

**BETON YAPILARA DEĞİŞİK BOYUT ETKİSİ BAĞINTILARININ
UYGULANMASI**

FARROKH RASOULI SARABI

726068

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2002

ANKARA

726068

Farrokh Rasouli Sarabi tarafından hazırlanan BETON YAPILARA DEĞİŞİK BOYUT ETKİSİ BAĞINTILARININ UYGULANMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Prof.Dr.Sıddık ŞENER

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. Abdussamet ARSLAN



Üye : Prof.Dr. Sıddık ŞENER



Üye : Prof.Dr. İlhan SUNGUR



Üye : _____

Üye : _____

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. NEDEN KIRILMA MEKANIĞI	5
2.1. Tarihsel Gelişim	5
2.2. Klasik Lineer Teori	6
2.3. Niçin Boyut Etkisi	8
2.3.1. Boyut etkisi	9
2.4. Gevrek ve Sünek Kırılma Tanımları	14
2.5. Boyut Etkisinin Enerji İle Açıklanması	15
2.6. Kırılma Bölgesi	19
2.7. Boyut Etkisi ve Yapıların Gevrekliği	21
2.7.1. Gevreklik sayısı	21
2.7.2. Bazant'ın önerdiği boyut etkisi	22
2.7.3. Carpinteri'nin önerdiği boyut etkisi	23
2.7.4. Kim'in önerdiği boyut etkisi	26
2.8. Regresyon İlişkileri	28
2.9. Boyut Etkisinde RILEM Önerileri	31
2.9.1. RILEM önerilerinde denklemler	32
3. ÇEŞİTLİ DENEY VE ANALİZ YÖNTEMLERİ	35
3.1. Direkt Çekme Deneyleri	36
3.1.1. Çentikli numunede direkt çekme deneyi	36
3.1.1.1. Direkt çekme deneyinde analizler	37
3.1.1.2. Direkt çekme deneyinde sonuç karşılaştırmaları	43
3.1.2. Direkt yükleme deneyi	45
3.1.2.1. Direkt yüklemede deney analizleri	47
3.1.2.2. Direkt yükleme deneyinde sonuç karşılaştırmaları	53
3.2. Dolaylı Çekme Deneyi	55
3.2.1. Çekip çıkarma deneyi	55
3.2.1.1. Çekip çıkarma deneyi analizleri	57
3.2.1.2. Çekip çıkarma deneyinde sonuç karşılaştırmaları	60
3.3. Basınç Deneyleri	62
3.3.1. Dışmerkez basınç deneyi	62
3.3.1.1. Dışmerkez basınçta deneyi analizleri	63
3.3.1.2. Dışmerkez basınç deneyinde sonuç karşılaştırmaları	75
3.3.2. Çentikli numunede dışmerkez basınç deneyi	77
3.3.2.1. Çentikli numunede dışmerkez basınçta deneyi analizleri	78

3.3.2.2.	Dışmerkez basınç deneyinde sonuç karşılaştırmaları	84
3.3.3.	Narin donatısız kolonlarda basınç deneyi	86
3.3.3.1.	Narin donatısız kolonlarda deney analizleri	88
3.3.3.2.	Narin donatısız kolonların basınç deneyinde sonuç karşılaştırmaları	97
3.4.	Eğilme Deneyleri	99
3.4.1.	Üç nokta yüklemede eğilme deneyi	99
3.4.1.1.	Üç nokta yüklemede deneyi analizleri	100
3.4.1.2.	Üç nokta eğilme deneyinde sonuç karşılaştırmaları	106
3.4.2.	Yüksek mukavemetli betonda üç nokta eğilme deneyi	108
3.4.2.1.	Yüksek mukavemetli betonda deneyi analizleri	110
3.4.2.2.	Yüksek mukavemetli beton eğilmesinde sonuç karşılaştırmaları	125
3.5.	Eğilmede Aderans Eki Deneyi	128
3.5.1.	Betonarme kirişte aderans eki deneyi	128
3.5.1.1.	Betonarme kirişte aderans eki deneyinin analizleri	130
3.5.1.2.	Betonarme kirişte aderans eki deneyinin sonuç karşılaştırmaları ...	142
3.6.	Kesme Deneyi	145
3.6.1.	Betonarme kirişte diyagonal kesme deneyi	145
3.6.1.1.	Diyagonal kesme deneyinin analizleri	147
3.6.1.2.	Diyagonal kesme deneyinde sonuç karşılaştırmaları	153
3.7.	Burulma Deneyi	155
3.7.1.	Boyuna donatılı, donatısız kirişlerde burulma deneyi	155
3.7.1.1.	Burulma yüklemede deney analizleri	157
3.7.1.2.	Burulma yüklemede deney sonuçlarının karşılaştırmaları	163
4.	TARTIŞMA VE SONUÇ	165
KAYNAKLAR		168
ÖZGEÇMİŞ		171

**BETON YAPILARA DEĞİŞİK BOYUT ETKİSİ BAĞINTILARININ
UYGULANMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

FARROKH RASOULI SARABI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2002

ÖZET

Bu çalışmada, beton yapılar üzerinde yapılmış boyut etkisi deney sonuçlarına değişik boyut etkisi bağıntıları uygulanmıştır. Deneylerde farklı numuneler üzerinde değişik yüklemeler uygulanmıştır. Lineer I, Lineer II, Non-lineer, MFSL ve MSEL analiz yöntemleri kullanılarak kırılma parametreleri ve bu parametrelerin değişim sonuçları sayısal ve grafiksel olarak verilmiştir. Bazant, Kim ve Carpinteri boyut etkisi denklemleri kullanılarak her bir deney için uygulanmıştır. Deneylerde geometrik olarak benzer fakat farklı boyutlu numuneler kullanılmıştır.

Bilim Kodu : 6240301

Anahtar Kelimeler : Beton yapılar, direkt çekme, dolaylı çekme, dışmerkez basınç, narinlik, eğilme, kesme, burulma, gerilme, göçme, kırılma mekaniği, boyut etkisi, gevreklik, kancalı, kancasız, regresyon.

Sayfa Adedi : 171

Tez Yöneticisi : Prof.Dr.Sıddık Şener

VARIOUS SIZE EFFECT RELATIONS APPLIED FOR THE CONCRETE STRUCTURES

(M.Sc. Thesis)

FARROKH RASOULI SARABI

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

December 2002

ABSTRACT

In this study, the size effect test results of the concrete structures were used and various size effect equations were applied. Different loadings were applied on the test specimens. Analytical and graphical results of the fracture parameters were given using the Linear I, Linear II, Non-linear, MFSL and MSEL analysis. Size effect equations of Bazant, Kim and Carpinteri used for each test were applied. Test specimens of geometrically similar with different sizes were used.

Science Code : 6240301

Key Words : Concrete buildings, direct tension, indirect tension, eccentric compression, slenderness, bending, shear, torsion, stress, failure, fracture mechanics, size effect, brittleness, anchored, unanchored, regression.

Page number : 171

Adviser : Prof.Dr.Sıddık Şener

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yardımcı olan, çalışmayı yönlendiren, bütün aşamalarını inceleyen, her adımda bilgi ve deneyimlerine baş vurduğum sayın hocam Prof.Dr.Sıddık Şener'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalar esnasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. İzzet Ufuk Çağdaş'a teşekkür ederim. Okul hayatımda bana desteklerini hiç esirgemeyen annem Azra Naimi ve abim Dr. Nasır Rasouli'ye teşekkür ederim.



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1.	Çentikli numunede çekme deney bilgileri (beton)37
Çizelge 3.2.	Çentikli numunede çekme deney sonuçları (beton)38
Çizelge 3.3.	Çentikli numunede çekme deney bilgileri (harç)40
Çizelge 3.4.	Çentikli numunede çekme deney sonuçları (harç)41
Çizelge 3.5.	Direkt yüklemede deney bilgileri (nervürlü donatı).....47
Çizelge 3.6.	Direkt yüklemede deney sonuçları (nervürlü donatı).....48
Çizelge 3.7.	Direkt yüklemede deney bilgileri (düz donatı).....50
Çizelge 3.8.	Direkt yüklemede deney sonuçları (düz donatı).....51
Çizelge 3.9.	Çekip çıkarma deney bilgileri.....57
Çizelge 3.10.	Çekip çıkarma deney sonuçları.....58
Çizelge 3.11.	Dışmerkez basınçta deney bilgileri (C50).....63
Çizelge 3.12.	Dışmerkez basınçta deney sonuçları (C50).....64
Çizelge 3.13.	Dışmerkez basınçta deney bilgileri (C70).....66
Çizelge 3.14.	Dışmerkez basınçta deney sonuçları (C70).....67
Çizelge 3.15.	Dışmerkez basınçta deney bilgileri (C80).....69
Çizelge 3.16.	Dışmerkez basınçta deney sonuçları (C80).....70
Çizelge 3.17.	Dışmerkez basınçta deney bilgileri (C90).....72
Çizelge 3.18.	Dışmerkez basınçta deney sonuçları (C90).....73
Çizelge 3.19.	Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney..... bilgileri (beton).....78
Çizelge 3.20.	Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney..... sonuçları (beton).....79

Çizelge 3.21.	Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney..... bilgileri (harç).....	81
Çizelge 3.22.	Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney..... sonuçları (harç).....	82
Çizelge 3.23.	Narin donatısız kolonlarda deney bilgileri ($\lambda=9,7$).....	88
Çizelge 3.24.	Narin donatısız kolonlarda deney sonuçları ($\lambda=9,7$).....	89
Çizelge 3.25.	Narin donatısız kolonlarda deney bilgileri ($\lambda=18$).....	91
Çizelge 3.26.	Narin donatısız kolonlarda deney sonuçları ($\lambda=18$).....	92
Çizelge 3.27.	Narin donatısız kolonlarda deney bilgileri ($\lambda=34,7$).....	94
Çizelge 3.28.	Narin donatısız kolonlarda deney sonuçları ($\lambda=34,7$).....	95
Çizelge 3.29.	Üç nokta yüklemede deney bilgileri (beton).....	100
Çizelge 3.30.	Üç nokta yüklemede deney sonuçları (beton).....	101
Çizelge 3.31.	Üç nokta yüklemede deney bilgileri (harç).....	103
Çizelge 3.32.	Üç nokta yüklemede deney sonuçları (harç).....	104
Çizelge 3.33.	Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,0$).....	110
Çizelge 3.34.	Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları ($N_p=0,0$).....	111
Çizelge 3.35.	Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,10$).....	113
Çizelge 3.36.	Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları ($N_p=0,10$).....	114
Çizelge 3.37.	Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,26$).....	116
Çizelge 3.38.	Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları ($N_p=0,26$).....	117
Çizelge 3.39.	Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,53$).....	119
Çizelge 3.40.	Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları ($N_p=0,53$).....	120
Çizelge 3.41.	Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,87$).....	122
Çizelge 3.42.	Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları ($N_p=0,87$).....	123

Çizelge 3.43.	Aderans ekinde deney bilgileri (sabit moment, etriyesiz).....	130
Çizelge 3.44.	Aderans ekinde deney sonuçları (sabit moment, etriyesiz)...	131
Çizelge 3.45.	Aderans ekinde deney bilgileri (sabit moment, etriyeli).....	133
Çizelge 3.46.	Aderans ekinde deney sonuçları (sabit moment, etriyeli).....	134
Çizelge 3.47.	Aderans ekinde deney bilgileri (sabit kesme, etriyesiz).....	136
Çizelge 3.48.	Aderans ekinde deney sonuçları (sabit kesme, etriyesiz).....	137
Çizelge 3.49.	Aderans ekinde deney bilgileri (sabit kesme, etriyeli).....	139
Çizelge 3.50.	Aderans ekinde deney sonuçları (sabit kesme, etriyeli).....	140
Çizelge 3.51.	Kesme göçmesinde deney bilgileri (kancalı ankraj).....	147
Çizelge 3.52.	Kesme göçmesinde deney sonuçları (kancalı ankraj).....	148
Çizelge 3.53.	Kesme göçmesinde deney bilgileri (kancasız ankraj).....	150
Çizelge 3.54.	Kesme göçmesinde deney sonuçları (kancasız ankraj).....	151
Çizelge 3.55.	Burulma yüklemede deney bilgileri (beton kiriş).....	157
Çizelge 3.56.	Burulma yüklemede deney sonuçları (beton kiriş).....	158
Çizelge 3.57.	Burulma yüklemede deney bilgileri (betonarme kiriş).....	160
Çizelge 3.58.	Burulma yüklemede deney sonuçları (betonarme kiriş)...	161

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1.	a) Sonlu elastik plakada elips boşluk tepesinde gerilme dağılımı ... b) Yarık şeklindeki boşluk tepesinde gerilme yığılımı7
Şekil 2.2.	a) Weibull zincir teorisi b) Donell paralel bağ teorisi9
Şekil 2.3.	a) Boyut etkisi, b) logaritmik eksenlerde mukavemet (ACI komitesi 446, 1992), c) nominal gerilme vs. göreceli yerdeğiştirme eğrisi11
Şekil 2.4.	Gevrek, Yarı gevrek, Sünek malzemeler13
Şekil 2.5.	Normal gerilmelerde gevrek; Kesme gerilmesinde sünek kırılma14
Şekil 2.6.	Boyut etkisinin enerji ile açıklanması15
Şekil 2.7.	Boyut etkisi ifadesinin grafik gösterimi18
Şekil 2.8.	Farklı malzemelerin kırılma bölgeleri: Cam, Metal, Beton20
Şekil 2.9.	Carpinteri'nin önerdiği MFSL grafik gösterimi24
Şekil 2.10.	Carpinteri'nin önerdiği MFSL , logaritmik eksenlerde gösterimi25
Şekil 2.11.	Bazant'ın boyut etkisi ile Kim'in boyut etkisi karşılaştırılması27
Şekil 2.12.	Regresyon grafikleri, a) logaritmik, b) lineer regresyon I, c) lineer regresyon II, d) ters logaritmik eğrisi30
Şekil 2.13.	RILEM metoduna göre önerilen numune geometrisi31
Şekil 3.1.	Direkt çekmede numune geometrisi (simetrik çentikli)36
Şekil 3.2.	Direkt çekmede regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi ... karşılaştırma (beton)39
Şekil 3.3.	Direkt çekmede regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi ... karşılaştırma (harç)42
Şekil 3.4.	Direkt yüklemede numune geometrisi45
Şekil 3.5.	Direkt yüklemede regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (nervürlü donatı)49

Şekil 3.6.	Direkt yüklemde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (düz donatı)	52
Şekil 3.7.	Çekip çıkarma deneyinin numune geometrileri	55
Şekil 3.8.	Çekip çıkarma deneyinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma	59
Şekil 3.9.	Dışmerkez basınçta numune geometrisi ve yükleme şekli	62
Şekil 3.10.	Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (C50)	65
Şekil 3.11.	Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (C70)	68
Şekil 3.12.	Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (C80)	71
Şekil 3.13.	Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (C90)	74
Şekil 3.14.	Dışmerkez basınçta numune geometrisi (simetrik çentikli)	77
Şekil 3.15.	Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (beton)	80
Şekil 3.16.	Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (harç)	83
Şekil 3.17.	Narin donatısız kolonlarda boyut etkisi deneyinde kullanılan numune geometrileri ve donatı durumları	87
Şekil 3.18.	Narin donatısız kolonlarda regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma ($\lambda=9,7$)	90
Şekil 3.19.	Narin donatısız kolonlarda regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma ($\lambda=18$)	93
Şekil 3.20.	Narin donatısız kolonlarda regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma ($\lambda=34,7$)	96
Şekil 3.21.	Üç nokta yüklemesinde numune geometrisi ve yükleme durumu	99
Şekil 3.22.	Üç nokta yüklemesinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (beton)	102

Şekil 3.23.	Üç nokta yüklemesinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL ... analizi, karşılaştırma (harç)105
Şekil 3.24.	Yüksek mukavemetli betonda, üç nokta yüklemesinde numune geometrisi ve yükleme durumu108
Şekil 3.25.	Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma ($N_P=0,0$)112
Şekil 3.26.	Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma ($N_P=0,10$)115
Şekil 3.27.	Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma ($N_P=0,26$)118
Şekil 3.28.	Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma ($N_P=0,53$)121
Şekil 3.29.	Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma ($N_P=0,87$)124
Şekil 3.30.	Betonarme kirişin aderans ekinde numune geometrileri ve yükleme durumu; sabit moment bölgesinde bindirme, sabit kesme bölgesinde bindirme129
Şekil 3.31.	Aderans ekinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, ... MSEL analizi, karşılaştırma (Sabit moment bölgesi, etriyesiz)132
Şekil 3.32.	Aderans ekinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, ... MSEL analizi, karşılaştırma (Sabit moment bölgesi, etriyeli)135
Şekil 3.33.	Aderans ekinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, ... MSEL analizi, karşılaştırma (Sabit kesme bölgesi, etriyesiz)138
Şekil 3.34.	Aderans ekinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, ... MSEL analizi, karşılaştırma (Sabit kesme bölgesi, etriyeli)141
Şekil 3.35.	Diyagonal kesme göçmesinde numune geometrisi, kesit, donatı ve yükleme durumu146
Şekil 3.36.	Diyagonal kesmede regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (kancalı)149
Şekil 3.37.	Diyagonal kesmede regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (kancasız)152
Şekil 3.38.	Burulma deneyinde numune geometrisi ve yükleme durumu156

Şekil 3.39.	Burulma yüklemesinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (beton kiriş)	159
Şekil 3.40.	Burulma yüklemesinde regresyon grafikleri, lineer I analizi, MFSL analizi, karşılaştırma (betonarme kiriş)	162



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Lineer I regresyon doğrusunun eğimi(Bazant)
A'	Lineer II regresyon doğrusunun eğimi(Bazant)
A_C	Lineer regresyon doğrusunun eğimi(Carpinteri)
A_{lig}	Kırılmamış bölgenin kesit alanı
a_0	Çatlak uzunluğu
a	Uygulanan yükün moment kolu
a_s	Kesme kolunun uzunluğu
Δa	Çatlak gelişiminin uzunluğu
A_s	Donatı kesit alanı
B	Malzeme özelliğine bağlı sabit
b	Numune kalınlığı
C	Eğrinin y eksenini kestiği nokta (Lineer I,Bazant)
C'	Eğrinin y eksenini kestiği nokta (Lineer II,Bazant)
C_C	Eğrinin y eksenini kestiği nokta (MFSL,Carpinteri)
C^-	y ekseninde olan değerlerin ortalaması
c	Basınç bölgesi ile tarafsız eksen arasındaki mesafe
c_f	Plastik bölgenin uzunluğu
c_N	Uygunluk katsayısı
D	Numune yüksekliği
D_0	Yapı biçimine bağlı sabit
D_2,D_3	Donatının etkin alanı
d	Çekme donatısının merkezi ile giriş üst lifi arasındaki mesafe
d_a,d_{max}	Maksimum dane çapı
d_e	Etkin yükseklik

d_b	Donatının nominal çapı
E	Young modülü
E_C	Betonun young modülü
e	Dışmerkezlik
F	Kırılma bölgesi
f_t	Betonun çekme dayanımı
f_c	Betonun basınç dayanımı
$f(a_0/d)$	Çatlak uzunluğu ve numune boyutuna bağlı fonksiyon
G_f	Kırılma enerjisi
G_C	Malzeme tokluğu
g	Yer çekimi ivmesi
h_f	Çatlak bandının genişliği
I	Eylemsizlik momenti
K_I	Gerilme şiddet çarpanı
K_{IC}	Kırılma tokluğu
k_1, k_2	Sabit katsayı
$K(\alpha_0)$	Çatlak uzunluğuna bağlı fonksiyon
$K'(\alpha_0)$	$K(\alpha_0)$ 'ın çatlak uzunluğuna göre türevi
L	Numune uzunluğu
L_d	Donatının beton içinde gömülü mesafesi
ℓ_d	Donatının bindirme boyu
ℓ_0	Karakteristik uzunluk (Bazant)
ℓ_p	Karakteristik uzunluk (genel)
ℓ_{ch}	Karakteristik uzunluk (Carpinteri)
M	Gerilme şiddetine bağlı değişken
mg	Numune ağırlığı
N	Lineer olmayan bölgenin uzunluğu
N_P	Kesitte donatının gevreklik sayısı
n	Numune sayısı
P_0	Numuneye uygulanan yük
P_u	Göçmede maksimum yük

P	Yük
q	Burulma momenti
R	Kırılma direnci
r	Korelasyon katsayısı
S	İki mesnet arasında olan mesafe
s	Carpinteri'nin denklemine göre gevreklik sayısı
T	Çekme kuvveti
T_n	Göçmede çekme kuvveti
t	Minimum paspayı
W	Yapıda depolanan potansiyel enerji
X	Lineer I analizinde olan X değeri (Bazant)
X'	Lineer II analizinde olan X değeri (Bazant)
X*	Non-linear I analizinde olan X değeri (Bazant)
X_C	MFSL analizinde olan X değeri (Carpinteri)
X_K	MSEL analizinde olan X değeri (Kim)
Y	Lineer I analizinde olan Y değeri (Bazant)
Y'	Lineer II analizinde olan Y değeri (Bazant)
Y*	Non-linear I analizinde olan Y değeri (Bazant)
Y_C	MFSL analizi ve Karşılaştırma eğrilerinde olan Y değeri (Carpinteri)
Y_K	MSEL analizinde olan Y değeri (Kim)
Y_B	Karşılaştırma eğrilerinde olan Y değeri (Bazant)
y	Çatlak tepesi ile kesit merkezi arasındaki mesafe
ρ	Donatı oranı
Φ	Donatı çapı
β	Gevreklik sayısı
λ	Narinlik
λ₀	Yapı geometrisine bağlı sabit
α	Yapı geometrisine bağlı sabit
α₀	Çatlak uzunluğuna bağlı olan değişken
ε	Şekil değiştirme
π	Pi sayısı

σ_N	Göçme gerilmesi
$\sigma_{N,r}$	Göçme gerilmesinin referans değeri
σ_y	Donatının akma dayanımı
σ_0	Artık dayanımı (genel)
ω_A	Lineer I analizinde eğim değişimi (Bazant)
$\omega_{A'}$	Lineer II analizinde eğim değişimi (Bazant)
ω_{Ac}	MFSL analizinde eğim değişimi (Carpinteri)
ω_C	Lineer I analizinde kesişim noktasının değişimi (Bazant)
$\omega_{C'}$	Lineer II analizinde kesişim noktasının değişimi (Bazant)
ω_{Cc}	MFSL analizinde kesişim noktasının değişimi (Carpinteri)
$\omega_{C''}$	y ekseninde olan değerlerin ortalamasının değişimi (genel)
ω_{KIC}	Gerilme şiddet çarpanının değişimi
ω_{Gf}	Kırılma enerjisinin değişimi
ω_{cf}	Plastik bölge uzunluğunun değişimi

Kısaltmalar Açıklama

TS	Türk standartları
EKM	Elastik kırılma mekaniği
LEKM	Lineer elastik kırılma mekaniği
FPZ	Fracture Process Zone (kırılma işlem bölgesi)
SEL	Size Effect Law
MFSL	Multifractal Scaling Law
MSEL	Modified Size Effect Law
NPÇ	Normal portland çimentosu
C50	28 günlük basınç dayanımı 50 MPa olan beton sınıfı

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinde yapıların analiz yöntemlerinde iki önemli durumdan bahsedebilir. Bunlardan birincisi dayanım kriteri ve diğeri limit kriter olarak bilinir. Dayanım kriterinde yapı, dış ve iç etkiler göz önünde bulundurarak hesaplanır. Limit durumunda ise yapıya tesir eden yüklerden oluşan yerdeğiştirmeler, şekil değişimleri önemli olur ve iç gerilmelerden oluşan çatlaklar yapı için limit kriterleri oluşturur [1].

Beton, yarı gevrek bir malzeme olduğundan davranışının plastik ya da elastik teoriye göre açıklanması doğru olmaz, bu nedenle kırılma mekaniği kriterleri kullanılmalıdır. Beton yapılarında kullanılan TS500 [2] yönetmeliğinde analiz kriterleri sadece plastik limit analizine dayanmakta olup boyut etkisini içermemektedir. Malzeme davranışı, gerilme ve uzama cinsinden tam olarak tanımlanamaz. Malzemenin matematik modeli kırılma parametrelerini içermelidir. Kırılma enerjisi ve karakteristik çatlak uzunluğu en önemli olan parametrelerdir. Beton malzemeler üzerinde yapılan deneylerde, boyut etkisi logaritmik gerilme-boyut grafiğinde gösterilmelidir. Geometrik olarak benzer fakat boyut olarak farklı numuneler karşılaştırılırsa kırılma anındaki nominal gerilme σ_N ' in elemanın karakteristik boyutu D ile azaldığı gözlenmektedir.

Son yıllarda beton ya da betonarme malzemelerde yapılan deneysel araştırmalarda kırılma kriterleri ve elemanların boyut etkisi incelenmektedir. Beton basınç altında dayanıklı fakat çekme gerilmelerine karşı dayanıksız bir malzemedir. Çekme gerilmelerini (çekme, eğilme, kesme) ve aynı zamanda basınç gerilmeleri altında oluşan kırılmalarda, numune boyutu önem taşımakta ve boyut etkisinin uygulanması zorunlu hale gelmektedir. Öngerilmeli beton elemanlarda, numunenin boyutu gerilmenin değişimini ve kırılma kriterlerini önemli oranda etkiler. Son yıllarda yapılan araştırmalara göre, değişik eleman boyutları için, yük-yerdeğiştirme eğrisinde, en büyük yük sonrası farklı yumuşama davranışı (artan yerdeğiştirmelerle yüklerin azalması) gözlenir. Betonarme elemanların davranışının anlaşılması için

birçok çalışma yapılmıştır [3-6]. Beton yapı elemanların tasarımında çekme, kesme, eğilme, burulma etkileri göz önünde alınır, halbuki betonun en önemli özelliği olan basınç göçmesi üzerinde çalışma azdır. Yapı analizindeki boyut etkisinin, fizikte karşılığı olan ölçek yasasının anlaşılması ile birçok fiziki olayın doğru analiz edilmesi olasılığı artmıştır. Bu durum beton yapılar için de geçerlidir. Büyük ve küçük elemanlar arasındaki ölçek kanunun farklılığı görecelik ve kuantum mekaniği teorilerinin gelişmesinin sonucudur. Akışkanlar mekaniğindeki ölçek problemi sınır-tabaka ve türbülans kavramlarının daha gerçekçi bulunmasına yol açmıştır [7].

Yakın zamana kadar betonda boyut etkisine, olasılıksal davranışın bir sonucu olarak bakılırdı. Weibull tipi teorilerle, boyut etkisi açıklanır ve güvenlik katsayıları kullanılırdı. Gerçekte maksimum yüke ulaşılmadan önce büyük çatlak gelişimi olmaktadır. Beton dayanımı, boyut etkisini çok az değiştirmektedir [8-10]. Daha büyük yapı daha fazla şekil değiştirme enerjisi tutabilir ve gelişen bir çatlağın önünde daha fazla enerji açığa çıkar.

Numune üzerinde yapılan deneylerde elemanın boyutu göz önüne alınmadığında mukavemet kriteri geçerli olur, bu konuya örnek olarak, basınç altında olan elemanda göçme gerilmesi elastisite teorisine göre şu şekilde ifade edilebilir: $\sigma_N = P_u / (bD)$, geometrik olarak benzer numunelerde değişik D değerleri için σ_N değeri sabittir. P_u = maksimum yük, b ve D = kesitin kenar uzunluklarıdır. Boyut etkisinde ise gerilme denklemi sabit bir katsayı ile çarpılır. Bu katsayı c_N olarak tanımlanır ve elemanın geometrik özelliklerine bağlı olarak bulunur, $\sigma_N = c_N P_u / (bD)$ bu durumda değişik D değerleri için değişik gerilme değerleri elde edilir. Klasik teoride tasarım kriterlerinde boyut etkisi gözönüne alınmadığından aksaklıklar yaşanabilir. Bu nedenle klasik teorinin geçerli olmadığını kontrol etmenin en iyi yolu boyut etkisi deneylerinin yapılmasıdır.

Buradan yola çıkarak yapıların analizinde kırılma mekaniğinin büyük bir önem taşıdığı söylenebilir. Kırılma mekaniği uzun süredir kullanılmaktadır ve özellikle cam ve metal gibi homojen ve gevrek malzemelerde denenmiş ama beton için henüz yeni bir uygulamadır. Bu teorinin temeli 1900 yıllarında atılmış ve

zamanımıza kadar çeşitli bilim adamlarının çalışmaları ile geliştirilmiş. Bu çalışmalarda elde edilen önemli noktalardan biri, beton veya betonarme yapıların tasarımında yük öncesi çatlaklar ve sonradan gelişen çatlakların eleman üzerinde çok önemli etkisinin olması ve bunları göz önüne almadan sağlıklı bir tasarım yapılamayacağı sonucuna varılmasıdır.

Bu çalışmada, beton veya betonarme numuneler üzerinde yapılan değişik deneylerden elde edilen sonuçlarla, kırılma parametrelerin bulunması ve bu parametrelerin farklı boyut etkisi yöntemleriyle karşılaştırılması hedeflenmiştir. Deneyler direkt çekme, indirekt çekme, eksentrik basınç, kesme, üç nokta eğilme ve burulma olarak sıralanabilir. Farklı boyutlu numunelerde göçme yükleri deneysel olarak bulunmuştur. Kullanılan beton değişik agregaya boyutlarına, değişik su : çimento : agregaya oranlarına ve değişik 28 günlük basınç dayanımlarına sahiptir. Farklı boyut etkisi yöntemleri, Bazant'ın önerdiği SEL (Size Effect Law) [1], Carpinteri'nin önerdiği MFSL (Multifractal Scaling Law) [11] ve Kim'in önerdiği MSEL (Modified Size Effect Law) [12] olarak sıralanabilir. Bazant'ın boyut etkisinde üç değişik analiz , lineer I analizi, lineer II analizi (Planas) ve non-lineer analizi kullanılır. Carpinteri'nin boyut etkisinde deney dataları lineer olarak analiz edilir. Kim'in boyut etkisinde ise deney dataları Levenberg-Marquardt nonlineer algoritma [13-14] ile analiz edilir.

Betonun kırılma mekaniğinin önemli bir uygulaması olan boyut etkisi birçok araştırmacı tarafından deneysel ve analitik olarak sürekli geliştirilmektedir. Prof. Bazant, Prof. Barr, Prof. Carpinteri, Prof. Reinhard, Prof. Wittmann, Prof. Mihashi, Prof. Kim, Prof. Kazemi, Prof. Şener, Prof. Arslan ve birçok bilim adamı tarafından uluslararası çalışmalar yapılmıştır.

Tezde kullanılan çalışmalar, çekip çıkarma deneylerinde boyut etkisi [15], etriyesiz betonarme kirişlerin diyagonal kesme göçmesi [16], direkt çekme altında aderans ekinde boyut etkisinin araştırılması [17], betonarme kirişlerde aderans eki göçmesinde boyut etkisi [18], narin donatısız kolonların boyut etkisi [19], dışmerkez basınca maruz kalan numunelerde kırılma enerjisi ve boyut etkisinin belirlenmesi

[20], Boyut etkisi ve gevreklik sayısı kavramlarını kullanarak kırılma enerjisinin bulunması [21], boyuna donatılı ve donatısız kirişlerin deneysel olarak burulma göçmesi [22], yüksek mukavemetli betonda minimum donatının belirlenmesi [23], boyut etkisi üzerine yapılmış bazı analitik ve deneysel çalışmalardır.



2. NEDEN KIRILMA MEKANİĞİ

Kırılma mekaniği bir göçme teorisidir ve aşağıdaki kriterleri içermektedir:

- Malzemenin kırılması enerji kriteri ile açıklanır, aynı zamanda mukavemet kriteride kullanılır.
- Kırılma gelişimini yapının içinde düşünür ve kırılma için tüm yüzey ve göçme bölgeleri aynı anda düşünülemez.

Kırılma mekaniği metal yapılarda bir göçme teorisi olarak kabullenilmiş ve özellikle havacılık, denizcilik ve nükleer mühendislik dallarında çok yaygın kullanım alanı olduğu görülür. Ancak beton yapıların tasarımı için henüz yeni bir yöntem olduğu kabullenilir [1].

2.1. Tarihsel Gelişim

Beton yapılar doğal olarak çatlaklarla doludur ve büyük kırıklar oluşarak göçerler. Hasar kırılma bölgesinde kararlı olarak başlar ve daha sonra çatlaklar ilerleyerek mikroçatlaklarla birleşirler. Maksimum yük seviyesine erişmeden yapıda büyük çatlaklar ve en sonunda göçme olur. Bundan dolayı beton yapılarda kırılma mekaniğini kullanmak daha iyi bir dizayn kriteri oluşturur. Kırılma teorisinin temel prensipleri 1950 yıllarına dayanır ve burada şu soru sorulabilir, Bu zamana kadar inşaat mühendisi hatalı mıydı?

Lineer Kırılma mekaniğinin formları bu zamana kadar bilinmekteydi ancak sadece homojen ve gevrek malzemelerde, cam veya metal gibi, uygulanmaktaydı. Kırılma mekaniğinin uygulanabilmesi ilk defa Kaplan (1961) tarafından hayata geçmiştir ve ayrıca diğer şahıslarda bu çalışmayı denemişler, ama başarısız olmuşlardır (Kesler, Naus and Lott, [24]). Şimdi olumsuz yanıtın nedenini daha iyi anlaşılır. Betonda kırılma olayı diğer malzemelerden farklı oluşur ve kırılma oluşumunda yapının boyutları çok önem taşır. Yeni çalışmalar 1970 ve 1980 yılları arasında yapılmıştır.

Beton yapıların tasarımında şimdiye kadar iki önemli devrim yaşanmıştır. Birincisi 1900-1930 yılları arasında yapılmıştır. Bu, betonun elastik ve çekmeye yer vermeyen

(elastic-no tension) analizdir. İkinci devrim ise 1930 yıllarında plastisite teorisine dayanan plastik limit analizi olarak tanınmaktadır. Artık kırılma mekaniğini hayata geçirmek için çok iyi sebepler bulunmaktadır ve son olarak yakın gelecekte üçüncü devrim gerçekleşmesi beklenmektedir [1].

2.2. Klasik Lineer Teori

Kırılma mekaniği 1913 yılında Inglis tarafından hayata geçirilmiştir. Inglis sonlu katı bir malzeme üzerinde olan elips boşluk tepesinde gerilmelerin elastik çözümünü elde etmiş ve eğer elips boşluk daralırsa ve bir yarık şeklinde olursa tepedeki gerilmeler sonsuz değerine ulaşmaktadır (Şekil 2.1.a). Bundan yararlanarak Griffith 1921-1924 yıllar arası yarık şeklindeki çatlaklar için incelemelerde bulunmuştur. Gerilmelerin çatlak tepesindeki değerlerinin sonsuza varması, yapıların göçmesi için önemli olduğu ve elastik malzeme için göçmenin, yükten ve geometriden bağımsız olması sonucuna varmıştır (Şekil 2.1.b).

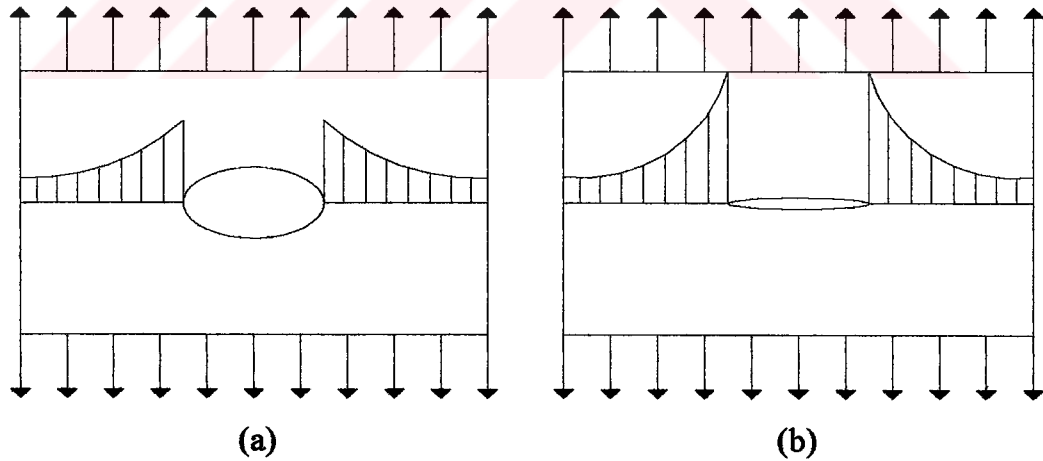
Bu sonuç yardımıyla göçme için enerji kriterinin öne çıkması ve klasik lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) veya genel bir tanım ile elastik kırılma mekaniği'nin (EKM) temelleri atılmıştır. Bu kritere dayanarak çatlağın gelişmesi için birim yüzeydeki enerji (kırılma enerjisine erişilir) ve enerji denge prensipleri geçerli olmaktadır. Griffith bu enerji miktarını 2γ değerine eşitlemiştir (γ , elastik malzemede birim yüzey enerji yoğunluğudur). Bu enerji malzeme içindeki bağları çözmeye ve yeni yüzey birim alanı oluşturmaya yardımcı olmaktadır.

Deneyler sonucunda çatlağın gelişmesi için gerekli enerji miktarının bu değerden fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni çoğu malzemelerde çatlak şekillerinin düzgün olmaması, genellikle tırtıklı ve eğri olmaları, mikro çatlaklarda ve yüzey sürtünmeleri ve kırılma işlem bölgelerinin (FPZ) görünmesidir. Bundan dolayı birim yüzeyinde enerji yoğunluğu (2γ) yerine kırılma direnci (R) sabitini kullanmak gerekmektedir. R direnç değerinin bulunması kırılma mekaniğinde henüz tam manasıyla çözülememiş bir problemdir ve deneysel olarak bir sonuç elde edilememiştir. Diğer bir önemli problem verilen yapı için çatlağın gelişimi için

gereken enerji miktarının hesabıdır. Bugün kırılma mekaniğinde enerji sözcüğü birim yüzeyde açığa çıkan enerji olarak kullanılmaktadır. Bu değer çatlakın uzunluğu ile bağlantılıdır ve zamana bağlı değildir (G).

Griffith'in çalışmaları incelendiği zaman bu çalışmaların akademik bir amacı olup, sadece cam gibi gevrek malzemelerin göçmesini içermektedir. Kırılma mekaniğinin gelişimi etkin olarak 1940 ve 1970 yılları arasında metal yapıların tasarımı sırasında gerçekleşmiştir.

Griffith'in çalışmalarından yola çıkarak enerji açığa çıkma hızı ' G ' ve gerilme – deformasyon ilişkileri arasında, her hangi bir geometri ve yükleme durumu için bir bağ kurulmuştur. Teorik olarak kırılma esnasında açığa çıkan enerji miktarı Rice tarafından 1968 yılında 'J- İntegrali' olarak bulunmuştur. Kırılma mekaniğinde herhangi bir çatlak durumu, elastik malzeme, yükleme durumu, gerilme – yerdeğiştirme ilişkileri, lineer veya non-lineer davranışları kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. (a) Sonlu elastik plakada elips boşluk tepesinde gerilme dağılımı
(b) Gerilme yığılması yarık şeklindeki boşluk tepesinde sonsuza gider

Kırılma mekaniğinin temelini oluşturan ikinci önemli teorik gelişme 1957 yılında Irwin tarafından yapıldı. Irwin çatlak tepesinde gerilme şiddeti ve açığa çıkan enerji miktarı ile bağlantılı parametreye gerilme şiddet çarpanı (K) adını verdi. 'K' değeri 'G' değerine göre daha sade bir denklemdir ancak sadece lineer elastik malzeme için geçerlidir [1].

2.3. Niçin Boyut Etkisi

Kırılma mekaniğinin betona uygulanmasında en önemli gerçeklerinden biri de geometrik olarak benzer, fakat farklı boyutlu elemanlarda göçmedeki gerilmenin boyut arttıkça azalmasıdır. Boyut etkisi üzerindeki çalışmaların yoğunluğu, günümüzde artıp, yayılmaktadır. Araştırma sonuçlarındaki değişimden ötürü bir kaç yıl önceki sonuçlar dahi kullanılamaz olmaktadır. Boyut etkisi kullanımı için birçok neden vardır. Bu nedenler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

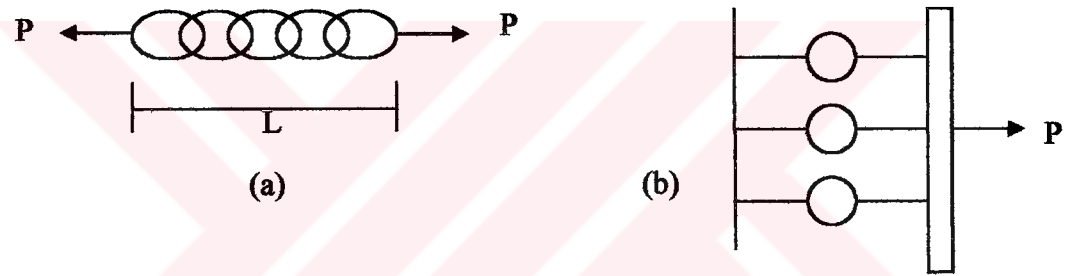
- a) Diğer mukavemete dayanan göçme teorileri (elastisite-plastisite) göçmede enerji kullanmazken, boyut etkisi enerji kullanır ve çatlak gelişmesi, yayılması içinde enerji gereklidir.
- b) Farklı boyutlu yapıların en büyük yük sonrası davranışlarını (süneklik) mukavemet kriteri göz önüne almaz iken, boyut etkisi bu farklılığı göz önüne alır.
- c) Farklı boyutlu geometrik olarak benzer elemanlarda göçme yüklerine karşı gelen nominal gerilme, mukavemet kriterine göre değişmez, sabit kalırken, gerçek davranış boyut etkisi içeren lineer olmayan kırılma mekaniği ile uyumlu artan boyutla gerilmelerin azaldığı görülür.
- d) Üç boyutlu elemanlarda farklı kalınlıklardan (boyut etkisi) ötürü sonuçlar da farklı olabilir, ancak iki boyutlu elemanlar (kalınlık sabit) test edilirse sonuçlar etkilenmez.
- e) Çeper etkisi ile iri malzeme, çeperlerden uzağa kaçar ve ince taneli malzemeler yüzeye (çepere) toplanır. İri malzemelerin elemanda uniform dağılması sonuçları etkileyen bir başka boyut etkisidir.

2.3.1. Boyut etkisi

Boyut etkisi uygulamada bir çok şekilde görülür

1- Geometrik olarak benzer farklı boyutlu elemanların maksimum yüklerinde boyut etkisi görülür.

2- Olasılıksal Boyut Etkisi: Weibull'un 1938'de önerdiği teoridir. Bu teoriye göre zincirin boyu arttıkça zincirde zayıf halka olma olasılığı ile zincirin kopma mukavemeti azalacaktır (Şekil 2.2.a). Bu teoride yapı birbirine bağlı halkalar dolayısı ile seri bağlı düşünülmemektedir. Bir başka teoriye göre ise (Donell Modeli 1950) yapı paralel bağlı düşünülmemektedir (Şekil 2.2.b).



Şekil 2.2. a) Weibull zincir teorisi, b) Donell paralel bağ teorisi

Ancak gerçek yapı davranışı karmaşık (paralel + seri) bağlı bir davranış sergilemektedir. Weibull teorisinin (seri bağlı) beton yapılara uygulanması kabul edilemez.

3- En büyük yük sonrası yerdeğiştirmelerde boyut etkisi görülür.

Tasarımcı mühendisler için boyut etkisi, kırılma mekaniğinin kullanımı için en iyi nedendir. Genel anlamda yük kapasitesinin tahmini, plastik limit analizi ve her hangi bir teori kullanımında malzemelerin göçme kriteri, gerilme ve şekil değiştirme (veya her ikisi) durumları için boyut etkisine önemli yer vermek gerekmektedir. Ama yapıların boyutları farklı oldukları zaman farklı sonuçlar elde edilir ve aynı zamanda yükün miktarı değişik sapmalar gösterir.

Boyut etkisi geometrik olarak benzer farklı boyutlu yapıların karşılaştırılması sonucu ortaya çıkar. Genellikle nominal dayanım, σ_N ile ifade edilir. σ_N maksimum (pik, tepe) yükte, P_u , gerilmenin nominal değeridir. Nominal gerilme yapının yük ve kesit alanı parametrelerine bağlıdır. Bu ifade $\sigma_N = P/(bD)$ (iki boyutlu) ya da $\sigma_N = P/D^2$ (3 boyutlu) denklemleri ile gösterilir. b = iki boyutlu yapının kalınlığı, D = yapının karakteristik boyutudur. 'D' değeri yapının her hangi bir boyutu seçilebilir. Örneğin kirişin derinliği, uzunluğu veya yarı uzunluk seçilebilir.

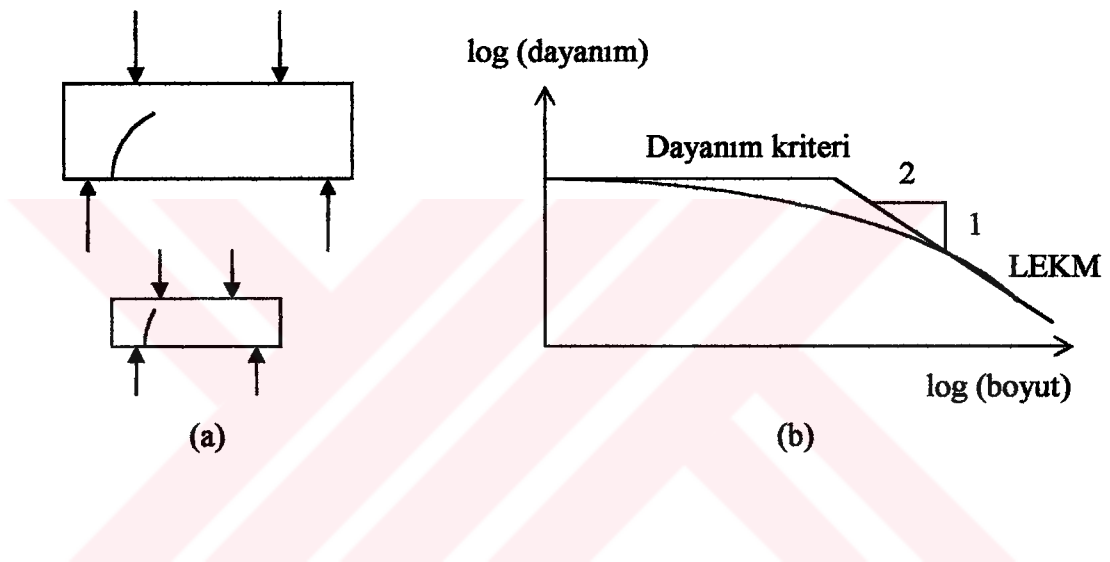
Klasik göçme teorileri, emniyet gerilmelerinde elastik analiz, plastik analiz veya dayanım limiti kullanan taşıma gücü teorilerinde σ_N gerilme değeri sabittir. Yani yapının geometrisine ve boyutuna bağlı değildir. Nominal gerilme kirişin eğilme, kesme ve burulma dayanımları, elastik ve plastik denklemleri şeklinde ifade edilebilir. $\log \sigma_N - \log D$ eğrisi çizildiğinde göçme durumları dayanım veya akma kriterlerine göre elde edilir (Şekil 2.3). Buna göre dayanım ve akma kriterlerinde göçme, boyut etkisi ile ifade edilmez. Diğer yandan lineer elastik kırılma mekaniğinde (LEKM) göçme durumları boyut etkisine bağlı olup, yapıların boyutları gerilme değerlerini önemli oranda etkiler.

Şekil 2.3.b' de gösterilen eğik çizginin eğimi $(-1/2)$ dir, ve lineer elastik kırılma mekaniğini (LEKM) ifade etmektedir. Beton yapılar için sürekli olan çizgi ile verilmektedir. Küçük yapılar için yatay çizgi mukavemet kriterini ve eğimli çizgi $-1/2$ eğimi ile çok büyük yapıları ifade etmektedir.

Boyut etkisi ve kırılma mekaniği ile ilgili çalışmalar ilk defa Griffith tarafından 1920 yılında yapılmıştır. Griffith gevrek malzemelerin teorik ve gerçek dayanımlarının (çekme gerilmeleri) farklı olduklarını gözlemiş ve gerçek dayanımın teorik dayanımdan daha düşük olduğunu ispat etmiştir. Bu durum çatlakların varolmasından dolayı meydana gelir. Elastik gevrek malzemelerde çatlak tepesinin yakınında büyük gerilme yığılması oluşur ve bu olay cam üzerinde denenmiştir. Cam levha çekme gerilmesine maruz kaldığı zaman gerilme akımı yüke paralel olarak düzgün yayılır ama merkezi çatlak etrafında bu çizgiler eğilirler, paralel olmaktan çıkarlar ve çok büyük gerilme yığılmaları oluşur.

Diğer bir çalışma 1958 yılında Irwin ile hayata geçti. Kırılma esnasında olay tek bir noktada oluşmayıp küçük ve sonlu bir bölgede meydana gelir ve bu bölgeye kırılma işlem bölgesi (Fracture Process Zone) adı verilmiştir. Bunun uzunluğu ' r_p ' olarak bilinir ve gevrek malzemenin parametreleri ile şöyle bir bağlantısı vardır:

$$r_p = K_{IC}^2 / (\pi f_t^2) = E' G_C / (\pi f_t^2) \quad (2.1)$$



Şekil 2.3. a) Boyut etkisi, b) logaritmik eksenlerde mukavemet (ACI komitesi 446, 1992), c) nominal gerilme vs. göreceli yerdeğiştirme eğrisi

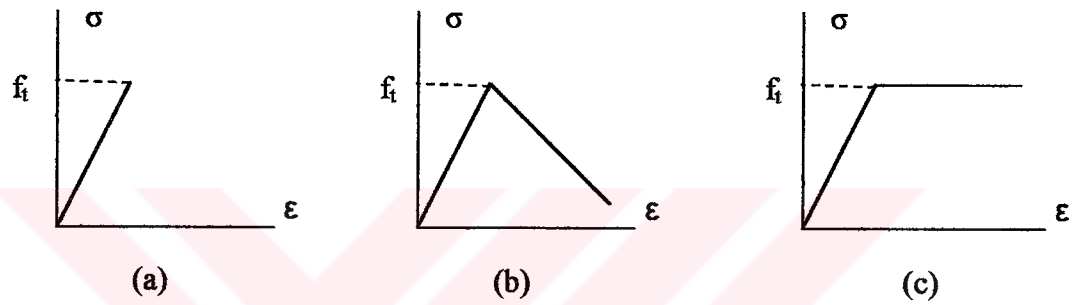
r_p değeri nonlinear kırılma mekaniğinde kullanılır ve bu değer çok küçük olduğu zaman lineer kırılma mekaniği kullanılabilir. Örnek olarak yüksek dayanımlı metallerde ($f_t > 500$ MPa) ve az donatılı beton ağırlık barajı gibi yapılar için lineer elastik kırılma mekaniği uygulanır.

Büyük yapılar için davranış kesit üzerinde çok farklıdır ve gerilme durumları çok daha karmaşık hale dönüşür. Bunun nedenlerinden biri, yapıda donatı bulunması ve diğer nedeni de değişik yükleme durumlarıdır (mekaniksel ve fiziksel yükler). Ayrıca lifli betonlarda kırılma mekanizmasının oluşumu esnasında çatlak şekillerinin kesme çatlaklarına yakın olması söz konusudur. Bu gözlemler Arslan ve arkadaşları [25] ve Van Mier and Timmers [26] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiştir. Lifli betonların davranışları ve özellikleri normal betondan iyi olup, çekme dayanımı, burulma, basınç, kesme, yorulma, kırılma dayanımları, kırılma tokluğu ve sünekliği daha iyidir.

Diğer bir önemli gelişme boyutun değişimi ile ilgilidir, Bazant modeli (SEL) küçük boyutlar için lineerdir, ancak numunenin boyutları büyüdüğü zaman gerilme değişimi nonlinear olarak değişir ve dayanımın sıfıra yaklaşması yanlış bir teori olur. (MFSL) modeli daha mantıklı sonuçlar verir, bununla ilgili Weibull-Carpinteri çalışmaları, Arslan ile İnce network modelleri boyut etkisinde atılımlara sebep olmuştur. Boyutun büyümesi ile yapının dayanımı tamamen azalmaz.

Kırılma mekaniğinin kullanımında bir başka boyut etkisi yapıların sünekliği ile ilgilidir, yapıya etki eden yükler ve gerilme – deformasyon ilişkisini inceler. Verilen yükleme durumu için iki tip kontrol mekanizması geçerlidir. Birincisi yük kontrolü ve ikincisi deplasman kontrolüdür. Yük kontrollüde yükü sabit tutarak yapının göçme durumları incelenir (yapı kararsız). Deplasman kontrolünde ise deplasman sabittir. Şekil 2.3.c’ de σ_N - göreceli yerdeğiştirme grafiği geometrik olarak benzer, boyut olarak farklı yapılar için geçerlidir. Boyut büyüdüğü zaman göçme tepeye daha fazla yaklaşır. Kırılma mekaniğinden yola çıkıldığında görülmektedir ki büyük yapılar daha çok enerji yutarlar.

Beton yapıların göçmesi, en büyük yüke ulaşmadan önce büyük çatlakların ve çatlama bölgesinin gelişmesi ile olur. Temel kırılma mekaniği teorileri bu yüzyılın ortasında elde edildiği halde henüz tasarım, kırılma mekaniğine dayanmamaktadır. Bunun nedeni kırılma mekaniği bağıntılarının son zamanlarda elde edilmiş olması ve sadece cam gibi homojen gevrek (Şekil 2.4) malzemeye uygulanmasıdır. Beton yapılarda, kırılma sırasında çatlak önündeki agreganın sağladığı gerilme köprüsü ile çatlakların dağılımı sonucu oluşan yumuşama gözönüne alınmalıdır.



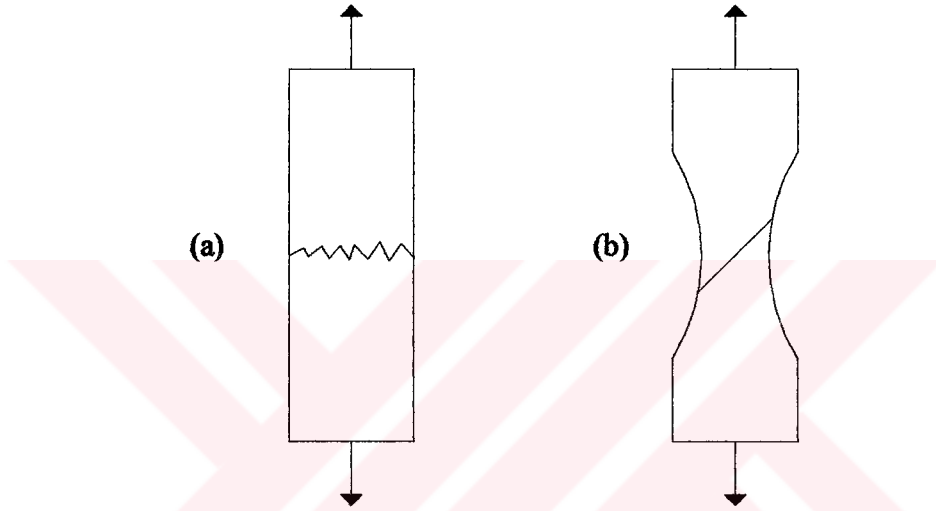
Şekil 2.4. a) Gevrek, b) Yarı gevrek c) Sünek malzemeler

Kırılma mekaniğinin betonarme elemanların tasarımında kullanılması önemli yararlar sağlayacaktır. Böylece, farklı boyutlu yapılar için aynı güvenliğe ulaşmak olası olacak, yapısal güvenlik artar ve ekonomik tasarım sağlanır. Ayrıca beton, benzeri malzemelerin ve yeni tasarımlarının olasılığı artar. Özellikle yüksek dayanımlı betonlar, çok büyük boyutlu beton yapılar, öngerilmeli yapılar, beton barajlar, nükleer reaktör hücreleri gibi güvenliğin çok yüksek olduğu ve hasarları büyük felaketlere neden olabilecek yapılar için kırılma mekaniğine göre tasarım, çok önemlidir.

Boyut etkisinin dayandığı kırılma mekaniği, yapıda göçmenin yayılmasını göz önüne alan, mukavemete dayanan, enerji kriteri kullanan, göçme teorisi olarak tanımlanabilir.

2.4. Gevrek ve Sünek Kırılma Tanımları

Çatlak tepesinde gerilmenin yığılması sonucu gerilme, kritik değere ulaştınca (malzeme çekme dayanımına erişince) çatlak ilerlemeye başlar. Kırılma, gerekli enerji miktarına göre sınıflandırılabilir. Gevrek kırılmaya az enerji gerekirken, sünek kırılmada fazla enerji gerekir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. a) Normal gerilmede gevrek b) Kesme gerilmesinde sünek kırılma

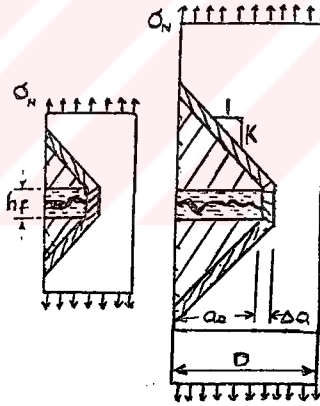
Gevrek kırılmada kırılan parçalar genelde orijinal boyutlarındadır. Kalıcı deformasyon yoktur ve davranış elastiktir. Kırılan parçalar tekrar birleştirilirse hiç kırılmamış gibi parçalar birleşebilir. Sünek kırılmada ise, kırılmadan önce geriye dönmeyen büyük plastik deformasyonlar (akma platosu) oluşur ve parçaların tekrar uyumu imkansızdır.

Yüksek sıcaklık ve düşük uzama hızlarında metallerde sünek davranış hakim iken, yüksek uzama hızlarında ve düşük sıcaklıklarda aynı malzemede gevreklik hakim olur. Gevrek malzeme göçmesi ani, habersiz, sesli, az enerji yutulması ile mikroskopik ölçekte göçmede aderans kopması gözlenir. Sünek kırılmada aksine kırılma yavaş, büyük enerji yutulması ile, mikroskopik ölçekte düzlemler üzerinde kayarak sıcaklığının artması ve büyük deformasyonlar gözlenir.

2.5. Boyut Etkisinin Enerji İle Açıklanması

Kırılma mekaniğinin enerji açığa çıkması açısından, boyut etkisiyle olan ilişkisi Şekil 2.6'da gösterilen üniform gerilmeli panel ele alınarak açıklanabilir. Şekil 2.6'da sol kenardaki küçük bölgenin dayanımının levhanın diğer kısmından daha zayıf 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, maksimum 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 yük a_0 çatlak uzunluğu, yapı boyutu D ile orantılıdır (a_0 / D).



Şekil 2.6. Boyut etkisinin enerji ile açıklanması

h_f genişliği, a_0 uzunluğundaki çatlak bandı ile kırılmanın oluşumu, şekil 2.6'daki taralı alandan $\sigma_N^2 / (2E)$ uzama enerjisinin açığa çıkması ile düşünülebilir (E =betonun Young modülü). a_0 uzunluklu çatlak Δa kadar uzarsa, ek uzama enerjisi Δa yatay genişlikli sık taralı şeritten çatlak önünde açığa çıkar. Büyük yapılarda bu taralı alan şeridi daha büyüktür. $\Delta A = h_f \Delta a + 2ka_0 \Delta a$, k = Şekil 2.6'da eğim olup yapı biçimine

bağlı amprik sabittir (boyut etkisinde önemli olmayan k değeri, deney sonuçlarından ve sonlu eleman analizleri ile $\pi/2$ olarak bulunmuştur).

W , yapıda depolanan potansiyel enerji; b , kalınlık; G_f , kırılma enerjisidir (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 daha büyük enerji için gerektiğinden σ_N küçülecektir. Dolayısıyla σ_N yapı boyutundan etkilendiğinden boyut etkisinin varlığı görülmektedir.

Dış yüklemeler sonucunda levhadaki taralı şeritten açığa çıkan enerji (Şekil 2.6);

$$\Delta W = b(h_f \Delta a + 2ka_0 \Delta a) \sigma_N^2 / (2E) \quad (2.2)$$

Levhada yutulan enerji,

$$\Delta W = G_f b \Delta a \quad (2.3)$$

Dış etkiler (2.2) ile levhanın yuttuğu enerji (2.3) eşitliğinde,

$$\sigma_N^2 [h_f + 2k(a_0/D)D] = 2EG_f \quad (2.4)$$

$$\sigma_N = [2EG_f / (h_f + 2k(a_0/D)D)]^{1/2} \quad (2.5)$$

$$D_0 = h_f D / (2ka_0) \text{ ile gösterirsek} \quad (2.6)$$

pay ve payda f_t ile çarpıldığında,

$$\sigma_N = [2EG_f / (h_f(1+D/D_0))]^{1/2} (f_t / f_i) \quad (2.7)$$

elde edilir. Sonuçta ;

$$\sigma_N = [2EG_f f_t^2 / (h_f f_t^2 (1+D/D_0))]^{1/2} \quad (2.8)$$

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi yasası [8] elde edilir.

$$\sigma_N = B f_t (1+\beta)^{-1/2}, \quad B = (2EG_f / (h_f f_t^2))^{1/2}, \quad \beta = D/D_0 \quad (2.9)$$

B, malzeme dayanımına; D_0 yapı biçimine bağlı boyutsuz sabitlerdir, f_t betonun çekme dayanımı; B'yi boyutsuz yapabilmek için kullanılmıştır. Daha genel boyut etkisi yasası $\sigma_N = B f_t (1+\beta^r)^{-1/2r}$, r geometriye bağlıdır. Bütün geometri ve malzemeler için $r \approx 1$ bulunduğundan 2.9 denklemi kullanılır. Denklem 2.9 yaklaşık bir ifadedir, fakat boyut değişiminin 1:20'ye kadar aralığı için yeterlidir. Daha büyük boyut değişimi için karmaşık formüller gereklidir. 2.9 denkleminin elde edilmesinde aşağıdaki varsayımlardan yararlanılmıştır.

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

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi ifadesinde (Denk. 2.9) yapı çok küçük ise ($D \ll D_0$) $\beta = d/D_0$ değeri birin yanında küçük olduğundan ihmal edilebilir. $\sigma_N = B f_t$ olur ki göçme gerilmesi plastik limit analizi ya da emniyet gerilmeleri yöntemi ile temsil edilmektedir. Eğer yapı çok büyük ise ($D \gg D_0$) bir değeri β değeri yanında çok

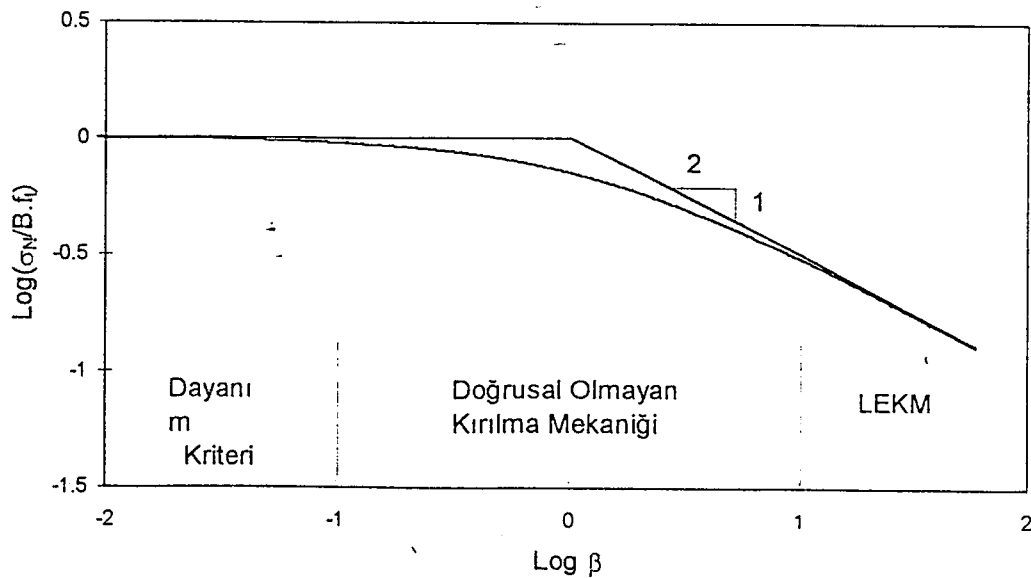
küçüktür, $\sigma_N = Bf_i \beta^{-1/2}$ olur. Yani göçme gerilmesi doğrusal elastik kırılma mekaniği ile temsil edilmektedir ya da her iki tarafın logaritması alındığında $\log \sigma_N = -1/2 \log \beta + \text{sabit}$, Şekil 2.3.b’de logaritmik eksen takımında, eğim $-1/2$ olan doğru ile gösterilmektedir (Şekil 2.7).

Asimtototun kesim noktası, plastik analizi ve LEKM teorileri eşitlenerek,

$$Bf_i = Bf_i \beta^{-1/2} \quad (2.10)$$

$\beta^{-1/2} = 1$, buradan $\beta = 1$, $D = D_0$ bulunur.

β gevreklik sayısıdır [27]. Buradaki gevreklik Gustafsson ve Hillerborg [28] ile Carpinteri [29] gevreklik sayısı (yapı boyutunun çatlak tepesinde oluşan plastik bölge çapına oranı) tanımlarından farklıdır. 2.9 denklemi 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 2.9 denkleminde düzeltme terimleri kullanılmalıdır.



Şekil 2.7. Boyut etkisi ifadesinin grafik gösterimi

$\text{Log } \beta \gg 1$ ise lineer kırılma mekaniği uygulanır.

$\text{Log } \beta \ll 1$ ise plastik limit analizi uygulanır.

Uygulamada ; (Şekil 2.7)

$\beta < 0,1$ ise plastik limit analiz

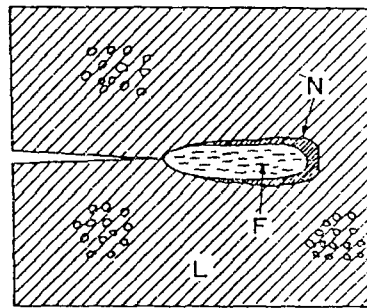
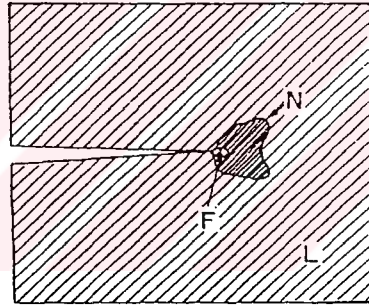
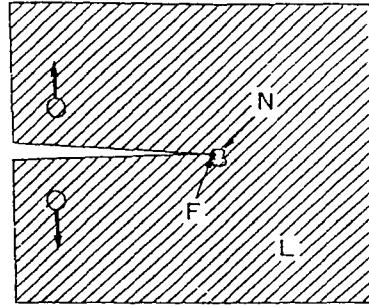
$0,1 < \beta < 10$ ise lineer olmayan kırılma mekaniği

$\beta > 10$ ise lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) geçerlidir.

$\beta < 0,1$ için şekil 2.7'deki yatay asimtot lineer olmayan eğriden %4,7 oranında sapar. $\beta > 10$ için eğimli asimtot (LEKM) lineer olmayan eğriden %4,7 oranla sapar. Eğer sapmaların %2'den az olması istenirse lineer olmayan bölge için β 'nın değişim aralığı $1/25 \leq \beta < 25$ arasında olmalıdır. $\beta \ll 1$ ya da $\beta \gg 1$ lineer olmayan kırılma mekaniği gereksizdir.

2.6. Kırılma Bölgesi

Farklı malzemelerde çatlak tepesinde de farklı bölgeler oluşmaktadır. Betonda boyut etkisinin en büyük gerekçelerinden biri kırılma bölgesinin (F) büyüklüğüdür. Genelde iki tip lineer olmayan kırılma mekaniği vardır; 1) Sünek (metaller) , 2) Sünek olmayan (beton, seramik). Şekil 2.8 lineer elastik kırılma mekaniğinde (cam) Şekil 2.8.a'da görüldüğü gibi lineer olmayan bölge çok küçük olup, tüm yapı hemen hemen elastiktir. Sünek kırılmada (Şekil 2.8. b,c), lineer olmayan bölgenin çoğu plastiktir, kırılma bölgesi (F), lineer olmayan kısmın (N), küçük bir kısmıdır. Sünek olmayan betonun kırılmasının (Şekil 2.8.c) aksine, kırılma bölgesi (F), büyük olup lineer olmayan bölgenin (N), hemen hemen tamamını kapsar [30].



Şekil 2.8. Farklı malzemelerin kırılma bölgeleri
a) Cam b) Metal c) Beton

2.7. Boyut Etkisi ve Yapıların Gevrekliği

Boyut etkisi kırılma mekaniği teorisinin çok önemli bir sonucudur. Bu yüzden kırılma özelliklerini buradan bulmak uygundur. Yapı tasarımı için boyut etkisi laboratuvar boyutundan gerçek boyuta geçmek için gereklidir. Maksimum nominal gerilmede boyut etkisi bölüm 2.5’de açıklanmıştır.

2.7.1. Gevreklik sayısı

Denklem 2.9 boyut etkisi yasasını malzeme kırılma parametreleri G_f ve f_t cinsinden verir. Bu gerçek Bazant tarafından belirtilmiş ve β gevreklik sayısı olarak isimlendirilmiş olup yapının biçiminden bağımsızdır. 2.9 denklemine göre gevreklik sayısı, $\beta = D / D_0$ dır.

Yapı gevrekliğinin diğer tanımları daha önce verilmiştir. Irwin’le (1958) başlayarak, araştırmacılar metallerde yapısal gevrekliği yapı boyutunun, Irwin’in lineer olmayan bölge boyutuna oranı olarak biliyorlardı. Bu tanım beton yapılar için Hillerborg ile D/ℓ_0 oranı ile tanımlanan yapısal geveklilik önerilmiştir. $\ell_0 = EG_f / f_t^2$ (ℓ_0 = karakteristik uzunluk). Bu yüzden ℓ_0 karakteristik kırılma bölgesi olarak isimlendirilir. Carpinteri gevreklik sayısını $s = G_f / (f_t D)$ olarak göstermiştir. Benzer tanımlar seramikler için önceden önerilmiştir. Hillerborg, Carpinteri’nin [28, 29], gevreklik sayısı, yapı geometrisinden bağımsız değildir ve genelleştirilemez, mutlak karakteristiktir ($\beta = 3$ bir yapı geometrisi için çok gevrek davranış ve başka geometri için çok sünek davranış verir).

Gevrekliğin genelleştirilmesi Bazant tarafından önerilmiştir, geçerli standart formüle göre limit analizin düzenlenmesinde, lineer olmayan kırılma mekaniği gözönüne alınarak taşıma yükünde nominal gerilme v_u (boyut etkisiz) şu biçimde verilmiştir.

$$\sigma_N = v_u / \sqrt{1 + \beta} \quad (> v_u^{\min}) \quad (2.11)$$

β 'nın bağılı olduğu D_0 'ı hesaplama yöntemi araştırılmalıdır. 2.11 denklemi nominal gerilmede $v_u^{\min}$ düşük limiti gevrek olmayan sürtünmeli göçme mekanizması yüzünden vardır. Böyle bir limite örnek Brazilian silindir deneyleridir.

2.7.2. Bazant'ın önerdiği boyut etkisi

Boyut etkisinde geometrik olarak benzer, farklı boyutlu ve çentikli numunelerde pik yük altında deneyler yapılmaktadır. Nominal dayanım hesaplanır, boyutlara göre grafiği çizilir, sonra denklem 2.10'a göre $B f_t$ ve D_0 parametreleri optimum en küçük kareler yoluyla eğri uydurma (optimal least-square curve fitting) yöntemi ile hesaplanacak. K_{IC} (kırılma tokluğu) , G_f (kırılma enerjisi) ve c_f (plastik bölgenin uzunluğu) aşağıdaki denklemlerden hesaplanır;

$$K_{IC} = B f_t \sqrt{D_0 K(\alpha_0)} \quad (2.12)$$

$$G_f = K_{IC}^2 / E \quad (2.13)$$

$$c_f = K(\alpha_0) / (2 K'(\alpha_0) D_0) \quad (2.14)$$

Burada unutulmamalıdır ki boyut etkisi sadece $K'(\alpha_0)$ değerleri pozitif ve çok küçük olmayan numuneler için geçerlidir.

$K'(\alpha_0)$ değeri yaklaşık sıfır veya negatif olduğu zaman bu yöntem uygulanamaz. Buna örnek verilecek olursa, merkezi çatlaklı (çentik) olan bir numunede çatlakın ilk gelişim zamanındaki $K'(\alpha_0)$ değeridir. Bir diğer sebep bu tür numunelerde göçme oluşturan pik yükte çatlak uzunluğunun çatlak ağzının genişliğinden çok daha uzun olması (kararlı çatlak gelişimi) ve çatlak uzunluklarının farklı numunelerde farklı olmasıdır.

2.12, 2.13 ve 2.14 denklemleri boyut etkisinde regresyon ilişkileri için kullanılırlar, veya aşağıdaki denklemden de bu işlem yapılabilir.

$$\sigma_N = B f_t / (1 + D / D_0)^{1/2} \quad (2.15)$$

$$B f_t = K_{IC} / c_f^{1/2} \quad (2.16)$$

$$D_0 = c_f \quad (2.17)$$

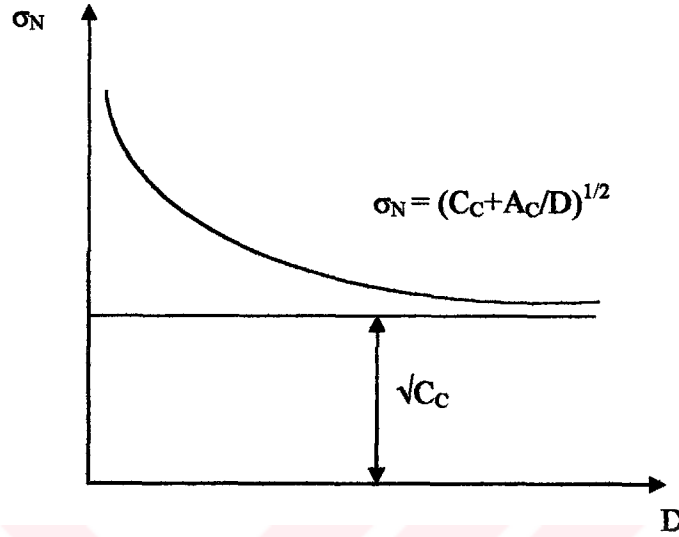
Bu denklemlerden c_f ve G_f değerleri doğrudan elde edilir. Burada özellikle numunelerin geometrik olarak benzerlik zorunlulukları yoktur. Numuneler farklı şekillerde ve geometrilerde düzenlenerek deneyler yapılır. Ancak numune şekillerinin parametresi, $K'(\alpha_0)/K(\alpha_0)$ oranı, yaklaşık olarak elde edildiğinden hata yapılması kaçınılmazdır. Hatayı önlemek için benzer geometrilere sahip numunelerle deney yapmak daha uygun olur.

Ayrıca eğri uydurma işlemi non-lineer olarak bazı non-lineer standart optimizasyon yöntemleriyle (Levenberg-Marquardt algoritması gibi) yapılabilir, bu yöntem yardımı ile c_f ve G_f değerleri doğrudan bulunur. Bununla beraber, lineer olan yöntemler daha kolay olduğundan tercih edilebilir [1].

2.7.3. Carpinteri'nin önerdiği boyut etkisi

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi metodunda lineer elastik kırılma mekaniğinde eğimin $-1/2$ olduğunu görülür (Şekil 2.7), fakat bu eğim çentiksiz yapılarda tüm boyutları gözönüne alınarak malzemenin genel davranışını yansıtmamaktadır. Diğer taraftan Bazant'ın önerdiği boyut etkisi sadece çentikli numuneler için elde edilmiş ve çentik boyu numune boyutlarına orantılıdır. Bazı deney geometrilerinde, örneğin Brezilya silindir yarma deneyinde, Bazant'ın önerdiği boyut etkisi iyi sonuçlar vermemektedir. Hasarlı mikro yapıdaki malzemeler için Carpinteri'nin önerdiği boyut etkisi metodu (Multifractal Scaling Law) [11] esas altyapıyı oluşturmaktadır. MFSL'e göre boyut sıfıra yaklaştıkça nominal gerilme sonsuza gider, aynı zamanda boyut sonsuza giderken nominal gerilme de küçük bir sabit değere yaklaşır.

Carpinteri'nin önerdiği boyut etkisinin analitik açıklaması Şekil 2.9 da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Carpinteri'nin önerdiği MFSL grafik gösterimi

Burada:

σ_N = nominal çekme gerilmesi ;

D = yapının karakteristik boyutu ;

C_C = gerilme değerinin karesi ile aynı boyutunda olan sabit ;

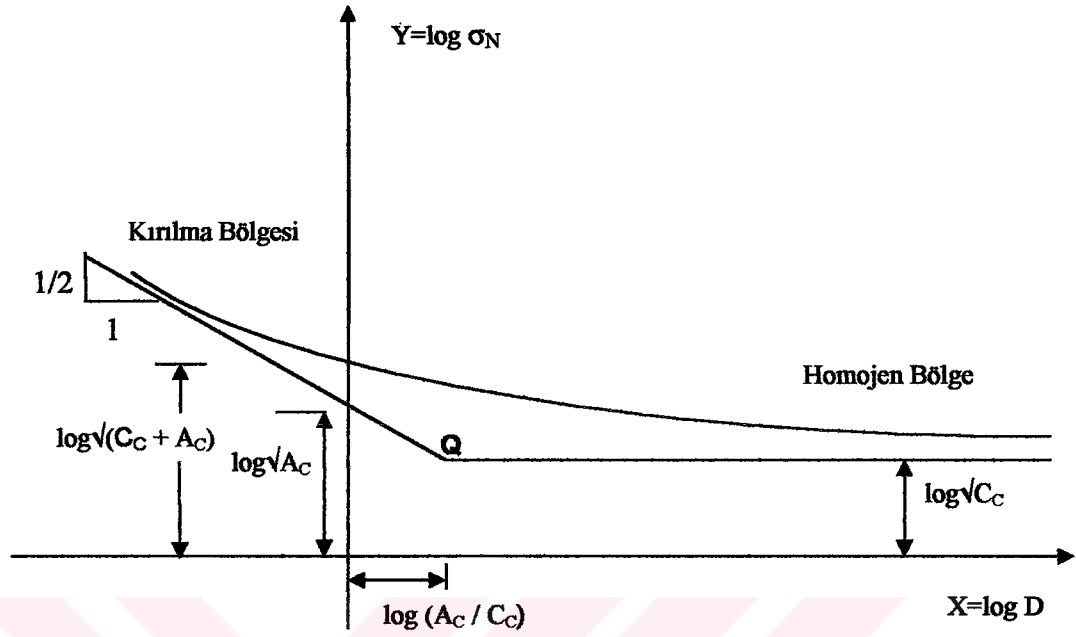
A_C = gerilme şiddet çarpanı değerinin kare kökü boyutunda olan sabit ;

C_C ve A_C sabitleri regresyon yöntemleri ile bulunabilir. Lineer olmayan eğrinin denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_N = (C_C + A_C/D)^{1/2} \quad (2.18)$$

Eğer numune boyutu sonsuza giderse ($D \rightarrow \infty$) :

$$\lim_{D \rightarrow \infty} (C_C + A_C/D)^{1/2} = \sqrt{C_C} \quad (2.19)$$



Şekil 2.10. Carpinteri'nin önerdiği MFSL , logaritmik eksenlerde gösterimi

Eğer numune boyutu sıfıra giderse ($D \rightarrow 0^+$) :

$$\lim_{D \rightarrow 0^+} (C_C + A_C/D)^{1/2} = +\infty \quad (2.20)$$

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi boyut ve gerilme logaritmik olarak çizildiğinde denklem 2.18 aşağıdaki forma gelir:

$$Y(X) = \frac{1}{2} \log (C_C + A_C / 10^X) \quad (2.21)$$

Şekil 2.10'da olan asimtotun yatay kısmı büyük boyutlar için geçerlidir, homojen bölgeyi temsil etmektedir ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$H_I(X) = \log \sqrt{C_C} \quad (2.22)$$

Eğik olan asimtot ise mikroskopik boyutlar için geçerlidir, yani D sıfıra yaklaşmaktadır ($X \rightarrow -\infty$), ve düzensiz veya kırılan bölgeyi temsil etmektedir. Aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$H_2(X) = -1/2X + \log \sqrt{A_c} \quad (2.23)$$

İki asimtotun kesiştiği nokta olan Q Şekil 2.10 da verilmiş ve yatay koordinatı şöyle ifade edilebilir;

$$X_Q = \log (A_c / C_c) \quad (2.24)$$

A_c/C_c 'nin boyutu uzunluk boyutu ile aynıdır ve mikro yapıdaki karakteristik boyutu ile bağlantılı olduğu görülmektedir. Karakteristik boyut ℓ_{ch} olarak gösterilir ve beton malzemesi için maksimum agrega boyutu ile orantılıdır:

$$\ell_{ch} = A_c/C_c = \alpha d_{max} \quad (2.25)$$

İnce taneli malzemeler için (taş, seramik, metal) ℓ_{ch} değeri betona göre daha küçüktür. Carpinteri'nin önerdiği boyut etkisi (MFSL) genel olarak aşağıdaki deklemler ile ifade edilir:

$$\sigma_N = f_t (1 + \ell_{ch}/D)^{1/2} \quad (2.26)$$

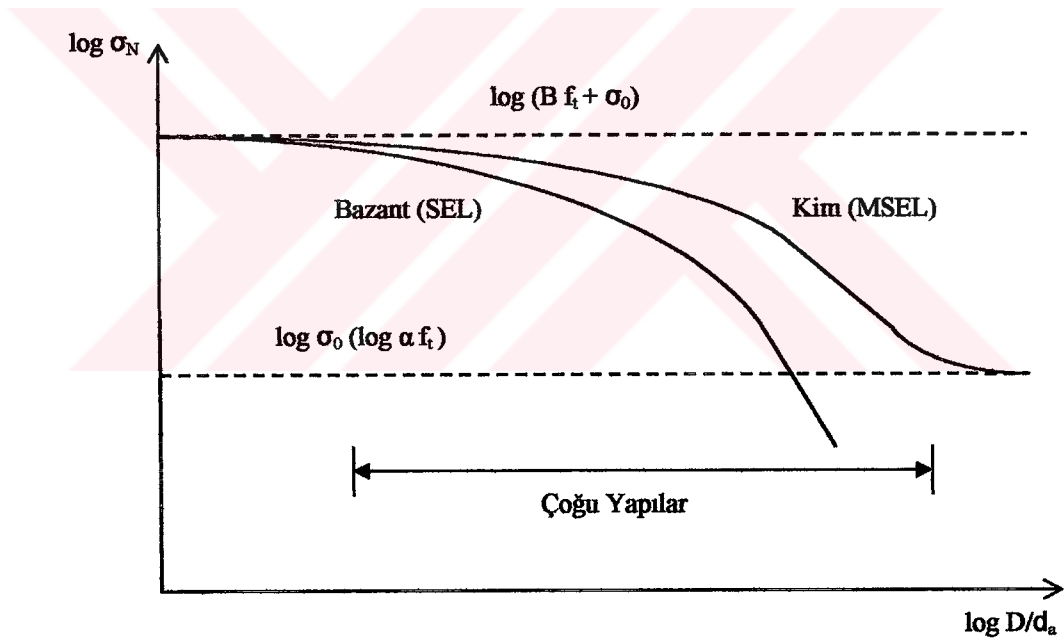
2.7.4. Kim'in önerdiği boyut etkisi

Metal gibi malzemelerde numune üzerinde önceden çatlak olmadığı için boyut etkisinin görülmesi zor bir olaydır. Bu tür malzemelerde göçme ani kırılma şeklinde değil, aksine büyük plastik deformasyondan dolayı gerçekleşir. Bilindiği gibi betonda çatlakların olmaması durumunda dahi boyut etkisi vazgeçilmez bir davranış olarak görülür. Bazant'ın boyut etkisi kanunu teorik olarak, geometrik olarak benzer ve aynı çatlak uzunluğuna sahip (a_0/D) numuneler için geçerlidir. Çatlaksız beton numunelerde a_0/D 'nin etkisi katıldığında Bazant'ın boyut etkisi denkleminin

düzenlenmesi gerekir. Yeni bir parametre λ_0 , a_0/D ' nin bir fonksiyonu olarak, denklemde yer alır. Bazant denkleminde $f(a_0/D)$ numune boyutu arttıkça azalan bir fonksiyondur ve düzenlenmiş olan denklem aşağıdaki gibidir;

$$\sigma_N = B f_t / [1 + D/f(a_0/D)d_a]^{1/2} \quad (2.27)$$

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi grafik gösteriminde numune boyutu sonsuza gittiğinde malzemenin dayanımı sıfıra yaklaşır. Diğer taraftan Kim'in [12] önerdiği boyut etkisi grafik gösteriminde boyut sonsuza gittiğinde malzemenin dayanımı küçük sabit bir değere ulaşır.



Şekil 2.11. Bazant'ın boyut etkisi ile Kim'in boyut etkisi karşılaştırılması

Kim'in önerdiği boyut etkisi bağıntısında genel boyut etkisi denklemine artık dayanımın küçük sabit bir değer olduğu görülür ve aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\sigma_N = B f_t / [1 + D/\ell_0]^{1/2} + \sigma_0 \quad (2.28)$$

Denklem 2.28'de $\sigma_0 (= \alpha f_t)$ boyuttan bağımsız dayanım olarak bilinir. α değeri birden küçük olan sabittir, geriye kalan kısım boyuta bağlı olan dayanımdır. İlk kısım çatlaksız durumu ve ikinci kısım çatlaklı durumu ifade etmektedir. ℓ_0 değeri karakteristik uzunluk parametresi olarak bilinmektedir. Denklem 2.28 her bir deney için aşağıdaki formu ile işleme girer;

$$\sigma_N = k_1 \sigma_{N,r} / [1 + D/\ell_0]^{1/2} + k_2 \sigma_{N,r} \quad (2.29)$$

Burada $\sigma_{N,r}$ referans aldığımız D boyutundaki gerilme değeridir, k_1 , k_2 ve ℓ_0 değerleri regresyon analizi ile elde edilir, Bazant'ın önerdiği boyut etkisi denkleminde $k_2 \sigma_{N,r}$ (artık dayanım) sıfıra eşittir.

2.8. Regresyon İlişkileri

D_0 ve Bf_t değerlerinin denklem 2.15'den bulunmasının en iyi yolu non-lineer yöntemdir. Ancak, Levenberg-Marquardt algoritmasının bilgisayar programı elde olması gerekmektedir. Deneylerden elde edilen σ_N değerleri ve bunlara karşılık gelen D_k ($k=1,2,3,\dots$) değerleri logaritmik olarak çizilirler. X ve Y koordinatında eğrilerin uydurma işlemleri yapılır (Şekil 2.12). Bazen σ_N değerleri doğrudan verilmez ama buna karşı gelen yük değerlerini kullanarak gerilme değerlerini hesaplayabiliriz. Örneğin üç nokta yüklemesinde hesaplarda mesnetler arası mesafenin ' S ' önemi vardır. X ve Y değerleri nonlinear analiz yöntemine göre aşağıdaki denklemde konulursa şöyle ifade edilir;

$$Y^* = \ln M / (N + e^{x^*})^{1/2} \quad (2.30)$$

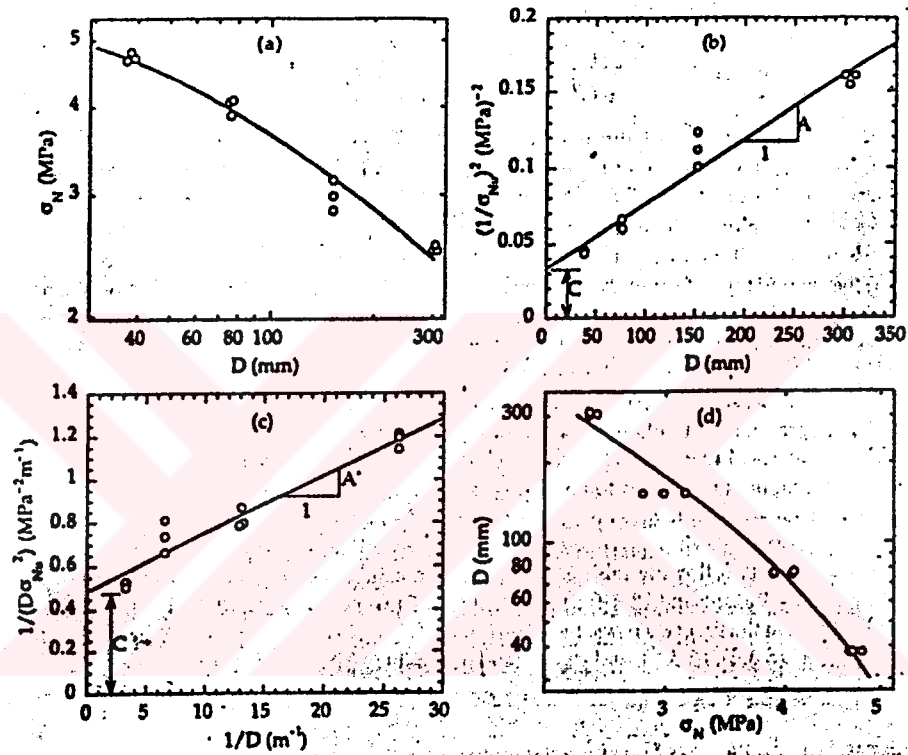
Burada ;

$$X^* = \ln D, Y^* = \ln \sigma_N, B f_t (D_0)^{1/2} = M, D_0 = N \quad (2.31)$$

K_{IC} (kırılma tokluğu), c_f (nonlinear bölgenin uzunluğu) ve G_f (kırılma enerjisi) değerlerinin M ve N ile ilişkileri aşağıdaki gibidir;

$$K_{IC} = K(\alpha_0) M, G_f = K(\alpha_0)^2 M^2 / E, c_f = K(\alpha_0) N / (2 K'(\alpha_0)) \quad (2.32)$$

Burada, M ve N değerleri öyle seçilmelidir ki G_f sadece M değerine ve c_f sadece N değerine bağlı olsun. Bu yolda bulunan hata parametreleri için c_f ve G_f içinde geçerlidir. Eğer diğer parametrelerde kullanılırsa onların korelasyon katsayıları da hesaplanmalıdır.



Şekil 2.12. Regresyon grafikleri, a) logaritmik, b) lineer regresyon I, c) lineer regresyon II, d) ters logaritmik eğrisi; deney grafikleri ve datalar Bazant ve Pfeiffer (1987) B1 serisinden alınmıştır

Eğer non - lineer yöntem için bilgisayar programı mevcut değilse aşağıdaki denklem lineer regresyon için kullanılabilir (Bazant);

$$\sigma_N = B f_t / (1 + D/D_0)^{1/2} \quad (2.33)$$

$$Y = A X + C \quad (\text{lineer regresyon I}) \quad (2.34)$$

Burada; $X=D$, $Y=1/(\sigma_N^2)$, $B_f=1/\sqrt{C}$, $D_0= C/A$ (2.35)

K_{IC} , c_f ve G_f değerleri için şu ilişkiler geçerlidir:

$$K_{IC} = K(\alpha_0)/\sqrt{A}, G_f = K(\alpha_0)^2/(EA), c_f = K(\alpha_0)C/(2 K'(\alpha_0) A) \quad (2.36)$$

Başka bir regresyon tipini Planas lineer II olarak önermiştir:

$$Y' = A' X' + C' \quad (\text{lineer regresyon II}) \quad (2.37)$$

Burada; $X'=1/D$, $Y' = 1/(\sigma_N^2 D)$, $B_f=1/\sqrt{A'}$, $D_0 = A'/C'$ (2.38)

K_{IC} , c_f ve G_f değerleri için şu ilişkiler geçerlidir:

$$K_{IC} = K(\alpha_0)/\sqrt{C'}, G_f = K(\alpha_0)^2/(E C'), c_f = K(\alpha_0) A'/(2 K'(\alpha_0) C') \quad (2.39)$$

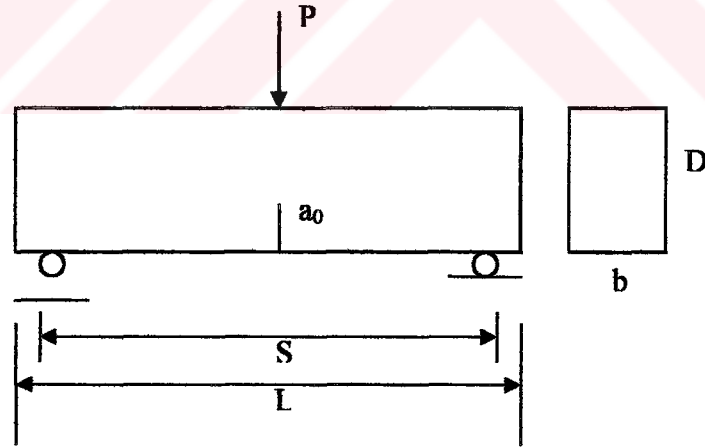
Şimdiye kadarki denklemlerde lineer regresyon I tipinde kırılma enerjisi regresyon eğimi ile ters orantılı ve lineer regresyon II tipinde kesişme noktası ile ters orantılıdır. Lineer I regresyon ile yapılan grafikler daha küçük numuneler için iyi sonuç vermekte ve lineer II regresyon sonsuz boyutlu numuneler için uygundur. LEKM yönteminde $c_f \rightarrow 0$, yani $C=0$ değeri için birinci tip regresyonda (çizgi orijinden geçiyor) ve $A'=0$ değeri için ikinci tip regresyonda (yatay çizgi) şekilleri elde edilmektedir. Dayanım teorisine göre $D_0 \rightarrow \infty$, birinci tip regresyonda $A/C = 0$ (ihmal edilebilen eğim), ikinci tip regresyon için $C'/A' = 0$ (regresyon çizgisi orijinden geçer) olur. Non-lineer , lineer I ve lineer II için kullandığımız denklemler tam olarak birbirleri ile eşdeğer değil ve aynı sonucu vermezler. Bunun sebebi data noktaları için her regresyonda farklı ağırlıkların bulunmasıdır. Başka bir yöntem ise lineer regresyon I için eşdeğer ağırlıklarla işlemlerin düzenlenmesi RILEM tarafından önerilmiştir.

2.9. Boyut Etkisinde RILEM Önerileri

RILEM önerilerine göre beton kırılmasında malzemenin kırılma özellikleri boyut etkisi kanunu ile (SEL) elde edilebilir (RILEM 1990b). Bu metodun temel düşüncesi Bazant ve Pfeiffer (1987) tarafından verilmiştir. Önce lineer I regresyon yöntemi ile kırılma parametreleri hesaplanır ve sonradan malzemenin kırılma parametreleri aşağıdaki denklemler ile bulunur;

$$K_{IC} = K(\alpha_0) / \sqrt{A} , G_f = K(\alpha_0)^2 / (EA) , c_f = K(\alpha_0)C / (2 K'(\alpha_0) A) \quad (2.40)$$

Bu yöntem, geometrik olarak pozitif numuneler için iyi sonuçlar vermektedir. Üç nokta yüklemesindeki kirişte standartlaşma önerileri geçerlidir. Yükler ve reaksiyonlar bir sabit mafsallı ile iki kayar mafsallı kiriş sisteminde uygulanmaktadır. Kayma sürtünmesi minimum seviyede olacak şekilde düzenleme yapılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. RILEM metoduna göre önerilen numune geometrisi

Kiriş mesnetleri ve kiriş sonu arasındaki mesafe iyi ayarlanmalı, aksi halde kirişte hasarlar ve çatlamlar meydana gelebilir. Numune açıklık ve kesit yüksekliği oranı (S/D) en az 2,5 olmalıdır. Çentik uzunluğunun derinliğe olan oranı (a_0/D) 0,15 ve 0,5 değerleri arasında olmalı ve çentik genişliği olabildiğince küçük tutulmalı; 0,5

d_a 'dan büyük olmamalı (d_a , maksimum agrega çapı), kiriş kalınlığı 'b' ve kiriş yüksekliği D , 3 d_a değerinden küçük olmamalıdır.

Önerilere göre deneyler en az üç numune üzerinde yapılmalı ve her numune için D değeri belli olmalıdır. $D = D_1, \dots, D_n$ 'in en küçük D_1 değeri 5 d_a 'dan büyük ve en büyük D_n değeri 10 d_a 'dan küçük olmamalıdır. Beton numunelerinde D_n / D_1 oranı en az 4 olmalıdır. Ayrıca boyut aralığı mümkün olduğu kadar büyük olmalıdır. Örnek olarak, $D / d_a = 4; 8; 16$ genelde kabul edilebilir ama $D / d_a = 3; 6; 12; 24$ ya da $3; 9; 27$ aralıkları daha fazla tercih edilir. İstatistiksel olarak deneyde en az üç benzer numune kullanılmalıdır. Her birinden en az üç adet olarak bütün numuneler aynı beton karışımından yapılmalı ve beton kalitesi uniform olmalıdır [1].

2.9.1. RILEM önerilerinde denklemler

Hesap tablosunda kullanılan datalar kiriş derinliği D ve P_{ui}^0 (deneyde ölçülen maksimum yük , $i = 1, 2, \dots, n$; n = numune sayısı) dır. Birinci aşamada σ_N değerleri hesaplanmalı ve kirişin öz ağırlığı ile üzerindeki diğer ağırlıklarda hesaba katılmalıdır.

Yükleri hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılır;

Eğer $S_i = L_i$ ise;

$$P_i = P_{ui}^0 + (m_i g / 2) ; g = \text{yer çekimi ivmesi} \quad (2.41)$$

Eğer $S_i < L_i$ ise;

$$P_{ui} = P_{ui}^0 + m_i g (2 S_i - L_i) / (2 S_i) \quad (2.42)$$

Önerilere göre $c_N = 1$ alınmalıdır (c_N uygunluk sayısı).

Her bir numune için nominal gerilme hesaplanır;

$$\sigma_N = 3 P_{ui} S_i / (2b_i D_i^2) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.43)$$

Sonunda lineer I regresyonu için $X_i = D_i$ ve $Y_i = 1/(\sigma_N^2)$ değerleri hesaplanır. A (eğim) ve C (kesişim noktası) katsayıları için aşağıdaki denklemler RILEM metoduna göre hesaplanır.

$$\sum_{i=1}^n 1^i = n, \quad \sum_{i=1}^n X_i, \quad \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2.44)$$

$$\sum_{i=1}^n (X_i)^2, \quad \sum_{i=1}^n (Y_i)^2, \quad \sum_{i=1}^n X_i Y_i \quad (2.45)$$

Buradan A ve C değerleri şu denklemler yardımıyla hesaplanır;

$$A = (\sum \sum_{xy} - \sum_x \sum_y) / \Delta, \quad C = (\sum_{xx} \sum_y - \sum_x \sum_{xy}) / \Delta \quad (2.46)$$

$$\Delta = \sum \sum_{xx} - (\sum_x)^2 \quad (2.47)$$

Dataların standard sapması;

$$\chi^2 = \sum_{yy} - A \sum_{xy} - C \sum_y \quad (2.48)$$

A ve C değerlerinin varyasyonu için;

$$\omega_A^2 = \chi^2 \sum / [(n-2) A^2 \Delta]; \quad \omega_A \leq \% 10 \text{ olmalıdır} \quad (2.49)$$

$$\omega_C^2 = \chi^2 \sum_{xx} / [(n-2) C^2 \Delta]; \quad \omega_C \leq \% 20 \text{ olmalıdır} \quad (2.50)$$

$$m^2 = (n-1) \chi^2 \sum (\sum_x)^2 / [(n-2) \Delta (\sum_y)^2]; \quad m \leq \% 20 \text{ olmalıdır} \quad (2.51)$$

C^- , K_{IC} , G_f , c_f değerleri için ;

$$C^{-} = \sum y / \sum , \omega_c^{-2} = \chi^2 \sum / [(n-2) (\sum y)^2] \quad (2.52)$$

$$\omega_{KIC} = 1/2 \omega_A \quad (2.53)$$

$$\omega_{Gf} = (\omega_A^2 + \omega_c^2)^{1/2} \quad (2.54)$$

$$\omega_{cf}^2 = C^{-2} / [C^2 (\omega_A^2 + \omega_c^2)] \quad (2.55)$$

Lineer II regresyonu için tüm denklemler geçerli, fakat X ; Y ; A ve C değerleri yerine X' ; Y' ; A' ; C' kullanılacaktır [1].

$$X' = 1 / D \text{ ve } Y' = 1 / (\sigma_N^2 D) \quad (2.56)$$

Hesaplarda bulunan kırılma parametreleri ve kullanılan denklemlerden bazıları aşağıdaki gibidir;

$$\text{Lineer I analizi için ; } M = K_{IC} / K(\alpha_0) = 1/\sqrt{A} ; N = D_0 = C / A ; Bf_i = M / \sqrt{D_0} \quad (2.57)$$

$$\text{Lineer II analizi için ; } M = K_{IC} / K(\alpha_0) = 1/\sqrt{C'} ; N = D_0 = A'/C' ; Bf_i = M / \sqrt{D_0} \quad (2.58)$$

$$\text{Non-lineer analizi için ; } x = \ln \sigma_{Ni} ; M_i = e^x (N + d_i) ; D_0 = N ; Bf_i = M / \sqrt{D_0} \quad (2.59)$$

$$\text{MFSL analizi için ; } f_i = \sqrt{C_C} ; \ell_{ch} = A_C / C_C ; \alpha = \ell_{ch} / d_{max} \quad (2.60)$$

MSEL analizi için ; k_1 , k_2 ve ℓ_0 katsayıları Levenberg-Marquardt non-lineer eğri uydurma yöntemi ile bulunur. $\sigma_0 = k_2 \sigma_{N,r}$ ayrıca karşılaştırma eğrileri (Kim ve Bazant) aşağıdaki datalar ile çizilir:

$$X_K = \log D ; Y_K = \log (\sigma_N / \sigma_{N,r}) = \log [k_1 / \sqrt{(1 + D / \ell_0)} + k_2] \rightarrow \text{Kim} \quad (2.61)$$

$$Y_B = \log (\sigma_N / \sigma_{N,r}) = \log [k_1 / \sqrt{(1 + D / \ell_0)}] \rightarrow \text{Bazant} \quad (2.62)$$

3. ÇEŞİTLİ DENEY VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Bu tezde incelenen deneyler direkt çekme, indirekt çekme, basınç, kesme, eğilme ve burulma olarak özetlenebilir. Direkt çekmede; numune üzerinde uygulanan direkt yüklemde nervürlü ve düz donatı kullanılmakta [17], diğeri simetrik çentikli numune üzerinde çekme uygulanmaktadır (beton, harç) [21]. Dolaylı çekmede, prizma şeklinde olan numunede çelik donatıya çekme kuvveti uygulanır [15]. Basınçta; dört farklı beton sınıfı üzerinde dışmerkez basınç uygulanmakta [20], diğeri deneyde beton ve harç numunelerinde dışmerkez basınç uygulanmaktadır [21]. Son olarak üç farklı narinlik değerine sahip olan donatısız kolonlar üzerinde basınç uygulanmıştır [19]. Eğilmede ; beton ve harç numunelere üç nokta yüklemesi uygulanmakta [21], yüksek mukavemetli betonda donatısız ve donatı yüzdesi artan numuneler üzerinde dört nokta yüklemesi uygulanmaktadır [23]. Aderans ekinde ise betonarme kirişde aderans eki göçmesi moment ve kesme bölgelerinde (etiriyeli ve etiriyesiz) incelenmiştir [18]. Kesmede, iki çeşit betonarme kirişde kancalı ve kancasız ankraj (etiriyesiz) kullanılarak dört nokta yüklemesi uygulanmaktadır [16]. Burulmada, beton ve boyuna donatılı betonarme kirişlere burulma etkimektedir [22].

Tezde kullanılan analiz yöntemleri Bazant, Carpinteri ve Kim' in önerdikleri boyut etkisi denklemleri kullanılmıştır. Bazant'ın [1] önerdiği boyut etkisi (SEL) lineer I, Planas'ın lineer II ve non-lineer dir. Tüm analizlerde RILEM önerileri [1] gözönüne alınarak kırılma parametreleri ve bunların varyasyonları hesaplanmaktadır. Carpinteri'nin [11] önerdiği boyut etkisinde (MFSL) yine kırılma parametreleri ve değişimleri lineer olarak hesaplanmaktadır. Son olarak Kim'in [12] önerdiği boyut etkisi (MSEL), denkleminde kullanılan katsayılar Levenberg – Marquardt [13, 14] nonlineer eğri uydurma yöntemi ile belirlenmektedir. İlk iki durumda Excel programı etkin olarak hasaplarda kullanılmakta, son durumda ise önce boyut ve gerilme değerleri Matlab programında veri olarak kullanılarak sonradan elde edilen katsayılar Excel programına dahil edilerek analiz tamamlanır. Tüm bu analizlerin grafikleri çizilmiştir.

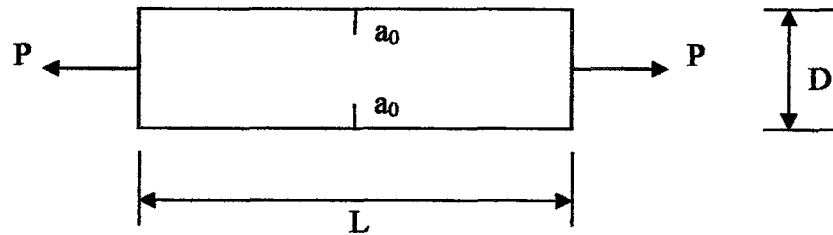
3.1. Direkt Çekme Deneyleri

3.1.1. Çentikli numunede direkt çekme deneyi

Çentikli numune üzerinde direkt çekme deneyi Bazant ve Pfeiffer [21] tarafından 1987 yılında yapılmıştır. İki tür malzeme, beton ve harç numuneler üzerinde deney yapılmıştır. Numunelerin kesiti dikdörtgen şeklinde olup ve uzunluk / yükseklik oranı 8:3 olarak düzenlenmiştir (Şekil 3.1). Yükseklik değerleri $D = 38,1; 76,2; 152,4$ mm ve kalınlık değeri $b = 19$ mm' dir. Bu üç farklı numune farklı beton karışımlardan elde edilmiş fakat her bir numune serisi aynı beton karışımından yapılmışlardır. Çentik derinliği $a_0 = D/6$ ve kalınlığı 2,5 mm olarak sertleşmiş numuneden elmas kesici ile elde edilmiştir. Beton karışımının oranı her iki numune için 1:2:2 (çimento-kum-çakıl) ve su/çimento oranı 0,6 olarak düzenlenmiştir (ağırlıkça). Maksimum dane çapı beton için $d_{max} = 12,7$ mm ve harç için $d_{max} = 4,83$ mm' dir. Betonun basınç dayanımını belirlemek için her karışımdan silindir numuneleri alınıp (çap=76,2 mm, yükseklik=152,4 mm) 28 günlük kür bakımından sonra ortalama basınç dayanımı beton için $f_c = 33,5$ MPa ve harç için $f_c = 47,6$ MPa olarak elde edilmiştir. Çekme dayanımı $f_t = 6\sqrt{f_c}$ ve Young modülü $E_c = 57000\sqrt{f_c}$ olarak psi cinsinden deneyler sonucunda elde edilmiştir. Nominal çekme dayanımı elastisite teorisine göre aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$\sigma_N = P_u / (bD) \quad (3.1)$$

P_u : maksimum yük, b : numunenin kalınlığı, D : numune derinliği



Şekil 3.1. Direkt çekmede numune geometrisi (simetrik çentikli)

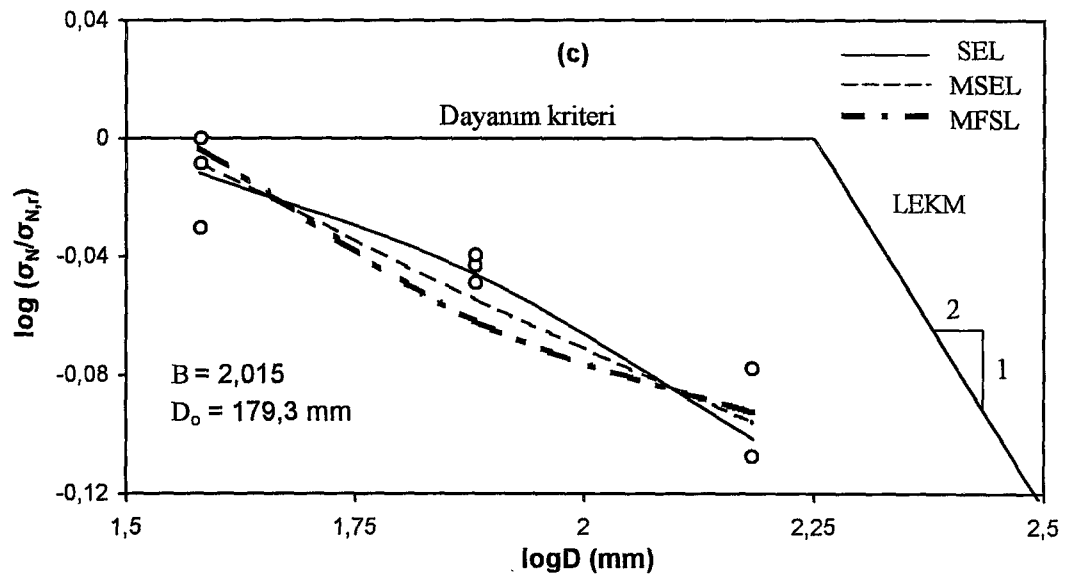
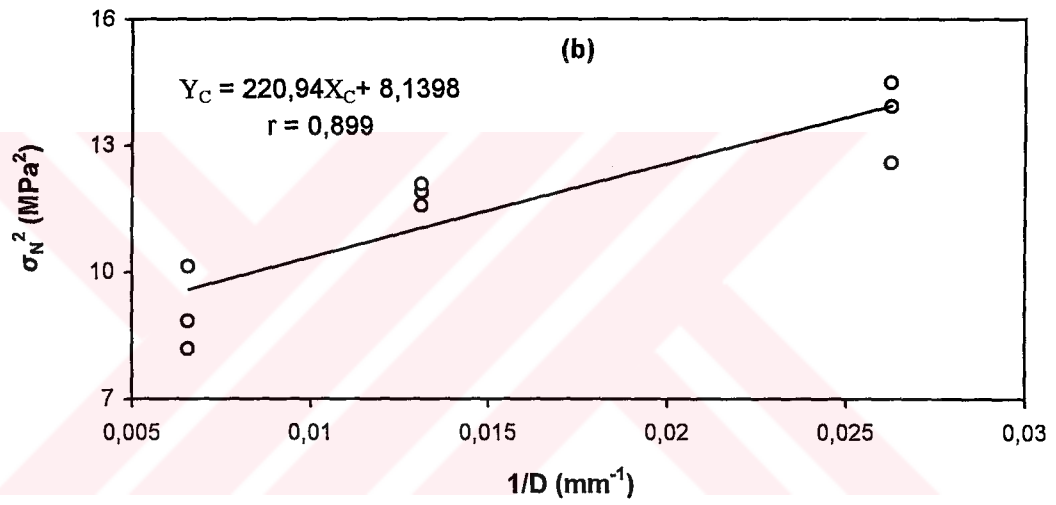
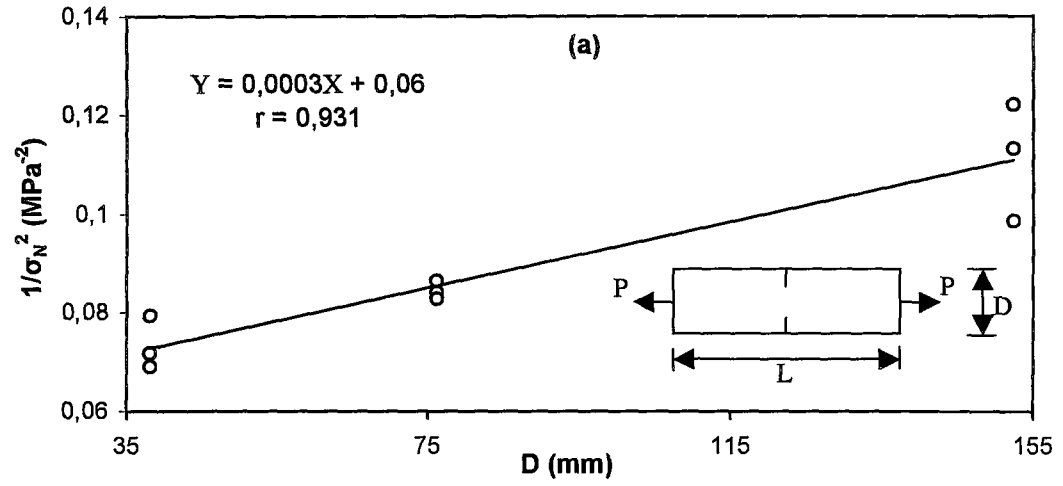
3.1.1.1 Çentikli numunede çekme deney analizleri

Çizelge 3.1. Çentikli numunede çekme deney bilgileri (beton)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
a_0 (mm)	6,35	6,35	6,35	12,7	12,7	12,7	25,4	25,4	25,4
d_e (mm)	25,4	25,4	25,4	50,8	50,8	50,8	101,6	101,6	101,6
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4
b (mm)	19	19	19	19	19	19	19	19	19
L (mm)	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4
f_c (MPa)	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5
P_u (N)	1712	1801	1837	3283	3327	3354	5524	5737,9	6147
σ_N (MPa)	3,548	3,733	3,807	3,401	3,447	3,475	2,862	2,9724	3,184
$X=D$ (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,079	0,072	0,069	0,086	0,084	0,083	0,122	0,1132	0,099
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,026	0,026	0,026	0,013	0,013	0,013	0,007	0,0066	0,007
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	8E-04	0,0007	6E-04
$X^*=LnD$ (mm)	3,64	3,64	3,64	4,333	4,333	4,333	5,027	5,0265	5,027
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	1,267	1,317	1,337	1,224	1,238	1,246	1,051	1,0894	1,158
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,026	0,026	0,026	0,013	0,013	0,013	0,007	0,0066	0,007
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	12,59	13,93	14,49	11,57	11,88	12,07	8,19	8,8352	10,14
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	3,807	3,807	3,807	3,807	3,807	3,807	3,807	3,807	3,807
$X_K=logD$ (mm)	1,581	1,581	1,581	1,882	1,882	1,882	2,183	2,183	2,183
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01	-0,008	-0,01	-0,05	-0,055	-0,05	-0,096	-0,096	-0,1
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01	-0,012	-0,01	-0,05	-0,046	-0,05	-0,101	-0,101	-0,1
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01	-0,011	-0,01	-0,06	-0,062	-0,06	-0,092	-0,092	-0,09

Çizelge 3.2. Çentikli numunede çekme deney sonuçları (beton)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	1,729	1,764	1,759		
M ² (MPa ² m)	2,99	3,112	3,092		
N (mm)	179,3	189,8	187,8		
A (Eğim)	3E-04	0,061		220,9	
C	0,06	3E-04		8,14	
C ⁻	0,09	0,001		11,52	
ω _A	0,148	0,059		0,184	
ω _C	0,083	0,193		0,087	
ω _{C⁻}	0,026	0,023		0,029	
m	0,139	0,124		0,153	
ω _{KIC}	0,074	0,029		0,092	
ω _{Gr}	0,17	0,202		0,204	
ω _{cf}	0,225	0,247		0,264	
Bf _t (MPa)	4,083	4,049	4,058	4,11	3,194
σ ₀ (MPa)	0	0	0	2,853	2,226
ℓ _p (mm)	179,3	189,8	185,8	27,14	10,93
ℓ _p /d _{max}	14,12	14,94	14,63	2,137	0,861
k ₁			1,068		0,839
k ₂			0		0,585
r	0,931	0,988	0,916	0,899	



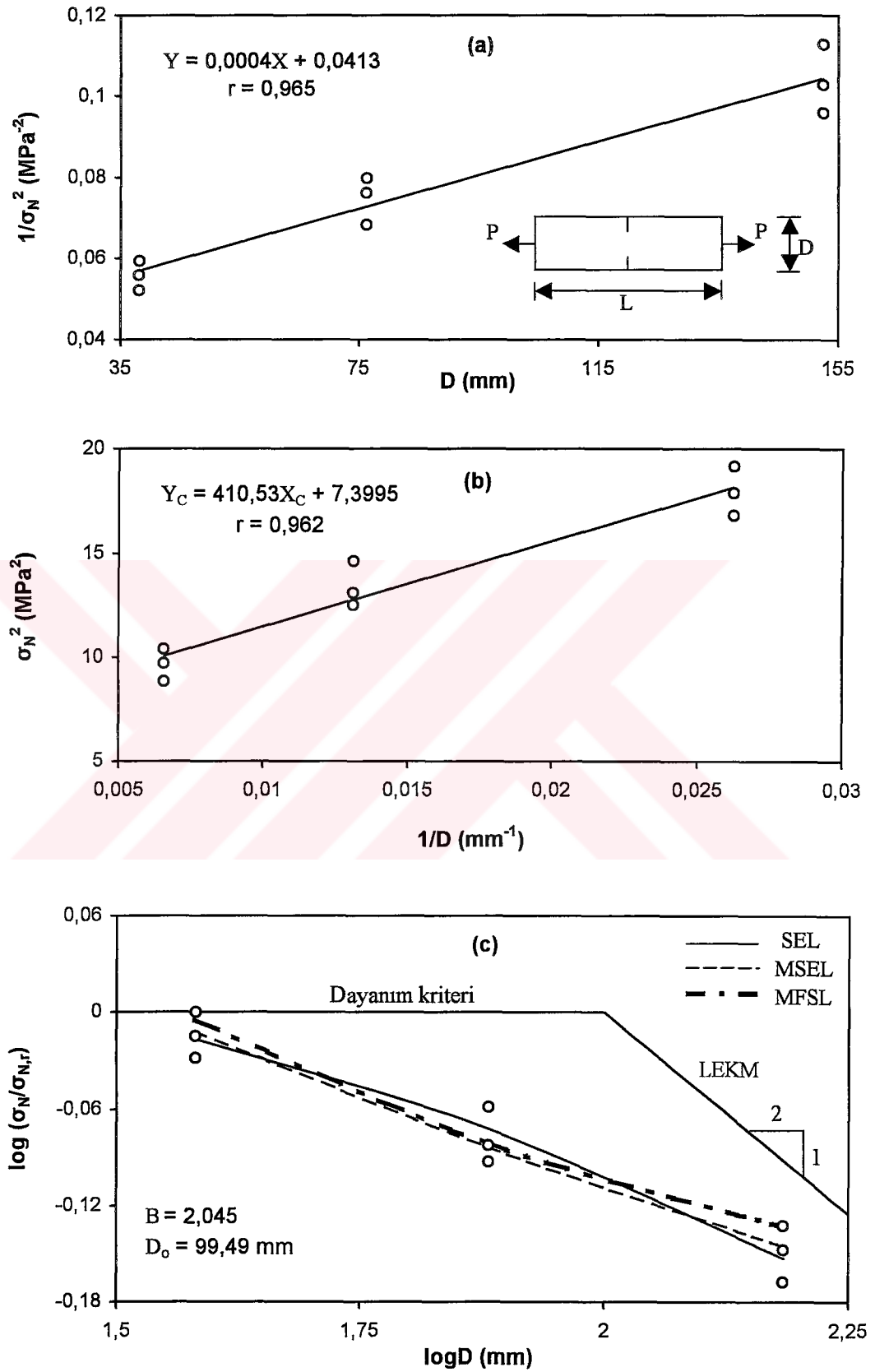
Şekil 3.2. Direkt çekmede regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi c) karşılaştırma (beton)

Çizelge 3.3. Çentikli numunede çekme deney bilgileri (harç)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
a_0 (mm)	6,35	6,35	6,35	12,7	12,7	12,7	25,4	25,4	25,4
d_e (mm)	25,4	25,4	25,4	50,8	50,8	50,8	101,6	101,6	101,6
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4
b (mm)	19	19	19	19	19	19	19	19	19
L (mm)	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4
f_c (MPa)	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6
P_u (N)	1979	2042	2113	3416	3496	3692	5747	6018,1	6232
σ_N (MPa)	4,101	4,23	4,378	3,539	3,622	3,825	2,977	3,1176	3,228
$X=D$ (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,059	0,056	0,052	0,08	0,076	0,068	0,113	0,1029	0,096
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,026	0,026	0,026	0,013	0,013	0,013	0,007	0,0066	0,007
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	9E-04	7E-04	0,0007	6E-04
$X^*=LnD$ (mm)	3,64	3,64	3,64	4,333	4,333	4,333	5,027	5,0265	5,027
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	1,411	1,442	1,477	1,264	1,287	1,342	1,091	1,1371	1,172
$X_c=1/D$ (mm ⁻¹)	0,026	0,026	0,026	0,013	0,013	0,013	0,007	0,0066	0,007
$Y_c=\sigma_N^2$ (MPa ²)	16,82	17,9	19,17	12,53	13,12	14,63	8,863	9,7192	10,42
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	4,378	4,378	4,378	4,378	4,378	4,378	4,378	4,378	4,378
$X_K=logD$ (mm)	1,581	1,581	1,581	1,882	1,882	1,882	2,183	2,183	2,183
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01	-0,012	-0,01	-0,08	-0,083	-0,08	-0,145	-0,145	-0,14
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,02	-0,017	-0,02	-0,07	-0,072	-0,07	-0,153	-0,153	-0,15
$Y_c=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0	-0,005	-0	-0,08	-0,081	-0,08	-0,133	-0,133	-0,13

Çizelge 3.4. Çentikli numunede çekme deney sonuçları (harç)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa $\sqrt{m}$)	1,552	1,508	1,541		
M^2 (MPa 2m)	2,41	2,274	2,374		
N (mm)	99,49	89,56	96,35		
A (Eğim)	4E-04	0,039		410,5	
C	0,041	4E-04		7,399	
C^-	0,078	0,001		13,68	
ω_A	0,102	0,077		0,108	
ω_C	0,104	0,12		0,104	
ω_C^-	0,026	0,024		0,026	
m	0,136	0,127		0,14	
ω_{KIC}	0,051	0,039		0,054	
ω_{gr}	0,146	0,143		0,149	
ω_{cf}	0,2	0,192		0,205	
Bf_t (MPa)	4,922	5,039	4,964	6,125	8,5
σ_0 (MPa)	0	0	0	2,72	1,947
ℓ_p (mm)	99,49	89,56	92,83	55,48	3,041
ℓ_p/d_{max}	7,834	7,052	7,31	4,369	0,239
k_1			1,143		1,942
k_2			0		0,445
r	0,965	0,98	0,968	0,962	



Şekil 3.3. Direkt çekmede regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi c) karşılaştırma (harç)

3.1.1.2. Direkt çekme deneyinde sonuç karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.2. ve 3.4. çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri beton numunesinde, harç numunesine göre artış göstermekte, fakat her iki numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde M değerleri birbirlerine çok yakındır.
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu, N beton numunede, harç numuneye göre artış göstermekte ve yaklaşık iki katıdır. Her iki numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde N değerleri birbirlerine çok yakındır.
- 3) Her iki numunede numune sayısı uniform olduğu için lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , sınır değerlerine yakın ve eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , sınır değerinin altında olduğu görülür ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Her iki numunede numune sayısı aynı olduğu için lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, sınır değerlerinin altında olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) Deney dataların dağılımı düzgün olmadığı için ve band genişliğinin fazla olduğundan MFSL analizinde eğim varyasyonu ω_{Ac} , betonda bir miktar yüksek fakat harçta sınır değerinin altında olduğunu ve kesişim değerin değişimi ω_{Cc} , her iki numunede sınır değerinin altında çıktığını görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) Y' ekseninde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_{C-} , her iki numunede birbirlerine çok yakın olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m , harçta beton numuneye göre biraz daha düşük fakat her iki numunede bu değerlerin çok yakın olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi, ω_{KIC} , her iki numunede lineer I ve lineer II analizlerinde birbirlerine yakın olduğu fakat MFSL analizinde daha yüksek bir değer olduğu görülür.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{GF} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{cf} , harçta, betona göre daha düşük olmakta ve birbirlerine yakın olduğu gözetlenir.
- 10) Bf_t değerinin her iki numunede birbirlerine yakın ve 4 ile 6 MPa arasında değişmektedir.

11) Numunede artık dayanım σ_0 , her iki numunede birbirlerine yakın fakat betonda biraz daha fazladır. Bunun nedeni betonda maksimum agreganın daha büyük olduğuna bağlanabilir. Bu değer Kim'in boyut etkisinde Carpinteri'nin denklemine göre daha az olduğu görülür.

12) Karakteristik uzunluk ℓ_p , harçta betona göre daha az, ℓ_p / d_{max} oranı ise bundan dolayı betonda daha yüksektir.

13) MSEL ve non lineer analizlerinde k_1 katsayısı betonda daha az ve bu sonucun Bf_1 değerlerine uyumlu olduğu görülür. Bazant'ın boyut etkisinde beton, harca göre daha düşük Bf_1 değerlerine sahiptir ($k_1 \sigma_{N,r}$ yırtılmaya karşı dayanım değerini ifade etmektedir).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

Beton → a) $r = 0,9308$ b) $r = 0,9881$ c) $r = 0,9164$ d) $r = 0,8987$

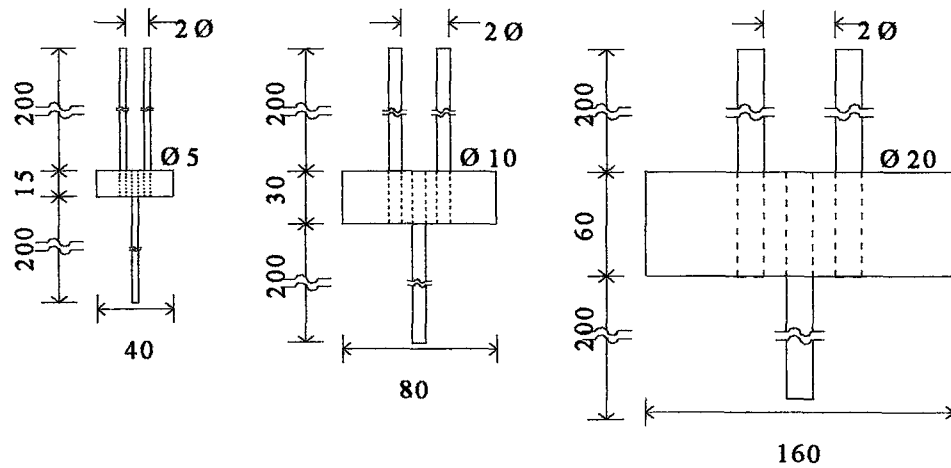
Harç → a) $r = 0,9653$ b) $r = 0,9797$ c) $r = 0,9683$ d) $r = 0,9618$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri harçta, betona göre birbirlerine daha yakın olduğu görülür (Şekil 3.2c ve 3.3c).

3.1.2. Direkt yükleme deneyi

Direkt çekme deneyinde, Direkt yükleme deneyi Prof. Şener [17] tarafından Gazi Üniversitesi, inşaat mühendisliği bölümünde yapılmıştır. Numunelerin kesiti D yüksekliğe ve L uzunluğa sahip olan kare prizmadan oluşmuşlardır (Şekil 3.4). Üç farklı numunede $D = 40, 80, 160$ mm ve L/D oranı tüm numuneler için $3/8$ 'e eşittir. Çelik donatılar eğilme etkisini azaltmak için numunenin bir kenarına paralel ve simetrik olarak iki yüzeyden dışarıya çıkmış vaziyette konulmuşlardır. Çeliğin akma dayanımı düz donatı için 220 MPa ve nervürlü donatı için 420 MPa olarak ölçülmüştür. Donatıların çapları sırası ile $d_b = 5, 10, 20$ mm' dir. Çelik çubuğun numune içine gömülü mesafesi prizmanın uzunluğuna eşit ve sırası ile $L_d = 15, 30, 60$ mm olarak alınmıştır. Tüm numuneler aynı beton malzemesinden yapılmış ve karışım oranı (su:çimento:agrega) 0,7:1:4 (ağırlıkça) olarak düzenlenmiştir. Agrega maksimum dane çapı $d_{max} = 4,76$ mm olarak seçilmiştir.

Betonun basınç dayanımını belirlemek için üç adet standard silindir numunesi alınmış ve bu silindirlerin çapı 76,2 mm, yüksekliği 152,4 mm' dir. Elde edilen 28 günlük basınç dayanımların f_c değerleri 3.1, 3.8 çizelgelerinde verilmiştir. Numune üzerinde olan donatıların birbirlerinden olan temiz açıklık 2Φ olarak düzenlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Direkt yüklemede numune geometrisi (tüm boyutlar mm'dir)

Çelik donatının sıyrılmaya karşı dayanımı amprik olarak Jirsa ve Breen tarafından 1977 yılında aşağıdaki denklemle verilmiştir.

$$\sigma_N = (0,1 + 0,265t / d_b + 4,344 d_b / L_d) \sqrt{f_c} \quad (3.2)$$

σ_N : aderans ekinde dayanım (MPa)

f_c : 28 günlük basınç dayanımı (MPa)

t: minimum paspayı (mm)

L_d : donatının beton içinde gömülü mesafes (mm)

d_b : donatının nominal çapı (mm).

Bazant'ın boyut etkisine göre denklem 3.2 düzenlendiğinde aşağıdaki şekile dönüşür.

Burada P_u makinadan okunan çekme kuvvetidir.

$$\sigma_N = P_u / (2\pi d_b L_d) \quad (3.3)$$

σ_N : aderans eki göçmesinde nominal gerilmedir.

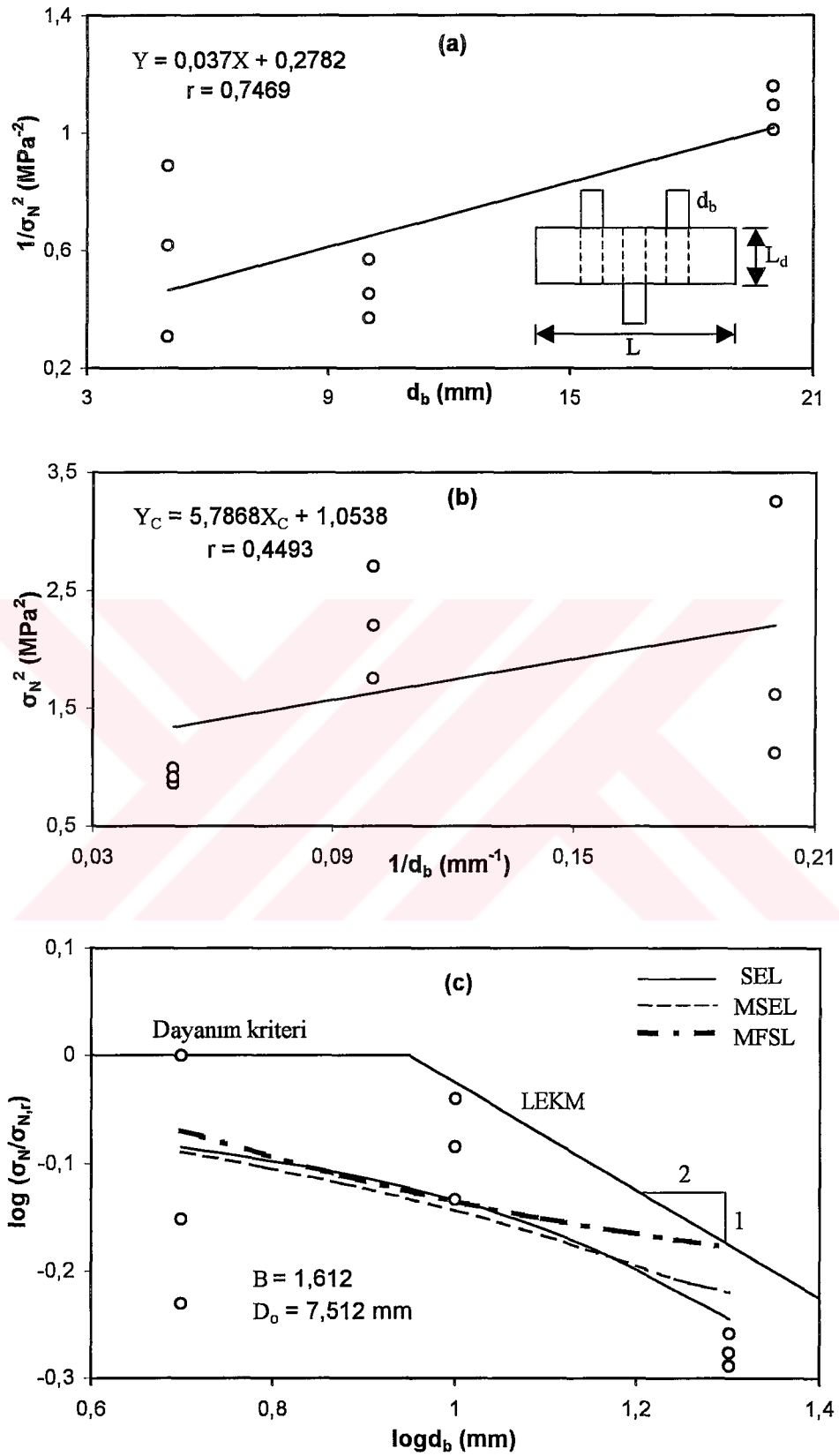
3.1.2.1. Direkt yüklemde deney analizleri

Çizelge 3.5. Direkt yüklemde deney bilgileri (nervürlü donatı)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
C (mm)	10	10	10	20	20	20	20	40	40	40
d _b (mm)	5	5	5	10	10	10	10	20	20	20
L _d (mm)	15	15	15	30	30	30	30	60	60	60
f _c (MPa)	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3
P _u (N)	850	600	500	3100	2500	2500	2800	7000	7500	7200
σ _N (MPa)	1,803756	1,27324	1,061033	1,6446011	1,3262912	1,3262912	1,4854461	0,9284038	0,9947184	0,9549297
X=d _b (mm)	5	5	5	10	10	10	10	20	20	20
Y=1/σ _N ² (MPa ⁻²)	0,307358	0,61685	0,8882644	0,369725	0,5684892	0,5684892	0,4531961	1,1601821	1,0108475	1,0986227
X'=1/d _b (mm ⁻¹)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05
Y'=1/σ _N ² d _b (MPa ⁻² mm) ²	0,061472	0,12337	0,1776529	0,0369725	0,0568489	0,0568489	0,0453196	0,0580091	0,0505324	0,0548311
X*=Lnd _b (mm)	1,609438	1,609438	1,6094379	2,3025851	2,3025851	2,3025851	2,3025851	2,9957323	2,9957323	2,9957323
Y*=Lnσ _N (MPa)	0,589871	0,241564	0,0592429	0,4974978	0,2823865	0,2823865	0,3957152	-0,074288	-0,005296	-0,046118
X _C =1/d _b (mm ⁻¹)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	3,253536	1,621139	1,1257909	2,7047127	1,7590483	1,7590483	2,2065502	0,8619337	0,9894647	0,9118907
σ _{N,r} (MPa)	1,803756	1,803756	1,803756	1,803756	1,803756	1,803756	1,803756	1,803756	1,803756	1,803756
X _K =log d _b (mm)	0,69897	0,69897	0,69897	1	1	1	1	1,30103	1,30103	1,30103
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,084551	-0,08455	-0,084551	-0,13406	-0,13406	-0,13406	-0,13406	-0,249405	-0,249405	-0,249405
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,088602	-0,0886	-0,088602	-0,143857	-0,143857	-0,143857	-0,143857	-0,224441	-0,224441	-0,224441
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,069072	-0,06907	-0,069072	-0,134957	-0,134957	-0,134957	-0,134957	-0,177319	-0,177319	-0,177319

Çizelge 3.6. Direkt yüklemde deney sonuçları (nervürlü donatı)

DEĞİŞKEN	LINEER I DEĞER	LINEER II DEĞER	NONLINEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa√m)	0,164336484	0,250789342	0,180288864		
M ² (MPa ² m)	0,02700648	0,062895294	0,032504075		
N (mm)	7,512087679	30,78383813	10,47795679		
A (Eğim)	0,037028151	0,489445811		5,786819878	
C	0,278158713	0,015899441		1,053827139	
C ⁻	0,703982445	0,072185709		1,719311425	
ω _A	0,314824723	0,361264907		0,702968239	
ω _C	0,542394887	1,439315323		0,499589952	
ω _{C⁻}	0,098314728	0,145431581		0,14047553	
m	0,571291966	0,84508085		0,816281988	
ω _{KIC}	0,157412361	0,180632453		0,351484119	
ω _{Gr}	0,627141786	1,483961229		0,862412004	
ω _{Gr}	0,834727016	1,768107789		1,169562717	
Bf _t (MPa)	1,896066936	1,42937997	1,761288914	3,852669887	20,64885756
σ _o (MPa)	0	0	0	1,026560831	-19,00040495
e _p (mm)	7,512087679	30,78383813	12,2555	5,491242027	311,42
e _p /d _{max}	1,57816968	6,467192884	2,574684874	1,153622275	65,42436975
k ₁			0,9676		11,4477
k ₂			0		-10,5338
r	0,746860094	0,699428338	0,541202365	0,449332839	



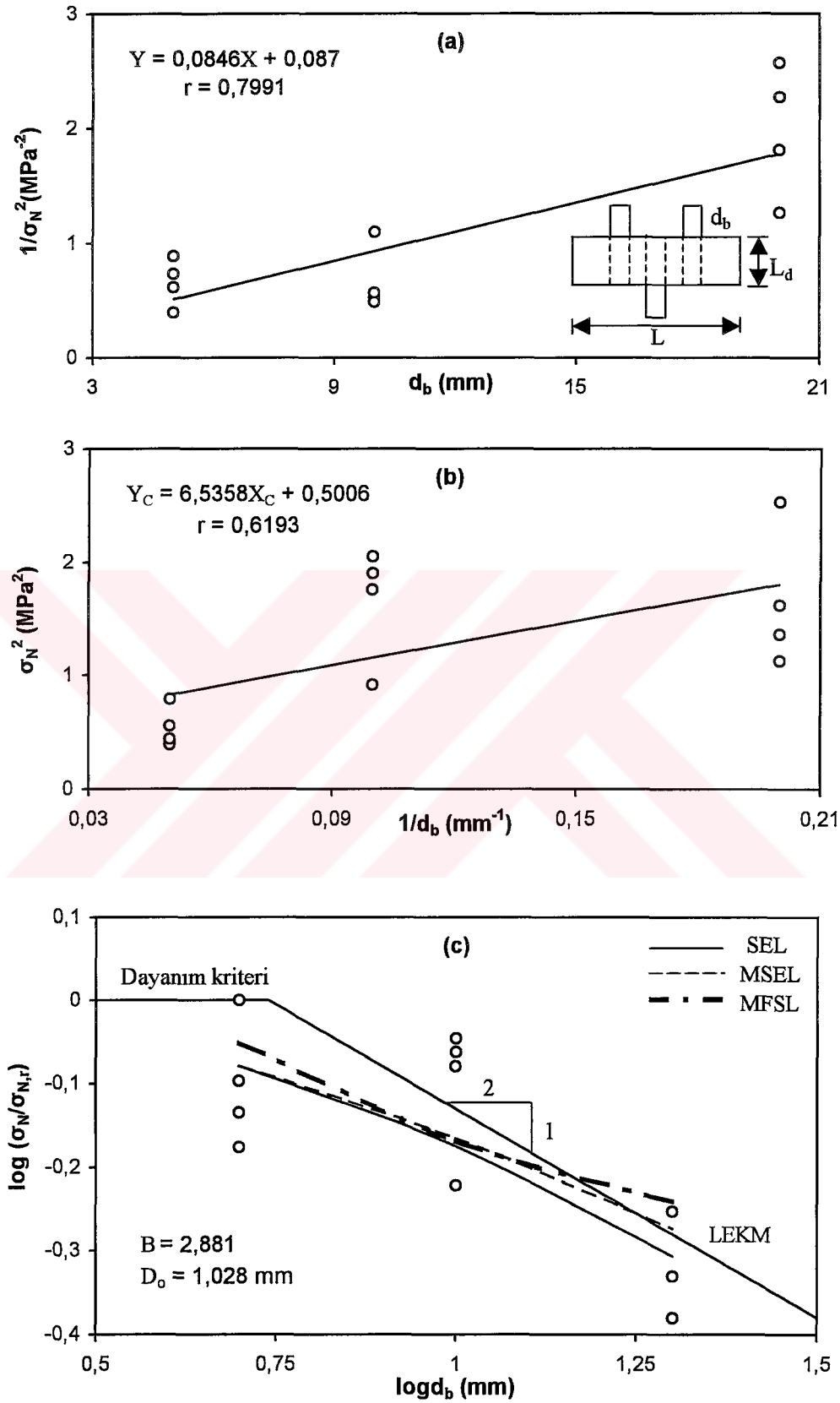
Şekil 3.5. Direkt yüklemede regresyon grafikleri, a)lineer I analizi, b)MFSL analizi, c) karşılaştırma (nervürlü donatı)

Çizelge 3.7. Direkt yüklemde deney bilgileri (düz donatı)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
t (mm)	10	10	10	10	20	20	20	20	20	40	40	40	40	40
d _b (mm)	5	5	5	5	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20
L _d (mm)	15	15	15	15	30	30	30	30	30	60	60	60	60	60
f _c (MPa)	11,3	11,3	11,3	10,1	8,3	8,3	8,3	10,1	10,1	8,3	8,3	8,3	10,1	10,1
P _u (N)	750	600	500	550	2600	2700	2500	1800	1800	5600	4700	5000	6700	6700
σ _N (MPa)	1,5915	1,2732	1,061	1,1671	1,3793	1,4324	1,3263	0,9549	0,9549	0,7427	0,6234	0,6631	0,8886	0,8886
X=d _b (mm)	5	5	5	5	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20
Y=1/σ _N ² (MPa ⁻²)	0,3948	0,6169	0,8883	0,7341	0,5256	0,4874	0,5685	1,0966	1,0966	1,8128	2,5735	2,274	1,2664	1,2664
X'=1/d _b (mm ⁻¹)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Y'=1/σ _N ² d _b (MPa√mm) ⁻²	0,079	0,1234	0,1777	0,1468	0,0526	0,0487	0,0568	0,1097	0,1097	0,0906	0,1287	0,1137	0,0633	0,0633
X*=Lnd _b (mm)	1,6094	1,6094	1,6094	1,6094	2,3026	2,3026	2,3026	2,3026	2,3026	2,9957	2,9957	2,9957	2,9957	2,9957
Y*=Lnσ _N (MPa)	0,4647	0,2416	0,0592	0,1546	0,3216	0,3593	0,2824	-0,046	-0,0461	-0,297	-0,473	-0,411	-0,118	-0,118
X _C =1/d _b (mm ⁻¹)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	2,533	1,6211	1,1258	1,3622	1,9026	2,0518	1,759	0,9119	0,9119	0,5516	0,3886	0,4398	0,7896	0,7896
σ _{N,r} (MPa)	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915	1,5915
X _K =logd _b (mm)	0,699	0,699	0,699	0,699	1	1	1	1	1	1,301	1,301	1,301	1,301	1,301
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,079	-0,079	-0,079	-0,079	-0,144	-0,144	-0,144	-0,144	-0,1442	-0,307	-0,307	-0,307	-0,307	-0,307
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,078	-0,078	-0,078	-0,078	-0,165	-0,165	-0,165	-0,165	-0,1647	-0,274	-0,274	-0,274	-0,274	-0,274
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,071	-0,071	-0,071	-0,071	-0,169	-0,169	-0,169	-0,169	-0,1686	-0,241	-0,241	-0,241	-0,241	-0,241

Çizelge 3.8. Direkt yüklemede deney sonuçları (düz donatı)

DEĞİŞKEN	LINEER I		LINEER II		NONLINEER		MFSL		MSEL	
	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER
M (MPa√mm)	0,108713179	0,124409268	0,122840706							
M ² (MPa ² mm)	0,011818555	0,015477666	0,015040743							
N (mm)	1,027900989	4,587347754	3,369486058							
A (Eğim)	0,084612711	0,296384982				6,535821211				
C	0,086973489	0,064609225				0,500575777				
C ⁻	1,114413546	0,097423276				1,224184554				
ω _A	0,217230544	0,53513215				0,366028712				
ω _C	2,879998497	0,309473664				0,602485329				
ω _{C⁻}	0,102026435	0,098156464				0,117823744				
m	0,722108865	0,649875022				0,780088292				
ω _{KIC}	0,108615272	0,267566075				0,183014356				
ω _{Gr}	2,888179436	0,618175029				0,704957864				
ω _{Gr}	3,075141374	0,820379634				0,940376163				
B _f (MPa)	3,390834194	1,836842432	2,11277286			4,741956977			19,89613725	
σ ₀ (MPa)	0	0	0			0,7075138			-18,37720965	
ε _p (mm)	1,027900989	4,587347754	5,2611			13,05860703			256,3073	
ε _p /d _{max}	0,215945586	0,96372852	1,105273109			2,74298467			53,84607143	
k ₁			1,1657						12,5015	
k ₂			0						-11,5471	
r	0,79906195	0,474763099	0,714282857			0,619273768				



Şekil 3.6. Direkt yüklemede regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi, c) karşılaştırma (düz donatı)

3.1.2.2. Direkt yükleme deney sonuçlarının karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.6. ve 3.8. çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri nervürlü donatılı numunede, düz donatılı numuneye göre artış göstermekte ve en çok artış lineer II analizinde görülmektedir .
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N , nervürlü donatılı numunede, düz donatılı numuneye göre artış göstermekte ve en çok artış lineer II analizinde görülmektedir.
- 3) Her iki numunede numune sayısı uniform olmadığı için lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , yüksek olduğu görülür ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Her iki grupta numune sayısı aynı olmadığı için lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, yüksek olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) Deney datalarının band genişliği büyük olduğundan MFSL analizinde eğim değişimi ω_{Ac} , eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , büyük çıktığı görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y eksenini üzerinde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_{C-} , düz donatılı numunede nervürlü donatılı numuneye göre daha düşük olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m , düz donatıda daha düşük fakat lineer I analizinde bu değerlerin yüksek olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi, ω_{KIC} , nervürlü donatılı numunede diğer numuneye göre daha az, fakat MFSL analizinde bu değerlerin yüksek olduğu görülür.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Gf} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{cf} , nervürlü donatıda düz donatıya göre daha azdır. Nervürlü donatıda lineer I analizinin değerleri, düz donatılı numune için lineer II ve MFSL değerlerinin daha düşük olduğu görülür.
- 10) Bf değerinin nervürlü donatılı numunede, düz donatılı numuneye göre daha az ve birbirlerine daha yakın olduğu görülür.

11) Numunede artık dayanım σ_0 , nervürlü donatıda düz donatıya göre daha fazla olduğu görülür. Bunun nedeni ise nervürlü donatının sıyrılmaya karşı daha dayanıklı olduğuna bağlanabilir. Bu değerin MSEL analizinde negatif olduğu görülür.

12) Karakteristik uzunluk ℓ_p , nervürlü donatıda düz donatıya göre daha fazla, ℓ_p / d_{max} oranı ise bundan dolayı nervürlü donatıda daha yüksektir.

13) MSEL ve non lineer analizlerinde k_1 katsayısı nervürlü donatıda daha az ve bu sonucun Bf_i değerlerine uyumlu olduğu görülür. Bazant'ın boyut etkisinde nervürlü donatı düz donatıya göre daha düşük Bf_i değerlerine sahiptir ($k_1\sigma_{N,r}$ aderans ekinde dayanım değerini ifade etmektedir).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

Nervürlü donatı → a) $r = 0,7469$ b) $r = 0,6994$ c) $r = 0,5412$ d) $r = 0,4493$

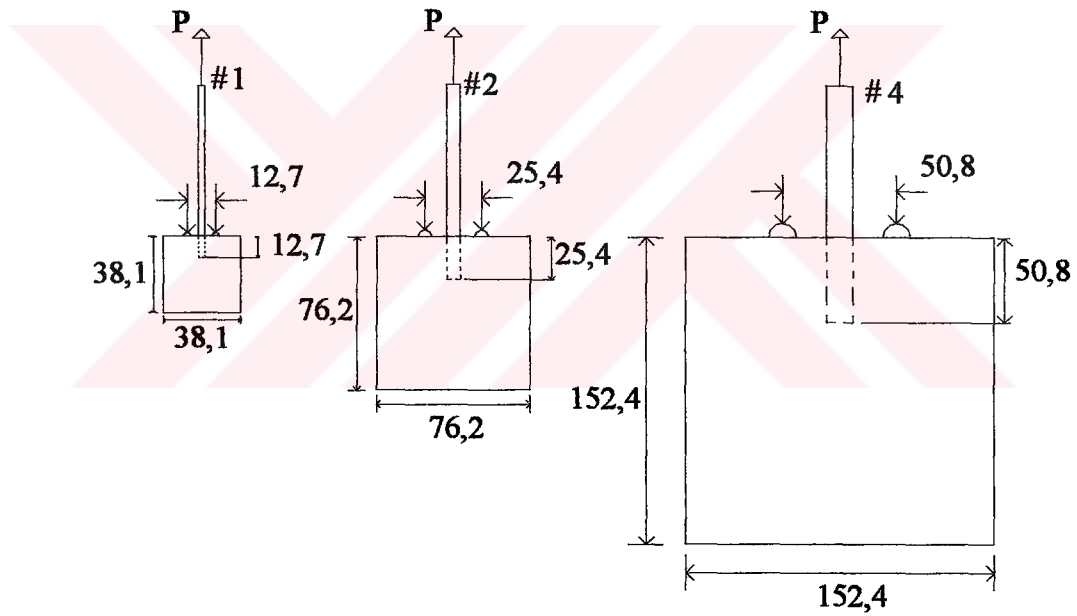
Düz donatı → a) $r = 0,7991$ b) $r = 0,4748$ c) $r = 0,7143$ d) $r = 0,6193$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri nervürlü donatılıda, düz donatılı numuneye göre daha yatay olduğu görülür (Şekil 3.5c ve 3.6c).

3.2. Dolaylı Çekme Deneyi

3.2.1. Çekip çıkarma deneyi

Dolaylı çekme deneyi olan çekip çıkarma deneyi Bazant ve Şener [15] tarafından 1988 yılında Northwestern Üniversitesinde yapılmıştır. Test numuneleri küp şeklinde olup ve çelik donatı numunenin bir kenarına paralel ve üst yüzeyinin merkezinden dışarıya çıkmış konumundadır. Boyut etkisini belirlemek için geometrik benzer farklı boyutlu numuneler kullanılmış ve yükseklikleri $D = 38,1; 76,2; 152,4$ mm olarak test edilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Çekip çıkarma deneyinin numune geometrileri (tüm boyutlar mm)

Çeliğin akma dayanımı 414 MPa ve çapları sırası ile $d_b = 2,9; 6,4; 12,7$ mm' dir. Çelik çubuğun numune içinde gömülü mesafesi sırası ile $L_d = 12,7; 25,4$ ve 50,8 mm olarak alınmıştır. Tüm numuneler aynı beton malzemesinden yapılmış ve karışım oranı (su:çimento:kum:çakıl) 0,6:1:2:2 (ağırlıkça) olarak düzenlenmiştir.

Agrega maksimum dane çapı $d_{max} = 6,4$ mm olarak seçilmiştir. Betonun basınç dayanımını belirlemek için üç adet standard silindir numunesi alınmış ve bu silindirlerin çapı 76,2 mm, yüksekliği 152,4 mm' dir. Elde edilen basınç dayanımların ortalaması $f_c = 45,8$ MPa olarak ölçülmüştür.

Göçmedeki nominal gerilme aşağıdaki denklemden hesaplanabilir:

$$\sigma_N = T_u / (\pi d_b L_d) \quad (3.4)$$

T_u : göçmedeki çekme kuvveti

d_b : çelik çubuğun nominal çapı

L_d : donatının beton içinde gömülü uzunluğudur.

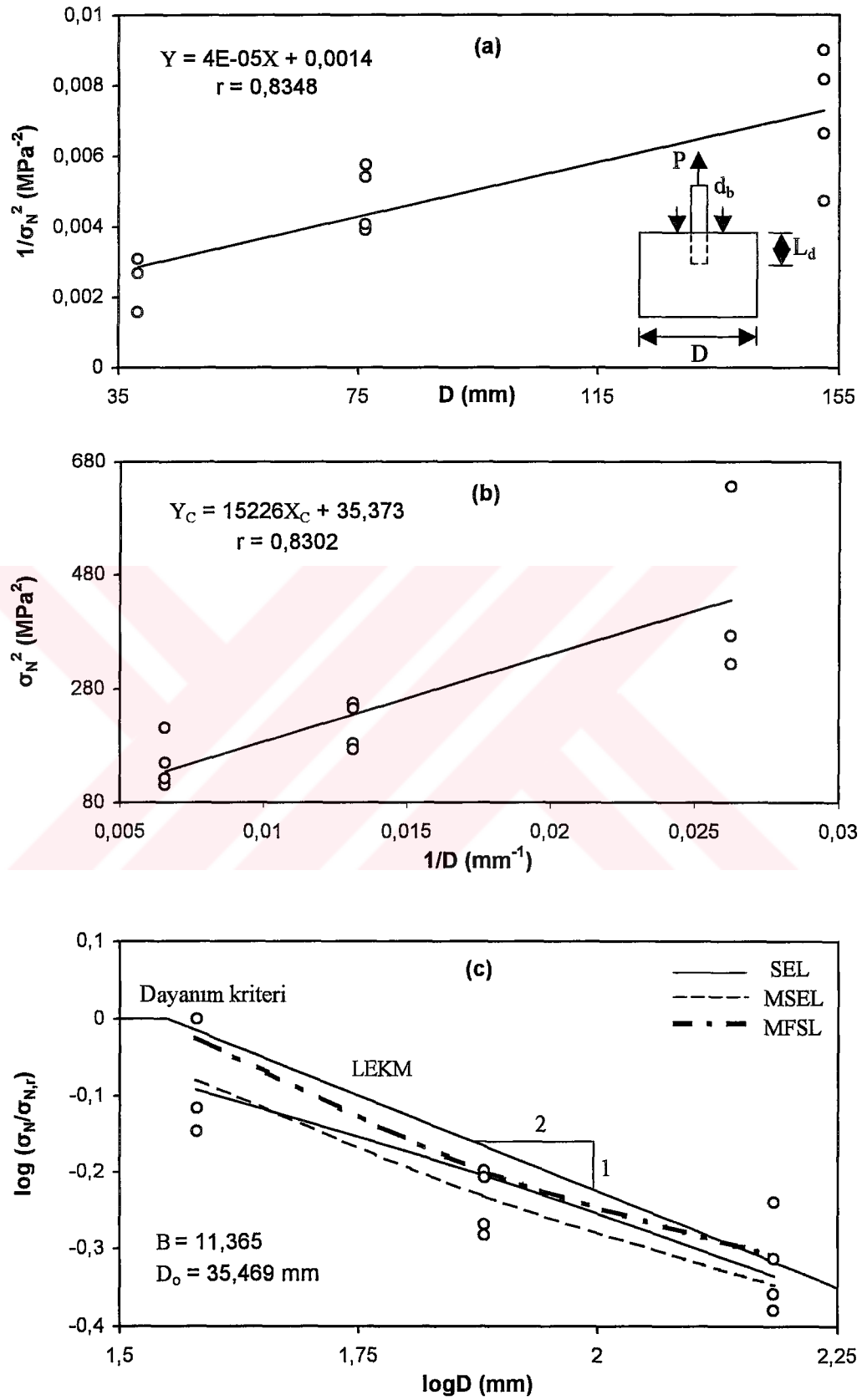
3.2.1.1. Çekip çıkarma deney analizleri

Çizelge 3.9. Çekip çıkarma deney bilgileri

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11
d_b (mm)	2,9	2,9	2,9	6,4	6,4	6,4	6,4	12,7	12,7	12,7	12,7
πd_b (mm)	9,1106187	9,110619	9,110619	20,10619	20,10619	20,10619	20,10619	39,89823	39,8982	39,8982	39,8982
l_d (mm)	12,7	12,7	12,7	25,4	25,4	25,4	25,4	50,8	50,8	50,8	50,8
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	152,4
σ_y (MPa)	414	414	414	414	414	414	414	414	414	414	414
f_c (MPa)	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8
T_u (N)	2917,888	2081,664	2232,896	6938,88	8166,528	8006,4	6725,376	29463,55	24873,2	21354,8	22417,9
σ_N (MPa)	25,218371	17,99115	19,2982	13,58707	15,99094	15,67739	13,16901	14,53677	12,272	10,5361	11,0606
$X=D$ (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	152,4
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,0015724	0,003089	0,002665	0,005417	0,003911	0,004069	0,005766	0,004732	0,00664	0,00901	0,00817
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,0262467	0,026247	0,026247	0,013123	0,013123	0,013123	0,013123	0,006562	0,00656	0,00656	0,00656
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻¹ mm)	4,127E-05	8,11E-05	7,05E-05	7,11E-05	5,13E-05	5,34E-05	7,57E-05	3,11E-05	4,4E-05	5,9E-05	5,4E-05
$X^*=LnD$ (mm)	3,6402143	3,640214	3,640214	4,333361	4,333361	4,333361	4,333361	5,026509	5,02651	5,02651	5,02651
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	3,2275727	2,88988	2,960012	2,609119	2,772022	2,752219	2,577866	2,676681	2,50732	2,35481	2,40339
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,0262467	0,026247	0,026247	0,013123	0,013123	0,013123	0,013123	0,006562	0,00656	0,00656	0,00656
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	635,96623	323,6817	372,4207	184,6085	255,71	245,7805	173,4227	211,3176	150,601	111,009	122,336
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	25,21837	25,21837	25,21837	25,21837	25,21837	25,21837	25,21837	25,21837	25,2184	25,2184	25,2184
$X_K=logD$ (mm)	1,580925	1,580925	1,580925	1,881955	1,881955	1,881955	1,881955	2,182985	2,18298	2,18298	2,18298
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,092555	-0,09255	-0,09255	-0,21459	-0,21459	-0,21459	-0,21459	-0,33469	-0,33469	-0,3347	-0,3347
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,089974	-0,08997	-0,08997	-0,21178	-0,21178	-0,21178	-0,21178	-0,34638	-0,34638	-0,3464	-0,3464
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,055092	-0,05509	-0,05509	-0,18863	-0,18863	-0,18863	-0,18863	-0,30872	-0,30872	-0,3087	-0,3087

Çizelge 3.10. Çekip çıkarma deney sonuçları

DEĞİŞKEN	LINEER I DEĞER	LINEER II DEĞER	NONLINEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa√m)	5,076151612	4,673674758	4,839360649		
M ² (MPa ² m)	25,76731519	21,84323574	23,41941149		
N (mm)	35,46874389	17,7665537	20,6271142		
A (Eğim)	3,88089E-05	0,000813366		15225,72433	
C	0,001376501	4,57808E-05		35,3730045	
C ⁻	0,005005835	5,74252E-05		253,3504466	
ω _A	0,219816833	0,710533515		0,223834234	
ω _C	0,648608772	0,205949578		1,571830349	
ω _{C⁻}	0,080067535	0,078732597		0,105237221	
m	0,503977688	0,455618756		0,608998731	
ω _{KIC}	0,109908417	0,355266757		0,111917117	
ω _{0f}	0,684845077	0,739779092		1,587687756	
ω _{cf}	0,850772808	0,896714719		1,771505579	
B _f (MPa)	26,95328359	35,06363123	33,69525538	2,695240647	60,11302857
σ ₀ (MPa)	0	0	0	5,94752087	2,315046366
ℓ _p (mm)	35,46874389	17,7665537	12,5424	430,4334491	3,7815
ℓ _p /d _{max}	6,4	2,776024015	1,95975	67,25522642	0,590859375
k ₁			1,6334		2,3837
k ₂			0		0,0918
r	0,834805367	0,424735212	0,868619595	0,830180703	



Şekil 3.8. Çekip çıkarmada regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi c) karşılaştırma

3.2.1.2. Çekip çıkarma deneyinde sonuç karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.10. çizelgesinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri tüm analizlerde birbirine yakın, fakat lineer I analizinde daha büyük olduğu görülmektedir .
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N , lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde birbirleri ile farklı olduğu görülür. Bunun nedeni ise deney datalarının farklı ağırlıklara sahip olmalarından meydana gelmektedir. Lineer I'de olan değer lineer II'nin yaklaşık iki katıdır.
- 3) Deneyde numune sayısı düzgün olmadığı için lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , yüksek olduğu görülür ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Deneyde numune sayısı düzgün olmadığı için lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, yüksek olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) Deney datalarının band genişliği yüksek olduğundan MFSL analizinde eğim değişimi ω_{Ac} , yüksek ve eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , çok büyük çıktığı görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y ekseninde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_{C-} , analizlerde birbirlerine yakın olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m , lineer II analizinde daha düşük olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , lineer I ve MFSL analizlerinde lineer II analizine göre daha az olmaktadır.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Of} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{cf} , lineer I analizinde lineer II ve MFSL analizlerine göre daha az olmaktadır.
- 10) Bf_1 değerinin lineer I analizinde daha az olduğu görülür. Lineer II ile non-lineer değerlerini karşılaştırıldığında birbirlerine daha yakın olmakta, fakat bu değer MFSL analizinde çok düşük olduğu görülür.
- 11) Numunede artık dayanım değeri σ_0 , MSEL analizinde düşük olduğu görülür.
- 12) A_c/C_c oranı yüksek olduğu için karakteristik uzunluk ℓ_p , yüksektir. ℓ_p / d_{max} oranı ise bundan dolayı yüksek çıktığı görülür.

13) MSEL analizinde k_1 katsayısı, Bazant'ın boyut etkisinde, Kim'in boyut etkisine göre daha düşük olduğu görülür ($k_1\sigma_{N,r}$ donatının çekip çıkarmaya karşı dayanım değerlerini ifade etmektedirler).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

a) $r = 0,8348$ b) $r = 0,4247$ c) $r = 0,8686$ d) $r = 0,8302$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri birbirlerine yakın olduğu ve SEL eğrisi daha iyi uyduğu görülür (Şekil 3.10c).



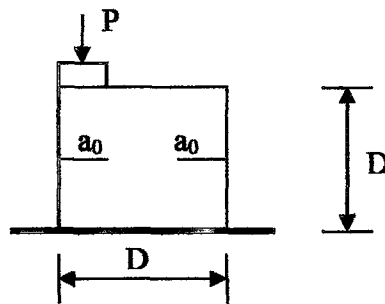
3.3. Basınç Deneyleri

3.3.1. Dışmerkez basınç deneyi

Dışmerkez basınç deneyi Barr, Abusiaf ve Şener [20] tarafından 1996 yılında Wales Cardiff Üniversitesinde yapılmıştır. Numunelerin kesiti kare, çift simetrik çentikli olup ve sabit kalınlıktan oluşmuşlardır (Şekil 3.9). Beş farklı numunede $D = 100, 150, 200, 300, 400$ mm ve kalınlık $b = 100$ mm tüm numuneler için geçerlidir. Çentiğin eleman boyutuna oranı tüm numuneler için 0,25'e eşittir. Deneyde dört farklı beton sınıfı, C50-C70-C80-C90 kullanılmıştır. Tüm numuneler aynı beton malzemesinden yapılmış ve karışım oranı (çimento:kum:çakıl) ve su-çimento oranı sırası ile C50 için 1:1,87:3,13 ve 0,50; C70 için 1:1,87:3,13 ve 0,46; C80 için 1:1,80:3,00 ve 0,34; C90 için 1:1,76:2,94 ve 0,30 (ağırlıkça) olarak düzenlenmiş ve ayrıca beton için silis dumanı ile süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Agreganın maksimum dane çapı $d_{max} = 10$ mm olarak seçilmiştir. Betonun basınç dayanımını belirlemek için 15 adet standard küp numunesi alınmış, küplerin kenar uzunlukları 100 mm' dir. Elde edilen 28 günlük basınç dayanımların f_c değerleri 3.11, 3.13, 3.15 ve 3.17 çizelgelerinde verilmiştir. Maksimum gerilme aşağıdaki denklemden elde edilir.

$$\sigma_N = (P_u + mg/2)/A_{lig} - (P_u e y)/I \quad (3.5)$$

σ_N : maksimum gerilme , P_u : maksimum yük , mg : numune ağırlığı , A_{lig} : kırılmamış bölgenin kesit alanı , e : dışmerkezlik , y : kesit ortası ile çatlak başı arasındaki mesafe, I : kırılmamış bölgenin eylemsizlik momenti.



Şekil 3.9. Dışmerkez basınçta numune geometrisi ve yükleme şekli

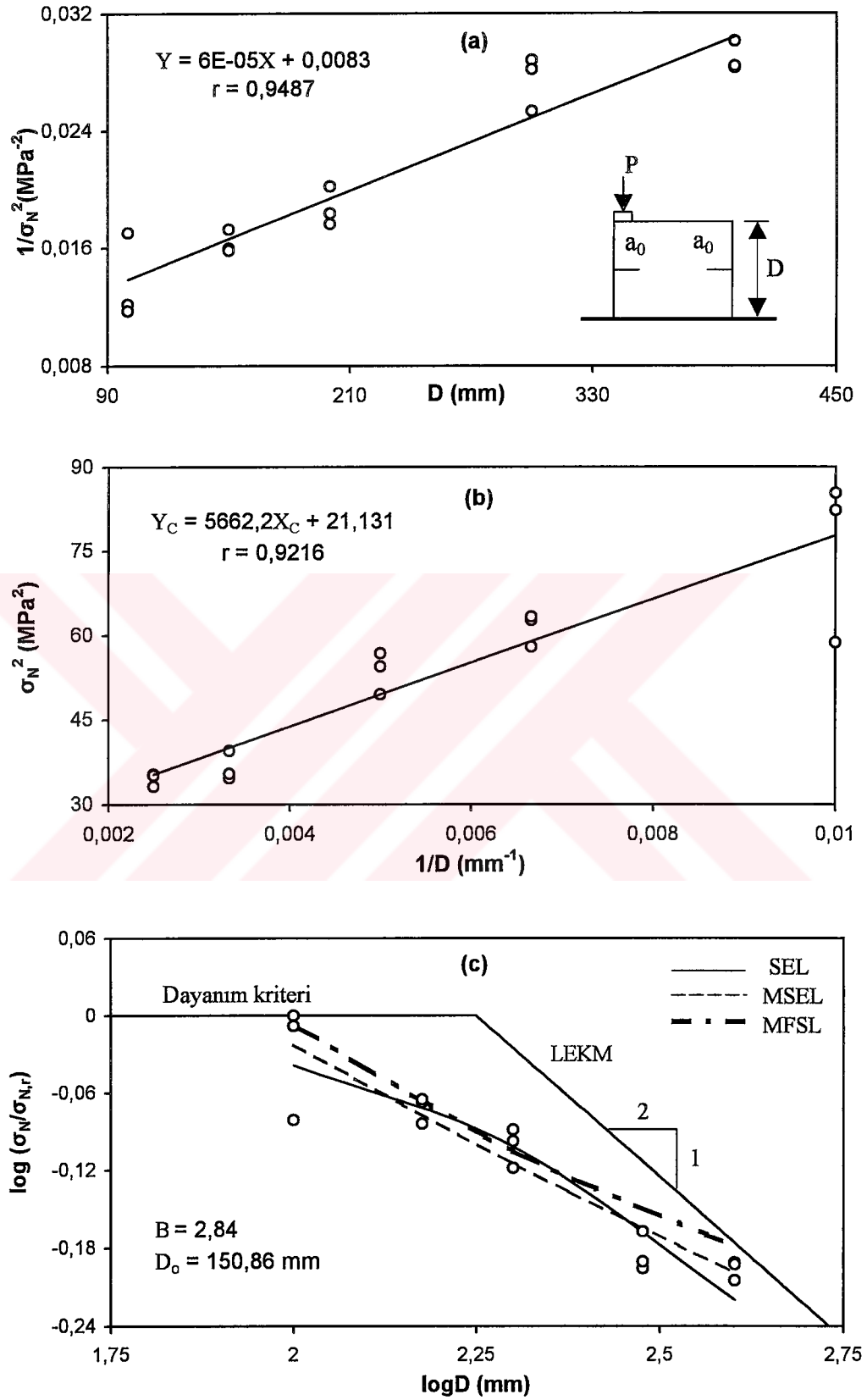
3.3.1.1. Dışmerkez basınçta deney analizleri

Çizelge 3.11. Dışmerkez basınçta deney bilgileri (C50)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15
b (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
mg (N)	25	25	25	56,25	56,25	56,25	100	100	100	225	225	225	400	400	400
A_{lig} (mm ²)	5000	5000	5000	7500	7500	7500	10000	10000	10000	15000	15000	15000	20000	20000	20000
e (mm)	45	45	45	67,5	67,5	67,5	90	90	90	135	135	135	180	180	180
I (mm ⁴)	1E+06	1E+06	1E+06	4E+06	4E+06	4E+06	8E+06	8E+06	8E+06	3E+07	3E+07	3E+07	7E+07	7E+07	7E+07
D (mm)	100	100	100	150	150	150	200	200	200	300	300	300	400	400	400
y (mm)	25	25	25	37,5	37,5	37,5	50	50	50	75	75	75	100	100	100
a ₀ (mm)	25	25	25	37,5	37,5	37,5	50	50	50	75	75	75	100	100	100
f _c (MPa)	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1
P _u (N)	10310	8710	10500	13500	12980	13560	16000	16780	17130	20100	21440	20330	27060	26240	27000
σ _N (MPa)	9,0703	7,662	9,238	7,9163	7,611	7,9515	7,035	7,3782	7,532	5,889	6,282	5,956	5,943	5,763	5,93
X=D (mm)	100	100	100	150	150	150	200	200	200	300	300	300	400	400	400
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,0122	0,017	0,012	0,016	0,017	0,0158	0,0202	0,0184	0,018	0,029	0,025	0,028	0,028	0,03	0,0284
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,0067	0,007	0,0067	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0025
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa [√] mm) ⁻²	0,0001	2E-04	1E-04	0,0001	1E-04	0,0001	0,0001	9E-05	9E-05	1E-04	8E-05	9E-05	7E-05	8E-05	7E-05
$X^*=LnD$ (mm)	4,6052	4,605	4,605	5,0106	5,011	5,0106	5,2983	5,2983	5,298	5,704	5,704	5,704	5,991	5,991	5,9915
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	2,205	2,036	2,223	2,0689	2,03	2,0734	1,9509	1,9985	2,019	1,773	1,838	1,784	1,782	1,751	1,78
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,0067	0,007	0,0067	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0025
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	82,27	58,71	85,33	62,667	57,93	63,226	49,491	54,438	56,73	34,67	39,46	35,47	35,32	33,21	35,165
σ _{N,r} (MPa)	9,2375	9,238	9,238	9,2375	9,238	9,2375	9,2375	9,2375	9,238	9,238	9,238	9,238	9,238	9,238	9,2375
$X_K=logD$ (mm)	2	2	2	2,1761	2,176	2,1761	2,301	2,301	2,301	2,477	2,477	2,477	2,602	2,602	2,6021
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,022	-0,022	-0,022	-0,077	-0,077	-0,077	-0,115	-0,115	-0,115	-0,17	-0,165	-0,165	-0,199	-0,199	-0,199
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,028	-0,028	-0,028	-0,071	-0,071	-0,071	-0,107	-0,107	-0,107	-0,16	-0,164	-0,164	-0,21	-0,21	-0,21
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,009	-0,009	-0,009	-0,069	-0,069	-0,069	-0,107	-0,107	-0,107	-0,15	-0,153	-0,153	-0,18	-0,18	-0,18

Çizelge 3.12. Dışmerkez basınçta deney sonuçları (C50)

	LINEER I	LINEER II	NONLINEER	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER
M (MPa√m)	4,256110958	4,169951695	4,224546621		
M ² (MPa ² m)	18,11448048	17,38849714	17,84679415		
N (mm)	150,8596383	136,1714935	143,0290891		
A (Eğim)	5,52045E-05	0,007831125		5662,18082	
C	0,008328124	5,75093E-05		21,13139287	
C ⁻	0,021025148	0,00010058		52,27338738	
ω _A	0,092391945	0,162959386		0,116781073	
ω _C	0,155539573	0,135636156		0,191266083	
ω _{C⁻}	0,026127518	0,03383441		0,03373217	
m	0,208766596	0,261105836		0,260316838	
ω _{KIC}	0,046195972	0,081479693		0,058390537	
ω _{Gr}	0,180911111	0,212021056		0,224099383	
ω _{Gr}	0,242399589	0,291084942		0,300695019	
Bf _i (MPa)	10,95787673	11,30024667	11,17037932	3,662225903	20,87675
σ ₀ (MPa)	0	0	0	4,596889477	2,70196875
ℓ _p (mm)	150,8596383	136,1714935	130,2814	267,9511406	9,2485
ℓ _p /d _{max}	15,08596383	13,61714935	13,02814	26,79511406	0,92485
k ₁			1,2451		2,26
k ₂			0		0,2925
r	0,948736001	0,862206472	0,944563391	0,921628993	



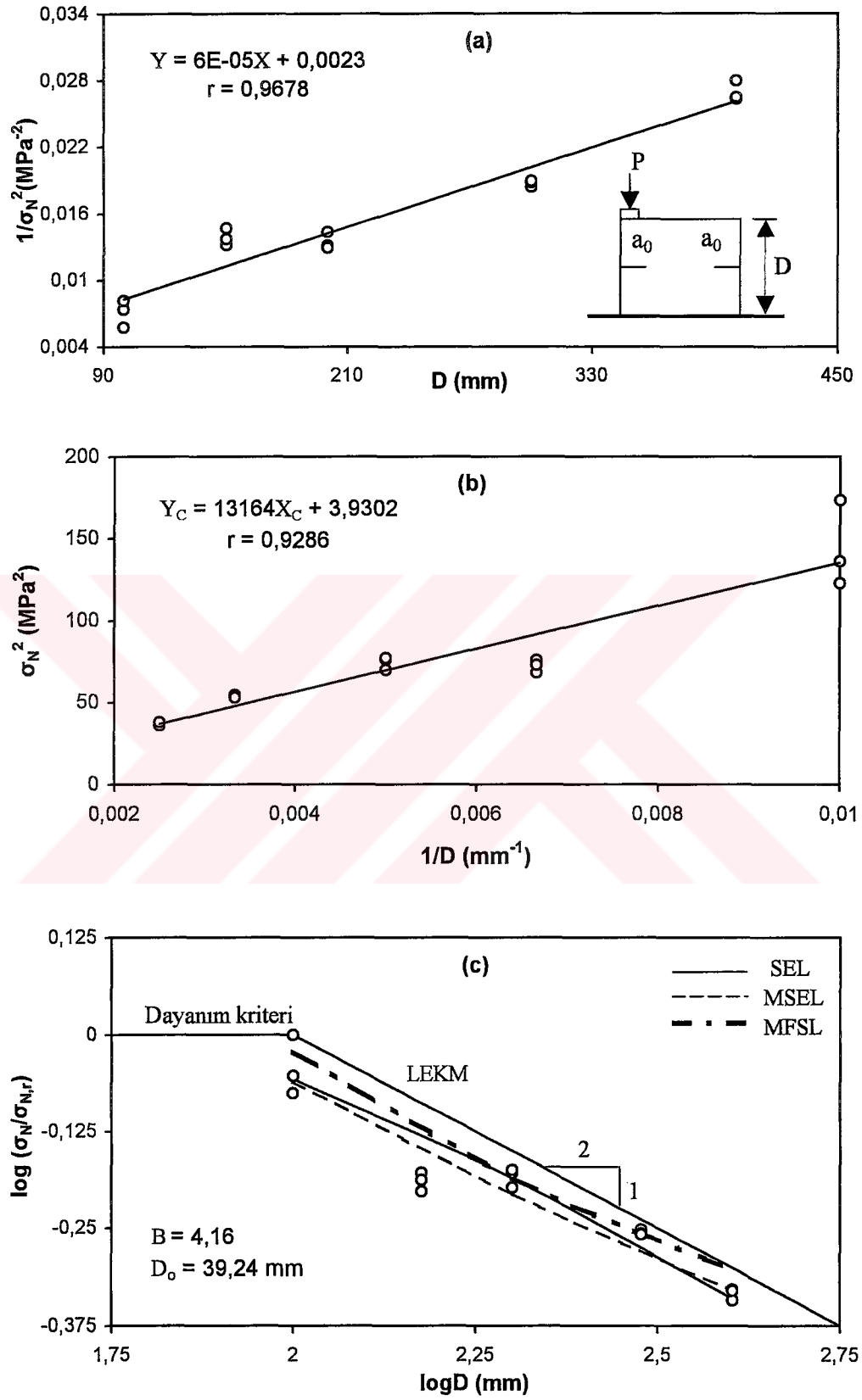
Şekil 3.10. Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi, c) karşılaştırma (C50)

Çizelge 3.13. Dışmerkez basınçta deney bilgileri (C70)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15
b (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
mg (N)	25	25	25	56,25	56,25	56,25	100	100	100	225	225	225	400	400	400
A _{lig} (mm ²)	5000	5000	5000	7500	7500	7500	10000	10000	10000	15000	15000	15000	20000	20000	20000
e (mm)	45	45	45	67,5	67,5	67,5	90	90	90	135	135	135	180	180	180
I (mm ⁴)	1E+06	1E+06	1E+06	4E+06	4E+06	4E+06	8E+06	8E+06	8E+06	3E+07	3E+07	3E+07	7E+07	7E+07	7E+07
D (mm)	100	100	100	150	150	150	200	200	200	300	300	300	400	400	400
y (mm)	25	25	25	37,5	37,5	37,5	50	50	50	75	75	75	100	100	100
a ₀ (mm)	25	25	25	37,5	37,5	37,5	50	50	50	75	75	75	100	100	100
f _c (MPa)	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03	66,03
P _u (N)	13260	12590	14970	14080	14870	14570	19840	19000	20000	25180	24900	24800	27240	28090	28010
σ _N (MPa)	11,666	11,08	13,17	8,2565	8,72	8,544	8,7246	8,355	8,795	7,379	7,297	7,267	5,983	6,17	6,1522
X=D (mm)	100	100	100	150	150	150	200	200	200	300	300	300	400	400	400
Y=1/σ _N ² (MPa ⁻²)	0,0073	0,008	0,006	0,0147	0,013	0,0137	0,0131	0,0143	0,013	0,018	0,019	0,019	0,028	0,026	0,0264
X'=1/D (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,0067	0,007	0,0067	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0025
Y'=1/σ _N ² D (MPa√mm) ⁻²	7E-05	8E-05	6E-05	1E-04	9E-05	9E-05	7E-05	7E-05	6E-05	6E-05	6E-05	6E-05	7E-05	7E-05	7E-05
X*=LnD (mm)	4,6052	4,605	4,605	5,0106	5,011	5,0106	5,2983	5,2983	5,298	5,704	5,704	5,704	5,991	5,991	5,9915
Y*=Lnσ _N (MPa)	2,4567	2,405	2,578	2,111	2,166	2,1452	2,1661	2,1229	2,174	1,999	1,987	1,983	1,789	1,82	1,8168
X _C =1/D (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,0067	0,007	0,0067	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0025
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	136,1	122,7	173,5	68,17	76,04	73	76,119	69,806	77,35	54,44	53,24	52,81	35,79	38,07	37,85
σ _{N,r} (MPa)	13,171	13,17	13,17	13,171	13,17	13,171	13,171	13,171	13,17	13,17	13,17	13,17	13,17	13,17	13,171
X _K =logD (mm)	2	2	2	2,1761	2,176	2,1761	2,301	2,301	2,301	2,477	2,477	2,477	2,602	2,602	2,6021
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,06	-0,06	-0,06	-0,14	-0,14	-0,14	-0,196	-0,196	-0,196	-0,27	-0,275	-0,275	-0,33	-0,33	-0,33
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,057	-0,057	-0,057	-0,138	-0,138	-0,138	-0,196	-0,196	-0,196	-0,28	-0,28	-0,28	-0,34	-0,34	-0,34
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,033	-0,033	-0,033	-0,118	-0,118	-0,118	-0,177	-0,177	-0,177	-0,26	-0,259	-0,259	-0,315	-0,315	-0,315

Çizelge 3.14. Dışmerkez basınçta deney sonuçları (C70)

DEĞİŞKEN	LİNEER I DEĞER	LİNEER II DEĞER	NONLİNEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa√m)	4,103085516	3,975269757	4,12666695		
M ² (MPa ² m)	16,83531075	15,80276964	17,02938011		
N (mm)	39,23698517	25,03399203	38,30557221		
A (Eğim)	5,9399E-05	0,001584152		13163,75597	
C	0,002330636	6,328E-05		3,930207727	
C ⁻	0,015992398	7,19929E-05		76,33086554	
ω _A	0,072097999	0,713752652		0,110821522	
ω _C	0,466667373	0,10921637		2,268811011	
ω _{C⁻}	0,028841476	0,041881651		0,050965053	
m	0,230451928	0,323207755		0,393305894	
ω _{KIC}	0,036049	0,356876326		0,055410761	
ω _{Gr}	0,472203938	0,722060291		2,271515972	
ω _{Gr}	0,532839024	0,813423834		2,369023195	
Bf _t (MPa)	20,71394188	25,12473848	21,08474935	11,65739706	50,1538509
σ ₀ (MPa)	0	0	0	1,982475152	0,6704039
ℓ _p (mm)	39,23698517	25,03399203	11,8981	3349,379189	4,8512
ℓ _p d _{max}	3,923698517	2,503399203	1,18981	334,9379189	0,48512
k ₁			2,6876		3,8079
k ₂			0		0,0509
r	0,96783263	0,362215406	0,953257573	0,928601098	



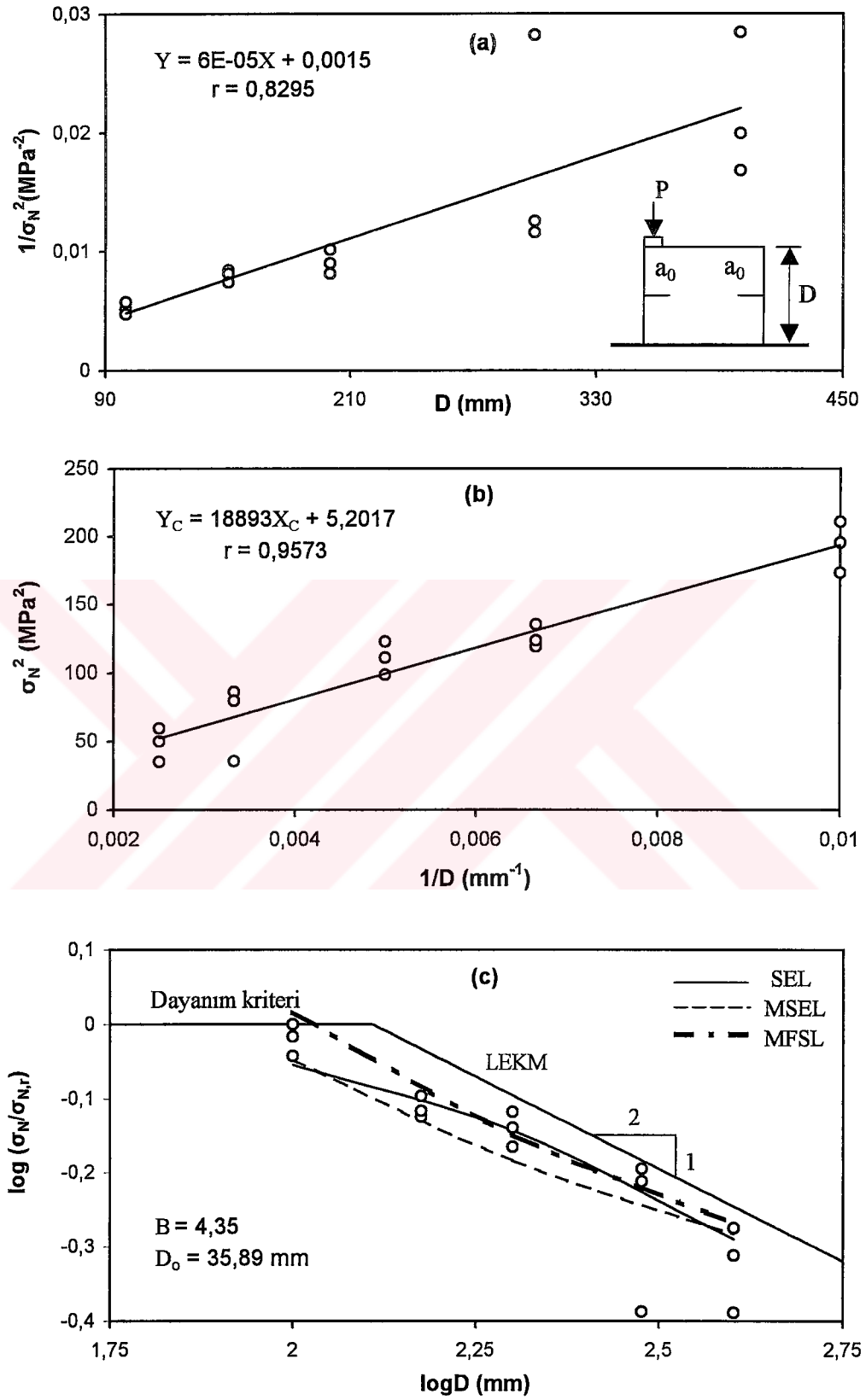
Şekil 3.11. Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi, c) karşılaştırma (C70)

Çizelge 3.15. Dış merkez basınçta deney bilgileri (C80)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15
b (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
mg (N)	25	25	25	56,25	56,25	56,25	100	100	100	225	225	225	400	400	400
A_{lig} (mm ²)	5000	5000	5000	7500	7500	7500	10000	10000	10000	15000	15000	15000	20000	20000	20000
e (mm)	45	45	45	67,5	67,5	67,5	90	90	90	135	135	135	180	180	180
I (mm ⁴)	1E+06	1E+06	1E+06	4E+06	4E+06	4E+06	8E+06	8E+06	8E+06	3E+07	3E+07	3E+07	7E+07	7E+07	7E+07
D (mm)	100	100	100	150	150	150	200	200	200	300	300	300	400	400	400
y (mm)	25	25	25	37,5	37,5	37,5	50	50	50	75	75	75	100	100	100
a ₀ (mm)	25	25	25	37,5	37,5	37,5	50	50	50	75	75	75	100	100	100
f _c (MPa)	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37	82,37
P _u (N)	15890	14980	16510	18610	18950	19840	23960	22580	25200	31670	30450	20330	35100	32220	27000
σ_N (MPa)	13,981	13,18	14,53	10,914	11,11	11,636	10,537	9,9302	11,08	9,282	8,925	5,956	7,712	7,078	5,93
X=D (mm)	100	100	100	150	150	150	200	200	200	300	300	300	400	400	400
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,0051	0,006	0,005	0,0084	0,008	0,0074	0,009	0,0101	0,008	0,012	0,013	0,028	0,017	0,02	0,0284
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,0067	0,007	0,0067	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0025
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa√mm) ⁻²	5E-05	6E-05	5E-05	6E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	4E-05	4E-05	4E-05	9E-05	4E-05	5E-05	7E-05
X*=LnD (mm)	4,6052	4,605	4,605	5,0106	5,011	5,0106	5,2983	5,2983	5,298	5,704	5,704	5,704	5,991	5,991	5,9915
Y*=Lnσ _N (MPa)	2,6377	2,579	2,676	2,3901	2,408	2,4541	2,3549	2,2956	2,405	2,228	2,189	1,784	2,043	1,957	1,78
X _C =1/D (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,0067	0,007	0,0067	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0025
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	195,46	173,7	211	119,12	123,5	135,39	111,04	98,609	122,8	86,16	79,65	35,47	59,47	50,1	35,165
σ _{N,r} (MPa)	14,526	14,53	14,53	14,526	14,53	14,526	14,526	14,526	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,526
X _K =logD (mm)	2	2	2	2,1761	2,176	2,1761	2,301	2,301	2,301	2,477	2,477	2,477	2,602	2,602	2,6021
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,017	-0,017	-0,017	-0,102	-0,102	-0,102	-0,163	-0,163	-0,163	-0,25	-0,25	-0,25	-0,313	-0,313	-0,313
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,019	-0,019	-0,019	-0,103	-0,103	-0,103	-0,163	-0,163	-0,163	-0,25	-0,249	-0,249	-0,31	-0,31	-0,31
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	0,0056	0,006	0,006	-0,079	-0,079	-0,079	-0,139	-0,139	-0,139	-0,22	-0,221	-0,221	-0,278	-0,278	-0,278

Çizelge 3.16. Dışmerkez basınçta deney sonuçları (C80)

DEĞİŞKEN	LINEER I DEĞER	LINEER II DEĞER	NONLINEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa√m)	4,173025271	4,262123731	4,812881496		
M^2 (MPa ² m)	17,41413991	18,1656987	23,16382829		
N (mm)	35,8923865	-8,027900892	33,96118586		
A (Eğim)	5,74246E-05	-0,000441926		18893,10593	
C	0,00147895	5,50488E-05		5,201745917	
C^-	0,012289264	5,26182E-05		109,1138285	
ω_A	0,186759279	3,181519546		0,083727813	
ω_C	2,965728058	0,156115667		1,858805139	
ω_C^-	0,093990349	0,071255297		0,038660017	
m	0,751010697	0,549889125		0,298345863	
ω_{kic}	0,09337964	1,590759773		0,041863907	
ω_{gr}	2,971602588	3,185347504		1,860689896	
ω_{cf}	2,797715636	3,041807078		1,934489511	
Bf_t (MPa)	25,839251	—	26,11642607	12,64045023	61,5379464
σ_o (MPa)	0	0	0	2,280733636	-0,0973242
e_p (mm)	35,8923865	-8,027900892	6,395	3632,070123	5,4996
e_p/d_{max}	3,58923865	-0,802790089	0,6395	363,2070123	0,54996
k_1			3,9045		4,2364
k_2			0		-0,0067
r	0,829457654	0,08660254	0,911427452	0,957340065	



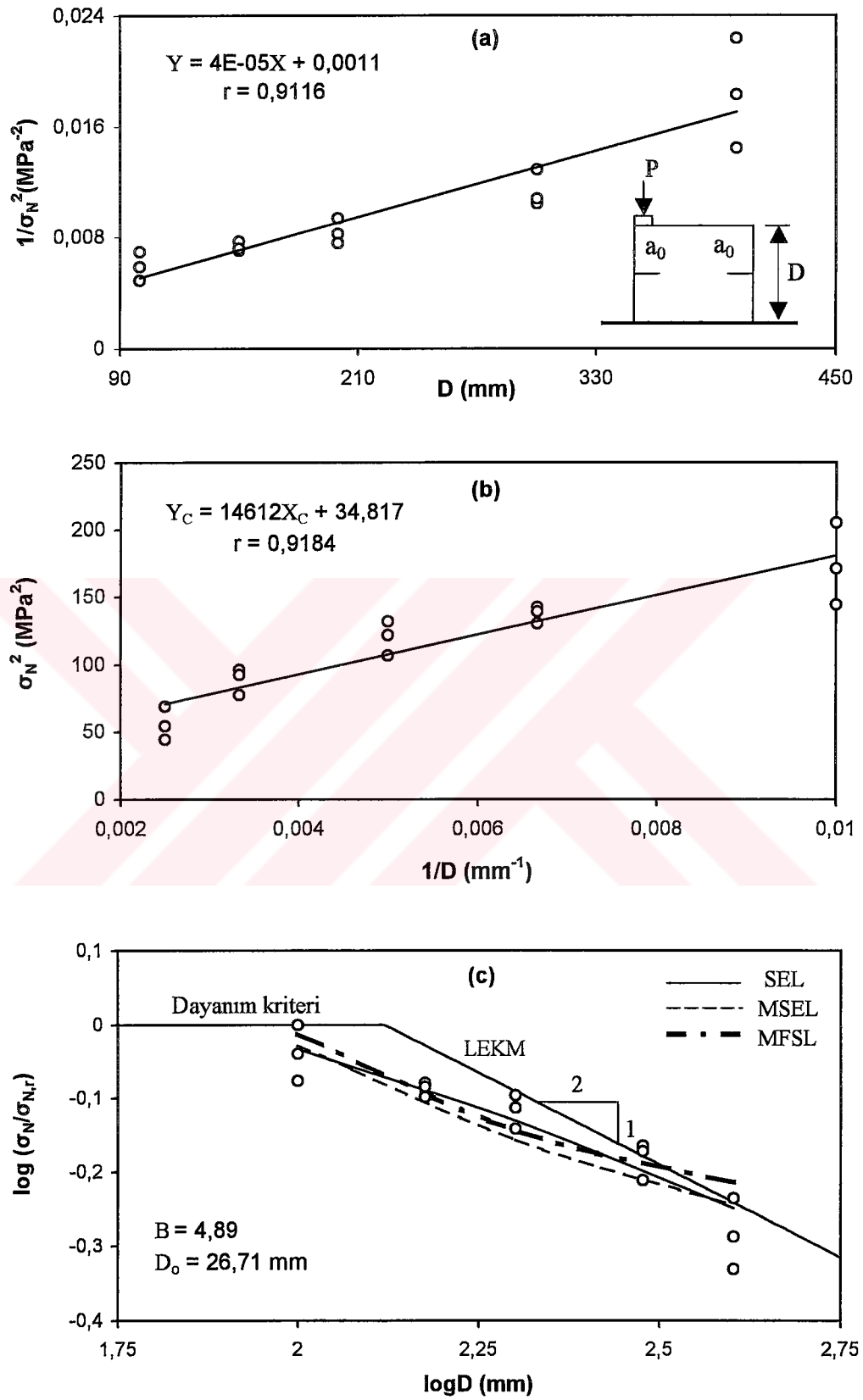
Şekil 3.12. Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi, c) karşılaştırma (C80)

Çizelge 3.17. Dış merkez basınçta deney bilgileri (C90)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15
b (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
mg (N)	25	25	25	56,25	56,25	56,25	100	100	100	225	225	225	400	400	400
A _{lig} (mm ²)	5000	5000	5000	7500	7500	7500	10000	10000	10000	15000	15000	15000	20000	20000	20000
e (mm)	45	45	45	67,5	67,5	67,5	90	90	90	135	135	135	180	180	180
I (mm ⁴)	1E+06	1E+06	1E+06	4E+06	4E+06	4E+06	8E+06	8E+06	8E+06	3E+07	3E+07	3E+07	7E+07	7E+07	7E+07
D (mm)	100	100	100	150	150	150	200	200	200	300	300	300	400	400	400
γ (mm)	25	25	25	37,5	37,5	37,5	50	50	50	75	75	75	100	100	100
a ₀ (mm)	25	25	25	37,5	37,5	37,5	50	50	50	75	75	75	100	100	100
f _c (MPa)	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4
P _u (N)	14860	16280	13650	20350	19460	20120	23510	25080	26100	33450	32870	30060	30430	37870	33650
σ _N (MPa)	13,074	14,32	12,01	11,935	11,41	11,8	10,339	11,03	11,48	9,805	9,634	8,81	6,685	8,321	7,393
X=D (mm)	100	100	100	150	150	150	200	200	200	300	300	300	400	400	400
Y=1/σ _N ² (MPa ⁻²)	0,0059	0,005	0,007	0,007	0,008	0,0072	0,0094	0,0082	0,008	0,01	0,011	0,013	0,022	0,014	0,0183
X'=1/D (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,0067	0,007	0,0067	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0025
Y'=1/σ _N ² D (MPa√mm) ⁻²	6E-05	5E-05	7E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	4E-05	4E-05	3E-05	4E-05	4E-05	6E-05	4E-05	5E-05
X*=LnD (mm)	4,6052	4,605	4,605	5,0106	5,011	5,0106	5,2983	5,2983	5,298	5,704	5,704	5,704	5,991	5,991	5,9915
Y*=Lnσ _N (MPa)	2,5706	2,662	2,486	2,4795	2,435	2,4681	2,336	2,4006	2,441	2,283	2,265	2,176	1,9	2,119	2,0005
X _C =1/D (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,0067	0,007	0,0067	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0025
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	170,94	205,2	144,2	142,44	130,3	139,24	106,9	121,67	131,8	96,13	92,82	77,62	44,68	69,25	54,656
σ _{N,r} (MPa)	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32	14,32
X _K =logD (mm)	2	2	2	2,1761	2,176	2,1761	2,301	2,301	2,301	2,477	2,477	2,477	2,602	2,602	2,6021
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,028	-0,028	-0,028	-0,091	-0,091	-0,091	-0,137	-0,137	-0,137	-0,2	-0,2	-0,2	-0,244	-0,244	-0,244
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,033	-0,033	-0,033	-0,087	-0,087	-0,087	-0,131	-0,131	-0,131	-0,2	-0,198	-0,198	-0,249	-0,249	-0,249
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,014	-0,014	-0,014	-0,082	-0,082	-0,082	-0,126	-0,126	-0,126	-0,18	-0,181	-0,181	-0,215	-0,215	-0,215

Çizelge 3.18. Dışmerkez basınçta deney sonuçları (C90)

DEĞİŞKEN	LİNEER I DEĞER	LİNEER II DEĞER	NONLİNEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa√m)	5,002397939	5,412520692	5,05171853		
M ² (MPa ² m)	25,02398514	29,29538024	25,5198601		
N (mm)	26,70692036	66,59867912	30,67748276		
A (Eğim)	3,99617E-05	0,002273351		14612,14491	
C	0,001067253	3,41351E-05		34,81734039	
C ⁻	0,010258435	4,66385E-05		115,1841374	
ω _A	0,125092469	0,314266052		0,119503113	
ω _C	1,189562349	0,12793017		0,306554353	
ω _{C⁻}	0,052483475	0,040849624		0,040426789	
m	0,419358491	0,315243422		0,311980336	
ω _{KİC}	0,062546234	0,157133026		0,059751556	
ω _{gr}	1,196121527	0,339307058		0,329023655	
ω _{cr}	1,30392869	0,432991604		0,417354171	
Bf _i (MPa)	30,61021155	20,97329965	28,84225979	5,243514975	30,246704
σ ₀ (MPa)	0	0	0	5,900622034	2,266856
ℓ _p (mm)	26,70692036	66,59867912	75,2935	419,6801003	15,7978
ℓ _p /d _{max}	2,670692036	6,659867912	7,52935	41,96801003	1,57978
k ₁			1,4156		2,1122
k ₂			0		0,1583
r	0,911592014	0,661664568	0,919021218	0,918368118	



Şekil 3.13. Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi, c) karşılaştırma (C90)

3.3.1.2. Dışmerkez basınç deneyinde sonuç karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.12., 3.14., 3.16. ve 3.18. çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri beton sınıfı arttıkça artış göstermekte, fakat C70 sınıfında bir düşüş görülür. Genel olarak değerler birbirlerine çok yakındır.
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N, lineer I analizinde beton mukavemeti arttıkça azalmakta fakat C80 sınıfında değerin eksi olduğu görülür. Lineer II analizinde beton mukavemeti arttıkça azalmakta ve C90 sınıfında yeniden değerin yükseldiği görünmekte fakat C80 sınıfında değerin eksi olduğu görülür. Non-lineer analizinde beton mukavemeti arttıkça azalmakta ve C90 sınıfında yeniden değerin yükseldiği görünmektedir. C80 sınıfı için non-lineer analizi en doğru sonucu vermektedir.
- 3) Lineer I analizinde; eğimin değişimi ω_A , C50 ve C70 için band genişliği az olduğundan sınır değerinin altındadır. C80 ve C90'da band genişliği fazla olduğu için sınır değerinin üstündedir. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , ise C50 haric diğer beton sınıflarında sınır değerinin üstündedir ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Lineer II analizinde; eğimin değişimi $\omega_{A'}$, tüm beton sınıfları için band genişliği fazla olduğundan sınır değerinin üstündedir. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, sınır değerlerinin altında olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) Deney dataların dağılımı düzgün olduğu için ve band genişliğinin dar olduğundan MFSL analizinde eğim değişimi ω_{Ac} , tüm sınıflar için sınır değerinin civarında olduğu görülür. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , C50 haric sınır değerinin üstünde çıktığı görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y ekseninde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_{C-} , analizlerde birbirlerine yakın olduğu görülür.

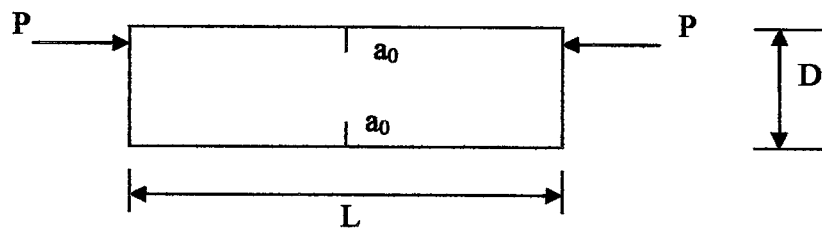
- 7) Band genişliğinin değeri m , tüm sınıflarda sınır değerinin üzerinde fakat C50’de daha düşük olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , lineer I analizinde birbirlerine yakın olduğu gözetlenir. Lineer II analizinde ise C50 haric diğer beton sınıflarında yüksek olduğu görülür. MFSL analizinde tüm sınıflarda çok yakın değerler çıktığı görülür.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Gf} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{cf} , lineer I ve lineer II analizlerinde C50 ve C70 için kabul edilebilecek değerler fakat C80 ve C90 için anlamlı değerler olmadığı gözetlenir. MFSL analizinde ise C50 ve C70 sınıflarının değerleri anlamlı olduğu görülür.
- 10) Bf_t değerinin beton mukavemeti arttıkça artışı görülür.
- 11) Numunede artık dayanım değeri σ_0 , MSEL analizinde daha düşük, fakat bu değer C80 için negatif olduğu görülür.
- 12) Karakteristik uzunluk ℓ_p , C70 ve C90 sınıflarında A_c/C_c oranı az olduğu için daha az çıktığı, C50 ve C80 için yüksek değerler olduğu gözetlenir. ℓ_p / d_{max} oranı ise bundan dolayı C70 ve C90 için düşük, C50 ile C80 için yüksek olduğu görülür.
- 13) MSEL analizinde k_1 katsayısı beton sınıfı arttıkça arttığı, fakat C90’da yeniden bu değer düşüğü görülür ($k_1\sigma_{N,r}$ basınç dayanım değerini ifade etmektedir).
- 14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:
- C50 → a) $r = 0,9487$ b) $r = 0,8622$ c) $r = 0,9446$ d) $r = 0,9216$
- C70 → a) $r = 0,9678$ b) $r = 0,3622$ c) $r = 0,9532$ d) $r = 0,9286$
- C80 → a) $r = 0,8294$ b) $r = 0,0866$ c) $r = 0,9114$ d) $r = 0,9573$
- C90 → a) $r = 0,9116$ b) $r = 0,6617$ c) $r = 0,9190$ d) $r = 0,9184$
- Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri’nin denklemlerine göre regresyon eğrileri C70 ve C90 sınıflarında birbirlerine daha yakın olduğu görülür (Şekil 3.10c, 3.11c, 3.12c ve 3.13c).

3.3.2. Çentikli numunede dışmerkez basınç deneyi

Çentikli numune üzerinde eksentrik basınç deneyi Bazant ve Pfeiffer [21] tarafından 1987 yılında yapılmıştır. İki tür malzeme, beton ve harç numuneler üzerinde deney yapılmıştır. Numunelerin kesiti dikdörtgen şeklinde olup ve uzunluk / yükseklik oranı 8:3 olarak düzenlenmiştir (Şekil 3.14). Yükseklik değerleri $D = 38,1; 76,2; 152,4$ ve $304,8$ mm ve kalınlık değeri $b = 38$ mm' dir. Bu dört farklı numune farklı beton karışımlardan elde edilmiş fakat her bir numune serisi aynı beton karışımından yapılmışlardır. Çentik derinliği $a_0 = D/6$ ve kalınlığı 2,5 mm olarak sertleşmiş numuneden elmas kesici ile elde edilmiştir. Beton karışımının oranı her iki numune için 1:2:2 (çimento-kum-çakıl) ve su/çimento oranı 0,6 olarak düzenlenmiştir (ağırlıkça). Maksimum dane çapı beton için $d_{max} = 12,7$ mm ve harç için $d_{max} = 4,83$ mm' dir. Betonun basınç dayanımını belirlemek için her karışımdan silindir numuneleri alınıp (çap=76,2 mm, yükseklik=152,4 mm) 28 günlük kürden sonra ortalama basınç dayanımı beton için $f_c = 33,5$ MPa ve harç için $f_c = 47,6$ MPa olarak elde edilmiştir. Çekme dayanımı $f_t = 6\sqrt{f_c}$ ve Young modülü $E_c = 57000\sqrt{f_c}$ olarak psi cinsinden basınç dayanımlarından elde edilmiştir. Maksimum yükteki nominal gerilme aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$\sigma_N = \alpha P_u / (bD) \quad (3.6)$$

P_u : maksimum yük, b : numunenin kalınlığı, D : numune derinliği, α : numune geometrisine bağlı olan sabit katsayı



Şekil 3.14. Dışmerkez basınçta numune geometrisi (simetrik çentikli)

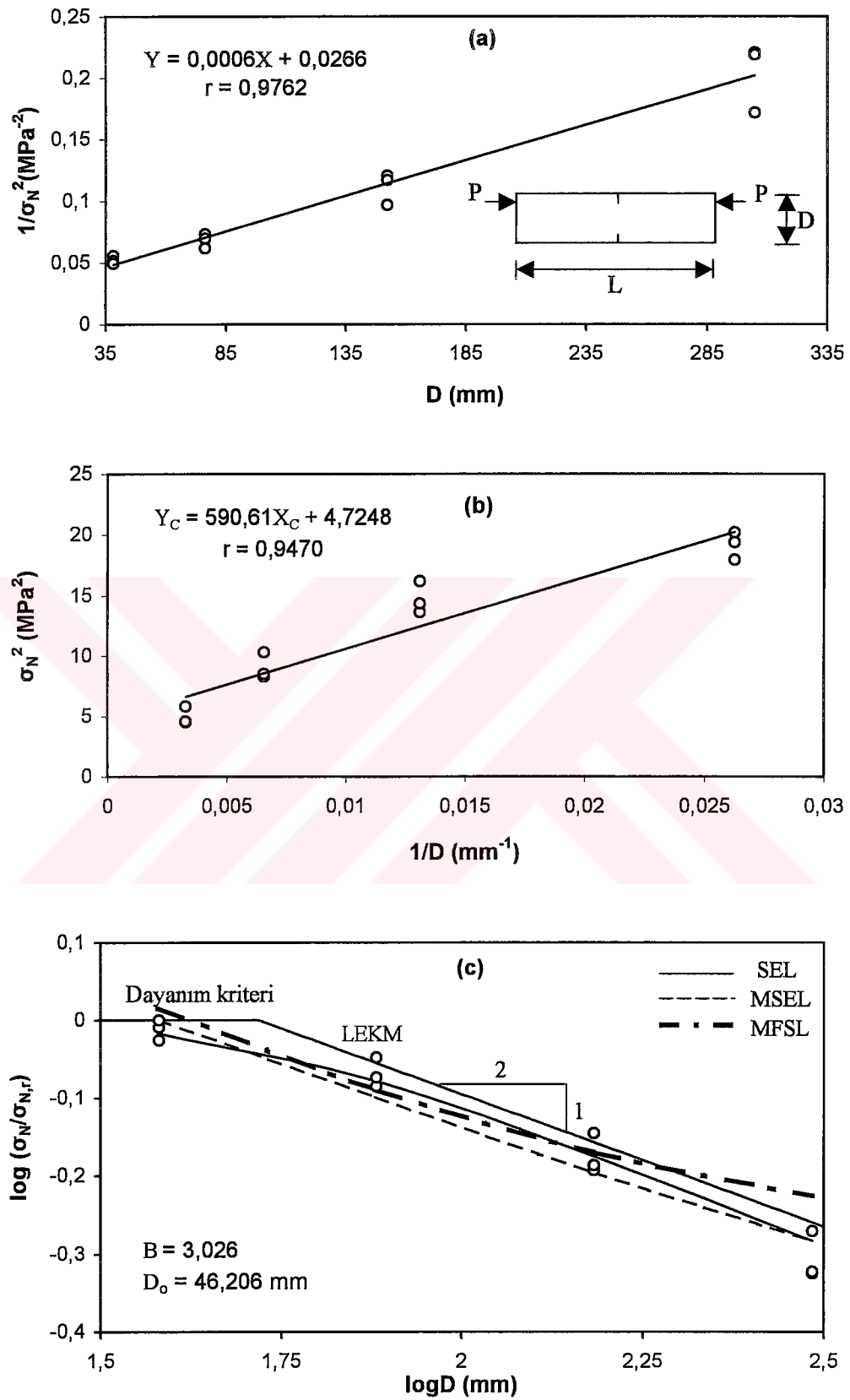
3.3.2.1. Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney analizleri

Çizelge 3.19. Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney bilgileri (beton)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
a_0 (mm)	6,35	6,35	6,35	12,7	12,7	12,7	25,4	25,4	25,4	50,8	50,8	50,8
e (mm)	14,2875	14,2875	14,2875	28,575	28,575	28,575	57,15	57,15	57,15	114,3	114,3	114,3
A_{lg} (mm ²)	965,2	965,2	965,2	1930,4	1930,4	1930,4	3860,8	3860,8	3860,8	7721,6	7721,6	7721,6
I (mm ⁴)	51892,4	51892,4	51892,4	415139	415139	415139	3321112	3321112	3321112	2,7E+07	26568893	2,7E+07
b (mm)	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8
L (mm)	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4	812,8	812,8	812,8
f_c (MPa)	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5
P_u (N)	4092,16	4252,29	4336,8	7134,6	7316,96	7766,21	11120	11289,02	12414,4	16435,4	16506,53	18632,7
σ_N (MPa)	4,2397	4,4056	4,49316	3,6959	3,79039	4,02311	2,88023	2,924012	3,21549	2,12849	2,137708	2,41306
$X=D$ (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,05563	0,05152	0,04953	0,0732	0,0696	0,06178	0,12054	0,116961	0,09672	0,22073	0,218828	0,17174
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02625	0,02625	0,02625	0,0131	0,01312	0,01312	0,00656	0,006562	0,00656	0,00328	0,003281	0,00328
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa $\sqrt{mm}$) ²	0,00146	0,00135	0,0013	0,001	0,00091	0,00081	0,00079	0,000767	0,00063	0,00072	0,000718	0,00056
$X''=LnD$ (mm)	3,84021	3,84021	3,84021	4,3334	4,33336	4,33336	5,02651	5,026509	5,02651	5,71966	5,719656	5,71966
$Y''=Ln\sigma_N$ (MPa)	1,44449	1,48288	1,50256	1,3072	1,33247	1,39205	1,05787	1,072957	1,16798	0,75541	0,759734	0,8809
$X_c=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02625	0,02625	0,02625	0,0131	0,01312	0,01312	0,00656	0,006562	0,00656	0,00328	0,003281	0,00328
$Y_c=\sigma_N^2$ (MPa ²)	17,9751	19,4093	20,1885	13,66	14,367	16,1854	8,29574	8,549844	10,3394	4,53048	4,569797	5,82285
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932	4,4932
$X_k=\log D$ (mm)	1,58092	1,58092	1,58092	1,882	1,88195	1,88195	2,18298	2,182985	2,18298	2,48401	2,484015	2,48401
$Y_k=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	0,00076	0,00076	0,00076	-0,0891	-0,0891	-0,0891	-0,1861	-0,18615	-0,1861	-0,2826	-0,2826	-0,2826
$Y_B=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,00662	-0,0066	-0,0066	-0,0783	-0,0783	-0,0783	-0,1751	-0,17515	-0,1751	-0,2929	-0,29288	-0,29288
$Y_C=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	0,01577	0,01577	0,01577	-0,0892	-0,0892	-0,0892	-0,1699	-0,16994	-0,1699	-0,2254	-0,22537	-0,22537

Çizelge 3.20. Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney sonuçları (beton)

DEĞİŞKEN	LINEER I DEĞER	LINEER II DEĞER	NONLINEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa $\sqrt{m}$)	1,317682164	1,368588232	1,35018743		
M^2 (MPa 2m)	1,736286285	1,873033748	1,823006095		
N (mm)	46,20631074	58,22433664	53,60326118		
A (Eğim)	0,000575942	0,031085578		590,6075213	
C	0,02661215	0,000533893		4,724767266	
C^-	0,108899847	0,000916344		11,99109996	
ω_A	0,070236621	0,0864994		0,1072215	
ω_C	0,26697264	0,076169683		0,202705222	
ω_C^-	0,037942759	0,025809976		0,046451078	
m	0,176022259	0,119736423		0,21549365	
ω_{KIC}	0,03511831	0,0432497		0,05361075	
ω_{Gr}	0,276057193	0,115256093		0,229316064	
ω_{cf}	0,326673328	0,154930723		0,296558913	
Bf_t (MPa)	6,129993586	5,671795016	5,831744038	5,394145304	6,4813833
σ_o (MPa)	0	0	0	2,173652977	0,79079616
e_p (mm)	46,20631074	58,22433664	59,3474	125,0024579	18,5701
e_p/d_{max}	3,638292184	4,584593436	4,673023622	9,842713221	1,462212598
k_1			1,262		1,4425
k_2			0		0,176
r	0,976217189	0,964572444	0,959583243	0,947048045	



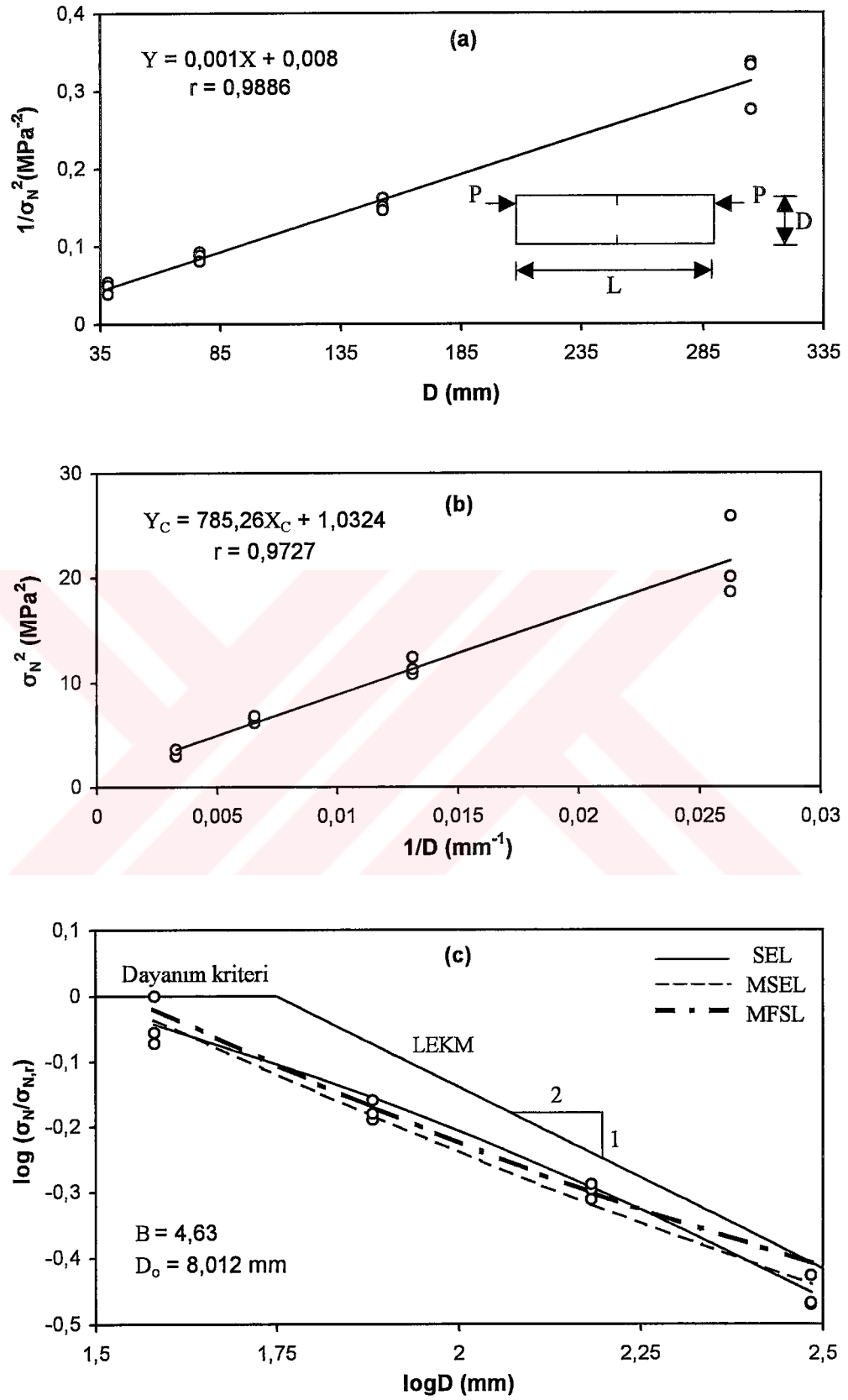
Şekil 3.15. Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma (çentikli beton numune)

Çizelge 3.21. Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney bilgileri (harç)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
a_0 (mm)	6,35	6,35	6,35	12,7	12,7	12,7	25,4	25,4	25,4	50,8	50,8	50,8
e (mm)	14,2875	14,2875	14,2875	28,575	28,575	28,575	57,15	57,15	57,15	114,3	114,3	114,3
A_{liq} (mm ²)	965,2	965,2	965,2	1930,4	1930,4	1930,4	3860,8	3860,8	3860,8	7721,6	7721,6	7721,6
I (mm ⁴)	51892,4	51892,4	51892,4	415139	415139	415139	3321112	3321112	3321112	2,7E+07	26568893	2,7E+07
b (mm)	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8
L (mm)	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4	812,8	812,8	812,8
f_c (MPa)	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6
P_u (N)	4163,33	4323,46	4910,59	6347,3	6485,18	6805,44	9589,89	9927,936	10105,9	13308,4	13388,48	14714
σ_N (MPa)	4,31344	4,47934	5,08764	3,2881	3,3595	3,5254	2,48391	2,571471	2,61755	1,72353	1,7339	1,90556
$X=D$ (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,05375	0,04984	0,03863	0,0925	0,0886	0,08046	0,16208	0,15123	0,14595	0,33684	0,332623	0,27539
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02625	0,02625	0,02625	0,0131	0,01312	0,01312	0,00656	0,00656	0,00656	0,00328	0,003281	0,00328
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻¹ mm)	0,00141	0,00131	0,00101	0,0012	0,00116	0,00106	0,00106	0,000992	0,00096	0,0011	0,001091	0,0009
$X''=LnD$ (mm)	3,64021	3,64021	3,64021	4,3334	4,33336	4,33336	5,02651	5,026509	5,02651	5,71966	5,719656	5,71966
$Y''=Ln\sigma_N$ (MPa)	1,46173	1,49948	1,62681	1,1903	1,21179	1,26	0,90983	0,944478	0,96224	0,54438	0,550373	0,64478
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02625	0,02625	0,02625	0,0131	0,01312	0,01312	0,00656	0,00656	0,00656	0,00328	0,003281	0,00328
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	18,6057	20,0645	25,8841	10,811	11,2863	12,4285	6,16982	6,612464	6,85159	2,97056	3,006408	3,63116
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	5,08764	5,08764	5,08764	5,0876	5,08764	5,08764	5,08764	5,08764	5,08764	5,08764	5,08764	5,08764
$X_K=logD$ (mm)	1,58092	1,58092	1,58092	1,882	1,88195	1,88195	2,18298	2,182985	2,18298	2,48401	2,484015	2,48401
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,04084	-0,0408	-0,0408	-0,1738	-0,1738	-0,1738	-0,3095	-0,30954	-0,3095	-0,4448	-0,44477	-0,44477
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,04246	-0,0425	-0,0425	-0,1698	-0,1698	-0,1698	-0,3077	-0,30772	-0,3077	-0,4516	-0,45165	-0,45165
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01927	-0,0193	-0,0193	-0,1597	-0,1597	-0,1597	-0,2913	-0,29126	-0,2913	-0,4083	-0,40825	-0,40825

Çizelge 3.22. Çentikli numunede dışmerkez basınçta deney sonuçları (harç)

	LINEER I	LINEER II	NONLINEER	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER
M (MPa√m)	1,00081726	1,010516675	1,024505364		
M ² (MPa ² ·m)	1,001635188	1,021143951	1,04961124		
N (mm)	8,012356615	10,55869685	12,79585939		
A (Eğim)	0,000998367	0,010340067		785,2552943	
C	0,007999276	0,000979294		1,032424212	
C ⁻	0,15064103	0,001106509		10,69353758	
ω _A	0,048085193	0,373113797		0,075429182	
ω _C	1,054036219	0,059582145		0,867674017	
ω _{C⁻}	0,032551606	0,030667868		0,048719501	
m	0,151011874	0,142272925		0,226017214	
ω _{KIC}	0,024042596	0,186556899		0,037714591	
ω _{Gr}	1,055132474	0,377841154		0,870946474	
ω _{Gf}	1,093510656	0,423004924		0,93006997	
Bf _t (MPa)	11,18084563	9,834183867	9,056898628	16,39630192	13,92792326
σ ₀ (MPa)	0	0	0	1,016082778	0,176541108
ε _p (mm)	8,012356615	10,55869685	9,677	760,5936448	4,3411
ε _{p/d_{max}}	1,658873005	2,1860656	2,003519669	157,4728043	0,898778468
k ₁			2,015		2,7376
k ₂			0		0,0347
r	0,988635423	0,646529195	0,985900604	0,972728122	



Şekil 3.16. Dışmerkez basınçta regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma (çentikli harç numune)

3.3.2.2. Dışmerkez basınç deneyinde sonuç karşılaştırmaları (çentikli numune)

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.20. ve 3.22. çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri beton numunesinde, harç numunesine göre yaklaşık %30 kadar artış göstermekte, fakat her iki numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde M değerleri birbirlerine çok yakındır.
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N , beton numunesinde harç numuneye göre artış göstermekte ve yaklaşık 4~5 katıdır. Her iki numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde N değerleri birbirlerine çok yakındır.
- 3) Her iki numunede numune sayısı aynı olduğu için lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , sınır değerlerinin altında, fakat eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , sınır değerinin üstünde olduğu görülür ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Her iki numunede numune sayısı aynı olduğu için lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, sınır değerlerinin altında olduğu görülür. Harçta eğim yüksek olduğu için değişimin sınır üstünde çıktığı görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) Deney datalarının band genişliği normala yakın olduğundan MFSL analizinde eğim değişimi ω_{Ac} , her iki numunede sınır değerinin altındadır. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , harçta yüksek, betonda sınır değerinin altında olduğu görünmektedir ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y ekseninde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_C , analizlerde birbirlerine yakın olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m , lineer I ve lineer II analizlerinde daha düşük olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , betonda daha büyük olduğu görülür. Her iki numunede lineer I ve lineer II analizlerinde birbirlerine yakındır.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Gf} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{cf} , harçta, betona göre daha fazla, fakat harç için lineer I analizinde çıkan değerler çok yüksek ve kabul edilemez olduğu görülür.

10) B_f değerinin her iki numunede birbirlerine yakın olduğu görülür. Harçta betona göre yaklaşık %80 kadar artış göstermekte fakat MFSL analizinde bu değer yaklaşık üç katına çıktığı görülür.

11) Numunede artık dayanım değeri σ_0 , betonda daha fazla ve yaklaşık iki katı olduğu görülür. Bunun nedeni ise betonda maksimum agreganın daha büyük olduğuna bağlanabilir.

12) Karakteristik uzunluk ℓ_p , betonda harca göre daha fazla fakat MFSL analizinde bu değer daha düşük olduğu görülür. ℓ_p / d_{max} oranı ise bundan dolayı betonda daha yüksektir.

13) MSEL analizinde k_1 katsayısı betonda daha az ve yaklaşık yarısı kadardır. Bu sonucun B_f değerlerine uyumlu, yani Bazant'ın önerdiği boyut etkisinde beton, harca göre daha düşük B_f değerlerine sahiptir ($k_1 \sigma_{N,r}$ dışmerkez basınca karşı dayanım değerini ifade etmektedir).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

Beton → a) $r = 0,9762$ b) $r = 0,9646$ c) $r = 0,9596$ d) $r = 0,9470$

Harç → a) $r = 0,9886$ b) $r = 0,6465$ c) $r = 0,9859$ d) $r = 0,9727$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri harçta, betona göre birbirlerine daha yakın olduğu ve MFSL eğrisi daha iyi uyduğu görülür (Şekil 3.15c, 3.16c).

3.3.3. Narin donatısız kolonlarda basınç deneyi

Beton kolonda basınç deneyi Şener, Barr ve Abusiaf [19] tarafından 1996 yılında Wales Cardiff Üniversitesinde yapılmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin kesiti kare olup ve kenar uzunlukları $D=50, 100, 200$ mm'ye eşittir. Numunelerin boyut ve donatı durumları şekil 3.17'de verilmiştir. Dokuz farklı numune üç seriye ayrılmıştır. Her bir seri üç farklı numuneden oluşmakta (küçük, orta, büyük) ve narinlik değeri ile sınıflandırılır. Narinlik değerleri ($\lambda = L/0,3D$) 9,7; 18,0 ve 34,7 olarak deneyde kullanılmıştır. Yükün numuneye etkin olarak iletilmesi için kolonların iki ucunda çelik plaka, etriyeli $L/10$ kadar uzunlukta kısa donatılar beton içine gömülmüştür (Şekil 3.17). Donatı çapları (d_b) $D= 50, 100$ ve 200 mm için sırası ile 6, 12, 25 mm olarak seçilmiştir. Kesitlerde donatılar için kullanılan paspayı $D/4$ olarak ayarlanmıştır. Tüm numuneler aynı beton malzemesinden yapılmış, karışım oranı (çimento:çakıl:kum:su) sırası ile 1 : 3,6 : 1,8 : 0,67 (ağırlıkça) olarak düzenlenmiştir. Agrega maksimum dane çapı $d_{max} = 10$ mm olarak seçilmiştir. Betonun basınç dayanımını belirlemek için 6 adet standard küp numunesi alınmış, küplerin kenar uzunlukları 100 mm' dir. Elde edilen 7 günlük basınç dayanımları $f_c = 27,97 \pm 2,38$ MPa ve 28 günlük basınç dayanımları $f_c = 35,7 \pm 0,97$ MPa olarak elde edilmiştir. Maksimum gerilme aşağıdaki denklemden elde edilir.

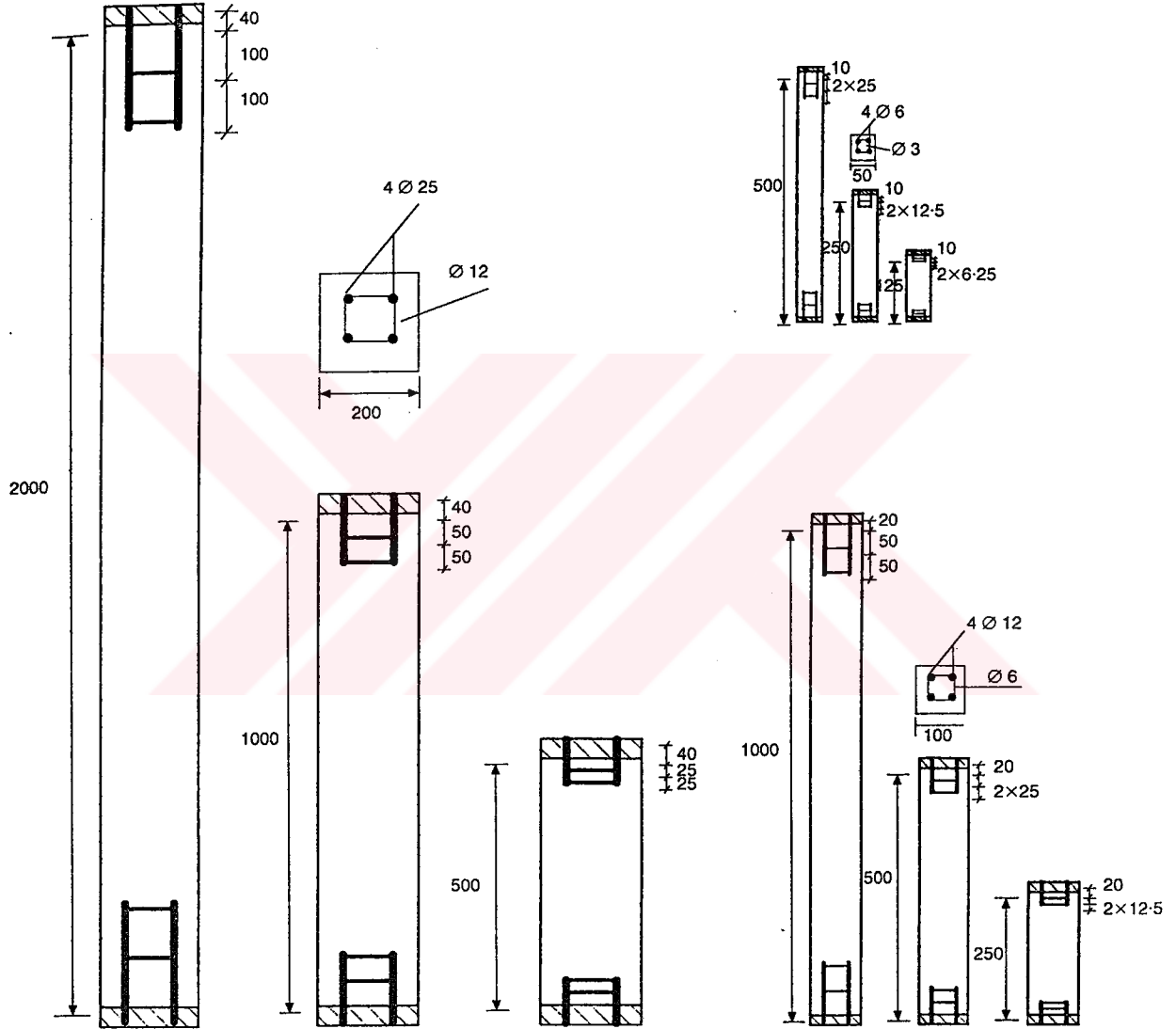
$$\sigma_N = P / D^2 \quad (3.7)$$

Burada ;

σ_N : maksimum gerilme (MPa)

P : maksimum yük (N)

D : numune yüksekliği (mm).



Şekil 3.17. Narin donatısız kolonlarda boyut etkisi deneyinde kullanılan numune geometrileri ve donatı durumları (tüm boyutlar mm'dir)

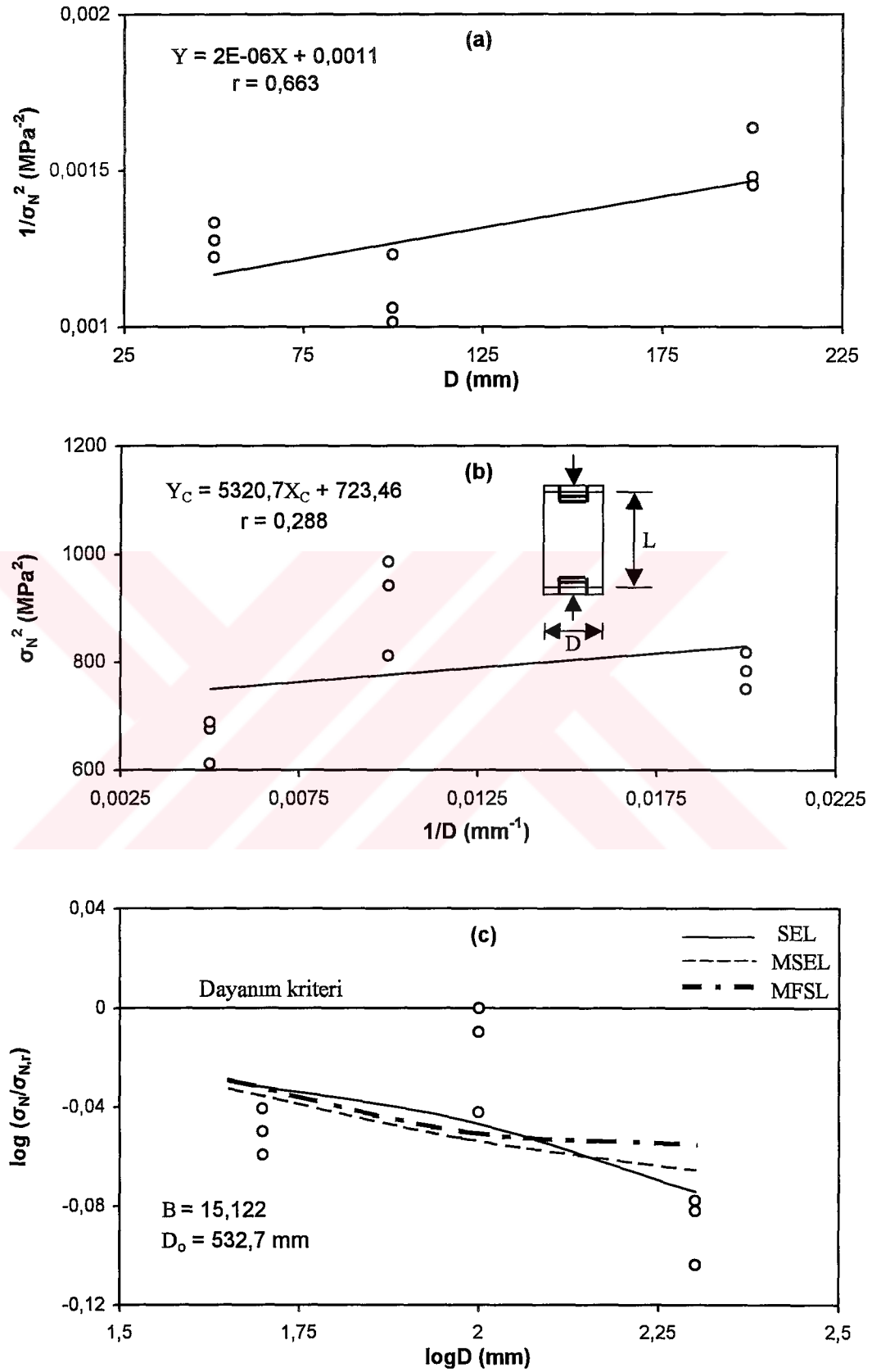
3.3.3.1. Narin donatısız kolonlarda deney analizleri

Çizelge 3.23. Narin donatısız kolonlarda deney bilgileri ($\lambda=9,7$)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
D (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
λ (Birimlessiz)	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7
L (mm)	125	125	125	250	250	250	500	500	500
f_c (MPa)	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7
P_u (KN)	68,5	71,5	70	314	285	307	989	1040	1050
σ_N (MPa)	27,4	28,6	28	31,4	28,5	30,7	24,73	26	26,25
$X=D$ (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	0,005
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	3E-05	2E-05	3E-05	1E-05	1E-05	1E-05	8E-06	7E-06	7E-06
$X^*=LnD$ (mm)	3,912	3,912	3,912	4,605	4,605	4,605	5,298	5,298	5,298
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	3,311	3,353	3,332	3,447	3,35	3,424	3,208	3,258	3,268
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	0,005
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	750,8	818	784	986	812,3	942,5	611,3	676	689,1
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4
$X_K=logD$ (mm)	1,699	1,699	1,699	2	2	2	2,301	2,301	2,301
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,04	-0,04	-0,04	-0,05	-0,052	-0,052	-0,065	-0,07	-0,07
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,03	-0,03	-0,03	-0,05	-0,047	-0,047	-0,074	-0,07	-0,07
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,03	-0,03	-0,03	-0,05	-0,048	-0,048	-0,055	-0,06	-0,06

Çizelge 3.24. Narin donatısız kolonlarda deney sonuçları ($\lambda=9,7$)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	22,35	53,12	20,9		
M ² (MPa ² m)	499,4	2822	436,8		
N (mm)	532,7	3475	447,3		
A (Eğim)	2E-06	0,001		5321	
C	0,001	4E-07		723,5	
C ⁻	0,001	1E-05		785,5	
ω_A	0,426	0,07		1,257	
ω_C	0,106	3,215		0,122	
ω_C^-	0,041	0,036		0,053	
m	0,217	0,193		0,281	
ω_{KIC}	0,213	0,035		0,628	
ω_{Gr}	0,439	3,215		1,263	
ω_{cf}	0,522	3,276		1,366	
Bf _t (MPa)	30,62	28,5	31,25	16,58	9,467
σ_0 (MPa)	0	0	0	26,9	24,72
ℓ_p (mm)	532,7	3475	639,8	7,355	12,46
ℓ_p/d_{max}	53,27	347,5	63,98	0,735	1,246
k ₁			0,966		0,302
k ₂			0		0,787
r	0,663	0,983	0,456	0,288	



Şekil 3.18. Narin donatısız kolonlarda regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi, c) karşılaştırma ($\lambda=9,7$)

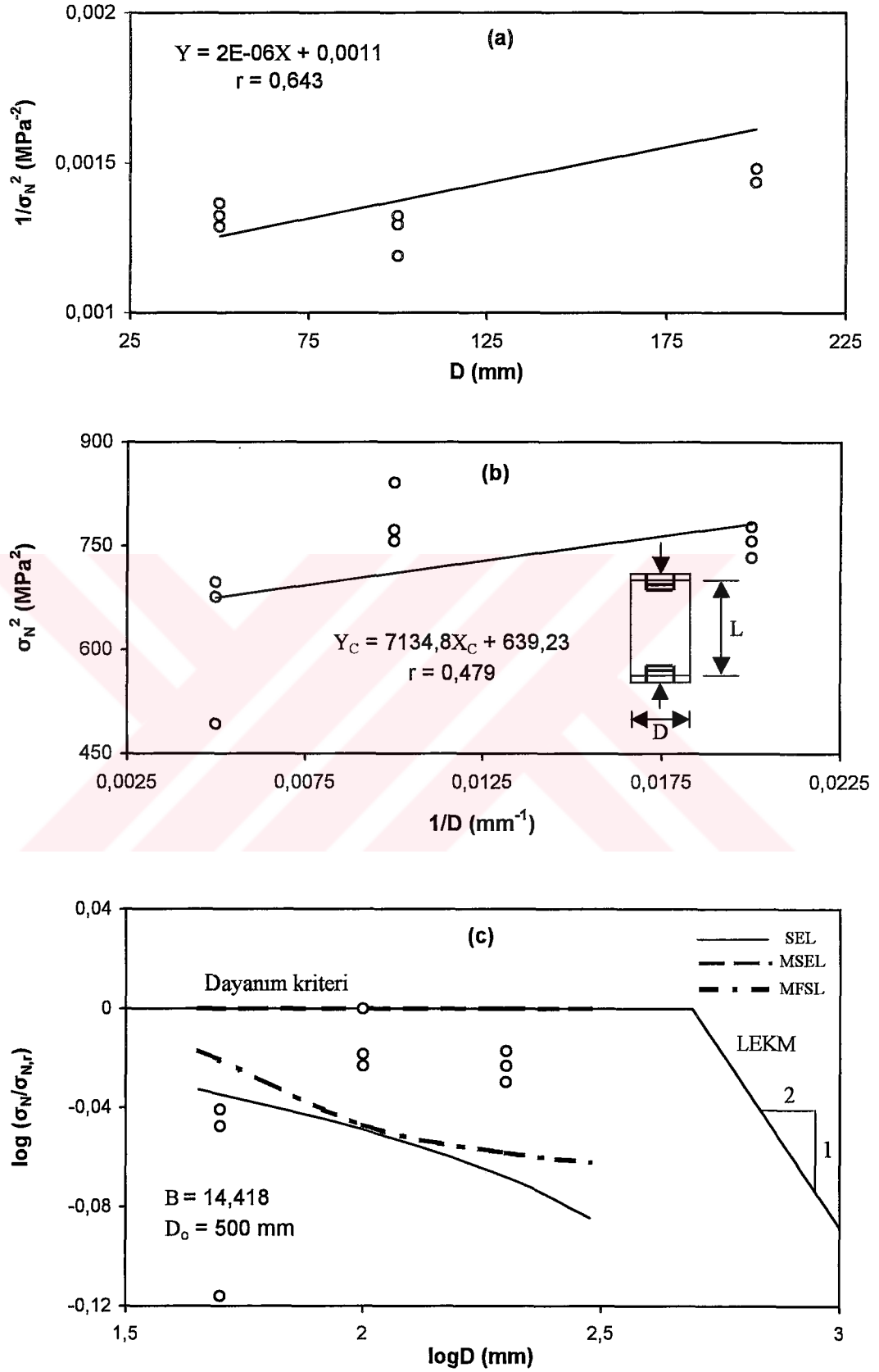
Çizelge 3.25. Narin donatısız kolonlarda deney bilgileri ($\lambda=18$)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
D (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
λ (Birimsiz)	18	18	18	18	18	18	18	18	18
L (mm)	250	250	250	500	500	500	1000	1000	1000
f_c (MPa)	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7
P_u (KN)	65	55,5	66	275	278	290	1100	1083	1115
σ_N (MPa)	26	22,2	26,4	27,5	27,8	29	27,5	27,08	27,88
$X=D$ (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	0,005
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	3E-05	4E-05	3E-05	1E-05	1E-05	1E-05	7E-06	7E-06	6E-06
$X^*=LnD$ (mm)	3,912	3,912	3,912	4,605	4,605	4,605	5,298	5,298	5,298
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	3,258	3,1	3,273	3,314	3,325	3,367	3,314	3,299	3,328
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	0,005
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	676	492,8	697	756,3	772,8	841	756,3	733,1	777
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	29	29	29	29	29	29	29	29	29
$X_K=\log D$ (mm)	1,699	1,699	1,699	2	2	2	2,301	2,301	2,301
$Y_K=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$Y_B=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06	-0,064	-0,064	-0,09	-0,09	-0,09
$Y_C=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,05	-0,05	-0,05	-0,07	-0,067	-0,067	-0,078	-0,08	-0,08

Çizelge 3.26. Narin donatısız kolonlarda deney sonuçları ($\lambda=18$)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	22,36	—	40,11		
M ² (MPa ² m)	500	—	1609		
N (mm)	500	-511	2123		
A (Eğim)	2*10 ⁻⁶	0,002		7135	
C	0,001	-0		639,2	
C ⁻	0,001	2E-05		722,5	
ω_A	0,699	0,114		0,414	
ω_C	0,101	0,772		0,065	
ω_C^-	0,055	0,073		0,036	
m	0,288	0,388		0,19	
ω_{KIC}	0,35	0,057		0,207	
ω_{Gf}	0,707	0,78		0,419	
ω_{cf}	0,612	0,673		0,358	
Bf _t (MPa)	31,62	—	27,53	15,4	—
σ_0 (MPa)	0	0	0	28,97	—
ℓ_p (mm)	500	-511	674,6	11,16	—
ℓ_p/d_{max}	50	-51,1	67,46	1,116	—
k ₁			0,926		—
k ₂			0		—
r	0,643	0,983	0,456	0,479	

NOT: k₁= - 0,508 - 1,058i , k₂= 1,0663 - 0,002i , ℓ_p = - 0,874 - 1,0006i (MSEL)



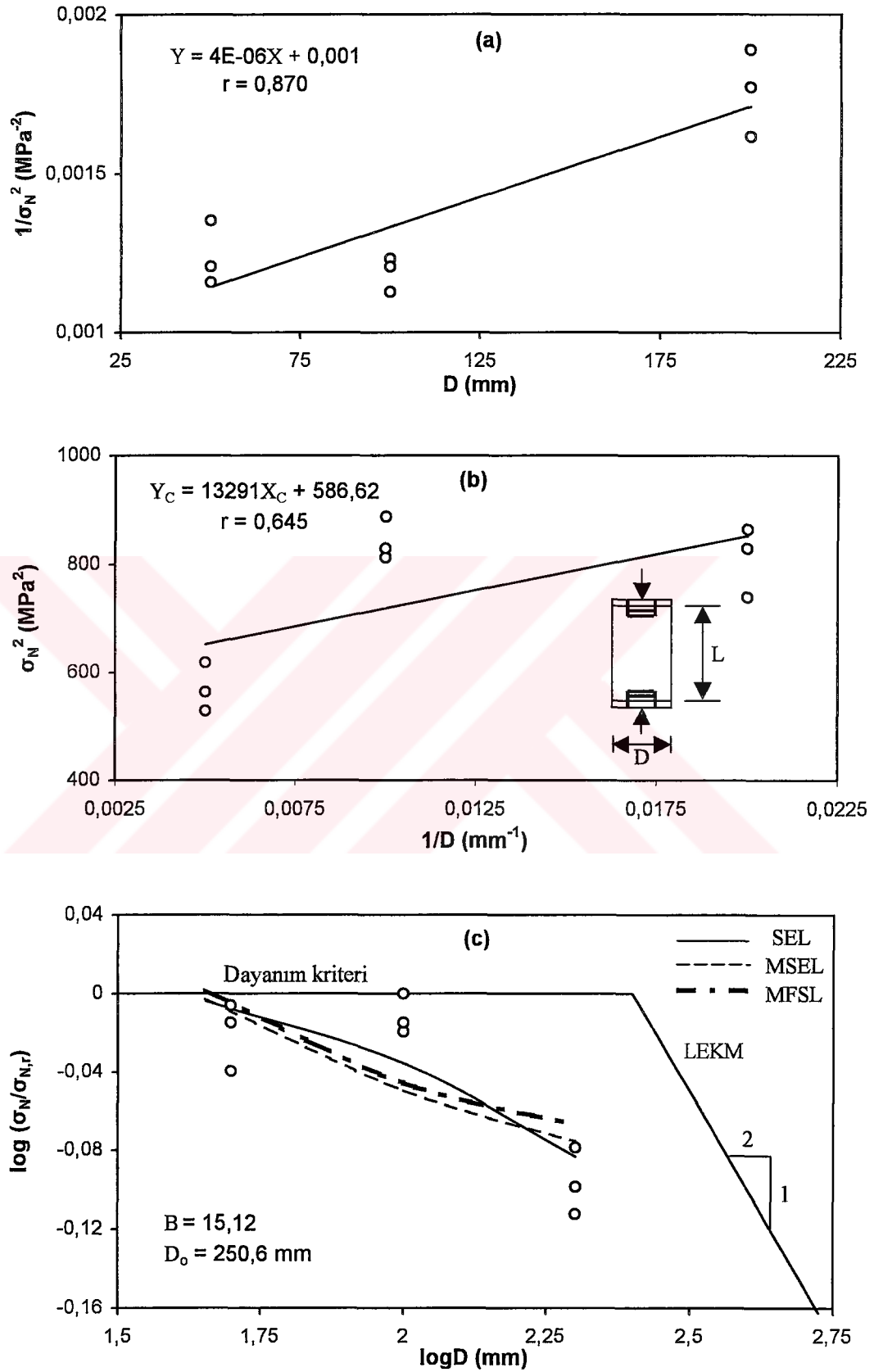
Şekil 3.19. Narin donatısız kolonlarda regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi, c) karşılaştırma ($\lambda=18$)

Çizelge 3.27. Narin donatısız kolonlarda deney bilgileri ($\lambda=34,7$)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
D (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
λ (Birimsiz)	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7
L (mm)	500	500	500	1000	1000	1000	2000	2000	2000
f_c (MPa)	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7
P_u (KN)	72	68	73,5	285	288	298	920	950	995
σ_N (MPa)	28,8	27,2	29,4	28,5	28,8	29,8	23	23,75	24,88
$X=D$ (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	0,005
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	2E-05	3E-05	2E-05	1E-05	1E-05	1E-05	9E-06	9E-06	8E-06
$X^*=\ln D$ (mm)	3,912	3,912	3,912	4,605	4,605	4,605	5,298	5,298	5,298
$Y^*=\ln \sigma_N$ (MPa)	3,36	3,303	3,381	3,35	3,36	3,395	3,135	3,168	3,214
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	0,005
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	829,4	739,8	864,4	812,3	829,4	888	529	564,1	618,8
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8
$X_K=\log D$ (mm)	1,699	1,699	1,699	2	2	2	2,301	2,301	2,301
$Y_K=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01	-0,01	-0,01	-0,04	-0,043	-0,043	-0,075	-0,08	-0,08
$Y_B=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01	-0,01	-0,01	-0,04	-0,035	-0,035	-0,083	-0,08	-0,08
$Y_C=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01	-0,01	-0,01	-0,05	-0,046	-0,046	-0,067	-0,07	-0,07

Çizelge 3.28. Narin donatısız kolonlarda deney sonuçları ($\lambda=34,7$)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	16,23	20,6	15,25		
M ² (MPa ² m)	263,3	424,4	232,5		
N (mm)	250,6	465,2	207,1		
A (Eğim)	4E-06	0,001		13291	
C	1E-03	2E-06		586,6	
C ⁻	0,001	2E-05		741,7	
ω_A	0,214	0,081		0,448	
ω_C	0,113	0,5		0,134	
ω_C^-	0,036	0,037		0,05	
m	0,192	0,194		0,265	
ω_{KIC}	0,107	0,041		0,224	
ω_{Gr}	0,242	0,507		0,468	
ω_{cf}	0,318	0,573		0,57	
Bf _t (MPa)	32,41	30,2	33,5	18,42	17,26
σ_0 (MPa)	0	0	0	24,22	19,27
ℓ_p (mm)	250,6	465,2	306,4	22,66	25,2
ℓ_p/d_{max}	25,06	46,52	30,64	2,266	2,52
k ₁			1,061		0,579
k ₂			0		0,647
r	0,87	0,978	0,751	0,645	



Şekil 3.20. Narin donatısız kolonlarda regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi, c) karşılaştırma ($\lambda=34,7$)

3.3.3.2. Narin donatısız kolonların basınç deneyinde sonuç karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.24., 3.26. ve 3.28. çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri, beton narinlik değeri arttıkça artış gösterdiği görülür. $\lambda=18$ 'de M değeri lineer II analizi için olumsuzdur (eğrinin y eksenini kestiği nokta negatif).
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N , beton narinlik değeri arttıkça azalır. Fakat $\lambda=18$ 'de N değeri lineer II analizi için negatiftir (eğrinin y eksenini kestiği nokta negatif).
- 3) Her üç numunede dağılım düzgün olmadığı için lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , sınır değerlerinin üstündedir. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , sınır değerinin altında bulunmuştur ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Her üç numunede dağılım düzgün olduğu için lineer II analizinde eğimin değişimi ω_A , sınır değerinin altındadır. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , sınır değerlerinin üstündedir ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 5) Deney datalarının band genişliği fazla olduğundan MFSL analizinde eğim değişimi ω_{Ac} , her üç numunede sınır değerinin üstünde, fakat eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , düşük ve sınır değerinin altında bulunmuştur ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y eksenini üzerinde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_C , analizlerde birbirlerine yakın olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m , tüm analizlerde değişiktir.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , tüm numuneler için lineer II analizinde lineer I ve MFSL analizlerine göre daha düşük olduğu görülür.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{GF} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{ef} , narinlik değeri arttıkça azalma göstermiş, fakat $\lambda=18$ 'de aksi olduğu görülür.
- 10) Bf değerinin narinlik değeri arttıkça çok az artış gösterir ve $\lambda=18$ için lineer II analizinde olumsuz bir sonuç verdiği görülür.

11) Numunede artık dayanım değeri σ_0 , en küçük narinlik değerinden orta narinlik değerine geçildiğinde artar fakat en büyük narinlik değerinde düştüğü görülür. Genel olarak değerler birbirlerine çok yakındır.

12) Karakteristik uzunluk ℓ_p , Bazant'ın önerdiği boyut etkisine uyumlu olduğu ve $\lambda=9,7$ ile $\lambda=34,7$ numunelerinde değerler lineer ve non-lineer değerlerine ($N=D_0$) yakın olduğu görülür ($\lambda=18$ haric, N değerleri lineer II ve MSEL analizlerinde olumsuz olduğu için). Kim'e göre ℓ_p değerleri Carpinteri'nin ℓ_p değerlerinden çok daha yüksek olduğu, ℓ_p / d_{max} oranı narinlik değeri arttıkça artış görülmüş, $\lambda=18$ 'de değerler lineer II ve MSEL analizlerinde negatif bulunmuştur.

13) MSEL analizinde k_1 katsayısı narinlik değeri arttıkça biraz artış gösterir. Fakat $\lambda=18$ için bu katsayının karmaşık olduğu görülür. Bu sonucu Bf_i değerlerine uyumlu, yani Bazant'ın önerdiği boyut etkisinde Bf_i değerleri azalmaktadır ($k_1\sigma_{N,r}$ basınca karşı dayanım değerini ifade etmektedir).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

$\lambda=9,7 \rightarrow$ a) $r = 0,6634$ b) $r = 0,9833$ c) $r = 0,4564$ d) $r = 0,2881$

$\lambda=18 \rightarrow$ a) $r = 0,6430$ b) $r = 0,9830$ c) $r = 0,4560$ d) $r = 0,4790$

$\lambda=34,7 \rightarrow$ a) $r = 0,8704$ b) $r = 0,9776$ c) $r = 0,7507$ d) $r = 0,6447$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri $\lambda=9,7$ 'de dayanım kriteri etkindir ve $\lambda=18$ 'de Kim'in önerdiği denklem geçersizdir. $\lambda=34,7$ 'de ise eğrilerin anlamlı ve birbirlerine yakın olduğu görülür (Şekil 3.18c, 3.19c ve 3.20c).

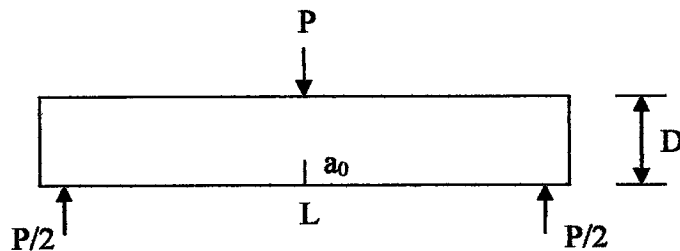
3.4. Eğilme Deneyleri

3.4.1. Üç nokta yüklemesinde eğilme deneyi

Çentikli numune üzerinde üç nokta yükleme deneyi Bazant ve Pfeiffer [34] tarafından 1987 yılında Northwestern Üniversitesinde yapılmıştır. İki tür malzeme, beton ve harç numuneleri dikdörtgen kesitli kullanılmış ve uzunluk / yükseklik oranı 8:3 olarak düzenlenmiştir (Şekil 3.21). Yükseklik değerleri $D = 38,1; 76,2; 152,4$ ve $304,8$ mm ve kalınlık değeri $b = 38$ mm' dir. Bu üç farklı numune farklı beton karışımlarından fakat her bir numune serisi aynı beton karışımından yapılmışlardır. Çentik derinliği $a_0 = D/6$ ve kalınlığı 2,5 mm olarak sertleşmiş numuneden elmas kesici ile elde edilmiştir. Beton karışımının oranı her iki numune için 1:2:2 (çimento-kum-çakıl) ve su/çimento oranı 0,6 olarak düzenlenmiştir (ağırlıkça). Maksimum dane çapı beton için $d_{max} = 12,7$ mm ve harç için $d_{max} = 4,83$ mm' dir. Betonun basınç dayanımını belirlemek için her karışımdan silindir numuneler alınıp (çap=76,2 mm, yükseklik=152,4 mm) 28 günlük kürden sonra ortalama basınç dayanımı beton için $f_c = 33,5$ MPa ve harç için $f_c = 47,6$ MPa olarak elde edilmiştir. Çekme dayanımı $f_t = 6\sqrt{f_c}$ ve Young modülü $E_c = 57000\sqrt{f_c}$ olarak psi cinsinden basınç dayanımlarından elde edilmiştir. Nominal gerilme aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$\sigma_N = 5,4 P_u / (bD) \quad (3.8)$$

P_u : maksimum yük (N), b : numunenin kalınlığı (mm), D : numune yüksekliği (mm).



Şekil 3.21. Üç nokta yüklemesinde numune geometrisi ve yükleme durumu

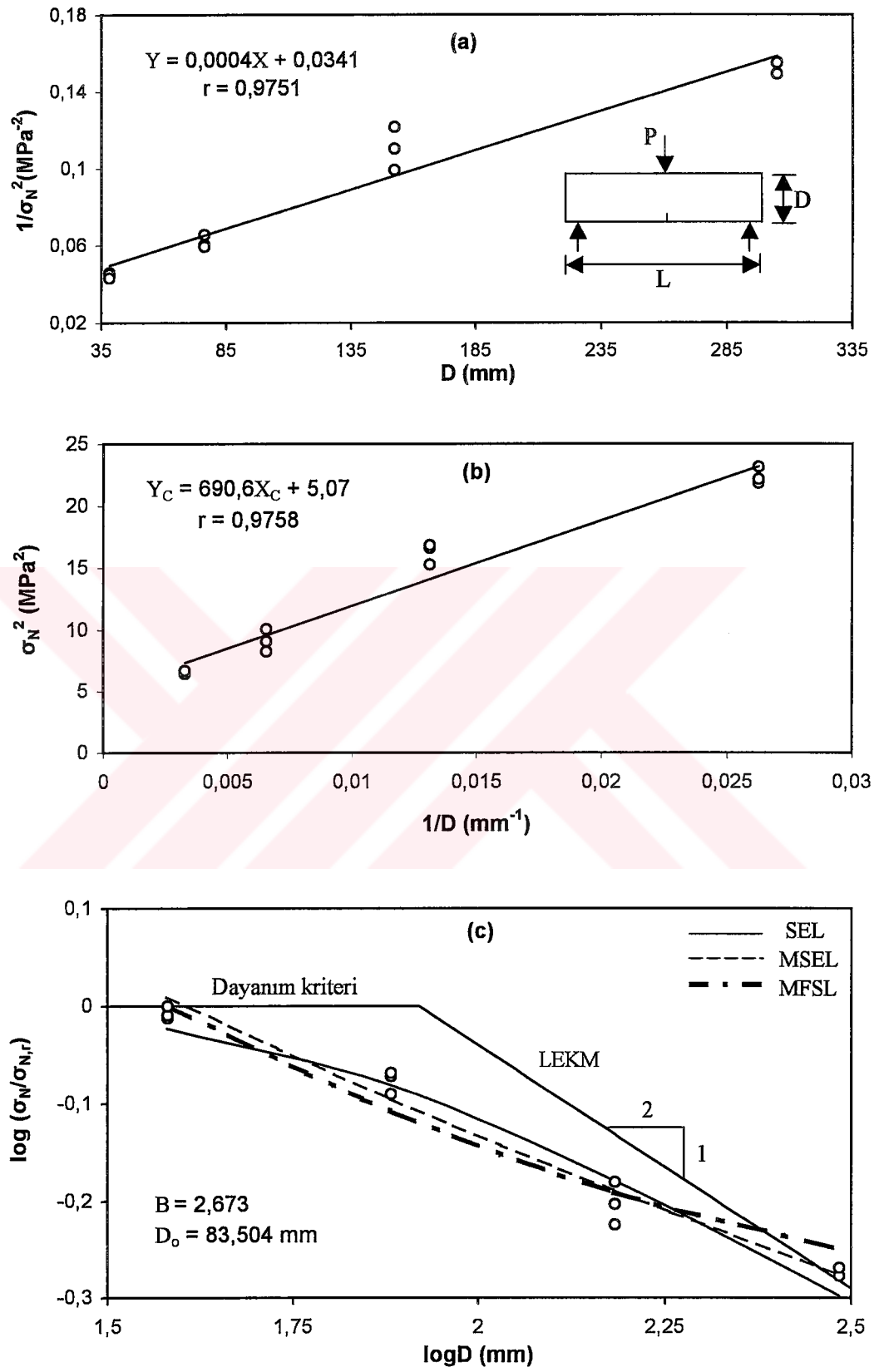
3.4.1.1. Üç nokta yüklemesinde deney analizleri

Çizelge 3.29. Üç nokta yüklemesinde deney bilgileri (beton)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
S (mm)	95,25	95,25	95,25	190,5	190,5	190,5	381	381	381	762	762	762
L (mm)	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4	812,8	812,8	812,8
mg (N)	3,67741	3,67741	3,67741	14,7096	14,70965	14,7096	58,8386	58,8386	58,8386	235,354	235,354	235,354
b (mm)	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8
P ₀ (N)	1801,44	1814,78	1854,82	3011,3	3140,288	3162,53	4403,52	4625,92	4875,01	7730,62	7735,07	7886,3
f _c (MPa)	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5
P _u (N)	1803,16	1816,5	1856,53	3018,17	3147,157	3169,4	4431	4653,4	4902,49	7840,53	7844,98	7996,21
σ _N (MPa)	4,67042	4,70499	4,80868	3,90873	4,075784	4,10459	2,86922	3,01323	3,17453	2,53851	2,53995	2,58891
X=D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8
$Y=1/\sigma_N^2 \text{ (MPa}^{-2}\text{)}$	0,04584	0,04517	0,04325	0,06545	0,060197	0,05936	0,12147	0,11014	0,09923	0,15518	0,15501	0,1492
$X'=1/D \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	0,02625	0,02625	0,02625	0,01312	0,013123	0,01312	0,00656	0,00656	0,00656	0,00328	0,00328	0,00328
$Y'=1/\sigma_N^2 D \text{ (MPa}\sqrt{\text{mm}}\text{)}^{-2}$	0,0012	0,00119	0,00114	0,00086	0,00079	0,00078	0,0008	0,00072	0,00065	0,00051	0,00051	0,00049
$X''=LnD \text{ (mm)}$	3,64021	3,64021	3,64021	4,33336	4,333361	4,33336	5,02651	5,02651	5,02651	5,71966	5,71966	5,71966
$Y''=Ln\sigma_N \text{ (MPa)}$	1,54125	1,54862	1,57042	1,36321	1,405063	1,4121	1,05404	1,10301	1,15516	0,93158	0,93214	0,95124
$X_C=1/D \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	0,02625	0,02625	0,02625	0,01312	0,013123	0,01312	0,00656	0,00656	0,00656	0,00328	0,00328	0,00328
$Y_C=\sigma_N^2 \text{ (MPa}^2\text{)}$	21,8129	22,1369	23,1234	15,2782	16,61202	16,9476	8,23244	9,07958	10,0776	6,44402	6,45133	6,70246
σ _{N,r} (MPa)	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868	4,80868
$X_K=\log D \text{ (mm)}$	1,58092	1,58092	1,58092	1,88195	1,881955	1,88195	2,18298	2,18298	2,18298	2,48401	2,48401	2,48401
$Y_K=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,00132	-0,00132	-0,0013	-0,09543	-0,09543	-0,09543	-0,1891	-0,1891	-0,1891	-0,2763	-0,2763	-0,2763
$Y_B=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,00808	-0,00808	-0,0081	-0,0811	-0,0811	-0,0811	-0,1792	-0,1792	-0,1792	-0,2979	-0,2979	-0,2979
$Y_C=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	0,0002	0,0002	0,0002	-0,10739	-0,10739	-0,10739	-0,1913	-0,1913	-0,1913	-0,2498	-0,2498	-0,2498

Çizelge 3.30. Üç nokta yüklemesinde deney sonuçları (beton)

DEĞİŞKEN	LINEER I DEĞER	LINEER II DEĞER	NONLINEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa√m)	1,564753222	1,458169118	1,451270984		
M ² (MPa ² m)	2,448452645	2,126257178	2,106187469		
N (mm)	83,50405991	57,40871606	54,81800761		
A (Eğim)	0,000408421	0,026999893		690,5950727	
C	0,034104829	0,00047031		5,070038071	
C ⁻	0,09245801	0,000802494		13,56653257	
ω _A	0,071847545	0,08144894		0,070837781	
ω _C	0,15111542	0,070717643		0,145929033	
ω _{C⁻}	0,032418251	0,024103483		0,031717104	
m	0,150393222	0,111819743		0,147140493	
ω _{KIC}	0,035923772	0,04072447		0,03541889	
ω _{Gr}	0,167325849	0,107865263		0,162213667	
ω _{Gr}	0,213687826	0,14493485		0,207682016	
Bf _t (MPa)	5,414920176	6,085818266	6,198504044	5,207235762	8,094451044
σ ₀ (MPa)	0	0	0	2,251674504	1,101668588
e _p (mm)	83,50405991	57,40871606	57,2175	136,2110231	10,0115
e _p /d _{max}	6,575122827	4,520371343	4,505314961	10,72527741	0,788307087
k ₁			1,2669		1,6833
k ₂			0		0,2291
Γ	0,975141015	0,968400743	0,984733466	0,975807358	



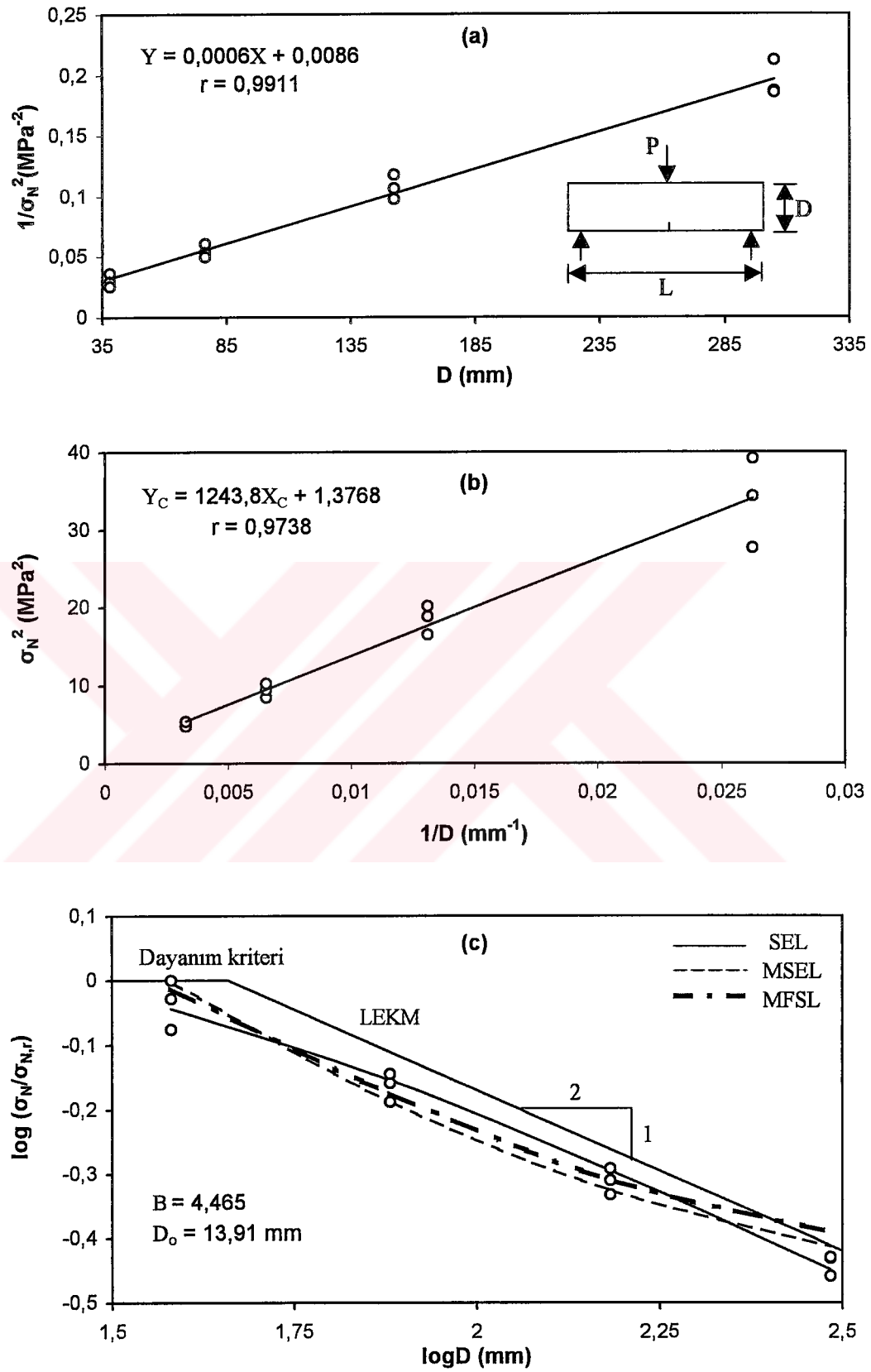
Şekil 3.22. Üç nokta yüklemesinde regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi, c) karşılaştırma (beton)

Çizelge 3.31. Üç nokta yüklemesinde deney bilgileri (harç)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
S (mm)	95,25	95,25	95,25	190,5	190,5	190,5	381	381	381	762	762	762
L (mm)	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4	812,8	812,8	812,8
mg (N)	3,67741	3,67741	3,67741	14,7096	14,70965	14,7096	58,8386	58,8386	58,8386	235,354	235,354	235,354
b (mm)	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8
P ₀ (N)	2028,29	2259,58	2415,26	3126,94	3344,896	3456,1	4470,24	4710,43	4910,59	6600,83	7036,74	7063,42
f _c (MPa)	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6
P _u (N)	2030,01	2261,3	2416,98	3133,81	3351,765	3462,97	4497,72	4737,91	4938,07	6710,74	7146,65	7173,33
σ _N (MPa)	5,25799	5,85708	6,26031	4,0585	4,340765	4,48478	2,91243	3,06796	3,19757	2,17272	2,31385	2,32249
X=D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8
Y=1/σ _N ² (MPa ⁻²)	0,03617	0,02915	0,02552	0,06071	0,053072	0,04972	0,11789	0,10624	0,0978	0,21183	0,18678	0,18539
X'=1/D (mm ⁻¹)	0,02625	0,02625	0,02625	0,01312	0,013123	0,01312	0,00656	0,00656	0,00656	0,00328	0,00328	0,00328
Y*=1/σ _N ² D (MPa ⁻¹ mm) ⁻²	0,00095	0,00077	0,00067	0,0008	0,000896	0,00065	0,00077	0,0007	0,00084	0,00069	0,00061	0,00061
X*=LnD (mm)	3,64021	3,64021	3,64021	4,33336	4,333361	4,33336	5,02651	5,02651	5,02651	5,71966	5,71966	5,71966
Y*=Lnσ _N (MPa)	1,65975	1,76765	1,83423	1,40081	1,468051	1,50069	1,06899	1,12101	1,16239	0,77598	0,83891	0,84264
X _C =1/D (mm ⁻¹)	0,02625	0,02625	0,02625	0,01312	0,013123	0,01312	0,00656	0,00656	0,00656	0,00328	0,00328	0,00328
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	27,6465	34,3054	39,1915	16,4714	18,84224	20,1132	8,48222	9,41237	10,2244	4,7207	5,3539	5,39396
σ _{N,r} (MPa)	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031	6,26031
X _K =logD(mm)	1,58092	1,58092	1,58092	1,88195	1,881955	1,88195	2,18298	2,18298	2,18298	2,48401	2,48401	2,48401
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,03298	-0,03298	-0,033	-0,16732	-0,16732	-0,16732	-0,3053	-0,3053	-0,3053	-0,4435	-0,4435	-0,4435
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,03386	-0,03386	-0,0339	-0,16454	-0,16454	-0,16454	-0,3044	-0,3044	-0,3044	-0,4494	-0,4494	-0,4494
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,01355	-0,01355	-0,0136	-0,15545	-0,15545	-0,15545	-0,2897	-0,2897	-0,2897	-0,4109	-0,4109	-0,4109

Çizelge 3.32. Üç nokta yüklemesinde deney sonuçları (harç)

DEĞİŞKEN	LİNEER I DEĞER	LİNEER II DEĞER	NONLINEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa√m)	1,273386575	1,250836322	1,27409194		
M ² (MPa ² m)	1,62151337	1,564591505	1,623310272		
N (mm)	13,90986822	9,417259583	12,48380352		
A (Eğim)	0,000616708	0,006018989		1243,828492	
C	0,008578325	0,000639144		1,376815125	
C ⁻	0,096690457	0,000713197		16,67982315	
ω _A	0,042496731	0,449996065		0,073810922	
ω _C	0,53658305	0,064091105		1,008486308	
ω _{C⁻}	0,027686323	0,033403868		0,048413185	
m	0,128441084	0,154965648		0,224596165	
ω _{KİC}	0,021248365	0,224998032		0,036905461	
ω _{Gr}	0,538263264	0,454537268		1,011183804	
ω _{cf}	0,571688177	0,503515043		1,06939262	
Bf _t (MPa)	10,79689205	12,88956358	11,40321482	14,19832729	17,4925582
σ ₀ (MPa)	0	0	0	1,173377657	0,163394091
e _p (mm)	13,90986822	9,417259583	8,0595	903,4099563	4,4188
e _p /d _{max}	2,8798899	1,949743185	1,66863354	187,0413988	0,914865424
k ₁			2,2137		2,7942
k ₂			0		0,0261
r	0,991110488	0,57497826	0,987977733	0,973806962	



Şekil 3.23. Üç nokta yüklemede regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi, c) karşılaştırma (harç)

3.4.1.2. Üç nokta eğilme deneyinde sonuç karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.30. ve 3.32. çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri beton numunesinde, harç numunesine göre çok az artış göstermekte, fakat her iki numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde M değerleri birbirlerine çok yakın görünmüştür.
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N , beton numunede, harç numuneye göre artış göstermekte ve yaklaşık 4~6 katıdır. Her iki numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde N değerleri birbirlerine yakındır.
- 3) Her iki numunede numune dağılımı düzgün olduğu için lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A ile eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , beton için sınır değerinin altında fakat harçta bu değer yüksek olduğu görülür ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Her iki numunede numune dağılımı düzgün olduğu için lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, sınır değerlerinin altında olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) Deney dataların band genişliği dar olduğundan MFSL analizinde eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , betonda sınır değerinin altında fakat harçta bir miktar yüksek olduğu ve eğim değişimi ω_{Ac} , her iki numunede sınır değerinin altında çıktığı görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y ekseninde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_C , analizlerde birbirlerine yakın olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m , tüm analizlerde düşük olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , her iki numunede birbirlerine yakın yalnız harçta bu değer lineer II için bir miktar yüksek çıkmıştır.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Gf} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{ef} , betonda, harca göre az ve anlamlıdır. Bu değerlerin her iki numune için birbirlerine yakın olduğu görülür.
- 10) Bf değerinin her iki numunede birbirlerine yakın ve harçta betona göre yaklaşık iki katı olduğu görülür.

11) Numunede artık dayanım değeri σ_0 , betonda daha fazla ve yaklaşık iki katıdır. Bunun nedeni ise betonda maksimum agreganın daha büyük olduğuna bağlanabilir.

12) Karakteristik uzunluk ℓ_p , Bazant'ın önerdiği boyut etkisine uyumlu ve her iki numunede değerler lineer ve non-lineer değerlerine çok daha yakındır. Kim'e göre ℓ_p değerleri Carpinteri' nin ℓ_p değerlerinden çok daha düşüktür. ℓ_p / d_{max} oranı harçta daha yüksek bulunmuştur.

13) MSEL analizinde k_1 katsayısı betonda daha az bulunmuştur. Bu sonuç Bf_t değerlerine uyumlu, yani Bazant'ın önerdiği boyut etkisinde beton, harca göre daha düşük Bf_t değerlerine sahiptir ($k_1\sigma_{N,r}$ eğilmeye karşı dayanım değerini ifade etmektedir).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

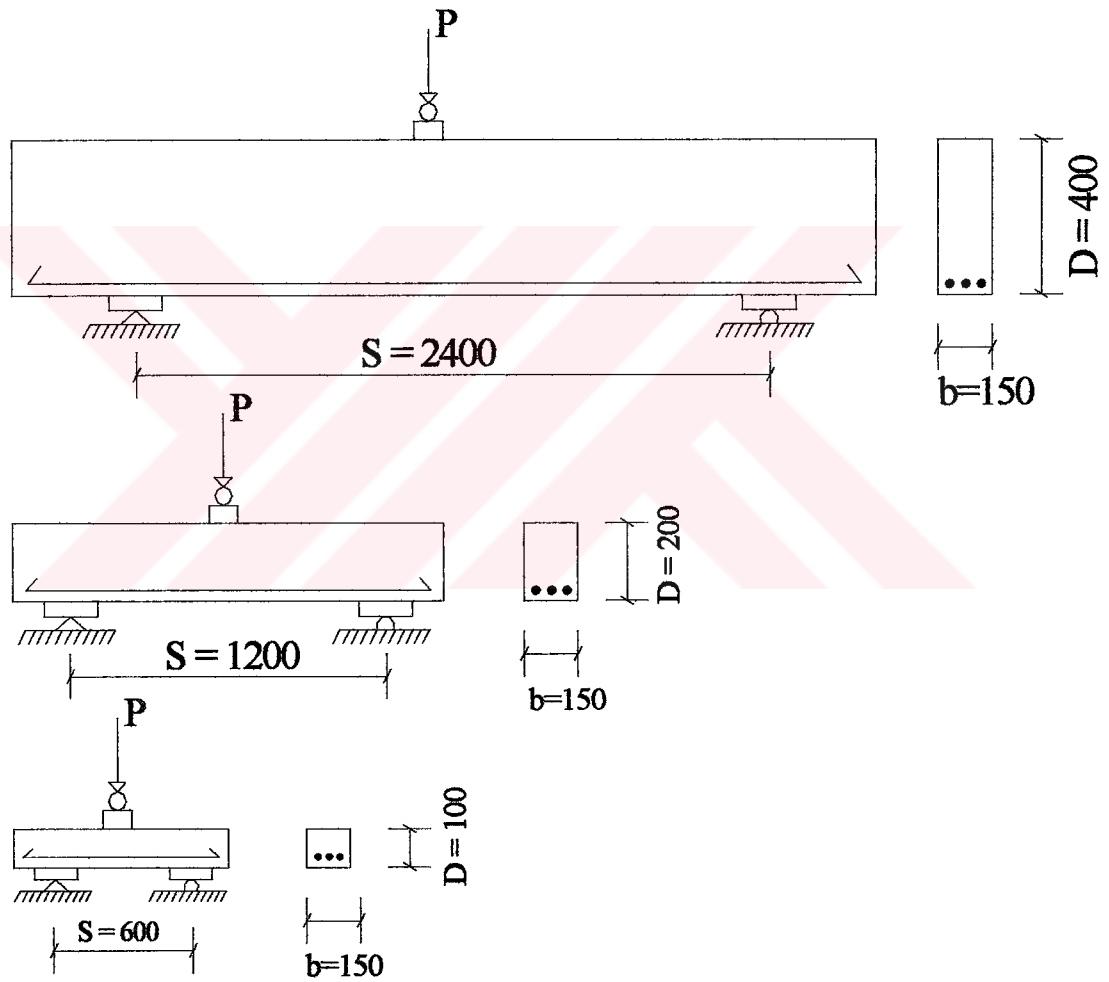
Beton $\rightarrow$ a) $r = 0,9751$ b) $r = 0,9684$ c) $r = 0,9847$ d) $r = 0,9758$

Harç $\rightarrow$ a) $r = 0,9911$ b) $r = 0,5750$ c) $r = 0,9880$ d) $r = 0,9738$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri harç numunesinde birbirlerine daha yakın olduğu ve dayanım kriterin daha az olduğu görülür (Şekil 3.22c ve 3.23c).

3.4.2. Yüksek mukavemetli betonda üç nokta eğilme deneyi

Kiriş numune üzerinde üç nokta yükleme deneyi Bosco, Carpinteri ve Debernardi [23] tarafından 1989 yılında yapılmıştır. Üç farklı boyutlu dikdörtgen kesitli kiriş numuneleri kullanılmış ve uzunluk / yükseklik oranı 6 olarak düzenlenmiştir. Yükseklik $D = 100, 200$ ve 400 mm ve kalınlık $b = 150$ mm'dir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Yüksek mukavemetli betonda üç nokta yüklemesinde numune geometrisi ve yükleme durumu (tüm boyutlar mm'dir)

Beton karışımında su/çimento oranı 0,27 olarak düzenlenmiştir (ağırlıkça). Maksimum dane çapı $d_{max} = 12,7$ mm'dir. Betonun basınç dayanımını belirlemek için 20 adet küp numunesi alınıp (kenar uzunluk 160 mm) 28 günlük kürden sonra ortalama basınç dayanımı $f_c = 91,2$ MPa olarak elde edilmiştir. Deneyde dört çeşit donatı $\Phi = 4, 5, 8$ ve 10 mm kullanılmış ve akma dayanımları sırası ile $f_y = 637, 569, 441$ ve 456 MPa olarak elde edilmiştir. Deneyde beş sınıf donatı (N_p) kullanılmış. N_p değeri gevreklik sayısı olarak geçiyor ve $N_p = 0; 0,10; 0,26; 0,53$ ve 0,87 olarak kullanılmıştır. Gevreklik sayısı aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$N_p = f_y D^{1/2} A_s / (K_{IC} A) \quad (3.9)$$

N_p : donatı ile ilgili gevreklik sayısı, f_y : donatının akma dayanımı (MPa), D : kesit yüksekliği (mm), A_s : donatının kesit alanı (mm²), K_{IC} : kırılma tokluğu (MPa√m), A : kirişin kesit alanı (mm²).

Nominal gerilme aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$\sigma_N = 3 P_u S / (2bD^2) \quad (3.10)$$

P_u : maksimum yük (N), S : iki mesnet arası mesafe (mm), b : numunenin kalınlığı (mm), D : numune yüksekliği (mm)'dir.

3.4.2.1 Yüksek mukavemetli betonda deney analizleri

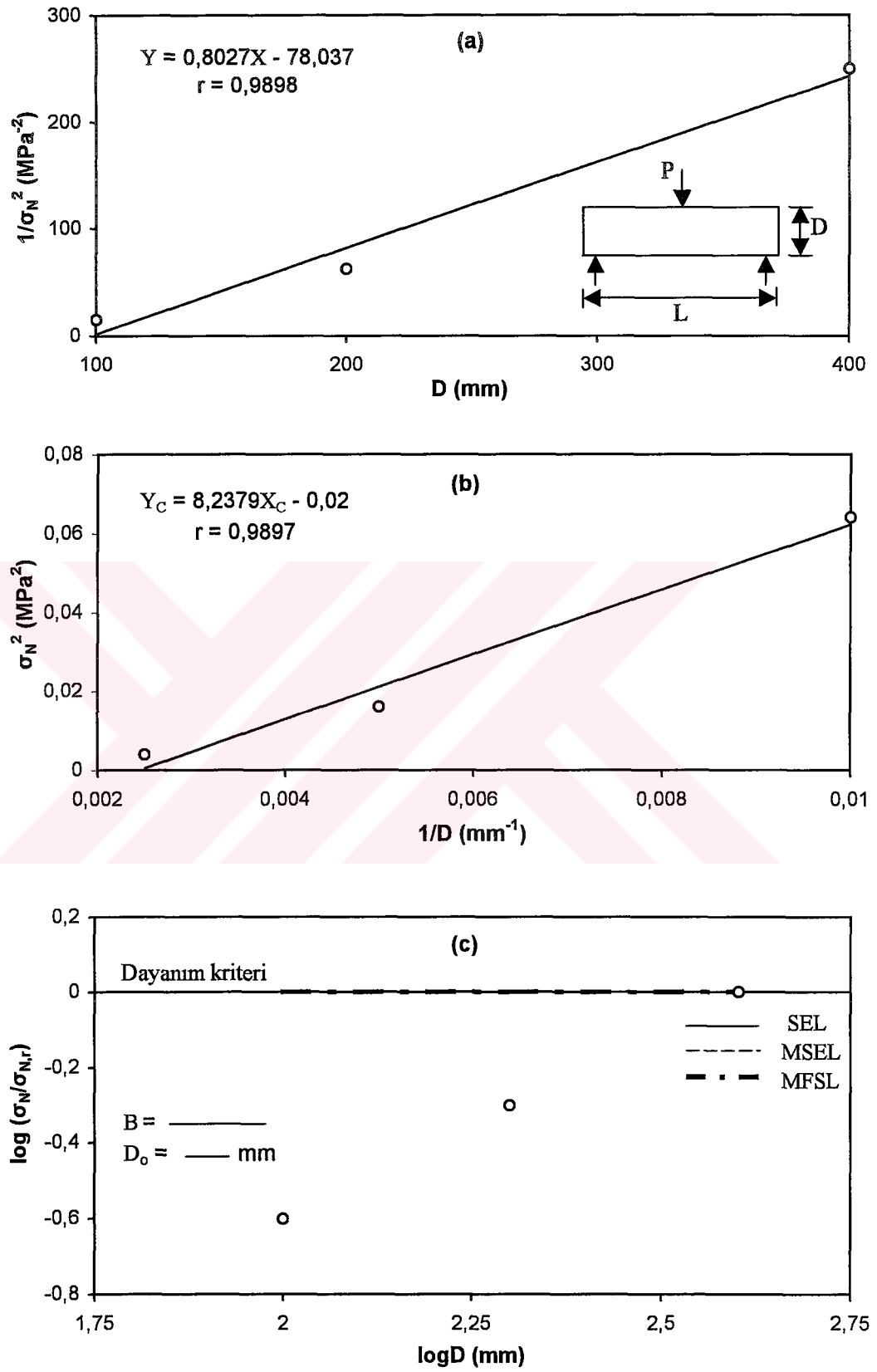
Çizelge 3.33. Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,0$)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6
L (mm)	750	750	1500	1500	3000	3000
mg (N)	281,25	281,25	1125	1125	4500	4500
P_0 (N)	0	0	0	0	0	0
D (mm)	100	100	200	200	400	400
b (mm)	150	150	150	150	150	150
S (mm)	600	600	1200	1200	2400	2400
f_c (MPa)	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2
P_U (N)	105,4688	105,4688	421,875	421,875	1687,5	1687,5
σ_N (MPa)	0,063281	0,063281	0,12656	0,126563	0,253125	0,25313
X=D (mm)	100	100	200	200	400	400
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	249,718	249,718	62,4295	62,42951	15,60738	15,6074
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	2,49718	2,49718	0,31215	0,312148	0,039018	0,03902
$X^*=LnD$ (mm)	4,60517	4,60517	5,29832	5,298317	5,991465	5,99146
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	-2,76017	-2,76017	-2,06702	-2,06702	-1,37387	-1,37387
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	0,004005	0,004005	0,01602	0,016018	0,064072	0,06407
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	0,25313	0,25313	0,25313	0,25313	0,25313	0,25313
$X_K=logD$ (mm)	2	2	2,30103	2,30103	2,60206	2,60206
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	————	————	————	————	————	————
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	————	————	————	————	————	————
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	————	————	————	————	————	————

Çizelge 3.34. Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları ($N_p=0,0$)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	0,035296	—	—		
M^2 (MPa ² m)	0,001246	—	—		
N (mm)	-388,889	-325,926	-420		
A (Eğim)	0,8027	343,3623		8,2379	
C	-78,037	-1,0535		-0,02	
C^-	109,2516	0,949449		0,028032	
ω_A	0,288675	0,118094		0,288675	
ω_C	0,196396	0,254588		0,196396	
ω_C^-	0,231455	0,133166		0,231455	
m	0,968246	0,557073		0,968246	
ω_{KIC}	0,144338	0,059047		0,144338	
ω_{cf}	0,349149	0,280644		0,349149	
ω_{cf}	0,148003	0,160408		0,148003	
Bf_t (MPa)	—	—	—	12,62616	—
σ_0 (MPa)	0	0	0	0,264724	—
ℓ_p (mm)	-388,889	-325,926	75,774	-411,895	—
ℓ_p/d_{max}	-30,6212	-25,6635	5,96646	-32,4327	—
k_1			0,584		—
k_2			0		—
r	0,989747	0,973242	0,9993	0,989747	

Not: $k_1 = -4,1684 + 0,0481i$, $k_2 = 1,7614 + 0,0031i$, $\ell_p = 16,3338 + 0,5102i$ (MSEL)



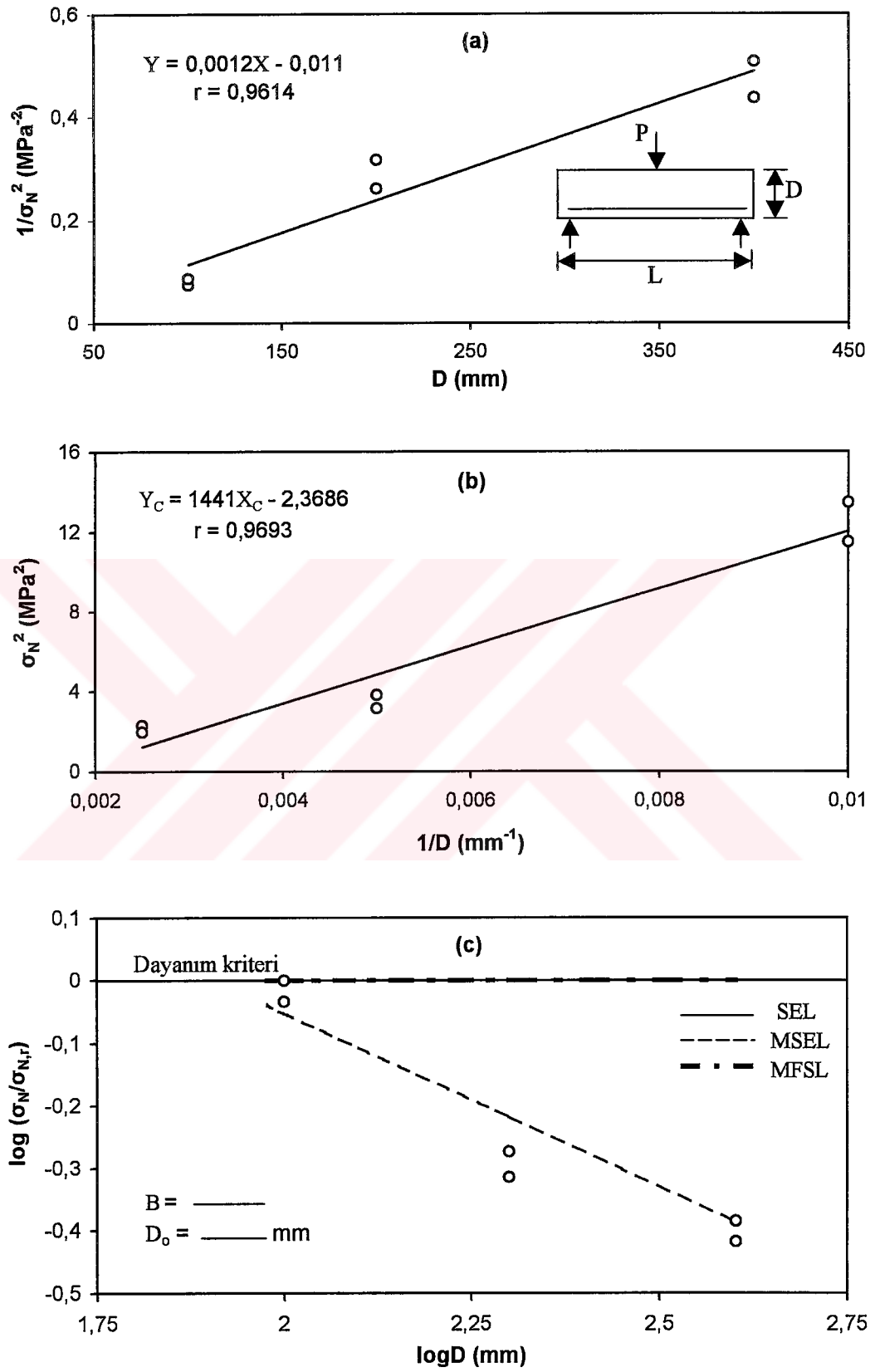
Şekil 3.25. Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma ($N_p=0,0$)

Çizelge 3.35. Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,10$)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6
L (mm)	750	750	1500	1500	3000	3000
mg (N)	281,25	281,25	1125	1125	4500	4500
P ₀ (N)	6010	5550	6100	5500	8400	7670
D (mm)	100	100	200	200	400	400
b (mm)	150	150	150	150	150	150
S (mm)	600	600	1200	1200	2400	2400
f _c (MPa)	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2
P _U (N)	6115,469	5655,469	6521,88	5921,875	10087,5	9357,5
σ_N (MPa)	3,669281	3,393281	1,95656	1,776563	1,513125	1,40363
X=D (mm)	100	100	200	200	400	400
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,074274	0,086848	0,26122	0,316839	0,436768	0,50757
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	0,000743	0,000868	0,00131	0,001584	0,001092	0,00127
$X^*=\ln D$ (mm)	4,60517	4,60517	5,29832	5,298317	5,991465	5,99146
$Y^*=L\sigma_N$ (MPa)	1,299996	1,221797	0,67119	0,57468	0,414177	0,33906
$X_c=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y_c=\sigma_N^2$ (MPa ²)	13,46362	11,51436	3,82814	3,156174	2,289547	1,97016
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	3,669281	3,669281	3,66928	3,669281	3,669281	3,66928
$X_K=\log D$ (mm)	2	2	2,30103	2,30103	2,60206	2,60206
$Y_K=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,03281	-0,03281	-0,2279	-0,2279	-0,4565	-0,4565
$Y_B=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	—	—	—	—	—	—
$Y_C=\log (\sigma_N/\sigma_{N,r})$	—	—	—	—	—	—

Çizelge 3.36. Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları ($N_p=0,10$)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	0,894536	0,816443	1,24097		
M ² (MPa ² m)	0,800195	0,666579	1,54		
N (mm)	-8,80859	-40,7337	114,158		
A (Eğim)	0,00125	0,0353		1440,954	
C	-0,01101	0,0009		-2,36856	
C ⁻	0,280588	0,001144		6,037001	
ω _A	0,143111	0,543584		0,126858	
ω _C	4,298495	0,146457		0,510472	
ω _{C⁻}	0,079497	0,090558		0,094412	
m	0,332561	0,378832		0,394956	
ω _{KIC}	0,071556	0,271792		0,063429	
ω _{Gr}	4,300876	0,562968		0,525999	
ω _{cf}	4,172828	0,420133		0,403055	
Bf _t (MPa)	—	—	3,67288	—	22,52205
σ ₀ (MPa)	0	0	0	—	-0,89714
e _p (mm)	-8,80859	-40,7337	0,1359	-608,366	3,7821
e _p /d _{max}	-0,69359	-3,20737	0,0107	-47,9029	0,297803
k ₁			23,5589		6,138
k ₂			0		-0,2445
r	0,961405	0,390768	0,97139	0,969278	



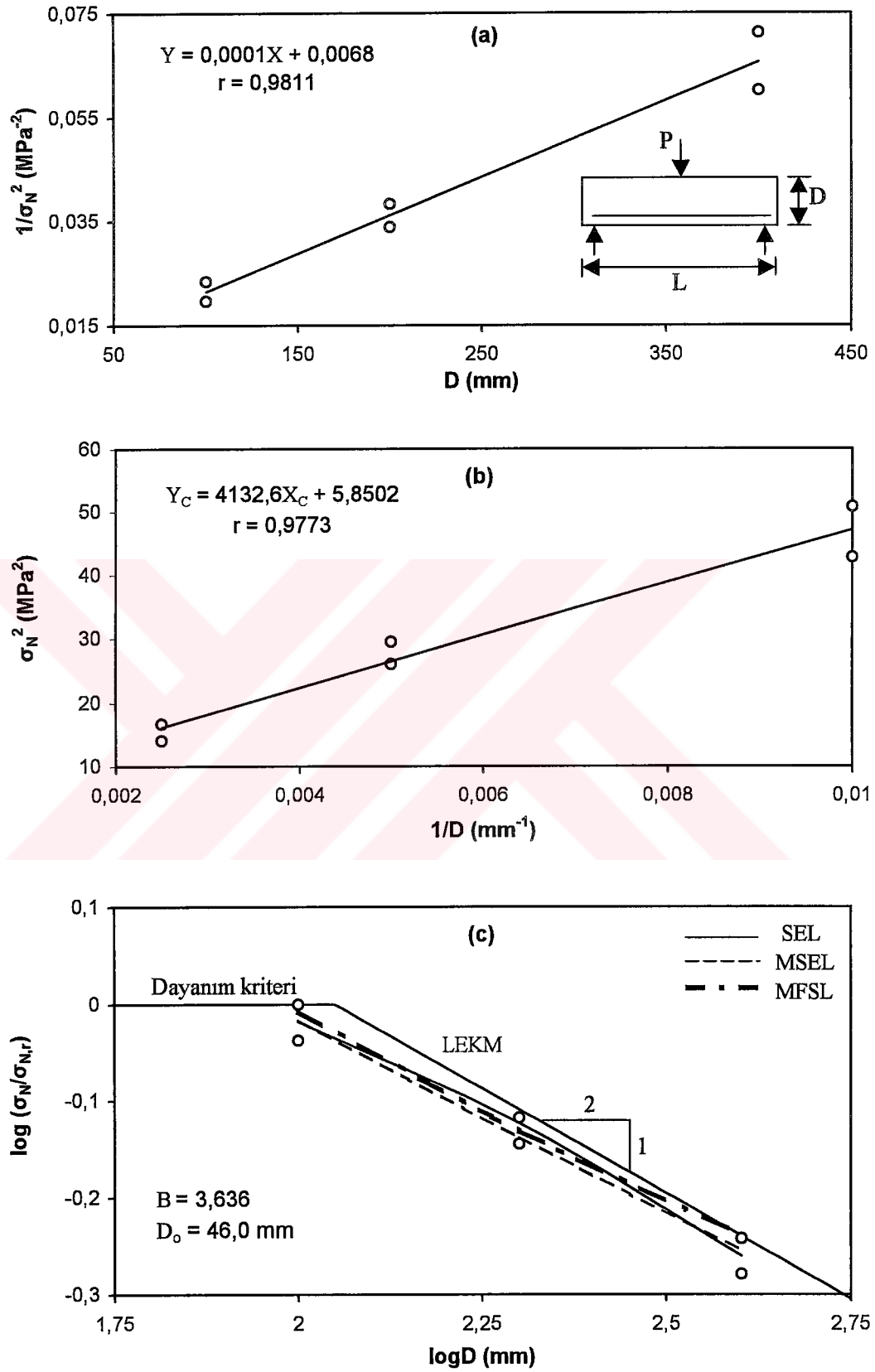
Şekil 3.26. Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma ($N_p=0,10$)

Çizelge 3.37. Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,26$)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6
L (mm)	750	750	1500	1500	3000	3000
mg (N)	281,25	281,25	1125	1125	4500	4500
P ₀ (N)	11770	10790	17690	16590	25500	23290
D (mm)	100	100	200	200	400	400
b (mm)	150	150	150	150	150	150
S (mm)	600	600	1200	1200	2400	2400
f _c (MPa)	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2
P _U (N)	11875,47	10895,47	18111,9	17011,88	27187,5	24977,5
σ_N (MPa)	7,125281	6,537281	5,43356	5,103563	4,078125	3,74663
X=D (mm)	100	100	200	200	400	400
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,019697	0,023399	0,03387	0,038393	0,060128	0,07124
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻¹ mm) ⁻²	0,000197	0,000234	0,00017	0,000192	0,00015	0,00018
$X^*=LnD$ (mm)	4,60517	4,60517	5,29832	5,298317	5,991465	5,99146
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	1,963649	1,877521	1,69259	1,629939	1,405637	1,32086
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	50,76963	42,73605	29,5236	26,04635	16,6311	14,0372
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	7,125281	7,125281	7,12528	7,125281	7,125281	7,12528
$X_K=logD$ (mm)	2	2	2,30103	2,30103	2,60206	2,60206
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01627	-0,01627	-0,13809	-0,13809	-0,25474	-0,25474
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,01826	-0,01826	-0,13123	-0,13123	-0,26022	-0,26022
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,00672	-0,00672	-0,13185	-0,13185	-0,23907	-0,23907

Çizelge 3.38. Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları (Np=0,26)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	2,60634	2,609986	2,61191		
M ² (MPa ² m)	6,793007	6,812026	6,82207		
N (mm)	46,00436	46,69312	46,3271		
A (Eğim)	0,000147	0,006855		4132,646	
C	0,006772	0,000147		5,850219	
C ⁻	0,041121	0,000187		29,95732	
ω _A	0,098707	0,347964		0,108264	
ω _C	0,567675	0,107467		0,505858	
ω _{C⁻}	0,044072	0,039816		0,046568	
m	0,184367	0,166561		0,19481	
ω _{KIC}	0,049354	0,173982		0,054132	
ω _{Gf}	0,576193	0,364181		0,517314	
ω _{cf}	0,656378	0,44563		0,6035	
Bf _t (MPa)	12,15155	12,07846	12,135	13,19705	26,34359
σ ₀ (MPa)	0	0	0	2,418723	0,948375
ℓ _p (mm)	46,00436	46,69312	46,5389	706,4088	5,3089
ℓ _p /d _{max}	3,622391	3,676623	3,66448	55,62274	0,418024
k ₁			1,7014		3,6972
k ₂			0		0,1331
r	0,981071	0,820792	0,98245	0,977343	



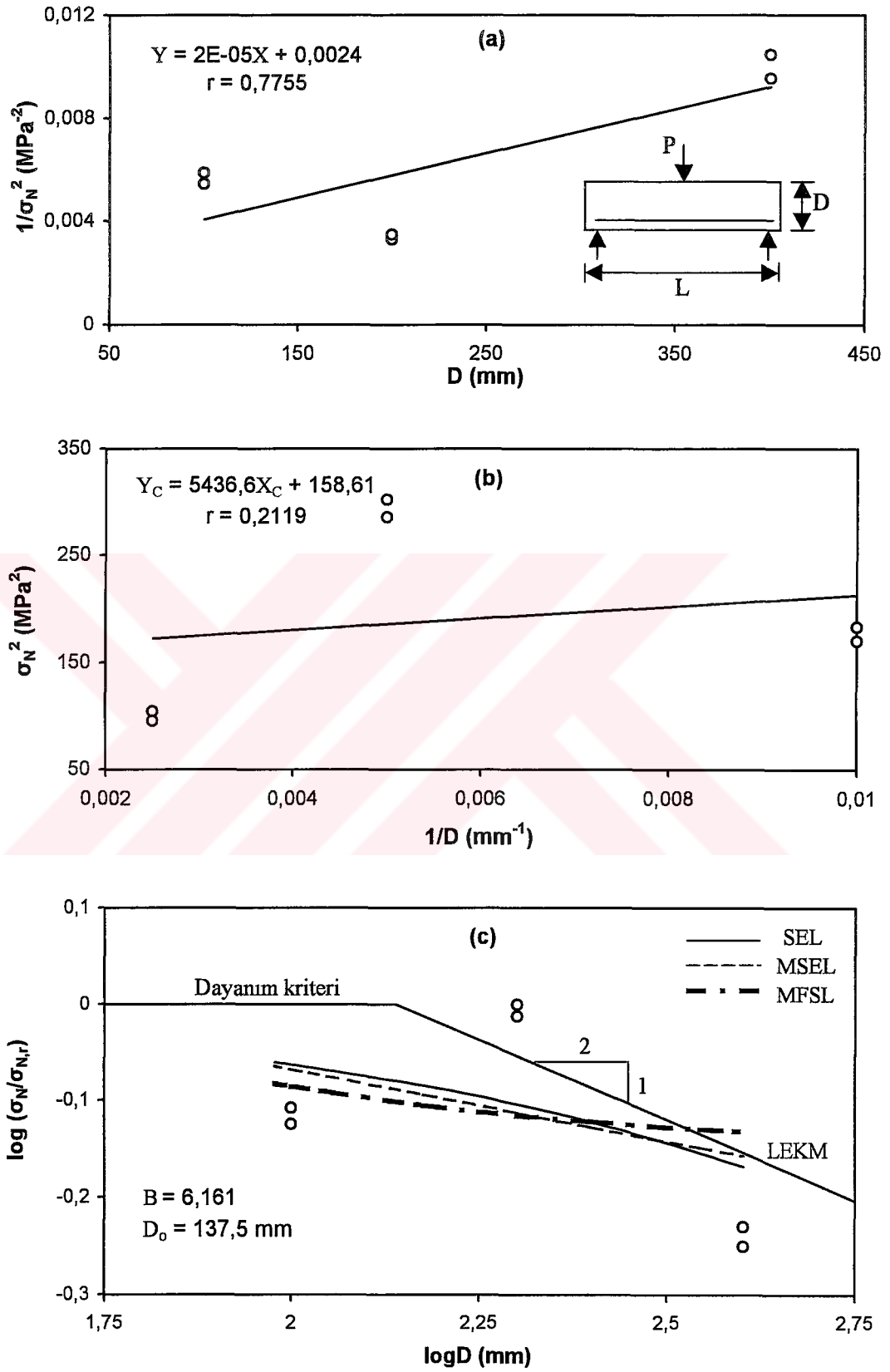
Şekil 3.27. Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma ($N_p=0,26$)

Çizelge 3.39. Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,53$)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6
L (mm)	750	750	1500	1500	3000	3000
mg (N)	281,25	281,25	1125	1125	4500	4500
P ₀ (N)	22480	21640	57530	55910	66540	63460
D (mm)	100	100	200	200	400	400
b (mm)	150	150	150	150	150	150
S (mm)	600	600	1200	1200	2400	2400
f _c (MPa)	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2
P _U (N)	22585,47	21745,47	57951,9	56331,88	68227,5	65147,5
σ_N (MPa)	13,55128	13,04728	17,3856	16,89956	10,23413	9,77213
X=D (mm)	100	100	200	200	400	400
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,005446	0,005874	0,00331	0,003501	0,009548	0,01047
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² /mm) ⁻²	5,45E-05	5,87E-05	1,7E-05	1,75E-05	2,39E-05	2,6E-05
$X^*=LnD$ (mm)	4,60517	4,60517	5,29832	5,298317	5,991465	5,99146
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	2,606481	2,56858	2,85564	2,827288	2,325728	2,27953
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	183,6372	170,2315	302,258	285,5952	104,7373	95,4944
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	17,3856	17,3856	17,3856	17,3856	17,3856	17,3856
$X_K=logD$ (mm)	2	2	2,30103	2,30103	2,60206	2,60206
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,06775	-0,06775	-0,11289	-0,11289	-0,15697	-0,15697
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,06294	-0,06294	-0,10404	-0,10404	-0,16839	-0,16839
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,086	-0,086	-0,11565	-0,11565	-0,13215	-0,13215

Çizelge 3.40. Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları (Np=0,53)

DEĞİŞKEN	LİN I DEĞ.	LİN II DEĞ.	N-LİN DEĞ.	MFSL DEĞ.	MSEL DEĞ.
M (MPa√m)	7,636976	13,81833	9,54295		
M ² (MPa ² m)	58,3234	190,9462	91,0679		
N (mm)	137,4992	904,9456	290,67		
A (Eğim)	1,71E-05	0,004739		5436,627	
C	0,002358	5,24E-06		158,6119	
C ⁻	0,006358	3,29E-05		190,3256	
ω _A	0,407064	0,294176		2,305185	
ω _C	0,783269	1,760834		0,522623	
ω _{C⁻}	0,136907	0,1322		0,205315	
m	0,572725	0,553033		0,858895	
ω _{KIC}	0,203532	0,147088		1,152593	
ω _{Gf}	0,882729	1,785239		2,363687	
ω _{cf}	1,158271	2,025027		2,777045	
Bf _t (MPa)	20,59545	14,52594	17,7004	2,534516	11,23631
σ ₀ (MPa)	0	0	0	12,59412	8,296408
ℓ _p (mm)	137,4992	904,9456	379,884	34,27628	52,1433
ℓ _p /d _{max}	10,82671	71,25556	29,9121	2,69892	4,105772
k ₁			0,9723		0,6463
k ₂			0		0,4772
r	0,7755	0,861916	0,49406	0,211896	



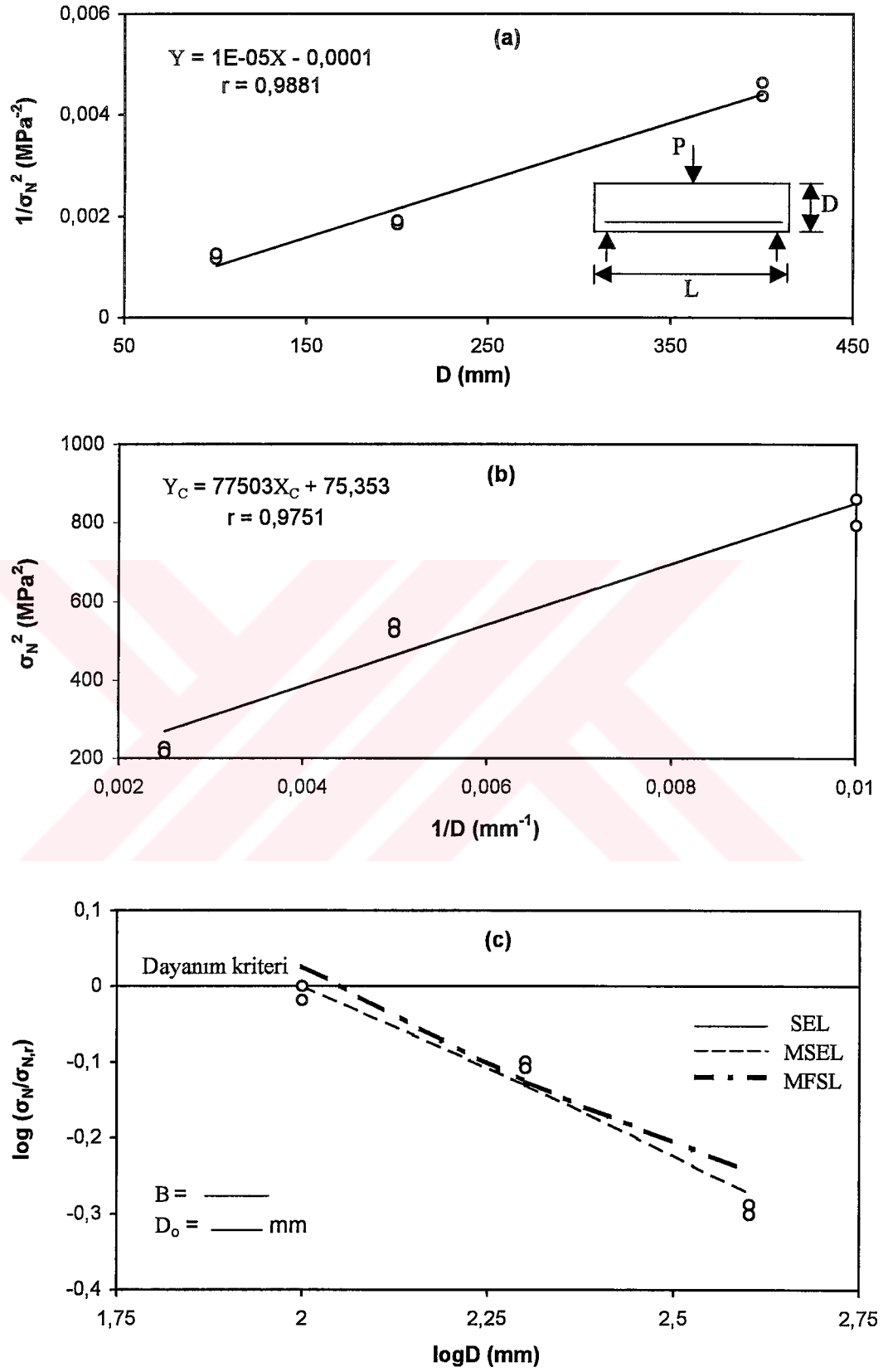
Şekil 3.28. Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma ($N_p=0,53$)

Çizelge 3.41. Yüksek mukavemetli betonda deney bilgileri ($N_p=0,87$)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6
L (mm)	750	750	1500	1500	3000	3000
mg (N)	281,25	281,25	1125	1125	4500	4500
P_0 (N)	48790	46830	77310	75810	99180	96120
D (mm)	100	100	200	200	400	400
b (mm)	150	150	150	150	150	150
S (mm)	600	600	1200	1200	2400	2400
f_c (MPa)	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2	91,2
P_U (N)	48895,47	46935,47	77731,9	76231,88	100867,5	97807,5
σ_N (MPa)	29,33728	28,16128	23,3196	22,86956	15,13013	14,6711
X=D (mm)	100	100	200	200	400	400
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,001162	0,001261	0,00184	0,001912	0,004368	0,00465
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	1,16E-05	1,26E-05	9,2E-06	9,56E-06	1,09E-05	1,2E-05
$X^*=LnD$ (mm)	4,60517	4,60517	5,29832	5,298317	5,991465	5,99146
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	3,378859	3,337948	3,14929	3,129807	2,716688	2,68588
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,01	0,01	0,005	0,005	0,0025	0,0025
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	860,6761	793,0578	543,802	523,0169	228,9207	215,242
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	29,33728	29,33728	29,3373	29,33728	29,33728	29,3373
$X_K=logD$ (mm)	2	2	2,30103	2,30103	2,60206	2,60206
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	0,000319	0,000319	-0,13024	-0,13024	-0,27296	-0,27296
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	—	—	—	—	—	—
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	0,006258	0,006258	-0,12582	-0,12582	-0,24358	-0,24358

Çizelge 3.42. Yüksek mukavemetli betonda deney sonuçları ($N_p=0,87$)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	9,408824	10,05069	9,89103		
M^2 (MPa ² m)	88,52597	101,0163	97,8325		
N (mm)	-9,24505	17,66909	10,2166		
A (Eğim)	1,13E-05	0,000175		77502,86	
C	-0,0001	9,9E-06		75,35256	
C^-	0,002531	1,09E-05		527,4526	
ω_A	0,077873	0,980827		0,113569	
ω_C	2,22856	0,114629		0,772628	
ω_C^-	0,043342	0,048988		0,052033	
m	0,181312	0,20493		0,21767	
ω_{KIC}	0,038936	0,490414		0,056785	
ω_{Gf}	2,22992	0,987503		0,78093	
ω_{cf}	2,160194	1,083269		0,874427	
Bf_t (MPa)	—	75,61164	97,8564	3,677171	66,65137
σ_0 (MPa)	0	0	0	8,680585	-0,63955
ℓ_p (mm)	-9,24505	17,66909	29,1771	1028,536	25,4031
ℓ_p/d_{max}	-0,72796	1,391267	2,29741	80,98713	2,000244
k_1			2,0872		2,2719
k_2			0		-0,0218
r	0,988079	0,454203	0,97242	0,975141	



Şekil 3.29. Yüksek mukavemetli betonda regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma ($N_p=0,87$)

3.4.2.2. Yüksek mukavemetli beton eğilmesinde sonuç karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.34, 3.36, 3.38, 3.40 ve 3.42 çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri, donatı oranı arttıkça artış göstermektedir. $N_p = 0$ serisinde eğrinin y eksenini kestiği nokta negatif olduğu için M değerlerinin olumsuz olduğu görülür.
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N , donatı oranı arttıkça çok değiştiği fakat $N_p = 0,26$ serisinde değerler birbirlerine daha yakın ve anlamlıdır. $N_p = 0,26$ ve $N_p = 0,87$ serilerinde bir düşüş ve diğer serilerde genelde eğrinin y eksenini kestiği nokta negatif olduğundan N değerleri değişken ve kabul edilemez.
- 3) Lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , tüm serilerde band genişliği fazla olduğundan sınır değerinin üstünde fakat $N_p = 0,26$ ve $N_p = 0,87$ serilerinde band genişliğinin daha az olduğu için sınırın altında çıktığı görülür. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , $N_p = 0$ serisi haric diğer serilerde sınır değerinin üstündedir ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, tüm serilerde band genişliğinin fazla olduğundan sınır değerinin üstündedir. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, $N_p = 0,10$; $N_p = 0,26$ ve $N_p = 0,87$ serileri haric diğer serilerde sınır değerlerinin üstünde olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) MFSL analizinde $N_p = 0,10$; $N_p = 0,26$ ve $N_p = 0,87$ serilerinde band genişliği az olduğundan eğim değişimi ω_{Ac} , sınır değer civarında fakat diğer seriler için sınır değerinin üstündedir. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , tüm serilerde sınır değerinin üstünde çıktığı görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y eksenini üzerinde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_{C-} , analizlerde birbirlerine yakın olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m , $N_p = 0,26$ ve $N_p = 0,87$ serilerinde daha düşük olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , $N_p = 0,10$; $N_p = 0,26$ ve $N_p = 0,87$ serilerinde lineer I ve MFSL analizlerinde lineer II analizine göre genelde daha az, fakat tüm serilerde çok değişkendir.

9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Gf} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{ef} , lineer I ve lineer II analizlerinde $N_P = 0,26$ serisi haric diğer serilerde fazla çıktığı ve çok değişken olduğu görülür.

10) Bf_t değerinin, donatı oranı arttıkça artışı görülür. $N_P = 0,26$ serisi daha anlamlı değerler bulunmuş ve diğer serilerde değişik analizlerde olumsuz değerler olduğu görülür.

11) Numunelerde artık dayanım değeri σ_0 , Kim'in önerdiği boyut etkisinde Carpinteri'nin denklemine göre daha az olduğu görülür. Bu değer sadece $N_P = 0,53$ serisinde olumlu bulunmuş ve diğer serilerde olumsuz ve negatif çıktığı görülür ($k_2\sigma_{N,r}$: artık dayanım değerini ifade etmektedir).

12) Bazant'ın önerdiği boyut etkisine göre karakteristik uzunluk ℓ_p , çok değişken olduğu fakat $N_P = 0,26$ ve $0,87$ serilerinde normal ve anlamlıdır. Kim'e göre ℓ_p , değeri donatı oranı artması ile yükseldiği fakat son seride ani bir düşüş olmuştur. ℓ_p / d_{max} oranı ise $N_P = 0,0$ ve $0,10$ serileri haric diğer serilerde genelde olumlu olduğu görülür.

13) MSEL analizinde k_1 katsayısı değişken olduğu görülür. Donatı oranı arttıkça genel olarak düşmüş, fakat $N_P = 0$ serisinde karmaşık bir katsayı çıktığı görülür. Bazant'ın önerdiği denklemde ise k_1 katsayısı $N_P = 0,10$ serisi haric diğer serilerde birbirlerine çok yakın değerlerdir ($k_1\sigma_{N,r}$ eğilmeye karşı dayanım değerini ifade etmektedir).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

$N_P = 0,00 \rightarrow$ a) $r = 0,9898$ b) $r = 0,9732$ c) $r = 0,9993$ d) $r = 0,9897$

$N_P = 0,10 \rightarrow$ a) $r = 0,9614$ b) $r = 0,6770$ c) $r = 0,9714$ d) $r = 0,9693$

$N_P = 0,26 \rightarrow$ a) $r = 0,9811$ b) $r = 0,8208$ c) $r = 0,9824$ d) $r = 0,9773$

$N_P = 0,53 \rightarrow$ a) $r = 0,7755$ b) $r = 0,8619$ c) $r = 0,4941$ d) $r = 0,2119$

$N_P = 0,87 \rightarrow$ a) $r = 0,9881$ b) $r = 0,4542$ c) $r = 0,9724$ d) $r = 0,9751$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri, $N_P = 0,0$ serisinde k_1 ve k_2 katsayıları karmaşık olup ve dayanım kriteri etkindir. SEL, MFSL ve MSEL eğrileri üstüste gelip geçersiz oldukları görülür. $N_P = 0,10$ serisinde Carpinteri ve Bazant denklemleri geçersiz, dayanım

kriteri etkindir. $N_P = 0,26$ serisinde eğriler birbirlerine daha yakın olduğu görülür. $N_P = 0,53$ serisinde eğriler daha yatay devam etmektedir. $N_P = 0,87$ serisinde Bazant denklemi geçersiz, dayanım kriteri etkindir. Ayrıca donatı oranı arttıkça dayanım kriteri artmıştır. SEL geçersiz olduğu durumlarda B ve D_0 katsayıları olumsuz değerler bulunmuş ve LEKM geçersiz olup dayanım kriteri etkindir (Şekil 3.25c, 3.26c, 3.27c, 3.28c ve 3.29c).



3.5. Eğilmede Aderans Eki Deneyi

3.5.1. Betonarme kirişde aderans eki deneyi

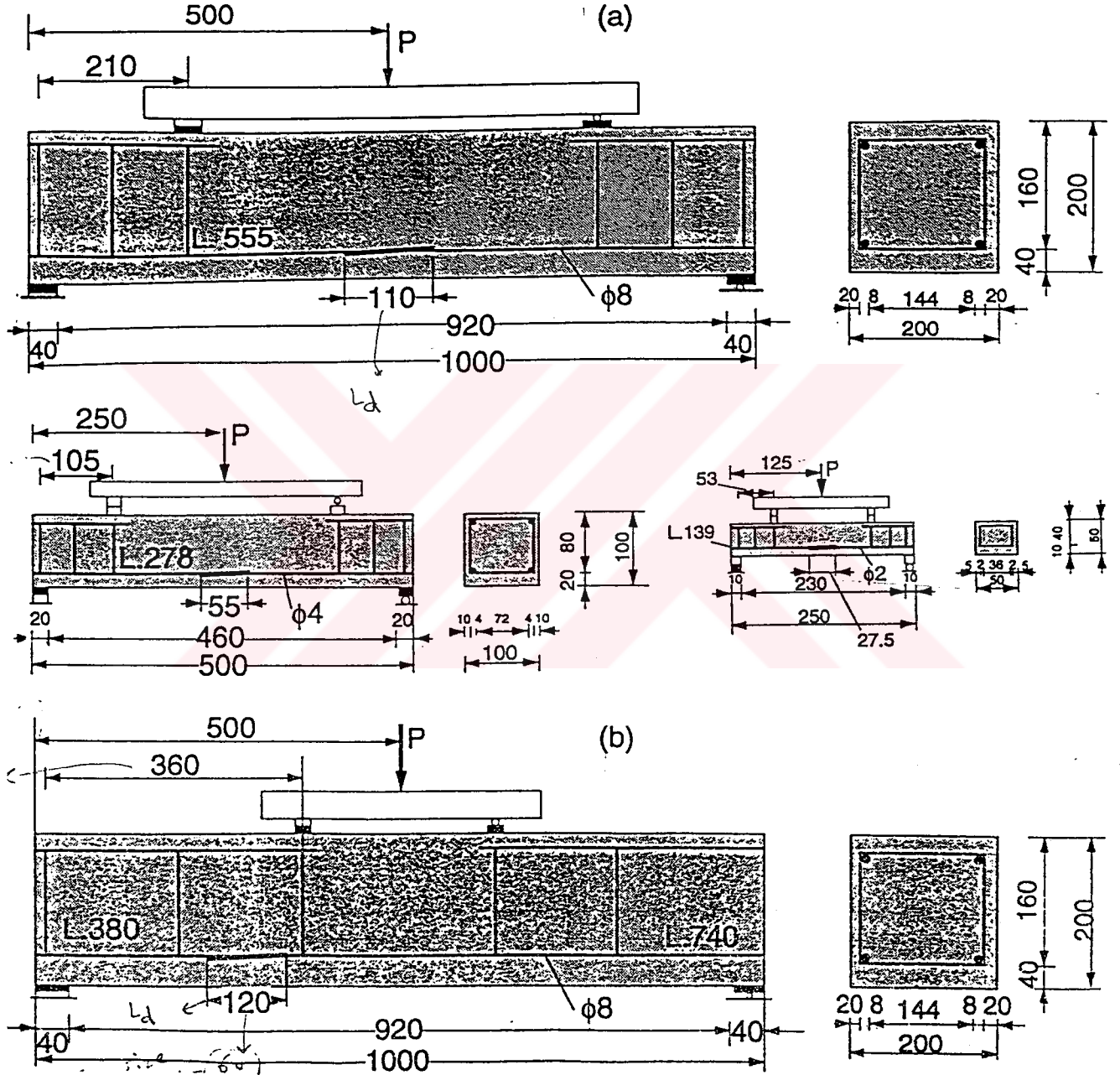
Betonarme kiriş numune üzerinde aderans ekinde boyut etkisi (dört nokta yüklemesi) deneyi Şener, Bazant ve Giraudon [18] tarafından Gazi Üniversitesinde 1999 yılında yapılmıştır. Dört seri numune ve her seride üçer adet farklı boyutlu, kare kesitli kiriş kullanılmıştır. Kirişlerde kullanılan boyuna giden donatılar bindirmeli olarak iki durumda düzenlenmiştir. Birinci durumda bindirme kirişin ortasına ve sabit moment bölgesine yerleştirilmiş, ikinci durumda ise bindirme kirişin sol tarafında sabit kesme bölgesine yerleştirilmiş ve her iki durum için dört nokta yüklemesi kirişe uygulanmıştır (Şekil 3.30). Yükseklik değerleri $D = 50, 100$ ve 200 mm'dir. Tüm numunelerde $S/d = 6$ (S : iki mesnet arasındaki mesafe), $L/D = 5$ (L : kiriş uzunluğu) olarak düzenlenmiştir. Birinci durum için kesme bölgesinin uzunluğu $a_s = 1,3d$ ve ikinci durum için $a_s = 2,3d$ olarak düzenlenmiştir. Beton karışımının oranı her iki seri için $0,7:1:4$ (su-çimento-agrega) (ağırlıkça) düzenlenmiş ve normal portland çimento (NPÇ35, TS19) kullanılmıştır. Maksimum tane çapı $d_{max} = 4,76$ mm'dir (mikrobeton). Betonun basınç dayanımını belirlemek için her karışımdan silindir numuneleri alınıp (çap=76,2 mm, yükseklik=152,4 mm) 28 günlük kürden sonra ortalama basınç dayanımları f_c (MPa) elde edilmiştir (3.43, 3.45, 3.47 ve 3.49 çizelgeleri). Deneyde düz donatı kullanılmış, akma dayanımı $f_y = 220$ MPa'dır. Kesitteki donatı oranı $0,31\%$ ve çapları $\Phi = 2; 4$ ve 8 mm olarak düzenlenmiştir. Deneyde kullanılan paspayları (t), bindirme boyları (ℓ_d) ve çekme donatısı ile kirişin üst lifi arasındaki mesafe (d) 3.43, 3.45, 3.47 ve 3.49 çizelgelerinde verilmiştir. Sıyrılmaya karşı nominal gerilme aşağıdaki denklemlerden elde edilir:

$$T = P_u a / (2 [d - (0,85c)/2]) \quad (3.11)$$

$$\sigma_N = T / (\pi d_b \ell_d) \quad (3.12)$$

σ_N : sıyrılmaya karşı nominal gerilme (MPa), T : donatıda oluşan çekme kuvveti (N),
 a : uygulanan yükün moment kolu (mm), P_u : maksimum yük (N), d : çekme donatısı

ile kirişin üst lifi arasındaki mesafe (mm), c : basınç bölgesi ile tarafsız eksen arasındaki mesafe (mm), d_b : donatı çapı (mm), ℓ_d : bindirme boyu (mm).



Şekil 3.30. Betonarme kirişin aderans ekinde numune geometrileri ve yükleme durumu; a) sabit moment bölgesinde bindirme, b) sabit kesme bölgesinde bindirme (tüm boyutlar mm'dir)

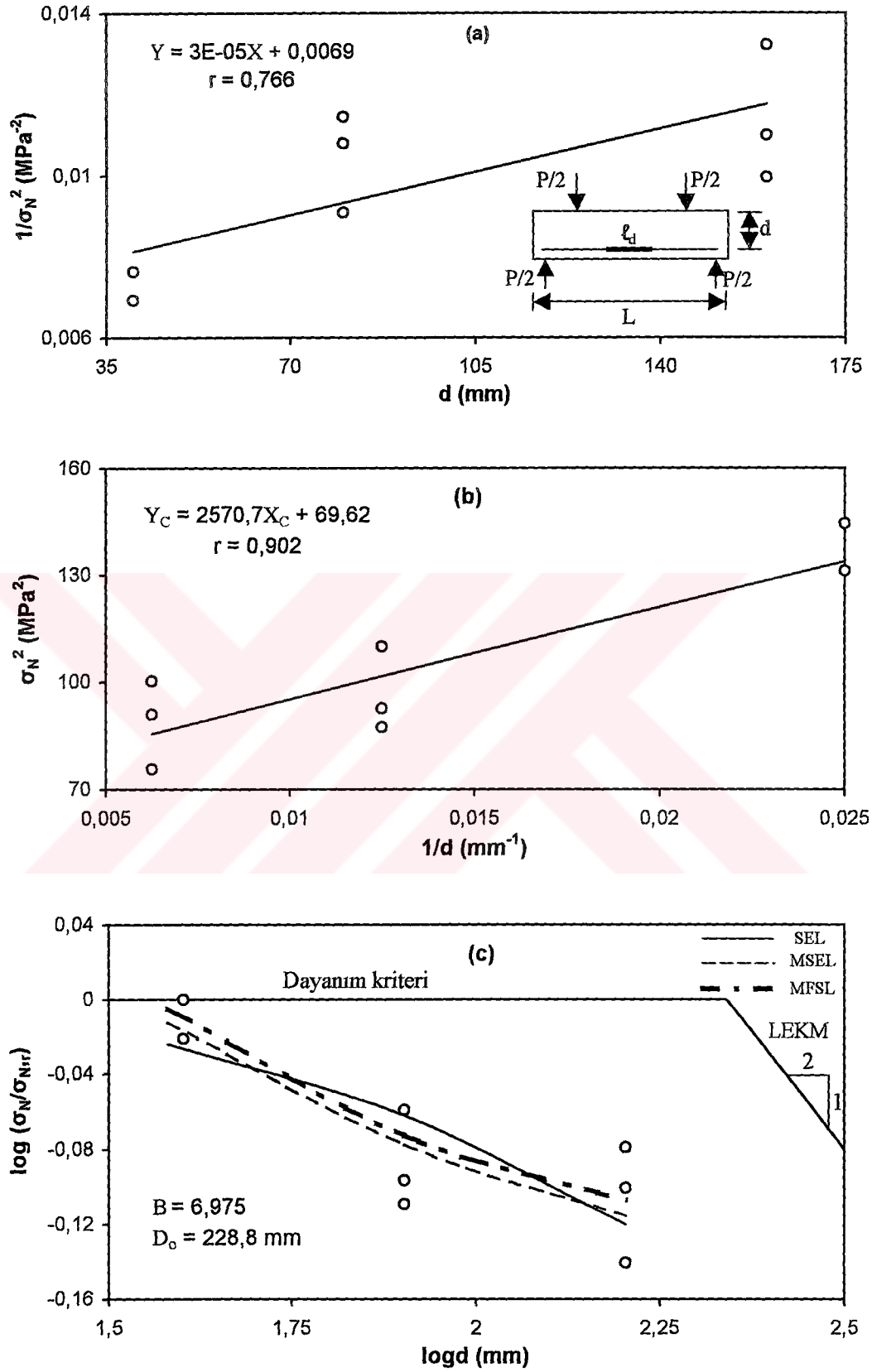
3.5.1.1. Betonarme kirişde aderans eki deneyinin analizleri

Çizelge 3.43. Aderans ekinde deney bilgileri (Sabit moment bölgesi, etriyesiz)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
t (mm)	10	10	10	20	20	20	40	40	40
d _b (mm)	2	2	2	4	4	4	8	8	8
ℓ _d (mm)	27,5	27,5	27,5	55	55	55	110	110	110
d (mm)	40	40	40	80	80	80	160	160	160
D (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
T (N)	2077	1978	1978	6659	7252	6461	26372	27691	24064
f _c (MPa)	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
P _u (N)	3150	3000	3000	10100	11000	9800	40000	42000	36500
σ _N (MPa)	12,02	11,45	11,45	9,63	10,49	9,35	9,54	10,02	8,7
X=d (mm)	40	40	40	80	80	80	160	160	160
Y=1/σ _N ² (MPa ⁻²)	0,007	0,008	0,008	0,011	0,009	0,011	0,011	0,01	0,013
X'=1/d (mm ⁻¹)	0,025	0,025	0,025	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006
Y'=1/σ _N ² d(MPa ⁻² mm) ⁻²	2E-04	2E-04	2E-04	1E-04	1E-04	1E-04	7E-05	6E-05	8E-05
X*=Lnd (mm)	3,689	3,689	3,689	4,382	4,382	4,382	5,075	5,075	5,075
Y*=Lnσ _N (MPa)	2,487	2,438	2,438	2,265	2,35	2,235	2,255	2,305	2,163
X _C =1/d (mm ⁻¹)	0,025	0,025	0,025	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	144,5	131,1	131,1	92,74	110	87,42	91,01	100,4	75,69
σ _{N,r} (MPa)	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02
X _K =logd (mm)	1,602	1,602	1,602	1,903	1,903	1,903	2,204	2,204	2,204
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,02	-0,019	-0,02	-0,073	-0,07	-0,07	-0,12	-0,12	-0,12
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,03	-0,026	-0,03	-0,062	-0,06	-0,06	-0,12	-0,12	-0,12
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,01	-0,013	-0,01	-0,073	-0,07	-0,07	-0,11	-0,11	-0,11

Çizelge 3.44. Aderans ekinde deney sonuçları (Sabit moment bölgesi, etriyesiz)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	5,752	4,768	4,697		
M^2 (MPa ² m)	33,08	22,73	22,06		
N (mm)	228,8	132,2	122,1		
A (Eğim)	3E-05	0,006		2571	
C	0,007	4E-05		69,62	
C^-	0,01	1E-04		107,1	
ω_A	0,318	0,117		0,181	
ω_C	0,147	0,255		0,11	
ω_C^-	0,049	0,041		0,034	
m	0,26	0,218		0,179	
ω_{KIC}	0,159	0,058		0,09	
ω_{Gr}	0,35	0,281		0,212	
ω_{cf}	0,453	0,363		0,283	
Bf_t (MPa)	12,02	13,11	13,44	11,32	27,63
σ_0 (MPa)	0	0	0	8,344	6,896
ℓ_p (mm)	228,8	132,2	181,2	36,93	1,139
ℓ_p/d_{max}	48,08	27,78	38,07	7,757	0,239
k_1			1,041		2,299
k_2			0		0,574
r	0,766	0,955	0,858	0,902	



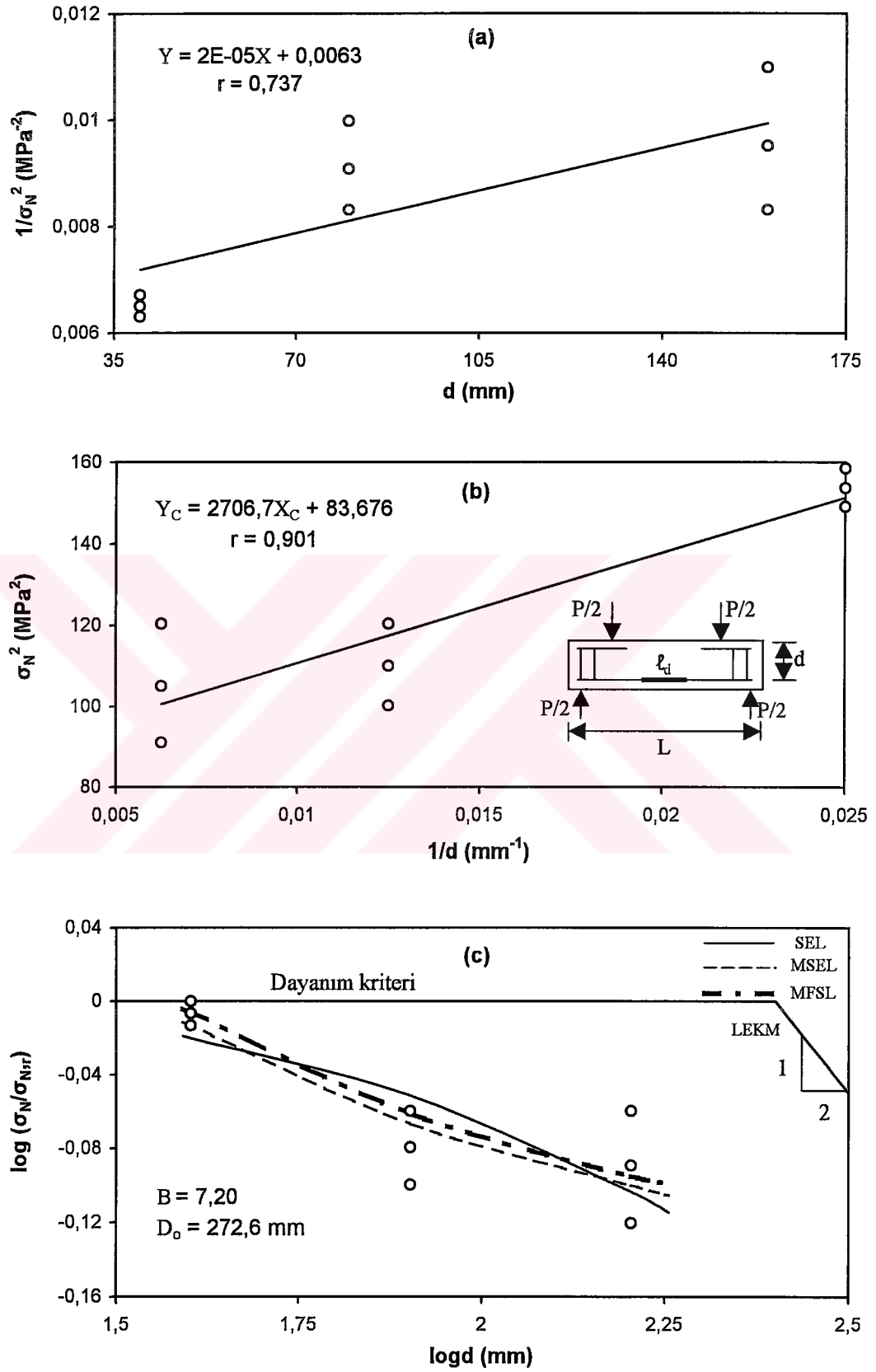
Şekil 3.31. Aderans ekinde regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi
c) karşılaştırma (Sabit moment bölgesi, etriyesiz)

Çizelge 3.45. Aderans ekinde deney bilgileri (Sabit moment bölgesi, etriyeli)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
t (mm)	10	10	10	20	20	20	40	40	40
d _b (mm)	2	2	2	4	4	4	8	8	8
e _d (mm)	27,5	27,5	27,5	55	55	55	110	110	110
d (mm)	40	40	40	80	80	80	160	160	160
D (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
T (N)	2142	2109	2175	6921	7580	7250	30319	28342	26364
f _c (MPa)	25	25	25	25	25	25	25	25	25
P _u (N)	3250	3200	3300	10500	11500	11000	46000	43000	40000
σ _N (MPa)	12,4	12,21	12,59	10,01	10,97	10,49	10,97	10,25	9,54
X=d (mm)	40	40	40	80	80	80	160	160	160
Y=1/σ _N ² (MPa ⁻²)	0,007	0,007	0,006	0,01	0,008	0,009	0,008	0,01	0,011
X'=1/d (mm ⁻¹)	0,025	0,025	0,025	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006
Y'=1/σ _N ² d(MPa√mm) ⁻²	2E-04	2E-04	2E-04	1E-04	1E-04	1E-04	5E-05	6E-05	7E-05
X*=Lnd (mm)	3,689	3,689	3,689	4,382	4,382	4,382	5,075	5,075	5,075
Y*=Lnσ _N (MPa)	2,518	2,502	2,533	2,304	2,395	2,35	2,395	2,327	2,255
X _C =1/d (mm ⁻¹)	0,025	0,025	0,025	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	153,8	149,1	158,5	100,2	120,3	110	120,3	105,1	91,01
σ _{N,r} (MPa)	12,59	12,59	12,59	12,59	12,59	12,59	12,59	12,59	12,59
X _K =logd (mm)	1,602	1,602	1,602	1,903	1,903	1,903	2,204	2,204	2,204
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,01	-0,013	-0,01	-0,062	-0,06	-0,06	-0,1	-0,1	-0,1
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,02	-0,02	-0,02	-0,051	-0,05	-0,05	-0,1	-0,1	-0,1
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,01	-0,006	-0,01	-0,061	-0,06	-0,06	-0,1	-0,1	-0,1

Çizelge 3.46. Aderans ekinde deney sonuçları (Sabit moment bölgesi, etriyeli)

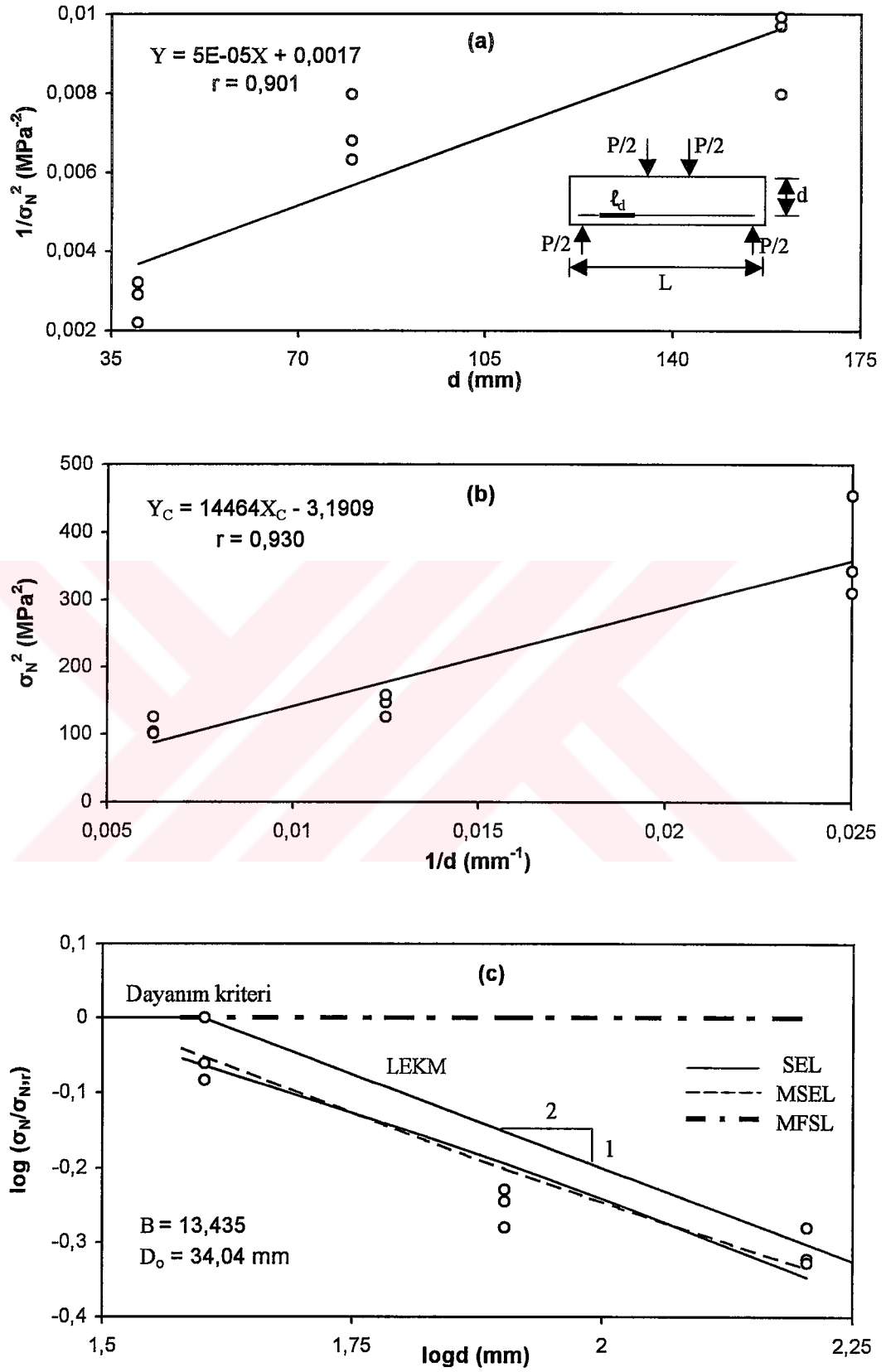
	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	6,596	5,29	5,245		
M ² (MPa ² m)	43,5	27,98	27,51		
N (mm)	272,6	146,8	138,6		
A (Eğim)	2E-05	0,005		2707	
C	0,006	4E-05		83,68	
C ⁻	0,008	1E-04		123,1	
ω _A	0,346	0,105		0,182	
ω _C	0,134	0,255		0,097	
ω _{C⁻}	0,047	0,038		0,031	
m	0,25	0,203		0,165	
ω _{KIC}	0,173	0,053		0,091	
ω _{Gf}	0,371	0,276		0,206	
ω _{cf}	0,469	0,352		0,272	
Bf _t (MPa)	12,63	13,8	14,09	10,69	31,02
σ ₀ (MPa)	0	0	0	9,147	7,754
ℓ _p (mm)	272,6	146,8	215,5	32,35	0,845
ℓ _p /d _{max}	57,27	30,85	45,28	6,796	0,178
k ₁			1,04		2,464
k ₂			0		0,616
r	0,737	0,963	0,846	0,901	



Şekil 3.32. Aderans ekinde regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi c) karşılaştırma (Sabit moment bölgesi, etriyeli)

Çizelge 3.48. Aderans ekinde deney sonuçları (Sabit kesme bölgesi, etriyesiz)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	4,485	3,873	4,089		
M ² (MPa ² m)	20,12	15	16,72		
N (mm)	34,04	5,032	11,32		
A (Eğim)	5E-05	3E-04		14464	
C	0,002	7E-05		-3,191	
C ⁻	0,006	7E-05		207,7	
ω _A	0,182	2,156		0,149	
ω _C	0,567	0,179		11,16	
ω _{C⁻}	0,071	0,079		0,081	
m	0,378	0,417		0,428	
ω _{KIC}	0,091	1,078		0,074	
ω _{Gf}	0,595	2,164		11,16	
ω _{cf}	0,732	2,316		11,03	
Bf _t (MPa)	24,31	54,6	38,43	—	64,24
σ ₀ (MPa)	0	0	0	—	0,124
ℓ _p (mm)	34,04	5,032	0,061	-4533	1,95
ℓ _p /d _{max}	7,152	1,057	0,013	-952,3	0,41
k ₁			22,63		3,012
k ₂			0		0,006
r	0,901	0,173	0,939	0,93	



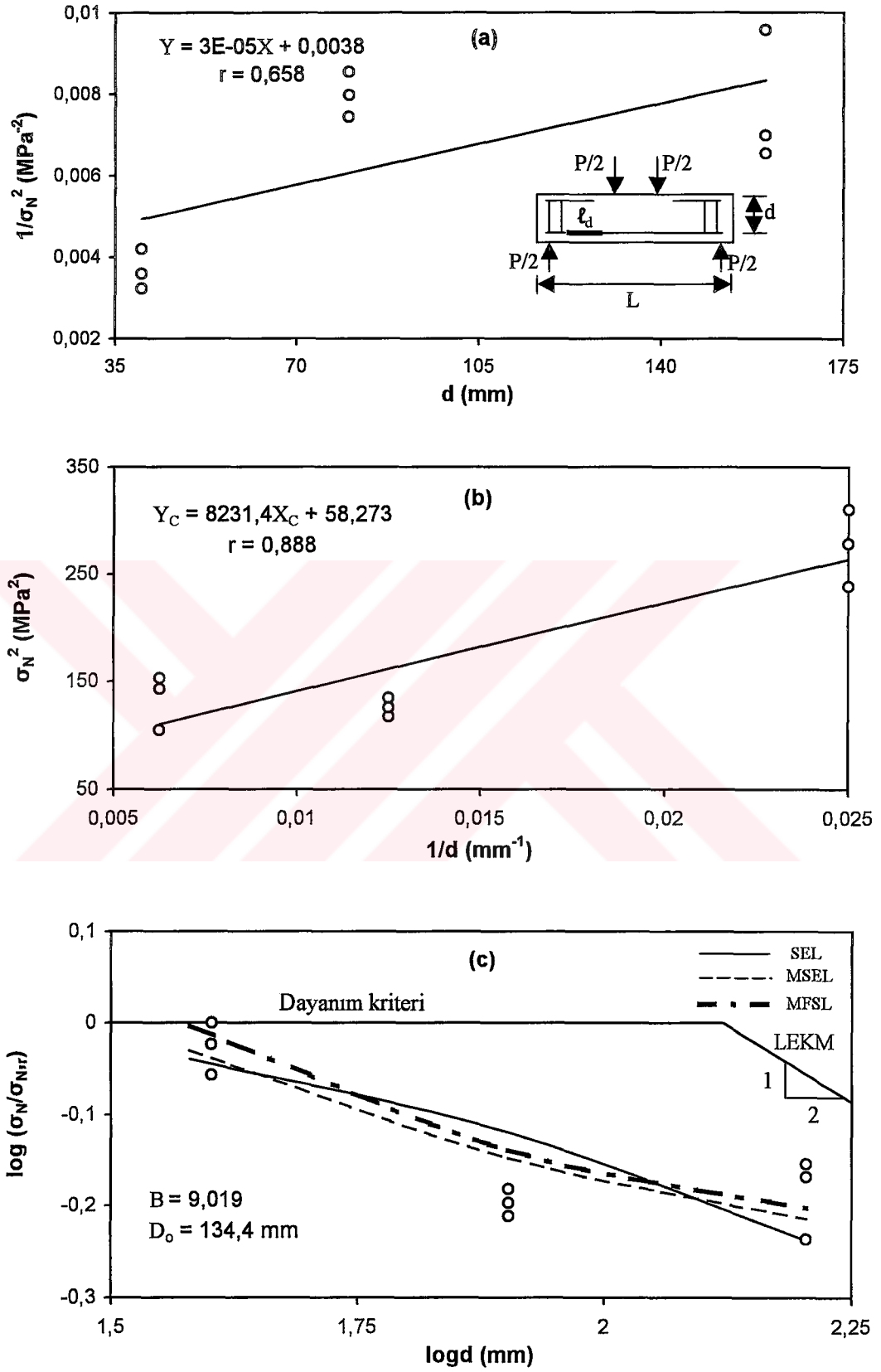
Şekil 3.33. Aderans ekinde regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi c) karşılaştırma (Sabit kesme bölgesi, etriyesiz)

Çizelge 3.49. Aderans ekinde deney bilgileri (Sabit kesme bölgesi, etriyeli)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
t (mm)	10	10	10	20	20	20	40	40	40
d _b (mm)	2	2	2	4	4	4	8	8	8
ℓ _d (mm)	30	30	30	60	60	60	120	120	120
d (mm)	40	40	40	80	80	80	160	160	160
D (mm)	50	50	50	100	100	100	200	200	200
T (N)	2913	3146	3321	8739	8157	8448	37288	36065	30821
f _c (MPa)	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
P _u (N)	2500	2700	2850	7500	7000	7250	32000	30950	26450
σ _N (MPa)	15,45	16,69	17,62	11,59	10,82	11,2	12,36	11,96	10,22
X=d (mm)	40	40	40	80	80	80	160	160	160
Y=1/σ _N ² (MPa ⁻²)	0,004	0,004	0,003	0,007	0,009	0,008	0,007	0,007	0,01
X [*] =1/d (mm ⁻¹)	0,025	0,025	0,025	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006
Y [*] =1/σ _N ² d(MPa√mm) ⁻²	1E-04	9E-05	8E-05	9E-05	1E-04	1E-04	4E-05	4E-05	6E-05
X [*] =Lnd (mm)	3,689	3,689	3,689	4,382	4,382	4,382	5,075	5,075	5,075
Y [*] =Lnσ _N (MPa)	2,738	2,815	2,869	2,45	2,381	2,416	2,514	2,482	2,324
X _C =1/d (mm ⁻¹)	0,025	0,025	0,025	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006
Y _C =σ _N ² (MPa ²)	238,7	278,6	310,5	134,3	117,1	125,4	152,8	143	104,4
σ _{N,r} (MPa)	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62
X _K =logd (mm)	1,602	1,602	1,602	1,903	1,903	1,903	2,204	2,204	2,204
Y _K =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,05	-0,045	-0,05	-0,138	-0,14	-0,14	-0,22	-0,22	-0,22
Y _B =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,04	-0,045	-0,04	-0,129	-0,13	-0,13	-0,24	-0,24	-0,24
Y _C =log(σ _N /σ _{N,r})	-0,02	-0,022	-0,02	-0,129	-0,13	-0,13	-0,21	-0,21	-0,21

Çizelge 3.50. Aderans ekinde deney sonuçları (Sabit kesme bölgesi, etriyeli)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	5,941	4,376	5,124		
M ² (MPa ² m)	35,3	19,15	26,26		
N (mm)	134,4	36,31	70,75		
A (Eğim)	3E-05	0,002		8231	
C	0,004	5E-05		58,27	
C ⁻	0,006	8E-05		178,3	
ω _A	0,432	0,487		0,196	
ω _C	0,34	0,292		0,457	
ω _{C⁻}	0,095	0,09		0,07	
m	0,501	0,477		0,373	
ω _{KIC}	0,216	0,244		0,098	
ω _{Gf}	0,55	0,568		0,497	
ω _{cf}	0,749	0,758		0,637	
Bf _t (MPa)	16,21	22,96	19,26	14,1	52,35
σ ₀ (MPa)	0	0	0	7,634	5,23
ℓ _p (mm)	134,4	36,31	43,91	141,3	1,725
ℓ _p /d _{max}	28,24	7,628	9,226	29,68	0,362
k ₁			1,247		2,971
k ₂			0		0,297
r	0,658	0,613	0,817	0,888	



Şekil 3.34. Aderans ekinde regresyon grafikleri, a) lineer I analizi, b) MFSL analizi c) karşılaştırma (Sabit kesme bölgesi, etriyeli)

3.5.1.2. Betonarme kirişde aderans eki deneyinin sonuç karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.44, 3.46, 3.48 ve 3.50 çizelgelerinde verilmiştir, dört seri genel deney yapılmıştır ve her seride üç farklı boyutlu kiriş numunesinden üçer adet kullanılmıştır (toplam numune sayısı = 36). İlk iki seride bindirme kirişin ortasında (sabit moment bölgesi, etriyesiz ve etriyeli) yapılmış, diğer serilerde ise bindirme kirişin sol tarafında (sabit kesme bölgesi, etriyesiz ve etriyeli) yapılmıştır.

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri, gerilme değeri arttıkça artış göstermekte, fakat moment bölgesinden kesme bölgesine geçişte bir miktar düşüş görülür. Sabit kesme bölgesinde M değeri artış göstermektedir.
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N , gerilme değeri arttıkça (sabit moment bölgesinde) çok az bir miktarda artış göstermekte, fakat moment bölgesinden kesme bölgesine geçişte ani bir düşüş ve yeniden N değerinde ani bir yükseliş görünmektedir (sabit kesme bölgesinde).
- 3) Lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , tüm serilerde band genişliği fazla olduğundan sınır değerinin üstündedir. Sabit kesme bölgesi etriyesiz serisinde band genişliği daha az olduğu için sınırın altındadır. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , sabit moment bölgesi serilerinde sınır değerinin altındadır. Sabit kesme bölgesi serilerinde ise sınır değerinin üstündedir ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, sabit moment bölgesinde band genişliği daha az olduğundan sınır değeri civarındadır. Sabit kesme bölgesinde $\omega_{A'}$ değerinin fazla olduğu görülür. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , sabit kesme bölgesi etriyesiz serisi haric diğer serilerde sınır değerlerinin üstünde olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 5) MFSL analizinde band genişliği fazla olduğundan eğim değişimi ω_{Ac} , tüm seriler için sınır değerinin üstünde, eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , sabit moment bölgesi haric sınır değerinin üstünde çıktığı görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y eksenini üzerinde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_C , her bölge içinde (moment ve kesme bölgeleri) birbirlerine yakın olduğu görülür.

- 7) Band genişliğinin değeri m , sabit moment bölgesinde MFSL analizinde daha düşüktür. Diğer numuneler için tüm analizlerde bu değerin yüksek olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , sabit moment bölgesinde lineer I analizinde lineer II analizine göre daha az ve anlamlı olduğu görülür. Sabit kesme bölgesi etriyeli'de bu değerin fazla olduğu ve sabit kesme bölgesi etriyesiz'de lineer II analizinde çok yüksek ve kabul edilemez bir değer olarak görülür. MFSL analizinde tüm numunelerde değişimin iyi çıktığı görülür.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Gf} , plastik bölge uzunluğunun değişimi ω_{cf} , sabit moment bölgesinde birbirlerine yakın fakat sabit kesme bölgesinde bu değişimlerin fazla çıktığı için anlamlı değerler olmadığı görülür.
- 10) Bf_t değeri gerilme arttıkça artar fakat sabit kesme bölgesi etriyesiz serisinde bu artışın ani olduğu ve yeniden ani bir düşüş olduğu görülür.
- 11) Numunede artık dayanım değeri σ_0 , sabit moment ve sabit kesme bölgesi etriyeli'de birbirlerine çok yakındır. Sabit kesme bölgesi etriyesiz'de bu değer olumsuz çıktığından Carpinteri'nin önerdiği denklemin geçersiz olduğu görülür ($\sqrt{C_C} \rightarrow$ negatif).
- 12) Bazant'ın önerdiği boyut etkisine göre karakteristik uzunluk ℓ_p , sabit moment ve sabit kesme bölgelerinde gerilmenin artması ile artışı fakat bu değerin sabit kesme bölgesi etriyesiz'de çok küçük ve anlamsız olduğu görülür. Kim'e göre ℓ_p değeri sabit moment bölgesinde kesme bölgesine göre daha düşük ayrıca her bölge için gerilmenin artması ile düşüşte olduğu görülür. ℓ_p / d_{max} oranı ise sabit kesme bölgesi etriyesiz'de anlamsız olduğu görülür.
- 13) MSEL analizinde k_1 katsayısı sabit moment ve sabit kesme bölgelerinde gerilmenin artması ile düştüğü fakat bu değerin kesmede, eğilmeye göre daha fazla olduğu görülür ($k_1 \sigma_{N,r}$ sıyrılmaya karşı dayanım değerini ifade etmektedir).
- 14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:
- Sabit moment etriyesiz $\rightarrow$ a) $r = 0,7655$ b) $r = 0,9554$ c) $r = 0,8578$ d) $r = 0,9020$
- Sabit moment etriyeli $\rightarrow$ a) $r = 0,7375$ b) $r = 0,9634$ c) $r = 0,8460$ d) $r = 0,9011$
- Sabit kesme etriyesiz $\rightarrow$ a) $r = 0,9008$ b) $r = 0,1726$ c) $r = 0,9393$ d) $r = 0,9304$
- Sabit kesme etriyeli $\rightarrow$ a) $r = 0,6585$ b) $r = 0,6130$ c) $r = 0,8174$ d) $r = 0,8880$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri sabit moment bölgesinde birbirlerinden daha uzak olduğu görülür. Sabit kesme bölgesinde eğrilerin çok yakın ve sabit kesme bölgesi etriyesiz'de yaklaşık üstüste geldiği ve Carpinteri'nin denkleminin geçersiz olduğu, ayrıca sabit kesme bölgesi etriyesiz'de dayanım kriteri çok azdır (Şekil 3.31c, 3.32c, 3.33c ve 3.34c).



3.6. Kesme Deneyi

3.6.1. Betonarme kirişde diyagonal kesme deneyi

Diyagonal kesme göçmesinde boyut etkisi deneyi Bazant ve Kazemi [16] tarafından 1991 yılında yapılmıştır. İki farklı numune serisi deneyde kullanılmış ve her bir seri için farklı d değerleri seçilmiştir (Çizelge 3.51 ve 3.53). d , kirişin üst lifi ile çekme donatısının merkezi arasındaki mesafedir. Birinci seride L uzunluğunda ($L = 6D$) ve D yüksekliğindeki kirişde ($D = 1,25d$) çekme donatısı düz olarak yerleştirilmiş ve d değerlerinin oranı $1 : 2 : 4 : 8$ olarak düzenlenmiştir. İkinci seride ise L uzunluğunda ($L = 6D$) ve D yüksekliğindeki kirişde ($D = 16d/13$) çekme donatısı 90 derecelik eğimle kanca yapılarak kirişe ankraj yapılmış ve d değerlerinin oranı $1 : 2 : 4 : 8 : 16$ olarak düzenlenmiştir (Şekil 3.35).

Kirişlerde $L/D = 6$ ve $S/d = 7$ oranları tüm numuneler için geçerlidir (S : iki mesnet arasındaki mesafedir). Dört nokta eğilme yüklemesi uygulanmış ve kesme kolunun uzunluğu $a_s = 3d$ 'dir (a_s : yük ile donatı ucu arasındaki mesafedir). Tüm numunelerde kalınlık $b = 38,1 \text{ mm}$ ' dir (Şekil 3.35).

Boyuna giden donatılar iki numune serisi için nervürlü olup ve akma dayanımları 690 ile 890 MPa arası değişmektedir. Donatıların etkin alanı $D_2 = 12,90 \text{ mm}^2$ ve $D_3 = 19,75 \text{ mm}^2$ olarak seçilmiş ve numunelerde bu iki tip donatı kullanılmıştır. Kesitte donatı oranı $\rho = A_s/(bd)$, birinci seri için 1,65 ve ikinci seri için 1,62 yüzde olarak kullanılmıştır (A_s = donatının kesit alanı).

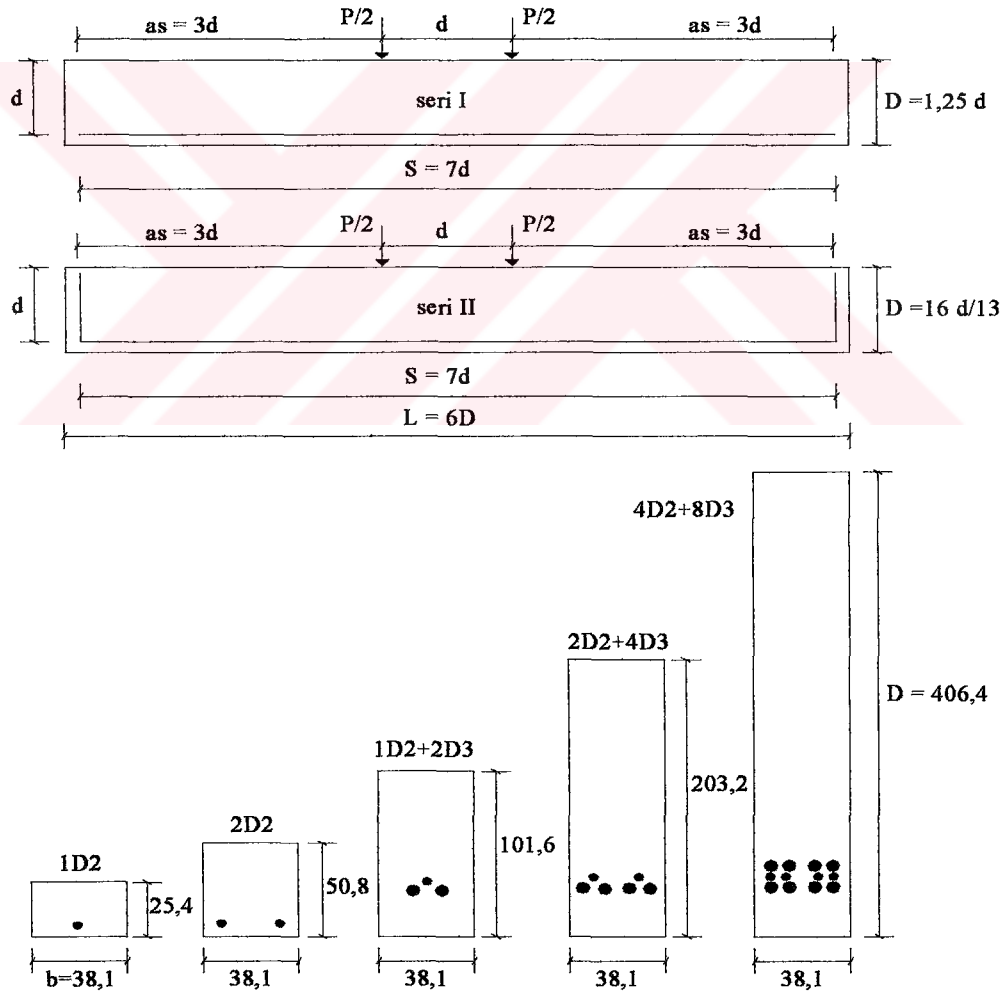
Ekonomik nedenlerden dolayı mikrobeton kullanılmış, maksimum agrega dane çapı $d_{\max} = 4,8 \text{ mm}$ ' dir. Betonda kullanılan karışım oranları (su : çimento : agrega) $1 : 2 : 4$ olarak ayarlanmıştır. Betonun basınç dayanımını belirlemek için her karışımdan silindir numuneler alınıp (çap=76,2 mm, yükseklik=152,4 mm) 28 günlük kürden sonra ortalama basınç dayanımı birinci seri için $f_c = 46,8 \text{ MPa}$ ve ikinci seri için $f_c = 46,2 \text{ MPa}$ olarak elde edilmiştir.

Beton karışımında herhangi bir katkı maddesi veya kimyasal madde kullanılmamıştır. PÇ150 portland çimentosu ile silis dumanı kullanılmıştır.

Deneyde nominal gerilme aşağıdaki denklemde elde edilir:

$$\sigma_N = P_u / (2 bd) \quad (3.13)$$

σ_N : göçmedeki nominal kesme gerilme (MPa), P_u : maksimum yük (N), b : numunenin kalınlığı (mm), d : çekme donatısı ile kirişin üst lifine olan mesafe (mm).



Şekil 3.35. Diyagonal kesme göçmesinde numune geometrisi, kesit ve donatı şekilleri ve yükleme durumu(tüm boyutlar mm'dir)

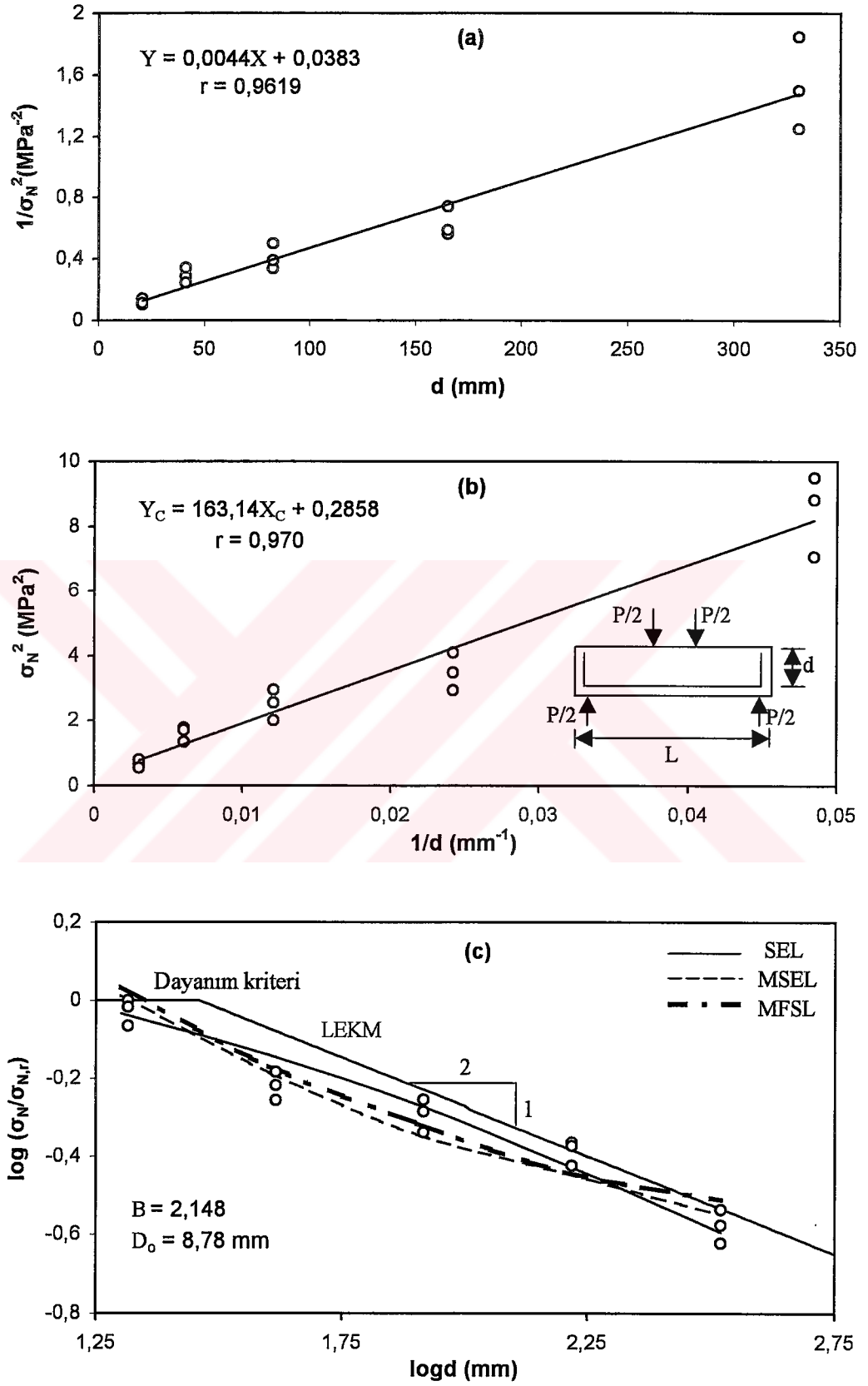
3.6.1.1. Diyagonal kesme deneyinin analizleri

Çizelge 3.51. Kesme göçmesinde deney bilgileri (kancalı ankraj)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15
D_s (mm ²)	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75	19,75
D (mm)	25,4	25,4	25,4	50,8	50,8	50,8	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4
b (mm)	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1
d (mm)	20,638	20,638	20,638	41,28	41,275	41,275	82,55	82,55	82,55	165,1	165,1	165,1	330,2	330,2	330,2
L (mm)	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8	609,6	609,6	609,6	1219,2	1219,2	1219,2	2438	2438,4	2438
S (mm)	144,46	144,46	144,46	288,9	288,93	288,93	577,9	577,85	577,9	1155,7	1156	1155,7	2311	2311,4	2311
f_c (MPa)	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2
P_u (N)	4181,1	4848,3	4670,4	5871	5382,1	6360,6	10809	10052	8896	14589	16769	16413	20550	22507	18504
σ_N (MPa)	2,6588	3,083	2,9699	1,867	1,7112	2,0224	1,718	1,5981	1,414	1,1597	1,333	1,3046	0,817	0,8945	0,735
$X=d$ (mm)	20,638	20,638	20,638	41,28	41,275	41,275	82,55	82,55	82,55	165,1	165,1	165,1	330,2	330,2	330,2
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,1415	0,1052	0,1134	0,287	0,3415	0,2445	0,339	0,3916	0,5	0,7436	0,563	0,5875	1,499	1,2498	1,849
$X'=1/d$ (mm ⁻¹)	0,0485	0,0485	0,0485	0,024	0,0242	0,0242	0,012	0,0121	0,012	0,0061	0,006	0,0036	0,005	0,0038	0,006
$Y'=1/\sigma_N^2 d$ (MPa ⁻¹ mm) ⁻²	0,0069	0,0051	0,0055	0,007	0,0083	0,0059	0,004	0,0047	0,006	0,0045	0,003	0,0036	0,005	0,0038	0,006
$X''=Lnd$ (mm)	3,0271	3,0271	3,0271	3,72	3,7203	3,7203	4,413	4,4134	4,413	5,1086	5,107	5,1086	5,8	5,7997	5,8
$Y''=Ln\sigma_N$ (MPa)	0,9779	1,1259	1,0885	0,624	0,5372	0,7043	0,541	0,4688	0,347	0,1481	0,287	0,2659	-0,202	-0,111	-0,307
$X_C=1/d$ (mm ⁻¹)	0,0485	0,0485	0,0485	0,024	0,0242	0,0242	0,012	0,0121	0,012	0,0061	0,006	0,0061	0,003	0,003	0,003
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	7,0691	9,5051	8,8203	3,485	2,9283	4,0899	2,953	2,5539	2	1,3448	1,777	1,7021	0,667	0,8001	0,541
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083	3,083
$X_K=logd$ (mm)	1,3147	1,3147	1,3147	1,616	1,6157	1,6157	1,917	1,9167	1,917	2,2177	2,218	2,2177	2,519	2,5188	2,519
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,043	-0,043	-0,043	-0,17	-0,17	-0,17	-0,3	-0,3	-0,3	-0,428	-0,428	-0,428	-0,551	-0,551	-0,551
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,038	-0,038	-0,038	-0,166	-0,166	-0,166	-0,3	-0,303	-0,303	-0,447	-0,447	-0,447	-0,594	-0,594	-0,594
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,021	-0,021	-0,021	-0,164	-0,164	-0,164	-0,3	-0,301	-0,301	-0,425	-0,425	-0,425	-0,532	-0,532	-0,532

Çizelge 3.52. Kesme göçmesinde deney sonuçları (kancalı ankraj)

DEĞİŞKEN	LINEER I DEĞER	LINEER II DEĞER	NONLINEER DEĞER	MFSL DEĞER	MSEL DEĞER
M (MPa√m)	0,478570714	0,472111152	0,475144796		
M ² (MPa ² m)	0,229029928	0,22288894	0,225762577		
N (mm)	8,78084737	9,177369604	8,024742188		
A (Eğim)	0,004366242	0,04117463		163,1448548	
C	0,038339301	0,004486539		0,285763294	
C ⁻	0,597010829	0,005259655		3,349052512	
ω _A	0,078872904	0,47092178		0,069434015	
ω _C	1,530878344	0,108089154		0,991412368	
ω _{C⁻}	0,064942191	0,060906079		0,055880862	
m	0,276163439	0,25900007		0,237630586	
ω _{kic}	0,039436452	0,23546089		0,034717007	
ω _{ef}	1,532908816	0,483167247		0,993840815	
ω _{ef}	1,59094611	0,556668643		1,044547952	
Bf _i (MPa)	5,107141661	4,928163953	5,304084483	4,450264362	7,7688517
σ _o (MPa)	0	0	0	0,534568325	0,1723397
ε _p (mm)	8,78084737	9,177369604	5,3001	570,9090641	2,6543
ε _p /d _{max}	1,829343202	1,911952001	1,1041875	118,9393884	0,552979167
k ₁			2,0249		2,5199
k ₂			0		0,0559
r	0,961873173	0,507444578	0,968039255	0,970051545	



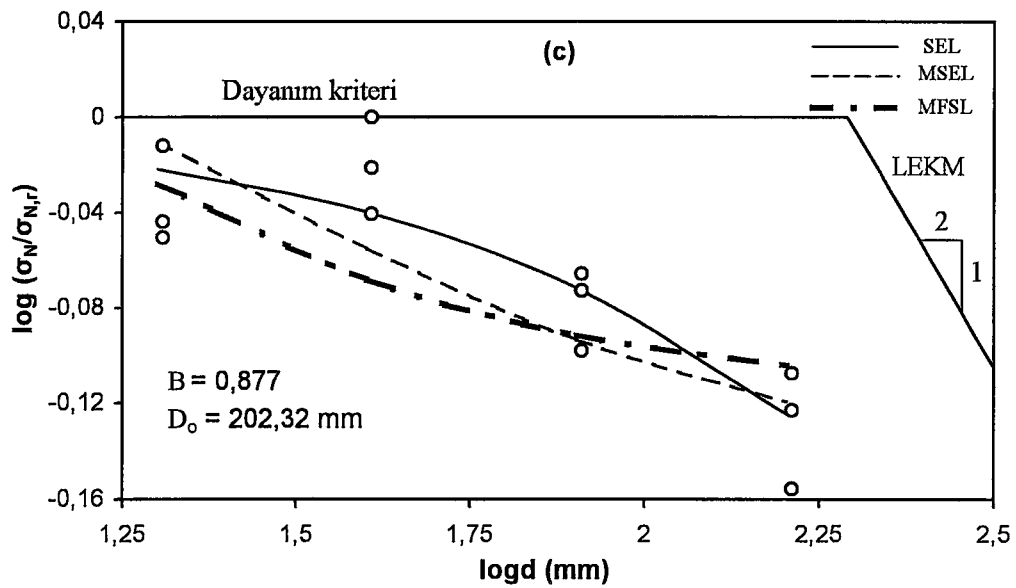
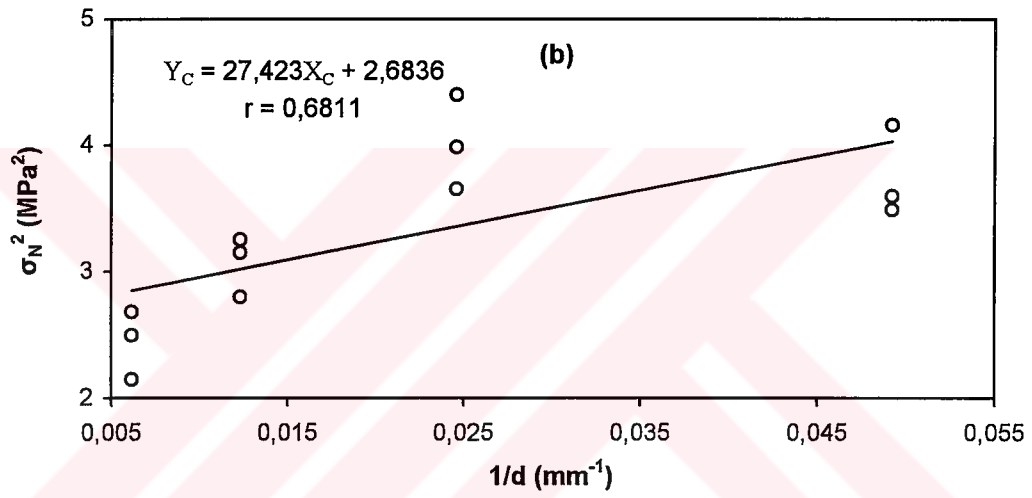
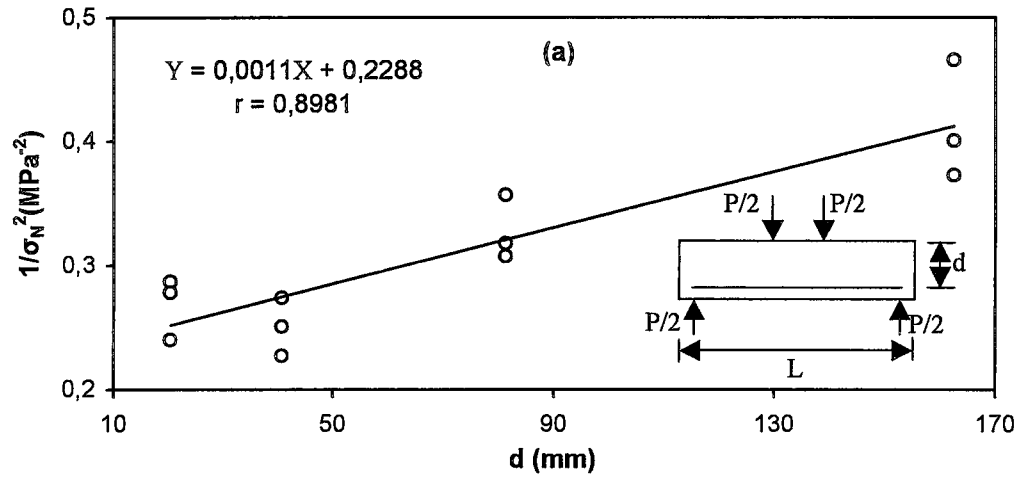
Şekil 3.36. Diyagonal kesmede regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma (kancalı ankraj)

Çizelge 3.53. Kesme göçmesinde deney bilgileri (kancasız ankraj)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
D_2 (mm)	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
S (mm)	142,24	142,24	142,24	284,48	284,48	284,48	568,96	568,96	568,96	1137,92	1137,92	1137,92
D (mm)	25,4	25,4	25,4	50,8	50,8	50,8	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2
b (mm)	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1
d (mm)	20,32	20,32	20,32	40,64	40,64	40,64	81,28	81,28	81,28	162,56	162,56	162,56
L (mm)	152,4	152,4	152,4	304,8	304,8	304,8	609,6	609,6	609,6	1219,2	1219,2	1219,2
f_c (MPa)	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8
P_u (N)	2891,2	2935,68	3158,08	6494,08	5915,84	6182,72	10986,6	11164,5	10363,8	18147,8	19571,2	20282,9
σ_N (MPa)	1,86724	1,89596	2,0396	2,09705	1,91033	1,99651	1,77388	1,8026	1,67333	1,46506	1,57997	1,63742
$X=d$ (mm)	20,32	20,32	20,32	40,64	40,64	40,64	81,28	81,28	81,28	162,56	162,56	162,56
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,28681	0,27819	0,24039	0,2274	0,27402	0,25088	0,3178	0,30775	0,35714	0,46589	0,40059	0,37297
$X'=1/d$ (mm ⁻¹)	0,04921	0,04921	0,04921	0,02461	0,02461	0,02461	0,0123	0,0123	0,0123	0,00615	0,00615	0,00615
$Y'=1/\sigma_N^2 d$ (MPa ⁻¹ mm)	0,01411	0,01369	0,01183	0,0056	0,00674	0,00617	0,00391	0,00379	0,00439	0,00287	0,00246	0,00229
$X''=Lnd$ (mm)	3,01161	3,01161	3,01161	3,70475	3,70475	3,70475	4,3979	4,3979	4,3979	5,09105	5,09105	5,09105
$Y''=Lnd\sigma_N$ (MPa)	0,62446	0,63973	0,71275	0,74053	0,64727	0,6914	0,57317	0,58923	0,51482	0,3819	0,45741	0,49312
$X_C=1/d$ (mm ⁻¹)	0,04921	0,04921	0,04921	0,02461	0,02461	0,02461	0,0123	0,0123	0,0123	0,00615	0,00615	0,00615
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	3,48657	3,59468	4,15996	4,39762	3,64935	3,98604	3,14663	3,24937	2,80004	2,14641	2,4963	2,68115
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705	2,09705
$X_K=\log d$ (mm)	1,30792	1,30792	1,30792	1,60895	1,60895	1,60895	1,90998	1,90998	1,90998	2,21101	2,21101	2,21101
$Y_K=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,0208	-0,0208	-0,0208	-0,04062	-0,0406	-0,0406	-0,0742	-0,0742	-0,0742	-0,1256	-0,12563	-0,1256
$Y_B=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,0221	-0,0221	-0,0221	-0,04032	-0,0403	-0,0403	-0,0727	-0,0727	-0,0727	-0,1259	-0,12586	-0,1259
$Y_C=\log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,029	-0,029	-0,029	-0,06879	-0,0688	-0,0688	-0,0918	-0,0918	-0,0918	-0,1043	-0,10426	-0,1043

Çizelge 3.54. Kesme göçmesinde deney sonuçları (kancasız ankraj)

DEĞİŞKEN	LİNEER I	LİNEER II	NONLINEER	MFSL	MSEL
	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER	DEĞER
M (MPa√m)	0,940340177	1,121647402	0,929166641		
M ² (MPa ² m)	0,884239649	1,258092894	0,863350647		
N (mm)	202,3231519	310,5139854	194,6278212		
A (Eğim)	0,001130915	0,246813242		27,4225586	
C	0,228810314	0,000794854		2,683583563	
C ⁻	0,314986047	0,006488442		3,316178265	
ω _A	0,154885092	0,054682295		0,339970167	
ω _C	0,071707933	0,481497103		0,098514336	
ω _{C⁻}	0,030294302	0,034304415		0,046364561	
m	0,140539897	0,159143424		0,215092285	
ω _{KIC}	0,077442546	0,027341148		0,169985084	
ω _{Gr}	0,170679288	0,484592214		0,353955914	
ω _{Gr}	0,217258921	0,526941103		0,423999346	
Bf _t (MPa)	2,090557906	2,012870208	2,106158974	1,461616406	1,77200725
σ ₀ (MPa)	0	0	0	1,638164694	0,332801835
e _p (mm)	202,3231519	310,5139854	211,9031	10,21863413	154,7592
e _g /d _{max}	42,15065664	64,69041363	44,14647917	2,128882111	32,2415
k ₁			0,9949		0,845
k ₂			0		0,1587
r	0,898053451	0,985393322	0,801249025	0,681102048	



Şekil 3.37. Diyagonal kesmede regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma (kancasız ankraj)

3.6.1.2. Diyagonal kesme deneyinde sonuç karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.52. ve 3.54. çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri kancalı numunede, kancasız numunenin yaklaşık iki katı, fakat her iki numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde M değerleri birbirlerine çok yakındır.
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N, kancasız numunede, kancalı numuneye göre çok fazla artış göstermekte, kancalı numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde N değerleri birbirlerine çok yakındır.
- 3) Lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , kancalı numunede sınır değerinin altında fakat kancasız numunede bu değer iki katı ve sınır değerinin üstündedir. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , kancasız numunede sınır değerinin altında fakat kancalı numunede sınır değerinin üstünde olduğu görülür ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, kancasız numunede sınır değerinin altında fakat kancalı numunede sınır değerinin üstündedir. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, kancalı numunede sınır değerinin altında fakat kancasız numunede bu değer sınır değerinin üstünde olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) MFSL analizinde eğimin değişimi ω_{Ac} , kancalı numunede sınır değerinin altında fakat kancasız numunede sınır değerinin üstündedir. Eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , kancasız numunede sınır değerinin altında fakat kancalı numunede bu değer sınır değerinin üstünde olduğu görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y ekseninde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_C , analizlerde birbirlerine yakın olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m, kancasız numunede daha düşük olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , lineer I ve MFSL analizlerinde kancasız numunede daha yüksek olduğu ve yaklaşık kancalı numunenin iki katıdır. Lineer II analizinde kancalı numunede daha yüksek olduğu ve yaklaşık kancasız numunenin dokuz katı bulunmuştur.

9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Gf} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{cf} , lineer I ve MFSL analizlerinde kancasız numunede düşük fakat kancalı numunede anlamlı bir değer olmadığı görünmektedir. Lineer II analizinde değerler birbirlerine çok yakındır.

10) Bf_t değerinin her iki numunede birbirlerine yakın, kancalı numunede yaklaşık 2,5 kat artış gösterdiği görülür.

11) Numunede artık dayanım değeri σ_0 , Kim'in önerdiği boyut etkisinde Carpinteri'nin denklemine göre daha az ve kancasız numunede daha yüksek olduğu görülür ($k_2\sigma_{N,r}$: artık dayanım).

12) Karakteristik uzunluk ℓ_p , Bazant'ın önerdiği boyut etkisine uyumlu, her iki numunede değerler lineer ve non-lineer değerlerine ($N=D_0$) çok daha yakın olduğu gözetlenir. Kim'e göre ℓ_p değeri Carpinteri'nin ℓ_p değerinden kancalı numunede düşük ve kancasız numunede çok yüksek olduğu görülür. ℓ_p / d_{max} oranı kancasız numunede daha yüksektir.

13) MSEL analizinde k_1 katsayısı kancasız numunede, kancalı numuneye göre daha az ve yaklaşık %35 kadar olduğu görülür. Bazant'ın önerdiği boyut etkisinde kancasız numune daha düşük Bf_t değerlerine sahiptir ($k_1\sigma_{N,r}$ kesmeye karşı dayanım değerini ifade etmektedir).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

Kancalı → a) $r = 0,9619$ b) $r = 0,5074$ c) $r = 0,9680$ d) $r = 0,970$

Kancasız → a) $r = 0,8981$ b) $r = 0,9854$ c) $r = 0,8012$ d) $r = 0,6811$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri kancalı numunede birbirlerine çok yakın olduğu ve Bazant eğrisi daha iyi uyduğu görülür. Kancasız numunede eğriler birbirinden biraz daha uzak, kancalı numunede dayanım kriterinin çok daha az olduğu görülür (Şekil 3.36c ve 3.37c).

3.7. Burulma Deneyi

3.7.1. Boyuna donatılı, donatısız kirişlerde burulma deneyi

Kiriş üzerinde burulma deneyi Bazant, Şener ve Prat [22] tarafından Northwestern Üniversitesinde 1987 yılında yapılmıştır. İki tür malzeme, beton ve betonarme numuneleri, kare kesitli kullanılmış ve uzunluk / yükseklik oranı 8:3 olarak düzenlenmiştir. Yükseklik $D = 38,1; 76,2$ ve $152,4$ mm'dir. Kiriş numuneleri karşı yönlü kuvvetlerle yüklenmiş ve bu yükleme kirişin her iki ucundan yapılmıştır (Şekil 3.38). Yük ile kiriş sonu arasındaki mesafe e ($e/L = 3/32$) olarak düzenlenmiştir. Beton karışımının oranı her iki numune için 1:2:2:0,6 (çimento-kum-çakıl-su) olarak düzenlenmiştir (ağırlıkça). Maksimum dane çapı her iki numune için $d_{max} = 4,8$ mm'dir. Betonun basınç dayanımını belirlemek için her karışımdan silindir numuneler alınıp (çap=76,2 mm, yükseklik=152,4 mm) 28 günlük kürden sonra ortalama basınç dayanımı her iki numune için $f_c = 43,6 \sim 44,1$ MPa olarak elde edilmiştir.

Betonarme numunede dört adet nervürlü donatı kesitin dört köşesine yerleştirilmiş ve paspayı değerleri üç numune için sırası ile 8,1; 16,3 ve 31,5 mm olarak düzenlenmiştir. 3,18; 6,35 ve 12,7 mm çaplı donatılar kullanılmış, akma dayanımı ise en küçük donatı için $f_y = 310$ MPa ve en büyük donatı için $f_y = 413$ MPa olarak elde edilmiştir.

Nominal gerilme elastisite teorisine göre aşağıdaki denklemden elde edilir:

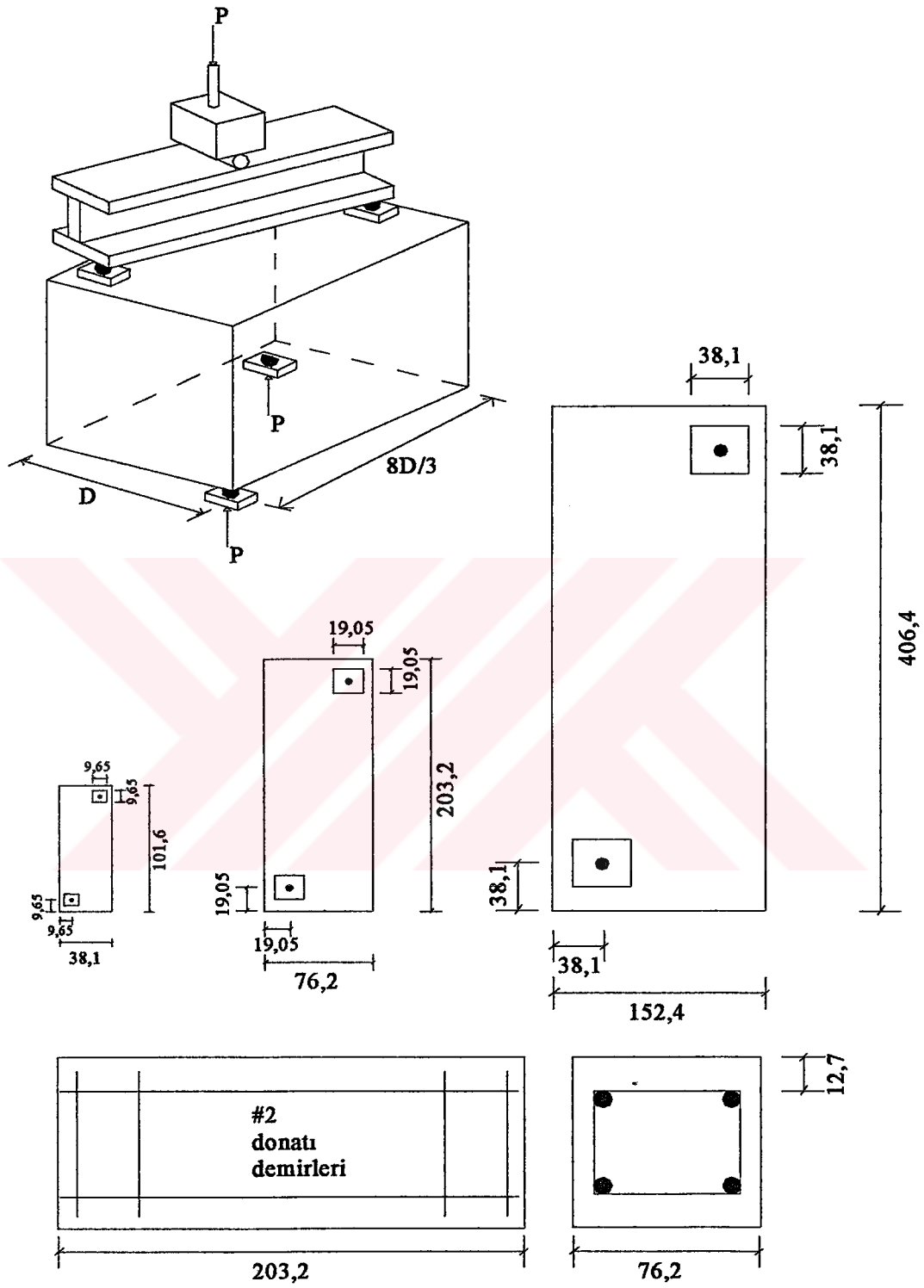
$$\sigma_N = q / (\alpha D^3) \quad (3.14)$$

σ_N : maksimum yükde nominal gerilme (MPa)

q : maksimum yükde burulma momenti (N-mm)

α : numune geometrisine bağlı olan sabit ($\alpha = 1/3$)

D : numune yüksekliği (mm)



Şekil 3.38. Burulma deneyinde numune geometrisi ve yükleme durumu

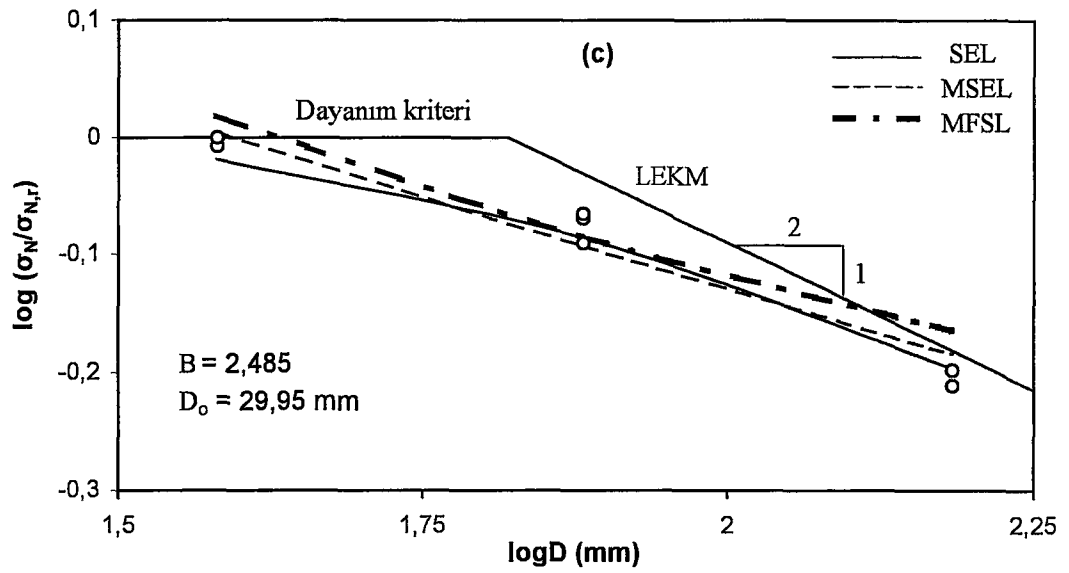
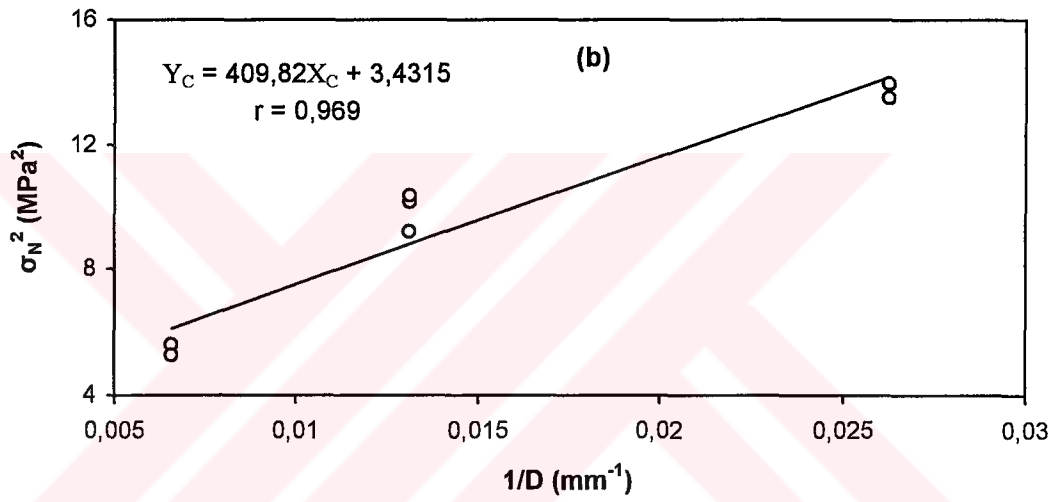
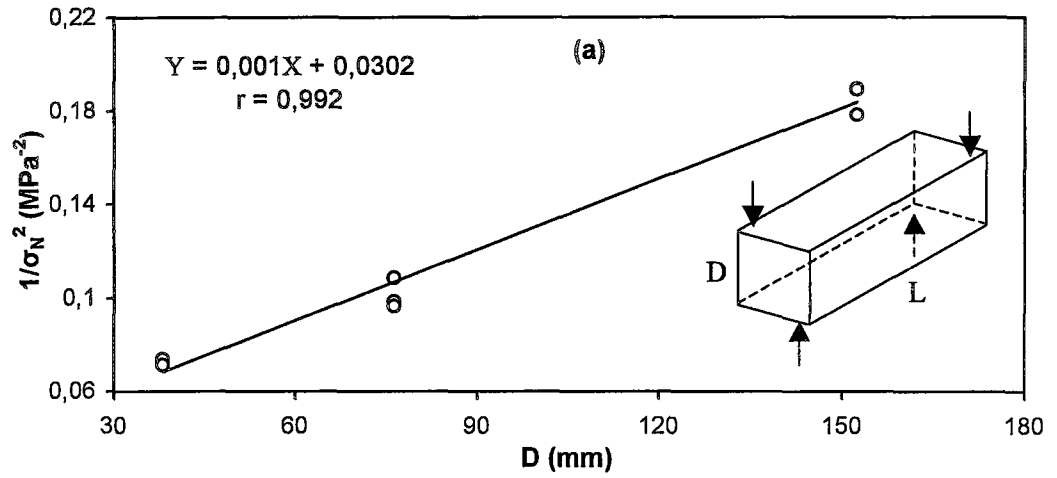
3.7.1.1. Burulma yüklemesinde deney analizleri

Çizelge 3.55. Burulma yüklemesinde deney bilgileri (beton kiriş)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4
α (Birimsiz)	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
L (mm)	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4
f_c (MPa)	44,13	43,61	43,61	44,13	43,61	43,61	44,13	43,61	43,61
q (N-mm)	68917	67788	68917	5E+05	4E+05	5E+05	3E+06	3E+06	3E+06
σ_N (MPa)	3,738	3,677	3,738	3,187	3,034	3,217	2,298	2,368	2,299
X=D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,072	0,074	0,072	0,098	0,109	0,097	0,189	0,178	0,189
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,026	0,026	0,026	0,013	0,013	0,013	0,007	0,007	0,007
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² mm) ⁻²	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$X^*=LnD$ (mm)	3,64	3,64	3,64	4,333	4,333	4,333	5,027	5,027	5,027
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	1,319	1,302	1,319	1,159	1,11	1,169	0,832	0,862	0,833
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,026	0,026	0,026	0,013	0,013	0,013	0,007	0,007	0,007
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	13,97	13,52	13,97	10,16	9,202	10,35	5,281	5,608	5,286
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	3,738	3,738	3,738	3,738	3,738	3,738	3,738	3,738	3,738
$X_K=logD$ (mm)	1,581	1,581	1,581	1,882	1,882	1,882	2,183	2,183	2,183
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	0,004	0,004	0,004	-0,093	-0,09	-0,09	-0,194	-0,194	-0,19
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	0,001	0,001	0,001	-0,086	-0,09	-0,09	-0,196	-0,196	-0,2
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	0,008	0,008	0,008	-0,095	-0,1	-0,1	-0,174	-0,174	-0,17

Çizelge 3.56. Burulma yüklemesinde deney sonuçları (beton kiriş)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	0,996	1,035	1,024		
M ² (MPa ² m)	0,993	1,072	1,049		
N (mm)	29,95	38,46	35,92		
A (Eğim)	0,001	0,036		409,8	
C	0,03	9E-04		3,431	
C ⁻	0,12	0,001		9,706	
ω _A	0,047	0,093		0,096	
ω _C	0,158	0,062		0,199	
ω _{C⁻}	0,019	0,018		0,033	
m	0,1	0,097		0,176	
ω _{KIC}	0,024	0,046		0,048	
ω _{Gf}	0,165	0,112		0,221	
ω _{cf}	0,201	0,15		0,288	
Bf _t (MPa)	5,757	5,28	5,403	8,272	6,233
σ ₀ (MPa)	0	0	0	1,852	0,667
ℓ _p (mm)	29,95	38,46	39,07	119,4	12,59
ℓ _p /d _{max}	6,239	8,012	8,139	24,88	2,624
k ₁			1,409		1,668
k ₂			0		0,178
r	0,992	0,971	0,974	0,969	



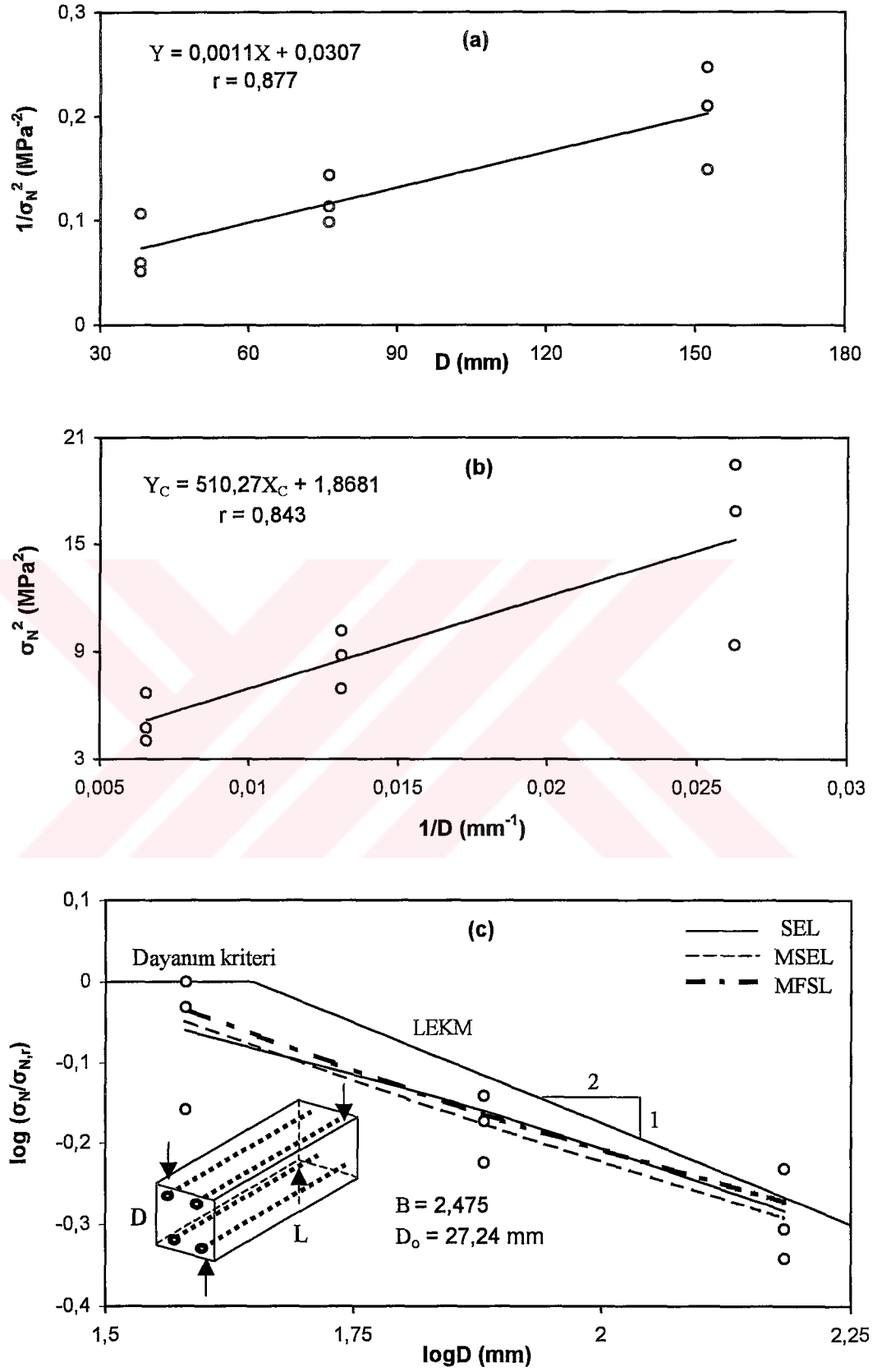
Şekil 3.39. Burulma yüklemesinde regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma (beton kiriş)

Çizelge 3.57. Burulma yüklemesinde deney bilgileri (betonarme kiriş)

DEĞİŞKEN	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4
α (Birimsiz)	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
L (mm)	101,6	101,6	101,6	203,2	203,2	203,2	406,4	406,4	406,4
f_c (MPa)	44,13	43,09	43,09	44,13	43,09	43,09	44,13	43,09	43,09
q (N-mm)	75696	81345	56490	5E+05	4E+05	4E+05	3E+06	3E+06	2E+06
σ_N (MPa)	4,106	4,412	3,064	3,187	2,965	2,635	2,59	2,183	2,011
X=D (mm)	38,1	38,1	38,1	76,2	76,2	76,2	152,4	152,4	152,4
$Y=1/\sigma_N^2$ (MPa ⁻²)	0,059	0,051	0,107	0,098	0,114	0,144	0,149	0,21	0,247
$X'=1/D$ (mm ⁻¹)	0,026	0,026	0,026	0,013	0,013	0,013	0,007	0,007	0,007
$Y'=1/\sigma_N^2 D$ (MPa ⁻² /mm)	0,002	0,001	0,003	0,001	0,001	0,002	1E-03	0,001	0,002
$X^*=LnD$ (mm)	3,64	3,64	3,64	4,333	4,333	4,333	5,027	5,027	5,027
$Y^*=Ln\sigma_N$ (MPa)	1,412	1,484	1,12	1,159	1,087	0,969	0,952	0,781	0,699
$X_C=1/D$ (mm ⁻¹)	0,026	0,026	0,026	0,013	0,013	0,013	0,007	0,007	0,007
$Y_C=\sigma_N^2$ (MPa ²)	16,86	19,47	9,389	10,16	8,789	6,944	6,709	4,766	4,044
$\sigma_{N,r}$ (MPa)	4,412	4,412	4,412	4,412	4,412	4,412	4,412	4,412	4,412
$X_K=logD$ (mm)	1,581	1,581	1,581	1,882	1,882	1,882	2,183	2,183	2,183
$Y_K=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,06	-0,06	-0,06	-0,176	-0,18	-0,18	-0,291	-0,291	-0,29
$Y_B=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,06	-0,06	-0,06	-0,171	-0,17	-0,17	-0,298	-0,298	-0,3
$Y_C=log(\sigma_N/\sigma_{N,r})$	-0,04	-0,04	-0,04	-0,164	-0,16	-0,16	-0,272	-0,272	-0,27

Çizelge 3.58. Burulma yüklemesinde deney sonuçları (betonarme kiriş)

	LİN I	LİN II	N-LİN	MFSL	MSEL
DEĞİŞKEN	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.	DEĞ.
M (MPa√m)	0,941	0,931	0,942		
M ² (MPa ² m)	0,886	0,866	0,888		
N (mm)	27,24	24,87	24,48		
A (Eğim)	0,001	0,029		510,3	
C	0,031	0,001		1,868	
C ⁻	0,131	0,002		9,681	
ω _A	0,207	0,683		0,241	
ω _C	0,767	0,295		1,142	
ω _{C⁻}	0,085	0,101		0,104	
m	0,449	0,533		0,55	
ω _{KIC}	0,104	0,341		0,12	
ω _{Gr}	0,795	0,744		1,167	
ω _{cf}	0,955	0,953		1,36	
Bf _t (MPa)	5,703	5,9	6,022	11,12	10,85
σ ₀ (MPa)	0	0	0	1,367	0,531
e _p (mm)	27,24	24,87	19,12	273,1	3,953
e _p /d _{max}	5,676	5,182	3,982	56,9	0,824
k ₁			1,508		2,458
k ₂			0		0,12
r	0,877	0,484	0,876	0,843	



Şekil 3.40. Burulma yüklemesinde regresyon grafikleri, a) lineer I analizi
b) MFSL analizi c) karşılaştırma (betonarme kiriş)

3.7.1.2. Burulma yüklemesinde deney sonuçlarının karşılaştırmaları

Deneyden elde edilen tüm sayısal sonuçlar 3.56 ve 3.58 çizelgelerinde verilmiştir:

- 1) Gerilme şiddet çarpanı ile orantılı olan M değeri beton numunesinde, betonarme numunesine göre çok az bir miktar artış göstermekte, fakat her iki numunede lineer I; lineer II ve non-lineer analizlerinde M değerleri birbirlerine çok yakın olduğu görülür.
- 2) Lineer olmayan bölgenin uzunluğu N, beton numunede betonarme numuneye göre artış göstermekte, fakat lineer II ve non-lineer analizlerinde N değerleri lineer I analizine göre daha fazladır.
- 3) Beton numunesinde numune sayısı düzgün olduğu için lineer I analizinde eğimin değişimi ω_A , eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_C , sınır değerlerinin altında fakat betonarmede bu değerlerin yüksek olduğu görülür ($\omega_A \leq \%10$ ve $\omega_C \leq \%20$ olmalı).
- 4) Beton numunesinde numune sayısı düzgün olduğu için lineer II analizinde eğimin değişimi $\omega_{A'}$, eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi $\omega_{C'}$, sınır değerlerinin altında fakat betonarmede bu değerlerin yüksek olduğu görülür ($\omega_{A'} \leq \%10$ ve $\omega_{C'} \leq \%20$ olmalı).
- 5) Beton numunesinde numune sayısı düzgün olduğu için MFSL analizinde eğimin değişimi ω_{Ac} , eğrinin y eksenini kestiği noktanın değişimi ω_{Cc} , sınır değerlerinin altında fakat betonarmede bu değerlerin yüksek olduğu görülür ($\omega_{Ac} \leq \%10$ ve $\omega_{Cc} \leq \%20$ olmalı).
- 6) y ekseninde olan değerlerin ortalamasının değişimi ω_C , betonarme numunede birbirlerine daha yakın olduğu görülür.
- 7) Band genişliğinin değeri m, beton numunede daha düşük olduğu görülür.
- 8) Gerilme şiddet çarpanının değişimi ω_{KIC} , beton numunede betonarme numunesine göre çok düşük olduğu görülür.
- 9) Kırılma enerjisinin değişimi ω_{Gf} , plastik bölgenin uzunluğunun değişimi ω_{ef} , betonda, betonarmeye göre çok daha az ve anlamlı olduğu görülür.

10) Bf_t değerleri her iki numunede birbirlerine yakın fakat betonarme numunesinde, beton numunesine göre daha fazla olduğu görülür.

11) Numunede artık dayanım değeri σ_0 , Kim'in önerdiği boyut etkisinde Carpinteri'nin denklemine göre daha azdır. Betonarmede bu değer daha yüksek ve Carpinteri'nin önerdiği değerlerine uyumlu olduğu görülür ($k_2 \sigma_{N,r}$: artık dayanım).

12) Karakteristik uzunluk l_p , Bazant'ın önerdiği boyut etkisine uyumlu ve her iki numunede değerler lineer, non-lineer değerlerine yakındır. Betonda betonarmeye göre daha yüksek olduğu, fakat Kim'e göre l_p değeri Carpinteri'nin l_p değerinden çok daha düşüktür. l_p / d_{max} oranı betonda daha yüksektir.

13) MSEL analizinde k_1 katsayısı betonda daha az ve bu sonuç Bf_t değerlerine uyumlu olduğu görülür. Bazant'ın önerdiği boyut etkisinde beton numunesi, betonarme numunesine göre daha düşük Bf_t değerlerine sahiptir ($k_1 \sigma_{N,r}$ burulmaya karşı dayanım değerini ifade etmektedir).

14) Korelasyon değerleri a) lineer I, b) lineer II, c) non-lineer ve d) MFSL için sırası ile aşağıdaki gibidir:

Beton $\rightarrow$ a) $r = 0,9923$ b) $r = 0,9712$ c) $r = 0,9737$ d) $r = 0,9692$

Harç $\rightarrow$ a) $r = 0,8767$ b) $r = 0,4842$ c) $r = 0,8758$ d) $r = 0,8433$

Karşılaştırma eğrilerinde Kim, Bazant ve Carpinteri'nin denklemlerine göre regresyon eğrileri her iki numunede birbirlerine yakın, fakat dayanım kriterinin betonarme numunede daha az olduğu görülür (Şekil 3.39c ve 3.40c).

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapıların analizinde kırılma mekaniği büyük bir önem taşır. Kırılma mekaniği uzun süredir kullanılmakta ve özellikle cam ve metal gibi homojen ve gevrek malzemelerde denenmiş, ancak beton için henüz yeni bir uygulamadır. Bu teorinin temeli 1900 yıllarında atılmış ve zamanımıza kadar çeşitli bilim adamlarının çalışmaları ile geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen önemli noktalardan biri, beton veya betonarme yapıların tasarımında yük öncesi doğal çatlaklar ve sonradan gelişen çatlakların eleman üzerinde çok önemli etkisinin olması ve bunları göz önüne almadan sağlıklı bir tasarım yapılamayacağıdır.

Beton elemanlarda numune geometrisi, yükleme şartları, donatı biçimi, eleman üzerinde varolan çatlaklar ve karışım özellikleri etki eden önemli özelliklerdir. Yukarıdaki parametreler değiştikçe, eleman davranışı ve göçme durumları büyük derecede değişmektedir.

Kırılma mekaniğinin betona uygulanmasında en önemli gerçeklerinden biri de geometrik olarak benzer, fakat farklı boyutlu elemanlarda göçmedeki gerilmenin boyut arttıkça azalmasıdır. Beton yapıların göçmesi, en büyük yüke ulaşmadan önce büyük çatlakların ve çatlama bölgesinin gelişmesi ile olur. Kırılma, genel olarak çatlak tepesinde mikro çatlakların yoğunlaşması ile başlar. Eleman içinde olan agregalar önemli derecede kırılmanın yayılmasını etkilemektedir. Yük arttığında, çatlak tepesine en yakın olan agrega çevresinde aderans çatlakları ve mikro çatlakların agrega etrafında yavaşması oluşur. Yük arttıkça aderans çatlakları çatlak tepesine yaklaşması ve mikro çatlakların yoğunlaşması ile kırılma işlem bölgesi oluşur. Sonunda aderans çözülmesi ve lineer olmayan yumuşama bölgesi meydana gelir. Bu bölge yük taşımaz ve çatlaklar diğer komşu agrega bölgesine ilerlerler.

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi (SEL) geometrik olarak benzer, farklı boyutlu ve çentikli numuneler için geçerli ve çentik boyu tüm numuneler için sabittir. Eleman boyutu çok büyük olduğunda, lineer elastik kırılma mekaniği uygulanır (az donatılı, beton ağırlıklı büyük barajlar). Bazant modeli (SEL) küçük boyutlar için lineerdir,

ancak numunenin boyutları büyüdüğü zaman gerilme değişimi nonlinear olarak değişir ve dayanımın sıfıra yaklaşır. Çentiksiz numunelerde, çentik boyu numune boyutu ile orantılı olarak değişen elemanlarda Bazant'ın önerdiği boyut etkisi [1] çok sağlıklı sonuçlar vermemektedir (örneğin Brezilya silindir yarma deneyi).

Hasarlı mikro yapıdaki malzemeler için Carpinteri'nin önerdiği boyut etkisi metodu (Multifractal Scaling Law) [11] esas altyapıyı oluşturmaktadır. MFSL'e göre boyut sıfıra yaklaştıkça nominal gerilme sonsuza gider, aynı zamanda boyut sonsuza giderken nominal gerilme de küçük bir sabit değere yaklaşır. Fractal, Kaos teorilerinden alınmış bir modeldir. Hasarlı mikro yapıdaki malzemeler incelendiğinde, kırılma yüzeyi tüm tabakalarda aynı olduğu ve her malzeme kendisine ait bir fractal bölgeye sahip olduğu görülmektedir.

Bilindiği gibi betonda çatlağın olmaması durumunda dahi boyut etkisi vazgeçilmez bir davranış olarak görülür. Bazant'ın boyut etkisi kanunu teorik olarak, geometrik olarak benzer ve aynı çatlak uzunluğuna sahip (a_0/D) numuneler için geçerlidir. Çatlaksız beton numunelerde a_0/D parametresinin etkisi katıldığında Bazant'ın boyut etkisi denkleminin düzenlenmesi gerekir. Kim'in [12] önerdiği boyut etkisinde, bu parametreyi göz önünde bulundurarak, boyut sonsuza gittiğinde malzemenin dayanımı küçük sabit bir değere ulaşır.

Genel olarak regresyon değerlerine bakıldığında Bazant'ın önerdiği lineer I analizi daha iyi sonuçlar vermektedir. Planas'ın önerdiği lineer II analizi diğer analizlere göre daha düşük bir korelasyon değerleri vermekte ve özellikle harç numunelerinde düşük değerler elde edilmiştir. Harç içinde büyük agregaların olmaması yük ve gerilim dağılımını önemli oranda etkilemekte, yük dağılımının matris içinde düzgün olmaması eleman dayanımını düşürür. Agrega eleman içinde çatlak dağılımını önemli oranda değiştirir. Ayrıca lineer II analizinde, y ekseninde bulunan değerlerin paydası boyut ile çarpıldığında data dağılımını ve band genişliğini etkilemekte ve lineer II analizi genelde büyük boyutlu numunelerde iyi sonuçlar vermektedir. Carpinteri'nin önerdiği MFSL lineer analizi, lineer I analize göre daha düşük, fakat çok yakın değerler olduğu görülür.

Tez çalışmalarına bakıldığında kırılma özellikleri farklı numunelerde çok fazla değişmekte, buradan beton yapıların analiz ve tasarımında kırılma mekaniğinin önem taşıdığı görülür. Eleman boyutları çok küçük ve çok büyük olması yapıların davranışlarını önemli derecede etkilemektedir. Tasarım koşullarında bu durumları göz önüne alarak sağlıklı, dış etkilere dayanıklı ve ekonomik yapılar yapılmalıdır.



KAYNAKLAR

1. Bazant, Z.P., Planas, J., 1998, Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, **CRC Press**, London.
2. TS 500, 2000, Betonarme yapıların hesap ve yapım kuralları **Türk standartları enstitüsü**, s 75, Ankara.
3. Nilson, A.H., Winter, G., 1986, Design of Concrete Structures, 10th Edn. **McGraw-Hill**, NewYork.
4. McGregor, J.G., 1988, Reinforced Concrete: Mechanics and Design, **Prentice-Hall**, Englewood Cliffs, NJ.
5. Bazant, Z.P., Cedolin, L., 1991, Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories, **Oxford University Press**, NY.
6. Bazant, Z.P., Cedolin, L., 1991, Tabbara, M.R., New method of analysis for slender columns, **ACI Struct. Journal** 88(4), pp. 391-401.
7. Barenblatt, G.I., 1987, Dimensional analysis, Gordon and Breach, NY.
8. Bazant, Z.P., 1984, Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal, **J. Engng. Mech. ASCE**, 110, pp. 518-535.
9. Bazant, Z.P., Xi, Y., Reid, S.G., 1991, Statistical size effect in quasi-brittle structures: is Weibull theory applicable?, **Ibid.** 117 (11), pp. 2609-2622.
10. Bazant, Z.P., Xi, Y., 1991, Statistical size effect in quasi-brittle structures: non-local theory, **Ibid.** 117 (11), pp. 2623-2640.
11. Carpinteri, A., Chiaia, B. and Ferro, G., 1995, Multifractal scaling law: An extensive application to nominal strenght size effect of concrete structures, Atti del Dipartimento di Ingegneria Strutturale No. 50, **Politecnico di Torino**, Italy.
12. Kim, J.K. and Eo, S.H., 1990, Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks, **Mag. Concrete Res.**, 42, pp. 233-238.
13. Levenberg, K., 1944, A method for the solution of certain non-linear problems in least-squares, **Quart. Appl. Math.**, 2, pp. 164-168.
14. Marquardt, D.W., 1963, An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters, **J. Soc. Indust. Appl. Math.**, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441, U.S.A.

15. Bazant, Z.P. and Sener, S., 1987, Tests of size effect in pull-out of reinforcing bars from concrete, computational mechanics of concrete structures-advances and applications, **IABSE Colloquium**, Delft, Netherland, pp. 139-142.
16. Bazant, Z.P. and Kazemi, M.T., 1991, Size effect on diagonal shear failure of concrete beams without stirrups, **ACI Structural Journal**, Vol. 88, No. 3, pp. 268-276.
17. Sener, S., 1993, Size effect in the direct loading tests, **Advances in Civil Engineering, First Technical Congress Gazimagusa**. North Cyprus, pp. 720-727.
18. Sener, S., Bazant, Z.P. and Giraudon, E.B., 1999, Size effect of failure of bond splices of steel bars in concrete beams, **Journal of Structural Engineering**, Vol. 125, No. 6, pp. 653-660.
19. Sener, S., Barr, B.I.G. and Abusiaf, H.F., 1996, Size effect tests in unreinforced concrete columns, Wales Cardiff University, **Magazine of Concrete Research**, No. 1, pp. 3-11.
20. Barr, B.I.G., Abusiaf, H.F. and Sener, S., 1996, Size effect and fracture energy studies using compact compression specimens, **Wales Cardiff University**, Vol. 31, pp. 36-41.
21. Bazant, Z.P., Pfeiffer, P.A., 1987, Determination of fracture energy from size effect and brittleness number, **ACI Materials Journal**, 84, pp. 463-480.
22. Bazant, Z.P. and Sener, S. and Prat, P., 1986, Size effect tests of torsional failure of plain and reinforced concrete beams, **Northwestern University**, Report 86-12 / 498s.
23. Bosco, C., Carpinteri, A. and Debernardi, P.G., 1989, Minimum reinforcement in high-strength concrete, **Journal of Structural Engineering**, Vol. 116, No. 2, pp. 427-437.
24. Kesler, C.E., Naus, D.J. and Lott, J.L., 1972, Fracture mechanics – its applicability to concrete, **In Proc. Int. Conf. on the Mechanical Behavior of Materials**, Vol. 4, The Soc. of Mater. Sci., pp. 113-124.
25. Arslan, A., Hughes, T.G. and Barr, B.I.G., 1991, Mixed mode fracture – including torsion in a new compact test specimen geometry, **in Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics**, Chapman & Hall / E & FN Spon, London, pp. 737-746.

26. Van Mier, J.G.M. and Timmers, G., 1991, Shear fracture in slurry in infiltrated fiber concrete (SIFCON), in Proceedings **RILEM/ACI Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites**, Chapman & Hall, London, pp. 348-360.
27. Bazant, Z.P., 1989, Fracture energy of heterogeneous materials and similitude, Proceedings, **RILEM-SEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock**, Springer-Verlag, New York, pp. 229-241.
28. Gustafsson, P.J. and Hillerborg, A., 1988, Sensitivity in shear strength of longitudinally reinforced concrete beams to fracture energy of concrete, **ACI Materials Journal**, Vol. 85, No. 3, pp. 286-294.
29. Carpinteri, A., 1989, Decrease of apparent tensile and bending strength with specimen size: two different explanations based on fracture mechanics, **International Journal of Solids and Structures**, Vol. 25, No. 4, pp. 407-429.
30. Report by **ACI Committee 446**, 1992, Fracture mechanics, fracture mechanics of concrete: concepts, models and determination of material properties.

ÖZGEÇMİŞ

Farrokh Rasouli Sarabi, 1972 yılında Tebriz/İran’da doğdu. İlk ve orta eğitimini Tebriz Kemal okulunda ve lise eğitimini Tebriz Mansur fen lisesinde tamamladı. 1999 yılında Ortadoğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü bitirdi. Şubat 2000’de Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans programına başladı. Küçük yaşlarda resim ve masa tenisi faaliyetlerine başladı ve profesyonel olarak yağlı boya resim ve sporla ilgilenmektedir.

