
- Genel olarak deney sonuçlarına bakıldığında, basınç dayanımı-kırılma parametreleri ilişkisinin doğru kurulabilmesi için betonların karışım oranları dikkate alınarak sınıflandırılması gerekmektedir.
- Betonun kırılma parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi için numunelerin döküm, bakım ve deney uygulama şartlarının mümkün olduğu kadar aynı olması gerekmektedir. Bu tez çalışmasının tamamı aynı laboratuarda ve yaklaşık aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Beton heterojen bir yapı malzemesidir. Betonun özelliklerini etkileyen üretim, yerleştirme, bakım ve karışım oranları gibi birçok parametre vardır. Bu parametrelerin tamamını sabit tutmak adeta imkânsızdır. Ancak betonun kırılma özelliklerinin belirlenmesi için betonu etkileyen özelliklerin yaklaşık %80-90’ı gibi bir miktarın kontrol altında tutulması gerekir. Bu durum betonun kırılma parametrelerinin sadece basınç dayanımı ile ifade edilemeyeceğini, basınç dayanımı kadar etkin olan diğer parametrelerin dikkate alınması gerektiğini doğrulamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Neville, A. M., 1995, Properties of concrete, fourth ed., London, Longman.
2. EFNARC 2005, The European Guidelines for Self-compacting Concrete: Specification, Production and Use, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
3. Tang, T., Ouyang, C., and Shah, S. P., A Simple Method for Determining Material Fracture Parameters from Peak Loads, ACI Materials Journal, 93 (2), 147-157, 1996.
4. İnce, R., and Alyamaç, K. E., 2008, "Determination of fracture parameters of concrete based on water-cement ratio", Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 15, pp. 14-22.
5. RILEM Recommendation, "Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete," Materials & Structures, Vol. 23, 1991, pp. 461-465.
6. Tang, T., Bazant, Z. P., Yang, S., and Zollinger, D., 1996, Variable-notch one-size test method for fracture energy and process zone length, Engineering Fracture Mechanics, 55, pp. 383-404.
7. Tang, T., Yang, S., and Zollinger, D., 1999, Determination of fracture energy and process zone length using variable-notch one-size specimens, ACI Materials Journal, 96, pp. 3-10.
8. Okamura, H., and Ouchi M., 1999, Self-compacting Concrete. Development, Present Use and Future, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edt: A. Skarendahl and Ö. Petersson, pp. 3-14.
9. Ambroise, J., Rols, S., and Pera, J., 1999, Self-levelling concrete – Design and Properties, Concrete Science and Engineering, 1, 140-147.
10. Khayat, K. H., Ghezal, A., and Hadriche, M. S., 1999, Factorial Design Models for Proportioning Self-consolidating Concrete, Materials and Structures, 32, pp. 679-686.
11. Yu, Z., Pan, Z., Liu, X., and Liu Z., 2005, Optimal Mixture Design of High Performance Self-compacting Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 181-190.
12. www.rilem.org, The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM, from the name in French).

13. Brite EuRam BE96-3801 Project, Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete, Marianne Grauers (Co-ordinator), from 01.01.1997 to 30.06.2000.
14. EFNARC 2002, Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
15. EFNARC 2003, Especificaciones y directries para el HAC, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
16. www.efnarc.org, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
17. Felekoğlu, B., 2003, Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 246s.
18. Bartos P. J. M., 2005, Testing-SCC: Towards new European Standards for Fresh SCC, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 25-44.
19. Collepardi, M., and Valente, M., 2005, Recent Developments Self-compacting Concretes in Europe, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 217-227
20. Wu, S., 2005, Application of Self-compacting Concrete in Frame-shear wall structure and road construction, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 705-712.
21. Billberg, P., 2005, Mechanisms behind reduced form pressure when casting with SCC, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 589-598.
22. Lu, L., 2005, Construction Technology of Self-compacting Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 617-625.
23. TS EN 206-1, 2002, Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
24. Domone, P. L., 2007, A Review of The Hardened Mechanical Properties of Self-compacting Concrete, Cement and Concrete Composites, 29, pp. 1-12.

25. Poppe, a. M., and Schutter, G. D., 2005, Creep and Shrinkage of Self-compacting Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 329-336.
26. Ferraris, C., 2005, Concrete Rheology: What Is It and Why Do We Need It?, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 229-236.
27. Schwartzentruber, L. D., and Roy, R. L., and Cordin, J., 2006, Rheological Behaviour of Fresh Cement Pastes Formulated From a Self-compacting Concrete (SCC), Cement and Concrete Research, 36, pp. 1203-1213.
28. Vikan, H., and Justnes, H., 2007, Rheology of Cementitious Paste with Silica Fume or Limestone, Cement and Concrete Research, 37, pp. 1512-1517.
29. Bui, V. K., Akaya, Y., and Shah, S. P., 2002, Rheological Model for Self-consolidating Concrete, ACI Materials Journal, 99, pp. 549-559.
30. Brouwers, H. J. H., and Radix, H. J., 2005, Self-compacting Concrete: Theoretical and Experimental Study, Cement and Concrete Research, 35, pp. 2116-2136.
31. Okamura, H., and Ouchi, M., 2003, Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 1, pp. 5-15.
32. Yamamoto, M., Sakue, J., Wattanalamerd, C., and Ouchi, M., 2005, Influence of viscosity agents on Fresh Properties of Self-Compacting Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 137-144.
33. Stark, J., and Friebert, M., 2005, Some Aspects of Cement Chemistry Regarding Self-Compacting Concrete (SCC), First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 237-244.
34. Sağlam, A. R., Parlak, N., Doğan, Ü. A., and Özkul, M. H., 2004, Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu, Beton 2004 Kongresi Bildirileri (10-12 Haziran 2004), Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 213-224.
35. Yazıcıoğlu, S., Çalışkan, S., ve Türk, Kazım., 2006, Effect of Curing Conditions on The Engineering Properties of Self-Compacting Concrete, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 13, pp. 25-29.
36. Wattanalamerd, C., and Ouchi, M., 2005, Flowability of Fresh Mortar in Self-Compacting Concrete Using Fly Ash, First International Symposium on Design,

- Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 261-270.
37. Khatib, J. M., 2007, Performance of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash, Construction and Building Materials, In Press.
 38. Li, Y., Zhou, S., Yin, J., and Zhou, W., 2005, Experimental Study on Bond Strength of Rebar in High Performance Concrete Containing Ultra Fine Fly Ash, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 449-456.
 39. Ho, D. W. S., Sheinn, A. M. M., Ng, C. C., Tam, C. T., 2002, The Use of Quarry Dust For SCC Applications, Cement and Concrete Research, 32, pp. 505-501.
 40. Zhu, W., and Gibbs, J. C., 2005, Use of Different Limestone and Chalk Powders in Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 35, pp. 1457-1462.
 41. Ye, G., Liu, X., Schutter, G. D., Poppe, A. M., and Taerwe, L., 2007, Influence of Limestone Powder Used as a Filler in SCC on Hydration and Microstructure of Cement Pastes, Cement and Concrete Composites, 29, pp. 94-102.
 42. Meng, Y., Sui, K., Sun, Q., and Lu, Y., 2005, Effect on Properties And Of Concrete With Mix Materials of Gangue, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 565-578.
 43. Yoo, J. H., Choi, J. J., and Choi D. S. 2005, Self Compacting Concrete Incorporating Atomized Steel Slag Aggregate, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 253-260.
 44. Xie, Y., Li, Y., and Long, G., 2005, Influence of Aggregate on Properties of Self-Consolidating Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 161-171.
 45. Assaad, J., and Khayat, K. H., 2005, Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, 102, pp. 145-153.
 46. Aksoy, F., 2002, Effect of Aggregate Grading and Coarse Aggregate Type on the Properties of Self-Compacting Concrete, Master Thesis, Boğaziçi University Science and Engineering Institute, 98s.
 47. Brouwers, H. J. H., and Radix, H. J., 2005, Self-Compacting Concrete: The Role of The Particle size Distribution, First International Symposium on Design, Performance and Use

- of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 109-118.
48. Bosiljkov, V. B., 2005, SCC Mixes with Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler, *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 1279-1286.
 49. Tu, T. Y., Jann, Y. Y., and Hwang, C. L., 2005, The Application of Recycled Aggregates in SCC, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005)*, Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 145-152.
 50. Yazıcı, Ş., 2003, Süper Akışkanlaştırıcıların Betondaki Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5, pp. 1-10.
 51. Akman, S., 1999, Yüksek Performanslı Betonların Taze Haldeki Özellikleri Üzerine Katkı Maddelerinin Etkisi, *Role of Admixtures on High Performance Concrete*, J. G. Cabrera and R. Rivera-Villarreal (The editors), Mexico, (Çeviri).
 52. Özkul, M. H., Işık, İ. E., Sağlam, A. R., and Parlak, N., 2005, Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Viskozite Düzenleyici Katkı Kullanımı, *6. Ulusal Beton Kongresi Bildirileri (16-18 Kasım 2005)*, İMO İstanbul Şubesi, 421-435.
 53. Şahmaran, M., Christiano, H. A., Yaman, İ. Ö., 2006, The Effect of Chemical Admixtures and Mineral Additives on the Properties of Self-Compacting Mortars, *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 432-440.
 54. Miao, C., Tian, Q., and Liu, J., 2005, High Performance Admixtures For Self-Compacting Concrete: Mechanism and Application in China Building, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005)*, Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 75-85.
 55. Felekoğlu, B., and Sarıkahya, H., 2007, Effect of Chemical Structure of Polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of Self-Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, In pres.
 56. Jiang, Z., Sun, Z., and Wang, P., 2005, Effects of Polymers on Properties of Underwater Anti-Washout Self-Compacting Concrete, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005)*, Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 153-160.
 57. Yahia, Y., Tanimura, M., and Khayat, K. H., 2005, Experiment Design to Evaluate the Effect of Mixture Parameters on Rheological Properties of Self-Consolidating Concrete Equivalent Mortar, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005)*, Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 271-281.

58. Karagüler, M., ve Sungur, S., 2007, Kendiliğinden Yerleşen Mimari Betonlarda Pigment Katkısının Etkileri, 7. Ulusal Beton Kongresi Bildirileri (28-30 Kasım 2007), İMO İstanbul Şubesi, 55-64.
59. Topçu, İ. B., ve Canbaz, M., 2007, Effect of Different Fibers on The Mechanical Properties of Concrete Containing Fly Ash, Construction and Building Materials, 21, pp. 1486-1491.
60. TS EN 1008, 2003, Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
61. Skarendahl, A., 2005, Changing Concrete Construction Through Use of Self-Compacting Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 17-24.
62. Ernst, F. M. L., 2000, Onderzoek Zelfverdichtend Beton, Msc Thesis TUE/CCO/00-09, Eindhoven University of Technology, Faculteit Bouwkunde, Capaciteitsgroep Constructief Ontwerpen, Eindhoven, The Netherlands, (in Dutch).
63. Sonebi, M., 2004, Medium Strength Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash: Modelling Using Factorial Experimental Plans, Cement and Concrete Research, 34, pp.1199-1208.
64. Xie, Y., Liu, B., Yin, J., and Zhou, S., 2002, Optimum Mix Parameters of High-Strength Self-Compacting Concrete With Ultrapulverized Fly Ash, Cement and Concrete Research, 32, pp.477-480.
65. Özbay, E., Gesoğlu, M., and Güneyisi, E., 2007, Empirical Modeling of Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concretes by Genetic Programming, Construction and Building Materials, In Press.
66. Grünewald, S., 2004, Performance-Based Design of Self-Compacting Fibre Reinforcement Concrete, Delft University Pres, 233.
67. Shi, C., and Yang, X., 2005, Design and Application of Self-Consolidating Lightweight Concretes, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 55-64.
68. Huang, P., 2005, Performance Evaluation Method of Self-Consolidating Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 429-438.

69. Bui, V. K., Montgomery, D., Hinczak, I., and Turner, K., 2002, Rapid Testing Method For Segregation Resistance of Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, pp.1489-1496.
70. Persson B., 2001, A Comparison between Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete and The Corresponding Properties of Normal Concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, pp.193-198.
71. Türkmen, İ., and Kantarcı, A., 2007, Effects of Expanded Perlite Aggregate and Different Curing Conditions on the Physical and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, *Building and Environment*, 42, pp.2378-2383.
72. Felekoğlu, B., Türkel, S., and Baradan, B., 2007, Effect of Water/Cement Ratio on The Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete, *Building and Environment*, 42, pp.1795-1802.
73. Reinhardt, H. W., and Stagmaier, M., 2006, Influence of Heat Curing on The Pore Structure and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, 36, pp.879-885.
74. Assie, S., Escadeillas, G., and Waller, V., 2007, Estimates of Self-Compacting Concrete Potential Durability, *Construction and Building Materials*, 21, 1909-1917.
75. Yu, Z., and Liu, X., 2005, Time-Dependent Analysis of Self-Compacting Concrete Beams, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005)*, Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 375-381.
76. Lu, L. 2005, Construction Technology of Self-Compacting Concrete, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005)*, Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 617-625.
77. Lehigh University, 2005, Comparative Performance of High Early Strength and Self-Consolidating Concrete For Use in Precast Bridge Beam Construction, Final Report, PITA Project PIT-457-04, 102 pp.
78. Uno, Y., 2005, Application of Self-Compacting Concrete to Segment for Shield Tunnel, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005)*, Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 665-673.
79. Galilei, G., *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Elzeviri, Leida, 1638. (English translation, *two new sciences*, The Macmillan Company, N. Y., 1933.

80. Coulomb, C. A., Remarque sur la rupture des corps, Memories presentes par divers savants al'Academie, vol 7, 1776.
81. English, C. E., Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners, transactions of the Institue of Naval Architects, Vol. 55, pp. 219-241, 1913.
82. Yayla, P., 2007, Kırılma Mekaniği, Çağlayan Kitabevi, 229s.
83. Griffith, A. A., The Phenomena of rupture and flow in solids, Phil. Trans, Roy, Soc., A221, 163-198, 1920.
84. Zener, C., and Holloman, J.H., "Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steel," J. App L Phys., 15, 22-32, 1944.
85. Irwin, G. R., Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, J. Appl. Mech., 24, 361-364, 1957.
86. Jan G. M. Van Mier, 2000, "Fracture Processess of concrete," CRC Pres, New York, 208p.
87. Barenblatt, G. I., On equilibrium cracks forming during brittle fracture, (Rusça) Prikladnaya Matematika i Mekhanika (PMM), 23, 434-444, 1959.
88. Dugdale, D. S., Yielding of steel sheets containing slits, J. Mech. Phsy. Solids, 8, 100-104, 1960.
89. Bilby, B. A., Cottrell, A. H., and Swinden, K. H., The spread of plastic yield from a notch, Proc Roy Soc London, A272, 304-314, 1963.
90. Rice, J. R., A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrationby nothces and cracks, J. of Applied Mechanics, June, 1968.
91. Hillerborg, A., Influence of beam size on concrete fracture energy determined according to a draft RILEM recommendation, Report TVBM-3201, Div Bldg Mater. Lund Inst. Tech, Sweeden, 1985.
92. Carpinteri, A., Scaling laws and renormalization groups for the strength and toughness of disordered materials, Int. J. Solids Struct, 31, 291-302, 1994.
93. Yeğinoğlu A., Tokyay M., Betonun Kırılma Mekaniği Konusundaki Çalışmaların Değerlendirilmesi, Birinci Ulusal Kırılma Konferansı, Ankara, 1981.
94. Kaplan, M. F., Crack propagation and the fracture of concrete, J. Of ACI, 58, 591-610, 1961.
95. Glucklich, J., Fracture of plain concrete, ASCE J. Engng. Mech, 89, 127-138, 1963.
96. Romualdi, J. P., and Batson, G. B., Mechanics of crack arrest in concrete, ASCE J. Engng. Mech, 89, 147-168, 1963.
97. Zaitsev, Ju, V., Deformation and failure of hardened cement paste and concrete subjected to short term load, Cement Concr. Res, 1, 123-137, 1971.

98. Swamy, R. N., and Rao C. K., Fracture mechanism in concrete systems under uniaxial loading, *Cement Concr Res*, 3, 413-427, 1973.
99. Brown, J. H., Measuring the fracture toughness of cement paste and mortars, *Cement Concr. Rec*, 3, 475-480, 1972.
100. Shah, S. P., and McGarry, F. J., Griffith fracture criterion and concrete, *ASCE J. Engng. Mech*, 97, 1663-1676, 1971.
101. Walsh, P. F., Fracture of plain concrete, *Indian Concr. J*, 46, 469-470, 1972.
102. Higgins, D. D., and Bailey, J. E., Fracture measurements on cement paste, *J. Mater Sci*, 1, 1976.
103. Mindess, S., and Nadeau, J. S., Effect of notch width on K_{IC} for mortar and concrete, *Cement Concr. Res*, 6, 529-534, 1976.
104. Walsh, P. F., Crack initiation in plain concrete, *Mag. Concr. Res*, 28, 37-41, 1976.
105. Gjorv, O. E., Sorensen, S. I., and Arnesen, A., Notch sensitivity and fracture toughness of concrete, *Cement Concr. Res*, 7, 333-344, 1977.
106. Rossi, P., Acker, P., and Francois, D., Measurements of the fracture toughness K_{IC} of concrete, In *FRACTURE' 84*, Eds. Valluri, S R et. al., Pergamon Press, Oxford, 4, 2833-2839, 1984.
107. Ohgishi, S., Ono, H., Takatsu, M., and Tanahashi, I., Influence of test conditions on fracture toughness of cement paste and mortar, In *G-23*, 281-290, 1986.
108. Tian, M., Huang, S., Liu, E., Wu, L., Long, K., and Yang, Z., Fracture toughness of concrete, In *G-23*, 299-306, 1986.
109. Nakayama, J., Direct measurement of fracture energies of brittle heterogeneous materials, *J. Am. Ceram. Soc*, 48, 583-587, 1965.
110. Tattersall, H. G., and Tappin, G., The work of fracture and its measurement in metals, ceramics and other materials, *J. Mater. Sci*, 1, 296-301, 1966.
111. Clarke, F. J. P., Tattersall, H. G., and Tapin, G., "Toughness of Ceramics and Their Work of Fracture," *Proceedings of the British Ceramic Society*, Vol. 6, 163-172, 1966.
112. Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P. E., Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement & Concrete Research*, 6, 773-782, 1976.
113. Hillerborg, A., Influence of beam size on concrete fracture energy determined according to a draft RILEM recommendation, Report TVBM-3201, Div Bldg Mater. Lund Inst. Tech, Sweden, 1985.

114. İnce R., 1998, "Betonarme yapı elemanlarında basınç-kesme kırılmasının ve boyut etkisinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 140s.
115. Karihaloo, B. L., 1995, *Fracture mechanics and structural concrete*, Longman Scientific & Technical Press, London.
116. Gettu, R., and Shah, S. P., *Fracture mechanics and high strength concrete*, In G-45, 1-75, 1992.
117. Bache, H. H., *Fracture mechanics in design of concrete and concrete structures*, In G-23, 577-586, 1986.
118. Brühwiler, E., Broz, J. J., and Saouma, V. E., *Fracture model evaluation of dam concrete*, J. Mater. Civil Engng, 3, 235-251, 1991.
119. Weibull, W., *A Statistical Theory of the Strength of Materials*, Royal Swedish Inst. for Engng. Res, Stockholm, 1939.
120. Bazant, Z. P., Kim, J. K., and Pfeiffer, P. A., *Determination of fracture properties from size effect tests*, ASCE J. Struct. Engng, 112, 289-307, 1986.
121. Carpinteri, A., Valente, S., Ferrara, G., and Imperato, L., *Experimental and numerical fracture modeling of a gravity dam*, In Proceeding FRAMCOS (ed. Z. P. Bazant) Elsevier publishers, 351-360, 1992.
122. Şener, S., 1997, *Size effect tests of high strength concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, 9, pp. 46-48.
123. Koç, V., ve Şener, S., 2007, *Normal dayanımlı betonda kırılma tokluklarının bulunması*, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 25, pp. 129-139.
124. Barr, B. I. G., Abusiaf, H. F., and Şener, S., 1998, *Size effect and fracture energy studies using compact compression specimens*, Materials and Structures, 31, pp. 36-41.
125. Arıcı, E., 2003, "Tekil temellerin yatak mukavemetinde boyut etkisinin incelenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 93s.
126. İnce R., and Arıcı E., "Size effect in bearing strength of concrete cubes", *Construction and Building Materials*, 18, 2004, pp. 603-609.
127. ACI-318-83 *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, Detroit.
128. ACI-446.1R-91, 1999, *Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determinations of Material Properties*, Detroit.
129. Jeng, Y. S. and Shah, S. P., *A two-parameter model for concrete*, ASCE J. Eng. Mech., 111, 1227-1241, 1985.

130. Yang, S., Tang, T., Zollinger, D. G., and Gurjar, A., "Splitting tension tests to determine concrete fracture parameters by peak-load method," *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 5, 1997, pp. 18-28.
131. RILEM Recommendation, "Determination of the fracture parameters (K_{IC}^s ve $CTOD_c$) of plain concrete using three-point bend tests," *Materials & Structures*, Vol. 23, 138, 1990, pp. 457-460.
132. Nallathambi, P. and Karihaloo, B. L., Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete, *Magazine of Concrete Res.*, 38, 67-76, 1986.
133. Onargan, T., Köse, H. ve Deliormanlı A.H., 2006, "Mermer", 4. baskı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye.
134. Türkiye Doğal Taş Grubu Resmi İnternet Sitesi, www.turkishstones.org
135. Burdur Valiliği, 2006, *Mahalli Çevre Kurulu Kararı*, Burdur.
136. Ağdağ, O. N., Kırımhan, S., 1999, "Denizli Organize Sanayi Bölgesi'nde Endüstriyel Katı Atık Durumu ve Geri Kazanımı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, No.1, s. 47-58.
137. Alyamaç, K. E., ve İnce, R., 2007, "Karo mozaik döşeme kaplama plak üretiminde atık mermer çamurunun kullanılabilirliği", 7. Ulusal Beton Kongresi (28-30 Kasım 2007), TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 437-446.
138. Alyamaç, K. E., ve İnce, R., 2007, "Atık mermer çamurunun Kendiliğinden Yerleşen Betonda Toz Madde Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması", TÇMB 3. Uluslar arası Çimento ve Betonda Sürdürülebilirlik Sempozyumu (21-23 Mayıs 2007), Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, İstanbul, 821-832.
139. Türk Standartları Enstitüsü, 2000, "TS EN 1097-2 Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin-Bölüm 2; Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar", Ankara.
140. Türk Standartları Enstitüsü, 2001, "TS EN 1367-1 Agregaların Termal Bozunma Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 1; Donmaya ve Çözölmeye Karşı Direncin Tayini", Ankara.
141. Türk Standartları Enstitüsü, 2003, "TS EN 12390-3 Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri– Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini", Ankara.
142. Türk Standartları Enstitüsü, 2003, "TS EN 12390-6 Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri– Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini", Ankara.
143. Türk Standartları Enstitüsü, 1978, "TS 3260 Beton Yüzey Sertliği Yolu İle Yaklaşık Beton Dayanımının Tayini Kuralı", Ankara.
144. John, Y.S., and Shah, S. P., 1989, Fracture Mechanics Analysis of High Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 1(4), 185-198.

145. Alyamaç, K. E., 2004, “Betonun Kırılma Parametreleri Üzerine Malzeme Parametrelerinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 82s.
146. Alyamaç, K. E., ve İnce, R., 2007, “Kür süresinin betonun kırılma parametreleri üzerine etkisinin incelenmesi”, 8. Uluslar arası Kırılma Konferansı (7-9 Kasım 2007), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 600-609.
147. Alyamaç, K. E., ve İnce, R., 2007, “Geleneksel betonda nem oranı-kırılma ilişkisinin belirlenmesi”, 8. Uluslar arası Kırılma Konferansı (7-9 Kasım 2007), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 634-643.
148. Alyamaç, K. E., ve İnce, R., 2007, “Farklı Kür Meotlarının Kırılma Parametreleri Üzerine Etkisi”, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (3), 347-355.
149. B. H. Bhaskar, B.K. Raghuprasad, D.S. Ramachandramurthy, R. Narayanan and S. Gopalakrishnan, 2005, “Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete”, Materials and Structures, 38, 63-72.

ÖZGEÇMİŞ

Kürşat Esat ALYAMAÇ, 1980 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlköğretimini Atatürk İlkokulu ve Mezre Orta Okulu'nda, orta öğretimini Balakgazi Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde tamamlamıştır. 1998 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2002 yılında birincilikle mezun olmuştur. Aynı yıl güz döneminde Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başlamıştır. Yüksek Lisans eğitime devam ederken, 2003 yılının Aralık Ayı'nda yüksek lisans yaptığı ana bilim dalına araştırma görevlisi olarak atanmıştır. 2004 yılı güz döneminde Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Ana Bilim Dalı'nda doktora eğitime başlamıştır. Yazar, 2007 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümü'nden mezun olarak, ikinci lisans eğitimini tamamlamıştır. Halen araştırma görevlisi görevini sürdürmekte olan ALYAMAÇ, evli ve iki çocuk babasıdır.

Tablo 1. Zaman serileri kırılma yükleri.

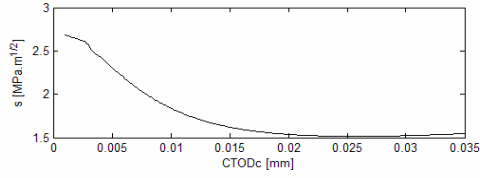
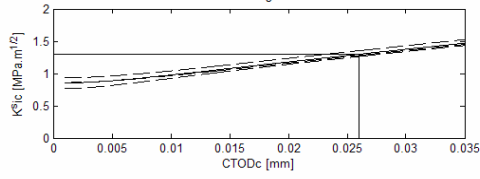
SD1 (7 günlük)			SD2 (7 günlük)			SD3 (7 günlük)			SD4 (7 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
28.6	0.0	4.4	30.0	0.0	4.4	30.7	0.0	4.3	39.2	0.0	4.3
33.4	0.0	4.3	34.7	0.0	4.4	35.1	0.0	4.4	46	0.0	4.3
20.7	15.5	4.4	21.6	15	4.4	25.1	15.5	4.3	26.5	16	4.3
22.8	16	4.4	25.4	15.5	4.4	22	15.8	4.4	26.7	16.5	4.3
18.5	30.5	4.3	18.7	30.9	4.4	17.8	30.5	4.4	19.8	30.5	4.4
19.8	31.5	4.3	17.4	31	4.3	17.3	30.7	4.3	19.6	30.7	4.3
15.7	37.5	4.4	14.6	37.5	4.3	16.7	36.9	4.3	18	37.5	4.4
15.7	37.5	4.4	15.8	37.5	4.2	14.9	38.5	4.3	18.7	37.5	4.3
UK1 (7 günlük)			UK2 (7 günlük)			UK3 (7 günlük)			UK4 (7 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
28.2	0.0	3.5	25.9	0.0	4.3	23.6	0.0	4.3	27.9	0.0	4.3
28.5	0.0	3.5	26.3	0.0	4.3	24.8	0.0	4.5	30.3	0.0	4.2
16.8	16.0	3.5	17.9	15.9	4.3	17.5	16.0	4.3	17.3	15.5	4.2
17.5	16.0	3.5	17.4	16.3	4.2	18.2	16.0	4.3	16.8	17.0	4.2
13.7	31.0	3.5	13.1	30.5	4.3	15.1	30.0	4.4	14.5	30.3	4.1
14	31.0	3.5	14.8	31.0	4.3	-	31.0	4.3	13.3	30.7	4.2
12.7	39.0	3.5	12.4	37.0	4.3	12.6	38.5	4.4	11.8	38.0	4.2
12.8	39.0	3.5	12.8	39.0	4.3	13.1	39.0	4.3	12.6	39.0	4.1
MT1 (7 günlük)			MT2 (7 günlük)			MT3 (7 günlük)			MT4 (7 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)		P_u (kN)	a_0 (mm)	
25.1	0.0	4.5	28.5	0.0	4.4	19	0.0		20.2	0.0	
26.8	0.0	4.4	29.1	0.0	4.4	20.1	0.0		21.8	0.0	
20.7	15.1	4.4	18.1	15.5	4.4	15.4	15.0		15.6	15.9	
18.6	15.2	4.4	21.1	16.5	4.5	14.1	16.0		14.1	17.0	
15	30.2	4.5	12.6	30.0	4.3	12.8	30.0		11	30.5	
14.7	30.9	4.4	14.5	30.3	4.4	14.9	30.5		11.8	30.7	
11.4	37.9	4.4	13.6	37.5	4.4	11.3	37.5		10.4	36.9	
12.6	38.5	4.5	13.7	38.5	4.3	11.9	39.0		9.6	37.5	
REF1 (7 günlük)			REF2 (7 günlük)								
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)						
26.4	0.0	4.3	25.9	0.0	4.4						
27.3	0.0	4.3	26.3	0.0	4.6						
19.8	15.8	4.4	19.9	15.0	4.3						
21.4	15.9	4.3	19.4	15.5	4.4						
15.3	30.5	4.2	14.3	31.0	4.5						
14.7	30.6	4.3	15.2	31.0	4.5						
12.5	38.0	4.3	12.5	37.5	4.3						
14.1	39.0	4.3	13.6	37.5	4.6						

Tablo 2. Zaman serileri kınılma yükleri.

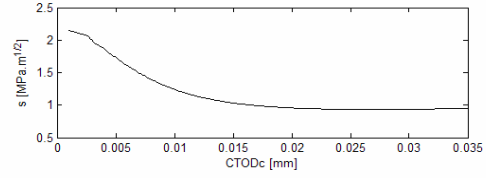
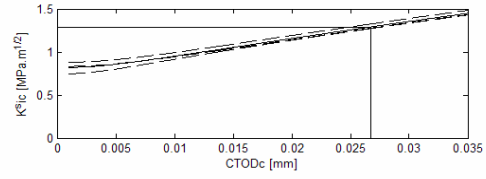
SD1 (28 günlük)			SD2 (28 günlük)			SD3 (28 günlük)			SD4 (28 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
29.8	0	4.5	29.8	0	4.6	25.3	0	4.4	28.8	0	4.3
34.4	0	4.6	32.1	0	4.6	26.8	0	4.4	29.5	0	4.4
18.6	14.6	4.5	18.0	15.5	4.5	20.6	15.5	4.5	21.7	15.2	4.4
20.9	14.6	4.5	18.6	17	4.5	18.3	17	4.4	18.8	15.5	4.4
15.6	30.5	4.6	15.4	30.4	4.5	13.9	29.5	4.4	17	31	4.4
16.8	30.8	4.6	16.4	31.2	4.5	15.8	30	4.5	15.3	32	4.4
14.4	36.5	4.5	15.3	37.5	4.6	13.6	38.3	4.4	14	37	4.3
16.1	37.5	4.5	15.3	37.5	4.6	10.9	38.9	4.4	15.4	37.5	4.4
UK1 (28 günlük)			UK2 (28 günlük)			UK3 (28 günlük)			UK4 (28 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
27.5	0.0	4.4	24.7	0.0	4.4	25.3	0.0	4.3	30.3	0.0	4.3
30.4	0.0	4.3	28.6	0.0	4.2	31.1	0.0	4.4	30.7	0.0	4.4
21	15.8	4.4	20.7	15.9	4.3	21.3	16.0	4.2	19.5	15.5	4.2
20	16.0	4.4	20.4	16.0	4.3	24	16.5	4.4	17.8	16.5	4.3
16.5	30.0	4.4	13.2	30.0	4.2	15.1	31.0	4.4	16.4	31.0	4.3
16.8	30.0	4.4	15.4	30.3	4.3	13.5	31.5	4.2	16.8	31.0	4.4
14.5	37.5	4.4	14.1	37.5	4.3	14.1	38.0	4.2	15.8	38.0	4.3
15	37.5	4.3	14.7	37.5	4.3	14.2	38.0	4.4	13.9	38.7	4.3
MT1 (28 günlük)			MT2 (28 günlük)			MT3 (28 günlük)			MT4 (28 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
24.6	0.0	4.5	24.9	0.0	4.6	22.4	0.0	4.3	20.9	0.0	4.3
25.8	0.0	4.6	27.6	0.0	4.6	25.6	0.0	4.3	23.5	0.0	4.2
19.8	15.8	4.4	17.6	15.2	4.5	17.6	15.2	4.4	20	16.0	4.4
18.3	16.5	4.4	20.2	16.1	4.5	21.9	15.3	4.3	15.6	17.5	4.3
15.2	30.2	4.4	13.4	30.5	4.5	12.4	30.5	4.4	14.6	31.2	4.3
16.9	31.0	4.4	12.6	30.9	4.4	16.8	31.5	4.4	14.6	31.5	4.3
12.1	37.8	4.4	12.8	37.0	4.6	13	38.0	4.3	11.7	38.0	4.2
13.9	37.8	4.4	13.2	37.5	4.5	13	39.3	4.4	13.7	38.5	4.3
REF1 (28 günlük)			REF2 (28 günlük)								
P_u (kN)	a_0 (mm)		P_u (kN)	a_0 (mm)							
25.7	0.0		27.2	0.0							
32.1	0.0		28.5	0.0							
21.3	15.3		24.6	15.0							
21.6	16.1		13.5	16.5							
13.4	30.5		15.4	30.0							
15.4	30.9		18.8	31.5							
12.7	38.5		13	38.0							
13.9	38.5		13.9	38.5							

Tablo 3. Zaman serileri kınılma yükleri.

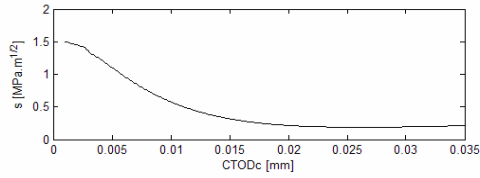
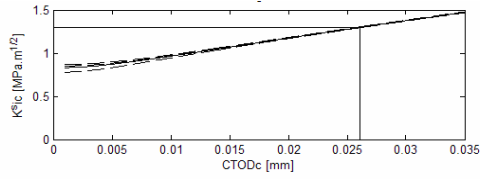
SD1 (90 günlük)			SD2 (90 günlük)			SD3 (90 günlük)			SD4 (90 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
33	0	4.5	31.5	0	4.7	25.3	0	4.4	27.4	0	4.4
36.8	0	4.5	36.3	0	4.6	29.6	0	4.4	28.7	0	4.4
20.8	15	4.5	21.6	15.2	4.7	16.9	15.8	4.4	19.9	14.5	4.4
20.1	15.2	4.5	24.1	15.3	4.6	17.3	16.2	4.5	20.6	15.8	4.4
16.5	30.8	4.5	18.9	30.5	4.6	14.8	29.9	4.4	15.1	30.3	4.4
17.2	30.8	4.5	17.8	30.6	4.6	15.8	31.2	4.4	15.8	31.2	4.4
17.7	38	4.5	14.5	37.2	4.5	13.5	36.9	4.4	12.3	38.5	4.4
15.8	38.1	4.5	14.8	39.7	4.6	14.7	39	4.4	13.1	38.5	4.4
UK1 (90 günlük)			UK2 (90 günlük)			UK3 (90 günlük)			UK4 (90 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
39.4	0.0	4.5	32.6	0.0	4.4	33.9	0.0	4.3	32.9	0.0	4.4
42.9	0.0	4.4	38.3	0.0	4.3	36.2	0.0	4.3	40.1	0.0	4.4
21.5	15.4	4.4	21.7	15.0	4.3	23.4	16.1	4.3	23.7	16.0	4.3
27.3	16.0	4.4	24.4	15.0	4.3	22	16.5	4.3	22.2	16.1	4.3
17.6	30.5	4.4	18.2	31.0	4.3	17.7	31.0	4.3	18.7	30.5	4.3
15.8	31.0	4.3	19.6	31.0	4.3	18.2	31.0	4.3	16.4	30.8	4.3
16.8	37.5	4.4	16.7	38.2	4.3	16.2	38.0	4.3	16.2	38.0	4.3
17.1	37.8	4.4	17.8	38.2	4.3	14	38.8	4.3	16.8	38.0	4.3
MT1 (90günlük)			MT2 (90 günlük)			MT3 (90 günlük)			MT4 (90 günlük)		
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)
28.1	0.0	4.5	29	0.0	4.6	21.6	0.0	4.5	24.5	0.0	4.5
28.9	0.0	4.5	33.4	0.0	4.6	26.5	0.0	4.5	28.1	0.0	4.5
18	15.6	4.6	20.1	15.0	4.6	21.4	16.5	4.5	20	16.0	4.5
21.6	15.9	4.5	22.2	15.0	4.5	19.9	17.0	4.5	17.5	17.0	4.5
16.9	30.2	4.4	15.8	30.8	4.5	14.8	30.0	4.5	14.7	30.0	4.5
16.1	30.9	4.5	18.1	30.8	4.5	15.7	30.2	4.5	15.7	30.6	4.5
14.9	37.5	4.5	14.1	37.5	4.5	13	38.2	4.5	14.1	37.2	4.5
13.8	38.0	4.4	14.3	38.3	4.5	13.2	39.5	4.5	15.4	37.5	4.4
REF1 (90 günlük)			REF2 (90 günlük)								
P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)	P_u (kN)	a_0 (mm)	V_s (km/s)						
33.6	0.0	4.4	38.6	-	4.4						
37	0.0	4.4	40.1	-	4.4						
24.1	16.8	4.4	25.8	16.8	4.3						
20.9	17.0	4.4	22.5	17.6	4.3						
19.7	30.3	4.4	18.9	30.9	4.3						
16.3	31.2	4.4	18.9	30.9	4.3						
15.6	38.2	4.4	16.6	37.2	4.3						
16	38.8	4.4	18.4	37.9	4.3						



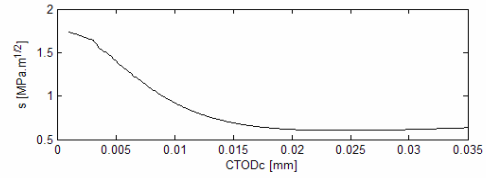
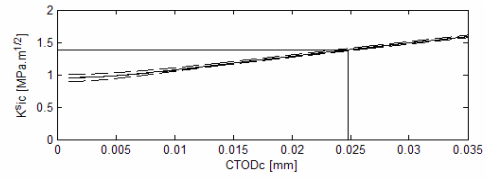
SD1 (7 günlük)



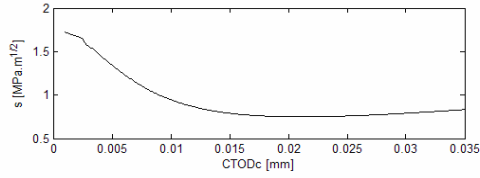
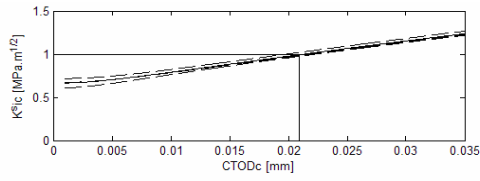
SD2 (7 günlük)



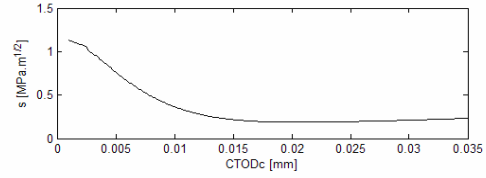
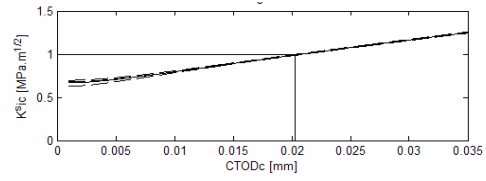
SD3 (7 günlük)



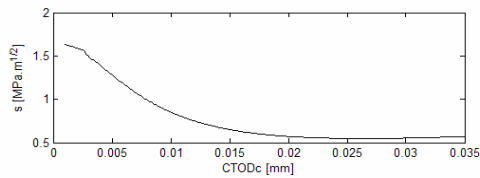
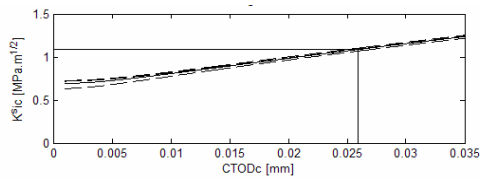
SD4 (7 günlük)



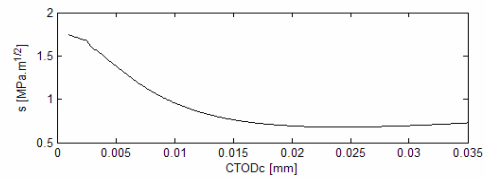
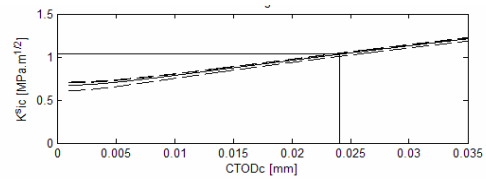
UK1 (7 günlük)



UK2 (7 günlük)

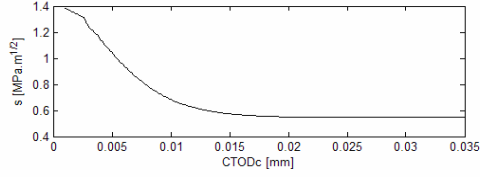
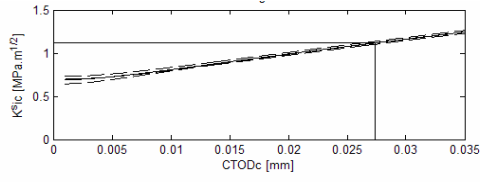


UK3 (7 günlük)

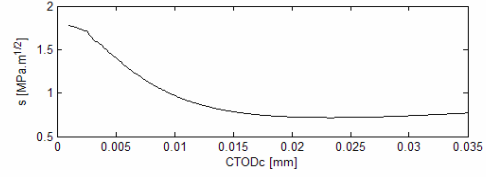
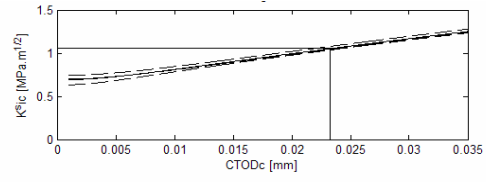


UK4 (7 günlük)

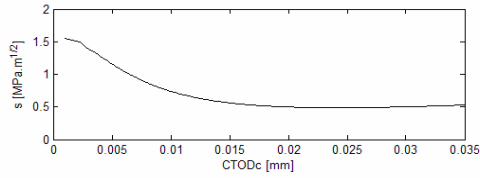
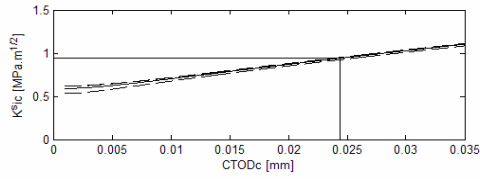
Şekil 1. Zaman serilerinin İPM grafik çözümleri.



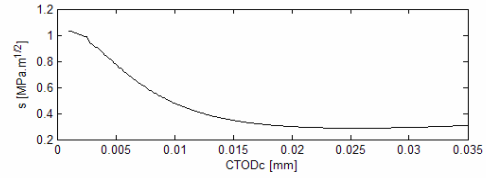
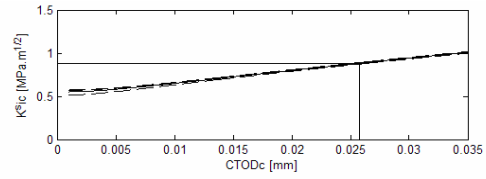
MT1 (7 günlük)



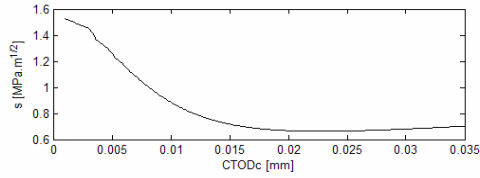
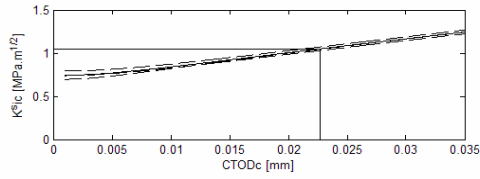
MT2 (7 günlük)



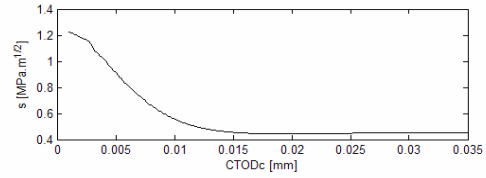
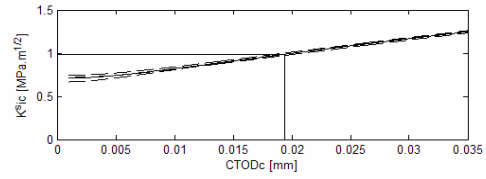
MT3 (7 günlük)



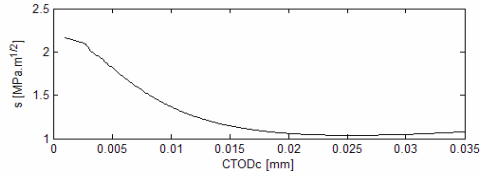
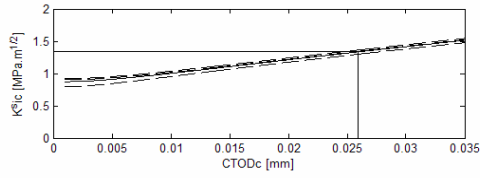
MT4 (7 günlük)



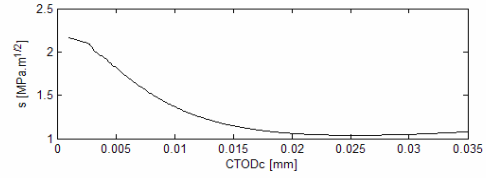
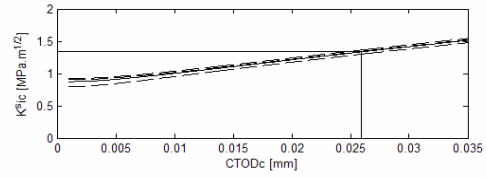
REF1 (7 günlük)



REF2 (7 günlük)

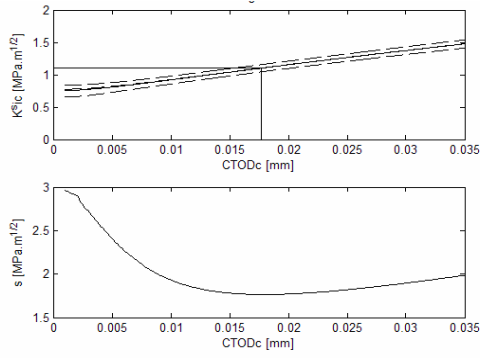


REF2 (28 günlük)

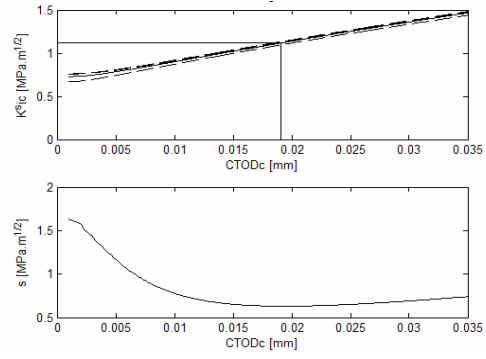


REF2 (90 günlük)

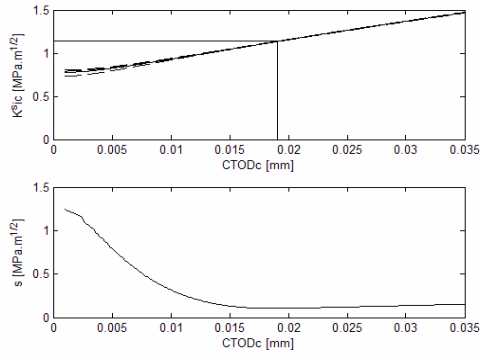
Şekil 2. Zaman serilerinin İPM grafik çözümleri.



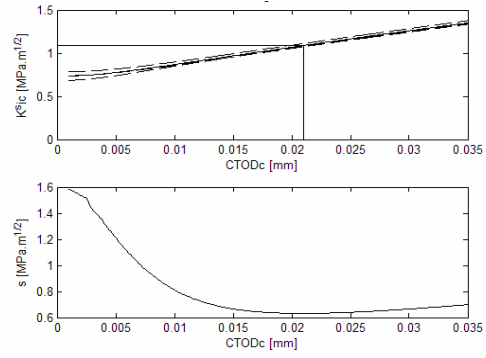
SD2 (28 günlük)



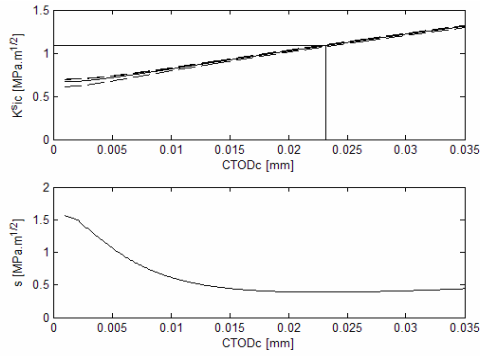
SD3 (28 günlük)



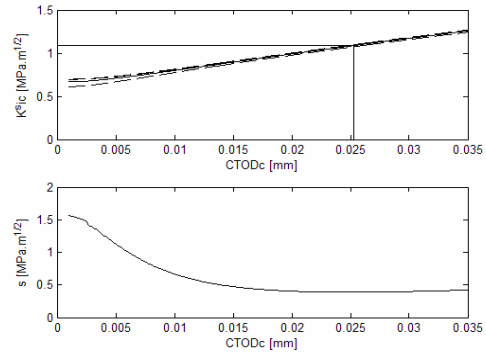
UK2 (28 günlük)



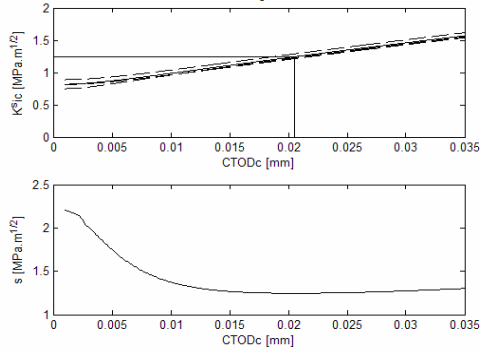
UK3 (28 günlük)



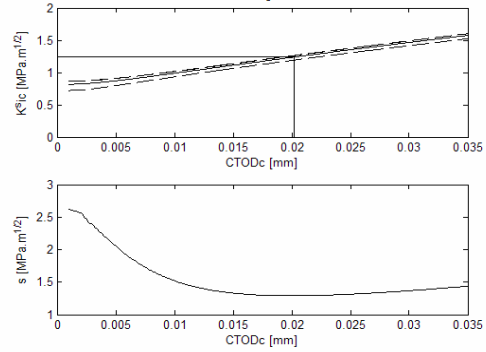
MT2 (28 günlük)



MT3 (28 günlük)

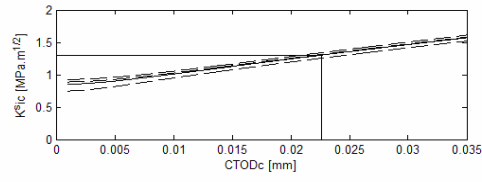


SD2 (90 günlük)

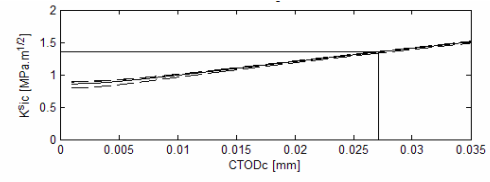


SD3 (90 günlük)

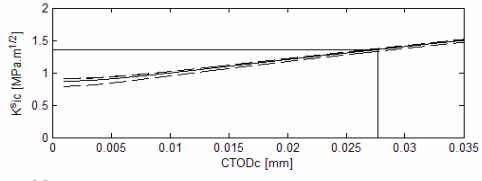
Şekil 3. Zaman serilerinin İPM grafik çözümleri.



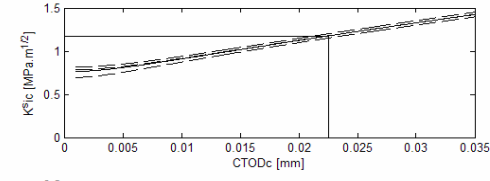
UK2 (90 günlük)



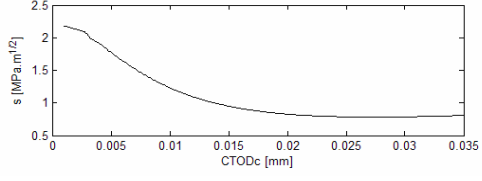
UK3 (90 günlük)



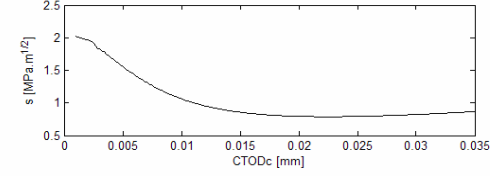
UK4 (90 günlük)



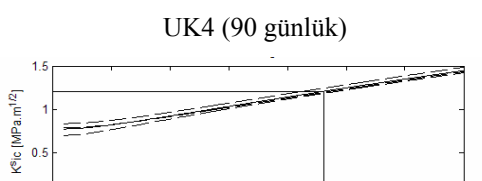
MT1 (90 günlük)



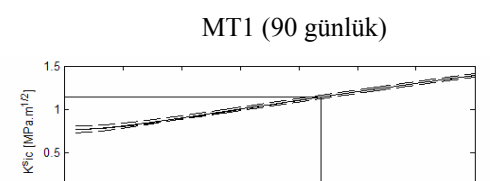
MT2 (90 günlük)



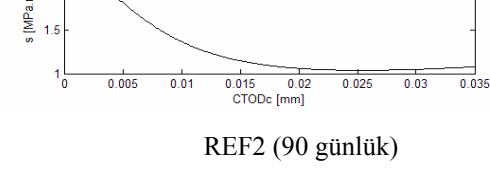
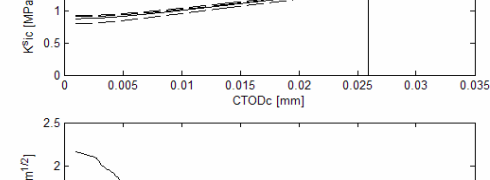
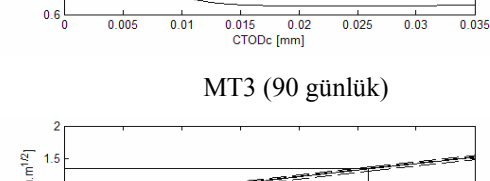
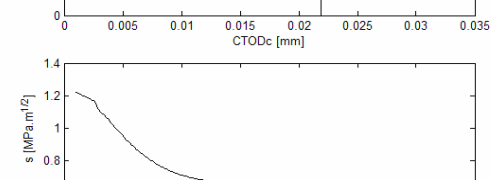
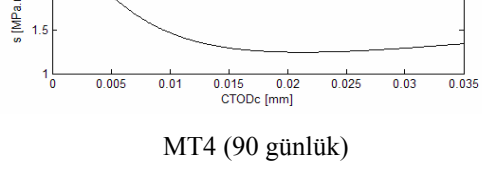
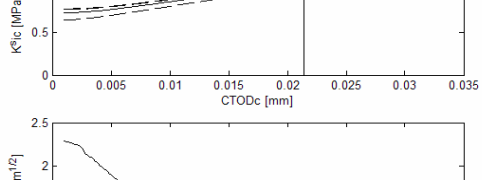
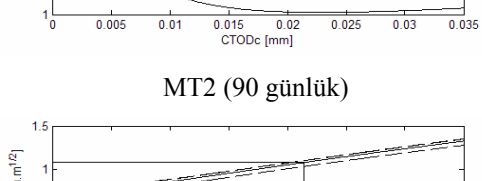
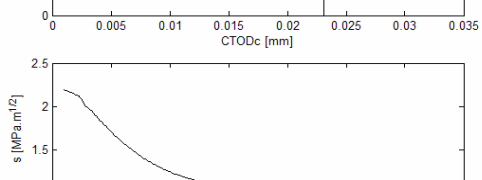
MT3 (90 günlük)



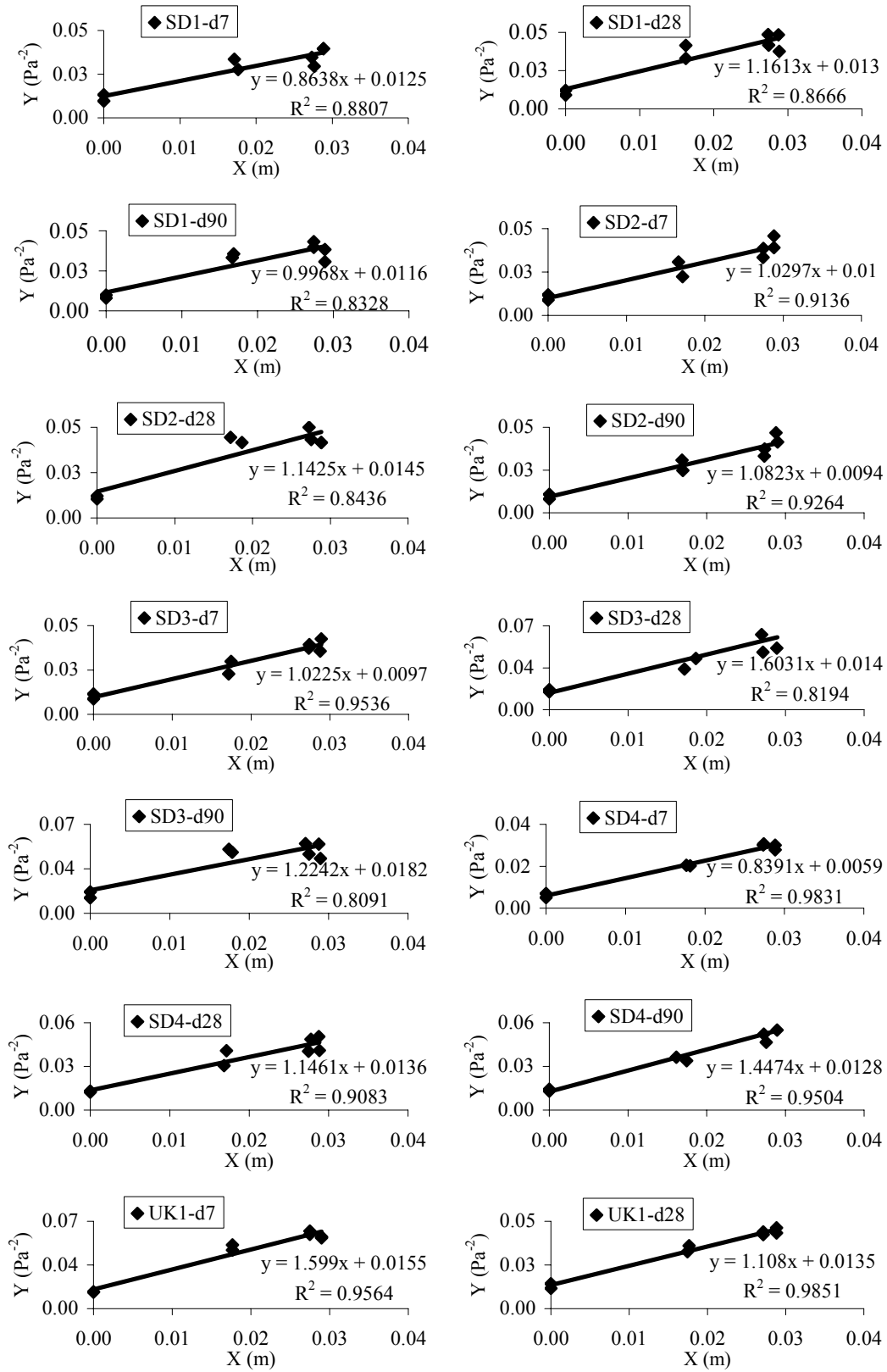
MT4 (90 günlük)



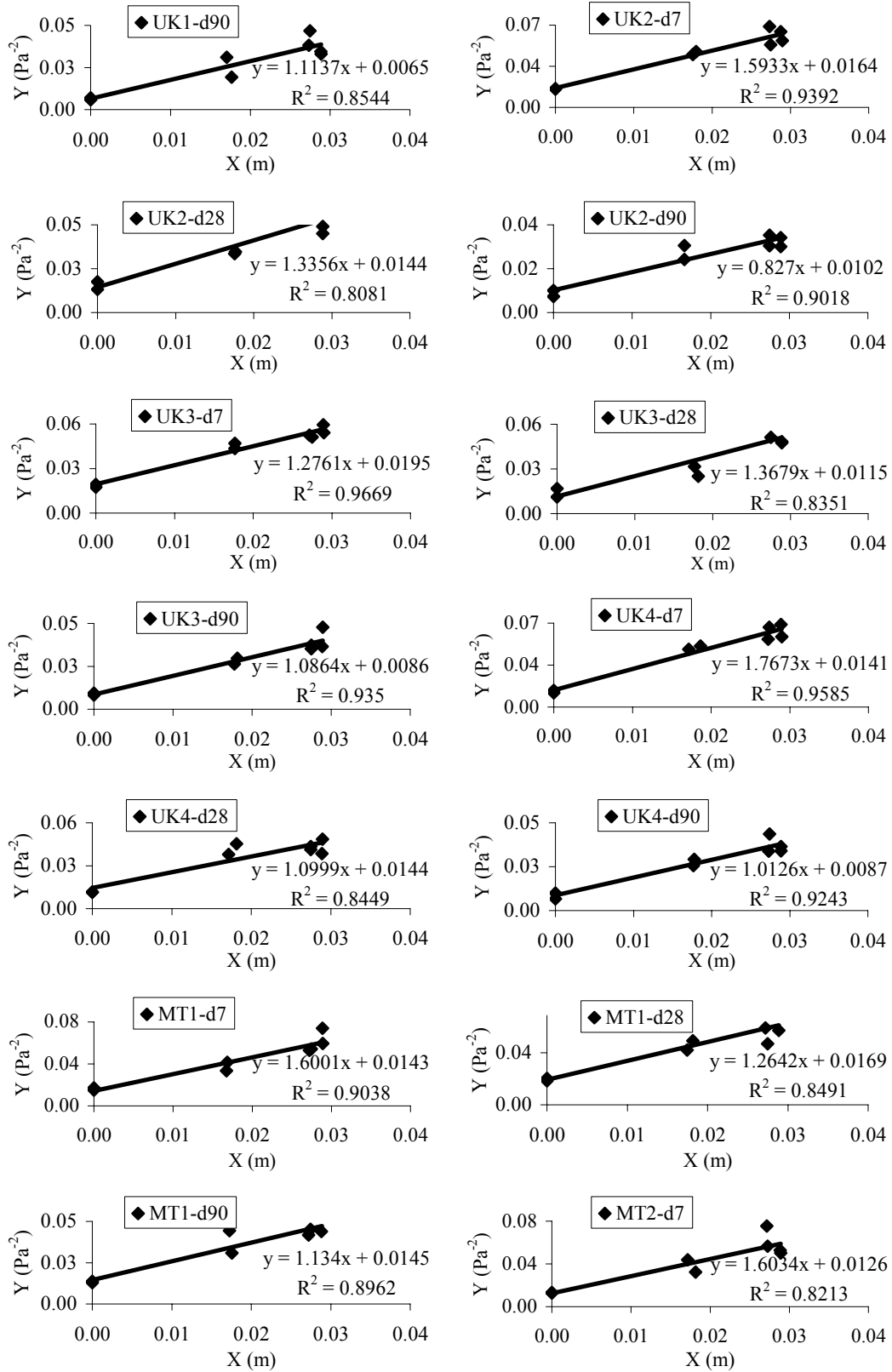
REF2 (90 günlük)



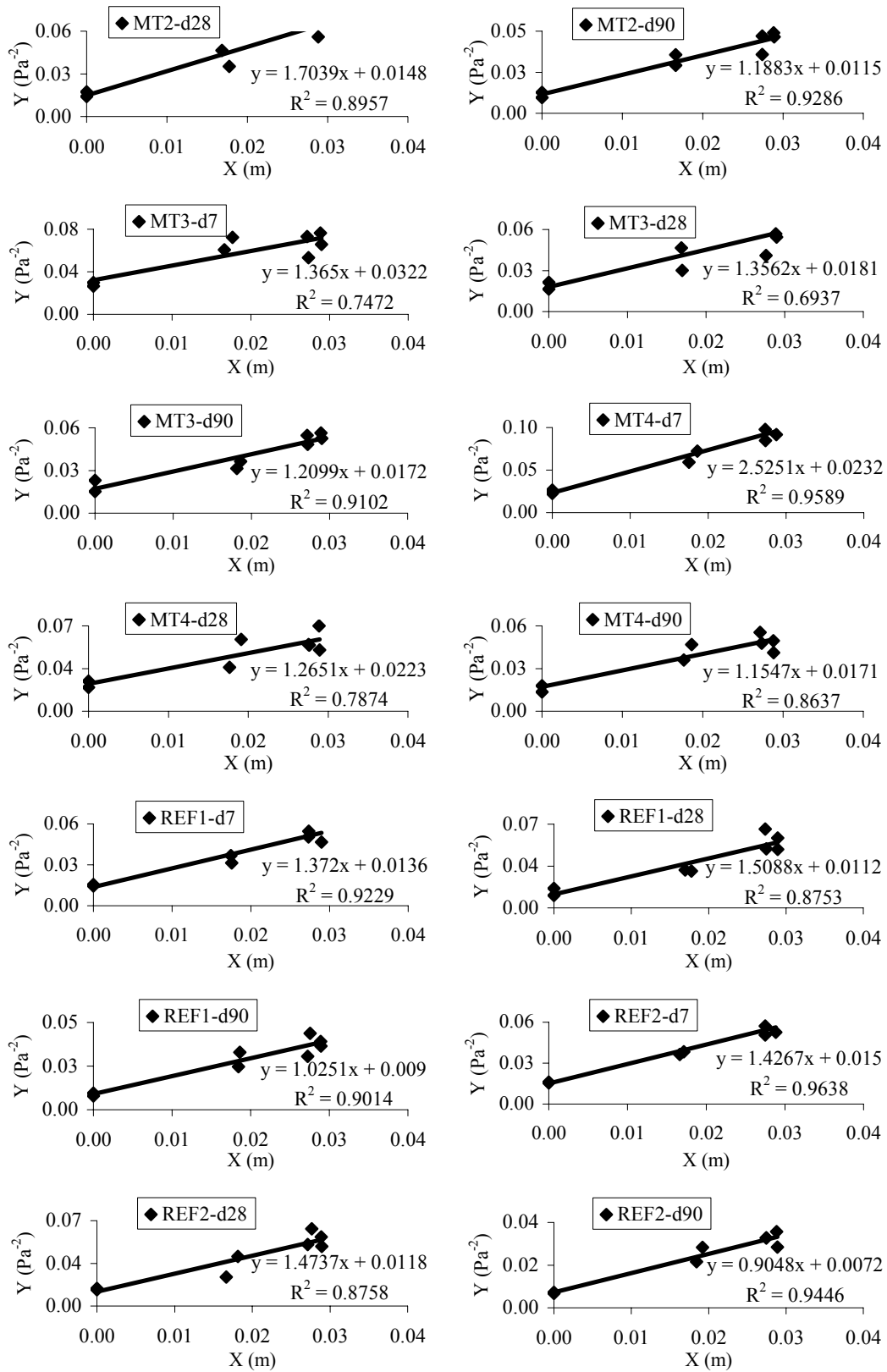
Şekil 4. Zaman serilerinin İPM grafik çözümleri.



Şekil 5. Zaman serilerinin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri.



Şekil 6. Zaman serilerinin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri.



Şekil 7. Zaman serilerinin Değişken-Çentikli Tek-Boyutlu Deney Metodu çözüm grafikleri.