

755785

**AŞIRI DONATILI BETONARME KİRİŞLERDE
BOYUT ETKİSİ DENEYLERİ**

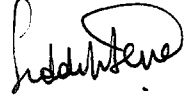
Çağatay Mehmet BELGİN

**DOKTORA TEZİ
(İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2004
ANKARA**

Çağatay Mehmet BELGİN tarafından hazırlanan AŞIRI DONATILI BETONARME KİRİŞLERDE BOYUT ETKİSİ DENEYLERİ adlı bu tezin doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım



Prof.Dr.Sıddık ŞENER

Bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr.Tekin GÜLTOP



Üye : Prof.Dr.Zekai CELEP



Üye : Prof.Dr.Abdussamet ARSLAN



Üye : Prof.Sıddık ŞENER



Üye : Y.DoçDr.Orhan DOĞAN



Bu tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
EKLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇALIŞMANIN AMAÇ VE KAPSAMI.....	3
2.1.Boyut Etkisi Üzerine Araştırmalar.....	3
2.2.Denge Üstü Donatılı Kiriş.....	4
2.3.Dört Nokta Yüklemesi.....	7
2.4.Kırılma Mekaniği.....	7
2.4.1.Kırılma mekaniğinin tarihi geçmişi.....	8
2.4.2.Yarı gevrek malzemeler için kırılma teorilerinin çalışma alanı.....	27
2.4.3.Kırılma mekaniği kullanmak için nedenler.....	28
2.5.Boyut Etkisi Eşitlikleri.....	38
2.5.1.Bazant'ın boyut etkisi eşitliği.....	38
2.5.2.Carpinteri'nin çok çatlaklı boyut etkisi eşitliği.....	49
2.5.3.Geliştirilmiş Bazant eşitliği.....	53
2.6.Enerji Açığa Çıkış Oranı ve Kırılma Enerjisi.....	55

2.6.1.Genel enerji dengesi	55
2.6.2.Kırılma işleminin şekilsel anlatımı	57
2.6.3.Kırılma enerjisi	60
2.6.4.Gerilme yoğunluk çarpanı	61
2.6.5.G _r değerinin deneysel verilerden bulunması	63
2.6.6.R eğrisi.....	64
2.6.7.Kırılma parametrelerinin boyut etkisi deneylerinden bulunması.....	65
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	67
3.1.Deney Elemanlarının Tanıtılması ve Sınıflandırılması	67
3.1.1. I.Grup kirişler.....	72
3.1.2. II.Grup kirişler	72
3.1.3.III.Grup kirişler	72
3.1.4.IV.Grup kirişler	73
3.1.5. V.Grup kirişler	73
3.2.Deney Elemanlarının Üretilmesi	73
3.2.1.Deney elemanlarının kalıpları.....	74
3.2.2.Deney elemanlarının donatıları.....	75
3.2.3.Deney elemanlarının dökülmesi.....	75
3.3.Kullanılan Malzemeler.....	81
3.3.1.Beton.....	81
3.3.2.Donatı	83
3.4.Deney Düzeneği.....	84
3.5.Deneylerden Resimler.....	89

4. DENGİ ÜSTÜ DONATILI KİRİŞLERİN DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	93
4.1.Deney Sonuçları.....	93
4.2.Bazant'ın Boyut Etkisi Denklemine Göre Analiz	97
4.2.1.Doğrusal analiz	97
4.2.2.Doğrusal olmayan gösterim	98
4.2.3. I.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analizler	98
4.2.4. II.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz	102
4.2.5.III.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz.....	105
4.2.6.IV.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz	115
4.2.7. V.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz.....	121
4.2.8.Bazant'ın boyut etkisi analizine göre deney sonuçlarının değerlendirilmesi	127
4.2.9.Bazant'ın analizinden bulunan kırılma mekaniği parametreleri.....	130
4.3.Carpinteri'nin Boyut Etkisi Denklemine Göre Analiz.....	131
4.3.1.Doğrusal analiz	131
4.3.2.Doğrusal olmayan gösterim	132
4.3.3. I.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz	132
4.3.4. II.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz	135
4.3.5.III.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz.....	137
4.3.6.IV.Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz	145
4.3.7.V. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz.....	150
4.3.8.Carpinteri'nin boyut etkisi analizine göre deney sonuçlarının değerlendirilmesi	154
4.4.Geliştirilmiş Bazant Modeli, Bazant Modeli ve Carpinteri Modellerinin Birlikte Analizi	157

4.4.1. I.Grup deneyler için doğrusal olmayan analiz	158
4.4.2. II.Grup deneyler için doğrusal olmayan analiz.....	160
4.4.3.III.Grup deneyleri için doğrusal olmayan analiz	163
4.4.4.IV.Grup deneyleri için doğrusal olmayan analiz	172
4.4.5.V. Grup deneyleri için doğrusal olmayan analiz.....	178
4.4.6. Geliştirilmiş Bazant, Bazant ve Carpinteri boyut etkisi analizine göre deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	184
4.4.7. Bütün gruplar için K_{Ic} , G_f ve c_f değerleri	186
4.4.8. Bütün gruplar için moment-eğrilik, yük-yerdeğiştirme, gerilme-birim yerdeğiştirme eğrileri ve değerlendirmeleri	187
4.4.9. Kirişlerin başlangıç elastik modülleri.....	198
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	200
KAYNAKLAR.....	202
EKLER	210
ÖZGEÇMİŞ	275

**AŞIRI DONATILI BETONARME KİRİŞLERDE
BOYUT ETKİSİ DENEYLERİ
(Doktora Tezi)**

Çağatay Mehmet BELGİN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2004**

ÖZET

Betonun gevrek, çatlaklı ve homojen olmayan bir malzeme olması kırılma mekaniği hesap yöntemlerindeki değişkenlerin bulunmasını güçleştirmektedir. Betonun neden olduğu bir kırılma türü olan aşırı donatılı kirişlerin eğilme altında kırılma deneyleri, kırılma mekaniği değişkenlerinin bulunabilmesine yardımcı olabilmek amacıyla yapılmıştır. Değerlendirilmeler yapılırken Bazant'ın boyut etkisi denkleminde, Carpinteri'nin çok çatlaklı kırılma denkleminde ve Bazant'ın geliştirilmiş Bazant yönteminden yararlanılmıştır. Bu üç yöntem birbirleri ile kıyaslanmış ve en uygun yöntem önerilmiştir. Ayrıca kirişlere ait moment-eğrilik, gerilme-birim uzama ve yük-düşey yerdeğiştirme şekilleri çizilmiş ve boyut etkisinin bu şekillere etkisi incelenmiştir.

Bilim Kodu : 968
Anahtar Kelimeler : Kırılma mekaniği, denge üstü donatılı kiriş, dört nokta eğilme deneyi.
Sayfa Adedi : 275
Tez Yöneticisi : Prof.Dr.Sıddık ŞENER

**SIZE EFFECT EVALUATION OF TESTS ON
OVERREINFORCED CONCRETE BEAMS
(Ph.D Thesis)**

Çağatay Mehmet BELGİN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2004**

ABSTRACT

Difficulties arise in determining the parameters of fracture mechanics in concrete due to the non-homogeneity and brittleness of concrete, and the existence of cracks. Concrete is the controlling component in failure of overreinforced concrete beams. Four point bending tests are carried out to determine the parameters of fracture mechanics in concrete. Results are evaluated by using Bazant, Carpinteri and modified Bazant models. Based on the comparisons, the best method for representing the observed behavior has been identified. The moment-curvature, stress-strain and load-vertical displacement variations of the beams are plotted and the impact of size effect on the charts were discussed.

Science Code :968
Key Words :Fracture mechanics, overreinforced beam, four point bending test
Page Numbers :275
Adviser :Prof.Dr. Sıddık ŞENER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof.Dr.Sıddık ŞENER'e, deney kirişlerinin üretimi için bedelsiz olarak demirleri sağlayan İZMİR Demir Çelik AŞ Genel Müdür Yardımcısı Emin Tüfekçiler'e, deney kirişlerinin üretimi ve deneyler sırasında her an yardım eden Uzm.Faruk OGÜN'e, deney kirişlerinin üretiminde yardımlarını esirgemeyen Araş.Gör. Emin KARA'ya, deney kirişlerinin üretimi, deneylerin yapılması, tezde yer alan bazı şekillerin çizimi ve tezin yazımı sırasında her an bana yardım eden Dr.Özgür ANIL'a, Levenberg-Marquardt denklemi ile yaptığım analizlerde kullandığım programı MATLAB® da hazırlayan İnş.Yük.Müh.İ.Ufuk Çağdaş'a ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli arkadaşlarım İnş.Yük.Müh Asu İNAN ve İnş.Yük.Müh Hakan MUTLU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Deney elemanları	70
Çizelge 3.2. Kirişlerin silindirik basınç değerleri	83
Çizelge 3.3. Donatı dayanımları.....	84
Çizelge 4.1. Analitik ve deneysel kırılma yükleri ve gerilmeler.....	95
Çizelge 4.2. I.Grup için doğrusal analiz değerleri.....	98
Çizelge 4.3. I.Grup için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler	99
Çizelge 4.4. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	101
Çizelge 4.5. II.Grup için doğrusal analiz değerleri	102
Çizelge 4.6. II.Grup için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	102
Çizelge 4.7. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	104
Çizelge 4.8. III.Grup A için doğrusal analiz değerleri	105
Çizelge 4.9. III.Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	105
Çizelge 4.10. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	108
Çizelge 4.11. III.Grup B için doğrusal analiz değerleri.....	109
Çizelge 4.12. III.Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler	109
Çizelge 4.13. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	111
Çizelge 4.14. III.Grup C için doğrusal analiz değerleri.....	112
Çizelge 4.15. III.Grup C için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler	112
Çizelge 4.16. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	114
Çizelge 4.17. IV.Grup A için doğrusal analiz değerleri	115
Çizelge 4.18. IV.Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	116
Çizelge 4.19. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	118

Çizelge 4.20. IV.Grup B için doğrusal analiz değerleri	119
Çizelge 4.21. IV.Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	119
Çizelge 4.22. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	121
Çizelge 4.23. V.Grup A için doğrusal analiz değerleri.....	122
Çizelge 4.24. V.Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	122
Çizelge 4.25. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	124
Çizelge 4.26. V.Grup B için doğrusal analiz değerleri.....	125
Çizelge 4.27. V.Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler	125
Çizelge 4.28. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i	127
Çizelge 4.29. Gruplara ait D_o ve Bf_i değerleri.....	128
Çizelge 4.30. Levenberg-Marquardt algoritması için başlangıç değerleri ve hatalar	130
Çizelge 4.31. K_{Io} , G_f ve c_f değerleri	130
Çizelge 4.32. I.Grup için doğrusal analiz değerleri.....	132
Çizelge 4.33. I.Grup için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler	133
Çizelge 4.34. En uygun analiz değerleri	134
Çizelge 4.35. II.Grup için doğrusal analiz değerleri	135
Çizelge 4.36.II.Grup için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	135
Çizelge 4.37. En uygun analiz değerleri	137
Çizelge 4.38. III.Grup A için doğrusal analiz değerleri	137
Çizelge 4.39. III.Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	138
Çizelge 4.40. En uygun analiz değerleri	139
Çizelge 4.41. III.Grup B için doğrusal analiz değerleri.....	140
Çizelge 4.42. III.Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler	140

Çizelge 4.43. En uygun analiz değerleri.....	142
Çizelge 4.44. III.Grup C için doğrusal analiz değerleri.....	142
Çizelge 4.45. III.Grup C için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler	143
Çizelge 4.46. En uygun analiz değerleri.....	144
Çizelge 4.47. IV.Grup A için doğrusal analiz değerleri	145
Çizelge 4.48. IV.Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	145
Çizelge 4.49. En uygun analiz değerleri.....	147
Çizelge 4.50. IV.Grup B için doğrusal analiz değerleri	147
Çizelge 4.51. IV.Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	148
Çizelge 4.52. En uygun analiz değerleri.....	149
Çizelge 4.53. V.Grup A için doğrusal analiz değerleri.....	150
Çizelge 4.54. V.Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler.....	150
Çizelge 4.55. En uygun analiz değerleri.....	152
Çizelge 4.56. V.Grup B için doğrusal analiz değerleri.....	152
Çizelge 4.57. V.Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler	153
Çizelge 4.58. En uygun analiz değerleri.....	154
Çizelge 4.59. Gruplara ait A ve B değerleri.....	155
Çizelge 4.60. Levenberg-Marquardt algoritması için başlangıç değerleri ve hatalar	156
Çizelge 4.61. Levenberg-Marquardt algoritması için Bazant ve Carpinteri hataları.....	157
Çizelge 4.62. I.Grup $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri.....	158
Çizelge 4.63. Değişkenler	158
Çizelge 4.64. Üç yöntemin hataları	159

Çizelge 4.65. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri.....	159
Çizelge 4.66. II.Grup $\text{Log } \sigma_N$ ve $\text{Log } D$ değerleri.....	160
Çizelge 4.67. Değişkenler	161
Çizelge 4.68. Üç yöntemin hataları	162
Çizelge 4.69. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri	162
Çizelge 4.70. III.Grup A $\text{Log } \sigma_N$ ve $\text{Log } D$ değerleri.....	163
Çizelge 4.71. Değişkenler	164
Çizelge 4.72. Üç yöntemin hataları	165
Çizelge 4.73. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri	165
Çizelge 4.74. III.Grup B $\text{Log } \sigma_N$ ve $\text{Log } D$ değerleri.....	166
Çizelge 4.75. Değişkenler	167
Çizelge 4.76. Üç yöntemin hataları	168
Çizelge 4.77. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri	168
Çizelge 4.78. III.Grup C $\text{Log } \sigma_N$ ve $\text{Log } D$ değerleri.....	169
Çizelge 4.79. Değişkenler	170
Çizelge 4.80. Üç yöntemin hataları	171
Çizelge 4.81. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri	171
Çizelge 4.82. IV.Grup A $\text{Log } \sigma_N$ ve $\text{Log } D$ değerleri	172
Çizelge 4.83. Değişkenler	173
Çizelge 4.84. Üç yöntemin hataları	174
Çizelge 4.85. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri	174
Çizelge 4.86. IV.Grup B $\text{Log } \sigma_N$ ve $\text{Log } D$ değerleri.....	175
Çizelge 4.87. Değişkenler	176

Çizelge 4.88. Üç yöntemin hataları	177
Çizelge 4.89. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri	177
Çizelge 4.90. V.Grup A $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri.....	178
Çizelge 4.91. Değişkenler	179
Çizelge 4.92. Üç yöntemin hataları	180
Çizelge 4.93. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri	180
Çizelge 4.94. V.Grup B $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri.....	181
Çizelge 4.95. Değişkenler	182
Çizelge 4.96. Üç yöntemin hataları	183
Çizelge 4.97. Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri	183
Çizelge 4.98. Gruplara ait değişkenlerin değerleri.....	184
Çizelge 4.99. Deney gruplarının her model için hataları.....	185
Çizelge 4.100. Kırılma mekaniği değişkenleri.....	186
Çizelge 4.101. Kirişlerin başlangıç elastik modülleri.....	199

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Dengeli donatı.....	5
Şekil 2.2. Denge üstü donatılı kiriş	6
Şekil 2.3. Dört nokta yüklemesi.....	7
Şekil 2.4. Boşluklu plakda gerilme dağılımı.....	9
Şekil 2.5. Kırılma modları	13
Şekil 2.6. Çatlak tepesinde gerilme durumu	14
Şekil 2.7. Barenblatt yoğun çatlak modeli.....	20
Şekil 2.8. Yoğun çatlak modeli	21
Şekil 2.9. Hillerborg'un sanal çatlak modeli.....	23
Şekil 2.10. Çatlak bandı modeli	25
Şekil 2.11. Farklı davranış modelleri.....	30
Şekil 2.12. Sonlu eleman modelleri.....	31
Şekil 2.13. Akma sahanlığı davranışı	32
Şekil 2.14. Zımbalama etkisindeki bir döşemede boyutun akma platosuna etkisi.....	33
Şekil 2.15. Boyut etkisi.....	34
Şekil 2.16. Numune boyutunun gerilme-göreceli yerdeğiştirme değişimine etkisi ...	36
Şekil 2.17. Boyut etkisinin açıklaması	39
Şekil 2.18. İnce çatlaklı model.....	42
Şekil 2.19. Boyut etkisinin logaritmik ölçekte gösterimi	44
Şekil 2.20. Doğrusal analiz I.....	45
Şekil 2.21. Doğrusal analiz II.....	47
Şekil 2.22. Carpinteri çok çatlaklı ölçek kanunu	50

Şekil 2.23. Çok çatlaklı ölçek kanunu logaritmik eksen üzerinde	51
Şekil 2.24. Farklı iki malzeme için Carpinteri ölçek etkisi	52
Şekil 2.25. Artık gerilme.....	54
Şekil 2.26. Çatlamış bir malzemede çatlak gelişimi.....	56
Şekil 2.27. Yük yerdeğiştirme altında kalan alan.....	57
Şekil 2.28. Çatlak gelişimi	58
Şekil 2.29. Enerji açığa çıkış oranı-çatlak boyu.....	59
Şekil 2.30. Doğrusal elastik kırılma mekaniğinde çatlak ilerlemesini gösterir G - a grafiği.....	59
Şekil 2.31. Doğrusal elastik kırılma mekaniğinde yükleme-çatlama-yük boşaltımı eğrisi	60
Şekil 2.32. Doğrusal elastik kırılma mekaniğinde yükleme-çatlama-yük boşaltma grafiği izo- G eğrisi.....	61
Şekil 2.33. Ortasında çatlak bulunan sonsuz boyutta bir plak	62
Şekil 2.34. Kırılma enerjisinin deneysel yolla bulunması	63
Şekil 2.35. R -eğrisinin bulunması	65
Şekil 3.1. Dört nokta yüklemesi altında gerilme ve birim yerdeğiştirme şekli.....	68
Şekil 3.2. I.Grup deney kirişlerinin donatı düzeni	76
Şekil 3.3. II.Grup deney kirişlerinin donatı düzeni	77
Şekil 3.4. III.Grup deney kirişlerinin donatı düzeni.....	78
Şekil 3.5. IV.Grup deney kirişlerinin donatı düzeni.....	79
Şekil 3.6. V.Grup deney kirişlerinin donatı düzeni.....	80
Şekil 3.7. Elek analizi	82
Şekil 3.8. Deney düzeneği	86
Şekil 3.9. Kiriş orta nokta yerdeğiştirme geometrisi.....	87

Şekil 3.10. Ölçüm düzeneği	88
Şekil 3.11. Moment-eğrilik hesaplamasında kullanılan yerdeğiştirme geometrisi	88
Şekil 4.1. Analitik kırılma yükü P'nin bulunması.....	93
Şekil 4.2. I.Grup	100
Şekil 4.3. I.Grup için doğrusal olmayan analiz.....	101
Şekil 4.4. II.Grup	103
Şekil 4.5. II.Grup için doğrusal olmayan analiz.....	104
Şekil 4.6. III.Grup A	107
Şekil 4.7. III.Grup A için doğrusal olmayan analiz.....	108
Şekil 4.8. III.Grup B	110
Şekil 4.9. III.Grup B için doğrusal olmayan analiz.....	111
Şekil 4.10. III.Grup C	113
Şekil 4.11. III.Grup C için doğrusal olmayan analiz.....	114
Şekil 4.12. IV.Grup A.....	117
Şekil 4.13. IV.Grup A için doğrusal olmayan analiz	118
Şekil 4.14. IV.Grup B	120
Şekil 4.15. IV.Grup B için doğrusal olmayan analiz.....	121
Şekil 4.16. V.Grup A.....	123
Şekil 4.17. V.Grup A için doğrusal olmayan analiz.....	124
Şekil 4.18. V.Grup B	126
Şekil 4.19. V.Grup B için doğrusal olmayan analiz	127
Şekil 4.20. I.Grup doğrusal analizi.....	133
Şekil 4.21. I.Grup için doğrusal olmayan analiz	134
Şekil 4.22. II.Grup doğrusal analizi.....	136

Şekil 4.23. II.Grup için doğrusal olmayan analiz.....	136
Şekil 4.24. III.Grup A doğrusal analizi.....	138
Şekil 4.25. III.Grup A için doğrusal olmayan analiz.....	139
Şekil 4.26. III.Grup B doğrusal analizi.....	141
Şekil 4.27. III.Grup B için doğrusal olmayan analiz.....	141
Şekil 4.28. III.Grup C doğrusal analizi.....	143
Şekil 4.29. III.Grup C için doğrusal olmayan analiz.....	144
Şekil 4.30. IV.Grup A doğrusal analizi	146
Şekil 4.31. IV.Grup A için doğrusal olmayan analiz	146
Şekil 4.32. IV.Grup B doğrusal analizi.....	148
Şekil 4.33. IV.Grup B için doğrusal olmayan analiz.....	149
Şekil 4.34. V.Grup A doğrusal analizi.....	151
Şekil 4.35. V.Grup A için doğrusal olmayan analiz.....	151
Şekil 4.36. V.Grup B doğrusal analizi.....	153
Şekil 4.37. V.Grup B için doğrusal olmayan analiz.....	154
Şekil 4.38. I.Grup kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	159
Şekil 4.39. I.Grup kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi	160
Şekil 4.40. II.Grup kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	162
Şekil 4.41. II.Grup kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi.....	163
Şekil 4.42. III.Grup A kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	165
Şekil 4.43. III.Grup A kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi.....	166
Şekil 4.44. III.Grup B kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	168

Şekil 4.45. III.Grup B kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi.....	169
Şekil 4.46. III.Grup C kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	171
Şekil 4.47. III.Grup C kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi.....	172
Şekil 4.48. IV.Grup A kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	174
Şekil 4.49. IV.Grup A kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi	175
Şekil 4.50. IV.Grup B kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	177
Şekil 4.51. V.Grup B kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi.....	178
Şekil 4.52. V.Grup A kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	180
Şekil 4.53. V.Grup A kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi.....	182
Şekil 4.54. V.Grup B kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli	183
Şekil 4.55. V.Grup B kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi.....	185
Şekil 4.56. Moment-eğrilik hesap yöntemi.....	188
Şekil 4.57. I.Grup yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik, gerilme-birim uzama	189
Şekil 4.58. II.Grup yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik, gerilme-birim uzama	191
Şekil 4.59. III.Grup yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik, gerilme-birim uzama	193
Şekil 4.60. IV.Grup yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik, gerilme-birim uzama	195
Şekil 4.61. V.Grup yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik, gerilme-birim uzama	197
Şekil 4.62. Elastisite modülünün bulunması.....	199

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Deney kalıpları.....	74
Resim 3.2. Dartec Donatı Çekme Aygıtı	85
Resim 3.3. Deney öncesi hazırlıklar yapılırken	89
Resim 3.4. Deney sırasında.....	89
Resim 3.5. L11.60c kirişi deneyden önce.....	90
Resim 3.6. L11.60c kirişi yük başlangıç fotoğrafı	90
Resim 3.7. L11.60c kirişi yük ortası fotoğrafı	91
Resim 3.8. L11.60c kirişi yükleme sonrası fotoğrafı	91

EKLERİN LİSTESİ

Ek	Sayfa
Ek-A1. a) S5.7a, b) S5.7b ve c) S5.7c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	210
Ek-A2. a) S11.15a, b) S11.15b ve c) S11.15c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	211
Ek-A3. a) M5.7a, b) M5.7b ve c) M5.7c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	212
Ek-A4. a) M11.15a, b) M11.15b ve c) M11.15c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	213
Ek-A5. a) M11.30a, b) M11.30b ve c) M11.30c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	214
Ek-A6. a) M22.30a, b) M22.30b ve c) M22.30c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	215
Ek-A7. a) L11.15a, b) L11.15b ve c) L11.15c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	216
Ek-A8. a) L11.30a, b) L11.30b ve c) L11.30c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	217
Ek-A9. a) L11.60a, b) L11.60b ve c) L11.60c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	218
Ek-A10. a) L22.30a, b) L22.30b ve c) L22.30c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri	219
Ek-B1. a) S5.7a, b) S5.7b ve c) S5.7c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	220
Ek-B2. a) S11.15a, b) S11.15b ve c) S11.15c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	221
Ek-B3. a) M5.7a, b) M5.7b ve c) M5.7c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	222
Ek-B4. a) M11.15a, b) M11.15b ve c) M11.15c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	223
Ek-B5. a) M11.30a, b) M11.30b ve c) M11.30c kirişleri yük-orta nokta üst,	

alt yatay yerdeğiştirmeleri	224
Ek-B6. a) M22.30a, b) M22.30b ve c) M22.30c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	225
Ek-B7. a) L11.15a, b) L11.15b ve c) L11.15c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	226
Ek-B8. a) L11.30a, b) L11.30b ve c) L11.30c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	227
Ek-B9. a) L11.60a, b) L11.60b ve c) L11.60c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	228
Ek-B10. a) L22.30a, b) L22.30b ve c) L22.30c kirişleri yük-orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri	229
Ek-C1. S5.7a kirişinin göçmesi	230
Ek-C2. S5.7b kirişinin göçmesi	231
Ek-C3. S5.7c kirişinin göçmesi	232
Ek-C4. S11.15a kirişinin göçmesi	233
Ek-C5. S11.15b kirişinin göçmesi	234
Ek-C6. S11.15c kirişinin göçmesi	235
Ek-C7. M5.7a kirişinin göçmesi	236
Ek-C8. M5.7b kirişinin göçmesi	237
Ek-C9. M5.7c kirişinin göçmesi	238
Ek-C10. M11.15a kirişinin göçmesi	239
Ek-C11. M11.15b kirişinin göçmesi	240
Ek-C12. M11.15c kirişinin göçmesi	241
Ek-C13. M11.30a kirişinin göçmesi	242
Ek-C14. M11.30b kirişinin göçmesi	243
Ek-C15. M11.30c kirişinin göçmesi	244

Ek-C16. M22.30a girişinin göçmesi	245
Ek-C17. M22.30b girişinin göçmesi	246
Ek-C18. M22.30c girişinin göçmesi	247
Ek-C19. L11.15a girişinin göçmesi	248
Ek-C20. L11.15b girişinin göçmesi	249
Ek-C21. L11.15c girişinin göçmesi	250
Ek-C22. L11.30a girişinin göçmesi	251
Ek-C23. L11.30b girişinin göçmesi	252
Ek-C24. L11.30b girişinin göçmesi	253
Ek-C25. L11.60a girişinin göçmesi	254
Ek-C26. L11.60b girişinin göçmesi	255
Ek-C27. L11.60c girişinin göçmesi	256
Ek-C28. L22.30a girişinin göçmesi	257
Ek-C29. L22.30b girişinin göçmesi	258
Ek-C30. L22.30c girişinin göçmesi	259
Ek-D1. Φ 32-S420 donatı çekme deneyi-1	260
Ek-D2. Φ 32-S420 donatı çekme deneyi-2	261
Ek-D3. Φ 32-S420 donatı çekme deneyi-3	262
Ek-D4. Φ 16-S420 donatı çekme deneyi-1	263
Ek-D5. Φ 16-S420 donatı çekme deneyi-2	264
Ek-D6. Φ 16-S420 donatı çekme deneyi-3	265
Ek-D7. Φ 8-S420 donatı çekme deneyi-1	266
Ek-D8. Φ 8-S420 donatı çekme deneyi-2	267
Ek-D9. Φ 8-S420 donatı çekme deneyi-3	268

Ek-D10. Φ 8-S220 donatı çekme deneyi-1	269
Ek-D11. Φ 8-S220 donatı çekme deneyi-2	270
Ek-D12. Φ 8-S220 donatı çekme deneyi-3	271
Ek-D13. Φ 5-S220 donatı çekme deneyi-1	272
Ek-D14. Φ 5-S220 donatı çekme deneyi-2	273
Ek-D15. Φ 5-S220 donatı çekme deneyi-3	274



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Bazant'ın boyut etkisi denkleminde doğrusal analiz I denkleminin eğimi
a	Çatlak uzunluğu
A'	Bazant'ın boyut etkisi denkleminde doğrusal analiz II denkleminin eğimi
a_b	Beton basınç bölgesinin yüksekliği
A_c	Carpinteri çok çatlaklı ölçek kanunu denkleminde değişken
a_e	Etkili çatlak boyu
a_o	Başlangıç çatlak uzunluğu
a_s	Moment kolu
A_s	Donatı alanı
A_{sb}	Dengeli çekme donatısı alanı
B	Bazant'ın boyut etkisi denklemindeki malzemenin geometrisine ve kırılma özelliklerine bağlı sabit değer
b	Kiriş kesit genişliği
B_c	Carpinteri çok çatlaklı ölçek kanunu denkleminde değişken
C	Bazant'ın boyut etkisi denkleminde doğrusal analiz I denklemindeki sabit değer
c	Kohezyonlu bölge uzunluğu
C'	Bazant'ın boyut etkisi denkleminde doğrusal analiz II denkleminin sabit değeri
c_1	Tarafsız eksen yüksekliği

c_b	Dengeli tarafsız eksen yüksekliği
c_f	Sabit, sonlu kırılma bölgesi uzunluğu
C_s	Yükleme düzeneğinin rijitliği, gerilme-göreceli yerdeğiştirme eğrisinde eğim
d	Donatı ağırlık merkezinden en üst life uzaklık, yararlı yükseklik
D	Karakteristik boyut
D_0	Bazant'ın boyut etkisi denklemindeki malzemenin geometrisine ve kırılma özelliklerine bağlı sabittir
d_{max}	En büyük agrega boyutu
E	Betonun Elastisite Modülü
E'	Düzlem uzama durumunda betonun Modülü
E_s	Çeliğin Elastisite Modülü
F_s	Donatı üzerine etkiyen kuvvet
f_{su}	Kopma dayanımı
f_y	Donatı akma dayanımı
f_t	Betonun çekme gerilmesi
f_{yd}	Donatı akma tasarım dayanımı
G	Enerji açığa çıkış oranı, bir çatlakın birim alan kadar ilerleyebilmesi için gereken enerji
G_c	Kritik kırılma enerjisi
G_F	Gerilme-çatlak ağzı açılma grafiğinin altında kalan alan, kırılma enerjisi
G_f	Boyut etkisinde kırılma enerjisi
h	Kiriş kesit yüksekliği
h_f	Çatlak şerit kalınlığı
i	Eylemsizlik yarıçapı
k	Bazant'ın boyut etkisi analizindeki çatlaklı bölgenin eğimi
K	Gerilme yoğunluk çarpanı
K_e	Kinetik enerji

K_I	Açılma modunda gerilme yoğunluk çarpanı
K_{Ic}	Kritik gerilme yoğunluk çarpanı (kırılma tokluğu)
K_{II}	Kayma modunda gerilme yoğunluk çarpanı
K_{III}	Yırtılma modunda gerilme yoğunluk çarpanı
K_{IR}	Çatlak ilerlemesiyle artan direnç
k_o	Kırılma mekaniği değişkeni
k_o'	Kırılma mekaniği değişkeninin türevi
L	Kiriş boyu
l_{ch}	Mikroyapısal karakteristik boyut
L_k	Etkili kolon boyu
m	Bazant'ın boyut etkisi denkleminde doğrusal analiz dağılım bandının genişliği
M	Bazant'ın boyut etkisi ifadesinde doğrusal analizde kullanılan bir değişken
M_d	Tasarım momenti
M_R	Moment kapasitesi
N	Bazant'ın boyut etkisi ifadesinde doğrusal analizde kullanılan bir değişken
P	Kuvvet
P_s	Sekant rijitliğinin %95 doğrusunun yük-yerdeğiştirme eğrisini kestiği nokta
P_{max}	Yükün en büyük değeri
Q_c	Carpinteri çok çatlaklı ölçek kuralı denkleminde homojen bölge ile çatlaklı bölgeyi birbirinden ayıran nokta
Q	Yapışma (kohezyon) modülü
r	Polar koordinatlarda başlangıç noktasından birim elemana olan uzaklık
R	Çatlak direnç eğrisi korelasyonu
V	Varyasyon
$\mathcal{R}_0$	Çatlak gelişim direnci

r_p	Kırılma işleminin gerçekleştiği sonlu bölgenin çapı
S	Kirişin yükleme açıklığı
t_u	Tarafsız eksenden üst LVDT ye uzaklık
t_a	Tarafsız eksenden alt LVDT ye uzaklık
U	Cismin elastik deformasyon enerjisi
u	Yatay yerdeğiştirme
v	Düşey yerdeğiştirme
W	Çatlak oluşumu sırasında dışarı çıkan enerji
w	Eksen yönü
w_c	Kritik çatlak tepesi açılma yerdeğiştirmesi
W^R	Kırılma için gereken enerji, eleman enerji tüketimi
z	Eksen yönü
z_1	d-a/2, yararlı yükseklik ile beton basınç bölgesinin ortası arasındaki kuvvet kolu
z_b	Dengeli durumda kuvvet kolu
ξ	x/a boyutsuz uzunluk oranı
θ	Açı
Γ	Çatlak yüzey enerjisi
ϕ	Donatı çapı
ν	Poisson oranı
β	Bazant'ın boyut etkisi ifadesinde bir değişken, gevreklik sayısı
κ	Poisson oranına bağlı bir katsayı
δ_1	Ölçülen giriş orta nokta yerdeğiştirmesi
δ_2	Kiriş ortasında ölçülen üst lif yatay yerdeğiştirmesi
δ_3	Kiriş ortasında ölçülen alt lif yatay yerdeğiştirmesi
δ_4	Sol mesnet çökmesi ölçümü
δ_5	Sağ mesnet çökmesi ölçümü
d_{net}	Kiriş orta nokta net yerdeğiştirmesi
δ_{mc}	Kiriş ortalama mesnet çökmeleri

ω_A	Bazant'ın boyut etkisi denkleminde doğrusal analizdeki A nın değişimi
δA	Çatlak artması ile açığa çıkan ek uzama enerjisi
δa	Yükleme ile çatlağın uzama miktarı
ω_C	Bazant'ın boyut etkisi denkleminde doğrusal analizdeki C nin değişimi
δ_{net}	Hesaplanan net kiriş orta nokta yerdeğiştirmesi
α_R	Geliştirilmiş Bazant boyut etkisi eşitliğinde artık gerilme değişkeni
α_r	Geliştirilmiş Bazant boyut etkisi eşitliğinde artık gerilme değişkeni
β_t	Kesme tutulması katsayısı
ε_{cu}	Betonun en büyük birim uzama değeri
ε_s	Donatı birim uzama değeri
ε_{sy}	Donatı akma birim uzaması
ε_{xx}	x eksenı doğrultusunda birim uzama
ε_{yd}	Donatı akma tasarım birim uzaması
γ_s	Yüzey enerji yoğunluğu
ρ_b	Dengeli donatı oranı
σ_0	Bazant'ın boyut etkisi eşitliğinde değişken
σ_I	Bazant'ın boyut etkisi eşitliğinde artık gerilme değişkeni
σ_r	Bazant'ın boyut etkisi eşitliğinde artık gerilme değişkeni
σ_{cr}	Kritik burkulma gerilmesi
σ_{xx}	x eksenı doğrultusunda gerilme
σ_y	Çatlak tepesinde kohezyondan oluşan gerilme
σ_{yy}	y eksenı doğrultusunda gerilme
σ_{zz}	z eksenı doğrultusunda gerilme
σ	Gerilme

σ_N	Nominal gerilme
σ_{NI}	Geliştirilmiş Bazant modelinde gerilme
τ	Kayma gerilmesi

Kısaltmalar	Açıklama
CTOD	Çatlak tepesi açılma yerdeğiştirmesi
CMOD	Çatlak ağızı açılma yerdeğiştirmesi
LEKM	Doğrusal elastik kırılma mekaniğı
LVDT	Doğrusal değışen yerdeğiştirme ölçeri
RILEM	Uluslararası yapı ve malzeme araştırmaları laboratuvarı



1. GİRİŞ

Beton plastik değil yarı gevrek olduğundan plastik teoriye göre açıklanması doğru değildir. Beton yapının göçmesi mikro çatlakların geliştiği en büyük yük sonrası yumuşama platosu ve bu dağılı çatlakların yerel olarak elemanı kırılmaya götüren ana çatlağın gelişmesi ile gösterilebilir. Bu tip bir davranışın matematik metodu kırılma mekaniği temeline dayanmalıdır. Malzeme metodu gerilme ve uzama cinsinden tam olarak tanımlanamadığından enerji veya karakteristik uzunluk değişkeni içermelidir. Bunlar malzeme özellikleridir. Geometrik olarak benzer fakat boyut olarak farklı yapılar karşılaştırılırlarsa σ_N 'nin kırılma anındaki nominal gerilme elemanın karakteristik boyutu D ile azalması boyut etkisi olarak tanımlanmaktadır.

Son on yılda betonun kırılma mekaniği konusunda yapılan araştırmalar çelikten çok betonun kırılmaya yol açtığı tüm elemanların göçme yükünde boyut etkisi göstermelerinin gerektiğini ortaya koymuştur. Bu sadece betonun çekme gerilmelerini taşıyamadığı için meydana gelen kırılmalarda değil betonun basınç gerilmelerini taşıyamadığı için meydana gelen kırılmalar için de geçerlidir (1). Aynı durum öngerilmeli betonlar için de geçerlidir. Malzeme kırılma özellikleri, betonarme elemanlarda boyut etkisinin beklenmesi gerektiğini gösteren tek neden değildir. Bir elemanın yük-deformasyon eğrisi en büyük yük sonrası yumuşama platosu gösterir ise bu yumuşama da boyut etkisi gösterir.

Geçmişte betonarme kolonların davranışının anlaşılması için birçok çalışma yapılmış (2-6) büyük ve küçük elemanlar arasındaki ölçek farklılığı görecelik ve kuantum mekaniği teorilerinin gelişmesi sağlanmıştır. Akışkanlar mekaniğindeki ölçek problemi sınır-tabaka ve türbülans teorilerinin bulunmasına yol açmıştır.

Yakın zamana kadar betonda boyut etkisi malzeme dayanımının olasılıksal davranışı ile tamamiyle açıklanabilir sanılırdı. Weibull tipi teorilerle boyut etkisi açıklanır ve göçme yükü için güvenlik katsayıları kullanılırdı. Gerçekte maksimum yüke ulaşmadan önce büyük çatlak gelişimi olmaktadır (7-9). Daha büyük yapı daha

fazla birim boy değişim enerjisi tutabilir (çatlak önündeki her birim çatlak gelişimi için enerji tüketimi yapı boyutuna bağlı olmaksızın aynıdır) ve gelişen bir çatlağın önüne daha fazla enerji ortaya çıkartır.

Dayanım Teorisinde Boyut Etkisi İçermeyen Örnek:

Yapı analizinde eğilmede, çekmede, kesmede, burulmada, basınç gibi diğer dayanım durumlarında boyut etkisi göz önüne alınmamaktadır (10). Boyut etkisi içermeyen dayanım kavramı basınç için şu şekildedir. $\sigma_N = P/bD$, geometrik olarak benzer kolonlarda değişik D değerlerinde sabittir. P =maksimum yük, b =kesitin genişliği, D =kesitin yüksekliği, bu örnek için karakteristik boyut olarak seçilmiştir.

Bir örnek verilir ise: Homojen, donatısız, narin, eksenel yüklü ve elastik malzemeden yapılmış bir kolon için Euler'in eşitliğine göre;

$$\sigma_N = P / bD = \sigma_{cr} = \pi^2 E i^2 / L_k^2, \quad i = D / 12^{1/2} \quad [1.1]$$

E =elastisite modülü, i =Eylemsizlik yarıçapı, L_k =Etkili kolon boyudur. Burada L_k/i ve L_k/D geometrik olarak benzer kolonlarda her ne kadar boyut değiştirilse de sabit olacağından σ_N de sabit bulunur. Bu örnekten görüldüğü gibi boyut etkisi dikkate alınırsa, klasik teoriyle açıklanamayacağı görülür. Bu nedenle klasik teori göçmeyi açıklayamaz, bunu test etmenin en iyi yolu boyut etkisi deneylerinin yapılmasıdır.

2. ÇALIŞMANIN AMAÇ VE KAPSAMI

Bu çalışmada dört nokta yüklemesi altında denge üstü donatılı dikdörtgen betonarme kirişlerde gevrek göçme yükleri ve yük-eğrilik ve yük-yerdeğiştirme değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerlerle kirişlerin enerji yutma sığaları, göçme yüklerindeki boyut etkisi ve kırılma mekaniği parametreleri hesaplanmıştır.

Deney sonuçlarına Bazant'ın boyut ve geliştirilmiş boyut etkisi, Carpinteri'nin çok kırılmalı metodları uygulanmıştır.

2.1. Boyut Etkisi Üzerine Araştırmalar

Boyut etkisi üzerinde araştırmalar genellikle Amerika'da Northwestern Üniversitesi'nde Bazant ve İngiltere'de Cardiff'te Wales Üniversitesi'nde Barr, İtalya'da Carpinteri, Japonya'da Mihashi, Kore'de Kim tarafından yürütülmektedir.

Bu çalışmalar; öngerilmeli kirişlerin eğik kesme göçmesi (11), betonarme kirişlerin kesme göçmesinde boyut etkisi (12), agrega boyutunun değişimi ile boyut etkisinin incelenmesi (13), boyuna donatılı, etriyeli kirişlerin kesme göçmesinde boyut etkisi (14), donatısız boruların kiriş ve çembersel göçmesi (15), kirişlerin burulma göçmesinde boyut etkisinin analitik incelenmesi (16), döşemelerin deneysel zımbalama göçmesi (17), boyuna donatılı ve donatısız kirişlerin deneysel olarak burulma göçmesi (18), çekip çıkarma deneylerinde boyut etkisi (19-21), etriyesiz betonarme kirişlerin diyagonal kesme göçmesi (22), Brezilya yarma deneylerinde boyut etkisi (23), yüksek mukavemetli, çentikli beton kirişlerde boyut etkisi (24), beton silindirlerin çift zımbalama deneylerinde boyut etkisi (25), betonarme kolonların dışmerkez yüklenmesinde boyut etkisi (2), üzerine yapılmış analitik ve deneysel çalışmalardır.

Bu konudaki çalışmalara Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü deneysel ve analitik çalışmalarla katkıda bulunmaktadır. Benzer çalışmalardan bazıları; direkt

çekme altında aderans ekinde boyut etkisi (26-27), aderans ekinde dolaylı yükleme altında boyut etkisi (28-29), sargılı donatıların aderans ekinde boyut etkisi (30), dolaylı yükleme altında aderans ekinde sargılı ve sargısız 2 ve 3 boyutlu elemanlarda boyut etkisi (31-32), direkt ve indirekt yüklemelerde sabit moment ve kesme bölgelerinde aderans eki deneyleri (spiralli ve spiralsız) (33-35), burulma altında betonarme kirişlerde boyut etkisi (36-37), yüksek dayanımlı silindirlerde boyut etkisi (38-39) deneyleridir.

2.2. Denge Üstü Donatılı Kiriş

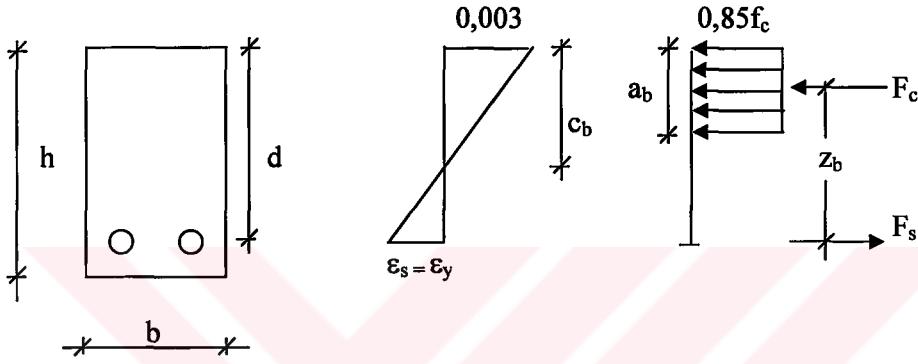
Betonarme elemanlarda donatının az olduğu durumda beton güç tükenmesi kısılmasından az, donatının akmaya eriştiği ve akma uzamasını aştığı durumdur. Donatıdaki büyük uzamalar nedeni ile kirişte sık ve kalın çatlaklar oluşur. Bu sınır duruma erişildikten sonra beton ezilerek dayanımını kaybederek dağılır. Kesitin bulunduğu kirişte büyük şekil değiştirmeler sonucu oluşan yerdeğiştirmeler ile, sünek bir davranışla göçme durumuna eriştiği için bu tür sınır durum haberli göçme durumu olarak adlandırılır. Ayrıca bu göçme durumu donatının akması nedeni ile ortaya çıktığı için “çekme göçmesi” olarak da bilinir.

Betonarme elemanlarda donatı fazla ise beton göçme kısılmasına (yaklaşık 0,003) eriştiği halde akmaya ulaşmayıp, elastik kalabilir. Donatının uzaması küçük kaldığı için kirişin çekme bölgesinde ancak seyrek ve ince çatlaklar oluşur. Göçmenin ani olarak sünek olmayan bu tür gevrek sınır durumu “habersiz göçme durumu” veya “basınç göçmesi” olarak adlandırılır. Yönetmelikler donatı oranını sınırlayarak sünek durumun ortaya çıkmasını sağlamışlardır.

Yukarıda açıklanan iki durumu ayıran sınır kesit şekil değiştirmesi donatının akmaya erişirken betonun da kesitin üst kenarında en büyük kısılmayı yapmasıdır. Bu şekil değiştirme “dengeli durum” olarak adlandırılır. Buna benzer olarak donatının göçme durumunda akmaya erişmeyecek kadar fazla olduğu ve gevrek bir şekilde göçen kesit “aşırı donatılı” veya “denge üstü” donatılı olarak bilinir. Göçme durumunda

donatının akmaya eriştiği duruma karşı gelen ve sünek bir davranışla göçen kesit ise “az donatılı” veya “denge altı donatılı” olarak bilinir. Burada aşırı ve az sözcükleri dengeli duruma kıyasla kullanılmaktadır (40-42).

Şekil 2.1. de eğilme momenti taşıyan kesitte dengeli donatı oranının elde edilmesinde kullanılan birim yerdeğiştirme, gerilme değerleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Dengeli donatı

Burada $F_s = A_s f_y$, çekme kuvvetlerinin bileşkesi, donatının akma birim uzaması ise $\epsilon_y = f_y / E_s$ olarak bilinir. Üçgen eşitliğinden tarafsız eksenin yeri c_b ,

$$c_b = \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} d \quad \text{elde edilir.} \quad [2.1]$$

Basınç bölgesinde dikdörtgen gerilme bloğunun yüksekliği $a_b = 0,85 c_b$, $z_b = d - (a_b/2)$

$$M_r = A_s f_y z_b \quad [2.2]$$

dengeli donatı

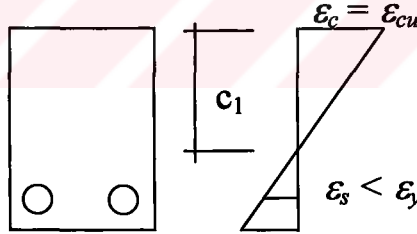
$$A_s = A_{sb} = M / f_y z_b \quad [2.3]$$

elde edilir. Dengeli donatı oranı

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{bd} = \frac{0,85 f_c}{f_y} \frac{a_b}{d} \quad [2.4]$$

elde edilir. Bu çalışmada denenen kirişlerin dengeli değerleri S420 donatısı için ($\varepsilon_y=0,0021$), $c_b=0,622d$, $a_b=0,528d$, $z_b=0,736d$ dir. Donatı oranı C20 amaçlandığından $\rho_b=0,021$ dengeli değeri üzerindeki denge üstü donatılı kirişler üretilmişlerdir.

Betonarme bir kiriş kesitindeki çekme donatısı oranı, dengeli çekme donatısı oranından fazla olduğu durumlarda gevrek kırılma meydana gelir. Bu durumda çekme donatısı akmadan önce beton üst lifi ε_{cu} (betonun en büyük birim uzama değeri olup TS 500 de bu değer 0,003 değerine ulaşmış olmaktadır. Güç tükenmesini donatı değil betonun başlattığı göçme betonun kırılması ile gevrek ve ani olmaktadır (Şekil 2.2).

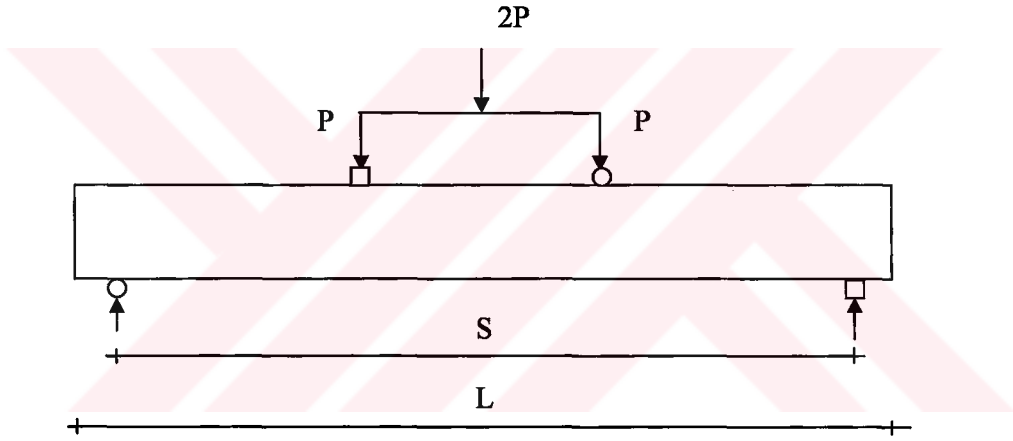


Şekil 2.2. Denge üstü donatılı kiriş

Bu çalışmada betonun kırılma mekaniğine örnek olarak aşırı donatılı kirişlerin göçme yükleri kullanılarak boyut etkisi analizi ile kırılma mekaniği parametreleri bulunmuştur.

2.3. Dört Nokta Yüklemesi

Dört nokta yükleme kiriş yükleme düzeneği Şekil 2.3. de verilmiştir. Kirişin alt kenarına biri sabit diğeri hareketli olmak üzere iki mesnet yerleştirilir (kiriş kenar ucundan alınan mesnette ezilme olmayacak şekilde uzakta seçilmektedir). Kirişin üst kısmına biri sabit diğeri hareketli olmak üzere iki yükleme mesneti konur ve bu mesnetlerden eşit miktarda yükleme yapılır (Şekil 2.3). Kirişin yükleme açıklığı S kiriş boyu olan L den küçüktür ($S < L$). Bu yükleme durumunda en büyük moment yükler arasında sabit olmaktadır.



Şekil 2.3. Dört nokta yükleme

2.4. Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniği iki temel kriteri dikkate alan bir davranış teorisidir, malzeme dayanımını enerji ve dayanım kriteri ile birleştiren ve kırılmayı bütün yapı boyunca ilerleyen bir davranış olarak gören bir teoridir. Kırılma mekaniği teorisi uzun süredir metal malzemelerin tasarımında, denizcilikte, uzay bilimlerinde ve nükleer

mühendislikte kullanılmasına rağmen beton davranışını açıklamada kullanımı çok yenidir (43-49).

2.4.1. Kırılma mekaniğinin tarihi geçmişi

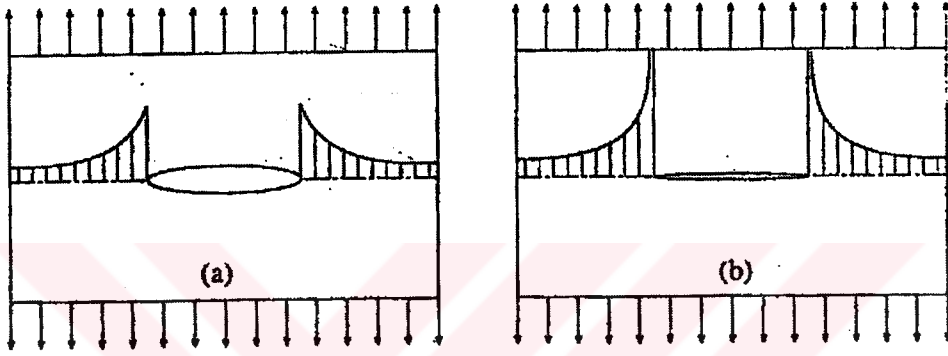
Beton yapılar çatlakla dolu olup en büyük yüke ulaşıldığında elemanda çatlak bölgeleri olur. Uygulamaları 1950'lere dayanan kırılma mekaniği tasarım teorisi beton yapıların tasarımında kullanılmamaktadır. Kırılma mekaniği teorileri bugüne kadar ancak cam ve metaller gibi homojen ve gevrek malzemeler için kullanılmıştır. Bu klasik teorilerin betona uygulanması düşüncesi Kaplan (50) tarafından ortaya atılmış ancak Kesler, Naus ve Lott'un yaptığı araştırmalarda bunun mümkün olamayacağı görülmüştür. Bunun nedeninin betondaki çatlak gelişiminin fiziksel davranışının yukarıda sözedilen malzemelerden daha farklı olmasıdır. Özellikle betonda çatlak gelişim bölgesinin diğer malzemelerinkinden çok daha büyük olduğu bilinmektedir. Betonun kırılmasına ait teoriler ancak 1970'lerin sonlarında ortaya çıkabilmiştir.

Beton tasarımı üç değişim geçirmiştir. Birincisi, beton yapıların tasarımında kullanılan, 1900-1930 yılları arasında geliştirilen, betonun çekme almadığı varsayımı ile hazırlanan emniyet gerilmeleri yöntemidir. İkincisi ise 1930 larda düşünülen ve 1940-1970 yılları arasında geliştirilen plastik limit analiz taşıma gücüdür. 1980 lerde düşünülp olgunlaştırılan kırılma mekaniği teorisi üçüncü devrim olarak görülmektedir.

2.4.1.1. Klasik doğrusal elastik kırılma mekaniği

İnglis boşluklu bir levhada gerilme analizi yapmıştır. Yaptığı çalışma kırılma mekaniği teorisinin başlangıcı olmuştur. Inglis çalışmasında elastik teoriyi kullanarak sonsuz bir plakada elips şeklinde bir boşluğun tepesinde gerilmeyi hesap etmiştir. Yaptığı hesaplamalarda elips şeklin bir çizgisel çatlğa benzetilmeğe çalışılması ile

(kısa kenar uzunluğu sıfıra giderken) elips tepesindeki gerilmelerin sonsuza gittiğini görmüştür (Şekil 2.4). Bu çalışmaya dayanarak Griffith malzemede bir çatlak varlığı durumunda gerilmelerin elastik teori ile açıklanamayacağı çünkü dış yük miktarı ne olursa olsun çatlak tepesinde gerilmelerin sonsuz olarak hesaplanacağını söylemiştir.



Şekil 2.4. Boşluklu plakta gerilme dağılımı a) Elips boşluklu sonsuz plakta gerilme yığılması, b) elips şeklindeki boşluk çatlakla yaklaşırken gerilme yığılması

Şekil 2.4 de görüldüğü gibi plak içinde keskin bir çatlak olduğunda gerilme akı çizgileri çatlak yöresinde gerilmenin yeniden dağılımına neden olmaktadır. Bir çentikteki gerilme uygulanan dış gerilme kuvvetine bağlı olmaksızın çatlak uçlarında sonsuza gitmektedir. Griffith, kalınlığı boyutlarından çok küçük, sabit bir gerilmeye maruz, ortasında elips şeklinde bir çatlak olan, elastik bir plakta bunu göstermiştir. Düzlem levha durumunda $\sigma_{zz} = 0$ kabul edilir. Elipsin küçük eksenini sıfıra giderken, yani elips şeklindeki çatlak çizgisel bir çatlakla dönüştürülürken $2a$ uzunluğundaki çatlakın tepesindeki gerilme aşağıdaki gibi verilir:

$$\sigma_{yy} = \sigma_{xx} + \sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1}} \left\{ 2 \frac{x}{a} + \sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1} \right\}^{-1} + \sigma \quad [2.5]$$

$$\sigma_{xy} = 0 \quad [2.6]$$

Çatlak tepesine yakın yerlerde iki eksenli bir gerilme durumu oluşmaktadır. $|x| \rightarrow a$ olurken hem σ_{xx} hem de σ_{yy} sonsuza gitmektedir. $|x| \gg a$ durumunda $\sigma_{xx} \rightarrow 0$ ve $\sigma_{yy} \rightarrow \sigma$ olur. Çatlağın üst yüzeyinin düşey yerdeğiştirmesi (v) aşağıdaki formülle verilebilir:

$$v(x) = \frac{2\sigma}{E} \sqrt{a^2 - x^2}, \quad 0 \leq |x| \leq a \quad [2.7]$$

Eşitlikde E , elastisite modülüdür. Çatlak çekme gerilmesi altında uzamış bir elips şeklini almaktadır. Bir boyutu diğeri boyutlarına göre çok büyük olan silindir gibi çentikli bir cisim düşünöldüğünde düzlem yerdeğiştirme durumu oluşacaktır. Yani $\varepsilon_{xx}=0$, $\sigma_{zz}=v(\sigma_{xx}+\sigma_{yy})$ durumu oluşacaktır. Bu durumda 2.7 eşitliğinin sağı tarafına paydaya $(1-v^2)$ çarpanı eklenecektir. Burada v malzemenin Poisson oranıdır. Düzlem uzama ve gerilme eşitliklerinde yerdeğiştirmeler E yerine E' yerleştirilerek bulunabilir. Düzlem gerilme durumunda $E \leftarrow E$ ve düzlem uzamada $E \leftarrow E/(1-v^2)$ olur. 2.5 eşitliğinin çözümünde süperpozisyon prensibi kullanılmıştır. Yukarıdaki eşitliklerden elde edilen toplam iş aşağıdaki gibi verilebilir:

$$W = 2 \left(-\frac{\sigma}{2} \int_{-a}^a v(x) dx \right) = -\frac{\pi a^2 \sigma^2}{E'} \quad [2.8]$$

Yukarıdaki eşitlikde eksi işareti gerilme ile yerdeğiştirmenin zıt yönlerde olduğunu göstermektedir. W değeri çatlak oluşumu sırasında dışarı çıkan enerjiyi vermektedir. Plağın yüklenmiş sınırları sabit ve yerdeğiştirme yapmıyorsa, W değeri çatlak oluşumu sırasında elastik enerjiye eşit olmaktadır. Griffith tarafından incelenen problemde olduğu gibi sınırlar serbest bir şekilde hareket edebiliyorsa cismin elastik deformasyon enerjisi U artmakta ve W değeri diğeri enerji kayıpları göz önüne alınmazsa sistemin potansiyel enerjisinin değişimine eşit olmaktadır. Her bir uçta çatlak Δa kadar arttırıldığında çatlak tepesinde tüketilen enerji kullanılarak denge eşitliğı elde edilir. Çatlağın düzgün bir şekilde büyüyebilmesi için aşağıdaki koşulun sağlanması gerekmektedir.

$$\delta W = -\delta \Gamma \quad [2.9]$$

burada Γ çatlak yüzey enerjisidir. Γ şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\Gamma = 4a\gamma_s \quad [2.10]$$

γ_s yüzey enerji yoğunluğudur. Griffith, enerji kriterini dikkate alan klasik doğrusal kırılma mekaniği teorisini önermiştir. Bu teoriye göre çatlağın birim yüzey alanının gelişimi için gereken enerji var olduğu takdirde ancak çatlak ilerleyebilecektir. Griffith bu enerjiyi $2\gamma_s$ olarak hesap etmiştir. γ_s elastik katı cismin spesifik yüzey enerjisidir, bir başka deyişle maddenin mikro yapısındaki bağlayıcıları kırmak için gerekli olan enerjidir.

Çatlak gelişimi için gereken enerji Griffith enerjisinden fazla olması gerekir. Genelde malzemede çatlak gelişimi doğrusal olmayıp, düzensiz ve kıvrımlıdır. Aynı zamanda ana çatlağa, etrafında pek çok mikro çatlak eşlik eder ve çatlak tepesinde plastik davranış sergileyen bir bölge bulunur. Bu sebeple $2\gamma_s$ olarak hesaplanan katı hal yüzey enerjisi daha genel bir terimle, sabit bir değer olan çatlak gelişim direnci, $\mathcal{R}$, ile değiştirilmiştir. $\mathcal{R}$ nin nasıl hesaplanacağı deneysel kırılma mekaniğinin temel uğraş alanıdır. Doğrusal elastik kırılma mekaniğinin bir diğer temel problemi de belirli bir yapı için bir çatlağı birim alan kadar ilerletmek için gereken enerjinin şiddetinin hesabıdır. Bu şiddet değerine enerji açığa çıkartma oranı, $\mathcal{G}$, denir (bu oran zamandan bağımsız, çatlak boyu ile orantılıdır).

Simetriden dolayı çatlak her bir uçta δa kadar ilerlediği zaman oluşan toplam çatlak yüzey alanı $4\delta a$ olmaktadır. Düzgün bir şekilde çatlağın ilerlemesi için gereken eşitlikden aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\frac{\delta}{\delta a} (W + \Gamma) = 0 \quad [2.11]$$

yukarıda yazılan eşitlikler arasında gerekli birleştirmeler yapılırsa aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\sigma^2 = \frac{4E'\gamma_s}{\pi a} \quad [2.12]$$

Bilinen bir malzeme için gerilme aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sigma\sqrt{\pi a} = 2\sqrt{E'\gamma_s} = \text{sabit.} \quad [2.13]$$

şeklinde yazılır. Griffith'in teorisi cismin gevrek kırılması temeline dayanmaktadır. Seramik gibi çok gevrek kırılan malzemelerde Griffith'in bulduğu eşitlikler çok başarılı sonuçlar vermektedir.

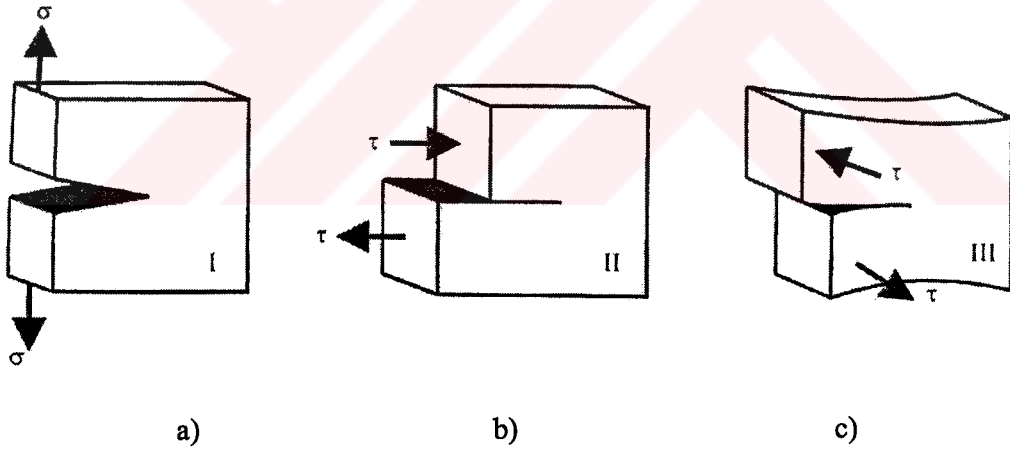
Griffith'in ilk çalışmaları ancak cam gibi çok gevrek maddelerin kırılmasını açıklayabilmiştir. Bu alanda 1940 lara kadar ciddi bir çalışma olmamıştır. Elastik kırılma mekaniğindeki gelişmeler 1940-1970 yılları arasında gözlemlenen şaşırtıcı kırılma olayları sonucunda olmuştur (Örnek olarak II.Dünya Savaşı sırasında durup dururken "Liberty" adlı gemi Kuzey Denizinde ortadan kırılarak ikiye ayrılmıştır). Bu dönem boyunca LEKM teorisini gelecekte tasarım kriteri olarak kullanma amaçlı pek çok analitik, deneysel ve matematiksel çalışmalar yapılmıştır.

Kuramsal LEKM nin temellerinin oluşturulmasında ikinci ana gelişme Irwin tarafından yapılmıştır. Irwin, çatlak tepesine yakın bölgelerde gerilme şiddetini enerji açığa çıkış oranı ile ilişkilendirip bir parametre olarak kullanmış ve buna gerilme şiddet çarpanı K adını vermiştir. Irwin'in metodunun en büyük üstünlüğü gerilme şiddet çarpanlarının toplanabilir olmasıydı ancak bu yöntem doğrusal elastisite ile sınırlıdır. Griffith'in enerji açığa çıkma oranları toplanamaz, ancak bu yöntem doğrusal elastisite ile sınırlı değildir.

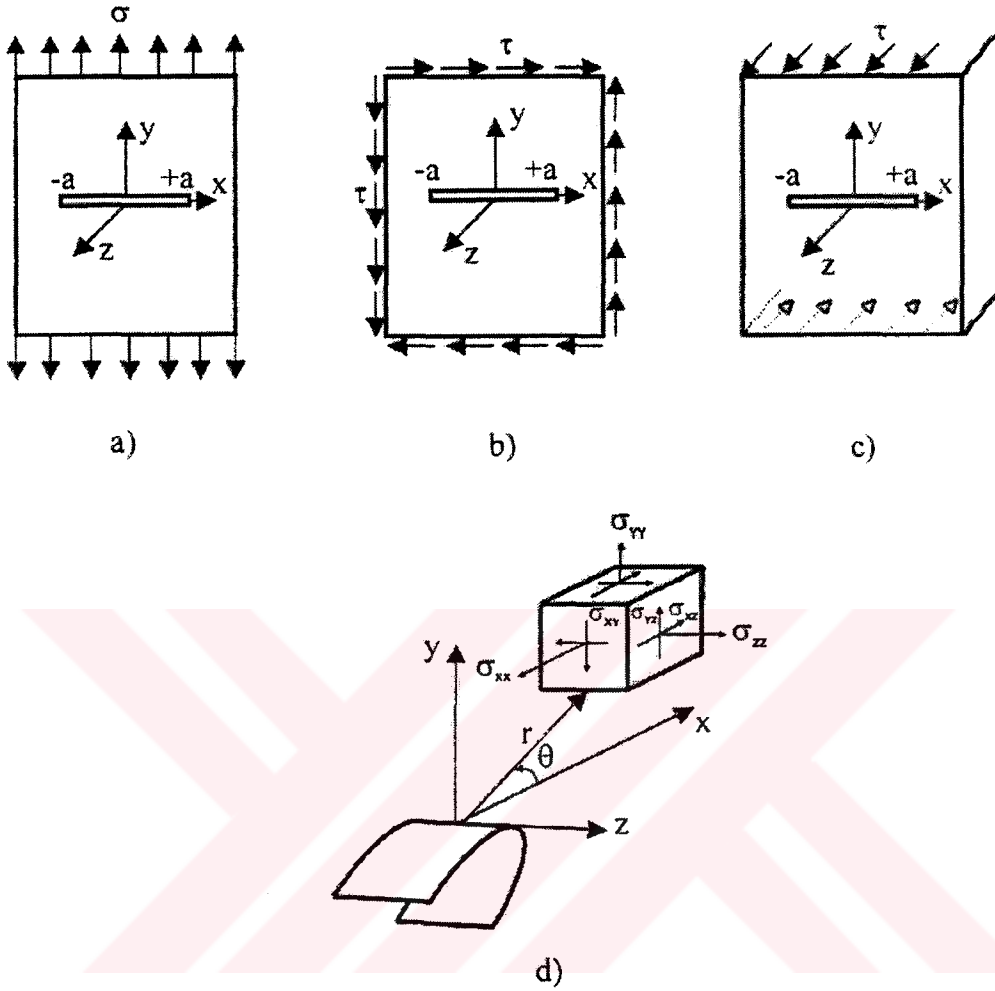
Gevrek bir cisimde kırılma, gerilme alanının yoğunlaştığı yerde olur. Cismin geri kalan kısmının ise elastik davranış içerisinde olduğu kabul edilmiştir. Irwin, keskin çatlak tepesinde gerilme bileşeninin yükleme ve elastik cismin şekline bağlı olduğunu ileri sürmüştür.

Genel olarak üç ayrı kırılma modundan sözedilir. Bunlardan birincisi çatlak düzlemine dik açılmayı gösteren ve açılma modu adıyla da anılan I. Mod'dur. İkincisi, çatlak yüzlerinin kendi düzlemlerinde hareket etmesiyle oluşan ve kayma modu adıyla da anılan II. Moddur. Üçüncüsü ise, çatlak yüzlerini düzlem dışında hareket etmesiyle oluşan ve yırtılma modu adıyla da anılan III. Moddur (Şekil 2.5).

Yukarıda değinilen modlara ait gerilme durumları ve eksen kabulleri Şekil 2.6 da verilmiştir.



Şekil 2.5 Kırılma modları a) I. Mod, açılma modu b) II. Mod, kayma modu c) III. Mod, yırtılma modu (43)



Şekil 2.6. Çatlak tepesinde gerilme durumu a) Mod I, b) Mod II c) Mod III d) gerilme durumu (43)

Bir çatlak tepesinde gerilmelerin hesaplanması matematiksel zorluklar nedeniyle ancak basit kapalı çözümlerle mümkün olabilmektedir. Yukarıda sözedilen temel üç moda ait gerilmeler hesaplanmıştır. Mod I için gerilmeler şu şekilde verilmiştir (51):

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad [2.14]$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad [2.15]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad [2.16]$$

$$u = \frac{K_I(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa-1}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad [2.17]$$

$$v = \frac{K_I(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa-1}{2} + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad [2.18]$$

yukarıdaki eşitliklerde u ve v değerleri yerdeğiştirmelere ait yatay ve dişey bileşenlerdir. κ değişkeni düzlem gerilme durumunda $(3-\nu)/(1+\nu)$, düzlem şekil değiştirme durumunda $(3-4\nu)$ olmaktadır. Çatlak tepesinde $\theta = 0$ durumunda

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = K_I / \sqrt{2\pi r}, \quad \sigma_{xy} = 0 \quad [2.19]$$

olmaktadır. K_I değerine gerilme şiddet çarpanı adı verilir. Yükleme durumuna ve cismin geometrisine bağlı bir değerdir. şekil 2.6a daki gibi bir geometri için K_I aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma(\xi) \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} d\xi, \quad \xi = x/a \quad [2.20]$$

$\sigma(\xi)$, mod I için verilen eksenel çekme gerilmesidir. Düzgün yayılı olduğu durumlarda $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ olur.

Mod II için gerilmeler aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad [2.21]$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad [2.22]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad [2.23]$$

$$u = \frac{K_{II}(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa+1}{2} + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad [2.24]$$

$$v = \frac{K_{II}(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa-1}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad [2.25]$$

Çatlak tepesinde $\theta = 0$ durumunda

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0, \quad \sigma_{xy} = K_{II} / \sqrt{2\pi r} \quad [2.26]$$

olmaktadır. Mod II durumu için gerilme şiddet çarpanı şu şekilde verilmiştir:

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \tau(\xi) \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} d\xi \quad [2.27]$$

Kayma gerilmesi düzgün yayılı olduğu durumlarda $K_{II} = \tau \sqrt{\pi a}$ olmaktadır.

Mod III için gerilmeler şu şekilde verilmiştir:

$$\sigma_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad [2.28]$$

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad [2.29]$$

$$w = \frac{K_{III}(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad [2.30]$$

w değeri, z yönündeki yerdeğiştirmedir. Mod III durumu için gerilme şiddet çarpanı şu şekilde verilmiştir:

$$K_{III} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \tau(\xi) \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} d\xi \quad [2.31]$$

Düzlem dışı kayma gerilmesi düzgün yayılı olduğu durumlarda $K_{III} = \tau \sqrt{\pi a}$ olmaktadır.

2.4.1.2. Doğrusal olmayan teoriler

Bugün LEKM, ani rüzgarlarda güvenlik hesapları, yıkıcı çatlak gelişimi, korozyon çatlakları gibi çatlak gelişimi ile ilgilenen ve analizi yapılan pek çok yapısal problemin çözümlenmesinde kullanılmıştır. Genelde betonun davranışı doğrusal elastik kırılma mekaniği davranışından sapmaktadır. Ancak çok büyük boyutlu betonlar LEKM ne yakın davranışlar sergilemektedir. LEKM nin beton davranışından sapmasının nedeni çatlak tepesindeki çatlak gelişim bölgesinin büyük olmasıdır. Bu bölgede uzamalar elastik bölgeyi aşmış, yumuşama bölgesine girmiştir. Sünek malzemelerde çatlak gelişim bölgesi küçük kalırken bu bölgenin çevresinde büyük bir doğrusal olmayan, plastik bölge vardır. Gevrek malzemelerde ise çatlak gelişim bölgesi büyüktür ve bu bölgenin etrafında küçük bir doğrusal olmayan bölge yer almaktadır. Beton gibi gevrek malzemelerde varolan çatlağın arkasında agregaların arasındaki matrisde mikro düzeyde çatlamlar olmakta daha sonra bu çatlaklar daha ilerlerdeki çatlaklarla birleşmekte ve birleşen çatlaklar yoğunlaşarak tek bir ana çatlağı oluşturmaktadır. Van Mier'in yaptığı deneysel araştırmalar ile betonda çatlak gelişim bölgesinin küçük olmadığı, aksine neredeyse kesitin tamamını kapladığı bulunmuştur.

LEKM nin kullanılmaya başlanmasından hemen sonra bu metodun ancak çok gevrek maddelerde iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Bir başka deyişle çatlamanın başlamasına kadar geçen süre içerisinde malzeme kesinlikle doğrusal davranış göstermelidir. Kopmadan önce çatlak tepesinde büyük bir plastik bölge oluşan, sert çelik gibi maddeler hariç pek çok malzeme için davranış bu şekilde olmaz. Bu uyumsuzluğun nedeni olan çatlak tepesindeki kırılma bölgelerinin büyüklüklerini tespit etmişlerdir. Daha sonra birbirine benzer pek çok doğrusal olmayan kırılma mekaniği teorileri elde edilmiştir. Elasto-plastik kırılma mekaniğinden ayrı olarak

eşdeğer elastik çatlak metodu ve bağlı çatlak metodu adında iki metod geliştirilmiştir.

Eşdeğer elastik çatlak metodu şu yaklaşımla bir teori oluşturmuştur; doğrusal olmayan bölgenin etkisi maddenin rijitliğini düşürür, yani her şeyi elastik tutarak çatlak boyunu uzatır. Sonradan oluşan bu çatlakla eşdeğer çatlak adı verilmiştir. Bu teori üzerinde araştırmacılar R-eğrisi (direnç eğrisi) adını verdikleri kavramı önermişlerdir. Böylece çatlak gelişim direnci R sabit değil, çatlak boyu ile değişken bir değer olduğu gösterilmiştir. Bu basit kavram halen yapı geometrisini dikkate alan ve R-eğrisinin oluşturulmasında kullanılan etkili bir yöntemdir. Irwin kırılma işleminin sonlu bir bölgede gerçekleşeceğini varsayarak bu bölgeyi hesaplamaya çalışmıştır. Bu bölgenin çapına r_p adını vermiştir.

$$r_p = \frac{1}{\pi} \frac{K_{Ic}^2}{f_t^2} = \frac{1}{\pi} \frac{E' G_c}{f_t^2} \quad [2.32]$$

Doğrusal elastik kırılma mekaniği hesabı elastik bölgenin elastik olmayan bölgeye göre çok büyük olduğu r_p uzunluğunun küçük olduğu durumlarda yapılabilir.

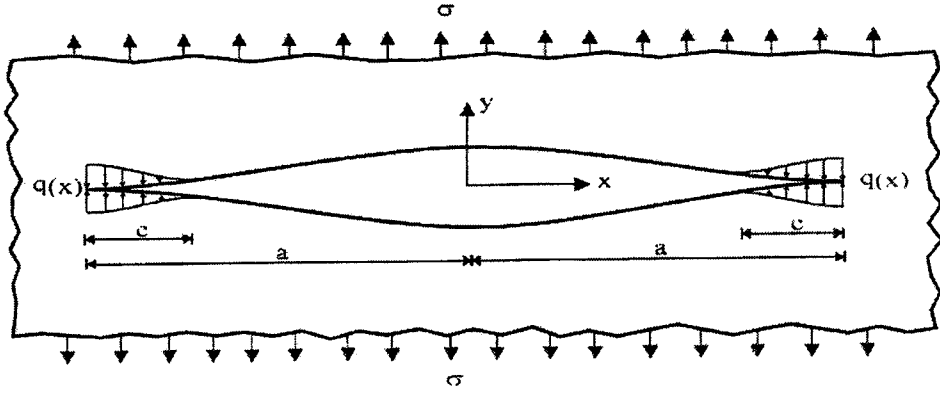
Beton için eşdeğer çatlak metodu Jenq, Shah ve Bazant tarafından önerilmiş ve betonun çatlama özelliklerinin tespiti için kullanılmıştır (52-54). 1980'li yıllarda kırılma mekaniği hesaplarında kullanılmak üzere pek çok boyut etkisi deneyleri yapılmıştır. Bazant yapı boyutunun gerilme üzerindeki etkisini gösteren yaklaşık bir eşitliği geliştirmiştir (7, 55). Daha sonra bu eşitlik, sadece yapıya ait özelliklerin değil, kırılma enerjisinin, kırılma bölgesi uzunluğunun ve R-eğrisinin tespitinde de kullanılmıştır. R-eğrisi seramiklere ve kayalara da uygulanmıştır. Ancak halen bu eğrinin yapının boyutundan bağımsız olup, olmadığı tam olarak anlaşılamamıştır.

Yoğun (cohesive) çatlak metodu, çatlak tepesinde doğrusal olmayan malzeme davranışını açıklamaya çalışan bir metoddur. Bu methodda çatlak açılmaya devam ederken bir yüzden diğer yüze gerilme aktarmaya devam eder düşüncesi ile

yaklaşımlarda bulunulmuştur. Yoğun çatlak metodunda makroskoen büyük yük çatlak gelişim direncini moleküllerin atomik düzeydeki bağlanma enerjileri ile ilişkilendirmiştir. Atomlar arası kuvveti, yeni oluşan çatlak yüzeyindeki dağılmış bağlayıcı gerilme kavramını ortaya atarak modellemeye çalışmıştır. Bu bağlayıcı atomik kuvvetler öyle bir şekilde hesaplanmıştır ki, gerilmenin çatlak tepesinde sonsuza gitmesi engellenmiştir. Barenblatt çatlak tepesi yakınında bağlayıcı kuvvetlerin çok küçük bir bölgede etkili olduğunu ve çatlak profilinin bu bölgede yapı boyutundan bağımsız olduğunu kabul etmiştir. Çatlak tepe noktasında yapılan dış işi, bağlayıcı iç kuvvetlerle dengeleyerek sonsuza giden gerilme değerini ortadan kaldırmayı başarmıştır.

Gevrek kırılmada cisim elastik modül ve Poisson oranı gibi elastik sabitlerle birlikte kırılma enerjisi diye adlandırılan G_c ve çatlak tepesinde tanımlanan kritik gerilme büyüklük çarpanı K_{Ic} (kırılma tokluğu) değişkenlerini de içerir. Kırılma anında cisim elastik bölgededir. Sadece kırılmanın gerçekleştiği çatlak tepesinde elastik bölge aşılmıştır. Bu bölge kırılma süresince enerjiyi tüketir. Kırılma enerjisi ve gerilme büyüklük çarpanı tanımları kırılma mekaniğinin ortaya koyduğu değişkenlerdir. Küçük yerdeğiştirmeler ve Hooke kanunu teorileri bu iki değişkeni içermezler.

Barenblatt yaptığı çalışmada büyük yoğun kuvvetlerin ($q(x)$) çatlak tepesine yakın bölgede ve c kadar bir uzunluktaki bölgede etkidiğini varsaymıştır (Şekil 2.7). Kohesyonun olduğu c bölgesi çatlak boyu a ya göre çok küçük kalmaktadır. Barenblatt kırılma oluşurken yoğun bölgenin şeklinin uygulanan yükden bağımsız olduğunu varsaymıştır.



Şekil 2.7. Barenblatt yoğun çatlak metodu (56)

Şekil 2.6 da gösterilen plaka yukarıda açıklanan mod I durumuna bir örnektir. Yoğun bölgedeki çatlakın biçiminin düzgün oluşu çatlak ucuna uygulanan çekme gerilmesinin ve yoğun kuvvetler etkisi altında gerilme büyüklük çarpanının kaybolmasını gerektirmektedir. Barenblatt, yapışma (kohezyon) modülü adını verdiği Q değişkenini tanımlamıştır.

$$Q = \sqrt{\frac{\pi}{2} K_I} \quad [2.33]$$

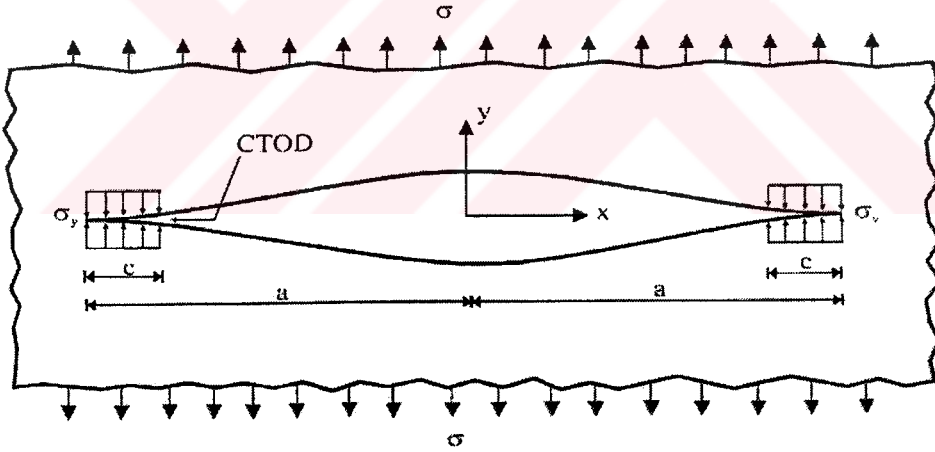
Çatlakta, yoğun bölgenin olmadığı yerlerde gerilme yoğunluk çarpanı kohezyon modülü ile doğru orantılıdır. Yukarıdaki Q eşitliği (2.33) c uzunluğunu içermemektedir. Bu şekilde yoğun bölgedeki değerler dikkate alınmamıştır ve Barenblatt'ın eşitliği kohezyonu dikkate almayan Griffith ve Irwin'in eşitliklerine benzemektedir. Yoğun bölgenin dikkate alınması eşitliklerin çözümünü zorlaştırmaktadır.

Sabit gerilme değerli bir kohezyon bölgesine sahip çizgisel çatlak metodunda mikroskoen büyük yük atomik etkileşimi değil makroskoen büyük yük plastisite dikkate alınmıştır. Her iki metotta da gerilmenin sonsuza gitmesi durumu ortadan kaldırılmıştır. Çok basit olmasına karşın büyük plastik bölgelere sahip olmayan sünek malzemeler için sünek kırılma davranışını açıklamıştır. Çok detaylı kohezyon

çatlağı metodları daha sonraları geliştirilmiştir (sanal çatlak metodu, köprülenmiş çatlak metodu gibi). Elices ve Planas'a göre bütün bu metodlar için genel anlamda bir formül önerilebilir ve her malzeme davranışı için bu genel formül özel hallere dönüştürülebilir (57). Yoğun çatlak metodunda yoğunluk bölgesindeki gerilmeler düzgün dağılı kabul edilmiştir (Şekil 2.8).

Bu metoda göre çatlak tepesinde plastik bölgede gerilme sonlu olacağından düzgün bir kapanma olacaktır. Plastik bölgenin bittiği yerde gerilme şiddet çarpanı K_I olmayacaktır. Kohezyonlu bölgenin toplam çatlak boyuna oranı şu şekilde elde edilebilir:

$$\frac{c}{a} = 1 - \cos\left(\frac{\pi a}{2\sigma_y}\right) \quad [2.34]$$



Şekil 2.8. Yoğun çatlak metodu (56)

Çatlak tepesindeki açılma yerdeğiştirmesi de hesaplanmıştır:

$$CTOD = \frac{8}{\pi E'} a \sigma_y \left(1 - \frac{c}{a}\right) \ln\left(1 - \frac{c}{a}\right)^{-1} \quad [2.35]$$

CTOD, çatlak tepesi açılma yerdeğiştirmesini gösterir. *CTOD*, kritik değer olarak tanımlanan w_c enine yerdeğiştirme değerine ulaştığında göçme ancak oluşabilmektedir. Kritik değer olan w_c nin elde edilmesi oldukça zordur.

Çatlak büyük ve dış gerilme çok küçükse ($\sigma/\sigma_y \ll 1$), plastik bölge uzunluğu c , a ya göre çok küçük olmaktadır. Bu durumda aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{E'\sigma_y w_c} \quad [2.36]$$

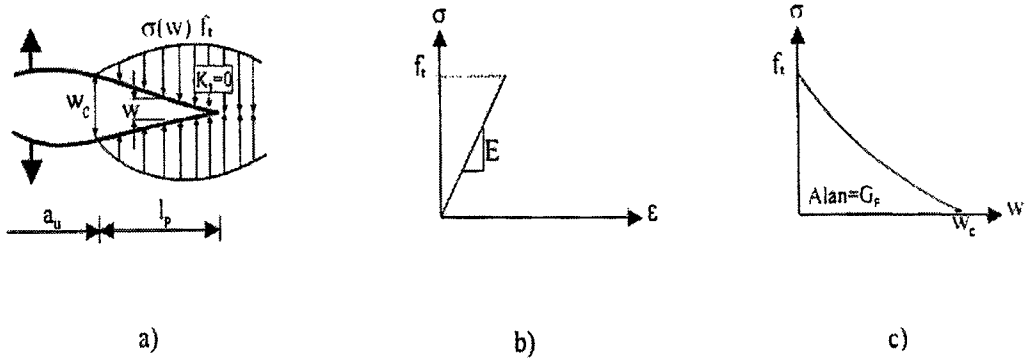
Plastik bölgesi küçük olan elasto-plastik malzemeler için K_{Ic} ve G_c w_c ile ifade edilebilir.

$$K_{Ic} = E'\sigma_y w_c \quad [2.37]$$

$$G_c = \sigma_y w_c \quad [2.38]$$

Hillerborg'un önerdiği sanal çatlak metodu üzerine çok fazla araştırma yapılmıştır (58). Bu metod dışındaki diğer bütün metodlar mevcut bir çatlağın varlığına göre tasarlanmıştır. Çatlak yok ise, LEKM (Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği), EKM (Elastik Kırılma Mekanikliği), eşdeğer çatlak metodu veya klasik kohezyon çatlağı metodu uygulanamaz. Hillerborg'un sanal çatlak metodu yukarıda söz edilen kohezyonlu çatlak metodunun genişletilmiş halidir. Bu metodda, her durumda çatlak oluşması için gereken kurallar eklenmiştir. Çatlaksız beton bir elemanın başlangıcından göçmeye kadarki bütün davranışı bu metodla ifade edilebilmektedir. Amaç klasik dayanım içeren metotlarla enerji içerikli kırılma mekanikliği teorileri arasında bağlantıyı kurabilmektir.

Hillerborg'un teorisi varolan bir çatlağın önünde sanal bir çatlağın olduğunu kabul ederek modellenmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Hillerborg'un sanal çatlak metodu a) Çatlak ağzı b) Gerilme-birim yerdeğiştirme şekli c) Gerilme-yapılan iş değişimi (43)

Sanal çatlak üzerinde kapanma gerilmesi ve uç kısmında da gerilme yoğunlaşması oluşmaktadır. Sanal çatlak metodu yoğun çatlak metodlarına benzemektedir. Bu metodlarda da olduğu gibi Hillerborg sanal çatlak metodunda kırılma bölgesinin ihmal edilebilir kalınlıkta olduğu ve çatlak uçlarının düzgün kapandığı kabul edilmektedir. Ancak Hillerborg metodunda kapanma gerilmesi sabit değildir. Mevcut çatlağın ucundan sıfır değeri ile başlayıp sanal çatlağın tepesinde malzeme çekme dayanımına eşit olmaktadır. Çatlak gelişim bölgesinde ise kapanma gerilmesinin dağılımı sanal çatlak yüzlerinin açılma değerine bağlı olmaktadır.

Barenblatt metodundan farklı olarak Hillerborg metodunda çatlak gelişim bölgesinin boyutu varolan çatlak boyutundan büyük olabilir varsayımı yapılmıştır. Bu nedenle de düzgün çatlak kapanma kabulüne göre kurulan teoriler geçerli olamamaktadır. Kapanma gerilmesinin dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Çatlak davranışı bir tek malzeme değişkenine bağlı olamaz, en az iki değişken gerekir. Sanal çatlak metodunda malzeme parametreleri olarak yumuşama bölgesindeki kapanma gerilmesi ve Şekil 2.9.c de gösterilen eğrinin altında kalan ve kırılma enerjisini tanımlayan G_F değeri kullanılmaktadır. G_F şu şekilde tanımlanmıştır:

$$G_F = \int_{f_t}^0 w(\sigma) d\sigma \equiv \int_0^{w_c} \sigma(w) dw \quad [2.39]$$

yukarıdaki eşitlikde f_t malzemenin çekme dayanımı, w_c varolan çatlakın açılma büyüklüğüdür. Beton bir malzemenin kırılması ancak malzemeye ait iki parametrenin bilinmesi ile açıklanabilir. Bunlar örnek olarak, f_t ve G_c olabilir.

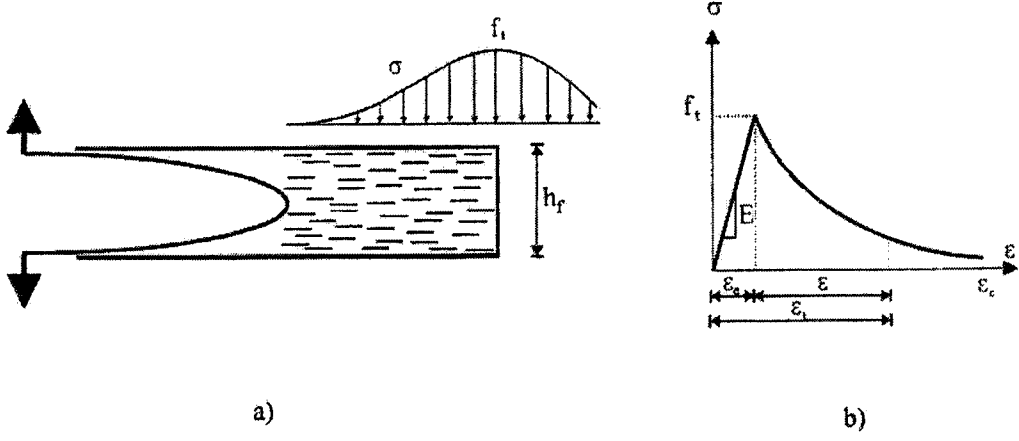
RILEM tarafından Hillerborg'un G_F 'i bulmak için önerdiği üç nokta yüklemeli kırış deneyi standart bir yöntem olarak kabul edilmiştir. $\sigma(w)$ eğrisinin şeklinin çok fazla önemli olmayacağı Karihaloo (48, 59) tarafından öne sürülmüştür.

2.4.1.3. Süreklilik içeren teoriler

Çekme dayanımına ulaşan elemanlarda rijitliğin sıfıra gitmesi ilkesi üzerine kurulmuş metodlar vardır. Bu metodlarda sürekli hasar mekaniği metodları ile malzemenin iç değişkenlerini kullanarak yumuşama açıklamaya çalışılmıştır.

Analiz sonrası alınan sonuçların seçilen sonlu eleman ağının boyutlarına çokca bağlı olduğu görülmüştür. Bu sakıncayı ortadan kaldırmak üzere Bazant çatlak bandı metodunu önermiştir (60-61). Bu metodda çatlak kalınlığı, malzemeye bağımlı fakat sabit bir değer olarak modellenmiştir. Ayrıca bu metodda birim uzamaların çatlak bandı boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. Elices ve Planas'ın yaptığı çalışmaya göre bu metod ilk başta Hillerborg metoduna rakip gibi görünse de sonradan sayısal olarak aynı oldukları ortaya çıkmıştır (62).

Metod, temel olarak bir elemanın kırılmaya giderken çatlak gelişim bölgesinde ana çatlak yerine pek çok küçük çatlaktan oluşan bir bölge olduğunu varsaymaktadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Çatlak bandı metodu a) yayılı mikro çatlak b) σ - ϵ bağıntısı (43)

Kapanma gerilmesi yerine betonun çekme yumuşama eğrisi kullanılmıştır. Çatlak bandının kalınlığı h_f olarak verilir. Çatlak bandı boyunca her küçük çatlağın birbirine paralel olduğu kabul edilirse düzlem deformasyon durumunda izotrop bir malzeme için şu eşitlik yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+\nu)E'}{E\beta_t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad [2.40]$$

Düzlem şekil değiştirme durumunda $E'=E/(1-\nu)^2$ ve $\nu'=\nu/(1-\nu)$, düzlem gerilme durumunda $E'=E$ ve $\nu'=\nu$ olmaktadır. β_t değeri sıfır ile bir arasında değişen kayma katsayısıdır. Betonda bu değer agregaların sürtünmesinden dolayı çatlak yüzlerindeki pürüzlülüktür. Kırılma enerjisi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$G_F = h_f \int_0^{\epsilon_c} \sigma_{yy}(\epsilon) d\epsilon \quad [2.41]$$

Sanal çatlak metodunda $\varepsilon_c = w_c/h_f$ değeri yerine w_c değeri kullanılmıştır. Bazant ve Oh çatlak band genişliği h_f değerini yaklaşık $3d_{max}$ olarak vermektedir. d_{max} değeri numunedeki en büyük agrega boyutudur.

1980 lerden bu yana Bazant süreklilik metodları üzerinde çalışmıştır (63). Çatlağın ne zaman ve nasıl oluştuğu ile ilgilenmeden kırılma işleminin genel tanımını yapmaya çalışmıştır. Yerel olmayan süreklilik yaklaşımında herhangi bir noktadaki doğrusal olmayan davranış sadece o noktaya ait birim boy değişimi ile değil, o noktanın etrafındaki noktalardaki birim boy değişimi ile de ifade edilir. Kırılma teorisine en genel yaklaşımı yapan bu metod daha önce yapılmış olan yerel olmayan elastik süreklilik metodundan esinlenmiştir. Herhangi bir noktadaki davranışın şekil değiştirme tansör invariantlarına ve daha yüksek dereceli gradyanlara bağlı olduğu yüksek dereceli süreklilik metodlarını, yerel olmayan metodla ve süreklilik ile açıklamaktadır. Sayısal analiz zorlukları genel süreklilik metodlarının kullanımını zorlaştırmaktadır. Ancak birkaç araştırmacı grup bu metodları kullanabilmektedir. Bu metodlar için güvenli ve hassas teorik analizler halen pek mümkün olmamaktadır. Yine de bu metodlar daha iyi metodların geliştirilmesi için sağlam temeller oluşturmaktadır. Örnek olarak vermek gerekirse, son dönemde yapılan çalışmalarda bazı yerel olmayan metodlar için yapışma (kohezive) çatlak metodu iyi bir temel oluşturmuştur.

2.4.1.4 Yaklaşık doğrusal olmayan metodlar

Sanal çatlak ve yayılı çatlak metodlarında çatlak tepesinde çatlak yüzlerinin kapanmasına etki eden gerilmeler dikkate alınmıştır. Ayrıca, bu metodlarda çatlak gelişim bölgesinin doğrusal olmayan, diğer bütün bölgelerin ise doğrusal bir davranış içerisinde olduğu varsayılmıştır. Bu durumda çatlak gelişim bölgesi dışında kalan bölgeler elastik davranış sergilemektedirler. Ancak bu varsayımlara göre yapılan hesaplamalarda çıkan sızgılar deneysel sızgalardan büyük olmaktadır. Bu nedenle etkili çatlak metodu adı verilen metodlar geliştirilmiştir. Bu metodlarda yapıda var olandan daha büyük bir çatlak varmış gibi analiz yapılır. Bu metodlar yardımı ile

betonun en büyük yükten hemen önceki doğrusal olmayan davranışının da analizi yapılabilmektedir. Bu nedenle en büyük yükün de gerçek değeri daha iyi hesaplanabilmektedir.

Mevcut yapı çatlağından daha büyük bir çatlak varsayarak hesap yapıldığında ($a_e > a_0$) a_e , eşdeğer olarak düşünülen elastik malzemenin çatlak boyu olmaktadır. Gerçek betona ait kırılma değerlerinin K_{Ic} ve çatlak tepesi açılma yerdeğiştirmesi $CTOD$ değerlerinden hesaplanabileceği düşünülmüştür. K_{Ic} değeri çatlak uzunluğu a_e den hesaplanabilir. $CTOD$ ise çatlak tepesindeki yerdeğiştirme ölçülerek bulunur.

Sözedilen üç parametreden (a_e , K_{Ic} , $CTOD$) ancak ikisi bağımsızdır. Bu nedenle bu yöntemle iki parametrelili metod denilmiştir. a_e , etkin çatlak boyu, numunenin boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Numune boyutu büyüdükçe bu değer azalmaktadır. Numune boyutu büyürken bu değer a_0 'a yaklaşmaktadır. a_e değeri yüke karşılık çizilen $CMOD$ grafiğinde en büyük yüke karşı gelen noktadan elastik davranışın görüldüğü bölgeye çizilen paralel doğru kullanılarak hesaplanır. Çatlağın ilerleyebilmesi için K_I değeri K_{Ic} değerine ulaşmalıdır. K_{Ic} ve $CTOD$ değerleri yükleme düzeninden ve numune boyutundan bağımsızdır. Bu metod en büyük yük sonrası davranışı hesaplayamaz.

Nallathambi ve Karihaloo, Jeng ve Shah'ın yaptıkları çalışma iki parametrelili metoddan farklı olarak a_e değerini gerçek betona ait grafikteki en büyük yüke karşı gelen noktada çizilen sekant rijitliği ile hesaplamışlardır (59,64).

2.4.2. Yarı gevrek malzemeler için kırılma teorilerinin çalışma alanı

1980'li yıllarda yarı gevrek malzemelerin -beton, kaya, seramik, kompozit malzemeler, buz ve bazı polimerlerin- kırılma davranışının açıklanması için pek çok çalışma yapılmıştır. Bu gün bu alanda yapılan çalışmalarda, metodların iyileştirilmesine, metodların çözümü için gereken analitik ve sayısal yöntemlerin geliştirilmesine, bazı metolardaki değişkenlerin bulunabilmesi için deney

düzeneklerinin geliştirilmesine ve makroskoen büyük yük kırılma davranışının mikroskoen büyük yük malzeme davranışıyla bağlatısının bulunmasına çalışılmaktadır. Böylece betonun makroskoen büyük yük düzeydeki kırılma davranışını açıklayan ideal metodlar geliştirilebilmiştir.

Yapılan araştırmalarda sertleştirilmiş seramik ve betonun kırılma davranışında pek çok benzerlik olduğu ortaya çıkmıştır. Seramiğin sertliği arttıkça kırılma davranışının daha çok beton hatta betonarme davranışına benzediği görülmüştür.

Son günlerde çalışmalar beton tasarımında kırılma mekaniğinin kullanılmasına elvermektedir. Böylece özellikle farklı boyutlu elemanlar için daha güvenli ekonomi sağlayacak yapılar yapma olasılığı artacaktır. Bu durum ekonomi sağlayacak ve daha güvenilir yapılar yapılabilmesine izin verecektir. Kırılma mekaniği özellikle yüksek dayanımlı betonlarda, lifli betonlarda, çok büyük beton yapılarda ve daha önce yapılmayan beton yapıların tasarımında kullanılabilir. Kırılma mekaniği güvenliğin çok önemli olduğu beton dolgu barajların ve nükleer santrallerin tasarımında kullanılmaktadır. Kırılma mekaniğini uygulamada kullanabilmenin en basit yolu boyut etkisi deneylerini genişleterek sürdürmektir.

2.4.3. Kırılma mekaniği kullanmak için nedenler

Bu güne kadar var olan yönetmelikler kullanılarak çoğu güvenli olan eleman yapılmıştır. Bu durumda var olan yönetmelikler ile tasarım yapmayı sürdürmek düşünülse de kırılma mekaniğini kullanmak için beş temel neden sayılabilir:

- a) Çatlak oluşumu için enerjinin gerekliliği hesaplara katılmalıdır.
- b) Yapısal analiz sonuçları sonlu eleman boyutunun büyüklüğünden bağımsız olmalıdır.
- c) Yapısal analiz, yük-yerdeğiştirme grafiğindeki akma platosunun eksikliğini gözönüne almalıdır.
- d) Yapısal analiz enerji yutma sığasını ve sünekliği hesaplayabilmelidir.

e) Yapısal analiz boyut etkisini dikkate almalıdır.

2.4.3.1. Çatlak oluşumu için enerjinin gerekliliği hesaplara katılmalı

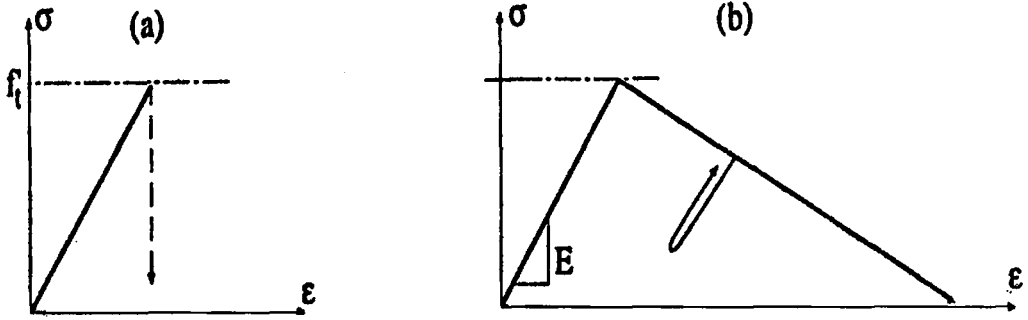
Çatlak oluşumu için bir gerilmenin olması gerektiği düşünülse de gerçekte çatlağı oluşturabilmek için belirli bir enerji gereklidir. Kırılma mekaniği göçme için enerji kullandığından tasarımda kırılma mekaniği kullanılmalıdır.

2.4.3.2. Yapısal analiz sonuçları bağımsız olmalı

Bir analizin sonucu seçilen koordinatlara ya da seçilen analiz ağlarına bağlı olmaksızın her zaman aynı sonucu vermelidir, yani bağımsız olmalıdır. Bir teori bağımsız olamıyorsa, kullanılması uygun değildir. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan bir yaklaşım dağılı çatlak kavramıdır. Bu kavrama göre sonlu bir elemanda dayanım malzemenin çekme dayanımı f_t ile sınırlandırılmıştır. Dayanıma ulaşıldıktan sonra malzemedeki gerilme azalmalıdır. Pratikte bu azalma aniden sıfıra düşüş ile ifade edilmiştir. Daha sonraları ani düşüş yerine yavaş yavaş azalmanın daha uygun sonuç verdiği görülmüş ve bu şekilde modellenmiştir (Şekil 2.11).

Bu metod sonlu eleman analizlerinde kullanılmaya başlandıktan sonra sonuca yaklaşım özelliklerinin yeterli olmadığı ve özellikle seçilen sonlu eleman ağının boyutuyla çok ilişkili olduğu görülmüştür.

Bu problem Şekil 2.12a daki düzgün yayılı düşey yüke maruz dikdörtgen bir panel ile açıklanabilir. Bu panelin sol orta bölgesinin dayanımı diğer yerlere göre biraz az olsun. Bu durumda soldan sağa doğru bir çatlak yayılmaya başlar.

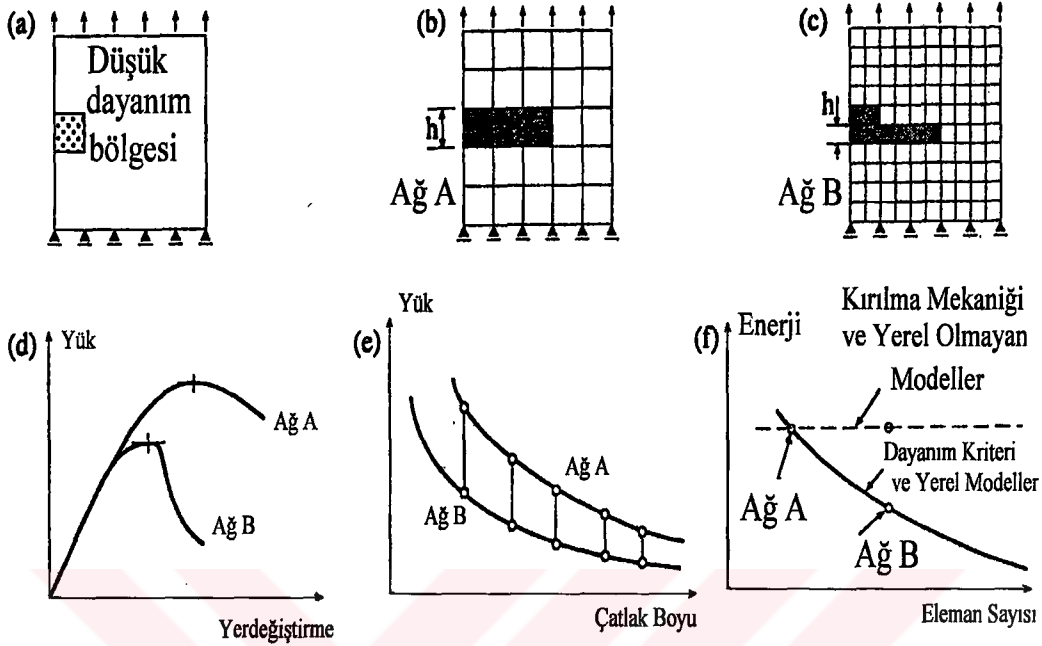


Şekil 2.11. Farklı davranış metodları a) ani yumuşama b) azalarak yumuşama gösteren metod

İki ayrı sonlu eleman boyutu kullanılarak yapılan hesaplamaların sonuçlarına bakıldığında, yük-yerdeğiştirme eğrisinde en büyük yükün ve en büyük yük sonrası yumuşama bölgesinin, sonlu eleman boyutuna bağlı olduğu görülür (Şekil 2.12b, c, d, e). En büyük yük yaklaşık olarak, h sonlu eleman ağının boyutu olmak üzere $h^{-1/2}$ ile orantılı olduğu görülür.

Yük-çatlak boyu değişimine bakıldığında yine sonlu eleman ağı boyutu ile ilgili farklılıklar görülür. Sonlu eleman boyutu küçüldükçe birim çatlak boyu için tüketilen enerjinin de küçüldüğü, h sıfıra doğru giderken tüketilen enerjinin de sıfıra doğru gittiği görülmektedir (Şekil 2.12f). Gerçekte böyle bir davranışın oluşması mümkün değildir.

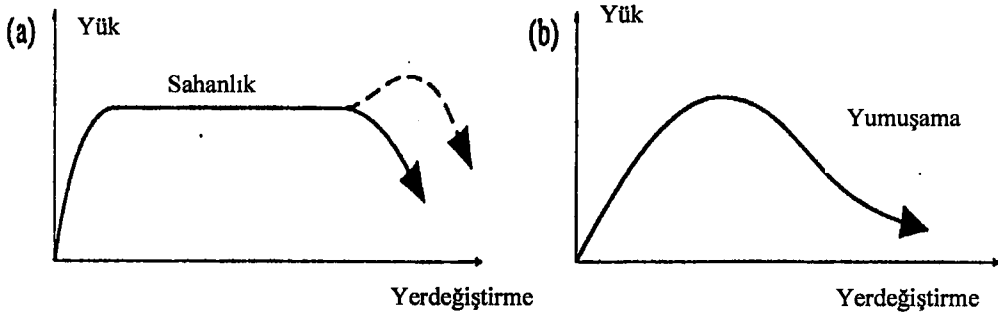
Bu tip eleman boyut seçiminden bağımsız olamayan davranış metodunun yerine kırılma mekaniği veya yerel olamayan kırılma mekaniği metodların kullanılması gerekmektedir.



Şekil. 2.12. Sonlu eleman metodları a) gerilme etkisinde levha, b) sonlu eleman ağı A, c) sonlu eleman ağı B, d) yük-yerdeğiştirme grafiği, e) yük-çatlak boyu grafiği, f) enerji-eleman sayısı grafiği (43)

2.4.3.3. Akma sahanlığının eksikliği

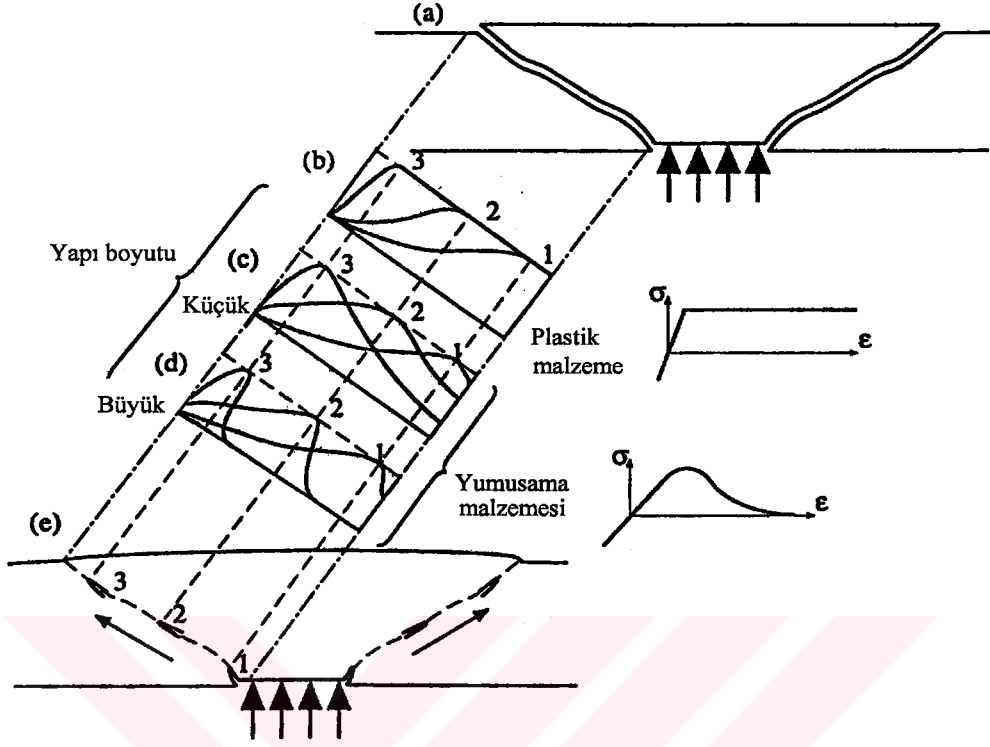
Yük-yerdeğiştirme grafiğine bakarak iki ayrı tip kırılmadan söz edilebilir; sünek ve gevrek. Plastik kırılmada eleman da tek serbestlik dereceli mekanizma gelişir. Tek bir parametreyle orantılı olarak kırılma elemanın her noktasında aynı anda gelişir. Bu tip elemanların yük-yerdeğiştirme grafiklerinde uzun bir akma platosu görülür (Şekil 2.13a) Yük-yerdeğiştirme grafiğinde böyle bir plato yer almıyorsa bu kırılma gevrek türüdür (Şekil 2.13b). Gevrek kırılma tek serbestlik dereceli olarak aynı anda elemanın her yerinde gerçekleşemez. Onun yerine kırılma bölgeleri bütün elemana zamanla yayılır.



Şekil. 2.13 Akma sahanlığı davranışı a) Akma sahanlığı olan sünek kırılma, b) akma sahanlığı olmayan gevrek kırılma

Bu davranışı daha iyi açıklamak üzere kirişsiz bir döşemenin zımbalama kırılması davranışı örnek olarak verilmiştir (Şekil 2.14). Kırılma yüzeyi boyunca oluşacak çekme gerilmeleri şekilde gösterilmiştir.

Malzeme plastik ise her noktada akmaya ulaşıncaya kadar kesit yavaş yavaş plastik davranış göstermeye başlar (Şekil 2.14b). Ancak malzeme birim şekil değiştirme yumuşama davranışı gösteriyorsa gerilme tepe noktası kırılma bölgesine doğru uzar ve bir miktar artık gerilme kalır (Şekil 2.14c, d). Eleman boyutu küçük ise gerilme azalması yavaş yavaş olur. Bu gibi durumlarda plastik limit analiz davranışı hakimdir (Şekil 2.14c). Ancak eleman boyutu büyük ise gerilme tepe noktasından sonra aniden düşüş sergiler. Bu gibi durumlarda plastik limit analiz davranışı olmaz (Şekil.2.14d).



Şekil 2.14. Zımbalama etkisindeki bir döşemede boyutun akma platosuna etkisi, a) zımbalama etkisi, b) plastik özellik gösteren malzeme, c) yumuşama gösteren küçük malzeme, d) yumuşama gösteren büyük malzeme, e) döşeme üzerinde seçilen noktalar (43)

2.4.3.4. Enerji tüketme sığası ve süneklik

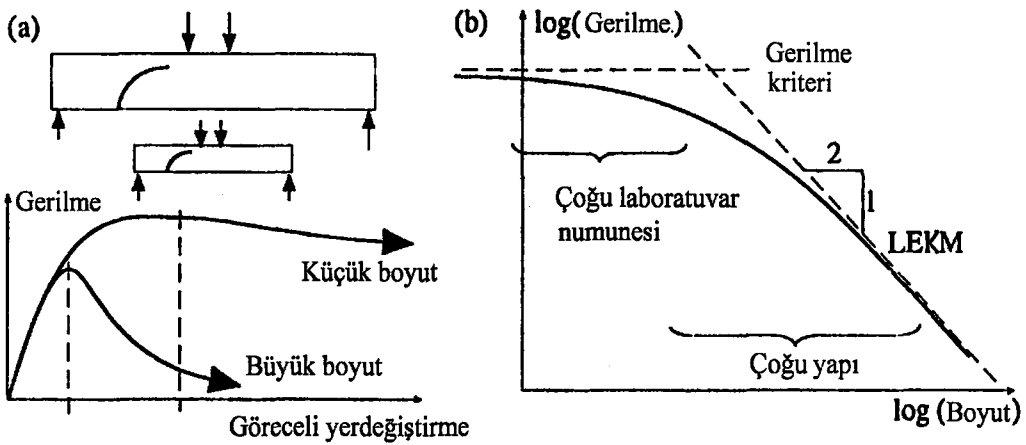
Yük-yerdeğiştirme eğrisi altında kalan alanın tamamı elemanın enerji tüketme sığası olarak bilinir. Bu alan elemanın özellikle dinamik yükleme altında sünekliğini belirler. Plastik limit analizin tepe noktası sonrası davranışı ve bu bölgede tüketilen enerjiyi tanımlayamaz. Plastik teoriye göre tepe noktasından sonra yük sabit kalmaktadır. Bu nedenle de enerji tüketme sığası teorik olarak sonsuzdur.

2.4.3.5. Boyut etkisi

Boyut etkisi, tasarım mühendisliği açısından kırılma mekaniğinin tasarım kriteri olarak kullanılma gereğinin en temel nedenlerinden biridir. Plastik limit analiz veya bir başka teoriye göre gerilme veya birim boy değişimi boyut etkisi içermez. Halbuki yapılan deneysel ve teorik araştırmalar elemanların gerilme ve birim boy değişimlerinde boyutun etkili olduğunu göstermiştir.

Boyut etkisi geometrik olarak benzer fakat farklı boyutlarda yapıların gerilme ve birim boy değişimlerinin karşılaştırılmaları ile bulunur. Genellikle en büyük yüke karşılık gelen gerilme değeri σ_N ile ifade edilir. Buna nominal gerilme denir. Nominal gerilme, benzerlik iki boyutlu iken $\sigma_N = P/bD$, üç boyutlu da, $\sigma_N = P/D^2$ şeklinde elde edilir. Burada b =iki boyutlu elemanın kalınlığı, D =elemanın karakteristik boyutudur. Karakteristik boyut olarak elemana ait herhangi bir boy; kiriş derinliği, açıklık, betonarmede yararlı yükseklik v.b. seçilebilir;

Plastik analiz ya da emniyet gerilmeleri yöntemine göre σ_N değeri yapı boyutundan bağımsız olarak daima sabit sonuç verir. Örnek olarak eğilme, kesme ve burulma altındaki bir kirişin elastik ve plastik teoriye göre hesap sonuçlarını karşılaştırabiliriz.



Şekil 2.15. Boyut etkisi, a) gerilme-göreceli yerdeğiştirme grafiğinde, b) logaritma gerilme-logaritma boyut grafiğinde

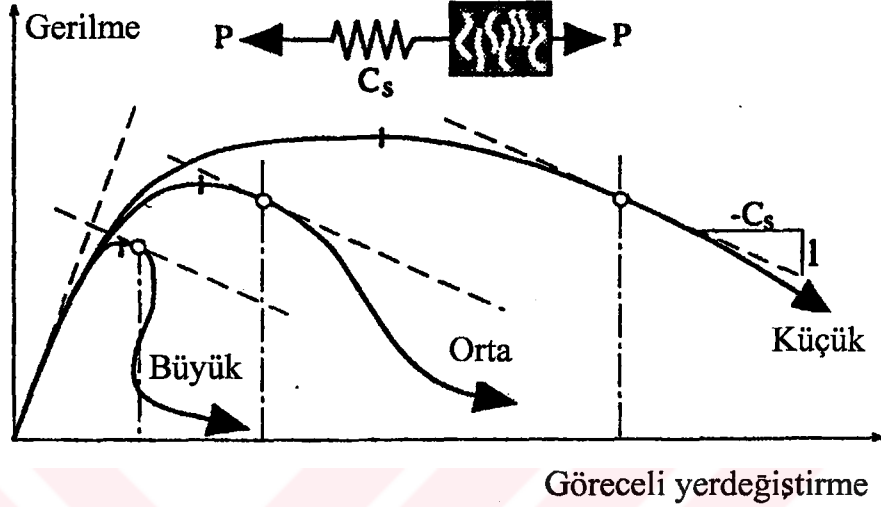
Herbiri için formüller aynı olmakla birlikte sadece çarpımda başlarına gelen katsayı farklıdır. $\log \sigma_N$ 'e karşı $\log D$ grafiğini çizilecek olursa kırılmanın grafikte kesik yatay doğruyla gösterildiği gibi daima doğrusal olduğunu görülür (Şekil 2.15). Buna karşılık doğrusal elastik kırılma mekaniği teorisi boyut etkisi göstermektedir. Bu davranış $\log \sigma_N$ 'e karşı $\log D$ grafiğinde eğimli kesik doğruyla gösterilmiştir. Bu doğrunun eğimi $-1/2$ dir. Beton yapıların davranışı boyut küçükten büyüğe gidildikçe yatay kesik doğruyla gösterilen gerilmeden eğimli kesik doğruyla gösterilen gerilmeye geçiş ile ifade edilebilir. Yapı boyutu çok küçükse grafiğin sol tarafında, yapı boyutu çok büyükse grafiğin sağ tarafında kalan bölgede yer alacaktır.

Kırılma mekaniğinin kullanılması için temel nedenlerden birisi olan bir başka boyut etkisi ise yapı boyutunun sünekliliğe etkisidir. Yük kontrollü yüklemelerde yapı en yüksek yük değerine ulaştığında dinamik biçimde kırılır. Yerdeğiştirme kontrollü deneylerde ise kırılma en yüksek yük değerine ulaşıldıktan sonra yumuşama bölgesinde yük azalması geri besleme ile sağlanarak artan yerdeğiştirmeler ile güç tükenmesi sağlanır. σ_N e karşılık yerdeğiştirmenin çizildiği bir grafikte kırılma noktası, eğimi sabit bir değer olan $-C_s$ ile ifade edilen bir teğettir (Şekil 2.16). C_s değeri aynı zamanda yükleme düzeneğinin rijitliğini verir. Dolayısı ile aynı yükleme düzeneği için farklı elemanlarda aynı C_s eğim değeri bulunmaktadır. Grafikten de görülebileceği gibi eleman boyutu arttıkça kırılma noktası en büyük yük değerine yaklaşmaktadır. Bu davranış kırılma mekaniği tarafından ifade edilebilmektedir; Büyük elemanlarda çatlak gelişimi için daha fazla birim boy değişim enerjisi birikir.

2.4.3.6. Diğer boyut etkileri

- a) Dış sınır etkisi: Bu etki çeper etkisi olarak da bilinir. Elemanların dış yüzeylerine çok yakın bölgede daha az iri agrega yer alır. Bu bölgede çok daha fazla ince agrega ve çimento harcı bulunur. Bu da elemanın iç ile dış yüzeyi arasında homojenliği bozar. Elemanın iç bölgesinin davranışı ile yüzeyinin davranışı farklı olur. Büyük bir elemanda dış yüzey elemanın az

bir bölgesidir. Küçük bir elemanda ise dış yüzey büyük elemana göre daha büyük bölgeyi kaplayacaktır.



Şekil 2.16. Numune boyutunun gerilme-göreceli yerdeğiştirme değişimine etkisi

Bu nedenle de küçük eleman ile büyük elemanın davranışları değişken olacaktır. Dış sınır etkisinin yarattığı bir başka boyut etkisi ise yüzeye paralel normal gerilmenin yarattığı boyut etkisidir. Betondaki agrega ile çimento harcının elastik davranışları benzeşmediği için yüzeye paralel normal gerilme elemanın iç kısımlarında dik gerilmeler oluşturur. Bu gerilmeler dış yüzeyde sıfırdır. Dış sınır etkisinin yarattığı üçüncü boyut etkisi Poisson etkisidir. Dış yüzey düzlem gerilme altında iç bölgeler ise düzlem şekil değiştirme etkisi altındadır.

- b) Geçirimlilik etkisi: Bu etki ısı transferine veya gözenekli malzemelerden suyun yayılmasına benzer bir davranıştır. Geçirgenlik eleman boyutunun karesi ile değişen bir hızla gerçekleşir. Döküldükten sonra kurumaya bırakılan biri küçük diğeri büyük beton eleman örnek olarak verilebilir. Küçük elemanın kuruma hızı ile büyük elemanın kuruma hızı aynı olmayacağından kuruma sırasında oluşacak çatlaklar her iki elemanda farklı artık gerilmeler oluşturacaktır.

- c) Hidratasyon ısısı: Kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşur. Yukarıda sözedilen geçirgenlik etkisi ile ilişkili olarak meydana gelir. Büyük elemanlar da hidratasyon ısısı küçük elemanlara göre daha fazla olacağından daha fazla çatlaklı bir iç yapıya sahip olurlar. Bu da her iki elemanın farklı davranış göstermesine neden olur.
- d) Olasılıksal boyut etkisi: Malzemenin dayanımı Weibull'un zincir teorisi ile açıklanabilir (64). Bu teoriye göre bir zincirin dayanımı o zinciri oluşturan halkalardan en düşük dayanıma sahip olan halkanınki kadardır. Zincir boyutu büyüdükçe düşük dayanıma sahip halka olma olasılığı artmaktadır. Aslında betonarme davranışını zincir teorisi ile açıklamak mümkün değildir. Büyük boyutta bir çatlak oluştuğu anda kırılan metallerin aksine beton ancak büyük bir çatlak bölgesi oluştuğunda kırılmaktadır. Bu çatlak bölgesinin gelişimi sırasında gerilmelerde ve enerjinin bırakılmasında yeniden dağılım meydana gelmektedir. Bu yeniden dağılım çok daha güçlü boyut etkisi yaratmaktadır.
- e) Kırılma mekaniği boyut etkisi: Bu etki elemanda biriktirilmiş olan enerjinin çatlak önüne açığa çıkması ile oluşur. Bu etki, boyut etkisini yaratan en büyük etken olarak görülmektedir.
- f) Çatlak yüzeyinin davranışı: Çatlakların dağılımında kusurlar etkili bir rol oynuyorsa bu durum boyut etkisini etkileyecektir. Ancak çalışmalar böyle bir etkiyi ortaya koyamamıştır (66-67).

Pratikte, deneyler yaparken eleman boyutları geometrik olarak iki boyutta benzer ise ilk üç etki ihmal edilebilir. Birinci etki yeteri kadar kalın elemanlar için gözönüne alınmayabilir. Elemanlar aynı sıcaklıkta ve rutubet ortamında tutuldukları sürece iki numaralı etki ihmal edilebilir. Üçüncü etki çok büyük kütle betonları dışında ihmal edilebilir. Olasılıksal boyut etkisi her zaman vardır ancak kırılma mekaniği boyut etkisi olduğu sürece katkısı ihmal edilebilir.

2.5. Boyut Etkisi Eşitlikleri

Bu çalışmada üç araştırmacının boyut etkisi için hazırladığı eşitliklerden yararlanılmıştır. Bunlar sırasıyla Bazant'ın Boyut Etkisi Eşitliği, Carpinteri'nin Çok Çatlaklı Boyut Etkisi Eşitliği ve Bazant'ın Geliştirilmiş Boyut Etkisi eşitlikleridir.

2.5.1. Bazant'ın boyut etkisi eşitliği

En basit boyut etkisi eşitliği Bazant tarafından pek çok deneysel ve analitik araştırmanın sonucunda önerilmiştir. Bu eşitlikde çatlak gelişimi için gerekli enerji eşitliği elde edilmiştir. Kırılma enerjisi eşitlikde görülmemektedir. Eşitliği sadeleştirmek için sadece iki parametrelili aşağıdaki eşitlik verilmiştir:

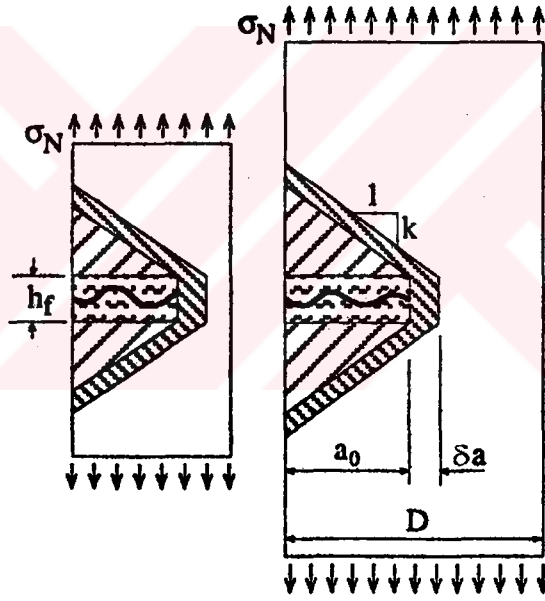
$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad [2.42]$$

Bu eşitlikde f_t malzemenin çekme gerilmesi, B boyutsuz bir sabit, D_0 ise birimi uzunluk olan bir sabittir. B ve D_0 malzemenin geometrisine ve kırılma özelliklerine bağlı birer sabittir. Bu iki sabit malzeme boyutundan bağımsızdır.

Kırılma mekaniğinin enerji açığa çıkması yüzünden, boyut etkisiyle olan ilişkisi Şekil 2.17 de gösterilen düzgün yayılı gerilmeli plak düşünülerek açıklanabilir. Şekil 2.17 de sol kenardaki küçük bölgenin dayanımının levhanın diğer kısmından daha az olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla çatlak bandının oluşumu soldan sağa doğru olacaktır.

Beton gibi gevrek heterojen malzeme için çatlak önünde dağılı çatlakların gözönüne alınması önemlidir. Bu bölgenin boyutu yapı boyutu ile orantılı değil, en büyük agrega boyutu ile ilişkilidir. En basit yaklaşımla, kırılma önündeki çatlak bandının h_f genişliği, yapı boyutundan bağımsız ve yaklaşık sabit varsayılmıştır (Aynı betondan

yapılmış benzer yapılar karşılaştırıldığı zaman). Benzer olarak maksimum yükde a çatlak uzunluğu, yapı boyutu D ile orantılıdır (Eleman analizlerinde ve betonarme yapıların gevrek göçme deneylerinin çoğunda a/D =sabit görülmüştür). h_f çatlak bandı kalınlığı, a_0 uzunluklu çatlak ile kırılmanın oluşumu Şekil 2.17'deki taralı alandan $\sigma_N^2/2E$ uzama enerjisinin açığa çıkması ile düşünülebilir (E =betonun elastisite modülü). a_0 uzunluklu çatlak δa uzarsa, ek uzama enerjisi δa yatay genişlikli sık taralı şeritten çatlak önünde açığa çıkar. Büyük yapılarda bu taralı alan şeridi daha büyüktür. Burada $\delta A = h_f \delta a + 2k a_0 \delta a$ ve k =Şekil 2.17. de eğim olup yapı biçimine bağlı yaklaşık sabittir (boyut etkisinde önemli olmayan k değeri sonlu eleman analizlerinde ve deney sonuçlarından $\pi/2$ bulunmuştur).



Şekil 2.17.Boyut etkisinin açıklaması

W , yapıda depolanan potansiyel enerji; b , kalınlık ve G_f kırılma enerjisi olmak üzere (birimi J/m^2), çatlak bandının birim uzunluğu veya çatlak oluşturan gerekli enerji, büyük yapılarda δa çatlak uzaması sonucu, aynı σ_N için daha fazla enerji açığa çıkar. Kırılma düzleminin birim alanında kırılma ile kaybolan enerji yaklaşık sabit olduğundan (malzeme özelliği olan G_f kırılma enerjisine eşittir) büyük yapı için σ_N

değeri, hacmin aynı kalacağı daha büyük bölgede açığa çıkan toplam enerjiden az olmalıdır. Büyük yapılarda birim çatlak gelişmesi için açığa çıkan aynı mikar enerji, daha büyük hacimde yayılacağından σ_N küçülecektir. Dolayısıyla σ_N yapı boyutundan etkilendiğinden boyut etkisinin varlığı görülmektedir.

Dış yüklemeler sonucunda levhanın sık taralı şeridinden açığa çıkan enerji

$$\delta W = b(h_f \delta a + 2ka_0 \delta a) \sigma_N^2 / 2E \quad [2.43]$$

Levhada yutulan enerji, G_f malzemenin kırılma enerjisi

$$\delta W = G_f b \delta a \quad [2.44]$$

Dış etkiler ile levhanın yuttuğu enerji eşitliğinde,

$$\sigma_N^2 [h_f + 2k(a/D)D] = 2EG_f \quad [2.45]$$

$$\sigma_N = \left| \frac{2EG_f}{h_f + 2k(a/D)D} \right|^{1/2} \quad [2.46]$$

$$D_0 = \frac{h_f D}{2ka} \quad \text{olarak tanımlanırsa} \quad [2.47]$$

pay ve payda f_t ile çarpıldığında, Sonuçta;

$$\sigma_N = \left| \frac{2EG_f f_t^2}{h_f f_t^2 (1 + D/D_0)} \right|^{1/2} \quad [2.48]$$

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi yasası elde edilir

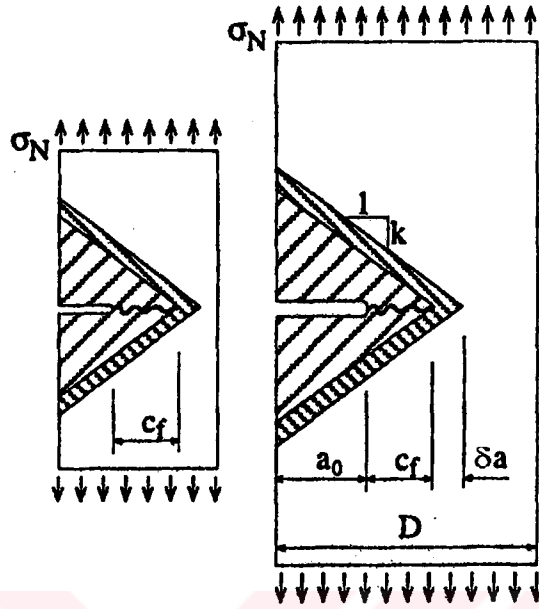
$$\sigma_N = B f_t (1 + \beta)^{-1/2}, \quad B = (2EG_f / h_f f_t^2)^{1/2}, \quad \beta = D/D_0 \quad [2.49]$$

(2.46) no'lu eşitlik $\sigma_N =$ için çözülürse aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$B f_t = \sqrt{\frac{2G_f E}{h_f}} = \text{sabit} \quad \text{ve} \quad D_0 = \frac{h_f D}{2k a_0} \quad [2.50]$$

B , malzeme dayanımına; D_0 , yapı biçimine bağlı boyutsuz sabitler olup f_t , betonun çekme dayanımı; B 'yi boyutsuz yapabilmek için kullanılmıştır.

Çıkarılan eşitlik bir çatlak bandı için geçerli gibi görünebilir. Ancak çatlak bandı yerine ince bir çatlağı düşündüğümüzde de aynı eşitlik bulunmaktadır. Betonda çatlağın önünde daima ölçülebilir, sabit, sonlu bir kırılma bölgesi vardır. Bu bölge boyunca gerilme f_t den sıfıra değişir. Bu bölge nedeniyle birim uzama enerjisinin tüketilmesini sağlayan çatlak boyu eşdeğer çatlak boyu olan a_0 dan c_f kadar daha uzundur. c_f değeri malzemeye bağlı sabit bir değerdir. Çatlak boyu δa kadar arttığında kırılma bölgesi de çatlak tepesi ile birlikte hareket eder. Çatlak ilerlemesi için gereken ek birim uzama enerjisi yoğun taranmış bölge olarak gösterilmiştir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18.İnce çatlaklı metod

Enerjinin tüketildiği çatlak bandının alanı

$$2k(a_0 + c_f) b \quad [2.51]$$

dır. Toplam tüketilen enerji

$$b2k(a_0 + c_f) \delta a \sigma_N^2 / 2E \quad [2.52]$$

dir. Bu değer çatlak gelişimi için gereken enerjiye eşitlenirse;

$$b2k(a_0 + c_f) \delta a \sigma_N^2 / 2E = G_f b \delta a \quad [2.53]$$

σ_N çözülrse

$$Bf_t = \sqrt{\frac{G_f E}{k c_f}} = \text{sabit ve } D_0 = c_f \frac{D}{a_0} = \text{sabittir.} \quad [2.54]$$

Eşitlik 2.42 yaklaşık bir ifadedir, fakat boyut değişiminin 1:20'ye kadar aralığı için yeterlidir. Daha büyük boyut değişimi için karmaşık formüller gereklidir. Eşitlik 2.42 nin elde edilmesinde aşağıdaki varsayımlardan yararlanılmıştır.

- Göçme anında çatlak önünde açığa çıkan enerji çatlak uzunluğuna bağlıdır.
- Açığa çıkan enerji aynı zamanda en büyük agrega boyutu d_a 'nın bir kaç katı olan çatlak genişliğine bağlıdır (deneyler ile kayada $5d_a$, betonda $3d_a$ bulunmuştur).
- Farklı boyutlu geometrik olarak benzer yapılarda oluşan kırılma yüzeyleride geometrik olarak benzerdir.
- Yapı göçmesi çatlak başlangıcı ile değil, çatlamış bölgenin tüm yapıya yayılması ile olur.

Bazant'ın önerdiği ve boyut etkisi bağıntısında eşitlik 2.42 için, yapı çok küçük $D \ll D_0$ ise $\beta = D/D_0$ değeri birin yanında küçük olduğundan ihmal edilebilir. $\sigma_N = Bf_t$ olur ki göçme gerilmesi plastik limit analizi ya da emniyet gerilmeleri yöntemi ile analiz edilmektedir. Eğer yapı çok büyük ise ($D \gg D_0$) bir değeri β değeri yanında çok küçüktür, $\sigma_N = Bf_t \beta^{1/2}$ olur. Yani göçme gerilmesi doğrusal elastik kırılma mekaniği ile analiz edilmekte ya da $\log \sigma_N = -1/2 \log \beta + \text{sabit}$, Şekil 2.19'da logaritmik eksen takımında eğimi -1/2 olan doğru ile gösterilmektedir.

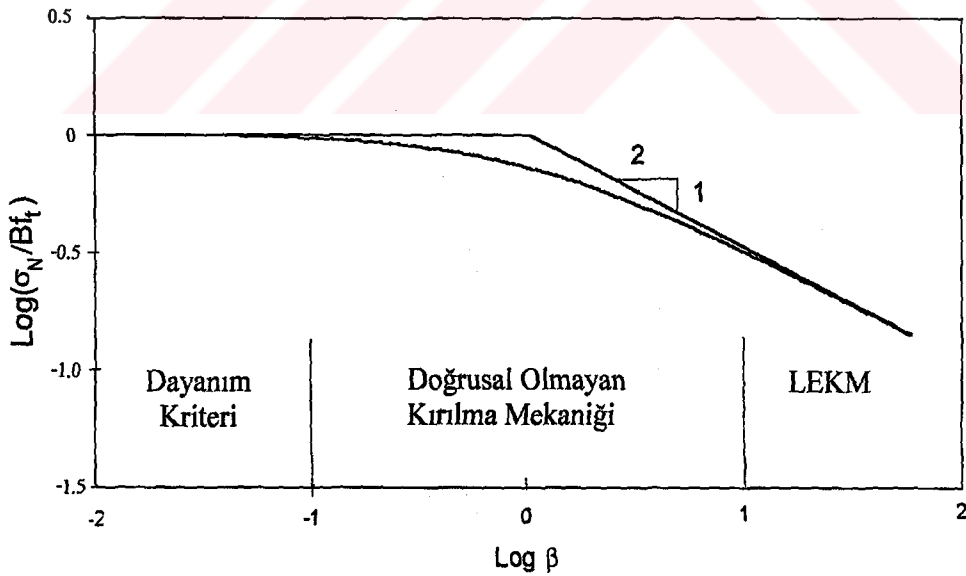
Asimptotun kesim noktası, plastik analiz ve LEKM teorileri eşitlenerek,

$$Bf_i = Bf_o \beta^{1/2} \quad [2.55]$$

$$\beta^{1/2} = 1 \quad \text{buradan} \quad [2.56]$$

$$\beta = 1, D = D_o \text{ bulunur.} \quad [2.57]$$

β gevreklik sayısıdır (68). Buradaki gevreklik Gustafsson ve Hillerborg (69) ile Carpinteri (70) gevreklik sayısı tanımlarından farklıdır. 2.42 eşitliği sadece aynı betondan yapılmış ve aynı en büyük agrega boyutu içeren yapılarda uygulanabilir. Agreganın küçük farklılıklar göstermesi durumunda bu yasa yaklaşık olarak uygulanabilir. Agreganın büyük farklılık göstermesi durumunda 2.42 eşitliğinde düzeltme terimleri kullanılmalıdır.



Şekil 2.19. Boyut etkisinin logaritmik ölçekte gösterimi

$\beta \gg 1$ ise lineer elastik kırılma mekaniği uygulanır. $\beta \ll 1$ ise plastik limit analizi uygulanır.

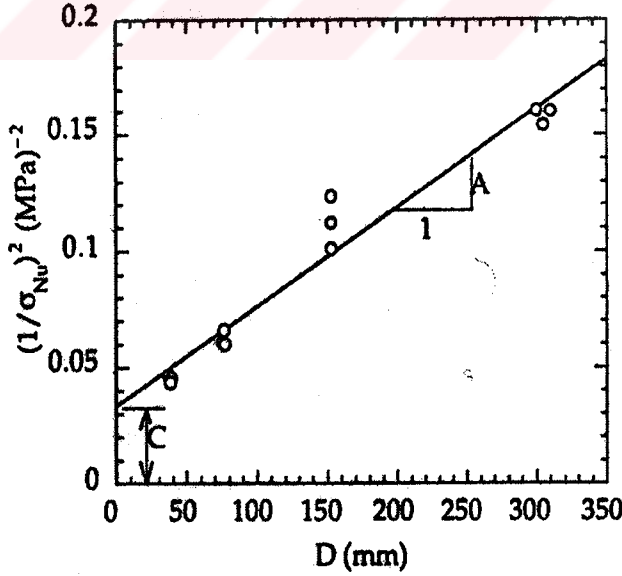
Uygulamada;

$\beta < 0.1$ ise plastik limit analiz, $0.1 < \beta < 10$ ise nonlinear kırılma mekaniği, $\beta > 10$ ise lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) geçerlidir.

$\beta < 0.1$ için Şekil 2.19'daki yatay asimptot % 4.7 oranında sapar. $\beta > 10$ için eğimli asimptot Şekil 2.19'dakinden % 4.7 oranla sapar. Eğer sapmaların % 2'den az olması istenirse nonlinear bölge için β 'nın değişim aralığı $1/25 \leq \beta < 25$ arasında olmalıdır.

2.5.1.1 Doğrusal analiz I

Doğrusal analiz I aşağıdaki gibi yapılır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Doğrusal analiz I

2.42 eşitliği

$$Y = AX + C \text{ (Doğrusal analiz I)} \quad \text{biçiminde düzenlenir ise} \quad [2.58]$$

$$X = D, Y = \left(\frac{1}{\sigma_N^2} \right), \quad Bf_i = 1/\sqrt{C}, \quad D_0 = C/A \quad [2.59]$$

Doğrusal olmayan analizde olduğu gibi kırılma mekaniği parametreleri yukarıdaki değerler bulunduktan sonra aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

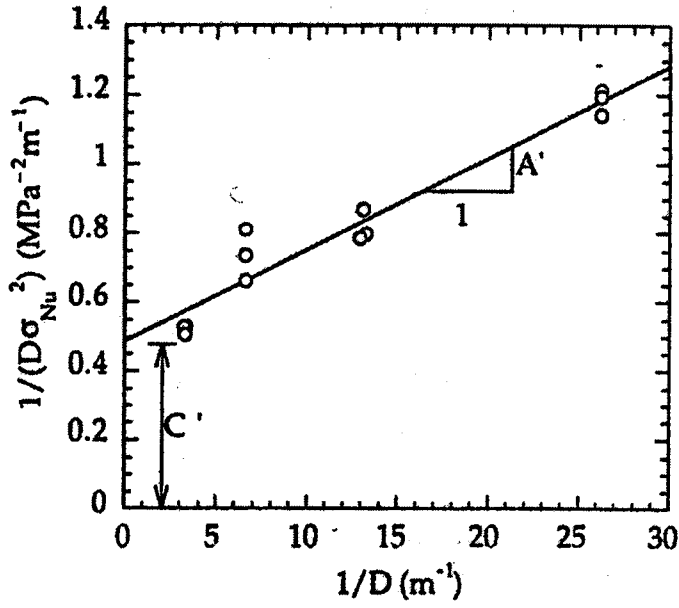
$$K_{lc} = k_0 \frac{1}{\sqrt{A}}, \quad G_f = \frac{k_0^2}{E} \frac{1}{A}, \quad c_f = \frac{k_0}{2k'_0} \frac{C}{A} \quad [2.60]$$

2.5.1.2 Doğrusal analiz II

Diğer doğrusal analiz Planas tarafından önerilmiş olup aşağıdaki biçimdedir: 2.42 eşitliği,

$$Y' = A X' + C' \text{ şeklinde düzenlenir ise (Şekil 2.21) (57);} \quad [2.61]$$

$$X' = 1/D, \quad Y' = \frac{1}{\sigma_N^2 D} \quad [2.62]$$



Şekil 2.21.Doğrusal analiz II

$$Bf_t = 1/\sqrt{A'} \quad [2.63]$$

$$D_0 = A'/C' \quad [2.64]$$

Doğrusal analiz II sonucunda K_{lc} , G_f ve c_f değerleri de şu şekilde bulunmaktadır:

$$K_{lc} = k_0 \frac{1}{\sqrt{C'}}, \quad G_f = \frac{k_0^2}{E'} \frac{1}{C'}, \quad c_f = \frac{k_0}{2k'_0} \frac{A'}{C'} \quad [2.65]$$

Doğrusal analiz I de kırılma enerjisi eğim ile ters orantılı, küçük numunelerde iyi sonuçlar verirken doğrusal analiz II de kırılma enerjisi kesim noktası ile ters orantılı, büyük numunelerde daha iyi sonuç vermektedir.

Doğrusal elastik kırılma mekaniğinde (LEKM) $c_f=0$ olup doğrusu Doğrusal analiz I de $C=0$ yani orjinden geçer, Doğrusal analiz II de $A'=0$ yani yatay olur. Dayanım teorisinde $D_0=\infty$ olup, Doğrusal analiz I de $A/C=0$ yani eğim sıfıra yakın, Doğrusal analiz II de $C'/A'=0$ orjinden geçer.

Doğrusal analiz bir program yardımı ile yapılamıyorsa aşağıdaki analiz formülleri kullanılarak değişkenler hesaplanabilir.

$$\Sigma = \sum_{k=1}^n 1^k = n, \quad \Sigma_x = \sum_{k=1}^n X_k, \quad \Sigma_y = \sum_{k=1}^n Y_k \quad [2.66]$$

$$\Sigma_{xx} = \sum_{k=1}^n (X_k)^2, \quad \Sigma_{xy} = \sum_{k=1}^n Y_k X_k, \quad \Sigma_{yy} = \sum_{k=1}^n (Y_k)^2 \quad [2.67]$$

$$\Delta = \Sigma \Sigma_{xx} - (\Sigma_x)^2 \quad [2.68]$$

Korelasyon katsayıları aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$A = \frac{\Sigma \Sigma_{xy} - \Sigma_x \Sigma_y}{\Delta}, \quad C = \frac{\Sigma_{xx} \Sigma_y - \Sigma_x \Sigma_{xy}}{\Delta} \quad [2.69]$$

olasılık hesaplarıyla “C” ve “A”nın değişimi ve dağılım bandının genişliği “m” hesaplanabilir:

$$\omega_A^2 = \frac{1}{A^2} \frac{\chi^2 \Sigma}{(n-2)\Delta}, \quad \omega_C^2 = \frac{1}{C^2} \frac{\chi^2 \Sigma_{xx}}{(n-2)\Delta}, \quad m^2 = \frac{(n-1)\chi^2 \Sigma(\Sigma_x)^2}{(n-2)\Delta(\Sigma_y)^2} \quad [2.70]$$

$$\chi^2 = \Sigma_{yy} - A \Sigma_{xy} - C \Sigma_y \quad [2.71]$$

RILEM’e göre “ ω_A ” %10’u, “ ω_C ” ve “m” %20’yi aşmamalıdır. K_{Ic} ve c_f için de değişim katsayısı hesaplanabilir:

$$\omega_{K_{Ic}} = \frac{1}{2} \omega_A \quad [2.72]$$

$$\omega_{c_f}^2 = \frac{1}{(C/A)^2} \left[\left(\frac{\bar{C}}{A} \right)^2 \omega_A^2 + \left(\frac{\bar{C}}{A} \right)^2 \omega_C^2 \right] = \frac{\bar{C}^2}{C^2} (\omega_A^2 + \omega_C^2) \quad [2.73]$$

$$\omega_C^2 = \frac{\chi^2 \Sigma}{(n-2)(\Sigma_y)^2} \quad [2.74]$$

$$\bar{C} = \frac{\Sigma_y}{\Sigma} \quad [2.75]$$

2.5.1.3 Doğrusal olmayan analiz

Bazant'ın eşitliğine doğrusal olmayan regresyon analizi şu şekilde yapılmaktadır. Deneysel veriler nominal gerilme σ_N ve karakteristik boyut D dir. D_0 ve Bf_t değerlerini doğrusal olarak gösterildiği ve sapmaların karesinin toplamını minimum yapan eşitlik şu şekildedir:

Doğrusal olmayan 2.42 eşitliğinin her iki tarafının doğal logaritması alınıp düzenlenir ise:

$$\ln \sigma_N = \ln \frac{Bf_t \sqrt{D_0}}{\sqrt{D_0 + D}} \quad [2.76]$$

ve analizi kolaylaştırmak için gerekli değişiklikler yapılırsa:

$$y = \ln \frac{M}{\sqrt{N + e^x}} \quad [2.77]$$

elde edilir. Yukarıdaki eşitlikde

$$x = \ln D, y = \ln \sigma_N, \quad Bf_t \sqrt{D_0} = M, D_0 = N \quad [2.78]$$

Bu analizin sonucunda K_{Ic} , G_f ve c_f değerleri bulunabilmektedir:

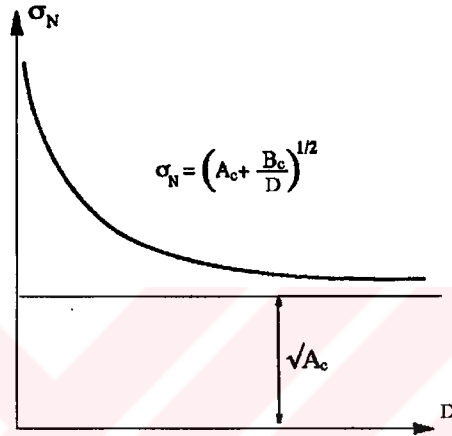
$$K_{Ic} = k_0 M, \quad G_f = \frac{k_0^2}{E} M^2, \quad c_f = \frac{k_0}{2k'_0} N \quad [2.79]$$

2.5.2. Carpinteri'nin çok çatlaklı boyut etkisi eşitliği

Carpinteri, malzemenin çatlaklı yapısının eleman boyutu büyüdükçe daha az etkili olduğunu anlamıştır. Buna göre eleman boyutu küçüldükçe nominal gerilmeler sonsuza gitmektedir. Eleman boyutu büyüdükçe nominal gerilme sabit bir değere yaklaşmaktadır. Elemanın mikroçatlaklı yapısı eleman boyutu küçükken mekanik davranışına daha çok etki etmektedir (71-76). Carpinteri'nin önerdiği eşitliğin analitik ifadesi şu şekildedir:

$$\sigma_N = \left(A_c + \frac{B_c}{D} \right)^{1/2} \quad [2.80]$$

eşitlikde σ_N nominal gerilmeyi, D karakteristik boyutu tanımlamaktadır. A_c nin birimi gerilmenin karesi, B_c nin birimi gerilme şiddet çarpanının karesidir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Carpinteri çok çatlaklı ölçek kanunu (75)

Carpinteri'nin önerdiği eşitliğin asimptotlarını bulmak için D karakteristik boyut değişkeninin limitlerine bakılır.

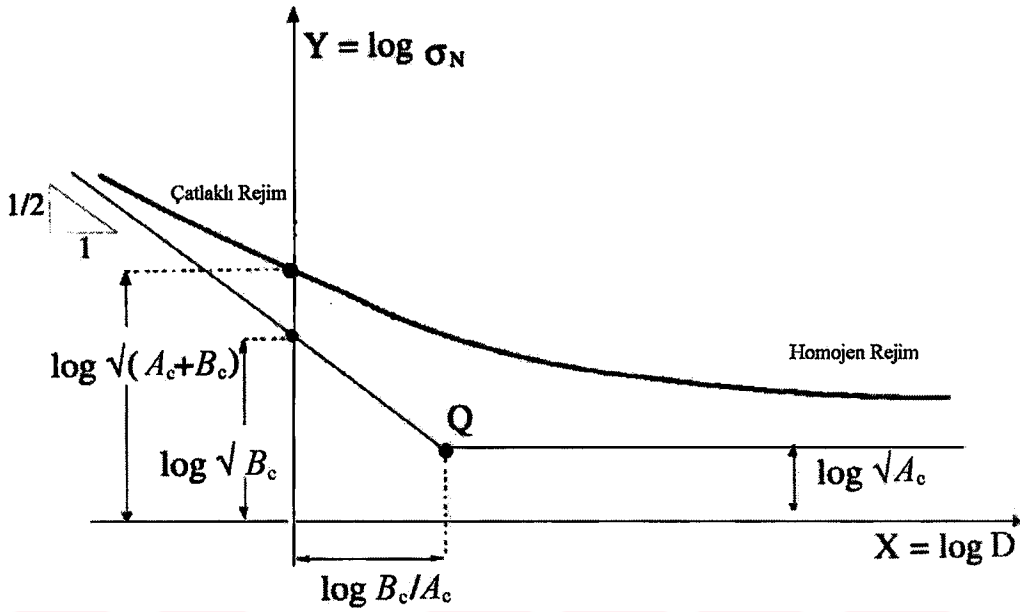
$$\lim_{D \rightarrow \infty} \left(A_c + \frac{B_c}{D} \right)^{1/2} = \sqrt{A_c} \quad [2.81]$$

$$\lim_{D \rightarrow 0^+} \left(A_c + \frac{B_c}{D} \right)^{1/2} = +\infty \quad [2.82]$$

Bilogaritmik grafikte Carpinteri'nin çok çatlaklı boyut etkisi

$$Y(X) = \frac{1}{2} \text{Log} \left(A_c + \frac{B_c}{10^x} \right) \quad [2.83]$$

eşitliği ile çizilebilir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23.Çok çatlaklı ölçek kuralı logaritmik eksen üzerinde (76)

D büyüdükçe eşitlik yatay asimptota yaklaşmaktadır. Bu bölgeye homojen rejim adı verilmiştir. Yatay asimptotun değeri:

$$H_1(X) = \text{Log} \sqrt{A_c} \quad [2.84]$$

dır. D küçüldükçe eşitlik eğik asimptota yaklaşmaktadır. Bu bölgeye çatlaklı rejim adı verilmiştir. Eğik asimptotun değeri:

$$H_2(X) = -\frac{1}{2}X + \text{Log} \sqrt{B_c} \quad [2.85]$$

dir. Bazant'ın boyut etkisi eşitliğine göre Carpinteri'nin boyut etkisi eşitliği tam ters değerler vermektedir. Ancak her ikisi de belirli bir bölge için yaklaşık aynı sonuçları vermektedir. Limit analiz ve Bazant'ın teorisine göre karakteristik boyut küçüldükçe gerilme yatay bir asimptota yaklaşmaktadır. Carpinteri'nin teorisine göre boyut küçüldükçe gerilme sonsuza gitmektedir. Limit analize göre karakteristik boyut büyüdükçe gerilmede bir değişiklik olmamaktadır. Bazant'ın teorisine göre karakteristik boyut büyüdükçe gerilme eğimi $\frac{1}{2}$ olan doğrusal elastik kırılma

mekanik asimptotuna yaklaşmakta ve karakteristik boyut sonsuza giderken gerilme de sıfıra gitmektedir. Carpinteri'nin teorisine göre karakteristik boyut büyüdükçe gerilme yatay asimptotun değerini almaktadır.

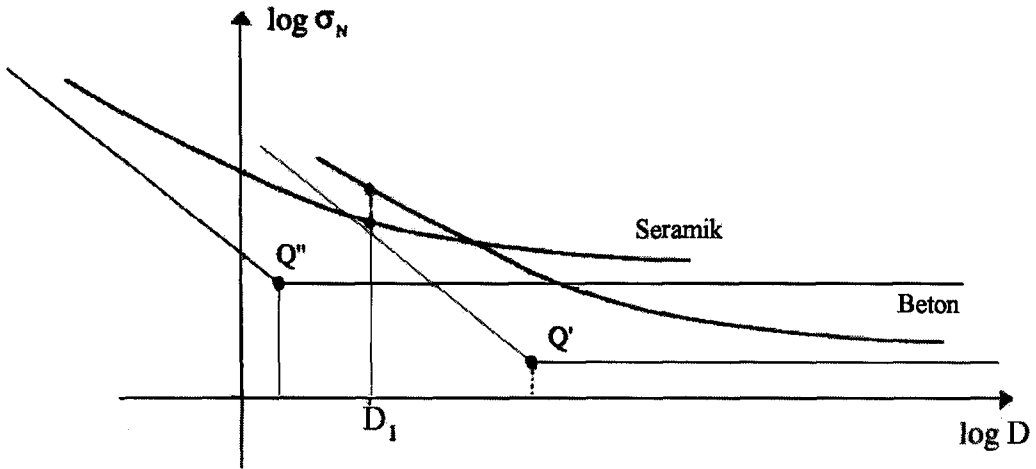
şekil 2.20 de verilen grafikte iki asimptotun keşiştiği Q noktasının yatay eksenindeki değeri:

$$X_Q = \text{Log} \frac{B_c}{A_c} \quad [2.86]$$

dır. B_c/A_c nın boyutu metredir. Q noktası homojen bölge ile çatlaklı bölgeyi birbirinden ayırır. B_c/A_c değerine mikroyapısal karakteristik boyut adı verilir ve l_{ch} ile gösterilir. l_{ch} beton malzeme için en büyük agrega çapı ile ilişkilendirilebilir.

$$l_{ch} = \frac{B_c}{A_c} = \alpha d_{\max} \quad [2.87]$$

Daha küçük agrega çapına sahip malzemeler için Q değeri daha küçük değerler verir. Seramik ile beton karşılaştırılırsa daha küçük danelere sahip seramiğin Q değerinin daha küçük olduğu görülür (şekil 2.24).



şekil 2.24. Farklı iki malzeme için Carpinteri  l ek etkisi (76)

Şeki 2.24'de aynı D_I karakteristik boyutu için seramik ve betondan yapılmış iki ayrı malzemenin farklı davranış içinde olduğu görülmektedir. Seramik malzeme D_I karakteristik boyutunda homojen kalırken aynı D_I karakteristik boyutu için beton malzeme çatlaklı olmaktadır.

Carpinteri'nin eşitliğindeki değişkenleri bulabilmek için eşitlik $Y=A+BX$ şeklinde bir doğruya dönüştürülür. Burada:

$$Y = \sigma_N^2, \quad X = 1/D \quad \text{dir.} \quad [2.88]$$

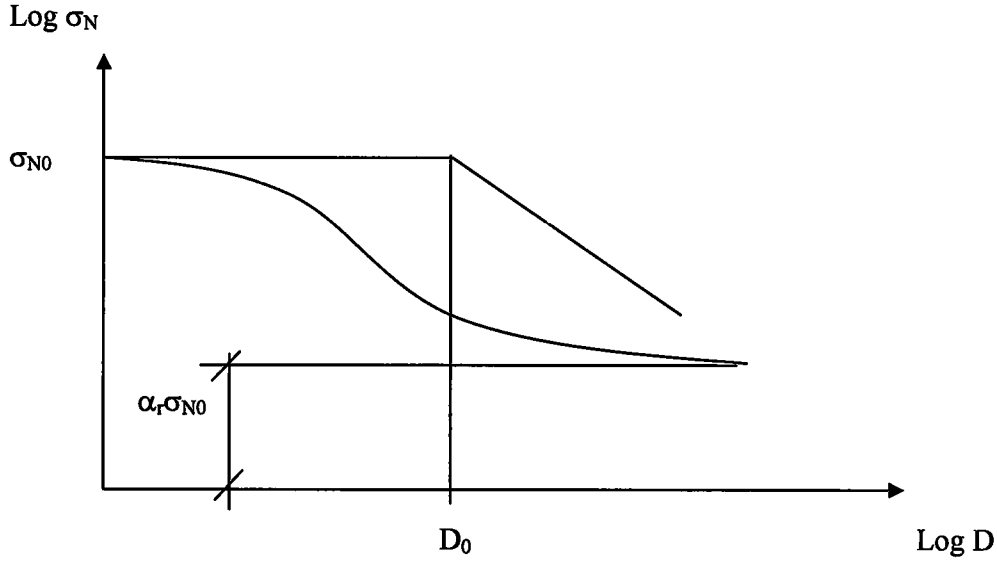
2.5.3 Geliştirilmiş Bazant eşitliği

Boyut etkisinin geliştirilmesi için yaklaşık boyut etkisi eşitliği (2.42) geliştirilmiştir. Basınç göçmesinde karşılaşılan sürtünmeli-plastik göçme mekanizması yüzünden Bazant, boyut etkisini geliştirmiştir. Bu eşitlik aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\sigma_N = \sigma_0 \left(\frac{\alpha_1}{\sqrt{1+\beta}} + \alpha_r \right); \quad \alpha_r = \frac{\alpha_r}{\alpha_1} \quad [2.89]$$

$$\beta = \frac{D}{D_0}, \quad \beta_1 = \frac{D_1}{D_0}, \quad \alpha_1 = (1 - \alpha_r) \sqrt{1 + \beta_1} \quad [2.90]$$

Bu eşitlikde $\sigma_N = My/I$, σ_0 ise $D=D_I$ boyutu için nominal eğilme gerilmesi, σ_N boyut düzeltilmiş nominal eğilme gerilmesini göstermektedir.



Şekil 2.25. Artık gerilme

β =kirişin göreceli boyutu D =geometrik olarak benzer kirişlerin donatı merkezinden üst life uzaklığı olan karakteristik boyut α_r =artık sürtünme gerilme oranı, artık nominal eğilme gerilmesi için $\alpha_r \mu_l$ 'in nominal gerilmesi μ_l 'e $D=D_l$ için denktir. Geliştirilmiş Bazant eşitliği D_0 , D_1 ve α_r olarak deneylerin doğrusal analizinden hesaplanan üç sabit ile tanımlanır. Bu sabitlerin teorik (kuramsal) bulunma olasılığı karmaşık kırılma mekaniği analizi ya da yerel olmayan hasar analizi gerektiğinden çok zordur. Geliştirilmiş Bazant eşitliğinin şekilsel anlatımı Şekil 2.25 de verilmiştir.

$$\sigma_N - \sigma_0 \alpha_r = \frac{\sigma_{N_1} \alpha_1}{\sqrt{1 + \beta}} \quad [2.91]$$

$$\frac{1 + D/D_0}{(\sigma_0 \alpha_1)^2} = \frac{1}{(\sigma_N - \sigma_0 \alpha_r)^2} \quad [2.92]$$

$$\frac{1}{(\sigma_0 \alpha_1)^2} + \frac{D}{D_0 (\sigma_0 \alpha_1)^2} = \frac{1}{(\sigma_N - \sigma_0 \alpha_r)^2} \quad [2.93]$$

$Y = AX + C$ biçiminde doğrusal analizi yapmak için

$$Y = \frac{1}{(\sigma_N - \sigma_0 \alpha_r)^2}; \quad X=D; \quad C = \frac{1}{(\mu_1 \alpha_1)^2}; \quad A = \frac{1}{D_0 (\mu_1 \alpha_1)^2} = \frac{C}{D_0} \quad [2.94]$$

α_r seçilerek , σ_N deneysel eğilmede nominal gerilme σ_0 kuramsal gerilme α_1 ve D_0 doğrusal analiz ile elde edilir.

2.6. Enerji Açığa Çıkış Oranı ve Kırılma Enerjisi

Griffith'in çatlak oluşumu için bir enerjiye ihtiyaç olduğu hipotezi Bölüm 1.2.2'de verilmiştir. Daha genel yaklaşımlar çatlak gelişimi için gereken enerjinin elemanın var olan çatlaklarına bağlı olabileceğini öne sürer. Bu durumlarda çatlağın bir birim gelişimi için gereken enerjiye çatlak gelişim direnci $\mathcal{R}$, denir. Kırılma mekaniğindeki temel problem çatlağın birim gelişimi için gereken enerjiyi hesaplamak ve mevcut enerji ile kıyaslamaktır. Ancak bu kıyaslama çok ayrıntılı analiz gerektirmektedir.

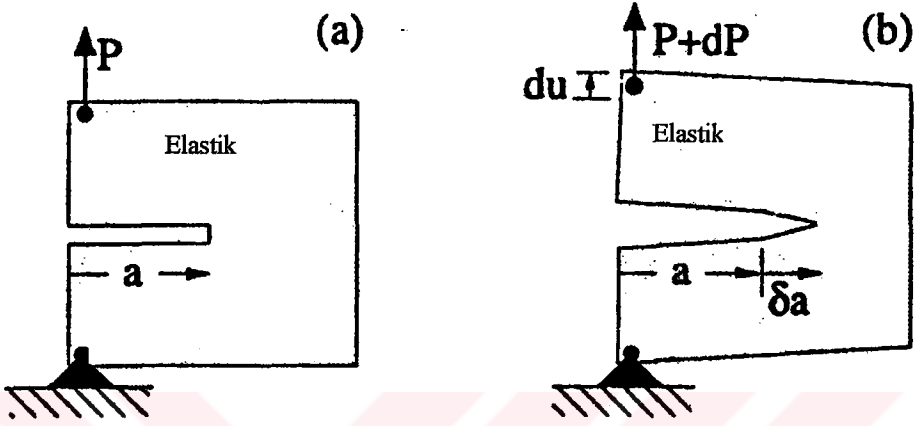
2.6.1 Genel enerji dengesi

Düzlemsel bir plakda bulunan a uzunluğundaki bir çatlak yine aynı düzlemde δa kadar ilerlerse, bu ilerlemeyi gerçekleştirecek kırılma enerjisi

$$\delta W^R = \mathcal{R} b \delta a \quad [2.95]$$

olur (Şekil 2.26). Bir yapının toplam enerji depolama sığası dış işe eşittir ve δW olarak adlandırılır. Toplam sığanın bir kısmı elastik enerji olarak yapıda kullanılır ve buna da δU denir. Kalan enerji diğer işleri yapmakta ve kinetik enerji oluşumunda

kullanılır. Oluşan kinetik enerjiye de δK_e adı verilir. Yapıda enerjiyi tüketen tek iş çatlak oluşumu ise bu durum statik harici yüklemelerdir ($\delta K_e=0$). Artan enerji ise kırılma için gereken enerji ya da eleman enerji tüketimidir (δW^R).



Şekil 2.26.Çatlamış bir malzemede çatlak gelişimi, a) başlangıç durumu, b) ek yükleme ile çatlak ilerlemesi

$$\delta W^R = \delta W - \delta U \quad [2.96]$$

Çatlak gelişiminin birim alana düşen enerji ile ifade edilmesi çoğu zaman daha uygun olmaktadır. Enerji açığa çıkış oranına $\mathcal{G}$ ile gösterilirse,

$$\mathcal{G} b \delta a = \delta W^R = \delta W - \delta U \quad [2.97]$$

statik dışı yüklemelerde;

$$\mathcal{G} \delta a = \mathcal{R} \delta a \quad [2.98]$$

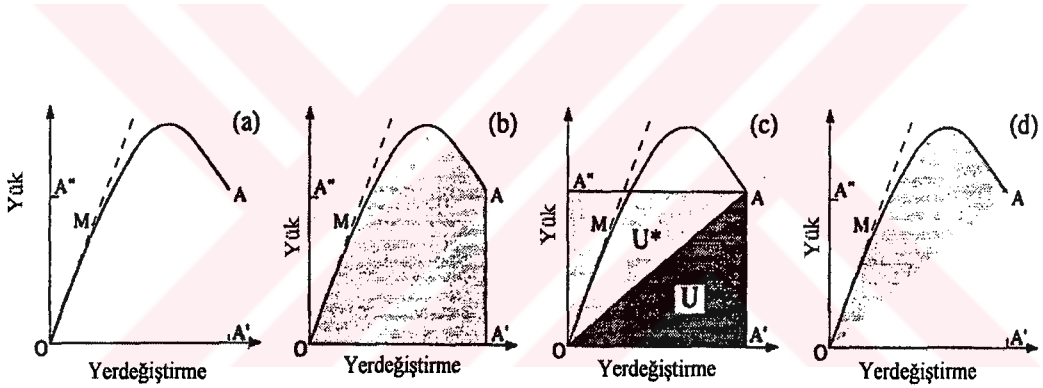
olur.

- | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------------------|
| $\mathcal{G} < \mathcal{R}$ | ise $\delta a = 0$, | $\delta K=0$ | ise çatlak gelişimi yoktur. |
| $\mathcal{G} = \mathcal{R}$ | ise $\delta a \geq 0$, | $\delta K=0$ | ise statik dışı gelişebilir. |
| $\mathcal{G} > \mathcal{R}$ | ise $\delta a > 0$, | $\delta K>0$ | ise dinamik çatlak gelişimi vardır. |

2.6.2. Kırılma işleminin şekilsel anlatımı

Statik olmayan bir yüklemeye maruz kalmış bir elemanın yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 2.27 a'da verilmiştir. Elemana başlangıç noktası O dan A ya kadar verilen enerji Pdu dur. Bu değer yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan OMAA'O alanıdır (Şekil 2.27b). Bu alanı dikdörtgene tamamlayan alan udP dir. Şekil 2.27b de OA''AA' ile gösterilmiştir.

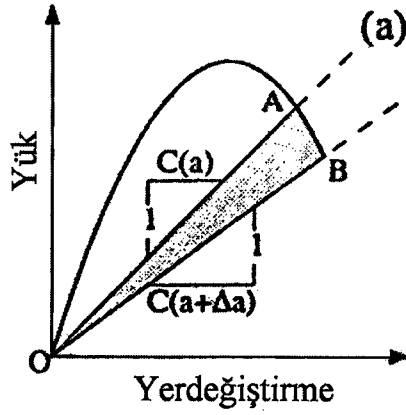
Çatlak boyunca ihmal edilebilir bir bölge dışında bütün eleman doğrusal elastik bölgede ise, elastik birim uzama enerjisi U, OAA' üçgeninin alanı ile ifade edilebilir (Şek. 2.27c).



Şekil 2.27 Yük yerdeğiştirme altında kalan alan a) yük-yerdeğiştirme eğrisi, b) toplam enerji tüketimi, c) elastik birim uzama ve tamamlayan enerji, d) çatlak gelişimi için tüketilen enerji (43)

Kırılma için depolanan enerji, iş ile kırılma enerjisi arasındaki farktır. Şekil 2.27d de OMAO olarak gösterilen alandır. Yük-yerdeğiştirme eğrisi tam bir statik olmayan yüklemeye ait ise çatlama için harcanan enerji kırılma için depolanan enerjiye eşittir.

Şekil 2.28 de A noktasında a çatlak uzunluğuna sahip bir malzeme gösterilmiştir. A noktasından B noktasına gidildiğinde çatlak boyu da δa kadar artar. Yeni oluşan bu çatlak için harcanan enerji OAB üçgeni ile gösterilen taralı alandır.



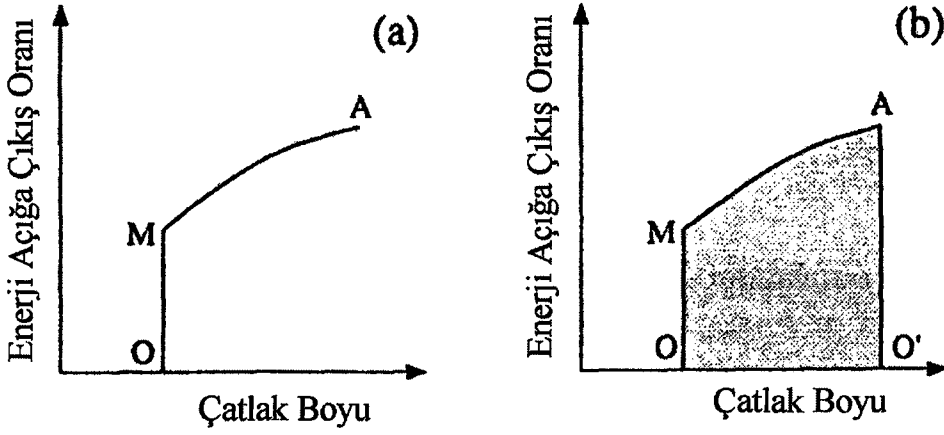
Şekil 2.28 Çatlak gelişimi

Şekil 2.28 de taralı üçgen alanı için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$G_b \delta a = \text{Alan}(OAB) \quad [2.99]$$

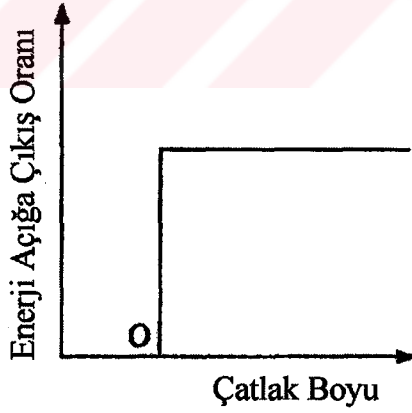
Enerji değişimini bulmak için yük-yerdeğiştirme grafiği gibi enerji açığa çıkış oranı-çatlak boyu grafiği de çizilebilir (Şekil 2.29).

Şekil 2.28 de OM doğrusu sabit çatlak boyunda enerji açığa çıkış oranının artmasını göstermektedir. M noktasına gelindiğinde çatlak boyu da ilerlemeye başlamaktadır. Bu yüklemede toplam enerji tüketimi $G \Delta a$ ya eşittir. Eğer yükleme statik olmayan yükleme ise tüketilen toplam enerji kırılma enerjisine eşittir. MA aralığında G değerinin sabit olmadığı görülür. Bu durum R-eğrisi davranışı adı ile adlandırılır. Çatlak direnci çatlak boyu ile birlikte artmaktadır.



Şekil 2.29. Enerji açığa çıkış oranı-çatlak boyu a) G -a Yükleme grafiği, b) çatlak için tüketilen toplam enerji

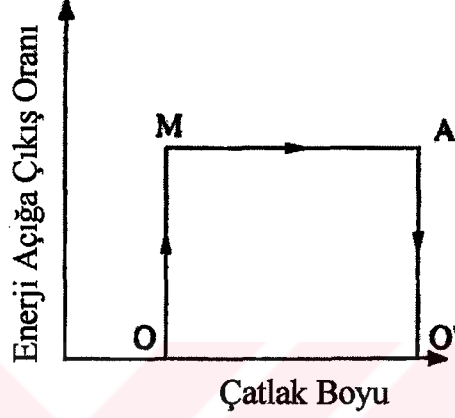
Doğrusal elastik kırılma mekaniği çatlakların sabit G altında ilerlediğini kabul eder. Malzemenin önceki yüklemeyi bilen bir belleği yoktur. Bu da çatlak gelişim direnci $R=G_f$ in her yükleme anı için sabit olması demektir. Bu kabule göre G -a grafiği adım fonksiyonu gibi olmalıdır (Şekil 2.30).



Şekil 2.30. Doğrusal elastik kırılma mekaniğinde çatlak ilerlemesini gösteren G -a grafiği

2.6.3. Kırılma Enerjisi

Doğrusal elastik kırılma mekaniğinin etkili olduğu durumlarda yükleme-çatlama-yük boşaltımı Şekil 2.31 daki gibi olur.



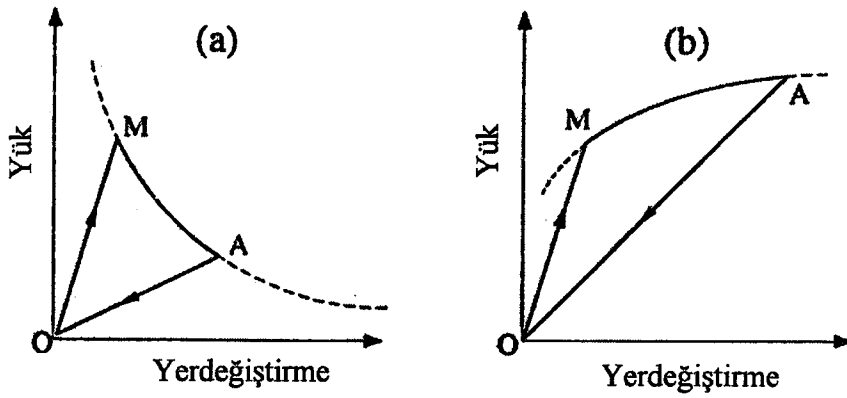
Şekil 2.31. Doğrusal elastik kırılma mekaniğinde yükleme-çatlama-yük boşaltımı eğrisi

Grafiğin OM kenarı boyunca G değeri artmakta fakat çatlak gelişimi olmamaktadır. Çatlak gelişimi için G değerinin çatlak direnci $\mathcal{R} = G_f$ değerine kadar artması gerekmektedir. MA boyunca çatlak sabit $G = G_f$ değeri ile ilerleyecektir. A noktasına gelindiğinde yük kaldırılırsa varolan çatlak kalacak, enerji açığa çıkışı sıfıra inecektir.

Aynı durum yük-yerdeğiştirme eğrisinde de gösterilebilir (Şekil 2.32). Bu eğri üzerindeki noktalar başlangıçtan gelen OM ve AO' noktaları ile gösterilebilir. Grafikte OM uzunluğu $G = G_f$ değerini verir. Bu değer şu şekilde hesaplanabilir;

$$G_f = \frac{P^2}{2b} C'(a) \quad [2.100]$$

Pek çok yapının G eğrisi Şekil 2.32a daki gibi eksi eğimlidir. Ancak bazı yapılarda bu grafik Şekil 2.32b deki gibi artı olabilir.



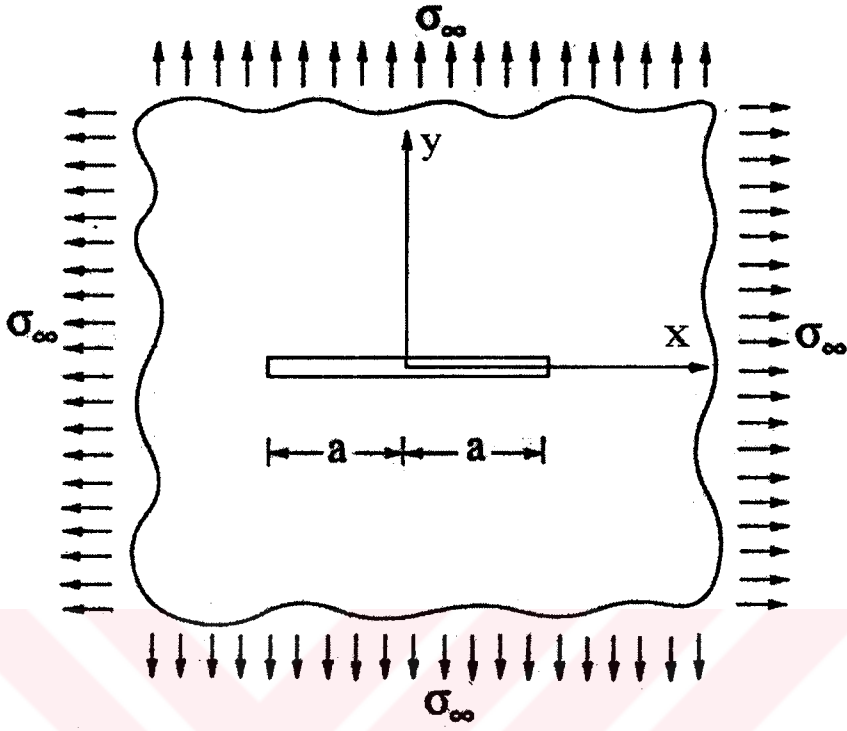
Şekil 2.32. Doğrusal elastik kırılma mekaniğinde yükleme-çatlama-yük boşaltma grafiği G eğrisi a) negatif olan yapılar, b) pozitif olan yapılar (43)

2.6.4. Gerilme yoğunluk çarpanı

Bir yapıda çatlak oluştuğu anda çatlak tepesinde yüksek miktarda gerilme oluşmaktadır. Çok küçük bir kırılma gelişim bölgesi dışında, davranış doğrusal elastik ve malzeme izotropen büyük yük ise, çatlak tepesine yakın bölgelerde gerilme dağılımı aynı, gerilme şiddeti değişken olmaktadır. Aynı şiddet için çatlak çevresinde ve yakınlarında gerilmeler eşittir.

Sonsuz büyüklükte ve sonsuz gerilme etkisinde bir plakta merkezi bir çatlak tepesinde normal gerilme değeri şu şekilde verilmiştir (Şekil 2.33);

$$\sigma_{yy} = \sigma_{\infty} \frac{|x_1|}{\sqrt{x_1^2 - a^2}} \quad [2.101]$$



Şekil 2.33. Ortasında çatlak bulunan sonsuz boyutta bir plak (43)

Bu eşitliğe göre çatlak tepesine yaklaştıkça normal gerilme değeri sonsuza gitmektedir. Çatlak tepesine yakın bölgede bir sınır değer tanımlamak amacı ile $x_1 - a$ değeri sağ çatlak tepesinden ölçülen r değeri ile değiştirilsin. Bu durumda $x_1 = r + a$, $x_1 + a = r + 2a$ olur. Eşitlikde yerine konur ise sınır değer yaklaşık aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma_{\infty} \sqrt{a}}{\sqrt{2r}} \left[1 + \frac{3r}{4a} - \frac{5r^2}{32a^2} + \dots \right] \quad [2.102]$$

Parantez içindeki terimler Taylor serisinin ilk üç terimidir. $r \ll a$ değeri için seri 1'e yakınsayacağı için;

$$K_I = \sigma_{\infty} \sqrt{\pi a} \quad [2.103]$$

denirse;

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad [2.104]$$

olur. Buradaki K_I değerine gerilme şiddet çarpanı denir. Burada sadece birinci mod olan açılma modundan söz edilmiş, birinci moda ait gerilme şiddet çarpanı verilmiştir. K ya ait alt indis modu belirtmektedir.

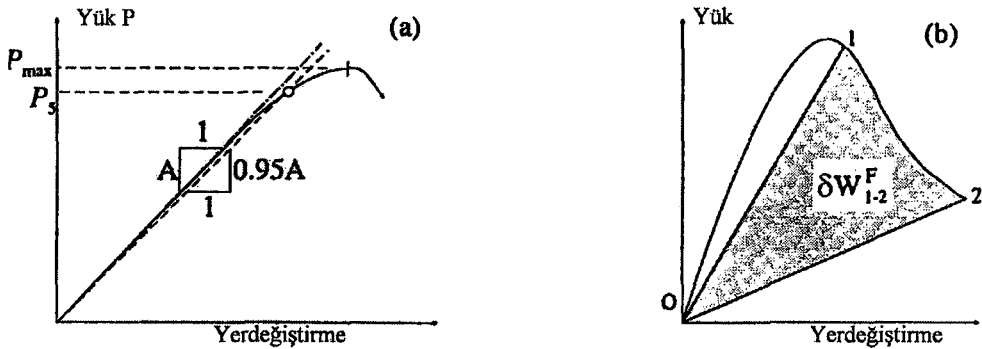
Irwin tarafından yapılan çalışmalarda da K_I ile enerji G arasındaki eşitlik aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad [2.105]$$

Bu durumda $K_I = \sqrt{EG}$ olmaktadır.

2.6.5. G_f Değerinin deneysel verilerden bulunması

G_f değeri deneysel olarak da bulunabilir. Yük-yerdeğiştirme eğrisi altında en büyük yük yük sonrası iki nokta arasındaki alanın toplam çatlak alanına bölünmesi ile G_f hesaplanabilir (Şekil 2.34).



Şekil 2.34. Kırılma enerjisinin deneysel yolla bulunması, a) yük-yerdeğiştirme eğrisi ve P_5 in tanımı, b) G_f değerinin deneysel yöntemle bulunması (43)

Yukarıdaki grafikten G_f şu şekilde hesaplanabilir;

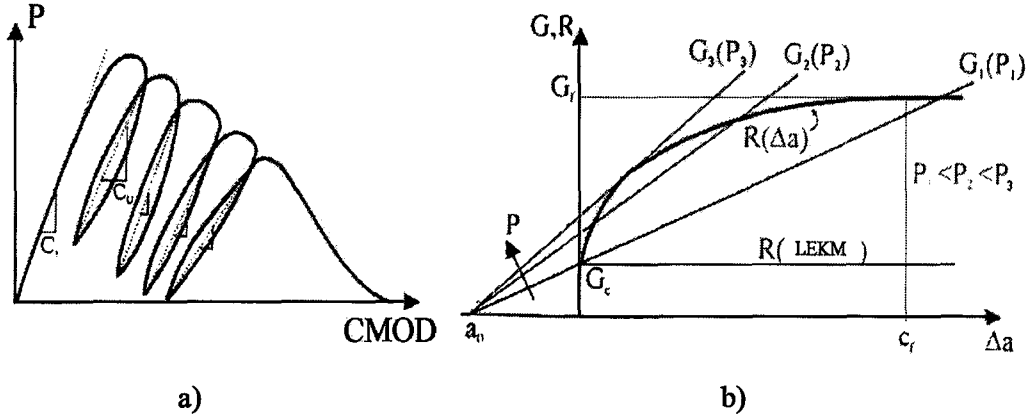
$$G_f = \frac{\delta W_{1-2}^F}{b(a_2 - a_1)} \quad [2.106]$$

Eşitlikde a_2 “2” noktasına gelindiği andaki çatlak boyu, a_1 “1” noktasına gelindiği andaki çatlak boyu ve b değeri çatlak derinliğidir (numune kalınlığı). Bu hesabı yapabilmek için deney numunesinin LEKM standartlarına uyması gerekmektedir. Bu standartlar şöyle özetlenebilir:

- 1) En yüksek yüke ulaşmadan önce numune katılığı doğrusal davranış göstermelidir. Sekant katılığının %95’inden yeni bir katılık doğrusu geçirilir. Geçen doğrunun eğriyi kestiği noktaya P_5 denirse; $P_{\max}/P_5$ oranı 1.1 den daha küçük olmalıdır.
- 2) Yük-yerdeğiştirme eğrisi için farklı eğrilerin G_f değerleri birbiri ile aynı olmalıdır.
- 3) Yük boşaltıldığı anda grafik doğrusal olarak O noktasından geçmelidir. Bu eğriden sapma, LEKM davranışından sapmayı belirler.

2.6.6. R eğrisi

İki parametrelili ve etkili çatlak metodları betonda direkt olarak kullanılamazlar. Kritik gerilme yoğunluk çarpanı, etkili çatlak uzunluğunun bir sabitidir. Gerilme yoğunluk çarpanı K_I , $\delta a = a - a_0$ ’la değişmektedir. K_I değeri en büyük yük sonrası çatlak ilerlemelerinde hesaplanabilir. δa , Şekil 2.35 de gösterildiği gibi R eğrisinin çizilmesiyle hesaplanabilir. Bir numunedeki çatlak uzunluğu arttıkça K_I değeri de artmaktadır. Çatlak boyu büyüdükçe numunenin çatlak direnci de artacaktır. Çatlak ilerlemesi için artan direnç $K_{IR}(\delta a)$ ile gösterilirse, Yük en büyük değerine ulaştığında $K_{Ic} = K_{IR}(\delta a)$ olur. İdeal gevrek malzemelerde çatlakın ilerleyebilmesi için $K_I(a) = K_{IR}(\delta a)$ olmalıdır.



Şekil 2.35. R-eğrisinin bulunması a) yük-çatlak ağız açılma yerdeğiştirmesi, b) $R(\Delta a)$ eğrisi (43)

$K_{IR}(\delta a)$ 'ya karşılık gelen enerji tüketimine $R(\delta a)$ dersek, $R(\delta a) = K_{IR}^2(\delta a)/E$ olur. İdeal gevrek bir malzeme için enerji tüketimi ile çatlak ilerlemesi yazılabilir; $G(a) = R(\delta a)$. δa ya bağımlı R -eğrisine direnç eğrisi adı verilmektedir. Başlangıç çentik uzunluğu a_0 ve herhangi bir yükleme anındaki çatlak uzunluğu da $a(a_0 + \delta a)$ olan bir numune düşünülürse. Çatlak uzunluğu a olduğu andaki yük P ise, bu yüke ve çatlakla ait $G(a)$ kırılma enerjisi LEKM eşitliklerini kullanarak bulunabilir. Şekil 2.35b de gösterilen yatay çizgi, ideal gevrek malzemeyi temsil etmektedir. Kalın çizilmiş olan eğri ise beton gibi bir malzemenin eğrisi olmaktadır. Beton gibi homojen olmayan malzemeler için $R(\delta a)$ eğrisinin yükselerek ilerlemesi çatlak ilerledikçe artan enerji tüketiminden ve en büyük yük öncesi doğrusal olmayan davranış ile ortaya çıkan pekleşme etkisinden kaynaklanmaktadır.

2.6.7. Kırılma parametrelerinin boyut etkisi deneylerinden bulunması

Bazant'ın boyut etkisi eşitliğindeki değişkenler D_0 ve Bf_t doğrusal analiz yöntemleri ile hesaplanabilir. Bu değerler hesaplandıktan sonra K_{Ic} ve c_f değerleri de şu şekilde bulunabilir;

$$K_{Ic} = Bf_t \sqrt{D_0} k_0 \quad [2.107]$$

$$c_f = \frac{k_0}{2k'_0} D_0 \quad [2.108]$$

Irwin'in bulduğu ilişkiye göre:

$$G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E'} \quad [2.109]$$

dolayısı ile :

$$G_f = \frac{(Bf_t)^2 D_0 k_0^2}{E'} \quad [2.110]$$

olur. Düzlem uzamada $E'=E$ alınmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deney Elemanlarının Tanıtılması ve Sınıflandırılması

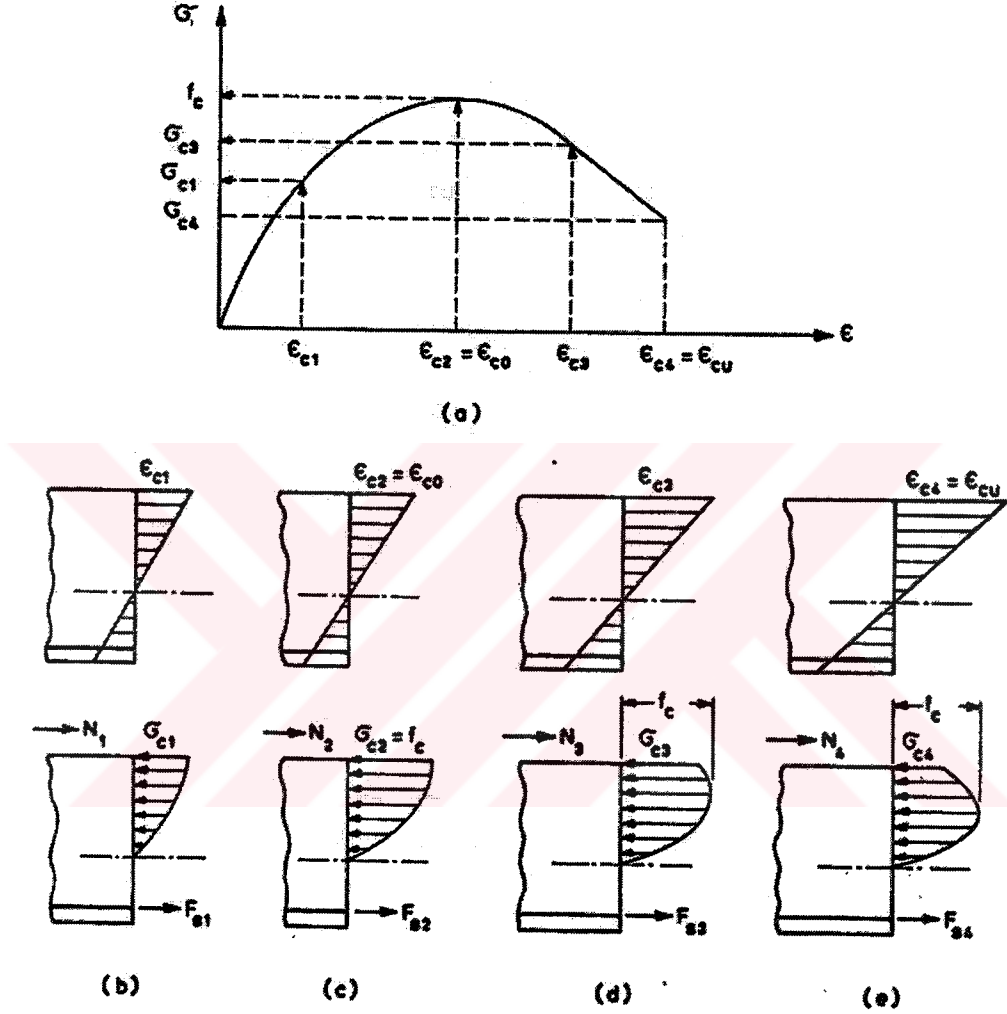
Kırılma mekaniği konusunda yapılan doktora tezlerine (76-77) ek olarak betonarme kirişler konusundaki boyut etkisi deneyi (78) bu çalışmada geniş olarak incelenmiş, ilk sonuçlar bir bildiri ile sunulmuştur (79). Deney elemanları olarak farklı boyutlarda geometrik olarak benzer dikdörtgen kesitli kirişler seçilmiştir. Toplam beş adet ana grup altında kırkbeş adet deney elemanı tasarlanmıştır. Bazı elemanlar aynı anda birden fazla grupta yer aldığı için kırkbeş eleman olmasına karşın otuz adet deney yapılmıştır. Her grup için farklı karakteristik boy seçilerek her karakteristik boy için üç farklı boyutta eleman üretilmiştir. Deneylerin yinelenebilir olduğunu göstermek için her deney elemanından üçer adet üretilmiştir.

Gruplardaki elemanlar adlandırılırken şu kurala uyulmuştur; her adın başındaki harf kirişin boyunu ifade etmektedir. Buna göre “S” boyu 1,15 m. olan kirişleri, “M” boyu 2,3 m. olan kirişleri ve “L” de boyu 4,6 m. olan kirişleri belirtmektedir. İlk harften sonra gelen sayı kiriş kesitinin genişliğini ve en son sayı ise kiriş kesitinin yüksekliğini ifade etmektedir. En sondaki harf ise her bir elemandan üçer adet üretildiği için bu üç elemanın birbirinden ayırt edilebilmesi için kullanılmıştır. “A” birinci, “B” ikinci ve “C” de üçüncü elemanı ifade etmektedir.

Deney elemanları bir kiriş ile birbirine eşit iki tekil kuvvete ayrılan dört nokta yüklemesi ile denenmiştir. Bu yükleme düzeneği ile kesme kuvveti ve eğilme momentinin etkileri birbirinden ayrılmıştır. Momentin maksimum olduğu ve kesme kuvvetinin sıfır olduğu yüklerin ortasındaki bölgede kirişlerin basınç ezilmesi sonucunda göçmesinin oluşması tasarlanmıştır.

Bu kısımda deney elemanı olarak seçilen betonarme kirişlerin tek yönlü eğilme momenti etkisinde basit eğilme ile yüklenmesi sonucundaki davranışından kısaca bahsedilecektir. Basit eğilme etkisindeki bir kirişin artan yüklemeler etkisi ile birlikte

çatlak oluşumları ve taşıma gücüne nasıl ulaşacağı adım adım izlemek konusunda önemli bilgiler vermektedir.



Şekil 3.1 Dört nokta yüklemesi altında gerilme ve birim yerdeğiştirme şekli a) gerilme-birim yerdeğiştirme şekli, b) elastik bölgede, c) tepe noktasında, d) yumuşama bölgesinde, e) kopma anında

Şekil 3.1’de dört nokta yüklemesi ile basit eğilme etkisindeki dikdörtgen kesitli bir betonarme kirişin gerilme ve birim yerdeğiştirme dağılımlarının artan yükleme ile nasıl değişim gösterdiği sunulmuştur. Şekil 3.1’de sunulan davranış çekme donatısının aşırı olmadığı denge altı bir kiriş için verilmiştir. Kirişe aşırı çekme donatısı yerleştirildiği zaman davranışta büyük bir değişme gözlenmektedir.

Gerektiğinden fazla yerleştirilmiş olan çekme donatısı Şekil 3.1’de c ve d de verilmiş olan dağılımlardaki tarafsız eksenin değişerek çekme donatısına doğru yaklaşmasına neden olmaktadır. Tarafsız eksenin çekme donatısına doğru kayması sonucunda en dış beton lifindeki birim deformasyon değeri ϵ_{cu} değerine ulaştığında çekme donatı daha henüz akma sınırına ulaşmayacaktır. Bu nedenle beklenen kırılma son derece gevrek, ani bir basınç kırılması şeklinde olacaktır. Daha sonraki bölümlerde sunulacak olan yük-yerdeğiştirme grafiklerinden bu davranış açık bir şekilde görülebilecektir. Aşırı donatılı tasarlanan tüm deney elemanları gevrek basınç kırılması şeklinde göçmüşlerdir.

Deney elemanlarında basınç kırılması inceleneceği için P yüklerinin verildiği aralıkta basınç donatısı yerleştirilmemiştir. Her kirişte denge üstü koşulunu sağlayacak şekilde aynı oranda çekme donatısı yerleştirilmiştir. Özellikle a_s/d oranı küçük olan kirişlerin basınç bölgesinde oluşacak beton ezilmesi sonucu göçmesinden önce kesme açıklıklarında oluşabilecek bir kesme kırılması sonucu göçmesine engel olmak amacıyla kesme açıklıklarına kesme dayanımını arttırmak amacı ile P yükleri ile mesnet arasında kalan bölgelerde sık ve büyük çaplı etriyeler yerleştirilmiştir.

Deneysel Değişkenler:

Deneysel çalışmada basınç kırılması şeklinde göçecek kirişlerde boyut etkisinin kırılma yükü, enerjisi ve kırılma mekaniği parametreleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak düşünülen deneysel değişkenler;

- a) Boyut etkisinde etkili olan karakteristik boyutun değişimi
 - Birinci grupta; kiriş toplam boyu
 - İkinci grupta; kiriş yüksekliği
 - Üçüncü grupta; kiriş yüksekliği, boyu ve genişliği
 - Dördüncü grupta; kiriş boyu ve yüksekliği
 - Beşinci grupta; kiriş yüksekliği ve genişliği
- b) Boyut etkisinin incelendiği gruplar

- Tek boyutlu boyut etkisi analizi (1 ve 2. Grup)
- Üç boyutlu boyut etkisi analizi (3. Grup)
- İki boyutlu boyut etkisi analizi (4 ve 5. Grup)

Yukarı kısaca özetlenen deneysel değişkenler ışığında planlanan deneysel programda yer alan deney elemanlarının adlandırılması ve özellikleri ile ilgili bilgiler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 Deney elemanları

Grup	Kiriş Adı	Kiriş Boyu	Kiriş Kesit Genişliği	Kiriş Kesit Yüksekliği
I. GRUP	S11.15a	1150 mm	110 mm	150 mm
	S11.15b	1150 mm	110 mm	150 mm
	S11.15c	1150 mm	110 mm	150 mm
	M11.15a	2300 mm	110 mm	150 mm
	M11.15b	2300 mm	110 mm	150 mm
	M11.15c	2300 mm	110 mm	150 mm
	L11.15a	4600 mm	110 mm	150 mm
	L11.15b	4600 mm	110 mm	150 mm
	L11.15c	4600 mm	110 mm	150 mm
II. GRUP	L11.15a	4600 mm	110 mm	150 mm
	L11.15b	4600 mm	110 mm	150 mm
	L11.15c	4600 mm	110 mm	150 mm
	L11.30a	4600 mm	110 mm	300 mm
	L11.30b	4600 mm	110 mm	300 mm
	L11.30c	4600 mm	110 mm	300 mm
	L11.60a	4600 mm	110 mm	600 mm
	L11.60b	4600 mm	110 mm	600 mm
	L11.60c	4600 mm	110 mm	600 mm

Çizelge 3.1 devam

III.GRUP	S5.7a	1150 mm	55 mm	75 mm
	S5.7b	1150 mm	55 mm	75 mm
	S5.7c	1150 mm	55 mm	75 mm
	M11.15a	2300 mm	110 mm	150 mm
	M11.15b	2300 mm	110 mm	150 mm
	M11.15c	2300 mm	110 mm	150 mm
	L22.30a	4600 mm	220 mm	300 mm
	L22.30b	4600 mm	220 mm	300 mm
	L22.30c	4600 mm	220 mm	300 mm
IV.GRUP	S11.15a	1150 mm	110 mm	150 mm
	S11.15b	1150 mm	110 mm	150 mm
	S11.15c	1150 mm	110 mm	150 mm
	M11.30a	2300 mm	110 mm	300 mm
	M11.30b	2300 mm	110 mm	300 mm
	M11.30c	2300 mm	110 mm	300 mm
	L11.60a	4600 mm	110 mm	600 mm
	L11.60b	4600 mm	110 mm	600 mm
	L11.60c	4600 mm	110 mm	600 mm
V.GRUP	M5.7a	2300 mm	55 mm	75 mm
	M5.7b	2300 mm	55 mm	75 mm
	M5.7c	2300 mm	55 mm	75 mm
	M11.15a	2300 mm	110 mm	150 mm
	M11.15b	2300 mm	110 mm	150 mm
	M11.15c	2300 mm	110 mm	150 mm
	M22.30a	2300 mm	220 mm	300 mm
	M22.30b	2300 mm	220 mm	300 mm
	M22.30c	2300 mm	220 mm	300 mm

Çizelgede özetlenmiş olan deney elemanlarının yer aldığı 5 farklı grupta ilgili bilgiler daha ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir.

3.1.1 I. Grup Kirişler

Bu grupta boyut etkisi analizlerinde kullanılmak üzere karakteristik boy olarak kirişlerin brüt boyları seçilmiştir. Bu grupta S11.15, M11.15 ve L11.15 kirişleri bulunmakta olup tek boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Deney kirişlerinin kesit alanları her numune için 110 mm x 150 mm dir. İyi bir dağılım elde edebilmek için her iki eleman arasında boy farkı iki katına çıkartılmıştır. Deney çerçevesinin boyutları kirişin en büyüğünün boyu 4,6m. olmasına izin verdiğinden bu değer seçilmiştir. Orta büyüklükteki kirişin boyutu 2,3m. ve en küçük kirişin boyutu 1,15m. dir.

3.1.2. II. Grup Kirişler

Bu grupta boyut etkisi analizlerinde kullanılmak üzere karakteristik boy olarak kiriş kesitlerinin yükseklikleri seçilmiştir. Bu grupta L11.15, L11.30 ve L11.60 kirişleri bulunmaktadır. Bu grupta tek boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Deney kirişlerinin boyları her numune için sabit ve 4,6m. dir. Deney kirişlerinin kesit alanları sırasıyla 110mm x 150mm, 110mm x 300mm ve 110mm x 600mm dir. İyi bir dağılım elde edebilmek için her numunenin kesit yüksekliği arasında iki kat fark olacak şekilde boyutlar seçilmiştir. Deney kirişlerinin en büyük boyu 4,6m. seçilmiştir.

3.1.3. III. Grup Kirişler

Bu grupta üç boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Karakteristik boy olarak kirişlerin boyu, kiriş kesit yüksekliği ve kiriş kesit genişliği seçilmiştir. Aynı deney elemanı için farklı karakteristik boy seçiminin boyut etkisi analizine katkısı araştırılmıştır. Bu grupta S5.7, M11.15 ve L22.30 kirişleri bulunmaktadır. Deney kirişlerinin kesit alanları her numune için sırasıyla 55mm x 75mm, 110mm x 150mm ve 220mm x 300mm dir. İyi bir dağılım elde edebilmek için her iki eleman arasında boy, kesit genişliği ve kesit yüksekliği farkı iki katına çıkartılmıştır. Deney kirişinin en büyük

boyu 4,6m. seçilmiştir. Orta büyüklükteki kirişin boyutu 2,3m. ve en küçük kirişin boyutu 1,15m.

3.1.4. IV. Grup Kirişler

Bu grupta iki boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Karakteristik boy olarak kiriş boyu ve kiriş kesit yüksekliği seçilmiştir. Aynı deney elemanı için farklı karakteristik boy seçiminin boyut etkisi analizine katkısı araştırılmıştır. Bu grupta S11.15, M11.30 ve L11.60 kirişleri bulunmaktadır. Bu grupta iki boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Deney kirişlerinin kesit alanları her numune için sırasıyla 110mm x 150mm, 110mm x 300mm ve 110mm x 600mm dir. İyi bir dağılım elde edebilmek için her eleman arasında boy ve kesit yüksekliği farkı iki kat seçilmiştir. Deney kirişin en büyüğünün boyu 4,6m. seçilmiştir. Orta büyüklükteki kirişin boyutu 2,3m. ve en küçük kirişin boyutu 1,15m. dir.

3.1.5. V.Grup Kirişler

Bu grupta iki boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Karakteristik boy olarak kiriş kesit genişliği ve kiriş kesit yüksekliği seçilmiştir. Aynı deney elemanı için farklı karakteristik boy seçiminin boyut etkisi analizine katkısı araştırılmıştır. Bu grupta M5.7, M11.15 ve M22.30 kirişleri bulunmaktadır. Bu grupta iki boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Deney kirişlerinin kesit alanları her numune için sırasıyla 55mm x75 mm, 110mmx150mm ve 220mmx300mm dir. İyi bir dağılım elde edebilmek için her eleman arasında kesit genişliği ve kesit yüksekliği iki kat büyük seçilmiştir.

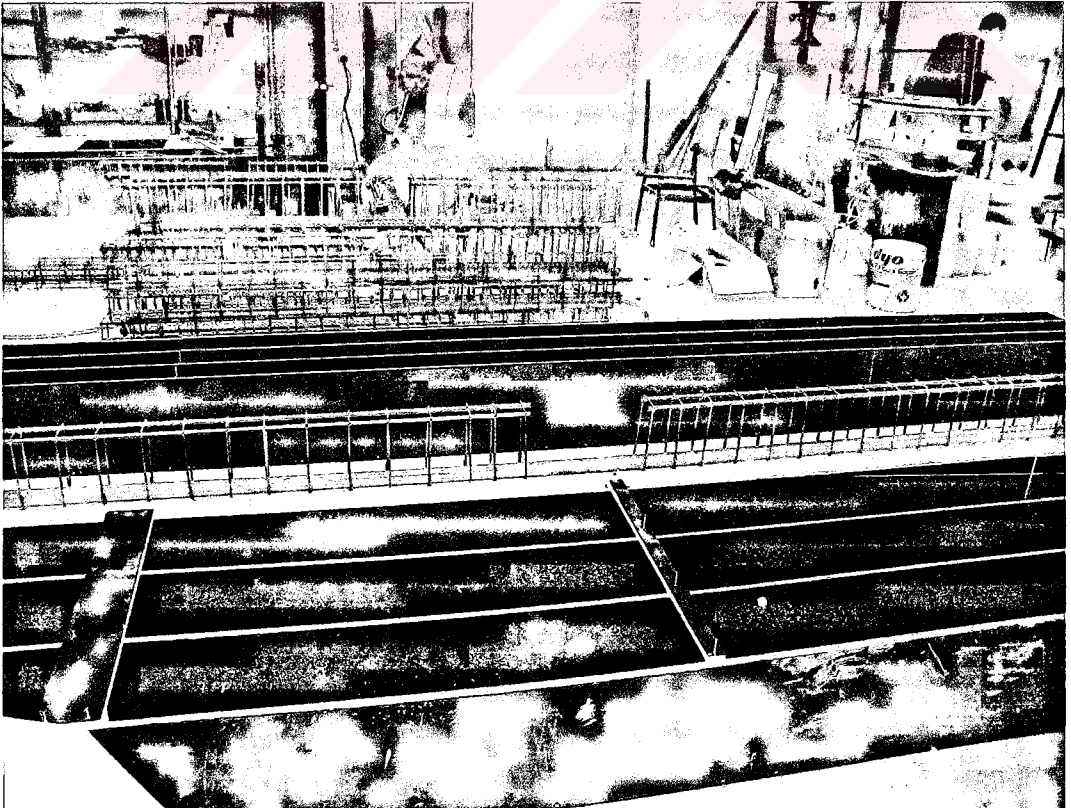
3.2. Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanlarının üretilmesi sırasında uygulanan işlemler aşağıda sırası ile sunulmuştur. Boyut etkisi analizinde üretim sırasında uyulması gerekli olan en

önemli kurallardan biri tüm deney elemanlarının malzeme özelliklerinin aynı olması ve analiz sonuçları etkileyecek bir parametre olmamasıdır. Bu nedenle deney elemanlarının sayısı oldukça fazla olmasına karşın aynı mekanik özelliklere sahip donatıların yerleştirilmesi ve betonlarının tek bir karışım ile dökülmesine özen gösterilmiştir.

3.2.1. Deney elemanlarının kalıpları

Deney elemanlarının boylarının uzun olması ve elemanların geometrik boyutlarındaki sapmayı minimuma indirmek amacı ile kalıp olarak 21mm lik plywood malzemesi kullanılmıştır. Deney elemanlarının kalıplarının üretimi için 1.8m.x2.1m. boyutlarında 13 tabaka malzeme kullanılmıştır. Kalıplar dışarıda verilen ölçülerde üretilmiş ve laboratuvarımıza taşınmıştır. Resim 3.1’de deney kalıpları görülmektedir.



Resim 3.1. Deney Kalıpları

3.2.2. Deney elemanlarının donatıları

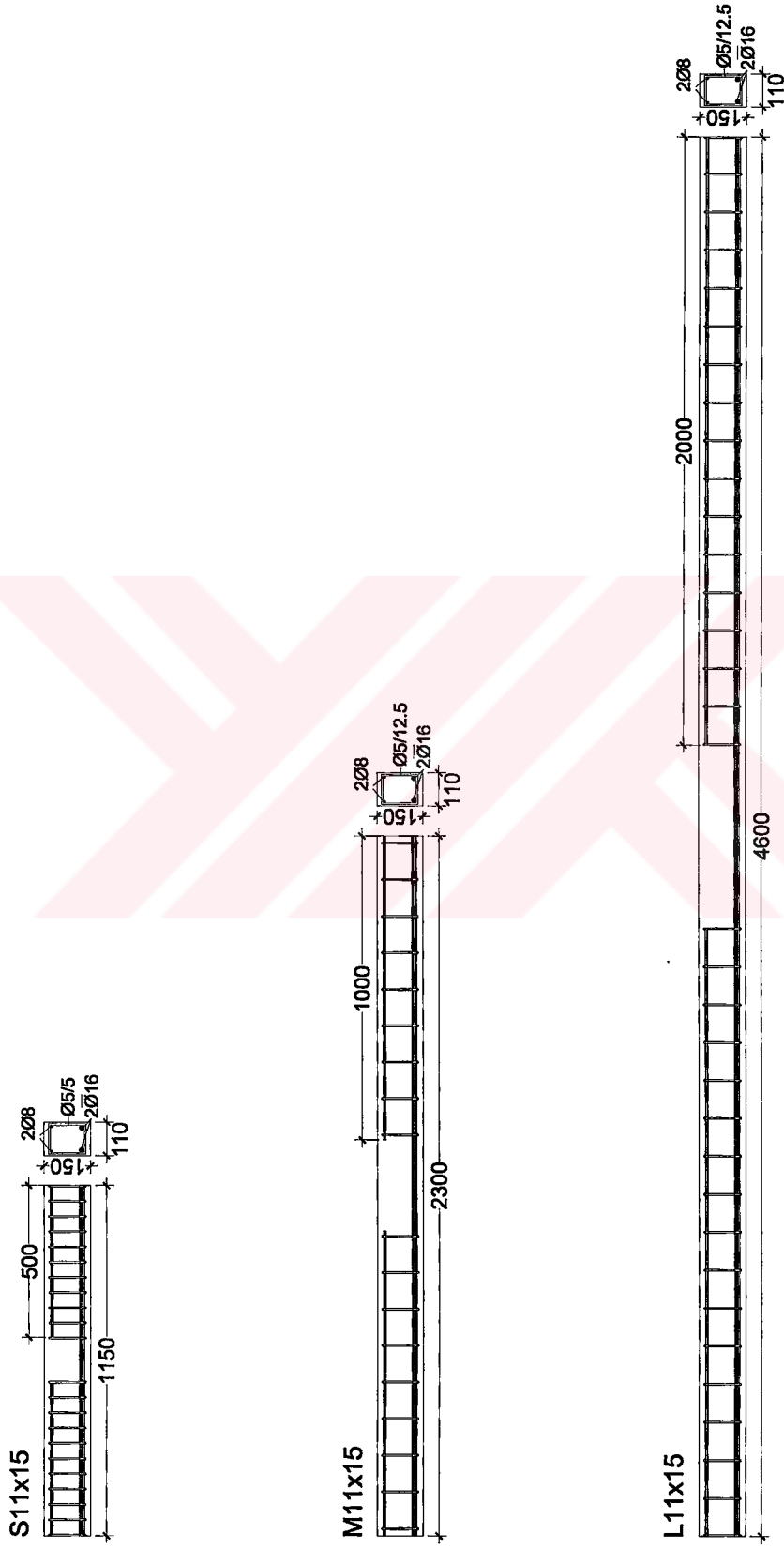
Deney kirişlerinin boyuna donatıları ve etriyeleri verilen ölçülerde imal edilmiş ve daha sonra önceden imal edilen kalıpların içerisine yerleştirilmiştir. I. grup deney kirişlerinin çizimi ve donatı düzeni Şekil 3.2. de, II.grup deney kirişlerinin çizimi ve donatı düzeni Şekil 3.3. de, III.grup deney kirişlerinin çizimi ve donatı düzeni Şekil 3.4.de, IV.grup deney kirişlerinin çizimi ve donatı düzeni Şekil 3.5. de, V.grup deney kirişlerinin çizimi ve donatı düzeni Şekil 3.6. da verilmiştir.

3.2.3. Deney elemanlarının dökülmesi

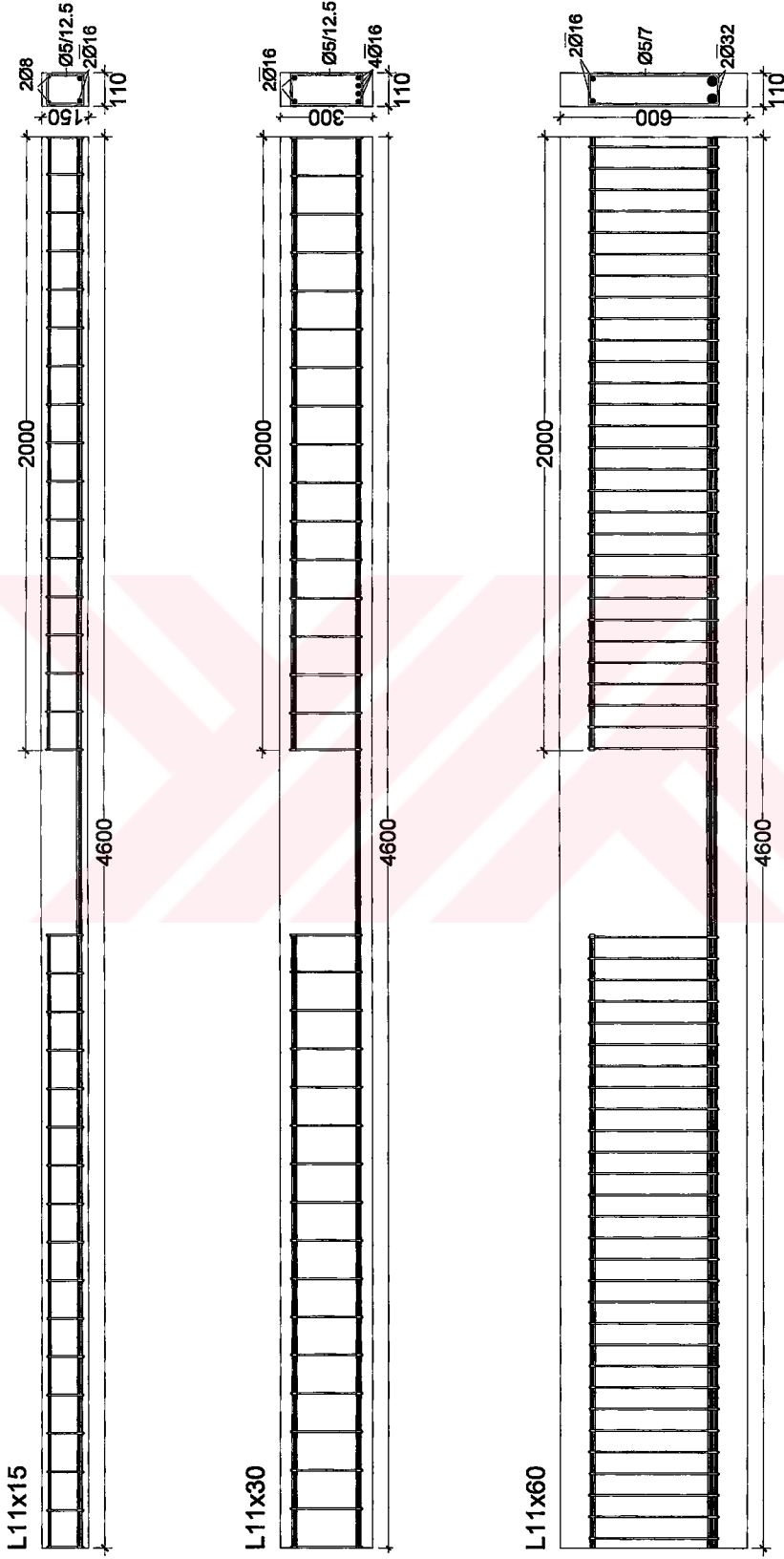
Beton dökümü 7 gün arayla iki aşamada yapılmıştır. 7 günlük bu ara, ilk döküm deneylerinin yaklaşık 7 gün sürmesi düşünüldüğünden her elemanın yaklaşık aynı yaşta denenebilmesi içindir. İlk aşamada L11.15, L11.60, M55.75, M22.30 ve L11.30 kirişleri dökülmüştür. İkinci aşamada S11.15, M11.15, S55.75, L22.30 ve M11.30 kirişleri dökülmüştür. Beton dökümünden önce kalıpların iç kısımları kalıp yağı ile yağlanmıştır. Birinci aşama dökümden 5 gün sonra kirişler kalıplardan çıkartılmış ve aynı kalıplar ikinci aşama dökümde kullanılmak üzere temizlenmiş ve yağlanmıştır.

Beton 250dm^3 beton karıştırıcısında harmanlanmıştır. Beton üretilirken önce kum ve agreganın birbirine karışması sağlanmış daha sonra karışıma su eklenerek beton imal edilmiştir. Beton dökümü sırasında betonun iyi yerleşebilmesi için el vibratörü kullanılmıştır. Kiriş betonları dökülürken aynı anda daha önceden kalıpları hazırlanan silindir numuneler de dökülmüştür.

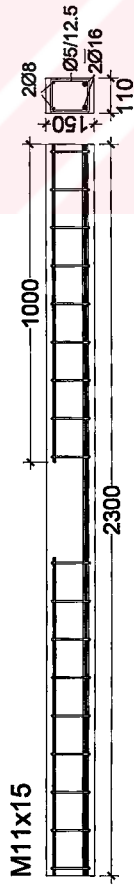
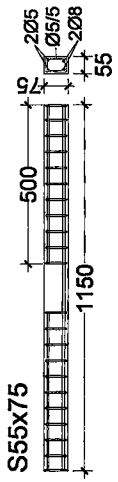
İki aşamalı yapılan beton dökümlerinde beton dayanımını bulmak amacı ile hazırlanan silindirler dahil toplam $3,35\text{m}^3$ beton dökülmüştür.



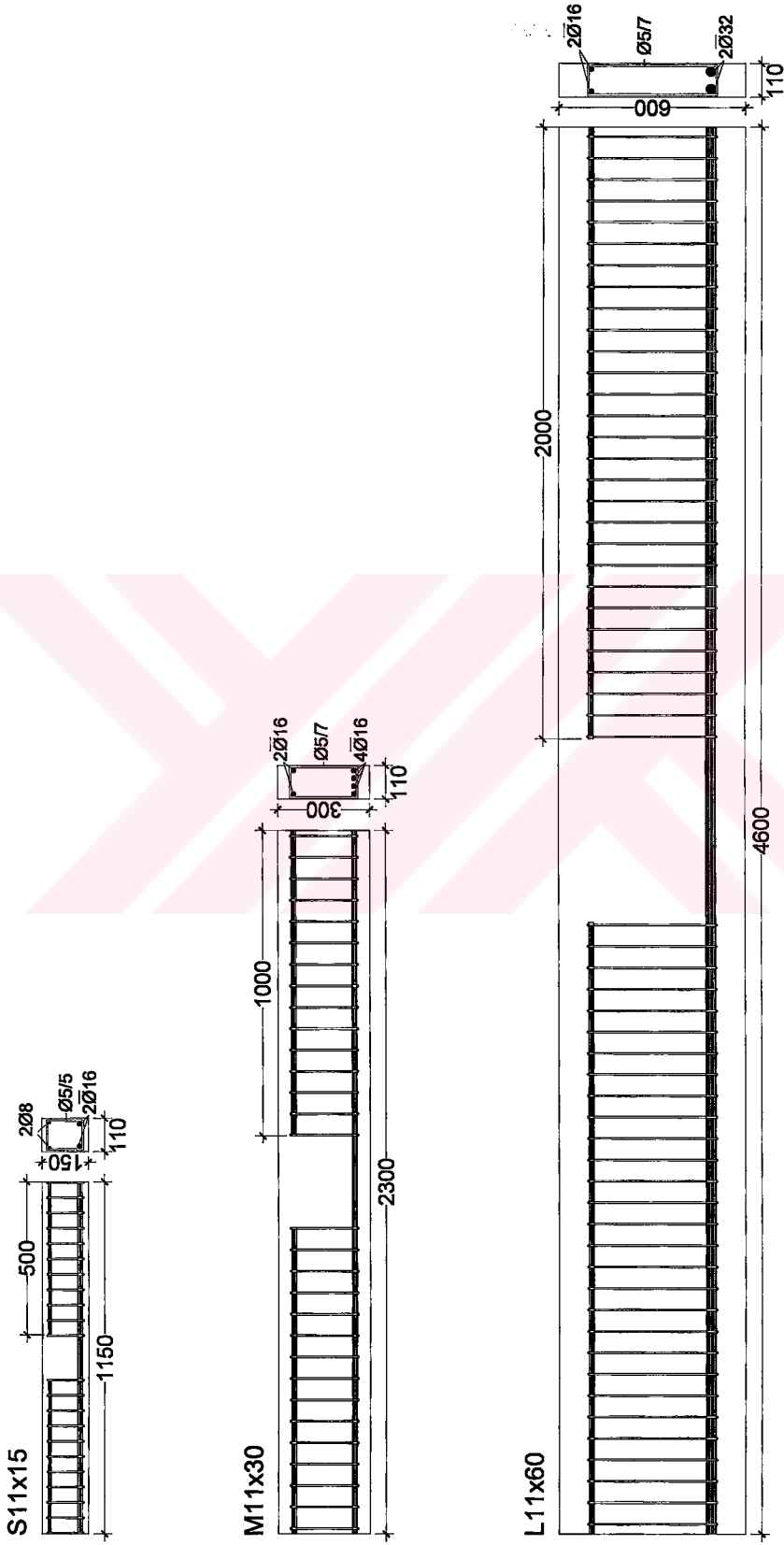
Şekil 3.2. I.Grup deney kirişlerinin donatı düzeni (birimler mm.dir)



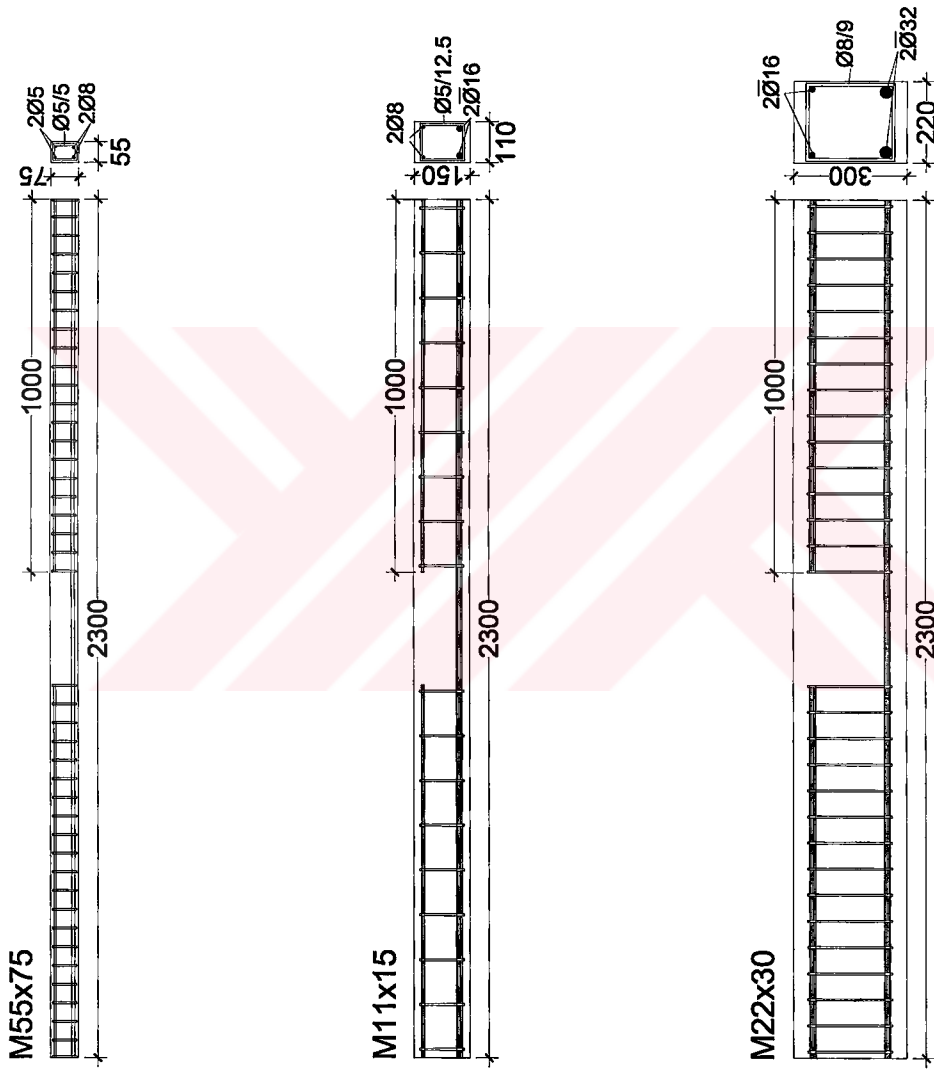
Şekil 3.3. II. Grup deney kirişlerinin donatı düzeni (birimler mm.dir)



Şekil 3.4. III. Grup deney kirişlerinin donatı düzeni (birimler mm.dir)



Şekil 3.5. IV. Grup deney kirişlerinin donatı düzeni (birimler mm.dir)



Şekil 3.6. V. Grup deney kirişlerinin donatı düzeni (birimler mm.dir)

Deney kirişleri beş günlük kür aldıktan sonra vidalarla monte edilmiş kalıplar sökülmüş ve hafif olanlar el ile, ağır olanlar vinç yardımı ile kalıplarından kaldırılmış ve kür için duracakları yere nakledilmişlerdir. Kirişlerin yerlerinden kaldırılırken çatlamaması için daha önceden düşünülen yerlerine beton dökümü sırasında kancalar monte edilmiştir. Bu kancalar, ölçüm bölgesinin dışında kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Kirişler bu kancalardan kaldırılarak kür edilecekleri yere nakledilmiş ve deney zamanı yine bu kancalardan kaldırılarak deney çerçevesine taşınmıştır.

Deney kirişleri betonları döküldükten sonra kalıpların içerisindeyken, kalıplardan çıkartıldıklarında bir arada tutulmuş ve üzerlerine ıslak çuval, naylon örtülmüştür. Bu çuvalların sürekli ıslak kalmasını sağlamak amacı ile çuvallar günde birkaç kez sulanmıştır. Deney kirişleri ile birlikte silindir numuneler de aynı çuvalların ve deney anına kadar nemli ortamlarında, naylonun altında tutulmuştur. Tüm kür süresi içerisinde bütün deney elemanlarının aynı şartlar altında kalmasına özen gösterilmiştir.

3.3. Kullanılan Malzemeler

Deney elemanlarının üretilmesinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri bu bölümde sunulacaktır.

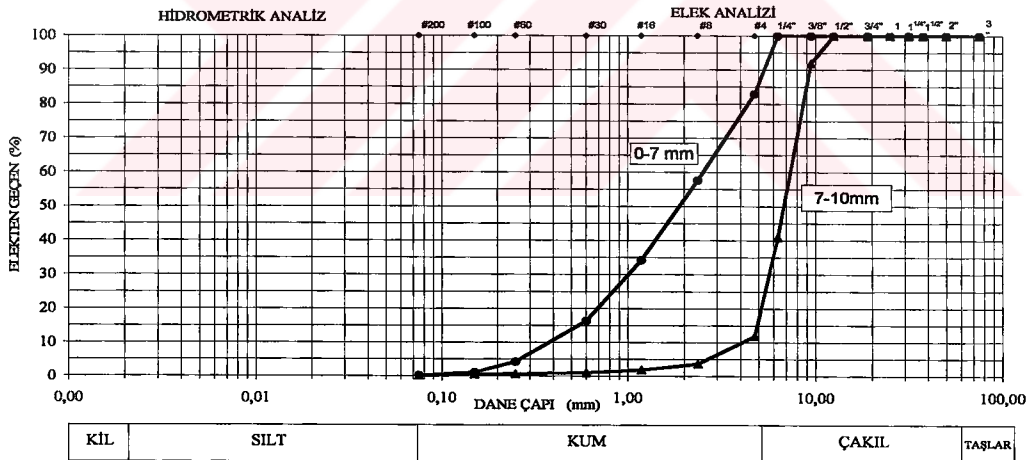
3.3.1. Beton

Denge altı donatılı deney elemanları tasarlandığı için beton basınç dayanımına üst sınırlama konmuştur. Denge üstü donatılı kirişlerde göçmenin basınç bölgesinde oluşan beton ezilmesi sonucu meydana gelmesi nedeniyle beton eksenel basınç dayanımı deney elemanlarının taşıma gücü yönünden çok daha fazla önem kazanmaktadır. Ayrıca yapı mekaniği laboratuvarında yer alan eğilme çerçevesi 300kN kapasiteye sahiptir. Bu nedenle tasarlanan deney elemanlarının kapasiteleri etkileyecek olan beton dayanımına sınırlama getirilmiştir. Yapılan analizlerde eldeki

donatı ve kesit genişlikleri dikkate alınarak beton basınç dayanımının 22MPa değerini aşmayacak şekilde ayarlanması planlanmıştır. Yapılan birkaç denemeden sonra eldeki agreg ve kum için 18-22MPa civarında beton basınç dayanımı elde edilebilecek karışım belirlenmiştir.

Beton kum ve çakıl agreg karışımından elde edilmiştir. Karışım 0-7mm boyundaki ince agreg (kum) ve 7-10mm boyutundaki kaba agreg (çakıl) karışımından oluşturulmuştur. Agreg karışımının en büyük dane çapı 10 mm'dir. Kum karışımının en büyük dane çapı 7mm'dir. Kullanılan karışımın elek analizi grafiği Şekil 3.7 de verilmiştir.

Yapılan elek analizi sonucunda yönetmeliğe uygun Fuller Parabolü ile uyumlu iyi bir karışım elde etmek için %45 çakıl ve %55 oranlarında kum kullanılması gerektiği görülmüştür. Tüm bu karışım oranları beton dökümünde sabit tutulmuştur. Beton



Şekil 3.7. Kullanılan agreg ve kumun elek analizinden bulunan granülometri eğrisi

üretiminde normal Portland çimentosu kullanılmıştır (NPÇ 32.5). Beton karışım oranı ağırlıkça agreg %45, kum %55, çimento % 25 ve su, çimentoya oranı %60 dır. Her deney elemanının deneneceği gün önceden belirlenmiş ve aynı gün denenecek elemanlar için üçer adet silindir numunesi kirşlerle eş zamanlı olarak dökülmüştür.

Silindir numuneler 150mmx300mm'lik elik kalıplara dökülmüştür. Bu silindirler numunelerle birlikte aynı gün kalıplarından çıkartılmış ve numunelerle birlikte kür edilmiştir. Kirişlerin betonunun dökümü sırasında aynı karışımdan alınan silindir numuneler deney günü denenmiştir. Kirişlerin beton basınç dayanımı değerleri izelge 3.2 de her kirişin 3er adet silindir ortalama basınç değerleri verilmiştir. Tüm numunelere eksenel yüklemenin başarı ile uygulanabilmesi için kükürt-grafit karışımı başlıklar yapılmıştır.

Çizelge 3.2. Kirişlerin silindir basınç değerleri

Kiriş Adı	Silindir Basınç Değeri (MPa)
S11.15	17.5
M11.15	17.2
L11.15	20.4
L11.30	20.4
L11.60	20.5
S55.75	17.2
L22.30	17.3
M11.30	17.5
M55.75	20.7
M22.30	20.7

Beton silindirlerin eksenel basınç dayanımları 17,2-20,7 MPa arasında değişim göstermektedir. Silindirlerin ortalama basınç dayanımı 18,9 MPa dır.

3.3.2. Donatı

Deney kirişlerinde kullanılan donatılar İzmir Demir elik Fabrikasından bu deneyde kullanılmak üzere laboratuvarımıza bağış yolu ile sağlanmışır. Nervürlü S420 sınıfında üretilen donatılar siparişimiz üzerine fabrikada kesilmiş, kargo ile yollanmış, hazır halde teslim alınmıştır. Deney kirişlerimizde $\Phi 32$, $\Phi 16$ ve $\Phi 8$ 'lik

boyuna donatılar ve S220 sınıfında $\Phi 8$ ve $\Phi 5$ 'lik etriyeler kullanılmıştır. Donatı çekme deneyi Fakültemiz Makina Mühendisliği Bölümünde bulunan yüklem ve yerdeğiştirme kontrollü test yapabilen DARTEC Marka eksenel çekme deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. EK-D'de $\Phi 32$, $\Phi 16$ ve $\Phi 8$ 'lik boyuna donatıların ve $\Phi 8$ ve $\Phi 5$ 'lik etriyelerin donatı çekme deney sonuçları elde edilmiş gerilme-birim uzama grafikleri ve test aracının vermiş olduğu mekanik özellikler çizelge olarak verilmiştir.

Çizelge 3.3'de donatıların mekanik özellikleri toplu olarak sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Donatı dayanımları

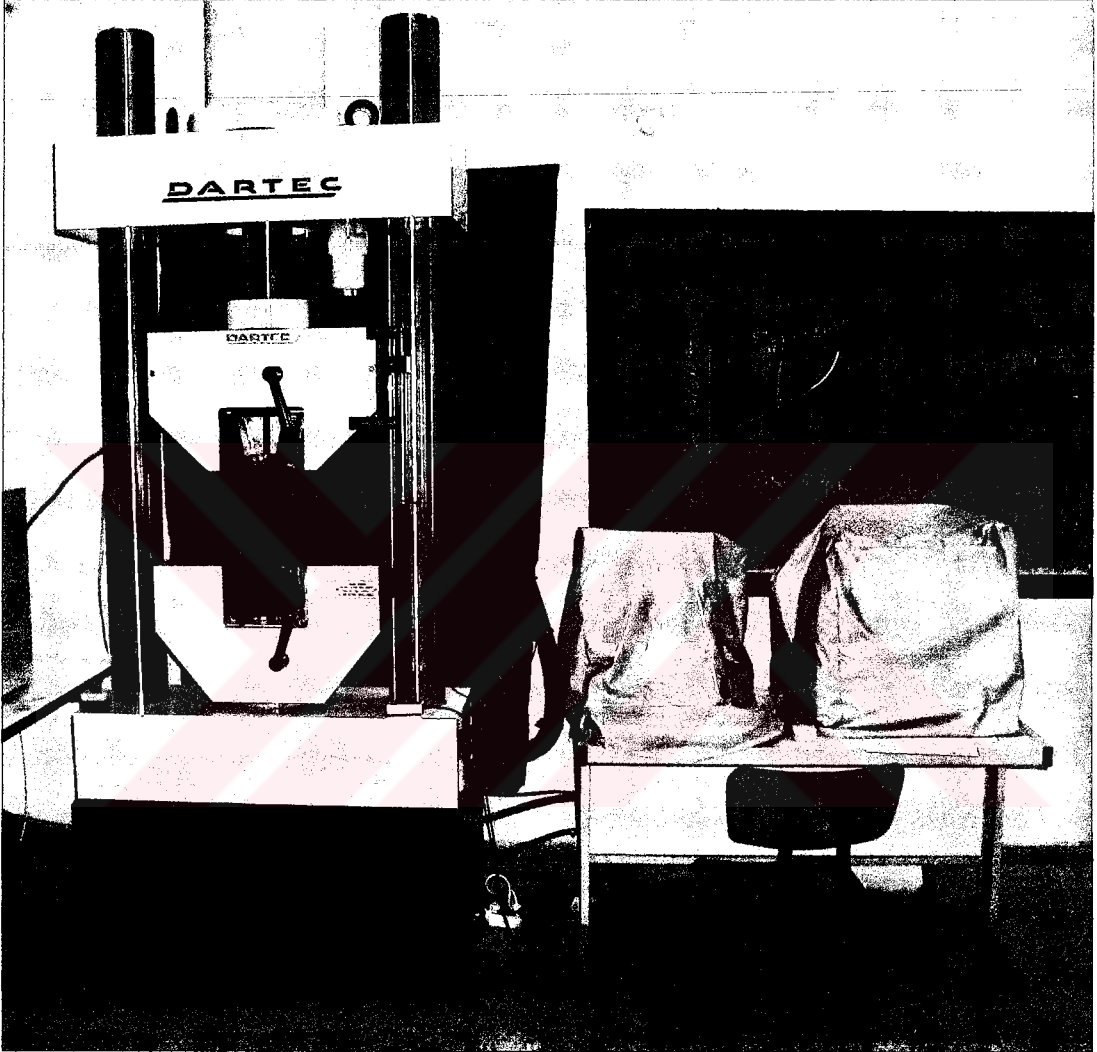
Donatı Çapı Φ (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı f_y (MPa)	En Yüksek Dayanım f_{su} (MPa)
32	S420	407,33	562,00
16	S420	514,00	608,67
8	S420	530,67	628,67
8	S220	300,67	338,33
5	S220	267,67	293,33

Eksenel çekme deneyi düzeneğinden alınmış bir fotoğraf Resim 3.2'de sunulmuştur.

3.4. Deney Düzeneği

Deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yer alan 4000 mm yüklem açıklığı ve 300kN yük taşıma kapasitesine sahip HiTec marka 1998 model eğilme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Deney çerçevesinin eğilme rijitliği 565 kN dır. Deney elemanları eğilme çerçevesine çelikten yapılmış sabit ve kayıcı mesnet özelliklerinde ara parçalar ile mesnetlenmişlerdir. Yüklem kolonuna 300kN basınç kapasiteli bir hidrolik krika, 300kN basınç kapasiteli bir yük hücresi ve bir adet mafsal yerleştirilmiştir.

Deney elemanlarına yükleme monotonik olarak uygulanmıştır. Yük sıfır düzeyinden deney elemanları basınç kırılması şeklinde

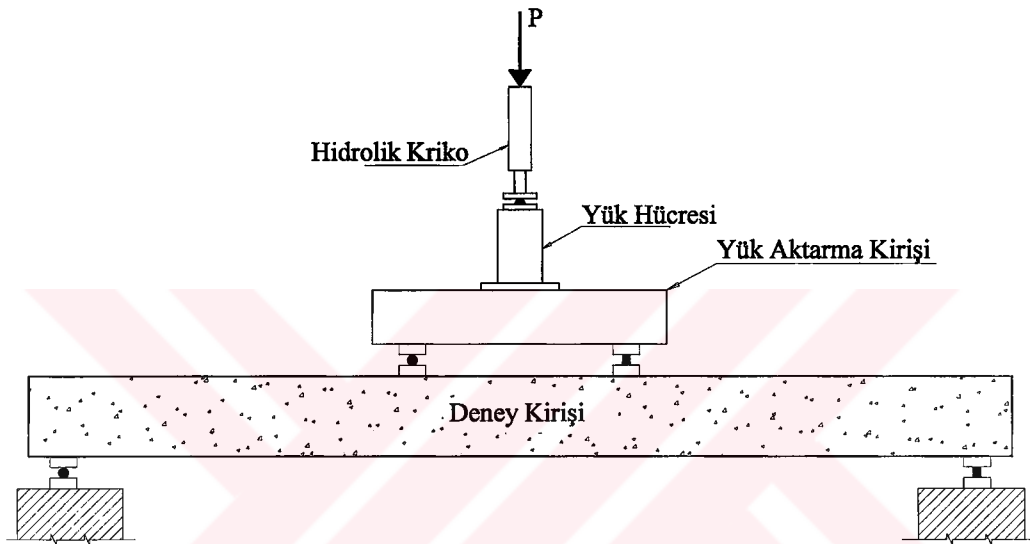


Resim 3.2. Dartec Donatı Çekme Aygıtı

göçene kadar boşaltılmadan ve tekrarsız olarak monotonik bir şekilde etkitilmiştir. Şekil 3.8’de deney düzeneği görülmektedir.

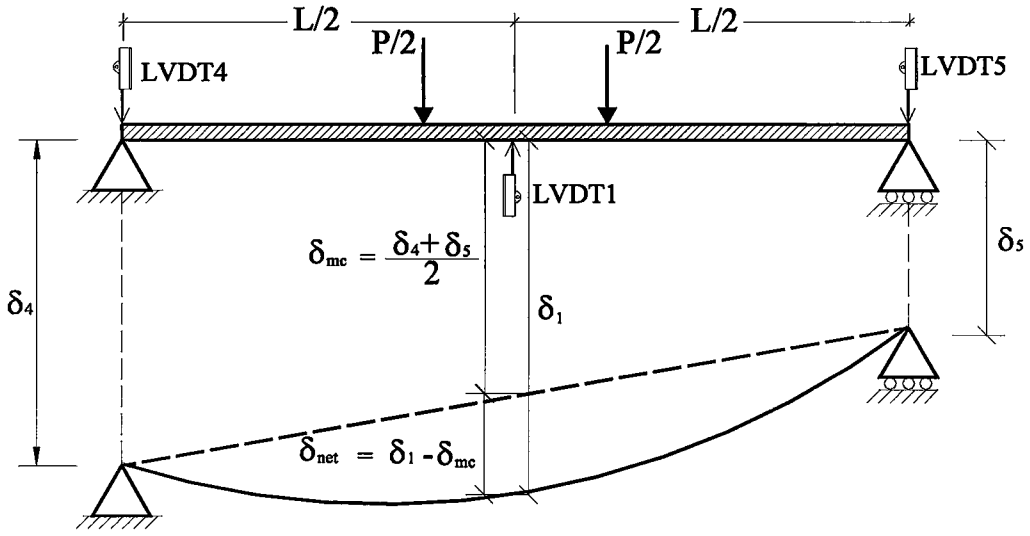
Deney sırasında meydana gelen yerdeğiştirmeler ve yük elektronik olarak bilgisayara bir data toplayıcı aracılığı ile bağlanmış elektronik yerdeğiştirme ölçerler (LVDT) kullanılarak ölçülmüştür. Daha sonra data toplayıcı tarafından derlenen yerdeğiştirme değerleri deney sırasında deneyin izlenmesi ve verilerin kaydedilmesi için

geliştirilmiş olan özel bir bilgisayar yazılımı ile bilgisayara kaydedilmiştir. Bu bilgisayar yazılımı ile deney sırasında deney elemanlarının orta nokta yerdeğiştirmesinin yüke bağlı olarak değişen yük-yerdeğiştirme grafiği izlenerek deney yapılmıştır. Daha sonra bilgisayardaki veriler değerlendirilerek deney sonuçlarının yorumlanması sağlanmıştır.



şekil 3.8. Deney düzeneği

Deney sırasında yükleme analitik olarak hesaplanmış kırılma yüküne beş dakikada ulaşılacak şekilde y k kontrollü olarak elle kumanda edilen bir hidrolik kriko ile yapılmıştır. Deney elemanlarından orta nokta yerdeğiştirmesi, mesnet çökmesi değerleri ve momentin maksimum olduğu iki yükleme arasından eğrilik değerinin hesaplanabilmesi amacıyla iki adet eğrilik     m  alınmıştır. Kiriş orta nokta yerdeğiştirmesi değeri mesnetlerde oluşan     me     mleri kullanılarak düzeltilmiştir. Mesnet     meleri sonucunda kiriş orta nokta yerdeğiştirmesinde oluşan hatanın düzeltilmesi için kullanılan yerdeğiştirme geometrisi şekil 3.9'da ve kullanılan eşitlik ise Denklem 3.1'de sunulmuştur.

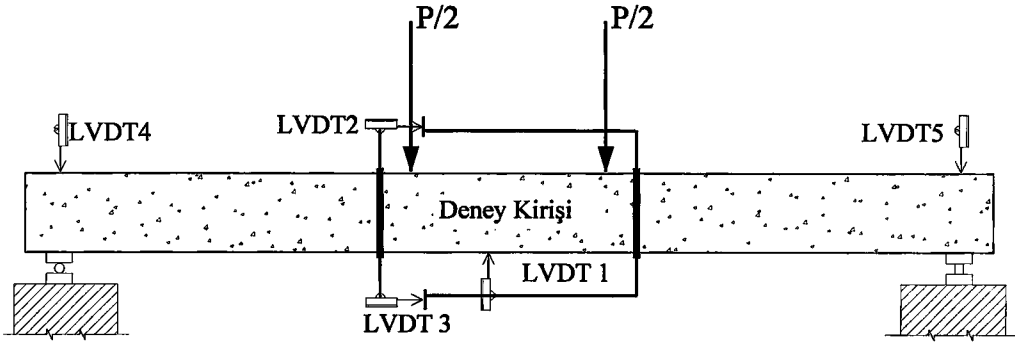


Şekil 3.9. Kiriş orta nokta yerdeğiştirme geometrisi

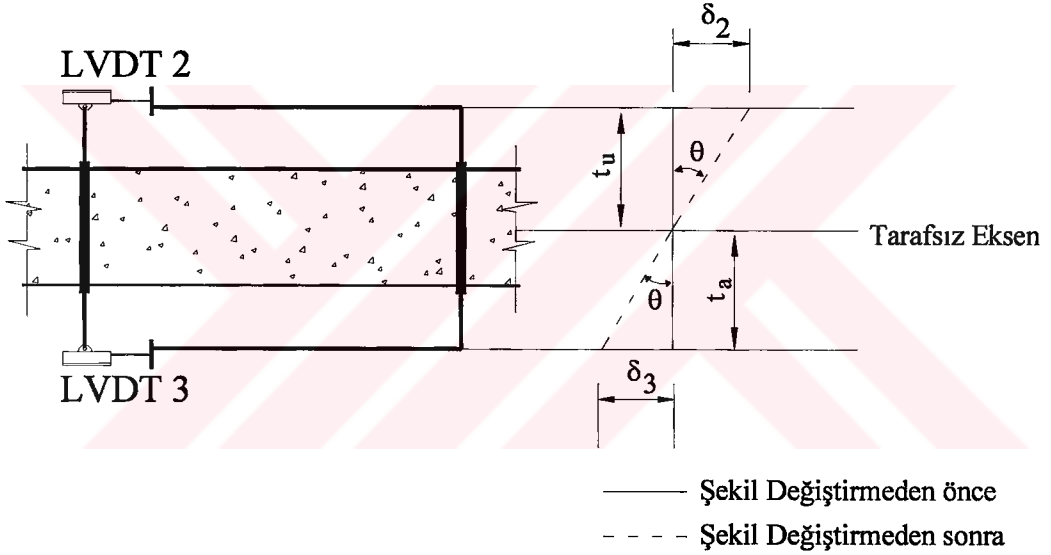
$$\delta_{net} = \delta_1 - \frac{\delta_4 + \delta_s}{2} \quad [3.1]$$

δ_{net} : Hesaplanan net kiriş orta nokta yerdeğiştirmesi, δ_1 : Ölçülen kiriş orta nokta yerdeğiştirmesi, δ_s : Sağ mesnet çökmesi ölçümü, δ_4 : Sol mesnet çökmesi ölçümüdür.

Deney elemanlarından alınan ölçümler Şekil 3.10'da sunulmuştur. δ_2 ve δ_3 deplasman ölçümleri deney elemanlarında momentin en büyük olduğu orta bölgeden alınan ve eğrilik hesaplamasında kullanılması düşünülen ölçümlerdir. Eğrilik değerinin hesaplanması için kullanılan yerdeğiştirme geometrisi Şekil 3.11'de ve hesaplamada kullanılan eşitlik ise Denklem 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Ölçüm düzeneği

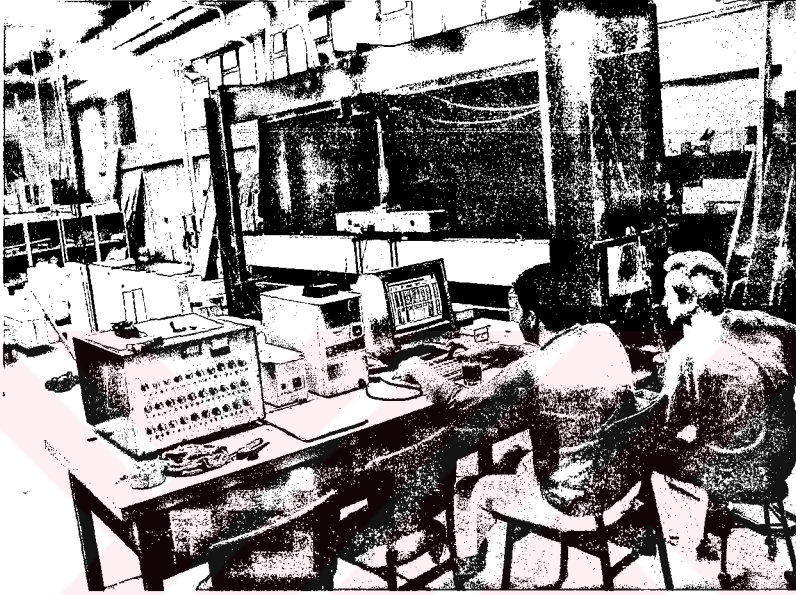


Şekil 3.11. Moment-eğrilik hesaplamasında kullanılan yerdeğiştirme geometrisi

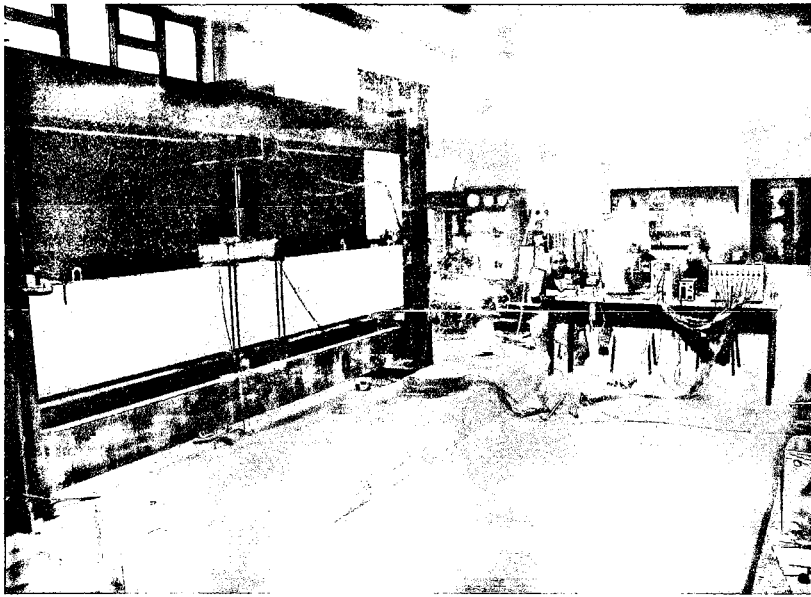
$$\theta = \frac{\delta_2}{a} = \frac{\delta_3}{b} \quad (3.2)$$

3.5. Deneylerden Resimler

Deneyler sırasında çekilmiş bazı fotoğraflar ve bazı deney kirişleri aşağıda verilmiştir. Bütün deney kirişlerine ait fotoğraflar EK-C de verilmiştir.



Resim 3.3. Deney öncesi hazırlıklar yapılırken



Resim 3.4. Deney sırasında

Aşağıda L11.60c kirişinin deney sırasında çekilen fotoğrafları görülmektedir.



Resim 3.5. L11.60c kirişi deneyden önce



Resim 3.6.L11.60c kirişi yük başlangıç fotoğrafı



Resim 3.7.L11.60c kirişi yük ortası fotoğrafı



Resim 3.8. L11.60c kirişi yükleme sonrası fotoğrafı

Dördüncü bölümde yer alan yük-yerdeğiştirme grafikleri hesaplanan net kiriş orta noktası yerdeğiştirmesi değerlerinin yüke karşı çizildiği grafiklerdir. Ayrıca moment

eğrilik grafiklerinde de hesaplanan eğrilik değerleri bu kısımda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Grafikler ile ilgili yorumlar ve deney sonuçlarının karşılaştırılması dördüncü bölümde yer alacaktır.

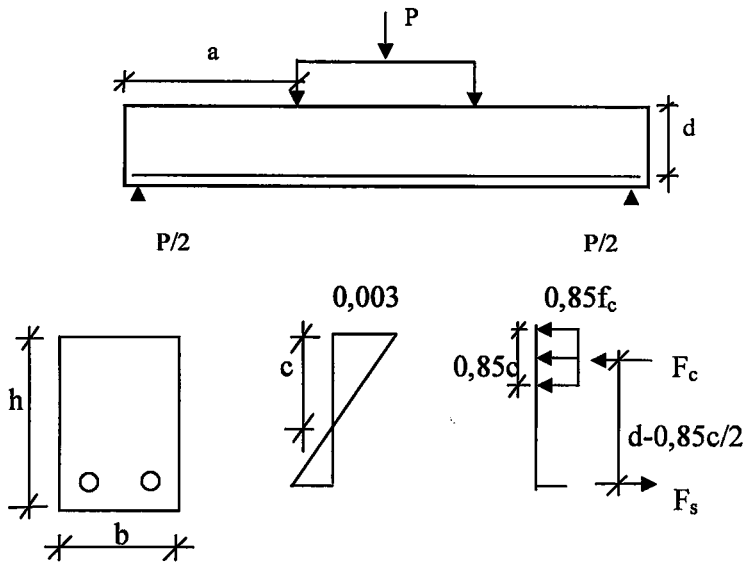


4. DENGİ ÜSTÜ DONATILI KİRİŞ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Denge üstü donatılı kirişlerin irdelenmesi bu bölümde verilmiştir. Sonuçların analizinde analitik olarak hesaplanan kırılma yükleri ile gerilmeler deney sonuçlarından elde edilen kırılma yükleri ve gerilmeler çizelge halinde verilerek kıyaslanmıştır. Boyut etkisi parametreleri doğrusal analizlerle ve Levenberg-Marquardt (80) algoritması ile hesaplanmış ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca farklı karakteristik boyut seçiminin boyut etkisi analizlerine etkisi incelenmiştir. Yük-yerdeğiştirme eğrileri ve moment-eğrilik eğrileri kendi içlerinde kıyaslanmıştır.

4.1. Deney Sonuçları

Bütün denge üstü donatılı kirişlerin, kırılma yükleri ve gerilmeleri analitik ve deney sonucuna bağlı olarak hesaplanmıştır. Analitik kırılma yükleri hesaplanırken taşıma gücü teorisi kullanılmış ancak malzeme dayanımları yerine karakteristik değerlerle hesap yapılmıştır. Analitik kırılma yükü, analitik gerilme, deneysel gerilme ve deneysel kırılma yükü değerlerinin bulunuşu aşağıda verilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Kırılma yükü P'nin bulunması

Deneysel eğilme gerilmesi değeri

$$f = My/I \quad [4.1]$$

dir. Burada f eğilme gerilmesi, eylemsizlik momenti $I = bh^3/12$, gerilmenin en büyük değerini verecek kiriş yarı yüksekliği $y = h/2$ dir. Eğilme momenti,

$$M = Pa/2 \quad [4.2]$$

dir. Burada a mesnetle yük arasındaki net uzaklık, P deneylerden elde edilen kırılma yüküdür.

Analitik gerilmenin bulunmasında beton ezilmiş ve donatı da akmamış olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Bu düşünceyle betonun aldığı kuvvet F_c

$$F_c = 0,85f_c b 0,85c \quad [4.3]$$

dir. Burada f_{ck} deney sırasında kırılan silindirlerden elde edilen betonun karakteristik basınç dayanımı, b kiriş genişliği, c tarafsız eksenin kiriş üst yüzünden olan uzaklığıdır. Donatıdaki gerilme F_s

$$F_s = A_s f_y \quad [4.4]$$

dir. Burada A_s çekme donatısı alanı, f_y ise donatıdaki bilinmeyen gerilme olup aşağıdaki bağıntıdan elde edilir [4.5].

$$f_y = \frac{0,003}{c} (d - c) E_s \quad [4.5]$$

Burada d donatı ağırlık merkezinden kirişin üst lifine olan uzaklık (yararlı yükseklik), E_s çeliğin elastisite modülüdür. F_c nin F_s ye eşit olması ilkesinden [4.3-4.5] bağıntıları yardımı ile,

$$A_s \frac{0,003}{c} (d - c) E_s = 0,7225 f_{ck} b c \quad [4.6]$$

elde edilir. Eşitlik [4.6] c ye göre yeniden düzenlenirse

$$0,7225 f_{ck} b c^2 + 0,003 A_s E_s c - 0,003 A_s E_s d = 0 \quad [4.7]$$

ikinci derece cebrik eşitlik elde edilir. Buradan bulunan anlamlı (pozitif) c ile elde edilecek kuvvet kolu yardımı ile iç kuvvetlerin momentini

$$M = F_s \left(d - \frac{0,85c}{2} \right) \quad [4.8]$$

olarak bulunur. Analitik kırılma yükü bulunan moment yardımı ile

$$P = 2M/a \quad [4.9]$$

elde edilir. Analitik gerilme değeri ise [4.1] bağıntısından elde edilir.

Bütün deney kirişleri için deneysel kırılma yükünün, kirişe ait silindir basınç gerilmesinin, mesnet ile yük arasındaki a uzaklığının, deneysel gerilme değerinin, analitik kırılma yükünün ve analitik gerilmenin birlikte gösterildiği çizelge aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Analitik ve deneysel kırılma yükleri ve gerilmeler

Numune	Deneysel kırılma yükü (kN)	Silindir basınç gerilmesi f_{ck} (MPa)	Yük-mesnet arası uzaklık a (mm)	Deneysel gerilme (MPa)	Analitik kırılma yükü P (kN)	Analitik gerilme (Mpa)
S5.7a	4,794	17,2	482,5	22,4	5,13	24,0
S5.7b	5,954	17,2	480	27,7	5,16	24,0
S5.7c	5,644	17,2	481	26,3	5,15	24,0
S11.15a	62,088	17,5	461	34,6	43,62	24,3

Çizelge 4.1 devam

S11.15b	38,660	17,5	465	21,7	43,24	24,3
S11.15c	56,521	17,5	462,5	31,6	43,48	24,3
M5.7a	4,253	20,7	987,5	40,7	2,94	28,1
M5.7b	4,021	20,7	990	38,6	2,93	28,1
M5.7c	4,407	20,7	985	42,0	2,94	28,1
M11.15a	20,799	17,2	962,5	24,2	20,58	24,0
M11.15b	22,577	17,2	971,5	26,5	20,39	24,0
M11.15c	22,423	17,2	966,5	26,2	20,50	24,0
M11.30a	100,052	17,5	935,5	28,3	85,98	24,3
M11.30b	104,923	17,5	924,5	29,3	87,00	24,3
M11.30c	95,645	17,5	945,5	27,4	85,07	24,3
M22.30a	176,135	20,7	955	25,4	194,34	28,1
M22.30b	193,223	20,7	925	27,0	200,65	28,1
M22.30c	193,996	20,7	924,5	27,1	200,76	28,1
L11.15a	11,289	20,4	2271	27,0	10,09	27,7
L11.15b	11,443	20,4	1980,5	27,4	11,57	27,7
L11.15c	9,046	20,4	1978,5	21,6	11,58	27,7
L11.30a	48,402	20,4	1970	28,8	46,53	27,7
L11.30b	45,232	20,4	1971	27,0	46,51	27,7
L11.30c	48,093	20,4	1980	28,8	46,29	27,7
L11.60a	143,738	20,5	1890,5	20,5	194,75	27,8
L11.60b	161,444	20,5	1886	23,0	195,21	27,8
L11.60c	151,702	20,5	1885	21,6	195,31	27,8
L22.30a	78,634	17,3	1875	22,3	84,95	24,1
L22.30b	77,011	17,3	1887,5	22,0	84,39	24,1
L22.30c	76,701	17,3	1902	22,1	83,75	24,1

Çizelge 4.1 incelenirse, numune boyutları büyüdükçe deneysel kırılma gerilmelerinde analitik kırılma gerilmelerine göre düşüş görülmektedir. En küçük numunelerde deneysel veriler analitik verilerden daha büyük olmakta, numuneler

büyüdükçe deneysel veriler analitik verilerden daha küçük olmaktadır. Bu durum boyut etkisinin varlığını göstermektedir. Deneysel veriler boyut etkisi analizinde kullanılırken aynı deney elemanları içerisinde diğer ikisinden çok farklı kırılma yükü veren deney elemanları hesaplarda kullanılmamıştır.

4.2. Bazant'ın Boyut Etkisi Denklemine Göre Analiz

Bazant'ın boyut etkisi denklemine göre yapılacak analiz daha önce 2. bölümde verilmiştir. Buna göre öncelikle Bazant'ın boyut etkisi denklemindeki değişkenler doğrusal analiz ve Marquardt-Levenberg algoritması kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bulunan bu değişkenler kullanılarak doğrusal olmayan eğri üzerinde Bazant'ın boyut etkisi denklemi ve deneysel veriler gösterilmiştir.

4.2.1. Doğrusal analiz

Bazant'ın denklemindeki değişkenler 2.5.1.1-3. bölümde anlatılan doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II kullanılarak bulunmuştur. Bazı deney grupları için doğrusal analiz I daha iyi sonuç verirken diğer deney grupları için ise doğrusal analiz II daha iyi sonuç vermiştir. Değişkenler ayrıca Matlab 6.5 programında yazılmış olan bir program ile Marquardt-Levenberg algoritması ile bulunmuştur. Bu program kullanılırken algoritmaya her değişken için bir başlangıç değeri atamak gerekmektedir. Atanan her başlangıç değeri farklı kökleri bulabilmekte ve hata miktarı değişken olmaktadır. Program tarafından hesaplanan değişkenler kullanılarak $\log \sigma$ ya karşılık $\log D$ şekli çizilmiştir. Hatayı en küçük yapan başlangıç değeri bulunurken, program tarafından hesaplanan değişkenler kullanılarak çizilen eğri ile deneysel olarak bulunan $\log \sigma$ değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Aynı eğri üzerinde doğrusal analiz I, doğrusal analiz II ve Levenberg-Marquardt'dan bulunan değişkenlerin hata miktarları karşılaştırılmıştır.

4.2.2. Doğrusal olmayan gösterim

Bazant’ın boyut etkisi denklemi kullanılarak hesaplanan değişkenler ve $\log(\sigma_N/Bf_i)$ ye karşılık $\log \beta$ şekli çizilmiştir.

4.2.3. I. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analizler

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.2. de verilmiştir.

Çizelge 4.2. I. Grup için doğrusal analiz değerleri

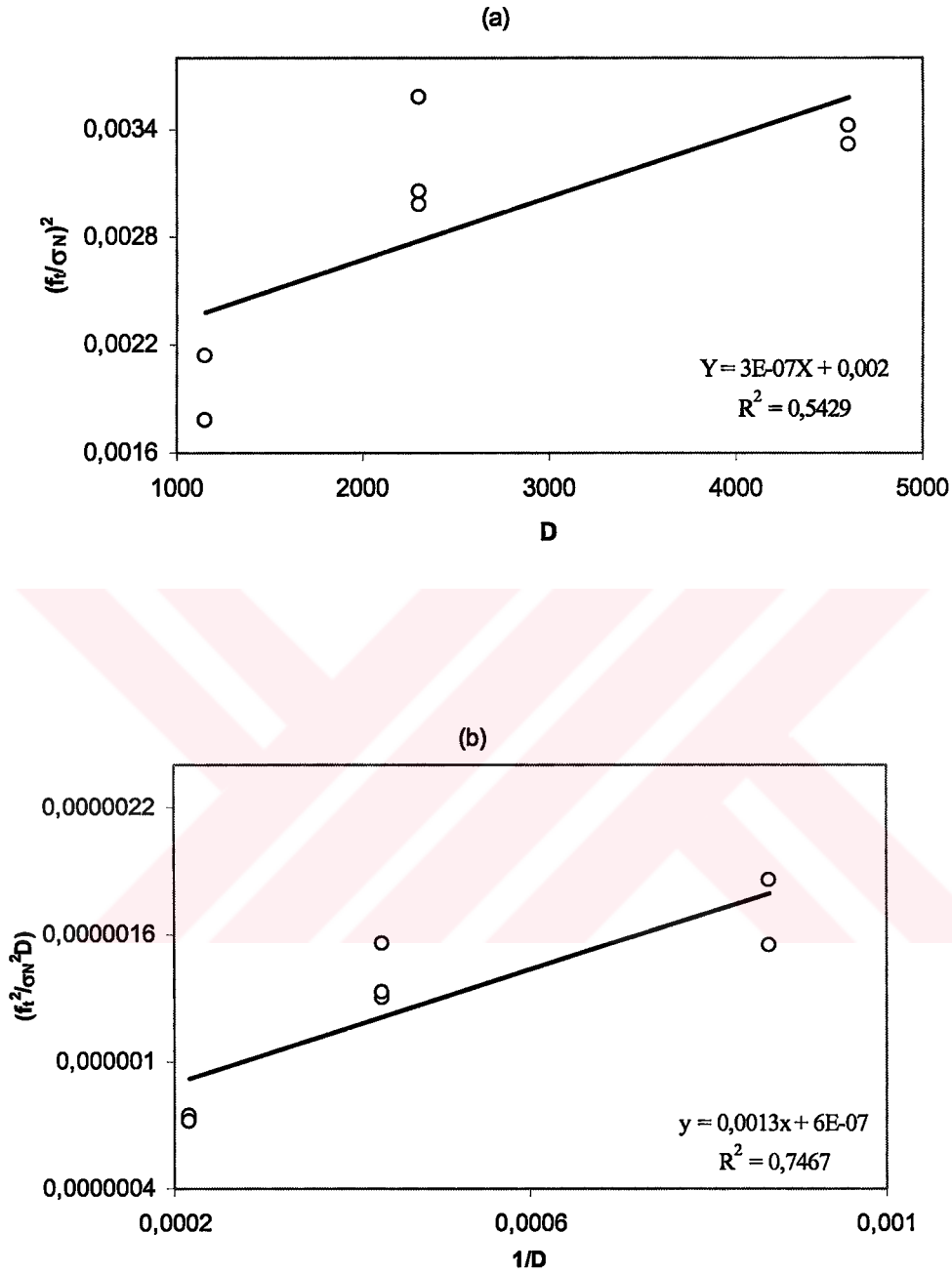
Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/mm)	$1/\sigma_N^2 D$
S11.15a	1150	0,001781	0,0009	1,5487E-07
S11.15c	1150	0,002135	0,0009	1,8567E-07
M11.15a	2300	0,003578	0,0004	1,55582E-07
M11.15b	2300	0,002981	0,0004	1,29606E-07
M11.15c	2300	0,003053	0,0004	1,32756E-07
L11.15a	4600	0,003425	0,0002	7,4458E-07
L11.15b	4600	0,003312	0,0002	7,19924E-07

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.3. de verilmiştir. Çizelgedeki “R” değeri korelasyon değeridir. En iyi korelasyon değeri 1, en kötü korelasyon değeri 0’dır. Çizelgedeki “hata” değeri Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak hesap yapılırken oluşan hatadır.

Çizelge 4.3. I. Grup için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,0000003	0,0013	-
C	0,002	0,0000006	-
$D_0 (mm)$	6666,67	2166,7	5557,6
$Bf_i (MPa)$	22,3607	27,73501	33,97740
R	0,74	0,86	-
hata	-	-	51,6

Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz II nin bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.2 de I. Grup için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.

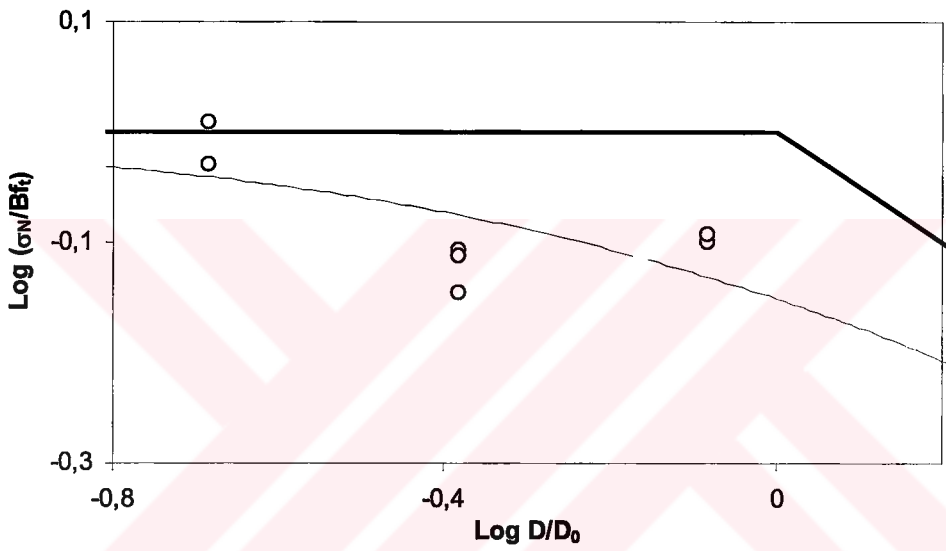


Şekil 4.2. I.Grup a) doğrusal analiz I b) doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.3 de verilmiştir. Bu eğride doğrusal analiz I den, doğrusal analiz II den ve Levenberg-Marquardt algoritmasından bulunan değişkenler

kullanılarak üç ayrı veri oluşturulmuş, en az hata miktarını veren veri çizimde gösterilmiştir.

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.3. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değere “hata” denilmiştir. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.4 de verilmiştir.



Şekil 4.3 I.Grup için doğrusal olmayan analiz

Çizelge 4.4. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_t

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,097018	0,095421	0,111497

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Doğrusal analiz II’dir. Bu nedenle I. Grup için $Bf_t = 27,73501$ MPa ve $D_o = 2166,7$ mm. seçilmiştir.

4.2.4. II. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.5. de verilmiştir.

Çizelge 4.5. II. Grup için doğrusal analiz değerleri

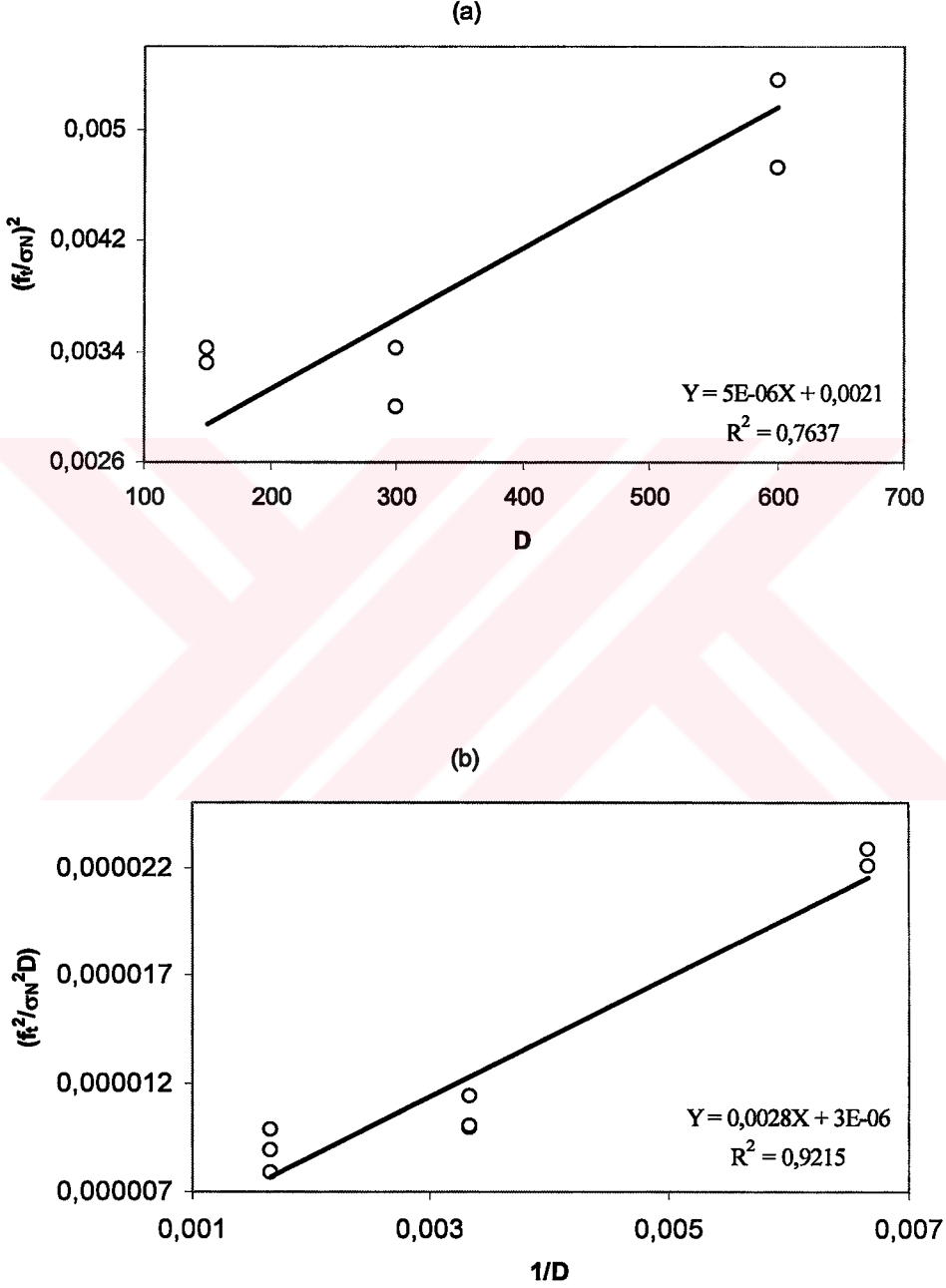
Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/mm)	$1/\sigma_N^2 D$
L11.15a	150	0,003425	0,006667	2,28338E-05
L11.15b	150	0,003312	0,006667	2,20777E-05
L11.30a	300	0,002993	0,003333	9,97732E-06
L11.30b	300	0,003424	0,003333	1,14132E-05
L11.30c	300	0,003001	0,003333	1,00041E-05
L11.60a	600	0,005926	0,001667	9,87620E-06
L11.60b	600	0,004720	0,001667	7,86610E-06
L11.60c	600	0,005351	0,001667	8,91828E-06

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.6. da verilmiştir.

Çizelge 4.6. II. Grup için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

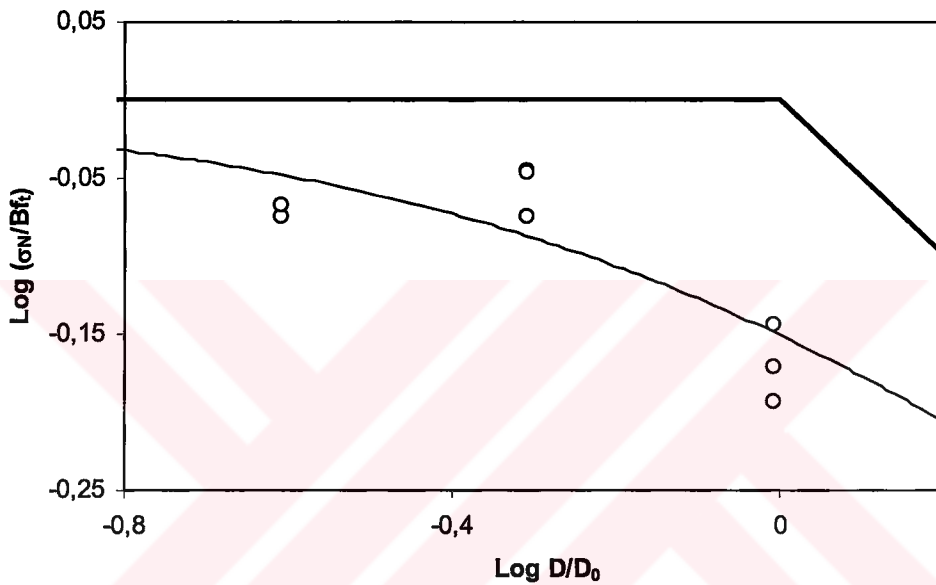
Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,000005	0,0028	-
C	0,0021	0,000003	-
D_0 (mm)	420	933,333	609,58
Bf_i (MPa)	21,82179	11,95468	32,0955
R	0,87	0,96	-
hata	-	-	24,9

Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz II nin bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.4 de II. Grup için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.4. II.Grup a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.5 de verilmiştir. Bu eğride doğrusal analiz I den, doğrusal analiz II den ve Levenberg-Marquardt algoritmasından bulunan değişkenler kullanılarak üç ayrı veri oluşturulmuş, en az hata miktarını veren veri çizimde gösterilmiştir.



Şekil 4.5. II.Grup için doğrusal olmayan analiz

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.5. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.7 de verilmiştir.

Çizelge 4.7. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,008748	0,007395	0,007085

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle II. Grup için $Bf_i=32,0955$ MPa ve $D_o= 609,58$ mm seçilmiştir.

4.2.5. III. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

III.Grupta üç boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Bu grupta karakteristik boy “ D ” nin seçiminin kırılma mekaniği ve Bazant’ın boyut etkisi parametrelerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu nedenle karakteristik boyut olarak üç ayrı “ D ” seçilmiştir.

4.2.5.1. III. Grup A deneyler

Grup A için karakterisitk boy “ D ”, kiriş genişliği olarak seçilmiştir. Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.8. de verilmiştir.

Çizelge 4.8. III. Grup A için doğrusal analiz değerleri

Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/mm)	$1/\sigma_N^2 D$
S5.7b	55	0,002743	0,018182	4,98804E-05
S5.7c	55	0,003040	0,018182	5,52797E-05
M11.15a	110	0,003578	0,009091	3,25307E-05
M11.15b	110	0,002981	0,009091	2,70995E-05
M11.15c	110	0,003053	0,009091	2,77580E-05
L22.30a	220	0,004247	0,004545	1,93030E-05
L22.30b	220	0,004369	0,004545	1,98595E-05
L22.30c	220	0,004338	0,004545	1,97162E-05

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.9. da verilmiştir.

Çizelge 4.9. III. Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

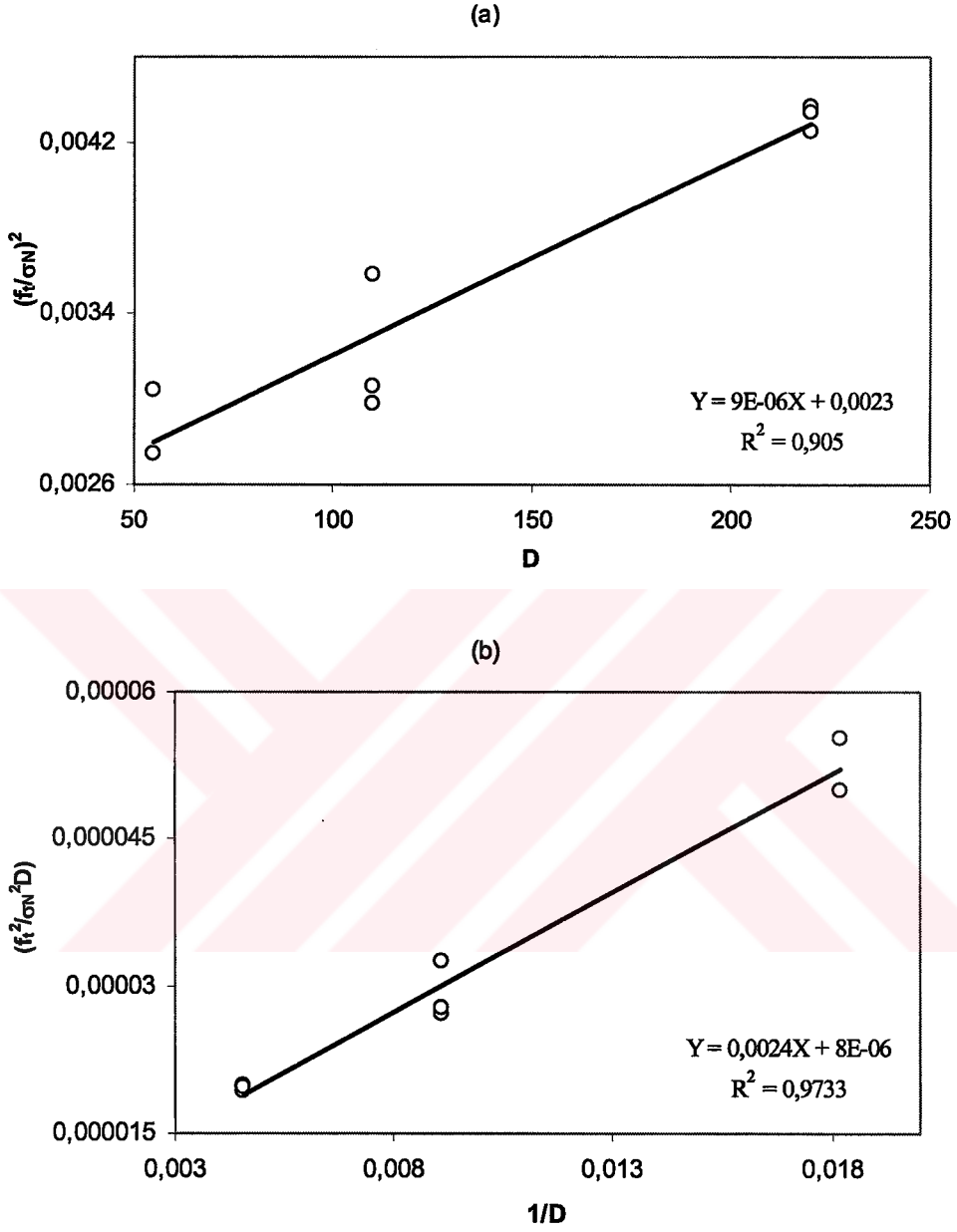
Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,000009	0,0024	-

Çizelge 4.9 Devam

C	0,0023	0,000008	-
D_0 (mm)	255,56	300	277,733
Bf_i (MPa)	20,8514	20,4124	29,81305
R	0,95	0,99	-
Hata	-	-	4,9

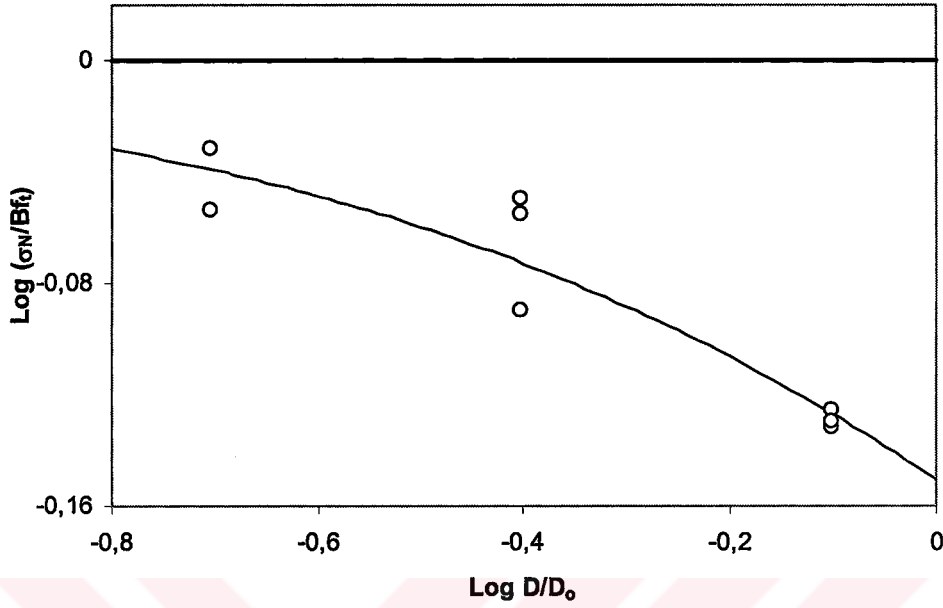
Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz II nin bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.6 da III. Grup A için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.





Şekil 4.6. III.Grup A a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.7 de verilmiştir.



Şekil 4.7. III.Grup A için doğrusal olmayan analiz

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.7. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.10 de verilmiştir.

Çizelge 4.10. En uygun analiz değerleri ve D_0 ve B_{fi}

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,001522	0,002110	0,001420

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle III. Grup A için $B_{fi} = 277,733$ MPa ve $D_0 = 29,81305$ mm seçilmiştir.

4.2.5.2. III. Grup B deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

III.Grup B için karakterisitk boy " D ", kiriş yüksekliği olarak seçilmiştir. Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.11. de verilmiştir.

Çizelge 4.11. III. Grup B için doğrusal analiz değerleri

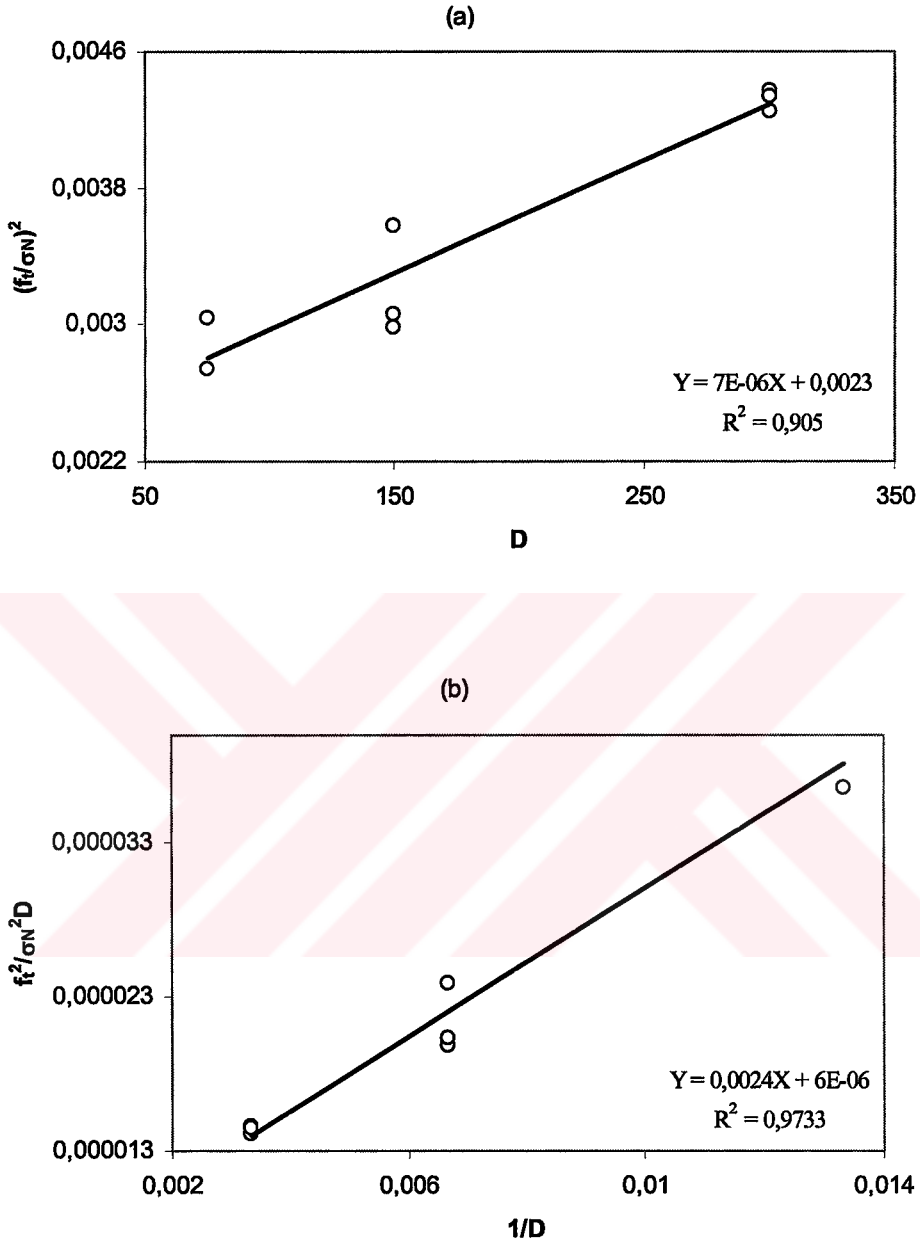
Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/mm)	$1/\sigma_N^2 D$
S5.7b	75	0,002743	0,013333	3,6578E-05
S5.7c	75	0,003040	0,013333	4,0538E-05
M11.15a	150	0,003578	0,006667	2,3855E-05
M11.15b	150	0,002981	0,006667	1,9873E-05
M11.15c	150	0,003053	0,006667	2,0359E-05
L22.30a	300	0,004247	0,003333	1,4116E-05
L22.30b	300	0,004369	0,003333	1,4564E-05
L22.30c	300	0,004338	0,003333	1,4459E-05

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.12. de verilmiştir.

Çizelge 4.12. III. Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

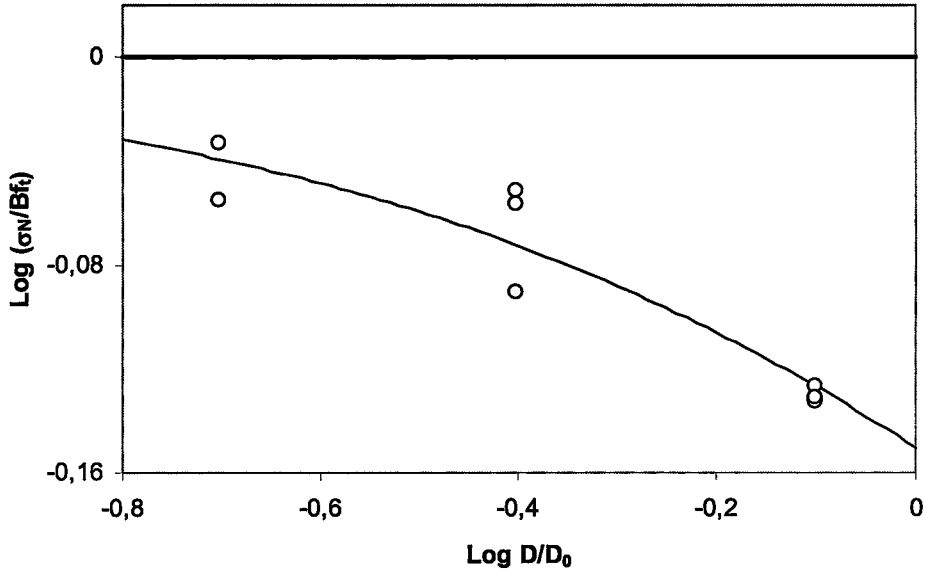
Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,000007	0,0024	-
C	0,0023	0,000006	-
D_0 (mm)	328,5714	400	378,7272
Bf_t (MPa)	20,8514	20,4124	29,91305
R	0,95	0,99	-
hata	-	-	4,9

Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz II nin bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.8 de III. Grup B için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.8. III.Grup B a) doğrusal analiz I, b)doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.9 da verilmiştir.



Şekil 4.9 III.Grup B için doğrusal olmayan analiz

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.9. da veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.13 de verilmiştir.

Çizelge 4.13. En uygun analiz değerleri ve D_o ve B_{fi}

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,001475	0,001619	0,001410

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle III. Grup A için $B_{fi}= 29,91305$ MPa ve $D_o= 378,7272$ mm seçilmiştir.

4.2.5.3. III. Grup C deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

III.Grup B için karakterisitk boy " D ", giriş boyu olarak seçilmiştir. Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.14. de verilmiştir.

Çizelge 4.14. III. Grup C için doğrusal analiz değerleri

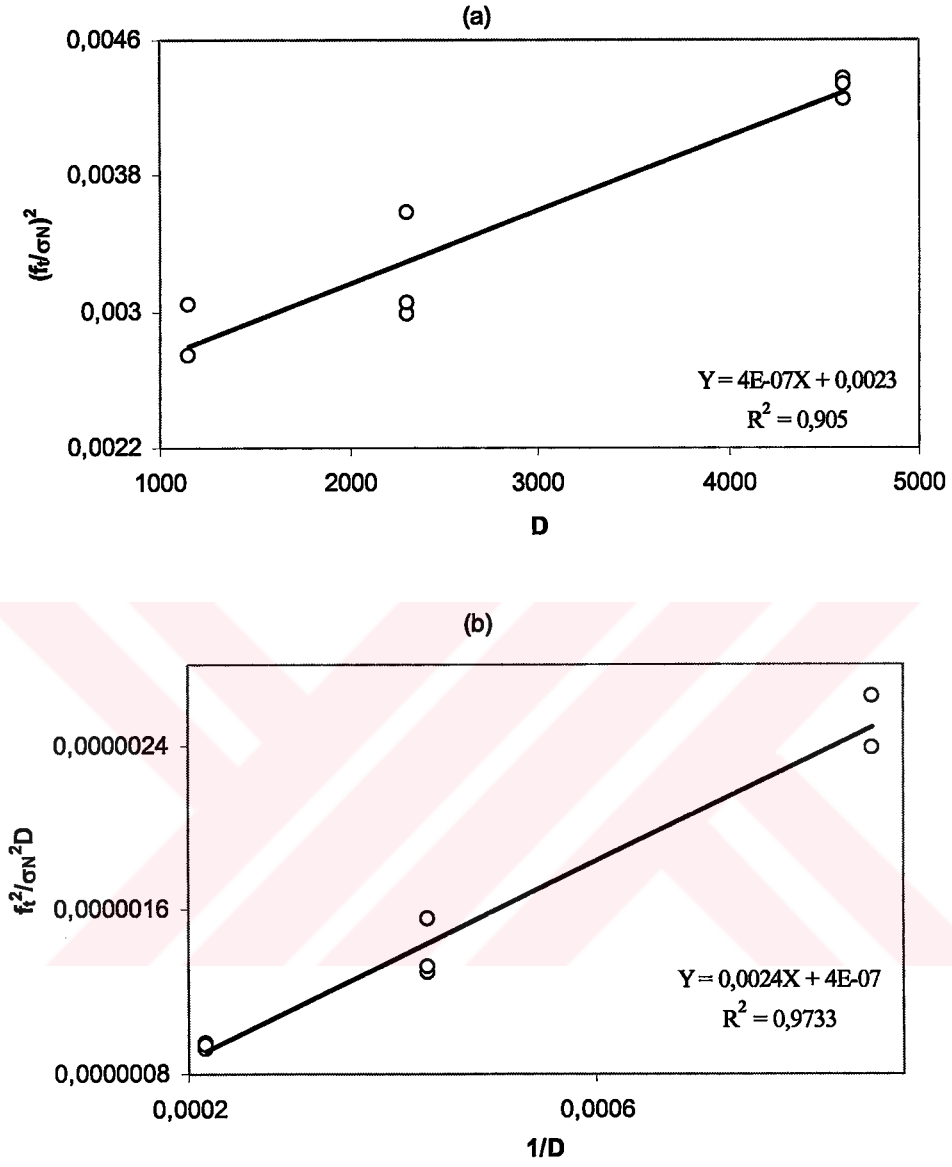
Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/mm)	$1/\sigma_N^2 D$
S5.7b	1150	0,002743	0,00087	2,3856E-06
S5.7c	1150	0,003040	0,00087	2,6438E-06
M11.15a	2300	0,003578	0,000435	1,5558E-06
M11.15b	2300	0,002981	0,000435	1,2961E-06
M11.15c	2300	0,003053	0,000435	1,3276E-06
L22.30a	4600	0,004247	0,000217	9,2319E-07
L22.30b	4600	0,004369	0,000217	9,4980E-07
L22.30c	4600	0,004338	0,000217	9,4295E-07

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.15. de verilmiştir.

Çizelge 4.15. III. Grup C için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

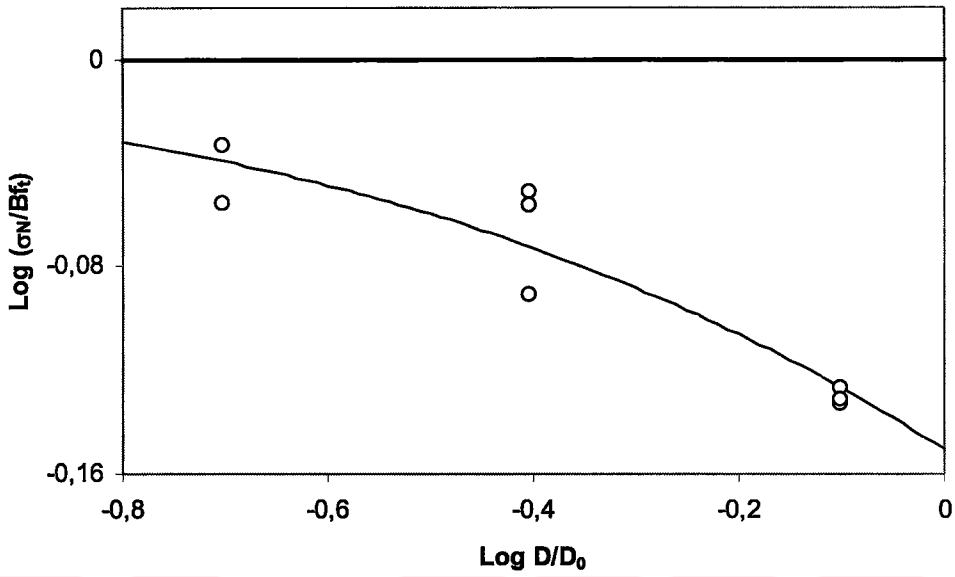
Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,0000004	0,0024	-
C	0,0023	0,0000004	-
D_0 (mm)	5750	6000	5807,1501
Bf_i (MPa)	20,8514	20,4124	29,913046
R	0,95	0,99	-
hata	-	-	4,9

Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz II nin bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.10 da III. Grup C için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.10. III.Grup C a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.11 da verilmiştir.



Şekil 4.11. III.Grup C için doğrusal olmayan analiz

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.11. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.16 da verilmiştir.

Çizelge 4.16. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,001467	0,001652	0,001410

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle III. Grup A için $Bf_i = 29.913046$ MPa ve $D_o = 5807.15$ mm seçilmiştir.

4.2.6. IV. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

IV.Gruptaki kirişlerde iki boyutlu boyut etkisi incelenmiştir. Bu grupta karakteristik boy “ D ” nin seçiminin kırılma mekaniği ve Bazant’ın boyut etkisi parametrelerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu nedenle karakteristik boyut olarak iki ayrı “ D ” seçilmiştir.

4.2.6.1. IV. Grup A deneyler

IV. Grup A için karakterisitk boy “ D ”, kiriş yüksekliği olarak seçilmiştir. Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.17. de verilmiştir.

Çizelge 4.17. IV. Grup A için doğrusal analiz değerleri

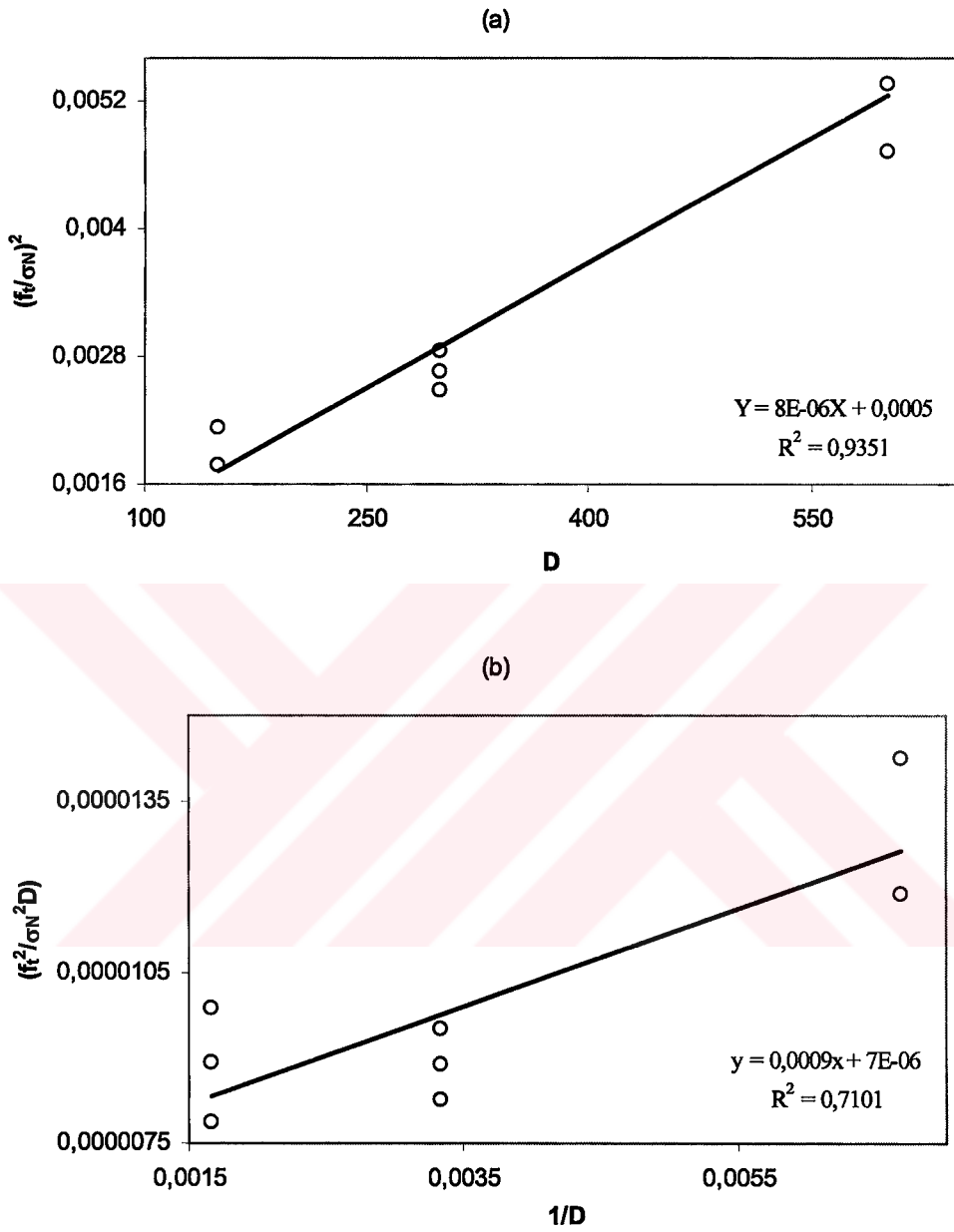
Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/m)	$1/\sigma_N^2 D$
S11.15a	150	0,001781	0,006667	1,1873E-05
S11.15c	150	0,002135	0,006667	1,4235E-05
M11.30a	300	0,002665	0,003333	8,8826E-06
M11.30b	300	0,002481	0,003333	8,2704E-06
M11.30c	300	0,002855	0,003333	9,5155E-06
L11.60a	600	0,005926	0,001667	9,8762E-06
L11.60b	600	0,004720	0,001667	7,8661E-06
L11.60c	600	0,005351	0,001667	8,9183E-06

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.18. de verilmiştir.

Çizelge 4.18. IV. Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

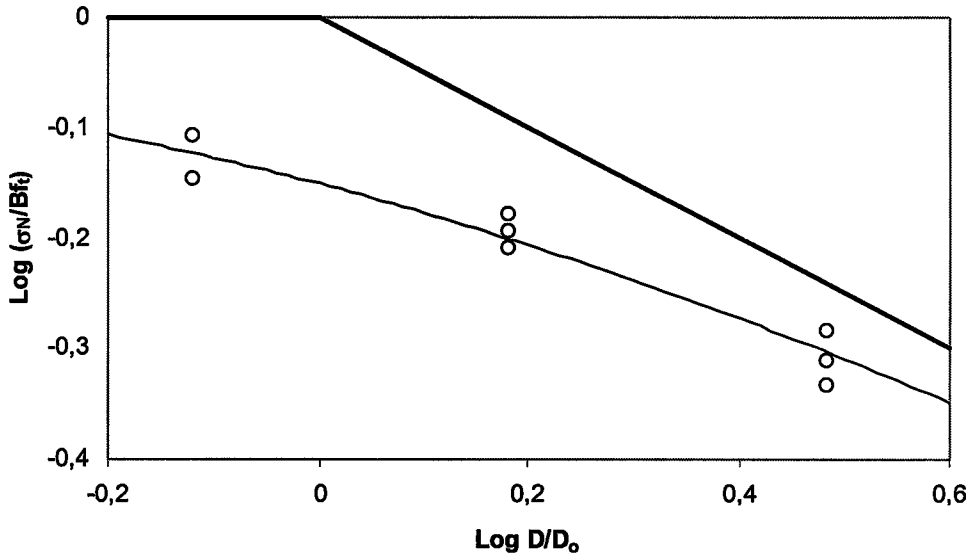
Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,000008	0,0009	-
C	0,0005	0,000007	-
D_0 (mm)	62,5	128,57	197,0315
Bf_t (MPa)	44,7214	33,3333	44,38816
R	0,97	0,84	-
hata	-	-	10,6

Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz I in bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.12 de IV. Grup A için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.12. IV.Grup A a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.13 de verilmiştir.



Şekil 4.13. IV.Grup A için doğrusal olmayan analiz

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.13. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.19 da verilmiştir.

Çizelge 4.19. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,005274	0,0056764708	0,002746

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle IV. Grup A için $Bf_i = 44,38816$ MPa ve $D_o = 197,0315$ mm seçilmiştir.

4.2.6.2. IV. Grup B deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

IV. Grup B için karakterisitk boy " D ", kiriş boyu olarak seçilmiştir. Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.20. de verilmiştir.

Çizelge 4.20. IV. Grup B için doğrusal analiz değerleri

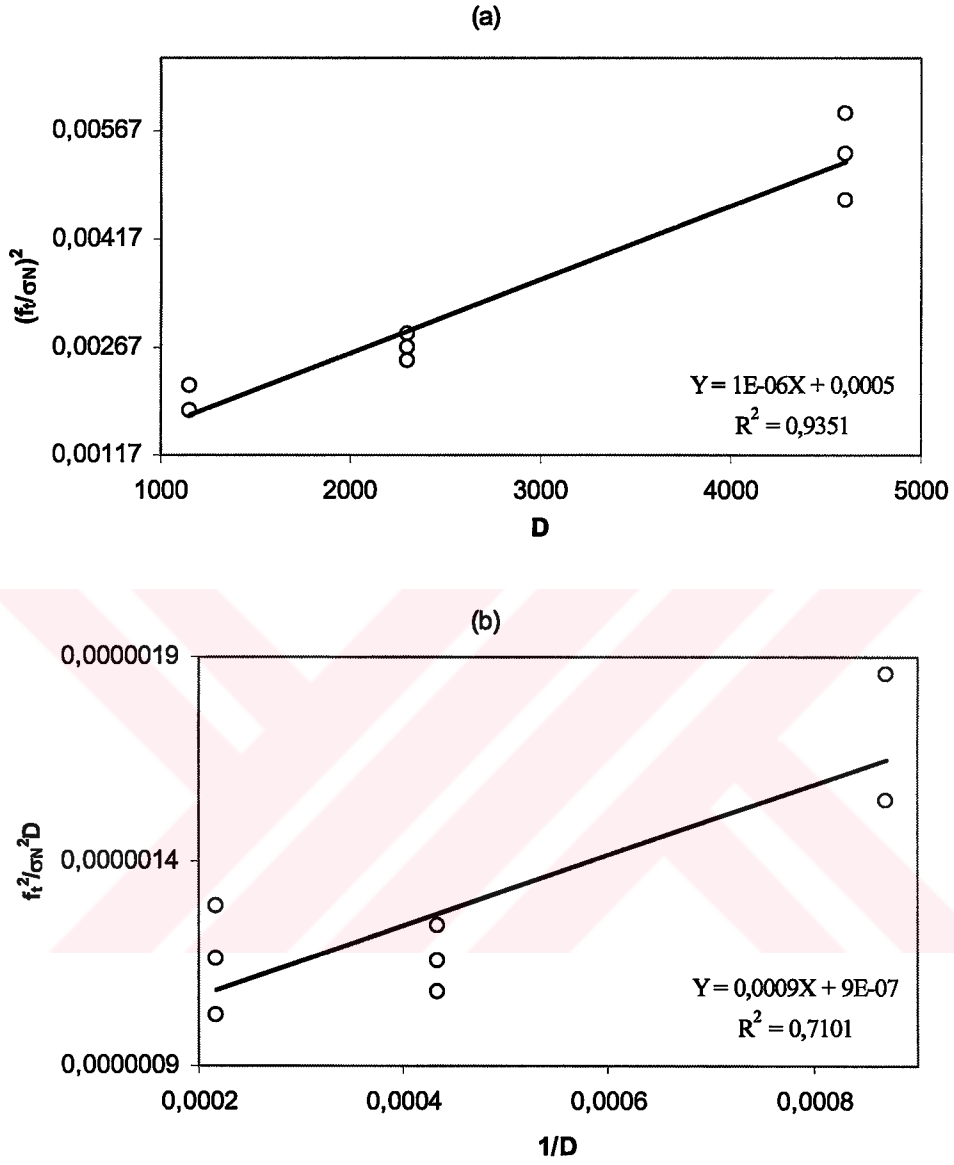
Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/mm)	$1/\sigma_N^2 D$
S11.15a	1150	0,001781	0,00087	7,22E-06
S11.15c	1150	0,002135	0,00087	8,66E-06
M11.30a	2300	0,002665	0,000435	5,4E-06
M11.30b	2300	0,002481	0,000435	5,03E-06
M11.30c	2300	0,002855	0,000435	5,79E-06
L11.60a	4600	0,005926	0,000217	5,13E-06
L11.60b	4600	0,004720	0,000217	4,09E-06
L11.60c	4600	0,005351	0,000217	4,63E-06

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.21. de verilmiştir.

Çizelge 4.21. IV. Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

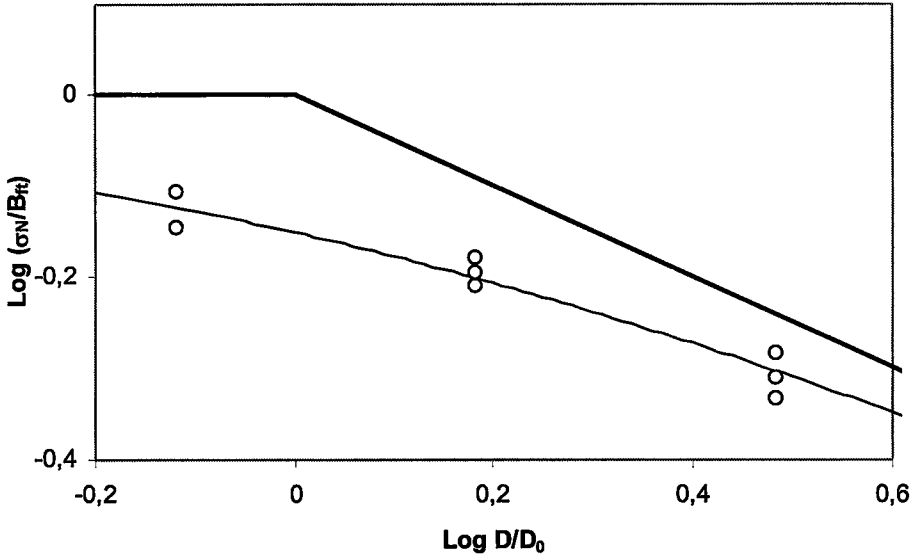
Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,000001	0,0009	-
C	0,0005	0,0000009	-
D_0 (mm)	500	1000	1510,5745
Bf_i (MPa)	44,7214	33,3333	44,388161
R	0,97	0,93	-
hata	-	-	44,4

Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz I in bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.14 de IV. Grup B için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.14. IV.Grup B a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.15. de verilmiştir.



Şekil 4.15. IV.Grup B için doğrusal olmayan analiz

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.15. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.22 de verilmiştir.

Çizelge 4.22. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,005685	0,004543	0,002746

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle IV. Grup A için $Bf_i = 44.388161$ MPa ve $D_o = 1510.5745$ mm seçilmiştir.

4.2.7. V. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

V.Grup daki kirişlerde iki boyutlu boyut etkisi vardır. Karakteristik boyut " D " nin seçiminin kırılma mekaniği ve Bazant'ın boyut etkisi denklemindeki parametreleri nasıl etkilediğini araştırmak amacı ile iki farklı karakteristik boyut seçilmiştir.

4.2.7.1. V. Grup A deneyleri için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

V. Grup A için karakterisitk boy “ D ”, kiriş genişliği olarak seçilmiştir. Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.23. de verilmiştir.

Çizelge 4.23. V. Grup A için doğrusal analiz değerleri

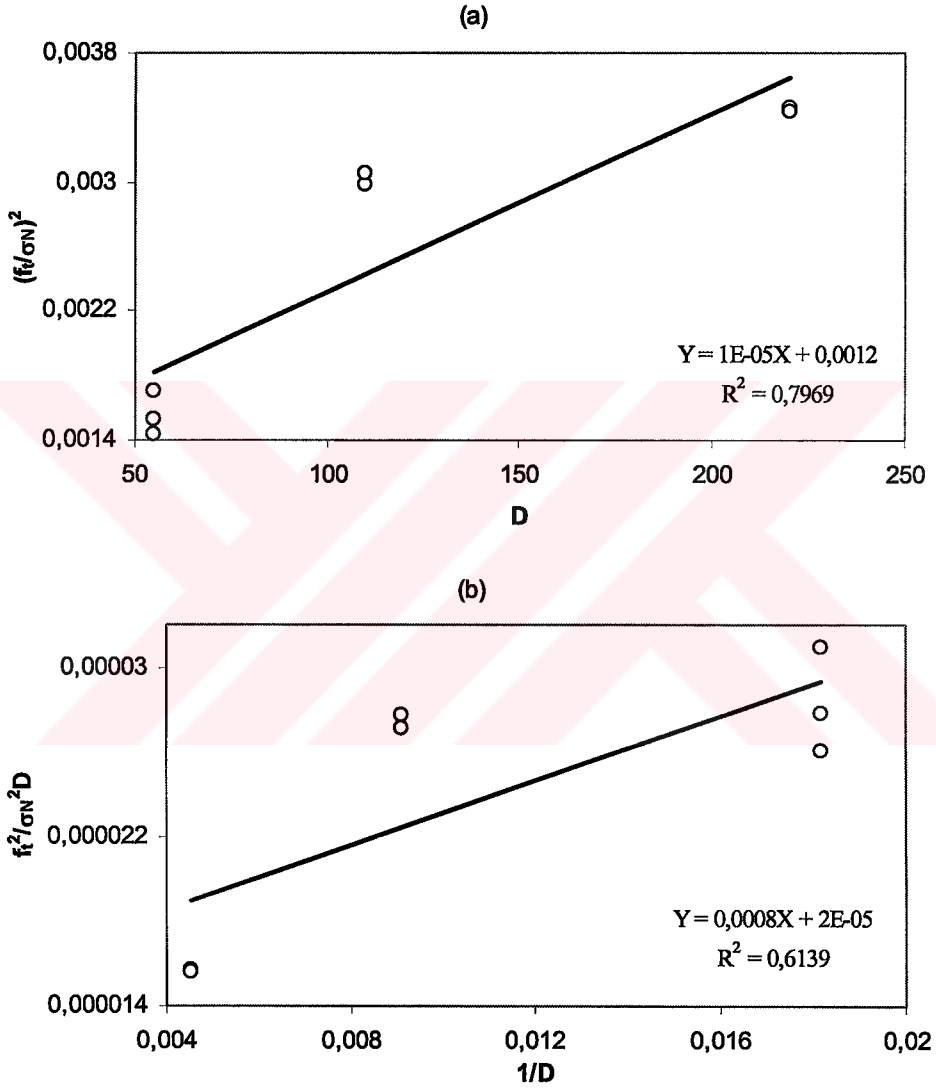
Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/mm)	$1/\sigma_N^2 D$
M5.7a	55	0,001529	0,018182	2,7798E-05
M5.7b	55	0,001702	0,018182	3,0941E-05
M5.7c	55	0,001431	0,018182	2,6020E-05
M11.15b	110	0,002981	0,009091	2,7100E-05
M11.15c	110	0,003053	0,009091	2,7758E-05
M22.30b	220	0,003458	0,004545	1,5717E-05
M22.30c	220	0,003434	0,004545	1,5609E-05

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.24. de verilmiştir.

Çizelge 4.24. V. Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

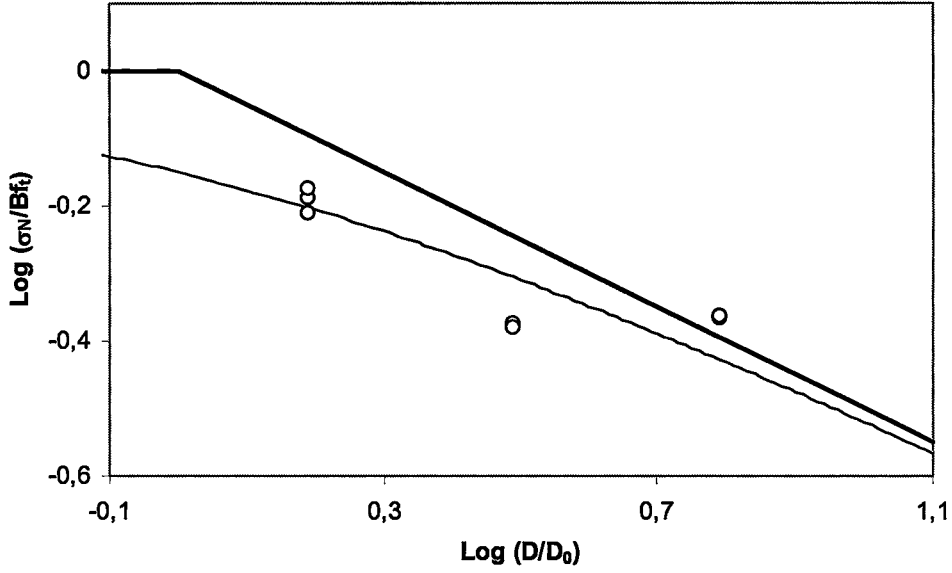
Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,00001	0,0008	-
C	0,0012	0,00002	-
D_0 (mm)	120	40	35,62528
Bf_t (MPa)	28,8675	35,3554	62,91992
R	0,89	0,78	-
hata	-	-	79,9

Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz I in bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.16 da V. Grup A için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.16. V.Grup A a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.17 de verilmiştir.



Şekil 4.17 V.Grup A için doğrusal olmayan analiz

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.17. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.25 de verilmiştir.

Çizelge 4.25. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,009780	0,022573	0,018993

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Doğrusal Analiz I dir. Bu nedenle V. Grup A için $Bf_i = 28,8675$ MPa ve $D_o = 120$ mm seçilmiştir.

4.2.7.2 V. Grup B deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

V. Grup B için karakterisitk boy “ D ”, kiriş yüksekliği olarak seçilmiştir. Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.26. da verilmiştir.

Çizelge 4.26. V. Grup B için doğrusal analiz değerleri

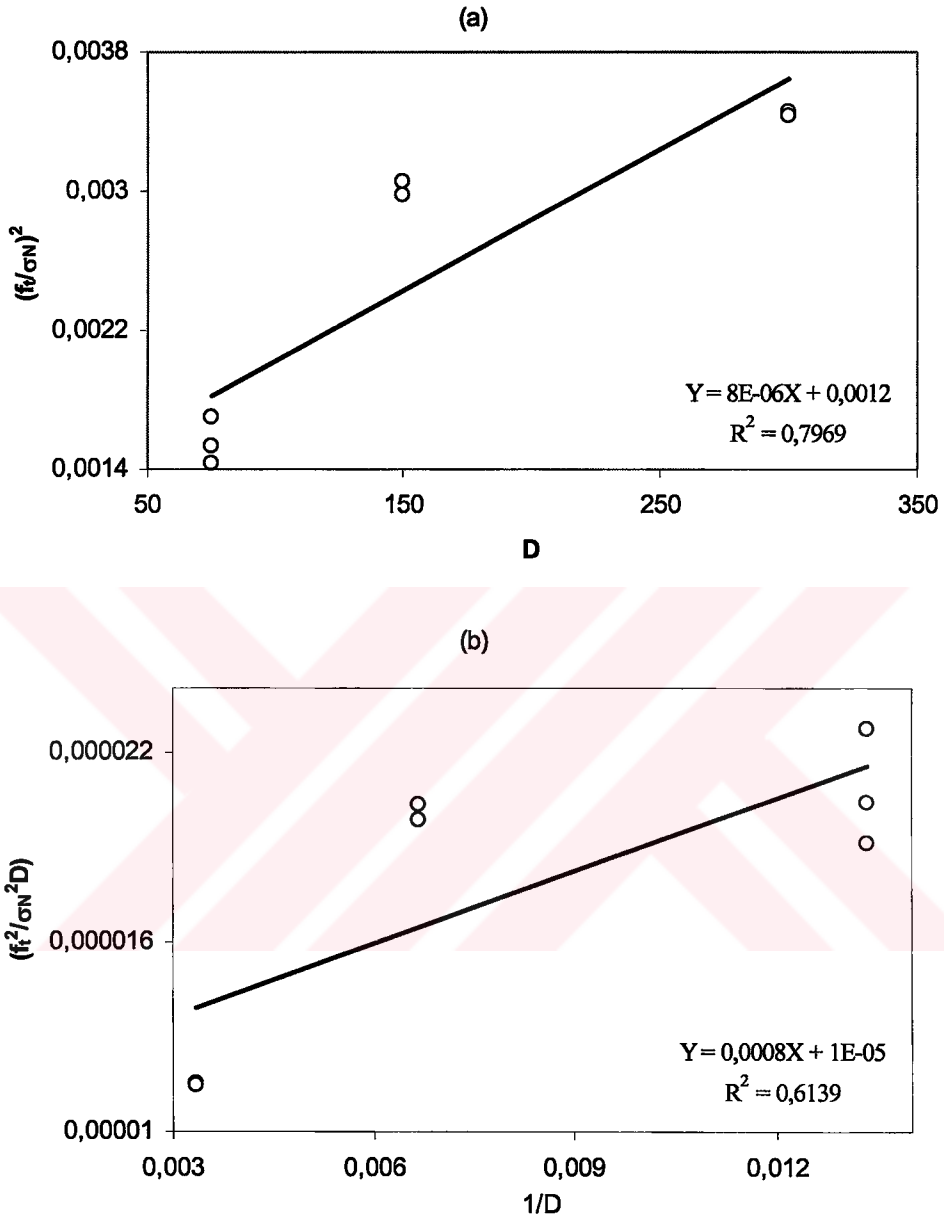
Kiriş Adı	Doğrusal Analiz I		Doğrusal Analiz II	
	D (mm)	$1/\sigma_N^2$	$1/D$ (1/mm)	$1/\sigma_N^2 D$
M5.75a	75	0,001529	0,013333	2,0385E-05
M5.7b	75	0,001702	0,013333	2,2690E-05
M5.7c	75	0,001431	0,013333	1,9082E-05
M11.15b	150	0,002981	0,006667	1,9873E-05
M11.15c	150	0,003054	0,006667	2,0356E-05
M22.30b	300	0,003458	0,003333	1,1526E-05
M22.30c	300	0,003434	0,003333	1,1447E-05

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.27. de verilmiştir.

Çizelge 4.27. V. Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

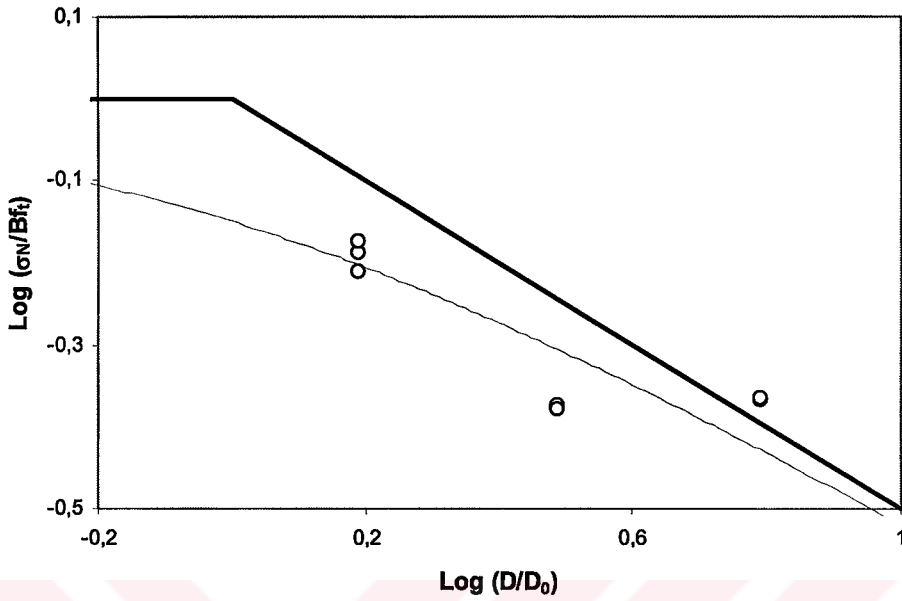
Değişkenler	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
A	0,000008	0,0008	-
C	0,0012	0,000001	-
D_0 (mm)	150	80	48,57959
Bf_i (MPa)	28,8675	35,3553	62,92007
R	0,89	0,78	-
hata	-	-	79,9

Doğrusal analiz I ve II kendi içlerinde kıyaslandığında doğrusal analiz I in bu grup için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 4.18 de V. Grup B için doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.18. V.Grup B a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II

Bazant'ın boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.19 de verilmiştir.



Şekil 4.19 V.Grup B için doğrusal olmayan analiz

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.19. da veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.28 de verilmiştir.

Çizelge 4.28. En uygun analiz değerleri ve D_o ve Bf_i

	Doğrusal Analiz I	Doğrusal Analiz II	Levenberg-Marquardt
Hata	0,009016	0,008581	0,018994

En düşük hata miktarını veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle V. Grup B için $Bf_i = 62,92$ MPa ve $D_o = 48,58$ mm seçilmiştir.

4.2.8. Bazant'ın boyut etkisi analizine göre deney sonuçlarının değerlendirilmesi

En düşük hata oranlarına bağlı olarak gruplara ait Bf_i ve D_o değerleri Çizelge 4.29 da verilmiştir (değerler tam sayıya yuvarlatılmıştır).

Çizelge 4.29 Gruplara Ait Bf_i ve D_0 değerleri

Gruplar	En düşük hata miktarını veren analiz	D	Bf_i (MPa)	D_0 (mm)
I. Grup	Doğrusal Analiz I	S	22	6667
II. Grup	Levenberg-Marquardt	h	32	610
III. Grup A	Levenberg-Marquardt	b	30	278
III. Grup B	Levenberg-Marquardt	h	30	379
III. Grup C	Levenberg-Marquardt	S	30	5807
IV. Grup A	Levenberg-Marquardt	h	44	197
IV. Grup B	Levenberg-Marquardt	S	44	1511
V. Grup A	Doğrusal Analiz I	b	29	120
V. Grup B	Doğrusal Analiz II	h	35	80

Çizelge 4.29'da " D " olarak gösterilen sütun karakteristik boy olarak deney kirişlerine ait hangi değerin seçildiğini gösterir. " S " kirişin yüklü net açıklığını, " h " kirişin kesit yüksekliğini, " b " kirişin kesit genişliğini, " L " kiriş boyunu gösterir.

Yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan analizlere göre çıkan sonuçlar şu şekilde değerlendirilmiştir:

- i) Birinci Grup ve Beşinci Grup A ve B hariç bütün diğer gruplarda en düşük hata miktarını Levenberg-Marquardt analizinden bulunan Bf_i ve D_0 değerleri vermiştir. Birinci ve Beşinci Grup A da en düşük hata miktarını doğrusal analiz I den bulunan Bf_i ve D_0 değerleri ve Beşinci Grup B de en düşük hata miktarını doğrusal analiz II den bulunan Bf_i ve D_0 değerleri vermiştir.
- ii) Bütün gruplar için Bf_i değeri 22 ile 44 arasında değişmektedir.
- iii) D_0 değeri seçilen karakteristik boy " D " ye bağımlı olarak değişmektedir. " D " değeri büyüdükçe D_0 değeri de ona bağlı olarak büyümektedir. Yalnızca Beşinci Grupda iki farklı doğrusal analiz metodları için D değeri D_0 değeri ile doğru orantılı olarak büyümemiştir.

- iv) Karakteristik boy üçüncü, dördüncü ve beşinci gruplarda farklı farklı seçilmiştir. Seçilen her karakteristik boy için ayrı ayrı yapılan analizlerden şu sonuç çıkmıştır; farklı karakteristik boy “ D ” seçimi Bf_i değerini etkilememektedir ancak D_0 değeri karakteristik boyyla orantılı olarak değişmektedir.
- v) Doğrusal olmayan analiz sonucunda birinci grupta en büyük numunelerde artık gerilmenin varlığı gözlenmektedir. Bu nedenle Bazant’ın boyut etkisi denklemi bu numunelerin davranışını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. İkinci grupta, üçüncü grubun her üç bölümünde, dördüncü grubun her iki bölümünde de Bazant’ın boyut etkisi denklemi bu numunelerin boyut etkisi davranışını başarılı bir şekilde ifade edebilmektedir. Beşinci grubun her iki bölümünde de büyük numunelerde artık gerilmenin varlığı gözlenmektedir. Bu nedenle Bazant’ın boyut etkisi denklemi bu numunelerin davranışını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu durum Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak Bazant’ın boyut etkisi denklemindeki parametreler bulunurken alınan başlangıç değerlerine ve bu değerlere ait hatalara bakıldığında gözlemlenebilir. Üçüncü ve dördüncü gruplarda hatalar az olmakta diğer gruplarda ise fazla olmaktadır. Bu durum Bazant’ın boyut etkisi denkleminin üçüncü ve dördüncü grupların davranışını açıklamada yeterli ancak diğer grupların davranışını açıklamada yetersiz olduğunu göstermektedir.

4.2.8.1. Başlangıç değerleri

Levenberg-Marquardt denklemi ile analiz yapılırken denkleme başlangıç değerleri atamak gerekmektedir. Atanan bu değerler çıkacak sonuçları etkilemektedir. Yapılan analizlerde aranan sonuçlarla birlikte hata miktarı da verilmektedir. En az hata miktarını verecek başlangıç değerleri yapılan pek çok denemelerle bulunmuştur. Levenberg-Marquardt denkleminde kullanılan başlangıç değerleri ve hatalar Çizelge 4.30 da verilmiştir

Çizelge 4.30 Levenberg-Marquardt algoritması için başlangıç değerleri ve hatalar

Gruplar	Başlangıç Değeri	Hata
I. Grup	8	51,6
II.Grup	284	24,9
III.Grup A	423	4,9
III.Grup B	891	4,9
III.Grup C	944	4,9
IV.Grup A	32	10,6
IV.Grup B	19	10,6
V.Grup A	24	79,9
V.Grup B	42	79,9

4.2.9. Bazant'ın analizinden bulunan kırılma mekaniği parametreleri

İkinci bölümde anlatılan kırılma mekaniği parametrelerinin bir kısmı deney sonuçlarının analizi ile hesaplanabilmektedir. Hesaplamalar yapılırken hata oranı en düşük olan analiz yönteminin Bf_i ve D_0 değerleri kullanılmıştır. Hesaplanan K_{Ic} , G_f ve c_f değerleri Çizelge 4.31 da verilmiştir. Bu değerler hesaplanırken yükleme şekline bağlı olan k_o ve k_o' değerleri kullanılmadığından bu değerlerin önündeki terimler hesaplanmıştır. k_o ve k_o' değerlerinin basınç kırılmasına maruz dört nokta yüklemeli deneyler için değerleri kullanılır ise K_{Ic} , G_f ve c_f değerleri bulunur.

Çizelge 4.31 K_{Ic} , G_f ve c_f değerleri

Gruplar	K_{Ic}/k_o	$G_f E / k_o^2$	$c_f 2k_o' / k_o$
I. Grup	1826	3 333 333	6667
II.Grup	792	627 941	610
III.Grup A	497	246 854	278
III.Grup B	582	338 881	379

Çizelge 4.31. Devam

III.Grup C	2280	5 196 182	5807
IV.Grup A	623	388 213	197
IV.Grup B	1725	2 976 298	1511
V.Grup A	316	100 000	120
V.Grup B	316	125 000	150

Hesaplanan K_{Ic} , G_f ve C_f değerlerine bakıldığında hepsinin D_0 dan etkilendikleri için seçilen karakteristik boyut “ D ” ile orantılı olduğu görülür. Karakteristik boyut büyüdükçe hesaplanan değerler de orantılı olarak büyümektedir.

4.3. Carpinteri’nin Boyut Etkisi Denklemine Göre Analiz

Carpinteri’nin boyut etkisi denklemine göre yapılacak analiz 3. bölümde verilmiştir. Buna göre öncelikle Carpinteri’nin boyut etkisi denklemindeki değişkenler doğrusal analiz ve Marquardt-Levenberg algoritması kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bulunan bu değişkenler kullanılarak doğrusal olmayan eğri üzerinde Carpinteri’nin boyut etkisi denklemi ve deneysel veriler gösterilmiştir.

4.3.1. Doğrusal analiz

3. bölümde anlatılan Carpinteri denklemi için doğrusal analiz kullanılarak denklemindeki değişkenler bulunmuştur. Değişkenler ayrıca Matlab 6.5 programında yazılmış olan bir program ile Marquardt-Levenberg algoritması ile bulunmuştur. Bu program kullanılırken algoritmaya her değişken için bir başlangıç değeri atamak gerekmektedir. Atanan her başlangıç değeri farklı kökleri bulabilmekte ve hata miktarı değişken olmaktadır. Program tarafından hesaplanan değişkenler kullanılarak $\log \sigma$ ya karşılık $\log D$ şekli çizilmiştir. Hatayı en küçük yapan başlangıç değeri bulunurken, program tarafından hesaplanan değişkenler kullanılarak çizilen eğri ile

deneysel olarak bulunan $\log \sigma$ değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Aynı eğri üzerinde doğrusal analiz I ve Levenberg-Marquardt dan bulunan değişkenlerin hata miktarları kıyaslanmıştır.

4.3.2 Doğrusal olmayan gösterim

Bazant'ın boyut etkisi analizinde olduğu gibi Carpinteri'nin boyut etkisi analizinde de hesaplanan değişkenler $\log(\sigma_N/f_t)$ ye karşılık $\log (l_{ch}/D)$ şekli üzerinde gösterilebilmektedir.

4.3.3. I. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.32. de verilmiştir.

Çizelge 4.32. I. Grup için doğrusal analiz değerleri

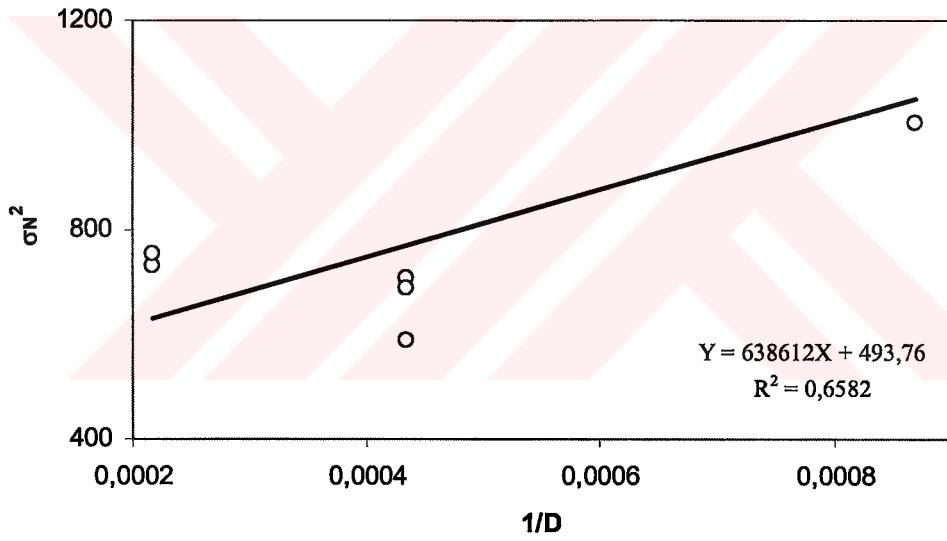
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		l/D (1/mm)	σ_N^2
S11.15a	1150	0,00087	1203,675
S11.15c	1150	0,00087	1004,004
M11.15a	2300	0,000435	588,8145
M11.15b	2300	0,000435	706,8222
M11.15c	2300	0,000435	690,0543
L11.15a	4600	0,000217	729,621
L11.15b	4600	0,000217	754,6083

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.33. de verilmiştir. Çizelgedeki “R” değeri korelasyon değeridir. En iyi korelasyon değeri 1, en kötü korelasyon değeri 0’dır. Çizelgedeki “hata” değeri Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak hesap yapılırken oluşan hatadır.

Çizelge 4.33. I. Grup için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

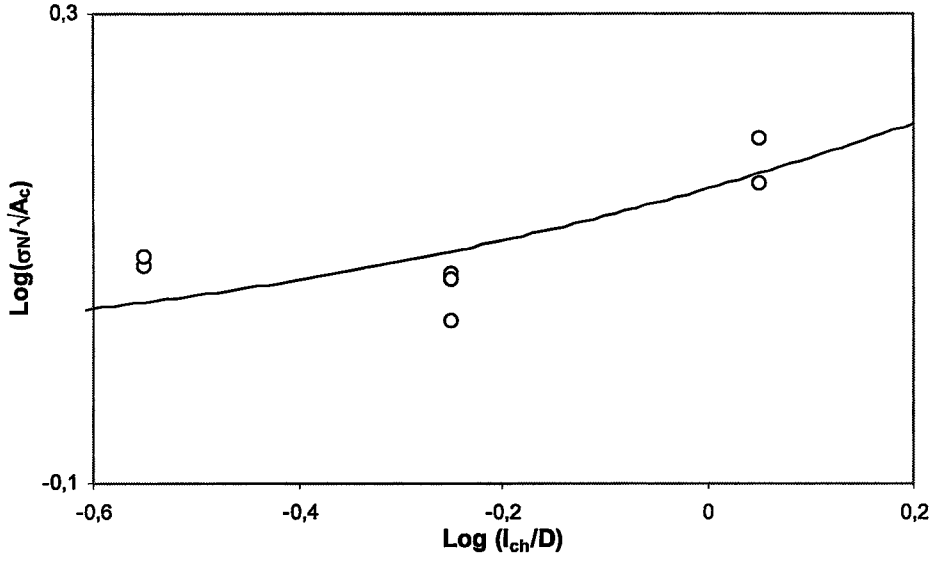
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	493,76	516,466
B_c	638612	584230,3
$l_{ch} = B_c/A_c$	1293,365	1131,208
R	0,81	-
Hata	-	30,2

Şekil 4.20 de I. Grup için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.20. I.Grup doğrusal analizi

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.21 de verilmiştir.



Şekil 4.21. I.Grup için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.21. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.34. de verilmiştir.

Çizelge 4.34. En uygun analiz değerleri

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,007796	0,007519

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt dır. Bu nedenle I. Grup için $A_c=516,46$ ve $B_c=584\ 230$ seçilmiştir.

4.3.4. II. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.35. de verilmiştir.

Çizelge 4.35. II. Grup için doğrusal analiz değerleri

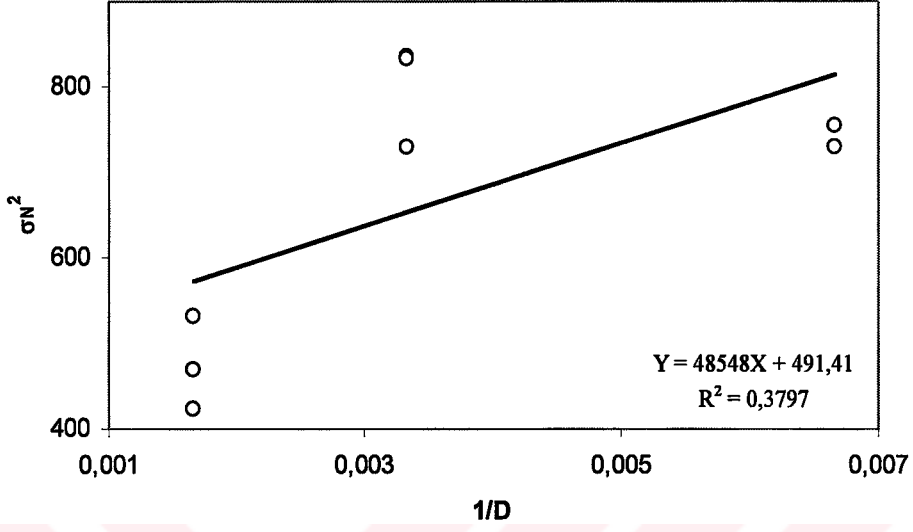
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		l/D (1/mm)	σ_N^2
L11.15a	150	0,006667	729,621
L11.15b	150	0,006667	754,6083
L11.30a	300	0,003333	834,8937
L11.30b	300	0,003333	729,8556
L11.30c	300	0,003333	832,6572
L11.60a	600	0,001667	423,788
L11.60b	600	0,001667	532,0829
L11.60c	600	0,001667	469,3075

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.36. da verilmiştir.

Çizelge 4.36. II. Grup için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

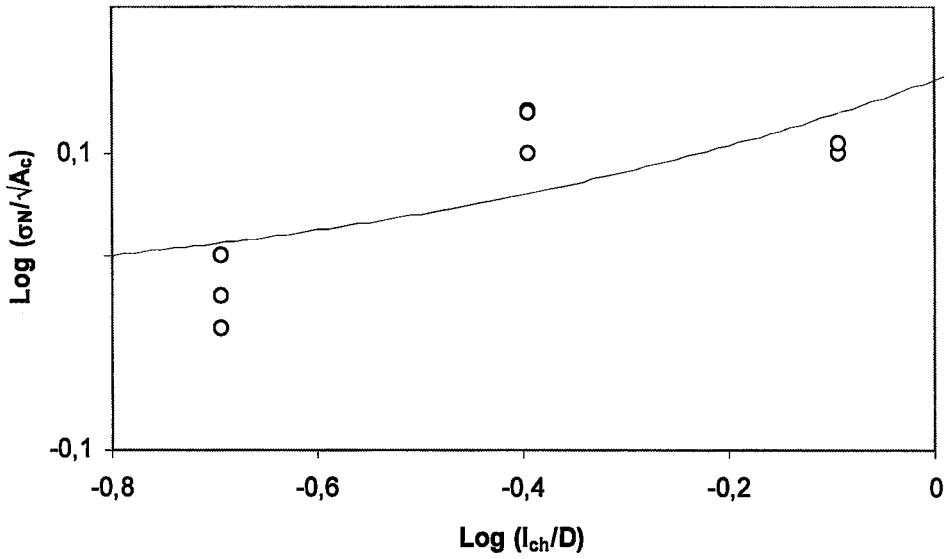
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	491,41	460,1934
B_c	48548	55811,25
l_{ch}	98,79327	121,2778
R	0,62	-
Hata	-	43,9

Şekil 4.22 de II. Grup için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.22. II.Grup doğrusal analizi

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.23 de verilmiştir.



Şekil 4.23 II.Grup için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.23. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.37. de verilmiştir.

Çizelge 4.37. En uygun analiz değerleri

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,013419	0,012787

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle II. Grup için $A_c=460,19$ ve $B_c=55811$ seçilmiştir.

4.3.5. III. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

4.3.5.1. III. Grup A deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.38. de verilmiştir.

Çizelge 4.38. III. Grup A için doğrusal analiz değerleri

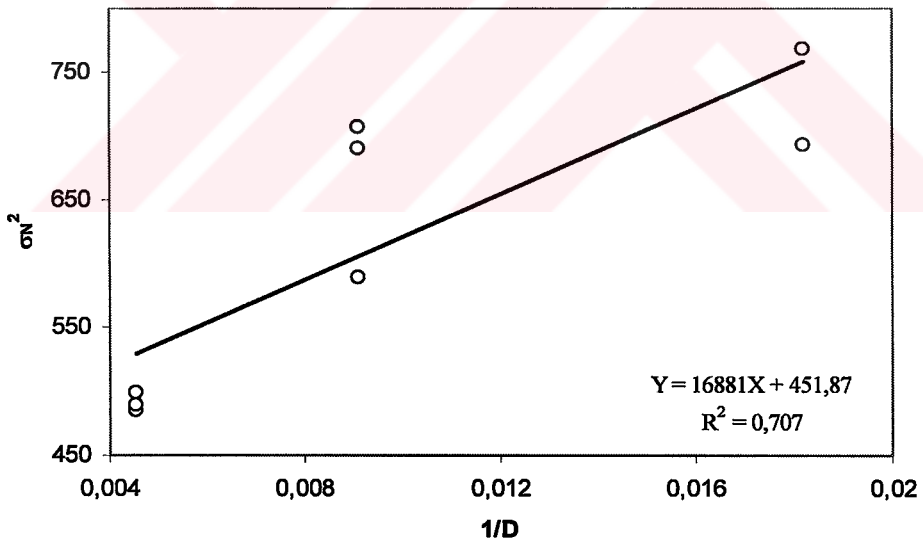
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		$1/D$ (1/mm)	σ_N^2
S5.7b	55	0,018182	768,0194
S5.7c	55	0,018182	693,0048
M11.15a	110	0,009091	588,8145
M11.15b	110	0,009091	706,8222
M11.15c	110	0,009091	690,0543
L22.30a	220	0,004545	499,0401
L22.30b	220	0,004545	485,0557
L22.30c	220	0,004545	488,5795

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.39. da verilmiştir.

Çizelge 4.39. III. Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

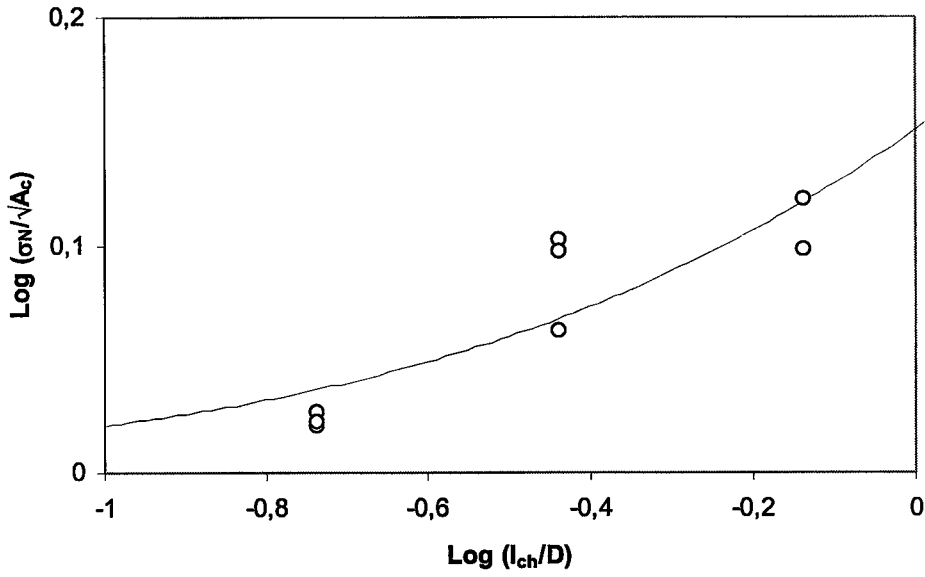
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	451,87	441,9167
B_c	16881	17776,62
l_{ch}	37,35809	40,22619
R	0,84	-
Hata	-	10,4

Şekil 4.24 de III. Grup A için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.24. III.Grup A doğrusal analizi

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.25 de verilmiştir.



Şekil 4.25. III.Grup A için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.25. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.40. da verilmiştir.

Çizelge 4.40. En uygun analiz değerleri

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,00317	0,00310

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle III. Grup A için $A_c=441,9167$ ve $B_c=17776,62$ seçilmiştir.

4.3.5.2. III. Grup B deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.41. de verilmiştir.

Çizelge 4.41. III. Grup B için doğrusal analiz değerleri

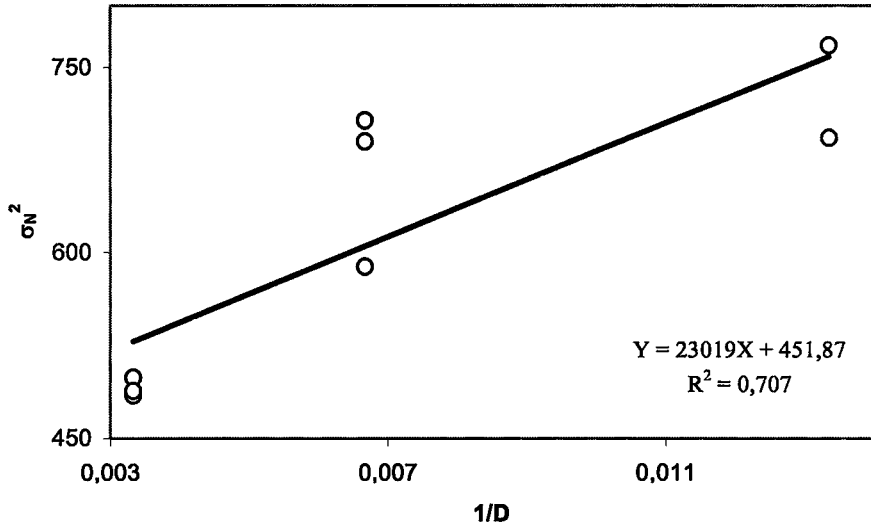
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		l/D (1/mm)	σ_N^2
S5.7b	75	0,013333	768,0194
S5.7c	75	0,013333	693,0048
M11.15a	150	0,006667	588,8145
M11.15b	150	0,006667	706,8222
M11.15c	150	0,006667	690,0543
L22.30a	300	0,003333	499,0401
L22.30b	300	0,003333	485,0557
L22.30c	300	0,003333	488,5795

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.42. da verilmiştir.

Çizelge 4.42. III. Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

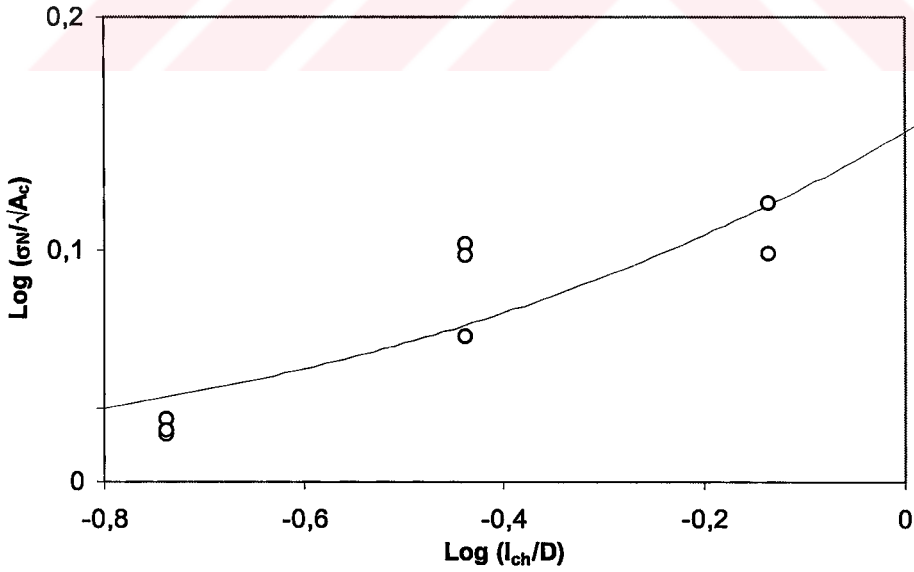
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	451,87	441,9167
B_c	23019	24240,85
l_{ch}	50,94164	54,85389
R	0,84	-
Hata	-	10,4

Şekil 4.26 da III. Grup B için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.26. III.Grup B doğrusal analizi

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.27 de verilmiştir.



Şekil 4.27 III.Grup B için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.27 de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.43. de verilmiştir.

Çizelge 4.43. En uygun analiz değerleri

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,003170	0,003095

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle III. Grup B için $A_c=441,92$ ve $B_c=24241$ seçilmiştir.

4.3.5.3. III. Grup C deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.44. de verilmiştir.

Çizelge 4.44. III. Grup C için doğrusal analiz değerleri

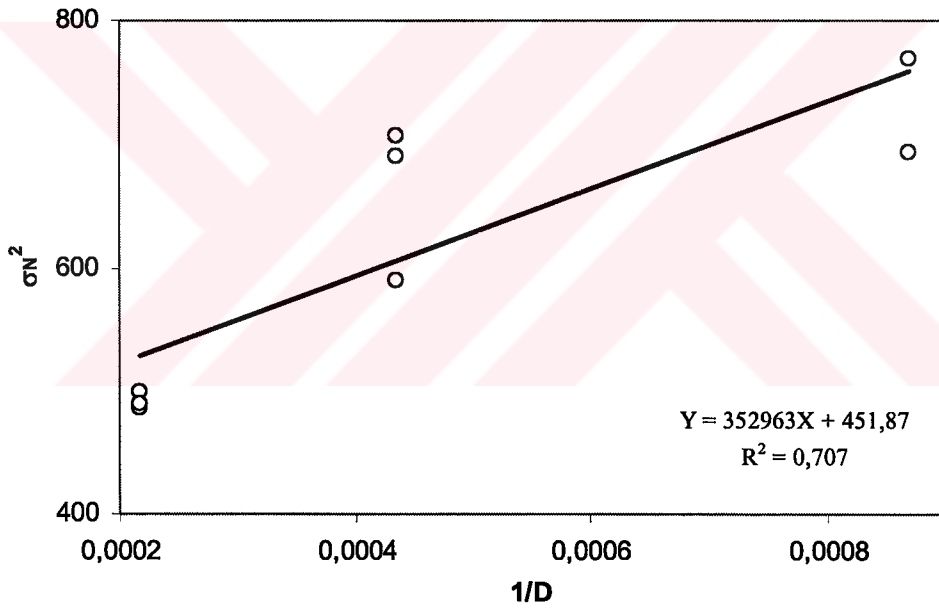
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		$1/D$ (1/mm)	σ_N^2
S55.75b	1150	0,00087	768,0194
S55.75c	1150	0,00087	693,0048
M11.15a	2300	0,000435	588,8145
M11.15b	2300	0,000435	706,8222
M11.15c	2300	0,000435	690,0543
L22.30a	4600	0,000217	499,0401
L22.30b	4600	0,000217	485,0557
L22.30c	4600	0,000217	488,5795

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.45. de verilmiştir.

Çizelge 4.45. III. Grup C için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

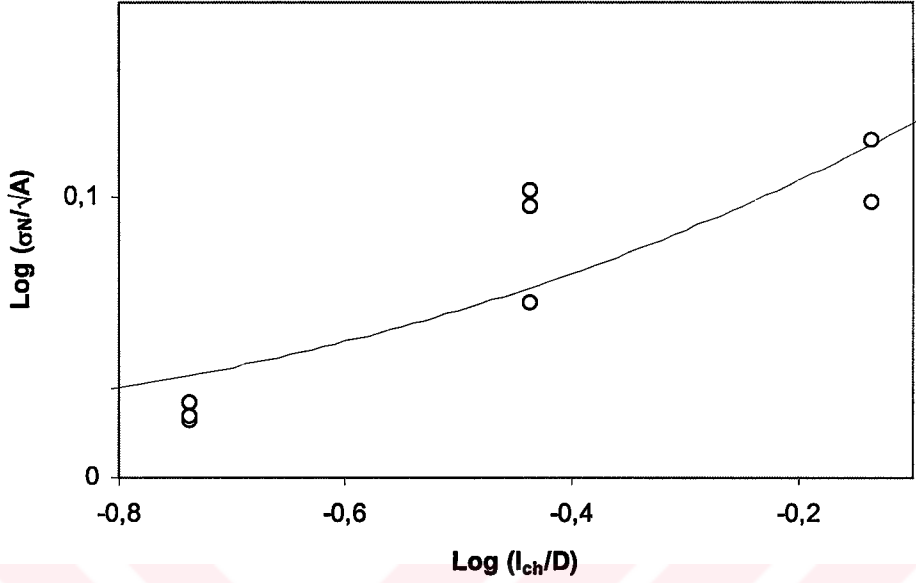
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	451,87	441,9167
B_c	352963	371693,1
l_{ch}	781,1163	841,0931
R	0,84	-
Hata	-	10,4

Şekil 4.28 de III. Grup C için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.28. III.Grup C doğrusal analizi

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.29 da verilmiştir.



Şekil 4.29. III.Grup C için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.29 da veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.46. da verilmiştir.

Çizelge 4.46. En uygun analiz değerleri

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,003170	0,03095

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt'dır. Bu nedenle III. Grup C için $A_c=441,92$ ve $B_c=371693$ seçilmiştir.

4.3.6. IV. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

4.3.6.1. IV. Grup A deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.47. de verilmiştir.

Çizelge 4.47. IV. Grup A için doğrusal analiz değerleri

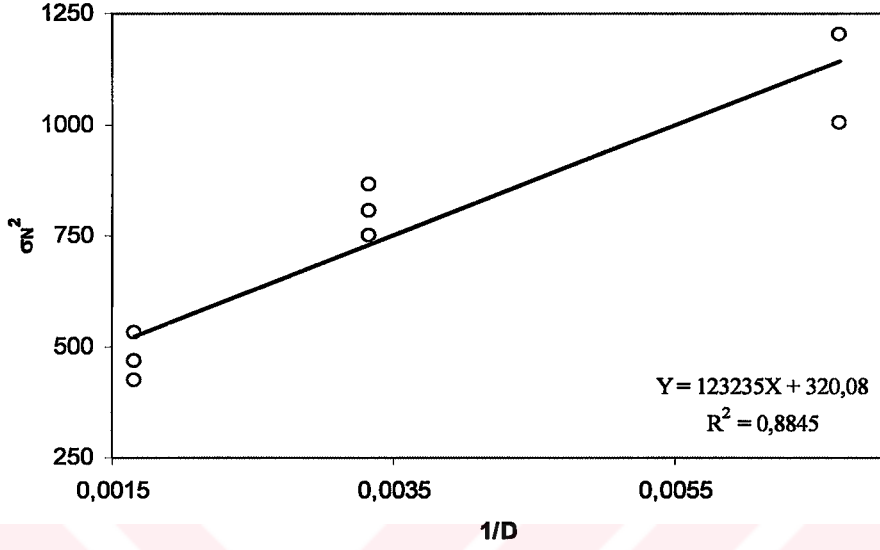
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		l/D (1/mm)	σ_N^2
S11.15a	150	0,006667	1203,675
S11.15c	150	0,006667	1004,004
M11.30a	300	0,003333	804,4726
M11.30b	300	0,003333	864,0271
M11.30c	300	0,003333	750,9651
L11.60a	600	0,001667	423,788
L11.60b	600	0,001667	532,0829
L11.60c	600	0,001667	469,3075

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.48. de verilmiştir.

Çizelge 4.48. IV. Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

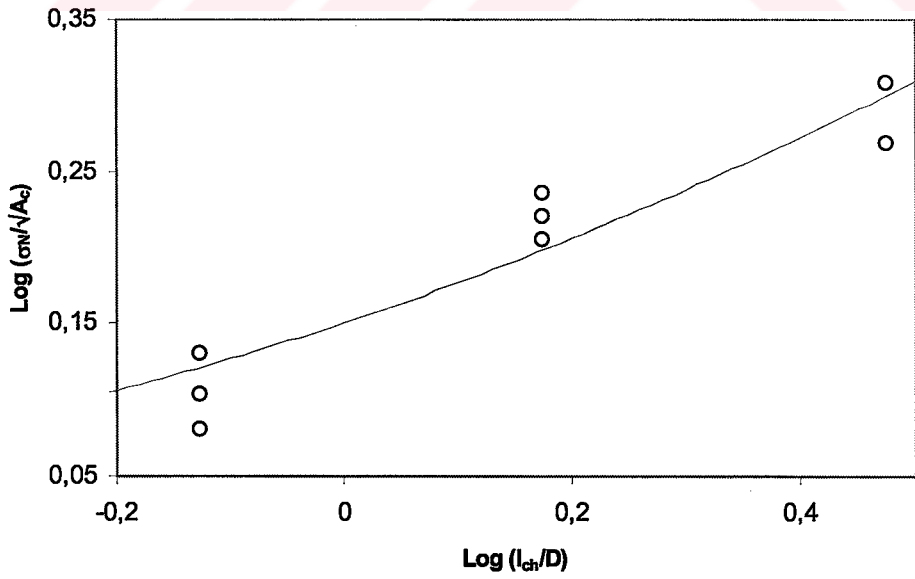
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	320,08	291,6581
B_c	123235	130582,5
l_{ch}	385,0131	447,7248
R	0,94	-
Hata	-	19,2

Şekil 4.30 da IV. Grup A için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.30. IV.Grup A doğrusal analiz

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.31 de verilmiştir.



Şekil 4.31. IVGrup A için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.31 de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.49. da verilmiştir.

Çizelge 4.49. En uygun analiz değerleri

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,005491	0,005008

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt Analizidir. Bu nedenle IV. Grup A için $A_c=291,66$ ve $B_c=130583$ seçilmiştir.

4.3.6.2. IV. Grup B deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.50. de verilmiştir.

Çizelge 4.50. IV. Grup B için doğrusal analiz değerleri

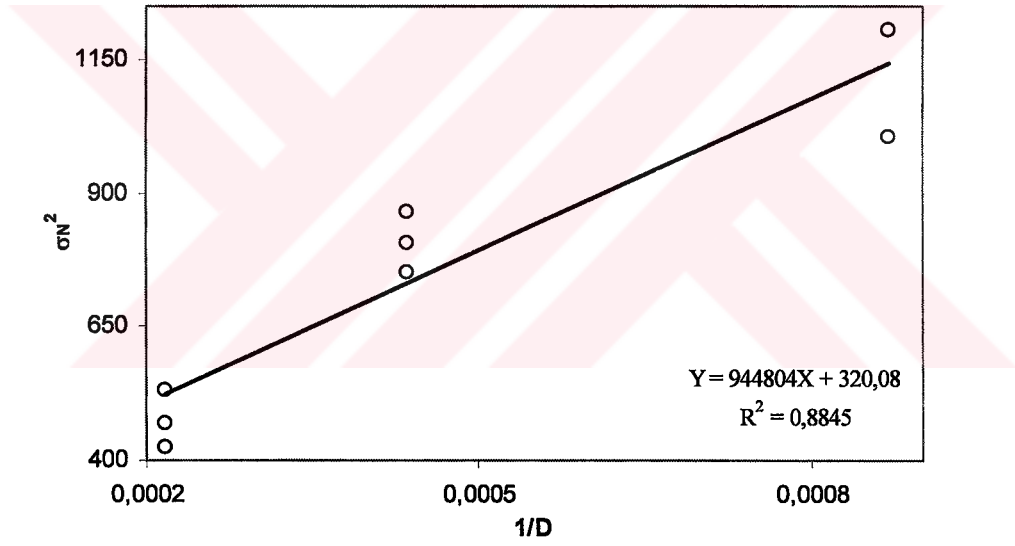
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		$1/D$ (1/mm)	σ_N^2
S11.15a	1150	0,00087	1203,675
S11.15c	1150	0,00087	1004,004
M11.30a	2300	0,000435	804,4726
M11.30b	2300	0,000435	864,0271
M11.30c	2300	0,000435	750,9651
L11.60a	4600	0,000217	423,788
L11.60b	4600	0,000217	532,0829
L11.60c	4600	0,000217	469,3075

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.51. de verilmiştir.

Çizelge 4.51. IV. Grup B için doğrusal analizi sonucu elde edilen değişkenler

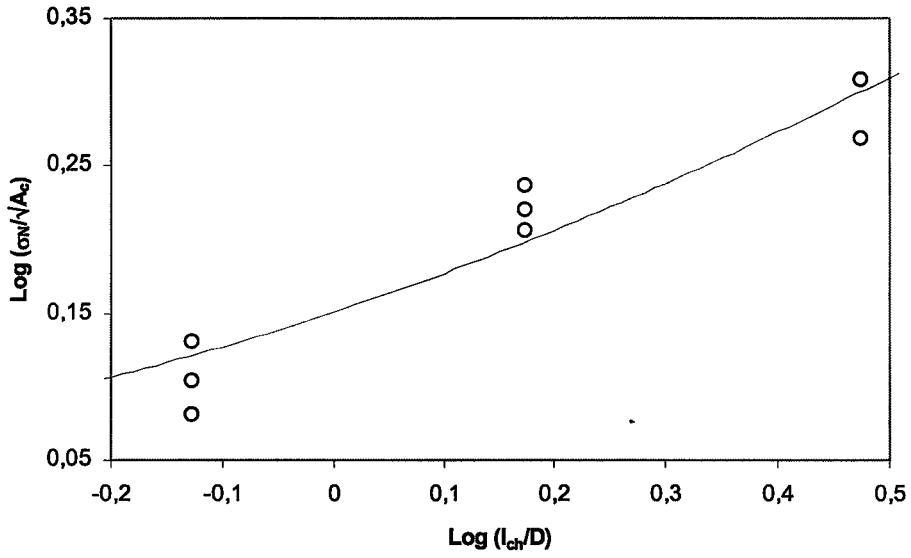
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	320,08	291,6581
B_c	944804	1001133
l_{ch}	2951,775	3432,557
R	0,94	-
Hata	-	19,2

Şekil 4.32 de IV. Grup B için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.32.IV.Grup B doğrusal analiz

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.33 de verilmiştir.



Şekil 4.33.IVGrup B için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.33 de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.52. de verilmiştir.

Çizelge 4.52. En uygun analiz değerleri

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,005491	0,005008

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Doğrusal Analizdir. Bu nedenle IV. Grup B için $A_c=291,66$ ve $B_c=1001133$ seçilmiştir.

4.3.7. V. Grup deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

4.3.7.1. V. Grup A deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.53. de verilmiştir.

Çizelge 4.53. V. Grup A için doğrusal analiz değerleri

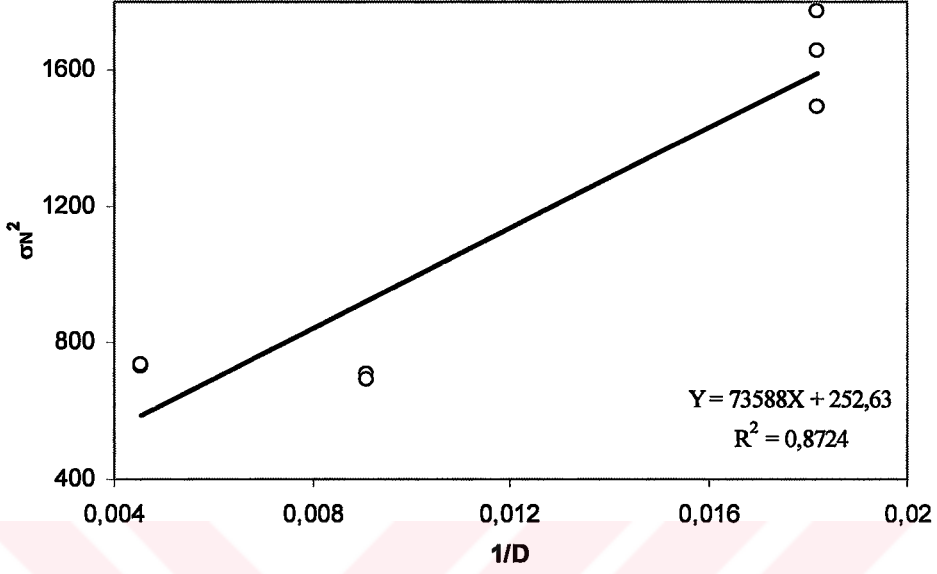
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		l/D (1/mm)	σ_N^2
M5.7a	55	0,018182	1658,582
M5.7b	55	0,018182	1490,084
M5.7c	55	0,018182	1771,865
M11.15b	110	0,009091	706,8222
M11.15c	110	0,009091	690,0543
M22.30b	220	0,004545	733,3533
M22.30c	220	0,004545	738,4337

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.54. de verilmiştir.

Çizelge 4.54. V. Grup A için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

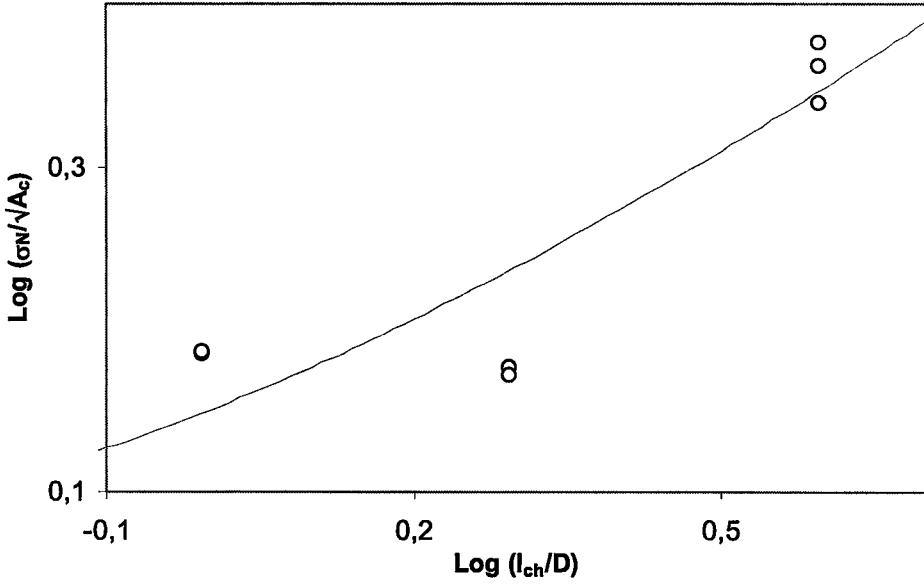
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	252,63	312,749
B_c	73588	67797,1
l_{ch}	291,2877	216,778
R	0,93	-
Hata	-	52,9

Şekil 4.34 de V. Grup A için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.34. V.Grup A doğrusal analizi

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.35. de verilmiştir.



Şekil 4.35. V. Grup A için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.35. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.55. de verilmiştir.

Çizelge 4.55. En uygun analiz değerleri³

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,012912	0,011599

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt Analizidir. Bu nedenle V. Grup A için $A_c=312,74$ ve $B_c=67797$ seçilmiştir.

4.3.7.2. V. Grup B deneyler için doğrusal ve doğrusal olmayan analiz

Bu grup için doğrusal analiz değerleri Çizelge 4.56. da verilmiştir.

Çizelge 4.56. V. Grup B için doğrusal analiz değerleri

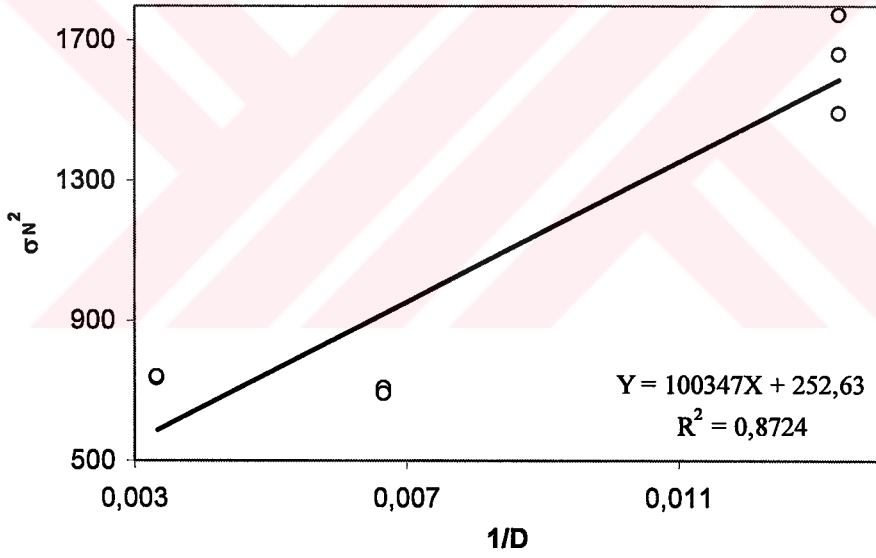
Kiriş Adı	D (mm)	Doğrusal Analiz	
		1/D (1/mm)	σ_N^2
M5.7a	75	0,013333	1658,582
M5.7b	75	0,013333	1490,084
M5.7c	75	0,013333	1771,865
M11.15b	150	0,006667	706,8222
M11.15c	150	0,006667	690,0543
M22.30b	300	0,003333	733,3533
M22.30c	300	0,003333	738,4337

Bu grup için doğrusal analiz sonucu ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak elde edilen değişkenler Çizelge 4.57. de verilmiştir.

Çizelge 4.57. V. Grup B için doğrusal analiz sonucu elde edilen değişkenler

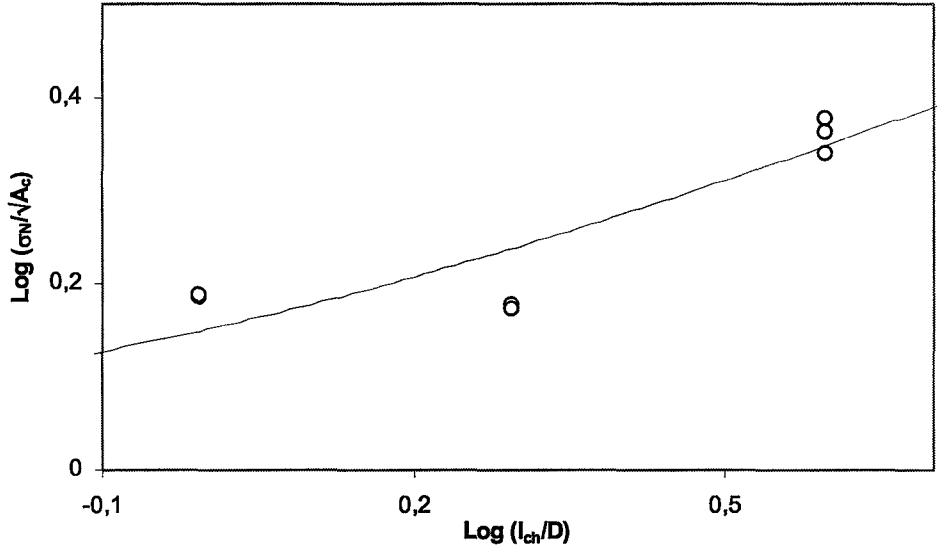
Değişkenler	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
A_c	252,63	312,7397
B_c	100347	92451,67
l_{ch}	397,2094	295,6186
R	0,93	-
Hata	-	52,9

Şekil 4.36. de V. Grup B için doğrusal analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.36. V.Grup B doğrusal analiz

Carpinteri'nin boyut etkisi için önerdiği denklem kullanılarak hazırlanmış doğrusal olmayan eğri Şekil 4.37. de verilmiştir.



Şekil 4.37. V. Grup B için doğrusal olmayan analiz

Her iki analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.37. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.58. de verilmiştir.

Çizelge 4.58. En uygun analiz değerleri

	Doğrusal Analiz	Levenberg-Marquardt
Hata	0,012912	0,011599

En düşük hatayı veren analiz bu grup için Levenberg-Marquardt Analizidir. Bu nedenle V. Grup B için $A_c=312.74$ ve $B_c=92452$ seçilmiştir.

4.3.8. Carpinteri'nin boyut etkisi analizine göre deney sonuçlarının değerlendirilmesi

En düşük hata oranlarına bağlı olarak gruplara ait A ve B değerleri Çizelge 4.59 da verilmiştir (değerler tam sayıya yuvarlanmıştır).

Çizelge 4.59 Gruplara Ait A ve B değerleri

Gruplar	En düşük hata miktarını veren analiz	D	A_c	B_c
I. Grup	Doğrusal Analiz	S	494	638 612
II. Grup	Levenberg-Marquardt	h	460	55 811
III. Grup A	Levenberg-Marquardt	b	442	17 777
III. Grup B	Levenberg-Marquardt	h	442	24 241
III. Grup C	Levenberg-Marquardt	S	442	371 693
IV. Grup A	Doğrusal Analiz	h	320	123 235
IV. Grup B	Doğrusal Analiz	S	320	944 804
V. Grup A	Levenberg-Marquardt	b	313	67 797
V. Grup B	Levenberg-Marquardt	h	313	92 452

Çizelge 4.59’da “ D ” olarak gösterilen sütun karakteristik boy olarak deney kirişlerine ait hangi değerin seçildiğini gösterir. “ S ” kirişin yüklü net açıklığını, “ h ” kirişin kesit yüksekliğini, “ b ” kirişin kesit genişliğini, “ L ” kiriş boyunu gösterir.

Yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan analizlere göre çıkan sonuçlar şu şekilde değerlendirilmiştir:

- vi) Üçüncü ve beşinci Gruplarda Levenberg-Marquardt algoritması ile, diğer gruplarda ise Doğrusal Analiz yöntemi ile en düşük hata ile A_c ve B_c değerleri hesaplanmıştır.
- vii) Bütün gruplar için A_c değeri 313 ile 494 arasında değişmektedir.
- viii) B_c değeri seçilen karakteristik boy “ D ” ye bağımlı olarak değişmektedir. “ D ” değeri büyüdükçe B_c değeri de ona bağlı olarak büyümektedir.
- ix) Karakteristik boy üçüncü, dördüncü ve beşinci gruplarda farklı farklı seçilmiştir. Seçilen her karakteristik boy için ayrı ayrı yapılan analizlerden şu sonuç çıkmıştır; farklı karakteristik boy “ D ” seçimi A_c değerini etkilememektedir ancak B_c değeri karakteristik boyla orantılı olarak değişmektedir.

- x) Doğrusal olmayan analiz sonucunda birinci grupta en büyük numunelerde artık gerilmenin varlığı gözlenmektedir. Bu nedenle Carpinteri'nin boyut etkisi denklemi bu numunelerin davranışını iyi bir şekilde açıklamaktadır. İkinci grupta, üçüncü grubun her üç bölümünde, dördüncü grubun her iki bölümünde de Carpinteri'nin boyut etkisi denklemi bu numunelerin boyut etkisi davranışını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Beşinci grubun her iki bölümünde de büyük numunelerde artık gerilmenin varlığı gözlenmektedir. Bu nedenle Carpinteri'nin boyut etkisi denklemi bu numunelerin davranışını iyi bir şekilde açıklamaktadır. Bu durum Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak Carpinteri'nin boyut etkisi denklemindeki parametreler bulunurken alınan başlangıç değerlerine ve bu değerlere ait hatalara bakıldığında gözlemlenebilir.
- xi) Bazant'ın analizinden hesaplanan hatalar ile Carpinteri'nin analizinden hesaplanan hatalar kıyaslandığında hata miktarının daha az olduğu analiz yönteminin boyut etkisi davranışını açıklamakta daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bazant'ın yüksek hata oranlı gruplarında Carpinteri, Carpinteri'nin yüksek hata oranlı gruplarında Bazant daha iyi sonuç vermektedir. Başlangıç değerleri ve hatalar Çizelge 4.60 da, Bazant ve Carpinteri'nin hataları birlikte Çizelge 4.61 de verilmiştir.

Çizelge 4.60 Levenberg-Marquardt algoritması için başlangıç değerleri ve hatalar

Gruplar	Başlangıç Değeri	Hata
I. Grup	151	30.2
II. Grup	139	43.9
III. Grup A	5	10.4
III. Grup B	15	10.4
III. Grup C	225	10.4
IV. Grup A	945	19.2
IV. Grup B	268	19.2
V. Grup A	69	52.9
V. Grup B	271	52.9

Çizelge 4.61 Levenberg-Marquardt algoritması için Bazant ve Carpinteri hataları

Gruplar	Bazant Hata Oranı	Carpinteri Hata Oranı	En Doğru Modelleyen Denklem
I. Grup	51.6	30.2	Carpinteri
II. Grup	24.9	43.9	Bazant
III. Grup A	4.9	10.4	Bazant
III. Grup B	4.9	10.4	Bazant
III. Grup C	4.9	10.4	Bazant
IV. Grup A	10.6	19.2	Bazant
IV. Grup B	10.6	19.2	Bazant
V. Grup A	79.9	52.9	Carpinteri
V. Grup B	79.9	52.9	Carpinteri

Çizelgelerde gösterilen hatalar, deney sonuçları ile modellere ait eğrilerin aralarındaki mesafelerin karelerinin toplamından hesaplanmaktadır. Bazant'ın en doğru modellediği gruplarda hata miktarı 25 i geçmezken, Carpinteri'nin en doğru modellediği gruplarda hata miktarı en az 30 olmaktadır. Bu sonuçlara bakıldığında Levenberg-Marquardt algoritmasının Bazant'ın denkleminin kullanıldığı durumlarda daha doğru sonuç verdiği söylenebilir.

4.4. Geliştirilmiş Bazant Modeli-Bazant Modeli ve Carpinteri Modellerinin Birlikte Analizi

Geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şeklinde birlikte analiz edilmiş ve hata miktarları bulunarak gruplara göre en uygun analiz yöntemi tespit edilmeye çalışılmıştır. Gerilme ve karakteristik boyut logaritmik ölçekte ele alınmıştır. Modellere ait eğriler çizilirken 4.2 ve 4.3 bölümlerinde hesaplanan, en düşük hata oranını veren doğrusal analiz veya Levenberg-Marquardt analizlerinden elde edilen değişkenler kullanılmıştır. En düşük hata oranını veren eğrinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasındaki eğimi

hesaplanmıştır. Bu eğimin karakteristik boyut büyüdükçe değişimi gözlenmiştir. Eğim arttıkça gevreklik de artmaktadır.

4.4.1. I. Grup deneyler için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.62’de verilmiştir.

Çizelge 4.62. I.Grup $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
S11.15a	1150	3,060698	34,69402	1,540255
S11.15c	1150	3,060698	31,68602	1,500868
M11.15a	2300	3,361728	24,2655	1,384989
M11.15b	2300	3,361728	26,58613	1,424655
M11.15c	2300	3,361728	26,26888	1,419442
L11.15a	4600	3,662758	27,0115	1,431549
L11.15b	4600	3,662758	27,47014	1,438861

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.63 de verilmiştir.

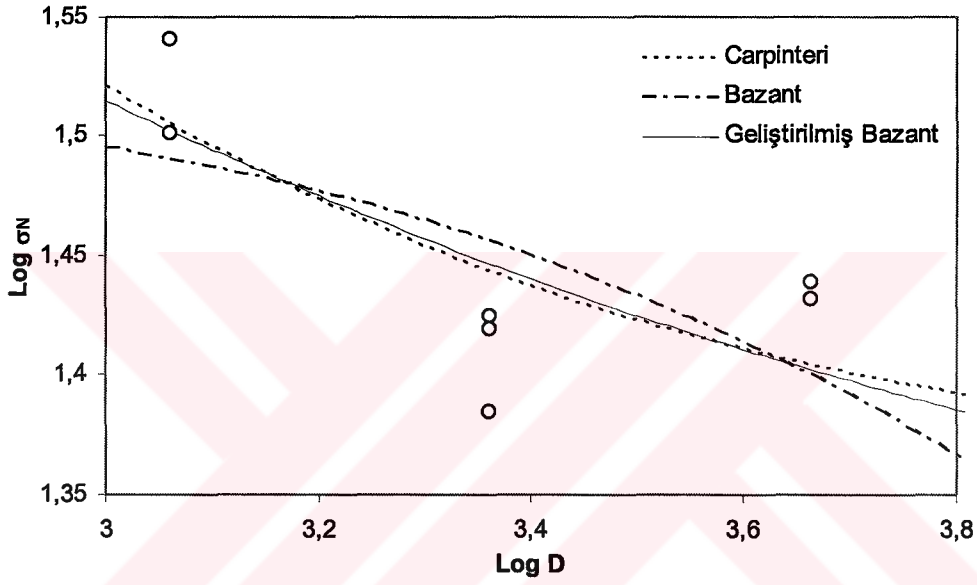
Çizelge 4.63. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{Nl} (MPa)	Levenberg-Marquardt	193,2858
	D_0 (mm)		5,286033
	σ_0 (MPa)		18,70969
Bazant	Bf_t (MPa)	Doğrusal Analiz I	22,36
	D_0 (mm)		6666,7

Çizelge 4.63 devam

Carpinteri	A_c	Doğrusal Analiz	493,76
	B_c		638612

Her üç yöntemin de birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz Şekil 4.38. de verilmiştir.



Şekil 4.38. I. Grup kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.38. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.64. de verilmiştir.

Çizelge 4.64. Üç yöntemin hataları

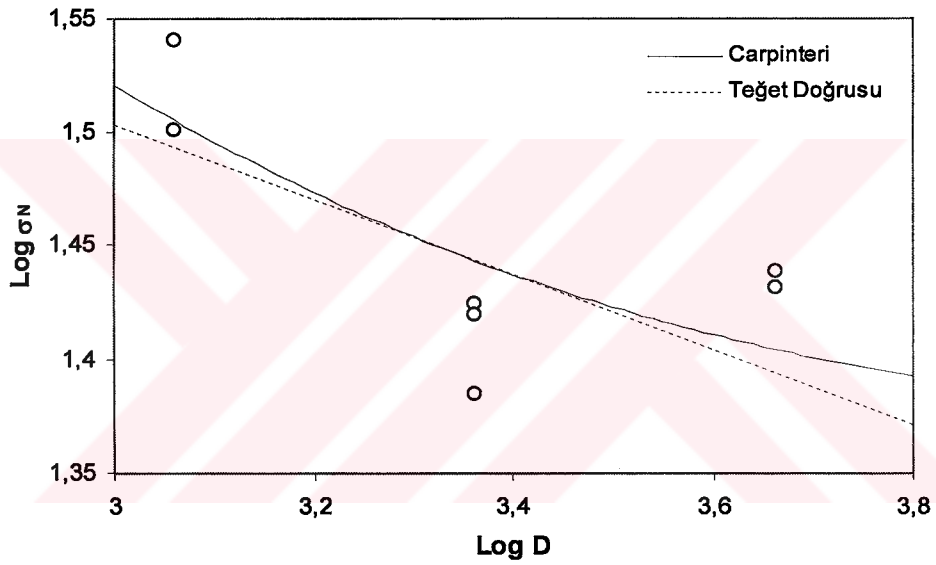
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,008647	0,012432	0,007519

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.65 de verilmiştir.

Çizelge 4.65 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,096798	27,96525	0,669034	18,70969

Hatası en az olan Carpinteri analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. log gerilme ve log boyut şeklinde çizilen gerilme değişim eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m=-0,1649240960$ dir (Şekil 4.39).



Şekil 4.39 I. Grup kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.2. II. Grup deneyler için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.66'da verilmiştir.

Çizelge 4.66. II. Grup $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
L11.15a	150	2,176091	27,0115	1,431549

Çizelge 4.66 Devam

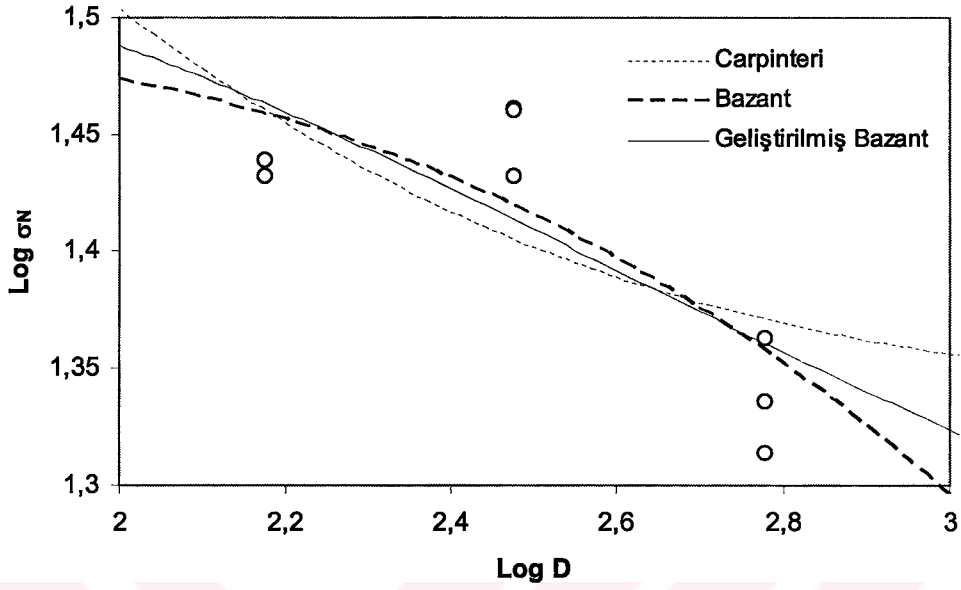
L11.15b	150	2,176091	27,47014	1,438861
L11.30a	300	2,477121	28,89453	1,460816
L11.30b	300	2,477121	27,01584	1,431618
L11.30c	300	2,477121	28,8558	1,460233
L11.60a	600	2,778151	20,58611	1,313574
L11.60b	600	2,778151	23,06692	1,36299
L11.60c	600	2,778151	21,66351	1,335729

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.67 de verilmiştir.

Çizelge 4.67. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{NI} (MPa)	Levenberg-Marquardt	23,6399
	D_0 (mm)		112,6395
	σ_0 (MPa)		13,5628
Bazant	Bf_t (MPa)	Levenberg-Marquardt	32,0955
	D_0 (mm)		609,58
Carpinteri	A_c	Levenberg-Marquardt	460,1934
	B_c		55811,25

Her üç yöntemin de birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz şekli Şekil 4.40. da verilmiştir.



Şekil 4.40. II.Grup kirişlerin geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.40. da veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.68. de verilmiştir.

Çizelge 4.68. Üç yöntemin hataları

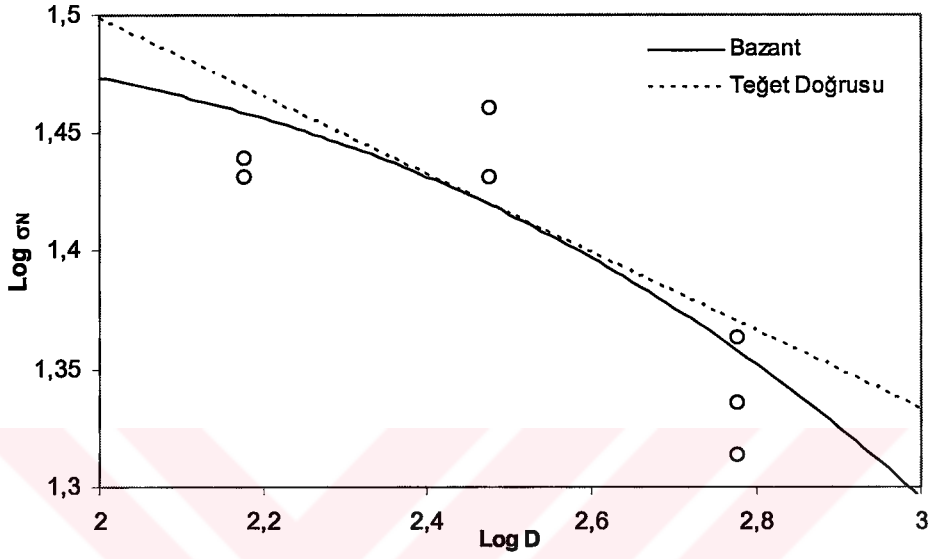
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,009213	0,007085	0,012787

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.69 da verilmiştir.

Çizelge 4.69 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,573725	25,9139	0,523379	13,5628

Hatası en az olan Bazant analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. Bu yöntemin eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hızasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m = -0,16499$ dir (Şekil 4.41.).



Şekil 4.41. II.Grup kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.3. III. Grup deneyleri için doğrusal olmayan analiz

4.4.3.1. III. Grup A deneyleri için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.70'de verilmiştir.

Çizelge 4.70. III.Grup A, $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
S5.7b	55	1,740363	27,71316	1,4427
S5.7c	55	1,740363	26,32498	1,4204
M11.15a	110	2,041393	24,2655	1,385
M11.15b	110	2,041393	26,58613	1,4247

Çizelge 4.70 devam

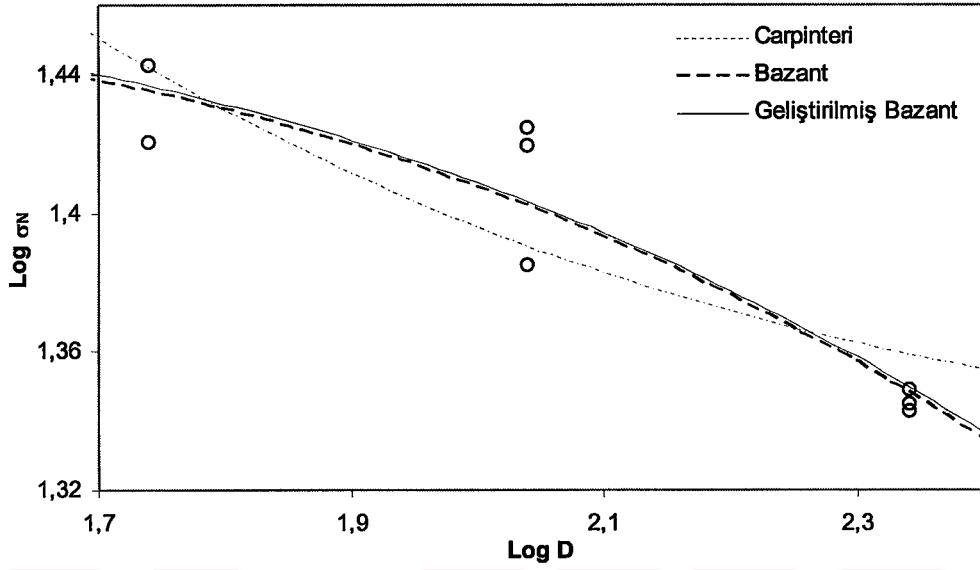
M11.15c	110	2,041393	26,26888	1,4194
L22.30a	220	2,342423	22,3392	1,3491
L22.30b	220	2,342423	22,02398	1,3429
L22.30c	220	2,342423	22,10383	1,3445

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.71 de verilmiştir.

Çizelge 4.71. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{NI} (MPa)	Levenberg-Marquardt	28,24192
	D_0 (mm)		249,2483
	σ_θ (MPa)		1,77514
Bazant	Bf_i (MPa)	Levenberg-Marquardt	29,81305
	D_0 (mm)		277,733
Carpinteri	A_c	Levenberg-Marquardt	441,9167
	B_c		17776,623

Her üç yöntemin de birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz Şekil 4.42. de verilmiştir.



Şekil 4.42. III.Grup A kirişleri için geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.42 de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.72. de verilmiştir.

Çizelge 4.72. Üç yöntemin hataları

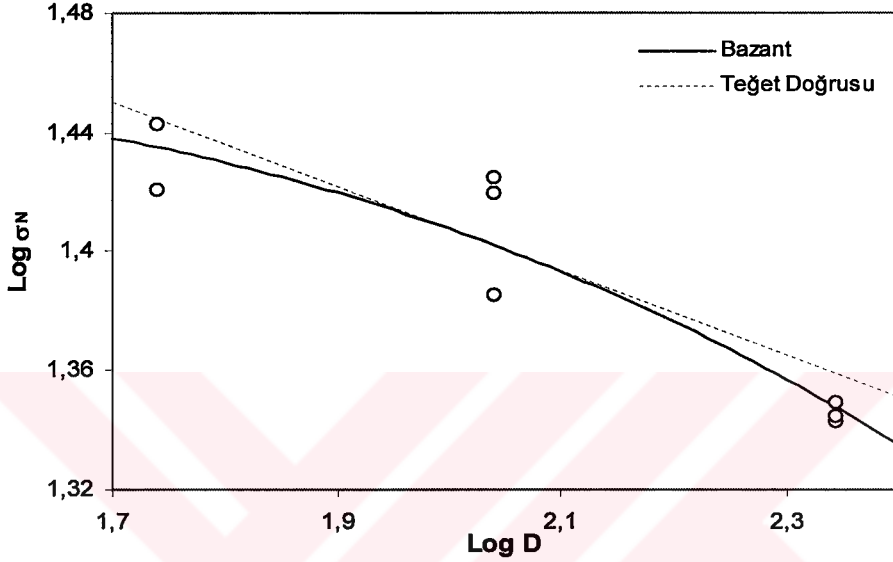
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,0014307	0,0014203	0,0030953

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.73 de verilmiştir.

Çizelge 4.73 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,062855	25,29923	0,070166	1,77514

Hatası en az olan Bazant analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. Bu yöntemin eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m=-0,14195$ dir (Şekil 4.43).



Şekil 4.43. III.Grup A kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.3.2. III. Grup B deneyleri için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.74’de verilmiştir.

Çizelge 4.74. III.Grup B, $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
S5.7b	75	1,875061	27,71316	1,4427
S5.7c	75	1,875061	26,32498	1,4204
M11.15a	150	2,176091	24,2655	1,385
M11.15b	150	2,176091	26,58613	1,4247
M11.15c	150	2,176091	26,26888	1,4194
L22.30a	300	2,477121	22,3392	1,3491

Çizelge 4.74. Devam

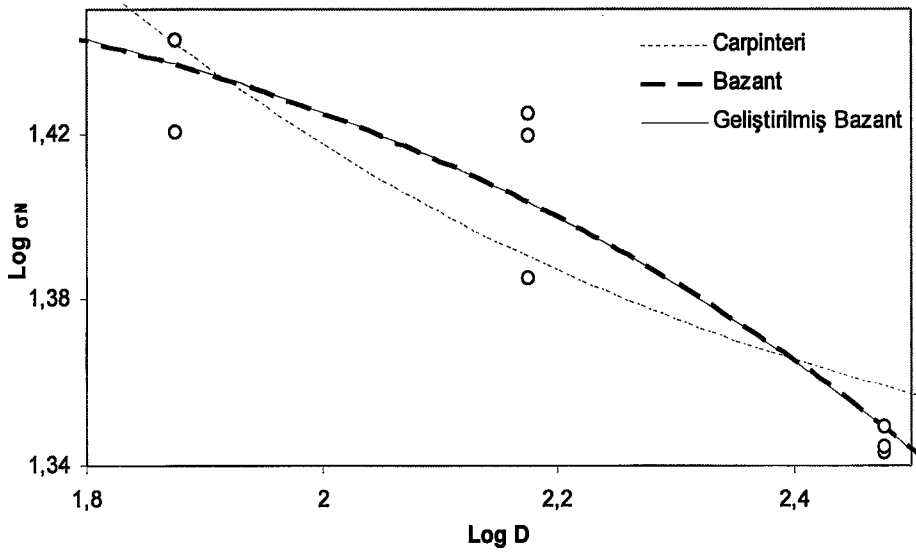
L22.30b	300	2,477121	22,02398	1,3429
L22.30c	300	2,477121	22,10383	1,3445

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.75 de verilmiştir.

Çizelge 4.75. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{NI} (MPa)	Levenberg-Marquardt	29,89247
	D_0 (mm)		372,9251
	σ_0 (MPa)		0,076095
Bazant	Bf_t (MPa)	Levenberg-Marquardt	29,91305
	D_0 (mm)		378,7272
Carpinteri	A_c	Levenberg-Marquardt	441,9167
	B_c		24240,85

Her üç yöntemin de birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz şekli Şekil 4.44. de verilmiştir.



Şekil 4.44. III. Grup B kirişleri için geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.44 de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.76. da verilmiştir.

Çizelge 4.76. Üç yöntemin hataları

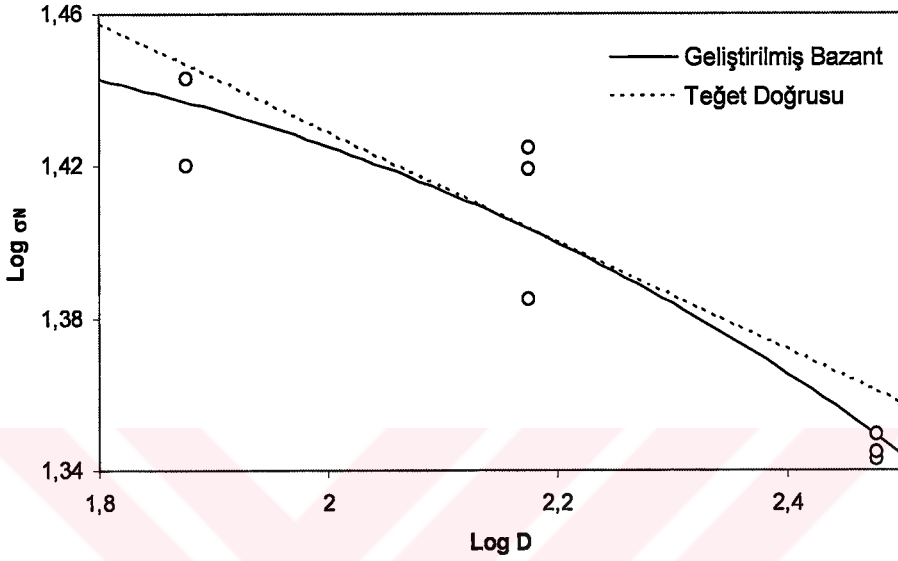
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,0014095	0,0014104	0,0030953

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.77 de verilmiştir.

Çizelge 4.77 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,002546	25,31978	0,003005	0,076095

Hatası en az olan Geliştirilmiş Bazant analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. Bu yöntemin eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m = -0,14309$ dir (Şekil 4.45).



Şekil 4.45 III. Grup B kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.3.3. III. Grup C deneyleri için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.78'de verilmiştir.

Çizelge 4.78. III. Grup C, $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
S5.7b	1150	3,060698	27,71316	1,4427
S5.7c	1150	3,060698	26,32498	1,4204
M11.15a	2300	3,361728	24,2655	1,385
M11.15b	2300	3,361728	26,58613	1,4247
M11.15c	2300	3,361728	26,26888	1,4194
L22.30a	4600	3,662758	22,3392	1,3491

Çizelge 4.78. Devam

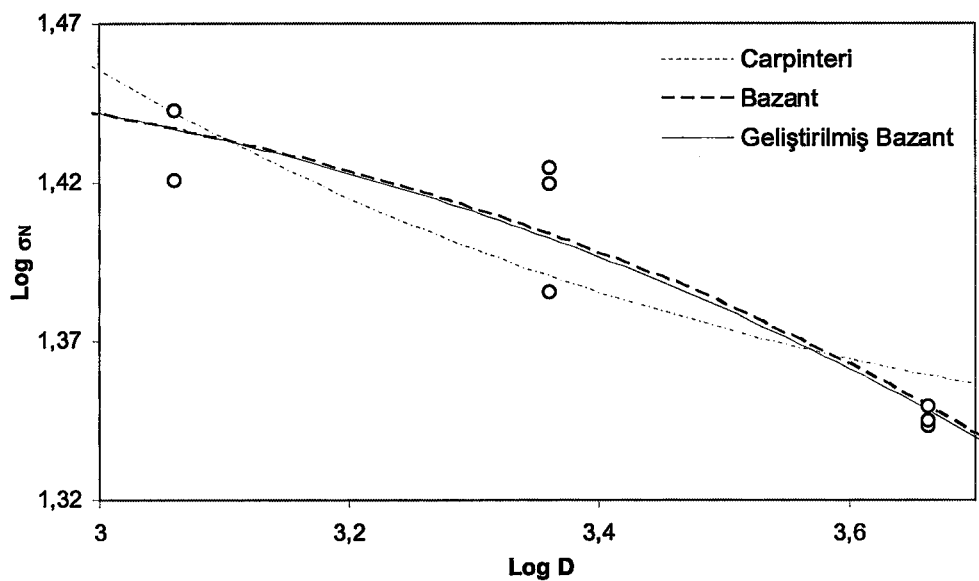
L22.30b	4600	3,662758	22,02398	1,3429
L22.30c	4600	3,662758	22,10383	1,3445

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.79 da verilmiştir.

Çizelge 4.79. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{NI} (MPa)	Levenberg-Marquardt	27,54102
	D_0 (mm)		4802,559
	σ_0 (MPa)		2,603199
Bazant	Bf_i (MPa)	Levenberg-Marquardt	29,91305
	D_0 (mm)		5807,15
Carpinteri	A_c	Levenberg-Marquardt	441,9167
	B_c		371693,1

Her üç yöntemin de birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz şekli Şekil 4.46. da verilmiştir.



Şekil 4.46. III.Grup C kirişleri için geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.46 da veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.80. de verilmiştir.

Çizelge 4.80. Üç yöntemin hataları

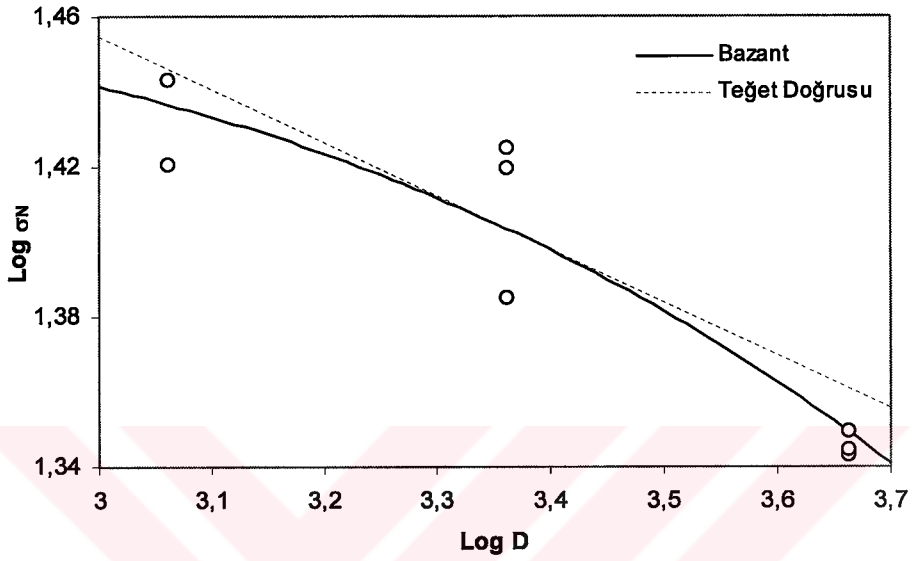
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,001440152	0,001410445	0,003095302

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.81 de verilmiştir.

Çizelge 4.81 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri σ_r

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,094521	25,25011	0,103097	2,603199

Hatası en az olan Bazant analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. Bu yöntemin eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m=-0,14195$ dir (Şekil 4.47).



Şekil 4.47. III. Grup C kırımların boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.4. IV. Grup deneyleri için doğrusal olmayan analiz

4.4.4.1. IV. Grup A deneyleri için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.82’de verilmiştir.

Çizelge 4.82. IV. Grup A, $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
S11.15a	150	2,176091	34,69402	1,540255
S11.15c	150	2,176091	31,68602	1,500868
M11.30a	300	2,477121	28,36323	1,452756
M11.30b	300	2,477121	29,39434	1,468264

Çizelge 4.82 Devam

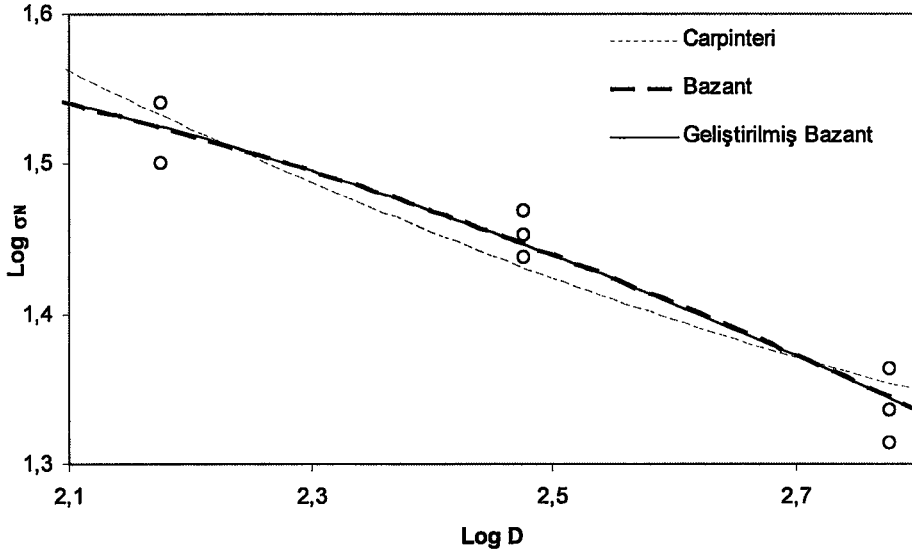
M11.30c	300	2,477121	27,40374	1,43781
L11.60a	600	2,778151	20,58611	1,313574
L11.60b	600	2,778151	23,06692	1,36299
L11.60c	600	2,778151	21,66351	1,335729

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.83 de verilmiştir.

Çizelge 4.83. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{NI} (MPa)	Levenberg-Marquardt	44,40938
	D_0 (mm)		189,7842
	σ_0 (MPa)		0,288846
Bazant	Bf_t (MPa)	Levenberg-Marquardt	44,38816
	D_0 (mm)		197,0315
Carpinteri	A_c	Levenberg-Marquardt	291,66
	B_c		130583

Her üç yöntemin de birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz şekli Şekil 4.48. de verilmiştir.



Şekil 4.48. IV Grup A kirişleri için geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.48 de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.84. de verilmiştir.

Çizelge 4.84. Üç yöntemin hataları

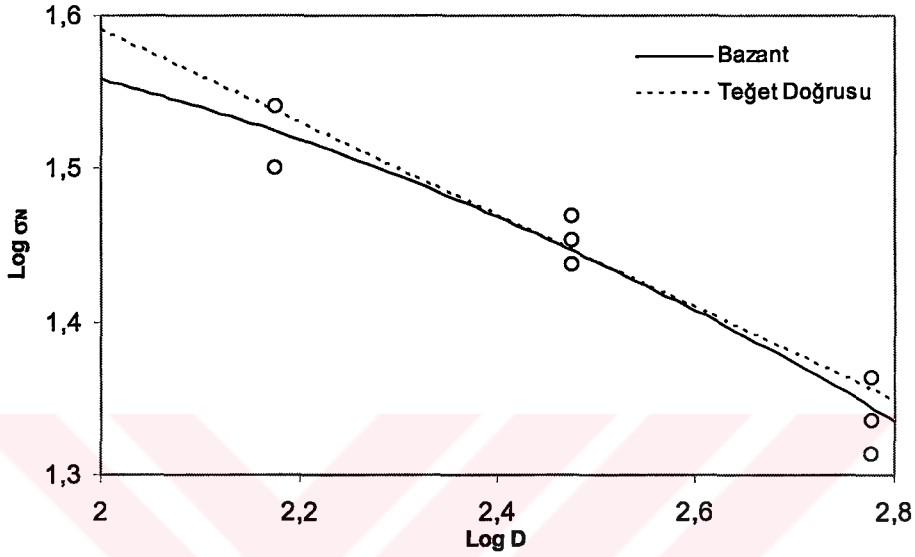
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,002753139	0,002745712	0,005007776

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.85 de verilmiştir.

Çizelge 4.85 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,006504	1,666179	0,173359	0,288846

Hatası en az olan Bazant analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. Bu yöntemin eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m=-0.30174$ dir (Şekil 4.49).



Şekil 4.49 IV. Grup A kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.4.2. IV. Grup B deneyleri için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.86'da verilmiştir.

Çizelge 4.86. IV. Grup B, $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
S11.15a	1150	3,060698	34,69402	1,540255
S11.15c	1150	3,060698	31,68602	1,500868
M11.30a	2300	3,361728	28,36323	1,452756
M11.30b	2300	3,361728	29,39434	1,468264
M11.30c	2300	3,361728	27,40374	1,43781
L11.60a	4600	3,662758	20,58611	1,313574

Çizelge 4.86 Devam

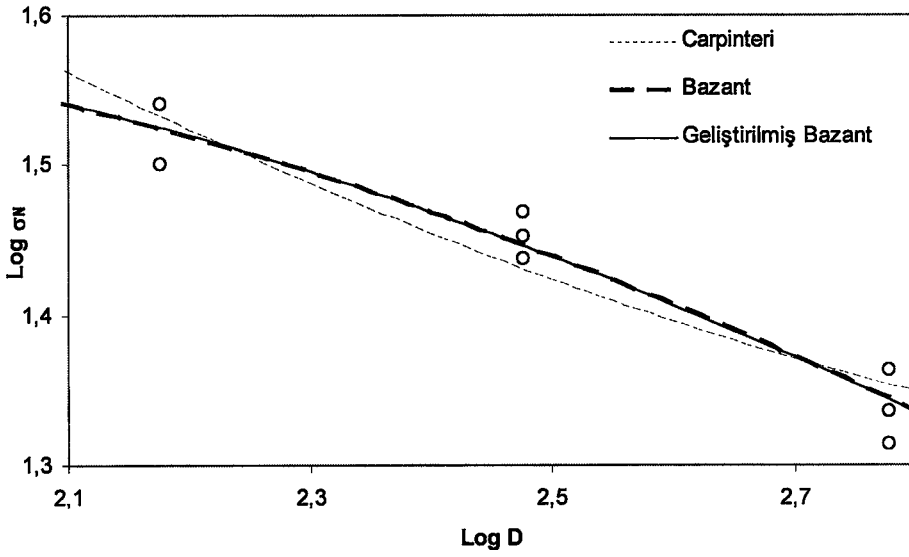
L11.60b	4600	3,662758	23,06692	1,36299
L11.60c	4600	3,662758	21,66351	1,335729

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.87 de verilmiştir.

Çizelge 4.87. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{NI} (MPa)	Levenberg-Marquardt	44,67027
	D_0 (mm)		1331,525
	σ_0 (MPa)		0,841964
Bazant	Bf_t (MPa)	Levenberg-Marquardt	44,38816
	D_0 (mm)		1510,5745
Carpinteri	A_c	Levenberg-Marquardt	291,66
	B_c		1001133

Her üç yöntemin de birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz şekli Şekil 4.50. de verilmiştir.



Şekil 4.50. IV Grup B kirişleri için geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.50. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.88. de verilmiştir.

Çizelge 4.88. Üç yöntemin hataları

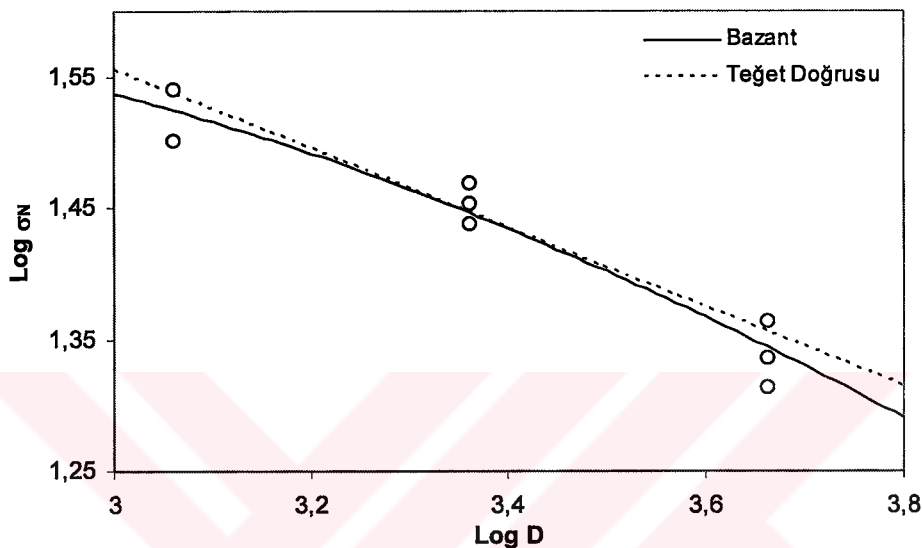
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,00276766	0,00274571	0,00500778

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.89 de verilmiştir.

Çizelge 4.89 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,018848	27,89081	0,030188	0,841964

Hatası en az olan Bazant analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. Bu yöntemin eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m=-0.30174$ dir (Şekil 4.51).



Şekil 4.51. IV.Grup B kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.5. V. Grup deneyleri için doğrusal olmayan analiz

4.4.5.1. V. Grup A deneyleri için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.90'da verilmiştir.

Çizelge 4.90. V.Grup A, $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
M5.7a	55	1,740363	40,7257	1,609869
M5.7b	55	1,740363	38,6016	1,586605

Tablo 4.90 devam

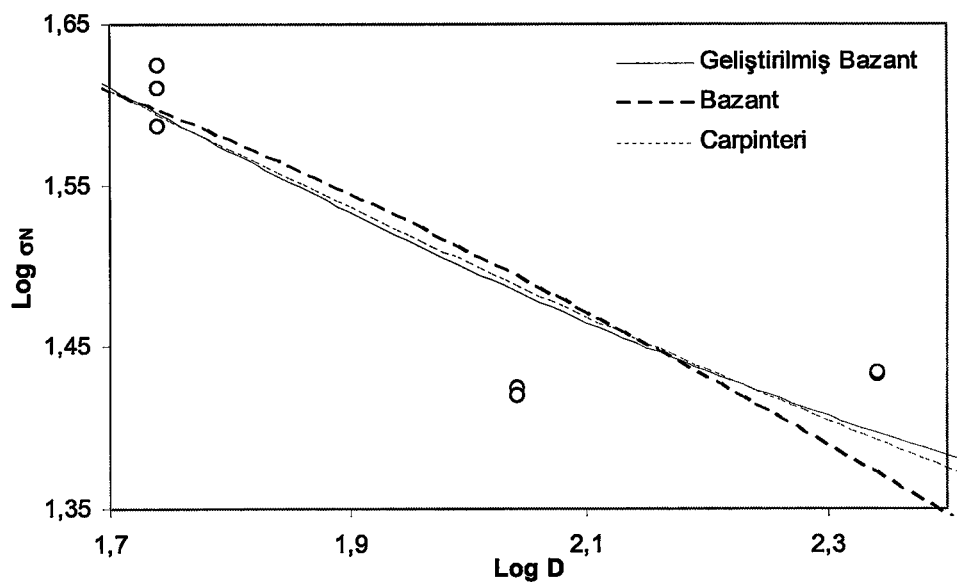
M5.7c	55	1,740363	42,09353	1,624215
M11.15b	110	2,041393	26,58613	1,424655
M11.15c	110	2,041393	26,26888	1,419442
M22.30b	220	2,342423	27,0805	1,432657
M22.30c	220	2,342423	27,17414	1,434156

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.91 de verilmiştir.

Çizelge 4.91. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{NI} (MPa)	Levenberg-Marquardt	170,1467
	D_0 (mm)		1,704763
	σ_0 (MPa)		9,735728
Bazant	Bf_t (MPa)	Doğrusal Analiz I	28,86
	D_0 (mm)		120
Carpinteri	A_c	Levenberg-Marquardt	312,749
	B_c		67797,1

Her üç yöntemin da birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz şekli Şekil 4.52. de verilmiştir.



Şekil 4.52. V Grup A kirişleri için geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.52. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.92. de verilmiştir.

Çizelge 4.92. Üç yöntemin hataları

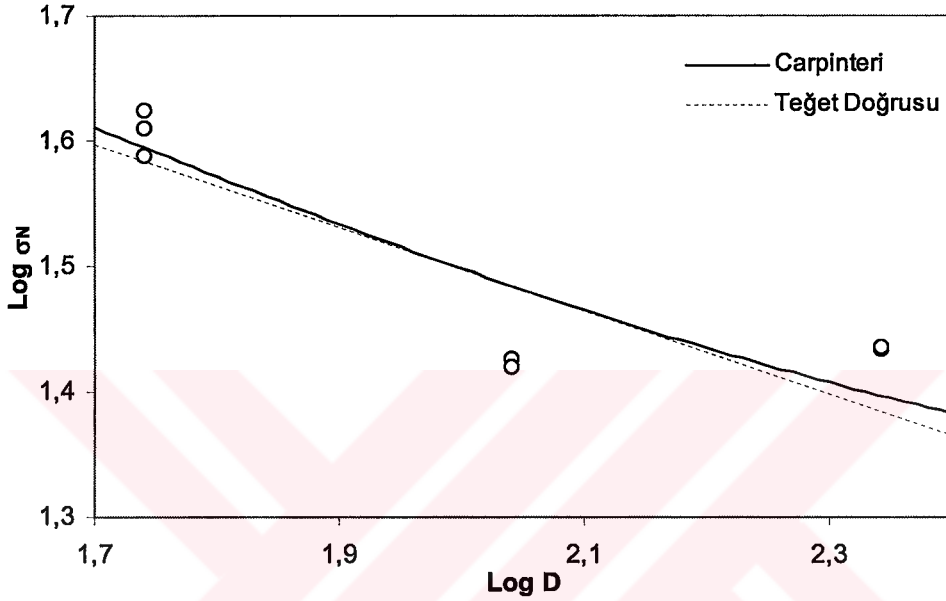
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,013378	0,018993	0,011599

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.93 de verilmiştir.

Çizelge 4.93 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,05722	30,75481	0,316559	9,735728

Hatası en az olan Carpinteri analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. Bu yöntemin eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m=-0.33161$ dir (Şekil 4.53).



Şekil 4.53. V.Grup A kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.5.2. V. Grup B deneyleri için doğrusal olmayan analiz

Bu grup için $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri Çizelge 4.94'de verilmiştir.

Çizelge 4.94. V.Grup B, $\log \sigma_N$ ve $\log D$ değerleri

	D (mm)	$\log D$	σ_N (MPa)	$\log \sigma_N$
M5.7a	75	1,875061	40,7257	1,609869
M5.7b	75	1,875061	38,6016	1,586605
M5.7c	75	1,875061	42,09353	1,624215
M11.15b	150	2,176091	26,58613	1,424655
M11.15c	150	2,176091	26,26888	1,419442

Çizelge 4.94 devam

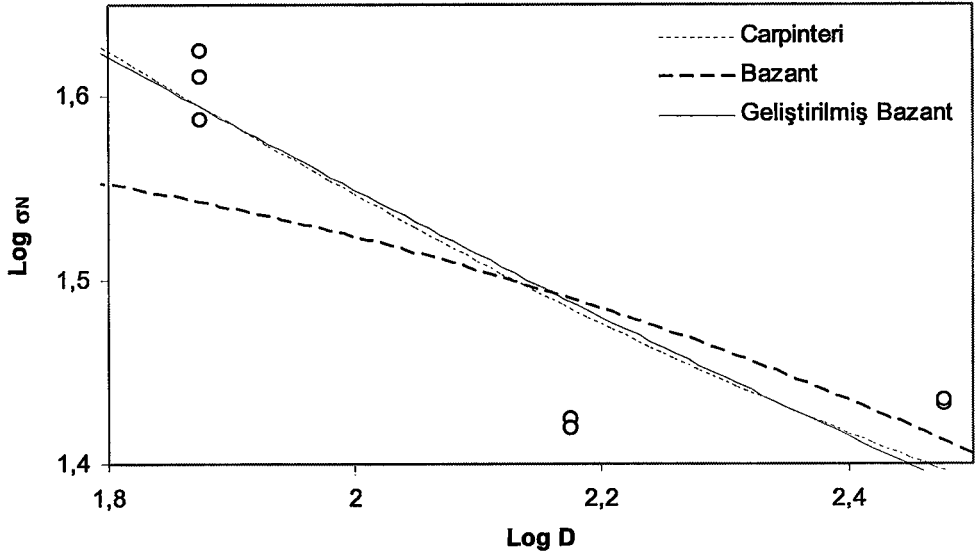
M22.30b	300	2,477121	27,0805	1,432657
M22.30c	300	2,477121	27,17414	1,434156

Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 4.95 de verilmiştir.

Çizelge 4.95. Değişkenler

Modeller	Değişkenler	En Düşük Hata Oranını Veren Analiz Yöntemi	Değeri
Geliştirilmiş Bazant	σ_{NI} (MPa)	Levenberg-Marquardt	167,4324
	D_0 (mm)		2,429445
	σ_0 (MPa)		9,602453
Bazant	Bf_i (MPa)	Doğrusal Analiz II	35,355
	D_0 (mm)		80
Carpinteri	A_c	Levenberg-Marquardt	252,63
	B_c		100347

Her üç yöntemin de birlikte gösterildiği doğrusal olmayan analiz şekli Şekil 4.54. de verilmiştir.



Şekil 4.54. V. Grup B kirişleri için geliştirilmiş Bazant modeli, Bazant modeli ve Carpinteri modelleri gerilme-karakteristik boyut şekli

Her üç analiz içinde en uygun olanı bulabilmek için Şekil 4.54. de veriler ile eğri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Çizelge 4.96. da verilmiştir.

Çizelge 4.96. Üç yöntemin hataları

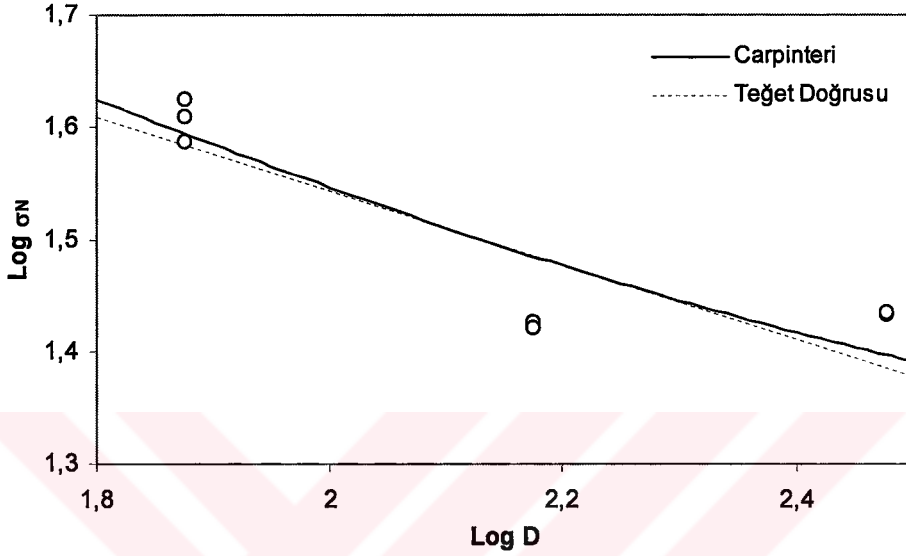
	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri
Hata	0,01344039	0,02345266	0,01159917

Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri Çizelge 4.97 de verilmiştir.

Çizelge 4.97 Geliştirilmiş Bazant yönteminin hesaplanmış değişkenleri

α_R	σ_I	α_r	σ_r
0,057351	30,7402	0,312374	9,602453

Hatası en az olan Carpinteri analiz yöntemi bu grup için en iyi sonuçları vermiştir. Bu yöntemin eğrisinin orta büyüklükteki karakteristik boyut hizasında eğimi hesaplanmıştır. Eğim, $m=-0.33161$ dir (Şekil 4.55).



Şekil 4.55. V.Grup B kirişlerin boyut etkisi analizindeki eğimi

4.4.6. Geliştirilmiş Bazant, Bazant ve Carpinteri boyut etkisi analizine göre deney sonuçlarının değerlendirilmesi

En düşük hata oranına bağlı olarak gruplara ait değişkenler Çizelge 4.98 de verilmiştir.

Çizelge 4.98 Gruplara ait değişkenlerin değerleri

Gruplar	En Düşük Hata Miktarını Veren Analiz	Geliştirilmiş Bazant			Bazant		Carpinteri	
		σ_{NI} (MPa)	D_0 (mm)	σ_0 (MPa)	Bf_t (MPa)	D_0 (mm)	A_c	B_c
I	Carpinteri						494	638612
II	Bazant				32	610		

Çizelge 4.98. devam

III A	Bazant				30	278		
III B	Gel.Bazant	30	373	0.08				
III C	Bazant				30	5807		
IV A	Bazant				44	197		
IV B	Bazant				44	1510		
V A	Carpinteri						313	67797
V B	Carpinteri						313	92452

Çizelge 4.98.'e bakıldığında, bazı deney sonuçlarının Bazant, bazı deney sonuçlarının ise Carpinteri boyut etkisi modelleri tarafından daha doğru açıklanabildiği görülmektedir. Sadece bir deney grubunda Geliştirilmiş Bazant modeli başarılı olmuş gibi görülmektedir. Ancak bütün deney gruplarına baktığımızda her grubu başarıyla açıklayabilen tek model Geliştirilmiş Bazant modelidir. Bunu daha iyi anlatabilmek için aşağıda Çizelge 4.99. da bütün deney grupları ve modellerin hataları verilmiştir. Bu çizelgeye bakılırsa, Bazant'ın veya Carpinteri'nin aynı anda çok başarılı olduğu her hangi bir deney grubu yoktur. Her ikisi de farklı deney gruplarında başarılı olmuşlardır. Ancak Geliştirilmiş Bazant Modeli her grupta diğer iki model kadar olmasa da onlara yakın sonuçlar ile başarılı olmuştur. Deney sonuçlarını tek bir model kullanarak açıklamak istenirse en başarılı olarak Geliştirilmiş Bazant Modeli görülmektedir. Bu modeli kullanarak yapılan değerlendirmeler çok az hata ile Bazant ve Carpinteri modellerinin başarısını yakalamaktadır.

Çizelge 4.99. Deney gruplarının her model için hataları

	Geliştirilmiş Bazant	Bazant	Carpinteri	Gel.Bazant Modelinin En İyi Modelle Farkı
I	0,008647	0,012432	0,007519	-0,001128
II	0,009213	0,007085	0,012787	-0,002128
III A	0,001431	0,001420	0,003095	-0,000011

Çizelge 4.99. devam

III B	0,001409	0,001410	0,003095	0,000001
III C	0,001440	0,001410	0,003095	-0,000030
IV A	0,002753	0,002746	0,005008	-0,000007
IV B	0,002768	0,002746	0,005008	-0,000022
V A	0,013378	0,018993	0,011599	-0,001779
V B	0,013440	0,023453	0,011599	-0,001841

Çizelge 4.99 a bakınca Geliştirilmiş Bazant Modelinin en başarılı modele göre yaptığı hatalar gruplara göre şöyle sıralanabilir; I. Grupta %15, II.Grupta %30, III.Grup A da %7,7, III.Grup B de %0,7, III.Grup C de %2,1, IV. Grup A da %0,025, IV.Grup B de %0,8, V.Grup A da %9,4 ve V.Grup B de %7,8.

4.4.7. Bütün gruplar için K_{Ic} , G_f ve c_f değerleri

İkinci bölümde kırılma mekaniği parametreleri olan kritik gerilme yoğunluk çarpanı K_{Ic} , boyut etkisi modelinde kırılma enerjisi G_f ve kritik etkili çatlak uzunluğu c_f değerlerinin hesap yöntemleri verilmişti. Bu bölümde, bu değerler hesaplanmıştır. Değerlerin bulunmasında başlangıç çatlak boyu ve son çatlak boyu değerleri kullanılmaktadır. Ancak yapılan deneylerde deney düzeneği açısından başlangıç çatlağı ve bitiş çatlağı değerleri yoktur. Kırılma mekaniğinin bu üç parametresi şekil (ya da geometri) etkisinden ve başlangıç ve bitiş çatlağı değerlerinden (k_0 ve k_0') bağımsız olarak hesaplanmış ve bu şekilde kıyaslanmıştır. Her grubun en düşük hata miktarını veren analiz yönteminin sonuçları Çizelge 4.100'de verilmiştir.

Çizelge 4.100 Kırılma Mekaniği Değişkenleri

Gruplar	D (mm)	K_{Ic} / k_0	$G_f E / k_0^2$	$c_f 2k_0' / k_0$
I	2300	1825	$3,000 \times 10^{-7}$	$1,500 \times 10^{-4}$
II	300	792	$1,593 \times 10^{-6}$	$1,640 \times 10^{-3}$

Çizelge 4.100 Devam

III A	110	497	$4,051 \times 10^{-6}$	$3,600 \times 10^{-3}$
III B	150	582	$2,951 \times 10^{-6}$	$2,640 \times 10^{-3}$
III C	2300	2280	$0,192 \times 10^{-6}$	$0,172 \times 10^{-3}$
IV A	300	623	$2,576 \times 10^{-6}$	$5,075 \times 10^{-3}$
IV B	2300	1725	$0,336 \times 10^{-6}$	$0,662 \times 10^{-3}$
V A	110	316	$1,000 \times 10^{-5}$	$8,333 \times 10^{-3}$
V B	150	353	$8,000 \times 10^{-6}$	$6,666 \times 10^{-3}$

Seçilen karakteristik boyut D, Çizelge 4.100'den de görülebileceği gibi, K_{Ic} , G_f ve c_f değerlerini etkilemektedir. k_0 ve k_0' fonksiyonları hesaplanamadığı için grupların birbirleri ile kıyaslamasını yapmak olanaklı değildir. Ancak farklı karakteristik boyut seçilebilen grupları kendi içinde kıyaslamak mümkün olabilir.

III. Grupta deney elemanları ve yükleme düzeni aynı olduğu için kendi içinde kıyaslama yapılabilir. III.Grupta, seçilen farklı karakteristik boyutlara göre farklı K_{Ic} , G_f ve c_f değerleri elde edilmiştir. Genel olarak karakteristik boyut büyüdükçe K_{Ic} değeri büyümekte, G_f ve c_f değerleri ise küçülmektedir. Aynı davranış dördüncü ve beşinci gruplarda da görülmüştür. Bu grupları da kendi içinde değerlendirmek mümkündür.

4.4.8. Bütün gruplar için moment-eğrilik, yük-yerdeğiştirme, gerilme-birim yerdeğiştirme eğrileri ve değerlendirmeleri

Bütün gruplar için moment-eğrilik, yük-yerdeğiştirme, gerilme-birim yerdeğiştirme değerleri hesaplanmış ve eğri haline getirilmiştir. Her bir deney elemanına ait, yük-yerdeğiştirme eğrileri Ek-A da verilmiştir. Moment-eğrilik hesabı için deney sırasında orta nokta dönme yerdeğiştirmelerinin kayıtları yerdeğiştirme ölçerler yardımı ile kaydedilmiştir. Yerdeğiştirme ölçerlerin deneyden önce kirişden ne kadar uzakta yerleştirildikleri ölçüldüğünden, deney sırasında kirişin herhangi bir lifi için

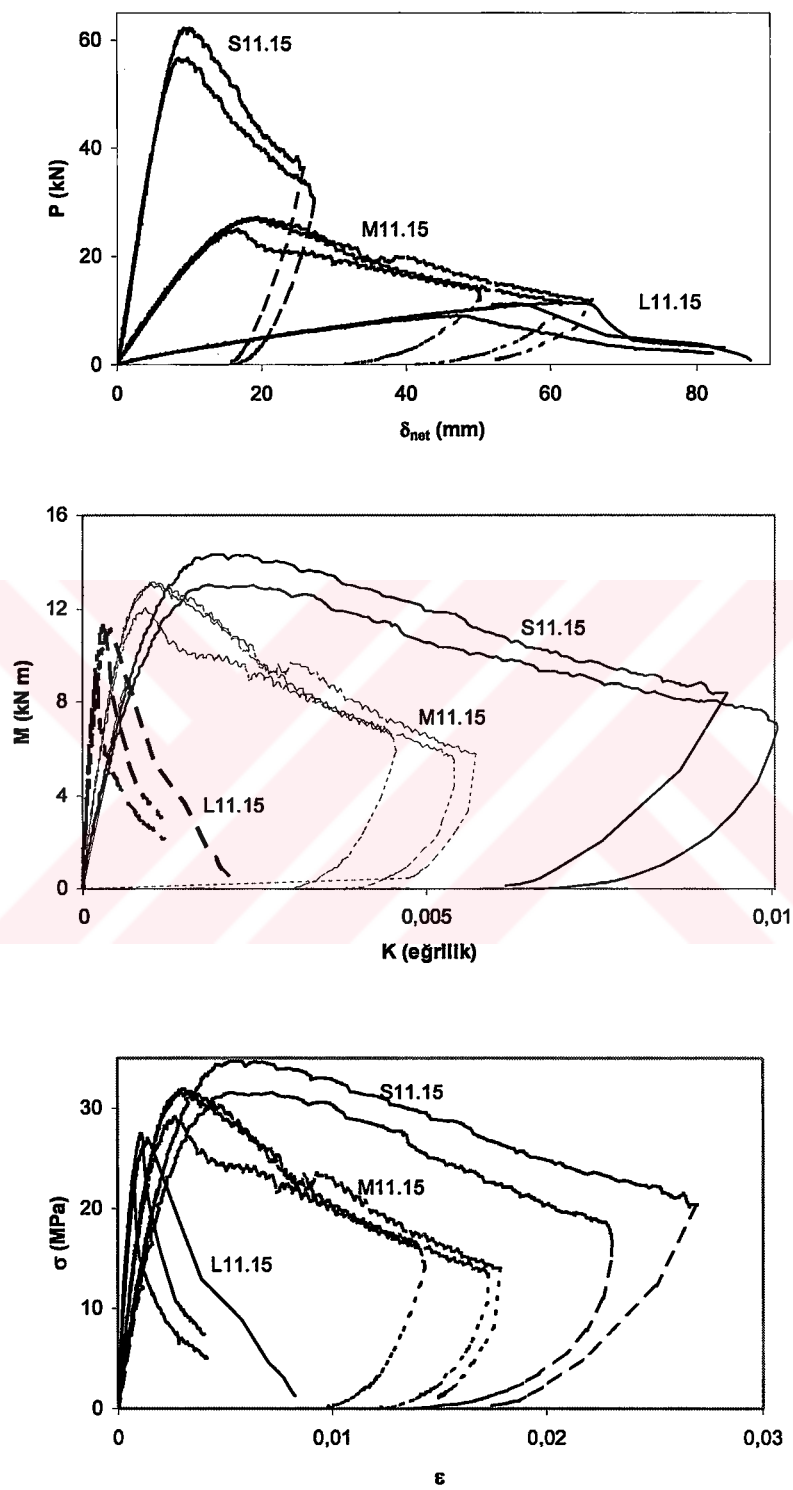
herhangi bir yüke ait lif uzama miktarı kayıtlardan hesaplanabilmiştir. Tarafsız eksenenden üst life olan mesafeye c denirse ve belirli bir c değeri anındaki üst lif uzaması ϵ_{ci} de bilindiğinden ϵ_{ci}/c değerinin hesaplanması ile eğrilik bulunmuştur (Şekil 4.56).



Şekil 4.56. Moment-eğrilik hesap yöntemi

4.4.8.1. I.Grup için gerilme-birim uzama, moment-eğrilik ve yük-düşey yerdeğiştirme şekilleri

I.Grupda yer alan S11.15a, S11.15b, S11.15c, M11.15a, M11.15b, M11.15c, L11.15a, L11.15b, L11.15c deney elemanlarına ait yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik ve gerilme-birim uzama şekilleri Şekil 4.57.de verilmiştir.

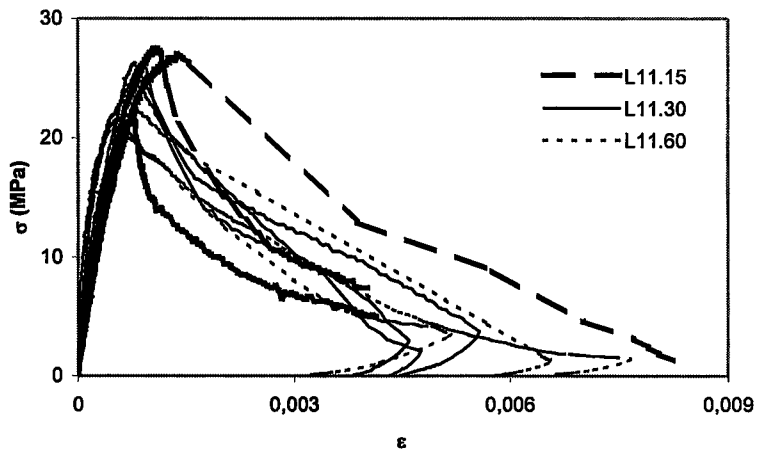
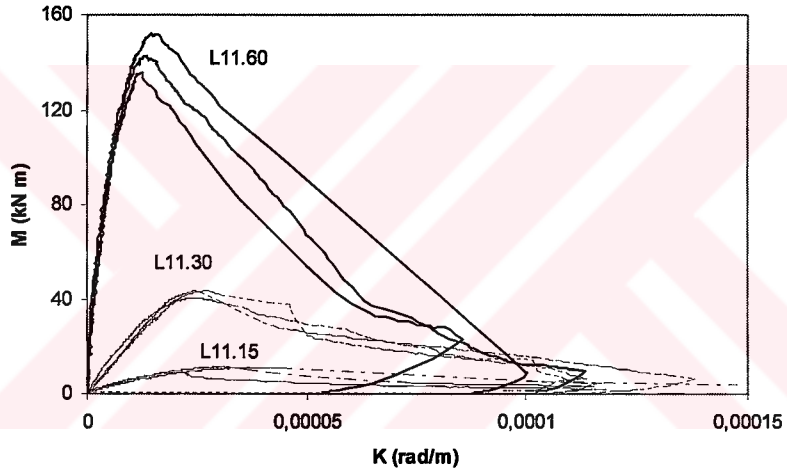
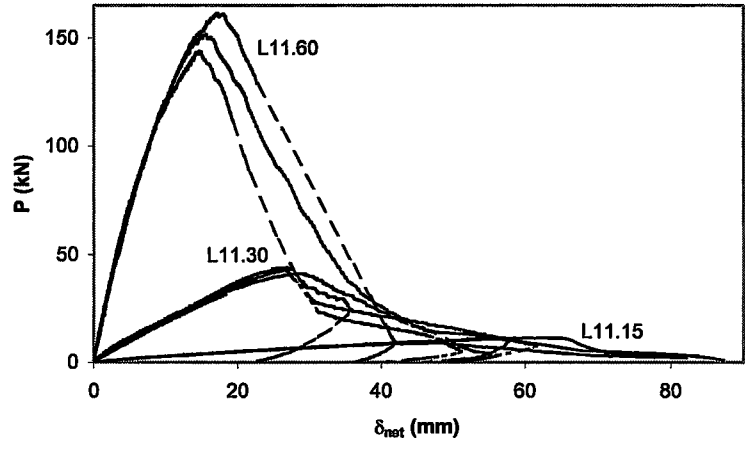


Şekil 4.57 I.Grup yük-düşey yerdeğiştirme, moment eğrilik, gerilme-birim uzama

Bu grupta her üç şekile de bakarak, deney kirişinin boyu arttıkça davranışın daha gevrek olduğu görülmektedir. Aynı kesite sahip farklı boylardaki bu grup elemanlarının enerji tüketme kapasitelerine bakıldığında, yani moment-eğrilik, yük-yerdeğiştirme, gerilme-birim yerdeğiştirme oranı şekli altındaki alana bakıldığında boyları küçük kirişlerin daha fazla enerji tüketebileceği görülür. Büyük boya sahip kirişlerde özellikle en büyük moment, yük ve gerilme değerinden sonra ani düşüş görülmekte, orta ve küçük boylardaki kirişlerde bu düşüşün daha hafif olduğu gözlenmektedir. Laboratuvar şartlarında belirli oranlarda küçültülerek hazırlanan deney numuneleri gerçek boyutlarında özellikle en büyük yük sonrasında çok farklı davranış göstermektedir.

4.4.8.2. II.Grup için gerilme-birim uzama, moment-eğrilik ve yük-düşey yerdeğiştirme şekilleri

II.Grupda yer alan L11.15a, L11.15b, L11.15c, L11.30a, L11.30b, L11.30c, L11.60a, L11.60b, L11.60c deney elemanlarına ait yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik ve gerilme-birim uzama şekilleri Şekil 4.58.de verilmiştir.

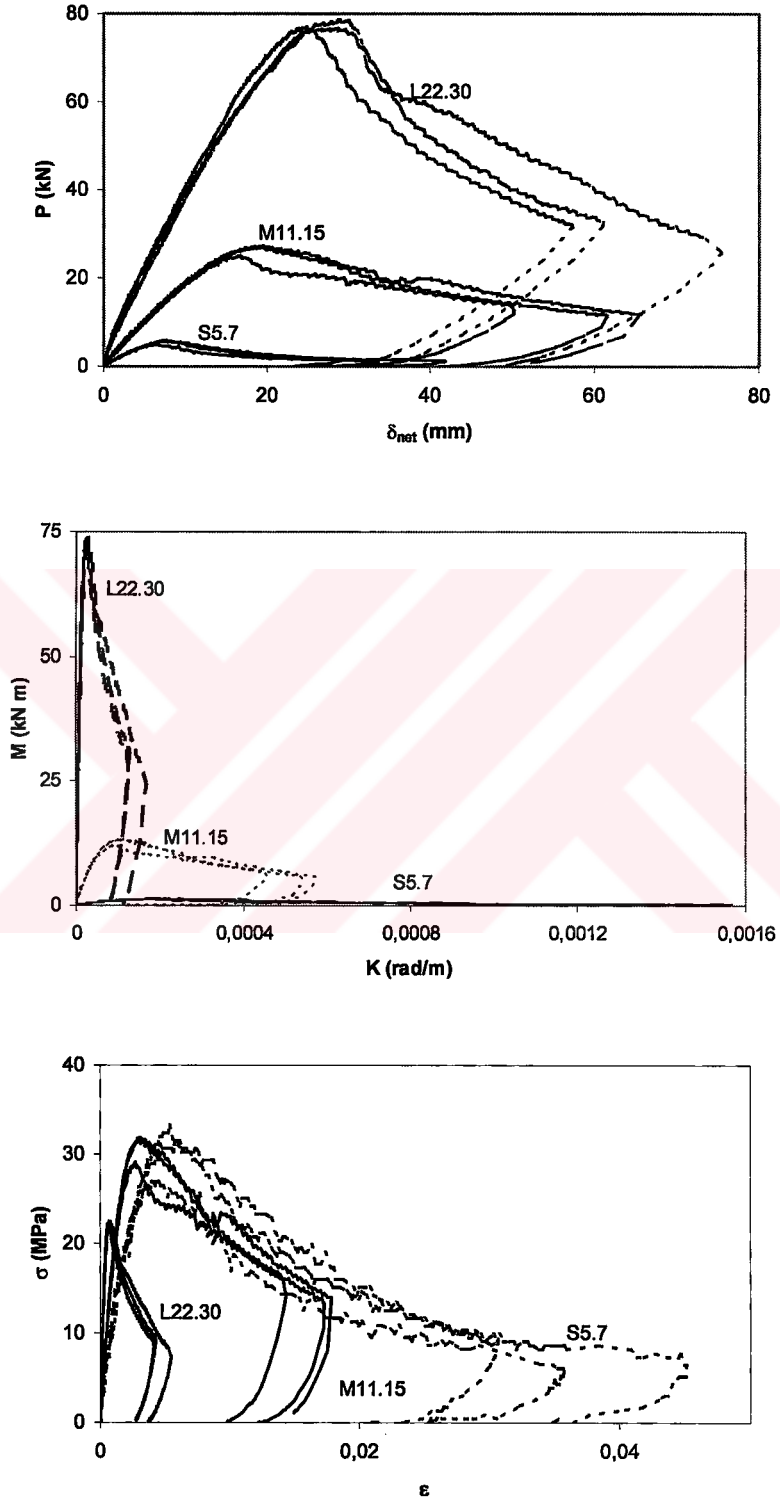


Şekil 4.58. II.Grup yük-düşey yerdeğiştirme moment eğrilik, gerilme-birim uzama

Bu grupta deney kirişlerinin kesit yüksekliği arttıkça aynı eğrilik ve yerdeğiştirme için daha çok moment ve yük taşıdıkları, kesit yüksekliği azaldıkça eğilme rijitliğinin azaldığı, küçük kesit yüksekliğine sahip kirişlerde tepe noktasından sonra yumuşama bölgesinin eğimin büyük kesit yüksekliğine sahip kirişlere göre az olduğu, büyük kesit yüksekliğine sahip kirişlerde tepe noktasının rahatlıkla seçilebilmesine karşın küçük kesit yüksekliğine sahip kirişlerde tepe noktasının ayırt edilemediği görülmektedir. Bu grupta sadece kesit yüksekliğinin artırılmasıyla moment-eğrilik ve yük-yerdeğiştirme davranışının ne kadar değiştiği anlaşılmaktadır. Gerilme-birim uzama şeklinde diğer iki şekildeki kadar olmasa da boyut değişimi ile davranışın değişimi gözlenebilmektedir. Büyük kesit yüksekliğine sahip kirişlerde davranışın küçük kesit yüksekliğine sahip kirişlere oranla daha gevrek olduğu görülmektedir.

4.4.8.3. III.Grup için gerilme-birim uzama, moment-eğrilik ve yük-düşey yerdeğiştirme şekilleri

III.Grupda yer alan S5.7a, S5.7b, S5.7c, M11.15a, M11.15b, M11.15c, L22.30a, L22.30b, L22.30c, deney elemanlarına ait yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik ve gerilme-birim uzama şekilleri Şekil 4.59.da verilmiştir.

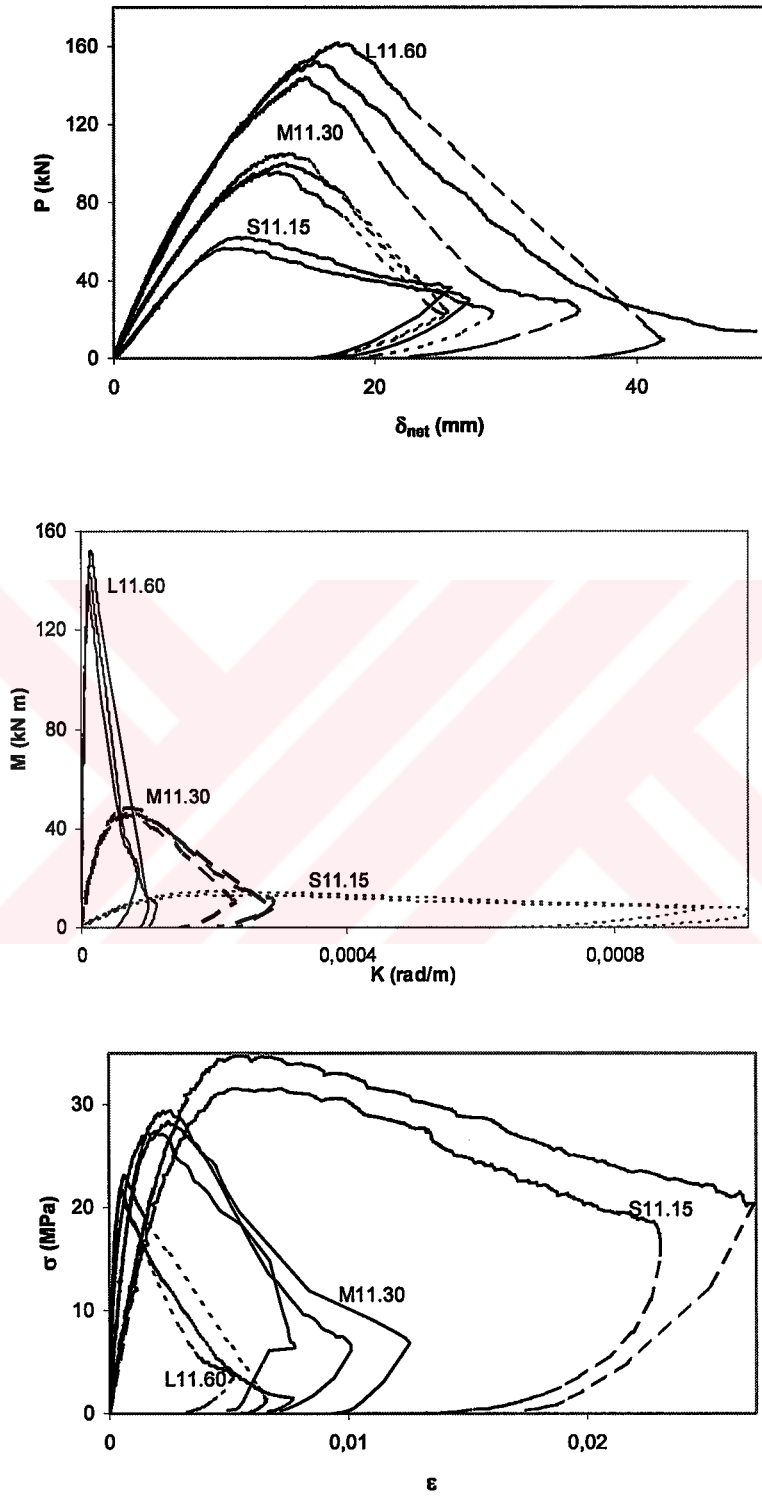


Şekil 4.59. III.Grup yük-düşey yerdeğiştirme moment eğrilik, gerilme-birim uzama

Bu grupta deney kirişlerinin boyu, kesit yüksekliği ve genişliği arttıkça aynı eğrilik ve yerdeğiştirme için II.gruba göre daha fazla moment ve yük taşıdıkları, kirişlerinin boyu, kesit yüksekliği ve genişliği azaldıkça eğilme rijitliğinin II.gruba göre daha fazla azaldığı, küçük boy, kesit yüksekliği ve genişliğine sahip kirişlerde tepe noktasından sonra yumuşama bölgesinin eğimin büyük kesit yüksekliğine sahip kirişlere göre az olduğu, büyük kesit yüksekliğine sahip kirişlerde tepe noktasının rahatlıkla seçilebilmesine karşın küçük kesit yüksekliğine sahip kirişlerde tepe noktasının ayırt edilemediği görülmektedir. Gerilme-birim uzama şekline bakıldığında diğer iki şekil kadar çok fark görülme de deney kirişlerinin tepe noktalarının ve özellikle tepe noktasından sonraki davranışlarının farklı olduğu görülmektedir. Daha küçük deney elemanlarının daha büyük elemanlara göre daha fazla gerilme taşıyabildiği ve daha fazla enerji tüketebildikleri görülmektedir.

4.4.8.4. IV.Grup için gerilme-birim uzama, moment-eğrilik ve yük-düşey yerdeğiştirme şekilleri

IV.Grupda yer alan S11.15a, S11.15b, S11.15c, M11.30a, M11.30b, M11.30c, L11.60a, L11.60b, L11.60c, deney elemanlarına ait yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik ve gerilme-birim uzama şekilleri Şekil 4.60.da verilmiştir.

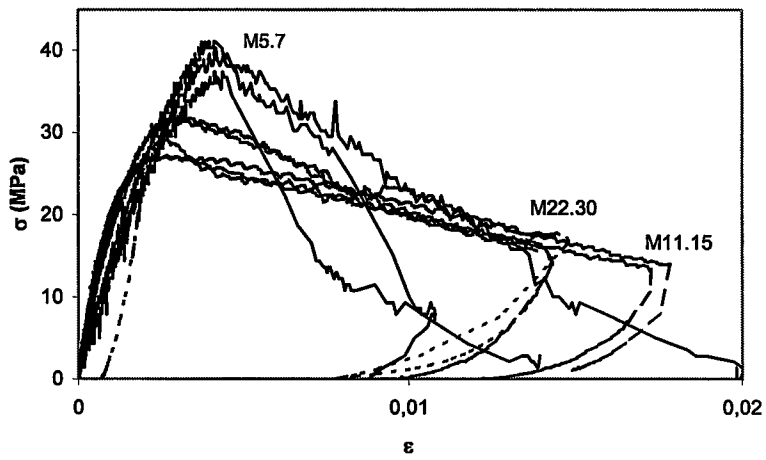
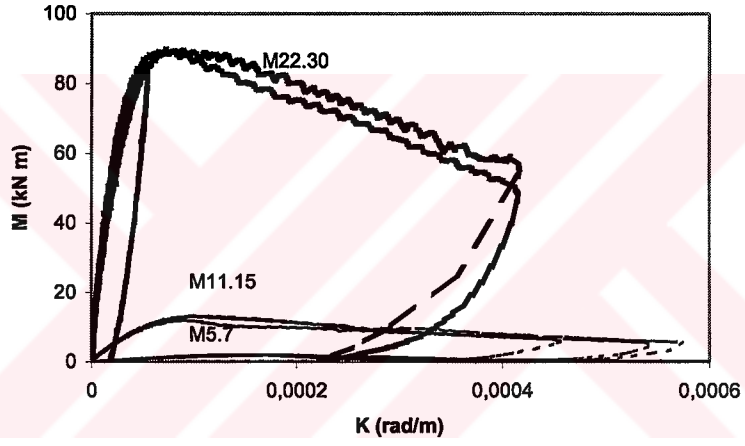
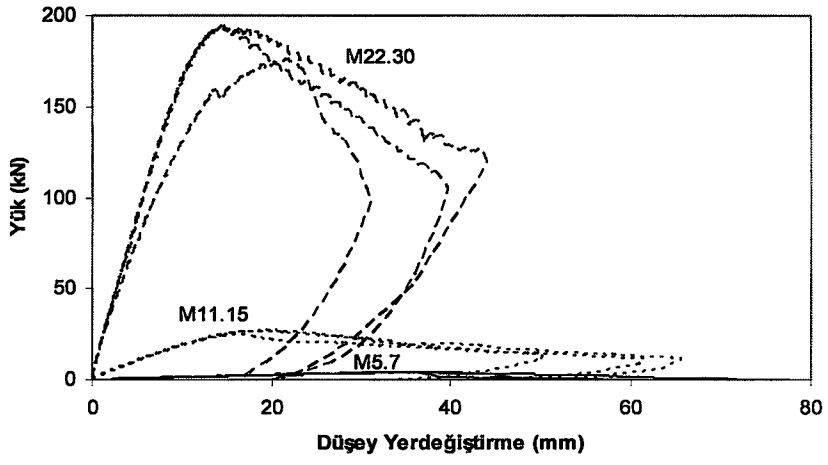


Şekil 4.60. IV.Grup yük-düşey yerdeğiştirme moment eğrilik, gerilme-birim uzama

Bu grupta deney kirişlerinin boyu ve kesit yüksekliği arttıkça davranışlarının, özellikle gerilme-birim yerdeğiştirme davranışının değiştiği görülmektedir. Kirişlerinin boyu ve kesit yüksekliği azaldıkça eğilme rijitliğinin azaldığı, küçük boy ve kesit yüksekliğine sahip kirişlerde tepe noktasından sonra yumuşama bölgesinin eğimin büyük boy ve kesit yüksekliğine sahip kirişlere göre az olduğu, büyük boy ve kesit yüksekliğine sahip kirişlerde tepe noktasının rahatlıkla seçilebilmesine karşın küçük kesit yüksekliğine sahip kirişlerde tepe noktasının ayırt edilemediği görülmektedir.

4.4.8.5. V.Grup için gerilme-birim uzama, moment-eğrilik ve yük-düşey yerdeğiştirme şekilleri

IV.Grupda yer alan M5.7a, M5.7b, M5.7c, M11.15a, M11.15b, M11.15c, M22.30a, M22.30b, M22.30c, deney elemanlarına ait yük-düşey yerdeğiştirme, moment-eğrilik ve gerilme-birim uzama şekilleri Şekil 4.61.de verilmiştir.



Şekil 4.61. V.Grup yük-düşey yerdeğiştirme moment eğrilik, gerilme-birim uzama

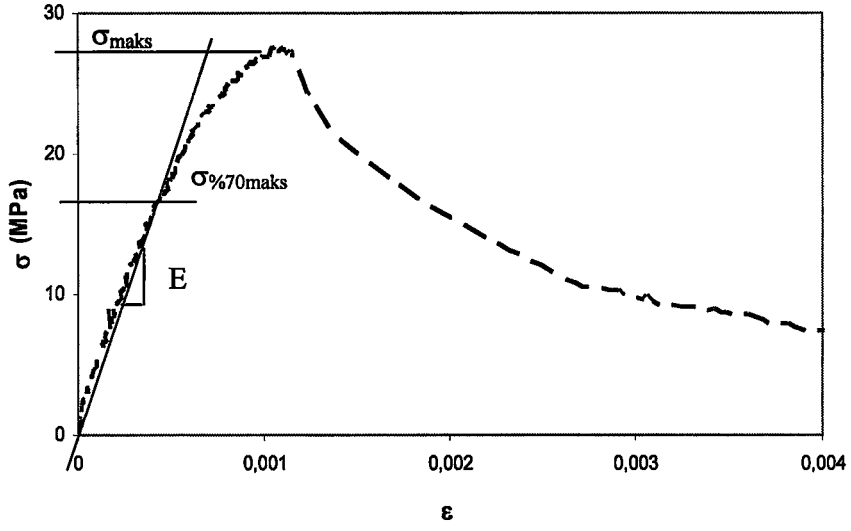
Bu grupta deney kirişlerinin kesit yüksekliği ve genişliği arttıkça aynı eğrilik ve yerdeğiştirme için daha fazla moment ve yük taşıdıkları, kirişlerinin kesit yüksekliği ve genişliği azaldıkça eğilme rijitliğinin azaldığı, küçük kesit yüksekliğine ve genişliğine sahip kirişlerde tepe noktasından sonra yumuşama bölgesinin eğimin büyük kesit yüksekliğine ve genişliğine sahip kirişlere göre az olduğu, büyük kesit yüksekliğine ve genişliğine sahip kirişlerde tepe noktasının rahatlıkla seçilebilmesine karşın küçük kesit yüksekliğine ve genişliğine sahip kirişlerde tepe noktasının ayırt edilemediği görülmektedir. Gerilme-birim uzama şeklinde kesit boyutları küçüldükçe numunelerin daha sünük davranış sergilediği görülmektedir.

Her beş grup birlikte incelendiğinde numunelerin kesit boyutları büyüdükçe moment-eğrilik, yük-yerdeğiştirme ve gerilme-birim uzama davranışlarında değişiklikler olduğu gözlenmektedir. Boyutlar büyüdükçe gevreklik artmakta, yerdeğiştirme, enerji tüketme kapasiteleri azalmaktadır. Bu davranış yüzünden özellikle laboratuvar ortamında yapılan deneylerde bulunan moment-eğrilik davranışı gerçek boyutlardaki elemanlar ile aynı sonucu vermemektedir. Araştırmacıların özellikle buna dikkat etmeleri gerekmektedir.

Deney sonuçlarından M11.15 grubuna ait numunelerin beklenen sonucu vermediği, dayanımlarının beklenenden daha az çıktığı görülmektedir. Numuneler hazırlanırken, beton döküm aşamasında istenmeden bir hata yapıldığı düşünülmektedir. Donatılar yüzünden iyi yerleşmemiş beton bu duruma neden olmuş olabilir.

4.4.9 Kirişlerin elastisite modülleri

Bütün kirişlere ait gerilme-birim uzama şekillerinden doğrusal bölge için elastisite modülleri bulunmuştur. Elastisite modülü Şekil 4.62.de gösterildiği gibi eğrilerin başlangıç ve en büyük gerilmelerinin %70 ine karşılık gelen noktaları birleştirilerek bulunmuştur. Bulunan değerler Çizelge 4.101 de verilmiştir.



Şekil 4.62. Elastisite modülünün bulunması

Çizelge 4.101. Kirişlerin elastik modülleri

Kiriş Adı	Elastik Modül (MPa)	Kiriş Adı	Elastik Modül (MPa)
S5.7	8850	M22.30	21674
S11.15	9877	L11.15	36800
M5.7	13036	L11.30	45675
M11.15	17149	L11.60	75715
M11.30	23151	L22.30	52390

SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçek boyutlardaki betonarme kirişler üzerinde yapılan boyut etkisi deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Bütün deney sonuçlarını en iyi gösteren eğri geliştirilmiş Bazant metodudur. Diğer boyut etkisi analiz sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

Bazant'ın boyut etkisi analiz sonuçları;

1. Bazant'ın boyut etkisi analizine göre birinci ve beşinci gruplar dışında bütün gruplarda en düşük hatayı Levenberg-Marquardt analizi vermiştir.
2. Gruplardan elde edilen Bf_i değeri 22 ile 44 arasında bulunmuştur.
3. Karakteristik D değeri büyüdükçe D_0 değeri büyümekte Bf_i aynı kalmaktadır.
4. Bazant'ın boyut etkisi bütün gruplarda görülmesine karşın, beşinci grupta artık gerilme davranışı gözlemlendiğinden geliştirilmiş Bazant kadar yakın deney sonuçlarını tanımlayamamıştır.

Carpinteri'nin boyut etkisi analiz sonuçları;

1. Bütün deney sonuçları Carpinteri'nin boyut etkisi analiz sonuçları ile gösterilebilmiştir.
2. Analizdeki A_c değeri 313 ile 494 arasında bulunmuştur.
3. B_c değeri karakteristik boyut büyüdükçe büyümekte A_c ise aynı kalmaktadır.
4. Beşinci gruptaki gibi artık gerilmenin olduğu durumlarda Carpinteri boyut etkisi eğrisi deney sonuçlarını daha iyi göstermektedir.

Bütün gruplar için kırılma mekaniği değişkenleri olan gerilme yoğunluk çarpanı K_{Ic} , boyut etkisi kırılma enerjisi G_f ve kritik etkili çatlak uzunluğu c_f RILEM in boyut etkisi bağıntılarından elde edilmiştir. Genel olarak karakteristik boyut büyüdükçe K_{Ic} büyümekte, G_f ve c_f küçülmektedir.

Deney kirişlerinin moment-eğrilik, yük-yerdeğiştirme, gerilme-birim uzama eğrileri elde edilmiştir. Bütün gruplarda büyük boyutlu kirişlerde büyük enerji depolanıp enerjinin açığa çıkışı hızlı olmaktadır. Büyük numuneler gevrek, küçük numuneler

ise yarı gevrek göçmüşlerdir. Büyük boyutlu kirişlerde en büyük yük tepe noktası kolayca görülebildiği halde, küçük boyutlu elemanlarda en büyük yük sonrası yük azalması az olduğu için tepe noktasını elde etmek güçleşmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda bütün deney numunelerini en doğru şekilde modelleyebilen eşitliğin Bazant'ın geliştirilmiş boyut etkisi eşitliği olduğu görülmektedir. Kullanımı daha zor olmasına karşın özellikle artık gerilmenin bulunduğu durumlarda bu eşitliği kullanmak doğru olacaktır.

Deneyler boyut etkisinin önemi açıkça ortaya koymaktadır. Laboratuvar şartlarında elde edilen deneysel veriler ile oluşturulan davranış, kapasite eşitlikleri boyut etkisini dikkate alacak şekilde güncellenmelidir.

Ek C de her bir kiriş için verilen kiriş ortasındaki yatay yerdeğiştirmeler alt ve üst lifte farklıdır. Bu farklılık sonucu tarafsız eksenin genelde aşağı kaydığı görülmüştür.

Yüksek dayanımlı beton ile daha ekonomik, daha güvenli yapılar üretildiği için kullanımı artmaktadır. Bu yüzden normal dayanımlı aşırı donatılı betonarme kirişler için yapılan boyut etkisi deneylerinin yüksek dayanımlı betonarme kirişler için yinelenmesi yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Belgin, Ç.,M., "Beton kolonların göçme yüklerinde boyut etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-82 (1997).
2. Bazant, Z.P., Kwon, Y.W. "Failure of slender and stocky reinforced concrete columns: tests of size effect", *Materials and Structures*, 27: 79-90 (1994).
3. Şener, S., Belgin Ç., Akyıldız A., Okkalı, S., Köybaşı, "Size effect in axially loaded reinforced concrete columns", *Concrete Technology for Developing Countries Fourth International Conference Eastern Mediterranean University*, North Cyprus, 640-646 (1996).
4. Şener, S., Belgin Ç., Öztürk A., "Betonarme kolonlarda yapım kusurlarının deneysel bulunması", *10. Ulusal Mekanik Kongresi*, İstanbul, 85-86 (1997).
5. Şener, S., Barr, B.I.G., Abusiaf, H.F., "Size effect tests of reinforced concrete columns", *J. Struct. Eng. ASCE*, 662-670, 2004, 130(4).
6. Bazant, Z.P., Cedolin, L., "Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories", *Oxford University Press*, NY, 1-65 (1991).
7. Bazant, Z.P., "Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal", *J. Engng. Mech. ASCE*: 110, 518-535 (1984).
8. Bazant, Z.P., Xi, Y., Reid, S.G., "Statistical size effect in quasi-brittle structures: is Weibull theory applicable?", *Ibid.* 117 (11): 2609-2622 (1991).
9. Bazant, Z.P., Xi, Y., ., "Statistical size effect in quasi-brittle structures: non-local theory", *Ibid.* 117 (11): 2623-2640 (1991).
10. Türk Standartları, "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", (TS 500), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 4-67 (2000).
11. Bazant, Z.P., and Cao, Z., "Size effect in shear failure of prestressed concrete beams", *ACI Journal*, Proceedings, 83(2): 260-268 (1986).
12. Bazant, Z.P., and Sun, H.H., "Size effect of diagonal shear failure; effect of aggregate size and stirrups.", *ACI Materials Journal*, 84(4): 259-272 (1987).
13. Bazant, Z.P., and Kim, J.K., Şener, S., Discussion of paper 3, *ACI Journal*, 82 (4): 579-583 (1985).
14. Bazant, Z.P., and Kim, J.K., "Size effect in shear failure of reinforced concrete beams", *ACI Journal*, Proceedings, Vol.81, No. 5: 456-468, (1984), and Discussion, 82 (4): 579-583 (1985).
15. Bazant, Z.P., Cao, Z., "Size effect in brittle failure of unreinforced pipes", *ACI Journal*, Proceedings, 83(3): 369-373 (1986).
16. Bazant, Z.P., and Şener, S., "Size effect in torsional failure of concrete beam", *J. Struct. Eng. Proc. ASCE*, 113: 2125-2136 (1987).

17. Bazant, Z.P., and Cao, Z., "Size effect in punching shear failure of slabs", *ACI Structural Journal*, 84(1): 44-53 (1987).
18. Bazant, Z.P., Şener, S., and Prat, P., "Size effect tests of torsional failure of plain and reinforced concrete beams", *RILEM & Materials and Structures*, 21: 425-430 (1988).
19. Bazant, Z.P., and Şener S., "Size effect in pull-out tests", *ACI Materials Journal*, 85(5):347-351 (1988).
20. Bazant, Z.P., and Şener, S., "Tests of size effect in pull-out of reinforcing bars from concrete", *Computational Mechanics of Concrete Structures-Advances and Applications, LABSE Colloquium*, Delft, Netherland, 139-142 (1987).
21. Şener, S., "Beton küplerde demir çubukların çekip çıkarılma yüklerinde boyut etkisi", *TUMTMK V. Ulusal Mekanik Kongresi*, Bursa, 866-867 (1992).
22. Bazant, Z.P., and Kazemi, M.T., "Size effect on diagonal shear failure of concrete beams without stirrups", *ACI Structural Journal*, 88(3): 268-276 (1991).
23. Bazant, Z.P., Kazemi, M.T. Hasegawa, T., and Mazars, J., "Size effect in Brazilian split-cylinder tests; measurements and fracture analysis", *ACI Materials Journal*, 88(3): 325-332 (1991).
24. Bazant, Z.P., and Scheil, W.F., "Fatigue fracture of high-strength concrete and size effect", *ACI Materials Journal*, 90(5):472-478 (1992).
25. Marti, P., "Size effect in double-punch tests on concrete cylinders", *ACI Materials Journal*, 86: 597-601 (1989).
26. Şener, S., "Betonarme donatıların aderans ekinde boyut etkisi", *İMO XI Teknik Kongre*, İstanbul, 117-128 (1991).
27. Şener, S., "Size effect in the direct loading tests", *Advances in Civil Engineering, First Technical Congress Gazimagusa*, North Cyprus, 720-727 (1993).
28. Şener, S., "Size effect in bond solices tests", *FIP'92 Symposium*, Budapest, Hungary, 357-362 (1992).
29. Şener, S., "Gevrek malzeme göçmesinde boyut etkisi", *VII. Ulusal Mekanik Kongresi*, Antalya, 567-576 (1991).
30. Şener, S., "Sargılı donatıların aderans ekinde boyut ekinde boyut etkisi", *İMO XII. Teknik Kongresi*, Ankara, 481-494 (1993).
31. Şener, S., Timur, İ., "Size effect in bond splices tests under the indirect loading", *Advances in Civil Engineering First Technical Congress. Gazimagusa*, North Cyprus, 728-735 (1993).
32. Şener, S., "Bond splices tests based on fracture mechanics", *The Fourth International Symposium on Brittle Matrix Composites*, Warsaw, 569-576 (1994).

33. Şener, S., "Concrete structures desing based on fracture mechanics", *The Third Inter Kerensky Conference on Global Trends in Structural Engineering*, Singapore, 563-567 (1994).
34. Şener, S., "Size effect in failure of splices of reinforcing bars in concrete", *Bulletin of the Technical University of İstanbul*, 47(1): 337-355 (1994).
35. Şener, S., Bazant, Z.P., Giraudon, E.B., "Size effect tests of bond splices", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 125 (6): 653-660 (1999).
36. Şener, S., Aydın, İ., "Beton kirişlerin tasarımında kırılma mekaniğinin kullanılması", *IX. Ulusal Mekanik Kongresi*, Ürgüp, 878-879 (1995).
37. Şener, S., Belgin, Ç., Aydın, İ., Selçuk, E., "Burulma altında boyuna donatılı ve donatısız betonarme kirişlerde boyut etkisi", *I. Sistem Müh. ve Savunma Uygulamaları Sempozyumu*, Ankara, 56-64 (1995).
38. Şener, S., "Yüksek dayanımlı betonda kırılma mekaniği", *İTÜ Prof. Turgan Sabis Sempozyumu*, İstanbul, 209-219 (1995).
39. Şener, S., "Size effect tests of high strength concrete" *Journal of Materials in Civil Eng, ASCE*, Vol.9, No.1: 46-48 (1997).
40. Celep, Z., Kumbasar, N., "Betonarme Yapılar", *Beta dağıtım*, İstanbul, 14-56 (1996).
41. Nilson, A.H., "Design of Concrete Structures", *McGraw Hill*, New York, 5-132 (1997).
42. McGregor, J.G., "Reinforced Concrete: Mechanics and Design", *Prentice Hall*, London, 1-250 (1997).
43. Bazant, Z.P., Planas, J., "Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials" *CRC Press*, London, 1-150 (1999).
44. Wittmann, F.H., "Fracture Mechanics of Concrete", *Elsevier*, Amsterdam, 54-78 (1983).
45. ACI Committee 446 "Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties", In *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Z.P. Bazant, *Elsevier Applied Science*, London, 1-140 (1992).
46. Van Mier, J.G.M., "Fracture Processes of Concrete, Assessment of Material Parameters for Fracture Models", *CRC Press*, London, 1-78 (1997).
47. Shah, S.P., Swartz, S.E., Ouyang, C., "Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock, and other Quasibrittle Materials", *John Wiley & Sons, Inc.*, NewYork, 1-35 (1995).
48. Karihaloo, B., L., "Fracture Mechanics and Structural Concrete", *Longman Scientific and Technical*, England, 1-17 (1997).
49. Erdoğan, F., "Fracture Mechanics", *International Journal of Solids Structures*, 37: 171-183 (2000).
50. Kaplan, M.F., "Crack propagation and the fracture of concrete", *ACI J.*, 58(11): (1961).

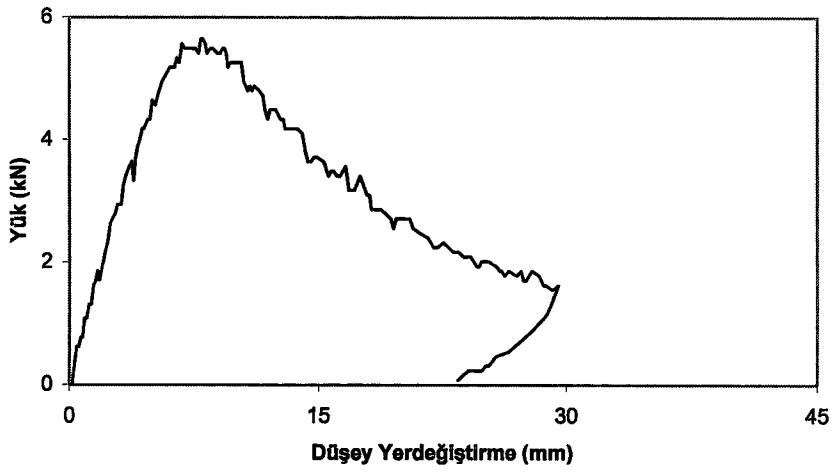
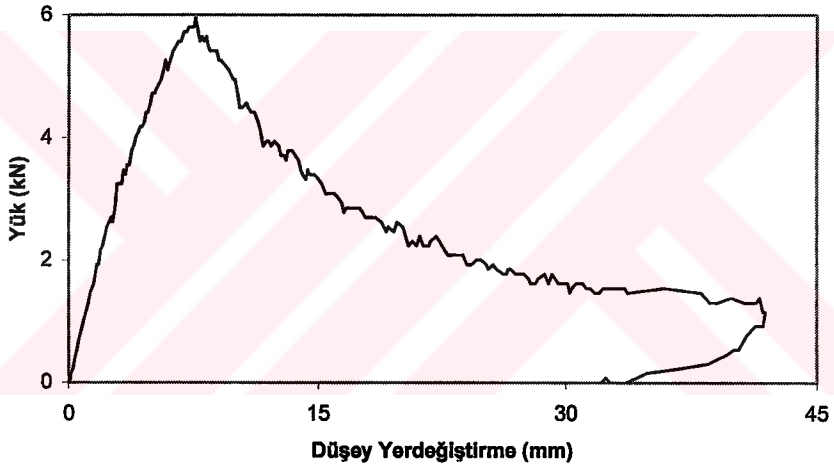
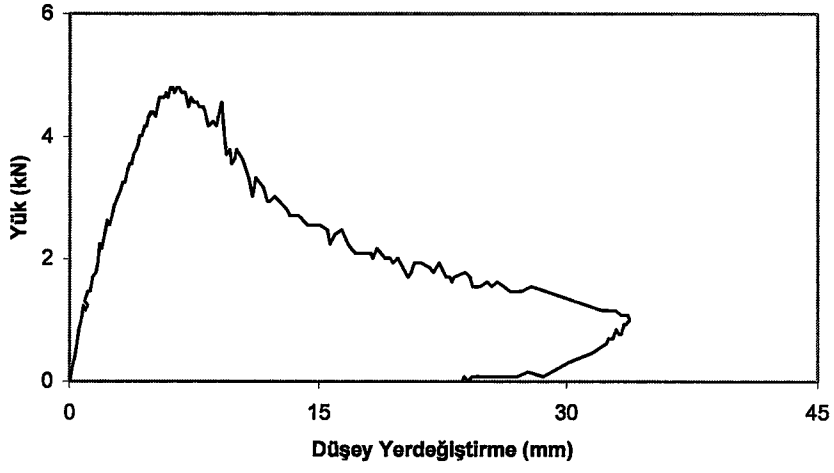
51. Tada, H., Paris, P.C., Irwin, G. R., "The Stress Analysis of Cracks Handbook", *Paris Production*, St Louis, Missouri, USA, 1-45 (1985).
52. Tang, T., Ouyang, C., Shah, S.P., "A simple method for determining material fracture parameters from peak loads", *ACI, Materials Journal*, 93(2): 147-157 (1996).
53. Tang, T., Shah, S.P., Ouyang, C., "Fracture mechanics and size effect of concrete in tension", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 118(11): 3169-3185, Discussion by Bazant, Z.P., 2555-2562 (1992).
54. Ouyang, C., Tang, T., Shah, S.P., "Relationship between fracture parameters from two parameter fracture model and size effect model", *RILEM, Materials and Structure*, 29: 79-86 (1996).
55. Bazant, Z.P., "Size Effect", *International Journal of Solids Structures*, 37: 69-80 (2000).
56. Turğut, P., "Betonun mezo-düzey mekanik davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi", Doktora Tezi, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-45 (2001).
57. Elices, M., Planas, J., "Material models in fracture mechanics of concrete structures", L. Elfgren, ed., *Chapmann and Hall*, London, 16-66 (1989).
58. Hillerborg, A., "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_f of concrete", *RILEM*, 18: 106 (1985).
59. Nallathambi, P., Karihaloo, B.L., "Determination of specimen size independent fracture toughness of plain concrete", *Mag. Concrete Research*, 38(135): 67-76 (1986).
60. Bazant, Z.P., "Crack band model for fracture of geomaterials", In *Pro. 4th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, 3, Z. Eisenstein, ed, 1137-1152 (1982).
61. Bazant, Z.P., Oh, B.H., "Crack band theory for fracture of concrete" *Mater. Struct.*, 16, 155-177 (1983).
62. Planas, J., Elices, M., "Size effect in concrete structures: mathematical approximations and experimental validation, in cracking and damage, strain localization and size effect", *Elsevier Applied Science*, London, 462-476 (1989).
63. Bazant, Z.P., "Fracture energy of heterogenous materials and similitude" *SEM-RILEM Int. Conference on Fracture of Concrete and Rock, Society for Experimental Mechanics*, Bethel, 390-402 (1987).
64. RILEM "Determination of fracture parameters (K_{Ic}^s and CTOD_c) of plain concrete using three-point bend tests", *Materials and Structures*, 23, 138: 457-460 (1990).
65. Weibull, W., "A statistical theory of strength of materials" *Proc. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences*, 151, 1-45 (1939).

66. Sarabi, F. R., "Beton yapılara değişik boyut etkisi bağıntılarının uygulanması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-25 (2002).
67. Carpinteri, A., Chiaia, B., Ferro, G., "Multifractal scaling law for the nominal strength variation of concrete structures in size effect in concrete structures", *E&FN Spon*, London, 193-206 (1994).
68. Bazant, Z.,P., "Scaling of quasibrittle fracture: hypothesis of invasive and lacunar fractality, their critique and Weibull connection" *International Journal of Fracture*, 83(1): 41-65 (1997).
69. Gustafsson, P.J., and Hillerborg, A., "Sensitivity in shear strength of longitudinally reinforced concrete beams to fracture energy of concrete, *ACI Materials Journal*, 85(3):286-294 (1988).
70. Carpinteri, A., "Decrease of apparent tensile and bending strength with specimen size: two different explanations based on fracture mechanics", *International Journal of Solids and Structures*, 25(4): 407-429 (1989).
71. Carpinteri, A., Chiaia, B., Ferro, G., "A new explanation for size effects on the flexural strength of concrete", *Magazine of Concrete Research*, 49, 178, 45-53 (1996).
72. Carpinteri, A., Ferro, G., "Size effects on tensile fracture properties: a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure", *Materials and Structures*, 27: 563-571 (1994).
73. Carpinteri, A., Chiaia, B., "Size effects on concrete fracture energy: dimensional transition from order to disorder", *RILEM, Materials and Structures*, 29: 259-266 (1996).
74. Carpinteri, A., Chiaia, B., "A multifractal approach to the strength and toughness scaling of concrete structures", *In Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Ed.F.H. Wittmann, *REDIFICATO*, 3:1773-1792 (1996).
75. Carpinteri, A., "Decrease of apparent tensile and bending strength with specimen size: two different explanations based on fracture mechanics" *International Journal of Solid Structures*, 25(4): 407-429 (1989).
76. Carpinteri, A, Chiaia, B., Ferro, G., "Multifractal scaling law: an extensive application to nominal strength size effect of concrete structures", *Politecnico di Torino*, Atti del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, 51:1-12, (1995).
77. Abusiaf, H.F., "Damage and fracture behaviour of concrete", Doktora Tezi, *University of Wales Cardiff*, Cardiff, İngiltere, 1-155 (1997).
78. Ozbolt, J., Mestrovic, D., Li, Y.J., Eligehausen, R., "Compression failure of beams made of different concrete types and sizes", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126 (2): 200-208 (2000).
79. Belgin, Ç., Özdem, Ö., Şener, S., "Aşırı donatılı betonarme kirişlerin göçme yükünde boyut etkisi", *Yapı Mekaniği Labortuarları Toplantısı, TÜBİTAK*, Konya, 169--172 (2003).

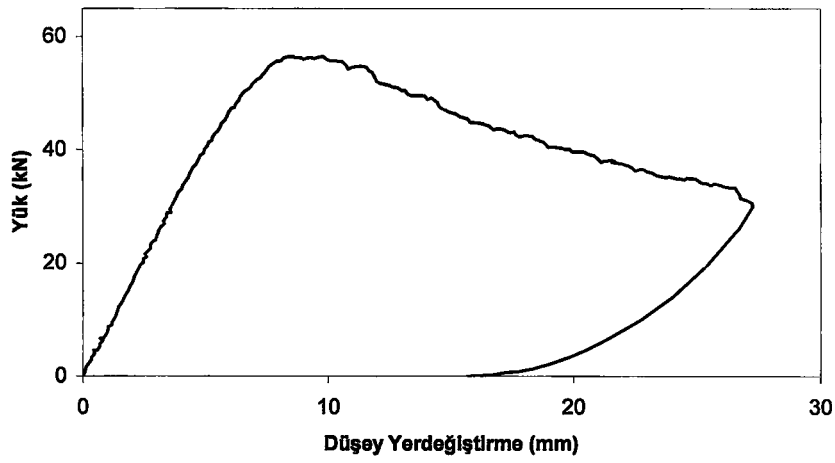
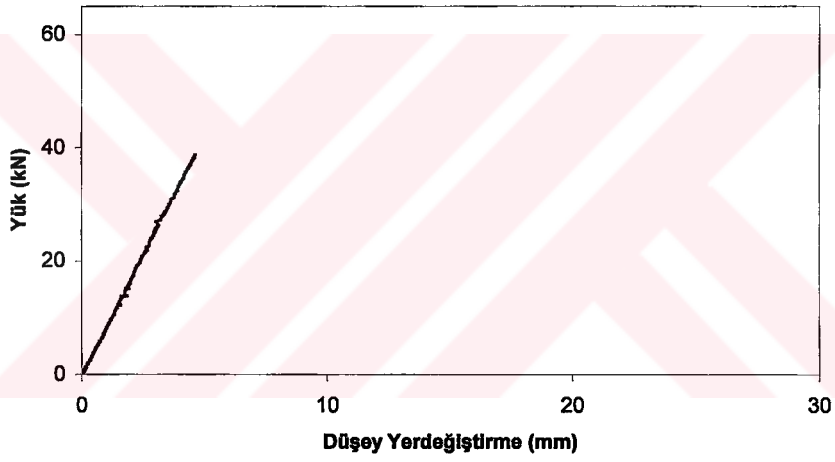
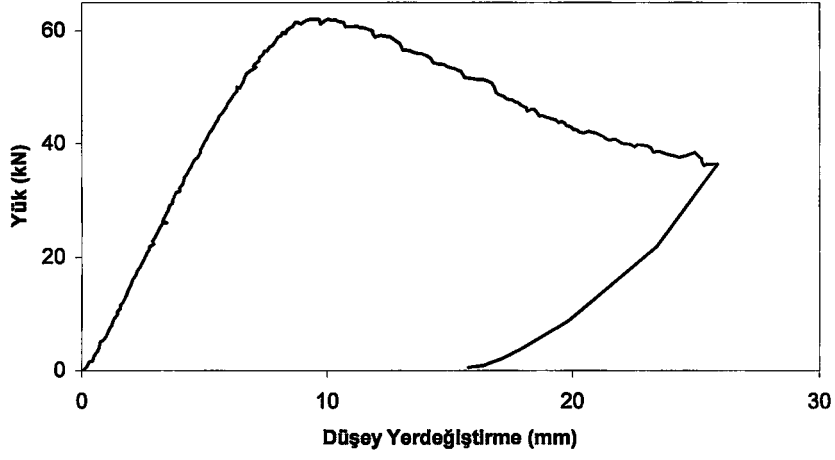
80. Marquardt, D.W., "An algorithm for least-squares estimation of non linear parameters", *Journal of Soc.Indust.Appl.Math.*, 11(2): 431-441 (1963).
81. Şener, S., Belgin, Ç., Begimgil, M., Ogün, F., "Çelik lifli çentikli kirişlerde boyut etkisi", *Çelik Donatılı Lifler Sempozyumu*, Sabancı Center, İstanbul, 49-54, (1990).
82. Şener, S., Begimgil, M., Belgin, Ç., "Çelik lifli ve lifsiz çentikli beton kirişlerde boyut etkisi," I.Bölüm, *Hazır Beton*, İstanbul, 7(37): 89-90 (2000).
83. Şener, S., Begimgil, M., Belgin, Ç., "Çelik lifli ve lifsiz çentikli beton kirişlerde boyut etkisi," II.Bölüm, *Hazır Beton*, İstanbul, 7(38): 66-68 (2000).
84. Şener, S., Belgin, Ç., "Size effect tests in notched concrete beams with and without steel fiber reinforcement", *Cement and Concrete Technology in the 2000s, II International Symposium*, İstanbul, 2: 572-581(2000).
85. Şener, S., Begimgil, M., Belgin, Ç., "Size effect on failure of concrete beams with and without steel fibers", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(5):436-440 (2003).
86. Belgin, Ç., Şener, S., "Betonarme donatıların bindirmeli ekinde boyut etkisi", *Yapı Mekaniği Labortuarları Toplantısı, TÜBİTAK*, Ankara, 111-114 (2001).
87. Şener, S., Belgin, Ç., "Load controlled tests for bond splices", *1st Turkish International Symposium on Deformations*, 116-121 (1994) .
88. Belgin, Ç., Şener, S., "Çentikli dairesel beton kolonlarda boyut etkisi", *Yapı Mekaniği Labortuarları Toplantısı, TÜBİTAK*, Ankara, 115-118 (2001).
89. Belgin, Ç., Şener, S., "Narin beton kolonlarda boyut etkisi deneyleri", *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, III. Teknik Kongre*, 147-155 (1997).
90. Şener, S., Belgin, Ç., Öztürk, A., "Yüksek dayanımlı betonarme kolonlarda boyut etkisi deneyleri", *Prof.Dr.Rifat Yazar Sempozyumu, İTÜ İnşaat Fakültesi*, İstanbul, 337-348 (1997).
91. Şener, S., Belgin, Ç., Aydın, İ., Selçuk, E., "Burulma altında boyuna donatılı ve donatısız betonarme kirişlerde boyut etkisi", *1ci sistem Mühendisliği ve Savunma Uygulamaları Sempozyumu*, Ankara, 56-64 (1995).



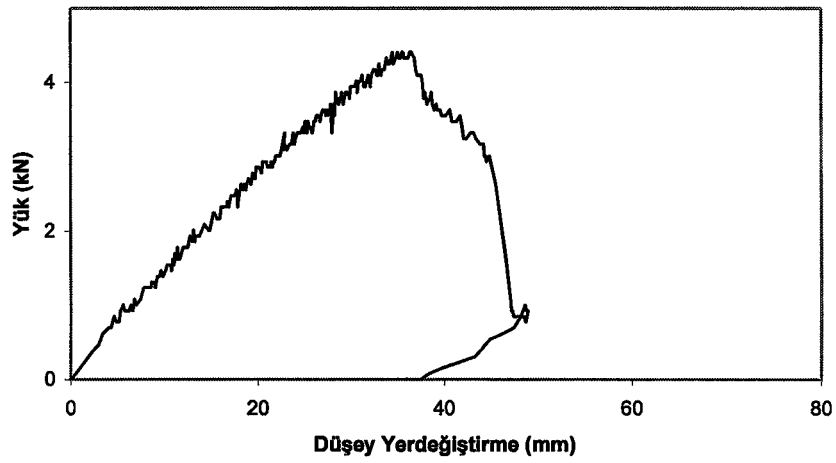
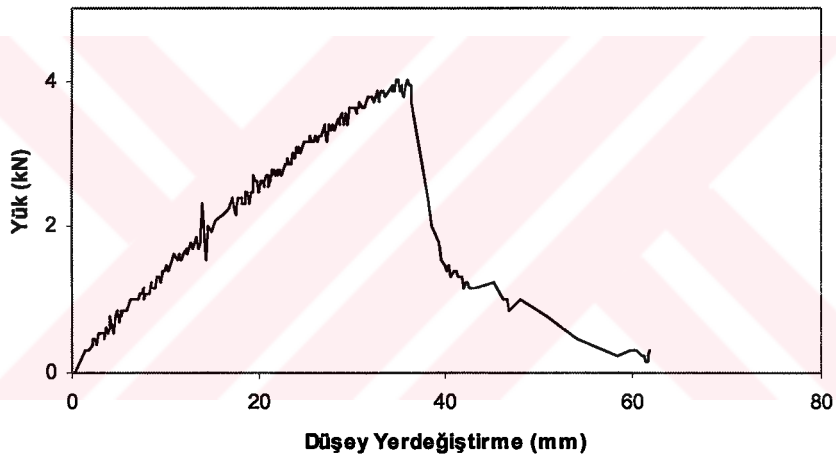
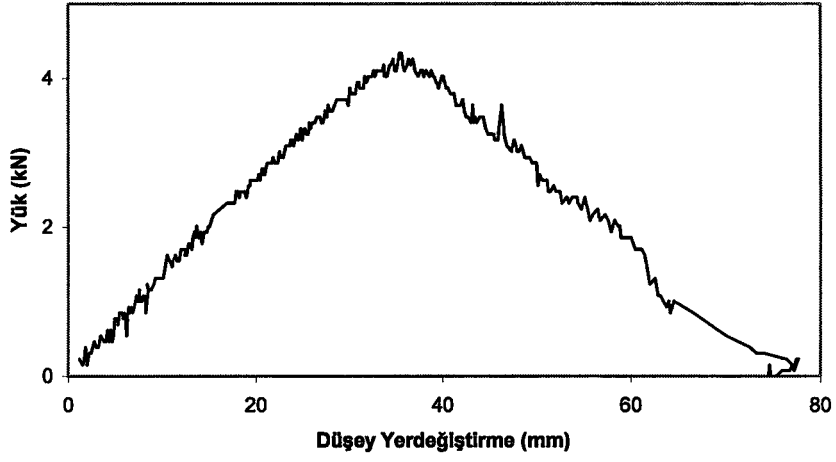
EKLER



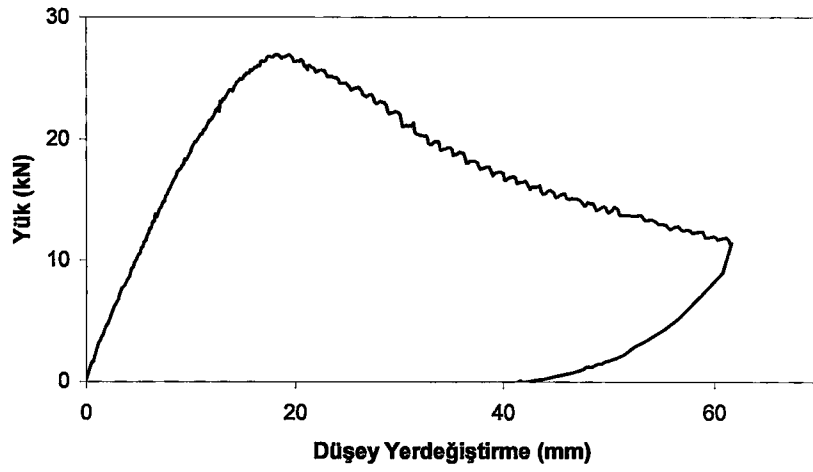
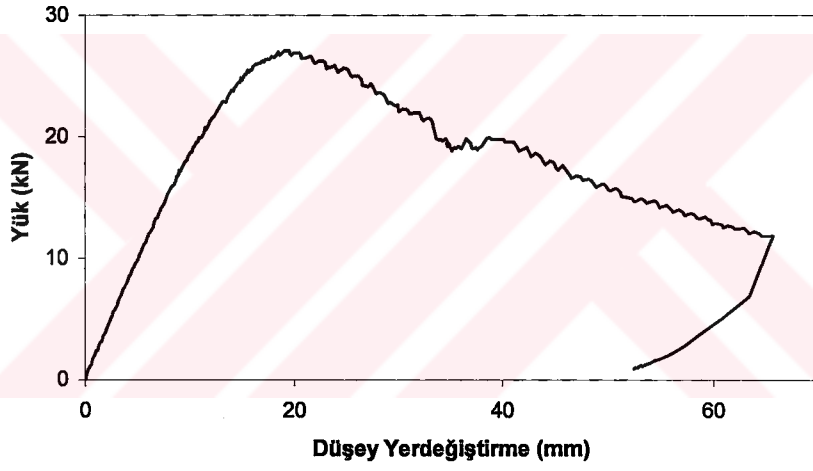
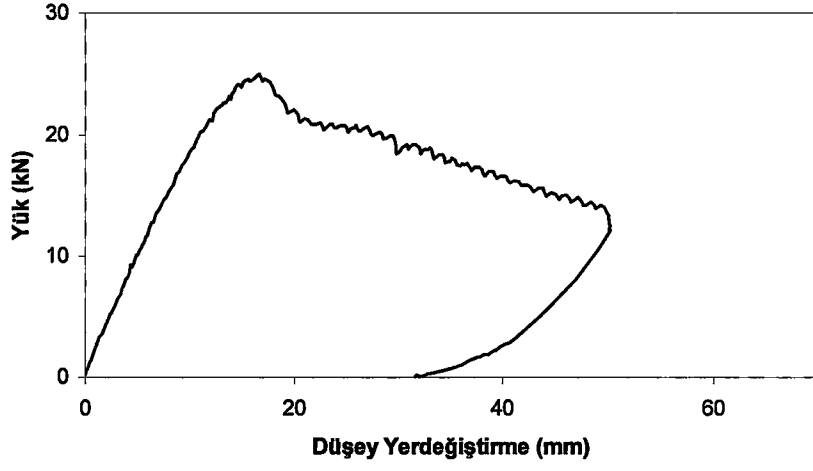
Ek-A1. a) S5.7a, b) S5.7b, c) S5.7c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri



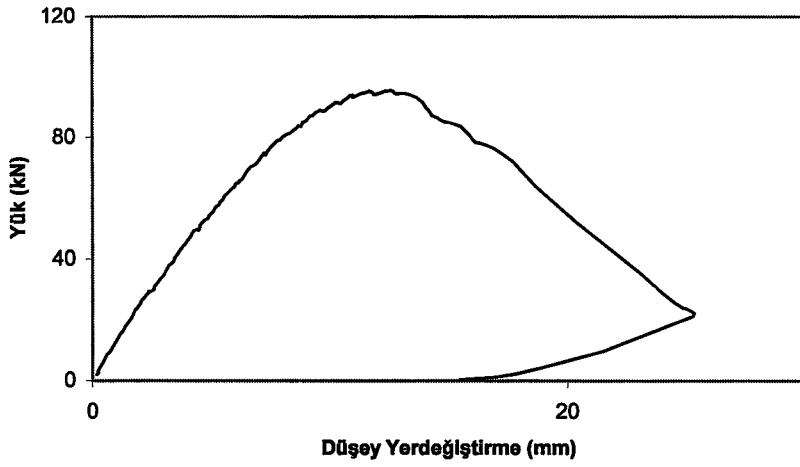
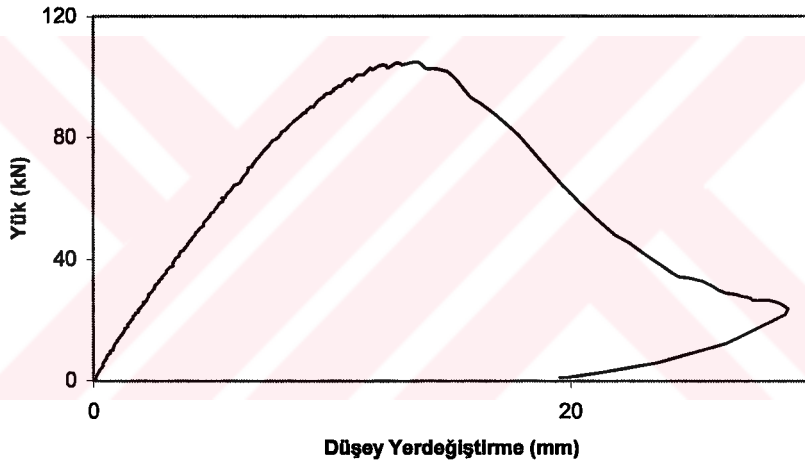
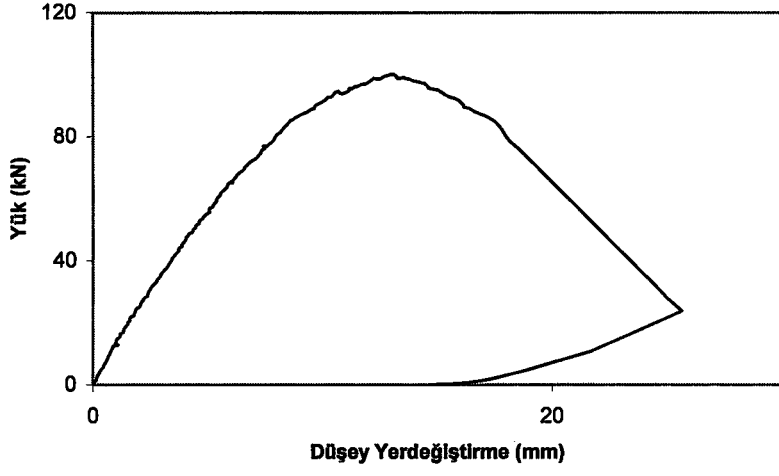
Ek-A2. a) S11.15a, b) S11.15b, c) S11.15c kirişleri yük-düsey yerdeğiştirmeleri



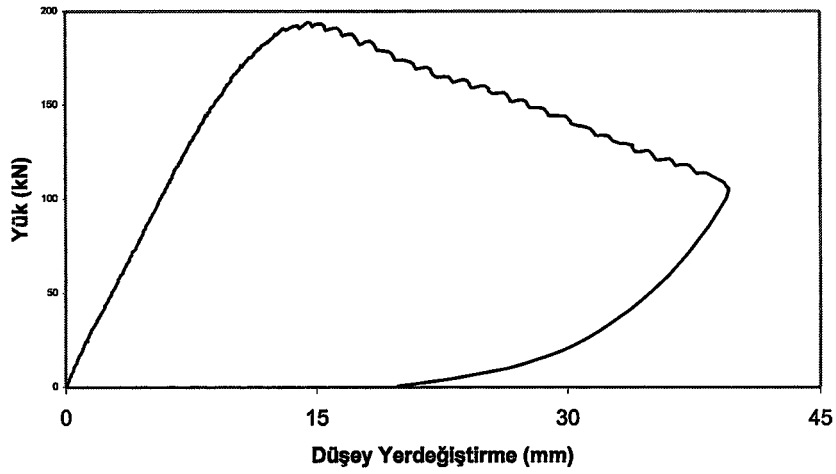
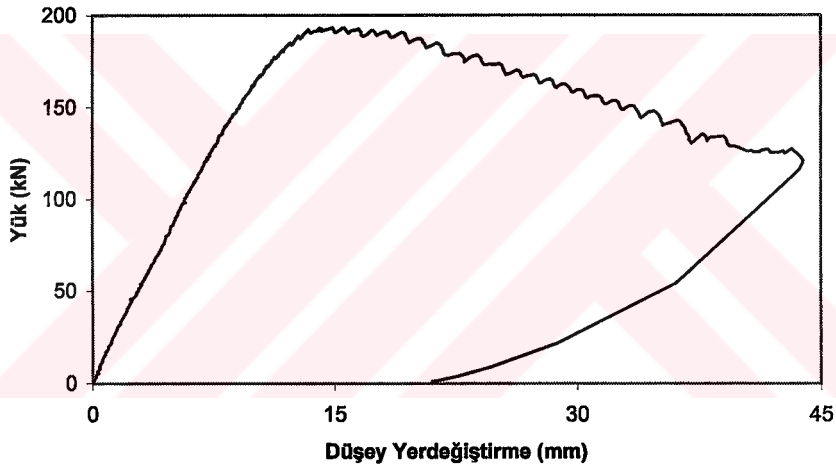
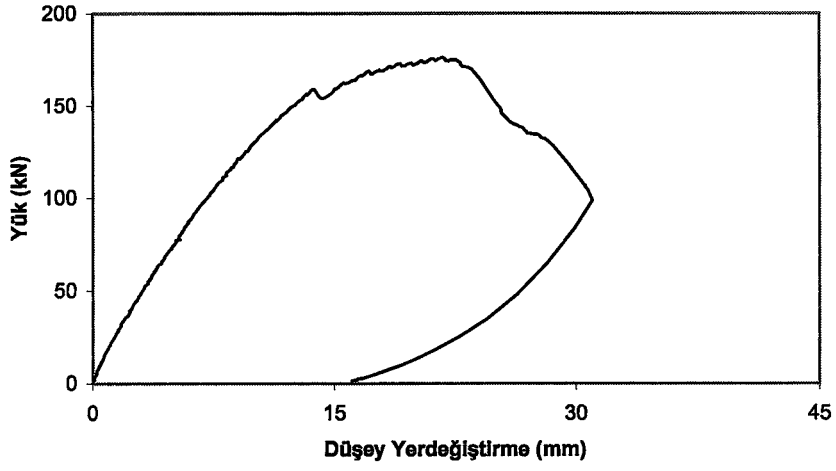
Ek-A3. a) M5.7a, b) M5.7b, c) M5.7c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri



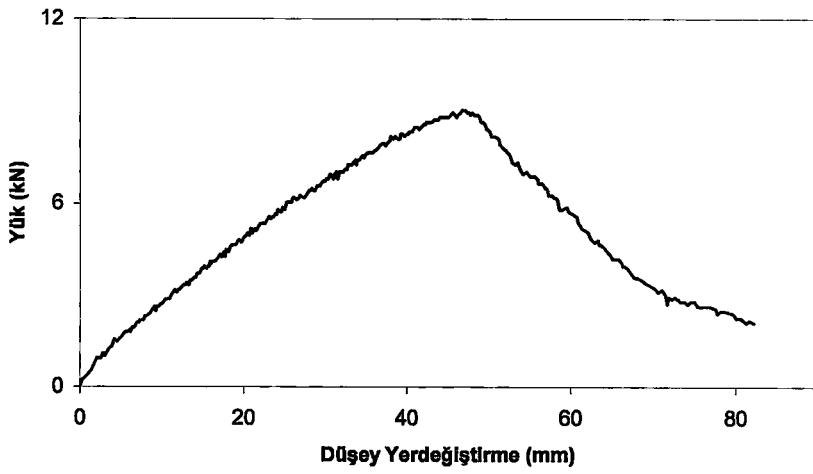
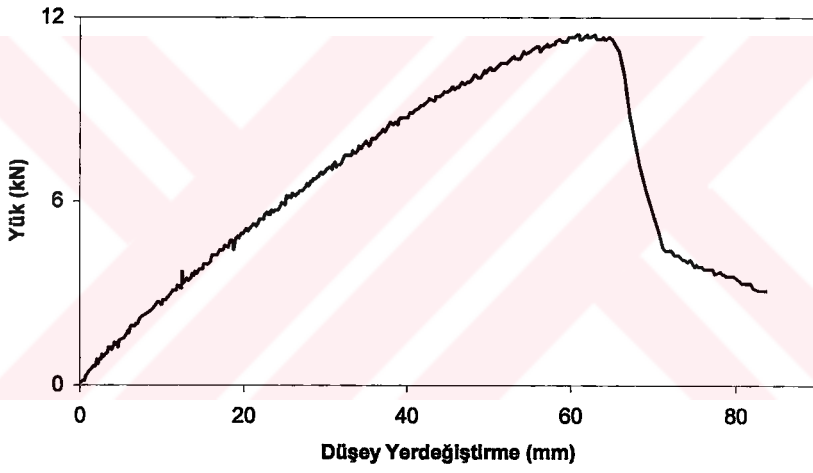
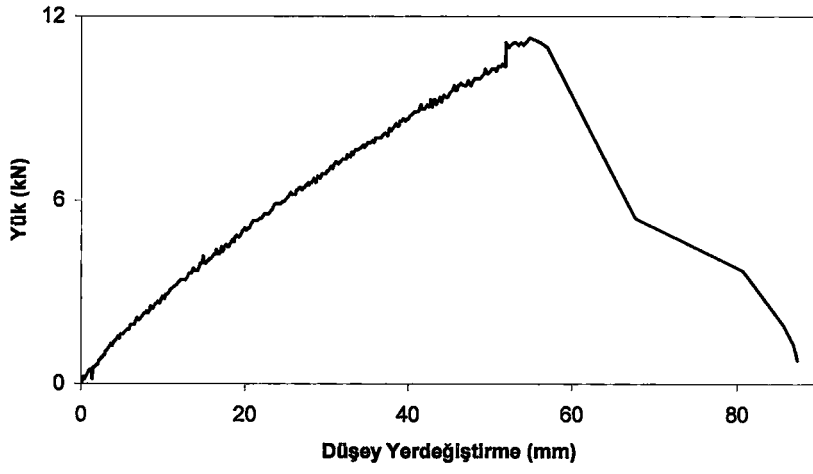
Ek-A4. a) M11.15a, b) M11.15b ve c) M11.15c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri



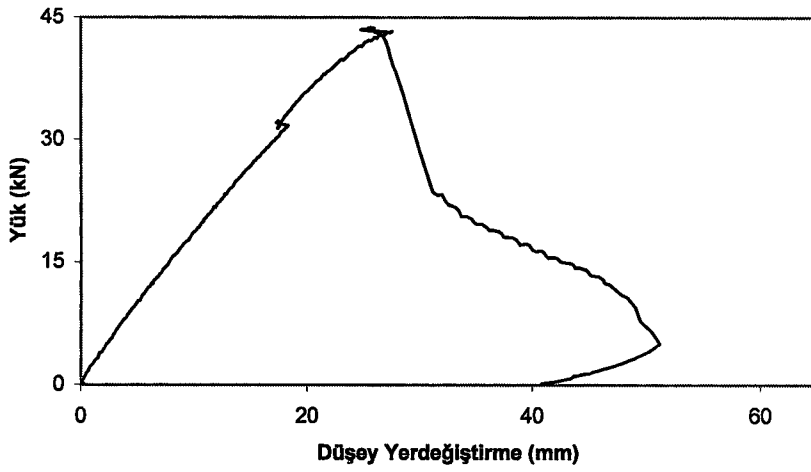
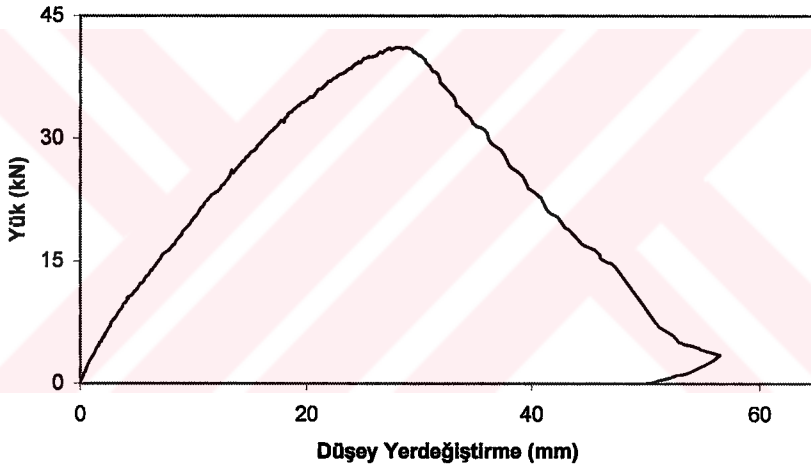
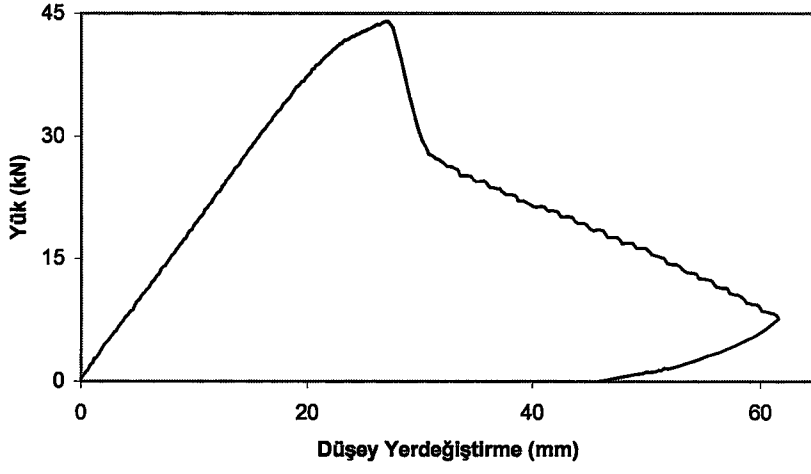
Ek-A5. a) M11.30a, b) M11.30b c) M11.30c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri



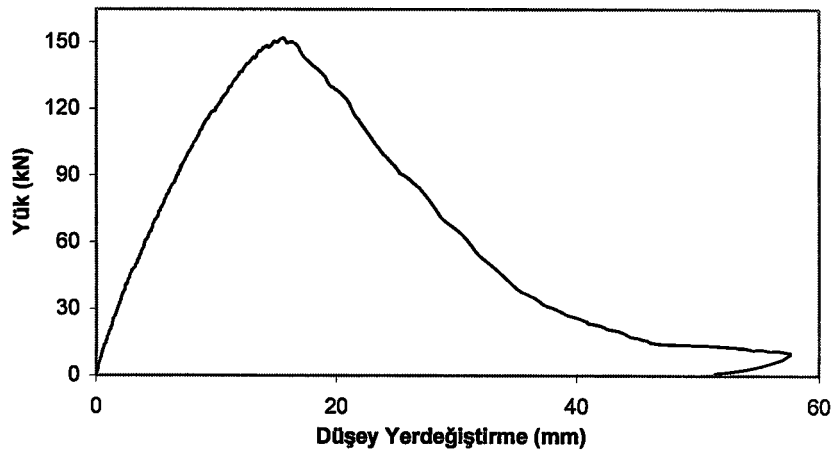
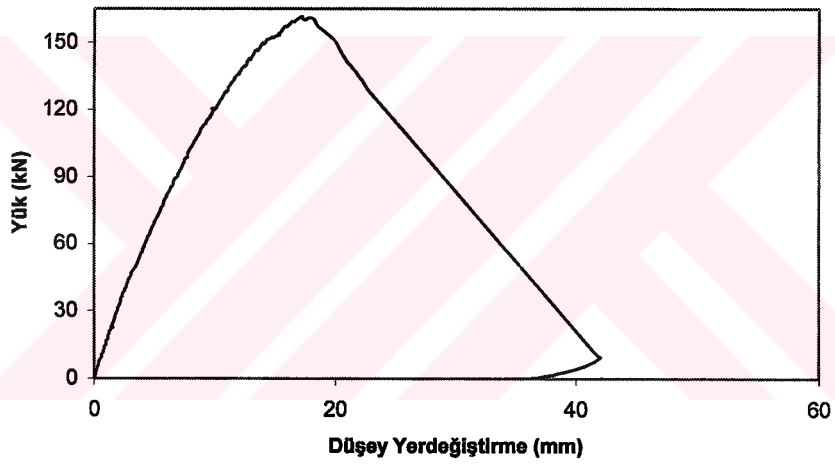
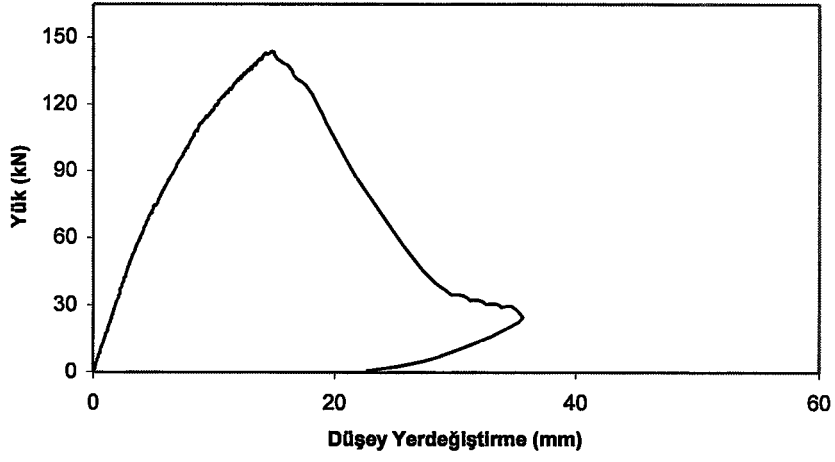
Ek-A6. a) M22.30a, b) M22.30b c) M22.30c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri



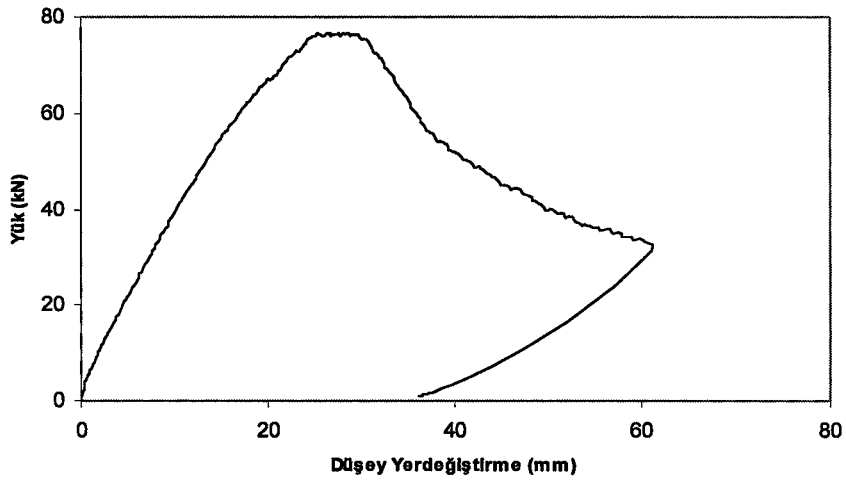
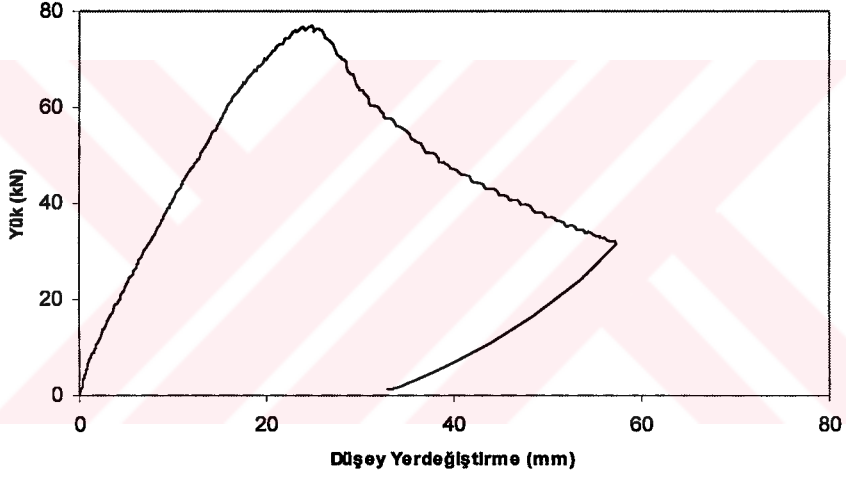
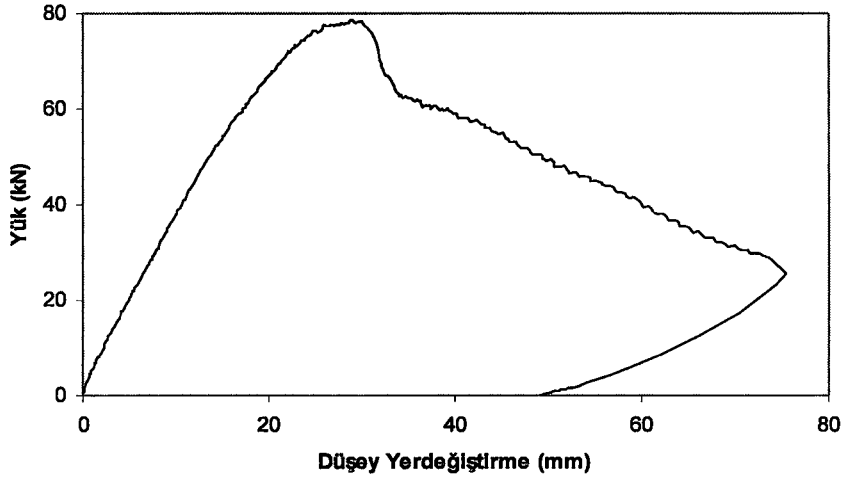
Ek-A7. a) L11.15a, b) L11.15b, c) L11.15c kirişleri yük-düsey yerdeğiştirmeleri



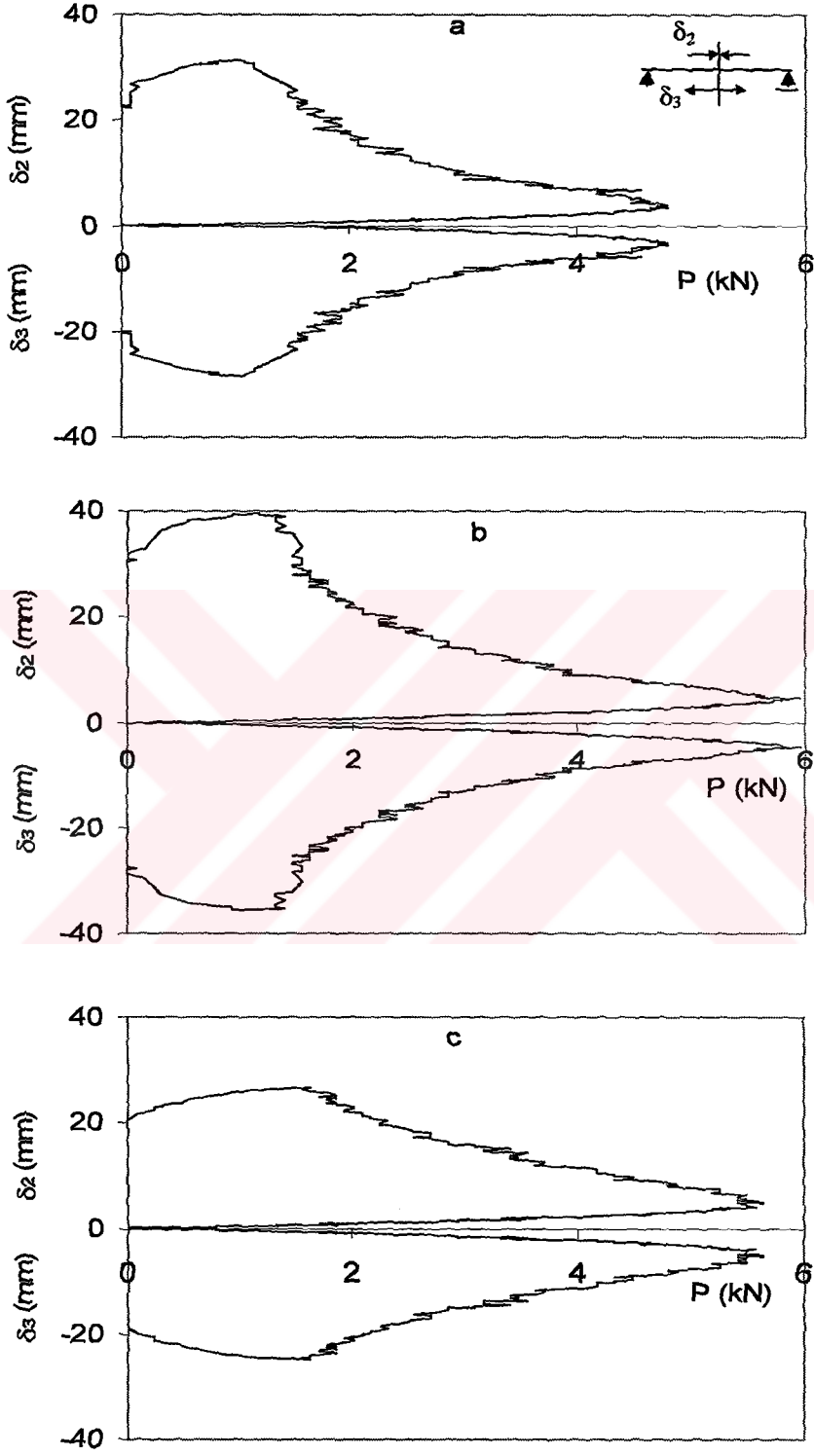
Ek-A8. a) L11.30a, b) L11.30b, c) L11.30c kirişleri yük-düsey yerdeğiştirmeleri



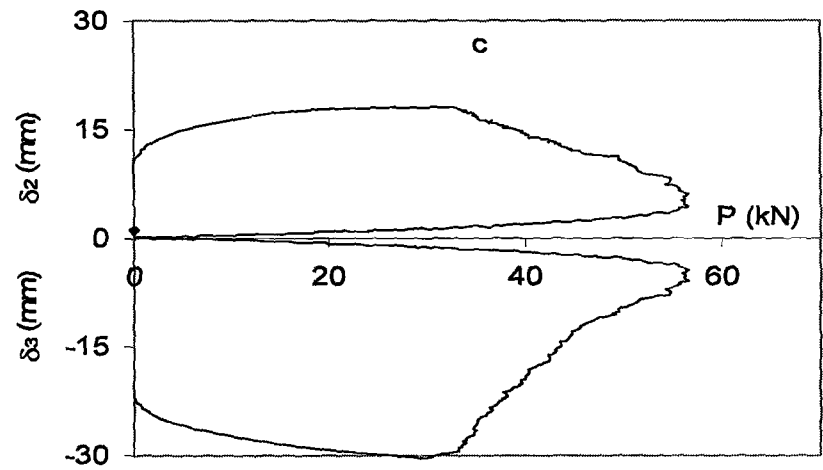
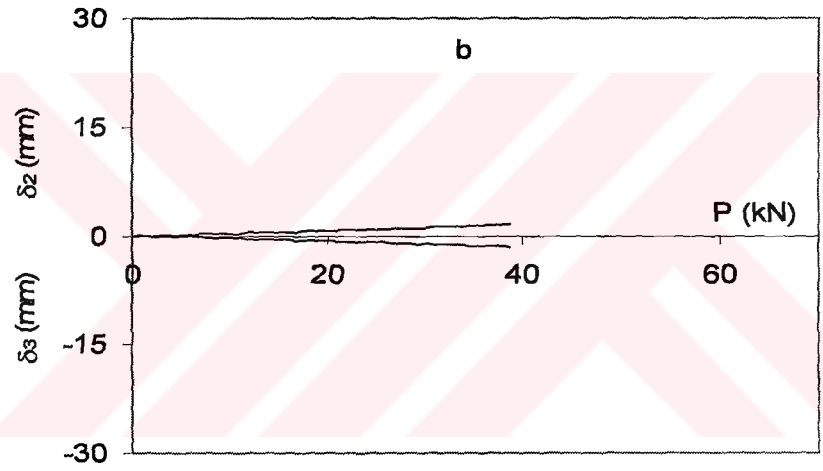
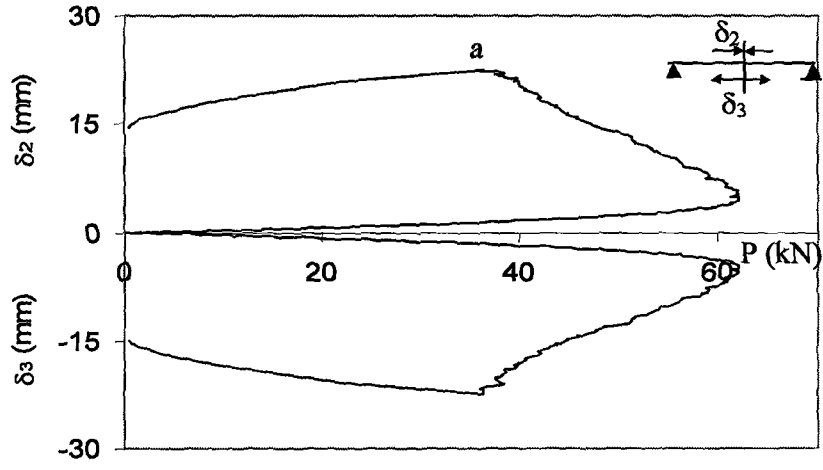
Ek-A9. a) L11.60a, b) L11.60b c) L11.60c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri



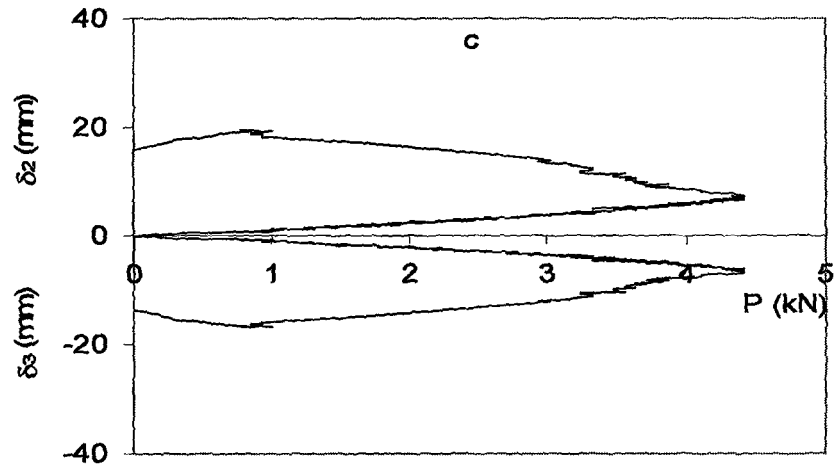
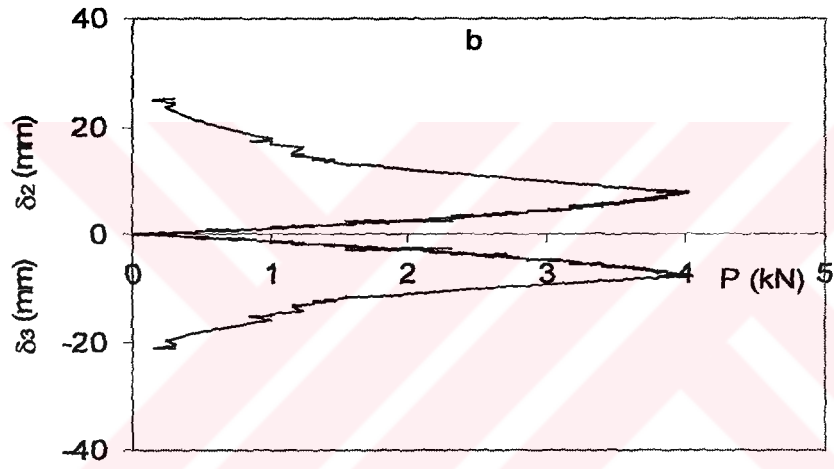
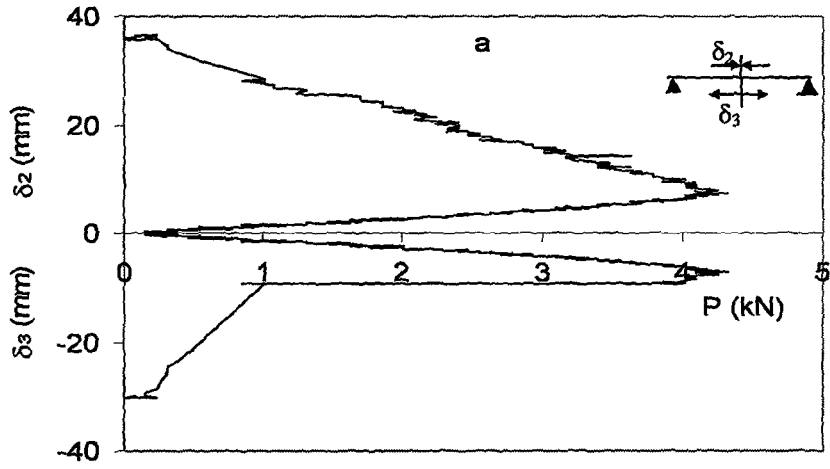
Ek-A10. a) L22.30a, b) L22.30b, c) L22.30c kirişleri yük-düşey yerdeğiştirmeleri



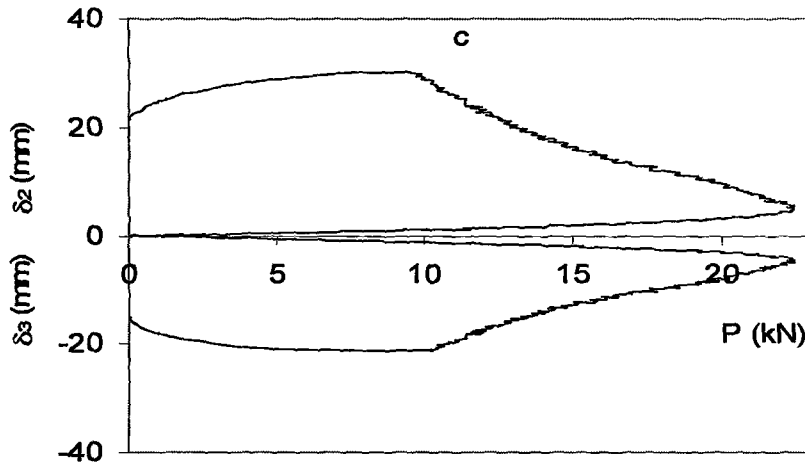
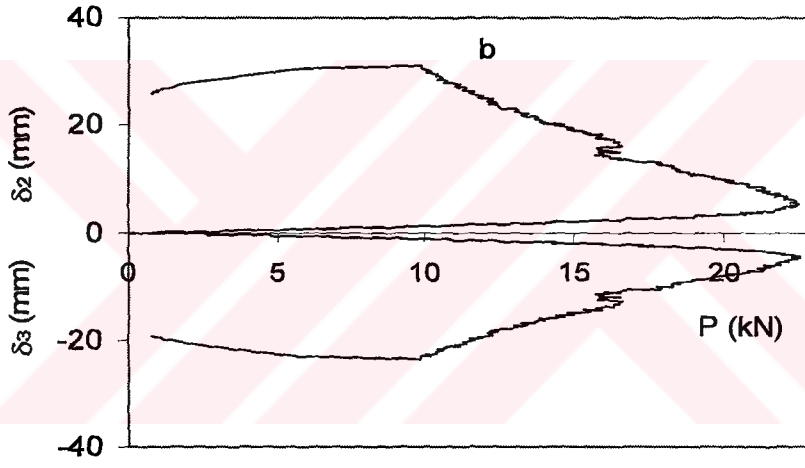
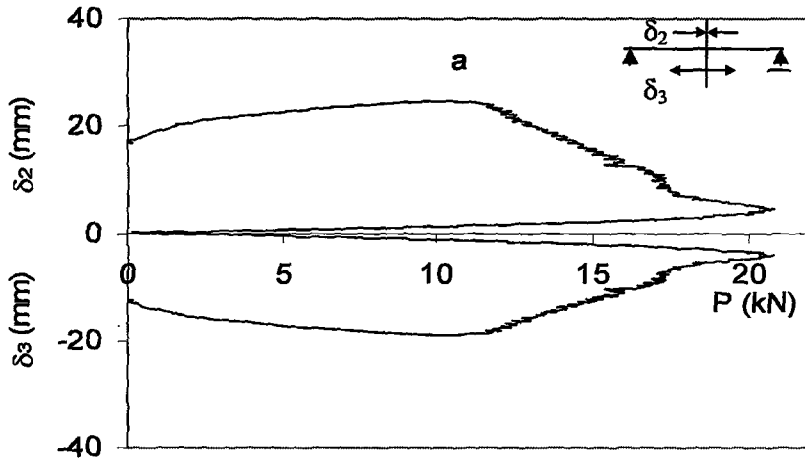
Ek-B1. a) S5.7a, b) S5.7b ve c) S5.7c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri



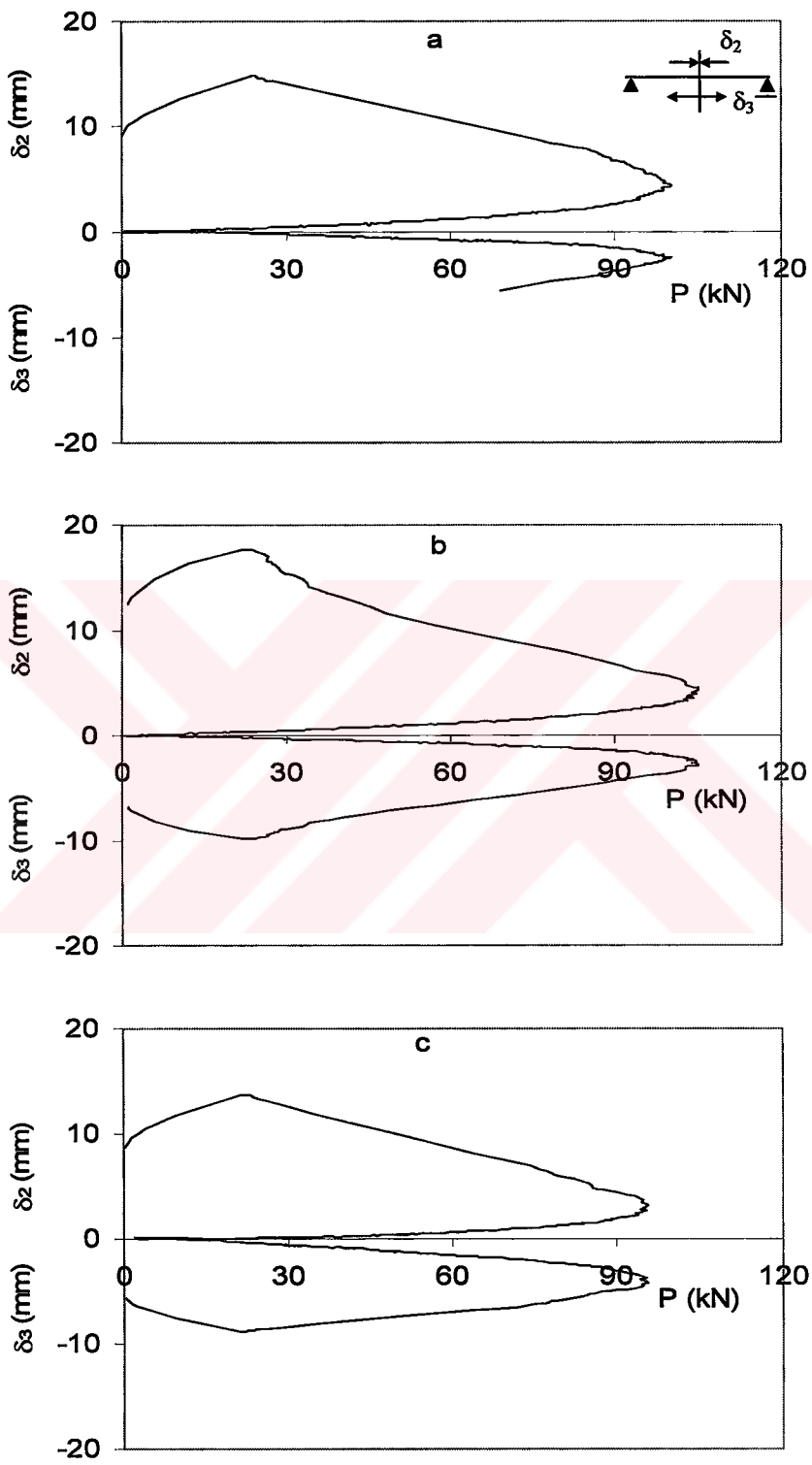
Ek-B2. a) S11.15a, b) S11.15b ve c) S11.15c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri



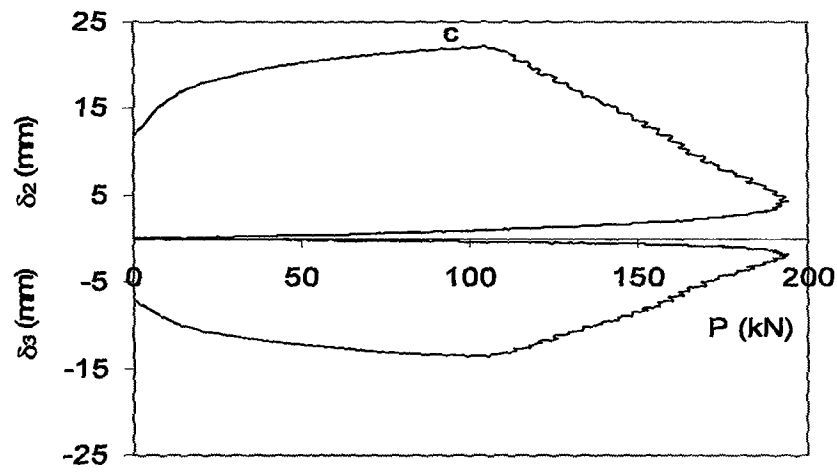
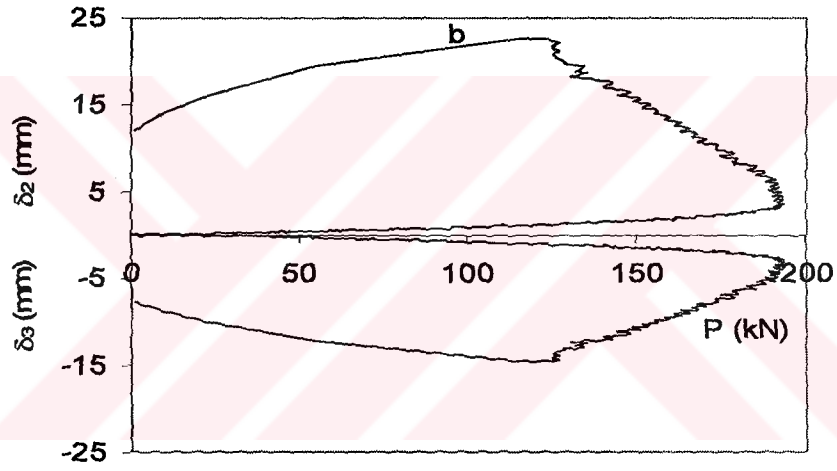
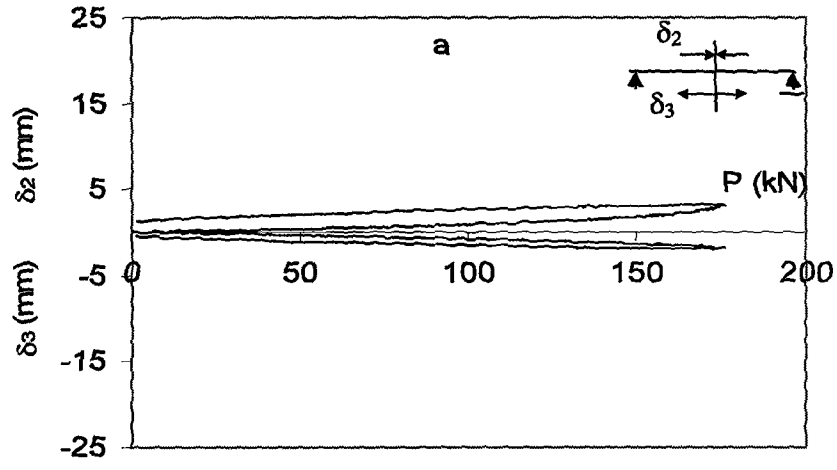
Ek-B3. a) M5.7a, b) M5.7b ve c) M5.7c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri



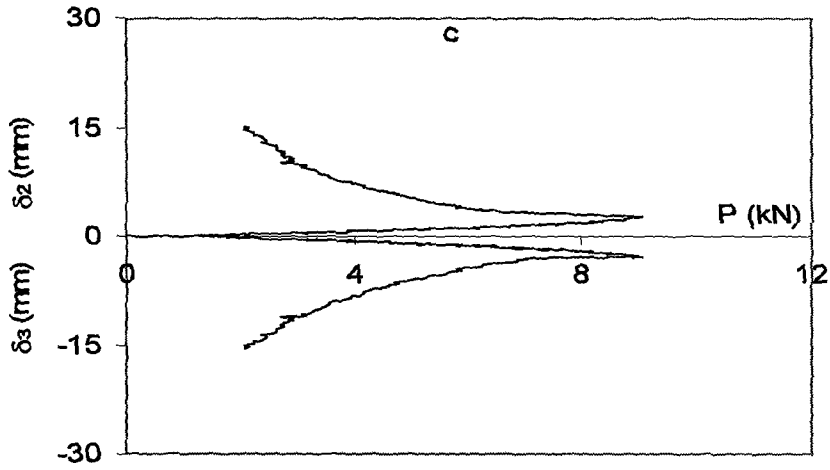
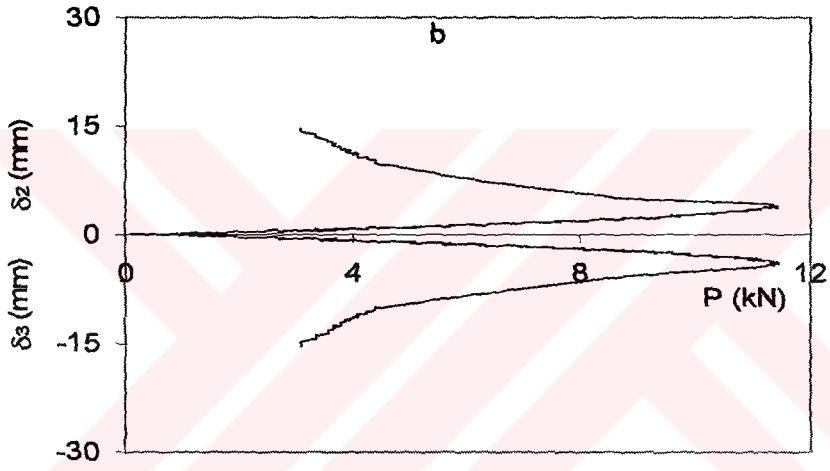
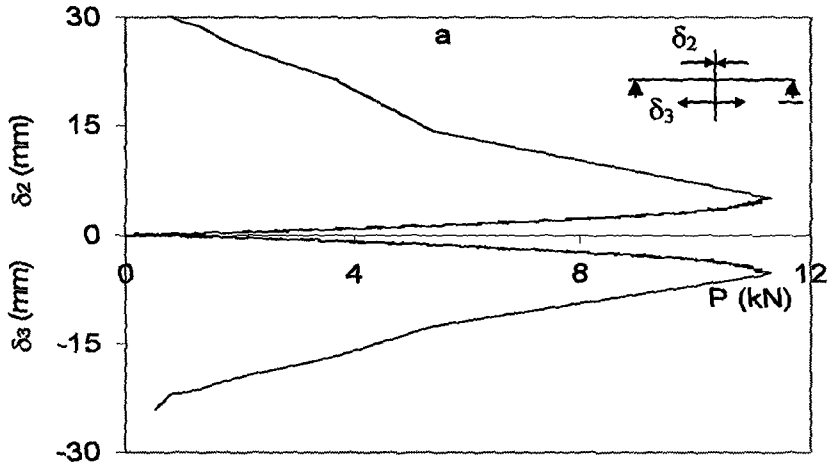
Ek-B4. a) M11.15a, b) M11.15b ve c) M11.15c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeşistirmeleri



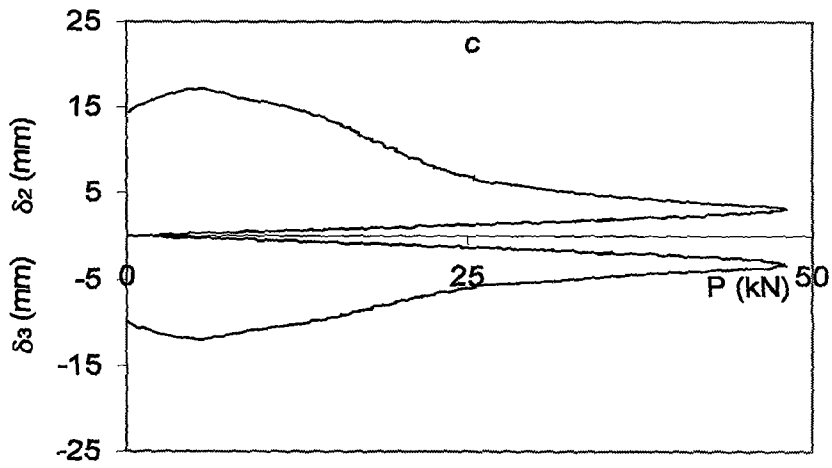
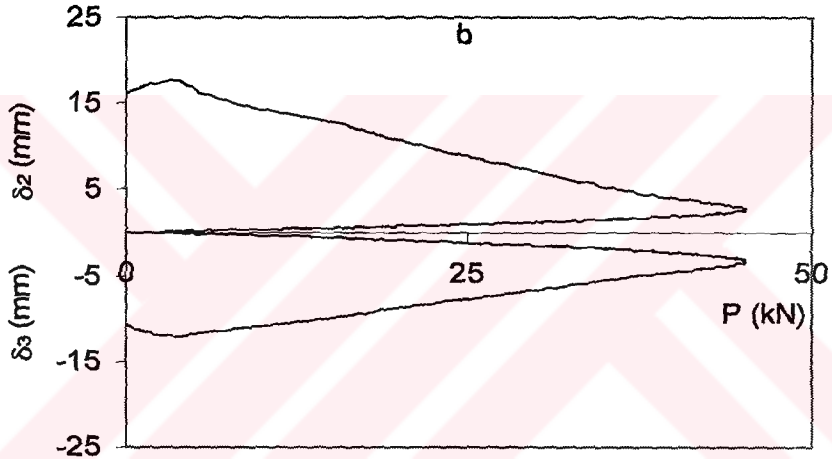
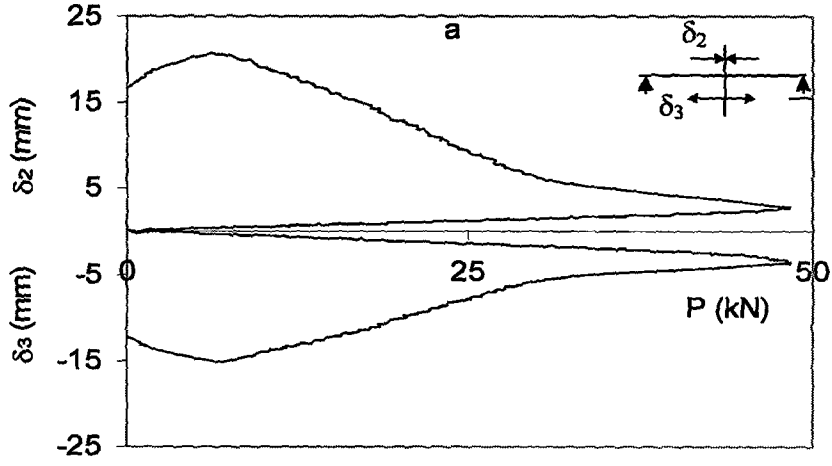
Ek-B5. a) M11.30a, b) M11.30b ve c) M11.30c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri



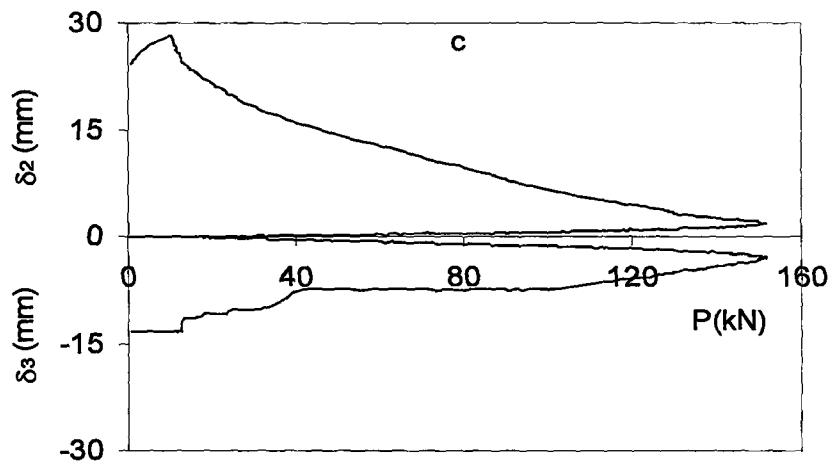
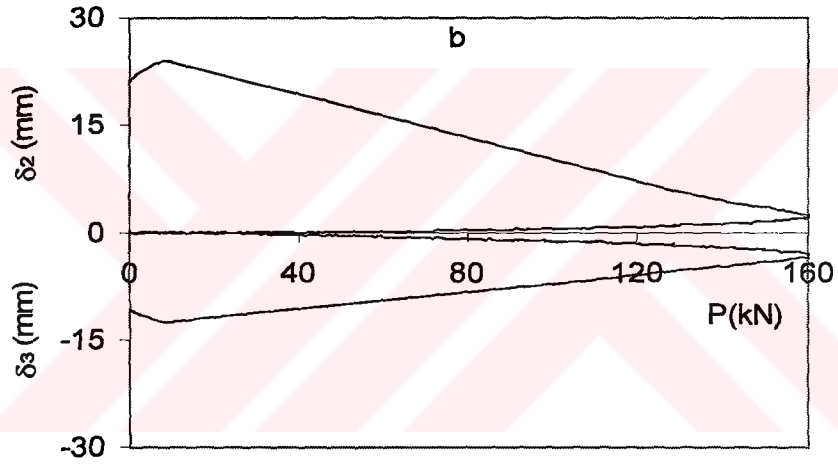
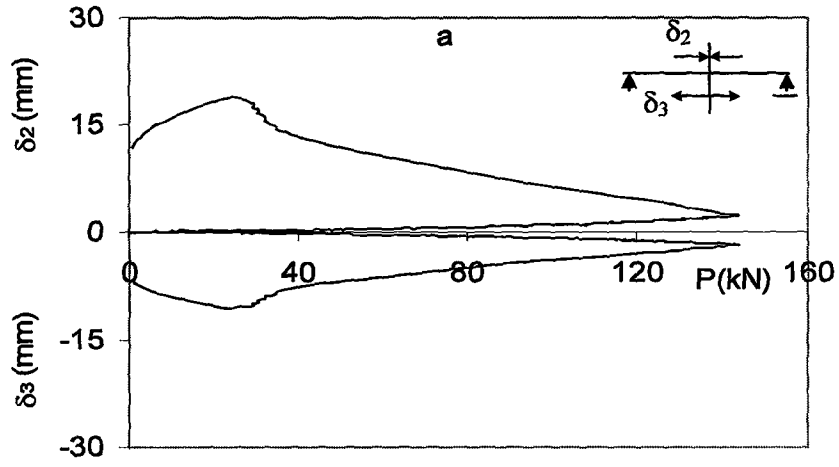
Ek-B6. a) M22.30a, b) M22.30b ve c) M22.30c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri



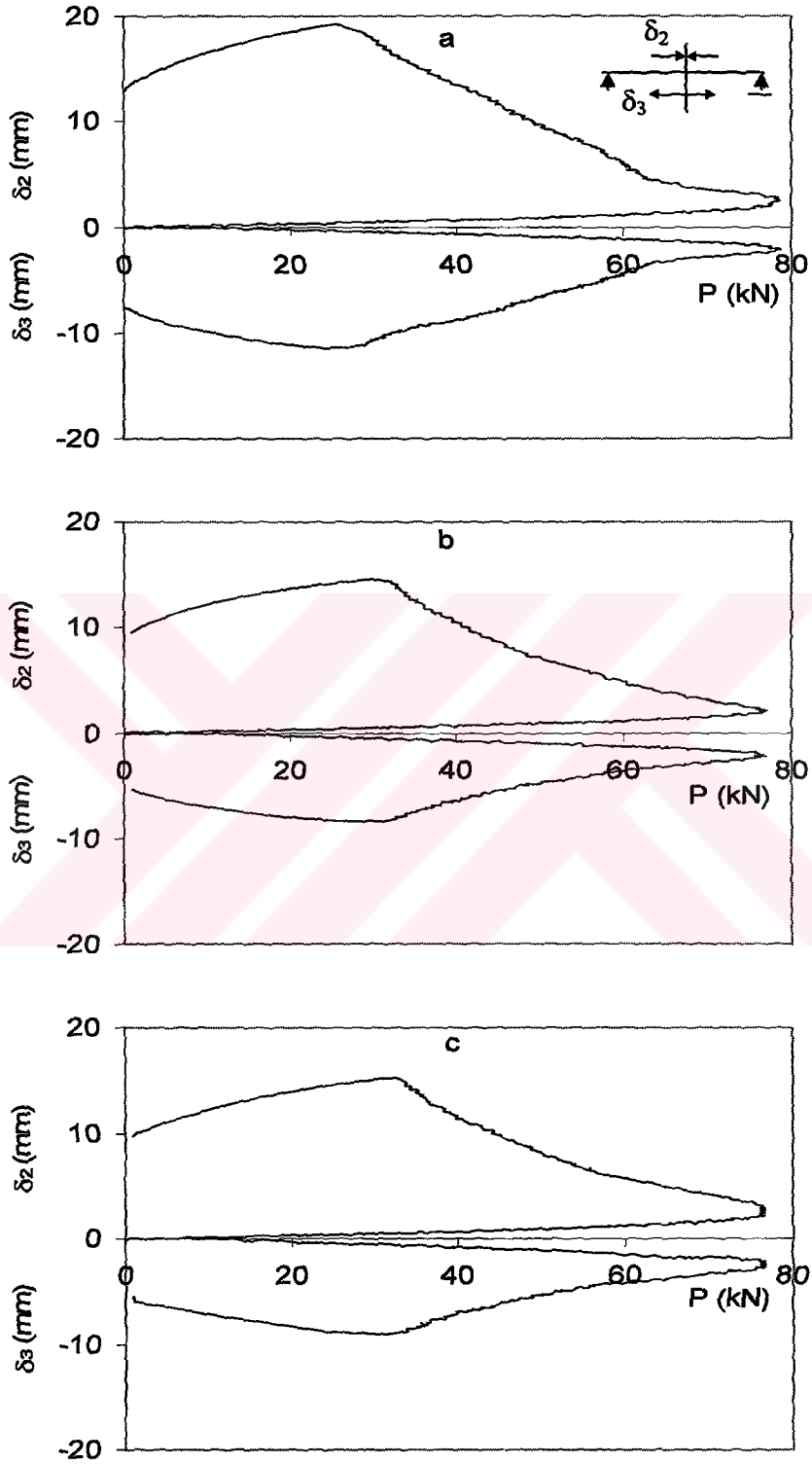
Ek-B7. a) L11.15a, b) L11.15b ve c) L11.15c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri



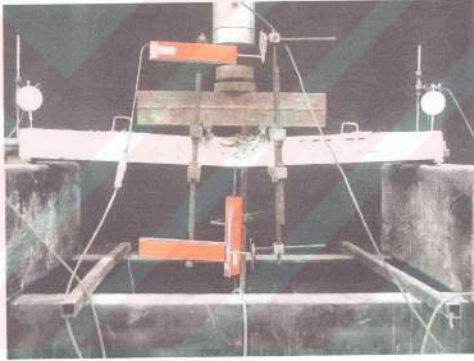
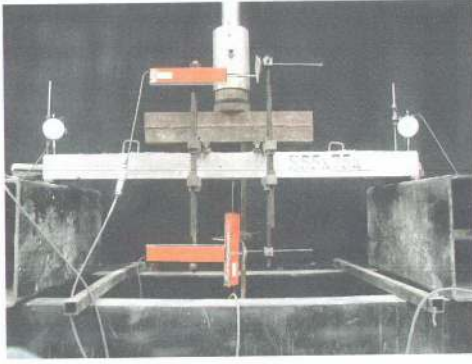
Ek-B8. a) L11.30a, b) L11.30b ve c) L11.30c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri



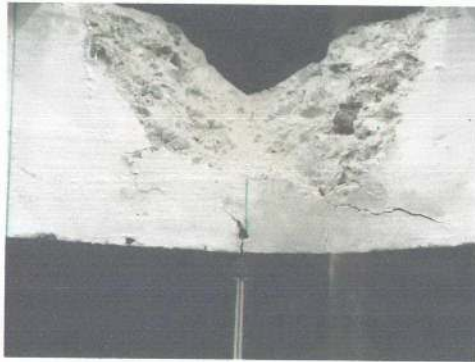
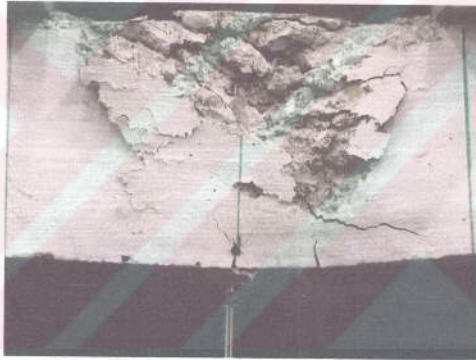
Ek-B9. a) L11.60a, b) L11.60b ve c) L11.60c kirişleri orta nokta üst, alt yatay yerdeğiştirmeleri



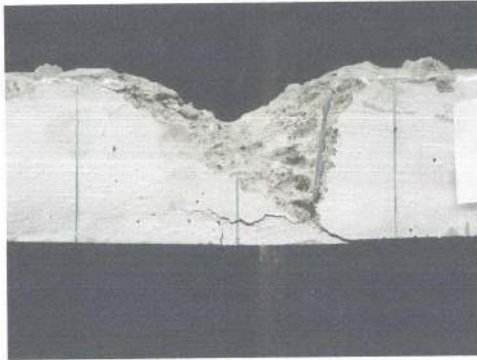
Ek-B10. a) L22.30a, b) L22.30b ve c) L22.30c kirişleri orta nokta őr, alt yatay yerdeğiştirmeleri



Ek-C1. S5.7a kirişinin göçmesi



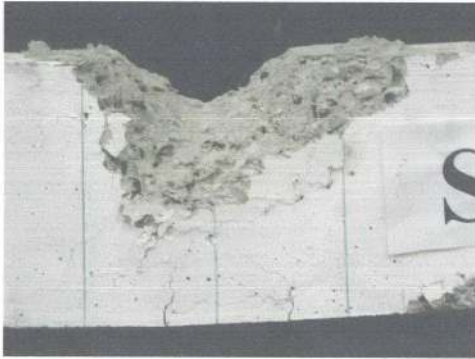
Ek-C2. S5.7b kirişinin göçmesi



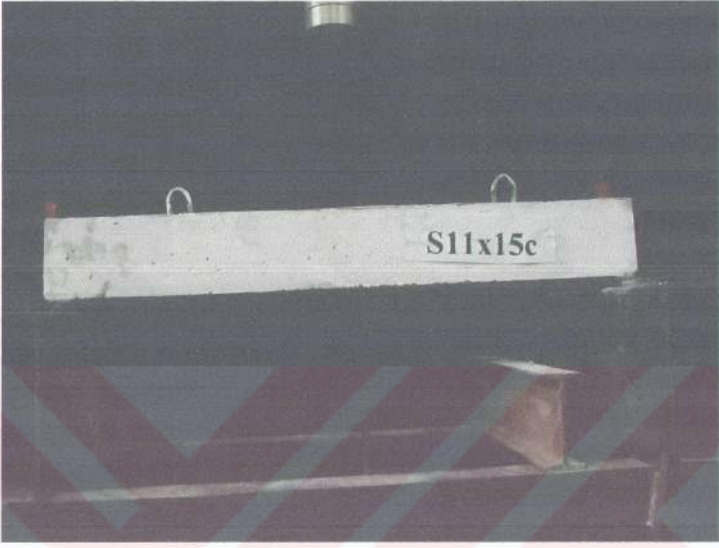
Ek-C3. S5.7c kirişinin göçmesi



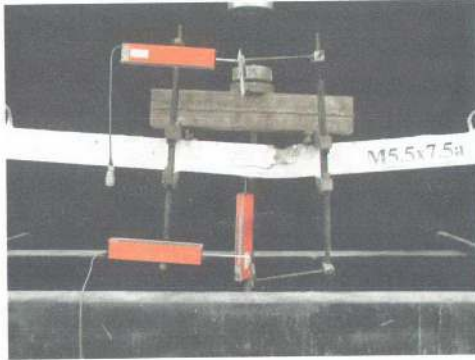
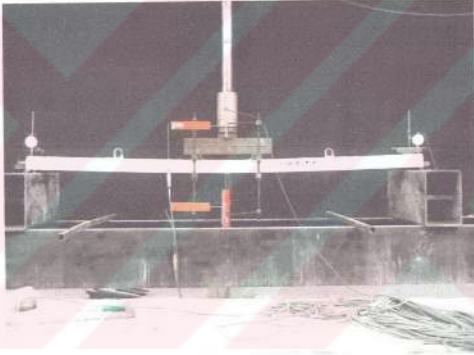
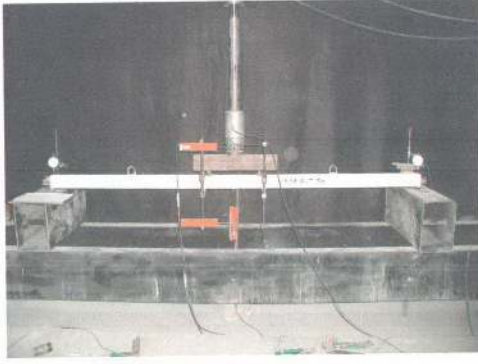
Ek-C4. S11.15a kirişinin göçmesi



Ek-C5. S11.15b kirişinin göçmesi



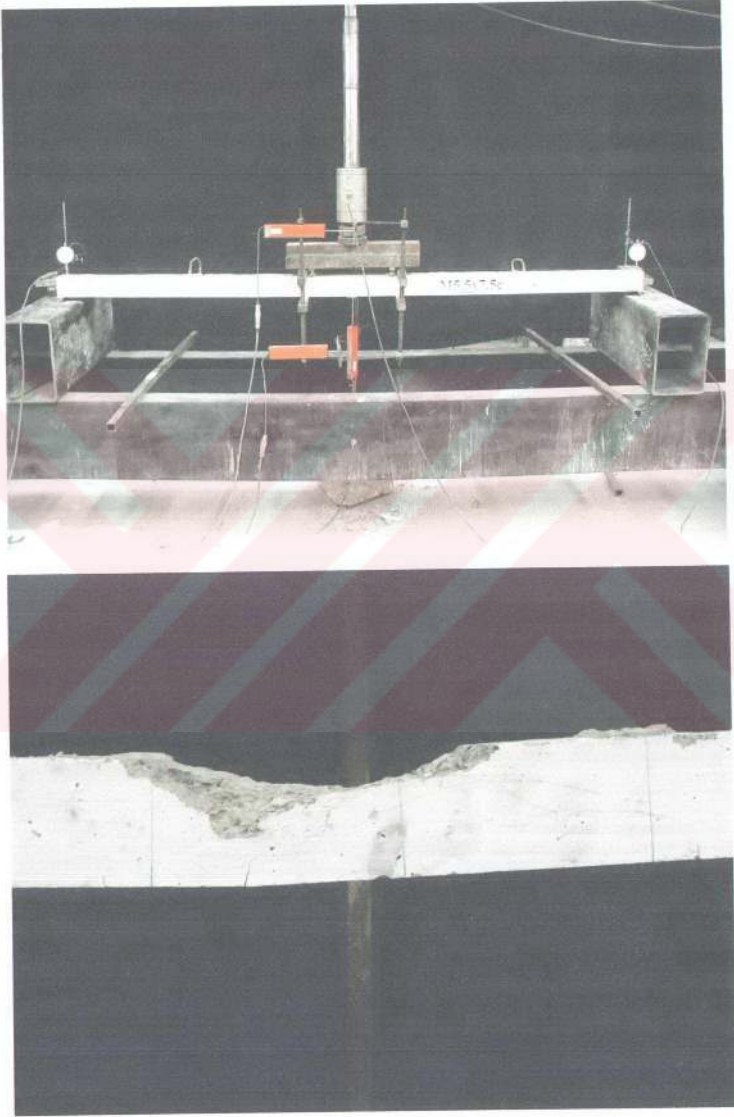
Ek-C6. S11.15c kirişinin göçmesi



Ek-C7. M5.7a kirişinin göçmesi



Ek-C8. M5.7b kirişinin göçmesi



Şekil EK-C9. M5.7c kirişinin göçmesi



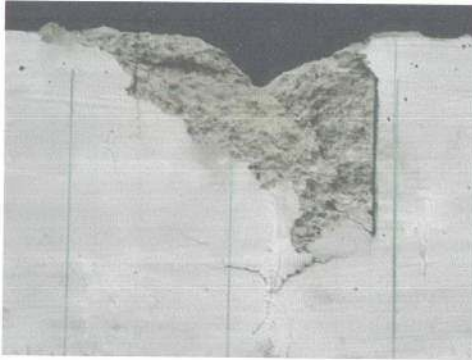
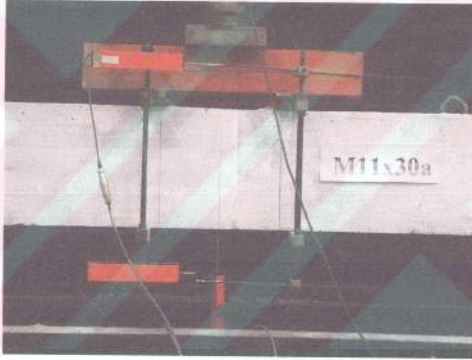
Ek-C10. M11.15a kirişinin göçmesi



Ek-C11. M11.15b kirişinin göçmesi



Ek-C12. M11.15c kirişinin göçmesi



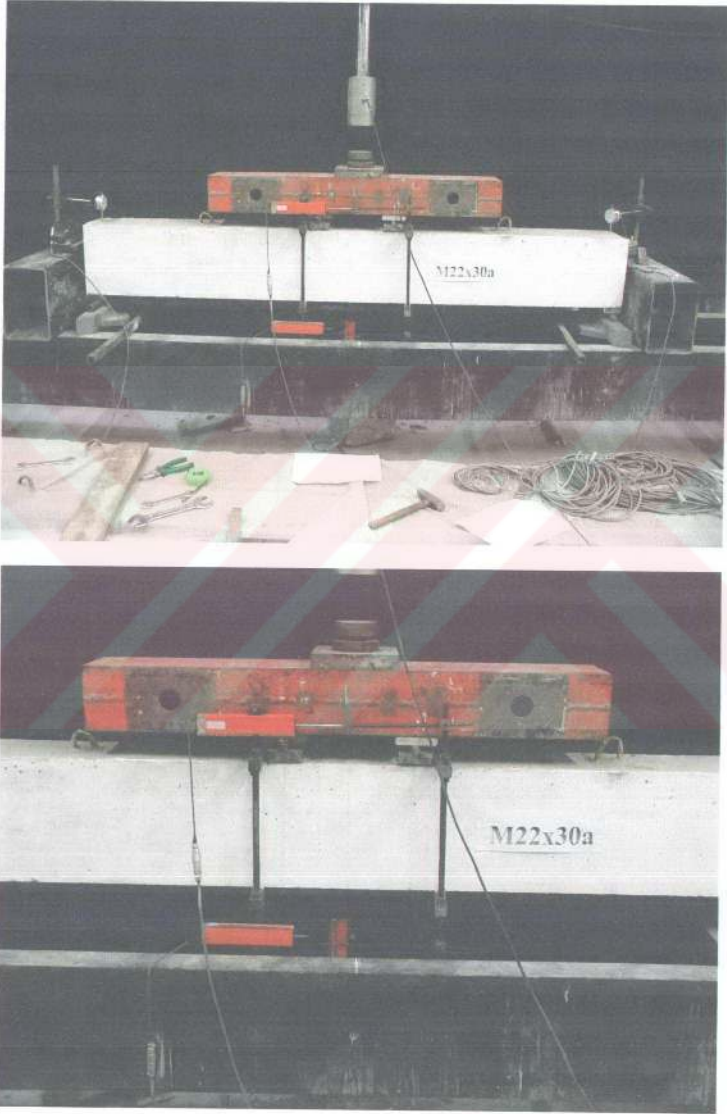
Ek-C13. M11.30a kirişinin göçmesi



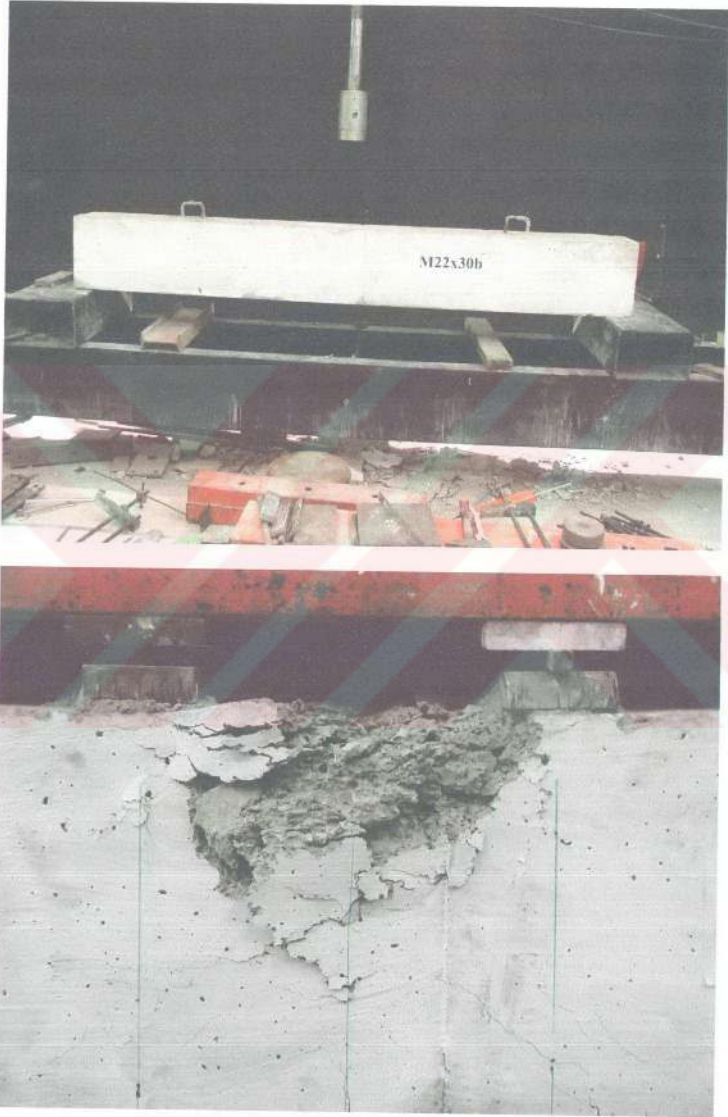
Ek-C14. M11.30b kirişinin göçmesi



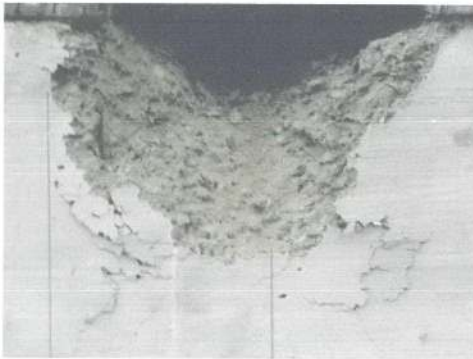
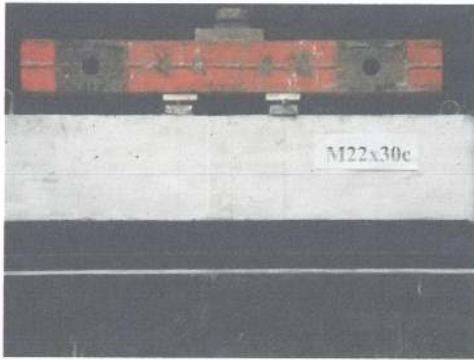
Ek-C15. M11.30c kirişinin göçmesi



Ek-C16. M22.30a kirişinin göçmesi



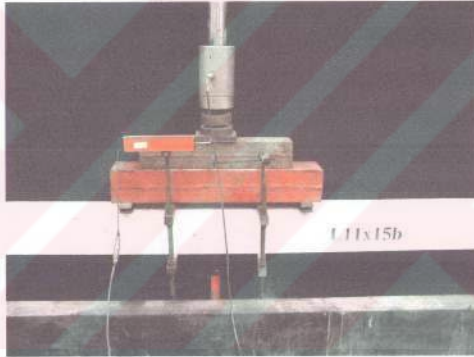
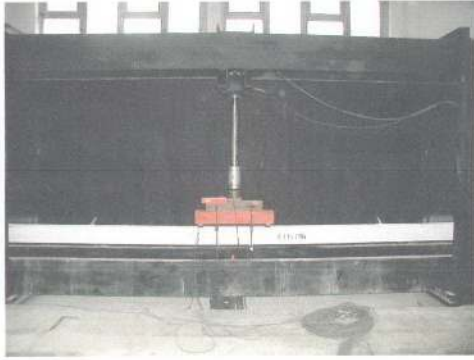
Ek-C17. M22.30b kirişinin göçmesi



Ek-C18. M22.30c kirişinin göçmesi



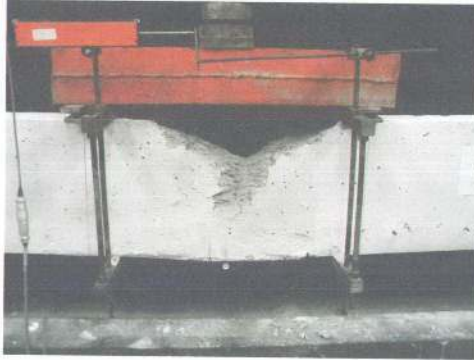
Ek-C19. L11.15a kirişinin göçmesi



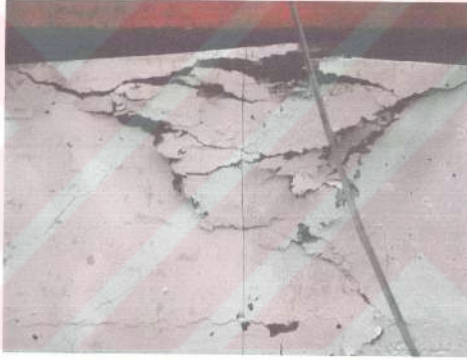
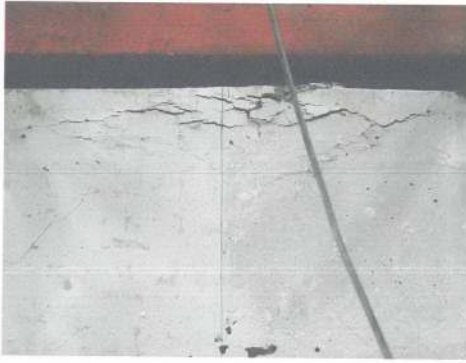
Ek-C20. L11.15b kirişinin göçmesi



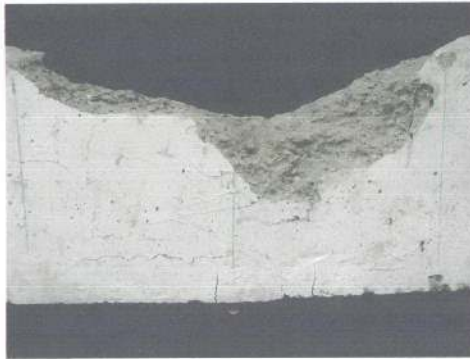
Ek-C21. L11.15c kirişinin göçmesi



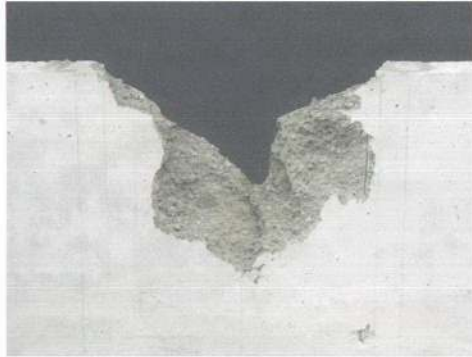
Ek-C22. L11.30a kirişinin göçmesi



Ek-C23. L11.30b kirişinin göçmesi



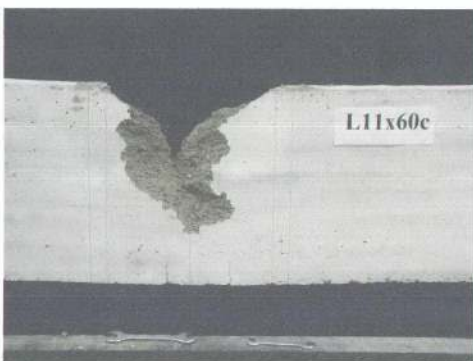
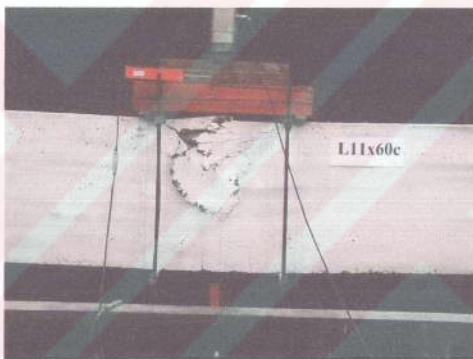
Ek-C24. L11.30c kirişinin göçmesi



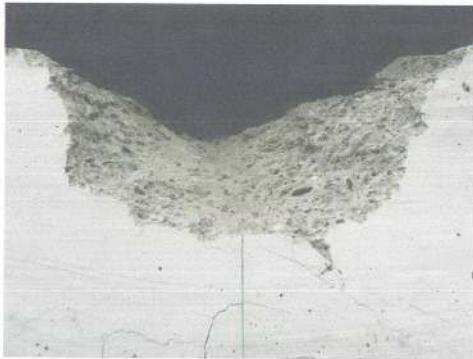
Ek-C25. L11.60a kirişinin göçmesi



Ek-C26. L11.60b kirişinin göçmesi



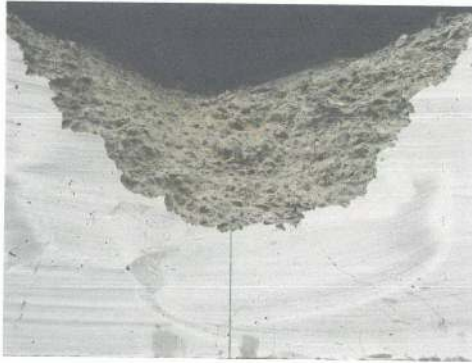
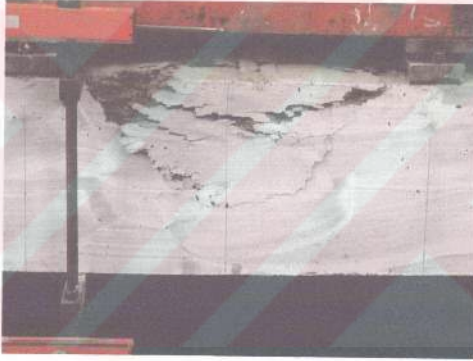
Ek-C27. L11.60c kirişinin göçmesi



Ek-C28. L22.30a kirişinin göçmesi

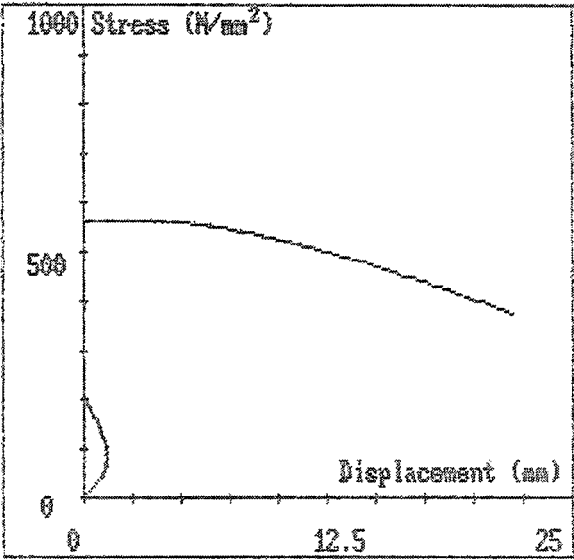


Ek-C29. L22.30b kirişinin göçmesi



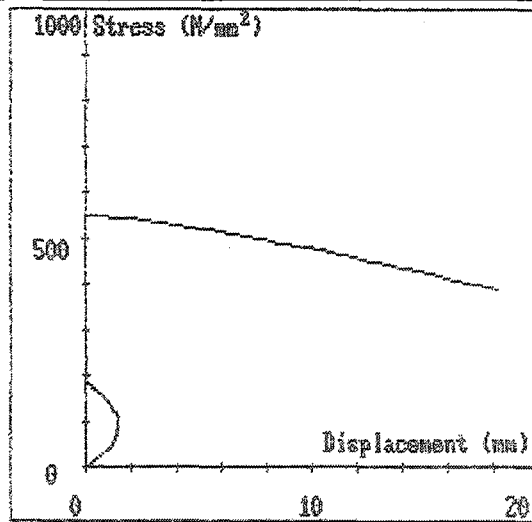
Ek-C30. L22.30c kirişinin göçmesi

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984		
FILE DATA					
File name	Cagatay	Test number	1		
File ID.	Φ32-S420	Date	24/05/02		
Config.		Time	10:05		
SPECIMEN DATA					
Specimen code				Source	
Diameter	32.000	mm	Operator		
Area	804.25	mm ²	Batch number		
Parallel length	44.0	mm			
Initial G.L	44.0	mm			
Final G.L	64.3	mm			
TEST RESULTS					
Fm	455.7	kN	Ae	0.0	
Rm	506	N/mm ²	At	0.0	
ReH	408	N/mm ²	E		
ReL	403	N/mm ²			
Test complete	Fracture detected				



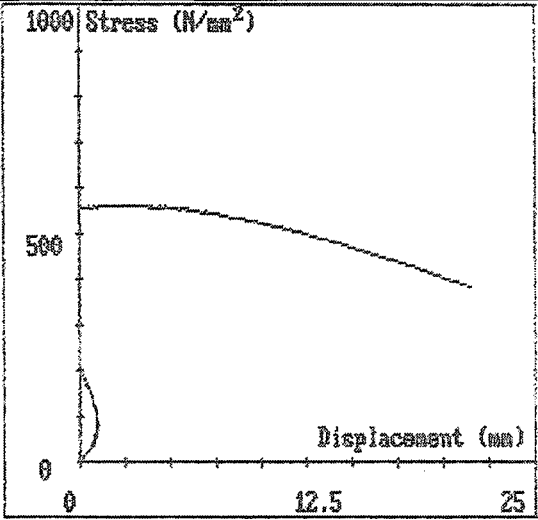
Ek-D1. Φ32-S420 donatı çekme deneyi-1

DARTEC SOFTWARE			ISO 6892 : 1984	
FILE DATA				
File name	Cagatay	Test number	2	
File ID.	Φ32-S420	Date	24/05/02	
Config.		Time	10:13	
SPECIMEN DATA				
Specimen code			Source	
Diameter	32.000	mm	Operator	
Area	804.25	mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0	mm		
Initial G.L	44.0	mm		
Final G.L	60.0	mm		
TEST RESULTS				
Fm	449.4	kN	Ae	0.0
Rm	559	N/mm ²	At	0.0
ReH	401	N/mm ²	E	
ReL	399	N/mm ²		
Test complete	Fracture detected			



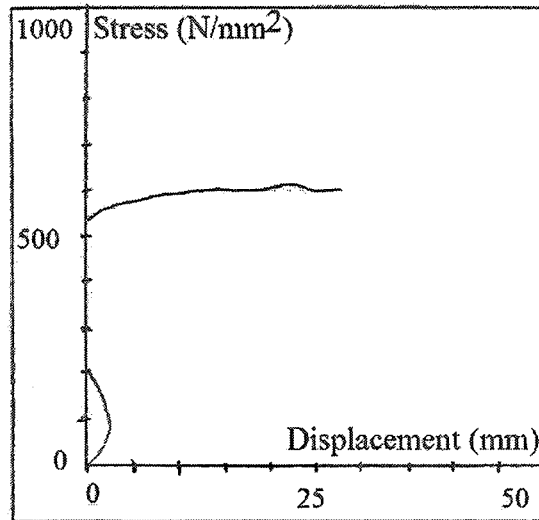
Ek-D2. Φ32-S420 donatı çekme deneyi-2

D A R T E C S O F T W A R E		ISO 6892 : 1984		
FILE DATA				
File name	Cagatay	Test number	3	
File ID.	Φ32-S420	Date	24/05/02	
Config.		Time	10:24	
SPECIMEN DATA				
Specimen code		Source		
Diameter	32.000	mm	Operator	
Area	804.25	mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0	mm		
Initial G.L	44.0	mm		
Final G.L	64.0	mm		
TEST RESULTS				
Fm	450.9	kN	Ae	0.0
Rm	561	N/mm ²	At	0.0
ReH	413	N/mm ²	E	
ReL	398	N/mm ²		
Test complete	Fracture detected			



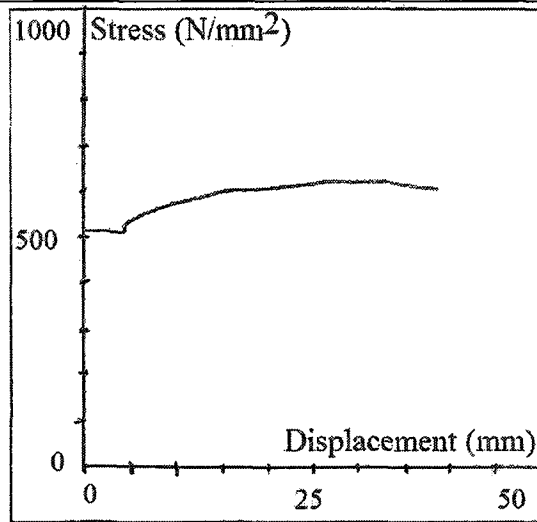
Ek-D3. Φ32-S420 donatı çekme deneyi-3

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984	
FILE DATA				
File name	Cagatay	Test number	1	
File ID.	Φ16-S420	Date	24/05/02	
Config.		Time	10:41	
SPECIMEN DATA				
Specimen code			Source	
Diameter	16.000	mm	Operator	
Area	201.06	mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0	mm		
Initial G.L	44.0	mm		
Final G.L	66.2	mm		
TEST RESULTS				
Fm	122.5	kN	Ae	0.0
Rm	609	N/mm ²	At	0.0
ReH	511	N/mm ²	E	
ReL	506	N/mm ²		
Test complete	Fracture detected			



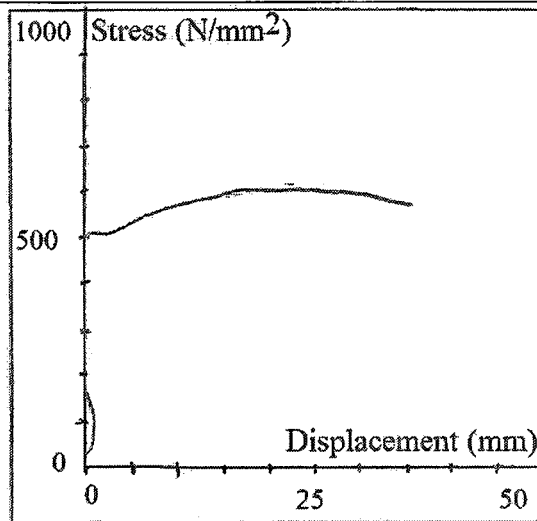
Ek-D4. Φ16-S420 donatı çekme deneyi-1

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984		
FILE DATA					
File name	Cagatay	Test number	2		
		Date	24/05/02		
File ID.	Φ16-S420	Time	10:58		
Config.					
SPECIMEN DATA					
Specimen code			Source		
Diameter	16.000	mm	Operator		
Area	201.06	mm ²	Batch number		
Parallel length	44.0	mm			
Initial G.L	44.0	mm			
Final G.L	82.2	mm			
TEST RESULTS					
Fm	123.4	kN	Ae	0.0	
Rm	614	N/mm ²	At	0.0	
ReH	517	N/mm ²	E		
ReL	509	N/mm ²			
Test complete	Fracture detected				



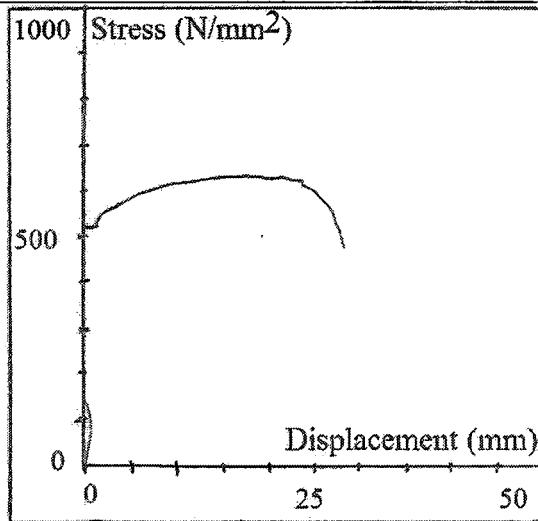
Ek-D5. Φ16-S420 donatı çekme deneyi-2

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984	
FILE DATA				
File name	Cagatay	Test number	3	
File ID.	Φ16-S420	Date	24/05/02	
Config.		Time	11:13	
SPECIMEN DATA				
Specimen code			Source	
Diameter	16.000	mm	Operator	
Area	201.06	mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0	mm		
Initial G.L	44.0	mm		
Final G.L	77.8	mm		
TEST RESULTS				
Fm	121.3	kN	Ae	0.0
Rm	603	N/mm ²	At	0.0
ReH	514	N/mm ²	E	
ReL	508	N/mm ²		
Test complete	Fracture detected			



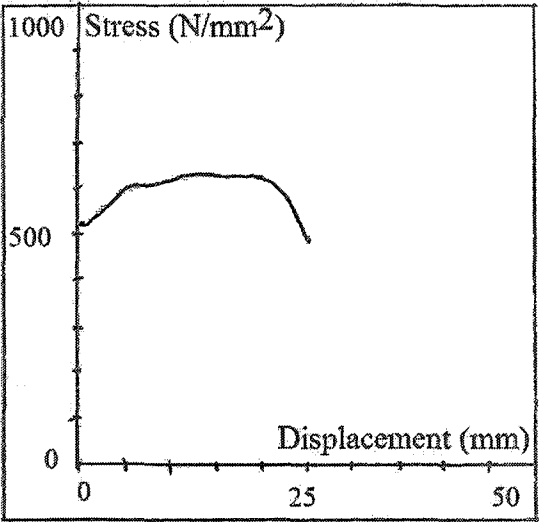
Ek-D6. Φ16-S420 donatı çekme deneyi-3

DARTEC SOFTWARE			ISO 6892 : 1984	
FILE DATA				
File name	Cagatay	Test number	1	
File ID.	Φ8-S420	Date	24/05/02	
Config.		Time	13:24	
SPECIMEN DATA				
Specimen code			Source	
Diameter	8.000	mm	Operator	
Area	50.27	mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0	mm		
Initial G.L	44.0	mm		
Final G.L	71.8	mm		
TEST RESULTS				
Fm	31.9	kN	Ae	0.0
Rm	633	N/mm ²	At	0.0
ReH	535	N/mm ²	E	
ReL	522	N/mm ²		
Test complete	Fracture detected			



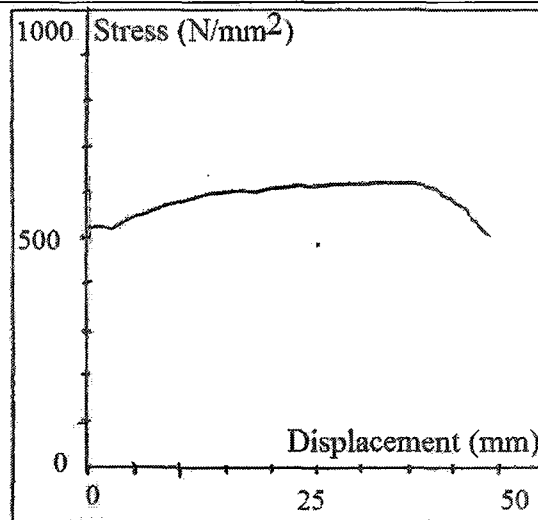
Ek-D7. Φ8-S420 donatı çekme deneyi-1

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984		
FILE DATA					
File name	Cagatay	Test number	2		
File ID.	Φ8-S420	Date	24/05/02		
Config.		Time	13:39		
SPECIMEN DATA					
Specimen code				Source	
Diameter	8.000	mm	Operator		
Area	50.27	mm ²	Batch number		
Parallel length	44.0	mm			
Initial G.L	44.0	mm			
Final G.L	68	mm			
TEST RESULTS					
Fm	31.7	kN	Ae	0.0	
Rm	631	N/mm ²	At	0.0	
ReH	530	N/mm ²	E		
ReL	522	N/mm ²			
Test complete	Fracture detected				



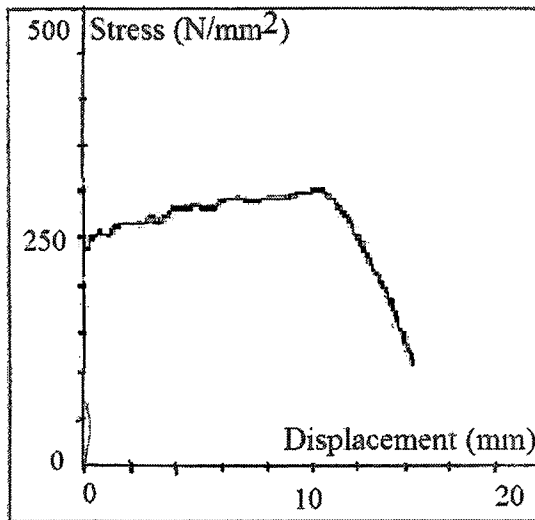
Ek-D8. Φ8-S420 donatı çekme deneyi-2

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984	
FILE DATA				
File name	Cagatay	Test number	3	
File ID.	Φ8-S420	Date	24/05/02	
Config.		Time	14:04	
SPECIMEN DATA				
Specimen code			Source	
Diameter	8.000	mm	Operator	
Area	50.27	mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0	mm		
Initial G.L	44.0	mm		
Final G.L	65.1	mm		
TEST RESULTS				
Fm	31.3	kN	Ae	0.0
Rm	622	N/mm ²	At	0.0
ReH	527	N/mm ²	E	
ReL	511	N/mm ²		
Test complete	Fracture detected			



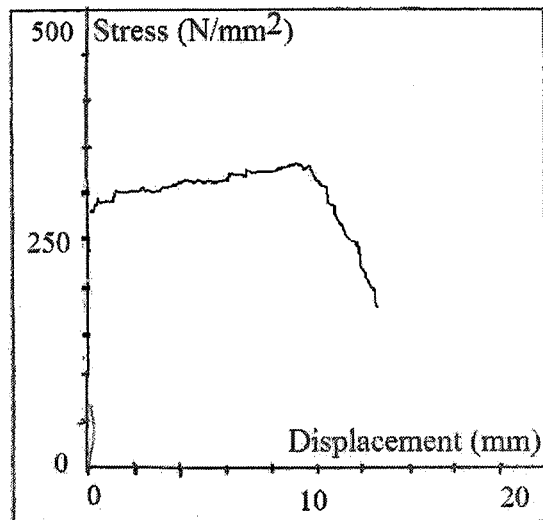
Ek-D9. Φ8-S420 donatı çekme deneyi-3

DARTEC SOFTWARE			ISO 6892 : 1984
FILE DATA			
File name	Cagatay	Test number	1
File ID.	Φ8-S220	Date	24/05/02
Config.		Time	11:36
SPECIMEN DATA			
Specimen code		Source	
Diameter	8.000 mm	Operator	
Area	50.27 mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0 mm		
Initial G.L	44.0 mm		
Final G.L	68.0 mm		
TEST RESULTS			
Fm	16.7 kN	Ae	0.0
Rm	309 N/mm ²	At	0.0
ReH	281 N/mm ²	E	
ReL	303 N/mm ²		
Test complete	Fracture detected		



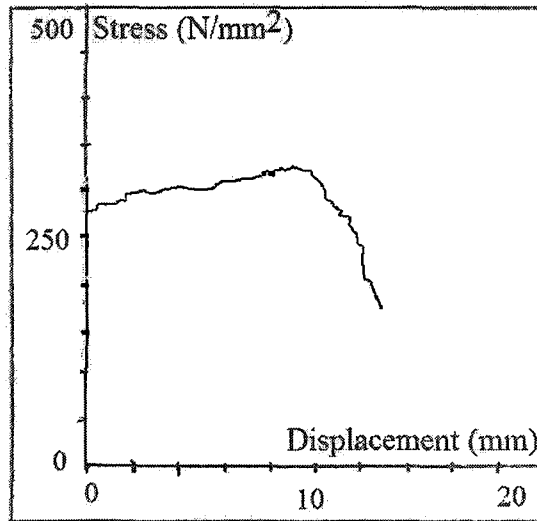
Ek-D10. Φ8-S220 donatı çekme deneyi-1

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984	
FILE DATA				
File name	Cagatay	Test number	2	
File ID.	Φ8-S220	Date	24/05/02	
Config.		Time	11:48	
SPECIMEN DATA				
Specimen code			Source	
Diameter	8.000	mm	Operator	
Area	50.27	mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0	mm		
Initial G.L	44.0	mm		
Final G.L	69.3	mm		
TEST RESULTS				
Fm	16.9	kN	Ae	0.0
Rm	351	N/mm ²	At	0.0
ReH	307	N/mm ²	E	
ReL	286	N/mm ²		
Test complete	Fracture detected			



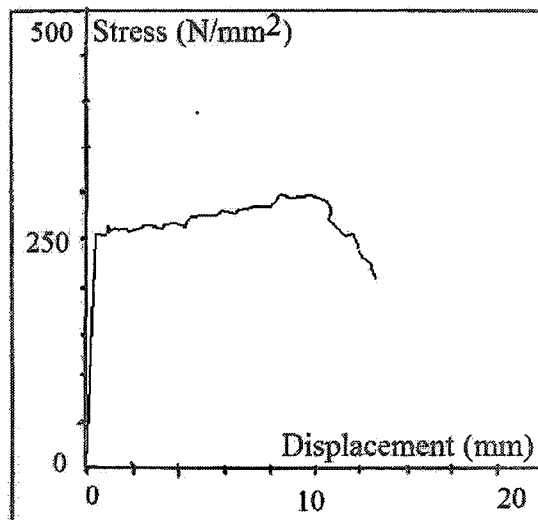
Ek-D11. Φ8-S220 donatı çekme deneyi-2

D A R T E C S O F T W A R E		ISO 6892 : 1984	
FILE DATA			
File name	Cagatay	Test number	3
File ID.	Φ8-S220	Date	24/05/02
Config.		Time	12:05
SPECIMEN DATA			
Specimen code		Source	
Diameter	8.000 mm	Operator	
Area	50.27 mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0 mm		
Initial G.L	44.0 mm		
Final G.L	67.2 mm		
TEST RESULTS			
Fm	16.9 kN	Ae	0.0
Rm	355 N/mm ²	At	0.0
ReH	314 N/mm ²	E	
ReL	294 N/mm ²		
Test complete	Fracture detected		



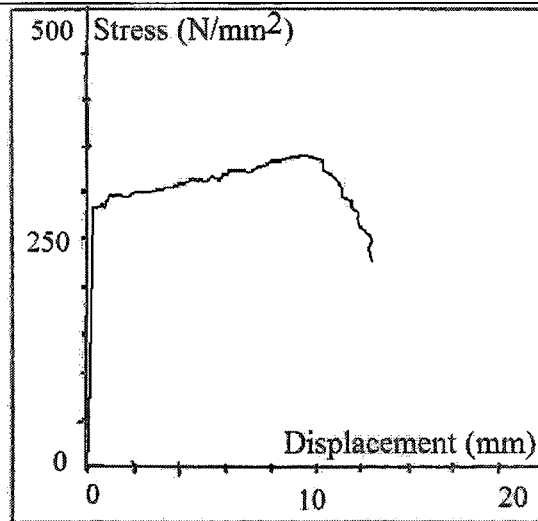
Ek-D12. Φ8-S220 donatı çekme deneyi-3

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984
FILE DATA			
File name	Cagatay	Test number	1
File ID.	Φ5-S220	Date	24/05/02
Config.		Time	14:36
SPECIMEN DATA			
Specimen code		Source	
Diameter	5.000 mm	Operator	
Area	19.63 mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0 mm		
Initial G.L	44.0 mm		
Final G.L	68.0 mm		
TEST RESULTS			
Fm	6.8 kN	Ae	0.0
Rm	294 N/mm ²	At	0.0
ReH	265 N/mm ²	E	
ReL	253 N/mm ²		
Test complete	Fracture detected		



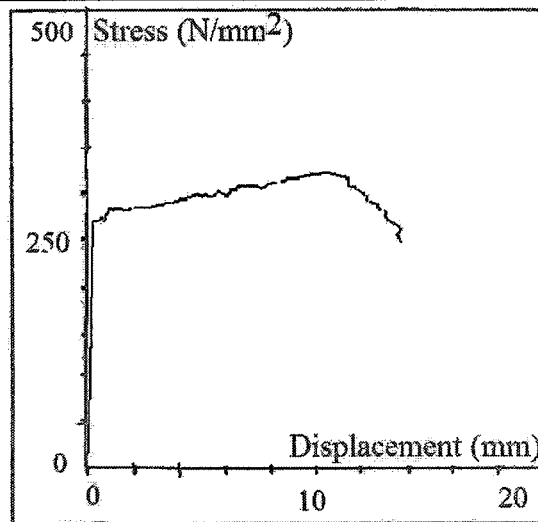
Ek-D13. Φ5-S220 donatı çekme deneyi-1

D A R T E C S O F T W A R E			ISO 6892 : 1984		
FILE DATA					
File name	Cagatay	Test number			
File ID.	Φ5-S220	Date	24/05/02		
Config.		Time	14:43		
SPECIMEN DATA					
Specimen code				Source	
Diameter	5.000	mm	Operator		
Area	19.63	mm ²	Batch number		
Parallel length	44.0	mm			
Initial G.L	44.0	mm			
Final G.L	68.0	mm			
TEST RESULTS					
Fm	6.7	kN	Ae	0.0	
Rm	301	N/mm ²	At	0.0	
ReH	270	N/mm ²	E		
ReL	259	N/mm ²			
Test complete	Fracture detected				



Ek-D14. Φ5-S220 donatı çekme deneyi-2

D A R T E C S O F T W A R E		ISO 6892 : 1984	
FILE DATA			
File name	Cagatay	Test number	3
File ID.	Φ5-S220	Date	24/05/02
Config.		Time	14:51
SPECİMEN DATA			
Specimen code		Source	
Diameter	5.000 mm	Operator	
Area	19.63 mm ²	Batch number	
Parallel length	44.0 mm		
Initial G.L	44.0 mm		
Final G.L	68.0 mm		
TEST RESULTS			
Fm	6.5 kN	Ae	0.0
Rm	285 N/mm ²	At	0.0
ReH	268 N/mm ²	E	
ReL	255 N/mm ²		
Test complete	Fracture detected		



Ek-D15. Φ5-S220 donatı çekme deneyi-3

ÖZGEÇMİŞ

Çağatay Mehmet Belgin 1971 yılında Ankara’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini TED Ankara Koleji’nde tamamladı. 1993 yılında Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 1997 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 1994 yılından beri bu kurumda araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

