

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

134797

**TEKİL TEMELLERİN YATAK MUKAVEMETİNDE  
BOYUT ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

T.C. FIRAT ÜNİVERSİTESİ ENSTİTÜSÜ  
DOKÜMANİSYON MEMURU

Erdoğan ARICI

DOKTORA TEZİ

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

134787

ELAZIĞ, 2003

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKİL TEMELLERİN YATAK MUKAVEMETİNDE  
BOYUT ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Erdoğan ARICI

DOKTORA TEZİ  
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez ..03..10..2003.....tarikhinde, aşığıda belirtilen jüri tarafından oybirliğı / oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değeriendirilmiştir.

Danışman: Yrd.Doç.Dr.Ragıp İNCE

Jüri Üyesi: Prof.Ali Sayıl ERDOĞAN

Jüri Üyesi: Prof.Dr.A.Sedat HAYALIOĞLU (Dicle Üniv.)

Jüri Üyesi: Prof.Dr.Mehmet ÜLKER

Jüri Üyesi: Yrd.Doç.Dr.Mehmet TUĞAL

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..08..10..2003...tarikh ve ..38/1.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesi ve yönlendirilmesinde her türlü yardımını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ragıp İNCE'ye teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Çalışmalarım esnasında her türlü kolaylığı sağlayan F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölüm Başkanı Yrd. Doç. Dr. Mehmet TUĞAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar esnasında büyük yardımlarını aldığım F.Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvar teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e ve F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Arş. Gör. Tahir GÖNEN'e ayrıca teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TEŞEKKÜR .....	III
İÇİNDEKİLER .....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	VI
TABLolar LİSTESİ .....	IX
SİMGELER LİSTESİ .....	XI
KISALTMALAR LİSTESİ .....	XIII
ÖZET .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
1. GİRİŞ .....	1
2. BETONDA KIRILMA MEKANİĞİ VE BOYUT ETKİSİ .....	4
2.1 Lineer Elastik Kırılma Mekanîği (LEKM) .....	5
2.2 LEKM nin Betona Uygulanması .....	8
2.3 Betonun Nonlineer Kırılma Teorisi .....	8
2.4. Boyut Etkisi Teorisi .....	10
2.4.1. Boyut Etkisi Kanunu (BEK) .....	12
2.4.2. Değiştirilmiş Boyut Etkisi Kanunu (DBEK) .....	13
2.4.3. Fraktal Boyut Etkisi Kanunu (FBEK) .....	16
2.4.4. Boyut Etkisi Üzerine Mevcut Çalışmalar .....	18
3. YATAK MUKAVEMETİ .....	20
3.1. Yatak Mukavemeti Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	22
3.1.1. Tung A. U. ve Donald L. B. (Beton blokların yatak kapasitesi) .....	22
3.1.2. Bauschinger (Tabii Taş Bloklar İle Yapmış Olduğu Deneyler) .....	24
3.1.3. N. M. Hawkins (Rijit Plakalar Arasında Yüklü Betonun Yatak Kapasitesi) .....	24
3.1.4. Shealson (Betonun Yatak Kapasitesi Üzerindeki Çalışmaları) .....	27
3.1.5. Meyerhof (Beton ve Kayaların Yatak Kapasitesi) .....	28
3.1.6. Tarig Ahmed ve diğ. (Limit Bir Alan Üzerinde Yüklü Donatılı ve Donatısız Betonun Yatak Kapasitesi Üzerine Çalışma) .....	30
3.1.7. Ömer PERİNÇEL (Betonun Yatak Kapasitesi ) .....	33
3.1.8. Sanat K. Niyogi (Betonun Yatak Dayanımı – Geometrik Değişimler) .....	35
4. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	41
4.1. Numune Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Özellikleri .....	42
4.2. Numunelerin Malzeme Karışım Miktarları .....	43

4.3.	Basınç Altındaki Numunelerin Davranışı ve Göçmenin Oluşum Şekli	44
4.3.1.	d/h Oranı 1/1 Olan Numunelerde Göçmenin Oluşum Şekli	45
4.3.2.	d/h Oranı 1/2 ve 1/3 Olan Numunelerde Göçmenin Oluşum Şekli	47
4.4.	Ters Piramit Formasyonunun Belirlenmesi	50
5.	DENEY SONUÇLARI	51
5.1.	$d_{max}=4$ mm'lik Numunelerin Deney Sonuçları	51
5.1.1.	$d_{max}=4$ mm'lik Numunelerin BEK'ya göre formülasyon ve grafikleri	53
5.1.2.	$d_{max}=4$ mm'lik Numunelerin FBK'ya göre formülasyon ve grafikleri	56
5.2.	$d_{max}=8$ mm'lik Numunelerin Deney Sonuçları	59
5.2.1.	$d_{max}=8$ mm'lik Numunelerin BEK'ya göre formülasyon ve grafikleri	62
5.2.2.	$d_{max}=8$ mm'lik Numunelerin FBK'ya göre formülasyon ve grafikleri	67
5.3.	$d_{max}=16$ mm'lik Numunelerin Deney Sonuçları	72
5.3.1.	$d_{max}=16$ mm'lik Numunelerin BEK'ya göre formülasyon ve grafikleri	73
5.3.2.	$d_{max}=16$ mm'lik Numunelerin FBK'ya göre formülasyon ve grafikleri	75
5.4.	Genel Formülasyonlar ve Grafikleri	76
6.	SONUÇLAR VE ÖNERLER	82
	KAYNAKLAR	83
	ÖZGEÇMİŞ	89

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Kırılma modları .....	6
Şekil 2.2. Barenblatt'ın kohezif çatlak modeli .....	7
Şekil 2.3 a) Çekmeye maruz bir numunenin yük-deformasyon diyagramı .....	9
b) Kırılma süreci bölgesi .....	9
Şekil 2.4. Kırılma süreci bölgesinin gelişimi .....	9
Şekil 2.5. Değişik malzeme sınıfları için Linear, non-linear ve kırılma süreci bölgeleri .....	10
Şekil 2.6: Numune boyutuna karşılık gelen kritik nominal gerilmenin LEKM'ye göre belirlenmesi .....	12
Şekil 2.7. Yarı-gevrek malzemeler için Boyut Etkisi Kanunu (BEK) .....	13
Şekil 2.8. Silindir yarma deneyi detayları .....	14
Şekil 2.9 : Bazant'ın hipotezi .....	15
Şekil 2.10. Pik yükte hasar gören bölgenin topolojisi .....	17
Şekil 2.11. Fraktal Boyut Etkisi Kanunu: Logaritmik diyagram .....	18
Şekil 3.1. Yatak göçmesinin mekanizması .....	20
Şekil 3.2. Plan ve yan görünüş üzerinden $A_1$ ve $A_2$ alanlarının tanımlanması .....	21
Şekil 3.3. Deneysel sonuçlar, Hawkins ve şartnamelerin yaklaşımı .....	21
Şekil 4.1. Hidrolik yük kontrollü preste numunenin yüklenmesi .....	44
Şekil 4.2. $d/h$ Oranı 1/1 olan numunelerde çatlak çeşitleri .....	45
Şekil 4.3. $d/h$ Oranı 1/1 olan küp numunelerde göçme tarzı .....	46
Şekil 4.4. $D/h$ Oranı 1/1 olan silindir numunelerde göçme tarzı .....	47
Şekil 4.5. $d/h$ Oranı 1/2 ve 1/3 olan numunelerde çatlak çeşitleri .....	48
Şekil 4.6. $d/h$ Oranı 1/2 olan kare prizma numunelerde göçme tarzı .....	48
Şekil 4.7. $D/h$ Oranı 1/2 olan silindir numunelerde göçme tarzı .....	49
Şekil 4.8. $d/h$ Oranı 1/3 olan kare prizma numunelerde göçme tarzı .....	49
Şekil 4.9. Kare kesitli numunelerde kama şekilleri.....	50
Şekil 4.10. Dairesel kesitli numunelerde kama şekilleri.....	50
Şekil 4.11. Kırılan numunelerde kama boyunun tesbiti .....	50
Şekil 5.1. $d_{max}= 4$ mm için seri I sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	53
Şekil 5.2. $d_{max}= 4$ mm için seri II sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	54
Şekil 5.3. $d_{max}= 4$ mm için seri IV sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	54
Şekil 5.4. $d_{max}= 4$ mm için seri V sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	55

Şekil 5.5. $d_{max} = 4$ mm için seri VI sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	55
Şekil 5.6. $d_{max} = 4$ mm için seri VII sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	56
Şekil 5.7. $d_{max} = 4$ mm için seri I sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	56
Şekil 5.8. $d_{max} = 4$ mm için seri II sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	57
Şekil 5.9. $d_{max} = 4$ mm için seri IV sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	57
Şekil 5.10. $d_{max} = 4$ mm için seri V sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	58
Şekil 5.11. $d_{max} = 4$ mm için seri VI sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	58
Şekil 5.12. $d_{max} = 4$ mm için seri VII sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	59
Şekil 5.13. $d_{max} = 8$ mm için seri I sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	62
Şekil 5.14. $d_{max} = 8$ mm için seri II sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	62
Şekil 5.15. $d_{max} = 8$ mm için seri III sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	63
Şekil 5.16. $d_{max} = 8$ mm için seri IV sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	63
Şekil 5.17. $d_{max} = 8$ mm için seri V sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	64
Şekil 5.18. $d_{max} = 8$ mm için seri VI sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	64
Şekil 5.19. $d_{max} = 8$ mm için seri VII sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	65
Şekil 5.20. $d_{max} = 8$ mm için seri VIII sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	65
Şekil 5.21. $d_{max} = 8$ mm için seri IX sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	66
Şekil 5.22. $d_{max} = 8$ mm için seri X sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	66
Şekil 5.23. $d_{max} = 8$ mm için seri I sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	67
Şekil 5.24. $d_{max} = 8$ mm için seri II sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	67
Şekil 5.25. $d_{max} = 8$ mm için seri III sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	68
Şekil 5.26. $d_{max} = 8$ mm için seri IV sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	68
Şekil 5.27. $d_{max} = 8$ mm için seri V sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	69
Şekil 5.28. $d_{max} = 8$ mm için seri VI sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	69
Şekil 5.29. $d_{max} = 8$ mm için seri VII sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	70
Şekil 5.30. $d_{max} = 8$ mm için seri VIII sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	70
Şekil 5.31. $d_{max} = 8$ mm için seri IX sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	71
Şekil 5.32. $d_{max} = 8$ mm için seri X sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	71
Şekil 5.33. $d_{max} = 16$ mm için seri I sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	73
Şekil 5.34. $d_{max} = 16$ mm için seri IV sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	74
Şekil 5.35. $d_{max} = 16$ mm için seri V sonuçlarıyla BEK formülasyon grafiği .....	74
Şekil 5.36. $d_{max} = 16$ mm için seri I sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	75
Şekil 5.37. $d_{max} = 16$ mm için seri IV sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	75
Şekil 5.38. $d_{max} = 16$ mm için seri V sonuçlarıyla FBK formülasyon grafiği .....	76
Şekil 5.39. Küp numunelerin seri sonuçları ve genel BEK formülasyon .....	76

<b>Şekil 5.40.</b> h/d Oranı 2 olan kare prizma numunelerin seri sonuçları ve BEK formülasyon grafiği .....	77
<b>Şekil 5.41.</b> h/d Oranı 3 olan kare prizma numunelerin seri sonuçları ve BEK formülasyon grafiği .....	77
<b>Şekil 5.42.</b> h/D Oranı 1 olan silindir numunelerin seri sonuçları ve BEK formülasyon grafiği	78
<b>Şekil 5.43.</b> h/D Oranı 2 olan silindir numunelerin seri sonuçları ve BEK formülasyon grafiği	78
<b>Şekil 5.44.</b> Küp numunelerin seri sonuçları ve FBK genel formülasyon grafiği .....	79
<b>Şekil 5.45.</b> h/d Oranı 2 olan kare prizma numunelerin seri sonuçları ve FBK genel formülasyon grafiği .....	79
<b>Şekil 5.46.</b> h/d Oranı 3 olan kare prizma numunelerin seri sonuçları ve FBK genel formülasyon grafiği .....	80
<b>Şekil 5.47.</b> h/D Oranı 1 olan silindir numunelerin seri sonuçları ve FBK genel formülasyon grafiği .....	80
<b>Şekil 5.48.</b> h/D Oranı 2 olan silindir numunelerin seri sonuçları ve FBK genel formülasyon grafiği .....	81



## TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 3.1.</b> Tung A. U. ve Donald L. B.'nin deney sonuçları .....	23
<b>Tablo 3.2.</b> Bauschinger'in deney sonuçları .....	24
<b>Tablo 3.3.</b> Hawkins'in konsantrik yüklemeleri için sonuçlar .....	26
<b>Tablo 3.4.</b> Shealson'un deney sonuçları .....	27
<b>Tablo 3.5.</b> Meyerhof'un deney sonuçları .....	29
<b>Tablo 3.6.</b> Tarig A. ve diğ. kullanmış oldukları betonun özellikleri .....	32
<b>Tablo 3.7.</b> Küçük kare prizmaların (200x200x300 mm) kare yükleme plakasıyla (50x50x15 mm) konsantrik yüklenmesi .....	32
<b>Tablo 3.8.</b> Küçük kare prizmaların (200x200x300 mm) dikdörtgen yükleme plakasıyla (100x50x15mm) konsantrik yüklenmesi .....	32
<b>Tablo 3.9.</b> Küçük kare prizmaların (200x200x300 mm) şerit yükleme plakasıyla (200x50x15 mm) konsantrik yüklenmesi .....	32
<b>Tablo 3.10.</b> Büyük kare prizmaların (400x400x600 mm) kare yükleme plakasıyla (100x100x15 mm) konsantrik ve eksantrik yüklenmesi .....	33
<b>Tablo 3.11.</b> Farklı donatı sınıflı numunelerin yatak kapasiteleri .....	33
<b>Tablo 3.12.</b> 20 cm'lik Küp numunelerin kare plaka ile yüklemesi (Niyogi) .....	36
<b>Tablo 3.13.</b> 20 cm'lik Küp numunelerin şerit plaka ile yüklenmesi (Niyogi) .....	36
<b>Tablo 3.14.</b> 20 cm'lik Küp numunelerin dikdörtgen plaka ile yüklemesi (Niyogi) .....	37
<b>Tablo 3.15.</b> Kare prizma numunelerin kare plaka ile yüklemesi (Niyogi) .....	37
<b>Tablo 3.16.</b> Kare prizma numunelerin dikdörtgen plaka ile yüklemesi (Niyogi) .....	38
<b>Tablo 3.17.</b> Kare prizma numunelerin şerit plaka ile yüklenmesi (Niyogi) .....	38
<b>Tablo 3.18.</b> Dikdörtgen numunelerin şerit plaka ile yüklenmesi (Niyogi) .....	39
<b>Tablo 3.19.</b> 20 cm'lik Küp numunelerde bir eksenli eksantriklik yükleme (Niyogi) .....	39
<b>Tablo 3.20.</b> Kare prizma numuneler için iki eksenli eksantrik yükleme (Niyogi) .....	40
<b>Tablo 4.1.</b> Karışıma giren agregaya ait genel özellikler .....	42
<b>Tablo 4.2.</b> PKÇ/B 32.5 R Tipi çimentonun fiziksel ve kimyasal analizleri .....	42
<b>Tablo 4.3.</b> PKÇ 42.5 R Tipi çimentonun fiziksel ve kimyasal analizleri .....	42
<b>Tablo 4.4.</b> Bazı serilerin 1m <sup>3</sup> 'ü için gerekli olan malzeme miktarları .....	43
<b>Tablo 5.1a.</b> d <sub>max</sub> = 4 mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları .....	51
<b>Tablo 5.1b.</b> d <sub>max</sub> = 4 mm'lik Kare prizma numunelerin deney sonuçları .....	51
<b>Tablo 5.1c.</b> d <sub>max</sub> = 4 mm'lik Silindir numunelerin deney sonuçları .....	51
<b>Tablo 5.2a.</b> d <sub>max</sub> = 4 mm'lik Küp numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri .....	52

<b>Tablo 5.2b.</b> $d_{\max}=4$ mm'lik Kare prizma numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri ....	52
<b>Tablo 5.2c.</b> $d_{\max}=4$ mm'lik Silindir numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri .....	52
<b>Tablo 5.3.</b> $d_{\max}=4$ mm İçin deney sonuçlarının analizleri .....	53
<b>Tablo 5.4a.</b> $d_{\max}=8$ mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları .....	59
<b>Tablo 5.4b.</b> $d_{\max}=8$ mm'lik Kare prizma numunelerin deney sonuçları .....	60
<b>Tablo 5.4c.</b> $d_{\max}=8$ mm'lik Silindir numunelerin deney sonuçları .....	60
<b>Tablo 5.5a.</b> $d_{\max}=8$ mm'lik Küp numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri .....	60
<b>Tablo 5.5b.</b> $d_{\max}=8$ mm'lik Kare prizma numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri ....	61
<b>Tablo 5.5c.</b> $d_{\max}=8$ mm'lik Silindir numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri .....	61
<b>Tablo 5.6.</b> $d_{\max}=8$ mm İçin deney sonuçlarının analizleri .....	61
<b>Tablo 5.7a.</b> $d_{\max}=16$ mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları .....	72
<b>Tablo 5.7b.</b> $d_{\max}=16$ mm'lik Kare prizma numunelerin deney sonuçları .....	72
<b>Tablo 5.8a.</b> $d_{\max}=16$ mm'lik Küp numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri .....	72
<b>Tablo 5.8b.</b> $d_{\max}=16$ mm'lik Kare prizma numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri	73
<b>Tablo 5.9.</b> $d_{\max}=16$ mm İçin deney sonuçlarının analizleri .....	73

## SİMGELER LİSTESİ

- a** : Numune genişliği [mm]  
**a<sub>0</sub>** : Çentik ( Çatlak ) uzunluğu [mm]  
**a<sub>k</sub>** : Ters piramit (Kama) yüksekliği [mm]  
**A<sub>1</sub>** : Yatak plakasının alanı [mm<sup>2</sup>]  
**A<sub>2</sub>** : Numune yüzey alanı [mm<sup>2</sup>]  
**b** : Yatak plakasının boyutu [mm]  
**B** : Amprik sabit  
**d** : Numunenin karakteristik boyutu [mm]  
**D** : Silindir numunelerin çapı [mm]  
**d<sub>max</sub>** : Agreganın maksimum dane çapı [mm]  
**E** : Elastisite modülü [N/mm<sup>2</sup>]  
**e-e'** : Yatak plakasının numune kenarlarına göre eksantriklik mesafesi [mm]  
**f<sub>t</sub>** : Betonun çekme dayanımı [N/mm<sup>2</sup>]  
**f'<sub>c</sub>** : Betonun 28 günlük ortalama basınç dayanımı [N/mm<sup>2</sup>]  
**G<sub>C</sub>** : Çatlak yayılma hızı [N/m]  
**G<sub>F</sub>** : Kırılma enerjisi [N/m]  
**h** : Numune yüksekliği [mm]  
**I** : Atalet momenti [mm<sup>4</sup>]  
**K** : Gerilme şiddet çarpanı [MPa√m ]  
**k** : Alan, Atalet momenti ve y eksenine bağlı sabit değer  
**K<sub>I</sub>** : Gerilme şiddet çarpanı [MPa√m ]  
**K<sub>II</sub>** : Gerilme şiddet çarpanı [MPa√m ]  
**K<sub>III</sub>** : Gerilme şiddet çarpanı [MPa√m ]  
**K<sub>C</sub>** : Gerilme şiddet çarpanı [MPa√m ]  
**K<sub>IC</sub>** : Kritik gerilme şiddet çarpanı [MPa√m ]  
**l<sub>ch</sub>** : Amprik sabit  
**n** : Nominal yatak dayanımının betonun 28 günlük dayanımına oranı ( σ<sub>N</sub>/f'<sub>c</sub> )  
**P<sub>U</sub>** : Kırılma yükü [kN]  
**R** : Numune kesit alanının yatak alanına oranı (A<sub>2</sub>/A<sub>1</sub>)  
**r** : Korelasyon katsayısı

- S** : Kesme kuvveti [kN]  
**S<sub>0</sub>** : P=0 Değerinde birim alandaki kesme kuvveti [kN]  
**t** : Numune yüksekliğinin yatak boyuna oranı (h/b)  
**W<sub>C</sub>** : Çatlak ucu açılımı [mm]  
**σ** : Çekme gerilmesi [N/mm<sup>2</sup>]  
**σ<sub>N</sub>** : Nominal dayanım [N/mm<sup>2</sup>]  
**σ<sub>y</sub>** : Malzemenin akma dayanımı [N/mm<sup>2</sup>]  
**τ** : Kayma gerilmesi [N/mm<sup>2</sup>]  
**λ<sub>0</sub>** : Amirik sabit  
**α** : Ters pramidin düşey düzleme göre yarım tepe açısı [D°]  
**β** : Gevreklik katsayısı  
**φ** : İç sürtünme açısı [D°]  
**θ** : Amirik sabit



## KISALTMALAR LİSTESİ

- ACI** : American Concrete Institute  
**BEK** : Boyut Etkisi Kanunu  
**ÇUAD** : Çatlak ucu açılım deplasmanı  
**DBEK** : Değiştirilmiş Boyut Etkisi Kanunu  
**FBEK** : Fraktal Boyut Etkisi Kanunu  
**LEKM** : Lineer elastik kırılma mekaniği  
**TSE** : Türk Standartları Enstitüsü



T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANİZYON MERKEZİ

## ÖZET

DOKTORA TEZİ

### TEKİL TEMELLERİN YATAK MUKAVEMETİNDE BOYUT ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Erdinç ARICI

Fırat Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

2003, sayfa: 89

Betonarme sistemlerde yatak göçmesi, genellikle mukavemeti yüksek kolon elemanının düşük dayanımlı temel pabucu üzerine oturduğu durumlarda temel gövdesinde meydana gelen yarıлма sonucu oluşur. Öngerilmeli beton elemanlardaki gergi plakaları, rıhtımlardaki köprü yatakları ve kolonlar üzerindeki kirişler v.b. yatak problemleri için birkaç örnektir. Boyutlandırma şartnameleri bu durumdan kaçınmak için belirli kriterleri ileri sürmekle birlikte, beton/betonarmenin kırılma mekaniğinde önemli bir olay olan boyut etkisini dikkate almamaktadır.

Sunulan tez çalışmasında maksimum agrega çapı 4, 8 ve 16 mm olan küp ve prizmatik numunelerden oluşan toplam 22 seride deneyler yapılmıştır. Boyut değişim aralığı 1:4 olan beton numuneler üzerinde yatak yüklemeleri yapılmış ve numunelere ait göçme yükleri boyut etkisi kanunu (BEK) ve fraktal boyut etkisi kanunu (FBEK) ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçları dizayn formülleri ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Beton, Yatak Mukavemeti, Boyut Etkisi, Boyut Etkisi Kanunu (BEK), Fraktal Boyut Etkisi Kanunu (FBEK).

## **ABSTRACT**

Phd Thesis

### **INVESTIGATE OF SIZE EFFECT IN BEARING STRENGTH OF THE INDIVIDUAL FOOTING**

Erdoğan ARICI

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

2003, Page: 89

Bearing failure in reinforced concrete structures generally occurs by splitting of the concrete in the foundation when column with high strength bases on the foundation with low strength. Anchor plates in prestressed concrete structures, bridge bearings over piers, beams over concrete columns, etc. are a few instances of bearing problems. Although design codes proposes specific criterions to avoid from this failure situation, they do not consider size effect which is an important phenomenon in the fracture mechanics of concrete/reinforced concrete.

In this study, 22 series of concrete cube and prismatic specimens, of which the aggregate sizes are 4, 8 and 16 mm, and geometrically similar of different sizes (size range=1:4) were tested by bear loading. Failure loads of specimens were analysed by Size Effect Law (SEL) and Multi-Fractal Size Effect Law (MSEL). Results of the analys were compared with design formula.

**Key Words:** Concrete, Bearing Strength, Size Effect, Size Effect Law , Multi-Fractal Size Effect Law

## 1. GİRİŞ

Bir yapı malzemesi olan beton, inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal olarak kullanıldığı alana göre belirli standartlarca kurallara bağlanmıştır. Fakat her ne kadar standartlara bağlanmış ise de, betonun homojen bir yapıya sahip olmamasından dolayı boyutlandırma işleminde bu standartların uygulanmasında zorluklar çıkmakta ve kesin kurallar ortaya konulamamaktadır.

Boyutlandırma işleminde, basınç kırılmasından uzak kalması gerektiği dizayn şartnamelerinde belirtilmiştir. Bu sebeple laboratuarlarda bu konu üzerine çalışmalar çok dar bir çerçeveye içerisinde kalmıştır. Bununla beraber mühendislikte etkin tasarımların yapılabilmesi için tehlikeli ve tehlikesiz durumların bir bütün olarak incelenmesi gerektiği açıktır. Kaldı ki tüm betonarme yapı elemanlarında, kırılma türü ne olursa olsun göçme, basınç bölgesindeki betonun sınır birim deformasyona erişmesi ile meydana gelmektedir [1]. Diğer taraftan betonda çatlağın yayılmacı bir tarzda oluşu ve eleman boyutuna bağlı olarak göçme mekanizmasının değişmesi etkin dizaynların yapılmasına tam olarak izin vermemektedir. Ancak kırılma mekaniği prensipleri ile böyle bir probleme daha gerçekçi yaklaşımlar sağlanabilir.

Kırılma mekaniği temelde, malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yoğunluğunu artıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. İlk olarak 1920' lerde Griffith [2] tarafından ortaya atılmış ve II. Dünya savaşı sırasında meydana gelen feci mühendislik kazaları sonucu bu konuya olan ilgi artmıştır. 1950' li yıllarda metallere ve 1960' lı yıllarda betona uygulanan Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) kavramları ile bir çok mühendislik problemine çözüm getirilmiştir. Deneysel teorik alandaki gelişmeler, betonda neme ve zamana bağlı olarak mekanik sabitlerin değişimi ve bünyesel kusurlardan dolayı meydana gelen boyut etkisi LEKM kanunlarının betonda yetersiz olduğunu göstermiştir [3]. Bu amaçla araştırmacılar tarafından, betonun yüksek mertebeden heterojenliğini dikkate alan bir çok lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları ileri sürülmüştür [4, 5]. Bu yaklaşımların temelinde, çatlamış bir beton kesitte gerilme transferini mümkün kılan, kırılma süreci bölgesi varlığını dikkate alırlar. Yapı şartnameleri ve LEKM tarafından ihmal edilen bu bölge, metallerde plastik bölgenin yanında çok küçük olmasına karşın, betonda çok büyük yer işgal eder [4]. Diğer taraftan bu bölgedeki gerilmeler, metallerdeki plastik bölgeden farklı olarak sabit kalmayıp azalmaktadır. Davranış ve güvenliği olumsuz etkileyen bu gerilmedeki düşüşün sebebi büyük olasılık ile boyut etkisidir [6].



Son zamanlarda, beton/betonarmenin kırılma mekaniğinde boyut etkisi konusu, deneysel ispatının yanında teorik uygulamalarıyla birçok araştırmacı tarafından büyük ilgi görmektedir. Özellikle Bazant [7] tarafından geliştirilen ve lineer olmayan kırılma mekaniğinin temeli sayılan Boyut Etkisi Kanunu (BEK) ilk sıralarda yer almaktadır. Bununla beraber, BEK'nın Brezilya Silindir Yarma Deneyi ve direkt basınca maruz numunelere ait uygulamalarında bazı sıkıntıların ortaya çıkması sonucu kanun revizyonlara uğramıştır [8].

Boyutun dayanıma etkisi üzerinde bir çok çalışma yapılmıştır. Bazant [7], beton yapılarda kullanılabilecek Boyut Etkisi Kanununu (BEK) geliştirmiştir. BEK Bazant ve Pheppier [9] tarafından basit mukavemet halleri olan aksenal basınç, eğilme, kesme, burulma ve çekme deneylerinde uygulanmıştır. Fakat, yapılan deneylerin tamamında boyutu numune boyutu ile orantılı olarak değişen çentikli numuneler kullanılmıştır. Bazant BEK'yı geliştirirken çalışmalarını yine çentikli numuneler üzerinde yapmıştır. Kim v.d. [10], Brezilya yarma deneyinden faydalanarak elde ettikleri sonuçlardan Boyut Etkisi Kanunundaki noksanlıkları görmüşler ve BEK'da bazı değişiklikler yaparak Değiştirilmiş Boyut Etkisi Kanunu'nu (DBEK) elde etmişlerdir. Carpinteri [11], BEK ve DBEK yaklaşımlarındaki eksiklikleri görerek çatlak formunu fraktal geometri ile modellemiş ve temelde numunenin homojenlik derecesini esas alan Fraktal Boyut Etkisi Kanunu'nu (FBEK) geliştirmiştir. FBEK, gerçek yapı boyutunda DBEK yaklaşımına yakın sonuçlar vermesine karşın, küçük ölçeklerde BEK ve DBEK yaklaşımları ile taban tabana zıttır [12].

Deterministik yaklaşımlarda, boyut etkisinin formülasyonlarını elde etmek için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; herhangi bir teori olmaksızın, her bir problem için deneylerden elde edilmiş istatistiksel eğriler ve ikincisi de numunenin boyutu ile dayanımı arasında ilişki kuran teorik boyut etkisi kanunlarıdır. Birinci yöntem uygulama yönünden kesindir ve belirli bir problem türü için sadece sınır değişim aralığını verir. İkinci (teorik) yaklaşım ise laboratuvar şartlarında geçerliliğini ispatlamış ve bazı kabuller üzerine oturtulmuştur. Günümüzde laboratuvar ölçeğinde çakışan ancak diğer ölçeklerde birbirine zıt iki farklı boyut etkisi teorisi beton/betonarme yapılarda kullanılmaktadır [13].

Ugulamada betonarme sistemlerde; aksenal taşıyıcı olan kolonun temele oturduğu bölgelerde, beton ayaklar üzerindeki köprü giriş yataklarında ve bazı ağır yapı temellerinin aksenal taşıyıcı ile etkileşimi sonucu oluşan gerilme yatak gerilmesi olarak tanımlanır. Yatak gerilmesi özellikle yüksek dayanımlı betonların elde edilmesiyle daha fazla önem kazanmıştır. Yüksek dayanımlı betonlarla birlikte temel üzerine gelen yapı yükleri de artmaktadır. Temel elemanı düşük dayanımlı olduğu zaman üzerine gelen yük sonucunda oluşan enine gerilmeler temelin göçmesin sebep olmaktadır.

Bazı araştırmacılar, ACI Standardının betonun yatak dayanımının hesabındaki yetersizliği belirlenmiş ve yaptıkları deneysel ve teoriksel yaklaşımlarla konuyu analiz etmişlerdir. Fakat yataktaki betonun davranışı çok iyi bir şekilde açıklanamamıştır [14]. Bauschinger (taş yapılı malzeme) [15], Shealson[16], Meyerhof [17], Hawkins [18], Tung-Au [19], Tarığ ve diğ. [20], Perinçel [14] ve Niyogi [21, 22, 23] yatak dayanımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yapılan bu çalışmalar genel olarak beton bloklarda yatak dayanımı ile sınırlı kalmıştır. Yatak dayanımında betonun boyut etkisi tam olarak incelenmemiştir.

Genel olarak; geometriksel olarak benzer numunelerde nominal dayanım ile numune boyutu arasındaki negatif eğimli ilişki boyut etkisi olarak tanımlanır. Boyut etkisi sünek malzemelerde de görülmesine karşın, gevrek malzemelerde daha da belirgindir [6]. İlk olarak Weibull [24], araştırmalarında istatistiksel yollarla elde ettiği boyut etkisi kavramını ortaya atmıştır. Günümüzde bu amprik ifadelere oturtularak deterministik hale getirilmiştir.

Sunulan tez çalışmasında; her seri üç farklı boyutta numuneden olmak üzere toplam 22 seri numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Numuneler, boyut değişim aralığı 1:4 ve h/d oranı 1/1, 1/2 ve 1/3 olan kp, silindir ve kare kesitli prizmalardan hazırlanmıştır. Ayrıca maksimum agrega çapı olarak 4 mm, 8 mm ve 16 mm'lik agregalar kullanılarak karışımlar hazırlanmış ve beton dayanımı açısından da bir kıyaslamanın yapılabilmesi için basınç dayanımı yönünden farklı numuneler oluşturulmuştur. Hazırlanan numunelere elik levhalar vasıtasıyla uygulanan yükleme sonucu yatak dayanımları belirlenmiş, elde edilen sonuçlar BEK ve FBK ile analizleri yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen nominal dayanım ve numune boyutu arasındaki ilişki, dizayn formülleri ile karşılaştırılmış ve dizayn işleminde daha kullanışlı olması açısından, yk, betonun basınç mukavemeti, beton alanı ve yükleme alanına (yatak yüzey alanı) bağlı olarak ifade edilmiştir.

## 2. BETONDA KIRILMA MEKANİĞİ VE BOYUT ETKİSİ

Beton yapıların göçmesi, en büyük yüke ulaşmadan önce büyük çatlakların ve çatlama bölgesinin gelişmesi ile olur. Son elli yıldır temel kırılma mekaniği teorileri elde edildiği halde, henüz tasarım kırılma mekaniğine dayanmamaktadır. Kırılma mekaniği önceleri cam gibi homojen gevrek malzeme ile homojen gevrek-sünek metallere uygulanmıştır. Kaplan [25], ilk olarak kırılma mekaniğini betona uygulamış ve 1980 li yıllardan sonra hızlı bir gelişim göstermiştir.

Kırılma mekaniğinin beton yapı tasarımında kullanılması önemli yararlar getirir. Özellikle farklı boyutlu yapılar için aynı güvenliğe ulaşmak mümkündür. Bununla yapısal güvenlik ve ekonomi arttırılır. Kırılma mekaniği özellikle yüksek dayanımlı betonlar, lifli beton yapılar, çok büyük boyutlu beton yapılar, öngerilmeli yapılar, beton barajlar ve nükleer reaktör hücreleri gibi güvenliğin çok yüksek olduğu ve büyük felaketlere neden olabilecek yapılar için önemlidir.

Kırılma mekaniği, yapıda göçmenin yayılmasını göz önüne alan, mukavemete dayanan ve enerji kriteri kullanan göçme teorisidir. Uygulamada kırılma mekaniğinin kullanılması için beş neden vardır.

1. Çatlak oluşumu için enerji gereklidir: Fiziki bakımdan çatlağın başlaması gerilmeye bağlıdır. Gerçekte çatlak oluşumu için katının yüzey enerjisi ile tanımlanan "kırılma enerjisi" gereklidir. Bu yüzden enerji kriteri kullanılmalıdır. Fizikçiler için gerekli olan bu kriter tasarımcılar için gerekli değildir.

2. Hesapların bağımsızlığı: Herhangi bir teoride hesaplar, eleman boyutu ve koordinat seçimi gibi özelliklerden bağımsız olmalıdır. Bu özelliklere bağlı teori kabul edilemez. Beton tasarımının sonlu eleman analizinde kullandığı yaklaşım yayılı çatlak düşüncesidir. Bu yaklaşıma göre sonlu elemandaki gerilme, malzemenin  $f_c$  çekme mukavemeti ile sınırlıdır. Bu dayanıma erişildiğinde sonlu elemandaki gerilme azalmalıdır. Önceki uygulamalarda gerilme aniden sıfıra azalıp, düşey inmektedir. Fakat son zamanlarda gerilmenin tedrici olarak azaldığı, yani malzemenin uzama yumuşama davranışı anlaşılmıştır. Uzama yumuşamanın kullanıldığı sonlu eleman program sonuçları, önemli değişiklikler gösterip, elemana bağlı sonuçların yanlışlığını göstermiştir.

3. Akma platosunun olmayışı: Yük-Deplasman diyagramına dayanan, elastik ve plastik olarak iki tip yapısal göçme vardır. Plastik göçmenin tipik karakteristiği; yapının çeşitli parçalarının göçmesi, tek bir parametre ile orantılı, tek serbestlik dereceli olarak aynı anda gelişir. Bu göçmeler, Yük-Deplasman eğrisinde uzun akma platosu ile gösterilirler. Eğer Yük-

Deplasman eğrisinin böyle bir akma platosu yok ise göçme plastik değil yarı gevrektir (yada gevrek-sünek). Eğer burkulmadaki P-δ etkisi gibi önemli geometrik kusurlar yok ise kırılma, çatlama ve diğer hasarlar yüzünden malzeme yumuşaması ile platonun yok olup, göçme işlemi tek serbestlik dereceli sistem olarak gelişmez.

4. Enerji yutma kapasitesi ve süneklilik: Yük-Deplasman eğrisinin altındaki alan göçme sırasında yapının yuttuğu enerjiyi verir. Bu enerji özellikle dinamik yükler için önemlidir ve yapının sünekliliğini verir. Plastik limit analiz pik yükün azalması ve yutulan enerji hakkında bilgi vermez. Farklı bir kırılma mekaniği yaklaşımı gereklidir.

5. Boyut etkisi: Kırılma mekaniği kanunlarının kullanımı için en önemli nedenlerden biridir [26].

## 2.1 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM)

İlk olarak 1921'de Griffith'in meşhur makalesi ile LEKM'nin temelleri atılmıştır. Griffith [2], cam lifler üzerine yapmış olduğu deneylerde, teorik mukavemetin, elastisite modülünün %10'u ( $E/10$ ) civarında olduğunu ve malzemenin gerçek mukavemeti arasındaki bu uçurumun içindeki kusurlardan kaynaklandığını tespit etmiştir. Ancak II. Dünya savaşı ve sonrasında ölümcül mühendislik facialarının meydana gelmesine kadar bu konu üzerine pek durulmamıştır. Irwin [27], seramik lifler üzerine yapmış olduğu deneylerde teorik mukavemetin  $E/10$  civarında olmadığını görmüş ve teoriyi metalleri de içine alarak genişletmiştir. Daha sonra sırasıyla açılma, kayma ve burulma durumlarına karşılık gelen üç elemanter mod I, mod II ve mod III (Şekil 2.1) genel kırılma modlarını ve bunların kombinezonundan oluşan karışık modun kanunlarını ve K adı verilen gerilme şiddet çarpanlarını ortaya koymuştur [28].

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a_0}$$

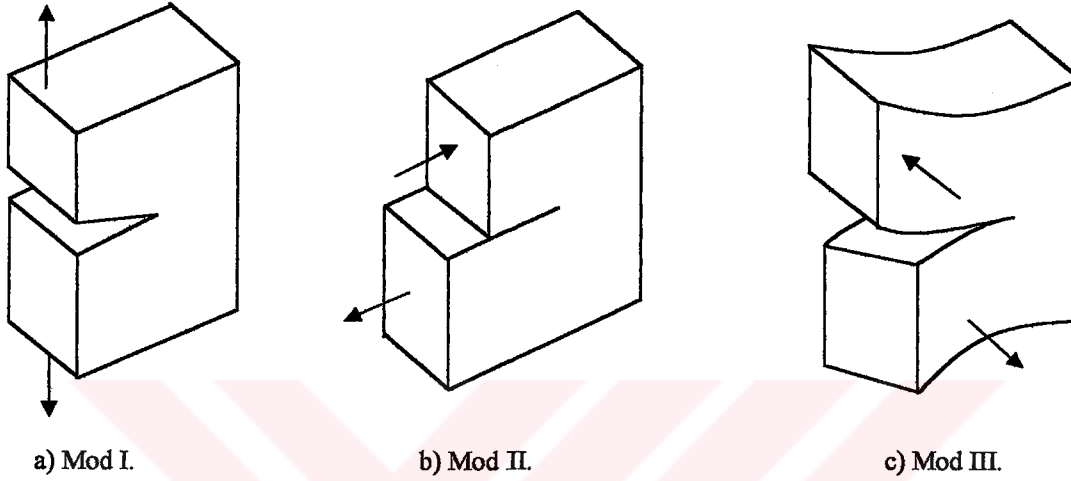
$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a_0} \quad (2.1)$$

$$K_{III} = \tau \sqrt{\pi a_0}$$

Burada;  $\sigma$ : malzemeye uygulanan çekme gerilmesi,  $\tau$ ; kayma gerilmesi ve  $a_0$ , yarı çentik uzunluğudur.

Gerilme şiddet çarpanı, geometriye ve yükleme durumuna bağlı bir sabittir. Yani her malzeme eşit 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 adını alır ve her malzeme için farklı bir değer alır. Mod I durumu için a numune genişliği, d numune karakteristik boyutu ve  $P_u$  kırılma yükü olarak alınırsa, nominal dayanım  $\sigma_N = P_u / (a \cdot d)$  olmak üzere kritik gerilme şiddet çarpanı (2.2) ifadesindeki gibidir [28].



Şekil 2.1 Kırılma modları.

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{af} \left( \frac{a}{d} \right) \quad (2.2)$$

Ancak, çatlakın başlangıcı ve yayılma hızı mühendislik açısından çok daha önemli olduğundan, Irwin,  $G_C$  çatlak yayılma hızı kavramını ortaya atmış ve  $K_C$  ile arasındaki bağıntıyı şu şekilde vermiştir:

$$G_C = \frac{K_C^2}{E} \quad (2.3)$$

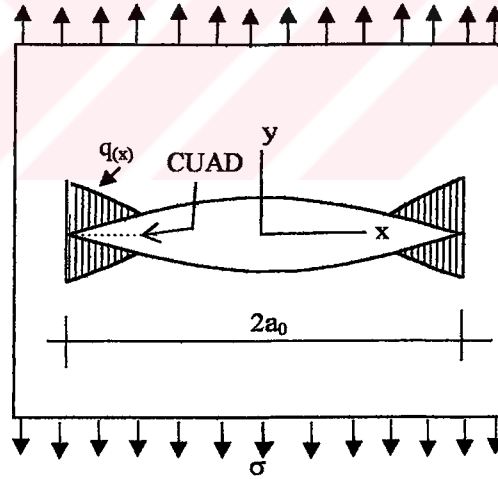
Irwin [29], çatlakın hemen ucunda kırılma süreci bölgesi adı verilen bölgede gerilme dağılımının sabit ve değerinin malzemenin akma dayanımına eşit olduğunu kabul etmiştir. Kırılma süreci bölgesinin uzunluğunu ise şu şekilde ifade etmiştir;

$$r_p = \frac{1}{\pi} \frac{K_{IC}^2}{f_t^2} = \frac{1}{\pi} \frac{EG_C}{f_t^2} \quad (2.4)$$

Burada;  $f_t$  malzemenin çekme dayanımı, E: elastisite modülüdür. Barenblatt [30], çatlak ucundaki bu bölgedeki gerilme dağılımının Irwin'in aksine  $q(x)$  gibi bir fonksiyon olduğunu kabul edip, matematiksel olarak probleme yaklaşmıştır (Şekil 2.2). Dugdale [31], Billby, Cotrell ve Swindeni [32], Barenblatt'ın teorisini ince elasto-plastik levhalara uygulamışlar ve çatlak ucunda Çatlak Ucu Açılımı Deplasmanı (ÇUAD) terimini ortaya atmışlardır. ÇUAD, kritik bir değeri olan  $W_C$ 'ye ulaştığında ise, çatlak anı olarak ilerleyeceğini ve bunun bir malzeme sabiti olarak kullanılabileceğini ispatlamışlardır. Ayrıca  $G_c$  ile  $W_C$  arasındaki ilişkiyi şu şekilde tanımlamışlardır:

$$G_c = \sigma_y W_C \quad (2.5)$$

Burada  $\sigma_y$ , malzemenin akma dayanımıdır.



Şekil 2.2 Barenblatt'ın kohezif çatlak modeli.

Yukarıda tanımlanan bütün bu temel kavramların ortaya konmasından günümüze kadar kırılma mekaniği özellikle metaller ve seramikler konusunda dizayn şartnamelerine girmiştir. Bunlara ilave olarak, günümüz malzeme bilimi gevrek kırılmadan uzak ve yüksek mukavemetli malzemeler üretmek için hala deneysel ve teorik düzeyde araştırmalara devam etmektedir. Kırılma mekaniği betona ilk defa 60'lı yıllarda uygulanmış ve 80'li yıllarda araştırmalara büyük hız verilmiştir [28].



## 2.2 LEKM'nin Betona Uygulanması

LEKM'nin betona ilk uygulamaları: Kaplan [25], Glucklich [33], Romualdi ve Batson [34], Zaitsev [35], Swamy [36], tarafından yapılmış ve 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 [37], Shah ve McGarry [38], Walsh [39], Swamy ve Rao [40], Higgins ve Bailey [41], Mindess ve Nadeau [42], Walsh [43], Gjorv vd. [44], Rossi vd. [45], tarafından yapılan araştırmalarda, deney numunesinin şekli, boyutları ve başlangıçtaki çentik uzunluğuna bağlı olarak  $K_{Ic}$  değerinin sürekli olarak değişmesinden dolayı bu sabitin beton için tutarlı bir malzeme sabiti olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca numune kalınlığı ve çentik genişliğinin,  $K_{Ic}$  üzerindeki etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir.

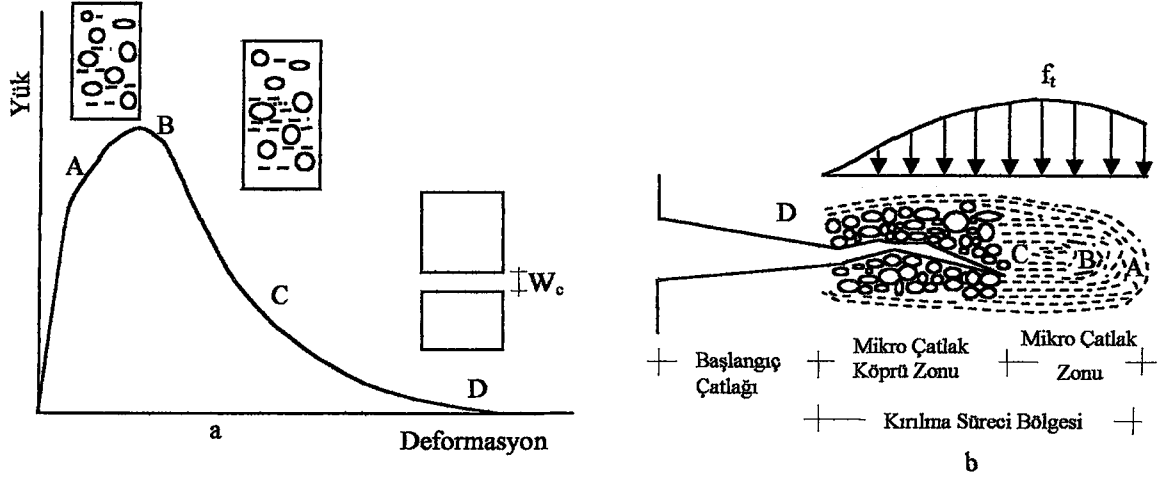
Ancak maksimum agrega çapının ( $d_{max}$ ) numune karakteristik boyutuna oranının küçük olduğu durumlarda ( $\sim 0.01$ ) davranışın LEKM ye daha çok yaklaştığını ve  $K_{Ic}$  nin sabit bir değer etrafında çok küçük salınımlar yaptığı Ohgishi vd. [46] ve Tian vd. [47], tarafından tespit edilmiştir.

Betonun heterojen yapısı, kırılma mekaniğinin temel kavramlarına tam olarak uygunluk göstermediği açık olarak görülmektedir. Bu sebeple ilk defa Nakayama [48], Tattersall ve Toppin [49], tarafından seramikler üzerine uygulanan kırılma enerjisi yaklaşımından hareketle Hillerborg vd. [4], Hillerborg [50, 51], ve RILEM [52], betonun  $G_f$  kırılma enerjisinin ölçümünde 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 [53]. Ancak direkt çekme deneyini stabil olarak yapmak çok zordur ve sadece çok iyi donatılmış laboratuvarlarda 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[28].

## 2.3 Betonun Nonlinear Kırılma Teorisi

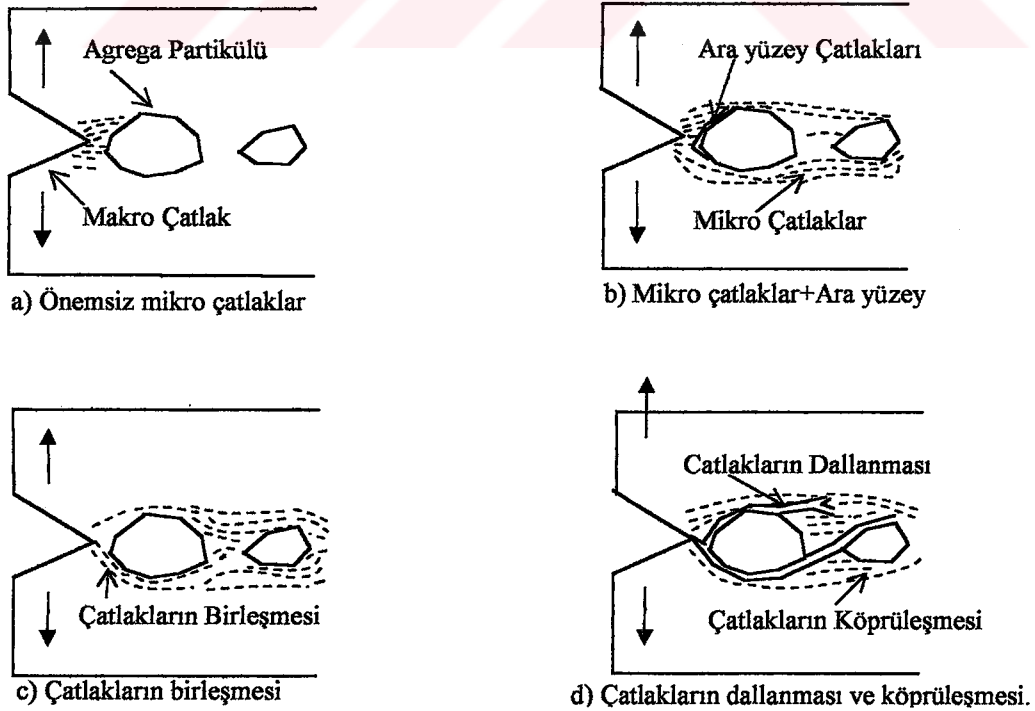
Betonun kırılma süreci bölgesi onun nonlinear davranışının açıklanmasında en önemli kavramdır. Şekil 2.3a da çekmeye maruz çentikli bir numunenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi görülmektedir. Burada AB pik yük öncesi nonlinear bölge, BC mikro çatlaklar sonucu oluşan

çekmede yumuşama bölgesini temsil etmektedir. CD kısmı ise bu eğrinin kuyruk kısmı olup agrega kilitlenmesi ve yüzeyler arası sürtünmeden dolayı meydana gelen bölgedir.



Şekil 2.3 a) Çekmeye maruz bir numunenin yük-deformasyon diyagramı,  
b) Kırılma süreci bölgesi [28].

Irwin [54], metalik ve seramik malzemeler için tanımladığı kırılma süreci bölgesi beton için eğrinin BCD kısmında gelişir (Şekil 2.3b). Bu zon ilk önce makro çatlak yanındaki agregayı saran matris içerisindeki önemsiz mikro çatlaklarla başlar (Şekil 2.4a). Daha sonra agrega çevresindeki zayıf bölgede büyük çatlaklar oluşur (Şekil 2.4b).



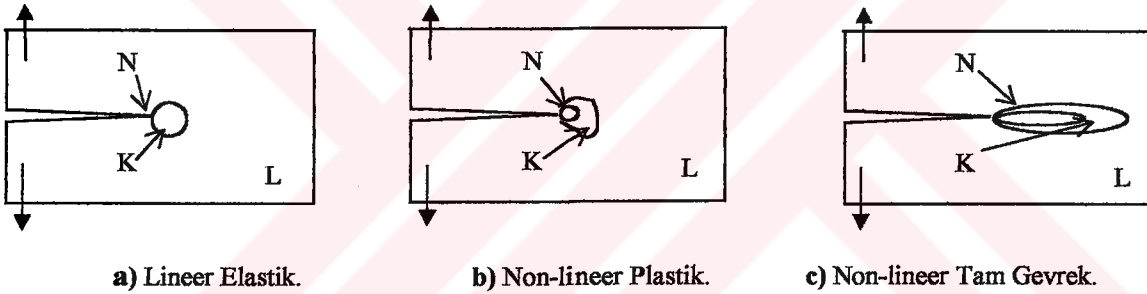
Şekil 2.4. Kırılma süreci bölgesinin gelişimi [28].



Bu çatlaklar matris içerisindeki mikro çatlaklarla birleştikten sonra makro çatlığa erişir (Şekil 2.4c) ve sonunda oluşan bu çatlaklar numune uzayı içerisinde birbirini keserek köprüler kurar ve numuneyi parçalarlar (Şekil 2.4d). Beton için Gettu ve Shah [55], Irwin'in denklem (2.4) deki tanımına benzer olarak kırılma süreci bölgesi uzunluğunu şu şekilde tanımlamışlardır:

$$I_p = \frac{EG_F}{f_t^2} \quad (2.6)$$

Bununla beraber kırılma süreci bölgesinin uzunluğu, malzemenin granüler yapısı ile yakından ilgilidir. Örneğin; cam gibi tam gevrek bir malzemede 10 mm (Bache [56]) olan bu zon normal beton için 200-500 mm (Hillerborg [50]) ve  $d_{max}=38$  mm olan baraj betonlarında 700 mm (Brühwiller vd., [57]) mertebesinde olmaktadır. Bu değişim çeşitli malzeme sınıfları için Şekil 2.5 de görülmektedir [28, 58].



Şekil 2.5 Değişik malzeme sınıfları için L:lineer, N:non-lineer ve K:kırılma süreci bölgeleri

#### 2.4. Boyut Etkisi Teorisi

Çok büyük numuneler için beton yapıların nominal çekme dayanımı yaklaşık olarak sabittir, oysa boyutun değişmesiyle bu etki de değişmektedir. Yani mikro derecede nominal çekme mukavemeti yapısal boyutun azalmasıyla artar. Bu ilk olarak Griffith [2] ve Weibull'un [24], yaklaşımlarınca kısmen açıklanmıştır. Griffith [2], yapmış olduğu deneylerde; cam liflerinin dayanımının elemanter dayanımından çok daha büyük olduğunu tespit etmiştir. Bunun sebebini ise cam numune yüzeyindeki kusurların boyutu ve heterojenliğine bağlamıştır. Weibull [24] ise hiçbir malzemenin kusursuz olmayacağını savunmuş ve istatistiksel tabanlı iki boyut etkisi teorisi geliştirmiştir. Teorisi uzun süre malzemelerin emniyet faktörlerini tayin etmek için kullanılmış, ancak yapılan deneysel

çalışmalarda, teorinin beton gibi heterojen malzemelere uygulanmasında yetersiz kaldığı gözlenmiştir [59, 60]. Daha sonraları araştırmacılar tarafından, heterojen malzemelere uygulanabilecek deterministik yaklaşımlar önerilmiştir.

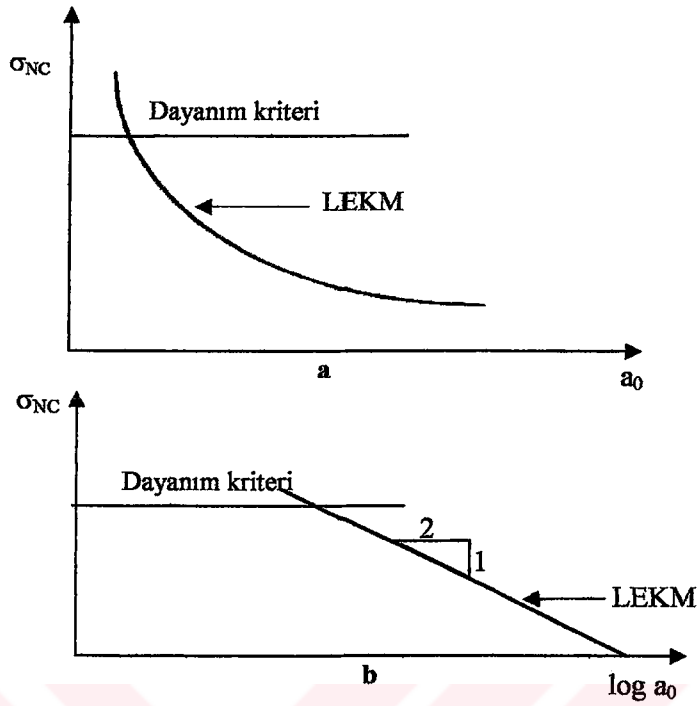
Deterministik yaklaşımlardan birinci yöntem; uygulama yönünden kesin ve belirli bir problem türü için sadece sınır değişim aralığını veren ve herhangi bir teori olmaksızın, her bir problem için deneylerden elde edilmiş istatistiksel eğrilerdir. İkinci (teorik) yaklaşım ise laboratuvar şartlarında geçerliliğini ispatlamış ve bazı kabuller üzerine oturtulmuş olan numunenin boyutu ile dayanımı arasında ilişki kuran, teorik boyut etkisi kanunudur [61].

Yapı elemanının artan boyut ile dayanımında gözlenen azalmalar yapısal dizayn için bir kaygı oluşturmaktadır. Malzeme dayanım parametreleri, gerçek yapı boyutuna göre daha küçük numuneler kullanılarak elde edilmektedir. Fakat Laboratuvar ortamında elde edilen dayanım değerleri, uygulamada gerçek yapısal değerlerle uyumlayabileceği göz önüne alınmalıdır [62].

Beton yapılarda göçme; çatlak oluşumu ve çatlak gelişiminin bir sonucu olarak meydana gelir. Betonda çekme kırılması, Lineer Elastik Kırılma Mekanizmasının (LEKM) kullanılmasıyla modellenir ve bu şekilde boyut artışı ile dayanımdaki azalmanın açıklanması mümkün olur. Fakat diğer bir görüşe göre LEKM'nin beton gibi gevrek malzemelere uygulanamayacağıdır. Betondaki karakteristik kırılmaya değişik Non – Lineer kırılma mekaniği yaklaşımları önerilmiştir. Bu yaklaşımlar; Kohesiv Çatlak Modelleri (Hillerborg v.d., [4], Bazant ve Oh [63], Yon v.d., [64]) ve efektif çatlak modelleri (veya eşdeğer elastik) (Bazant [7], Jenq ve Shah [65], Karihaloo ve Nallathambi, [66], Bazant ve Kazemi, [67]) gibi sınıflandırılmıştır. Kırılma mekaniğinde gevrek bir malzemenin gerilme dayanımı; yapısında büyük ve zararlı kusurların gelişip kritik değerlere ulaştığı zaman belirlenir. Bu kusurun boyutuna “ $a_0$ ”, nominal gerilme dayanımı da  $\sigma_{NC}$  ile gösterilirse, bu değerler arasındaki orana bakıldığında  $\sigma_{NC}$  ile  $\sqrt{a_0}$  arasında ters orantı olduğu görülür. Bu bağıntı Şekil 2.6a'da gösterilmiştir. Şekil 2.6b'de ise boyut etkisi kanuna göre bu değerlerin  $-1/2$  oranında olduğu gösterilmiştir [7]. Ayrıca çok büyük boyutlardaki numuneler için beton dayanımının sifira yaklaştığı belirlenmiştir. Kim ve Eo [10], Bazant'ın teorisindeki aksaklıkları görerek regregasyon analizinden elde ettikleri boyuttan bağımsız bir gerilme ilavesiyle boyut etkisi kanununda değişiklik yapmışlardır [62].

Bazant'ın boyut etkisi kanununa (BEK) bakıldığında; yalnızca çentikli numuneler için sağladığını ve çentik boyutu ile yapısal boyut arasında sabit bir oran olduğunu kabul eder. Bazı deneysel geometriler için özel durum vardır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
BÖLGESEL İZMİR MERKEZİ



Şekil 2.6 Numune boyutuna karşılık gelen kritik nominal gerilmenin LEKM'ye göre belirlenmesi ( Not: Şekil 2.6a'da  $a_0/d$  oranı sabit ise " $a_0$ " yerine " $d$ " alınabilir. Şekil 2.6b'de geometriksel benzer numunelerde  $\log a_0$  yerine  $\log d$  alınabilir.)

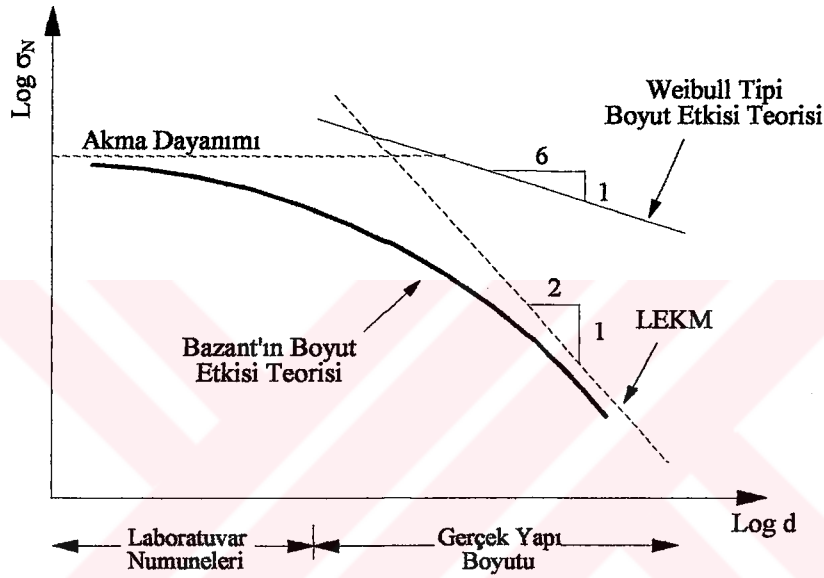
Örneğin; Brezilya yarma deneyi BEK'nın yetersizliğine bir delildir. Carpinteri ise Fraktal Boyut Etkisi Kanunu (FBEK) kabulünde hasar derecesinden yaklaşmıştır. FBEK bilogaritmik eğrinin konkavlığını kabul eden en uygun metottur ve BEK ile bu noktada taban tabana zıttır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en uygun yolun bu olduğu belirlenmiştir. FBEK'ya göre nominal dayanım, boyut sıfıra yaklaştıkça sonsuza doğru gitmekte ve sabit bir değere yaklaşmaktadır [11].

#### 2.4.1. Boyut Etkisi Kanunu (BEK)

Bazant, pik yükte çatlakın ilerlemesi sonucu serbest kalan şekil değiştirme enerjisi ile çatlama beton yüzey tarafından absorbe edilen enerji arasındaki basit denge bağıntısını boyut analizi yardımı ile kurarak kendi adı ile anılan, Boyut Etkisi Kanununu (BEK) geliştirmiştir. Lineer olmayan kırılma mekaniğinin temeli olarak kabul edilen kanun, aynı geometriye sahip benzer numunelerde, nominal dayanım ( $\sigma_N$ ) ile karakteristik boyut ( $d$ ) arasındaki ilişkiyi

$$\sigma_N = Bf'_i (1 + \beta)^{-1/2} , \quad \beta = \frac{d}{\lambda_0 d_{max}} \quad (2.7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $f'_i$ , betonun çekme dayanımı,  $d_{max}$  maksimum agrega çapı ve  $B$ ,  $\lambda_0$  ampirik sabitlerdir. Bu ampirik sabitler, İfade (2.7) üzerine yapılan bir dizi dönüşümden sonra en küçük kareler yönteminin uygulanması ile veya direkt olarak, lineer olmayan eğri uydurma algoritmaları ile bulunabilir [9].



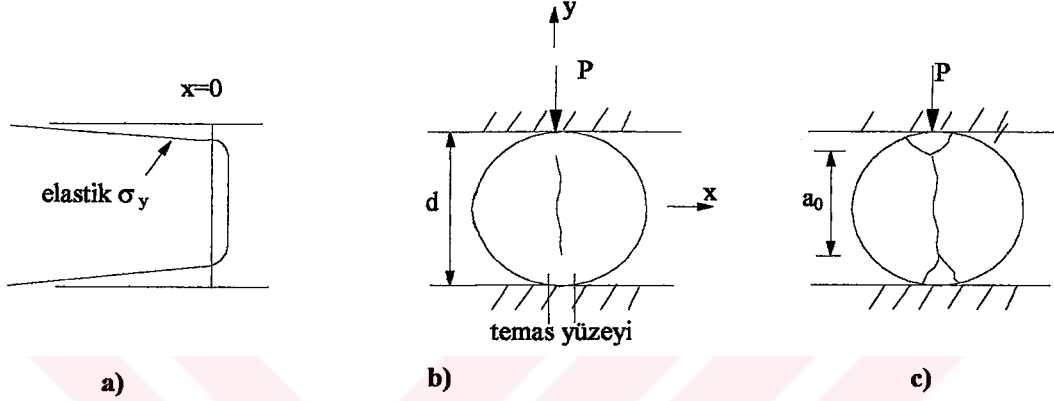
Şekil 2.7. Yarı-gevrek malzemeler için Boyut Etkisi Kanunu (BEK)

Denklem (2.7) de,  $\beta$  gevreklik sayısı olup kırılmanın şeklini belirler. Şekil 2.7. de görüldüğü gibi,  $\beta < 0.1$  olduğu değerlerde,  $\sigma_N$  sabit bir değere asimtot olur. Bu durumda dayanım kriteri geçerli olur ve malzemede sünek kırılma gözlemlenir. Numune boyutunun çok büyük olduğunda ( $\beta > 10$ ) nominal dayanım,  $d^{1/2}$  ile orantılıdır. Bu durumda Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) kriteri geçerli olur ve malzeme gevrek tarzda kırılır. Bununla beraber uygulamadaki mühendislik yapıları, bu iki limit durum arasında kalmaktadır. BEK, dayanım kriteri ile LEKM arasında bir geçiş eğrisini temsil etmektedir ( $0.1 \leq \beta \leq 10$ ) [8].

#### 2.4.2. Değiştirilmiş Boyut Etkisi Kanunu (DBEK)

BEK kabullerine göre, malzemede oluşan çatlaklar herhangi bir şekilde gerilme karşılayamazlar. Fakat bir çok deneysel sonuçlar göstermiştir ki, ön çatlaklar dışında büyük çatlaklar dahi bir miktar gerilme karşılar. Hasegawa vd. [68], yaptıkları silindir yarma deneyi

sonucunda nominal dayanımın numune boyutunun atmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Ancak belli bir boyuttan sonra bu azalmanın tamamen durduğunu ve asimtotik bir değere yaklaştığını belirlemişlerdir. Bu sonuçtan hareketle Bazant ve Kazemi , deneyleri tekrarlamışlar ve bu durumun, numunelerde göçme anında oluşan mekanizmaya bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır [58, 69].

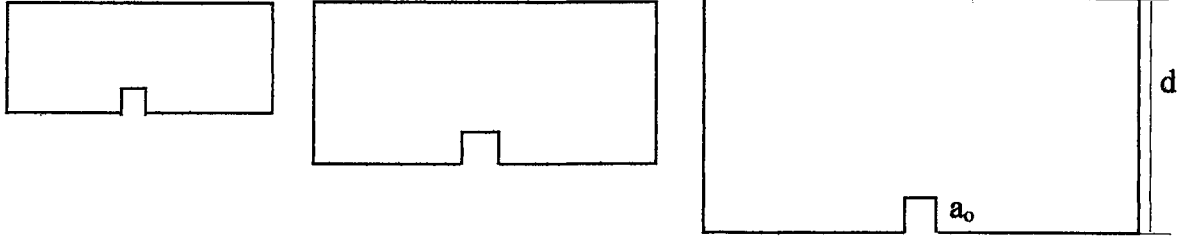


Şekil 2.8. Silindir yarma deneyi detayları

Şekil 2.8 dikkatle incelenirse, silindir yarma deneyinin, klasik mukavemette iki cismin temas problemine benzediği görülmektedir. Temas probleminde, yükleme düzlemine paralel olarak, yükleme levhasının hemen altında basınç gerilmeleri ve orta bölgede ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir (Şekil 2.8a). Bunun doğal sonucu olarak göçme, yükleme levhasının hemen altında kama şeklinde bir çatlak gelişimi ve aksel yönde meydana gelen bir yarıma çatlakıyla meydana gelmektedir (Şekil 2.8 b,c). Ancak burada temel sorun, yükleme düzlemine paralel olarak meydana gelen basınç ve çekme gerilmelerinin dağılım bölgesinin, numune çapı ile orantılı olarak değişmemesidir. Yani Şekil 2.8c de tanımlanan  $a_0/d$  oranı numune boyutunun artmasıyla, büyümektedir. Buna bağlı olarak, küçük boyutlarda, yarıma çatlakına sebep olan yük, kama şekilli bölgenin sürtünme sıyrılmasına sebep olan yükten çok büyük olmaktadır. Diğer taraftan, büyük boyutlarda, yarıma göçmesine sebep olan nominal dayanım, kama yüzeyinde meydana gelen içsel sürtünme gerilmelerinden çok küçük olmaktadır. Dolayısıyla belirli bir boyuttan sonra, gevrek davranıştan tekrar sünek bir davranışa geçiş gözlenmektedir. Bu durumda, bir üst limitin yanında (Şekil 2.7) boyut etkisi kanununa bir alt limitin eklenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım aynı zamanda, özellikle de bu tür çatlakların gözlemlendiği basınç etkisine maruz sistemlerde de geçerlidir [8].

Ayrıca deneysel verilere destek olarak, son zamanlardaki literatürlerde Bazant'ın Boyut Etkisi Kanununun yetersizliğini gösteren bazı teoriksel açıklamalarda getirilmiştir. Tang v.d.

[62], BEK bakıldığı zaman esas uyumsuzluğun özel durumlar dışında temelde olduğunu göstermişlerdir. Bazant formüllerini yalnızca çentikli numunelerden elde etmiştir. Şekil 2.9’da gösterildiği gibi, gerilme değerlerini çentik boyutu ( $a_0$ ) ile yapısal boyut ( $d$ ) arasındaki oranın etkilediğini kabul etmiştir.



Şekil 2.9 : Bazant'ın hipotezi :  $a_0/d = \text{sabit}$

Kim v.d. [10], çentiksiz numunelerde karakteristik kusur boyutu  $a_0$ 'nın farklı etkilere sebep olduğunu kabul ederek, 2.7. denklemindeki  $\lambda_0$  parametresini  $a_0/d$  oranının monoton olarak azalan bir fonksiyonu olarak almışlardır. Böylece numunenin karakteristik boyutunun artışı gibi,  $\lambda_0$  değerinde geniş aralıkta değişen değerlerini elde etmişler ve denklemi aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır;

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{\left(1 + \frac{d}{f\left(\frac{a_0}{d}\right) d_{\max}}\right)^{1/2}} \quad (2.8)$$

Denklem (2.8) sadece ön çatlak oluşturulmuş numunelerde değil aynı zamanda çatlak oluşturulmamış normal numuneler içinde geçerlidir. Ayrıca, Boyut Etkisi Kanunuyla elde edilen çok büyük dayanım değerlerini düşük değerlere indirmeyi sağlamıştır. Fakat (2.8) denkleminde  $f(a_0/d)$  fonksiyonundan tam bir sonuç almak çok zordur. Bu sebeple daha uygun bir hale getirmek için Kim ve Eo [10] ve Bazant [69], tarafından beton silindirlere Brezilya Yarma deneyinden elde edilen sonuçlardan ve ampirik değerler yardımıyla DBEK elde etmişlerdir. Bu da zaten BEK'nın yetersizliğine tam bir kanıttır. (2.9) denkleminin kullanılmasıyla sonsuz yapısal boyutların çekme dayanımının sıfırdan farklı gerçekçi bir asimtotik değeri elde edilmiştir

$$\sigma_N = Bf'_i (1 + \beta)^{-1/2} + \theta f'_i \quad (2.9)$$

Burada  $B$  ve  $\theta$  ampirik sabitlerdir. Bu yaklaşım, Değiştirilmiş Boyut Etkisi Kanunu (DBEK) olarak adlandırılmaktadır [8].

Diğer taraftan yapay sinir ağları ile yapılan çalışmalar, deneysel verilerden elde edilen boyut etkisi eğrilerinin DBEK'a uygunluğunu doğrulamıştır [70].

Denklem (2.9) daki ampirik sabitler lineer olmayan eğri uydurma algoritmaları ile bulunabilir. Bununla beraber  $\lambda_0$  sabiti, bir çok uygulamada problemin durumuna göre 2-3 arasında sabit olarak alınmıştır [71].

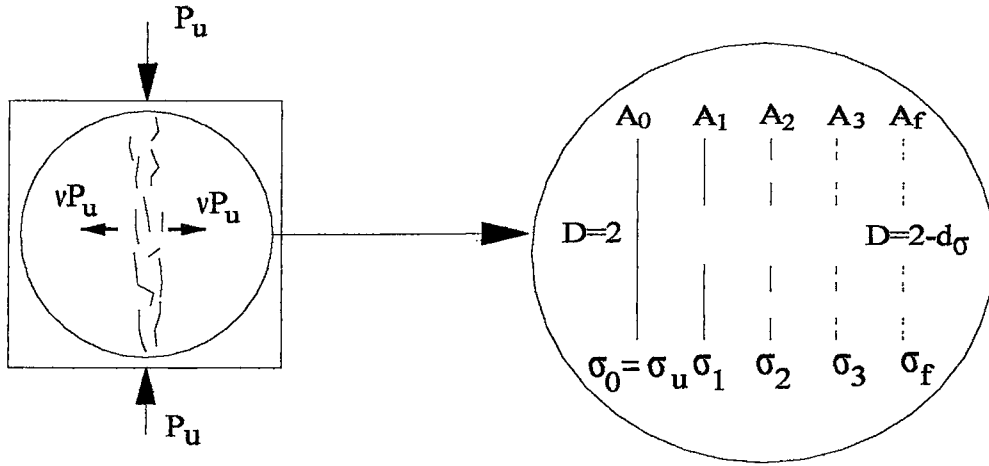
#### 2.4.3. Fraktal Boyut Etkisi Kanunu (FBEK)

Carpinteri [11], maksimum yükte çatlak yüzeyinde meydana gelen hasarı, fraktal geometri ile modelleyerek, boyut etkisi kavramına geometrik olarak yaklaşmıştır. İlk olarak Mandelbrot [72] tarafından kullanılan fraktal kavramı, sonsuza kadar kendini tekrarlayan iç içe geçmiş şekiller olarak tanımlanabilir. Bu tür bir geometrik yaklaşımda boyutlar Öklid geometrisindeki gibi tamsayılarla değil, kesirli sayılarla ifade edilir.

Fraktal teoriye göre; yük altında bir beton numunede, gerilme transferini sağlayan kesitin, Şekil 2.11'de basınç yüklemesine maruz bir beton numunede olduğu gibi, (ki bu çalışmadaki numuneler bu tip yüklemeye maruzdur) Cantor kümesine benzediği kabul edilir. Kesitin fraktal boyutu  $1 < D \leq 2$  olmak üzere  $D = 2 - d\sigma$  şeklinde ifade edilir. Burada  $d\sigma$  çatlaklar ve boşluklar sebebi ile enkesitteki zayıflamayı göstermektedir ( $0 \leq d\sigma < 1$ ). Carpinteri ve Brown [37] un çalışmalarını dikkate alarak gerilme transferini sağlayan kesitin fraktal boyutunu 1.5 olarak sınırlandırmıştır ( $d\sigma = 0.5$ ). Ancak gerilmedeki bu kesirli boyut çok dar bir alanda, yani mikroskopik ölçekte geçerli olmaktadır. Dolayısıyla yapı boyutu arttıkça (makroskopik ölçekte) bu fraktal boyutlar öklid geometrisindeki tamsayı boyutlara yaklaşmaktadır. Carpinteri, bu durumu homojen davranış olarak tanımlamıştır [73].

Fraktal boyuttaki gerilme kavramı, yine fraktalların kendini tekrarlama özelliğinden faydalanılarak elde edilebilir. Bunun için fraktal ve öklid geometrisinde değişmeyen global parametrelerden yararlanılır.





Şekil 2.10. Pik yükte hasar gören bölgenin topolojisi

Maksimum gerilmenin fraktal boyuttaki ifadesi boyut analizi yardımıyla

$$[\sigma_u^f] = [F][L]^{-(2-d\sigma)} \quad (2.10)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada  $[F]$  yük,  $[L]$  uzunluk boyutudur. Denklem (2.10) daki yük boyutu, enine şekil değiştirmeden dolayı oluşan eşdeğer yatay çekme yükü  $vP_u$  (Şekil 2.11) şeklinde global bir parametre olarak almırsa

$$vP_u = \sigma_u^0 A_0 = \sigma_u^f A_f \quad (2.11)$$

öklid geometrisi ile fraktal geometri arasında denge kurulabilir (burada  $0$  indisi öklid rejimini,  $f$  indisi fraktal rejimi göstermektedir).  $d$  Kesitin karakteristik boyutu olmak üzere,  $A_0 \propto d^2$  makro ölçekte alan,  $A_f \propto d^{2-d\sigma}$  mikro ölçekte alanı göstermektedir. Denklem (2.11) den

$$\sigma_u^f = \sigma_u^0 d^{d\sigma} \quad (2.12)$$

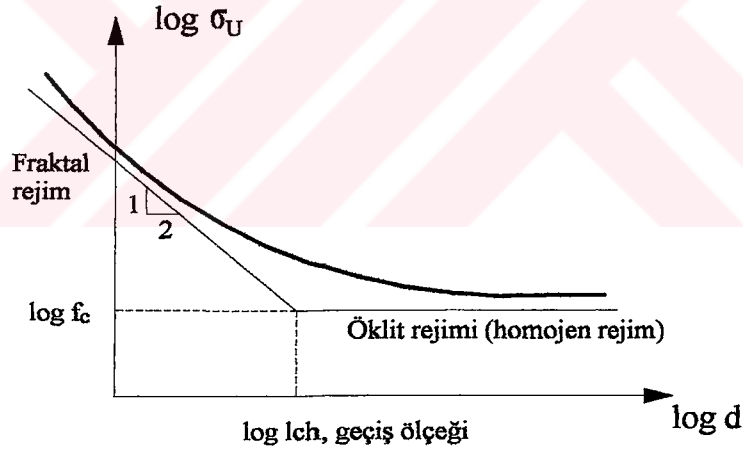
elde edilir. Denklem (2.12) mikro ölçekte geçerli olduğunda pratikte kullanımı mümkün değildir. Bununla beraber hangi durumlarda fraktal rejimin veya öklid rejiminin kullanılacağı önemlidir. Bu amaçla Carpinteri, bu iki rejim arasındaki geçiş kriterini karakteristik içsel uzunluk adını verdiği ampirik  $lch$  parametresine bağlamıştır.  $lch$  parametresinin yapı boyutu  $d$  ye oranı davranışı belirlemektedir. Bu oran küçüldükçe (yapı boyutu arttıkça) yapıda homojen



davranış, oranın azalması ile (küçük yapılarda) fraktal davranış gözlemlenir. Brown sınırları ve denklem (2.12) dikkate alınırsa fraktal teoriye göre gerilmedeki boyutun tesirinin analitik formu

$$\sigma_u = f_c \sqrt{1 + \frac{lch}{d}} \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\sigma_u$  nominal dayanım (maksimum yükün kesit alanına oranı)  $f_c$  sonsuz boyuttaki bir numune için nominal dayanım ve  $lch$  malzemenin içsel uzunluğudur. Şekil 2.12 de denklem (2.13) logaritmik ölçekte görülmektedir. Burada fraktal rejimdeki  $\frac{1}{2}$  lik eğimler Brown sınırlarını ifade etmektedir. Denklem (2.13) deki ampirik sabitler, formül üzerine yapılacak olan bir dizi dönüşümden sonra uygulanacak olan, en küçük kareler yöntemi ile veya direkt olarak, lineer olmayan eğri uydurma algoritmaları ile bulunabilir [13,74]. Carpinteri,  $lch$  in malzemenin mikro yapısına, yani betondaki maksimum agrega çapına bağlı olduğunu kabul etmektedir [73].



Şekil 2.11. Fraktal Boyut Etkisi Kanunu: logaritmik diyagram

#### 2.4.4. Boyut Etkisi Üzerine Mevcut Çalışmalar

Boyut etkisi üzerine literatürde bir çok çalışma mevcuttur. Genel olarak bakarsak bunlar iki ana grupta toplanmıştır. Birinci grupta Bazant'ın BEK ve Kim ve Eo'nun DBEK , ikinci grupta ise Carpinteri'nin FBK üzerine yapılmış çalışmalardır.

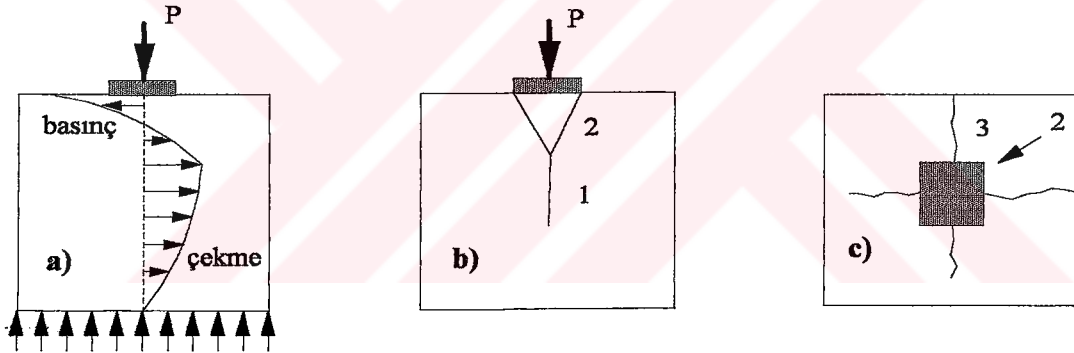
Birinci grup yaklaşımlar içerisinde beton için, temel kırılma modları Bazant ve Pfeiffer [9] (Mod I ve Mod II) ve Bazant ve Prat [75] (Mode III) ve Tokatly ve Barr [76] (Mode III)

tarafından incelenmiştir. Bunun yanında Brezilya silindir yarma deneyinde boyut etkisi [69], boyuna donatılı kirişlerin kesme göçmesinde boyut etkisi [77], beton, kaya ve metallerin kırılmasında boyut etkisi [78], beton silindir numunelerde çift zımbalama deneyinde boyut etkisi [79], donatısız beton borularda boyut etkisi [80], gevreklik katsayısı ve boyut etkisinden kırılma enerjisinin belirlenmesi [9], çekmedeki betonun kırılma mekaniği ve boyut etkisi [81], normal ve yüksek dayanımlı betonların silindir basınç dayanımında kürenin ve boyutun etkisi [82], boyut etkisi [60], betonun basınç-eğilme mukavemetinde boyut etkisi [71], betonarme yatak mukavemetinde boyut etkisi [8], çalışmaları verilebilir. Ayrıca betonarme için, öngerilmeli beton kirişlerde boyut etkisi [83], diyagonal kesme göçmesinde agreganın ve etriyenin boyut etkisi [84], Çekip-çıkarma (Pull-out) deneyinde boyut etkisi [85], Etriyesiz betonarme kirişlerde boyut etkisi [86,28,13,1], Eksenel yüklü kolonlarda boyut etkisi [87], Eksenel yüklü fretli kolonda boyut etkisi [88], kare prizmatik betonarme kirişlerde burulma mukavemetinde boyut etkisi [89] gibi çalışmalar yapılmıştır.

İkinci grup çalışmalarda ise araştırmalar sınırlı olmakla beraber, betonda mode I durumunun incelendiği [90], multifractal bir yaklaşımda beton numunelerin çekme dayanımının güvenilirlik derecesi [91], kayma donatısız betonarme kirişlerde boyut etkisi [28, 74], Betonarme sistemlerde yatak mukavemetinde boyut etkisinin Fraktal modeli [73] gibi araştırmalar verilebilir. Bununla beraber Carpinteri vd. birçok araştırmacı tarafından yapılan deneysel çalışmaların toplandığı bir raporda FBK yaklaşımı uygulanmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir [61].

### 3. YATAK MUKAVEMETİ

Genel olarak betonarme sistemlerde, genellikle kolon elemanının temel pabucu üzerine oturduğu durumlarda, temel gövdesinde meydana gelen enine çekme gerilmeleri yatak gerilmesi olarak tanımlanır. Yatak göçmesi, genellikle enine çekme gerilmelerinin sebep olduğu yarıлма tesiriyle meydana gelir (Şekil 3.1a). Hawkins [18], rijit bir zemine oturtulmuş, donatısız beton bloklar üzerine rijit plakalarla yüklemeler yaparak bu durumu gözlemlemiştir. Şekil 3.1b de görüldüğü gibi yükleme sonucu gövdede oluşan enine çekme gerilmelerinden dolayı ilk önce 1 numara ile gösterilen kısımda çatlak meydana gelmektedir. Daha sonra konik bir kama şeklinde gelişen 2 nolu çatlak vasıtasıyla, 1 nolu çatlak yüzeye erişmektedir. Bunun sonucu olarak, yükleme levhasının çevresinde Şekil 3.1c de detayı verilen 3 nolu radyal çatlaklar oluşur ve göçme meydana gelir.



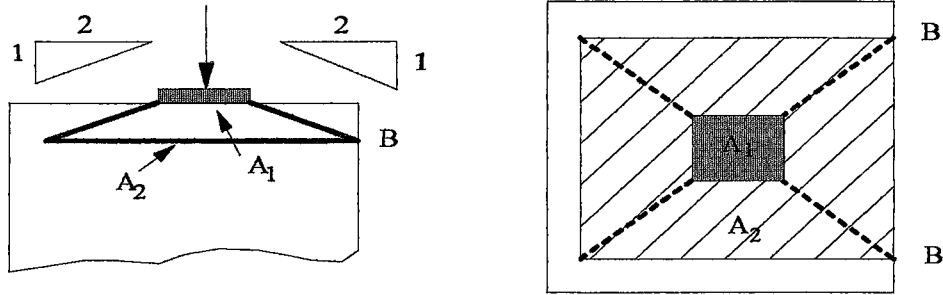
Şekil 3.1. Yatak göçmesinin mekanizması

Şartnameler, yatak göçmesini önlemek için iki yol önermektedir: Şekil 3.1b de görülen 1 nolu çatlakın gelişiminden sonra çekme gerilmelerini karşılamak amacıyla bu bölgeye donatı yerleştirmek (BS5400), ikinci yol olarak içsel çatlakın meydana gelmemesi için yatak gerilmelerini sınırlamaktır [92].

ACI-318 [92], yatak mukavemetinin hesabı için, Hawkins'in yaklaşımını kullanmaktadır.

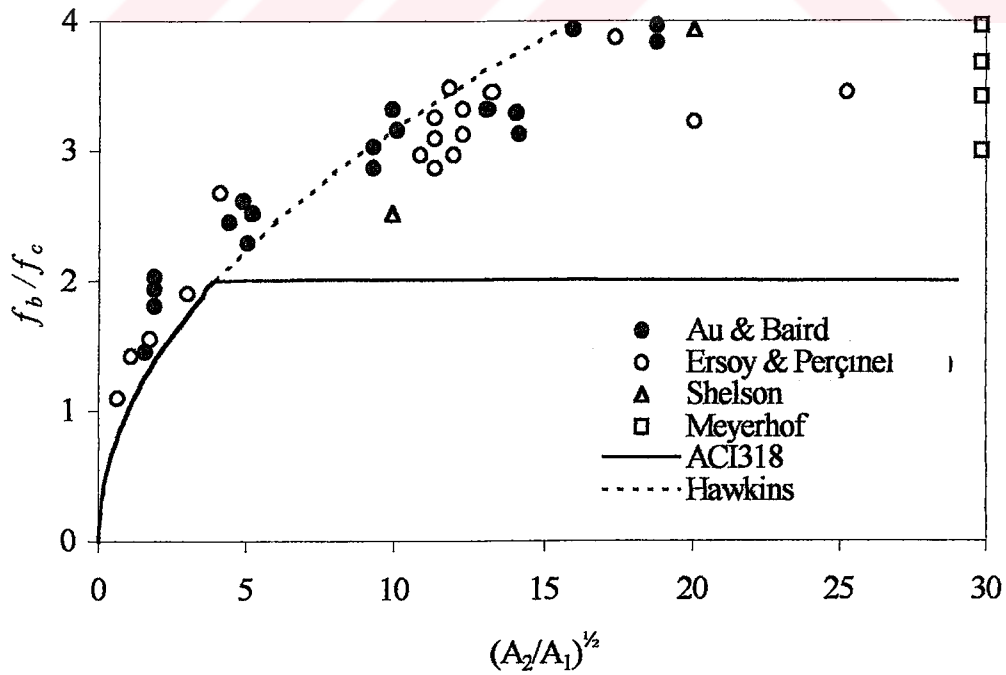
$$f_b = \frac{P_u}{A_1} = f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (3.1)$$

Burada  $P_u$  göçme yükü,  $A_1$  yatak alanı,  $f'_c$  yatak betonunun basınç mukavemeti ve  $A_2$  Şekil 3.2 de görüldüğü gibi yataktan itibaren yatayda 2, düşeyde 1 eğimle gidildiğinde bloğun sınırına ilk erişildiği seviyede oluşan düzlemin alanıdır.



Şekil 3.2. Plan ve yan görünüş üzerinden  $A_1$  ve  $A_2$  alanlarının tanımlanması

Ancak şartnameler,  $f_b \leq 2f'_c$  ile yatak mukavemetini sınırlamaktadır. Bununla beraber şartnamelerin önerdiği sınırlama özellikle  $\sqrt{A_2/A_1}$  büyük olduğu durumlarda çok emniyetli yönde kalmaktadır. Şekil 3.3'de literatürdeki mevcut bazı çalışmalar ve şartnameler gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Deneysel sonuçları, Hawkins ve şartnamelerin yaklaşımı [93]

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
BOKÜNERGİTİM MERKEZİ

### 3.1. Yatak Mukavemeti Üzerine Yapılan Çalışmalar

#### 3.1.1. Tung A. ve Donald L. B. (Beton blokların yatak kapasitesi)

Tung-Au ve Baird [19], deneylerinde 6.35 ve 12.7 mm'lik agregalar kullanılarak yüzey alanı ile yatak alanı oranları (R) 2 ile 16 arasında değişen yaklaşık 60 adet kare prizma beton bloklar hazırlamışlardır. Betonun yatak kapasitesinde iç sürtünme açısının anlaşılabilmesi için iki farklı agrega boyutu kullanmışlardır. Hazırlanan bu karışımlarla  $b=d$  (A serisi) ve  $b=2d$  (B serisi) oranında numuneler üretilmiştir. Burada;  $b$ : Numune genişliği,  $d$ : numune boyudur.

A Serisinde küp numunelerde yapılan deneylerde bloğun üst kısmından başlayan düşey çatlak kayma göçmesiyle aşağı doğru gelişmiş, max yüke genelde çatlak belirmeden kısa bir zaman sonra ulaşılmış ve o an yük taşıma kapasitesi bir miktar düşüş gözlenmiştir. Deneylerinde yatak plakası vasıtasıyla uygulanan yük sonucu göçme olayı başladığında aşağı doğru zorlanma neticesinde ters bir piramit elde edilmiştir.

B Serisindeki numunelerde yarıma, radyal olmuş ve bir çok durumda temiz piramit elde edilememiştir. Yalnız birkaç tanesinde orta noktada kesilmiş vaziyette iki alt üst piramit formasyonunda şekil elde edilmiştir. Bu seride çatlaklar ilk önce alt kısımda oluşmuş ve yukarı doğru gelişmiştir. Bu görünüşlerden yarımanın yatak plakası atındaki betonun aşırı deformasyonu sonucu meydana gelen radyal basınçla oluştuğu düşüncesine varılmıştır.

##### 3.1.1.1. 200 x 200 x 200 mm'lik numunelerde (A Serisi) göçme:

Deneyler esnasında 200 mm'lik küp blokların göçmesi çatlakların diyagonal bir düzlem boyunca yarılmalarıyla oluşmuştur. Bu yarıma uygulanan yatak gerilmesince aşağı doğru yapılan basınç sonucu ters bir piramit formasyonu gelişmiştir. Yapmış oldukları deneylerden yatak gerilmesini aşağıdaki formülle yaklaşık olarak bulunabileceği belirtilmiştir.

$$\sigma_N = (2S_0 + kf_t) \cot \alpha \quad (3.2)$$

Burada;  $k$ : Alan, atalet momenti ve  $y$  eksenine bağlı sabit değer,  $S_0$ :  $P=0$  için birim aladaki kesme direnci,  $\alpha$ : Ters pramidin düşey düzleme göre yarım tepe açısını ifade eder.

Deneylerde; betonun tam homojen yapıya sahip olmamasından dolayı göçme sonrası oluşan piramidin kenarları tam simetrik olmamıştır. Tepe açılarını tam olarak ölçülememiştir,

fakat yarım tepe açısının yaklaşık olarak  $19^{\circ}$ ~ $25^{\circ}$  arasında olduğunu belirlemişlerdir.  $\alpha$  Açısının küçük bir değişimi (3.2) ve (3.3) denklemlerindeki  $k$  ve  $Cot\alpha$  değerini çok fazlasıyla etkileyeceğini vurgulamışlardır. Almış oldukları üniform sonuçlara göre her iki karışım içinde en uygun değeri  $22^{\circ}$  olarak benimsemişlerdir. Ayrıca deney verilerinin grafiksel eğrilerinden faydalanılarak pratiksel kullanımlar için  $f_t'/f_c' = 0,23$  ve  $f_t'/f_c' = 0,1$  değerlerini önermişlerdir. Bu değerler kullanılarak yatak kapasitesi tam olarak belirlenemeyeceği sonucuna varılmıştır. Fakat deneysel verilerin korelasyonunda iyi bir yaklaşım sağlayacağı vurgulanmıştır.

### 3.1.1.2. 200 x 200 x 100 mm'lik prizmalar

Bu numunelerde göçmeden sonra düzgün piramit formu gözlenememiş ve buna sebep olarak da kayma göçme direnci gösterilmiştir. B Serisinden elde edilen sonuçlar A Serisine göre daha büyük çıkmıştır (tablo 3.1). Tabandaki gerilme etkisiyle bloğun bir konsol gibi davranması, preste yatak plakası ile blok tabanı arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan radyal çatlama direnci gibi faktörler relatif olarak ince blokları etkilemiştir. Bu seride elde edilen sonuçlardaki bazı tutarsızlıklara sebep olarak yukarıda sözü edilen faktörleri göstermişlerdir.

**Tablo 3.1.** Tung A. ve Donald L. B'nin deney sonuçları

	Numune Serisi	Numune Boyutu (cm)			$A_2/A_1$ ( R ) Oranı					
		d	d	h	2	4	6	8	12	16
		Ortalama Yatak mukavemeti ( $N/mm^2$ )	$d_{max}=6,35$ mm $f_c'=55,51N/mm^2$	200	200	200	71,02	90,53	106,67	118,94
200	200			100	75,98	97,36	111,63	134,11	154,59	178,24
$d_{max}=12,7$ mm $f_c'=31,03N/mm^2$	200		200	200	48,82	64,33	74,12	83,22	102,87	128,94
	200		200	100	64,05	69,10	86,19	90,19	140,66	147,62
$\sigma_N/f_c'$ ( n ) oranı	$d_{max}=6,35$ mm $f_c'=55,51N/mm^2$	200	200	200	1,28	1,63	1,92	2,14	2,40	2,80
		200	200	100	1,37	1,76	2,02	2,42	2,79	3,21
	$d_{max}=12,7$ mm $f_c'=31,03N/mm^2$	200	200	200	1,57	2,07	2,39	2,68	3,32	4,16
		200	200	100	2,06	2,23	2,78	2,91	4,53	4,76

### 3.1.2. Bauschinger (Tabii Taş Bloklar İle Yapmış Olduğu) Deneyler

Bauschinger [15], tabii kum taşlarından hazırlanmış olduğu küpler üzerinde yatak gerilmesini belirlemek için deneyler yapmış ve bunların sonuçlarını Münih'te yayınlamıştır. Yapmış olduğu deneyler sonucunda, blok alanının yükleme alanına oranının (R) artışına bağlı olarak maksimum yatak gerilmesinde yükseldiğini görmüştür. R oranlarını 1~7 arasında sınırlı değerlerde almış ve aşağıdaki sonuçları elde etmiştir.

Tablo 3.2. Bauschinger'in deney sonuçları

R	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N/f_c'$
1,7	73,087	52,402	1,40
3,0	90,325	52,402	1,72
7,0	117,215	52,402	2,24

Bauschinger elde etmiş olduğu deney sonuçlarından yatak kapasitesini aşağıdaki temel bir formülle ifade etmiştir.

$$\frac{\sigma_N}{f_c'} = 1,25 R^{1/3} \quad (3.4)$$

### 3.1.3. N. M. Hawkins (Rijit Plakalar Arasında Yüklü Betonun Yatak Kapasitesi) Deneyleri

Hawkins [18], yaptığı bu çalışma rijit plakalar arasındaki betonun yatak dayanımı ile ilgilidir. Numunenin ve yükleme plakasının geometrisi, konsantrik veya eksantrik yüklenmesi ve beton sınıfı gibi özellikler dikkate alınarak 18 seri numunenin raporunu hazırlanmıştır.

Deneylerini konsantrik yüklü 100 numune ve eksantrik yüklü 130 numune üzerinde yapmıştır. Başlıca değişken olarak beton sınıfı, numune boyutu, yükleme plakasının şekli ve boyutu, ayrıca eksantrik yüklü deneyler için yatak plakasının konumunu da bir değişken olarak almıştır. Konsantrik yüklemelere ait sonuçlar tablo 3.3'de verilmiştir.

Deneyler esnasında, göçmeden kısa bir süre öncesine kadar betonda çatlama, kabarma veya dökülmenin görülmediğini belirtmiştir. Bir kenardan yüklü numunelerde ilk dikkat edilen şey yükleme alanını çevreleyen numunenin kenarlarında ince düşey çatlaklar oluşmuş ve kısa bir süre sonra max. yüke ulaşarak beton yatak plakasından dışarı doğru atılmıştır. Köşe yükleme durumunda bu olayın gözlenmediği vurgulanmıştır.



Konsantrik yüklü numunelerde göçme esnasında üç veya daha fazla çatlak yükleme alanından radyal olarak yayılmıştır. Yükleme altında göçen kamalarda yaklaşık 35° ~ 40° tepe açısı ile piramit şekli oluşmuştur.

Eksantrik yüklü numunelerinde ise köşe yüklemesi hariç diğer yükleme şeklinde göçme modeli konsantrik yüklü numunelerinkine benzer şekilde olmuştur. Beton yükleme alanının altından dışarıya doğru kama şeklinde zımbalanmış ve tepe açısında 17° ~ 25° arasında meydana gelmiştir. Yapılan deneylerden aşağıdaki sonuçları çıkarmıştır.

1. (3.5) Denkleminde R'nin 40'dan düşük değerleri için, nihai yatak dayanımının yaklaşık değeri belirlenebilir.

$$\frac{\sigma_N}{f_c'} = 1 + \frac{k}{\sqrt{f_c'}} (\sqrt{R} - 1) \quad (3.5)$$

2. Pratik çalışmalarda en uygun değer belirlenmesinde K faktörü 50 alınmalıdır.

3. R değeri yükleme alanının şekli ve yüklemenin eksantrikliğinin uygunluğu göz önüne alınarak seçilmelidir. Yüksüz alan "efektif" yüklü alan ile konsantrik olmalı, denklem (3.5) den hesaplanan değerden daha büyük yatak gerilmesi kenar yüklemeler için kullanılabilir. Nihai yatak dayanımı; c/b oranı 2 den büyük ve "a" değeri "b" değerine eşit veya daha az olmak şartıyla yaklaşık olarak  $(1 + a/2b)f_c'$  olarak alınabilir.

Burada; a: Dikdörtgen yatak plakasının kısa veya kare plakanın kenar uzunluğu, b: Plakanın uzun kenarı veya numune kenarıyla çakışan kısım, c: Numunelerin kenar uzunluğudur.

4. Beton basınç dayanımı üstünde yatak kapasitesindeki herhangi bir artış direk olarak iç sürtünme açısına bağlıdır.

$$\frac{q}{f_c'} = 1 + \frac{k}{\sqrt{f_c'}} (\sqrt{R} - 1) \quad (3.6)$$

$$\frac{q}{f_c'} = \left(1 + \frac{a}{2b}\right) + \frac{(k - A)(c - b)}{2b \sqrt{f_c'} \left(4 \sin \beta \cos \beta + \frac{8a}{c - b} \cos^2 \beta\right)} \quad (3.7)$$

$$\frac{q}{f_c'} = 1,5 + \frac{(k - A)(c - a)}{2a \sqrt{f_c'} \left(4 \sin \beta \cos \beta + \frac{8a}{c - a} \cos^2 \beta\right)} \quad (3.8)$$



**Tablo 3.3. Konsantrik yüklemeler için sonuçlar [18]**

Deney Serisi	Beton Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Numune Boyutu (mm)	Yükleme Plakasının Şekli	R	$\sigma_N / f_c'$ Ölçülen	$\sigma_N / f_c'$ Teoriksel	Kol.6/Kol7
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
A	0,022	150 mm Küp	Kare	11,9	2,85	3,18	0,90
				8,8	2,66	2,74	0,97
				5,9	2,25	2,27	0,99
				4,0	1,89	1,89	1,00
				2,2	1,48	1,43	1,03
B	0,026	225 mm Küp	Kare	13,0	3,16	3,11	1,02
				8,8	2,73	2,59	1,05
				4,9	2,07	1,99	1,04
C	0,053	150 mm Küp	Kare	11,8	2,18	2,39	0,91
				8,7	2,02	2,11	0,96
				5,9	1,75	1,81	0,97
				4,1	1,48	1,58	0,94
				2,2	1,22	1,27	0,96
D	0,027	150 mm Küp	Kare	9,0	3,05	3,10	0,98
				4,0	2,09	2,05	1,02
				1,0	0,96	1,00	0,96
E	0,040	150 mm Küp	Kare	9,0	2,60	2,82	0,92
				4,0	1,59	1,91	0,83
				1,0	0,93	1,00	0,93
F	0,012	100 x 200 mm Silindir	Daire	16,0	5,67	5,35	1,06
				7,1	3,18	3,41	0,93
				4,0	2,08	2,45	0,85
				1,8	1,56	1,49	1,05
G	0,041	150 mm Küp	Kare	36,0	5,42	5,22	1,04
				24,0	4,40	4,29	1,03
				18,0	3,85	3,74	1,03
				9,0	2,62	2,69	0,97
				4,0	2,03	1,85	1,10
H	0,034	150 mm Küp, 150x300 mm Silindir	25 mm çap	36,0	4,62	4,59	1,01
			35x35 mm	18,0	3,30	3,30	1,03
			50 mm çap	9,0	2,44	2,44	1,00
			75x75 mm	4,0	1,75	1,72	1,02
			25x50 mm	18,0	4,06	3,58	1,13
			25x75 mm	12,0	3,22	2,96	1,09
			25x100 mm	9,0	2,75	2,59	1,06
			50x75 mm	6,0	2,04	2,15	0,95
	0,034	50x100 mm	4,5	1,96	1,89	1,04	

### 3.1.4. Shealson'un Betonun Yatak Kapasitesi Üzerindeki Çalışmaları

Shealson [16], deney verisi olarak önceki ve kendi çalışmalarından elde ettiği sonuçlarda beton ve kaya numunelerde temel alanının yatak alanına oranı ile nihai yatak kapasitesi arasındaki ilişkiyi inceleyerek çalışmasını yapmıştır.

Shealson deneylerinde 6,25 mm kalınlığında ve farklı boyutlardaki yatak plakaları vasıtasıyla 200 mm'lik numunelere yükleme yaparak yatak dayanımlarını belirlemiştir.

Numune karışımını hazırlarken W/Ç = 0,50 ve çimento:agrega oranı 1:2,5 olacak şekilde ayarlamıştır. Deneylerinde 1,168 mm'lik agrega ve çabuk sertleşen çimento kullanmıştır. Deney serisinin her biri için numuneler aynı gün içinde dökülmüş fakat grup halinde düzenlendiğinden dolayı her grup için üçer adet 150x300 mm'lik silindir basınç numunesi ile 25 mm kesitli çekme numuneleri hazırlamıştır. Yatak kapasitesi üzerine yapmış olduğu deneylerden tablo 3.4'deki sonuçları elde etmiştir.

Beton bloklar yatak deneyine tabii tutulurken bloğun göçmesini iki aşamada gözlemlemiştir. Birinci aşamada plaka aşağı doğru baskı yaparak kamayı oluşturmuş, ikinci aşamada ise oluşan kama bloğun içinden aşağı doğru baskı yapması sonucu blokta çatlamlar meydana gelerek blok parçalanmıştır. Oluşan kamaya bakıldığında kamanın simetrik olmadığı ve tepe açısında 60°~70° civarı olduğu görülmüştür. Fakat geniş tabanlı plakalarda koninin formasyonu tam olarak oluşmadığını görmüştür.

Yapılan deneyler sonucunda yatak plakası altında donatısız betonun yatak kapasitesini ifade eden (3.9) amprik bir formül elde etmiştir. Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere numune alanı/yükleme alanı oranı (R) değeri arttıkça yatak gerilmesinin değeri de artmıştır.

$$\sigma_N = 0,25 f'_c R^{0,3} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9) dan. faydalanarak bulmuş olduğu sonuçlarda R değeri 30'un üstüne çıktığında yatak gerilmesi limit bir değere yaklaşmıştır. Ayrıca önceki çalışmaları inceleyerek temel derinliğinin de yatak gerilmesini etkileyeceğini vurgulamıştır.

Tablo 3.4. Shealson'un deney sonuçları [16]

r	R	Yatak Plakası Alanı(mm <sup>2</sup> )	P (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )			$\sigma_{No ft}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{Nort}/f'_c$
			P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$			
8,00	64	625	145,01	153,90	145,45	232	246	233	237	46,13	5,14
5,60	32	1246	290,90	256,21	275,78	234	206	221	220	43,62	5,04
4,00	16	2500	379,86	352,28	329,15	152	141	132	142	43,51	3,26
2,83	8	5006	369,6	422,91	353,92	74	85	71	77	39,85	1,93
2,67	7,11	5625	275,97	287,62	275,07	49	51	49	50	45,28	1,10

### 3.1.5. Meyerhof (Beton ve Kayaların Yatak Kapasitesi) Deneyleri

Meyerhof [17], çalışmalarını hem beton hemde kaya numuneler üzerinde yapmıştır. Bu çalışmaları sonucunda elde edilen nihai yatak kapasitesinin betonun silindir basınç dayanımından daha büyük olduğunu belirlemiştir. Ayrıca yatak kapasitesinin blok alanı ile yükleme alanının oranına (R) bağlı olduğunu belirlemiştir. Yapmış olduğu deneyler sonucunda bu durumu üç eksenli deneylerdeki gibi kontak alanının çevresindeki bölgede sınırlanmış basıncın yardımıyla açıklamıştır. Numunelerde yüklemeler sonucu meydana gelen göçmede yarma veya kesme doğrultusunda bir veya birden çok parçalanmanın Coulomb-Mohr teorisine uygun olduğunu kabul etmiştir. Bu teoriye göre numunelerdeki kesme dayanımını (3.10) daki formülle ifade etmiştir.

$$S = C + P \tan \phi \quad (3.10)$$

Burada;

C= Betonun birim kohezyonu,

P= Kesme yüzeyinde efektif normal gerilme,

$\phi$ = İç sürtünme açısı,

S= Kesme kuvvetidir.

Betonun birim kohezyonu yaklaşık olarak betonun sınırlanmamış dayanımının beşte birine denktir ve 40° ile 50° derece arasında değişen iç sürtünme açısında yaklaşık olarak 45° civarı alınabileceğini belirtmiştir.

Meyerhof, yapmış olduğu çalışmaların açıklamasını yaparken kesme-yarma göçmesinin iki boyutlu analizinden faydalanmıştır. Analizler sonucu elde etmiş olduğu bağıntıyı (3.11) formülasyonu ile ifade etmiştir.

$$P_h = Q \tan^2 \alpha - 2 C \tan \alpha \quad (3.11)$$

Burada;

$P_h$  Mohr-Coulomb teorisine göre yarma gerilmesidir ve bunun sonucu  $\frac{d}{2} C \cot \alpha$

derinliğinde etkiler.  $\alpha$  Yarı köşe açısıdır (kesme açısı) ve  $45-\phi/2$  ye karşılık gelir.

$$P_t = \left[ 1 + \frac{6t}{2t - d \cot \alpha} \right] \frac{d \cot \alpha}{2t - d \cot \alpha} P_h \quad (3.12)$$

Bu iki denklemden faydalanarak  $\sigma_N$  değeri aşağıdaki şekilde bulunabilir;

$$\sigma_N = \frac{(2t/d - \cot \alpha)^2 P_t \cot \alpha}{8t/d - \cot \alpha} + 2C \cot \alpha \quad (3.13)$$

Diğer taraftan sınırlanmamış prizma dayanımı  $P_u = 2C \cot \alpha$  olduğundan, buradan;

$$\frac{\sigma_N}{P_u} = 1 + \frac{t P_t}{4 d c} \quad (3.14)$$

olur. Denklem (3.14) 'de  $P_t/c \sim 1$  civarındadır.

Meyerhof çalışmalarında üç seri numune kullanmıştır. Bunlar;

SERİ I ) Blokların genişliği 150 mm'de sabit tutuldu ve kalınlıkları 37,5 ~ 150 mm arasında değişti (  $R=23,2$  sabit alındı,  $r = 1,2 \sim 4,8$  arasında değişti).

SERİ II ) Blokların kalınlığı 150 mm'de sabit tutuldu ve genişlikleri 150 ~ 450 mm arasında değişti (  $r = 4,8$  sabit alındı,  $R = 23,2 \sim 207$  arasında değişti).

SERİ III ) 450 x 450 x 150 mm'lik sabit boyutlu beton bloklar kullanmıştır. Fakat bunlar kesme göçmesinde betonun yarılmamasını engellemek için çevresel olarak güçlendirilmişlerdir. İlk iki serini sonuçları tablo 3.5'de verilmiştir.

**Tablo 3.5.** Meyerhof'un deney sonuçları [17]

Seri No	r	R	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N / f_c'$
Seri I	1,2	23,2	64,13	21,86	2,93
	2,4	23,2	89,29	21,86	4,09
	4,8	23,2	114,11	21,86	5,22
Seri II	4,8	23,2	92,39	20	4,62
	4,8	92,2	133,76	20	6,69
	4,8	207	176,51	20	8,83

### 3.1.6. Tarig Ahmed v.d. (Limit Bir Alan Üzerinde Yüklü Donatılı ve Donatısız Betonun Yatak Kapasitesi Üzerine Çalışma)

Tarig Ahmed v.d. [20], Yapmış oldukları çalışmada sade ve donatı donatılı beton blokların farklı yükleme konfügrasyonlarında deneye tabii tutularak yatak kapasitelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneyler için donatılı ve sade olmak üzere 300 mm yüksekliğinde, 200x200 mm kesitinde küçük numunelerden 35 seri ve boyut kıyaslaması için de 600 mm yüksekliğinde, 400x400 mm kesitinde büyük numunelerden 4 seri numune hazırlamışlardır. Hazırladıkları beton numunelerin bazı özellikleri tablo 3.6'da verilmiştir.

Küçük (200x200x300 mm) deney numuneleri donatı durumuna göre beş ana grup altında toplanmıştır. Bunlar;

- Donatı sınıfı I: KR1 olarak adlandırılan bu sınıfta üç kenardan getirilen donatı dördüncü kenarın sonuna kadar devam ettirilmiştir. Toplam donatı uzunluğu 775 mm'dir.
- Donatı sınıfı II: KR2 olarak adlandırılan bu sınıfta geleneksel etriye şekli oluşturuldu, toplam donatı uzunluğu 630 mm olarak alınmıştır.
- Donatı sınıfı III: KR3a olarak adlandırılan bu sınıfta etriye iki parçadan oluşturuldu, bu parçalar karşılıklı iki kenarın orta noktasında birleştirildi, toplam donatı uzunluğu 600 mm olarak alınmıştır.
- Donatı sınıfı III: KR3b olarak adlandırılan bu sınıfta etriye iki parçadan oluşturuldu, bu parçalar sadece karşılıklı iki kenara yerleştirildi, toplam donatı uzunluğu 254 mm olarak alınmıştır.
- Donatısız beton bloklar (KS-B) : Bu sınıfta herhangi bir donatı kullanılmadı . Sade betondan hazırlanmıştır.

Ayrıca büyük numuneler (400x400x600 mm) için iki farklı numune hazırlandı, bunlar;

- Donatı sınıfı I: BR2 olarak adlandırılan bu sınıfta geleneksel etriye şekli oluşturuldu, toplam donatı uzunluğu 1272 mm olarak alındı.
- Donatısız beton bloklar (BS-B) : Bu sınıfta herhangi bir donatı kullanılmadı . Sade betondan hazırlanmıştır.

Hazırlanan bu numunelere dikdörtgen, kare ve şerit yatak plakları vasıtasıyla eksantrik ve konsantrik olarak farklı şekillerde yüklemeler yapılmıştır.

Konsantrik yüklü numunelerde, beton blokların kırılması iki aşamada meydana gelmiştir. Birinci aşamada yatak plakasının altındaki beton ters bir piramit formasyonunda çatlama meydana gelmiştir. İkinci aşamada ise ters piramit düşeyle 30° açı ile parçalanarak aşağı

doğru inmiştir. Blokta oluşan max. çekme gerilmesi betonun çekme gerilmesini aştığından dolayı kırılmıştır.

İki eksenli ve eksantrik yüklü numunelerde, düşey çatlama yatak plakasının yakınında blokun yan tarafından başlamış, kayma göçmesine uygun bir şekilde çatlama aşağı doğru yayılmıştır. Yüklemenin son kısmında çatlaklar plakanın çevresinden tam olarak yayılarak ortaya çıkmıştır. Elde ettiği deney sonuçları tablo 3.7, 3,8 ve 3.9'da verilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda donatılı numuneler için aşağıdaki formülden yararlanılabileceğini vurgulamışlardır.

$$\sigma_N = f'_c \left[ 3 \left( \frac{\text{Yanal Donatı Alanı}}{\text{Beton Alanı}} \right) \left( \frac{A}{A'} \right) + C_1 \right] \quad (3.15)$$

Bu deneysel incelemeler sonucunda aşağıdaki bulguları elde edilmiştir.

1. Yatak plakası altındaki koninin formasyon yalnızca sade beton numunelerde gözlendi. Numuneler kare ve dikdörtgen altında deneylere tabii tutulduğu zaman R3b ile donatısı yapıldı.

2. Bütün numunelerdeki göçmenin asıl sebebi çekme gerilmesidir. Yapılan çalışmalarda çekme dayanımı ile ilgili çok açılı bir ilişki kuruldu.

3. Bu çalışmalar gösterdi ki yanal donatının artışı göçen numunelerde yatak gerilmesini de etkiler. Yatak mukavemetinin ters etkilenmemesi için yanal donatı hesaplandığı kadar olmalı aşırısına kaçılmamalıdır.

4. Numunelerin boyutundaki artış olduğunda nihai yatak gerilmesi ( $\sigma_N$ ) ve "n" oranındaki değişimler genel olarak boyut etkisinin bir sonucu olara ortaya çıkar. 400x400x600 mm'lik büyük numuneler sabit R değerı ile hem konsantrik hemde eksantrik yükleme altında küçük boyutlu güçlendirilmiş numunelerle kıyaslandığı zaman nihai yatak dayanımı ve "n" değerlerinde azalma % olarak sırasıyla 11.7, 11.5, 30.7 ve 30.8 olduğu görülmüştür. Aynı şekilde sade beton bloklar ile donatılı numuneler arsında nihai yatak kapasitesi ve n değerindeki düşüş kıyaslandığında, numunelerin bütün boyutlarında bu değerler % olarak sırasıyla 8,6; 8,5; 14,8 ve 14,9 olduğu tespit edilmiştir.

5. Büyük değerli belli sayıdaki numunelerin deneylerinden Niyogi'nin ( $\sigma_N$ ) değerleri elde edilmiştir. Büyük numunelere göre küçük numunelerde  $\sigma_N$  değerı yaklaşık olarak  $1/S^{1/4}$  civarındır. Burada S değerı amprik bir sabittir.

6. R1, R2, R3a sınıfı donatılar, numunenin başlangıç çatlağına karşı direncini artırmış fakat R3b donatısı daha az etkili olmuştur.

**Tablo 3.6. Kullanılmış oldukları betonun özellikleri**

Zaman	Basınç Dayanımı $f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	İndirek Çekme Dayanımı $f_t'$ (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Modülü (N/mm <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü (kN/mm <sup>2</sup> )
28 Günlük	48,50	4,64	5,26	31,38

**Tablo 3.7. Küçük kare prizmaların (200x200x300 mm) kare yükleme plakasıyla (50x50x15 mm) konsantrik yüklenmesi**

Numunenin Türü	Eksantriklik ( mm )		A/A'	İlk Çatlamada Yatak Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	Nihai Yatak mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N / f_c'$	$\sigma_N / f_t'$
	$e_x$	$e_y$	R	$\sigma_N$	$\sigma_N$	n	n'
KR1	0	0	16	132,0	168,0	3,46	36,21
KR2	0	0	16	127,6	143,6	2,96	30,95
KR3a	0	0	16	122,4	140,0	2,89	30,17
KR3b	0	0	16	118,8	137,2	2,83	29,57
KS-B	0	0	16	111,2	132,0	2,72	28,45

**Tablo 3.8. Küçük kare prizmaların (200x200x300 mm) dikdörtgen yükleme plakasıyla (100x50x15mm) konsantrik yüklenmesi**

Numunenin Türü	Eksantriklik ( mm )		A/A'	İlk Çatlamada Yatak Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	Nihai Yatak mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N / f_c'$	$\sigma_N / f_t'$
	$e_x$	$e_y$	R	$\sigma_N$	$\sigma_N$	n	n'
KR1	0	0	8	79,6	100,0	2,06	21,55
KR2	0	0	8	84,0	91,77	1,89	19,78
KR3a	0	0	8	82,74	84,21	1,74	18,15
KR3b	0	0	8	80,82	81,27	1,68	17,52
KS-B	0	0	8	51,87	77,90	1,61	16,79

**Tablo 3.9. Küçük kare prizmaların (200x200x300 mm) şerit yükleme plakasıyla (200x50x15 mm) konsantrik yüklenmesi**

Numunenin Türü	Eksantriklik ( mm )		A/A'	İlk Çatlamada Yatak Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	Nihai Yatak mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N / f_c'$	$\sigma_N / f_t'$
	$e_x$	$e_y$	R	$\sigma_N$	$\sigma_N$	n	n'
KR1	0	0	4	52,0	64,5	1,33	13,90
KR2	0	0	4	45,0	59,5	1,23	12,82
KR3a	0	0	4	40,8	59,0	1,22	12,72
KR3b	0	0	4	37,0	48,5	1,00	10,45
KS-B	0	0	4	39,9	48,3	0,99	10,41



**Tablo 3.10.** Büyük kare prizmaların (400x400x600 mm) kare yükleme plakasıyla (100x100x15 mm) konsantrik ve eksantrik yüklenmesi

Numunenin Türü	Eksantriklik ( mm )		A/A'	İlk Çatlamada Yatak Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	Nihai Yatak mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N / f_c'$	$\sigma_N / f_t'$
	e <sub>x</sub>	e <sub>y</sub>	R	$\sigma_N'$	$\sigma_N$	n	n'
BR2	0	0	16	89,0	126,8	2,62	27,34
BS-B	0	0	16	102,3	120,6	2,49	26,00

**Tablo 3.11.** Farklı donatı sınıflı numunelerin yatak kapasiteleri

Numunenin Türü	Eksantriklik ( mm )		A/A'	İlk Çatlamada Yatak Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	Nihai Yatak mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N / f_c'$	$\sigma_N / f_t'$
	e <sub>x</sub>	e <sub>y</sub>	R	$\sigma_N'$	$\sigma_N$	n	n'
KR2	0	0	16	127,6	143,6	2,96	30,95
BR2	0	0	16	89,0	126,83	2,62	27,34
KS-B	0	0	16	111,2	132,0	2,72	28,45
BS-B	0	0	16	102,35	120,60	2,49	26,00

### 3.1.7. Ömer PERİNÇEL ( Betonun Yatak Kapasitesi )

Perinçel [14], yaptığı bu çalışmasında beton blokların yatak kapasitesinde R ( $d^2/b^2$ ) ve t (h/d) değerlerinin etkisini incelemiştir. Bu amaçla 30 farklı numune hazırlayarak bunların üzerinde deneylerini yapmıştır.

Deneylerin birinci serisinde t oranının etkisinin analizini yapmıştır. t Değeri büyüdüğü zaman deney sonuçlarının geniş bir aralığa yayıldığını gözlenmiştir. Bu seride R değeri sabit olarak alınmış, ayrıca diğer faktörlerle de bir kıyaslama yapılmamıştır. Deney sonuçlarından yatak kapasitesinin t değerindeki artışla artacağını fakat bu artışın beklenenden az olacağını vurgulamıştır. Bulmuş olduğu değerlerden yaklaşık olarak  $\sigma_N / f_c' \sim 0,9r$  değerine geldiğini ve belli bir değerden sonra r oranının etkisinin önemsenmeyecek derecede olduğunu görmüştür.

Deneylerin ikinci serisinde yatak kapasitesinin R oranıyla değişimi incelenmiş. Bu incelemeler yapılırken r değeri sabit tutulmuş ve üç farklı boyutta numune hazırlanmıştır. Bu serilerde elde edilen sonuçlardan R oranının etkisinin; küçük R oranlı bloklarda büyük, büyük R oranlı bloklarda ise önemsenmeyecek derecededir ve R oranıyla yatak kapasitesi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu vurgulanmıştır. Bu sonuçlar Shealson ve Ersoy'un fikirleriyle de uyusmaktadır.



Grafiklerdeki bazı sapmaların sebebi olarak ise yükleme plakası altındaki büyük agregaların yük konsantrasyonuna bağlamıştır. Yüzeyleri düzgün olmayan numunelerde her n kadar plaka ile numune arasına çimento hamuru yerleştirmiş ise de çimentonun yüklemenin düşük mertebesinde parçalanmasından dolayı bloğun pütürlü üst yüzeyindeki büyük agregalar düzensiz yüklemeye sebep olmuştur. Yapmış olduğu deneyler sonucunda şu sonuçlara varmıştır.

1. Yatak göçmeleri iki grup içinde sınıflandırılabilir

- a) Piramit göçmesi
- b) Kırılma (Ezilme) göçmesi

2. Bloğun kalınlığı ile genişliğinin oranı birden küçük olduğunda gerilme eğrileri daimidir ve kapasitesi bloğun kalınlığınca etkilenmez. Bu durumda piramit göçmesi oluşur ve bloğun kapasitesi yalnızca R oranıyla etkilenir. Deney sonuçları göstermiştir ki R oranındaki artışla yatak kapasitesi de artar.

3. Bloğun kalınlığı ile genişliğinin oranı birden çok büyük olduğunda gerilme eğrileri süreksizdir ve bloğun kapasitesinde R oranının etkisi azalır. b/t oranının büyük değerleri için esasen yatak göçmesinden çok ezilme göçmesi meydana gelir.

4. Deney sonuçlarından yaklaşık ampirik dizayn denklemleri elde etmeye çalışmıştır. Bunlar;

$$\frac{\sigma_N}{\sqrt{f_c}} = 0,88 + 0,12R \quad (3.16)$$

$\frac{h}{d} \leq 1$  olduğu zaman  $\sigma_N/f_c$  5,0'ı aşmamalı ve  $\frac{h}{d} > 1$  olduğu zaman ise  $\sigma_N/f_c$  2,5'i aşmamalı.

Ayrıca  $\frac{h}{d} \leq 1$  olduğunda aşağıdaki denklem kullanılabilir.

$$\frac{\sigma_N}{\sqrt{f_c}} = 16,5R \quad (3.17)$$

5. Emniyet faktörü 3 alınırsa yukarıdaki denklemler

$$\frac{\sigma_N}{\sqrt{f_c}} = 0,3 + 0,04R \quad (3.18)$$

hale getirilebilir.

$$\frac{h}{d} \leq 1 \text{ olduğu zaman } \sigma_N / f_c' \text{ 1,67'yi aşmamalı ve } \frac{h}{d} > 1 \text{ olduğu zaman ise } \sigma_N / f_c'$$

0,83'ü aşmamalı. Buradaki denklemler ACI ve Alman standartlarıyla uyuşmakla beraber ayrıca ekonomik çözümler vereceğini vurgulamıştır.

7. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki  $f_c'$  yerine  $\sqrt{f_c'}$  konulması daha uygundur. Fakat dizayn formüllerinde  $f_c'$  tercih edilmesinin sebebi daha basit denklemler oluşturulmasıdır.

### 3.1.8. Sanat K. Niyogi (Betonun Yatak Dayanımı–Geometrik Değişimler)

Niyogi (21), yapmış olduğu çalışmada  $d_{max} = 12.7$  mm'lik agrega kullanarak 200 mm'lik küp ve farklı boyutlardaki prizmalar hazırlamıştır. Hazırladığı numunelere kare, dikdörtgen ve şerit yükleme plakaları vasıtasıyla merkezi ve eksantrik olarak yükleme yapmış ve deney verileri elde etmiştir.

Niyogi, deney sonuçlarını etkileyen başlıca faktörleri şu şekilde sıralamıştır;

1. Geometri: Bunu üç başlık altında değerlendirmiştir,
  - a) Numune yüzey alanının yatak plakası alanına oranı ( $R = A_2/A_1$ ). Tabii ki burada yükleme plakasının kare, dikdörtgen veya şerit olması göz önüne alınmalı,
  - b) Numune yüksekliğinin genişliğine oranı ( $d/a$ ),
  - c) Yatak plakasının  $e$  ve  $e'$  eksantriklik değerleri. ( $e$  ve  $e'$ ; yatak plakasının kenarlara olan uzaklığı)
2. Yatağın mahiyeti, rijitliği ve randımanı,
3. Numunenin yatak alanı veya bir taraftan konsantrik yükleme şekli,
4. Betonun karışım özellikleri ve dayanımı,
5. Numunenin boyutu,
6. Donatı şekli ve miktarıdır.

Yüklemelere başlandığında çatlak ilk olarak yükleme yüzeyi yakınında meydana gelmiş, bu çatlağın yükleme yüzeyinden mesafesi; numunenin derinliği, yatak plakasının şekline ve boyutuna bağlı olduğunu ifade etmiştir. Yüklemenin artmasıyla beraber çatlaklar içe ve dışa doğru gelişmiş, bazı numunelerde bu çatlaklarda çatallanma veya sapmalar meydana gelmiş, fakat tabana doğru yaklaştığında diyagonal bir şekil almıştır. Göçmenin oluşumuna doğru çatlaklar genelde yatak plakasının köşesinden dış kısma uzanarak gelişmiştir.

Eksantrik yük altında, ilk çatlama yatak plakasına yakın numune kenarında oluşmuş ve yatak plakasının eksenine ile çatlaklar pek nadiren çakışmıştır. Plakaların yönündeki çatlakların gelişimi diğerleri ile hemen hemen aynı olmuştur.

Deneyler esnasında yatak plakasının numune yüzeyinden itibaren içeri doğru batma miktarı yatak basınç dağılımına, beton dayanımına ve plaka boyutuna bağlı olduğunu belirtmiştir.

Yatak gerilmelerini; ilk çatlamaadaki yatak gerilmesi ( $\sigma_N^1$ ) ve nihai yatak gerilmesi ( $\sigma_N$ ) olmak üzere iki kademede ölçmüştür. Yapmış olduğu denelerde  $\sigma_N^1$  ve  $\sigma_N$  arasında R ve h/d değerlerine göre değişimler olduğunu belirlemiştir. R>8 ve h/d>1 olan numunelerde bu iki yatak gerilmesi arasındaki fark hemen hemen hiç yokken, küçük R değerli h/d<1 olan numunelerde bu fark oldukça fazla olmuştur.

Deneylerde; R<8 değerlerinde numune yüksekliğinin artışı ile beraber yatak dayanımında düşme olduğunu görmüş ve bu düşmenin numune yüksekliğinin azaltılarak tabandaki sürtünme etkisini azaltabileceğini hatta beklenen boyut etkisini dahi verebileceğini belirtilmiştir.

Sabit bir R değerinde yükün her iki eksendeki eksantrikliğini zıt etkilediğini ve küçük yüklü alanların geniş yükülere göre daha fazla etkilendiğini görmüştür. Bu değerlendirmeyi kare plaklara göre yapmıştır, fakat dikdörtgen plakalarda da aynı sonuca varılabileceği kanaatine varmıştır.

Deneyler sonucu elde ettiği veriler tablo 3.12-3.20'de verilmiştir.

**Tablo 3.12.** 20 cm'lik Küp numunelerin kare yükleme plakası ile yüklemesi [21]

Plaka boyutu (cm)	R	$\sigma_N^1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	n
2,5 x 2,5	64	200,045	200,045	28,159	7,10
3,525 x 3,525	32	138,327	141,037	29,676	4,75
5 x 5	16	77,527	81,940	27,235	3,01
7,075 x 7,075	8	44,845	57,201	27,704	2,06
10 x 10	4	36,392	47,334	30,634	1,55
15 x 15	1,78	20,933	34,213	31,386	1,09
20 x 20	1	15,176	27,897	28,849	0,97

**Tablo 3. 13.** 20 cm'lik Küp numunelerin şerit yükleme plakası ile yüklenmesi [21]

Plaka boyutu (cm)	R	$\sigma_N^1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	n
1,25 x 20	16	80,568	81,313	32,138	2,53
1,675 x 20	12	60,910	66,695	30,545	2,18
2,5 x 20	8	48,837	58,594	31,324	1,87
3,325 x 20	6	29,642	44,162	26,891	1,64
5 x 20	4	28,504	39,591	28,559	1,39
6,25 x 20	3,2	24,312	40,653	31,096	1,31
7,5 x 20	2,67	20,782	39,357	31,331	1,26
10 x 20	2	20,616	34,792	31,558	1,10
20 x 20	1	11,611	27,890	28,849	0,97

**Tablo 3.14.** 20 cm'lik Küp numunelerin dikdörtgen yükleme plakası ile yüklenmesi [21]

Plaka boyutu (cm)	R	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	n
1,25 x 5	64	193,046	193,556	29,600	6,54
1,25 x 7,5	42,67	158,082	158,089	29,497	5,36
1,25 x 10	32	131,488	133,260	31,793	4,19
1,25 x 15	21,33	99,840	102,025	29,828	3,42
2,5 x 5	32	123,124	123,738	29,552	4,19
2,5 x 7,5	21,33	80,582	87,153	25,994	3,35
2,5 x 10	16	72,591	79,555	29,552	2,69
2,5 x 15	10,67	50,920	65,447	29,552	2,21
3,325 x 5	24	104,321	104,528	28,525	3,66
3,325 x 7,5	16	70,308	80,823	29,724	2,72
3,325 x 10	12	60,400	72,398	29,724	2,44
3,325 x 15	8	37,054	54,257	29,724	1,83
5 x 7,5	10,67	62,062	66,295	27,028	2,45
5 x 10	8	47,127	50,982	24,836	2,05
5 x 12,5	6,4	40,977	48,665	27,628	1,76
5 x 15	5,33	33,820	43,487	28,132	1,55
7,5 x 10	5,33	37,564	51,299	31,503	1,63
10 x 15	2,67	22,685	34,834	30,241	1,15

**Tablo 3.15.** Kare prizma numunelerin kare yükleme plakası yüklenmesi [21]

Numune boyutu (cm)	Plaka boyutu (cm)	R	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	n
20 x 20 x 10	2,5 x 2,5	64	112,485	120,090	28,256	4,25
	3,525 x 3,525	32	74,487	91,393	30,186	3,03
	5 x 5	16	54,346	76,865	29,835	2,58
	7,075 x 7,075	8	32,303	68,088	28,504	2,15
	10 x 10	4	25,270	48,934	25,477	1,92
20 x 20 x 15	2,5 x 2,5	64	159,605	166,190	27,194	6,11
	3,525 x 3,525	32	101,088	118,056	29,635	3,98
	5 x 5	16	57,008	72,301	27,249	2,65
	7,075 x 7,075	8	32,875	58,594	29,635	1,98
	10 x 10	4	22,616	45,604	30,076	1,52
20 x 20 x 30	2,5 x 2,5	64	205,140	205,140	28,256	7,26
	3,525 x 3,525	32	123,172	123,172	25,153	4,90
	5 x 5	16	84,753	88,366	28,476	3,10
	7,075 x 7,075	8	43,328	51,306	27,215	1,89
	10 x 10	4	32,117	40,384	28,118	1,44
20 x 20 x 40	2,5 x 2,5	64	200,651	131,715	27,794	7,22
	3,525 x 3,525	32	140,679	141,885	28,545	4,97
	5 x 5	16	89,311	92,193	29,221	3,16
	7,075 x 7,075	8	55,105	58,911	31,510	1,87
	10 x 10	4	42,094	42,756	32,082	1,33
20 x 20 x 60	2,5 x 2,5	64	176,388	177,794	25,249	7,04
	3,525 x 3,525	32	130,729	131,488	28,745	4,57
	5 x 5	16	98,054	98,812	30,924	3,20
	7,075 x 7,075	8	54,160	55,587	29,235	1,90
	10 x 10	4	35,916	38,005	29,187	1,30

**Tablo 3.16.** Kare prizma numunelerde dikdörtgen yükleme plakası ile yüklenmesi [21]

Numune boyutu (cm)	Plaka boyutu (cm)	R	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	n
20 x 20 x 10	5 x 7,5	10,67	28,373	41,708	26,201	1,59
	5 x 10	8	26,222	54,636	26,835	2,04
	5 x 15	5,33	22,547	48,134	26,201	1,84
20 x 20 x 15	5 x 10	8	32,303	58,911	28,511	2,07
	5 x 15	5,33	33,310	59,531	34,199	1,74
20 x 20 x 30	5 x 10	8	41,425	49,885	25,394	1,96
	5 x 15	5,33	29,766	39,901	26,298	1,52
20 x 20 x 40	5 x 10	8	56,629	60,814	31,400	1,94
	5 x 15	5,33	39,012	46,548	31,958	1,46
20 x 20 x 60	5 x 10	8	49,023	52,257	29,028	1,80
	5 x 15	5,33	37,743	41,170	31,614	1,30

**Tablo 3.17.** Kare prizma numunelerde şerit yükleme plakası ile yüklenmesi [21]

Numune boyutu cm	Plaka boyutu cm	R	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	n
20 x 20 x 10	1,25 x 20	16	23,946	54,160	23,084	2,35
	2,5 x 20	8	18,058	56,056	27,883	2,01
	3,325 x 20	6	20,664	56,277	29,352	1,92
	5 x 20	4	13,300	46,796	25,987	1,80
	7,5 x 20	2,67	15,403	43,073	25,946	1,66
	10 x 20	2	10,929	41,273	27,208	1,52
20 x 20 x 15	1,25 x 20	16	68,412	68,398	26,739	2,56
	2,5 x 20	8	33,255	52,733	25,946	2,03
	3,325 x 20	6	27,077	53,781	29,697	1,81
	5 x 20	4	22,326	39,667	25,043	1,58
	7,5 x 20	2,67	18,692	34,682	25,077	1,38
	10 x 20	2	18,548	34,378	25,918	1,33
20 x 20 x 30	1,25 x 20	16	72,618	72,970	29,573	2,47
	2,5 x 20	8	46,555	55,587	31,855	1,75
	3,325 x 20	6	45,604	50,223	31,124	1,61
	5 x 20	4	25,181	31,131	25,084	1,24
	10 x 20	2	24,608	36,750	34,227	1,07
20 x 20 x 40	1,25 x 20	16	83,664	83,664	32,669	2,56
	2,5 x 20	8	47,127	53,209	31,145	1,71
	3,325 x 20	6	34,916	41,673	27,787	1,50
	5 x 20	4	31,827	35,702	31,234	1,14
	10 x 20	2	19,003	25,691	29,945	0,86
20 x 20 x 60	1,25 x 20	16	81,375	12,425	31,000	0,40
	2,5 x 20	8	40,853	45,610	28,407	1,61
	3,325 x 20	6	31,352	35,971	27,677	1,30
	5 x 20	4	24,229	29,697	28,214	1,05
	10 x 20	2	17,817	22,719	9,984	2,28

TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
TEKNIK BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

**Tablo 3.18.** Dikdörtgen blok numunelerin şerit yükleme plakaları ile yüklenmesi [21]

Numune boyutu (cm)	Plaka boyutu (cm)	R	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	n
10 x 20 x 20	1,25 x 20	8	48,644	49,410	24,781	1,99
	1,675 x 20	6	28,504	45,583	27,111	1,68
	2,5 x 20	4	23,946	30,786	25,401	1,21
	3,325 x 20	3	20,382	28,497	25,132	1,13
	5 x 20	2	17,734	22,519	23,305	0,97
15 x 20 x 20	1,25 x 20	12	57,387	61,379	26,332	2,33
	2,5 x 20	6	41,997	47,127	28,649	1,65
	5 x 20	3	18,810	28,318	23,305	1,22
	7,5 x 20	2	19,320	34,627	30,910	1,12
30 x 20 x 20	2,5 x 20	12	31,738	52,450	25,422	2,06
	3,325 x 20	9	44,611	56,629	30,331	1,87
	3,75 x 20	8	28,876	50,982	27,932	1,83
	5 x 20	6	22,802	42,756	25,422	1,68
	7,5 x 20	4	18,244	42,439	27,318	1,55
	10 x 20	3	25,215	39,729	29,138	1,36
40 x 20 x 20	15 x 20	2	19,920	39,874	31,165	1,28
	2,5 x 20	16	33,827	54,636	26,153	2,09
	3,325 x 20	12	48,886	51,644	26,946	1,92
	5 x 20	8	20,713	44,893	26,153	1,72
	10 x 20	4	23,933	42,584	27,635	1,54
60 x 20 x 20	20 x 20	2	21,768	41,273	33,193	1,24
	2,5 x 20	24	42,377	58,911	29,269	2,01
	3,75 x 20	16	30,779	52,243	27,677	1,89
	5 x 20	12	25,463	41,804	25,684	1,63
	7,5 x 20	8	23,312	42,280	26,635	1,59
	10 x 20	6	27,904	46,983	31,496	1,49
	15 x 20	4	21,823	44,652	31,372	1,42
	30 x 20	2	7,771	36,743	29,131	1,26

**Tablo 3.19.** 20 cm'lik Küp numunelerde bir eksenli eksantriklik yükleme [21]

Plaka boyutu (cm)	R	e/(2d)	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$n_c$	$n_c/n$
2,5 x 2,5	64	0,125	186,972	187,475	30,083	6,23	0,88
		0,250	135,287	135,287	30,083	4,50	0,63
		0,375	98,805	98,488	30,083	3,27	0,46
3,525 x 3,525	32	0,063	117,043	122,903	29,214	4,21	0,89
		0,125	113,243	113,568	28,800	3,94	0,83
		0,188	108,686	108,686	29,214	3,72	0,78
		0,250	93,482	93,738	29,249	3,20	0,67
5 x 5	16	0,375	66,123	66,882	29,249	2,29	0,48
		0,063	88,552	92,696	32,993	2,81	0,93
		0,125	73,349	74,997	29,152	2,57	0,85
		0,188	68,026	72,080	28,800	2,50	0,83
10 x 10	4	0,250	55,870	63,593	29,152	2,18	0,72
		0,375	42,184	42,315	26,180	1,62	0,54
		0,063	32,117	39,750	26,980	1,47	0,95
		0,125	42,094	41,811	30,890	1,35	0,87
		0,188	28,504	37,550	29,214	1,29	0,83
		0,250	24,229	26,959	26,642	1,01	0,65



**Tablo 3. 20. Kare prizma numuneler için iki eksenli eksantrik yükleme [21]**

Numune boyutu (cm)	R	$e/(2d)$	$e'/(2d)$	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	n	$n_e/n$
2,5 x 2,5	64	0,125	0,125	165,687	165,687	30,221	5,48	0,77
		0,250	0,250	115,526	115,526	30,221	3,82	0,54
		0,375	0,375	60,800	60,828	30,221	2,01	0,28
3,525 x 3,525	32	0,063	0,063	113,823	113,823	27,870	4,08	0,86
		0,125	0,125	114,416	113,726	29,559	3,85	0,81
		0,188	0,188	85,884	85,884	27,897	3,08	0,65
		0,250	0,250	78,286	78,534	29,559	2,66	0,56
		0,375	0,375	38,764	46,107	29,235	1,58	0,33
5 x 5	16	0,063	0,063	66,130	69,929	26,180	2,67	0,89
		0,125	0,125	75,252	78,293	32,751	2,39	0,79
		0,188	0,188	52,064	54,726	26,463	2,07	0,69
		0,250	0,250	49,410	56,118	31,400	1,79	0,59
		0,313	0,313	35,344	40,922	28,980	1,41	0,47
		0,375	0,375	34,585	36,488	31,586	1,16	0,75
10 x 10	4	0,063	0,063	30,214	38,005	26,635	1,43	0,92
		0,125	0,125	24,415	34,682	27,966	1,24	0,80
		0,188	0,188	24,395	30,248	26,442	1,14	0,74
		0,250	0,250	22,140	23,870	27,856	0,86	0,55
5 x 5	16	0,063	0,125	67,268	68,791	27,787	2,48	0,82
		0,063	0,250	53,209	56,284	27,787	2,03	0,67
		0,063	0,375	45,604	45,983	28,966	1,59	0,53
		0,125	0,250	49,023	63,089	31,717	1,99	0,66
		0,125	0,375	47,886	50,547	31,717	1,59	0,53
		0,250	0,375	38,764	39,267	30,407	1,29	0,43

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmalara başlamadan önce literatür taraması yapılmıştır. Yapılan bu taramalarda hem boyut etkisi hem de yatak dayanımı üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalara dikkat edildiğinde genel olarak yalnızca bir konunun araştırıldığı görülür. Yatak mukavemeti üzerine yapılan çalışmalarda genellikle tek boyutta veya değişken olarak yüzey alanının yükleme alanına oranı (R) esas alınmış ve çalışmalar dar bir çerçevede kalmıştır.

Daha kapsamlı bir çalışma ortaya koymak amacıyla sunulan tez çalışmasında boyutları ve karışımları açısından farklı numune serileri hazırlanmıştır. Numuneler boyut değişim aralığı 1/4 olan kare prizma ve silindir şeklinde, h/d oranı 1/1, 1/2 ve 1/3 olarak seçilmiştir. Karışımlar hazırlanırken  $d_{max}$  4 mm, 8 mm ve 16 mm olma üzere üç ana grupta seriler oluşturulmuştur. Ayrıca betonun basınç dayanımının yatak mukavemeti üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla düşük, normal ve yüksek dayanımlı beton numuneler hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Normal dayanımlı numunelerde KPC 32,5 ve yüksek dayanımlı numunelerde KPC 42,5 kullanılmıştır. Bazı karışımların içine akışkanlaştırıcı katkı maddesi konularak dayanımın artırılması da sağlanmıştır.

Numuneler hazırlanırken karışımlar da üç farklı değerde maksimum agrega çapı kullanılarak elde edilen verilerden, yatak mukavemetinde iç sürtünmenin etkisi de incelenebilir. Fakat deneysel çalışma yapılırken özellikle küçük boyutlu numunelerde çok dikkat edilmesi gereklidir. Çünkü deney esnasında yatak plakasının altına gelecek büyük bir agrega sonuçlarda sapmalar meydana getirebilir ve bunun sonucunda tutarsız deney verileri elde edilebilir.

Her seri; üç farklı boyutlu numune ve standart silindir numunelerden oluşturulmuştur. Basınç dayanımları standart silindirlere (100x200 mm) belirlenen numuneler R oranlarına göre yatak plakaları vasıtasıyla deneye tabii tutulmuştur. Deneyler 2.5 MN luk hidrolik yük kontrollü preste yapılmış ve max. yüke ortalama 8 dk.± 30 sn. de ulaşılmıştır.

Deneysel çalışmalarda yatak levhası olarak 10 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılmıştır. Sonuçların tutarlı ve deney şartlarının aynı olabilmesi için yüzeyleri temiz ve pürüzsüz rijit çelik plakalar kullanılmasına dikkat edilmiştir. Yükleme yapıldıktan sonra yatak plakaları kontrol edildi, şayet herhangi bir zedelenme varsa bunlar yenileri ile değiştirilmiştir. Ayrıca yükleme esnasında numune ve yatak plakalarının temas yüzeylerinin tam ve merkezci olmasına dikkat edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda numunenin yatak plakası ve pres tablasıyla temas eden yüzeyleri yağlanmamıştır. Normal şartlar altında düşünüldüğünde mutlaka belli bir oranda sürtünme olayı meydana gelecektir. Fakat deneyler tamamı aynı şartlar altında yapıldığından dolayı sürtünme faktörü dikkate alınmamıştır.

TR. YATAY GÖRÜŞ KURULU  
BÜYÜK MİMARLIK VE İNŞAAT



#### 4.1. Numune Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Deneylerde kullanılan agrega, Elazığ ili, Palu ilçesinden geçen Murat Nehrin'den temin edilmiştir. Minerolojik olarak nehir kumu niteliğinde olan agreganın özellikleri tablo 4.1'de verilmiştir. Numunenin seri özelliklerine göre, maksimum dane çapı, 4 mm, 8 mm ve 16 mm olarak alınmıştır. Granülometrik bir karışım oluşturulması amacıyla TS 706'daki sınır değerlere uygun olarak ayarlanmıştır. Fakat bazı karışımlarda farklı basınç dayanımları elde etmek amacıyla bu sınır değerlerin dışına çıkmıştır.

Tablo 4.1. Karışıma giren agregaya ait genel özellikler

Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Su emme (%)	Aşınma kaybı (%)	Kil miktarı (%)	Donma kaybı (%)
2.48	4	16.6	2.0	1.83

Deneylerde Elazığ Altınova Çimento San. T.A.Ş.'nin ürettiği PKÇ/B 32.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler tablo 4.2 de verilmiştir.

Tablo 4.2. PKÇ/B 32.5 R Tipi çimentonun fiziksel ve kimyasal analizleri

Kimyasal Analiz Sonuçları									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	T.E.			
26.86	8.09	5.18	45.88	3.64	2.41	4.99			
Fiziksel Analiz Sonuçları									
45µ	Blaine	Priz b.	Priz s.	Öz. ağı.	Yoğunluk	H. gen.	2 gün	7 gün	28 gün
1.9	4326	2.35	3.45	2.98	925	4	16.9	28.4	39

Yüksek dayanımlı numune üretiminde PKÇ 42.5 tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler tablo 4.3 de verilmiştir.

Tablo 4.3. PKÇ 42.5 R Tipi çimentonun fiziksel ve kimyasal analizleri

Kimyasal Analiz Sonuçları									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	T.E.			
32.08	6.05	3.23	49	3.85	3.31	1.05			
Fiziksel Analiz Sonuçları									
45µ	Blaine	Priz b.	Priz s.	Öz. ağı.	Yoğunluk	H. gen.	2 gün	7 gün	28 gün
1.3	3493	1.55	3.05	3.06	980	6	23.8	41.3	57

Ayrıca yüksek dayanımlı numunelerin elde edilmesi amaçlanan numune karışımları hazırlanırken karışımın içerisine % 1,1 oranında Sikamek 98 Süper Akışkanlaştırıcı katılmıştır.

## 4.2. Numunelerin Malzeme Karışım Miktarları

Karışımlar hazırlanırken S/Ç oranı 0.55 ve çökme değeri de yaklaşık olarak 6 ~ 7 cm civarında alınmıştır. Karışıma giren malzeme oranları ve özellikleri aynı olduğu halde bazı numunelerin basınç dayanımlarında farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bunun en önemli sebebi ise çimentoların dayanımları arasındaki küçük farklılıklardan dolayıdır. Serilerin 1m<sup>3</sup>'ü için gerekli malzeme miktarları tablo 4.4. de verilmiştir.

Maksimum dane çapı 4 mm olan grup, toplam beş seri numuneden oluşmaktadır. d/h oranı 1/1 olan Üç serisi küp ve iki seri silindir, d/h oranı 1/2 ve 1/3 olan birer seri kare prizma numuneleridir. Bu seriye bakıldığında genel olarak dört farklı (R) ve üç farklı d/h oranlarında numuneler hazırlanarak deneylere tabii tutulmuştur.

Maksimum dane çapı 8 mm olan grup, toplam on seri numuneden oluşmaktadır. d/h oranı 1/1 olan dört seri küp ve iki seride silindir numunelerdir. d/h oranı 1/2 olan iki seri kare prizma ile iki seride silindir numunelerden oluşmaktadır. Bu seriye bakıldığında genel olarak iki farklı (R) ve iki farklı d/h oranlarında numuneler hazırlanarak deneylere tabii tutulmuştur.

Maksimum dane çapı 16 mm olan grup, toplam beş seri numuneden oluşmaktadır. d/h oranı 1/1 olan üç seri küp, d/h oranı 1/2 ve 1/3 olan birer seri kare prizma numunelerden oluşmaktadır. Bu seriye bakıldığında genel olarak yedi farklı (R) ve üç farklı d/h oranlarında numuneler hazırlanarak deneylere tabii tutulmuştur.

Ayrıca bazı serilerde yüksek dayanımlı beton elde etmek amacıyla karışım hazırlanırken Sikamek 98 Süper Akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Kullanılan katkı maddesi karışımın içerisine belli bir miktar su ile karıştırılarak çimentonun ağırlığınca % 1,1 civarında kademeli olarak ilave edilmiştir. Katkı maddesi katıldığında da çökme değeri yine 6 ~ 7 cm civarında alınmıştır.

Tablo 4.4. Bazı serilerin 1m<sup>3</sup>'ü için gerekli olan malzeme miktarları

d <sub>max</sub> (mm)	f <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	$\sqrt{R}$	Kum (kg)	Çakıl (kg)	Çimento (kg)	Su (lt)	Süper Akışkanlaştırıcı (kg)
4	27,42	2,5	1500	-	455	250	-
4	20,31	2,5	1530	-	440	242	-
4	22,51						
8	9,63	2,5	1085	810	335	175	-
8	22,03	2,5	810	774	415	228	-
8	23,6	4	810	774	415	228	-
8	48	2,5	833,5	792	427	202	4,688
16	24,05	2,5	780	960	380	198	-

Hazırlanan karışımlar deneylere tabii tutulmuş ve elde edilen veriler Matlab programı ortamında BEK ve Fraktal'a göre analizler yapılmış ve grafikler hazırlanmıştır.

### 4.3. Basınç Altındaki Numunelerin Davranışı ve Göçmenin Oluşum Şekli

Hazırlanan numuneler üzerinde basınç ve yatak dayanımı deneyleri Şekil 4.1 de görülen 2.5 MN luk hidrolik yük kontrollü preste yapılmıştır. Yükleme yapılırken numuneye uygulanacak yükleme hızı numune yüzey alanına göre belirlenmiş ve yükleme hızı sırasıyla 1 kN/sn, 2 kN/sn ve 4 kN/sn olarak uygulanmıştır. Maksimum yüke ulaşıldığında pres otomatik olarak yüklemeyi kesmiştir.



Şekil 4.1. Hidrolik yük kontrollü preste numunenin yüklenmesi

Yükleme deneyleri sırasında numunelerde göçmenin oluşumuna bakıldığında genel olarak iki aşamada meydana geldiği görülmüştür. Birinci aşamada, yatak plakası uygulanan yük sonucu numune yüzeyinden itibaren aşağıya doğru yavaş yavaş çökmeye başlamış ve bu olaydan kısa bir süre sonra numunenin yan yüzeylerinde belirli bölgelerden hafif dökülmeler ve

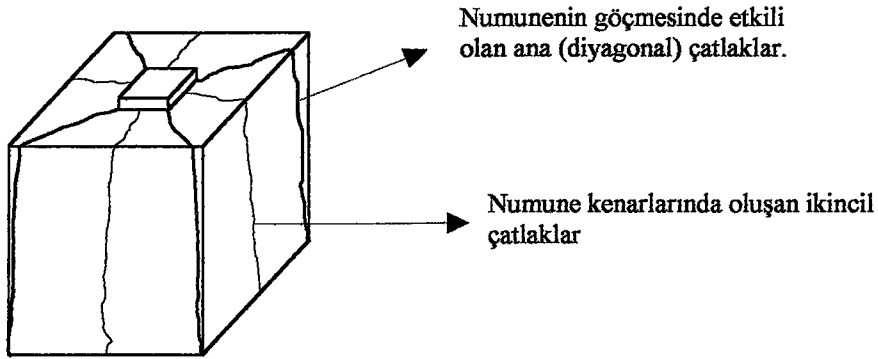
ince çatlaklar oluşmuştur. Yüklemenin devam etmesi ve yatak plakasının aşağı doğru baskı yapması sonucunda numunede parçalanmalar meydana gelmiş ve nihai yatak mukavemetine ulaşıldıktan sonra mekanizma otomatik olarak yüklemeyi kesmiştir. Her ne kadar numunelerdeki göçme olayının oluşumu genel olarak bu şekilde meydana gelmişse de d/h oranı 1/2 ve 2/3 olan numunelerle 1/1 olan numuneler arasında göçmenin oluşumunda farklılıklar mevcut olduğu için bunları iki ayrı kategoride incelenmiştir. Fakat genel bir bakış açısıyla incelendiğinde göçme olayı iki aşamada meydana gelmiştir. Bunlar;

1. Pramidin oluşumu,
2. Parçalanmadır.

#### 4.3.1. d/h Oranı 1/1 Olan Numunelerde Göçmenin Oluşum Şekli

Bu numunelerde yükleme başladığında, ilk önce uygulanan yükün etkisiyle numunenin yatak plakası altında kalan yükleme alanı aşağı doğru çökmeye başlamış ve yükün artmasıyla beraber yükleme alanının köşe ve kenarlarından numune kenarlarına doğru ince çatlaklar meydana gelmeye başlamıştır. Bu çatlakların ilerlemesinden bir süre sonra kenar çatlaklar meydana gelmiş ve yüklemenin artırılmasıyla maksimum yüke ulaşıldıktan bir süre sonra numune çatlaklardan ayrılarak parçalanmıştır.

Numunelerde göçme esnasında çatlakların oluşumuna dikkat edildiğinde ( Şekil 4.2.); yatak plakasının köşelerinden numune köşelerine doğru ilerleyen ve kenarlara dik yöndeki çatlaklar olmak üzere iki çeşit çatlak oluşmuştur. Piramit formasyonunun oluşmasında ve numunenin göçmesinde asıl etkili olan ana çatlaklar köşeler yönündeki diyagonal çatlaklardır. Kenarlara dik yöndeki çatlaklar ana çatlaklar değildirler, fakat numunenin göçmesinde etkileri vardır.

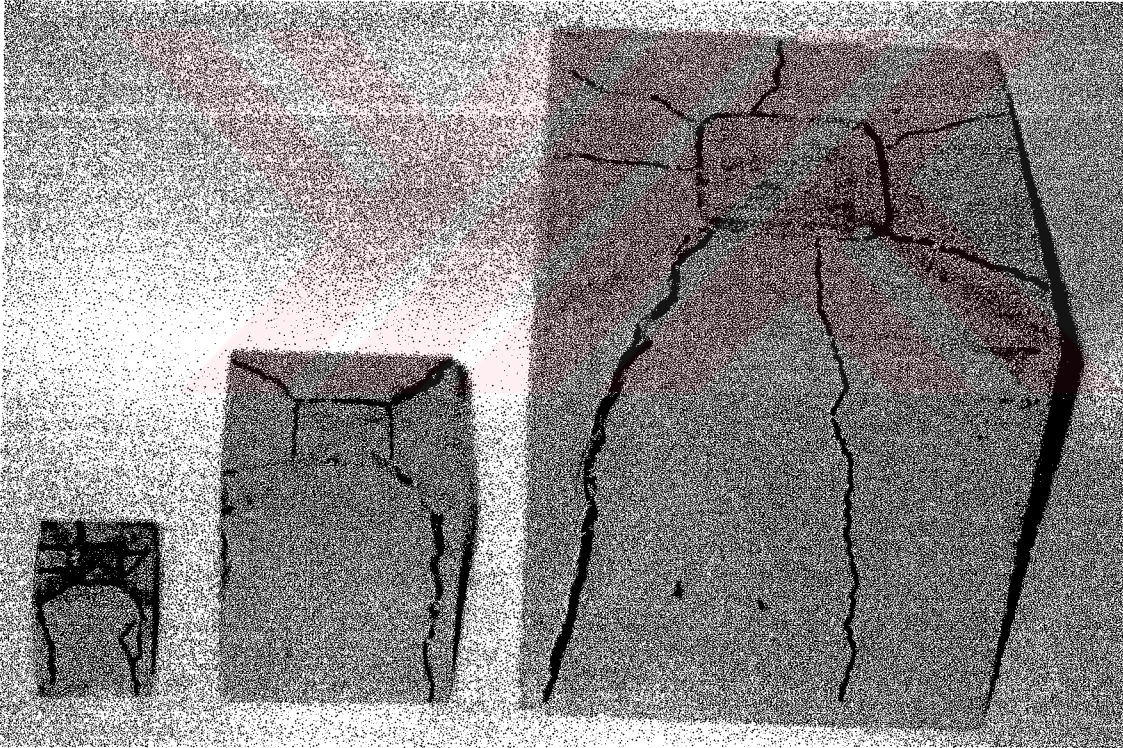


Şekil 4.2. d/h Oranı 1/1 olan numunelerde çatlak çeşitleri



Yüklemenin başlangıcından itibaren çatlak oluşumuna dikkat edildiğinde, yüklemeye başladıktan bir süre sonra numunelerin yan yüzeylerinde köşelere yakın bölgede çatlaklar oluşmaya başlamış ve artan yük ile ilerleyen çatlak yüklem plakasına doğru diyagonal olarak gelişmiştir. Bu çatlaklar plakaya ulaştıktan sonra göçme meydana gelmiştir. Bu çatlaklar blokların göçmesinde ve pramidin oluşumunda ana unsurdur. Şekil 4.3 ve şekil 4.4’de küp ve silindir numunelerin de genel olarak çatlama şekli gösterilmiştir.

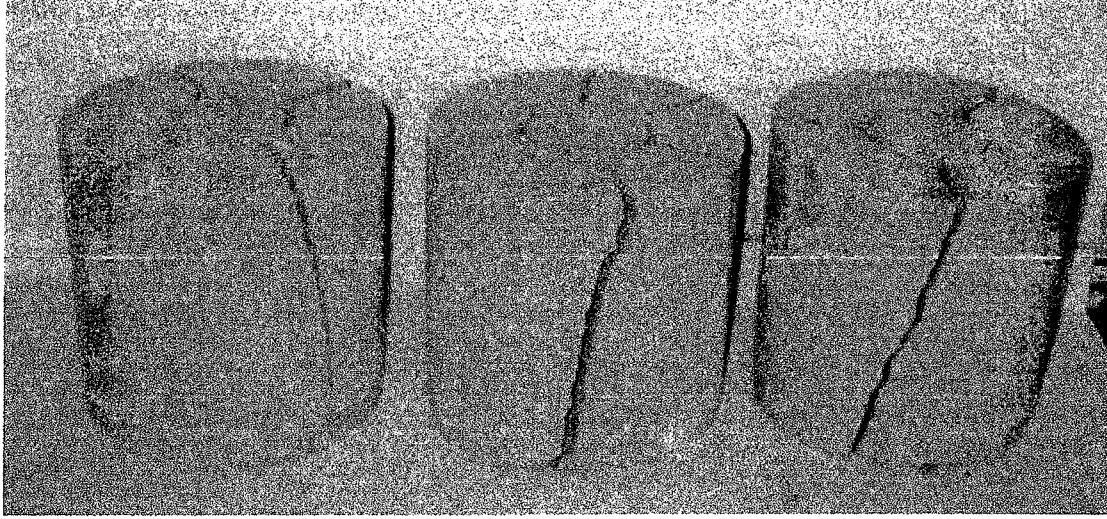
Köşeler yönündeki diyagonal çatlaklardan hariç, kenarlara dik yöndeki ikincil çatlaklar oluşmuştur. Kalınlıkları diğer çatlaklara oranla biraz daha ince olan bu çatlaklar diyagonal çatlakların oluşmaya başlamasından kısa bir süre sonra meydana gelmiştir. Numunenin göçmesinde ana çatlaklar kadar etkili olmamalarına rağmen yinede göçme olayı ve yüklem sonrası numunede yatak plakasının ters piramit formasyonunun meydana gelmesinde bir miktar etkili olmuştur.



Şekil 4.3. d/h Oranı 1/1 olan küp numunelerde göçme tarzı

Çatlakların oluşmaya başlamasıyla beraber yüklemeye devam edildiğinde, ters piramit formasyonundaki kamanın oluşumunda sonra göçen blokların yük taşıma kapasitesi de yavaş yavaş azalmıştır.





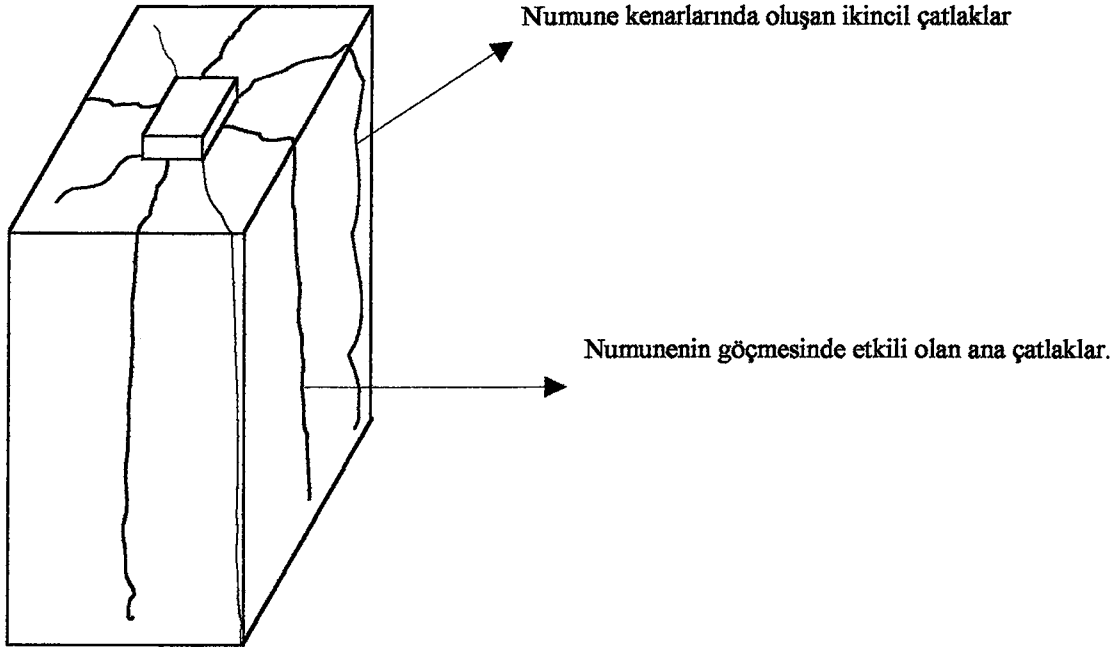
**Şekil 4.4. D/h Oranı 1/1 olan silindir numunelerde göçme tarzı**

Numunelerin nihai göçme durumuna bakıldığında genel olarak ters piramit formasyonunda kamanın oluşumu gözlenmiştir. Her ne kadar, maksimum dane çapı büyük, ebadı küçük numunelerde bazen yükleme plakası altına büyük agrega denk geldiğinde istenildiği gibi temiz piramit formasyonu oluşmadıysa da genel olarak tam oluşum sağlanmıştır. Bilindiği gibi beton heterojen yapıya sahip bir malzemedir, bu sebeple piramit yüzeylerinde tam simetriklik görülmemektedir. Fakat simetriklikteki bu bozukluk çok küçük oranlarda olduğundan dolayı fazla dikkate alınmamıştır.

#### **4.3.2. d/h Oranı 1/2 ve 1/3 Olan Numunelerde Göçmenin Oluşum Şekli**

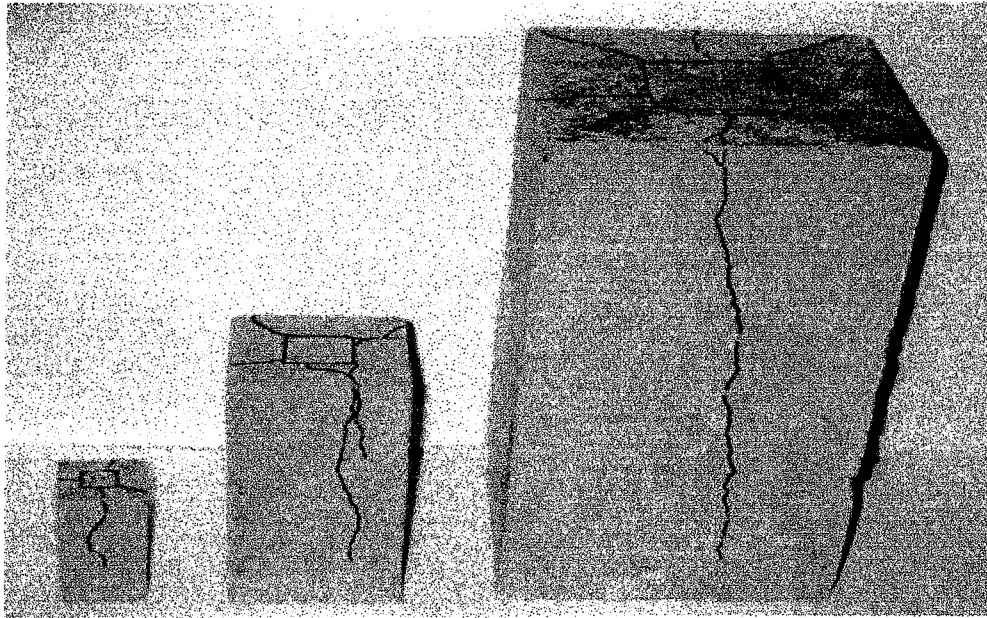
Bu numunelerde ise göçme her ne kadar d/h oranı 1/1 olan numunelerde olduğu gibi geliştirse de çatlakların oluşumuna bakıldığında farklılıklar olmuştur. En önemli farklılık ise numunenin göçmesine sebep olan çatlakların gelişim yönü ve şeklidir. d/h oranı 1/1 olan numunelerde ana çatlaklar köşeler yönündeki diyagonal çatlaklar olmasına rağmen bu numunelerde ana çatlaklar kenarlar yönünde olmuştur.

Bu numunelerde yükleme başladıktan sonra yüklemenin etkisiyle yatak plakası aşağı doğru baskı yapmaya başlamış ve bunun sonucunda ilk önce numunenin yan yüzeylerinden üst yüzeye yakın bölgede ve dik yönde ince çatlaklar meydana gelmeye başlamıştır. Yüklemenin artmasıyla beraber genişleyen bu çatlaklar numune üst yüzeyinden gelen çatlaklarla birleşmiş ve numunelerin göçme yüküne yaklaşıldığında köşeleri yönünde küçük oranlarda diyagonal çatlaklar oluşmuştur (Şekil 4.5.). Fakat bu çatlaklar d/h oranı 1/1 olan numunelerde olduğu gibi göçmeye sebep olan ana çatlaklar olmayıp sadece ikincil çatlaklardır.



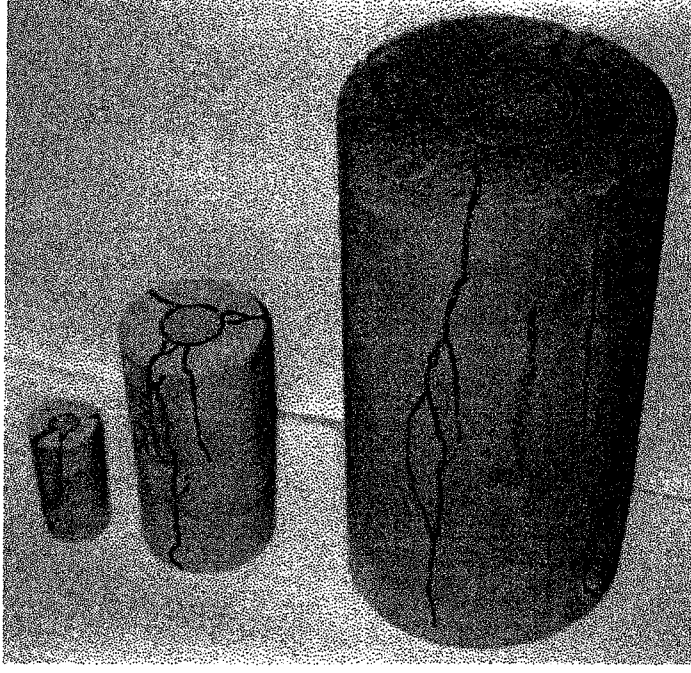
Şekil 4.5.  $d/h$  Oranı  $1/2$  ve  $1/3$  olan numunelerde çatlak çeşitleri

Ayrıca, göçme olayından sonra çatlakların yapısına dikkat edildiğinde  $d/h$  oranı  $1/1$  olan numunelerle bu numunelerin çatlak yapısı ve boyu arasında farklılıklar olduğunu da rahat bir şekilde görülebilir.  $d/h$  oranı  $1/1$  olan numunelerde çatlak boyları hemen hemen taban kadar inmesine rağmen  $d/h$  oranı  $1/2$  ve  $1/3$  olan numunelerde ise ana çatlakların tabana kadar inmediği gözlenmiştir (şekil 4.6, 4.7 ve 4.8).

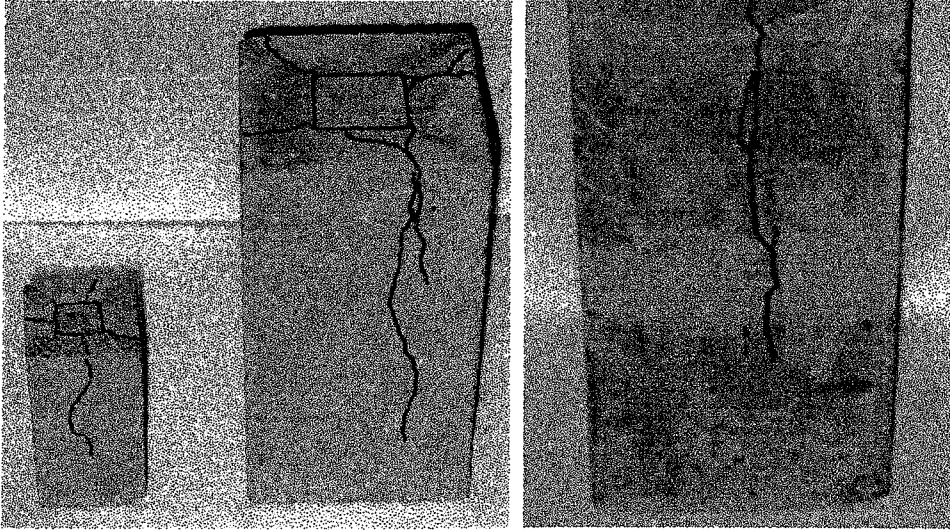


Şekil 4.6.  $d/h$  Oranı  $1/2$  olan kare prizma numunelerde göçme tarzı





**Şekil 4.7.** D/h Oranı 1/2 olan silindir numunelerde göçme tarzı

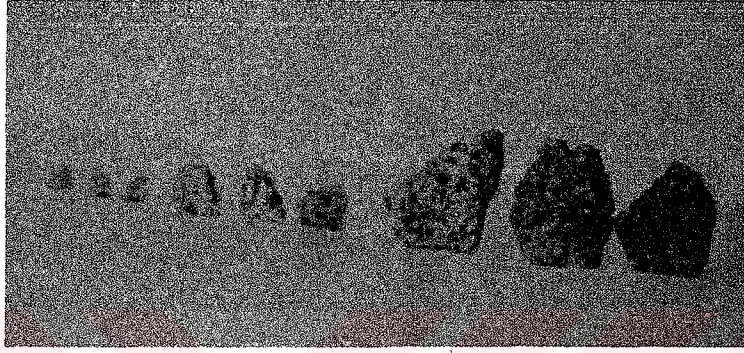


**Şekil 4.8.** d/h Oranı 1/3 olan kare prizma numunelerde göçme tarzı

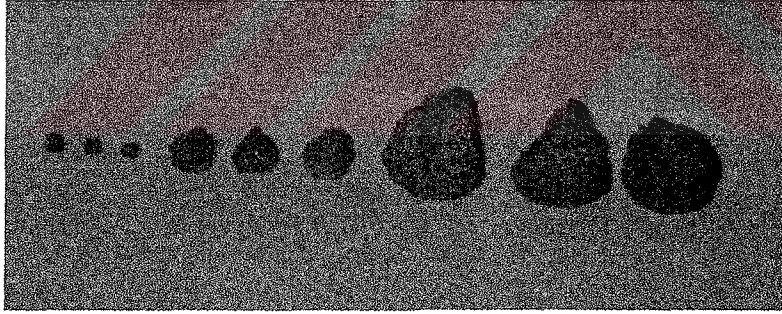


#### 4.4. Ters Piramit Formasyonunun Belirlenmesi

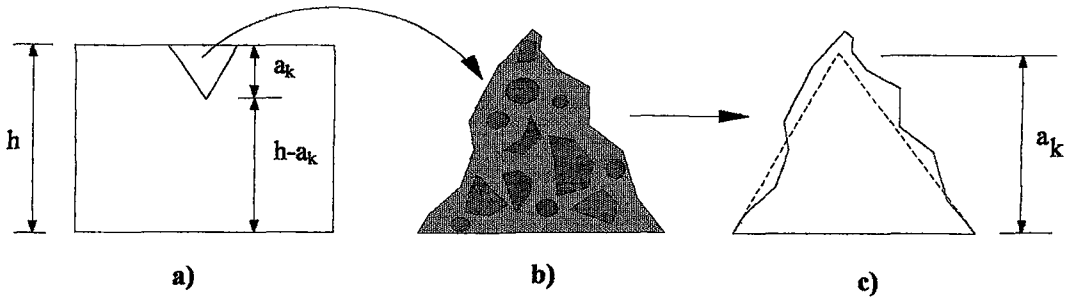
Yatak dayanımı deneyi sonucunda parçalanan numunelerde, kama oluşum şeklinin belirlenmesi amacıyla numuneler çatlaklar doğrultusunda kırılmıştır. Yükleme levhasının altında oluşan kama biçimindeki beton bloklar çıkarılmış (şekil 4.9 ve 4.10) ve boyutları kabaca şekil 4.11’de görüldüğü gibi ölçülmüştür.



Şekil 4.9. Kare kesitli numunelerde kama şekilleri



Şekil 4.10. Dairesel kesitli numunelerde kama şekilleri



Şekil 4.11. Kırılan numunelerde kama boyunun tespiti

## 5. DENEY SONUÇLARI

### 5.1. $d_{max}=4$ mm'lik Numunelerin Deney Sonuçları

Tablo 5.1a.  $d_{max}=4$  mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları

Seri No	d (mm)	b (mm)	R	$P_U$ (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )				$f'_c$ N/mm <sup>2</sup>	n $\sigma_{Nort}/f'_c$
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$	$\sigma_{Nort}$		
Seri I	50	20	6.25	39.6	37.1	40.7	99	92.75	101.75	97.83	27.42	3.57
	100	40	6.25	112.4	109.1	113.4	70.25	68.19	70.88	69.77		2.54
	200	80	6.25	345.5	352.9	367.2	53.98	55.14	57.38	55.5		2.02
Seri II	50	12.5	16	19.3	19.4	-	123.52	124.16	-	123.84	20.31	6.10
	100	25	16	59.5	58.9	-	95.2	94.24	-	94.72		4.66
	200	50	16	183.9	186.5	-	73.56	74.6	-	74.08		3.65
Seri III	100	12.5	64	33.6	31.8	-	215.4	203.52	-	209.46	20.31	10.31
	100	25	16	59.5	58.9	-	95.2	94.24	-	94.72		4.66
	100	50	4	107.1	112.3	-	42.84	44.92	-	43.88		2.16

Tablo 5.1b.  $d_{max}=4$  mm'lik Kare prizma numunelerin deney sonuçları

Seri No	h (mm)	b (mm)	R	$P_U$ (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )				$f'_c$ N/mm <sup>2</sup>	n $\sigma_{Nort}/f'_c$
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$	$\sigma_{Nort}$		
Seri IV	100	20	6.25	23.2	22.9	23.9	58	57.25	59.75	58.33	20.31	2.87
	200	40	6.25	82.7	86.3	88.3	51.69	53.94	55.19	53.61		2.64
	400	80	6.25	265	262.3	272.9	41.41	40.98	42.64	41.67		2.05
Seri V	150	20	6.25	23.1	24.2	24.1	57.75	60.5	60.25	59.50	22.51	2.64
	300	40	6.25	92.7	90.2	89.7	57.94	56.38	56.06	56.79		2.52
	600	80	6.25	290	283	305	45.31	44.22	47.66	45.73		2.03

\*(Not: IV. Seride  $h/d=2$  ve V. Seride  $d/a=3$  oranındadır.)

Tablo 5.1c.  $d_{max}=4$  mm'lik Silindir numunelerin deney sonuçları

Seri No	D (mm)	b (mm)	R	$P_U$ (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )				$f'_c$ N/mm <sup>2</sup>	n $\sigma_{Nort}/f'_c$
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$	$\sigma_{Nort}$		
Seri VI	50	12.5	16	23.9	22.7	23.5	194.75	184.98	191.5	190.41	34.24	5.56
	100	25	16	77.1	76.2	77.9	157.07	155.23	158.7	156.67		4.58
	200	50	16	230.1	229.7	230.4	117.19	116.99	117.34	117.17		3.42
Seri VII	50	20	6.25	35.3	36.5	35.7	112.36	116.18	113.64	114.06	34.24	3.33
	100	40	6.25	114.7	112.5	113.1	91.28	89.52	90	90.27		2.64
	200	80	6.25	378.5	367.9	365.4	75.3	73.19	72.69	73.73		2.15

\*(Not: VI. ve VII. Seride  $D/h=1$  oranındadır.)

Deneyler sonucunda elde edilen veriler yardımıyla nominal dayanım ( $\sigma_N$ ) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerden faydalanılarak ampirik sabitler Matlab programı vasıtasıyla bulunmuştur. Bulunan bu değerler nominal dayanım ile numune boyutu arasındaki ilişkiyi gösteren formülasyon ifadesinde yerleştirilmiş ve hem BEK hemde FBK ya göre ifadeler elde edilmiştir. Ayrıca her iki kanuna göre elde edilen korelasyon katsayısı değerlerine bakılırsa  $r > 0.9$  olduğu görülür ki buda sonuçların tutarlı olduğunun bir ifadesidir

**Tablo 5.2a.**  $d_{max} = 4$  mm'lik Küp numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri

Seri No	d (mm)	b (mm)	Kama Boyu (mm)			$\frac{\overline{a_k}}{h}$	Yarım Tepe Açısı			$\alpha_{ort}$
			$a_{k1}$	$a_{k2}$	$a_{k3}$		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
Seri I	50	20	24	26	26	0.51	22.62	22.04	21.04	21.57
	100	40	43	42	43	0.43	24.94	25.46	24.94	25.11
	200	80	81	81	83	0.41	26.28	26.28	25.73	26.10
Seri II	50	12.5	16	17	-	0.33	21.34	20.19	-	20.77
	100	25	28	26	-	0.27	24.06	25.68	-	24.87
	200	50	52	51	-	0.26	25.67	26.11	-	25.89
Seri III	100	12.5	18	21	-	0.20	19.15	16.57	-	17.86
	100	25	29	30	-	0.30	23.32	22.62	-	22.97
	100	50	51	49	-	0.50	26.11	27.03	-	26.57

**Tablo 5.2b.**  $d_{max} = 4$  mm'lik Kare prizma numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri

Seri No	h (mm)	b (mm)	Kama Boyu (mm)			$\frac{\overline{a_k}}{h}$	Yarım Tepe Açısı			$\alpha_{ort}$
			$a_{k1}$	$a_{k2}$	$a_{k3}$		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
Seri IV	100	20	29	26	27	0.27	19.02	21.04	20.32	20.13
	200	40	45	46	46	0.23	23.96	23.50	23.50	23.65
	400	80	83	83	85	0.21	25.73	25.73	25.20	25.55
Seri V	150	20	27	27	29	0.18	20.32	20.32	19.02	19.89
	300	40	48	50	47	0.16	22.62	21.80	23.05	22.49
	600	80	87	84	83	0.14	24.69	25.46	25.73	25.29

**Tablo 5.2c.**  $d_{max} = 4$  mm'lik Silindir numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri

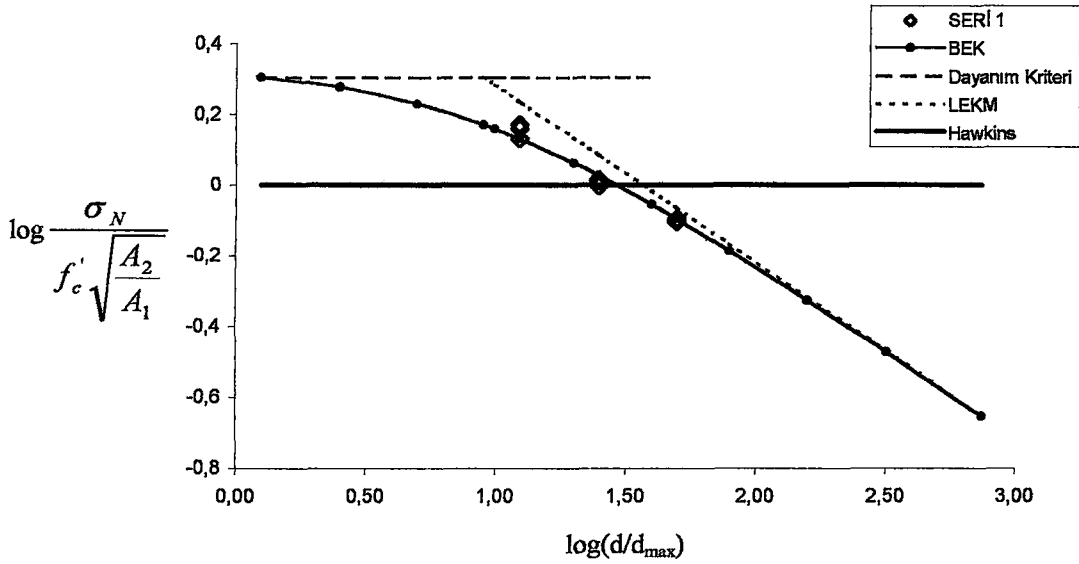
Seri No	h (mm)	b (mm)	Kama Boyu (mm)			$\frac{\overline{a_k}}{h}$	Yarım Tepe Açısı			$\alpha_{ort}$
			$a_{k1}$	$a_{k2}$	$a_{k3}$		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
Seri IV	50	12.5	12.29	12.19	12.71	0.25	26.96	27.15	26.19	26.77
	100	25	23.08	23.79	23.15	0.23	28.44	27.72	28.37	28.18
	200	50	43.84	43.93	43.37	0.22	29.69	29.64	29.96	29.76
Seri V	50	20	19.60	19.16	20.03	0.39	27.03	27.56	26.53	27.04
	100	40	34.48	35.42	35.45	0.35	30.11	29.45	29.43	29.66
	200	80	64.75	64.17	65.13	0.32	31.71	31.94	31.56	31.74

Tablo 5.3.  $d_{max}=4$  mm için deney sonuçlarının analizleri.

SERİ NO	BEK			FBEK		
	r	B	$d_o$	r	$f_t$	$l_{ch}$
I	0.9825	149.0322	31.4596	0.9853	26.9126	606.0936
II	0.9970	183.1367	38.7258	0.9997	49.3961	264.7659
IV	0.9796	74.4460	93.1667	0.9085	38.3847	69.7503
V	0.9563	71.0374	145.0535	0.8577	43.994	45.0951
VI	0.9978	294.9905	37.7449	0.9803	88.9881	183.6351
VII	0.9909	147.0639	66.0384	0.9966	54.8189	167.1666

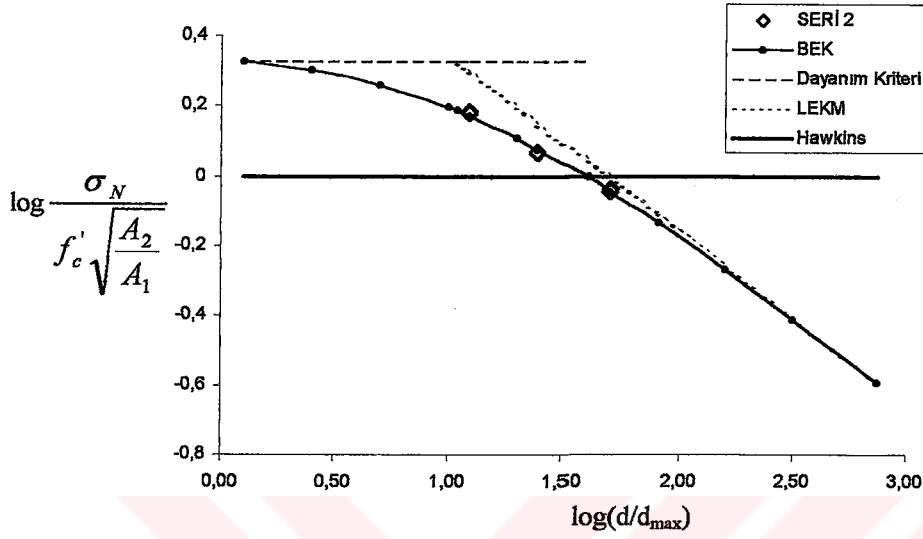
### 5.1.1. $d_{max}=4$ mm'lik Numunelerin BEK'ya Göre Formülasyon ve Grafikleri

$$\text{Seri I} \dots\dots\dots \sigma_N = 2,174 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{7,8649 d_{max}} \right)^{-1/2} \quad (5.1)$$



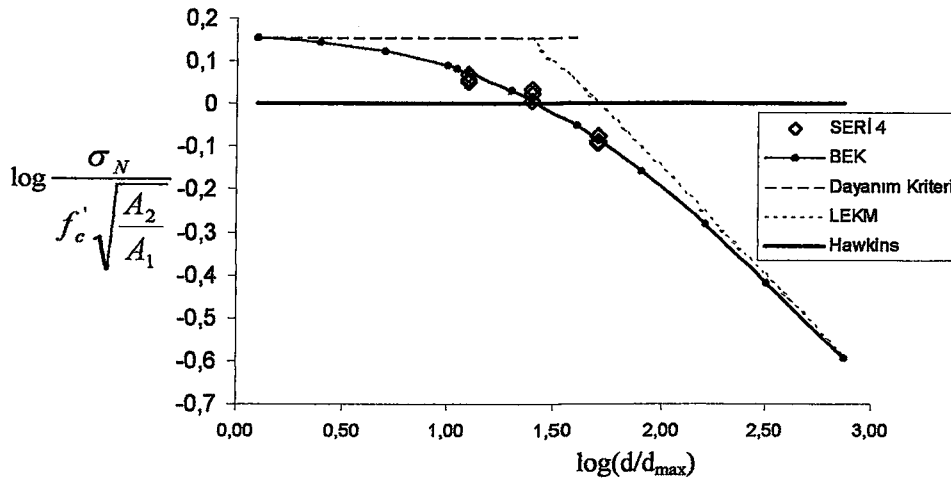
Şekil 5.1.  $d_{max}=4$  mm için seri I sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri II .....  $\sigma_N = 2,254 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{9,682 d_{\max}}\right)^{-1/2}$  (5.2)



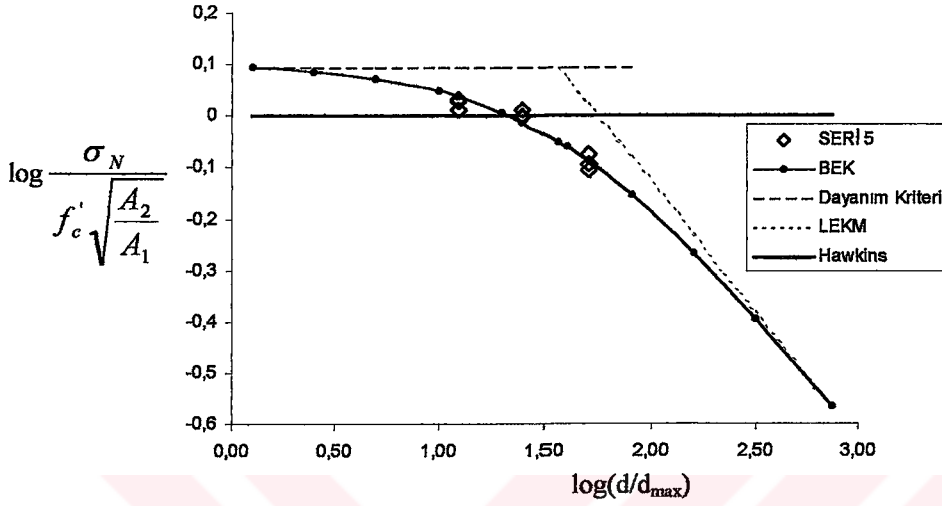
Şekil 5.2.  $d_{\max} = 4$  mm için seri II sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri IV .....  $\sigma_N = 1,466 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{23,292 d_{\max}}\right)^{-1/2}$  (5.3)



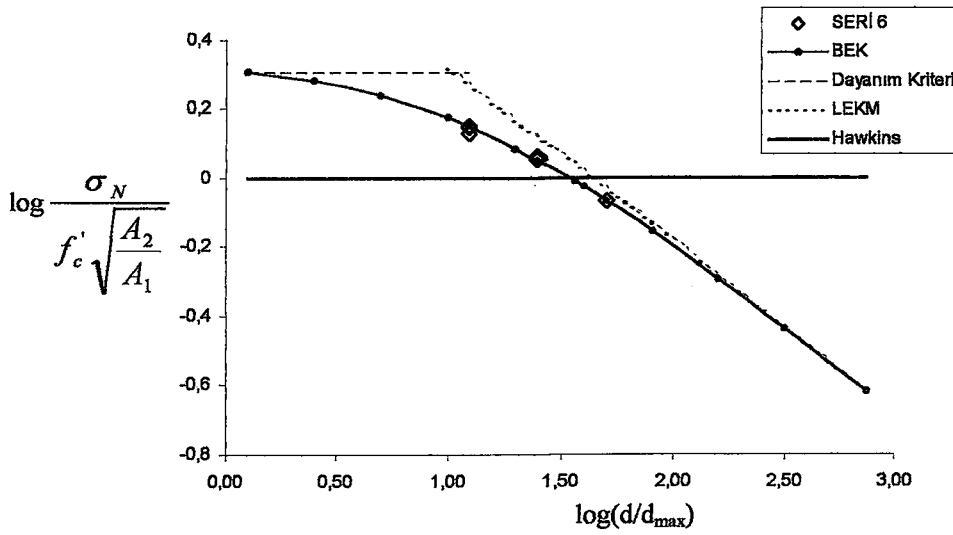
Şekil 5.3.  $d_{\max} = 4$  mm için seri IV sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri V .....  $\sigma_N = 1,262 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{36,263 d_{\max}} \right)^{-1/2}$  (5.4)



Şekil 5.4.  $d_{\max} = 4$  mm için seri V sonuçlarıyla formülasyon grafiği

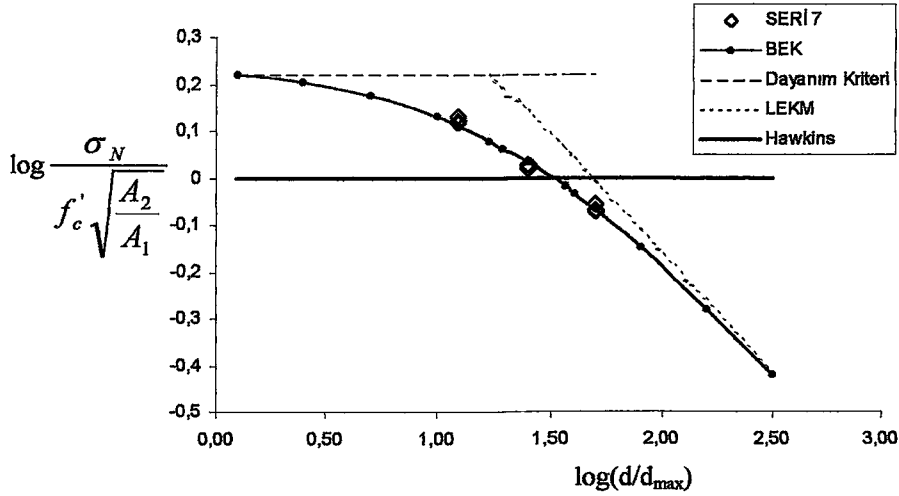
Seri VI .....  $\sigma_N = 2,154 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{9,436 d_{\max}} \right)^{-1/2}$  (5.5)



Şekil 5.5.  $d_{\max} = 4$  mm için seri VI sonuçlarıyla formülasyon grafiği



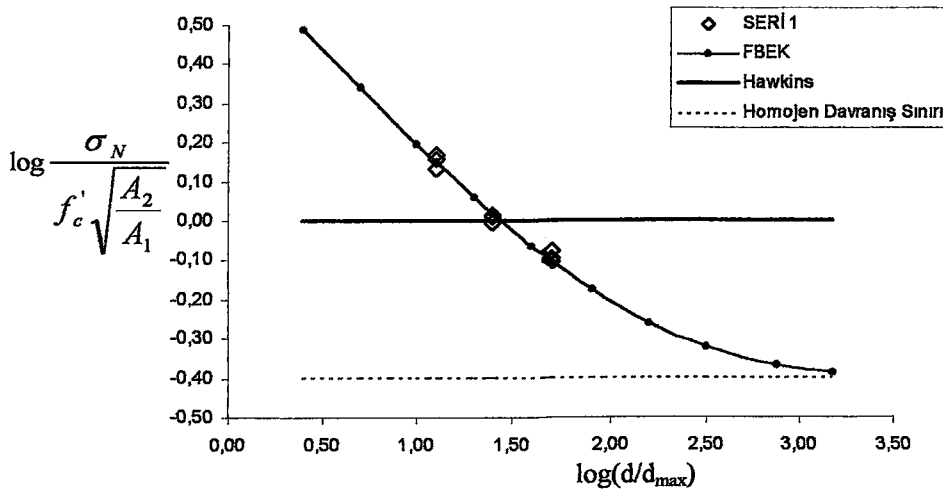
$$\text{Seri VII} \dots\dots\dots \sigma_{N=} 1,718 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{16,5096 d_{\max}} \right)^{-1/2} \quad (5.6)$$



Şekil 5.6.  $d_{\max}=4$  mm için seri VII sonuçlarıyla formülasyon grafiği

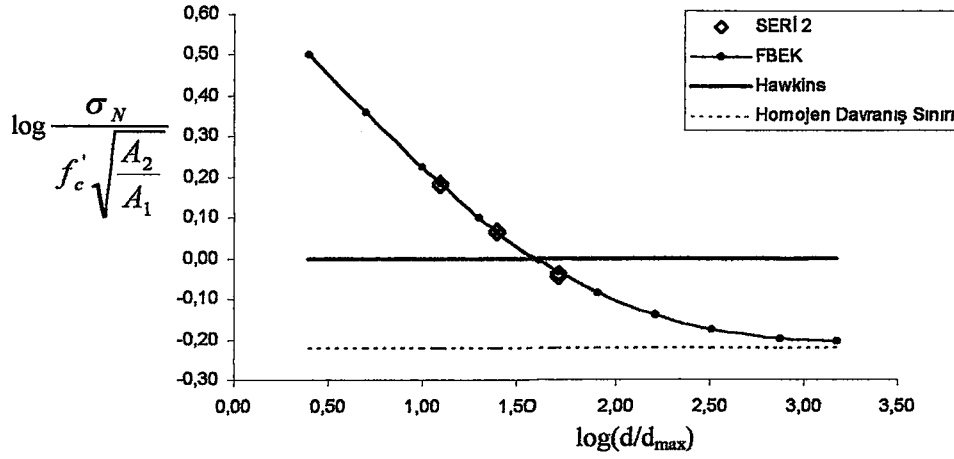
### 5.1.2. $d_{\max}=4$ mm'lik Numunelerin FBK'ya Göre Formülasyon ve Grafikleri

$$\text{Seri I} \dots\dots\dots \sigma_{N=} 0,3926 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{151,52 d_{\max}}{d} \right)^{1/2} \quad (5.7)$$



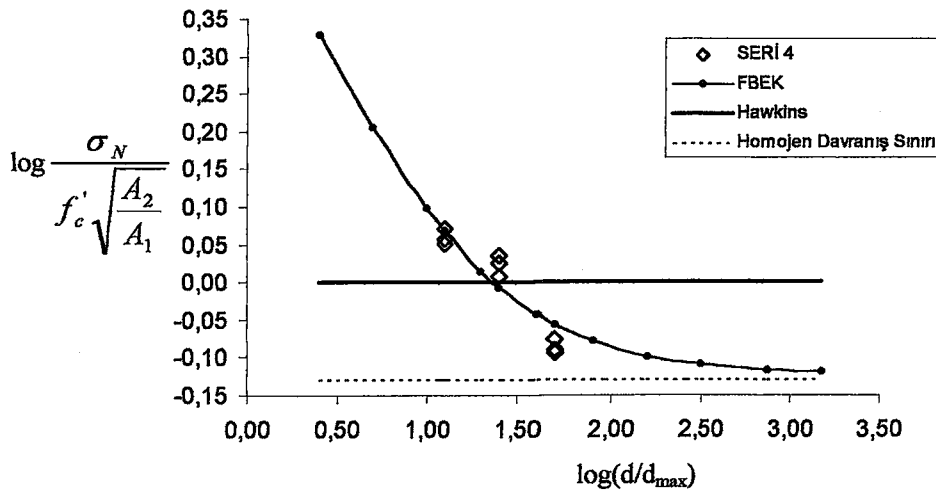
Şekil 5.7.  $d_{\max}=4$  mm için seri I sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri II .....  $\sigma_N = 0,608 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{66,19 d_{\max}}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$  (5.8)



Şekil 5.8.  $d_{\max} = 4$  mm için seri II sonuçlarıyla formülasyon grafiği

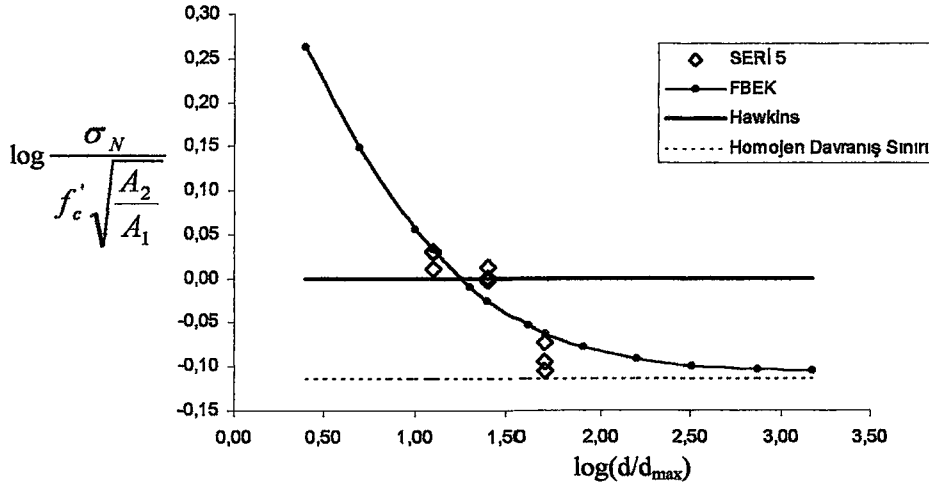
Seri IV .....  $\sigma_N = 0,756 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{17,44 d_{\max}}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$  (5.9)



Şekil 5.9.  $d_{\max} = 4$  mm için seri IV sonuçlarıyla formülasyon grafiği

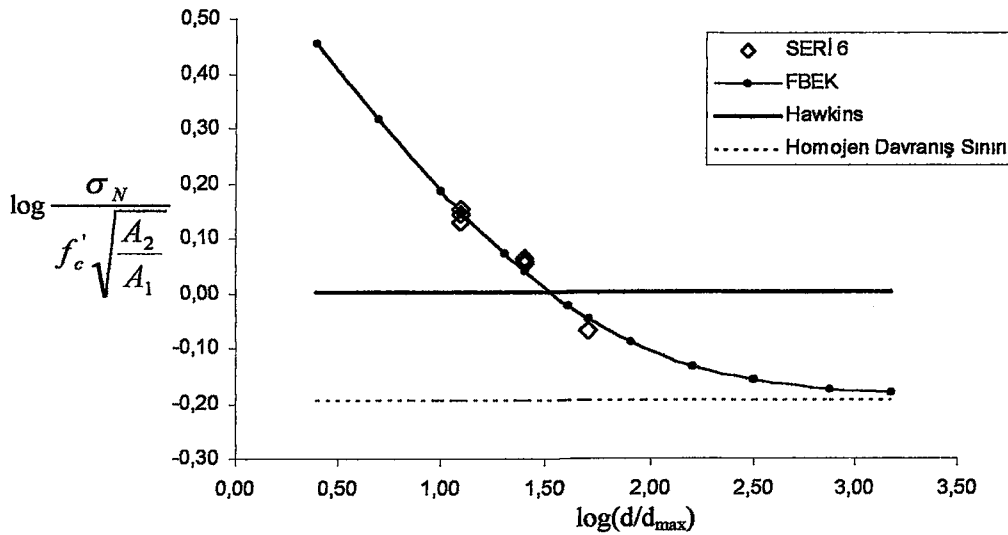


Seri V .....  $\sigma_N = 0,7818 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{11,27 d_{\max}}{d}\right)^{1/2}$  (5.10)



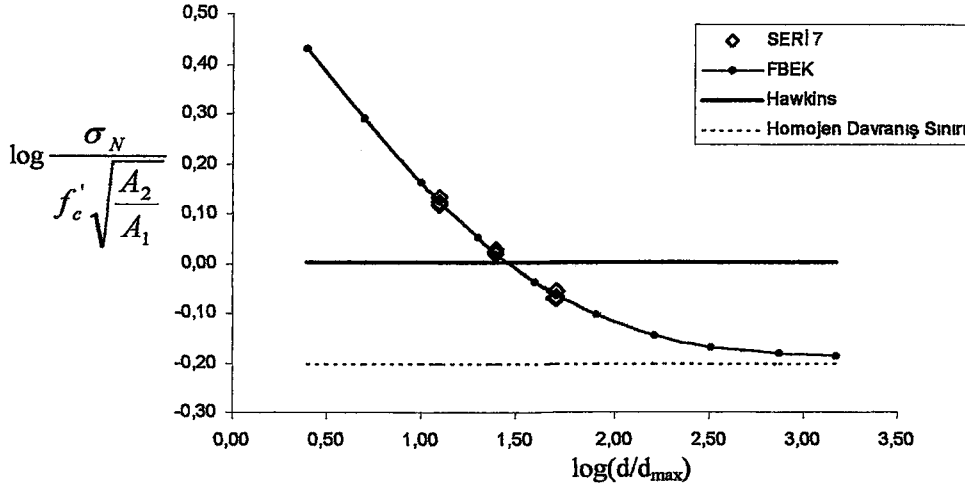
Şekil 5.10.  $d_{\max} = 4$  mm için seri V sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri VI .....  $\sigma_N = 0,650 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{45,909 d_{\max}}{d}\right)^{1/2}$  (5.11)



Şekil 5.11.  $d_{\max} = 4$  mm için seri VI sonuçlarıyla formülasyon grafiği

$$\text{Seri VII} \dots\dots\dots \sigma_N = 0,7818 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{11,27 d_m}{d}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.12)$$



Şekil 5.12.  $d_{max} = 4$  mm için seri VII sonuçlarıyla formülasyon grafiği

### 5.2. $d_{max} = 8$ mm İçin Deney Sonuçları

Tablo 5.4a.  $d_{max} = 8$  mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları

Seri No	d (mm)	b (mm)	R	$P_U$ (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )				$f_c'$ N/mm <sup>2</sup>	n $\sigma_{Nort}/f_c'$
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$	$\sigma_{Nort}$		
Seri I	50	20	6.25	16.8	19.6	-	42	49	-	45.5	9.63	4.73
	100	40	6.25	50	51	58.6	31.25	31.88	36.63	33.25		3.45
	200	80	6.25	171	187.9	177.8	26.72	29.36	27.78	27.95		2.90
Seri II	50	20	6.25	40.6	39.8	41.6	101.5	99.5	104	101.67	22.03	4.62
	100	40	6.25	146.9	133.4	139.2	91.81	83.38	87	87.4		3.97
	200	80	6.25	442.8	396.5	405.1	69.18	61.95	63.3	64.81		2.94
Seri III	50	12.5	16	28.5	28	28.3	182.4	179.2	181.12	180.91	23.60	7.67
	100	25	16	93.7	93.1	94.5	149.52	148.96	151.2	150.03		6.36
	200	50	16	287.9	283.5	284.3	115.16	113.4	113.72	114.04		4.83
Seri IV	50	20	6.25	81.1	83.4	88.4	202.75	208.5	221	210.75	48.03	4.39
	100	40	6.25	262.3	268.8	265.5	163.94	168	165.94	165.96		3.46
	200	80	6.25	755	749.3	758.6	117.96	117.08	118.53	117.86		2.46

**Tablo 5.4b.**  $d_{max}=8$  mm'lik Kare prizma numunelerin deney sonuçları

Seri No	h (mm)	b (mm)	R	$P_U$ (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )				$f'_c$ N/mm <sup>2</sup>	n
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$	$\sigma_{Nort}$		
Seri V	100	12.5	16	21.8	22.1	21.9	139.52	141.4	140.16	140.36	32.67	4.30
	200	25	16	81.5	80.8	82.7	130.4	129.28	132.32	130.67		4.00
	400	50	16	297.1	283.5	290.1	118.84	113.4	116.04	116.09		3.55
Seri VI	100	20	6.25	36.5	35.9	36.3	91.25	89.75	90.75	90.58	32.67	2.77
	200	40	6.25	136.7	134.1	134.7	85.44	83.81	84.19	84.48		2.59
	400	80	6.25	420.6	415.4	417.1	65.72	64.91	65.17	65.27		1.99

\* (Not: V. ve VI. Seride  $h/d=2$  oranındadır.)

**Tablo 5.4c.**  $d_{max}=8$  mm'lik Silindir numunelerin deney sonuçları

Seri No	D (mm)	b (mm)	R	$P_U$ (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )				$f'_c$ N/mm <sup>2</sup>	n
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$	$\sigma_{Nort}$		
Seri VII	50	12.5	16	23.5	22.9	23.8	191.49	186.61	193.94	190.68	30.54	6.24
	100	25	16	74.2	75.8	73.7	151.16	154.42	150.14	151.91		4.97
	200	50	16	227.6	216.4	229.3	115.92	110.21	116.78	114.30		3.74
Seri VIII	50	20	6.25	32.9	33.1	32.8	104.72	105.36	104.41	104.83	30.54	3.43
	100	40	6.25	113.9	109.7	112.3	90.64	87.30	89.37	89.10		2.92
	200	80	6.25	309.2	314.5	311.9	61.51	62.57	62.05	62.04		2.03
Seri IX	50	12.5	16	19.7	19.1	20.7	160.53	155.64	168.68	161.62	36.8	4.39
	100	25	16	69.7	70.6	67.1	142	143.83	136.7	140.84		3.83
	200	50	16	246	237.6	239.3	125.29	121.01	121.88	122.71		3.34
Seri X	50	20	6.25	38.2	38.3	35.7	121.59	121.92	113.64	119.05	45.3	2.63
	100	40	6.25	127.4	121.4	124.2	101.38	96.61	98.84	98.94		2.18
	200	80	6.25	415.8	406.9	413.9	82.72	80.95	82.34	82		1.81

\* (Not: VII. ve VIII. Serilerde  $h/D=1$  oranında, IX. ve X. Serilerde  $h/D=2$  oranındadır.)

**Tablo 5.5a.**  $d_{max}=8$  mm'lik Küp numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri

Seri No	h (mm)	b (mm)	Kama Boyu (mm)			$\frac{\overline{a_k}}{h}$	Yarım Tepe Açısı			$\alpha_{ort}$
			$a_{k1}$	$a_{k2}$	$a_{k3}$		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
Seri I	50	20	28	28	-	0.56	19.65	19.65	-	19.65
	100	40	48	46	47	0.47	22.62	23.50	23.0	23.21
	200	80	75	75	77	0.38	28.07	28.07	27.45	27.86
Seri II	50	20	29	30	29	0.59	19.03	18.43	19.03	18.83
	100	40	49	50	51	0.50	22.20	21.81	21.41	21.80
	200	80	84	87	87	0.43	25.46	24.69	24.69	24.95
Seri III	50	12.5	16	13	16	0.30	21.34	25.68	21.34	22.79
	100	25	26	27	29	0.27	25.68	24.84	23.32	24.61
	200	50	51	53	53	0.26	26.11	25.25	25.25	25.54
Seri IV	50	20	24	27	25	0.51	22.62	20.32	21.80	21.58
	100	40	41	43	39	0.44	26.00	24.94	27.15	26.03
	200	80	79	78	81	0.40	26.85	27.14	26.28	26.76

**Tablo 5.5b.**  $d_{max} = 8$  mm'lik Kare prizma numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri

Seri No	h (mm)	b (mm)	Kama Boyu (mm)			$\frac{\bar{a}_k}{h}$	Yarım Tepe Açısı			$\alpha_{ort}$
			$a_{k1}$	$a_{k2}$	$a_{k3}$		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
Seri V	100	12.5	16	17	19	0.17	21.33	20.16	18.21	19.9
	200	25	29	29	30	0.15	23.31	23.31	23.31	22.94
	400	50	56	55	58	0.14	24.05	24.44	23.31	23.93
Seri VI	100	20	24	25	25	0.25	22.62	21.8	21.8	22.07
	200	40	42	42	42	0.21	25.46	25.46	25.46	25.46
	400	80	79	79	82	0.20	26.85	26.85	26	26.57

**Tablo 5.5c.**  $d_{max} = 8$  mm'lik Silindir numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri

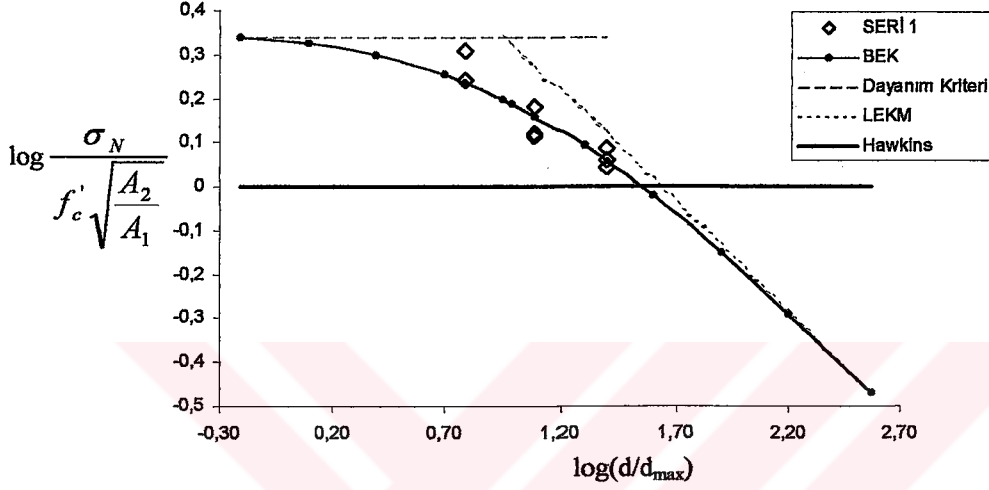
Seri No	h (mm)	b (mm)	Kama Boyu (mm)			$\frac{\bar{a}_k}{h}$	Yarım Tepe Açısı			$\alpha_{ort}$
			$a_{k1}$	$a_{k2}$	$a_{k3}$		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
Seri VII	50	12.5	11	12	11	0.23	29.61	27.51	29.61	28.91
	100	25	22	21	21	0.21	29.60	30.76	30.76	30.37
	200	50	40	40	41	0.20	32.01	32.01	31.37	31.80
Seri VIII	50	20	18	18	18	0.36	29.06	29.06	29.06	29.06
	100	40	32	33	33	0.33	32.01	31.22	31.22	31.48
	200	80	61	60	60	0.30	33.25	33.69	33.69	33.54
Seri IX	100	12.5	13	13	13	0.13	25.67	25.67	25.67	25.67
	200	25	24	24	24	0.12	27.51	27.51	27.51	27.51
	400	50	45	44	44	0.11	29.65	29.60	29.60	29.62
Seri X	100	20	19	20	19	0.19	27	26.56	27	26.67
	200	40	37	37	37	0.19	28.39	28.39	28.39	28.39
	400	80	69	68	68	0.17	30.10	30.46	30.46	30.34

**Tablo 5.6.**  $d_{max} = 8$  mm için deney sonuçlarının analizleri.

SERİ NO	BEK			FBEK		
	r	B	$d_o$	r	$f_t$	$l_{ch}$
I	0.9202	54.3863	69.1589	0.9319	17.3922	288.8766
II	0.9688	152.9235	44.0469	0.9493	53.5303	135.6370
III	0.9987	263.5105	46.3703	0.9854	88.8136	161.3770
IV	0.9967	458.2981	14.2871	0.9806	73.6647	366.6157
V	0.9836	152.6454	273.7292	0.9509	110.3155	32.2844
VI	0.9825	115.7989	95.5783	0.8994	61.0382	64.6170
VII	0.9925	303.5032	33.0394	0.9903	80.1821	236.5710
VIII	0.9899	203.6433	20.8632	0.9613	48.2231	194.1720
IX	0.9755	181.2705	166.3494	0.9633	109.1504	60.7188
X	0.9895	145.035	92.8721	0.9793	67.2914	108.0346

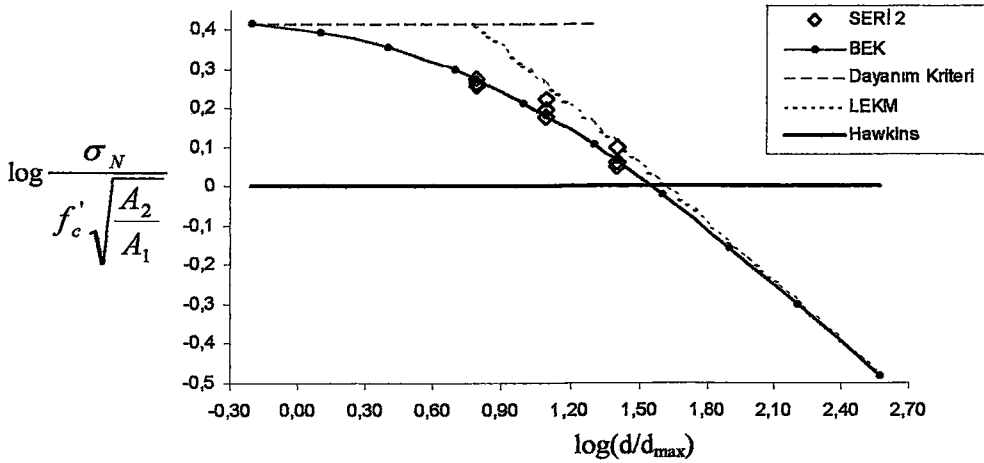
5.2.1.  $d_{\max}=8$  mm'lik Numunelerin BEK'ya Göre Formülasyon ve Grafikleri

Seri I .....  $\sigma_N = 2,259 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{8,645 d_{\max}}\right)^{-1/2}$  (5.13)



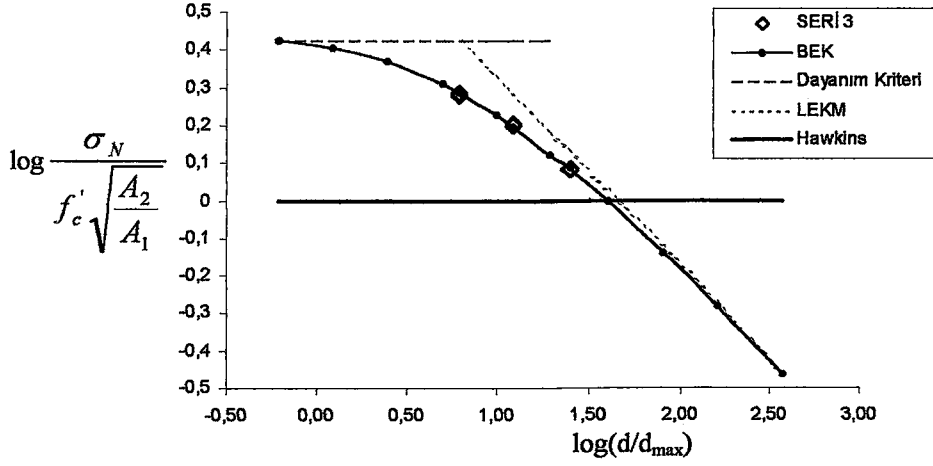
Şekil 5.13.  $d_{\max}=8$  mm için seri I sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri II .....  $\sigma_N = 2,743 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{5,506 d_{\max}}\right)^{-1/2}$  (5.14)



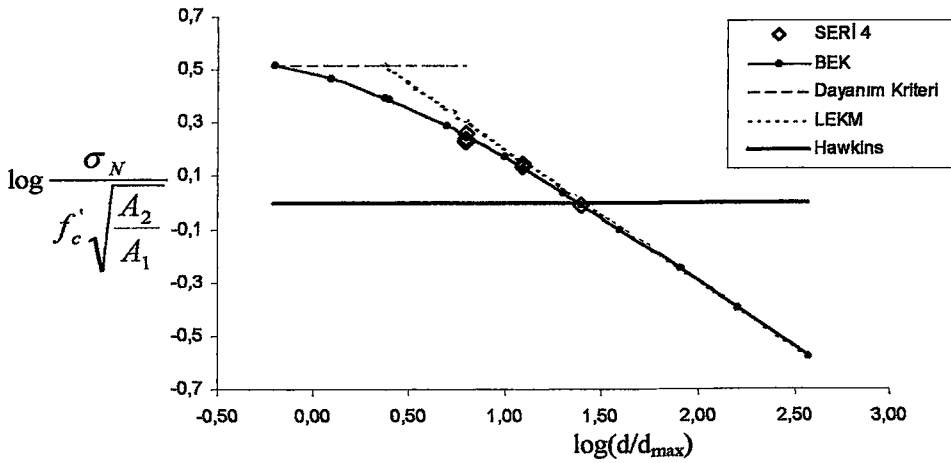
Şekil 5.14.  $d_{\max}=8$  mm için seri II sonuçlarıyla formülasyon grafiği

$$\text{Seri III} \dots\dots\dots \sigma_N = 2,791 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{5,796 d_{\max}}\right)^{-1/2} \quad (5.15)$$



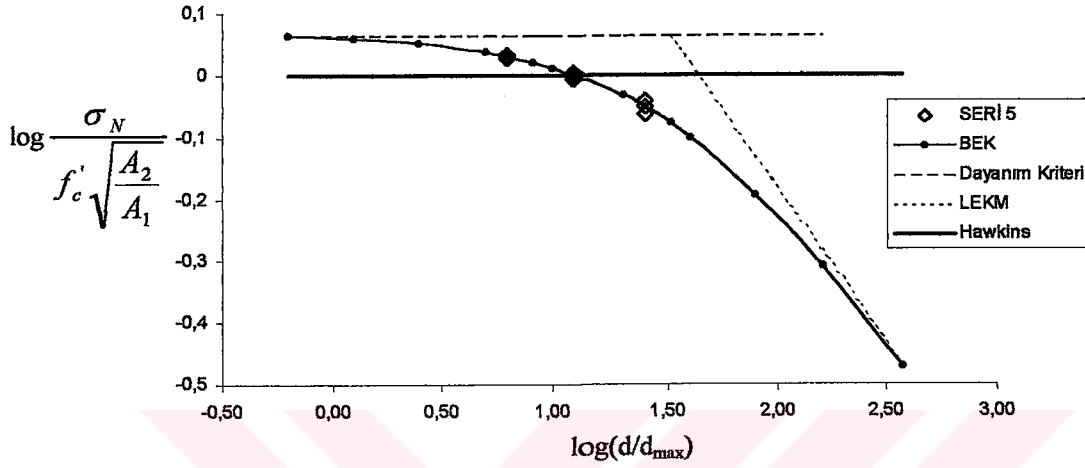
Şekil 5.15.  $d_{\max} = 8$  mm için seri III sonuçlarıyla formülasyon grafiği

$$\text{Seri IV} \dots\dots\dots \sigma_N = 3,817 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{1,786 d_{\max}}\right)^{-1/2} \quad (5.16)$$



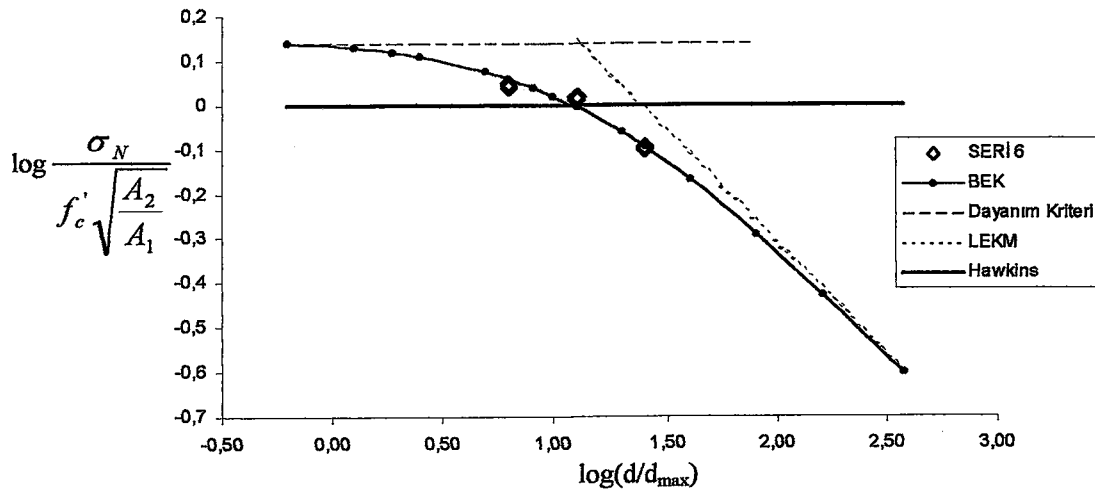
Şekil 5.16.  $d_{\max} = 8$  mm için seri IV sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri V .....  $\sigma_N = 1,168 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{34,841 d_{\max}} \right)^{-1/2}$  (5.17)



Şekil 5.17.  $d_{\max} = 8$  mm. için seri V sonuçlarıyla formülasyon grafiği

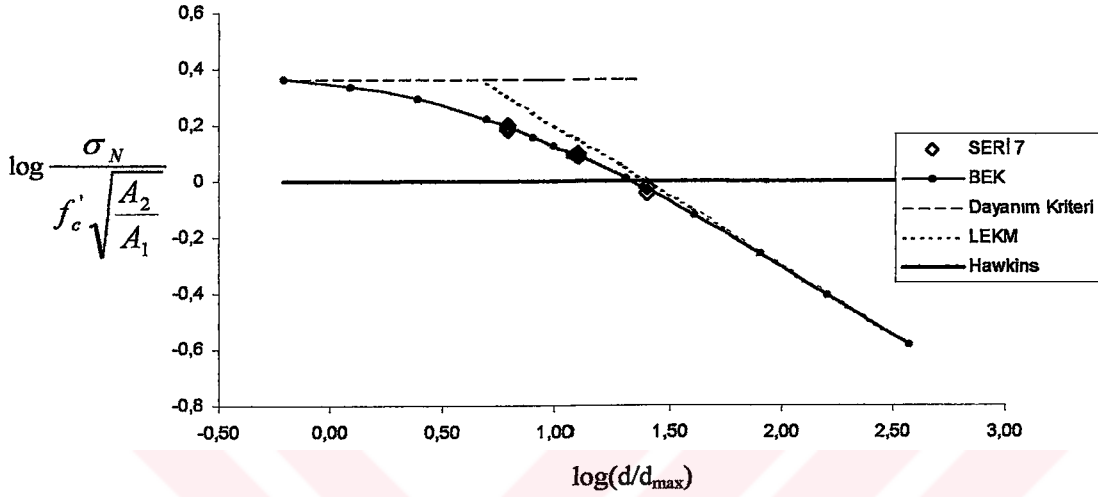
Seri VI .....  $\sigma_N = 1,418 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{11,9476 d_{\max}} \right)^{-1/2}$  (5.18)



Şekil 5.18.  $d_{\max} = 8$  mm. için seri VI sonuçlarıyla formülasyon grafiği

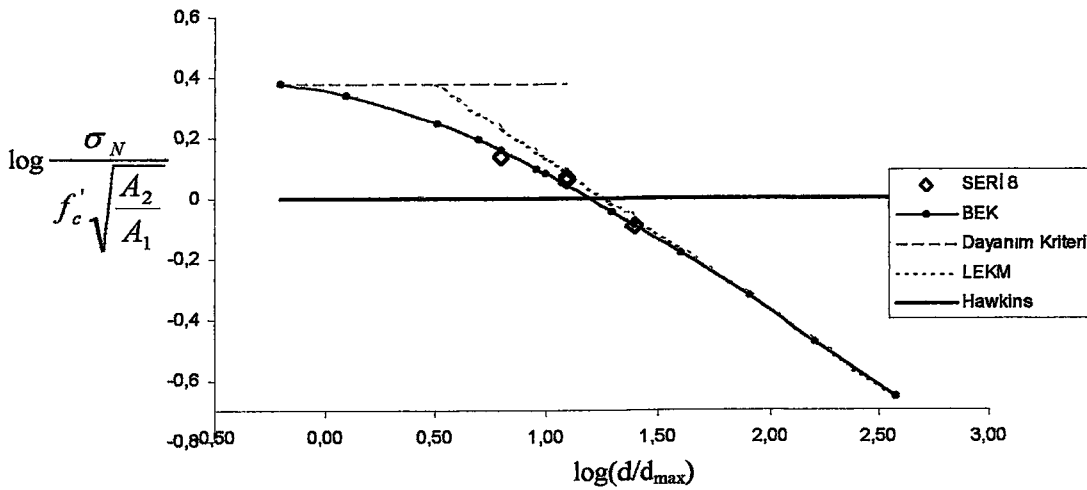


Seri VII .....  $\sigma_N = 2,485 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{4,130 d_{\max}}\right)^{-1/2}$  (5.19)



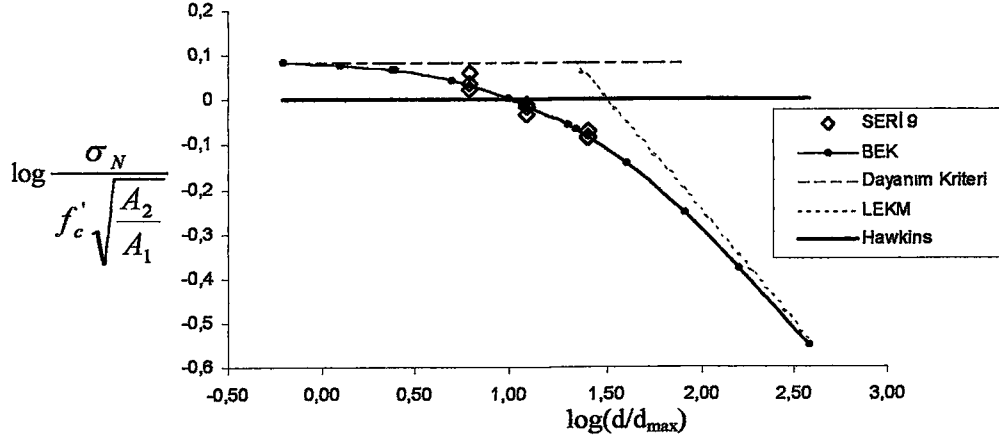
Şekil 5.19.  $d_{\max} = 8$  mm. için seri VII sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri VIII .....  $\sigma_N = 2,667 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{2,608 d_{\max}}\right)^{-1/2}$  (5.20)



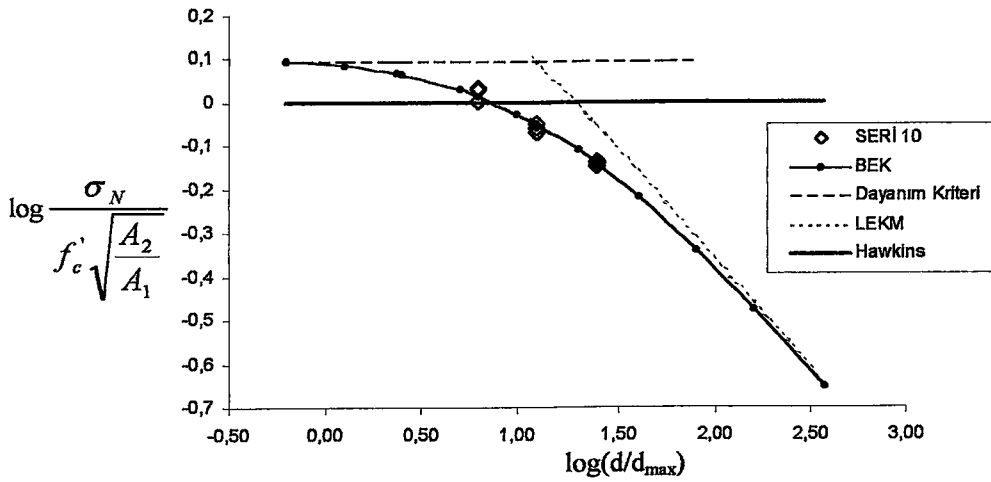
Şekil 5.20.  $d_{\max} = 8$  mm. için seri VIII sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri IX .....  $\sigma_N = 1,231 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{20,794 d_{\max}} \right)^{-1/2}$  (5.21)



Şekil 5.21.  $d_{\max} = 8$  mm için seri IX sonuçlarıyla formülasyon grafiği

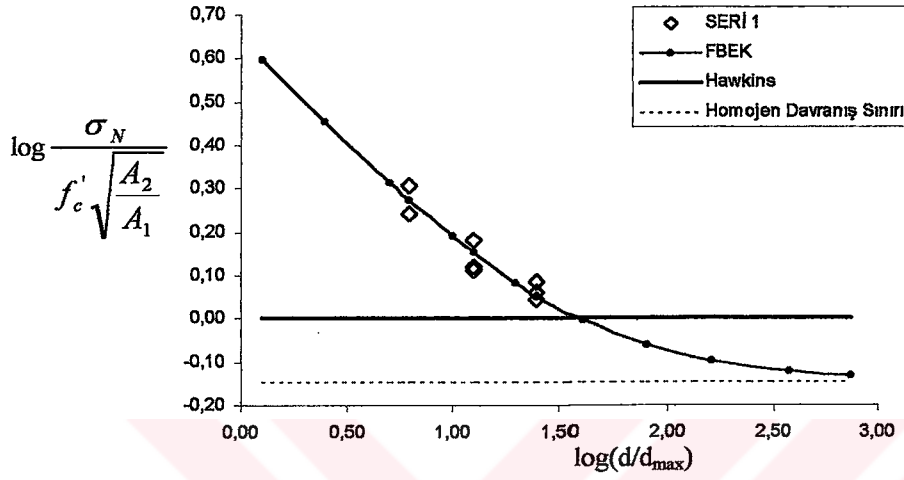
Seri X .....  $\sigma_N = 1,281 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{11,609 d_{\max}} \right)^{-1/2}$  (5.22)



Şekil 5.22.  $d_{\max} = 8$  mm için seri X sonuçlarıyla formülasyon grafiği

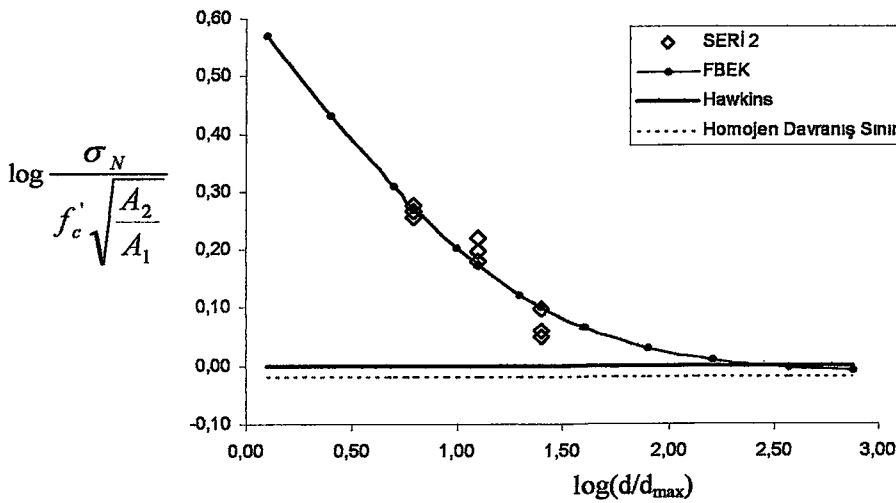
### 5.2.2. $d_{\max}=8$ mm'lik Numunelerin FBEK'ya Göre Formülasyon ve Grafikleri

Seri I .....  $\sigma_N = 0,722 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{36,11 d_{\max}}{d}\right)^{\frac{1}{2}}$  (5.23)



Şekil 5.23.  $d_{\max}=8$  mm İçin seri I sonuçlarıyla formülasyon grafiği

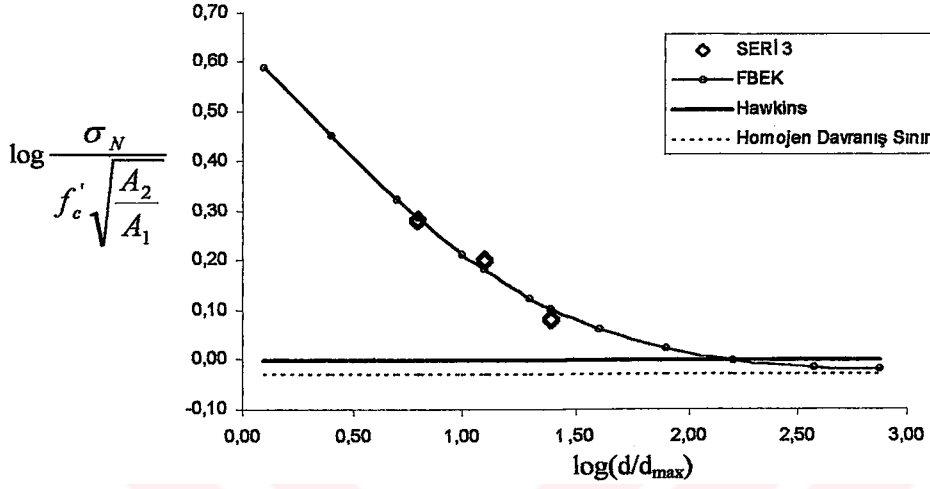
Seri II .....  $\sigma_N = 0,972 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{16,96 d_{\max}}{d}\right)^{\frac{1}{2}}$  (5.24)



Şekil 5.24.  $d_{\max}=8$  mm İçin seri II sonuçlarıyla formülasyon grafiği

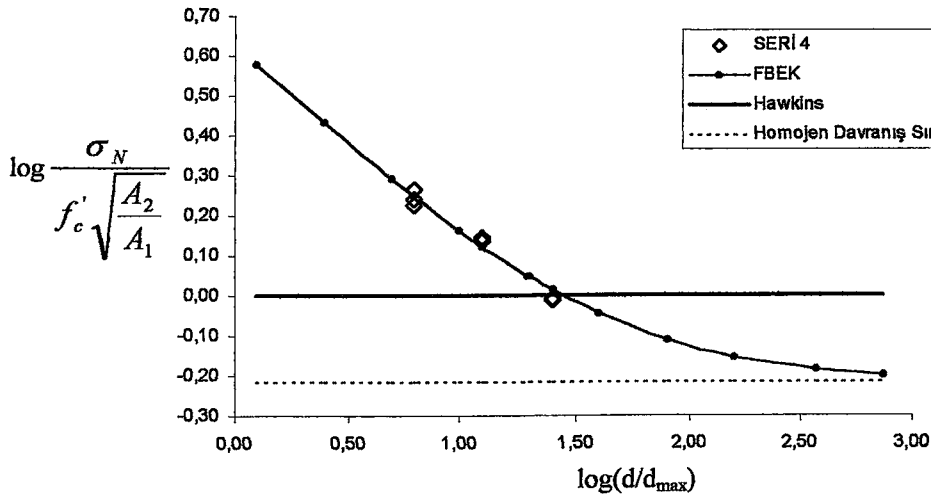
TC YATIRIM BANKASI  
DENEYLER VE İNCELEMELER

$$\text{Seri III} \dots\dots\dots \sigma_N = 0,941 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{20,17 d_{\max}}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.25)$$



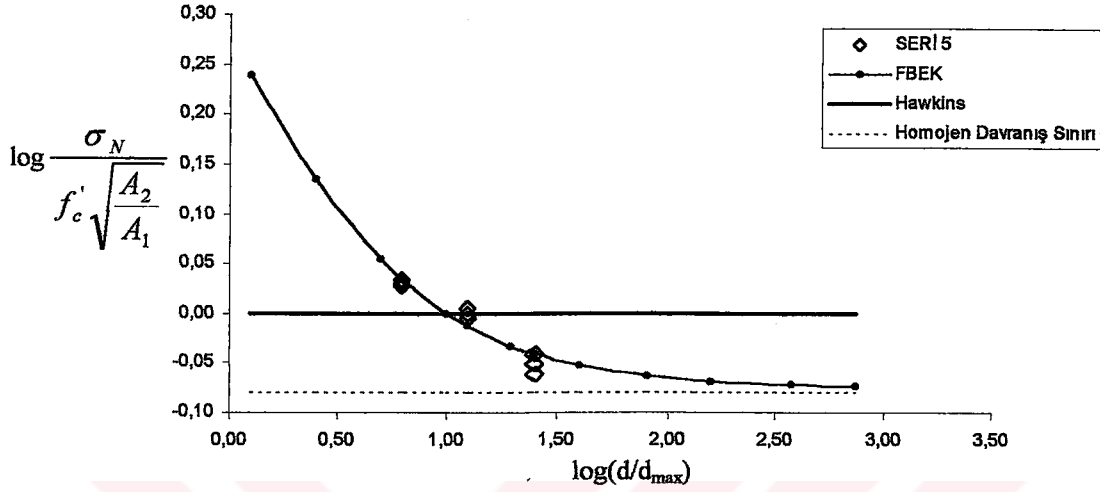
Şekil 5.25.  $d_{\max} = 8$  mm için seri III sonuçlarıyla formülasyon grafiği

$$\text{Seri IV} \dots\dots\dots \sigma_N = 0,614 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{45,83 d_{\max}}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.26)$$



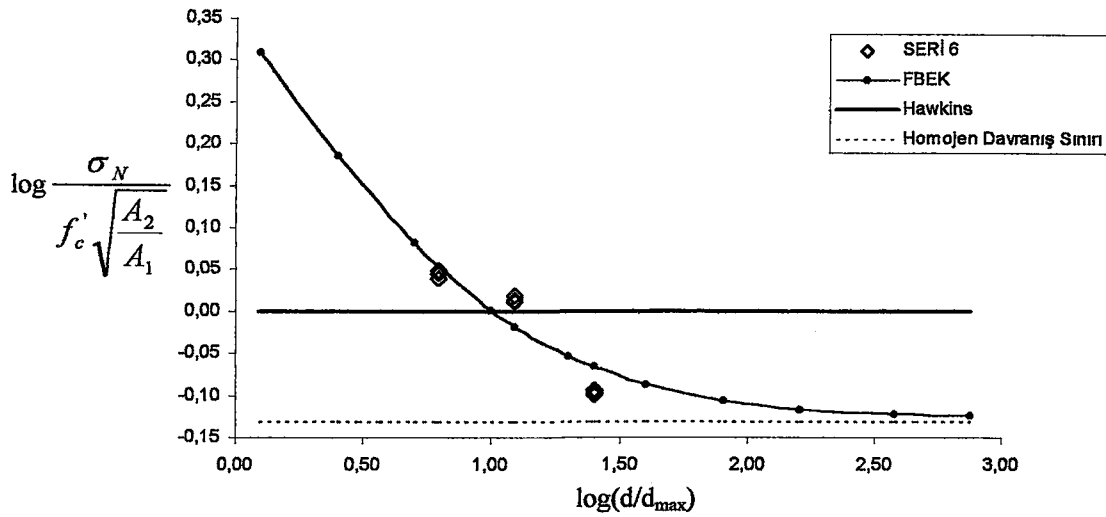
Şekil 5.26.  $d_{\max} = 8$  mm için seri IV sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri V .....  $\sigma_N = 0,844 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{40,356 d_{\max}}{d} \right)^{1/2}$  (5.27)



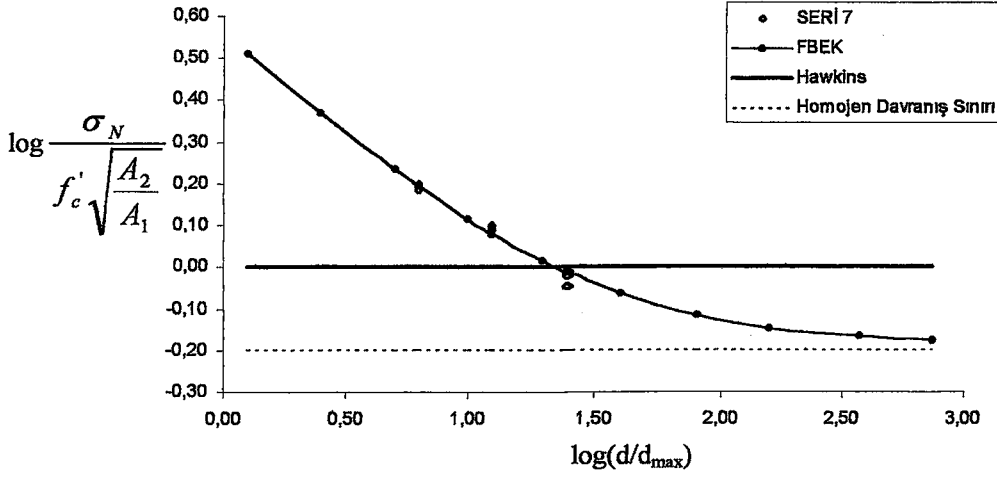
Şekil 5.27.  $d_{\max} = 8$  mm. için seri V sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri VI .....  $\sigma_N = 0,747 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{8,077 d_{\max}}{d} \right)^{1/2}$  (5.28)



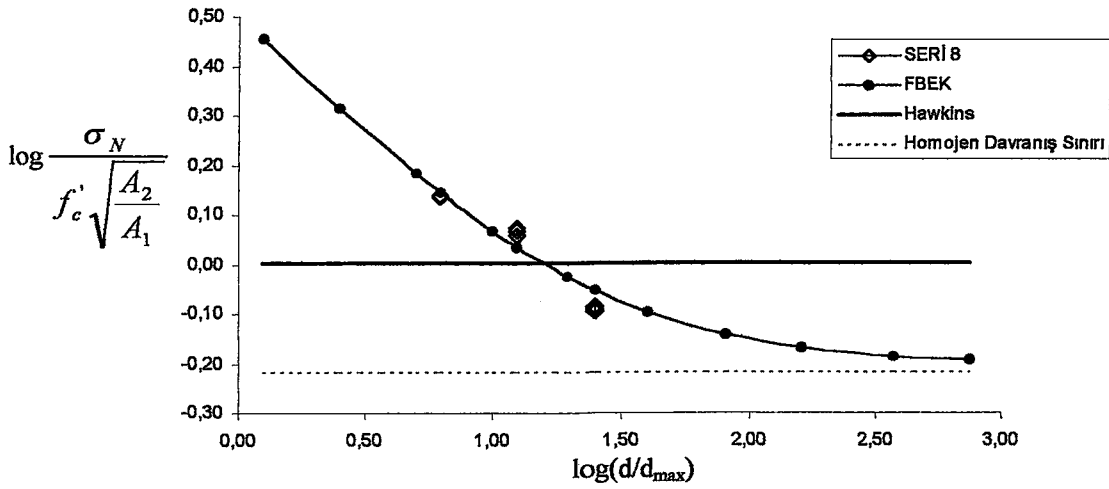
Şekil 5.28.  $d_{\max} = 8$  mm. için seri VI sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri VII .....  $\sigma_N = 0,656 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{29,571 d_{\max}}{d} \right)^{1/2}$  (5.29)



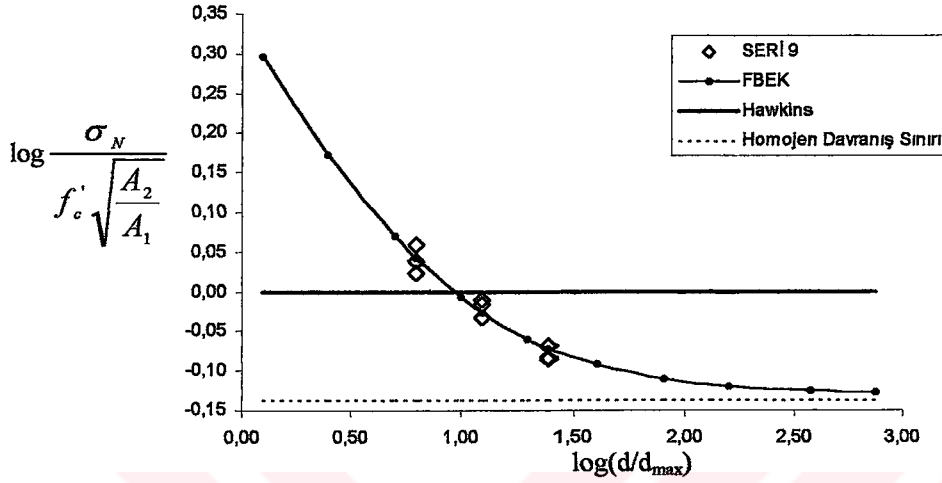
Şekil 5.29. d<sub>max</sub> = 8 mm. için seri VII sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri VIII .....  $\sigma_N = 0,632 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{24,272 d_{\max}}{d} \right)^{1/2}$  (5.30)



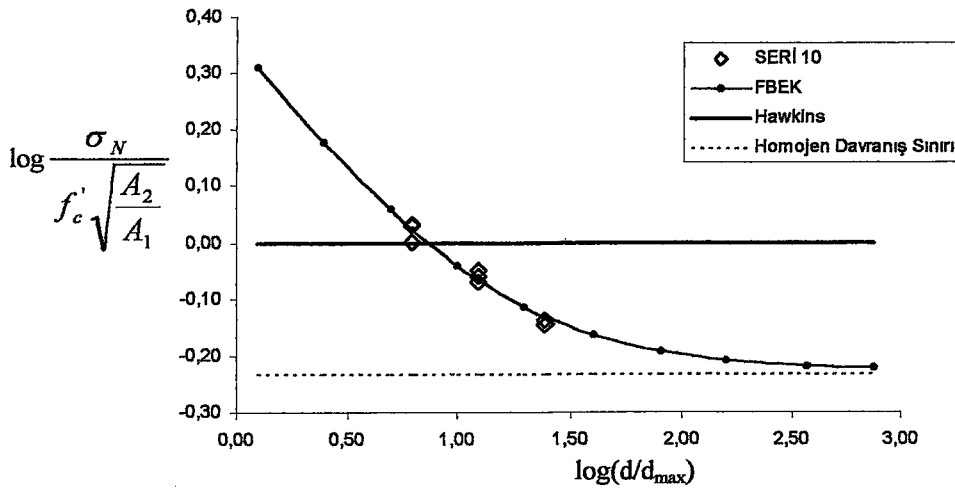
Şekil 5.30. d<sub>max</sub> = 8 mm. için seri VIII sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri IX .....  $\sigma_N = 0,742 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{7,590 d_{\max}}{d}\right)^{1/2}$  (5.31)



Şekil 5.31. d<sub>max</sub>= 8 mm İçin seri IX sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri X .....  $\sigma_N = 0,594 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{13,504 d_{\max}}{d}\right)^{1/2}$  (5.32)



Şekil 5.32. d<sub>max</sub>= 8 mm İçin seri X sonuçlarıyla formülasyon grafiği



### 5.3. $d_{max} = 16$ mm İçin Deney Sonuçları

**Tablo 5.7a.**  $d_{max} = 16$  mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları

Seri No	d (mm)	b (mm)	R	$P_U$ (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )				$f'_c$ N/mm <sup>2</sup>	n $\sigma_{Nort}/f'_c$
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$	$\sigma_{Nort}$		
Seri I	50	20	6.25	51.3	51.8	53.1	128.25	129.5	132.75	130.17	24.05	5.41
	100	40	6.25	154.7	150.4	156.3	96.69	94	97.69	96.13		4.00
	200	80	6.25	498.2	507.8	495	77.84	79.34	77.34	78.17		3.25
Seri II	100	12.5	64	52.5	52.7	52	336	337.28	332.8	335.36	27.39	12.24
	100	25	16	84.4	84	82.9	135.04	134.4	132.64	134.03		4.89
	100	50	4	196	204	192	78.4	81.6	76.8	78.93		2.88
Seri III	150	20	56.25	114.2	109.7	101.5	285.5	274.3	253.75	271.18	33.05	8.21
	150	40	14.06	163.6	166	185.3	102.25	103.75	118.81	108.27		3.28
	150	80	3.52	408.6	444.8	399.9	63.84	69.5	62.49	65.28		1.98

**Tablo 5.7b.**  $d_{max} = 16$  mm'lik Kare prizma numunelerin deney sonuçları

Seri No	h (mm)	b (mm)	R	$P_U$ (kN)			$\sigma_N$ (N/mm <sup>2</sup> )				$f'_c$ N/mm <sup>2</sup>	n $\sigma_{Nort}/f'_c$
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\sigma_{N1}$	$\sigma_{N2}$	$\sigma_{N3}$	$\sigma_{Nort}$		
Seri IV	100	20	6.25	28.7	28.9	29.6	71.75	72.25	74	72.67	25.19	2.89
	200	40	6.25	106.2	107.8	107.9	66.38	67.38	67.44	67.12		2.67
	400	80	6.25	365	373	359.1	57.03	58.28	56.11	57.14		2.26
Seri V	150	20	6.25	29.58	29.67	29.58	73.95	74.18	73.95	74.03	27.39	2.7
	300	40	6.25	112.3	113.9	118	70.19	71.19	73.75	71.71		2.62
	600	80	6.25	367	367	395	57.34	57.34	61.72	58.80		2.15

\* (Not: IV. Seride  $h/d=2$  ve V. Seride  $h/d=3$  oranındadır.)

**Tablo 5.8a.**  $d_{max} = 16$  mm'lik Küp numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri

Seri No	h (mm)	b (mm)	Kama Boyu (mm)			$\frac{\overline{a_k}}{h}$	Yarım Tepe Açısı			$\alpha_{ort}$
			$a_{k1}$	$a_{k2}$	$a_{k3}$		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
Seri I	50	20	23	28	26	0.51	23.68	21.64	21.64	21.40
	100	40	44	47	48	0.46	24.44	23.05	22.62	23.37
	200	80	82	78	77	0.40	26.00	27.15	27.45	26.87
Seri II	150	20	25	26	29	0.18	21.80	21.03	19.03	20.62
	150	40	43	47	41	0.29	24.94	23.05	26.00	24.66
	150	80	75	73	79	0.50	28.07	28.72	26.85	27.88

**Tablo 5.8b.**  $d_{max}=16$  mm'lik Kare prizma numunelerde kama boyları ve tepe açısı değerleri

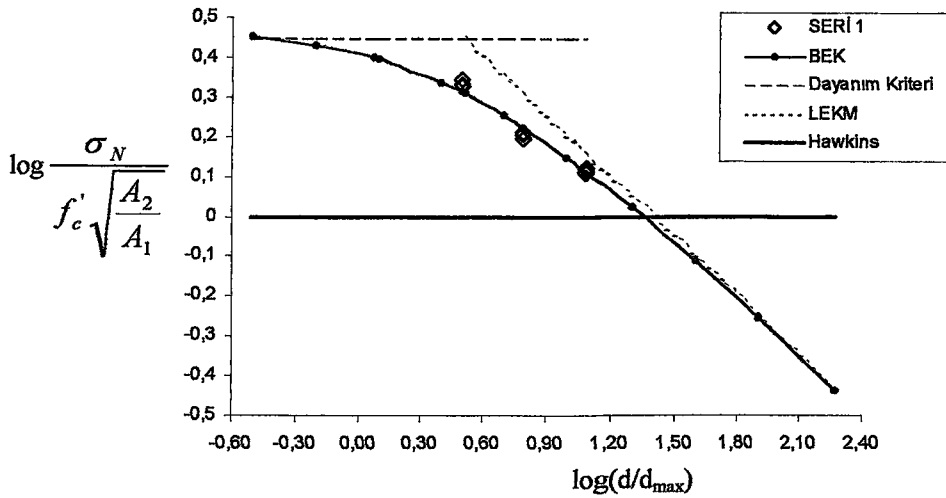
Seri No	h (mm)	b (mm)	Kama Boyu (mm)			$\frac{\bar{a}_k}{h}$	Yarım Tepe Açısı			$\alpha_{ort}$
			$a_{k1}$	$a_{k2}$	$a_{k3}$		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
Seri IV	100	20	21	23	23	0.22	25.46	23.50	23.50	24.15
	200	40	41	43	39	0.21	26.00	24.94	27.15	26.03
	400	80	77	72	71	0.18	27.45	29.05	29.40	28.68
Seri V	150	20	24	23	23	0.16	22.62	23.50	23.50	23.21
	300	40	40	41	43	0.14	26.56	26.00	24.94	25.83
	600	80	79	82	79	0.13	26.85	26.00	26.85	26.57

**Tablo 5.9.**  $d_{max}=16$  mm için deney sonuçlarının analizleri.

SERİ NO	BEK			FBEK		
	r	B	$d_o$	r	$f_t$	$l_{ch}$
I	0,9853	178,5611	46,3236	0,9960	47,5363	322,7038
IV	0,9898	82,3651	186,8447	0,9420	53,6113	43,9961
V	0,9437	86,1594	179,035	0,8295	57,3935	36,4662

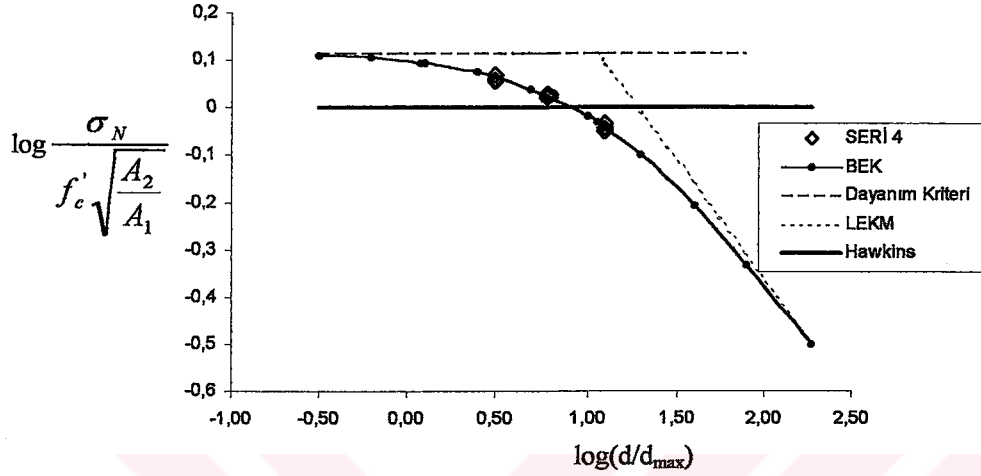
### 5.3.1. $d_{max}=16$ mm'lik Numunelerin BEK'ya Göre Formülasyon ve Grafikleri

Seri I .....  $\sigma_N = 2,970 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{2,895 d_{max}} \right)^{-1/2}$  (5.33)



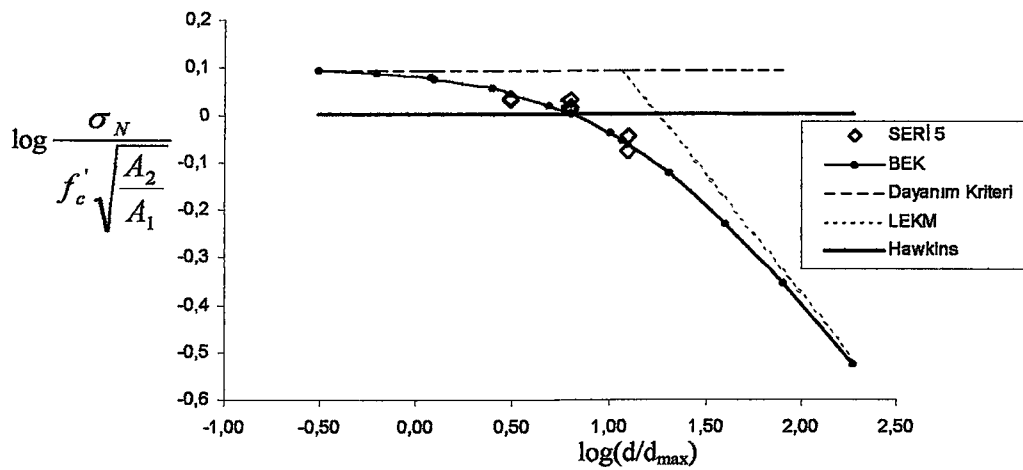
**Şekil 5.33.**  $d_{max}=16$  mm için seri I sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri IV .....  $\sigma_N = 1,308 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{11,678 d_{\max}} \right)^{-\frac{1}{2}}$  (5.34)



Şekil 5.34.  $d_{\max} = 16$  mm için seri IV sonuçlarıyla formülasyon grafiği

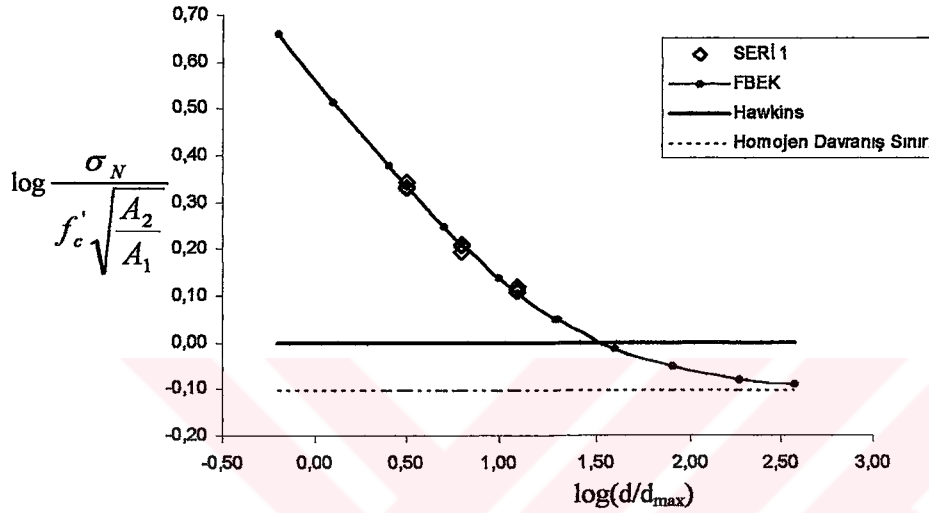
Seri V .....  $\sigma_N = 1,258 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{11,190 d_{\max}} \right)^{-\frac{1}{2}}$  (5.35)



Şekil 5.35.  $d_{\max} = 16$  mm için seri V sonuçlarıyla formülasyon grafiği

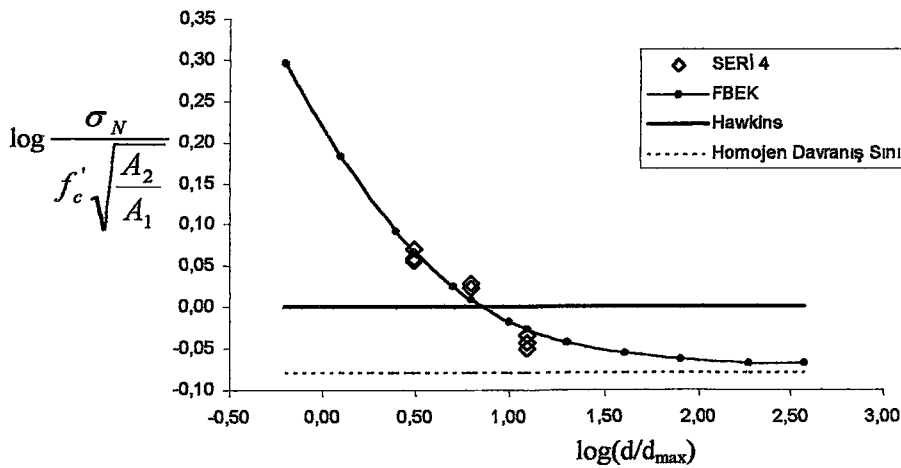
5.3.2.  $d_{\max}=16$  mm'lik Numunelerin FBEK'ya Göre Formülasyonu ve Grafikleri

Seri I .....  $\sigma_N = 0,7906 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{20,17 d_{\max}}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$  (5.36)



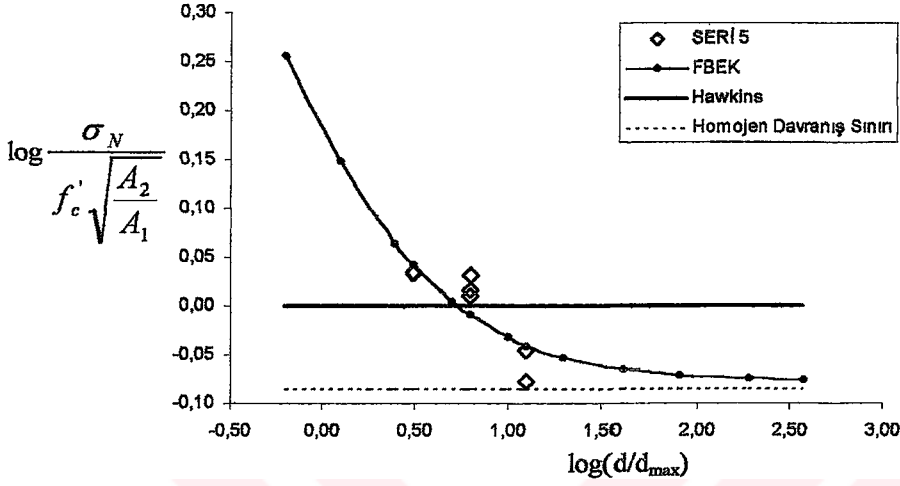
Şekil 5.36.  $d_{\max}=16$  mm İçin seri I sonuçlarıyla formülasyon grafiği

Seri IV .....  $\sigma_N = 0,851 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{2,75 d_{\max}}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$  (5.37)



Şekil 5.37.  $d_{\max}=16$  mm İçin seri IV sonuçlarıyla formülasyon grafiği

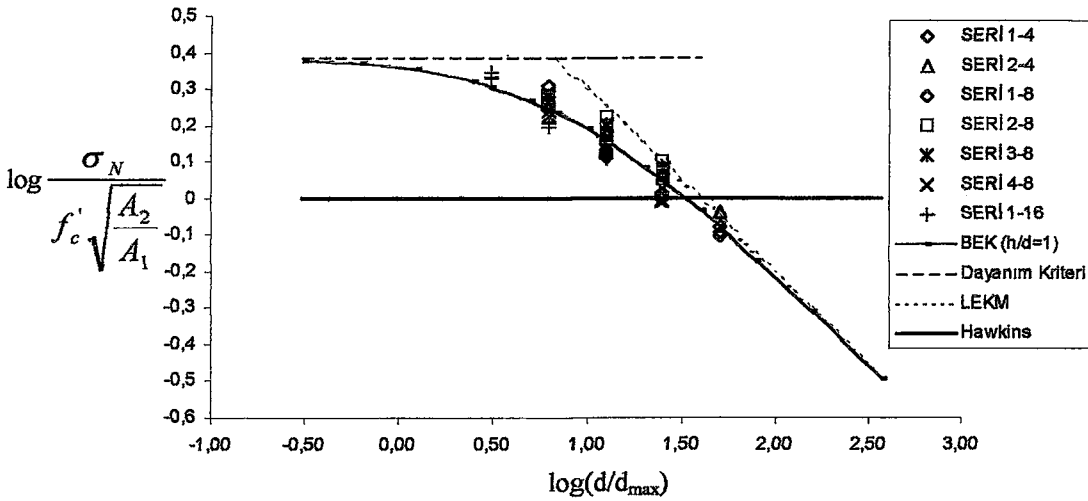
$$\text{Seri V} \dots\dots\dots \sigma_N = 0,8382 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{2,28d_m}{d}\right)^{1/2} \quad (5.38)$$



Şekil 5.38.  $d_{\max} = 16$  mm için seri V sonuçlarıyla formülasyon grafiği

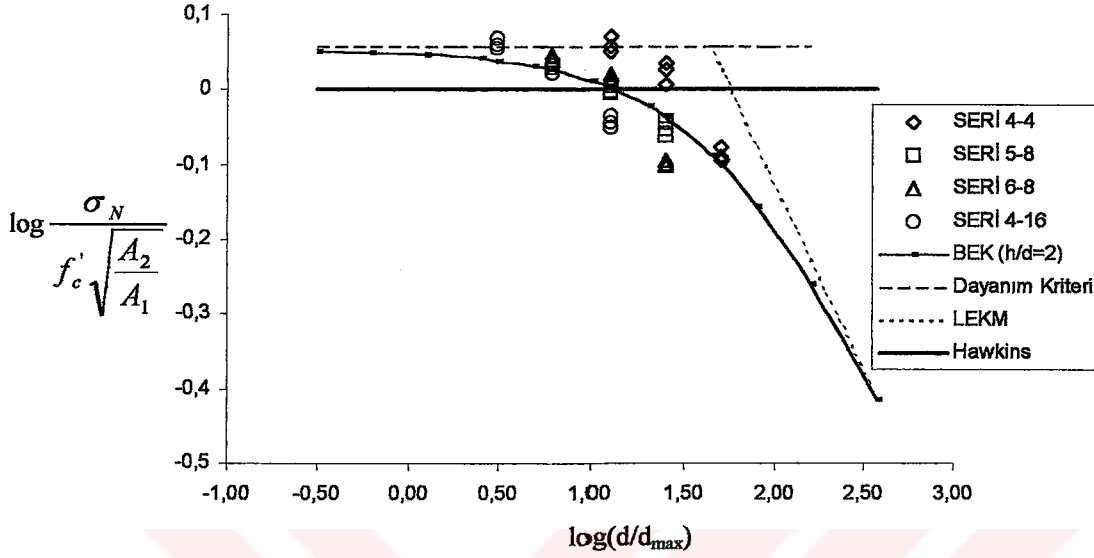
#### 5.4. Genel Formülasyonlar ve Grafikleri

$$\text{Küp numuneler için} \dots\dots\dots \sigma_N = 2,4516 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{6,5738d_{\max}}\right)^{-1/2} \quad (5.39)$$



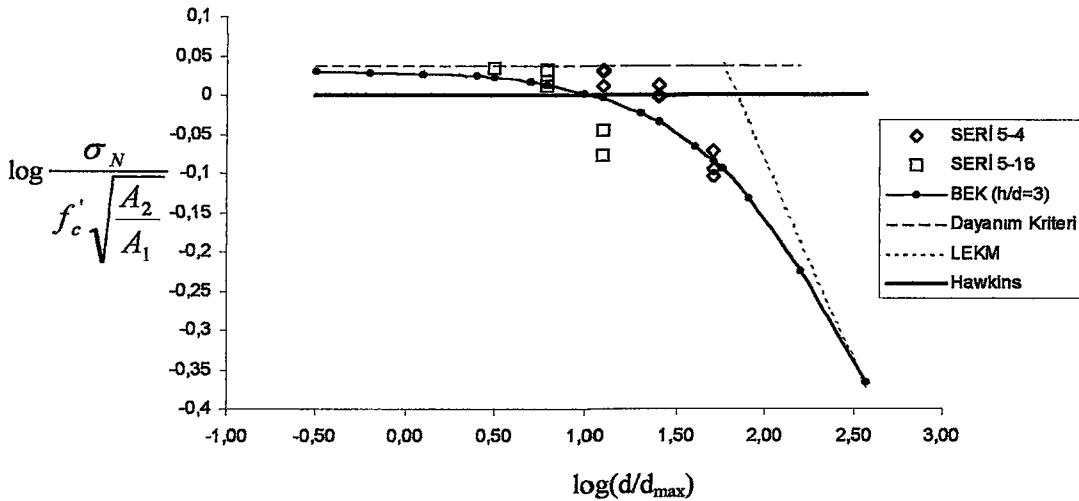
Şekil 5.39. Küp numunelerin seri sonuçları ve genel BEK formülasyon grafiği

$$h/d=2 \text{ (Kare prizma)} \dots\dots\dots \sigma_N = 1.128 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{49.7096 d_{\max}}\right)^{-1/2} \quad (5.40)$$



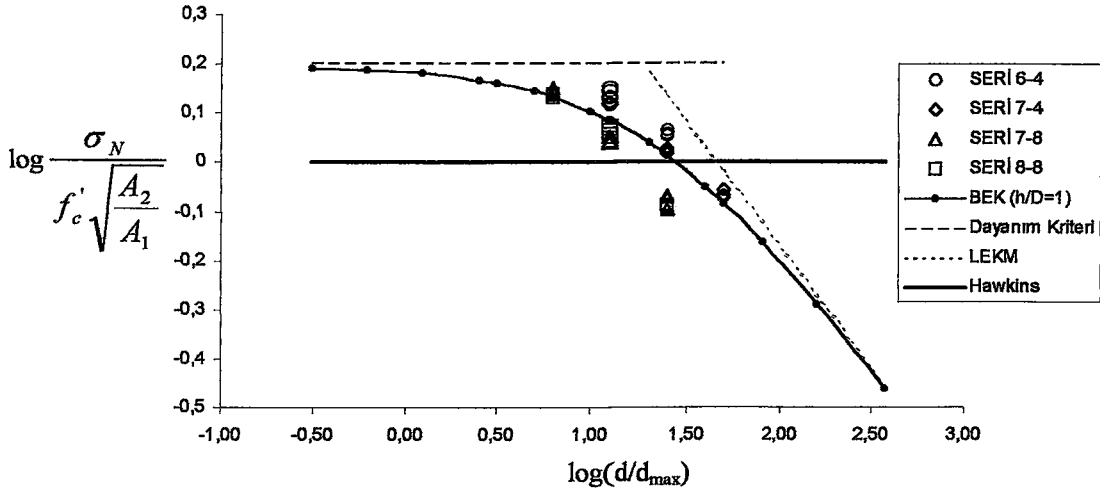
Şekil 5.40. h/d Oranı 2 olan kare prizma numunelerin seri sonuçları ve BEK formülasyon grafiği

$$h/d=3 \text{ (Kare prizma)} \dots\dots\dots \sigma_N = 1.0742 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{d}{71.3886 d_{\max}}\right)^{-1/2} \quad (5.41)$$



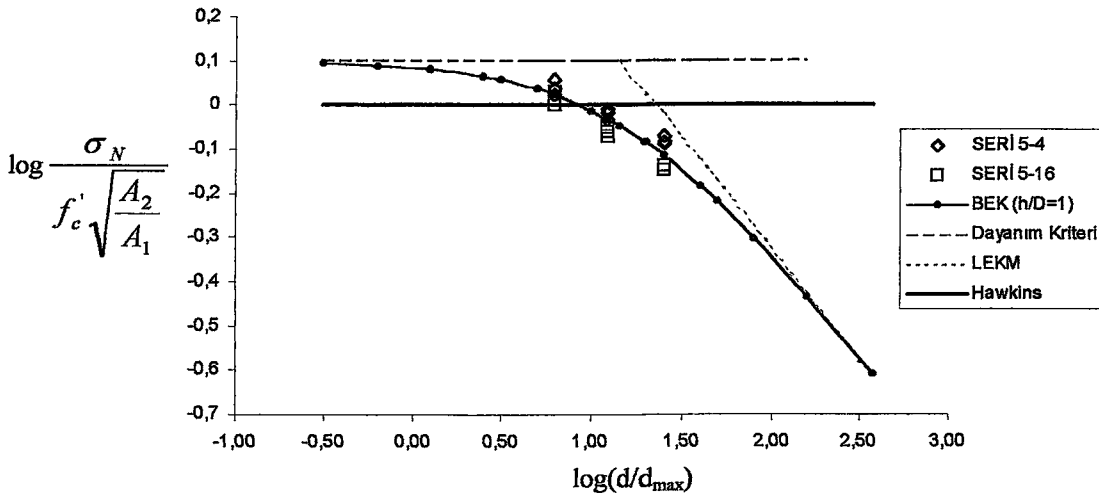
Şekil 5.41. h/d Oranı 3 olan kare prizma numunelerin seri sonuçları ve BEK formülasyon grafiği

$$h/D=1 \text{ (silindir)} \dots\dots\dots \sigma_N = 1.5672 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{19.2461 d_{\max}} \right)^{-1/2} \quad (5.42)$$



Şekil 5.42. h/D Oranı 1 olan silindir numunelerin seri sonuçları ve BEK formülasyon grafiği

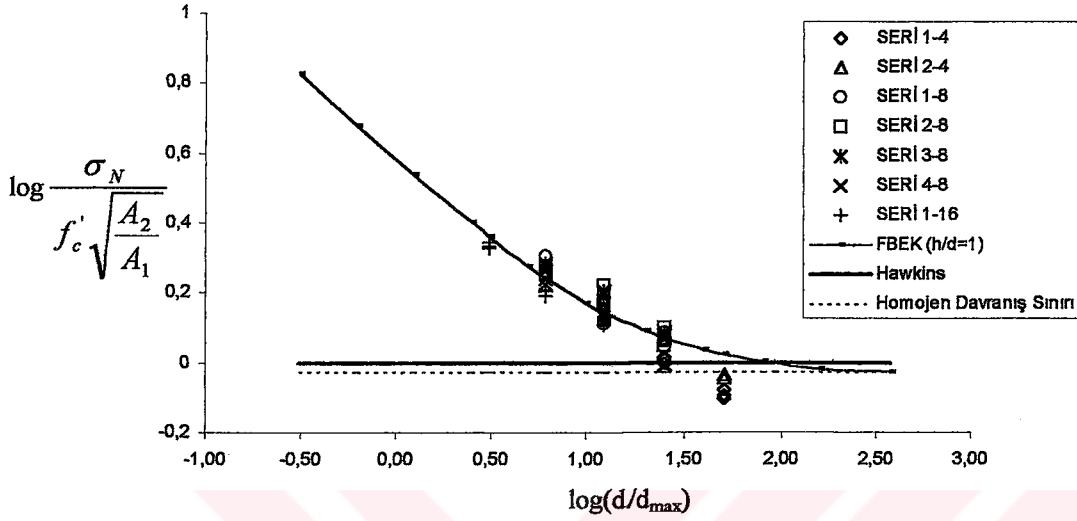
$$h/D=2 \text{ (Silindir)} \dots\dots\dots \sigma_N = 1.2553 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{d}{15.0667 d_{\max}} \right)^{-1/2} \quad (5.43)$$



Şekil 5.43. h/D Oranı 2 olan silindir numunelerin seri sonuçları ve BEK formülasyon

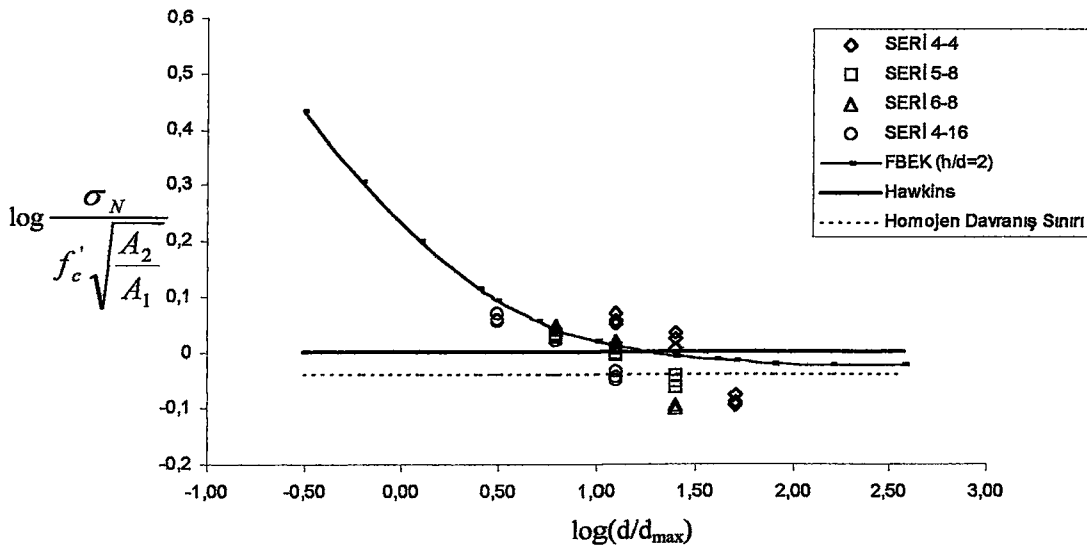


Küp için .....  $\sigma_N = 0.9166 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{16.4739 d_{\max}}{d} \right)^{1/2}$  (5.44)



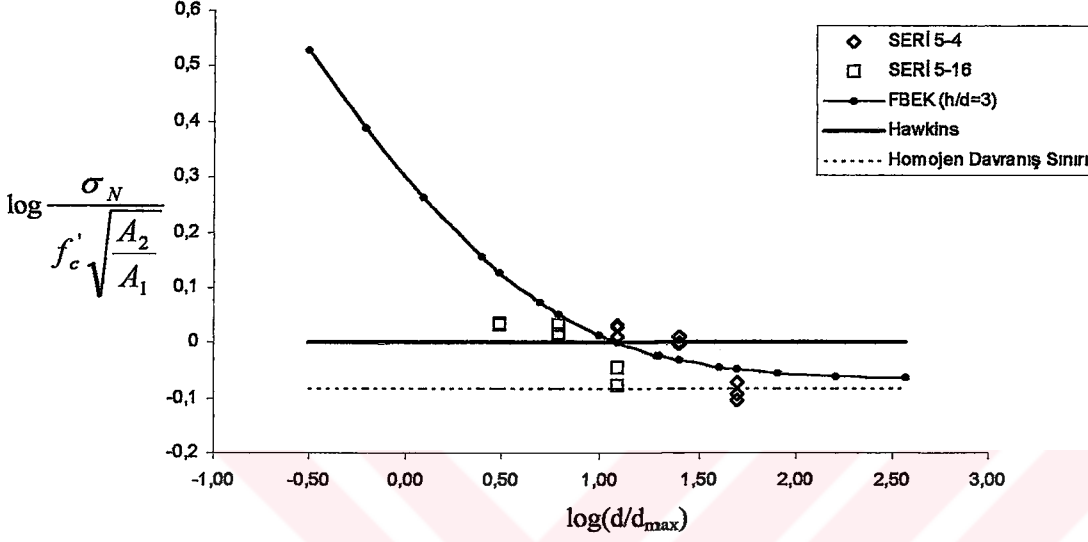
Şekil 5.44. Küp numunelerin seri sonuçları ve FBEK genel formülasyon grafiği

$h/d=2$  (kare prizma) .....  $\sigma_N = 0.9441 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left( 1 + \frac{2.2609 d_{\max}}{d} \right)^{1/2}$  (5.45)



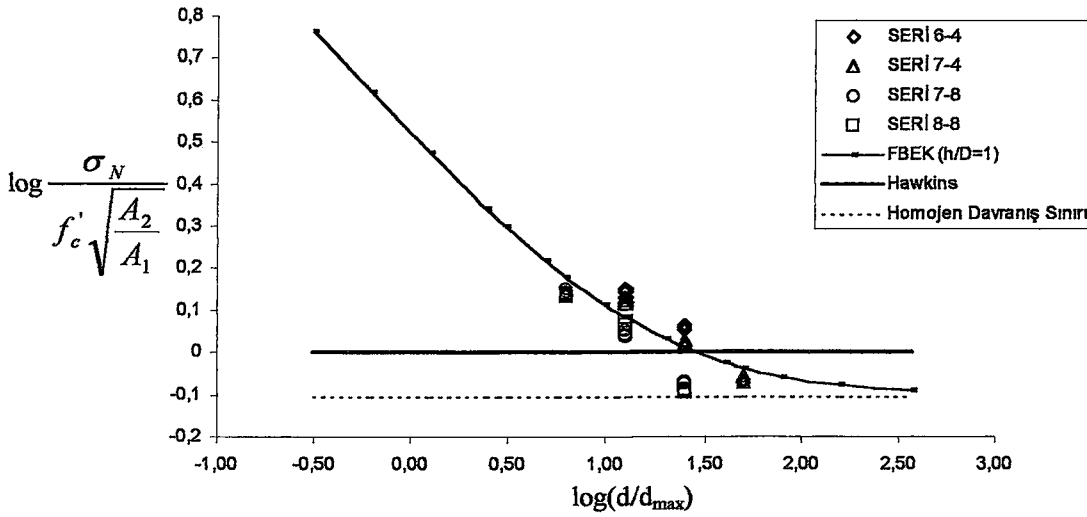
Şekil 5.45.  $h/d$  Oranı 2 olan kare prizma numunelerin seri sonuçları ve FBEK genel formülasyon grafiği

$$h/d=3 \text{ (kare prizma)} \dots\dots\dots \sigma_N = 0.8579 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{4.4839 d_{\max}}{d}\right)^{1/2} \quad (5.46)$$



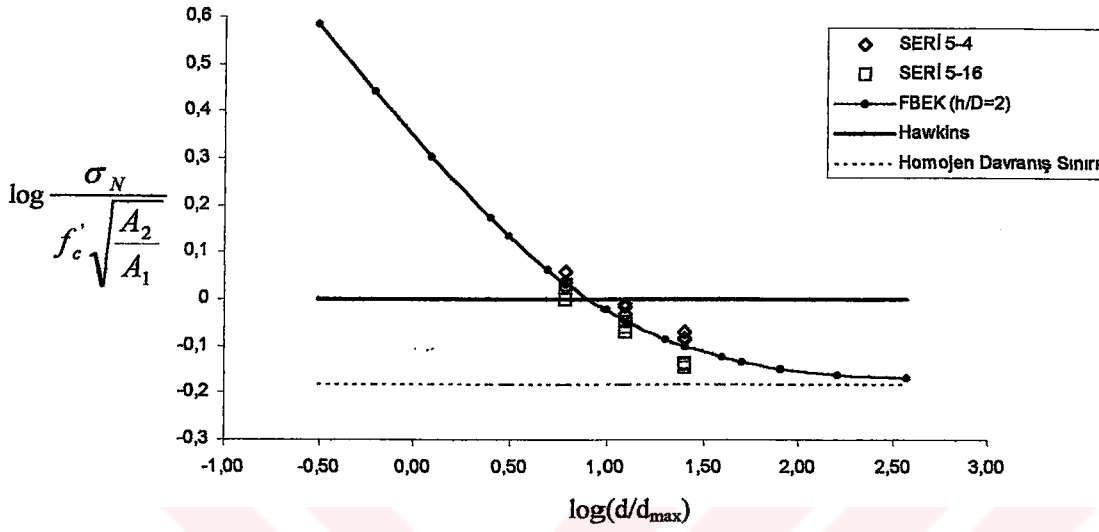
Sekil 5.46. h/d Oranı 3 olan kare prizma numunelerin seri sonuçları ve FBEK genel formülasyon grafiği

$$h/D=1 \text{ (silindir)} \dots\dots\dots \sigma_N = 0.7971 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{16.4032 d_{\max}}{d}\right)^{1/2} \quad (5.47)$$



Şekil 5.47. h/D Oranı 1 olan silindir numunelerin seri sonuçları ve FBEK genel formülasyon grafiği

$$h/D=2 \text{ (silindir)} \dots\dots\dots \sigma_N = 0.6719 f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \left(1 + \frac{9.9026 d_{\max}}{d}\right)^{1/2} \quad (5.48)$$



Şekil 5.48. h/D Oranı 2 olan silindir numunelerin seri sonuçları ve FBEK genel formülasyon grafiği

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel ve teoriksel çalışmalar sonucunda, beton/betonarme sistemlerde meydana gelebilen yatak göçmesinde boyut etkisinin varlığı araştırılmıştır. Buna göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- 1) Bölgesel yüklemeye maruz donatısız beton numunelerde yatak mukavemeti, karakteristik boyutun artmasıyla azaldığı gözlenmiştir. Gerek Bazant'ın ve gerekse de Carpinteri'nin boyut etkisi kanunlarının uygulanmasında elde edilen korelasyon katsayılarının yüksek olması bu savı desteklemektedir ( $r > 0.900$ ).
- 2) Numune yüzey alanının yatak alanına oranı (R) yatak dayanımını aşırı derecede etkilemektedir. R değeri arttıkça nominal yatak dayanımı değeri de buna paralel olarak artmaktadır.
- 3) Yatak mukavemeti betonun basınç dayanımı ile orantılı olduğu tespit edilmiştir. Numune boyutu ve yatak boyutu aynı olan numunelere dikkat edilirse, basınç dayanımındaki artış ile birlikte yatak dayanımında da artış gözlenmiştir. R değeri eşit, basınç dayanımları farklı serilere bakıldığında, yatak dayanımı değişmiş olmasına karşın  $n = (\sigma_N / f_c)$  oranı yaklaşık olarak aynıdır.
- 4) Numune yüksekliğinin yatak mukavemetini etkilediği deneysel sonuçlarda gözlenmiştir. h/d oranı 1 olan numunelerde yatak mukavemeti en büyük değerdedir. Ayrıca boyutun değişimiyle beraber yatak mukavemetinde ki değişimde geniş bir aralıkta olmaktadır. h/d oranı 2 ve 3 olan numunelerde yatak mukavemeti, diğer seriye göre düşük olmanın yanında değişim aralığı da çok küçüktür. Bunun özellikle tabandaki sürtünmeden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.
- 5) Kırılmış numunelerden elde edilen kamaların boylarına ( $a_k$ ) ve yarım tepe açıları dikkate alındığında, numune boyutunun artmasıyla beraber  $a_k/h$  oranının küçüldüğü ve yarım tepe açısının da ( $\alpha$ ) büyüdüğü tespit edilmiştir.
- 6) Bu çalışmada, diğerlerinden farklı olarak ilk defa dairesel kesitli prizmalarda yatak mukavemeti incelenmiştir.

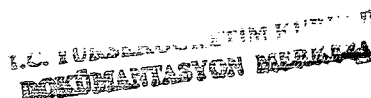
## 6. KAYNAKLAR

1. İnce, R. ve Arslan, A., (2001), **Basınç-Kesme Kırılmasına Maruz Etriyesiz Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisi**, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13/2, 109-116.
2. Griffith, A. A., (1921), **The Phenomana of Rupture and Flaw in Solids**. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Series A, 221,163-198s.
3. Kesler, C. E., Naus, D. J. and Lott J. L., (1971), **Fracture Mechanics – its applicability to concrete**, In: Proc., Int. Conf. on the Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, vol. IV. The Soc. of Mater Sci., 4, 113-124.
4. Hillerborg, A. M. and Petersson, P. E., (1976), **Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements**, Cement Conc. Res, 6, 773-782
5. Nallathambi, P. and Karihaloo, B L, (1986), **Determination of The Specimen Size Independent Fracture Toughness of Plain Concrete**, Mag. Concr. Res, 38,67-76 .
6. Bazant, Z. P. and Xi, Y., (1990), **Statistical Size Effect in Concrete Structures: Nonlocal Theory**, Report No. 89-12/B623s, Center For Advaced Cement-Based Materials, Northwestern University, Evanston, IL.
7. Bazant, Z. P., (1984), **Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock and Metal**, ASCE J. Engng. Mech, 110, 518-535.
8. Ince, R. ve Arıcı, E., (2002), **Betonarme Sistemlerde Yatak Mukavemetinde Boyut Etkisi**, V. Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 25-27 Eylül, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
9. Bazant, Z. P. and Pheppier, P. A., (1987), **Determination of Fracture Energy Properties From Size Effect and Brittleness Number**, ACI Mater. J., 84, 463-480.
10. Kim, J. K. and Eo, S. H., (1990), **Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar İnitial Cracks**, Magazine of Concrete Res., 42, 233-238.
11. Carpinteri, A., (1994), **Scaling Laws and Renormalization Groups for the Strength and Toughness of Disordered Materials**, Int. J. Solids Struct, 31, 291-302.
12. Carpinteri, A., Chiaia B. and Ferro G. (1995), **Multifractal Scalling Law: an Extensive Application to Nominal Strength Size Effect of Concrete Structures**, Politecnico di Torino, Diretimento di ingegneria strutturale, Report No. 51, Torino, Italy.
13. İnce, R. ve Arslan, A., (2000), **Kesme Açıklığı Kısa Kayma Donatısız Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisi**, Tr. J. Engin. Environ. Sci., 69-77
14. Perinçel, Ö., (1963), **Bearing Capacity of Concrete**, Presented to the school of Engineering of Middle East Technical University, 23s.

15. Bauschinger, J., (1976), **Versuche mit Qudern aus Naturstein**, Mechanischen und technischen labororium der kge, Tech. Hochschule, Mnich, Germany, Vol: 4, P: 13.
16. Shealson, W., (1957), **Bearing Capacity of Concrete**, Journal of the American Concrete Institute, 54(5), 405-414.
17. Meyerhof, G., (1953), **The Bearing Capacity of Concrete and Rock**, Magazine of concrete Research, 4, 107-116.
18. Hawkins, N. M., (1968), **The Bearing Strength of Concrete Loaded Through Rigid Plates**, Magazine of Concrete Research, 20, 31-40.
19. Tung, A. and Donald, L. B., (1960), **Bearing Capacity of Concrete Bloks**, Journa of the American Concrete Institute, 31, 869-877.
20. Tarig, A., Burley, E. and Rigdem, S., (1998), **Bearing Capacity of Plain and Reinforced Concrete Loaded over a Limited Area**, ACI Structural Journal, 95, 330-342.
21. Niyogi, S. K., (1973), **Bearing Strength of Concrete – Geometric Variations**, Journal of the Structural Division, 99, 1471-1490.
22. Niyogi, S. K., (1974), **Concrete Bearing Strength – Support, Mix, Size Effect**, Journal of the Structural Division, 100, 1685-1702.
23. Niyogi, S. K., (1975), **Bearing Strength of Reinforced Concrete**, Journal of the Structural Division, 101, 1125-1137.
24. Weibull, W., (1939), **A Statistical Theory of the Strength of Materials**, Royal Swedish Inst. for Engng. Res, Stockholm.
25. Kaplan, M. F., (1961), **Crack Propagation and the Fracture of Concrete**, Journal of the American Concrete Institute, 58, 591-610
26. Şener, S., (1995), **Yüksek Dayanımlı Betonda Kırılma Mekanığı**, Prof. İ. Turgay Sabis Anısına Sempozyum, 24 Kasım, Istanbul Teknik Universitesi, Istanbul, Türkiye.
27. Irwin, G R., (1957), **Analysis of Stresses And Strains Near the end of a Crack Traversing a Plate**, J. Appl. Mech., 24, 361-364.
28. İnce, R., (1998), **Betonarme Yapı Elemanlarında Basınç-Kesme Kırılmasının ve Boyut Etkisinin Deneysel ve Numerik Olarak İncelenmesi**, Doktora Tezi, F. U. Fen Bilimleri Ens., Elazığ.
29. Irwin, G.R., Kies J.A., Smith H.L., (1958), **Fracture Strength Relative to onset and Arrest of Crack Propagation** Proceedings of the American Society for Testing Materials, Vol. 58, pp. 640-657.
30. Barenblatt, G. I, (1959), **The Formulation Of Equilibrium Cracks During Brittle Fracture. General İdeas and Hypotheses. Axially-Symmetric Cracks**. J. of Appl. Math. and Mech. (PPM); 23 : 622-636.



31. Dugdale, D. S., (1960), **Yielding of Steel Sheets Containing Slits**, J. Mech. Phys. Solids, 8, 100-104.
32. Bilby, B. A., Cottrell, A.H. and Swindeni K H., (1963), **The Spread of Plastic Yield from a Notch**, Proc Roy Soc London, A272, 304-314.
33. Glucklish, J., (1963), **Fracture of Plain Concrete**, ASCE J. Engng. Mech, 89,127-138
34. Romualdi, J. P. and Batson, G. B., (1963), **Mechanics of Crack Arrest in Concrete**, ASCE J. Engng. Mech., 89, 147-168.
35. Zaitsev, J. V., (1971), **Deformation and Failure of Hardened Cement Paste and Concrete Subjected to Short Term Load**, Cement Concr. Res., 1, 123-137.
36. Swamy, R N (1979) **Fracture Mechanics Applied to Concrete**, Developments in concrete technology-1, Applied science publishers ltd. 221-281
37. Brown, J. H., (1972), **Measuring The Fracture Toughness of Cement Paste and Mortars**, Cement Concr. Rec., 3, 475-480.
38. Shah, S. P. and McGarry, F. J., (1971), **Griffith Fracture Criterion and Concrete**, ASCE J. Engng. Mech., 97, 1663-1676.
39. Walsh, P. F., (1972), **Fracture of Plain Concrete**, Indan Concr. Res., 28, 37-41.
40. Swamy, R. N. and Rao, C. V. S. K., (1973), **Fracture Mechanism in Concrete Systems Under Uniaxial Loading**, Cement Concr. Rses., 3, 413-417.
41. Higgins D. D. and Bailey, J. E. (1976), **Fracture Measurements on Cement Paste**, J. Mater Sci, 1, 1995-2003.
42. Mindess, S., and Nadeau, J. S., (1976), **Effect of Notch Width on  $K_{IC}$  for Mortar and Concrete**, Cement Concr. Res., 6, 529-534.
43. Walsh, P. F., (1976), **Crack Initiation in Plain Concrete**, Mag. Concr. Res., 28, 37-41.
44. Gjorv, O. E., Sorensen, S. I. and Arnesen, A., (1977), **Notch Sensitivity and Fracture Toughness of Concrete**, Cement Concr. Res., 7, 333-344.
45. Rossi, P., Acker, P. and Francois, D., (1984), **Measurement of the Fracture Toughness  $K_{IC}$  of Concrete**, Eds. Valluri, S R et. al., Pegamon Press, Oxford, 4, 2833-2839.
46. Ohgishi, S., Ono, H., Takatsu, M. and Tanahashi, I., (1986), **Influence of Test Conditions on Fracture Toughness of Cement Paste and Mortar**, In G-23, 281-290.
47. Tian, M., Huang, S., Liu, E., Wu, L., Long, K. and Yang, Z., (1986), **Fracture Toughness of Concrete**, In G-23, 299-306.
48. Nakayama, J., (1965), **Direct Measurement of Fracture Energies of Brittle Heterogeneous Materials**, J. Am. Ceram. Soc, 48, 583-587.
49. Tattesall, H. G. and Tappin, G., (1966), **The Work of Fracture and its Measurement in Metals, Ceramics and Other Materials**, J. Mater. Sci., 1, 296-301.



50. Hilleborg, A., (1983), **Analysis of One Single Crack**, In G-18, 223-249.
51. Hilleborg, A., (1985), **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.
52. RILEM Committee FCM 50 (1985), **Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of the Three-Point Bend Test on Notched Beams**, Mater. Struct., 18, 285-290.
53. İnce, R., (1994), **Çimento Bazlı Malzemelerin Kırılmasında (non-linear kırılma mekaniği) Boyut Tesirinin Yapay Sinir Ağları İle İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, F.Ü.Fen Bil.Ens,Elazığ.
54. Irwin, G. R., (1958), **Fracture**, In Handbuch der Physik, VI, Springer-Verlag, Berlin, 551-590. Jayatilaka, A. S. (1979), **Fracture of Engineering Materials**, App. Sci. Publishers, London.
55. Gettu, R. and Shah, S. P., (1992), **Fracture Mechanics and Hight Strength Concrete**, In G-45, 1-75.
56. Bache, H. H., (1986), **Fracture Mechanics in Design of Concrete and Concrete Structures**, In G-23, 577-586.
57. Brühwiller, E., Broz, J. J. and Saouma, V. E., (1991), **Fracture Model Evaluation of Dam Concrete**, J. Mater. Civil Engng., 3, 235-251.
58. ACI-446.1R (1990), **Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models, and Determination of Material Properties**, Am. Conc. Ens., Detroit.
59. Bazant, Z. P. and Xi, Y. (1990), **Statistical Size Effect in Concrete Structures: nonlocal theory**, Report No. 89-12/B623s, Center For Advaced Cement-Based Materials, Northwestern University, Evanston, IL.
60. Bazant, Z. P., (2000), **Size Effect**, Int. Journal of Solids and Structures, 37, 69-80.
61. Yalçın, E., (2002), **Kırılma Mekaniği Açısından BetonarmeYapı Elemanlarında Perçin Etkisinin ve Boyut Tesirinin İncelenmesi**, Doktora Lisans Tezi, F.U.Fen Bil.Ens,Elazığ.
62. Tang, T., Shah, S. P. and Ouyang, C., (1992), **Fracture Mechanics and Size Effect of Concrete in Tension**, Journal of Structural Engineering, V:118, No:11, 3169-3185.
63. Bazant, Z. P., and Oh, B.H., (1983), **Crack Band Theory for Fracture of Concrete**. Materials and Structures, 16(83), 155 – 157
64. Yon, J.H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., (1991), **Numerical Simulation of Model Dynamic Fracture of Concrete**. J. Engrg. Mech., ASCE, 117(7). 1595 -1610.
65. Jenq, Y. S., and Shah, S. P., (1985), **A Two Parameter Fracture Model For Concrete**, J. Engrg. Mech., ASCE, 111(10), 1227-1241.

66. Karihaloo, B. L. and Nallathambi, P., (1986), **Determination of Specimen-Size Independent Fracture Toughness Of Plain Concrete**, Magazine of Concr. Res., 38 (135), 67-76.
67. Bazant, Z P. and Kazemi, M.T. (1990). **Determination of Fracture Energy, Process Zone Length and Brittleness Number From Size Effect, With Application to Rock and Concrete**. Int. J. Fracture, 44(2), 111 - 131.
68. Hasegawa, T., Shioy, T. and Okada, T., (1985), **Size Effect on Splitting Tensile Strength of Concrete**, Proceedings of the Japan Institute, 7<sup>th</sup> Conference, Japan Concr. Ins., 309-312.
69. Bazant Z. P., Kazemi, M. T., Hasegawa T. and Mazars J. (1991) **Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis**, ACI Mater. J., 88(3), 325-332.
70. Arslan, A. and Ince, R., (1995), **The Neural Network-Based Analysis of Size Effect in Concrete Fracture**, Proceeding of the II. Int. Conf. FRAMCOS-II, 693-707, Zurich, Switzerland, July 25-28
71. Kim, J. K., Yi, A. T. and Yang, E. I., (2000), **Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens**, ACI Structural Journal, 97, 291-296.
72. Mandelbrot, B., (1982), **The Fractal Geometry of Nature**. W. H. Freeman and Company.
73. Arıcı, E., İnce, R., (2003), **Betonarme Sistemlerde Yatak Mukavemetinde Boyut Etkisinin Fraktal Modeli**, 6. Uluslararası Kırılma Konferansı, Konya, Türkiye.
74. İnce, R., (2001), **Kayma Donatısız Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisinin Fraktal Modeli**, 5. Uluslararası Kırılma Konferansı, Elazığ, Türkiye.
75. Bazant, Z.P. and Prat, P. C., (1988), **Measurement of Mode III Fracture Energy of Concrete**. Nuclear Engineering and Design 106, 1-8.
76. Tokatly, Z. Y. and Barr B., (1991), **Size Effect in Mode III Fracture**, Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics, Published by E & F. N. Spon, London, 473-482.
77. Bazant, Z.P. and Kim J. K., (1984), **Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams**, ACI Journal , 579-583.
78. Bazant, Z.P. and F. ASCE., (1984), **Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal**, Journal of Engineering Mechanics, V: 110, No: 4, 518-535.
79. Marti, P., (1989), **Size Effect in Double-Punch Tests on Concrete Cylinders**, ACI materials J., V. 86, No 6, 597-601.
80. Bazant, Z.P. and Cao, Z. (1986b), **Size Effect in Brittle Failure of Unreinforced Pipes**, Am. Concrete Institute Journal, 83, 365-373.
81. Tang, T., Shah, S. P. and Ouyang, C., (1992), **Fracture Mechanics Size Effect of Concrete in Tension**, Journal of Structural Engineering, 118, 3169-3185.

82. Aitcin, P. C., Miao, B., Cook W. D. and Mitchell D., (1994), **Effect of Size and Curing on Cylinder Compressive Strength of Normal and High-Strength Concretes**, ACI Materials Journal, 91, 349-354.
83. Bazant, Z.P., and Cao, Z. (1988), **Size Effect of Shear Failure in Prestressed Concrete Beams**, Am. Concrete Institute Journal, 83, 260-268.
84. Bazant, Z.P. and Sun, H-H. (1987). **Size Effect in Diagonal Shear Failure: Influence of Aggregate Size and Stirrups**. ACI Materials Journal, 84 (4), 259-272.
85. Bazant, Z. P. and Şener, S. (1988), **Size Effect in Pullout Tests**. ACI Materials Journal 85, 347-351.
86. Bazant, Z. P. and Kazemi, M T (1991) **Size Effect On Diagonal Shear Failure of Beams Without Stirrups**, ACI Struct. J. 88, 268-276.
87. Şener S., Belgin C., Akyıldıl A. And Okkalı S. K., (1996), **Size Effect in Axially Loaded Reinforced Concrete Columns**, Concrete Technology for Developing Countries IV. Int. Conf., EMU, North Cyprus, 640-646.
88. Kim, J. K., Yi, S. T., Park, C. K. and Eo, S. H., (1999), **Size Effect on Compressive Strength of Plain and Spirally Reinforced Concrete Cylinders**, ACI S. J. V. 96, 88-94.
89. Bazant, Z.P. and Şener, S., (1987), **Size Effect in Torsional Failure of Concrete Beams**, J. of Struct. Engrg. ASCE, 113 (10), 2125-2136.
90. Carpinteri, A. and Ferro, G., (1994), **Size Effect on Tensile Fracture Properties: A Unitary Explanation Based on Fractality of Concrete Microstructure**, Materials and Structures, 27, 563-571
91. Carpinteri, A. Chiaia, B. and Ferro, G., (1995), **Multifractal Scalling Law: an Extensive Application to Nominal Strength Size Effect of Concrete Structures**, Politecnico di Torino, Dipartimento di ingegneria strutturale, Report No. 51, Torino, Italy.
92. ACI-318 (1989), **Building Code Requirements for Reinforced Concrete**, Detroit.
93. Ersoy, U., (2000), **Reinforced Concrete**, METU, Ankara.

## ÖZGEÇMİŞ

1967 Erzurum doğumluyum. İlk ve ortaöğretimimi Erzurum'da tamamladım. 1990 yılında F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümüne kayıt yaptırđım ve 1994 yılı bahar dönemi sonunda mezun oldum. F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Bölümünde 1994 yılında Yüksek lisans öğrenimimi başladım ve 1997 yılında tamamladım. 1998 yılında F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Bölümünde Doktora öğrenimine başladım. Şu anda Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Yapı Öğretmenliği Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktayım.

F.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
ERZURUM İLİ  
ERZURUM ÜNİVERSİTESİ