



Yasin ÇAĞLAR tarafından hazırlanan “Mod-I beton kırılmasında çentik ve boyut etkisi üzerine bir çalışma” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Sıddık ŞENER

İnşaat Mühendisliği, İstanbul Bilgi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Alper İLKİ

İnşaat Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Hüsnü CAN

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Sabahattin AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma

Tarihi: 29/08/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**MOD I BETON KIRILMASINDA ÇENTİK VE BOYUT ETKİSİ ÜZERİNE
BİR ÇALIŞMA**

Yasin ÇAĞLAR

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2014

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yasin ÇAĞLAR

31.12.2014

MOD I BETON KIRILMASINDA ÇENTİK VE BOYUT ETKİSİ ÜZERİNE

BİR ÇALIŞMA

(Doktora Tezi)

Yasin ÇAĞLAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2014

ÖZET

80 adet deney numunesi içeren çalışmada, amaç çentikli ve çentiksiz beton kiriş elemanlarında boyut ve çentik etkilerinin gözlemlenmesi ve bu etkilerin deneysel ve sonlu elemanlar metodları ile araştırılmasıdır. Bu amaçla dört farklı boyutta çentikli ve çentiksiz olmak üzere herbiri dörder elemanlı ve beş çentik oranlı toplam seksen adet kiriş hazırlanmış ve deneyleri yapılmıştır. Atena 3D sonlu elemanlar analiz programı yardımıyla modellenen elemanların analizleri yapılmış deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel veri ve bulunan sayısal sonuçların birbirleriyle uyumlu oldukları görülmüştür. Sonuçlar ele alındığında beton kirişlerde genel mukavemet hesaplarının aksine beton kirişlerinin karakteristik boyutları arttığında kırılma anında elde edilen nominal gerilmelerde azalma görülmüştür. Bu etkiler bize çentikli ve çentiksiz beton kirişlerde boyut ve çentik etkisinin varlığını kanıtlamaktadır. En büyük agrega çapı olan 10 mm'ye eşit ve daha altında çentik derinliğine sahip sığ çentikli kirişlerde boyut etkisi tipi Tip II'den ziyade çentiksiz yani Tip I'e yaklaşmaktadır. Çentik derinlikleri arttıkça Tip I'den Tip II boyut etkisine daha fazla yaklaşmaktadır. Orta çentikli D=40 ve 93 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 3 ve 7 mm dolayısıyla en büyük agrega çapından küçüktür. D=215 ve 500 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 16 ve 38 mm dolayısıyla en büyük agrega çapı olan 10 mm'den büyüktür. Büyük çentikli D=40 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri 6 mm, en büyük agrega çapından küçüktür. D=93, 215 ve 500 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 14, 32 ve 75 mm, dolayısıyla en büyük agrega çapı olan 10 mm'den büyüktür. Boyut etkisi Tip II davranışı sergilemektedir. Derin çentikli kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 12, 28, 65 ve 150 mm'dir, Tamamı en büyük agrega çapından büyüktür. Boyut etkisi olarak derin çentikli kirişlerde Tip II davranışı tam olarak gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.082
Anahtar Kelimeler : Kırılma mekaniği, Boyut etkisi, Çentik etkisi, Atena 3D
Sayfa Adedi : 148
Danışman : Prof. Dr. Sıddık ŞENER

A STUDY ON NOTCH AND SIZE EFFECT OF CONCRETE FRACTURE
IN MODE I
(Ph.D Thesis)

Yasin ÇAĞLAR

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2014

ABSTRACT

In this experimental and numerical study that consists of 80 test specimens, the aim was to observe notch and size effect in notched and unnotched specimens and investigation of the effects by means of experimental and finite element methods. Five groups having different size, notched and unnotched beams which have four specimens in each group and four different notch ratio; totally 80 specimens were prepared and tested. Atena 3D programme was used for finite element analyses and results are observed in compliance with the experimental results. Considering both the notched and the unnotched concrete experimental and numerical results, in contrast to the conventional strength calculations, when size of the beam's characteristic dimension increased, reduction of the nominal stress during fracture was observed. These effects prove us the existence of the size and notch effect in notched and unnotched concrete beams. In the beams where the notch depths are equal and lower than the maximum aggregate size which is 10 mm in shallow notched beams, size effect type behavior is closer to Type I rather than Type II. When the notch depth increases, Type I to Type II size effect behavior transition can be observed. D=40 and 93 mm middle notched beams' notch depths are 3 and 7 mm, respectively, and therefore lower than maximum aggregate size. D=215 mm and 500 mm middle notched beams' notch depths are 16 and 38 mm respectively, hence greater than the maximum aggregate size. D=40 mm large notched beams' notch depth is 6 mm, lower than the maximum aggregate size. D=93, 215, and 500 mm large notched beams' notch depths are, 14, 32, and 75 mm respectively, and hence greater than 10 mm. Size effect behavior is very closer to Type II size effect law. Finally D=40, 93, 215, and 500 mm deep notched beams' notch depths are 12, 28, 65, and 150 mm respectively, and beams were observed exactly like Type II size effect law.

Science Code : 911.1.082
Key Words : Fracture mechanics, Size effect, Notch effect, Atena 3D
Page Number : 148
Supervisor : Prof. Dr. Siddık ŞENER

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başladığı günden itibaren bilgi ve tecrübelerini paylaşan, yönlendiren, tez danışman hocam Prof. Dr. Sıddık ŞENER'e en içten saygılarımı sunar ve teşekkür ederim.

Tez çalışmamın hem deneysel hem de araştırma kısmında bilgi ve tecrübelerini paylaşan Dr. Çağatay M. BELGİN'e, deneysel çalışma aşamalarındaki büyük katkılarından ötürü Uzman Faruk OGÜN'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalardaki 111M374 No'lu proje kapsamında desteğinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca, beni her zaman destekleyen ve yanımda olan çok değerli aileme emek ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Son ve en büyük teşekkürlerimi de sabırla yollarımı gözleyen ve desteklerini her an yanımda hissettiğim eşim ve kızıma gönderirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
2. BETONDA KIRILMA MEKANİĞİ	7
2.1. Kırılma Mekanîği Yaklaşımı	9
2.2. Kırılma Modları	11
2.3. Boyut Etkisi.....	15
2.3.1. Boyut etkisinin enerji ile açıklanması.....	19
2.3.2. Tip I ve Tip II boyut etkisi.....	26
2.3.3. Kırılma bölgesi.....	29
2.3.4. Boyut etkisi ve yapıların gevrekliği	30
2.3.5. Artık sünek ya da sürtünme limitinin etkisi.....	31
2.3.6. Boyut etkisi tipleri	32
2.3.7. Yüksek dayanımlı beton ve harç dayanımının etkisi.....	33
3. ÇENTİKLİ VE ÇENTİKSİZ ELEMANLARIN ÜRETİMİ	35
3.1. Malzeme ve Karışım Oranları	35
3.2. Kirişlerin Adet ve Boyutları	37

	Sayfa
3.3. Kirişlerin Adlandırılması	38
3.3.1. C kirişleri	38
3.3.2. NS kirişleri	39
3.3.3. NM kirişleri	39
3.3.4. NB kirişleri	40
3.3.5. ND kirişleri	40
3.4. Çentiklerin Açılması	41
3.5. Deney Düzeneği	43
3.6. Deney Sonuçları	46
3.6.1. Çentiksiz (C) kirişlerde kırılma gerilmeleri	50
3.6.2. Sığ çentikli (NS) kirişlerde kırılma gerilmeleri	54
3.6.3. Orta çentikli (NM) kirişlerde kırılma gerilmeleri	56
3.6.4. Büyük çentikli (NB) kirişlerde kırılma gerilmeleri	58
3.6.5. Derin çentikli (ND) kirişlerde kırılma gerilmeleri	60
3.7. Çentikli ve çentiksiz beton kirişlerde dönme açısı-yük ölçümleri	70
4. BOYUT ETKİSİ ANALİZLERİ	77
5. ELEMANLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	81
5.1. Analizlerde Kullanılan Malzeme Tipleri	82
5.2. Numunelerin Tasarım Aşamaları	87
5.3. Numunelerin Adlandırılması ve Boyutları	88
5.4. Yakınsama Analizi	93
5.5. Eleman Ağları	96
5.6. Analiz Sonuçları	108
5.6.1. Kirişlerin deneysel ve analizlerden bulunan göçme yükleri	108

	Sayfa
5.6.2. Analiz sonrası yük-yerdeğiştirme eğrileri ve gerilme, çatlak resimleri.....	112
6. BULGULARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	123
6.1. Boyut ve Çentik Oranı Etkilerinin Karşılaştırılması	123
7. SONUÇLAR	127
KAYNAKLAR.....	129
EKLER.....	135
EK-1. Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı.....	136
ÖZGEÇMİŞ	146

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Beton karışımından alınan silindir ve küp numune sonuçları.....	35
Çizelge 3.2. Kiriş boyutları ve eleman tipine bağlı kiriş sayıları	36
Çizelge 3.3. Kirişlerin boyut ve adetleri.....	37
Çizelge 3.4. Çentikli ve çentiksiz kirişlerin göçme yükleri	46
Çizelge 3.5. Çentiksiz kirişlerin kırılma gerilmeleri.....	50
Çizelge 3.6. Sığ çentikli (NS) kirişlerin kırılma gerilmeleri.....	54
Çizelge 3.7. Orta çentikli (NM) kirişlerin kırılma gerilmeleri	56
Çizelge 3.8. Büyük çentikli (NB) kirişlerin kırılma gerilmeleri	58
Çizelge 3.9. Derin çentikli (ND) kirişlerin kırılma gerilmeleri	60
Çizelge 3.10. Kirişlerin boyut, kırılma anındaki dönme açısı ve kırılma yükleri.	70
Çizelge 3.11. Kirişlerin sadeleştirilmiş boyut ve çentik oranlarına göre kırılma anındaki dönme açıları	70
Çizelge 3.12. Kirişlerin boyut ve çentik oranlarına göre kırılma anındaki ortalama dönme açıları	71
Çizelge 5.1. Analizlerde kullanılan çelik malzeme özellikleri	82
Çizelge 5.2. Analizlerde kullanılan beton malzeme özellikleri.....	83
Çizelge 5.3. Yakınsama analizi sonuçları.....	95
Çizelge 5.4. Çentik oranı 0-0,15 olan kirişlerin deneysel ve simulasyon sonuçları.....	108
Çizelge 5.5. Çentik oranı 0,30 olan kirişlerin deneysel ve simulasyon sonuçları	109
Çizelge 6.1. Kirişlerin deney ortalamaları ve Atena 3D sonuçlarına göre göçme yükleri	123

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Beton ve betonu oluşturan malzemelerin yükleme-gerilme grafiği....	7
Şekil 2.2. Kohezif çatlak gösterimi.....	9
Şekil 2.3. Kohezif çatlağa göre parabolik eğri.....	10
Şekil 2.4. Kırılma modları a) I. Mod, açılma modu b) II. Mod, kayma modu c) III. Mod, yırtılma modu	11
Şekil 2.5. Çatlak tepesinde gerilme durumu a) Mod I, b) Mod II c) Mod III d) Gerilme durumu.....	12
Şekil 2.6. Olasılıksal boyut etkisi a) Weibull zincir teorisi, b) Donell paralel bağ teorisi	16
Şekil 2.7. Boyut etkisi kuralı tip II	17
Şekil 2.8. a) Gevrek b) Yarı gevrek c) Sünek malzemeler	18
Şekil 2.9. Boyut etkisinin enerji ile açıklanması	20
Şekil 2.10. Tip I boyut etkisi ifadesinin grafik gösterimi.....	22
Şekil 2.11. Tip II boyut etkisi ifadesinin grafik gösterimi.....	25
Şekil 2.12. Farklı malzemelerin kırılma işlem bölgeleri	29
Şekil 3.1. C elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri	38
Şekil 3.2. NS elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri.....	39
Şekil 3.3. NM elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri	39
Şekil 3.4. NB elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri.....	40
Şekil 3.5. ND elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri	40
Şekil 3.6. a) Kirişlerin 3 nokta yüklemesi b) Yükleme ve ölçüm düzeneği	44
Şekil 3.7. C kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	52
Şekil 3.8. C kirişlerinin tüm yük-yerdeğiştirme eğrileri	53
Şekil 3.9. C kirişlerinde karakteristik boyuta bağlı maksimum yük kapasitesi...	53

Şekil	Sayfa
Şekil 3.10. C kirişlerinde boyut etkisi	54
Şekil 3.11. NS kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri	55
Şekil 3.12. NM kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	57
Şekil 3.13. NB kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri	59
Şekil 3.14. ND kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri	61
Şekil 3.15. D=500 mm olan kirişlerin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	62
Şekil 3.16. D=500 mm olan kirişlerin çentik oranlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	63
Şekil 3.17. D=215 mm olan kirişlerin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	64
Şekil 3.18. D=215 mm olan kirişlerin çentik oranlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	65
Şekil 3.19. D=93 mm olan kirişlerin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	66
Şekil 3.20. D=93 mm olan kirişlerin çentik oranlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	67
Şekil 3.21. D=40 mm olan kirişlerin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	68
Şekil 3.22. D=40 mm olan kirişlerin çentik oranlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	69
Şekil 3.23. Dönme açısı karakteristik boyut grafiği	71
Şekil 3.24. C kirişleri yük-dönme açısı grafikleri	72
Şekil 3.25. NS kirişleri yük-dönme açısı grafikleri	73
Şekil 3.26. NM kirişleri yük-dönme açısı grafikleri	74
Şekil 3.27. NB kirişleri yük-dönme açısı grafikleri	75
Şekil 3.28. ND kirişleri yük-dönme açısı grafikleri.....	76
Şekil 4.1. Sığ çentikli (NS) kirişlerde boyut etkisi	77

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Orta çentikli (NM) kirişlerde boyut etkisi.....	78
Şekil 4.3. Büyük çentikli (NB) kirişlerde boyut etkisi	79
Şekil 4.4. Derin çentikli (ND) kirişlerde boyut etkisi	80
Şekil 5.1. Eleman ağı sıklaştırmasına bağlı en büyük taşıma gücü karşılaştırması	96
Şekil 5.2. Çentiksiz (C) kirişlerinde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları	109
Şekil 5.3. Sığ çentikli (NS) kirişlerde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları	110
Şekil 5.4. Orta çentikli (NM) kirişlerde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları	110
Şekil 5.5. Büyük çentikli (NB) kirişlerde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları	111
Şekil 6.1. Deney sonuçlarına göre en büyük göçme yüküne boyut ve çentiklerin etkisi	124
Şekil 6.2. Atena 3D sonuçlarına göre en büyük göçme yüküne boyut ve çentiklerin etkisi	124
Şekil 6.3. Tüm deney elemanlarına ait yük-yerdeğiştirme grafikleri.....	125

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Beton kirişlerin dökümünde vibratör kullanımı	36
Resim 3.2. Döküm sonrası L=1200mm'lik kirişler	37
Resim 3.3. Deney elemanları	38
Resim 3.4. Çentik açma makinası	41
Resim 3.5. Çentik açma makinasında kesme yüksekliği kontrolü	41
Resim 3.6. Çentik açma makinasında kesme hızı kontrolü	42
Resim 3.7. Çentik açılan deney elemanı 1	42
Resim 3.8. Çentik açılan deney elemanı 2	43
Resim 3.9. Deney düzeneği	45
Resim 3.10. Deneylerde kullanılan eğimölçer sensörü	46
Resim 3.11. C1 Elemanı yükleme düzeneği	51
Resim 3.12. C1 Elemanı kırılma sonrası görüntüsü	51
Resim 5.1. Çelik malzeme elastisite modülü ve poisson oranı giriş ekranı.....	82
Resim 5.2. Çelik malzeme özgül ağırlık ve termal genleşme katsayısı giriş ekranı	83
Resim 5.3. Beton için temel malzeme katsayıları giriş ekranı.....	84
Resim 5.4. Beton için malzeme çekme özellikleri giriş ekranı (Çatlak açılma kanunu gösterimli)	84
Resim 5.5. Beton için malzeme çekme özellikleri giriş ekranı (Çekme sertleşmesi gösterimli)	84
Resim 5.6. Beton için malzeme basınç özellikleri giriş ekranı (Basınç sünekliliği gösterimli)	85
Resim 5.7. Beton için malzeme basınç özellikleri giriş ekranı (Basınç mukavemetinde kalıcı tepe birim deformasyon gösterimli)	85
Resim 5.8. Beton için malzeme basınç özellikleri giriş ekranı (Basınç mukavemetinde azalma gösterimli)	85

Resim	Sayfa
Resim 5.9. Beton için malzeme kesme özellikleri giriş ekranı (Kesme çarpanı gösterimli).....	86
Resim 5.10. Beton için diğer malzeme kırılma özellikleri giriş ekranı (Yüzey şekline bağlı katsayılar gösterimli).....	86
Resim 5.11. Beton için diğer malzeme kırılma özellikleri giriş ekranı (Beton kalıcı akma yönü ile ilgili katsayılar gösterimli).....	86
Resim 5.12. Beton için diğer malzeme kırılma özellikleri giriş ekranı (Çatlak açılma kanunu gösterimli)	87
Resim 5.13. Eleman analizi için malzeme tipi giriş ekranı	89
Resim 5.14. C500F kirişi eleman ağının (mesh) oluşturulması	90
Resim 5.15. C500F kirişinin Atena 3D programı ile analizinin 15. adım görüntüsü.....	90
Resim 5.16. C500F kirişinin Atena 3D programı ile analizinin 16. adım görüntüsü.....	91
Resim 5.17. C500F kirişinin Atena 3D programı ile analizinin 40. adım görüntüsü.....	91
Resim 5.18. C500F kirişinin maksimum yük öncesi en fazla birim deformasyon yapan bölgesi	92
Resim 5.19. C500F kirişinin analiz sona erdirildiği adımdaki çatlak haritası	93
Resim 5.20. Model üzerinde eleman ağı bölgeleri.....	94
Resim 5.21. C500F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü.....	97
Resim 5.22. C215F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü.....	98
Resim 5.23. C93F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü.....	98
Resim 5.24. C40F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü.....	99
Resim 5.25. NS500F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	99
Resim 5.26. NS215F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	100
Resim 5.27. NS93F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	100
Resim 5.28. NS40F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	101

Resim	Sayfa
Resim 5.29. NM500F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	101
Resim 5.30. NM215F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	102
Resim 5.31. NM93F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	102
Resim 5.32. NM40F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	103
Resim 5.33. NB500F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	103
Resim 5.34. NB215F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	104
Resim 5.35. NB93F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	104
Resim 5.36. NB40F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	105
Resim 5.37. ND500F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	105
Resim 5.38. ND215F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	106
Resim 5.39. ND93F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	106
Resim 5.40. ND40F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü	107
Resim 5.41. C500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	112
Resim 5.42. C215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	112
Resim 5.43. C93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	113
Resim 5.44. C40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	113
Resim 5.45. NS500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	114
Resim 5.46. NS215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	114
Resim 5.47. NS93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	115
Resim 5.48. NS40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	115
Resim 5.49. NM500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	116
Resim 5.50. NM215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	116
Resim 5.51. NM93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	117
Resim 5.52. NM40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	117

Resim	Sayfa
Resim 5.53. NB500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	118
Resim 5.54. NB215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	118
Resim 5.55. NB93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	119
Resim 5.56. NB40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği	119
Resim 5.57. ND500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği.....	120
Resim 5.58. ND215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği.....	120
Resim 5.59. ND93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği.....	121
Resim 5.60. ND40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği.....	121
Resim 1.1. Çentiksiz ($\alpha=0$) C1 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	136
Resim 1.2. Çentiksiz ($\alpha=0$) C2 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	136
Resim 1.3. Çentiksiz ($\alpha=0$) C3 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	137
Resim 1.4. Çentiksiz ($\alpha=0$) C4 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	137
Resim 1.5. Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) NS1 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	138
Resim 1.6. Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) NS2 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	138
Resim 1.7. Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) NS3 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	139
Resim 1.8. Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) NS4 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	139
Resim 1.9. Orta çentikli ($\alpha=0,075$) NM1 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	140
Resim 1.10. Orta çentikli ($\alpha=0,075$) NM2 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	140
Resim 1.11. Orta çentikli ($\alpha=0,075$) NM3 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	141

Resim	Sayfa
Resim 1.12. Orta çentikli ($\alpha=0,075$) NM4 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	141
Resim 1.13. Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) NB1 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	142
Resim 1.14. Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) NB2 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	142
Resim 1.15. Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) NB3 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	143
Resim 1.16. Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) NB4 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	143
Resim 1.17. Derin çentikli ($\alpha=0,3$) ND1 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	144
Resim 1.18. Derin çentikli ($\alpha=0,3$) ND2 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	144
Resim 1.19. Derin çentikli ($\alpha=0,3$) ND3 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	145
Resim 1.20. Derin çentikli ($\alpha=0,3$) ND4 kırıışının deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı	145

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a_0	Çentik uzunluğu
B	İki boyutlu numunenin kalınlığı
Bf_t	Numune geometrisine bağlı bir sabit
β	Gevreklik sayısı ve numune genişliğinin numune boyutuna oranı
c_n	Numune geometrisine bağlı uygunluk katsayısı
d	Karakteristik boyut
D	Kesitin boyutu
Δ	Yatay yerdeğiştirme
E	Elastisite modülü
f_c	Beton basınç dayanımı
F	Kırılma bölgesine lineer olmayan kısım
f_t	Tek eksenli çekme dayanımı
G_c	Çatlak yayılma hızı
G_f	Kırılma enerjisi
h_o	Çatlak bandının genişliği
κ	Düzlem gerilme ve düzlem birim şekil değiştirme için kırılma mekaniği katsayısı
K_I, K_{II}, K_{III}	Mod I, Mod II ve Mod III için gerilme şiddet çarpanı
L	Kiriş boyu
L'	Kiriş net açıklığı
l_{ch}	Karakteristik boy
l_p	Malzeme karakteristik uzunluğu
L_o	Karakteristik kırılma uzunluğu
N	Kırılma işlem bölgesi
P, P_0	Göçme yükü
r, θ	Kutupsal koordinatlarda yarıçap ve x eksenine yapılan açı

Simgeler**Açıklamalar**

r_p	Kırılma işlem bölgesinin uzunluğu
S	Carpinteri gevreklik sayısı
σ	Gerilme
σ_N	Nominal gerilme
$\sigma(\xi)$	Mod I için eksenel çekme gerilmesi
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$	İki boyutlu gerilme hali için gerilmeler
σ_{xz}, σ_{yz}	Üç boyutlu gerilme hali için gerilmeler
u, v, w	Üç boyutlu yerdeğiştirmeler
V	Malzemenin hacmi
ν	Poisson oranı sabiti
w	Çatlak/Çentik genişliği
W	Yapıda depolanan potansiyel enerji

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
CEB	Avrupa Uluslararası Beton Komitesi
KİB	Kırılma İşlem Bölgesi
LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
LVDT	Doğrusal Değişken Diferansiyel Dönüştürücü
TDG	Teknik Destek Grubu
TS500	Türk Standartları (Betonarme Yapıların Hesap ve Kuralları)

1. GİRİŞ

Bu çalışmada basit mesnetli, üç nokta yüklemesi altında çentiksiz ve dört farklı çentik boyutlu olarak deneyleri yapılmış 80 adet kirişin çentik ve boyut etkileri araştırılmıştır. Deneyleri yapılan numunelerin Atena 3D sonlu elemanlar programı ile analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında çentik ve boyut etkileri araştırılmıştır.

Deney kirişlerinde kullanılan betonunun ortalama silindirik basınç dayanımı 35 MPa elde edilmiştir. Kullanılan en büyük agrega çapı 10 mm'dir. Bu çalışmada 2 boyutlu boyut etkisi kullanıldığı için bütün kirişlerin kalınlıkları 40 mm seçilmiştir. Deneyleri yapılmış olan 80 adet kiriş; geometri ve çentik boyuna göre 5 gruba ayrılmaktadır. Her gruptaki kiriş sayısı dörder adettir. Sonuçlar Bazant'ın önerdiği boyut etkisi bağıntıları ile analiz edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde kırılma parametrelerini esas alan Atena 3D programı kullanılmıştır. Malzemenin modelinde özellikle kırılma enerjisi, basınç, çekme, kesme gerilmesi ve diğer kırılma parametrelerini kapsamaktadır. Beton içerikli deney elemanlarının deneylerinde boyut etkisi görülmüştür. Bu nedenle modellemelerin analiz sonuçlarında da boyut etkisinin gözlenmesi beklenmektedir.

Geometrik olarak benzer farklı yapılar karşılaştırılırsa kırılma anındaki nominal gerilme σ_N 'in elemanın karakteristik boyutu D ile azaldığı gözlenir. Beton yarı gevrek bir malzemedir. Beton davranışının sadece plastik ya da elastik teoriye göre açıklanması doğru olmamakla birlikte, kırılma mekaniği açısından da incelenmesi gerekmektedir. TS500 yönetmeliği [75] plastik limit analizine dayanmaktadır ancak boyut etkisini içermez. Yapılan deneyler boyut etkisinin önemini göstermektedir. Çünkü eleman boyutu arttıkça deneysel ve modelleme sonuçlarına göre nominal göçme gerilmelerinde azalmalar görülmüştür.

Beton yapıların göçmesinin sünek olması her zaman arzu edilen bir durumdur, fakat betonun homojen olmayan yapısından ötürü, gevrek göçme kaçınılmazdır. Sünek malzeme göçmesinde taşıma gücüne erişildiğinde, artan şekil

değiştirmelerle yük hemen hemen sabit kalabilirken gevrek göçmede ise taşıma gücüne ulaşıldıktan sonra yükte ani bir azalma olur. Davranışı ve güvenliği olumsuz etkileyen bu ani yük azalmasının nedenlerinden biri de boyut etkisidir.

Çalışmanın Kapsamı ve Amacı

Bu çalışmada basit mesnetli, üç nokta yüklemesi altında farklı geometriye ve farklı çentik boylarına sahip 80 adet kirişin deneylerinde taşıyabilecekleri maksimum yükler, düşey yerdeğıştirmeler, dönme açıları ve maksimum yüke ulaşma süreleri ölçülmüştür. Aynı malzeme ve yükleme durumları göz önüne bulundurularak bu kirişlerin analizleri Atena 3D sonlu elemanlar programı ile yapılmış ve alınan sonuçlar ayrıca karşılaştırılmıştır. Amaç, çentikli ve çentiksiz beton kirişlerde çentik ve boyut etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle araştırılmasıdır.

Mevcut Araştırmalar

Betonun kırılma mekaniğinin önemli uygulamasından biri olan boyut etkisi hakkında günümüzde dünyanın birçok yerinde araştırmacılar tarafından deneysel ve analitik çalışmalarla yapılmaktadır.

Abusiaf ve ark. [1] beton ve betonarme kolonlarda boyut etkisi deneyleri ve [2] betonun kırılma davranışı üzerinde çalışmıştır.

Amin [3], boyut etkisi deneylerinin modellenmesi konusunda çalışma yapmıştır.

Barr ve ark. [5] kompakt basınç elemanlarında kırılma enerjisinin bulunması ve boyut etkisi konularında çalışmalarda bulunmuştur.

Son yıllarda kırılma mekaniği ve boyut etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda Bazant ve ark.'nın büyük oranda katkısı bulunmaktadır. Beton, kaya ve metallerde boyut etkisi [6], betonarme ve öngermeli betonarme kirişlerde kayma göçmesinde boyut etkisi [7,9], donatısız beton borularda gevrek göçmede boyut etkisi [10], kayma göçmesinde agrega boyutu ve etriyelerin etkisi [11], betonarme kirişlerde burulma göçmesinde boyut etkisi [12], döşemelerde betonarme kirişlerde zımbalama

göçmesinde boyut etkisi [13,15], boyut etkisi deneylerinden kırılma enerjisinin hesaplanması [14], çekip çıkarma deneylerinde boyut etkisi [16], etriyesiz betonarme kirişlerin diyagonal kayma göçmesinde boyut etkisi [17], Brezilya yarma deneylerinde boyut etkisi [18], yüksek mukavemetli betonlarda yorulma kırılması ve boyut etkisi [19], narin ve tıknaz betonarme kolonlarda boyut etkisi [20], etriyesiz betonarme kirişlerin kayma gerilmesindeki boyut etkisine göre tasarımlarının yapılabilmesi için formülasyonların bulunması [21], yarı gevrek yapıların mukavemetlerinde çatlak derinliğinin etkisi ve genelleştirilmiş boyut etkisi kanunu [22], kırılma işi metodunun eşsiz olmaması kohezif kırılma parametrelerinin bulunması için boyut etkisi deneyleri [23] bu çalışmalardan başlıcalarıdır.

Belgin, Şener [24,25] aşırı donatılı betonarme kirişlerde boyut etkisi üzerine çalışmıştır.

Carpinteri ve ark. tarafından yapılan çalışmalara; deney elemanlarının boyutlarına göre çekme ve eğilme mukavemetlerinde azalma [26], betonun mikro yapısından kaynaklanan bozulma ve fraktallığı temel alan çekme göçmesindeki boyut etkisi [27,28], multifraktal boyut etkisi kanunu ve beton yapılara uygulanması [29], beton eğilme mukavemetinde boyut etkisi [30], beton kırılma enerjisinde boyut etkisi [31] verilebilir.

Duan K. ve ark. [34] yarı gevrek kırılmada çeper ve boyut etkisi üzerine çalışma yapmıştır.

Hawkins [35] konvansiyonel betonarme tasarımında kırılma mekaniğinin rolü üzerine çalışma yapmıştır.

Hillerborg betonun kırılma enerjisinin belirlenmesinin teorik temelleri üzerine çalışmıştır [36].

Hoover ve ark. beton göçmesinde çatlak uzunluğu etkisi üzerine deneysel çalışmalar [37], betonda Tip I ve Tip II boyut etkisi göçme deneyleri [38,39], kohezif çatlaklar, çatlak bandı ve kırılma işi modellerinin karşılaştırılması [40],

genelleştirilmiş boyut etkisi [41], yarı gevrek göçmelerde sınır etkisi ile boyut etkisi yasasının karşılaştırılması [42] üzerine çalışmalarda bulunmuştur.

Hu ve ark. yüzeye yakın çatlaklardan kaynaklanan kırılma tokluğunda boyut etkisi [43], kompozit malzemelerde kırılma tokluğunda boyut etkisi üzerine asimptotik yaklaşımlar [44,45], boyut etkisi ve yarı gevrek göçmede kırılma işlem bölgesinin rolü [46], boyut etkisinin arkasında yatan mekanizma [47] konularında çalışmalar yapmıştır.

Irwin [48] kırılma mekaniği konusunda geniş çalışmalara sahiptir.

Kaplan [49] çatlak yayılımı ve kırılma mekaniği konularında çalışmalar yapmıştır.

Karihaloo [50] ve ark. beton kirişler üzerinde boyut etkisi çalışmaları yapmıştır.

Koç, Şener [51,52] eksenel yük altında farklı çentik boyunda normal ve yüksek mukavemetli betonlarda boyut etkisini araştırmıştır.

Malvar, Warren [53] tek kenar çentikli kirişlerin üç nokta eğilme deneyinde kırılma enerjisinin bulunması konusunda çalışmıştır.

Marti [54] beton silindirlerin çift zımbalama deneylerinde boyut etkisini araştırmıştır.

Shah ve ark. [56] betonun kırılma mekaniği konusunda bir çok çalışma yapmıştır.

Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde kırılma mekaniği ve boyut etkisi konularında bir çok çalışma yapılmıştır. Bu konudaki çalışmalarından bazıları:

Şener ve ark. tarafından [57,58,67] betonarme donatıların aderans ekinde boyut etkisinin araştırılması, sargılı donatıların aderans ekinde boyut etkisi [59], aderans ekinde dolayı yükleme altında boyut etkisinin araştırılması [60], kırılma mekaniği temelli beton yapı ve beton kirişlerin tasarımında kullanılması [61,62], yüksek dayanımlı betonda kırılma mekaniği [63], eksenel yüklü betonarme kolonlarda

boyut etkisi [64,70], narin beton kolonlarda boyut etkisi [65], betonarme kolonlarda yapım kusurlarının deneysel olarak bulunması [66], donatısız beton kolonlarda boyut etkisi deneyleri [68], elik fiberli ve fibersiz beton kirişlerin göçmesinde boyut etkisi [69], betonda Tip I ve Tip II boyut etkisi deneyleri [71] ve karbon nano tüp katkılı betonlarda boyut etkisi deneyleri [72] konularında araştırmalar yapılmıştır.

Tada ve ark. [73] çatlaklarda gerilme analizleri konusunda araştırmalarda bulunmuştur.

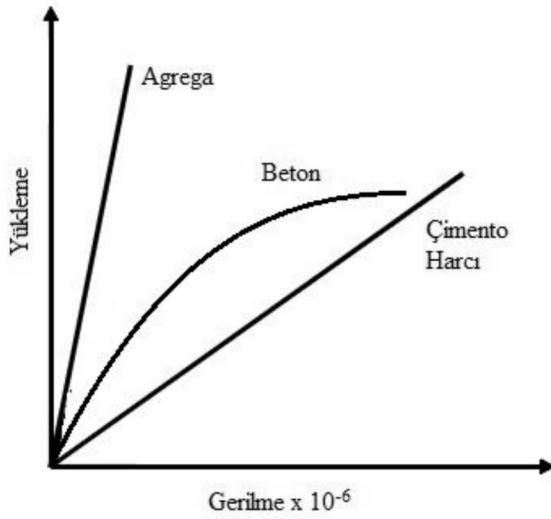
Tang ve ark. [74] tek boyutlu, değişken çentikli elemanlarda kırılma enerjisi ve kırılma işlem bölgesinin bulunması için deney yöntemini geliştirmiştir.

Weibull [76,77] istatistik dağılım ve bu dağılımın farklı alanlardaki kullanımları üzerine çalışmıştır.

Yu ve ark. [78] yarı gevrek göçmede sınır etkisi modelinin problemleri ve boyut etkisi kanunu ile karşılaştırılması konusunda çalışmalar yapmıştır.

2. BETONDA KIRILMA MEKANİĞİ

Beton kompozit bir malzeme olmasına rağmen, mekanik performansı açısından basit kompozit teorisine tam olarak uyumaz. Bu durum Şekil 2.1’de gösterildiği gibi betonun ve betonu oluşturan malzemelerin (beton harcı ve agregası) basit yükleme-gerilme grafiğiyle açıklanabilir. Çimento harcı ile agregası yük-gerilme durumunun %80’ine ulaştığında lineer elastik gerilme davranışı gösterirken, beton yükleme durumunun %40-50 değerine ulaştığında lineer olmayan elastik davranış göstermeye başlar.



Şekil 2.1. Beton ve betonu oluşturan malzemelerin yükleme-gerilme grafiği

Yükleme altındaki betonun lineer olmayan davranışı betonun içeriğindeki üç fazlı heterojen malzemenin tanımlanması ile açıklanabilir; çimento harcı, agregası ve geçiş fazı. Geçiş fazı, çimento harcı ve agregası arasındaki yüzey bölgesidir; agregası parçacıkları çevresinde 10-50 μm kalınlığında ve diğer iki fazdan daha zayıftır. Diğer iki fazda çatlaklar olmamasına rağmen geçiş fazının yüksek gözeneklilik ve düşük gerilme kuvveti nedeniyle mikro çatlaklar kolaylıkla yayılabilir. Bu beton karışımının lineer olmayan davranışının sonucudur. Kotsovos betonun lineer olmayan eğrisini, betonun içerisinde artış gösteren homojen yükleme durumu ile açıklamaktadır.

Betonda gerilme ya da basıncı oluşturan iki temel ayırt edici özellikten biri yükleme diğeri ise enerjidir. Yükleme, çatlak çevresinde gelişen yerel yükleme gerilmesi malzemenin kohezif yüklemesinin üstesinden gelmesi için yeterli olmalıdır. Enerji

ise bir çatlağın yayılması için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanır. Bu iki ayırt edici özellik herhangi bir malzemenin kırılma davranışını açıklamasına rağmen tüketilen enerji miktarının belirlenmesi ve özel sınırlandırılmış durumlarda çatlak boyunca oluşan gerilmenin doğru olarak nasıl hesaplanması gerektiğini gösterir.

Kırılma mekaniğinin beton yapı tasarımında kullanılması yapısal güvenlik ve ekonomiyi artırması ile birlikte özellikle yüksek dayanımlı betonlar, lifli beton yapılar, çok büyük boyutlu beton yapılar, ön gerilmeli yapılar ve beton barajlar gibi güvenliğin yüksek olması gerektiği yapılar için önem taşımaktadır.

Uygulamada kırılma mekaniğini kullanılmasının temel nedenleri;

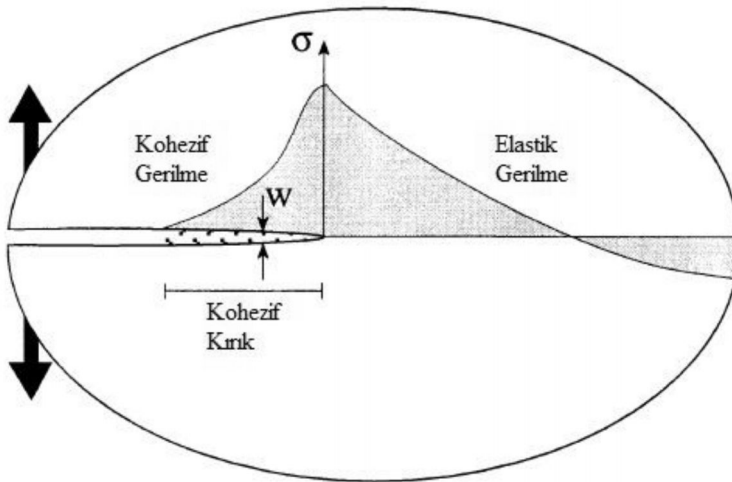
- a. *Çatlak oluşumu için gerekli enerji:* Fiziksel açıdan çatlağın başlaması gerilmeye bağlı olabileceği gibi gerçekte çatlak oluşumu belirli bir enerji gerektirir. Aynı zamanda bu kırılma enerjisi yeni yüzeyler oluşturur.
- b. *Objektif Hesaplamalar:* Herhangi bir teoride hesaplar, eleman boyutu ve koordinat seçimi gibi özelliklerden bağımsız olmalıdır. Bu özelliklere bağlı teori kabul edilemez. Beton tasarımının sonlu eleman analizinde kullandığı yaklaşım yaygın çatlak düşüncesidir. Bu yaklaşıma göre, sonlu elemandaki gerilme, malzemenin f_t çekme mukavemeti ile sınırlıdır. Bu dayanıma erişildiğinde sonlu elemandaki gerilme azalmalıdır. Önceki uygulamalarda gerilme aniden sıfıra yaklaşır, düşey inmektedir. Fakat son zamanlarda gerilmenin kademeli olarak azaldığı, yani malzemenin uzama yumuşama davranışı anlaşılmıştır. Uzama yumuşamasının kullanıldığı sonlu eleman program sonuçları, önemli değişiklikler gösterip eleman boyutuna bağlı sonuçların yanlışlığını göstermiştir.
- c. *Akma Bölgesinin Olmaması:* Yük-yerdeğiştirme diyagramına dayanan, elastik ve plastik olarak iki tip yapısal göçme vardır. Plastik göçmenin tipik karakteristiği; yapının çeşitli parçalarının göçmesi, tek bir parametre ile orantılı, tek serbestlik dereceli olarak aynı anda gelişir. Bu göçmeler, yük-yer değiştirme eğrisinde uzun akma bölgesi ile gösterilirler. Eğer yük-yer değiştirme eğrisinin böyle bir akma platosu yok ise göçme plastik değil yarı

gevreklerdir. Eğer burkulmadaki $P-\delta$ etkisi gibi önemli geometrik kusurlar yok ise kırılma, çatılma ve diğer hasarlar yüzünden malzeme yumuşaması ile göçme işlemi tek serbestlik dereceli sistem olarak gelişmez.

- d. *Enerji Yutma Kapasitesi ve Süneklilik*: Yük-yerdeğiştirme eğrisinin altındaki alan göçme sırasında yapının yuttuğu enerjiyi verir. Bu enerji özellikle dinamik yükler için önemlidir ve yapının sünekliliğini verir. Plastik limit analiz pik yükün azalması ve yutulan enerji hakkında bilgi vermez. O yüzden farklı bir kırılma mekaniği yaklaşımı gereklidir.
- e. *Boyut Etkisi*: Tasarım mühendislerinin kırılma mekaniğini kullanmak için en önemli nedenidir.

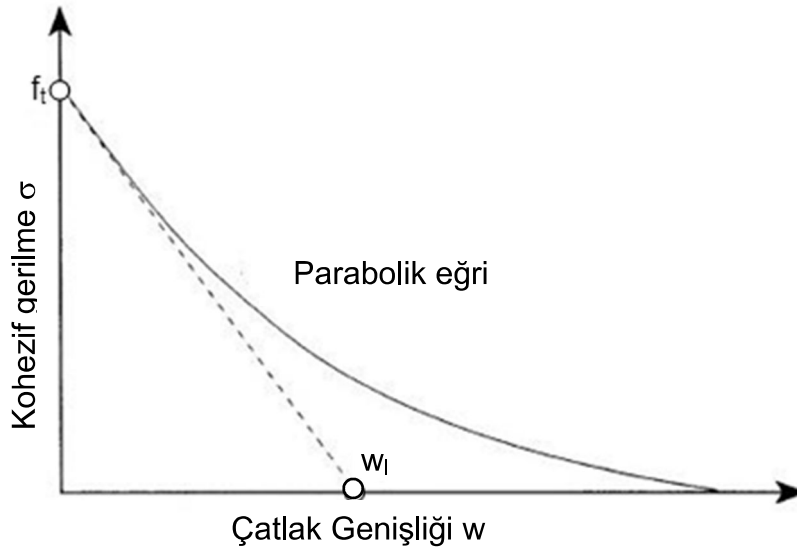
2.1. Kırılma Mekaniği Yaklaşımı

Boyut etkisi, lineer olmayan davranış göstermez. Bu düşünce sınırlı analiz teorisinin klasik kopma kriteri ile açıklanamaz. Kohezif çatlak modeli, beton ve diğer çimento içerikli malzemelerin kırılma modelinden faydalanılarak gösterilebilir. Bu model ile yarma testinde boyut etkisi sayısal olarak analiz edilir.



Şekil 2.2. Kohezif çatlak gösterimi

Kohezif çatlak modelinde, malzemede gerilme mukavemeti f_t herhangi bir değerdeyken, maksimum gerilme yönünde dik çatlaklar oluşur. Bu çatlak ani bir gerilme artışı olmadan oluşmaz.



Şekil 2.3. Kohezif çatlağa göre parabolik eğri

Bu model iki varsayımla açıklanabilir. Birincisi, malzemenin hacmi V ve Poisson oranı (ν) yardımı ve lineer elastik malzeme ile yaklaşık olarak hesaplanabilir. İkincisi, analiz tek doğrultuda yük ve çatlak genişliği için sınırlıdır. Çatlağın herhangi bir noktasında gerilme σ bu noktadaki çatlak genişliği w ile ilişkilidir. Gerilme ve çatlak genişliği ilişkisi bir malzeme özelliği olarak kabul edilebilir ve parabolik eğri ile gösterilebilir.

Brezilya Yarma testinin kullanıldığı çentiksiz numuneler için eğer analiz gerilmenin belirlenmesi ve maksimum yükün yerdeğiştirmesi ile sınırlandırılmışsa bu durum parabolik eğrinin sadece başlangıç kısmı ile ilgilidir. Parabolik eğrinin başlangıçtaki lineer yaklaşımı gerilme mukavemeti f_t ile tanımlanır ve başlangıç eğrisinin w_l yatay kesişimi eğrinin tümü yerine kullanılabilir. Yerdeğiştirmeler, malzeme özellikleri olan f_t , w ve E değerlerine bağlıdır. Çatlak önündeki gerilme yığılışı I_{ch} , karakteristik uzunluk olarak adlandırılan parametre ile ilişkilidir.

$$I_{ch} = \frac{E_1 w_l}{2f_t} \quad (2.1)$$

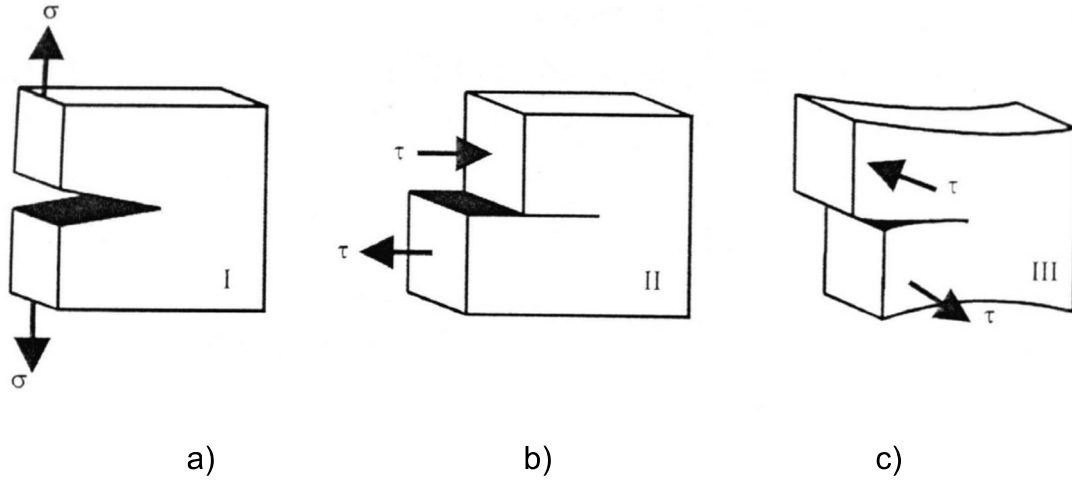
Beton için N' değeri 50-400 mm aralığındadır. Farklı beton mukavemetleri ve agrega boyutları için N' değeri CEB kod modelinde tavsiye edilen ampirik formüllerden hesaplanır.

2.2. Kırılma Modları

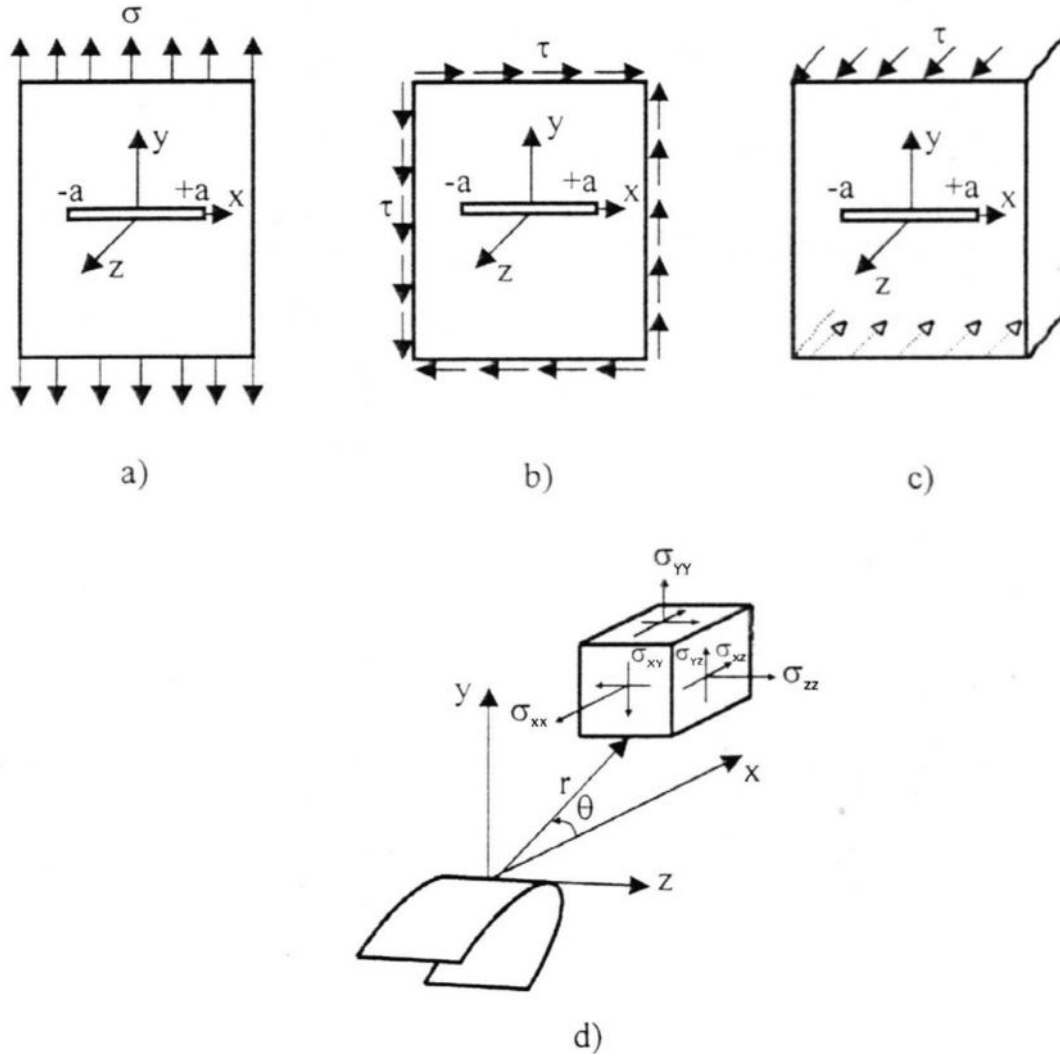
Gevrek bir cisimde kırılma, gerilme alanının yoğunlaştığı yerde olur. Cismin geri kalan kısmının ise elastik davranış içerisinde olduğu kabul edilmiştir. Irwin, keskin çatlak tepesinde gerilme bileşeninin yükleme ve elastik cismin şekline bağlı olduğunu ileri sürmüştür [25].

Genel olarak üç ayrı kırılma modundan sözedilir. Bunlardan birincisi çatlak düzlemine dik açılmayı gösteren ve açılma modu adıyla da anılan I. Mod'dur. İkincisi, çatlak yüzlerinin kendi düzlemlerinde hareket etmesiyle oluşan ve kayma modu adıyla da anılan II. Moddur. Üçüncüsü ise, çatlak yüzlerini düzlem dışında hareket etmesiyle oluşan ve yırtılma modu adıyla da anılan III. Mod'dur (Şekil 2.4c).

Yukarıda değinilen modlara ait gerilme durumları ve eksen kabulleri Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Kırılma modları a) I. Mod, açılma modu b) II. Mod, kayma modu c) III. Mod, yırtılma modu



Şekil 2.5. Çatlak tepesinde gerilme durumu a) Mod I, b) Mod II c) Mod III
d) Gerilme durumu

Bir çatlak tepesinde gerilmelerin hesaplanması matematiksel zorluklar nedeniyle ancak basit kapalı çözümlerle mümkün olabilmektedir. Yukarıda sözedilen temel üç moda ait gerilmeler hesaplanmıştır. Mod I için gerilmeler şu şekilde verilmiştir [25]:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.3)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.4)$$

$$u = \frac{K_I(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa-1}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.5)$$

$$v = \frac{K_I(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa-1}{2} + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.6)$$

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

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \quad \sigma_{xy} = 0 \quad (2.7)$$

olmaktadır. K_I değıerine gerilme şiddet çarpanı adı verilir. Yükleme durumuna ve cismin geometrisine bağılı bir değıerdir. Şekil 2.5a'daki gibi bir geometri için K_I aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma(\xi) \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} d\xi, \quad \xi = \frac{x}{a} \quad (2.8)$$

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

Mod II için gerilmeler aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.9)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$u = \frac{K_{II}(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa+1}{2} + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.12)$$

$$v = \frac{K_{II}(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa-1}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.13)$$

Çatlak tepesinde $\theta = 0$ durumunda

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0, \quad \sigma_{xy} = K_{II} / \sqrt{2\pi r} \quad (2.14)$$

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

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \tau(\xi) \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} d\xi \quad (2.15)$$

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

Mod III için gerilmeler şu şekilde verilmiştir:

$$\sigma_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.16)$$

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (2.17)$$

$$w = \frac{K_{III}(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.18)$$

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

$$K_{III} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \tau(\xi) \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} d\xi \quad (2.19)$$

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

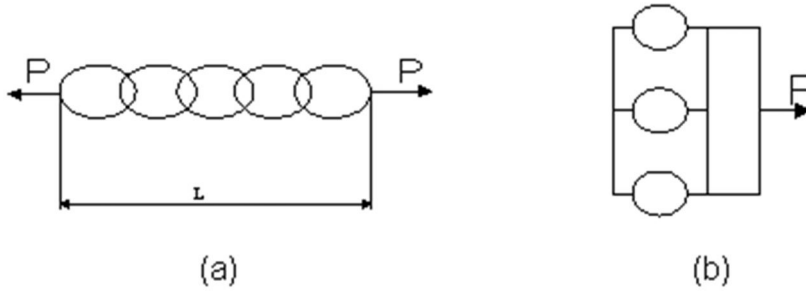
2.3. Boyut Etkisi

Son yıllarda, yapıların çökme yüklerinin ve malzeme kırılma parametrelerinin belirlenmesi için kırılma mekaniğinin boyut etkisi hakkında çok sayıda çalışmalar yapılmaktadır. Hawkins [35], betonun taşıma kapasitesinin belirlenmesinde boyut etkisinin etkin olmadığını, bunun yanı sıra beton yapılarının dayanımının boyut artışı ile ters orantılı olduğunu belirtmektedir. Beton yapılarında boyut etkisi kırılma mekaniği ile açıklanabilir. Ancak çok büyük numuneler için beton yapıların nominal çekme dayanımı yaklaşık olarak sabittir, fakat boyutun değişmesiyle bu etki de değişmektedir. Mikro derecede nominal çekme mukavemeti yapısal boyutun azalmasıyla artar. Yapısal tasarımda boyutun artışı ile yapının dayanımda oluşan azalmalar önemlidir. Yapının gerçek boyutuna göre daha küçük numuneler kullanarak malzeme dayanım parametreleri hesaplanmaktadır. Bununla birlikte laboratuvar şartlarında bulunan bu değerlerin gerçek yapısal değerlerle bağdaşmayacağı düşünülmelidir. Bazant ve Kazemi tarafından önerilen Boyut Etkisi Kuralı geometrik olarak benzer fakat farklı boyuttaki kiriş numuneleri içermektedir [17-18].

Boyut etkisi uygulamada birçok şekilde görülür:

- Geometrik olarak benzer farklı boyutlu elemanların maksimum yüklerinde boyut etkisi görülür.
- Olasılıksal boyut etkisi: Weibull'un 1938'de önerdiği teoridir [76-77].

Weibull teorisine göre zincirin boyu arttıkça zincirde zayıf halka olma olasılığı artar. Zincir uzadıkça zincirin kopma mukavemeti azalacaktır (Şekil 2.6a). Bu teoride yapı birbirine bağlı halkalar dolayısı ile seri bağlı düşünülmektedir. Bir başka teoriye göre ise (Donell Model, 1950) yapı paralel olarak bağlı olduğu düşünülmektedir (Şekil 2.6b). Ancak gerçek yapı davranışı karmaşık (paralel ve seri bağlı) bir davranış sergilemektedir. Weibull teorisinin (seri bağlı) beton yapılara uygulanması kabul edilemez.



Şekil 2.6. Olasılıksal boyut etkisi a) Weibull zincir teorisi, b) Donell paralel bağ teorisi

- En büyük yük sonrası yer değiştirmelerde boyut etkisi görülür.

Boyut etkisi iki farklı biçimde karşımıza çıkar. Birinci tip boyut etkisi sonlu eleman analizinde farklı boyut kullanımı sonucu bulunan farklılıklardır. İkinci tip boyut etkisi ise yapısal boyut etkisidir. Boyut etkisi, farklı boyutlu geometrik olarak benzer yapıların P göçme yüklerini (maksimum yük) karşılaştırarak tanımlanır. Burada σ_N nominal (göçme) gerilme cinsinden belirtilmiştir. σ_N iki boyutlu benzerlik için (levha gibi) Eşitlik 2.20'den ve üç boyutlu benzerlik (silindir gibi) için Eşitlik 2.21'den elde edilir.

$$\sigma_N = c_N \left(\frac{P}{bD} \right) \quad (2.20)$$

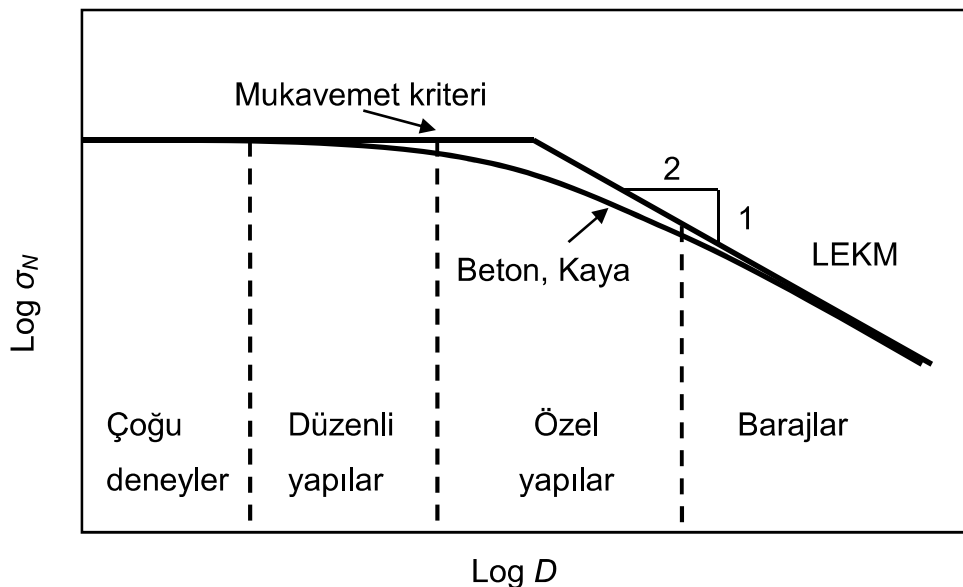
$$\sigma_N = c_N \left(\frac{P}{bD^2} \right) \quad (2.21)$$

Burada:

b iki boyutlu yapının kalınlığı, D yapının herhangi boyutu olarak tanımlanan karakteristik boyuttur. Sadece σ_N 'in bağıl değeri gerektiğinden D boyutu, kirişin yüksekliği veya kesit kenar uzunluğu olabilir. c_N ise uygunluk için kullanılan boyutsuz katsayıdır.

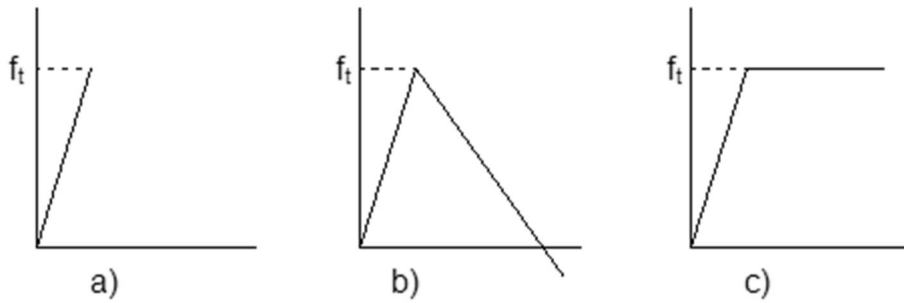
Beton yapılar, boyut etkisinin çok fazla olduğu lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ile boyut etkisinin olmadığı dayanım, elastik teori ya da taşıma gücü ölçütü arasındadır. Plastik limit analizinde (taşıma gücü) ya da elastik analizinde (emniyet gerilmeleri yöntemi), gerilmeler cinsinden kullanılan herhangi bir teoriye göre σ_N göçme gerilmesi, yapı boyutundan bağımsızdır. Dolayısı ile eğilme, kesme ya da burulma elastik ya da plastik teoriye dayanan formüller ile verilmiştir. Betonda göçme, tek bir noktada başlayıp çatlak önünde sonlu bölgede kırılma bölgesi oluşur. Bu da göçmenin yayılarak oluştuğunu gösterir. Lineer elastik kırılma mekaniğinde (LEKM) göçme ise çatlak tepesindeki küçük noktada olur. Elemanın diğer kısımlarında ise elastik kaldığı kabul edilmektedir.

Boyut etkisi, tasarımı yapanlar tarafından göz önüne alınmadığından kırılma mekanikçiler için memnuniyetsizlik konusudur. Geometrik olarak benzer farklı boyutlu elemanların göçme yüklerinden elde edilen σ_N değerleri aynı ise boyut etkisi yoktur denir. σ_N 'nin yapı boyutuna bağımlılığı boyut etkisini gösterir.



Şekil 2.7. Boyut etkisi kuralı tip II

Elastik analiz (Emniyet Gerilmeleri Yöntemi) ile plastik limit analize (taşıma gücü) dayanan göçme kriterleri yapı boyutundan bağımsız olduğundan boyut etkisi içermezler. Eğer $\log \sigma_N$ 'in $\log D$ 'ye göre değişimi çizilirse elastik ya da plastik göçme kriterleri yatay çizgiyle verilir. Bu yatay çizgi Şekil 2.8'dekidir. Bu yüzden elastik ya da plastik göçme kriterleri boyut etkisi göstermez. Gerçekte beton yapılar Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, dayanım kriteri ile lineer elastik kırılma mekaniği arasındadır. Eğer yapı çok küçükse deney sonuçları yatay doğruya (dayanım kriteri), yapı çok büyük ise eğimli doğruya yaklaşır [1].



Şekil 2.8. a) Gevrek b) Yarı gevrek c) Sünek malzemeler

Beton yapıların göçmesi, en büyük yüke ulaşmadan önce büyük çatlakların ve çatlama bölgesinin gelişmesi ile oluşur. Temel kırılma mekaniği teorileri bu yüzyılın ortasında elde edilmesine rağmen tasarım, kırılma mekaniğine dayanmamaktadır. Bunun nedeni kırılma mekaniği son zamanlarda elde edilmiş olup, sadece cam gibi homojen gevrek (Şekil 2.8a), ya da beton, kaya, deniz buzu gibi yarı gevrek (Şekil 2.8b) malzemeye uygulanmasıdır. Kırılma teorilerinin betona uygulaması ilk olarak Kaplan [49] tarafından düşünülmüş, fakat başarılı olmamıştır. Beton yapılarda, kırılma sırasındaki çatlak önündeki agreganın ve boşlukların sağladığı gerilme köprüsü ile çatlakların dağılımı sonucu yumuşama göz önüne alınmalıdır. Donatı gibi sünek malzemeler elasto-plastik göçme gösterirler.

Betona uygulanan kırılma mekaniği biçimi son on yılda çok gelişmiştir. Beton yapı tasarımı iki devrim görmüştür. İlki beton yapıyı elastik ve betonun çekme almadığı varsayımına dayanan emniyet gerilmeleri yöntemi 1900-1930'larda kullanılmıştır. İkinci devrim 1930'daki teoriye dayanmakta olup, plastik limit analizin 1940-1970'li yıllarda kullanması sonucu ortaya çıkan taşıma gücüdür. Beton yapıların tasarımında üçüncü devrimin Kırılma mekaniğinin kullanılması öngörülmektedir. Kırılma mekaniğinin beton tasarımında kullanılması önemli yararlar sağlayacaktır.

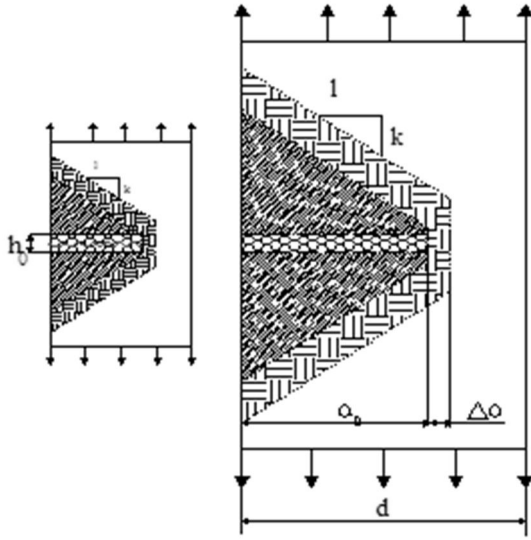
Öyle ki farklı boyutlu yapılar için aynı güvenliğe ulaşmak olası olacaktır. Bu da yapısal güvenlik ve ekonomiyi artırır. Bununla yeni beton malzemesi ve yeni tasarımlar gerçekleşecektir.

Özellikle yüksek dayanımlı betonlar, lifli beton yapılar, çok büyük boyutlu beton yapılar, öngerilmeli yapılar, beton barajlar, nükleer reaktör santraller gibi güvenliğin çok yüksek olduğu ve hasarları büyük felaketlere sebep olabilecek yapılar için kırılma mekaniğine göre tasarım çok önemlidir. Hawkins [35] betonarme yapı tasarım hesabında kırılma mekaniğini kullanmadığı için 1984 yılına kadar Amerikan betonarme yapım yönetmeliğinin (ACI 318) 29 kez düzeltildiğini ya da değiştirildiğini belirtmiştir.

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

2.3.1. Boyut etkisinin enerji ile açıklanması

Kırılma mekaniğinin enerji ile açığa çıkması yüzünden, boyut etkisi olan ilişki Şekil 2.9'da gösterilen üniform gerilmeli panel düşünülerek açıklanabilir. Şekilde sol kenardaki küçük bölgenin dayanımının levhanın sağ tarafından daha az olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla çatlak bandının oluşumu sol taraftan sağa doğru olacaktır. Beton gibi gevrek homojen malzeme için çatlak önünde dağılı çatlakların göz önünde tutulması önemlidir. Bu bölgenin boyutu yapı boyutu ile orantılı olmayıp maksimum agrega boyutu ile ilişkilidir. En basit yaklaşım, kırılma önündeki h_0 çatlak bandının genişliği, aynı betondan yapılmış benzer yapılar karşılaştırıldığı zaman yapı boyutundan bağımsız ve yaklaşık sabit varsayılmıştır. Benzer olarak maksimum yükte a_0 çatlak uzunluğu, yapı boyutu D ile orantılıdır. a/D bu tür davranış elemanların analizlerinde ve betonarme yapıların gevrek göçme deneylerinin çoğunda görülmüştür.



Şekil 2.9. Boyut etkisinin enerji ile açıklanması

Şekil 2.9'daki taralı alandan $\frac{\sigma^2}{2E}$ uzama enerjisinin açığa çıkması ile düşünebilir.

Burada; E betonun Young Modülü, h_0 genişliği, a_0 uzunluklu çatlak bandı ile kırılmanın oluşumudur.

Eğer a_0 uzunluklu çatlak Δa kadar uzarsa, ek uzama enerjisi Δa yatay genişlikli sık taralı alan şeridi daha büyüktür.

$$\Delta A = h_0 \Delta a + 2ka \Delta a \quad (2.22)$$

Şekil 2.9'da görüldüğü gibi k eğim olup yapı biçimine bağlı ampirik sabittir. Boyut etkisinde önemli olmayan k değeri, sonlu eleman analizlerinde ve deneylerinden $\pi/2$ bulunmuştur.

Yapıda depolanan potansiyel enerji W , kalınlık b , kırılma enerjisi G_f 'tir. Çatlak bandının birim uzunluğu veya çatlak oluşturan gerekli enerji, büyük yapılarda Δa çatlak uzaması sonucu, malzeme özeliği olan G_f kırılma enerjisine eşittir. Büyük yapı için σ_N değeri, hacmin aynı kalacağı daha büyük bölgede açığa çıkan toplam enerjisinden az olmalıdır. Büyük yapılarda birim çatlak gelişmesi için daha büyük enerji gerektiğinden σ_N küçülecektir. Dolayısıyla σ_N yapı boyutundan etkilendiğinden boyut etkisinin varlığı görülmektedir.

Şekil 2.9’da dış yüklemeler sonucunda levhadaki taralı şeritten açığa çıkan enerji aşağıdaki bağıntıdaki gibidir;

$$\Delta W = b(h_0 \Delta a + 2k \Delta a) \left(\frac{\sigma_N^2}{2E} \right) \quad (2.23)$$

Levhada yutulan enerji;

$$\Delta W = G_f b \Delta a \quad (2.24)$$

Dış etkiler ve levhanın yuttuğu enerji eşitliğinden;

$$\sigma_N^2 = \left[h_0 + 2k \left(\frac{a}{D} \right) D \right] = 2EG_f \quad (2.25)$$

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f}{h_0 + 2k \left(\frac{a}{D} \right) D} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

$$D_0 = \frac{h_0 D}{2ka} \quad (2.27)$$

Eğer D_0 yukarıdaki Eşitlik 2.26 ile gösterirse ve pay ve payda f_t ile çarpıldığında,

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f}{h_0 \left(1 + \frac{D}{D_0} \right)} \right]^{1/2} \frac{f_t}{f_t} \quad (2.28)$$

elde edilir. Sonuçta aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f f_t^2}{h_0 f_t^2 \left(1 + \frac{D}{D_0} \right)} \right]^{1/2} \quad (2.29)$$

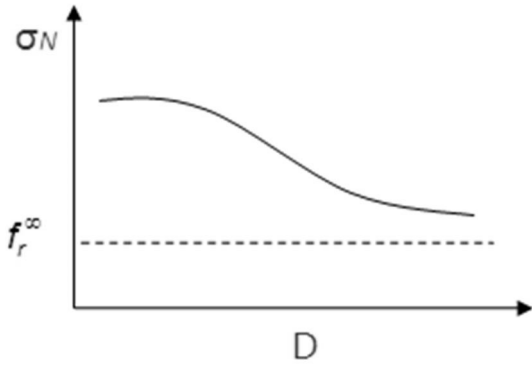
Kırılma mekaniğindeki Bazant'ın [6-23] önerdiği boyut etkisi yasası iki tiptir.

Tip I. Çentiksiz elemanlar için geçerli eşitlik Eşitlik 2.30'da verilmiştir.

$$\sigma_N = f_r^\infty \left(1 + \frac{D_b}{D + l_p} \right) \quad (2.30)$$

Burada f_r^∞ , l_p ve D_b doğrusal regresyon sonucu bulunan malzeme sonuçlarıdır.

l_p malzeme karakteristik uzunluğu olup en büyük agrega boyutu ile ilişkilidir.



Şekil 2.10. Tip I boyut etkisi ifadesinin grafik gösterimi

Tip II. Çentikli elemanlarda boyut etkisi alttaki bağıntılarda gösterilmiştir.

$$\sigma_N = B f_t (1 + \beta)^{-1/2} \quad (2.31)$$

$$B = \left(\frac{2EG_f}{h_0 f_0^2} \right)^{1/2} \quad (2.32)$$

$$\beta = \frac{D}{D_0} \quad (2.33)$$

Bağıntılarda, B malzeme dayanımına bağlı sabit, D yapı biçimine bağlı boyutsuz sabittir. f_t betonun çekme dayanımı ve β katsayıdır.

Daha genel boyut etkisi yasası Eşitlik 2.34 ile açıklanmıştır.

$$\sigma_N = Bf_t(1 + \beta^r)^{-1/2r} \quad (2.34)$$

Burada r elemanın geometrisine bağlıdır.

Bütün geometri ve malzemeler için $r \geq 1$ bulunduğundan bu çalışmada Eşitlik 2.34 kullanılmıştır. Eşitlik yaklaşık bir ifadedir, fakat boyut değişiminin 2-20 aralığı için yeterlidir. Daha büyük boyut değişimi için karmaşık formüller gereklidir. Eşitlik 2.34'ün elde edilmesinde aşağıdaki varsayımlardan yararlanılmıştır [1].

- Göçme anında çatlak önünde açığa çıkan enerji çatlak uzunluğuna bağlıdır.
- Açığa çıkan enerji aynı zamanda en büyük d_a agrega boyutunun bir kaç katı olan çatlak bandının genişliğine bağlıdır
- Farklı boyutlu geometrik olarak benzer yapılarda oluşan kırılma yüzeyleri de geometrik olarak benzerdir.
- Yapı göçmesi çatlak başlangıcı ile değil, çatlamış bölgenin tüm yapıyı kaplaması ile olur.

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi ifadesinde yani Eşitlik 2.31'de;

- Eğer yapı çok küçükse $D \ll D_0$ kabul edilerek $\beta = d/D_0$ değeri birin yanında küçük olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda $\sigma_N = Bf_t$ olur ki göçme gerilmesi plastik limit analizi ya da emniyet gerilmeleri yöntemi ile temsil edilmektedir.

- Eğer yapı çok büyük ise $D \gg D_o$ bir değeri β değeri yanında çok küçük olduğundan bir değeri ihmal edilir ve $\sigma_N = Bf_t(\beta)^{-1/2}$ olur.

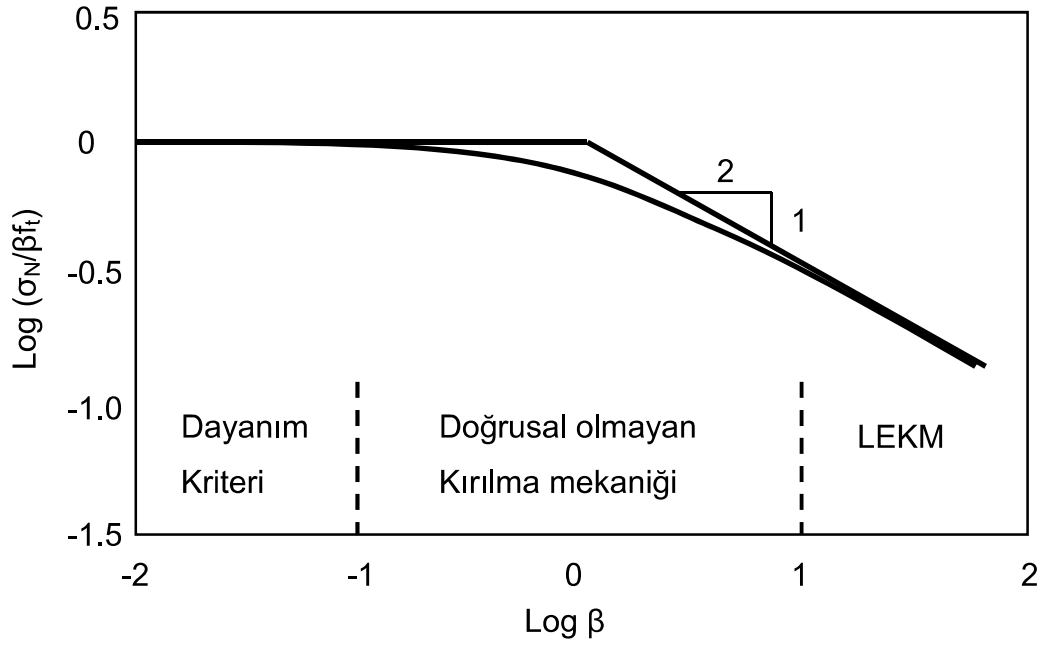
Yani göçme gerilmesi doğrusal elastik kırılma mekaniğini temsil etmektedir. Her iki tarafın logaritması alındığında $\log \sigma = -(\frac{1}{2})\log \beta + \text{sabit}$ olur. Şekil 2.11'de logaritmik eksen takımında, eğimi -1/2 olan doğru ile göstermektedir.

Asimptotun kesim noktası, plastik analiz ve LEKM teorileri eşitlenerek Eşitlik 2.35 elde edilir.

$$Bf_t = Bf_t(\beta)^{-1/2} \quad (2.35)$$

$\beta^{-1/2} = 1$, buradan $\beta = 1$ ve $D = D_o$ bulunur. β gevreklik sayısıdır.

Buradaki gevreklik sayısı, yapı boyutunun çatlak tepesinde oluşan plastik bölge çapına oranından farklıdır. Eşitlik 2.35 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 Eşitlik 2.35'deki düzeltme terimleri kullanılmalıdır.



Şekil 2.11. Tip II boyut etkisi ifadesinin grafik gösterimi

- $\text{Log} \beta \gg 1$ eşitliği lineer elastik kırılma mekaniğinde kullanılır.
- $\text{Log} \beta \ll 1$ eşitliği plastik limit analizinde kullanılır. Şekil 2.11'de yatay eksen β olarak gösterilmiştir.

$\beta < 0.1$ ise plastik limit analizi,

$0.1 < \beta < 10$ ise lineer olmayan kırılma mekaniği,

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

Betonun çekme dayanımı Eşitlik 2.36 ile belirlenir [66].

$$f_t = 0.35\sqrt{f_c} \quad (2.36)$$

Beton basınç dayanımı f_c ile gösterilir. Boyut etkisi eşitliğinin üstünlüğü lineer regresyon için düzenlenebilir olmasıdır. Bu düzenlemeler yapılırsa deney sonuçları;

$$y = Ax + C \quad (2.37)$$

biçiminde bir doğru ile temsil edilebilir.

2.3.2. Tip I ve Tip II boyut etkisi

Tip I boyut etkisi

Çentiksiz numuneler için geçerlidir. Eşitlik 2.30 $D \gg I_p$ varsayılarak düzenlenir ve $f_r^\infty = \sigma_0$ Tip I değişken dönüşümü yapılır ise,

$$\frac{1}{\sigma_N} = \frac{1}{\sigma_0} + \frac{1}{\sigma_0} \frac{D}{D_b} \quad (2.38)$$

Eşitlik 2.20'deki Y , X , C ve A değerleri Eşitlik 2.39'da gösterilmiştir.

$$Y = \frac{1}{\sigma_N}, \quad X = D, \quad C = \frac{1}{\sigma_0} \quad \text{ve} \quad A = \frac{C}{D_b} \quad (2.39)$$

3 nokta yüklemesi altındaki kirişler için göçme yüklerinden

$$\sigma_N = \frac{3P_u L}{2bD^2} \quad (2.40)$$

eşitliği elde edilir.

D_b ve σ_N lineer gerilmeden elde edilerek boyut etkisi eşitliği elde edilmiş olur.

Lineer Dağılım Eğrisi için hesap:

$$- \sigma_N = \sigma_0 \left(1 + \frac{rD_b}{D}\right)^{(1/r)} \quad \text{tip I eşitliği.} \quad (2.41)$$

Bu bağıntıda her iki tarafın r'inci kuvveti alınır

$$(\sigma_N)^r = (\sigma_0)^r \left(1 + \frac{r D_b}{D}\right) \text{ şeklini alır.} \quad (2.42)$$

- $(\sigma_0)^r$ terimi $\left(1 + \frac{r D_b}{D}\right)$ parantezi üzerine dağıtılırsa;

$$(\sigma_N)^r = (\sigma_0)^r + (\sigma_0)^r \left(\frac{r D_b}{D}\right) \text{ şeklini alır.} \quad (2.43)$$

- Düzenli bir şekilde yazılırsa;

$$(\sigma_N)^r = (\sigma_0)^r + (\sigma_0)^r D_b r \left(\frac{1}{D}\right) \text{ eşitliği } y = Ax + C \text{ şeklinde bir doğru eşitliği haline gelir.}$$

$$Y = C + Ax \quad (2.44)$$

$$- (\sigma_0)^r = C \rightarrow \sigma_0 = C^{(1/r)} \quad (2.45)$$

$$- (\sigma_0)^r D_b r = A \rightarrow D_b = \frac{A}{r C} \quad (2.46)$$

$$- y = (\sigma_N)^r \text{ ve } x = \frac{1}{D} \text{ olarak bulunur.} \quad (2.47)$$

Sonuç olarak lineer dağılım eğrisi çizilirken yatay eksene $\frac{1}{D}$, dikey eksene ise $(\sigma_N)^r$ verileri yerleştirilerek doğrusal bir grafik çizilir.

Tip II boyut etkisi

Çentikli numuneler için geçerlidir. Tip II boyut etkisi Eşitlik 2.31'e göre düzenlenirse aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\frac{\sqrt{1+\beta}}{B} = \frac{f_t}{\sigma_N} \quad (2.48)$$

Her iki tarafın karesi alınması ile Eşitlik 2.49 elde edilir.

$$\left(\frac{f_t}{\sigma_N} \right)^2 = \frac{1 + \frac{D}{D_0}}{B^2} \quad (2.49)$$

Parantez açılırsa ortaya çıkan sonuç Eşitlik 2.50'ye benzer.

$$\left(\frac{f_t}{\sigma_N} \right)^2 = \frac{1}{B^2} + \frac{1}{B^2} \frac{D}{D_0} \quad (2.50)$$

Yukarıda eşitlik $y=Ax+C$ şeklinde temsil edilebilir.

$$Y = \left(\frac{f_t}{\sigma_N} \right)^2 \quad (2.51)$$

$$C = \left(\frac{1}{B^2} \right)^2 \quad (2.52)$$

$$X = D \quad (2.53)$$

$$A = \frac{C}{D_0} \quad (2.54)$$

Bu dönüşüm ile X, Y eksen takımında doğru eşitliği elde edilir. Gerçekte sonuçlar dağılım göstereceğinden lineer bağıntı ile A doğru eğimi, C doğrusunun Y eksenini kestiği nokta bulunur. Bunlardan yararlanarak Eşitlik 2.31 için gerekli olacak B ve D_0 sabitleri bulunarak boyut etkisi yasası elde edilmiş olur.

2.3.3. Kırılma bölgesi

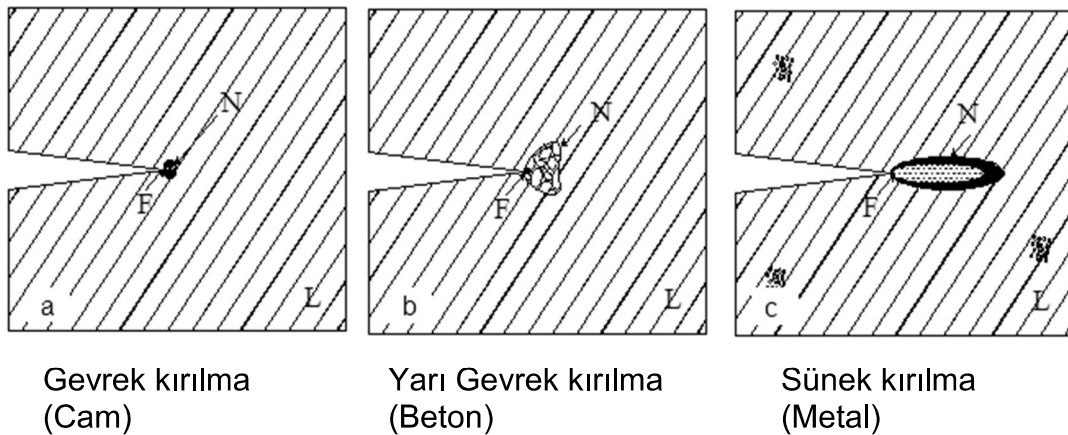
Farklı malzemelerde çatlak tepesinde de farklı bölgeler oluşmaktadır. Şekil 2.12’de verildiği gibi betonda boyut etkisinin en büyük gerekçelerinden biri kırılma bölgesi *KİB*(*Kırılma işlem bölgesi*)’nin büyüklüğüdür.

Genelde iki tip lineer olmayan kırılma mekaniği vardır;

- Sünek (metaller) malzemeler
- Sünek olmayan (beton, seramik) malzemeler

Farklı malzemelerin kırılma bölgeleri yani Şekil 2.12a kırılması gevrek kırılma olup cam türü malzemelerin kırılmasıdır. Bu kırılmada lineer olmayan bölge çok küçük olmakla birlikte tüm yapı hemen hemen elastiktir.

Şekil 2.12’nin b ve c şıklarındaki kırılma tam gevrek bir kırılma değildir. *b*’deki kırılma yarı gevrek ve *c*’deki kırılma sünek kırılmadır. Yarı gevrek kırılma beton sünek kırılma ise metal türü malzemelerde oluşur. Şekil 2.12’de kırılma işlem bölgesi ve *N* ise lineer olmayan kısımdır. Gevrek kırılmalarda, *F* alanı, *N* alanının yaklaşık olarak tamamını kapsamaktadır.



Şekil 2.12. Farklı malzemelerin kırılma işlem bölgeleri

Kırılma işlem bölgesinin uzunluğu, malzemenin granüler yapısı ile ilişkilidir. Örneğin cam gibi tam gevrek bir malzemede 10 mm olan bu tabaka normal beton

için 200-500 mm ve maksimum agregâ çapı 38 mm olan baraj betonlarında 700 mm civarında olmaktadır.

2.3.4. Boyut etkisi ve yapıların gevrekliğı

Kırılma mekaniğı teorisinin çok önemli bir sonucu boyut etkisidir. Bu yüzden kırılma özelliklerini buradan bulmak uygundur. Yapı tasarımı için boyut etkisi eşitliğı laboratuardaki küçük numune sonuçlarından gerçek boyutlu eleman sonuçlarına geçmek için gereklidir.

Eşitlik 2.14 boyut etkisi yasasını malzeme kırılma parametreleri G_f ve f_t cinsinden verir. Bazant β gevreklik sayısını yapının biçiminden bağımsız isimlendirmiştir.

Daha önce belirtildiğı gibi gevreklik sayısı $\beta = \frac{D}{D_0}$ 'dır.

Yapının gevrekliğinin diğâ tanımları daha önce verilmiştir. Araştırmacılar metallerde yapısal gevrekliğı yapı boyutunun, Irwin'in lineer olmayan bölge boyutuna oranı olarak bulmuşlardır. Hillerborg [36] ise D/L_0 oranı ile tanımlanan yapısal gevrekliğı önermiştir. L_0 karakteristik uzunluktur.

$$L_0 = \frac{EG_f}{f_t^2} \quad (2.55)$$

Bu yüzden L_0 karakteristik kırılma bölgesi olarak isimlendirilir. Carpinteri gevreklik sayısını aşağıdaki denklemde göstermiştir.

$$S = \frac{G_f}{f_t D} \quad (2.56)$$

Benzer tanımlar seramikler için önceden önerilmiştir. Hillerborg, Carpinteri'nin gevreklik sayısının yapı geometrisine bağılı olduğundan genelleştirilemez olduğunu söylemiştir.

Daha sonra gevrekliğin genelleştirilmesi Bazant tarafından önerilmiştir. Geçerli standart formülle göre limit analizin düzenlenmesinde, lineer olmayan kırılma mekaniği göz önüne alınarak taşıma yükünde nominal gerilme v_u (boyut etkisiz) şu şekilde verilmiştir.

$$\sigma_N = \frac{v_u}{\sqrt{1+\beta}} \quad (> v_u^{\min}) \quad (2.57)$$

β değerinin bağlı olduğu D_o 'i hesaplama yöntemi araştırılmalıdır. Normal gerilme (2.39) eşitliğinin $> v_u^{\min}$ limit değeri vardır (Tip I). Böyle bir limite örnek Brezilya silindir yarmada çekme deneyleridir. Tip II'de ise boyut arttıkça, gerilme azalmaktadır.

2.3.5. Artık sünek ya da sürtünme limitinin etkisi

Silindirlerin Brezilya yarmada çekme deneylerinde, Bazant, Kazemi ve Hasegawa göçmede nominal gerilmenin silindirin artan yarıçapı ile azaldığını, sonra sabit kaldığını gözlemlemiştir [18]. Buna göre belli büyük boyutlarda maksimum yükte gevrek olmayan göçme mekanizmasına geçiş vardır. Bunun nedeni büyük boyutların maksimum yükünde yük uygulaması noktası altındaki bölgede küçük kama biçimli bölge vardır. Küçük çaplılarda yükün neden olduğu ayrılma çatlağı kama biçimli bölgenin sürtünmeli kaymasından büyüktür. Bu yüzden sünek kırılma mekanizması olur. Halbuki eğer yapı çok büyük olursa ayrılma göçmesindeki nominal gerilme, kamada sürtünmeli kaymaya neden olan σ_N nominal gerilmesinden çok küçüktür. Bu yüzden bu tip göçme için boyut etkisi yasasında σ_N 'nin daha fazla azalmayacağı bir limit konmalıdır. Basınçta ayrılma göçmesi içeren diğer göçme mekanizmaları durumunda da bu artık gerilme doğabilir.

2.3.6. Boyut etkisi tipleri

Rastgele dayanım yüzünden istatistiksel boyut etkisi

Malzemenin heterojenliği yüzünden dayanım Weibull tipi istatistik modellerle tanımlanmıştır. Ancak yapının ilk çatlakla göçmesi ya da yapının büyük parçasında gerilmenin uniform olduğu beton yapıda, Weibull teorisinin etkisi, boyut etkisine göre ihmal edilecek kadar azdır.

Farklı rutubet ve kırılma yüzünden boyut etkisi

Hidratasyon sırasında açığa çıkan ısı farklı boyutlu elemanlarda değişkenlik göstermektedir. Beton barajların gövdesinde hidratasyon çok uzun süre devam eder. Ayrıca farklı ısıdan doğan gerilmenin düzgün dağılılması, yapıdaki rutubet ve betonun kuruması; difüzyon yüzünden, önemli yapısal boyut etkisine yol açmaktadır.

Çeper etkisinin doğurduğu boyut etkisi

Betonun yüzeyine yakın sınır tabaka, yapının içinden mukavemet ve karışım olarak farklılığı, başka bir boyut etkisi doğurur. Bu sınır tabaka bir agrega kalınlığında olup, harcın (ince malzeme) büyük agregaya (kaba malzeme) oranından fazladır. Bu tabaka “çeper etkisi” olarak bilinir. Sınır tabakanın kalınlığının yapı boyutundan bağımsızlığı yüzünden bu tabakanın etkisi küçük yapılarda, büyük yapılardan fazladır. Çok büyük kesitlerde bu etki önemsiz olur.

Çatlak uçlarında tekillik yüzünden boyut etkisi

Gerilme şiddet çarpanı sabit olmayıp plağın yüzeyi ile kesişme noktasında Poisson oranının sıfır olduğu durumlar hariç, sıfıra düşer. Gerilme şiddet çarpanının ortalama değerine plak kalınlığının etkisi vardır. Kalınlık büyük olmamalıdır. Eğer kirişlerin kalınlıkları aynı ise bu etki göz ardı edilebilir.

Agrega boyutu sebebiyle boyut etkisi

Boyut etkisi, kırılma parametreleri, aynı agrega boyutu ve betondan yapılmış yapılar için geçerlidir. Eğer agrega boyutu değişirse, kırılma parametreleri ve boyut etkisi parametreleri değişir. Boyut etkisi eşitliği düzeltilmelidir.

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1+\beta}} \quad \text{ve} \quad \beta = \frac{D}{D_0} \quad (2.58)$$

$$f_t = f_t^0 \left(1 + \sqrt{\frac{c_0}{d_a}} \right) \quad (2.59)$$

Burada, f_t^0 betonun çekme dayanımıdır. Bu değer referans olarak seçilmiştir. f_t ise maksimum agrega boyutu d_a olan beton için çekme dayanımıdır. c_0 ampirik sabittir.

2.3.7. Yüksek dayanımlı beton ve harç dayanımının etkisi

Beton dayanımındaki son gelişmeler matrisin (bağlayıcı harç) dayanımı ve agrega–matris kenetlenmesini artırma yönündedir. Yüksek dayanımlı betonda agrega ve matrisin elastisite modülleri ve mukavemeti arasındaki fark normal dayanımlı betondan çok küçüktür. Yüksek dayanımlı beton, daha homojen malzeme olarak davranır ve sonuçta kırılma işlem bölgeleri (fracture process zone) daha küçüktür. Boyut etkisi yasasında d_0 kırılma işlem bölgesi ile ilişkilidir. Aynı yapı boyutu için yüksek mukavemetli beton lineer elastik kırılma mekaniğine daha yakın olup normal betona göre davranışı daha gevrektr. Bu yüzden kırılma mekaniği analizi ve boyut etkisi, yüksek dayanımlı betonlarda, normal dayanımlı betonlardan çok daha önemlidir.

3. ÇENTİKLİ VE ÇENTİKSİZ ELEMANLARIN ÜRETİMİ

Çentikli ve çentiksiz etkisi deneyleri için beş farklı grubun her birinden 20'şer adet kiriş hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm kirişlerin kalınlıkları 40 mm'dir. Diğer boyutları ise 1200x500, 516x215, 223x93, 96x40 ve toplam kiriş adedi 80'dir. Laboratuvar ortamında hazırlanan her gruptaki bu kirişler 28 günlük dayanım sonrası 4'e ayrılarak farklı çentik boyları açılmıştır. Sonuçların analizi için Bazant'ın çentikli kirişler için önerdiği boyut etkisi eşitlikleri kullanılmıştır.

3.1. Malzeme ve Karışım Oranları

Kirişlerin dökümü sırasında alınan kontrol silindirlerinin basınç dayanımları ortalaması $f_c=35$ MPa, varyasyon katsayısı 0,11 MPa elde edilmiştir.(Çizelge 3.1)

Tip I-Tip II boyut etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla çentikli ve çentiksiz kirişler için aynı karışımdan toplam 80 kiriş dökülmüştür. Dökümde kullanılan betonun karışım oranı, çimento/su/kum/çakıl (c/w/s/g)=1/0.55/2,81/1,81 seçilmiştir. Kalıpların sökümü 9-10/12/2012'de yapılmıştır. Kirişler kür boyunca ıslak bez altında korunmuştur.

Çizelge 3.1. Beton karışımından alınan silindir ve küp numune sonuçları

Döküm Tarihi	Deney Tarihi	Yaşı [gün]	Boyutlar [mm]	Tipi	Adet	Maks.Yük P_u [kN]	Alanı [mm ²]	f_c [MPa]	Std. Sapma s	Basınç Muk. σ_c [MPa]	Değişik. Kats. CoV
06.12. 2012	09.07. 2013	215	75x150	Silindir	7	152,9 187,3 167,0 156,4 133,4 174,1 168,8	4418	34,6 42,4 37,8 35,4 30,2 39,4 38,2	3,9	36,9	0,11
06.12. 2012	09.07. 2013	215	150	Küp	5	1039,5 1104,8 1071,0 1021,5 1089,0	22500	46,2 49,1 47,6 45,4 48,4	1,5	47,3	0,03

Çentikler 22-24.01.2013 tarihleri arasında açılmıştır. Bu kirişlerde boyut değişim aralığı 1:12,5 'dir. Kirişlerin boyutları ve çentik oranı α , Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kiriş boyutları ve eleman tipine bağlı kiriş sayıları

Bağıl Boyutlar	Derinlik [mm]	Uzunluk [mm]	$\alpha=a/D$					Toplam Sayı
			0	0,02	0,075	0,15	0,3	
12,5	500	1200	4	4	4	4	4	20
5,4	215	516	4	4	4	4	4	20
2,3	93	223	4	4	4	4	4	20
1,0	40	96	4	4	4	4	4	20

Resim 3.1'de kirişlerin dökümü sırasında vibrasyon uygulaması görülmektedir.



Resim 3.1. Beton kirişlerin dökümünde vibrator kullanımı

Kalıp açıklığı 40 mm ve maksimum agregası boyutu 10 mm'dir. Kiriş genişliği çok ince olduğu için betonun yerleşip hava kabarcıklarının karışımından uzaklaşması amacıyla belirli aralıklarla ve sabit hızlarda vibrasyon uygulanmıştır.



Resim 3.2. Döküm sonrası L=1200mm'lik kirişler

Resim 3.2'de kirişlerin üzeri örtülmeden önce orta bölgedeki yanal açılmaları önleyecek şekilde işkencelerin yardımıyla sabitlenmeleri görülmektedir.

3.2. Kirişlerin Adet ve Boyutları

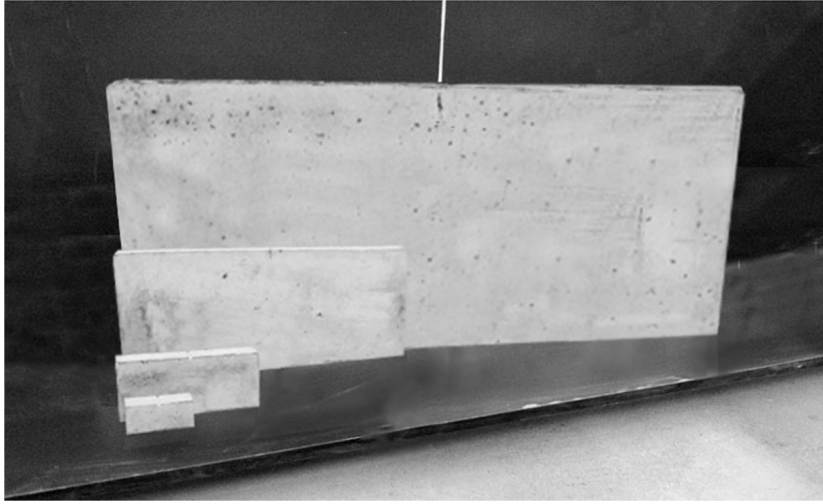
Deney kirişlerinin boyut, adet, çentik boyları ve çelik mesnetlerin boyutları aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kirişlerin boyut ve adetleri

D_i/D_4	Boyutlar (mm)			Çentikli Eleman Adedi	Çentiksiz Eleman Adedi	Toplam Eleman Adedi
	L	D	b			
12,5	1200	500	40	16	4	20
5,4	516	215	40	16	4	20
2,3	223	93	40	16	4	20
1	96	40	40	16	4	20

3.3. Kirişlerin Adlandırılması

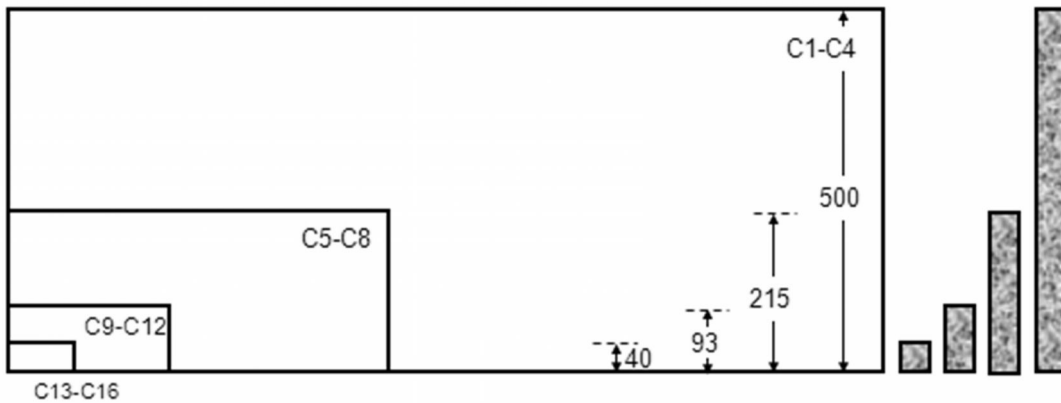
Kirişlerin adlandırılmasında birinci harf C=çentiksiz, N=çentikli, ikincisi S=sığ çentik, M=orta çentik, B=büyük çentik, D ise derin çentik uzunluk oranlı kirişleri göstermektedir. 1'den 16'ya kadar olan sayılar ise dörderli gruplar halinde boyutları göstermektedir. 1-4 kirişlerinin karakteristik yükseklikleri; D=500 mm, 5-8 kirişlerinin D=215 mm, 9-12 kirişlerinin D=93 mm, 13-16 kirişlerinin ise D=40 mm'dir. Aynı harfli kirişlerin çentik oranları (α) sırasıyla 0(C), 0,02(NS), 0,075(NM), 0,15(NB) ve 0,30(ND)'dir.



Resim 3.3. Deney elemanları

3.3.1. C kirişleri

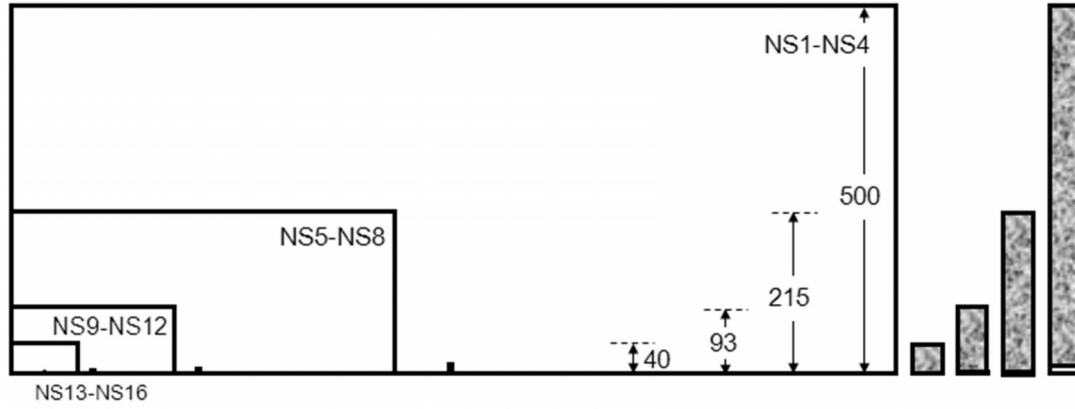
Çentiksiz 1. grup kiriş elemanlarıdır. Elemanların boyut ve kesitleri Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. C elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri

3.3.2. NS kirişleri

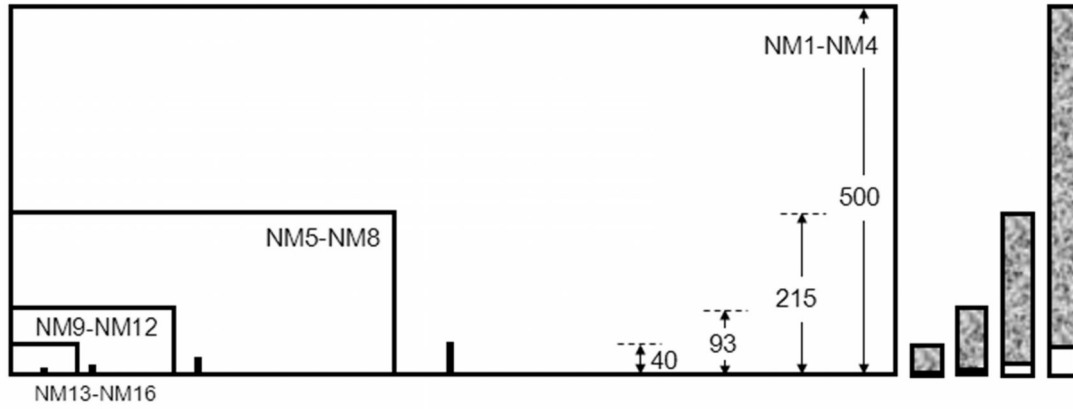
Sığ ęentikli 2. grup kiriş elemanlarıdır. Elemanların boyut ve kesitleri şekil 3.2’de görülmektedir.



şekil 3.2. NS elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri

3.3.3. NM kirişleri

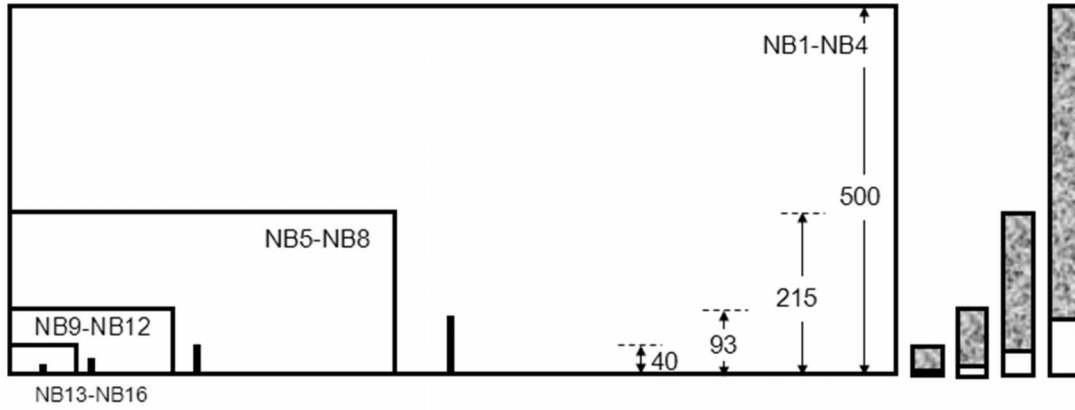
Orta ęentikli 3. grup kiriş elemanlarıdır. Elemanların boyut ve kesitleri şekil 3.3’de görülmektedir.



şekil 3.3. NM elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri

3.3.4. NB kirişleri

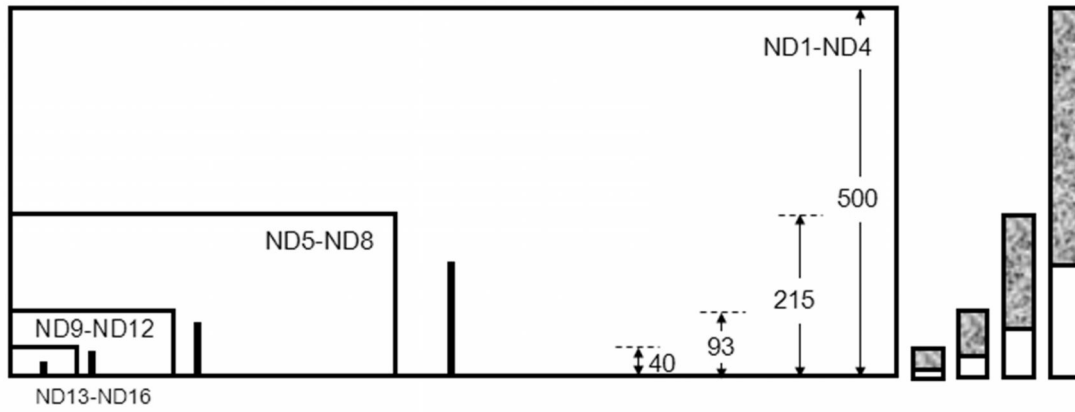
Büyük çentikli 4. grup kiriş elemanlarıdır. Elemanların boyut ve kesitleri Şekil 3.4’de görölmektedir.



Şekil 3.4. NB elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri

3.3.5. ND kirişleri

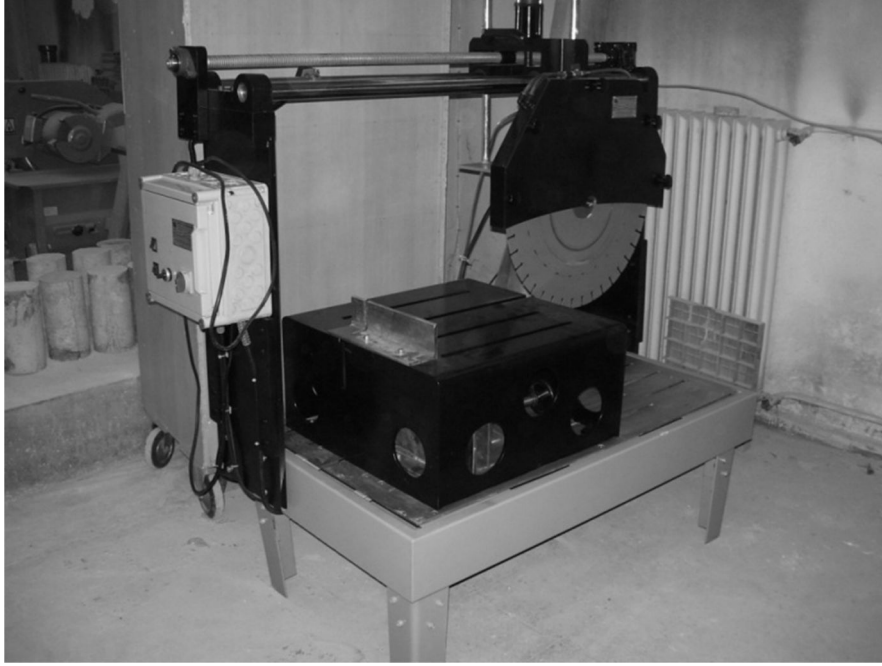
Derin çentikli 5. grup kiriş elemanlarıdır. Elemanların boyut ve kesitleri Şekil 3.5’de görölmektedir.



Şekil 3.5. ND elemanlarının boyut ve kesit görünüşleri

3.4. Çentiklerin Açılması

Kirişlere kesme hızı elektronik kontrollü ve manuel hassas dişlili yükseklik ayarına sahip su püskürtmeli soğutucuya sahip kesici yardımıyla istenen çentikler açılmıştır. Kesicinin kullanım öncesi fotoğrafı Resim 3.4'te görülmektedir.



Resim 3.4. Çentik açma makinası



Resim 3.5. Çentik açma makinasında kesme yüksekliği kontrolü

Resim 3.5'te yatay çevrilen dişli yardımıyla kesme yüksekliği hassas şekilde ayarlanabilmektedir. Yükseklik ayarı yapıldıktan sonra ilgili vidalar sıkılarak sabitlenir.



Resim 3.6. Çentik açma makinasında kesme hızı kontrolü

Elektronik devre kontrollü ileri ve geri hız ayarı yapılarak çok hassas bir şekilde beton deney elemanlarında hasar görmeden çentik açma yapılabilir.



Resim 3.7. Çentik açılan deney elemanı (1)



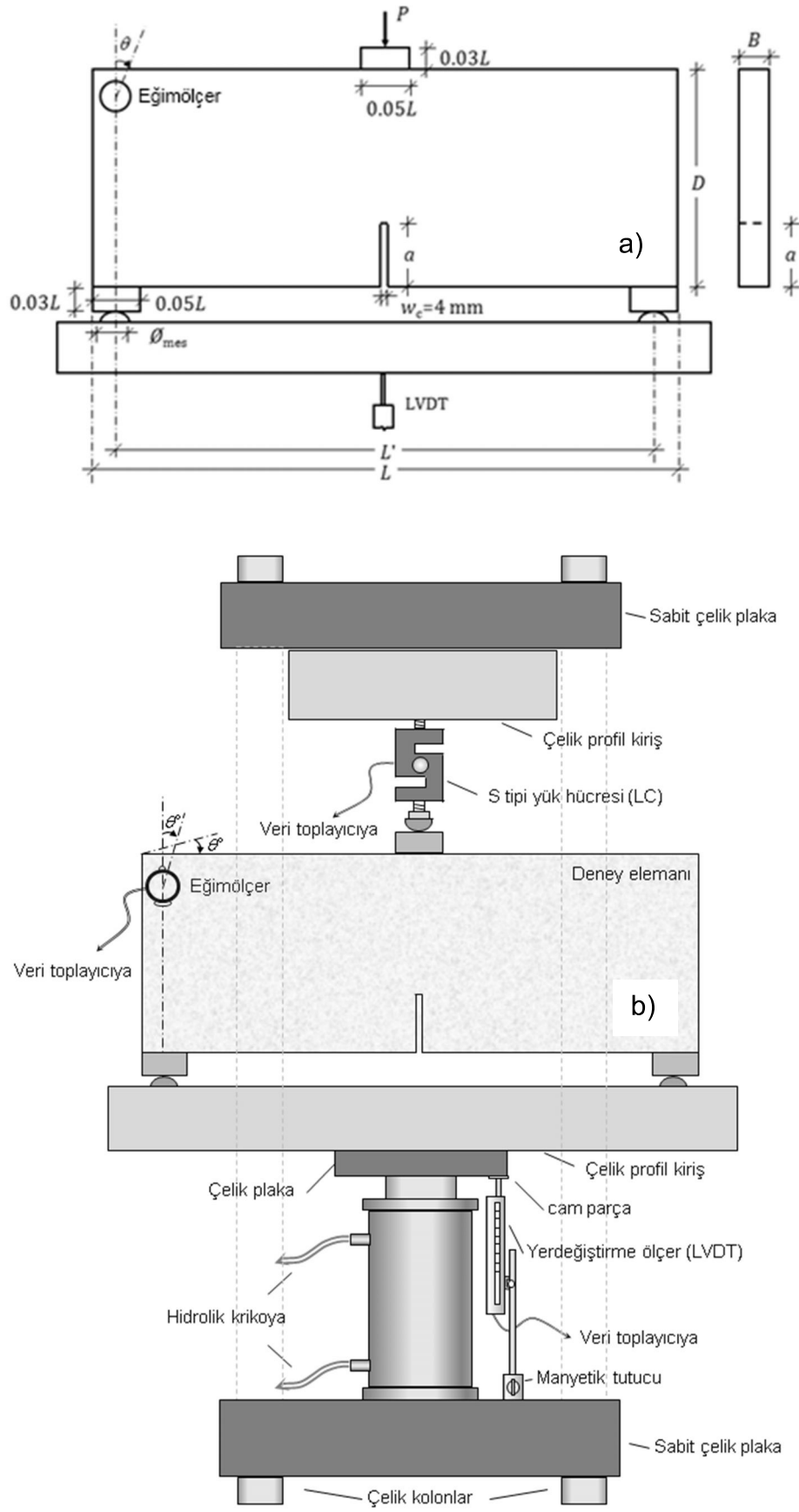
Resim 3.8. Çentik açılan deney elemanı (2)

Resim 3.7 ve 8’de çentik açılan deney elemanları görülmektedir. Elemanların çentik açılması esnasında oynamaması için işkence aparatı ile dikkatlice sıkıştırılmıştır.

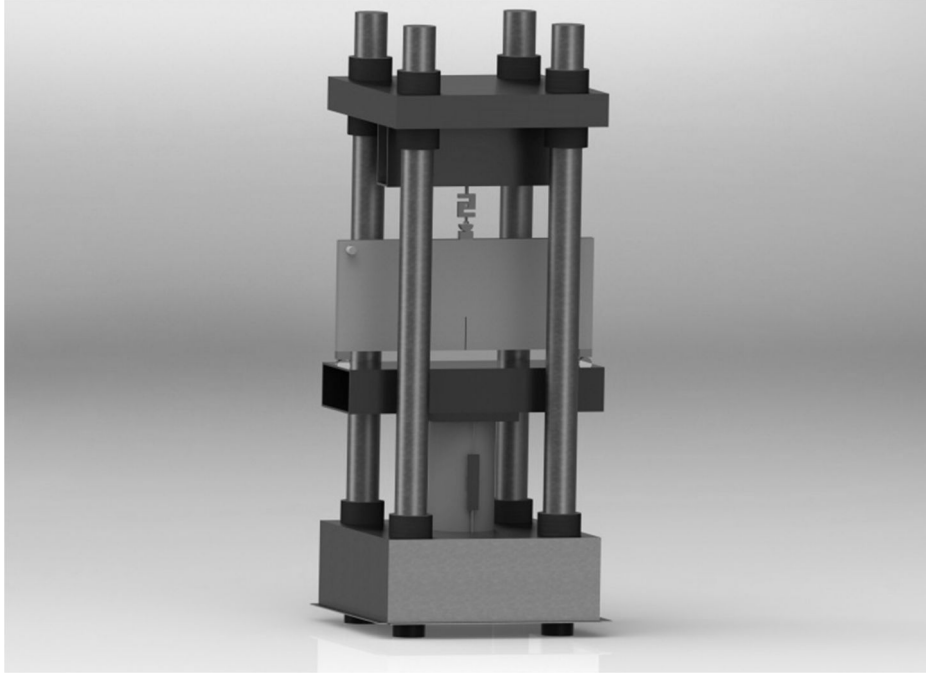
3.5. Deney Düzeneği

Deney elemanları Şekil 3.6’da gösterildiği gibi 3 nokta yüklemesi altında denenmiştir.

Hız kontrollü krika yardımıyla yükleme altında eğimölçer ve LVDT kullanılarak veriler veri kaydediciye (datalogger) oradan da bilgisayara aktarılarak deney sonrasında harddiske kaydedilir.



Şekil 3.6. a) Kirişlerin 3 nokta yükleme b) Yükleme ve ölçüm düzeneği



Resim 3.9. Deney düzeneği

Elemanların deneyleri Şekil 3.6'daki deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Elemanların kapasitesine uygun şekilde 50 kN ve 5 kN'luk S tipi loadcell (yük hücresi) ile yük okumaları TDG firmasına ait 8 kanallı datalogger'a (veri toplayıcı) aktarılmıştır. Düşey yerdeğiştirmeler için 200 mm'lik LVDT (doğrusal değişken diferansiyel dönüştürücü) kullanılmıştır.

Dönme açısı ölçümlerinde Measurement Specialties firmasına ait AccuStar model eğimölçer kullanılmıştır. Resim 3.10'da kullanılan eğimölçer görülmektedir. Bu eğimölçer 0,001 ° hassasiyet ve oransal analog voltaj çıkışına sahiptir. +(kırmızı kablo) ve -(siyah kablo) besleme kutuplarından verilen gerilimin büyüklüğü ile orantılı olarak (ratiometric) sensör çıkışından (sarı kablo) sensör açısına uygun olarak analog sinyal göndermektedir. Veri toplayıcının girişleri bu sensörün gönderdiği sinyalleri direkt olarak okuyamadığından dolayı araya gerilim bölücü ve sinyal koşullandırıcı devre yapılmıştır.



Resim 3.10. Deneylerde kullanılan eğimölçer sensörü

3.6. Deney Sonuçları

Deney sonucunda kirişlerin tüm göçme yükleri gruplar şeklinde Çizelge 3.4’de verilmektedir. Bu çizelgede deney kirişlerinin boyutları, çentik oranları ve göçme yükleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.4’de deney kirişlerinin boyutları, çentik oranları ve göçme yükleri görülmektedir.

Çizelge 3.4. Çentikli ve çentiksiz kirişlerin göçme yükleri

Kiriş	B [mm]	D [mm]	L [mm]	$\alpha=a/D$	a [mm]	P_0 [kN]
C1	40	500	1200	---	0	20,07
C2	40	500	1200	---	0	19,25
C3	40	500	1200	---	0	24,97
C4	40	500	1200	---	0	27,60
C5	40	215	516	---	0	15,88
C6	40	215	516	---	0	12,99
C7	40	215	516	---	0	16,69
C8	40	215	516	---	0	18,52
C9	40	93	223	---	0	10,73
C10	40	93	223	---	0	8,62

Çizelge 3.4. (devam) Çentikli ve çentiksiz kirişlerin göçme yükleri

C11	40	93	223	---	0	6,95
C12	40	93	223	---	0	6,42
C13	40	40	96	---	0	4,37
C14	40	40	96	---	0	4,38
C15	40	40	96	---	0	3,33
C16	40	40	96	---	0	4,07
NS1	40	500	1200	0,02	10	18,97
NS2	40	500	1200	0,02	10	21,82
NS3	40	500	1200	0,02	10	20,49
NS4	40	500	1200	0,02	10	20,11
NS5	40	215	516	0,02	4	9,06
NS6	40	215	516	0,02	4	6,64
NS7	40	215	516	0,02	4	7,73
NS8	40	215	516	0,02	4	8,53
NS9	40	93	223	0,02	2	5,51
NS10	40	93	223	0,02	2	5,85
NS11	40	93	223	0,02	2	5,17
NS12	40	93	223	0,02	2	5,48
NS13	40	40	96	0,02	1	3,47
NS14	40	40	96	0,02	1	4,46
NS15	40	40	96	0,02	1	3,99
NS16	40	40	96	0,02	1	3,90
NM1	40	500	1200	0,075	38	16,76
NM2	40	500	1200	0,075	38	15,26
NM3	40	500	1200	0,075	38	13,79
NM4	40	500	1200	0,075	38	16,16
NM5	40	215	516	0,075	16	10,02
NM6	40	215	516	0,075	16	7,69
NM7	40	215	516	0,075	16	7,55
NM8	40	215	516	0,075	16	8,48
NM9	40	93	223	0,075	7	5,32
NM10	40	93	223	0,075	7	4,74
NM11	40	93	223	0,075	7	4,20
NM12	40	93	223	0,075	7	4,96
NM13	40	40	96	0,075	3	3,22
NM14	40	40	96	0,075	3	3,29
NM15	40	40	96	0,075	3	3,35
NM16	40	40	96	0,075	3	3,44

Çizelge 3.4. (devam) Çentikli ve çentiksiz kirişlerin göçme yükleri

NB1	40	500	1200	0,15	75	13,22
NB2	40	500	1200	0,15	75	12,81
NB3	40	500	1200	0,15	75	13,45
NB4	40	500	1200	0,15	75	13,77
NB5	40	215	516	0,15	32	7,73
NB6	40	215	516	0,15	32	6,28
NB7	40	215	516	0,15	32	7,06
NB8	40	215	516	0,15	32	9,62
NB9	40	93	223	0,15	14	3,84
NB10	40	93	223	0,15	14	4,46
NB11	40	93	223	0,15	14	4,70
NB12	40	93	223	0,15	14	5,06
NB13	40	40	96	0,15	6	2,98
NB14	40	40	96	0,15	6	2,68
NB15	40	40	96	0,15	6	3,06
NB16	40	40	96	0,15	6	2,42
ND1	40	500	1200	0,3	150	11,34
ND2	40	500	1200	0,3	150	11,38
ND3	40	500	1200	0,3	150	10,82
ND4	40	500	1200	0,3	150	11,54
ND5	40	215	516	0,3	65	6,69
ND6	40	215	516	0,3	65	7,04
ND7	40	215	516	0,3	65	6,60
ND8	40	215	516	0,3	65	8,04
ND9	40	93	223	0,3	28	3,30
ND10	40	93	223	0,3	28	4,86
ND11	40	93	223	0,3	28	2,90
ND12	40	93	223	0,3	28	2,76
ND13	40	40	96	0,3	12	1,78
ND14	40	40	96	0,3	12	1,66
ND15	40	40	96	0,3	12	1,40
ND16	40	40	96	0,3	12	1,61

Yukarıdaki çizelgede B kiriş genişliği; D kiriş yüksekliği; L kiriş uzunluğu; α çentik oranı, a çentik uzunluğu; P_0 kirişte ölçülen en büyük kırılma yükünü göstermektedir.

Kırılan çentikli kirişlerin en büyük yüke karşı gelen (Çizelge 3.3) nominal göçme gerilmesi Eşitlik 3.1'de verilmiştir.

$$\sigma_N = c_N P_0 [B(D - a)] \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda σ_N göçme yüküne karşı gelen nominal gerilmedir. D karakteristik boyut olup kirişin yüksekliği seçilmiştir. c_N uygunluk olup üç nokta yüklemede; L kirişin boyu, B kirişin genişliğidir. $c_N = 1.5L' / D$ dir. L' kirişin net açıklığı olup deneylerde $L' = 0.95L$ kullanılmıştır. Bütün kirişlerin kalınlıkları 40 mm aynı seçilerek kalınlıktan oluşacak sınır tabaka (çeper) etkisi, difüzyon (geçirgenlik), hidratasyon ısısından oluşacak boyut etkisi en aza indirilmeye çalışılmıştır. Eşitlik 3.1 iki boyutlu boyut etkisi bağıntısıdır.

Boyut etkisi analizleri için çentikli kirişlerde geçerli olan Tip II boyut etkisi eşitliği kullanılacaktır. Tip II boyut etkisi Eşitlik 3.2'de verilmiştir.

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{D_0}\right)}} \quad (3.2)$$

Burada, B kiriş genişliği, f_t betonun çekme dayanımı, D karakteristik boyut olarak seçilen kiriş yüksekliği, D_0 yapının geometrisine bağlı sabittir. Kiriş deneylerinde kullanılan çelik mesnetlerin boyutları Şekil 3.6a'da parametrik olarak gösterilmiştir.

Farklı geometri ve çentik boylarına sahip kirişlerin gerilme σ_N değerleri Eşitlik 3.3 ile bulunur. Burada M kirişin orta bölgesinde oluşan en büyük eğilme momenti değeridir. Bu moment değeri Eşitlik 3.4 ile bulunabilir. I kirişin atalet momenti (Eşitlik 3.5) ve y kirişin net yüksekliğinin yarısıdır. Hesaplarda Eşitlik 3.6 kullanılmıştır.

$$\sigma_N = \frac{M}{I} y \quad (3.3)$$

$$M = \frac{PL'}{4} \quad (3.4)$$

$$I = \frac{B(D-a)^3}{12} \quad (3.5)$$

$$y = \frac{(D-a)}{2} \quad (3.6)$$

Burada, P kirişin en büyük kırılma yükü, L' kirişin net açıklığı, B kiriş genişliği, D kiriş yüksekliği ve a ise çentik uzunluğudur.

3.6.1. Çentiksiz (C) kirişlerde kırılma gerilmeleri

Çentiksiz kirişlerde çentik oranı $\alpha=0$ 'dır.

Çizelge 3.5. Çentiksiz kirişlerin kırılma gerilmeleri

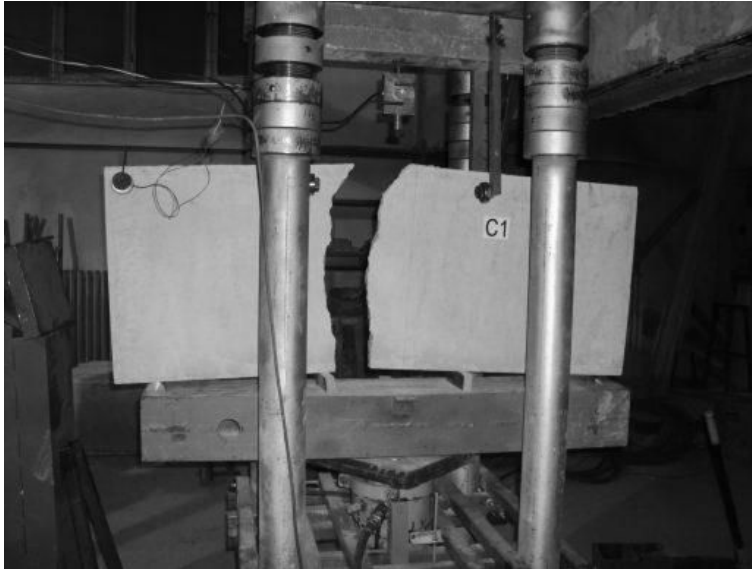
Kiriş	B [mm]	D [mm]	L [mm]	$\alpha=a/D$	a [mm]	σ_N [MPa]
C1	40	500	1200	---	0	3,43
C2	40	500	1200	---	0	3,29
C3	40	500	1200	---	0	4,27
C4	40	500	1200	---	0	4,72
C5	40	215	516	---	0	6,32
C6	40	215	516	---	0	5,17
C7	40	215	516	---	0	6,64
C8	40	215	516	---	0	7,36
C9	40	93	223	---	0	9,86
C10	40	93	223	---	0	7,92
C11	40	93	223	---	0	6,38
C12	40	93	223	---	0	5,90
C13	40	40	96	---	0	9,34
C14	40	40	96	---	0	9,36
C15	40	40	96	---	0	7,12
C16	40	40	96	---	0	8,70

Resim 3.11’de çentiksiz elemanlardan en büyük boyutlu olan C1 kirişi deney öncesi düzenekte görülmektedir. Kırılma sonrası görüntüsü ise Resim 3.12’de verilmiştir.



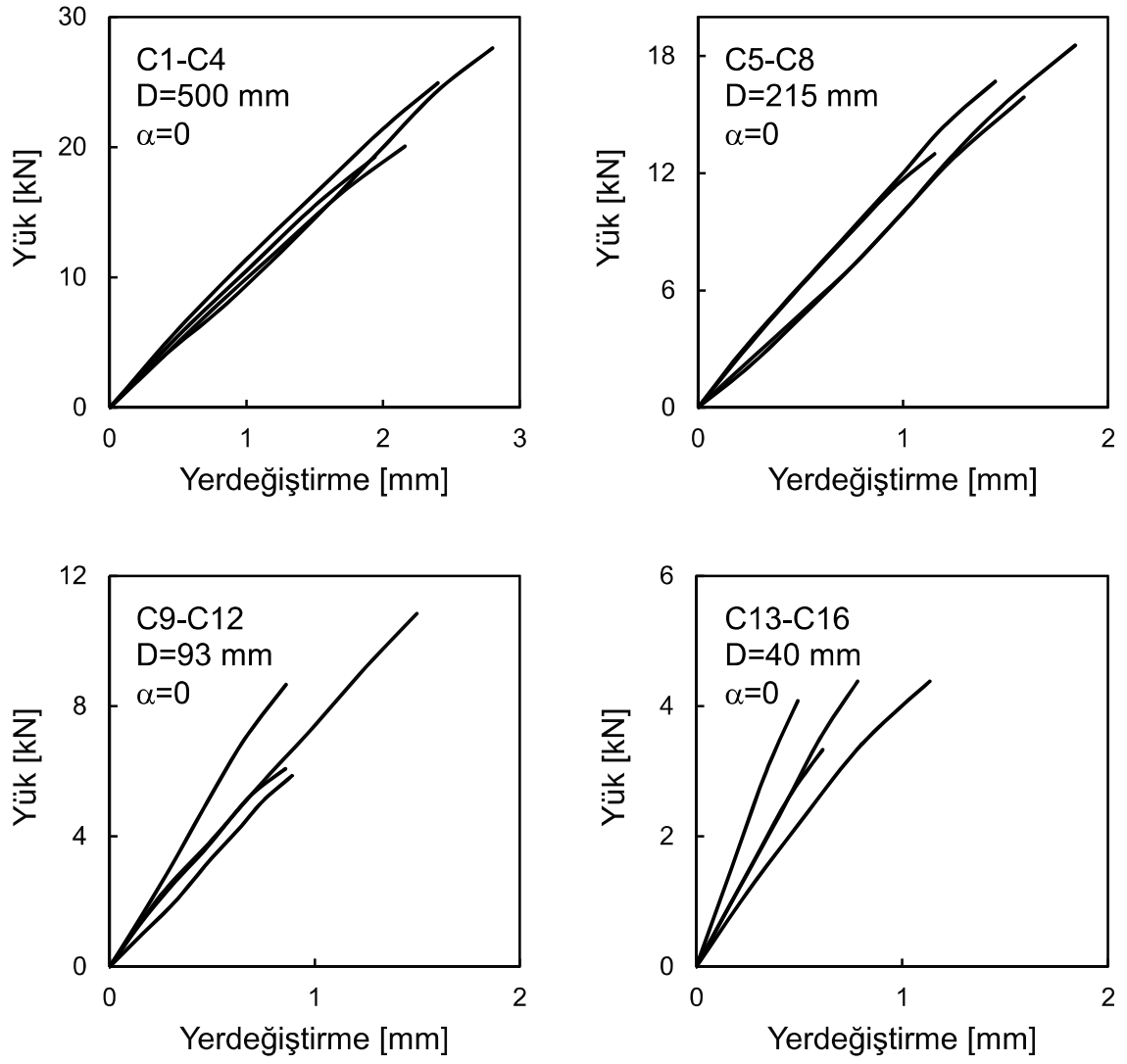
Resim 3.11. C1 elemanı yükleme düzeneği

C1 kirişinin kırılma sonrası görüntüsü ise Resim 3.12’de verilmiştir.



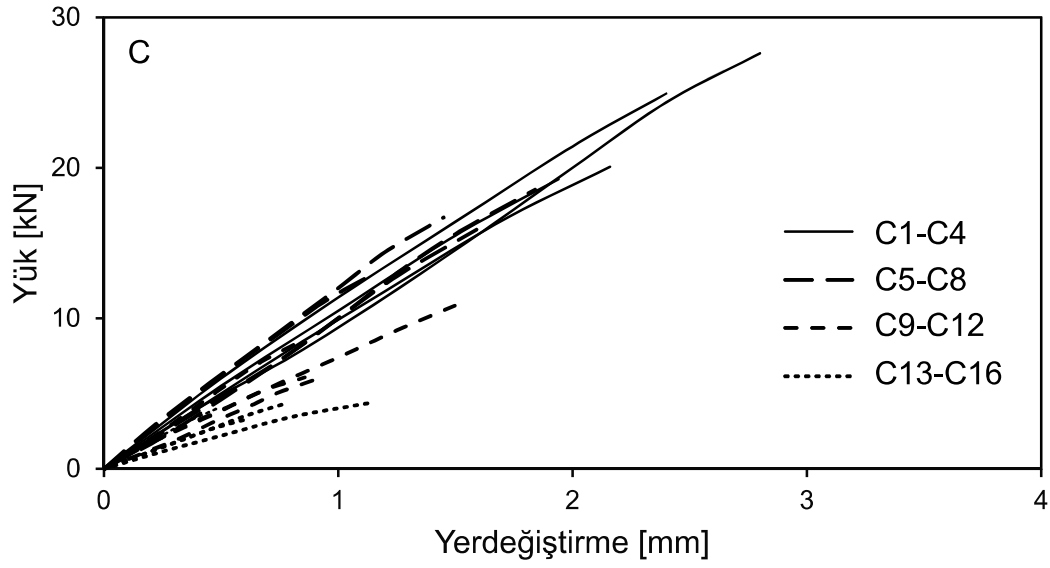
Resim 3.12. C1 elemanı kırılma sonrası görüntüsü

C kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.7’de, tümünün birlikte gösterildiği yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.8’de verilmiştir.



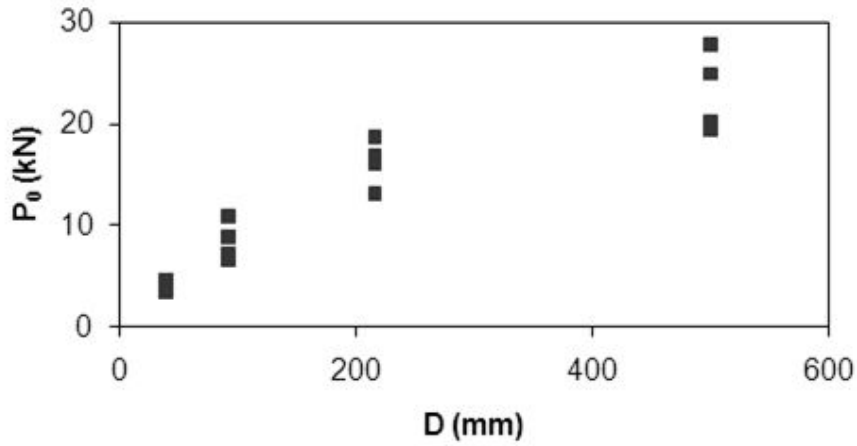
Şekil 3.7. C kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri

Çentiksiz (C) elemanlarda kiriş yüksekliği D'ye bağlı olarak göçme yükleri ve yerdeğiştirme kapasitelerinde azalma görülmektedir.



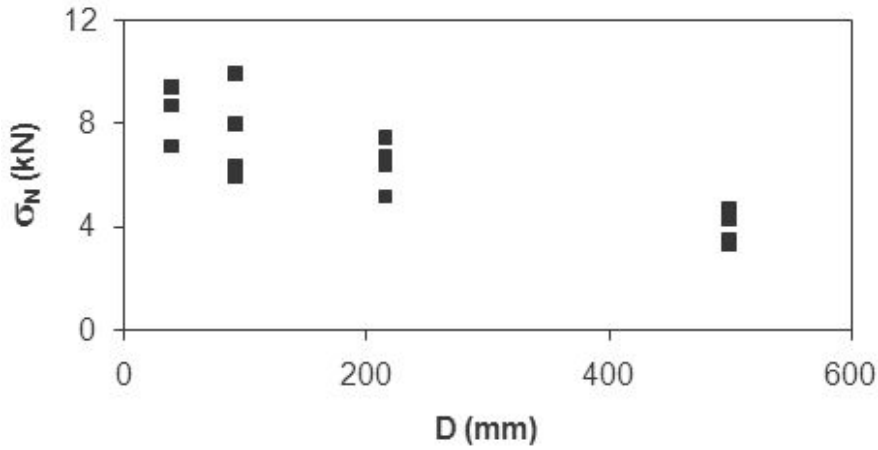
Şekil 3.8. C kirişlerinin tüm yük-yerdeğiştirme eğrileri

C kirişlerinin karakteristik boyutlara ayrılmış boyut-maksimum yük kapasitesi eğrileri Şekil 3.9'da, maksimum yük kapasitesine eriştiği anda hesaplanan nominal gerilme-karakteristik boyut grafiği (boyut etkisi) ise Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9. C kirişlerinde karakteristik boyuta bağlı maksimum yük kapasitesi

Kiriş yüksekliği ve buna bağlı olarak da rijitlik arttığından dolayı göçme yüklerinde artış gözlemlenmektedir.



Şekil 3.10. C kirişlerinde boyut etkisi

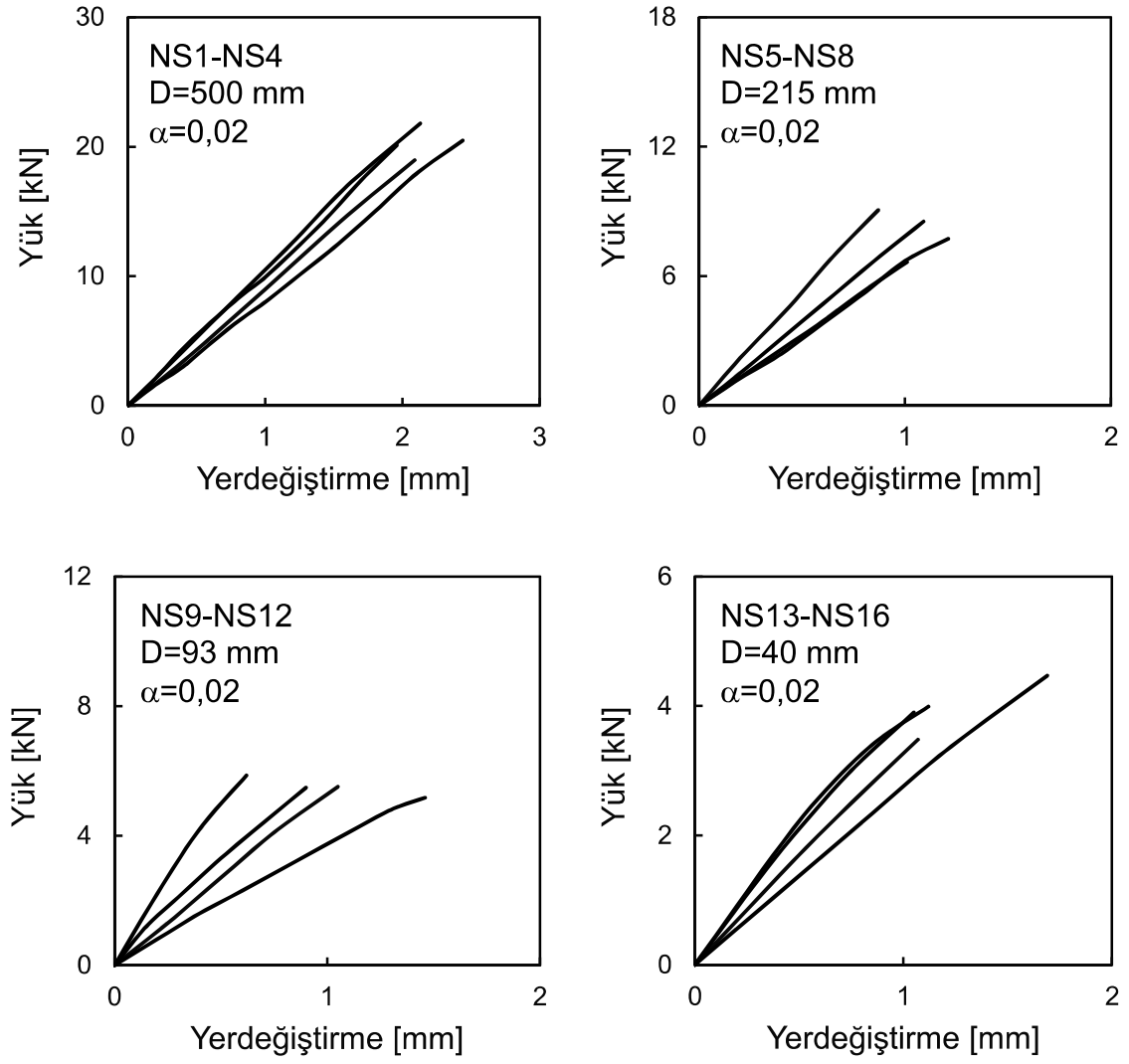
Karakteristik boyut D yüksekliğine bağlı olarak kirişlerdeki nominal gerilmenin azalması yani boyut etkisi görülmektedir.

3.6.2. Sığ çentikli (NS) kirişlerde kırılma gerilmeleri

Sığ çentikli kirişlerde çentik oranı $\alpha=0,02$ 'dir.

Çizelge 3.6. Sığ çentikli (NS) kirişlerin kırılma gerilmeleri

Kiriş	B [mm]	D [mm]	L [mm]	$\alpha=a/D$	a [mm]	σ_N [MPa]
NS1	40	500	1200	0,02	10	3,38
NS2	40	500	1200	0,02	10	3,89
NS3	40	500	1200	0,02	10	3,65
NS4	40	500	1200	0,02	10	3,58
NS5	40	215	516	0,02	4	3,75
NS6	40	215	516	0,02	4	2,75
NS7	40	215	516	0,02	4	3,20
NS8	40	215	516	0,02	4	3,53
NS9	40	93	223	0,02	2	5,27
NS10	40	93	223	0,02	2	5,59
NS11	40	93	223	0,02	2	4,94
NS12	40	93	223	0,02	2	5,24
NS13	40	40	96	0,02	1	7,72
NS14	40	40	96	0,02	1	9,93
NS15	40	40	96	0,02	1	8,88
NS16	40	40	96	0,02	1	8,68



Şekil 3.11. NS kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri

Sığ çentikli (NS) elemanlarda kiriş yüksekliği D'ye bağlı olarak göçme yükleri ve yerdeğiştirme kapasitelerinde azalma görülmektedir.

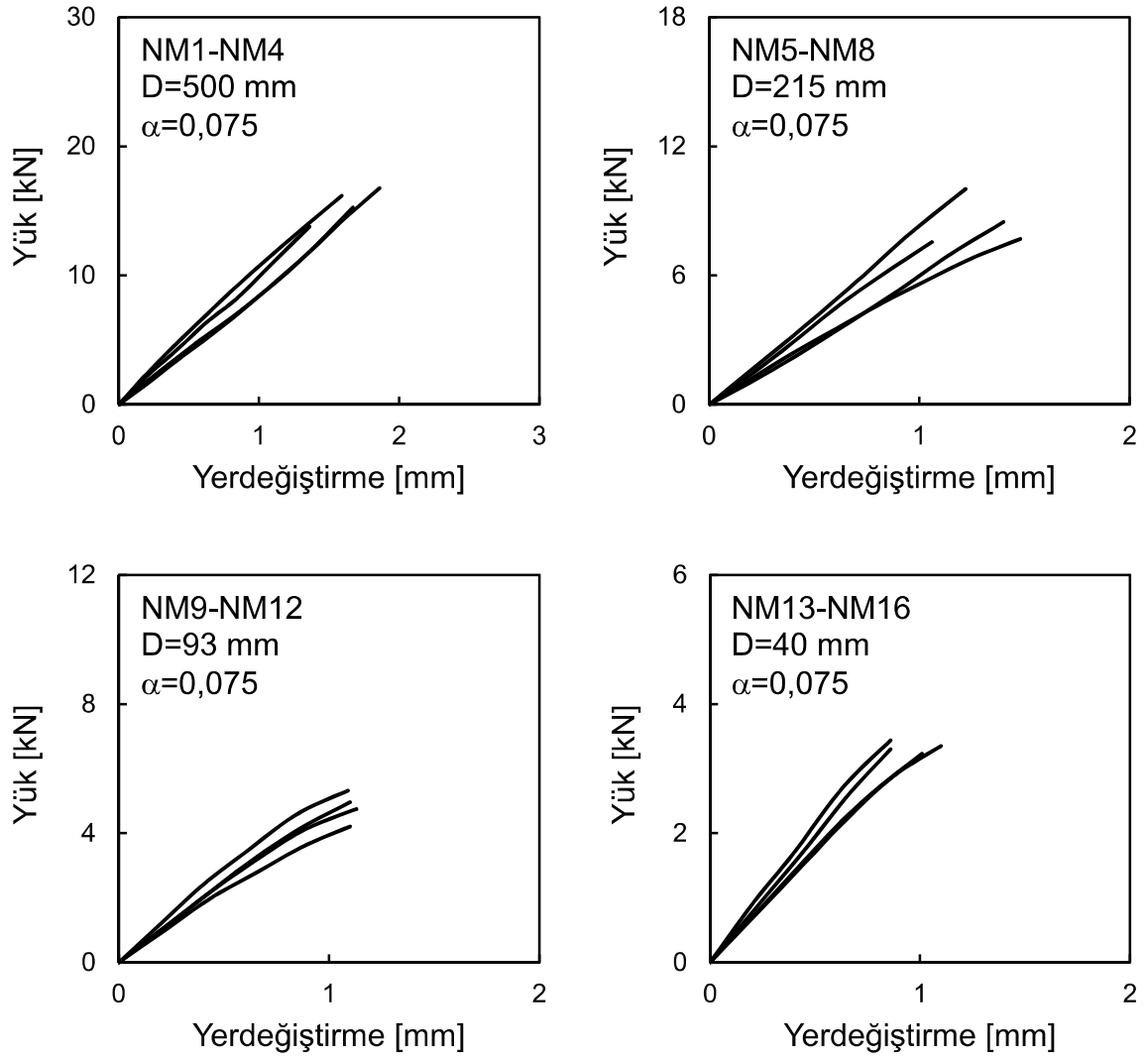
3.6.3. Orta çentikli (NM) kirişlerde kırılma gerilmeleri

Orta çentikli kirişlerde çentik oranı $\alpha=0,075$ 'dir.

Çizelge 3.7. Orta çentikli (NM) kirişlerin kırılma gerilmeleri

Kiriş	B [mm]	D [mm]	L [mm]	$\alpha=a/D$	a [mm]	σ_N [MPa]
NM1	40	500	1200	0,075	38	3,35
NM2	40	500	1200	0,075	38	3,05
NM3	40	500	1200	0,075	38	2,76
NM4	40	500	1200	0,075	38	3,23
NM5	40	215	516	0,075	16	4,66
NM6	40	215	516	0,075	16	3,57
NM7	40	215	516	0,075	16	3,51
NM8	40	215	516	0,075	16	3,94
NM9	40	93	223	0,075	7	5,71
NM10	40	93	223	0,075	7	5,09
NM11	40	93	223	0,075	7	4,51
NM12	40	93	223	0,075	7	5,32
NM13	40	40	96	0,075	3	8,04
NM14	40	40	96	0,075	3	8,22
NM15	40	40	96	0,075	3	8,37
NM16	40	40	96	0,075	3	8,59

Çizelge 3.7'de çentik oranı $\alpha=0,075$ olan orta çentikli kirişlerin karakteristik boyut D yüksekliğine göre hesaplanan çentik ucundaki nominal gerilme σ_N değerleri verilmiştir.



Şekil 3.12. NM kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri

Orta çentikli (NM) elemanlarda kiriş yüksekliği D'ye bağlı olarak göçme yükleri ve yerdeğiştirme kapasitelerinde azalma görülmektedir.

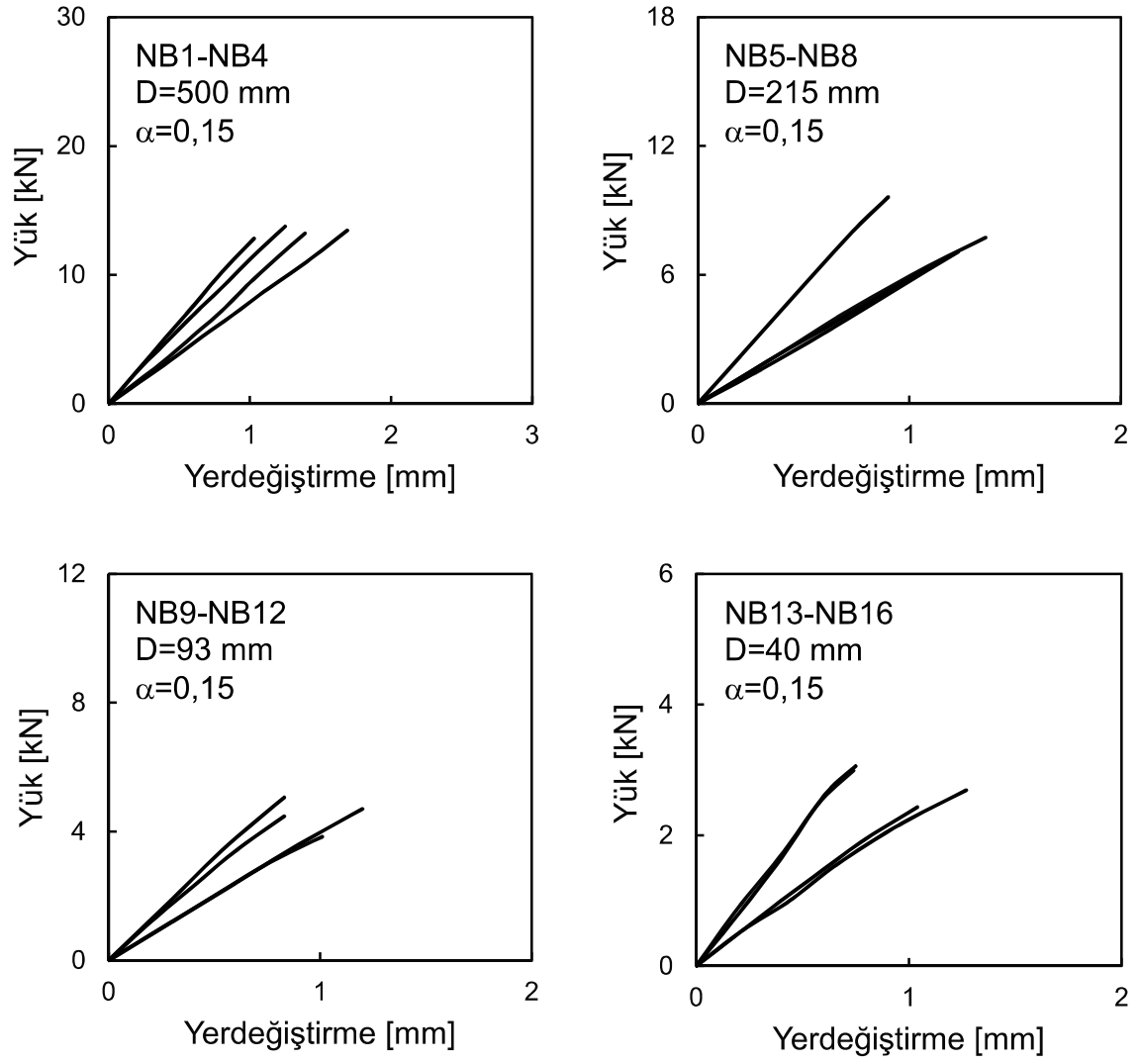
3.6.4. Büyük çentikli (NB) kirişlerde kırılma gerilmeleri

Büyük çentikli kirişlerde çentik oranı $\alpha=0,15$ 'dir.

Çizelge 3.8. Büyük çentikli (NB) kirişlerin kırılma gerilmeleri

Kiriş	B [mm]	D [mm]	L [mm]	$\alpha=a/D$	a [mm]	σ_N [MPa]
NB1	40	500	1200	0,15	75	3,13
NB2	40	500	1200	0,15	75	3,03
NB3	40	500	1200	0,15	75	3,18
NB4	40	500	1200	0,15	75	3,26
NB5	40	215	516	0,15	32	4,25
NB6	40	215	516	0,15	32	3,46
NB7	40	215	516	0,15	32	3,89
NB8	40	215	516	0,15	32	5,29
NB9	40	93	223	0,15	14	4,88
NB10	40	93	223	0,15	14	5,67
NB11	40	93	223	0,15	14	5,98
NB12	40	93	223	0,15	14	6,43
NB13	40	40	96	0,15	6	8,82
NB14	40	40	96	0,15	6	7,93
NB15	40	40	96	0,15	6	9,05
NB16	40	40	96	0,15	6	7,16

Çizelge 3.8'de çentik oranı $\alpha=0,15$ olan büyük çentikli kirişlerin karakteristik boyut D yüksekliğine göre hesaplanan çentik ucundaki nominal gerilme σ_N değerleri verilmiştir.



Şekil 3.13. NB kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri

Büyük çentikli (NB) elemanlarda kiriş yüksekliği D'ye bağlı olarak göçme yükleri ve yerdeğiştirme kapasitelerinde azalma görülmektedir.

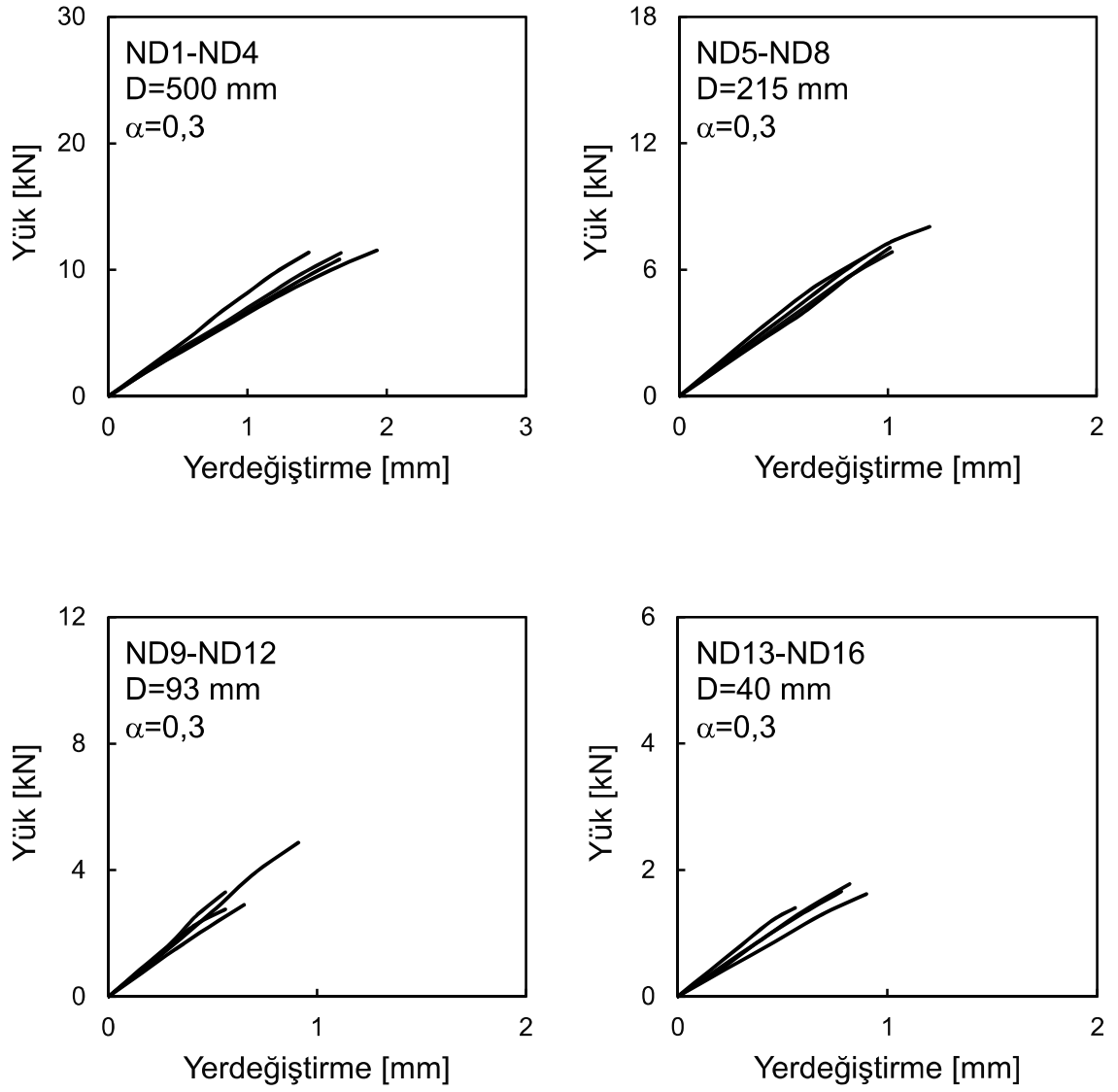
3.6.5. Derin çentikli (ND) kirişlerde kırılma gerilmeleri

Derin çentikli kirişlerde çentik oranı $\alpha=0,3$ 'dür.

Çizelge 3.9. Derin çentikli (ND) kirişlerin kırılma gerilmeleri

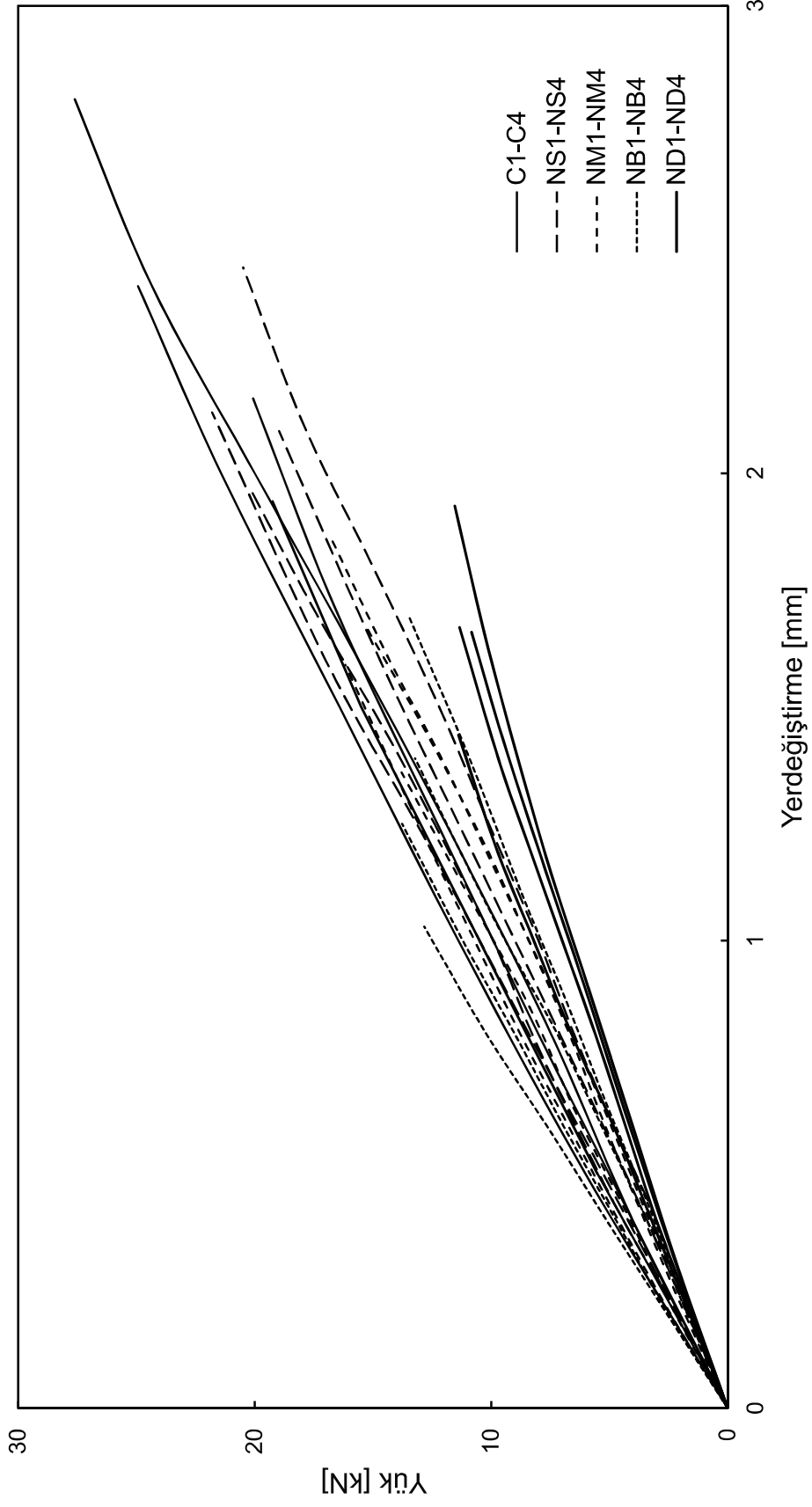
Kiriş	B [mm]	D [mm]	L [mm]	$\alpha=a/D$	a [mm]	σ_N [MPa]
ND1	40	500	1200	0,3	150	3,96
ND2	40	500	1200	0,3	150	3,97
ND3	40	500	1200	0,3	150	3,78
ND4	40	500	1200	0,3	150	4,03
ND5	40	215	516	0,3	65	5,43
ND6	40	215	516	0,3	65	5,71
ND7	40	215	516	0,3	65	5,36
ND8	40	215	516	0,3	65	6,53
ND9	40	93	223	0,3	28	6,19
ND10	40	93	223	0,3	28	9,11
ND11	40	93	223	0,3	28	5,44
ND12	40	93	223	0,3	28	5,17
ND13	40	40	96	0,3	12	7,76
ND14	40	40	96	0,3	12	7,24
ND15	40	40	96	0,3	12	6,11
ND16	40	40	96	0,3	12	7,02

Çizelge 3.9'da çentik oranı $\alpha=0,3$ olan derin çentikli kirişlerin karakteristik boyut D yüksekliğine göre hesaplanan çentik ucundaki nominal gerilme σ_N değerleri verilmiştir.

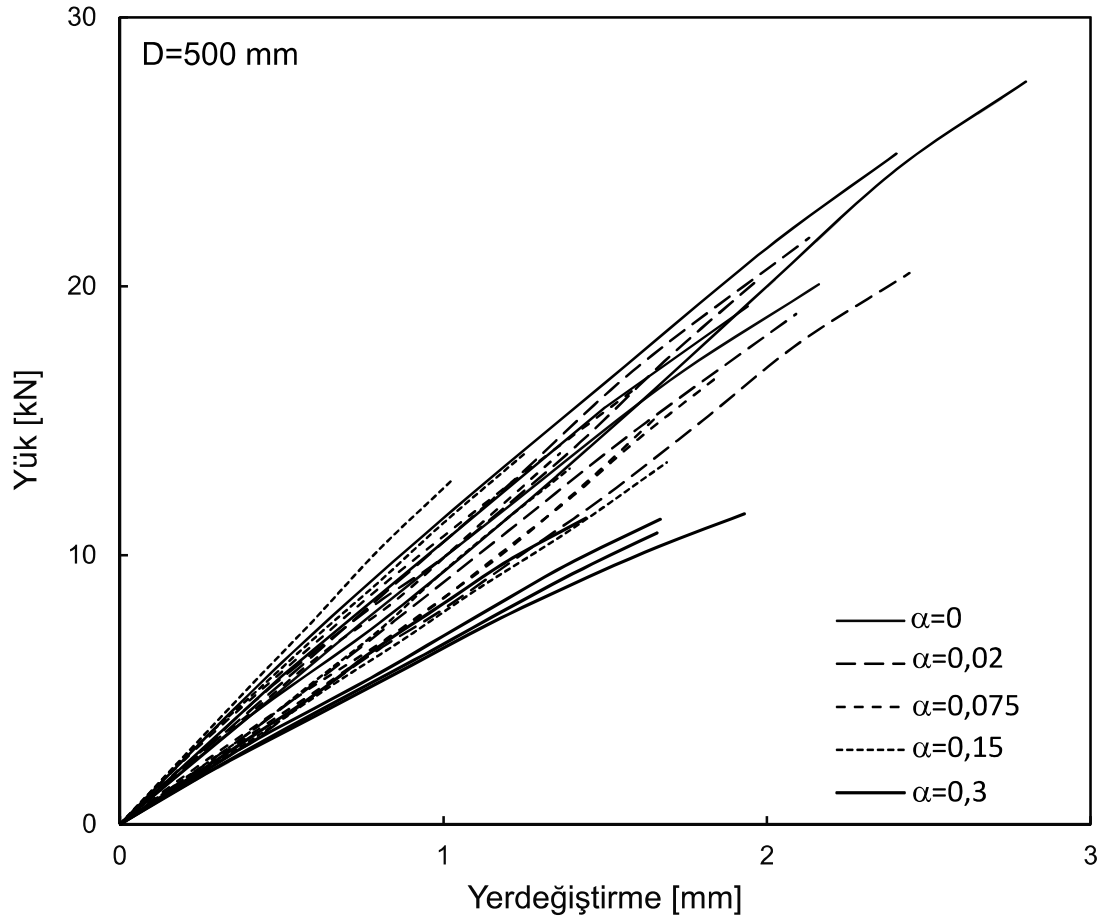


Şekil 3.14. ND kirişlerinin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri

Derin çentikli (ND) elemanlarda kiriş yüksekliği D'ye bağlı olarak göçme yükleri ve yerdeğiştirme kapasitelerinde azalma görülmektedir.

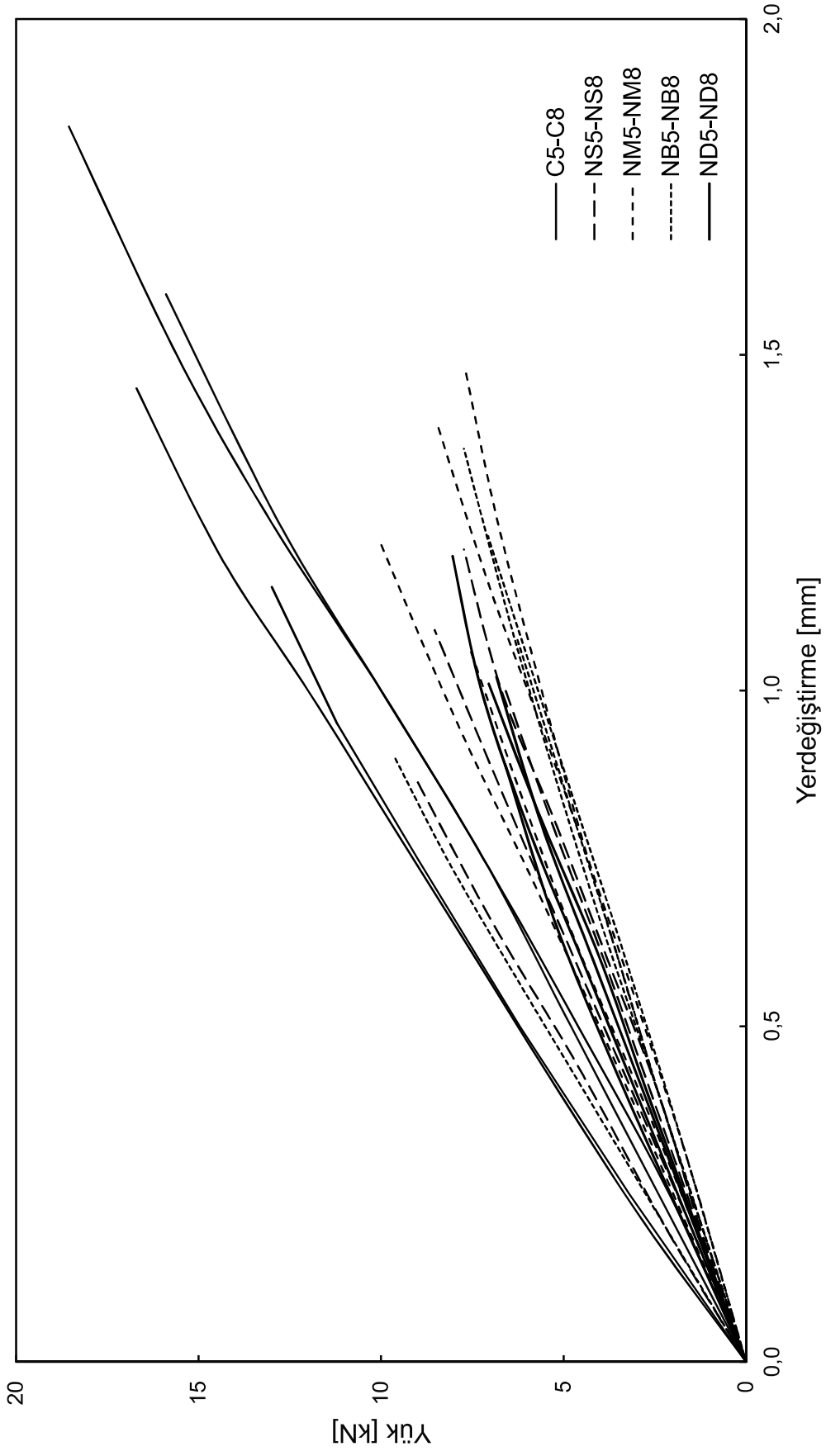


Şekil 3.15. D=500 mm olan kirişlerin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri

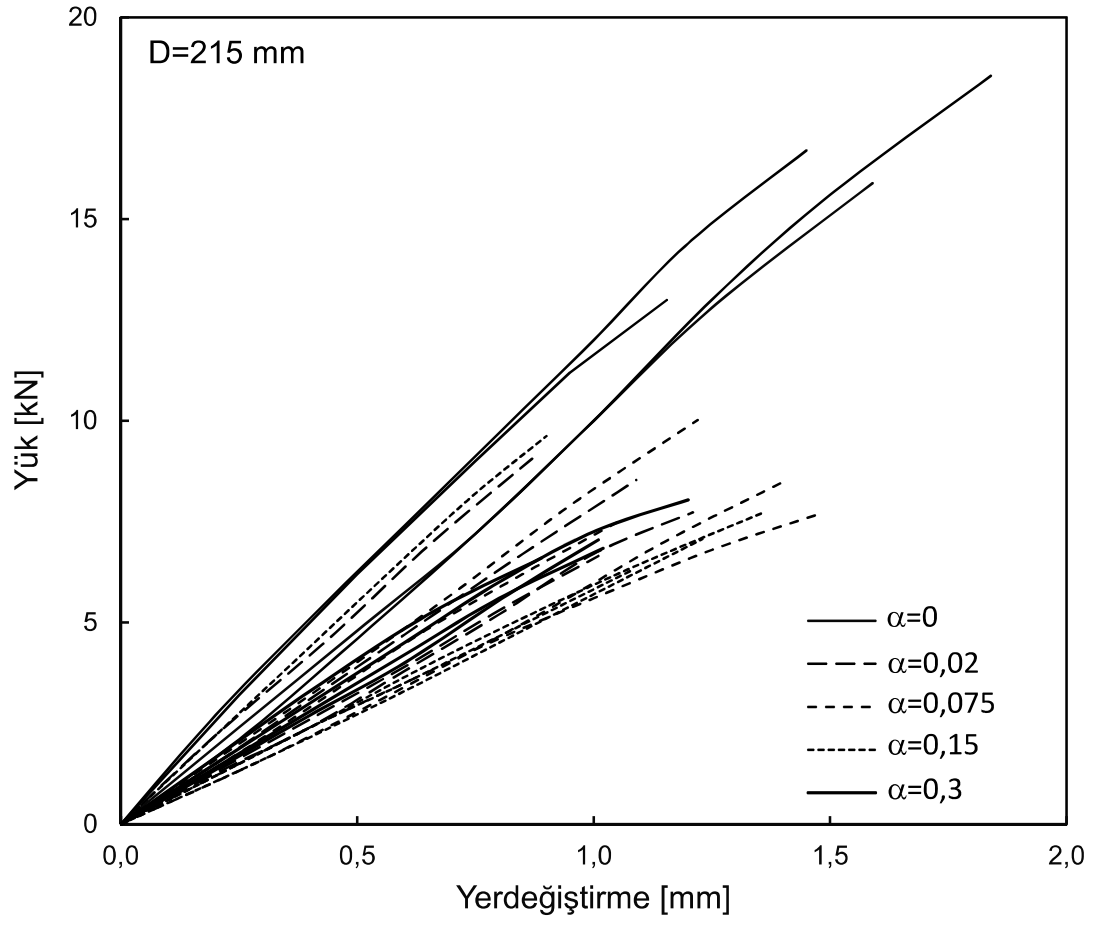


Şekil 3.16. D=500 mm olan kirişlerin çentik oranlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.16'da karakteristik boyut D=500 mm olan kirişlerde çentik oranının etkisi görülmektedir. Çentik oranı arttıkça göçme yükü ve yerdeğiştirme kapasitesinde azalma olmaktadır.

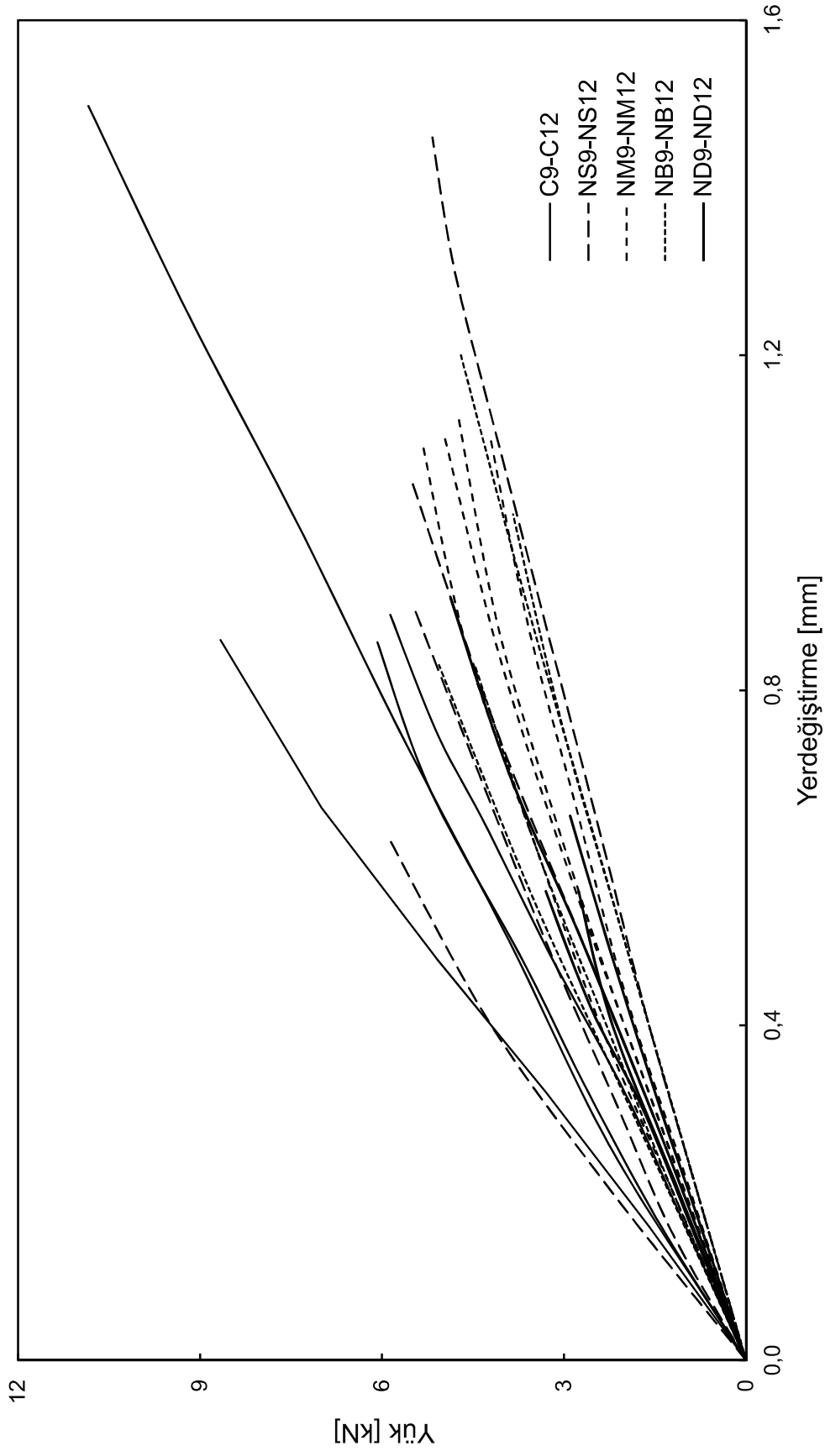


Şekil 3.17. D=215 mm olan kirişlerin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri

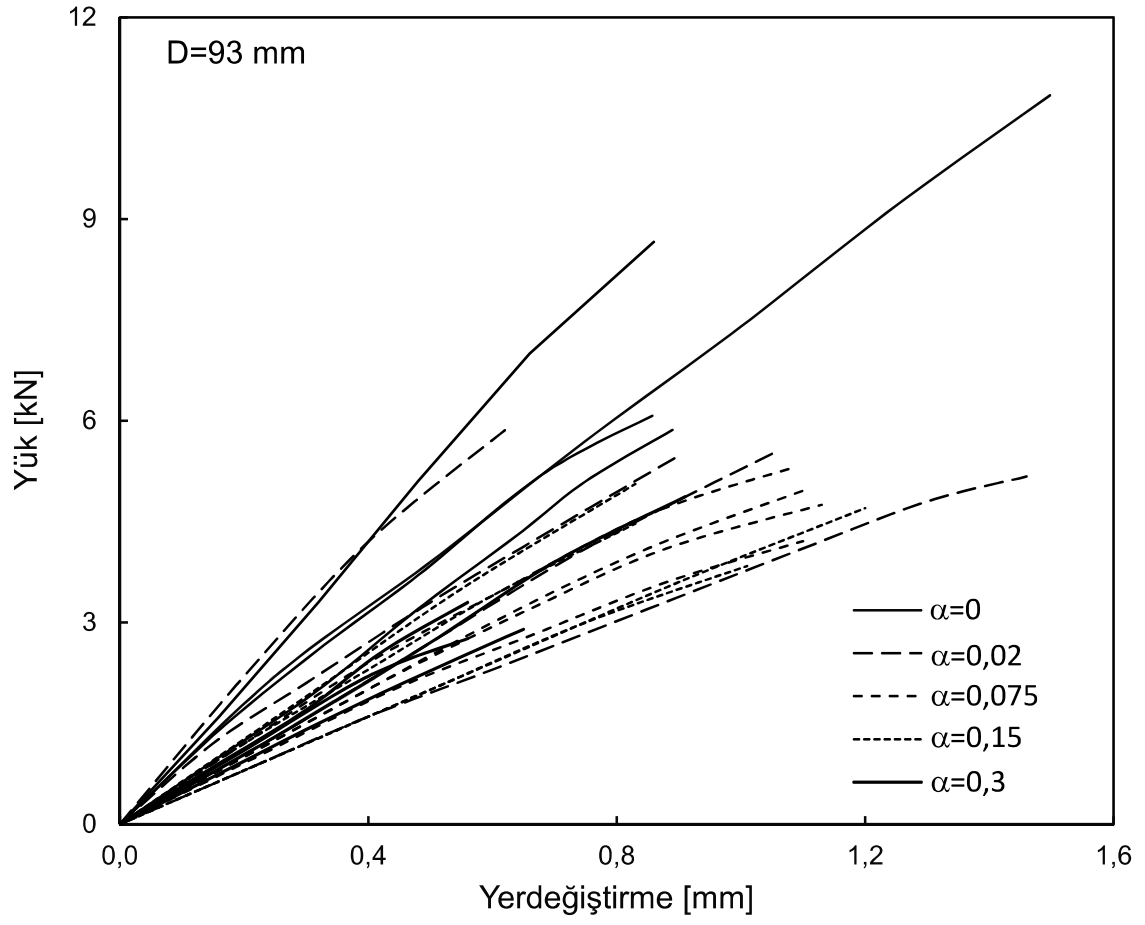


Şekil 3.18. D=215 mm olan kirişlerin çentik oranlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.18’de karakteristik boyut D=215 mm olan kirişlerde çentik oranının etkisi görülmektedir. Çentik oranı arttıkça göçme yükü ve yerdeğiştirme kapasitesinde azalma olmaktadır.

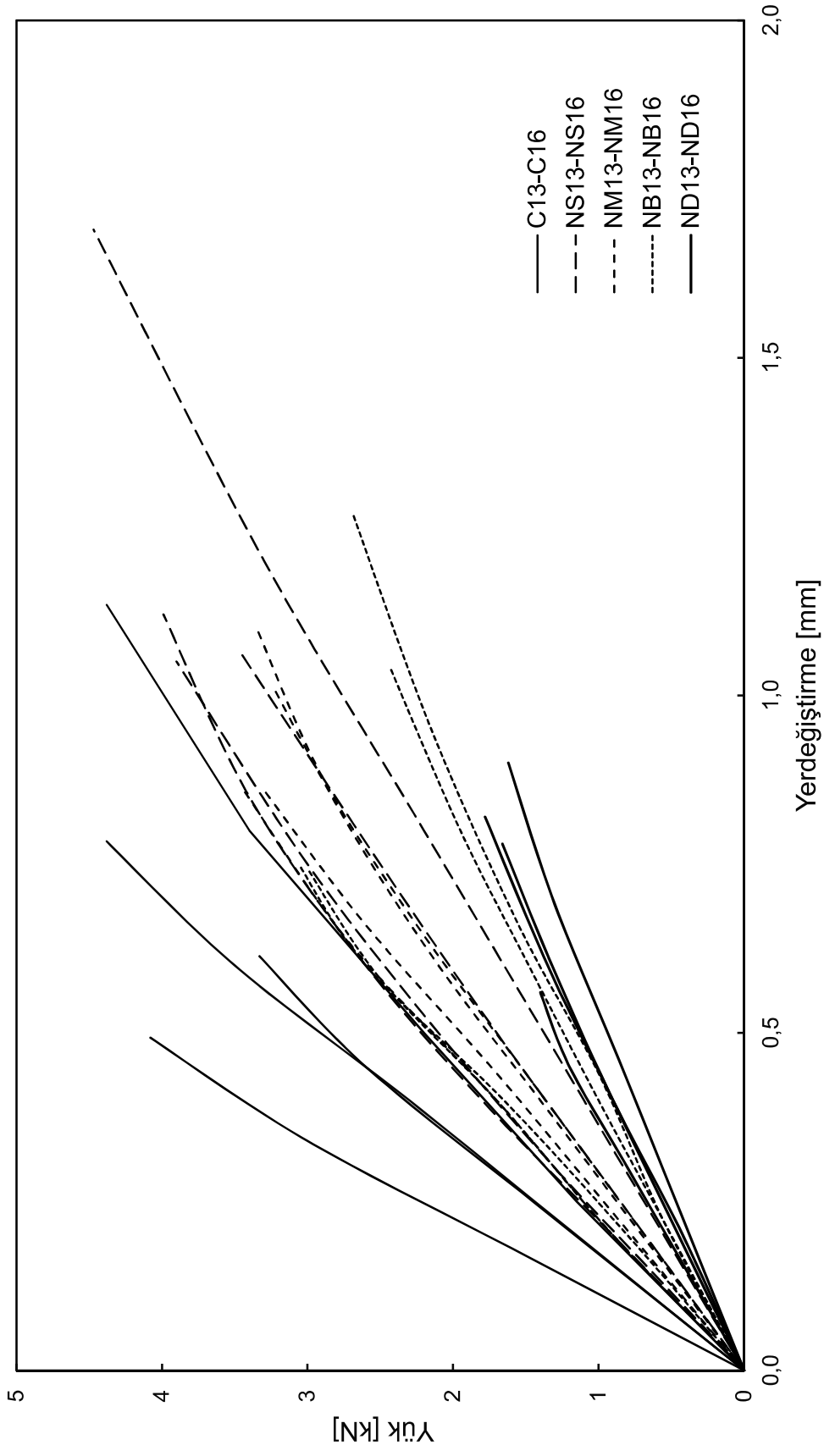


Şekil 3.19. D=93 mm olan kirişlerin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri

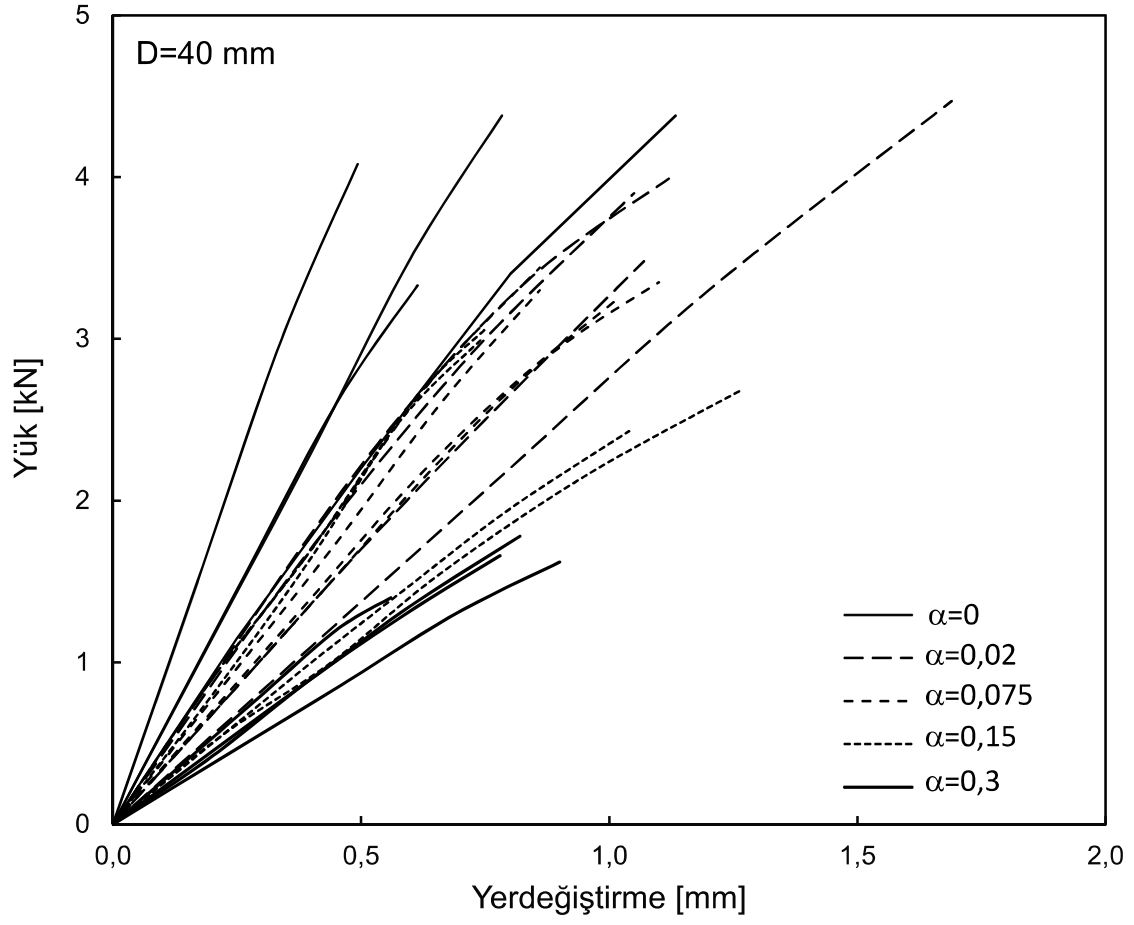


Şekil 3.20. D=93 mm olan kirişlerin çentik oranlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.20’de karakteristik boyut D=93 mm olan kirişlerde çentik oranının etkisi görülmektedir. Çentik oranı arttıkça göçme yükü ve yerdeğiştirme kapasitesinde azalma olmaktadır.



Şekil 3.21. D=40 mm olan kirişlerin gruplara ayrılmış yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 3.22. D=40 mm olan kirişlerin çentik oranlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 3.22’de karakteristik boyut D=40 mm olan kirişlerde çentik oranının etkisi görülmektedir. Çentik oranı arttıkça göçme yükü ve yerdeğiştirme kapasitesinde azalma olmaktadır.

3.7. Çentikli ve çentiksiz beton kirişlerde dönme açısı-yük ölçümleri

Deney düzeneğinde eğimölçer ve yük hücresi tarafından elde edilen veriler grafikler halinde sunulmuştur.

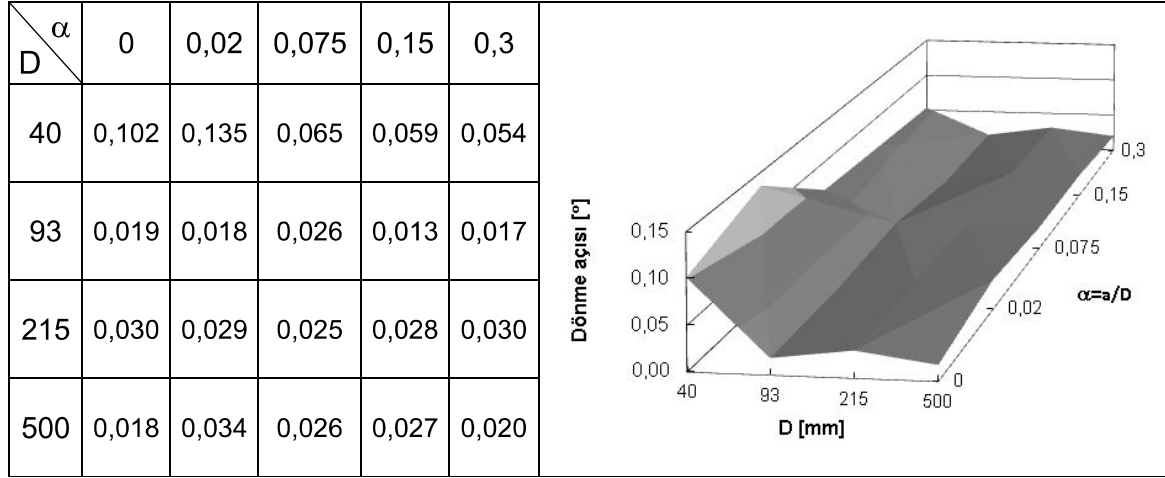
Çizelge 3.10. Kirişlerin boyut, kırılma anındaki dönme açısı ve kırılma yükleri

D [mm]	Kiriş $\alpha=0$	θ_{pu} [°]	P_u [kN]	Kiriş $\alpha=0.02$	θ_{pu} [°]	P_u [kN]	Kiriş $\alpha=0.075$	θ_{pu} [°]	P_u [kN]	Kiriş $\alpha=0.15$	θ_{pu} [°]	P_u [kN]	Kiriş $\alpha=0.3$	θ_{pu} [°]	P_u [kN]
500	C1	0,013	20,07	NS1	0,022	18,97	NM1	0,022	16,76	NB1	0,029	13,22	ND1	0,020	11,34
500	C2	0,010	19,25	NS2	0,030	21,82	NM2	0,018	15,27	NB2	0,020	12,83	ND2	0,026	11,38
500	C3	0,031	24,97	NS3	0,043	20,49	NM3	0,039	13,79	NB3	0,038	13,79	ND3	0,018	10,83
500	C4	0,017	27,61	NS4	0,043	20,12	NM4	0,024	16,17	NB4	0,020	13,77	ND4	0,016	11,54
215	C5	0,017	15,88	NS5	0,017	8,53	NM5	0,030	10,02	NB5	0,029	7,73	ND5	0,025	6,84
215	C6	0,044	12,99	NS6	0,055	6,65	NM6	0,027	7,70	NB6	0,033	6,29	ND6	0,035	7,05
215	C7	0,036	16,70	NS7	0,026	7,73	NM7	0,021	7,55	NB7	0,024	7,07	ND7	0,032	6,60
215	C8	0,022	18,55	NS8	0,018	8,53	NM8	0,023	8,48	NB8	0,027	9,62	ND8	0,027	8,04
93	C9	0,019	10,84	NS9	0,017	5,51	NM9	0,021	5,32	NB9	0,017	3,84	ND9	0,015	3,30
93	C10	0,021	8,66	NS10	0,018	5,86	NM10	0,025	4,75	NB10	0,009	4,47	ND10	0,015	4,86
93	C11	0,018	6,96	NS11	0,021	5,18	NM11	0,028	4,21	NB11	0,014	4,70	ND11	0,016	2,90
93	C12	0,016	6,42	NS12	0,016	5,48	NM12	0,029	4,96	NB12	0,011	5,06	ND12	0,022	2,76
40	C13	0,144	4,38	NS13	0,158	3,48	NM13	0,055	3,23	NB13	0,060	2,99	ND13	0,059	1,78
40	C14	0,130	4,38	NS14	0,131	4,47	NM14	0,073	3,30	NB14	0,067	2,69	ND14	0,048	1,66
40	C15	0,063	3,33	NS15	0,114	3,99	NM15	0,073	3,35	NB15	0,056	3,06	ND15	0,066	1,40
40	C16	0,069	4,08	NS16	0,135	3,90	NM16	0,058	3,44	NB16	0,053	2,43	ND16	0,041	1,62

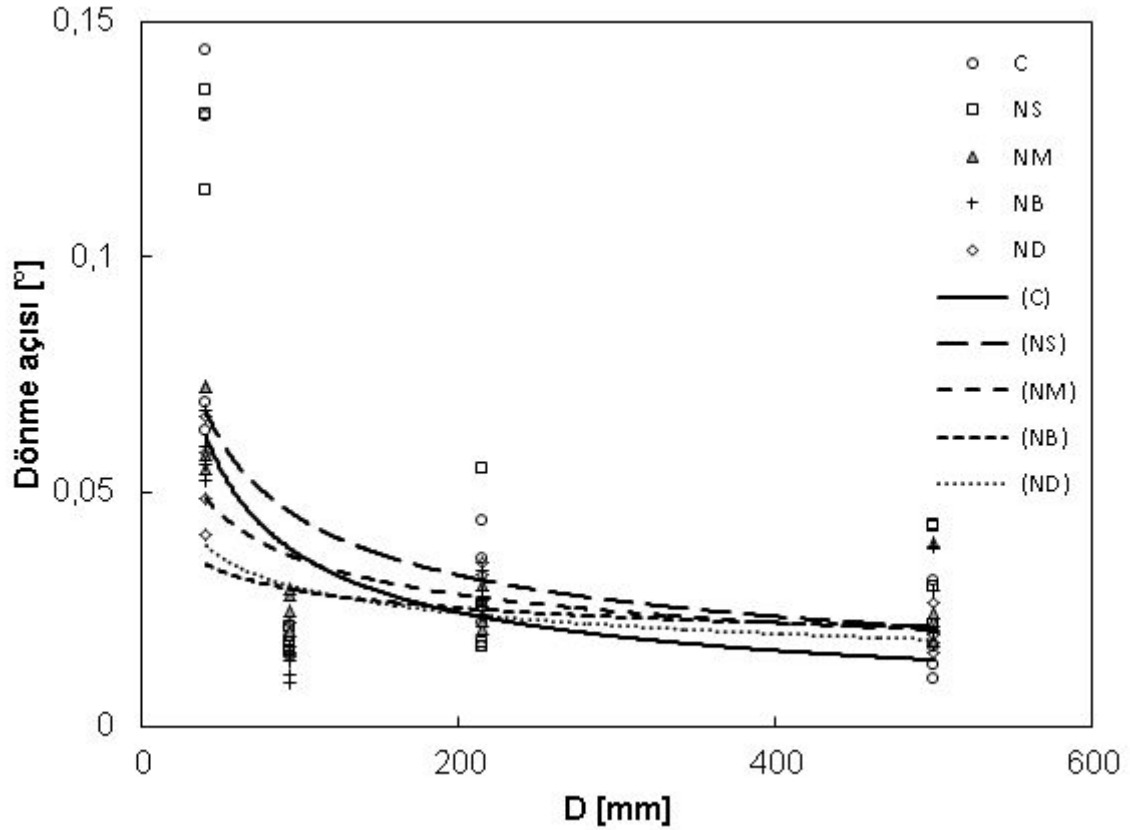
Çizelge 3.11. Kirişlerin sadeleştirilmiş boyut ve çentik oranlarına göre kırılma anındaki dönme açıları

α D	0	0,02	0,075	0,15	0,3
500	0,013	0,022	0,022	0,029	0,020
500	0,010	0,030	0,018	0,020	0,026
500	0,031	0,043	0,039	0,038	0,018
500	0,017	0,043	0,024	0,020	0,016
215	0,017	0,017	0,030	0,029	0,025
215	0,044	0,055	0,027	0,033	0,035
215	0,036	0,026	0,021	0,024	0,032
215	0,022	0,018	0,023	0,027	0,027
93	0,019	0,017	0,021	0,017	0,015
93	0,021	0,018	0,025	0,009	0,015
93	0,018	0,021	0,028	0,014	0,016
93	0,016	0,016	0,029	0,011	0,022
40	0,144	0,158	0,055	0,060	0,059
40	0,130	0,131	0,073	0,067	0,048
40	0,063	0,114	0,073	0,056	0,066
40	0,069	0,135	0,058	0,053	0,041

Çizelge 3.12. Kirişlerin boyut ve çentik oranlarına göre kırılma anındaki ortalama dönme açıları

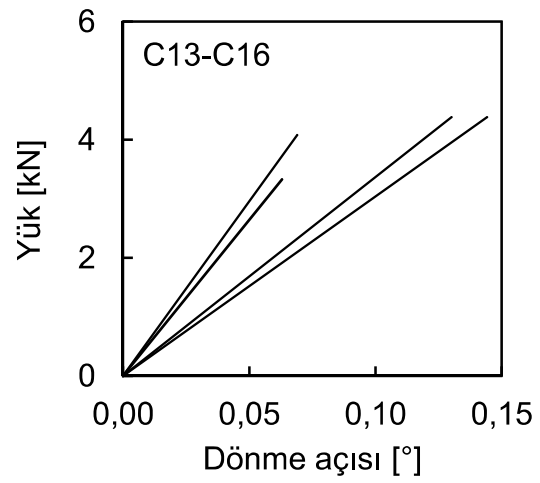
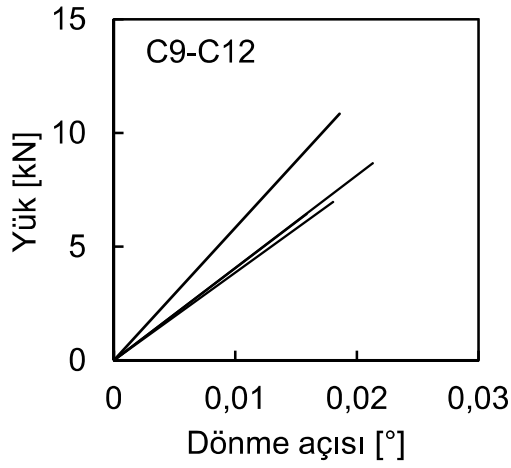
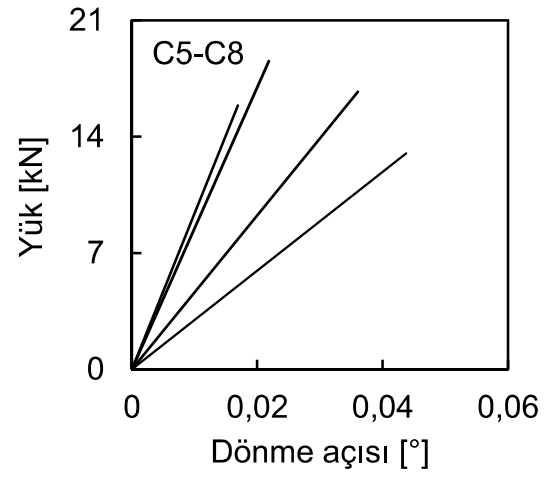
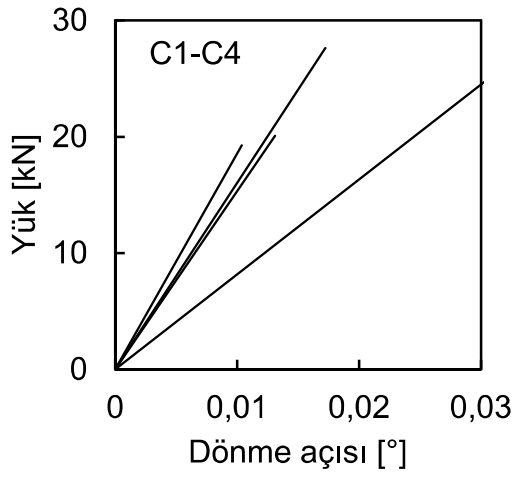


Karakteristik yüksekliğe bağlı dönme açıları Şekil 3.23'te gösterilmiştir.

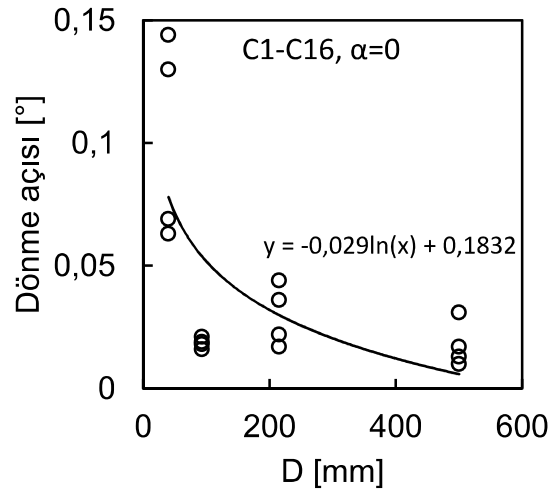


Şekil 3.23. Dönme açısı karakteristik boyut grafiği

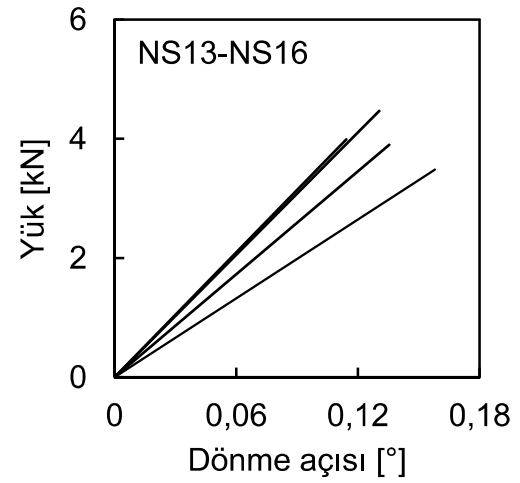
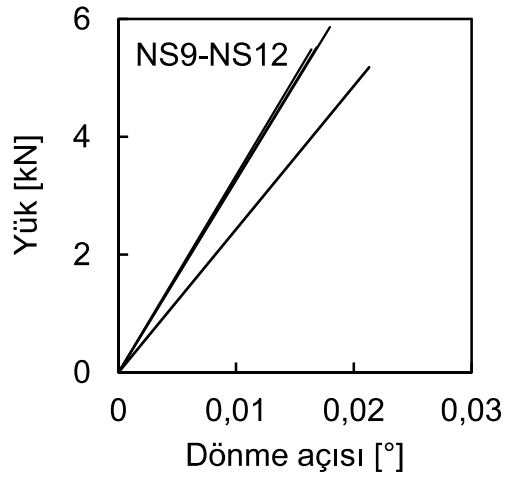
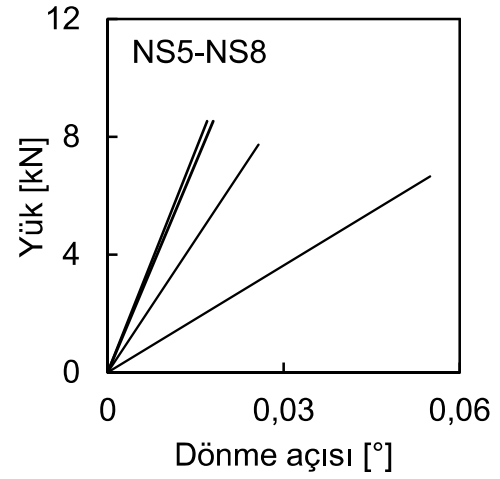
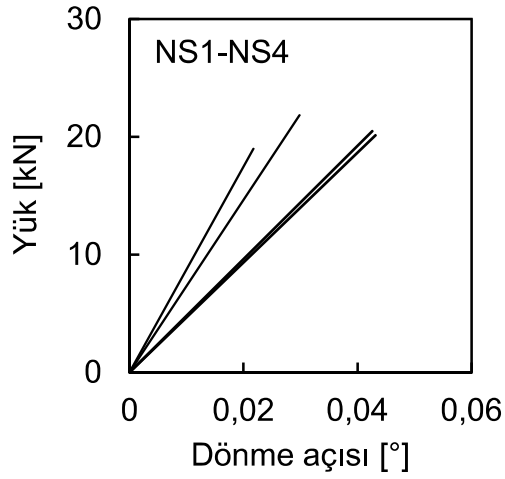
Çentik oranlarına göre gruplandırılmış dönme açısı-göçme yükü grafikleri Şekil 3-24-3.28'de verilmiştir.



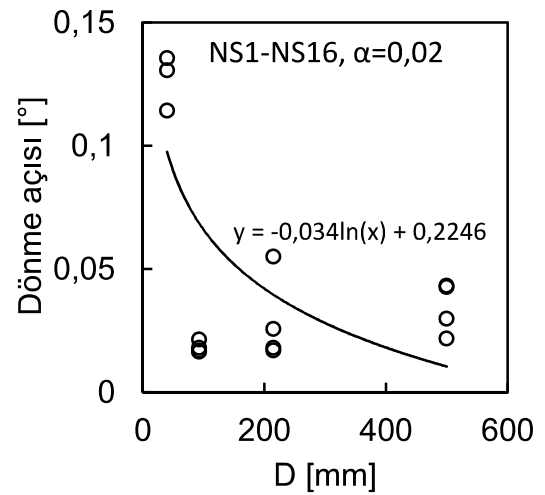
Kiriş $\alpha=0$	D [mm]	θ_{Pu} [°]	P_u [kN]
C1	500	0,013	20,07
C2	500	0,010	19,25
C3	500	0,31	24,97
C4	500	0,017	27,61
C5	215	0,017	15,88
C6	215	0,044	12, 9
C7	215	0,036	16,70
C8	215	0,022	18,55
C9	93	0,019	10,84
C10	93	0,021	8,66
C11	93	0,018	6,96
C12	93	0,016	6,42
C13	40	0,144	4,38
C14	40	0,130	4,38
C15	40	0,063	3,33
C16	40	0,069	4,08



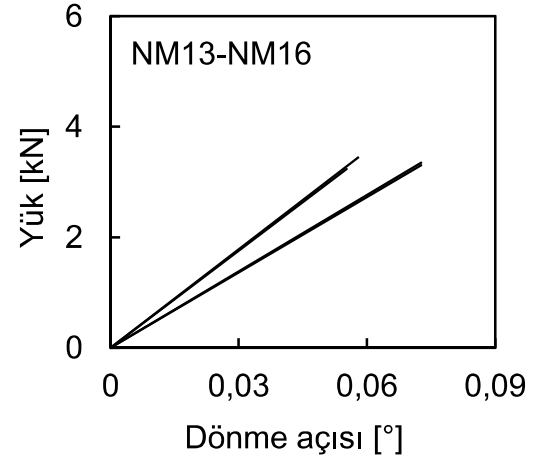
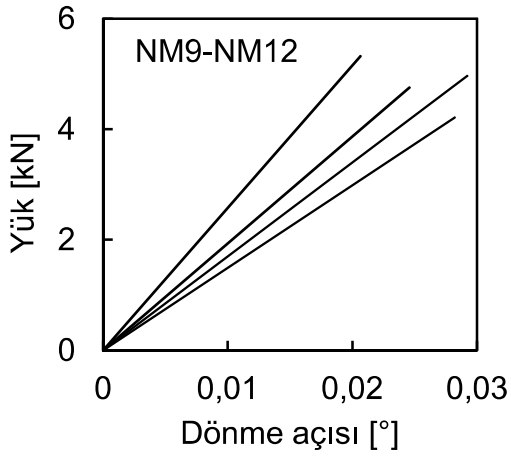
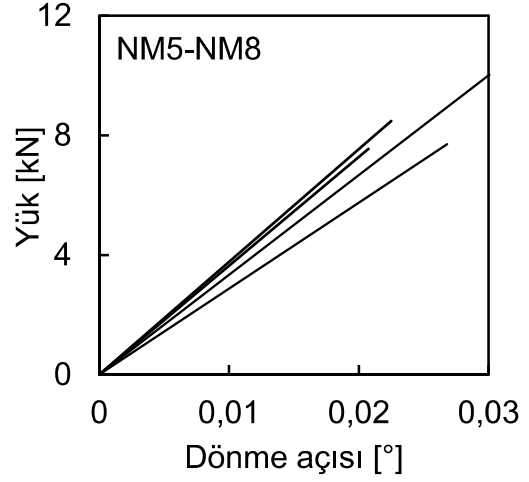
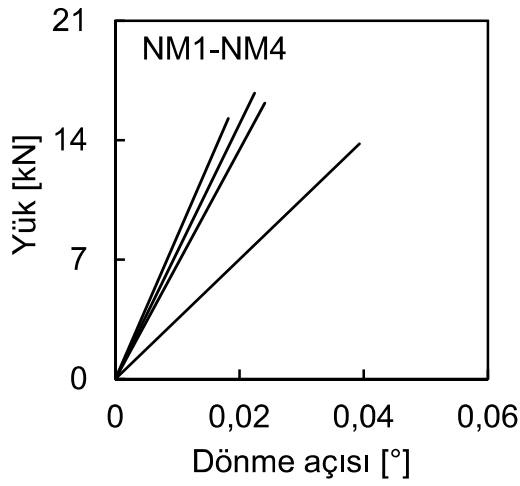
Şekil 3.24. C kirişleri yük-dönme açısı grafikleri



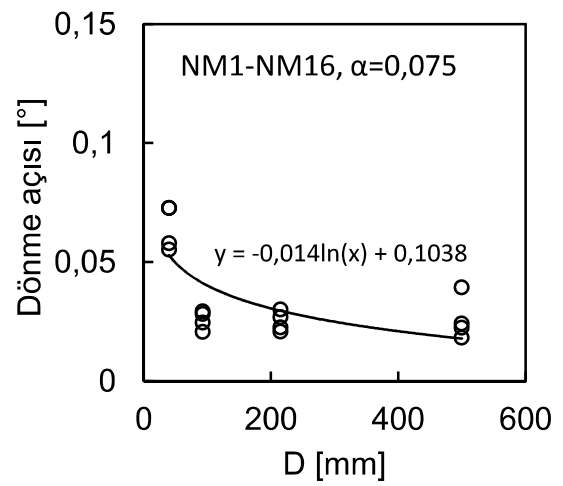
Kiriş $\alpha=0,02$	D [mm]	θ_{Pu} [°]	P_u [kN]
NS1	500	0,022	18,97
NS2	500	0,030	21,82
NS3	500	0,043	20,49
NS4	500	,043	20,12
NS5	215	0,017	8,53
NS6	215	0,055	,65
NS7	215	0,026	7,73
NS8	215	0,018	8,53
NS9	93	0,017	5,51
NS10	93	0,018	5,86
NS11	93	0,021	5,18
NS12	93	0,016	5,48
NS13	40	0,158	3,48
NS14	40	0,131	4,47
NS15	40	0,114	3,99
NS16	40	0,135	3,90



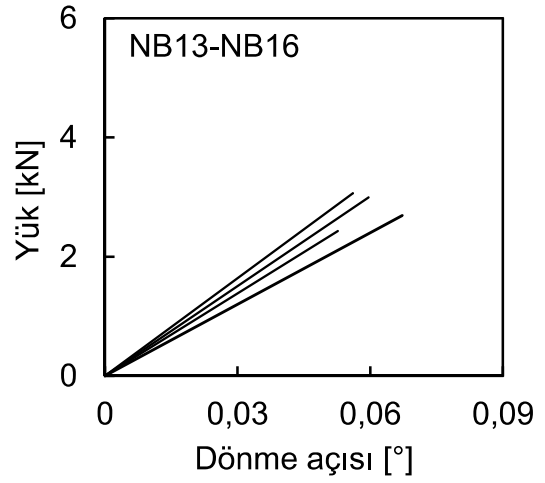
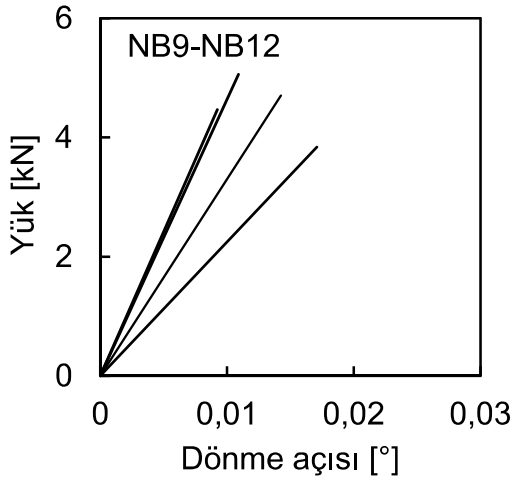
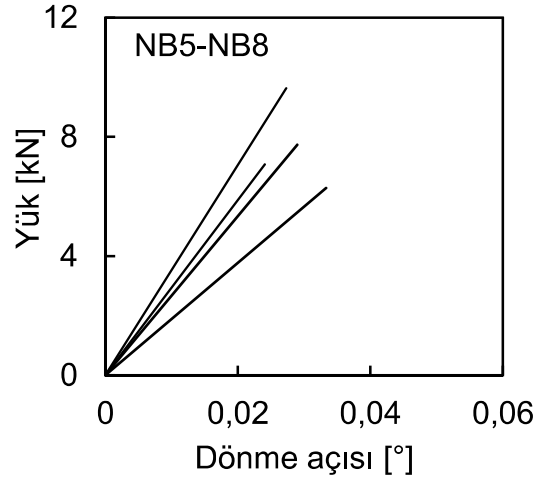
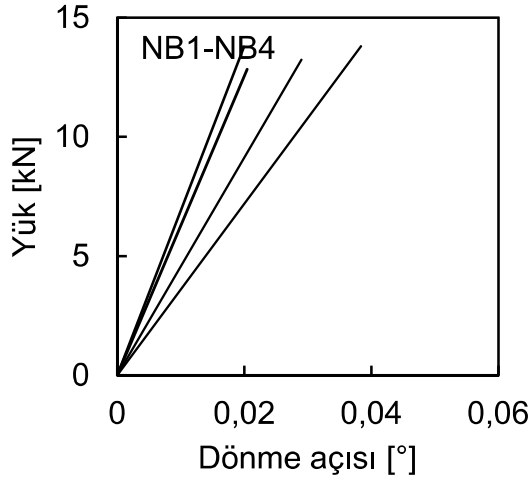
Şekil 3.25. NS kirişleri yük-dönme açısı grafikleri



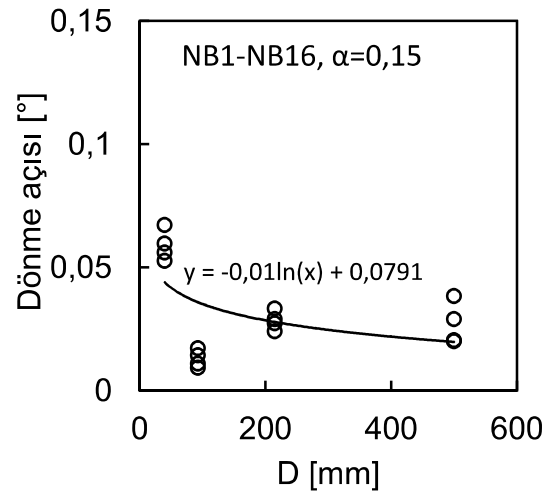
Kiriş $\alpha=0,075$	D [mm]	θ_{Pu} [°]	P_u [kN]
NM1	500	0,022	16,76
NM2	500	0,018	15,27
NM3	500	0,039	13,79
NM4	500	0,024	16,17
NM5	215	0,030	10,02
NM6	215	0,02	7,70
NM7	215	0,021	7,55
NM8	215	0,023	8,48
NM9	93	0,021	5,32
NM10	93	0,025	4,75
NM11	93	0,028	4,21
NM12	93	0,029	4,96
NM13	40	0,055	3,23
NM14	40	0,073	3,30
NM15	40	0,073	3,35
NM16	40	0,058	3,44



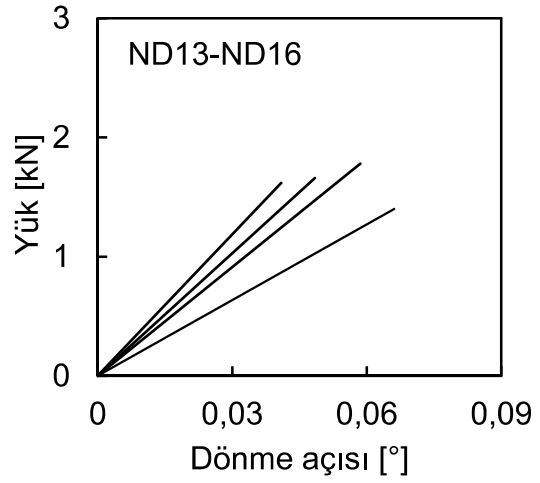
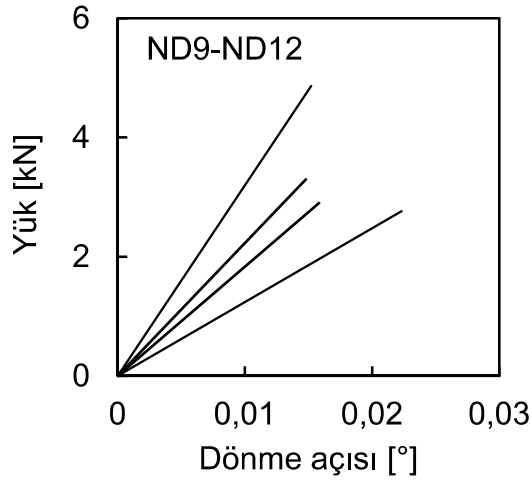
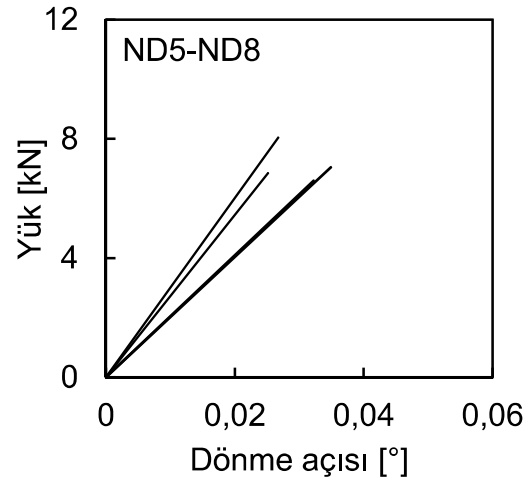
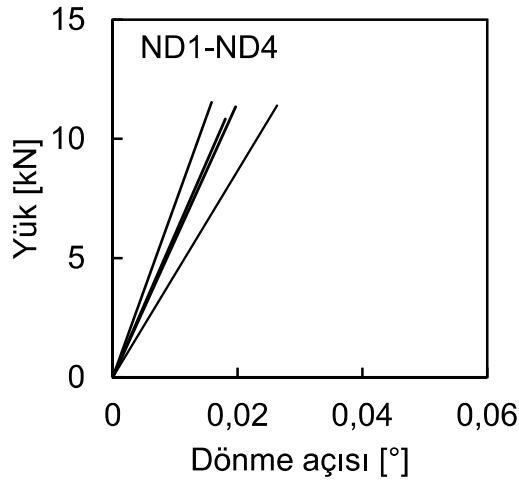
Şekil 3.26. NM kirişleri yük-dönme açısı grafikleri



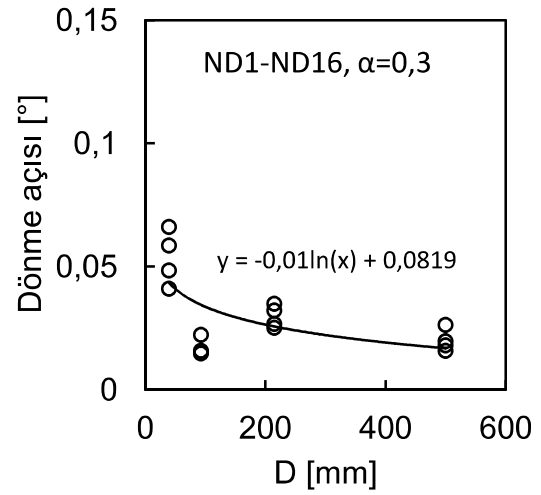
Kiriş $\alpha=0,15$	D [mm]	θ_{Pu} [°]	P_u [kN]
NB1	500	0,029	13,22
NB2	500	0,020	12,83
NB3	500	0,038	13,79
NB4	500	0,0 0	13,77
NB5	215	0,029	7,73
NB6	215	0,033	6,29
NB7	215	0,024	7,07
NB8	215	0,027	9,62
NB9	93	0,017	3,84
NB10	93	0,009	4,47
NB11	93	0,014	4,70
NB12	93	0,011	5,06
NB13	40	0,060	2,99
NB14	40	0,067	2,69
NB15	40	0,056	3,06
NB16	40	0,053	2,43



Şekil 3.27. NB kirişleri yük-dönme açısı grafikleri



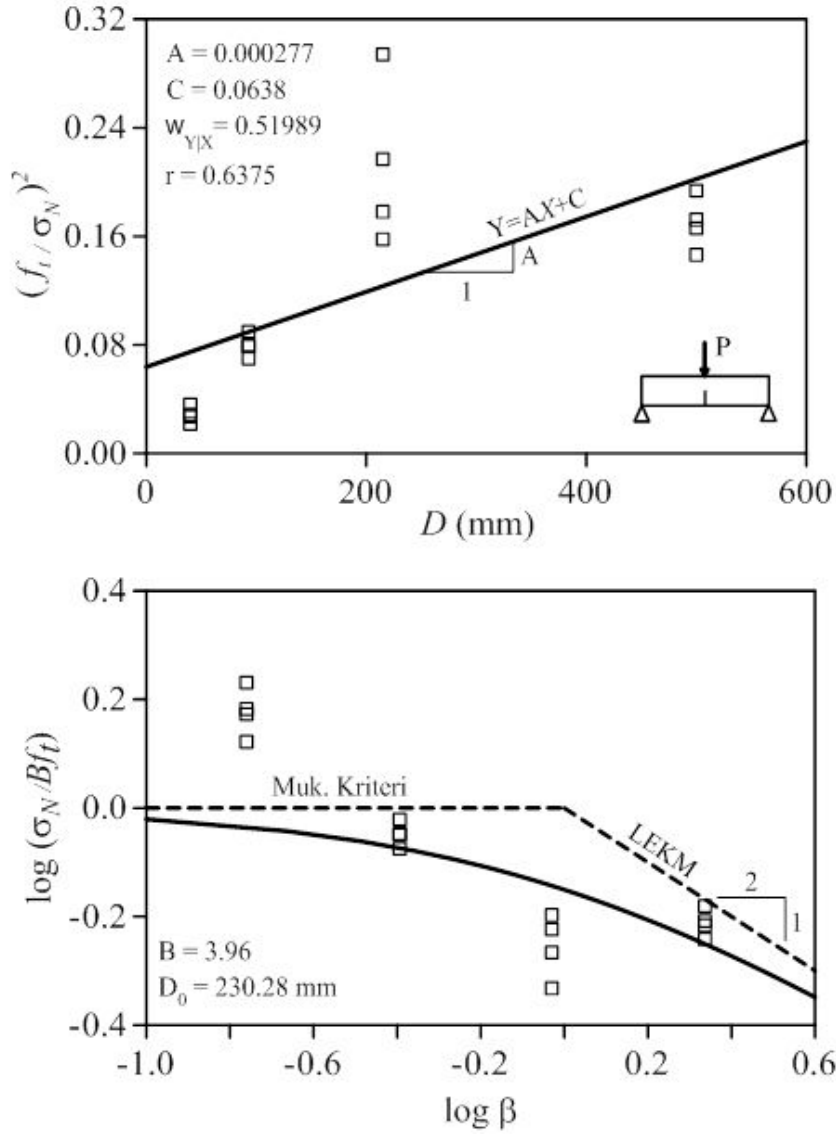
Kiriş $\alpha=0,3$	D [mm]	θ_{Pu} [°]	P_u [kN]
ND1	500	0,020	11,34
ND2	500	0,026	11,38
ND3	500	0,018	10,83
ND4	500	0,016	11,54
ND5	215	0,025	6,84
ND6	215	0,035	7,05
ND7	215	0,032	6,60
ND8	215	0,027	8,04
ND9	93	0,015	3,30
ND10	93	0,015	4,86
ND11	93	0,010	2,90
ND12	93	0,022	2,76
ND13	40	0,059	1,78
ND14	40	0,048	1,66
ND15	40	0,066	1,40
ND16	40	0,041	1,62



Şekil 3.28. ND kirişleri yük-dönme açısı grafikleri

4. BOYUT ETKİSİ ANALİZLERİ

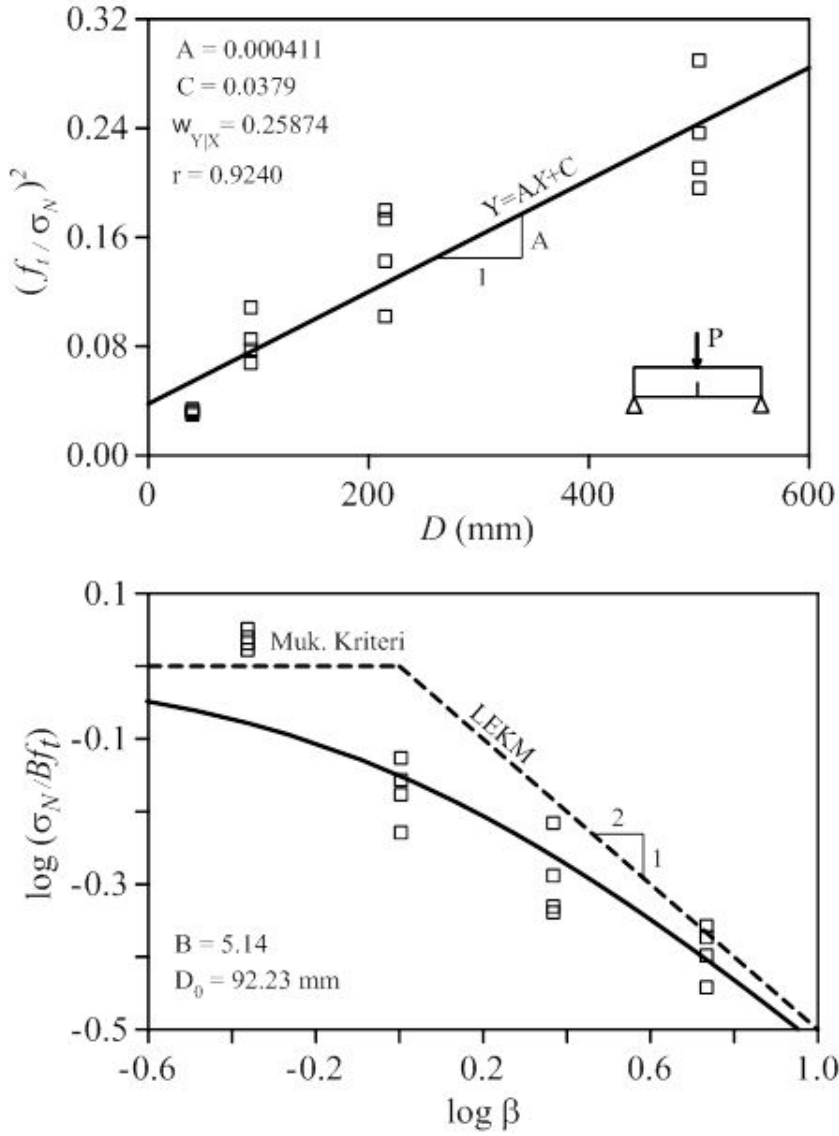
Çentikli kirişlerde Tip II boyut etkisi'nde anlatılan yöntem ile boyut etkisi analizleri yapılarak ilgili grafikler karakteristik boyut D ve $\log \beta$ 'ye göre ayrı ayrı düzenlenerek Şekil 4.1-4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Sığ çentikli (NS) kirişlerde boyut etkisi

Sığ çentikli kirişlerin çentik derinlikleri düşük ve özellikle en büyük agrega çapı olan 10 mm'ye eşit ve daha altında olduğundan dolayı boyut etkisi tipi Tip II'den ziyade çentiksiz yani Tip I'e yaklaşımaktadır.

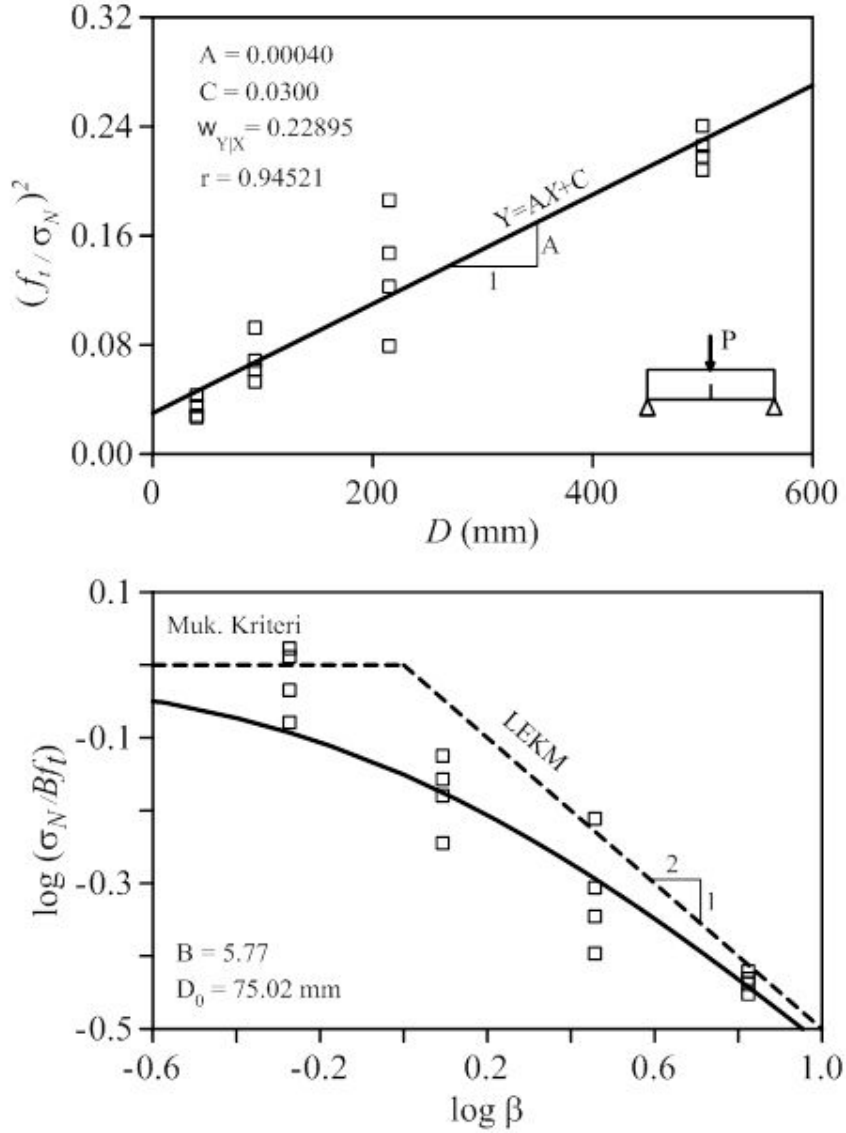
Şekil 4.1'de karakteristik boyuta bağlı $\log \beta$ değeri=-0,8 olan kirişlerin nominal gerilmeye bağlı $\log(\sigma_N/\beta f_t)$ değerleri mukavemet kriterinin üzerine çıkmıştır. Bu da bize Tip I boyut etkisi davranışı sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.2. Orta çentikli (NM) kirişlerde boyut etkisi

Çentik derinlikleri arttıkça Tip I'den Tip II boyut etkisine daha fazla yaklaşmaktadır. Orta çentikli $D=40$ ve 93 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 3 ve 7 mm dolayısıyla en büyük agrega çapından küçüktür. $D=215$ ve 500 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 16 ve 38 mm dolayısıyla en büyük agrega çapı olan 10 mm'den büyüktür.

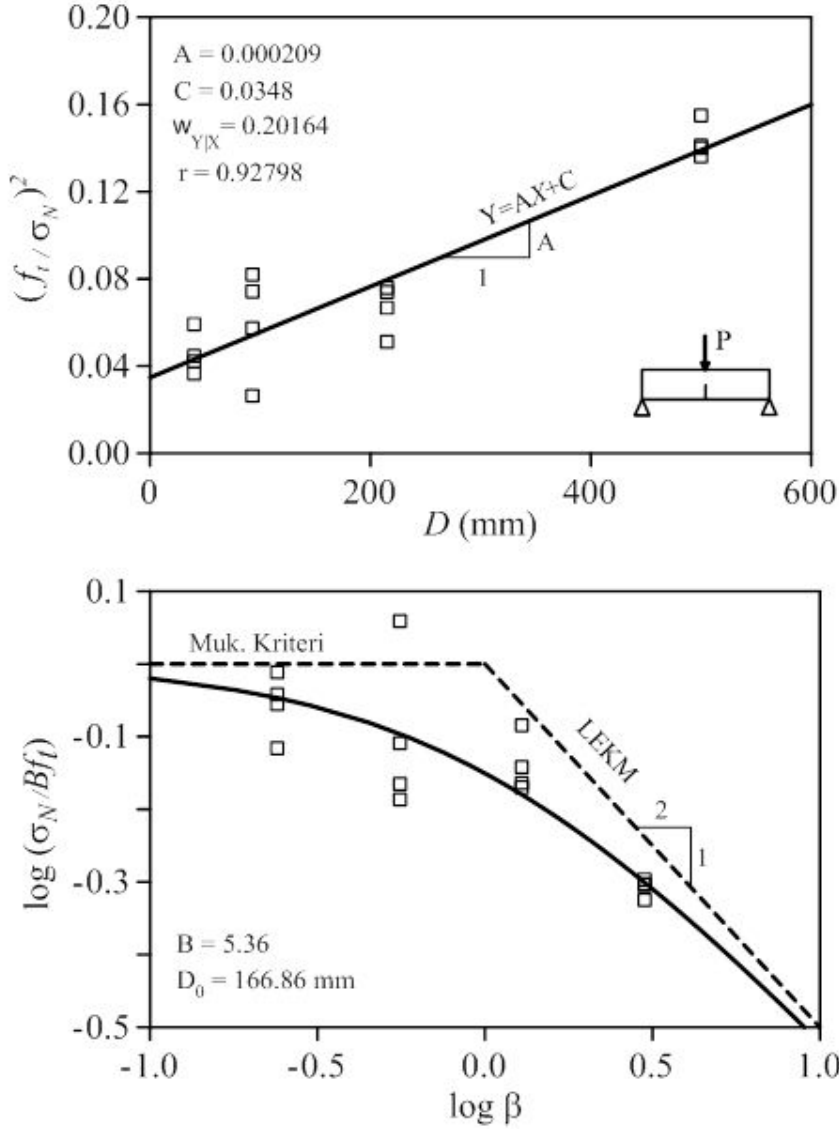
Şekil 4.2'de karakteristik boyuta bağlı $\log \beta$ değeri=-0,3 olan kirişlerin nominal gerilmeye bağlı $\log(\sigma_N/\beta f_t)$ değerleri mukavemet kriterine yakın çıkmıştır. Bu da bize Tip I-Tip II boyut etkisi geçiş davranışı sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.3. Büyük çentikli (NB) kirişlerde boyut etkisi

Büyük çentikli $D=40 \text{ mm}$ olan kirişlerin çentik derinlikleri 6 mm , en büyük agrega çapından küçüktür. $D=93, 215$ ve 500 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla $14, 32$ ve 75 mm , dolayısıyla en büyük agrega çapı olan 10 mm 'den büyüktür. Boyut etkisi Tip II davranışı sergilemektedir.

Şekil 4.3'de karakteristik boyuta bağlı $\log \beta$ değeri=-0,25 olan kirişlerin nominal gerilmeye bağlı $\log(\sigma_N/\beta f_t)$ değerleri mukavemet kriteri ve altında çıkmıştır. Bu da bize Tip II boyut etkisine geçiş davranışı sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.4. Derin çentikli (ND) kirişlerde boyut etkisi

Derin çentikli kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 12, 28, 65 ve 150 mm'dir, Tamamı en büyük agrega çapından büyüktür. Boyut etkisi olarak Tip II davranışını tam olarak gösterdiği görülmektedir.

Şekil 4.4'de derin çentikli kirişlerin $\log(\sigma_N/\beta f_t)$ değerlerine göre tam olarak Tip II boyut etkisi davranışı sergiledikleri görülmektedir.

5. ELEMANLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında sonlu elemanlar analizi yapılırken farklı çentik boylarına sahip beton elemanların bulunmasından dolayı ve özellikle malzeme modellerinde kırılma parametrelerini gözönüne alarak analizler yapabildiği için Atena 3D programı kullanılmıştır.

Modellenecek kirişin analizlerinin yapılması için işlem adımlarının takip edilmesi gerekmektedir. Bu adımlar sırasıyla;

- Malzeme tanımlarının yapılması
- 3 boyutlu kiriş geometrisinin ve çentiklerin oluşturulması
- Mesnetlerin oluşturulması
- Mesnet şartlarının (kayıcı, sabit) belirlenmesi
- Yükleme şartlarının oluşturulması
- Sonlu eleman ağlarının oluşturulması
- Gözlem noktalarının girilmesi
- Analiz yöntemi ve yükleme adımlarının girilmesi
- Analizin çalıştırılması
- Analiz sonrası işlemlerin yapılması (gerilmeler, deformasyonlar, birim deformasyonlar, çatlak genişlikleri v.b)
-

Atena 3D programının kullandığı beton malzemesinde aşağıdaki doğrusal ve doğrusal olmayan etkiler de gözönüne alınmaktadır [56].

- Basınçta yumuşamayı da içerecek şekilde doğrusal olmayan davranış
- Kırılma enerjisi kriterini dikkate alan çekme göçmesi
- Çift eksenli gerilme göçmesi kriteri
- Çekme rijitleşmesi etkisi
- Sabit çatlak modelinde çatlama sonrası çekme rijitleşmesinde tutulma
- Sabit ve dönmüş çatlak yönü modelleridir.

5.1. Analizlerde Kullanılan Malzeme Tipleri

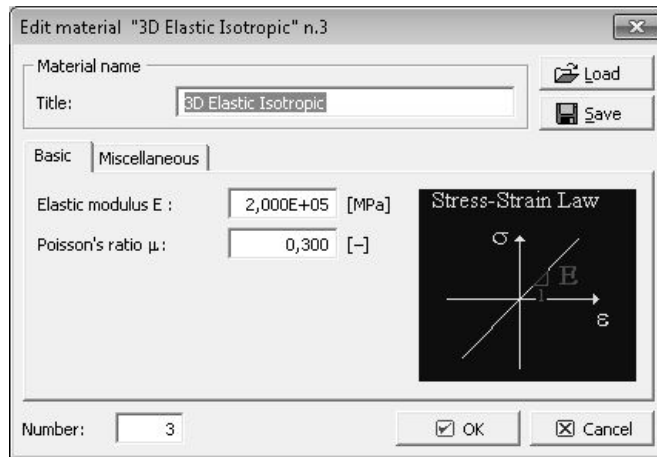
Mesnetlerin ve yükleme yapılan (birim deformasyon verilen) kısımdaki çelik parçaların malzemesi üç boyutlu elastik, izotropik (*3D Elastic Isotropic*) olarak girilmiştir.

Çizelge 5.1’de analizlerde kullanılan çelik malzeme özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Analizlerde kullanılan çelik malzeme özellikleri

Çelik Mesnetler	
Malzeme tipi	3D Elastik, izotropik
E, Elastisite modülü	200 GPa
μ , Poisson oranı	0,3
ρ , Özgül ağırlığı	78.5 kN/m ³
α , Termal genl. kats.	1,2.10 ⁻⁵

Resim 5.1’de elemanların Atena 3D programında çelik malzeme seçim ekranları gösterilmektedir.



Resim 5.1. Çelik malzeme elastisite modülü ve poisson oranı giriş ekranı

Edit material "3D Elastic Isotropic" n.3

Material name: _____

Title: 3D Elastic Isotropic

Basic Miscellaneous

Specific material weight ρ : 7,850E-02 [MN/m³]

Coefficient of thermal expansion α : 1,200E-05 [1/K]

Number: 3

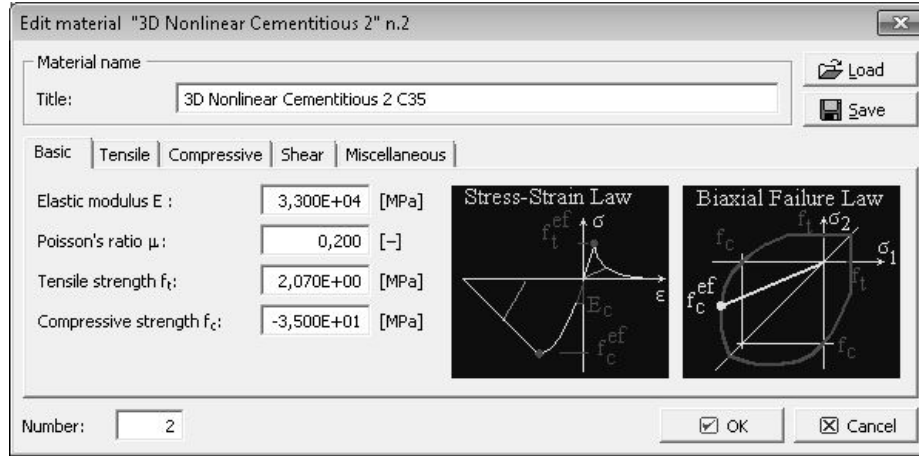
OK Cancel

Resim 5.2. Çelik malzeme özgül ağırlık ve termal genleşme katsayısı giriş ekranı

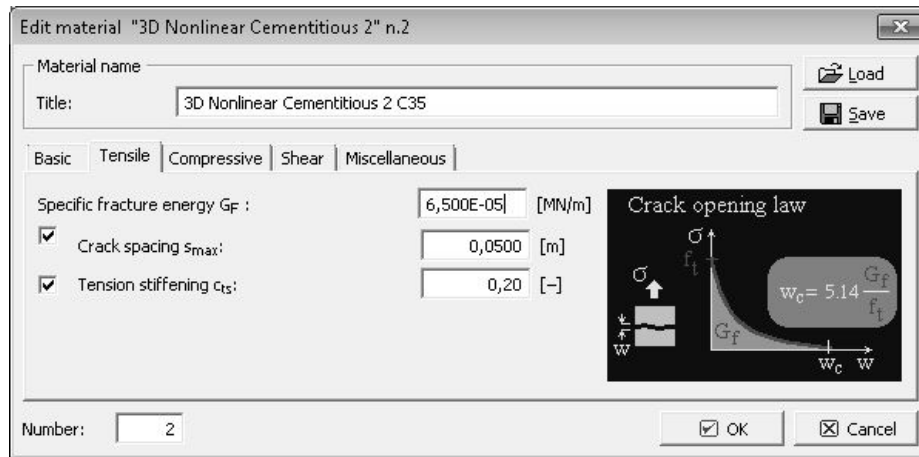
Beton malzeme olarak ise deneyi yapılan elemanların kırılma parametrelerini temsil edecek şekilde üç boyutlu doğrusal olmayan beton malzemesi (3D Nonlinear Cementitious 2) seçilmiştir. Tasarımda kullanılan betonun silindirik basınç dayanımı $f_c=35\text{MPa}$ seçilmiştir.

Çizelge 5.2. Analizlerde kullanılan beton malzeme özellikleri

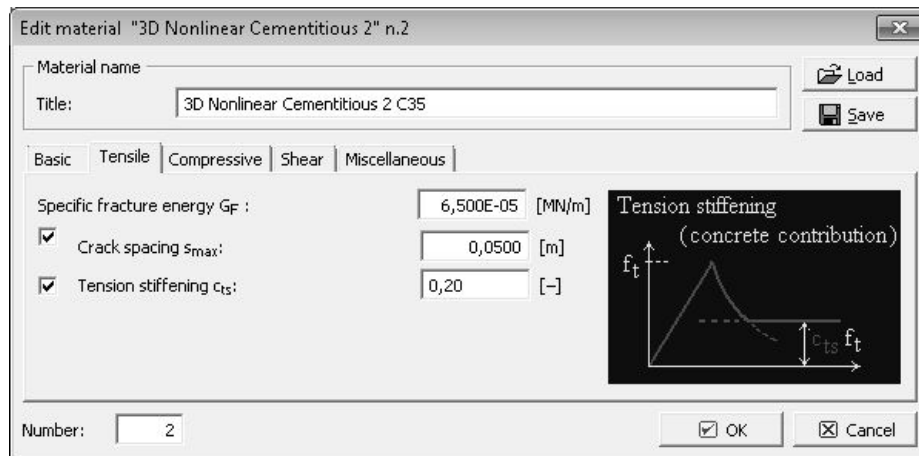
Beton Kirişler	
Malzeme tipi	3D Elastik, izotropik
E, Elastisite modülü	33 GPa
μ , Poisson oranı	0,2
f_t , Çekme mukavemeti	2,07 MPa
f_c , Basınç mukavemeti	35 MPa
G_F , Özgül kırılma enerjisi	65 N/m
s_{max} , Maksimum çatlak aralığı	0,05 m
c_{ts} , Çekme sertleşmesi	0,20
W_d , Kritik basınç yerdeğiştirmesi	$-5 \cdot 10^{-5}$ m
ε_{cp} , Basınç mukavemetinde kalıcı birim deformasyon	$-1,15 \cdot 10^{-3}$
$r_{c,lim}$, Çatlaktan kaynaklanan bas. muk. azaltma kats.	0,20
S_F , Çatlak için kesme rijitlik katsayısı	20
Agregalar arası kilitleme özelliği	Var
Maksimum agrega çapı	0,01 m
Göçme yüzeyi ekzantrisitesi	0,52
β , Kalıcı akış yönü çarpanı	0,000
ρ , Özgül ağırlığı	23,0 kN/m ³
α , Termal genl. kats.	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Sabit çatlak modeli katsayısı	1,00



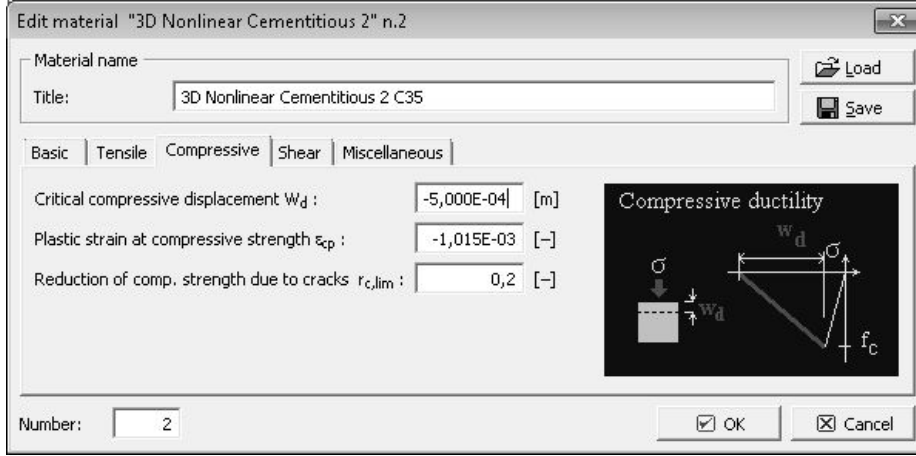
Resim 5.3. Beton için temel malzeme katsayıları giriş ekranı



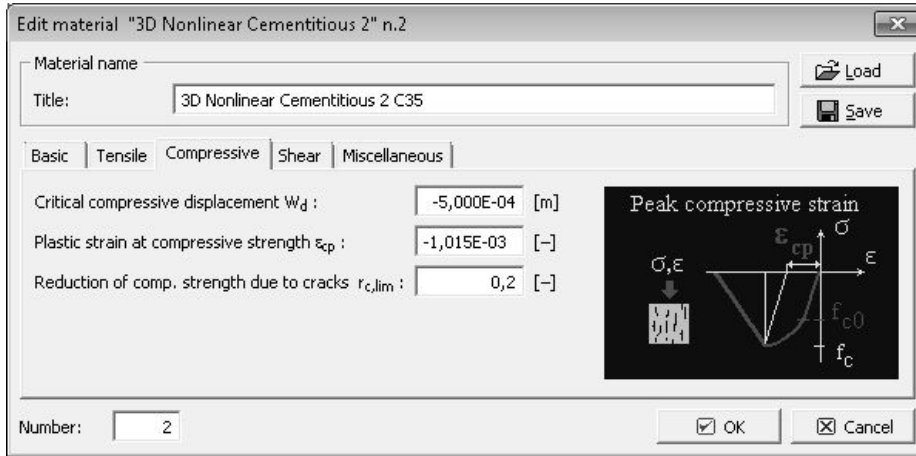
Resim 5.4. Beton için malzeme çekme özellikleri giriş ekranı (Çatlak açılma kanunu gösterimli)



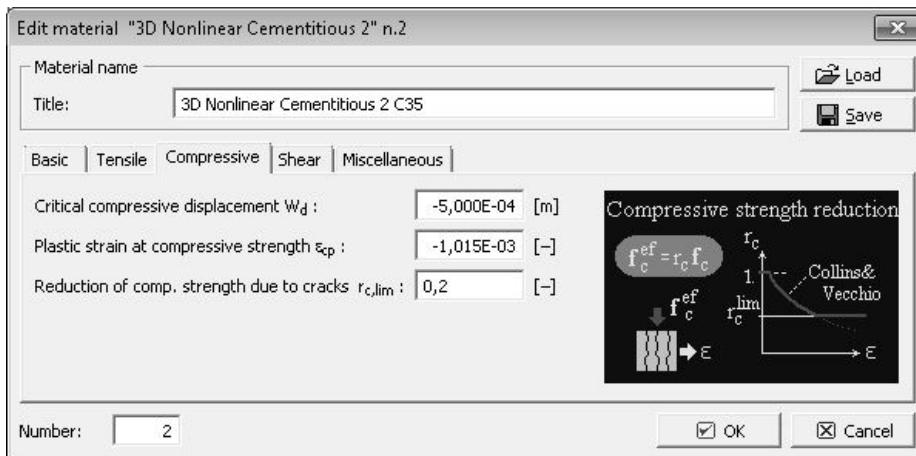
Resim 5.5. Beton için malzeme çekme özellikleri giriş ekranı (Çekme sertleşmesi gösterimli)



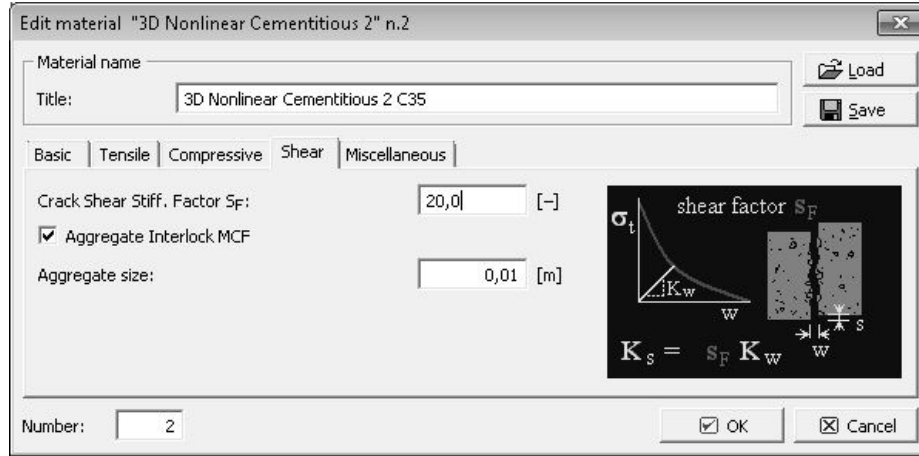
Resim 5.6. Beton için malzeme basınç özellikleri giriş ekranı (Basınç sünekliliği gösterimli)



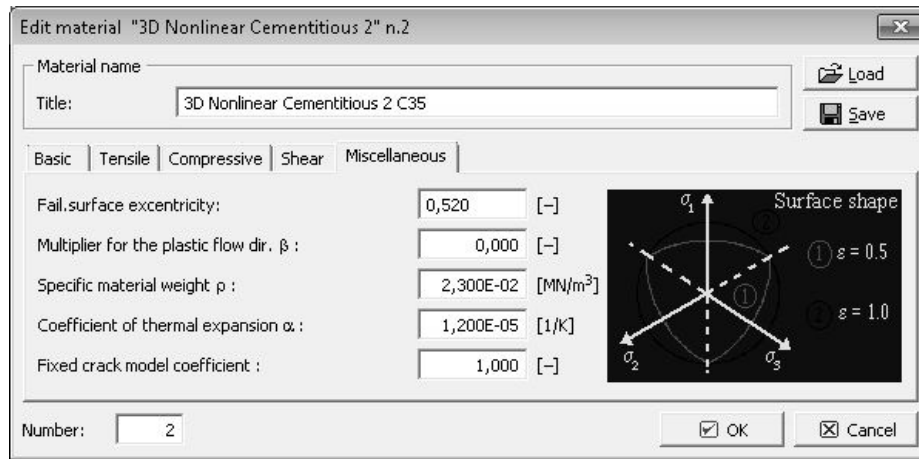
Resim 5.7. Beton için malzeme basınç özellikleri giriş ekranı (Basınç mukavemetinde kalıcı tepe birim deformasyon gösterimli)



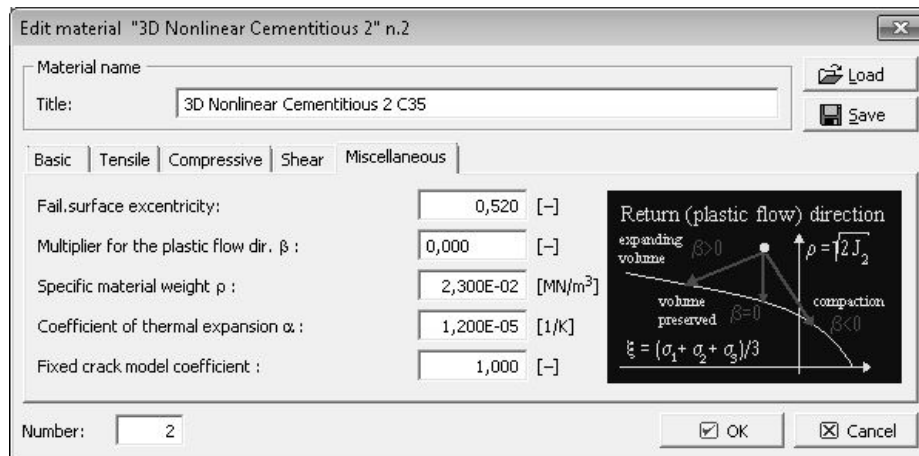
Resim 5.8. Beton için malzeme basınç özellikleri giriş ekranı (Basınç mukavemetinde azalma gösterimli)



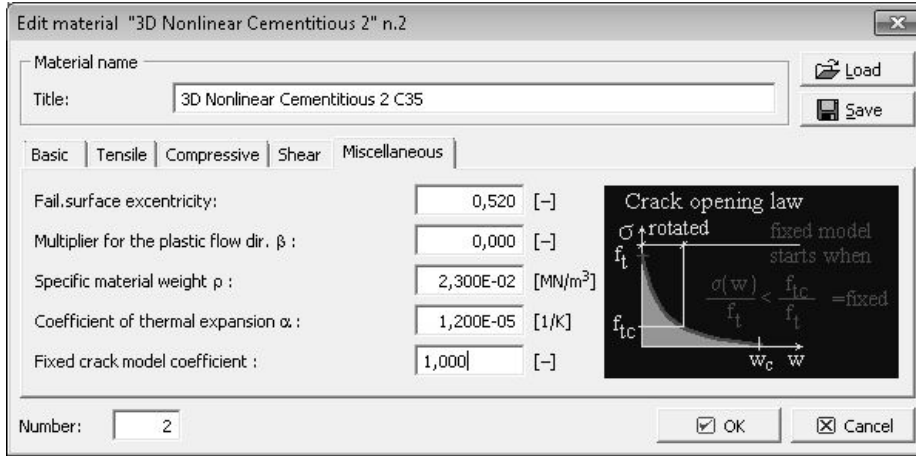
Resim 5.9. Beton için malzeme kesme özellikleri giriş ekranı (Kesme çarpanı gösterimli)



Resim 5.10. Beton için diğer malzeme kırılma özellikleri giriş ekranı (Yüzey şekline bağlı katsayılar gösterimli)



Resim 5.11. Beton için diğer malzeme kırılma özellikleri giriş ekranı (Beton kalıcı akma yönü ile ilgili katsayılar gösterimli)



Resim 5.12. Beton için diğer malzeme kırılma özellikleri giriş ekranı (Çatlak açılma kanunu gösterimli)

5.2. Numunelerin Tasarım Aşamaları

Elemanların bir mesneti kayıcı diğeri sabit seçilmiştir. İki mesnette de kayıcı tanımlandığında diğer sonlu elemanlar programlarında da olduğu gibi Atena 3D programında analizin bazı adımlarında stabilite sorunu ortaya çıkmaktadır.

Analizler yerdeğiştirme kontrollü (Prescribed deformation) olarak yapılmıştır. Deneylerde olduğu gibi burada da 3 nokta yüklemesi söz konusudur. İki adet mesnet ve bir de kirişin orta noktasında birim yerdeğiştirmenin kirişte oluşturduğu reaksiyon kuvvetlerinden o anki analiz adımına göre P yükü program tarafından hesaplanmaktadır. Analiz sırasında kirişteki deformasyonu ölçmek için eğilme momentinin maksimum olduğu yerin en üst kısmında yani kirişin deneyde yükleme yapılan üst orta noktasına bir gözlem noktası (monitoring point) yerleştirilmiştir. Yük ölçümü için kirişin üst orta kısmında yükleme levhasının üzerine bir gözlem noktası yerleştirilmiştir. Bu şekilde her bir adımdaki birim deformasyona karşılık gelen yükler hesaplanmıştır. Analiz sonlandığında yer değiştirmeye bağlı olarak kirişin göçme öncesi ve sonrası yük-yerdeğiştirme grafikleri program ekranında gösterilmektedir.

Eleman ağının oluşturulması aşamasında yakınsama analizi yapılarak uygun eleman sayısı ve büyüklüğü tespit edilmeye çalışılmıştır.

5.3. Numunelerin Adlandırılması ve Boyutları

Boyutları 1200x500, 516x215, 223x93, 96x40 olan kirişlerin Atena 3D sonlu elemanlar programı ile analizi yapılmıştır. Her bir boyuttan 4'er adet denenmiştir. Bunun nedeni malzeme, döküm yükleme v.s. nedenlerden dolayı oluşacak hatayı mümkün mertebe sıfıra indirmek ve kirişin gerçek kırılma yükünün bulunmasıdır. Ancak Atena 3D programı ile yapılan analizlerde her bir kiriş boyutundan 1'er adet yapılmıştır. Programda kullanılan boyutlar, malzeme ve sınır şartları değişmedikçe alınan sonuçlar da değişmemektedir.

Laboratuarda deneyleri yapılan kirişlere karşılık gelen analizi yapılan kirişlerin adlandırılmasında kiriş boyu ve yükseklikleri kullanılmıştır. Örnek olarak C500F kirişi, çentiksiz, yüksekliği 500, boyu 1200 mm olan kirişi ve F kısaltması ise Atena 3D programı ile sonlu elemanlar analizi yapılmış anlamında kullanılmıştır.

Çentiksiz (C) kirişlerin sonlu elemanlar analizindeki karşılıkları aşağıda verilmiştir:

C1-4	→	C500F
C5-8	→	C215F
C9-12	→	C93F
C13-16	→	C40F

Sığ çentikli (NS) kirişlerin sonlu elemanlar analizindeki karşılıkları aşağıda verilmiştir:

NS1-4	→	NS500F
NS5-8	→	NS215F
NS9-12	→	NS93F
NS13-16	→	NS40F

Orta çentikli (NM) kirişlerin sonlu elemanlar analizindeki karşılıkları aşağıda verilmiştir:

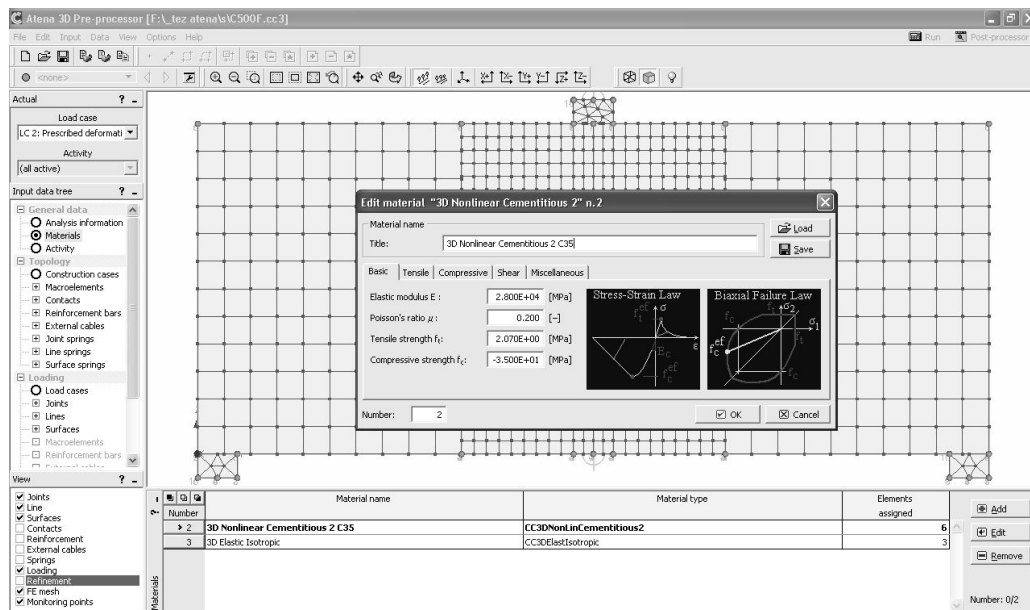
NM1-4 → NM500F
 NM5-8 → NM215F
 NM9-12 → NM93F
 NM13-16 → NM40F

Büyük çentikli (NB) kirişlerin sonlu elemanlar analizindeki karşılıkları aşağıda verilmiştir:

NB1-4 → NB500F
 NB5-8 → NB215F
 NB9-12 → NB93F
 NB13-16 → NB40F

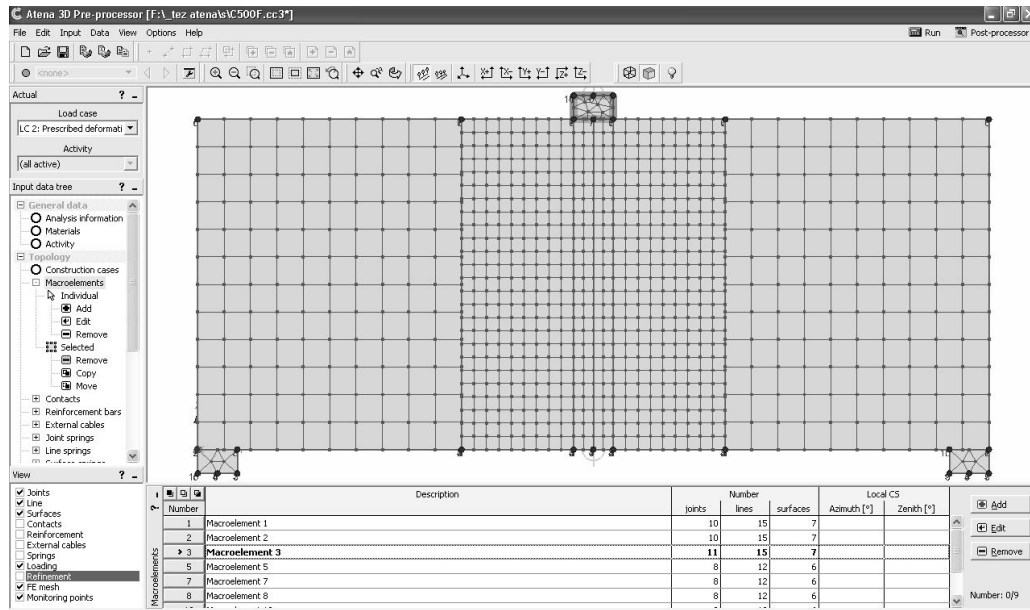
Derin çentikli (ND) kirişlerin sonlu elemanlar analizindeki karşılıkları aşağıda verilmiştir:

ND1-4 → ND500F
 ND5-8 → ND215F
 ND9-12 → ND93F
 ND13-16 → ND40F



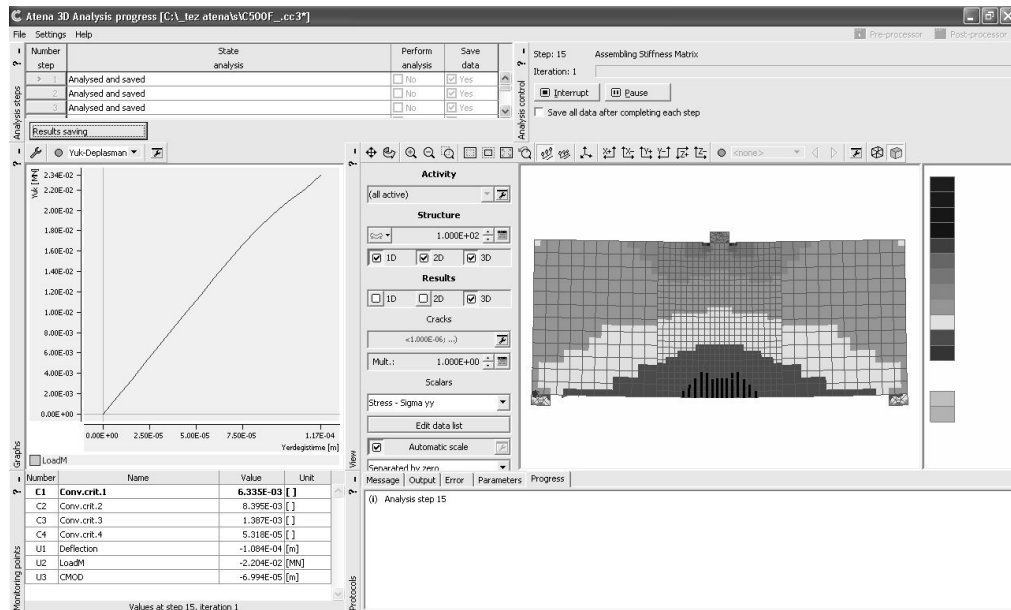
Resim 5.13. Eleman analizi için malzeme tipi giriş ekranı

Resim 5.14’de eleman ağının oluşturulması gösterilmiştir.



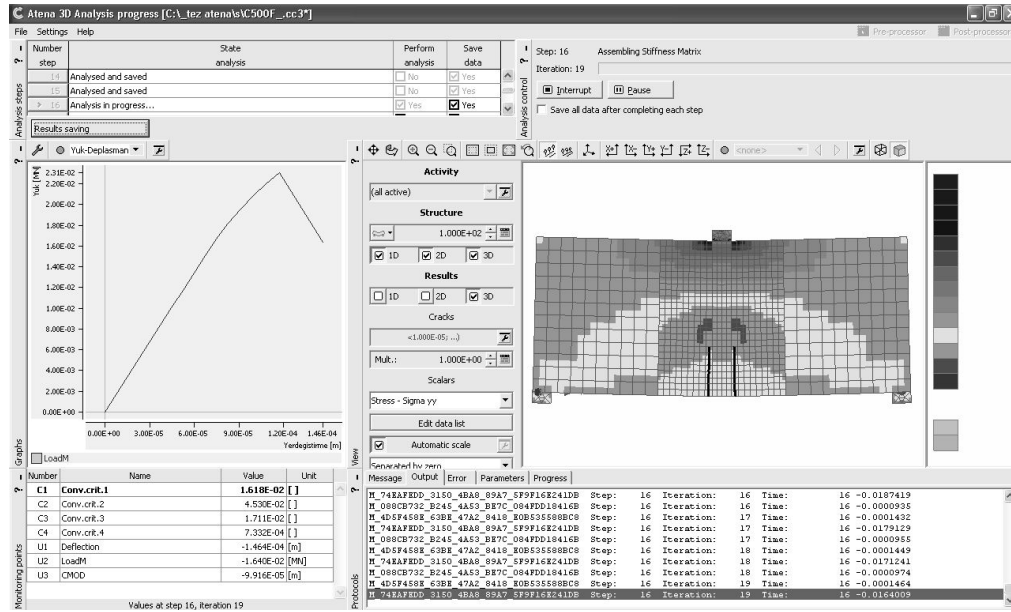
Resim 5.14. C500F kirişi eleman ağının (mesh) oluşturulması

C500F, çentiksiz en büyük kirişin Atena 3D programı ile yapılan analiz süreci ve analiz sonrası Resim 5.15 – 5.16’da sırası ile gösterilmiştir. Resim 5.15’te 15. adımdaki yük – yerdeğiştirme ile çatlak dağılımları gösterilmektedir.

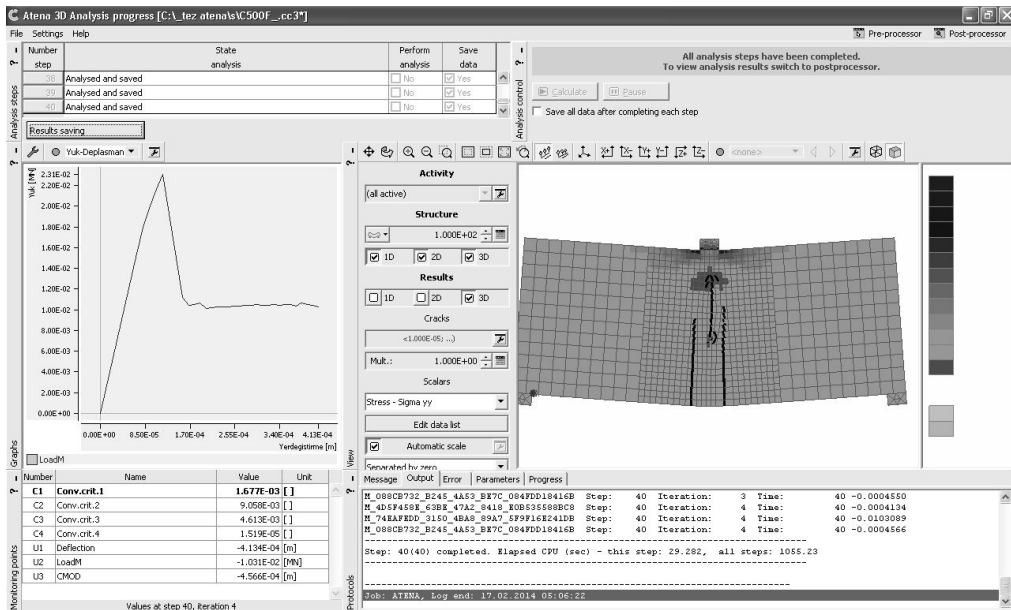


Resim 5.15. C500F kirişinin Atena 3D programı ile analizinin 15. adım görüntüsü

Tüm elemanların analiz görüntülerini eklemek çok fazla yer kaplamaması amacıyla bu bölümde C500F çentiksiz kirişinin Atena 3D programı ile yapılan analiz süreci ve sonucuna resimlerde sırası ile yer verilmiştir. Resim 5.16'da 16. adımda elemanda oluşan maksimum yük sonrası çatlak dağılımı ve yük-yerdeğiştirme eğrisi gösterilmektedir.

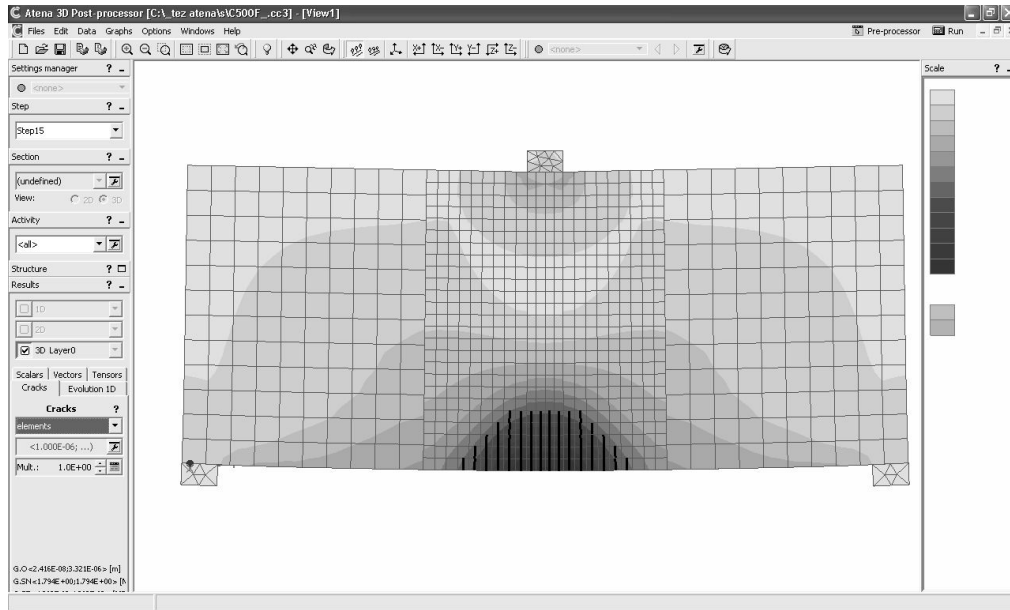


Resim 5.16. C500F kirişinin Atena 3D programı ile analizinin 16. adım görüntüsü



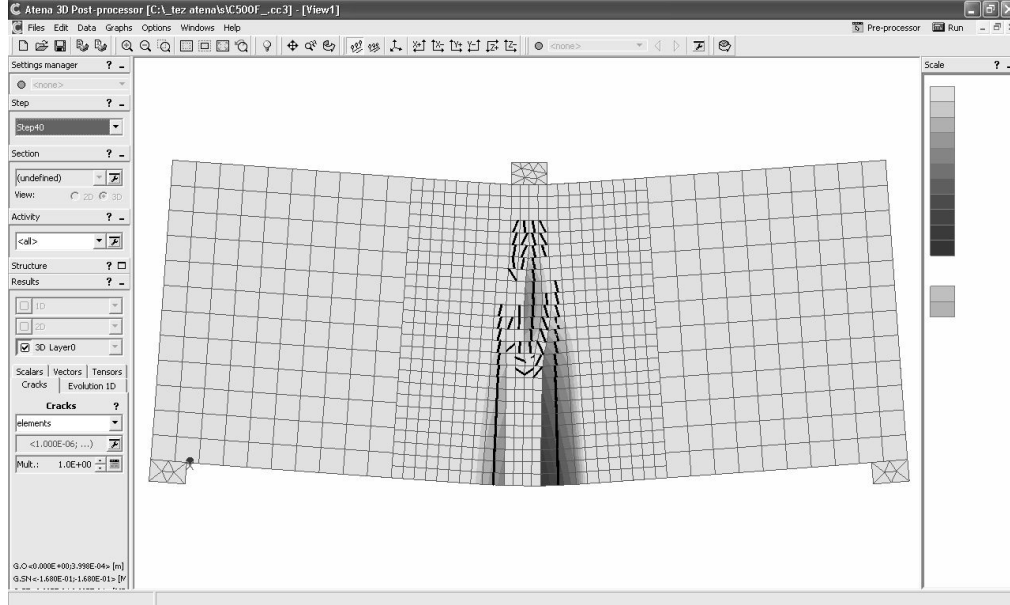
Resim 5.17. C500F kirişinin Atena 3D programı ile analizinin 40. adım görüntüsü

Resim 5.17’de analizin sona erdirildiği 40. adımdaki yük-yerdeğiştirme ile elemanda oluşan çatlak dağılımı gösterilmektedir. C500F kirişinin yapılan maksimum yük öncesi en fazla birim deformasyona maruz kalan bölgesi Resim 5.18’de gösterilmiştir. Olması beklendiği gibi kirişte göçmeye neden olan çatlak ilerlemesi orta bölgede maksimum momentin olduğu bölgeden başlayarak yükün olduğu noktaya kadar ulaşmıştır.



Resim 5.18. C500F kirişinin maksimum yük öncesi en fazla birim deformasyon yapan bölgesi

Resim 5.19’da kirişin orta-alt bölgesinde analizin sona erdirildiği adımdaki elemanda oluşan çatlaklar gösterilmektedir.



Resim 5.19. C500F kirişinin analiz sona erdirildiği adımdaki çatlak haritası

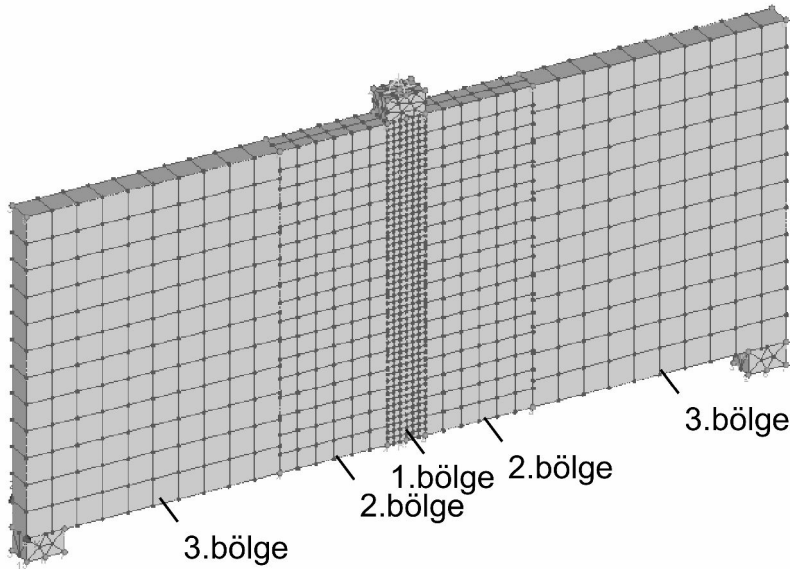
5.4. Yakınsama Analizi

Eleman ağının sıklığı sonuçlar üzerinde büyük etkiye sahip olmaktadır. Özellikle gerilme yığılmalarının oluşturduğu mesnet bölgesi yük etkiye noktası ve muhtemel çatlak oluşması beklenen bölgelerde ağ sıklaştırılması yapılması gerekmektedir. Eleman ağının gereğinden fazla sıklaştırılması ise eleman sayısının aşırı şekilde artmasına bunun sonucunda ise işlem zamanında aşırı uzamalara sebebiyet vermektedir. Ayrıca sonlu eleman boyutlarının temsil ettiği malzemenin boyutlarına uygun olarak seçilmesi de dikkat edilmesi gereken hususlar içerisinde yer almaktadır.

Yakınsama analizlerinde literatürdeki çalışma sonuçları incelendiğinde genellikle üç farklı durum söz konusudur. Bunlar elde edilen değerlerin optimum eleman sıklığına yaklaşıldığında yerel minima, yerel maksima veya asimptotik sonuçlar göstermesidir. Burada yapılan analizlerde elde edilen sonuçlarda asimptotik yani belirli bir değere yaklaşma tespit edilmiş ve bulgular ışığında ağ sıklığına karar verilmiştir. Örnek olması açısından $D=500$ mm olan çentiksiz kirişlerin modellemesinde farklı eleman ağı sıklıkları için sonuçlar irdelenmiş ve burada paylaşılmıştır.

C500F yani çentiksiz D=500 mm olan kirişlerin eleman ağı sıklaştırılmasında kirişler 3 farklı bölgeye ayrılmıştır. Eleman tipi olarak hexahedral (altı yüzlü) elemanlar kullanılmıştır. 1. bölge kuvvet uygulanan mesnet altı ve muhtemel çatlakların oluşacağı orta bölge, 2. bölge kiriş ortasından orta üst mesnet plakasının altından kirişin kalan diğer yarısının üçte birlik kısımdaki eleman ağı sıklaştırması ve 3. bölge ise kalan kaba eleman ağı bölgesidir. Optimum ağ sıklığını belirleyebilmek amacıyla beş farklı ağ sıklığı denemesi yapılmış ayrıca deney sonuçları ile kontrol edilmiştir.

Resim 5.20'de model kiriş üzerinde eleman sıklığı değiştirilen bölgeler gösterilmiştir. Bu bölgelerdeki eleman boyutları 10 mm ile 60 mm arasında değiştirilmiştir.



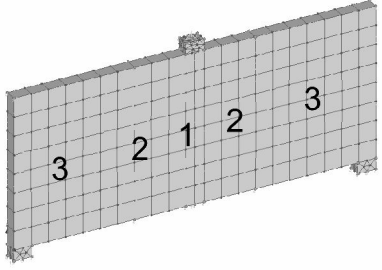
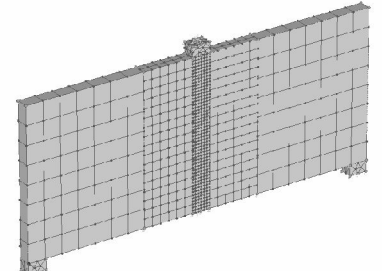
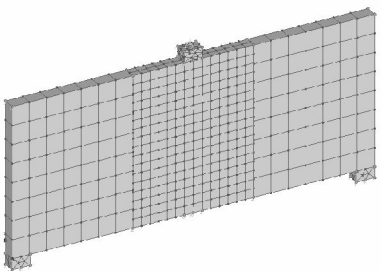
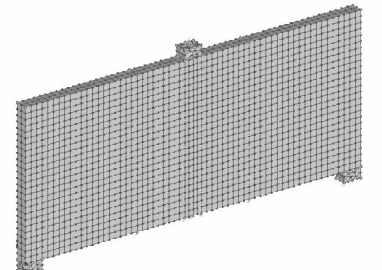
Resim 5.20. Model üzerinde eleman ağı bölgeleri

Eleman ağı sıklaştırılması bölgelerinin herbirinin 20 mm olması ve 40/30/10 mm olmaları durumlarında en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Eleman sıklığının tamamının 20mm olduğu en büyük kirişlerde eleman sayısı toplam 3316 adettir. Diğer 40/30/10 olması durumunda ise toplam 2064 adet hexahedral (düzgün altı yüzlü) eleman oluşturulmuştur. Eleman sayısının artması işlem süresini doğrudan etkilemektedir. Kritik bölgelerin (1 ve 2. bölgeler) dışında kalan ağın sıklaştırılması modelleme ve analizlerde işlem süresini aşırı şekilde uzatmaktadır. Bu yüzden analizlerde özellikle çentiksiz en büyük kirişlerde 40/30/10 tipi kullanılmıştır.

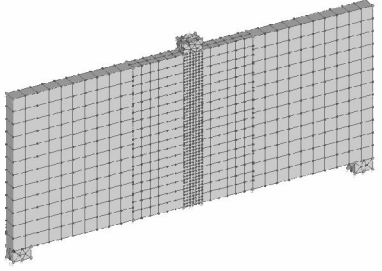
En büyük derinlikli kirişler dışındaki çentikli ve çentiksiz modellerin eleman ağları oluşturulurken uygun büyüklükte tetrahedral (dört yüzlü üçgen piramit) elemanlar kullanılmıştır.

D=500 mm olan kirişlerin çentikli tipleri farklı bölgelere ayrılarak hexahedral elemanlar kullanılmıştır.

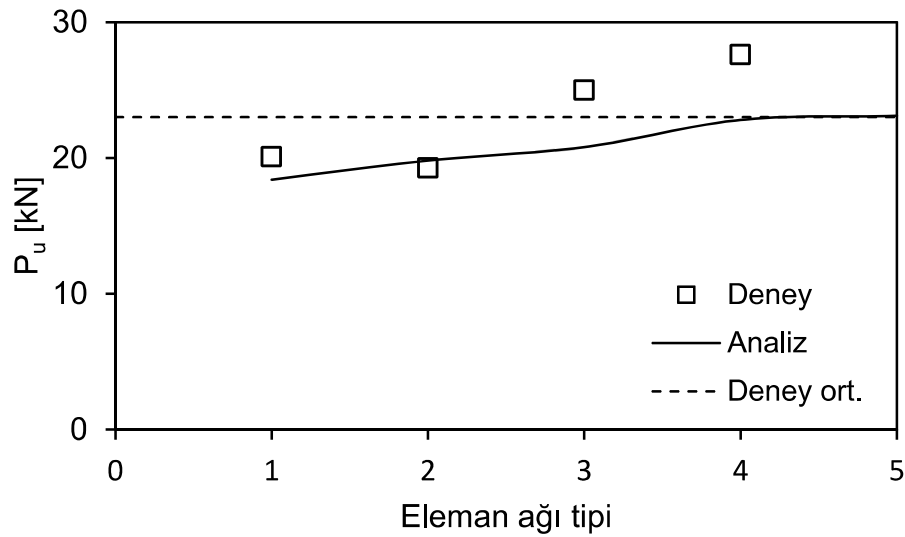
Çizelge 5.3. Yakınsama analizi sonuçları

No	Tip	Eleman ağı bölgesi			Eleman Sayısı	C500 - P_u analiz [kN]
		3	2	1		
1		60	60	60	392	18,4
2		60	30	10	1936	19,8
3		60	30	30	804	20,8
4		20	20	20	3316	22,8

Çizelge 5.3. (devam) Yakınsama analizi sonuçları

5		40	30	10	2064	23,1
---	---	----	----	----	------	------

Eleman ağı sıklıklarının sonuçları değerlendirilerek hangi tür ve sıklıkta yapılacağına karar verilmiştir.



Şekil 5.1. Eleman ağı sıklılaştırmasına bağılı en büyük taşıma gücü karşılaştırması

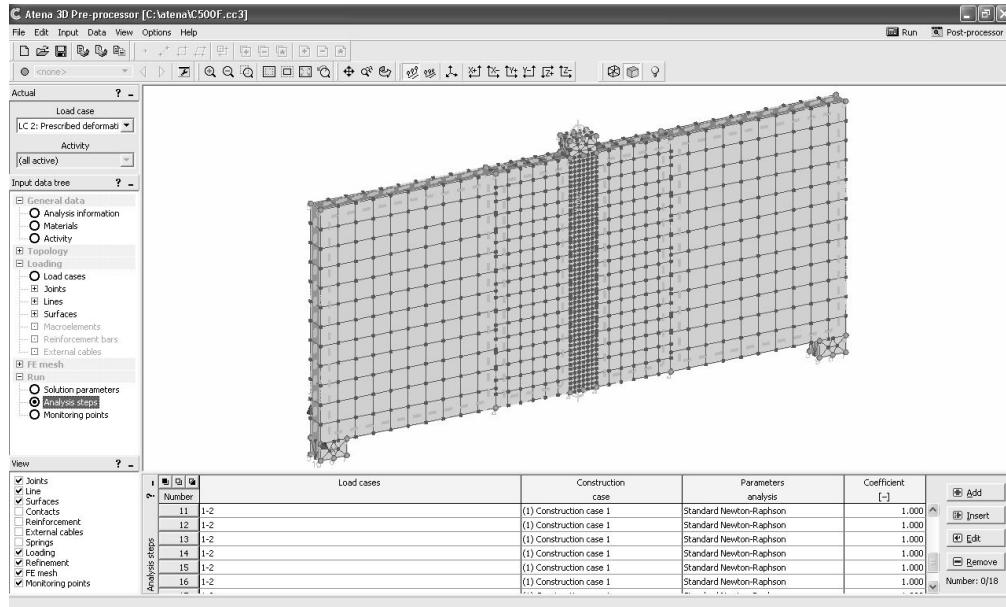
Yakınsama analizinde modelleme sonuçları farklı eleman ağı sıklıklarına bağılı olarak farklı değerler vermiş eleman sıklılığının belirli değerlerinde deney sonuçlarının ortalamasına asimptotik olarak yaklaştığı görölmüştür. Bu durum grafik halinde Şekil 5.1’de verilmiştir.

5.5. Eleman Ağları

Modellenen elemanların farklı boyut ve çentiklerde eleman ağı sıklılaştırmaları uygun şekilde yapılarak Resim 5.21-5.40 arasında verilmiştir.

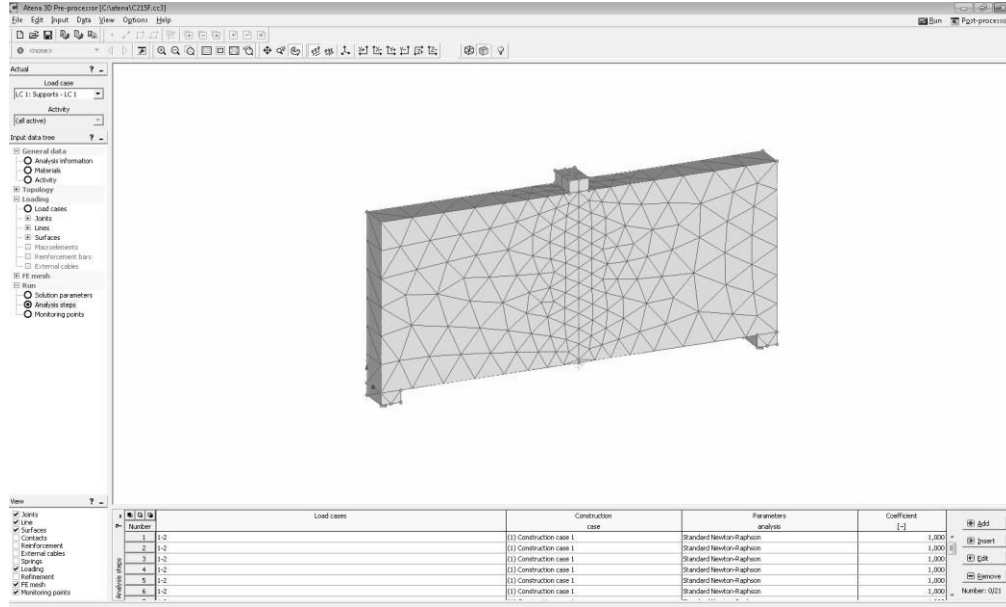
Resim 5.21’de D=500 mm olan çentiksiz kirişin eleman ağının oluşturulmuş hali görülmektedir. Kuvvetin uygulandığı ve muhtemel çatlak bölgesinde sıklaştırma uygulaması yapılmıştır.

Çelik mesnetler ve kuvvet tatbiki yapılan çelik parça da ayrıca tanımlanarak kuvvet ve reaksiyonun belirli bir bölgeye yayılması sağlanmış böylece tekillik(singularity) sorunu oluşturacak bölgelerden kaçınılmıştır.



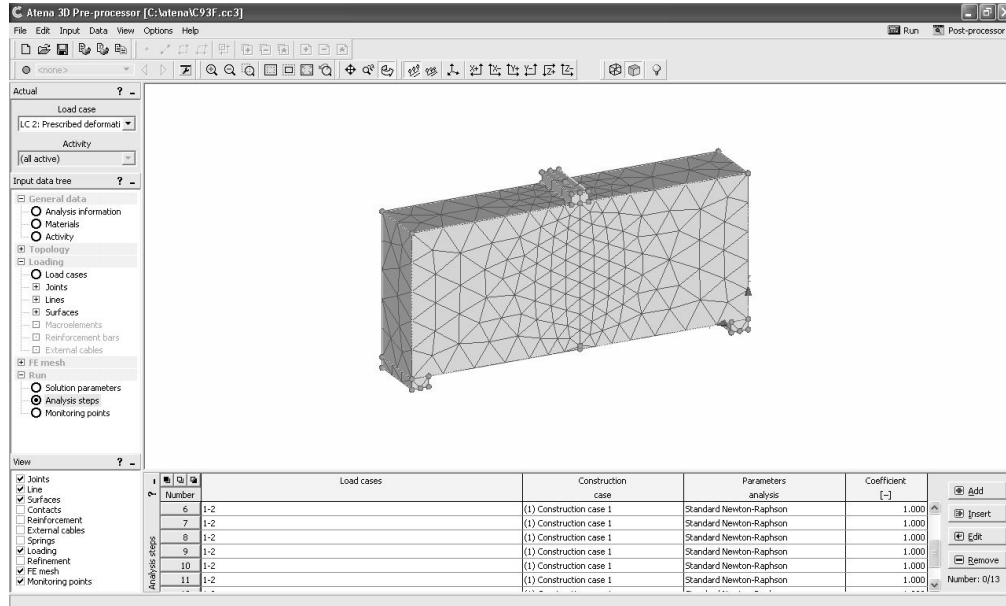
Resim 5.21. C500F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü

Yüksekliği en büyük olan (D=500 mm) çentikli kirişlerin dışında kalan kirişlerde ağ sıklaştırması yapılırken orta bölge çentiği kapsayacak şekilde sağ ve sol parça olmak üzere 5 kenara sahip alan ve derinliği ile birlikte hacim tanımlanmıştır. Geometrideki bu değişiklikten dolayı ağ oluşumu hexahedral (altı yüzlü) değil tetrahedral (dört yüzlü üçgen piramit) olarak yapılmıştır.



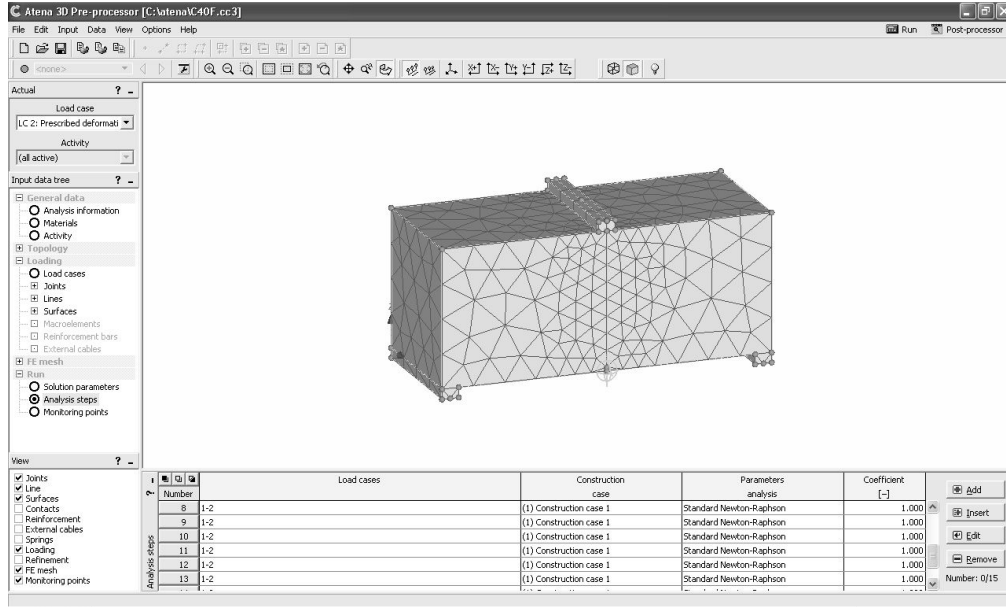
Resim 5.22. C215F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=215 mm olan çentiksiz kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.22’de gösterilmiştir.



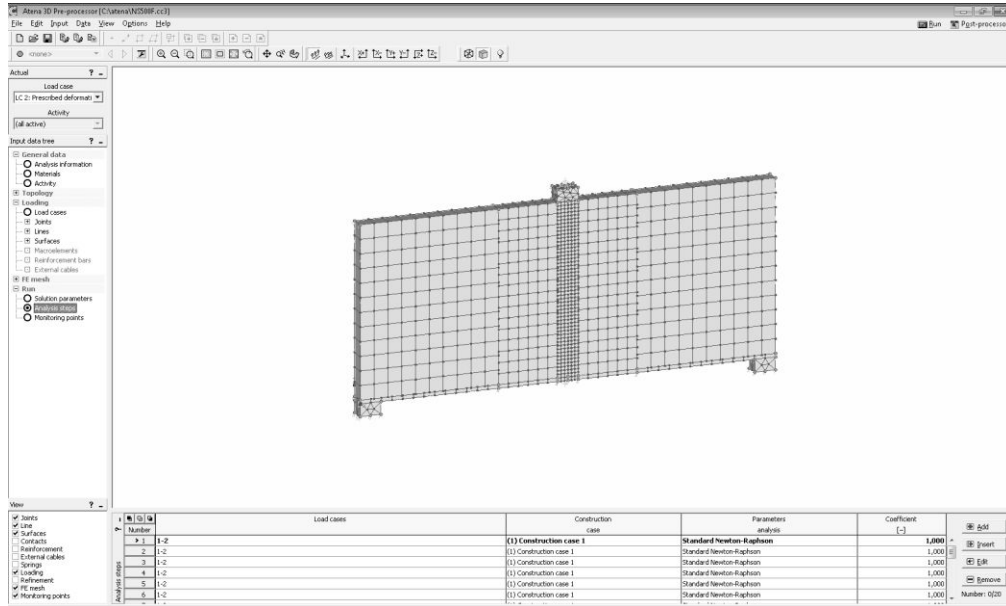
Resim 5.23. C93F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=93 mm olan çentiksiz kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.23’de gösterilmiştir.



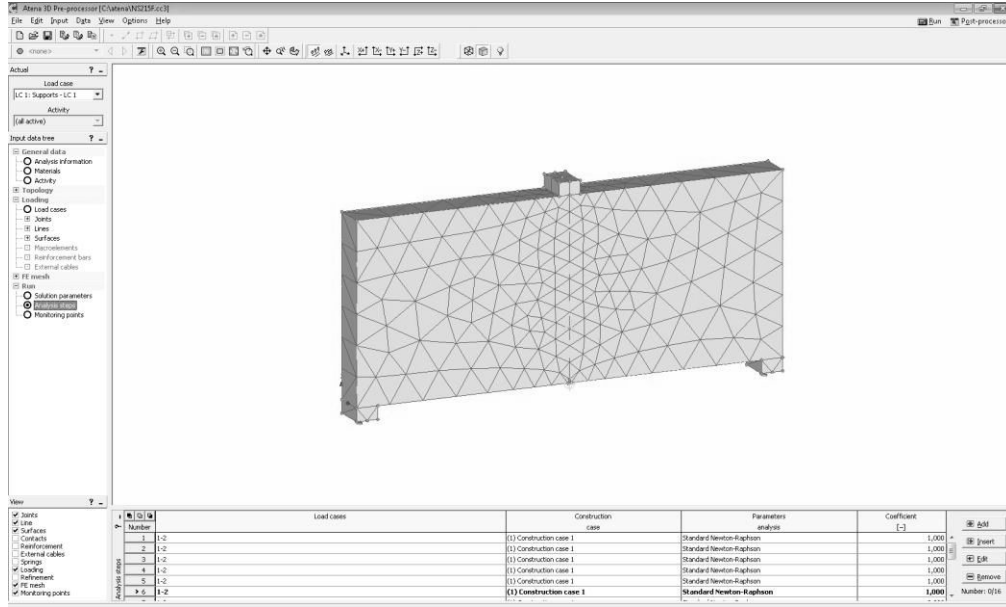
Resim 5.24. C40F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=40 mm olan çentiksiz kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.24'de gösterilmiştir.



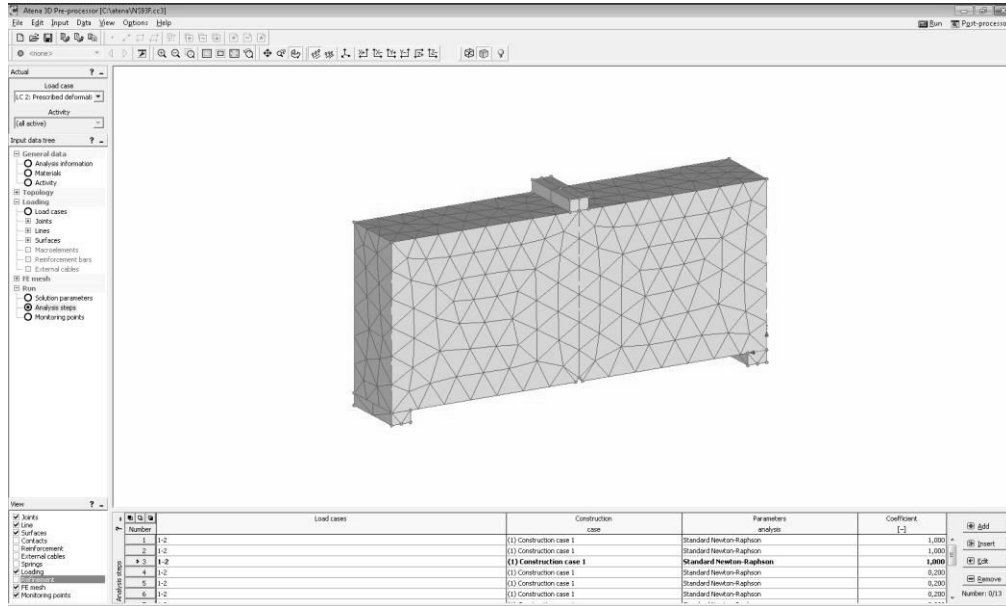
Resim 5.25. NS500F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=500 mm olan sığ çentikli kiriş modelinin hexahedral eleman ağı yapısı Resim 5.25'de gösterilmiştir.



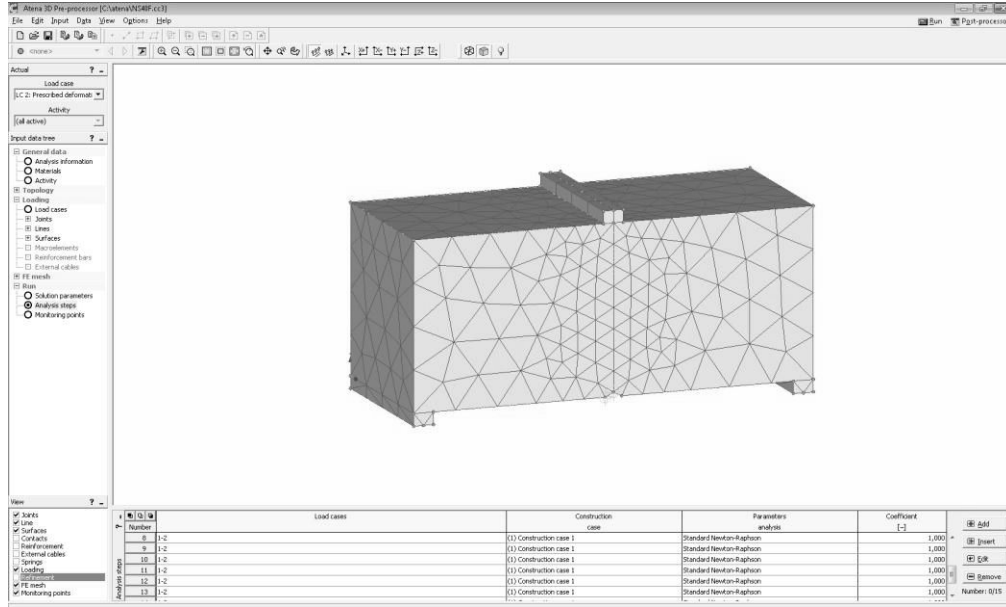
Resim 5.26. NS215F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=215 mm olan sığ çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.26'da gösterilmiştir.



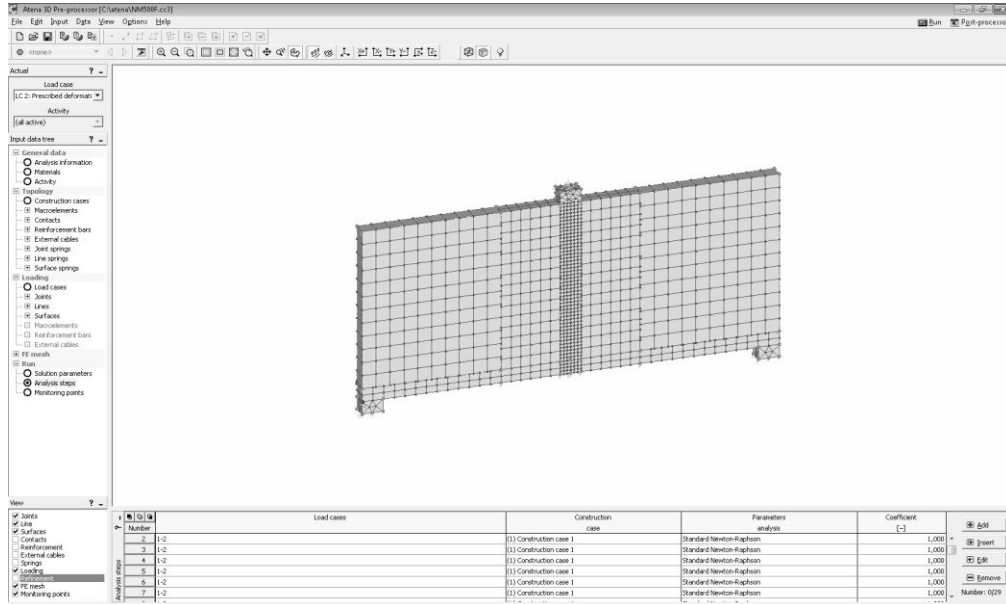
Resim 5.27. NS93F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=93 mm olan sığ çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.27'de gösterilmiştir.



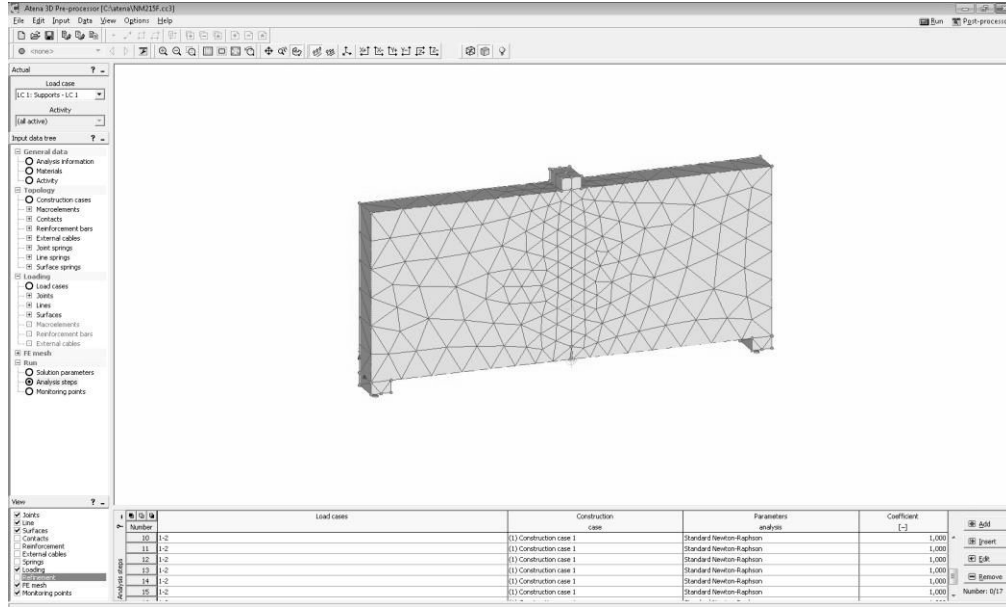
Resim 5.28. NS40F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=40 mm olan sığ çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.28’de gösterilmiştir.



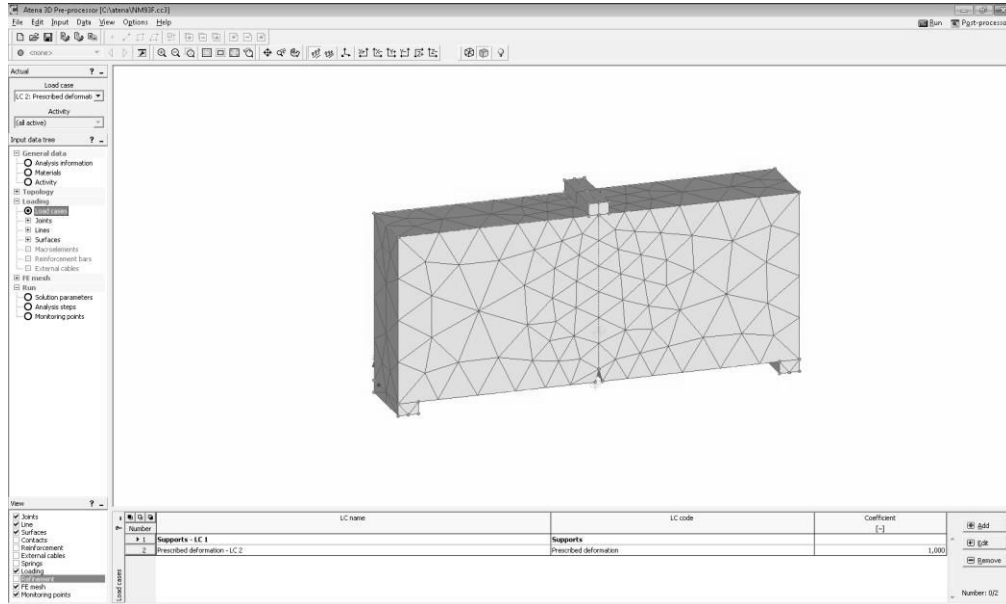
Resim 5.29. NM500F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=500 mm olan orta çentikli kiriş modelinin hexahedral eleman ağı yapısı Resim 5.29’da gösterilmiştir.



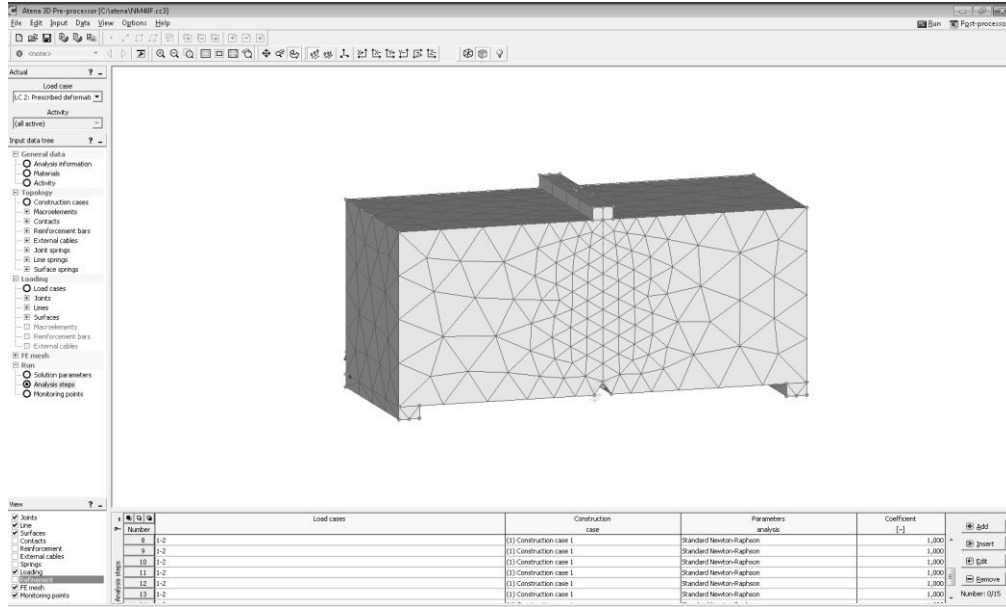
Resim 5.30. NM215F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=215 mm olan orta çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.30'da gösterilmiştir.



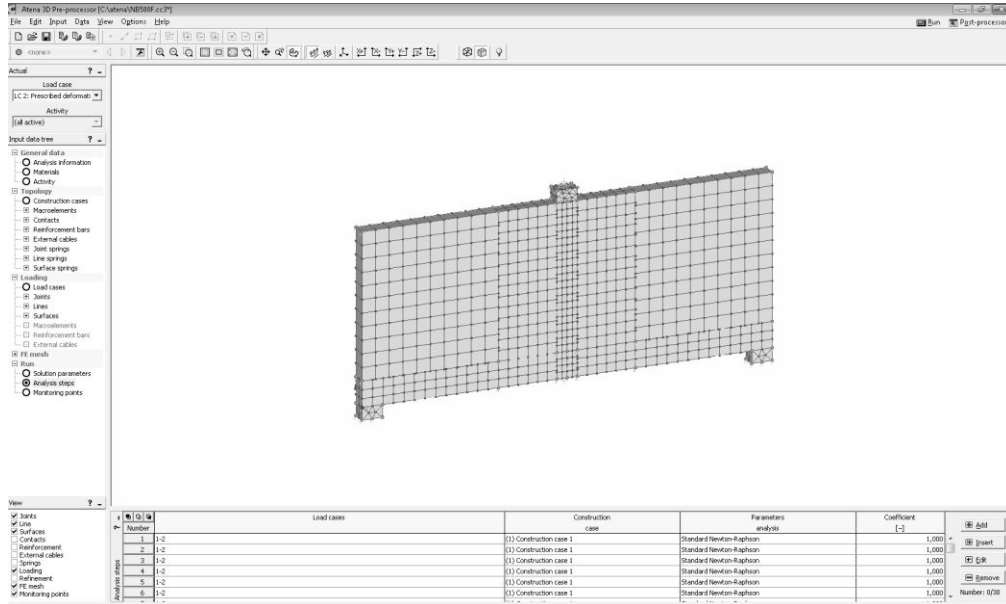
Resim 5.31. NM93F kirişi eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=93 mm olan orta çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.31'de gösterilmiştir.



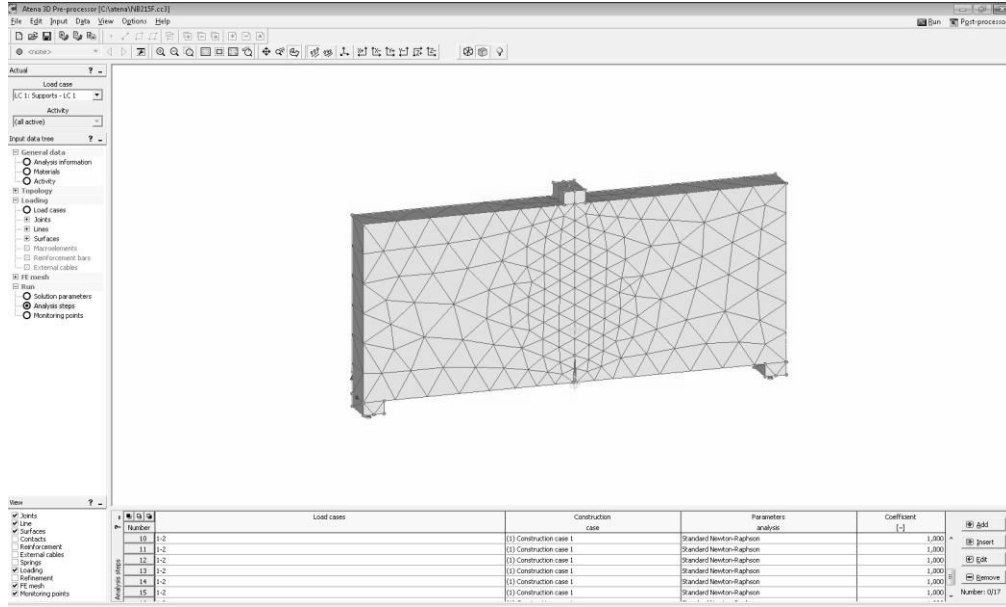
Resim 5.32. NM40F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=40 mm olan orta çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.32’de gösterilmiştir.



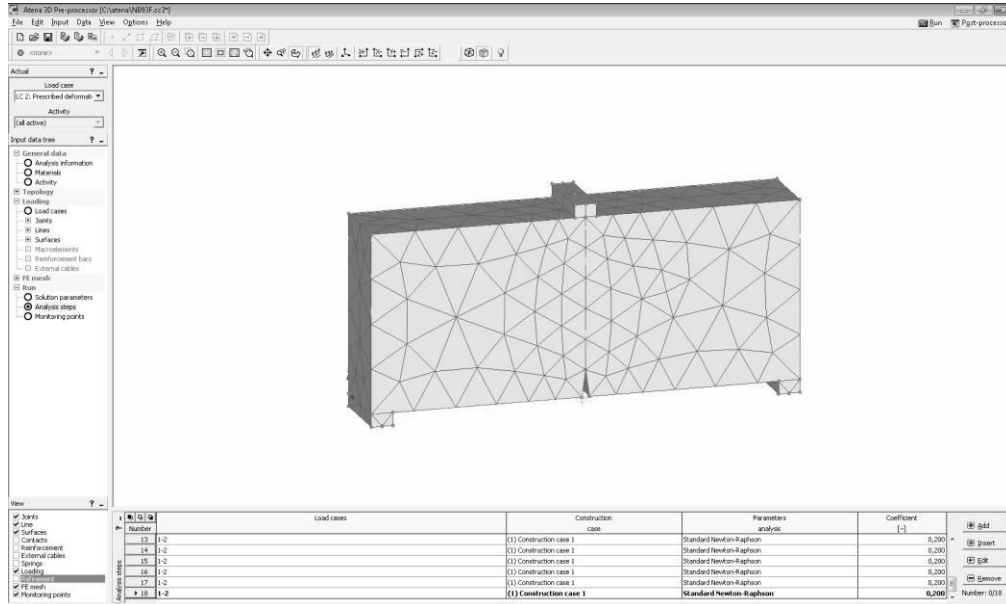
Resim 5.33. NB500F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=500 mm olan büyük çentikli kiriş modelinin hexahedral eleman ağı yapısı Resim 5.33’de gösterilmiştir.



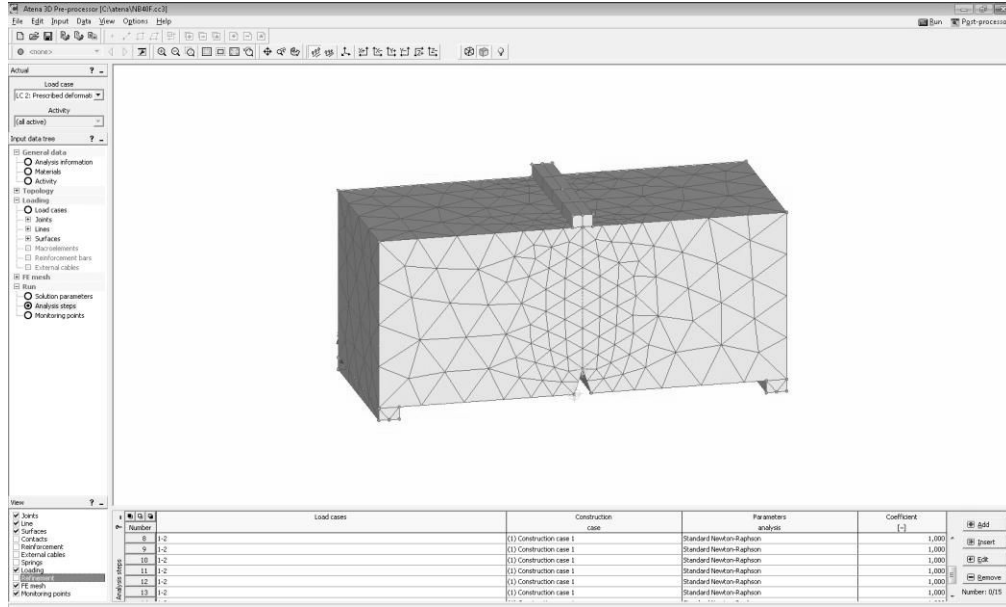
Resim 5.34. NB215F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=215 mm olan büyük çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.34'de gösterilmiştir.



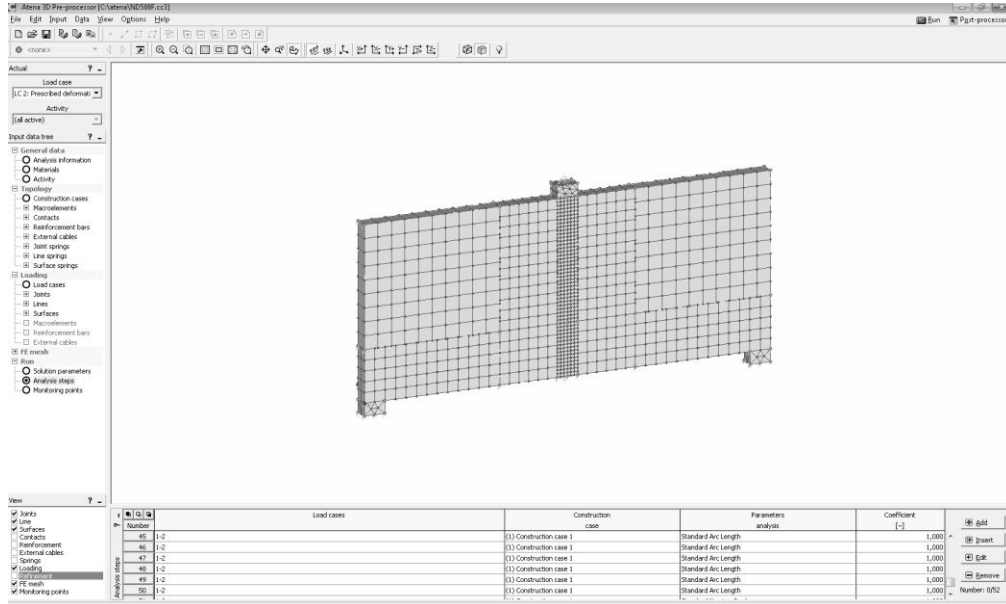
Resim 5.35. NB93F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=40 mm olan büyük çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.35'de gösterilmiştir.



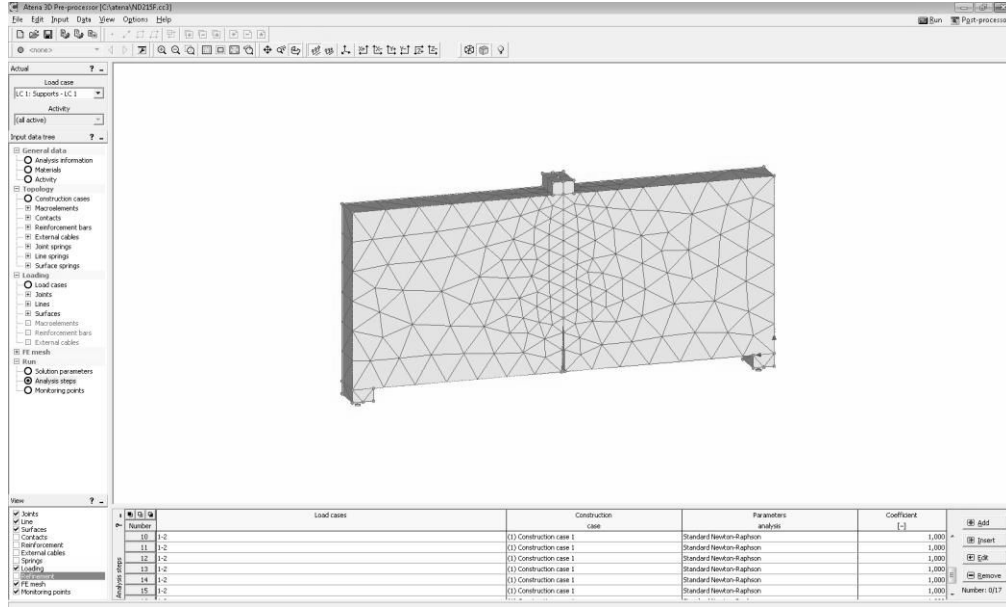
Resim 5.36. NB40F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=40 mm olan büyük çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.36'da gösterilmiştir.



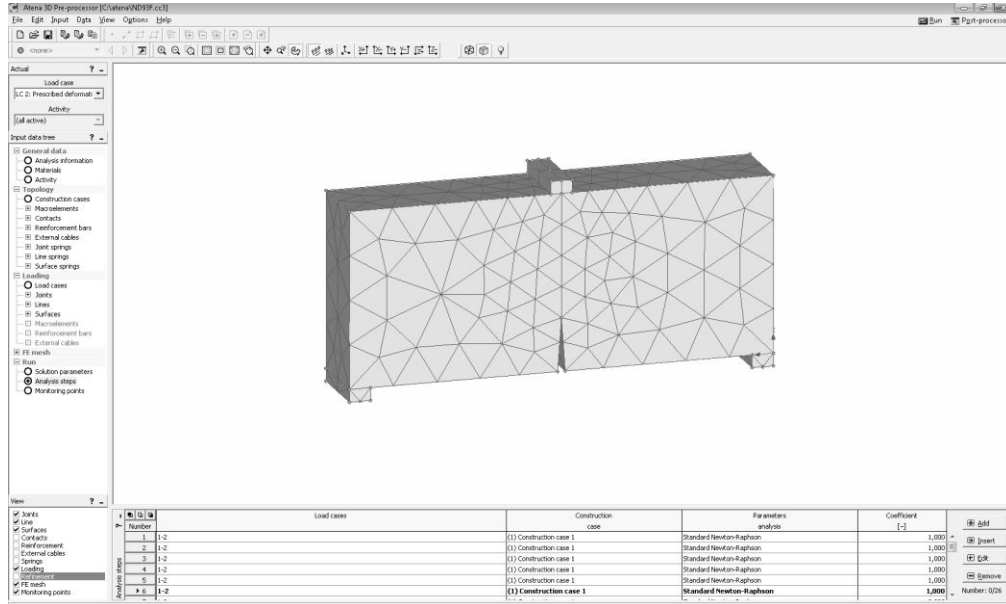
Resim 5.37. ND500F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=500 mm olan derin çentikli kiriş modelinin hexahedral eleman ağı yapısı Resim 5.37'de gösterilmiştir.



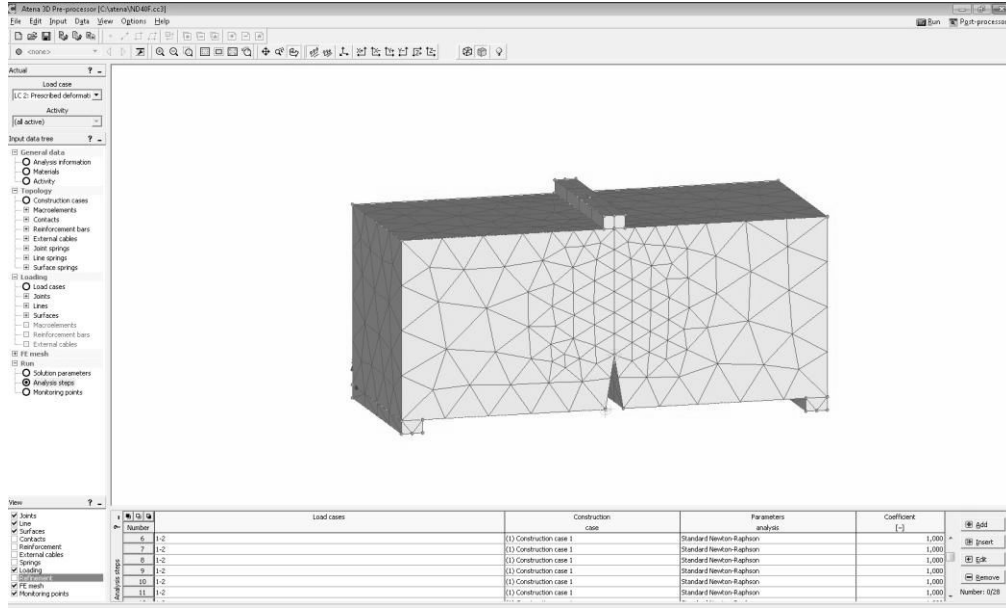
Resim 5.38. ND215F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=215 mm olan derin çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.38’de gösterilmiştir.



Resim 5.39. ND93F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=93 mm olan derin çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.39’da gösterilmiştir.



Resim 5.40. ND40F kiriş eleman ağı (mesh) görüntüsü

D=40 mm olan derin çentikli kiriş modelinin tetrahedral eleman ağı yapısı Resim 5.40'da gösterilmiştir.

5.6. Analiz Sonuçları

5.6.1. Kirişlerin deneysel ve analizlerden bulunan göçme yükleri

Deneylerden ve Atena 3D sonlu eleman programı ile yapılan analizlerden elde edilen kirişlerin göçme yükleri Çizelge 5.4-5.5'de verilmiştir.

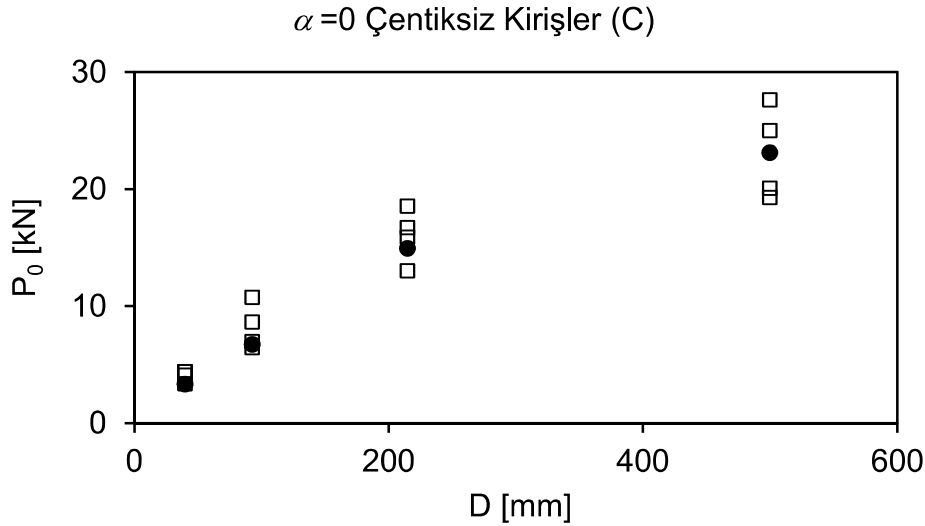
Çizelge 5.4. Çentik oranı 0-0,15 olan kirişlerin deneysel ve simulasyon sonuçları

Kiriş	D [mm]	α a/D	P_{0deney} [kN]	P_{0sim} [kN]	Kiriş	α a/D	P_0 [kN]	P_{0sim} [kN]
C1	500	--	20,07	23,1	NS1	0,02	18,97	21,1
C2	500	--	19,25		NS2	0,02	21,82	
C3	500	--	24,97		NS3	0,02	20,49	
C4	500	--	27,61		NS4	0,02	20,12	
C5	215	--	15,88	14,9	NS5	0,02	8,53	10,4
C6	215	--	12,99		NS6	0,02	6,65	
C7	215	--	16,70		NS7	0,02	7,73	
C8	215	--	18,55		NS8	0,02	8,53	
C9	93	--	10,84	6,7	NS9	0,02	5,51	5,5
C10	93	--	8,66		NS10	0,02	5,86	
C11	93	--	6,96		NS11	0,02	5,18	
C12	93	--	6,42		NS12	0,02	5,48	
C13	40	--	4,38	3,3	NS13	0,02	3,48	3,2
C14	40	--	4,38		NS14	0,02	4,47	
C15	40	--	3,33		NS15	0,02	3,99	
C16	40	--	4,08		NS16	0,02	3,90	
NM1	500	0,075	16,76	16,5	NB1	0,15	13,22	14,5
NM2	500	0,075	15,27		NB2	0,15	12,83	
NM3	500	0,075	13,79		NB3	0,15	13,79	
NM4	500	0,075	16,17		NB4	0,15	13,77	
NM5	215	0,075	10,02	8,6	NB5	0,15	7,73	8,4
NM6	215	0,075	7,70		NB6	0,15	6,29	
NM7	215	0,075	7,55		NB7	0,15	7,07	
NM8	215	0,075	8,48		NB8	0,15	9,62	
NM9	93	0,075	5,32	5,0	NB9	0,15	3,84	4,6
NM10	93	0,075	4,75		NB10	0,15	4,47	
NM11	93	0,075	4,21		NB11	0,15	4,70	
NM12	93	0,075	4,96		NB12	0,15	5,06	
NM13	40	0,075	3,23	3,0	NB13	0,15	2,99	2,8
NM14	40	0,075	3,30		NB14	0,15	2,69	
NM15	40	0,075	3,35		NB15	0,15	3,06	
NM16	40	0,075	3,44		NB16	0,15	2,43	

Çizelge 5.5. Çentik oranı 0,30 olan kirişlerin deneysel ve simulasyon sonuçları

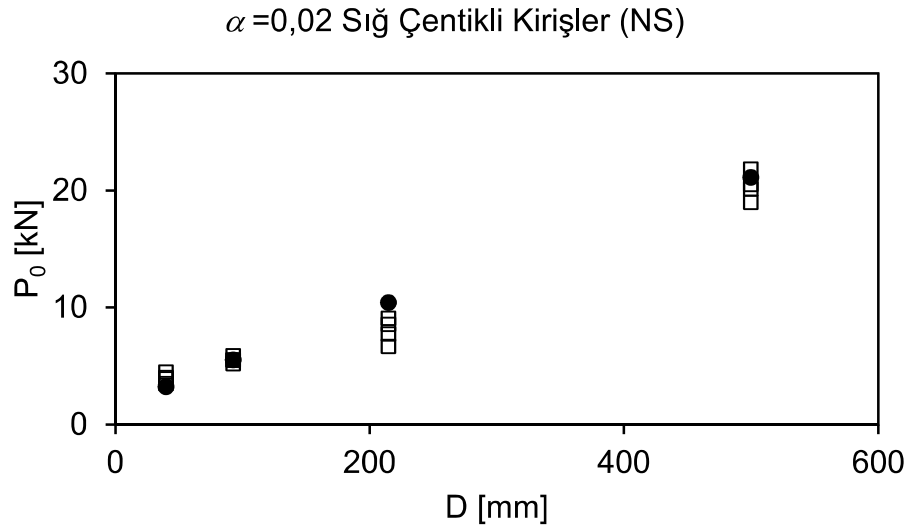
Kiriş	D [mm]	α a/D	$P_{0\text{deney}}$ [kN]	$P_{0\text{sim}}$ [kN]
ND1	500	0,3	11,34	11,5
ND2	500	0,3	11,38	
ND3	500	0,3	10,83	
ND4	500	0,3	11,54	
ND5	215	0,3	6,84	6,7
ND6	215	0,3	7,05	
ND7	215	0,3	6,60	
ND8	215	0,3	8,04	
ND9	93	0,3	3,30	3,5
ND10	93	0,3	4,86	
ND11	93	0,3	2,90	
ND12	93	0,3	2,76	
ND13	40	0,3	1,78	1,7
ND14	40	0,3	1,66	
ND15	40	0,3	1,40	
ND16	40	0,3	1,62	

Çentik oranı 0,30 olan kirişlerin deneysel ve Atena 3D göçme yükleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.



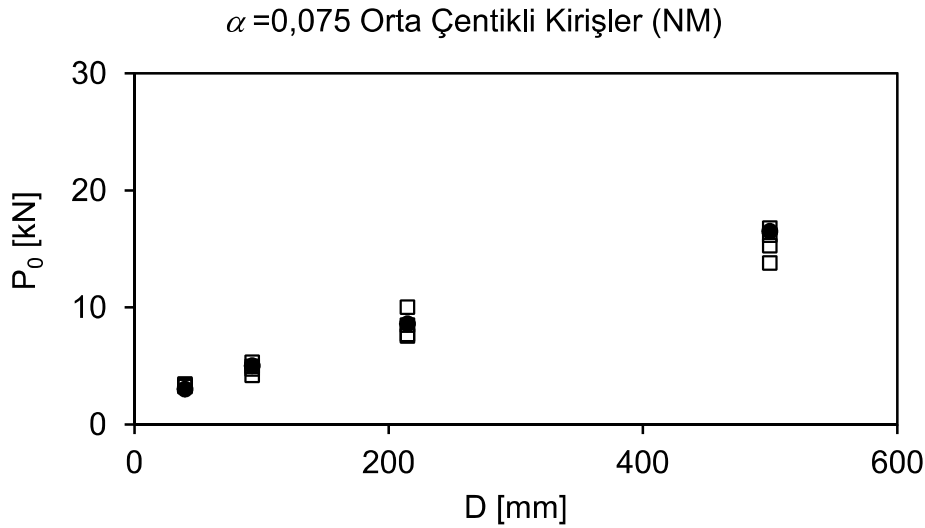
Şekil 5.2. Çentiksiz (C) kirişlerinde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları

Çentiksiz ($\alpha=0$) kirişlerin karakteristik boyut D 'ye bağlı deneysel ve Atena 3D analizi sonucu göçme yükleri Şekil 5.2’de verilmiştir. İçi boş kare ile gösterilenler elemanların deney sonucu içi dolu daire ise Atena 3D analiz sonucudur.



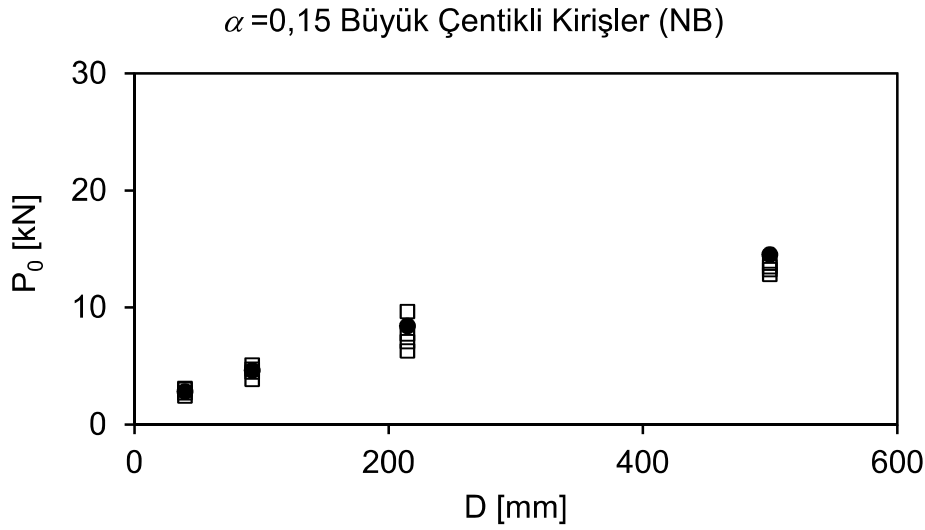
Şekil 5.3. Sığ çentikli (NS) kirişlerde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları

Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) kirişlerin karakteristik boyut D'ye bağlı deneysel ve Atena 3D analizi sonucu göçme yükleri Şekil 5.3'de verilmiştir. İçi boş kare ile gösterilenler elemanların deney sonucu içi dolu daire ise Atena 3D analiz sonucudur.



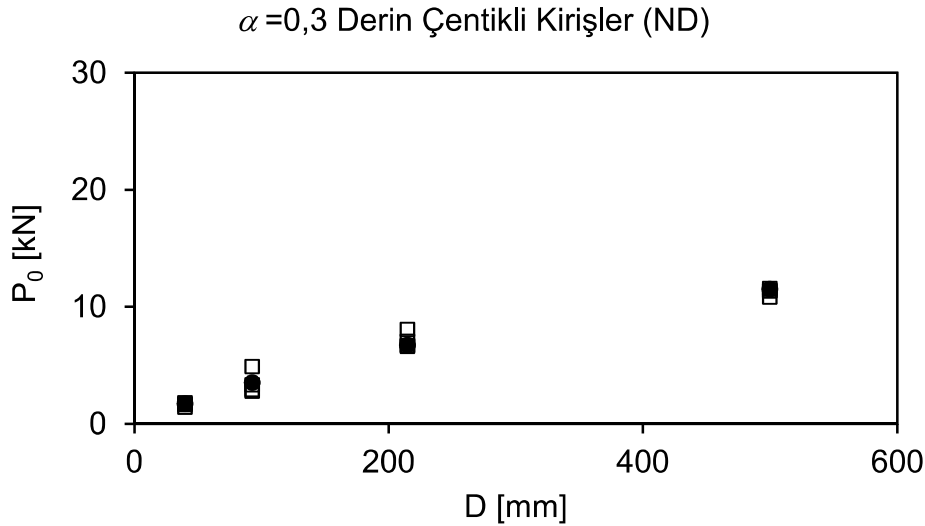
Şekil 5.4. Orta çentikli (NM) kirişlerde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları

Orta çentikli ($\alpha=0,075$) kirişlerin karakteristik boyut D'ye bağlı deneysel ve Atena 3D analizi sonucu göçme yükleri Şekil 5.4'de verilmiştir. İçi boş kare ile gösterilenler elemanların deney sonucu içi dolu daire ise Atena 3D analiz sonucudur.



Şekil 5.5. Büyük çentikli (NB) kirişlerde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları

Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) kirişlerin karakteristik boyut D'ye bağlı deneysel ve Atena 3D analizi sonucu göçme yükleri Şekil 5.5'de verilmiştir. İçi boş kare ile gösterilenler elemanların deney sonucu içi dolu daire ise Atena 3D analiz sonucudur.

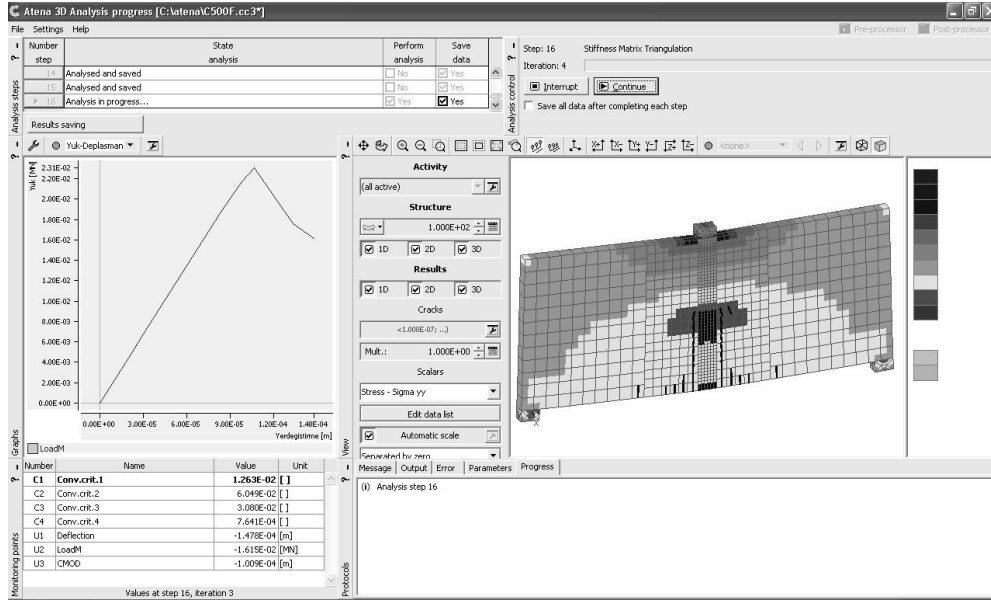


Şekil 5.6. Derin çentikli (ND) kirişlerde deneysel ve Atena 3D analiz sonuçları

Derin çentikli ($\alpha=0,3$) kirişlerin karakteristik boyut D'ye bağlı deneysel ve Atena 3D analizi sonucu göçme yükleri Şekil 5.6'da verilmiştir. İçi boş kare ile gösterilenler elemanların deney sonucu içi dolu daire ise Atena 3D analiz sonucudur.

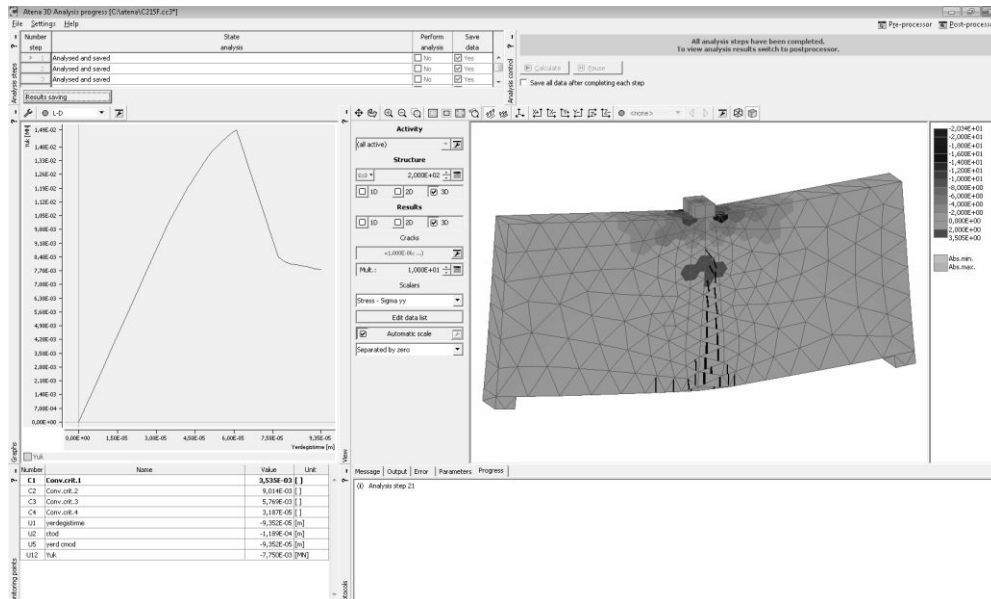
5.6.2. Analiz sonrası yük-yerdeğiştirme eğrileri ve gerilme, çatlak resimleri

Atena 3D programı ile yapılan analizlerde göçme yüklerinden sonra çözüm adımları durdurulmuş analizlerin yük yerdeğiştirme ve gerilmeleri Resim 5.40-5.59'da verilmiştir.



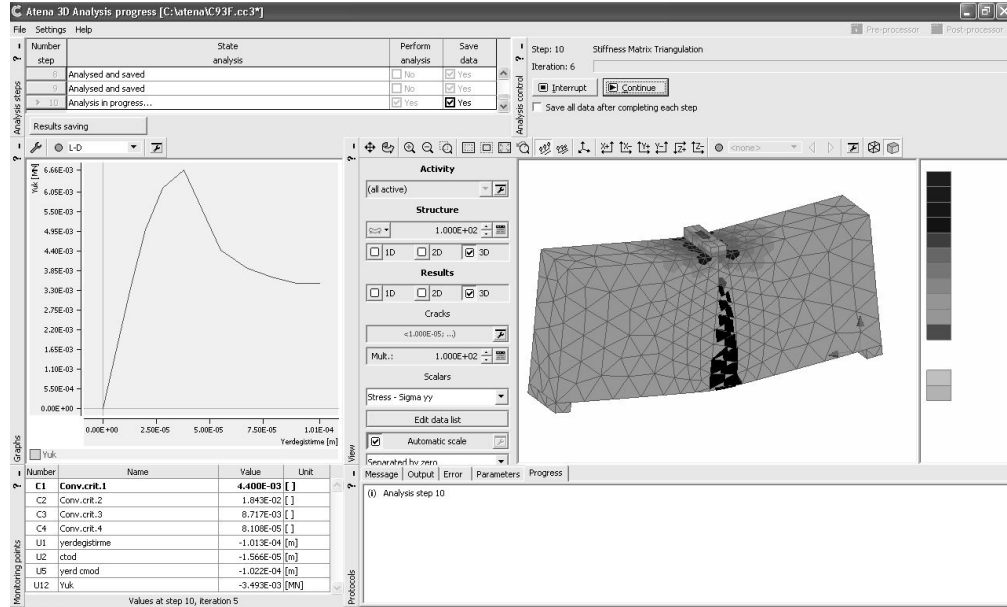
Resim 5.41. C500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=500 mm olan çentiksiz kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.41'de görülmektedir.



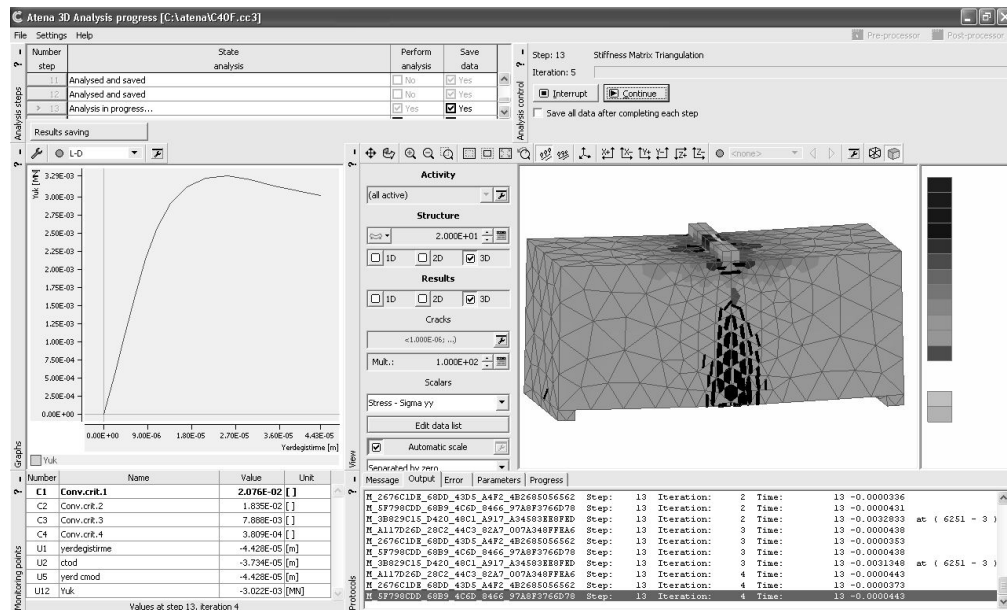
Resim 5.42. C215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=215 mm olan çentiksiz kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasındaki çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.42’de görülmektedir.



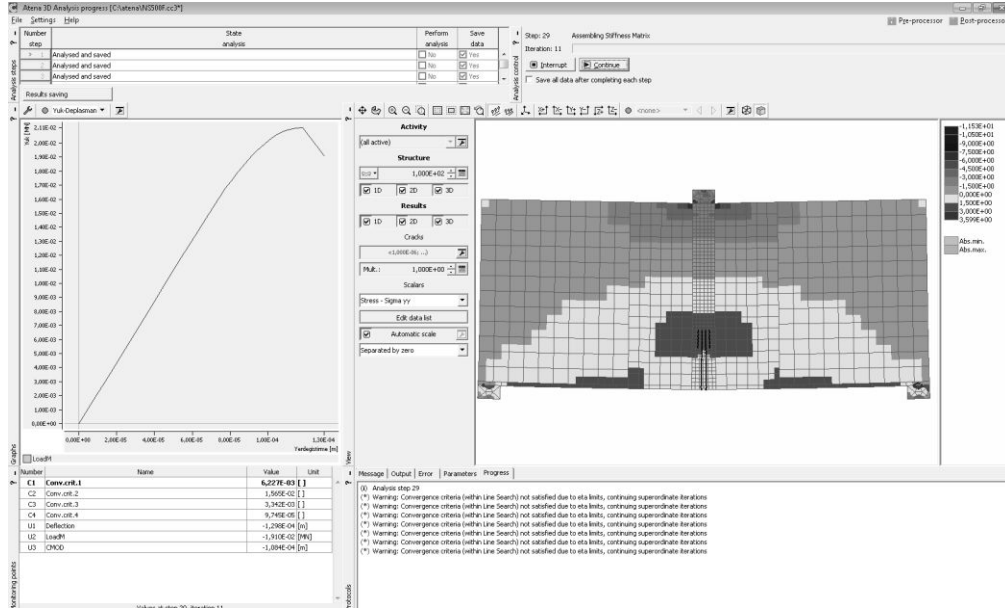
Resim 5.43. C93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=93 mm olan çentiksiz kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasındaki çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.43’de görülmektedir.



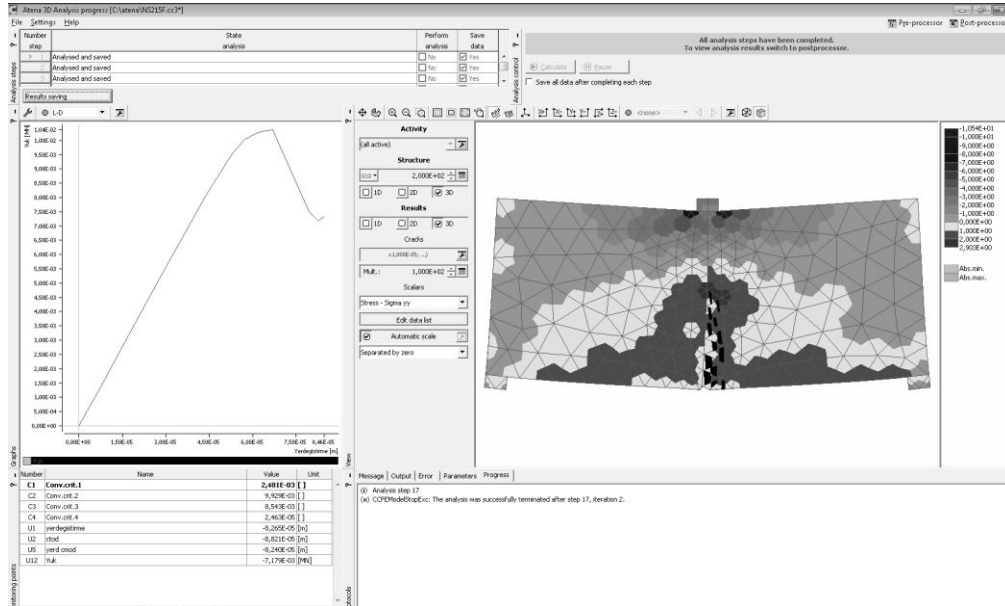
Resim 5.44. C40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=40 mm olan çentiksiz kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasındaki çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.44’de görülmektedir.



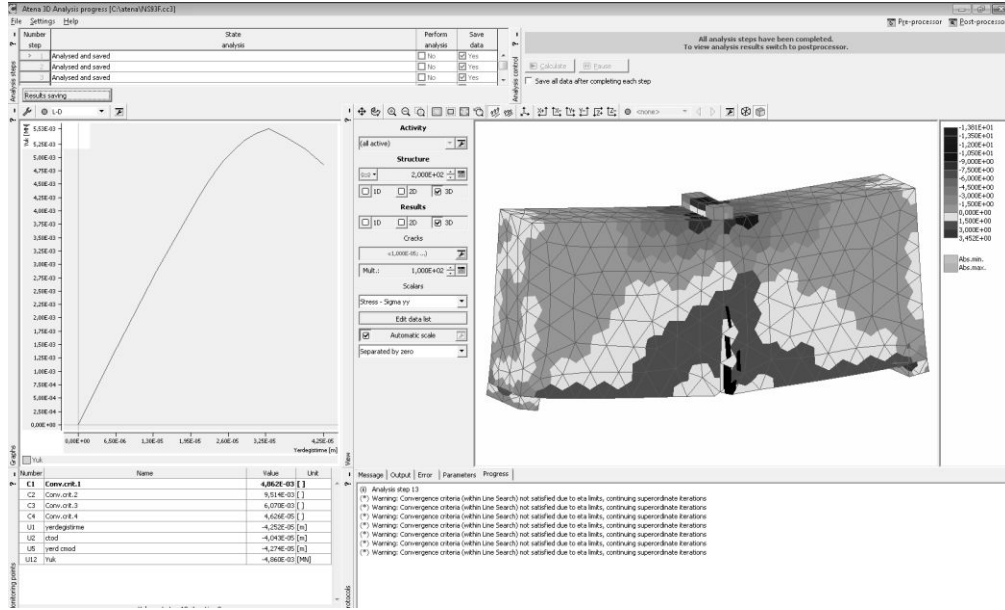
Resim 5.45. NS500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=500 mm olan sığ çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.45'de görülmektedir.



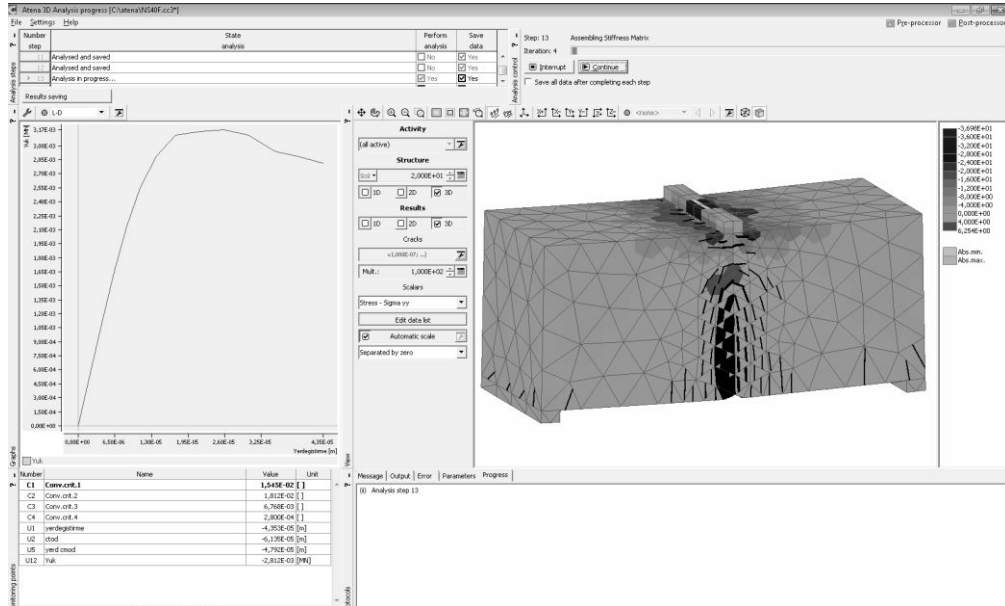
Resim 5.46. NS215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=215 mm olan sığ çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.46'da görülmektedir.



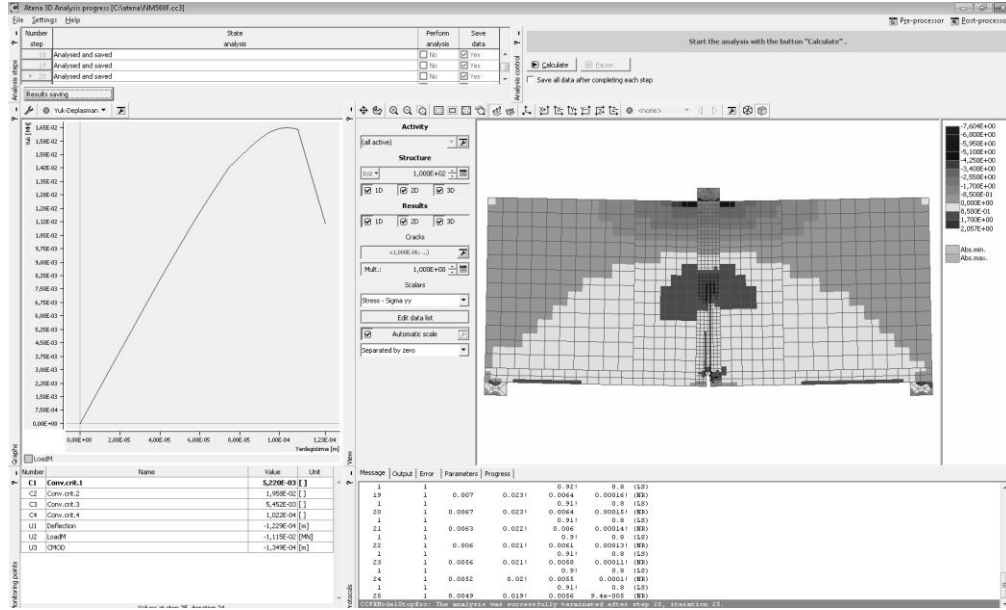
Resim 5.47. NS93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=93 mm olan sığ çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.47'de görülmektedir.



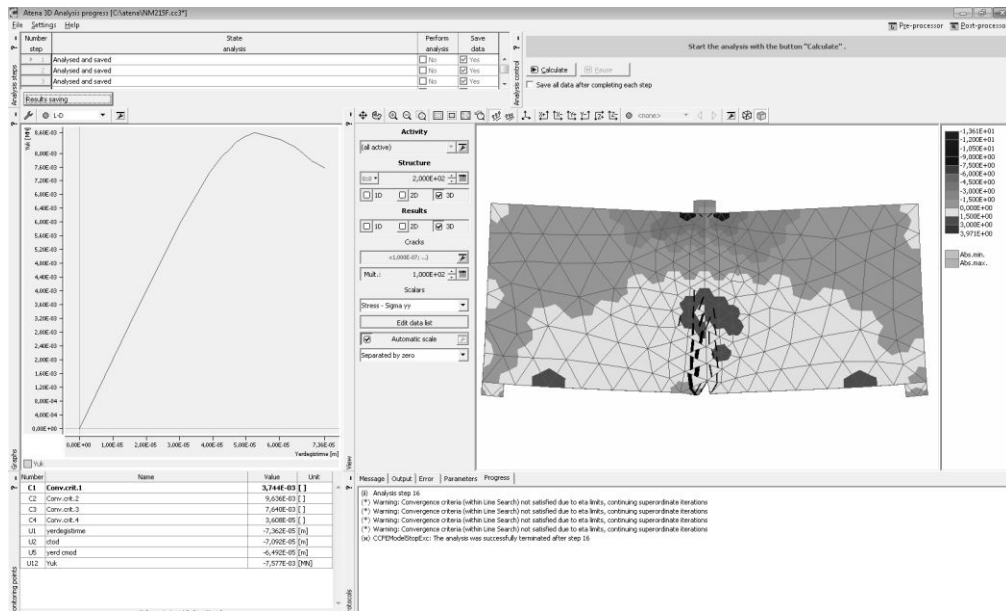
Resim 5.48. NS40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=40 mm olan sığ çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.48'de görülmektedir.



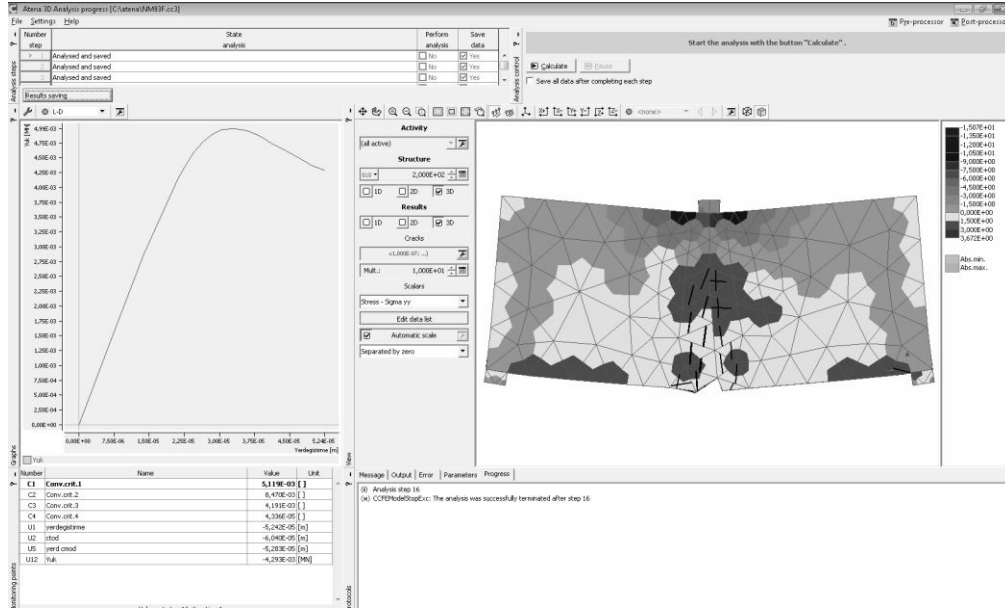
Resim 5.49. NM500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=500 mm olan orta çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.49'da görülmektedir.



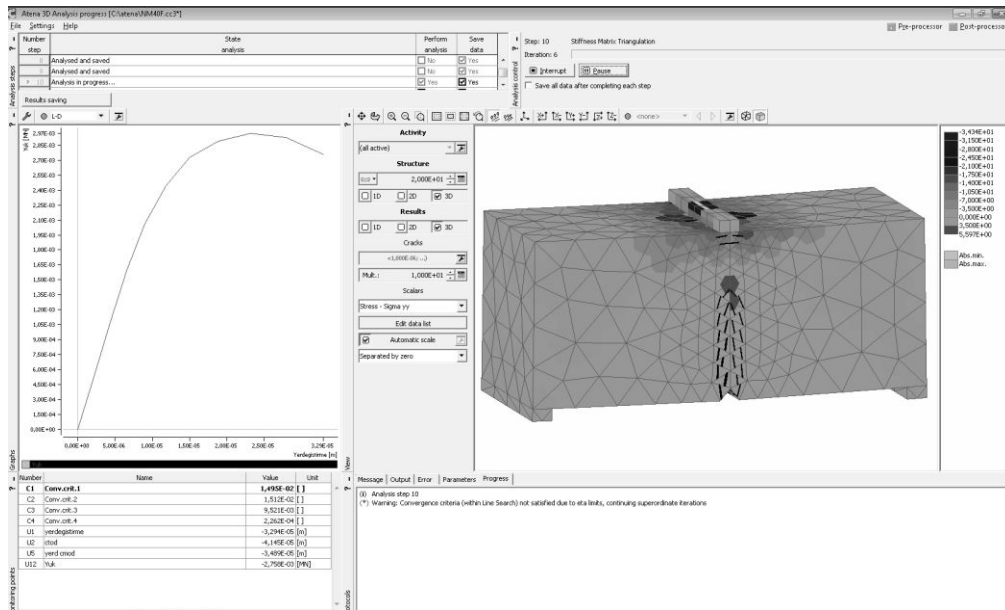
Resim 5.50. NM215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=215 mm olan orta çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.50'de görülmektedir.



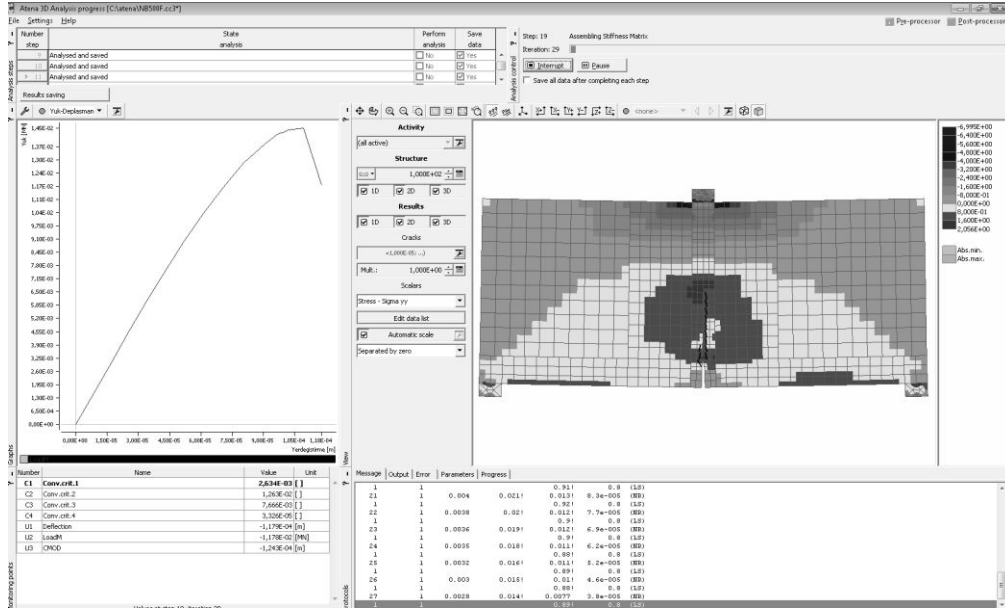
Resim 5.51. NM93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=93 mm olan orta çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasındaki çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.51’de görülmektedir.



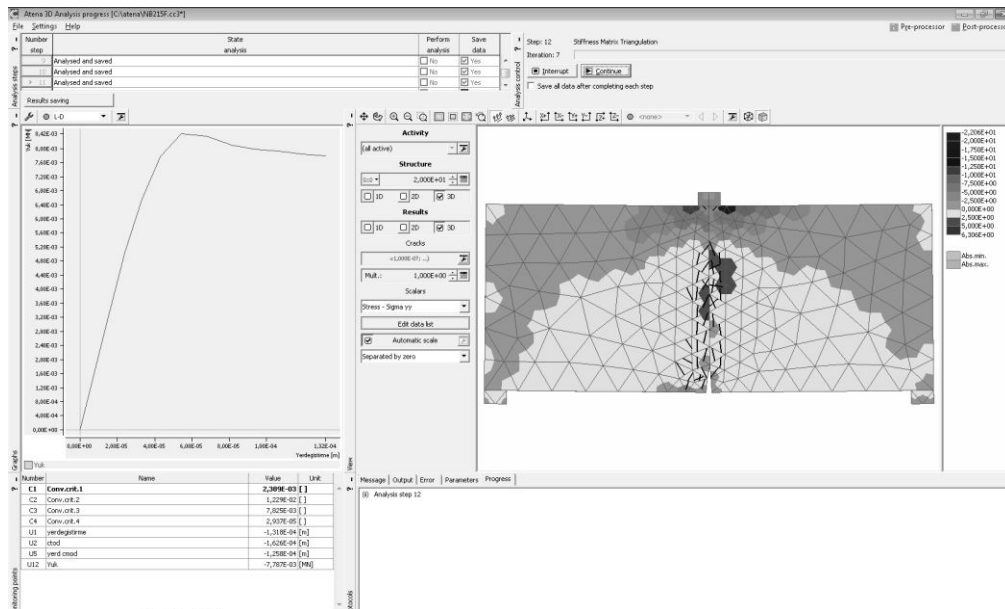
Resim 5.52. NM40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=40 mm olan orta çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasındaki çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.52’de görülmektedir.



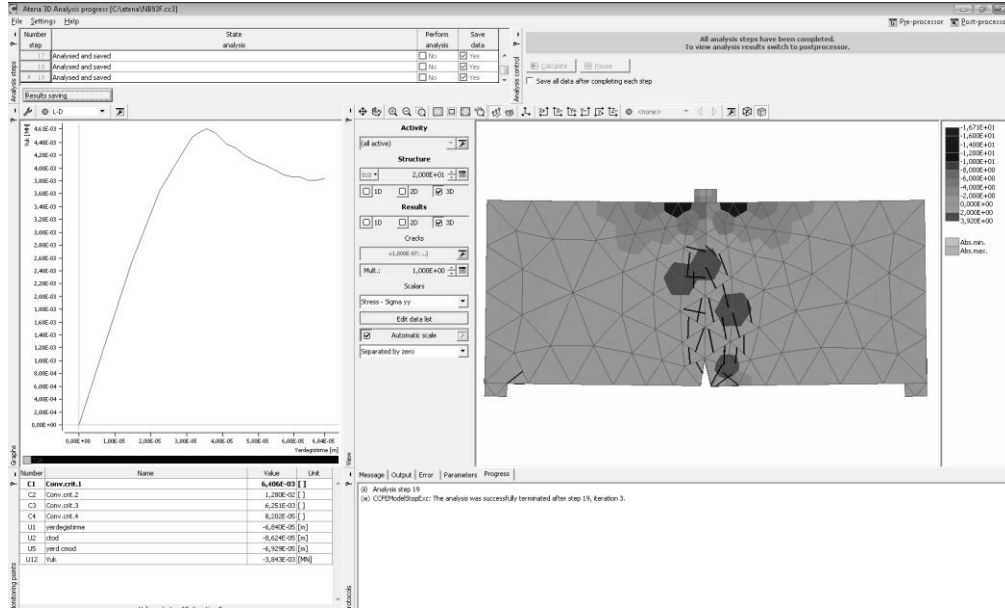
Resim 5.53. NB500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=500 mm olan büyük çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.53'de görülmektedir.



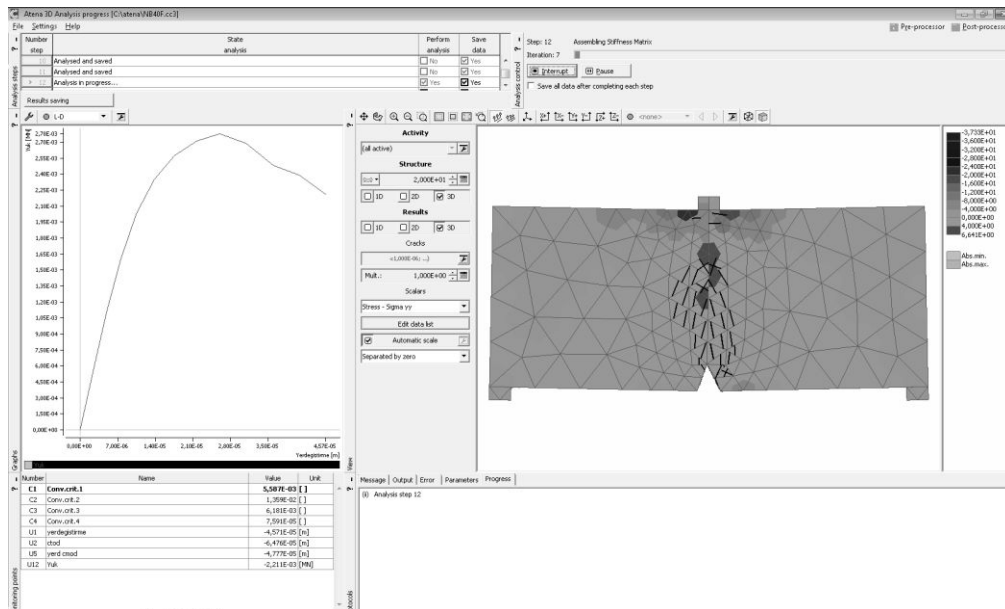
Resim 5.54. NB215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=215 mm olan büyük çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.54'de görülmektedir.



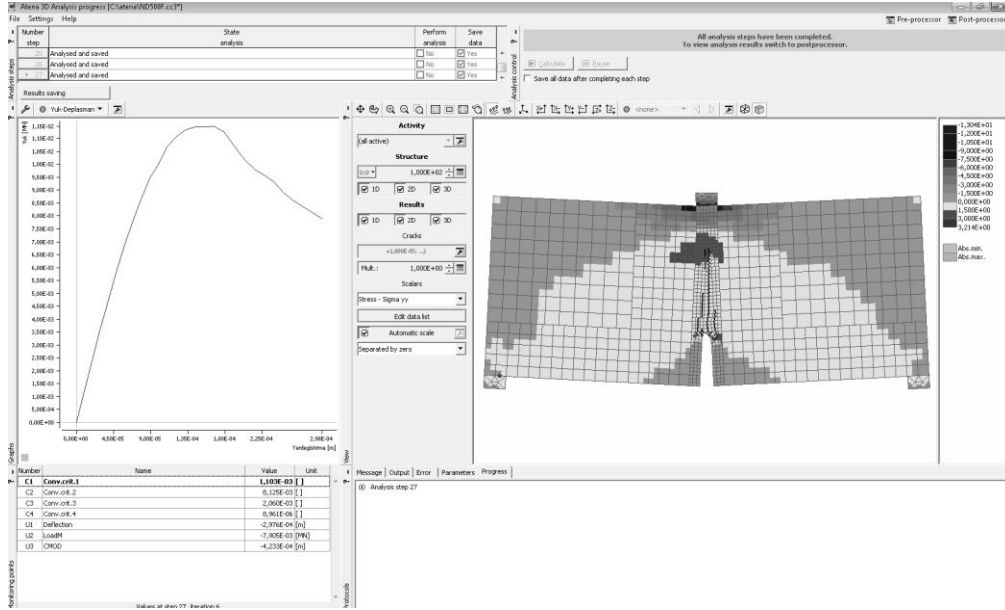
Resim 5.55. NB93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=93 mm olan büyük çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.55'de görülmektedir.



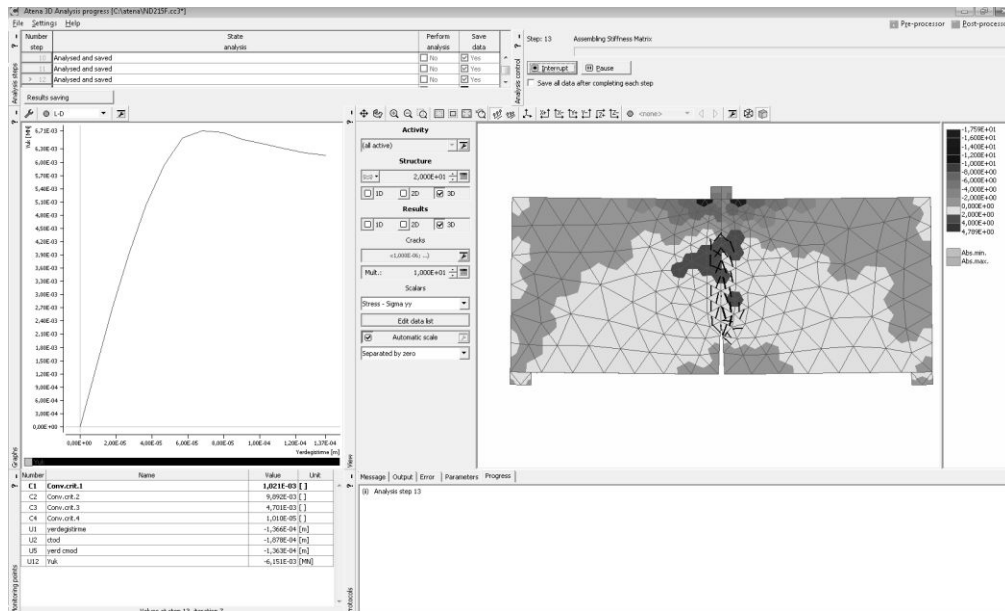
Resim 5.56. NB40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=40 mm olan büyük çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.56'da görülmektedir.



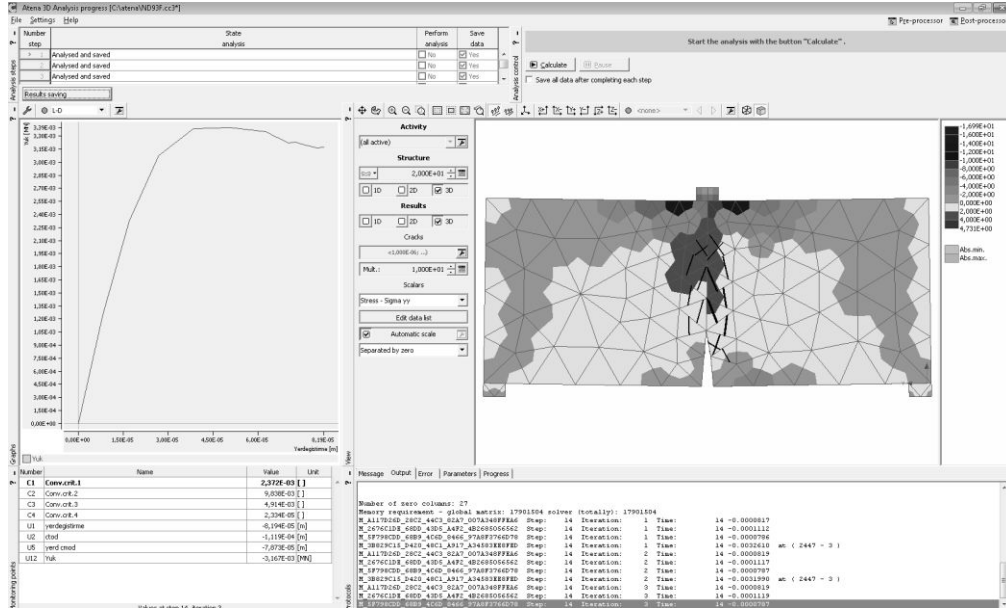
Resim 5.57. ND500F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=500 mm olan derin çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.57'de görülmektedir.



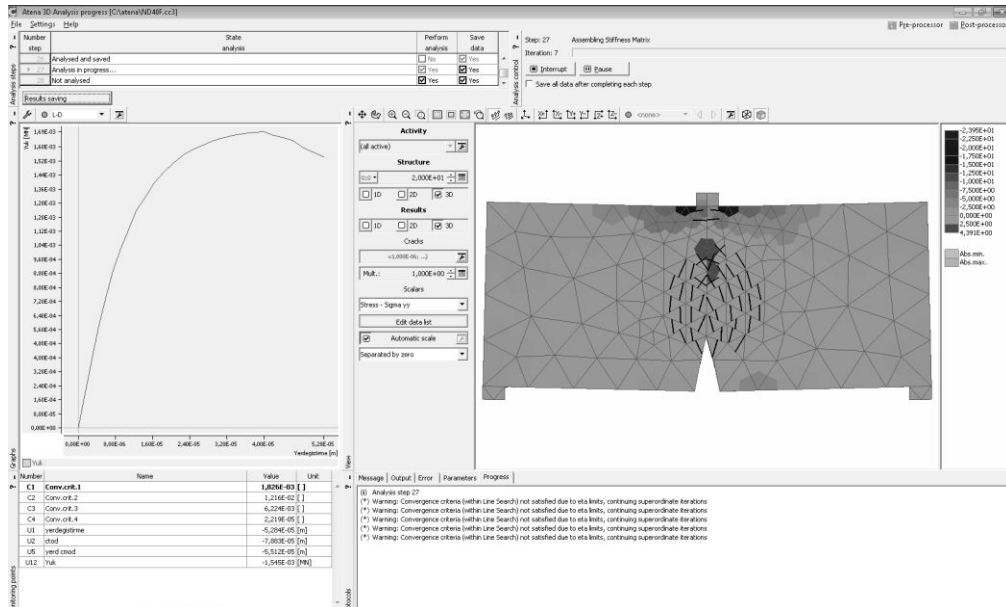
Resim 5.58. ND215F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=215 mm olan derin çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.58'de görülmektedir.



Resim 5.59. ND93F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=93 mm olan derin çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.59'da görülmektedir.



Resim 5.60. ND40F kirişi analiz sonrası yük-yerdeğiştirme grafiği

D=93 mm olan derin çentikli kirişin yük-yerdeğiştirmesi ve analiz ekranındaki çatlak ilerlemesi sırasında çatlak ucu gerilme yığılması Resim 5.60'da görülmektedir.

6. BULGULARIN KARŞILAŞTIRILMASI

6.1. Boyut ve Çentik Oranı Etkilerinin Karşılaştırılması

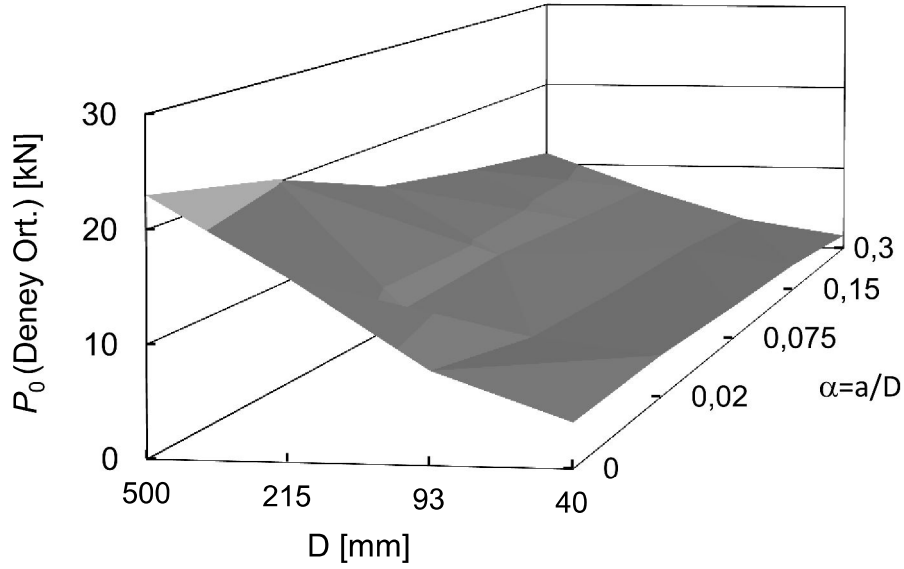
Dört grup çentikli ve bir grup çentiksiz beş farklı çentik derinliğine ve 4 farklı geometriye sahip kiriş grubunun göçme yükleri Atena 3D programıyla yapılan analizler ile bulunmuştur. Bu değerlere göre aynı geometriye sahip kirişlerin üzerindeki çentik etkisini gösteren eğriler çizilmiştir.

Yüksekliği (D) 500, 215, 93 ve 40 mm olan kirişlerin Atena 3D ve deneysel göçme yükleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

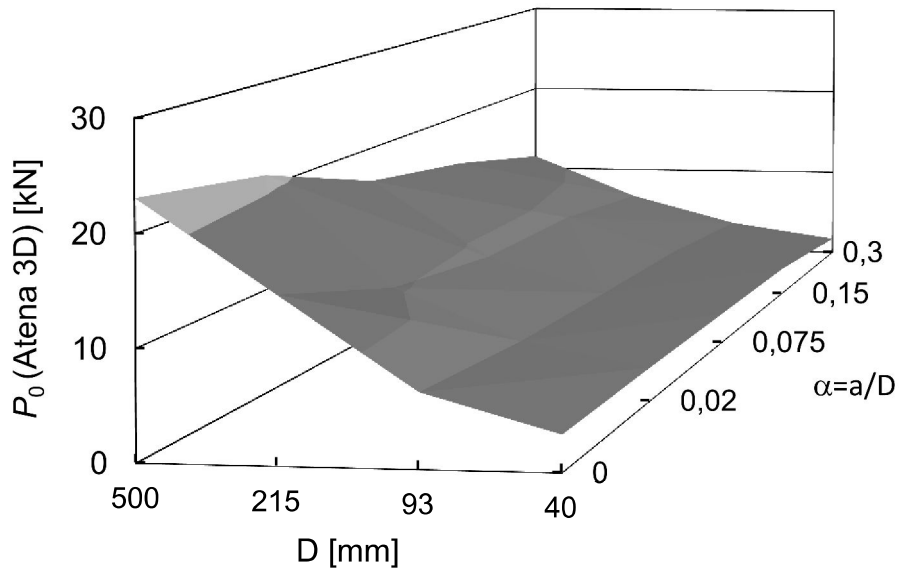
Çizelge 6.1. Kirişlerin deney ortalamaları ve Atena 3D sonuçlarına göre göçme yükleri

Kiriş Adı	α	P_0 (Deney Ort.)	P_0 (Atena 3D)
C500F	0	23,0	23,1
NS500F	0,02	20,3	21,1
NM500F	0,075	15,5	16,5
NB500F	0,15	13,3	14,5
ND500F	0,3	11,4	11,5
C215F	0	16,0	14,9
NS215F	0,02	8,0	10,4
NM215F	0,075	8,4	8,6
NB215F	0,15	7,7	8,4
ND215F	0,3	7,1	6,7
C93F	0	8,2	6,7
NS93F	0,02	5,5	5,5
NM93F	0,075	4,8	5,0
NB93F	0,15	4,5	4,6
ND93F	0,3	3,5	3,5
C40F	0	4,0	3,3
NS40F	0,02	4,0	3,2
NM40F	0,075	3,3	3,0
NB40F	0,15	2,8	2,8
ND40F	0,3	1,6	1,7

Yükseklikleri (D) 40-500 mm arasında olan kirişlerin deney sonuçları ile Atena sonuçlarının en büyük göçme yüküne çentik oranlarının etkileri Şekil 6.1 ve 6.2'de gösterilmiştir.

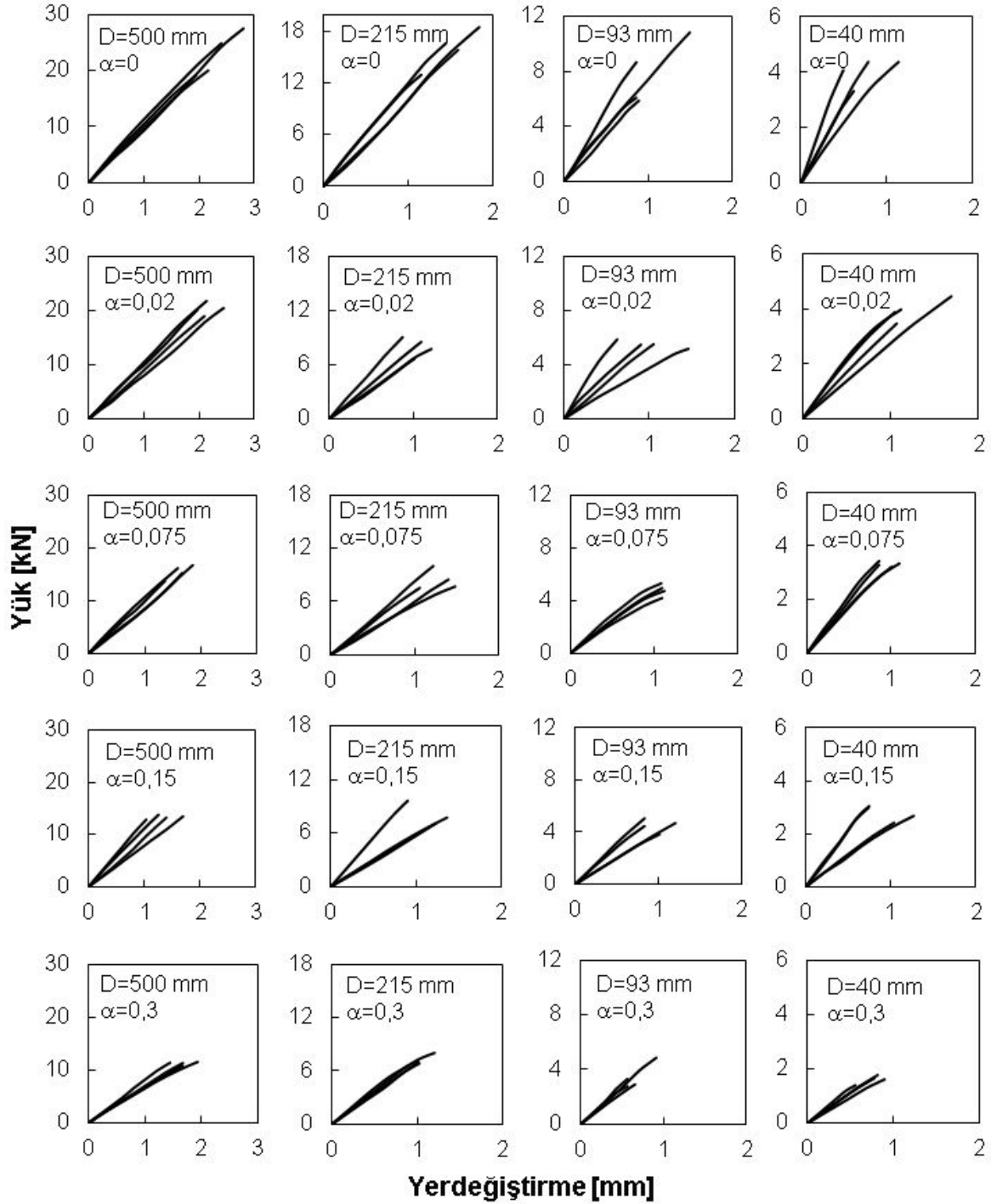


Şekil 6.1. Deney sonuçlarına göre en büyük göçme yüküne boyut ve çentiklerin etkisi



Şekil 6.2. Atena 3D sonuçlarına göre en büyük göçme yüküne boyut ve çentiklerin etkisi

Tüm kiriş elemanlarına ait çentik oranlarına ve karakteristik yüksekliklerine (D) göre yük-yerdeğiştirme grafikleri Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Kiriş yüksekliklerinin azalması ve çentik boylarındaki artma göçme yüklerinde düşmeye yol açmakta olduğu görülmektedir.



Şekil 6.3. Tüm deney elemanlarına ait yük-yerdeğiştirme grafikleri

7. SONUÇLAR

Yapı elemanlarının boyutları, özellikle de yararlı yükseklikleri büyüdükçe göçme yükleri artmaktadır. Kirişlerin göçme anındaki en büyük taşıma gücüne ulaştığı anda hesaplanan çentik ucundaki nominal gerilmelerin direkt olarak maksimum çekme gerilmesine eşit olmadığı aksine eleman boyutlarına göre değiştikleri görülmüştür. Ayrıca çentik oranlarının değişimine göre de gerilmelerde farklılıklar görülmüştür. Çentik oranları küçüldüğünde eleman davranışı Tip I yani çatlaksız boyut etkisi göstermekte, çentik oranları büyüdüğünde ise Tip II çatlaklı boyut etkisi davranışı sergilemektedir. Kiriş boyutları küçüldükçe çentik oranının kiriş taşıma gücü ve nominal gerilmelere olan etkisi azalmaktadır. Bu etkiler deney ve Atena 3D sonlu eleman programı ile alınan sonuçların her ikisi için de geçerlidir.

Diğer sonuçlar,

- Sığ çentikli kirişlerin çentik derinlikleri düşük ve özellikle en büyük agrega çapı olan 10 mm'ye eşit ve daha altında olduğundan dolayı boyut etkisi tipi Tip II'den ziyade çentiksiz yani Tip I'e yaklaşmaktadır.
- Çentik derinlikleri arttıkça Tip I'den Tip II boyut etkisine daha fazla yaklaşmaktadır. Orta çentikli D=40 ve 93 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 3 ve 7 mm dolayısıyla en büyük agrega çapından küçüktür. D=215 ve 500 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 16 ve 38 mm dolayısıyla en büyük agrega çapı olan 10 mm'den büyüktür.
- Büyük çentikli D=40 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri 6 mm, en büyük agrega çapından küçüktür. D=93, 215 ve 500 mm olan kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 14, 32 ve 75 mm, dolayısıyla en büyük agrega çapı olan 10 mm'den büyüktür. Boyut etkisi Tip II davranışı sergilemektedir.
- Derin çentikli kirişlerin çentik derinlikleri sırasıyla 12, 28, 65 ve 150 mm'dir, Tamamı en büyük agrega çapından büyüktür. Boyut etkisi olarak Tip II davranışını tam olarak gösterdiği görülmektedir.

- Analizlerde Bazant'ın çentiksiz Tip I ve çentikli kirişler için önerdiği Tip II boyut etkilerinin geçerli olduğu görülmüştür. Boyut arttıkça nominal gerilmelerde azalmalar gözlemlenmiştir.
- Atena 3D sonlu eleman analizlerinde bulunan göçme yüklerinin deney sonuçlarıyla uyumlu oldukları görülmüştür.
- Sonlu eleman analizlerinde program yerdeğiştirme kontrollü olarak çalıştırılmaktadır. Deneyler ise deney ekipmanının özelliğinden dolayı sadece yük kontrollü olarak yapılabilmektedir. Ayrıca deney düzeneğinde kullanılan çelik kiriş profillerin esnemesinden kaynaklanan ancak strok yerdeğiştirmesine olan etkisi ölçülmediğinden dolayı analizlerde pik yükler doğru olarak bulunmasına rağmen (analiz-deney arasındaki yükleme farkından dolayı) yerdeğiştirme eğrileri deneyler ile tam olarak yakalanamamıştır.

KAYNAKLAR

1. Abusiaf, H.F., Şener, S., and Barr, B. (1996). Size Effect Tests for Plain and Reinforced Concrete Columns. *Report*, University of Wales, Cardiff, İngiltere.
2. Abusiaf, H.F. (1997). *Damage and fracture behaviour of concrete*, Doktora Tezi, University of Wales Cardiff, İngiltere.
3. Amin, H. (2013). *Boyut Etkisi Deneylerinin ATENA Sonlu Eleman Programı ile Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
4. Barenblatt, G.I. (1987). Dimensional Analysis. *Gordon&Brech*, NY, USA
5. Barr, B.I.G., Abusiaf, H.F. and Şener, S. (1998). "Size Effect and Fracture Energy Studies using Compact Compression Specimens," *RILEM, Materials and Structures*, Vol.31, 36-41.
6. Bazant, Z.P. (1984). Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 110, 518-535.
7. Bazant, Z.P., Kim, J.K. (1984-1985). Size Effect in Shear Failure of Reinforced Concrete Beams. *ACI Journal, Proceedings*, Vol.81, No.5, 456-468, and Discussion, Vol.82, No.4, 579-583.
8. Bazant, Z.P., Kim, J.K., and Sener S. (1985). Discussion of paper 12, *ACI Journal*, Vol.82, No.4, 579-583.
9. Bazant, Z.P., Cao, Z. (1986). Size Effect in Shear Failure of Prestressed Concrete Beams. *ACI Journal, Proceedings*, Vol.83, No.2, 260-268.
10. Bazant Z.P., Cao, Z. (1986). Size Effect in Brittle Failure of Unreinforced Pipes. *ACI Journal, Proceedings*, Vol.83, No.3, 369-373.
11. Bazant, Z.P., Sun, H.H. (1987). Size Effect Shear Failure; Effect of aggregate Size and Stirrups. *ACI Materials Journal*, Vol. 84, No.4, 259-272.
12. Bazant, Z.P., Şener, S. (1987). Size Effect in Torsional Failure of Concrete beams. *J.Struct.Eng.Proc.ASCE* Vol.113, 2125-2136.
13. Bazant, Z.P., Cao, Z. (1987). Size Effect in Punching Shear Failure of Slabs. *ACI Structural Journal*, Vol.84, No.1, 44-53.
14. Bazant, Z.P., Pfeiffer, P.A. (1987). Determination of fracture energy from size effect and brittleness number. *ACI Material Journal*, 84(6),463-80.
15. Bazant, Z.P., Şener, S. and Prat, P. (1988). Size Effect Tests of Torsional Failure of Plain and Reinforced Concrete Beams. *Rilem and Materials and Structures*, Vol.21, 425-430.

16. Bazant, Z.P., Şener, S. (1988). Size Effect in Pull-out Tests. *ACI Materials Journal*, Vol.85, No.5, 347-351.
17. Bazant, Z.P., Kazemi, M.T. (1991). Size Effect on Diagonal Shear Failure of Concrete Beams Without Stirrups. *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No.3, 268-276.
18. Bazant, Z.P., Kazemi, M.T., Hasegawa T., and Mazars J. (1991). Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests; Measurements and Fracture Analysis. *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.3, May-June, 325-332.
19. Bazant, Z.P., Scheil, W.F. (1992). Fatigue Fracture on High-Strength Concrete and Size Effect. *ACI Materials Journal*, Vol.90, No.5, 472-478.
20. Bazant, Z.P., Kwon, Y.W. (1994). Failure of Slender and Stocky Reinforced Concrete Columns: Tests of Size Effect. *Materials and Structures*, 27, 79-90.
21. Bazant, Z.P., Yu, Q. (2005). Designing against size effect on shear strength of reinforced concrete beams without stirrups: I. Formulation. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 131(12), 1877-85.
22. Bazant, Z.P., Yu, Q. (2009). Universal size effect law and effect of crack depth on quasi-brittle structure strength. *Journal of Engineering Mechanics*, 135(2), 78-84.
23. Bazant, Z.P., Yu, Q. (2011). Size effect testing of cohesive fracture parameters and non-uniqueness of work-of-fracture method. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 137(8), 580-8.
24. Belgin, Ç., Şener, S. (2008). Size Effect on Failure of Overreinforced Concrete Beams. *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 2308-2319.
25. Belgin, Ç. (2004). *Aşırı Donatılı Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisi Deneyleri*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 13-17.
26. 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*, 25(4): 407-429
27. Carpinteri, A., Ferro, G. (1994). Size effects on tensile fracture properties: a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure, *Materials and Structures*, 27, 563-571.
28. Carpinteri, A., Chiaia, B., and Ferro, G. (1995). Size effect on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligament and dimensional transition from order to disorder. *Materials and Structures*, 28, 311-7.

29. Carpinteri, A., Chiaia, B., and Ferro, G. (1995). Multifractal scaling law: an extensive application to nominal strength size effect of concrete structures. *Atti del Dipartimento di Ingegneria Strutturale*, 2, 50, Politecnico de Torino, Italy.
30. Carpinteri, A., Chiaia, B., and Ferro, G. (1996). A new explanation for size effects on the flexural strength of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 49, 178, 45-53.
31. Carpinteri, A., Chiaia, B. (1996). Size effects on concrete fracture energy: dimensional transition from order to disorder", *RILEM, Materials and Structures*, 29, 259-266.
32. Carpinteri, A., Chiaia, B. (1996). A multifractal approach to the strength and toughness scaling of concrete structures, *In Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Ed.F.H. Wittmann, *REDIFICATO*, 3,1773-1792.
33. Celep, Z., Kumbasar, N. (1996). *Betonarme Yapılar*. Beta dağıtım, İstanbul, 851.
34. Duan, K., Hu, X., and Wittmann, F. (2006). Scaling of quasi-brittle fracture: boundary and size effect. *Mech Materials*; 38,128-41.
35. Hawkins, N.M. (1989). The Role for Fracture Mechanics in Conventional Reinforced Concrete Design. *NATO workshop, of Fract. Mech.*, Sept. Northwestern Univ., Evanston, Illionis, USA.
36. Hillerborg, A. (1985). The theoretical basis of a method to determine the fracture energy GF of concrete. *Mater. Struct.*,18, 291-6.
37. Hoover, C.G., Bazant, Z.P., Wendner R., Vorel J., Hubler M., Kim K., et al. (2012). Experimental investigation of transitional size effect and crack length effect in concrete fracture. Life-Cycle and sustainability of civil infrastructure systems: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE)*, Vienna, Austria.
38. Hoover, C.G., Bazant, Z.P. (2013). Comprehensive concrete fracture tests: size effects of Type 1&2, crack length effect and postpeak, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.110, 281-289.
39. Hoover, C.G., Bazant, Z.P. Vorel, J., Wendner, R., and Hubler, M.H. (2013). Comprehensive concrete fracture tests: description and results, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.114, 92-103.
40. Hoover, C.G., Bazant, Z.P. (2014). Cohesive crack, size effect, crack band and work-of-fracture models compared to comprehensive concrete fracture tests. *International Journal of Fracture*, Vol.187, 133-143.
41. Hoover, C.G., Bazant, Z.P. (2014). Universal size-shape effect law based on comprehensive concrete fracture tests. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.140, 473-479.

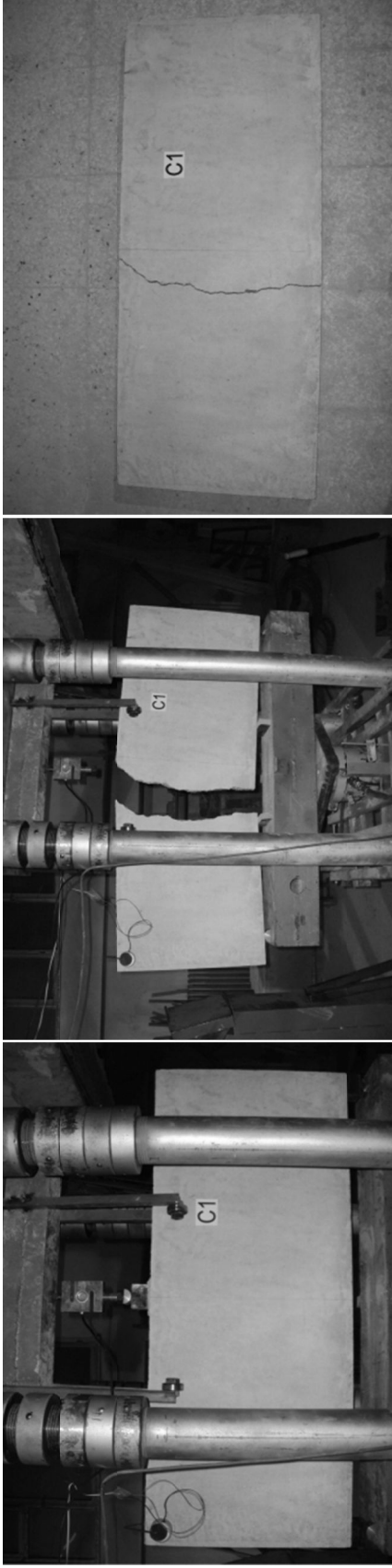
42. Hoover, C.G., Bazant, Z.P. (2014). Comparison of the Hu-Duan boundary effect model with the size-shape effect law for quasi-brittle fracture based on new comprehensive fracture tests. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.140, 480-486.
43. Hu, X., Wittmann, F. (2000). Size effect on toughness induced by crack close to free surface. *Engineering Fracture Mechanics*, 65, 209-21.
44. Hu, X. (2002). An asymptotic approach to size effect on fracture toughness and fracture energy of composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 555-64.
45. Hu, X., Duan, K. (2007). Size effect: influence of proximity of fracture process zone to specimen boundary. *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 1093-100.
46. Hu, X., Duan, K. (2008). Size effect and quasi-brittle fracture: the role of FPZ. *International Journal of Fracture*, 154, 3-14.
47. Hu, X., Duan, K. (2010). Mechanism behind the size effect phenomenon. *Journal of Engineering Mechanics*, 136(1), 60-8.
48. Irwin, G.R. (1958). *Fracture*. Handbuch Phys. 6,551-90, Springer, Berlin.
49. Kaplan, M.F. (1961). Crack Propagation and the Fracture of Concrete. *ACI Journal*, 58, 11.
50. Karihaloo, B.L., Abdalla, H.M., and Xiao, Q.Z. (2003). Size effect in concrete beams. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 979-93.
51. Koç, V. (2005). *Normal ve Yüksek Dayanımlı Beton Elemanların Basınç Yüklemesinde Boyut Etkisi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
52. Koç, V., Şener, S. (2009). Size Effect in Normal and High Strength Concrete with Different Notches Under the Axial Load. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 21, 9, 433-445.
53. Malvar, J.L., Warren, G.E. (1988). Fracture energy for three-point-bend tests on single-edge-notched beams. *Experimental Mechanics*, 28(3):266-72.
54. Marti, P. (1989). Size Effect in Double-Punch Tests on Concrete Cylinders. *ACI Materials Journal*, Vol.86, 597-601.
55. Nilson, A.H., Winter, G. (1986). *Design of Concrete Structures*. 10 Edn. McGraw-Hill, New York, USA
56. Shah, S.P., Swartz, S.E., and Ouyang, C. (1995). *Fracture Mechanics of Concrete*, J.Wiley, New York.
57. Şener, S. (1991). Betonarme Donatıların Aderans Ekinde Boyut Etkisi. *İMO XI Teknik Kongre*, İstanbul, 117-128.

58. Şener, S. (1992). Size Effect in Bond Splices Tests., *FIP'92 Symposium*. Budapest, Hungary, 357-362.
59. Şener, S. (1993). Sargılı Donatıların Aderans Ekinde Boyut Etkisi. *IMO XII.Teknik Kongresi*, Ankara, 481-494.
60. Şener, S., Timur, İ. (1993). Size Effect in Bond Splices Tests Under the Indirect Loading. *Advances in Civil Engineering First Technical Congress*, Gazimagusa, North Cyprus, October 25-27, 728-735.
61. Şener, S. (1994). Concrete Structures Design based on Fracture Mechanics. *The Third Inter. Kerensky Conference on Global Trends in Structural Engineering*, Singapore, 563-567.
62. Şener, S., Aydın, İ. (1995). Beton Kirişlerin Tasarımında Kırılma Mekaniğinin Kullanılması. *IX Ulusal Mekanik Kongresi*, Ürgüp, 878-879.
63. Şener, S. (1995). Yüksek Dayanımlı Betonda Kırılma Mekaniği. *Prof. Turgan Sabis Sempozyumu*, İTÜ, İstanbul, 209-219.
64. Şener, S., Belgin, Ç., Akyıldız, A., and Okkalı, S. (1996). Size Effect in Axially Loaded Reinforced Concrete Columns. Concrete Technology for Developing Countries *Fourth International Conference*, Eastern Mediterranean University, North Cyprus, 640-646.
65. Şener, S., Belgin, Ç. (1997). Narin Beton Kolonlarda Boyut Etkisi Deneyleri. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, *III. Teknik Kongre*, 147-155.
66. Şener, S., Belgin, Ç., ve Öztürk, A. (1997). Betonarme Kolonlarda Yapım Kusurlarının Deneysel Bulunması. *10. Ulusal Mekanik Kongresi*, 85-86,
67. Şener, S., Bazant, Z.P., and Becq-Giraudon, E. (1999). Size Effect in Failure of Bond Splices of Steel Bars in Concrete Beams. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.125, No.6, 653-660.
68. Şener, S., Barr, B.I.G., and Abusiaf, H.F. (1999). Size Effect Tests in Unreinforced Concrete Columns. *Magazine of Concrete Research*, 51, 3-11.
69. Şener, S., Begimgil, M., ve Belgin, Ç. (2002). Size Effect on Failure of Concrete Beams With and Without Steel Fibers. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.14, No.5, 436-440.
70. Şener, S., Barr, B.I.G., and Abusiaf, H.F. (2004). Size Effect in Axially Loaded Reinforced Concrete Columns. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 130, 4, 662-670.
71. Şener, S., Çağlar, Y., Şener, K.C., and Belgin, Ç. M. (2014). Size Effect Tests of Concrete for Type I and Type II, *ACE2014, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul.

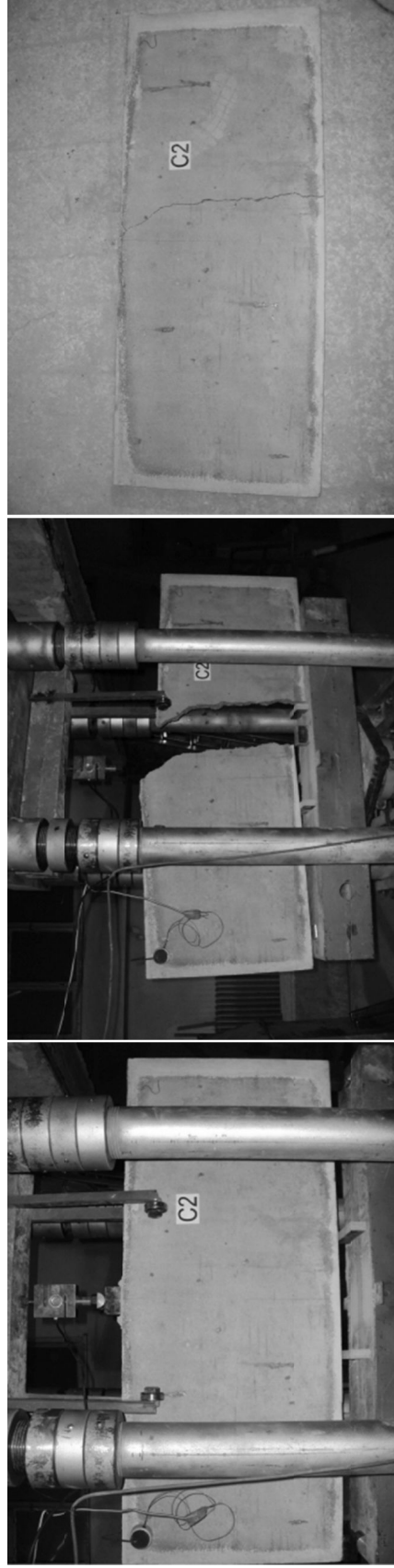
72. Şener, S., Çağlar, Y., Belgin, Ç. M., and Hasanpour, R. (2014). Size Effect Tests of Concrete with Carbon Nano Tubes, *ICESA2014, Int. Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians*, Antalya, 83-90.
73. Tada, H., Paris, P. C., and Irwin, G. R. (1985). *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, Paris Production, St Louis, Missouri, USA, 1-45.
74. Tang, T., Bazant, Z. P., Yang, S., and Zollinger, D. (1996). Variable-notch one-size test method for fracture energy and process zone length. *Engineering Fracture Mechanics*, 55(3), 383-404.
75. *TS500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*. (1984). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
76. Weibull, W. (1939). The phenomenon of rupture in solids proc. Roy Swed Inst Engng. Res;153:1-55. *Ingenioersvetenskaps Akad. Handl.*, Stockholm.
77. Weibull W. (1954). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *J. Appl. Mech.* 18, 293-7.
78. Yu, Q., Le, J.L., Hoover, C.G., and Bazant, Z.P. (2010). Problems with Hu-Duan boundary effect model and its comparison to size-shape effect law for quasibrittle fracture. *Journal of Engineering Mechanics*, 136(1), 40-50.

EKLER

EK-1. Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

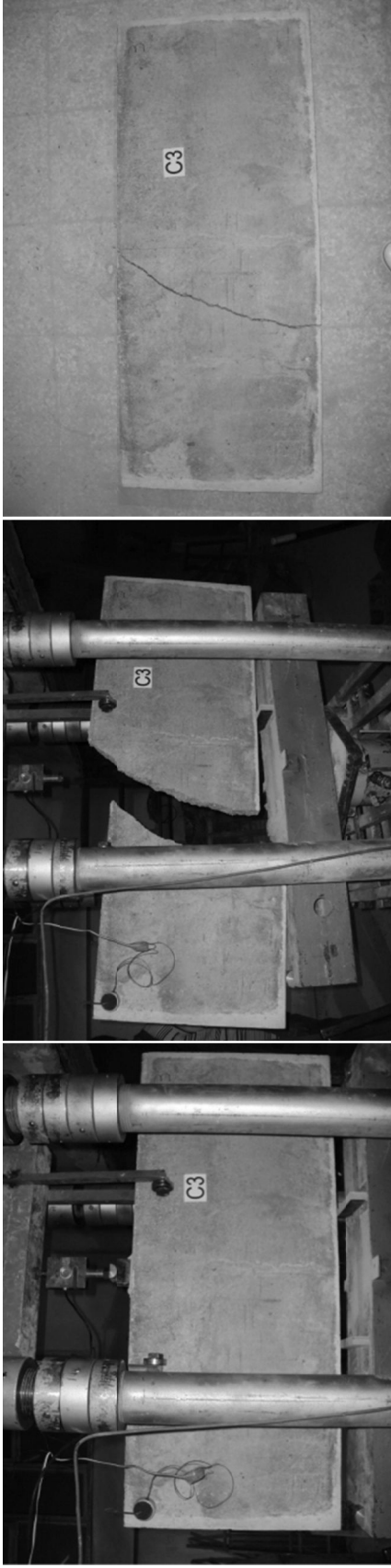


Resim 1.1. Çentiksiz ($\alpha=0$) C1 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

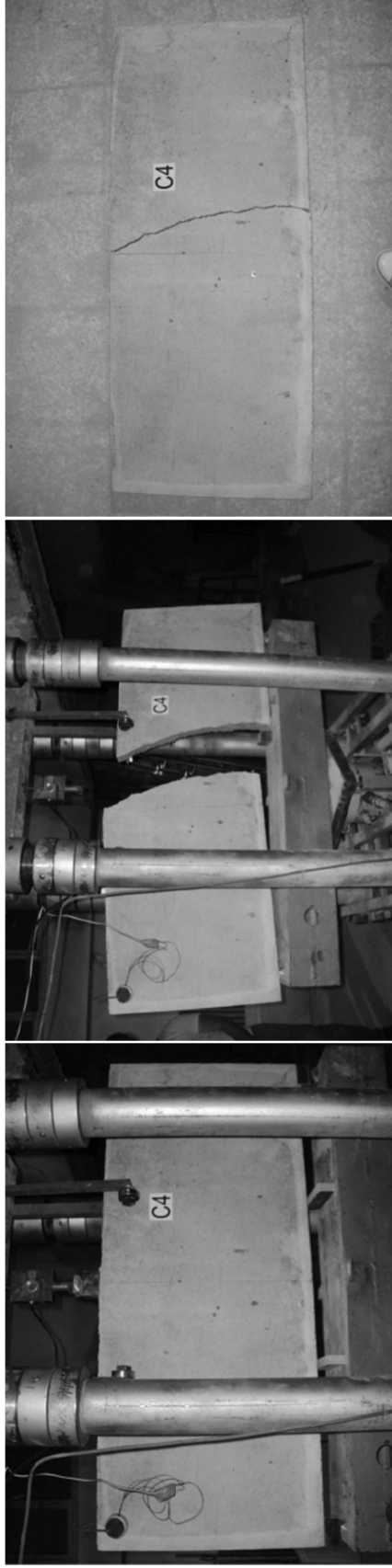


Resim 1.2. Çentiksiz ($\alpha=0$) C2 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

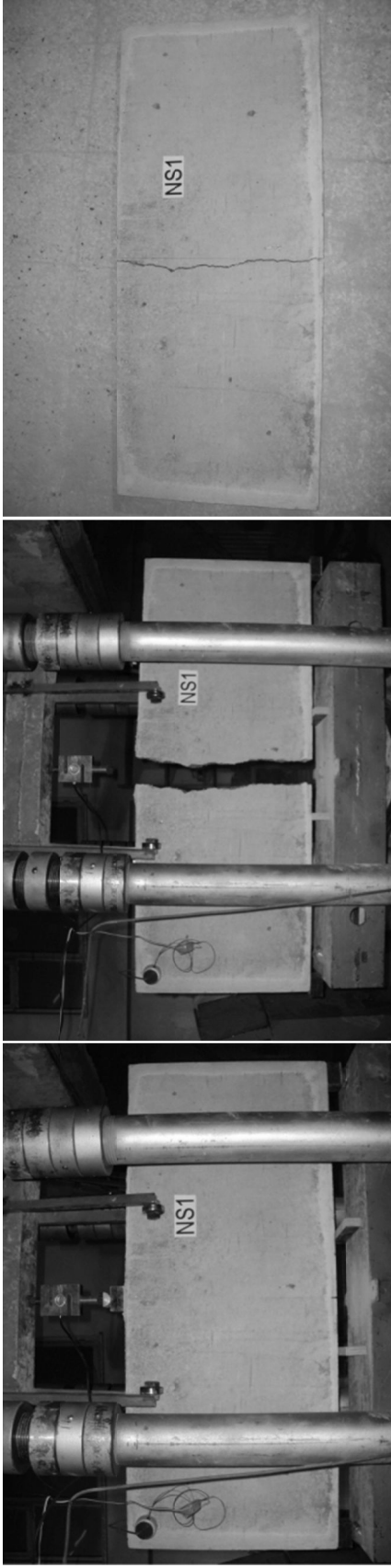


Resim 1.3. Çentiksiz ($\alpha=0$) C3 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

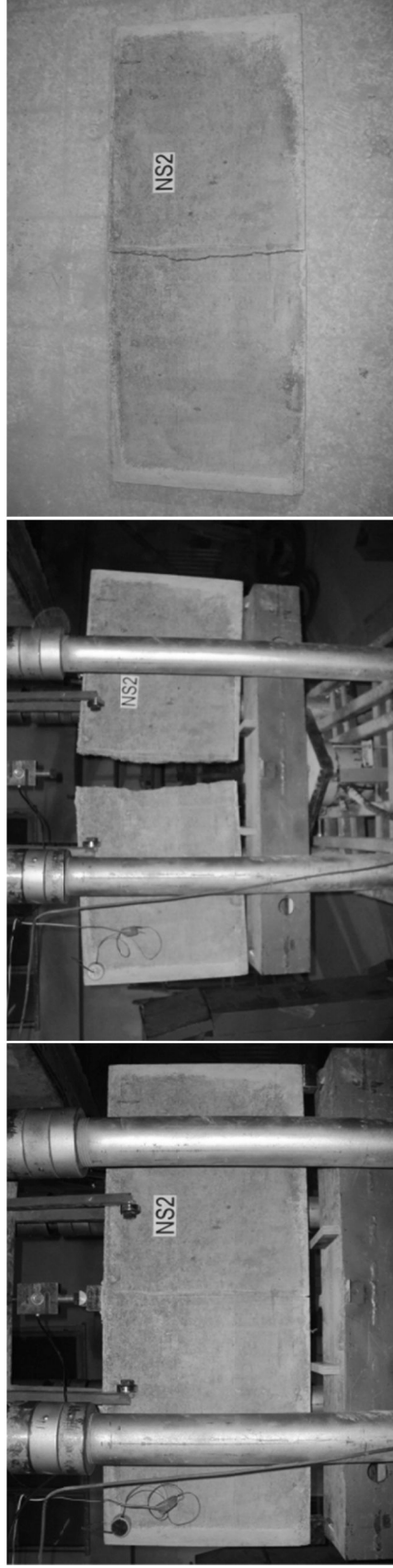


Resim 1.4. Çentiksiz ($\alpha=0$) C4 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

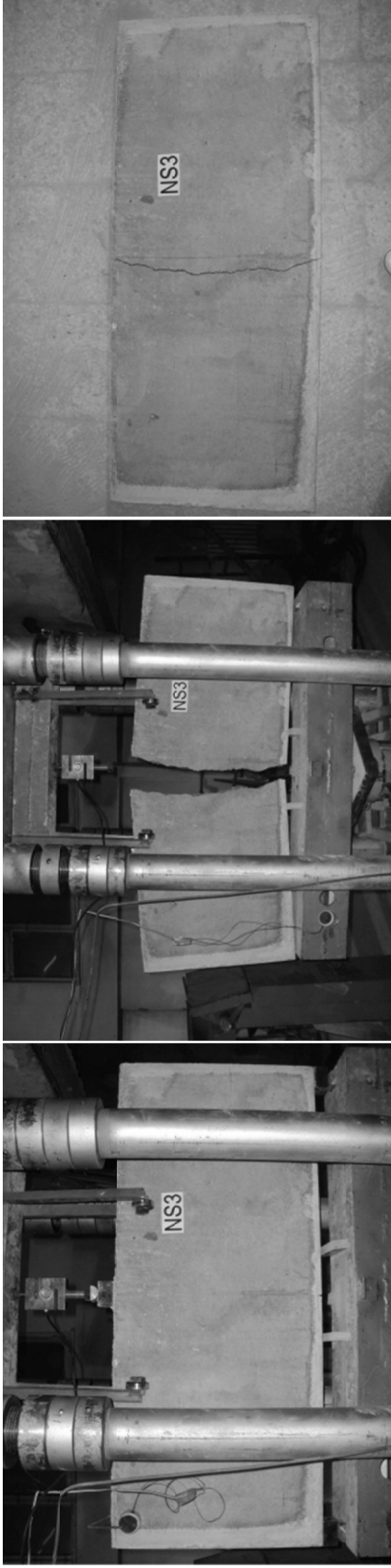


Resim 1.5. Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) NS1 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı



Resim 1.6. Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) NS2 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

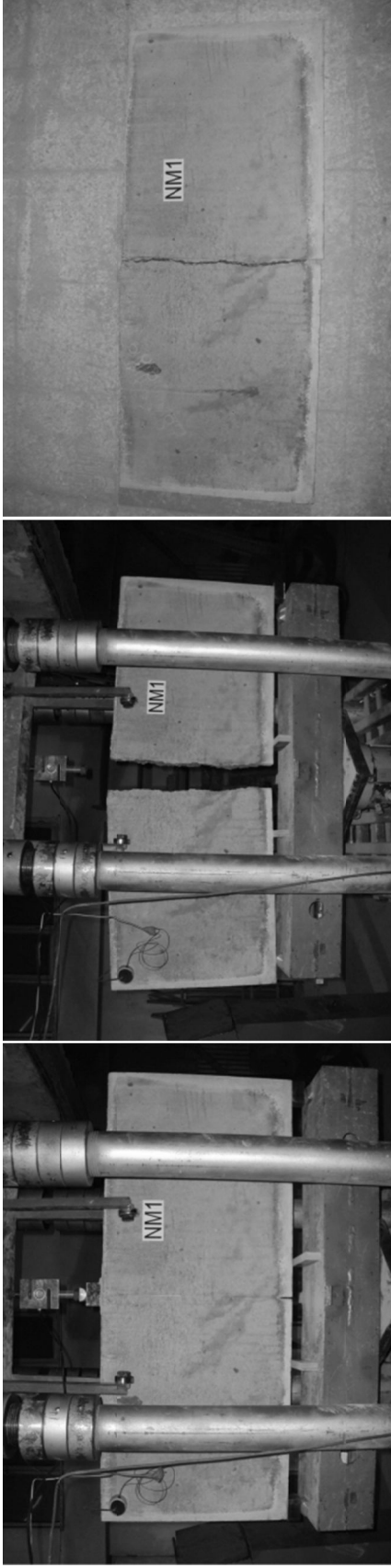


Resim 1.7. Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) NS3 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

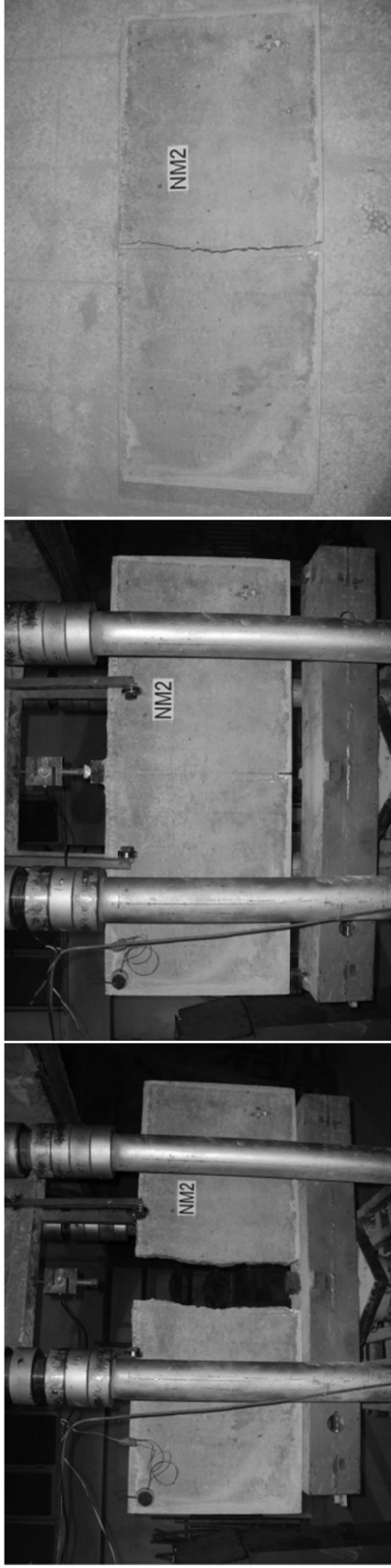


Resim 1.8. Sığ çentikli ($\alpha=0,02$) NS4 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

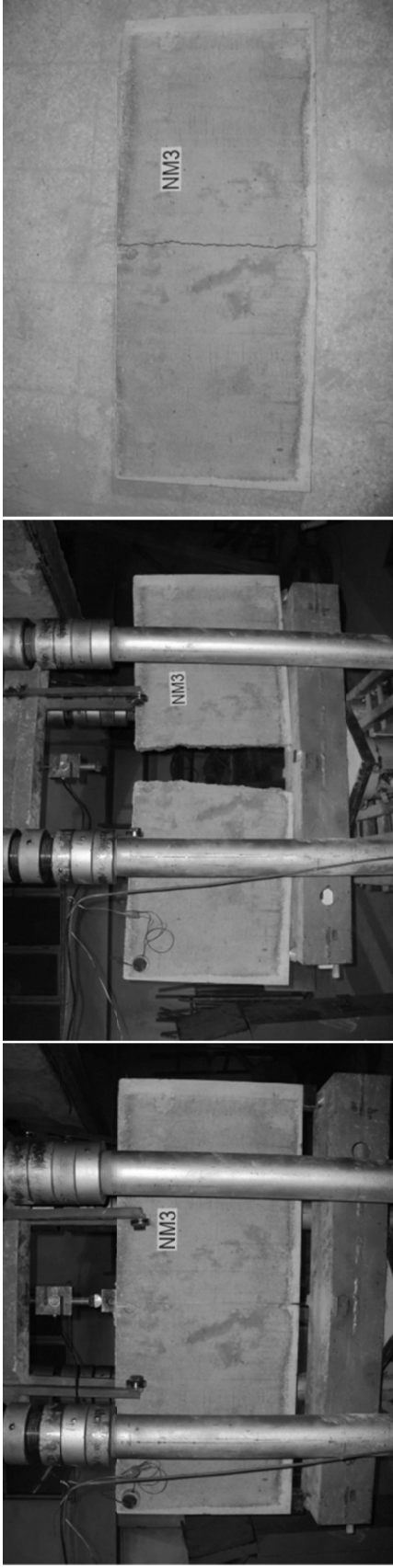


Resim 1.9. Orta çentikli ($\alpha=0,075$) NM1 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı



Resim 1.10. Orta çentikli ($\alpha=0,075$) NM2 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

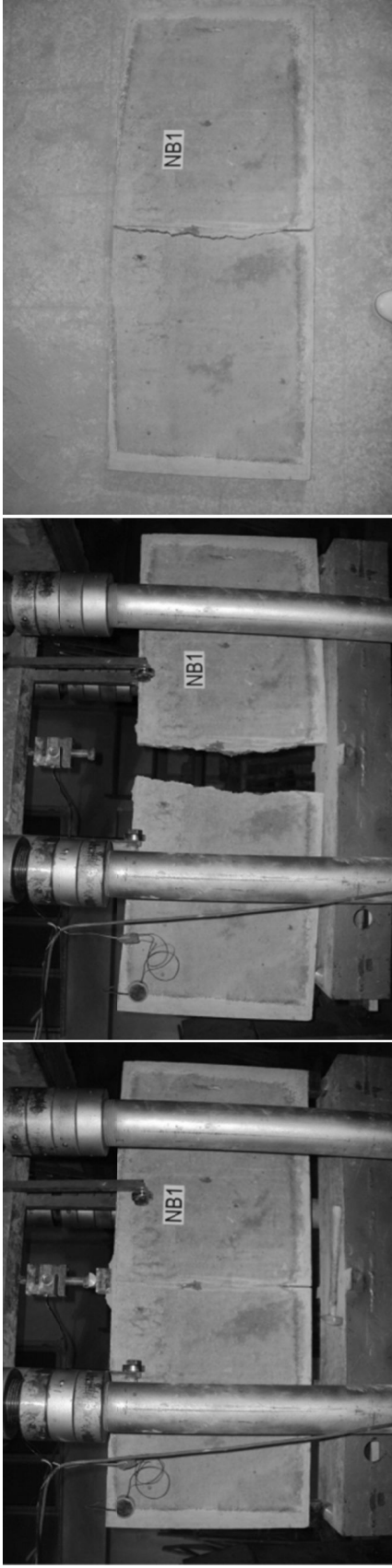


Resim 1.11. Orta çentikli ($\alpha=0,075$) NM3 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı



Resim 1.12. Orta çentikli ($\alpha=0,075$) NM4 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

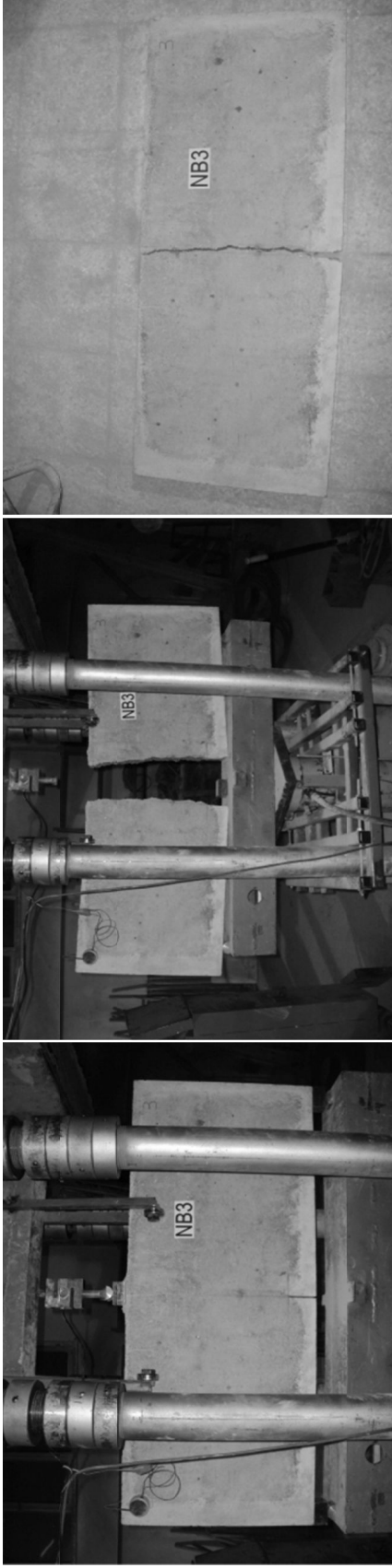


Resim 1.13. Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) NB1 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

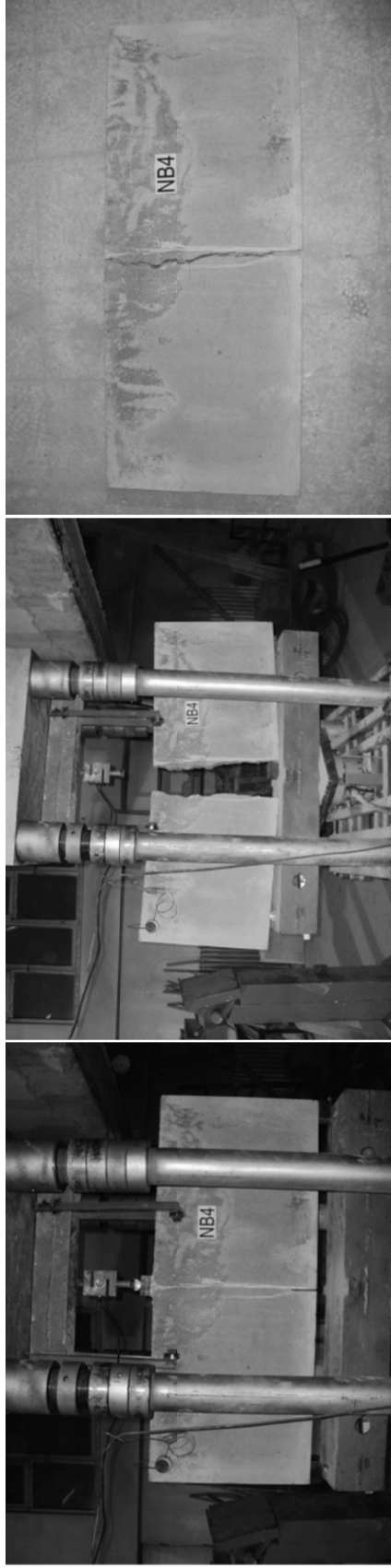


Resim 1.14. Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) NB2 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı



Resim 1.15. Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) NB3 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

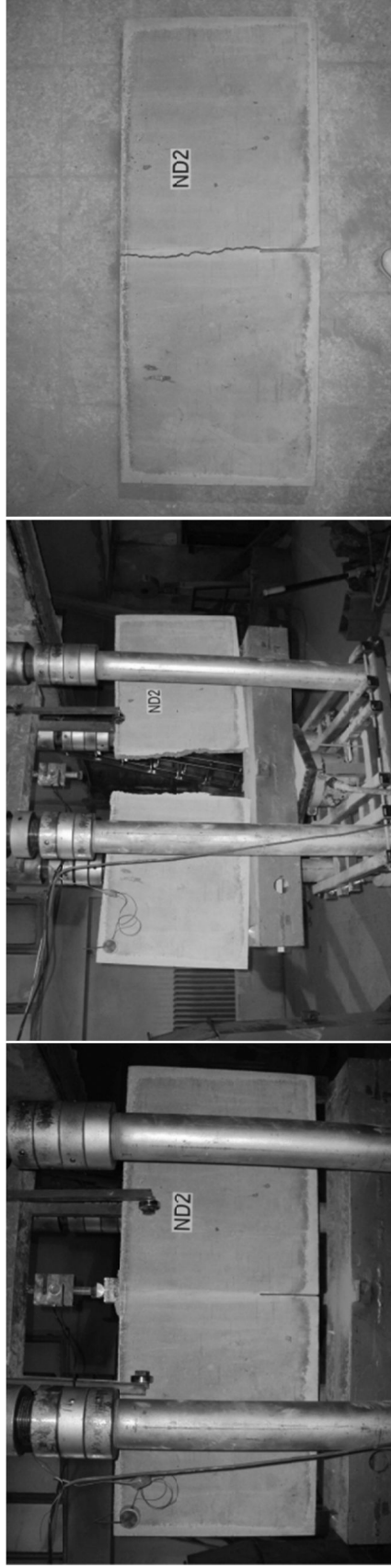


Resim 1.16. Büyük çentikli ($\alpha=0,15$) NB4 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

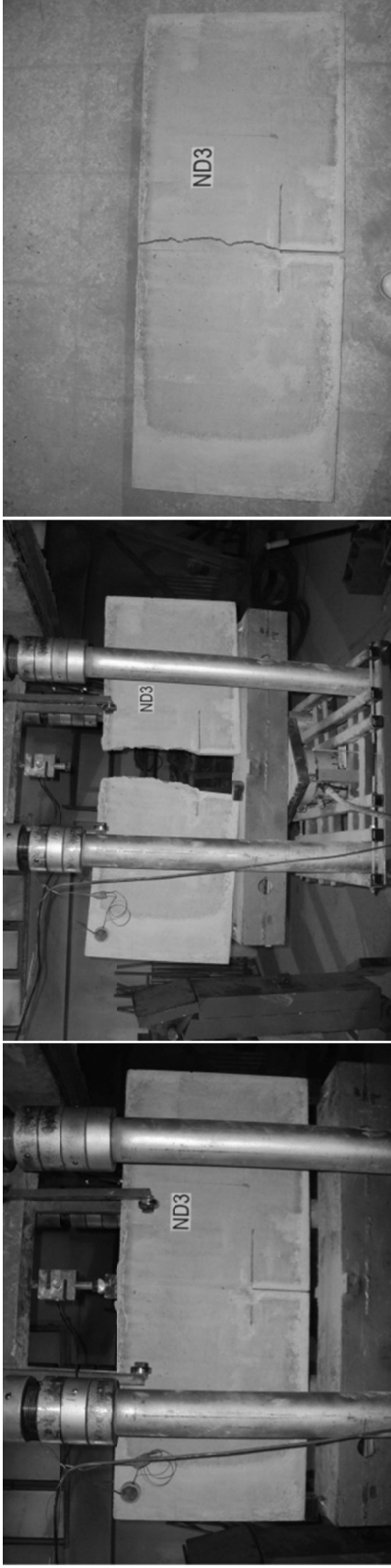


Resim 1.17. Derin çentikli ($\alpha=0,3$) ND1 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

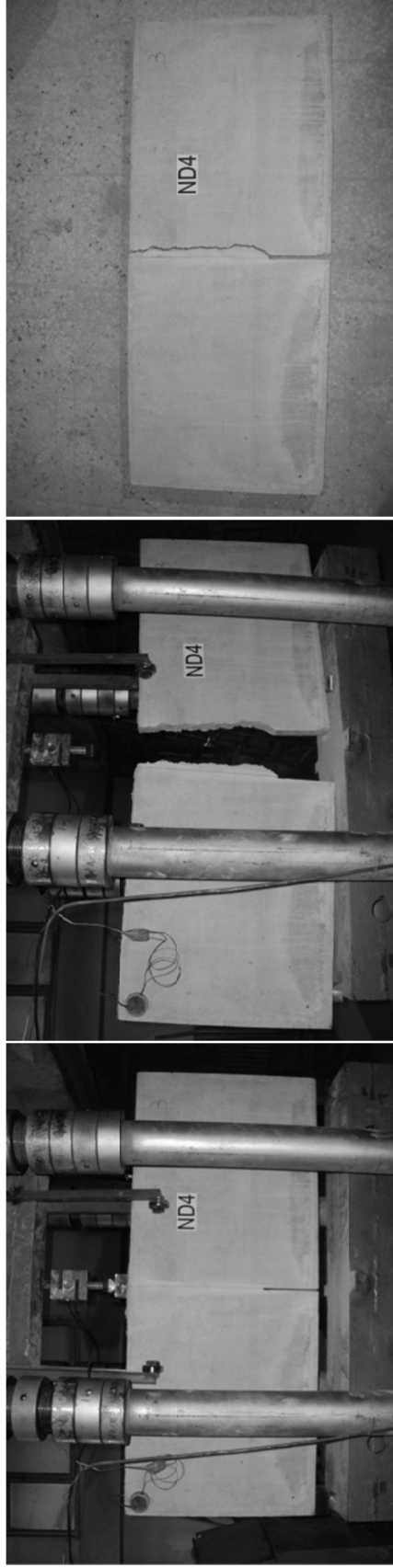


Resim 1.18. Derin çentikli ($\alpha=0,3$) ND2 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

EK-1. (devam) Deney öncesi ve deney sonrası çatlak dağılımı



Resim 1.19. Derin çentikli ($\alpha=0,3$) ND3 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı



Resim 1.20. Derin çentikli ($\alpha=0,3$) ND4 kirişinin deney öncesi, kırılma sonrası ve çatlak dağılımı

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇAĞLAR, Yasin
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.03.1976 Ankara
 Telefon : 0 312 582 32 52
 Medeni hali : Evli
 e-mail : ycaglar@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Kırıkkale Üni. Fen Bil. Enst.	2002
Lisans	Kırıkkale Üni. İnş. Müh. Böl.	1999
Orta Öğretim	Yenimahalle Anadolu Tek. Lis.	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1999-2007	Kırıkkale Üni. Müh. Fak.	Araştırma Görevlisi
2007-2014	Gazi Üni. Müh. Fak.	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Şener, S., Çağlar, Y., Şener, K.C., ve Belgin, Ç. M. (21-25 Ekim 2014). Size Effect Tests of Concrete for Type I and Type II, *ACE2014, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul.

2. Şener, S., Çağlar, Y., Şener, K.C., ve Gündüz, N. (11-13 Ağustos 2014). The differential shrinkage displacements of box section prestressed concrete bridges, *IBC2014 Istanbul Bridge Conference*, İstanbul.
3. Şener, S., Çağlar, Y., Belgin, Ç. M., ve Hasanpour, R. (2014). Size Effect Tests of Concrete with Carbon Nano Tubes, *ICESA2014, Int. Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians*, Antalya, 83-90.
4. Şener, S., Çağlar, Y., Belgin, Ç. M., ve Şener, K.C. (Baskıda, 2014). Modified Arcan Tests for Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes, *Advanced Materials Letters*.
DOI: 10.5185/amlett.2014.amwc1032
5. Çağlar, Y., Belgin, Ç. M., ve Şener, S. (2013). Modified Arcan Tests for Concrete with Carbon Nanotubes, *Advanced Materials World Congress*, İzmir, 209.
6. Şener, S., Çağlar, Y., Üçpınar, V., ve Şahin, C. (2013). Ard germeli Tigem Köprüsü'nde Yerdeğiştirmeler, İMO-İTÜ, *Prof. Dr. Zekai Celep Onuruna Betonarme Yapılar Semineri*, İstanbul, 17-28.
7. Çağlar, Y., Şener, S., Belgin, Ç., ve Şener, K.C. (2011). Kutu Kesitli Öngerilmeli Köprülerde Zamana Bağlı Yerdeğiştirmeler, *XVII. Ulusal Mekanik Kongresi*, Fırat Üni., Elazığ, 172-181.
8. Çağlar, Y., Şener, S., Belgin, Ç., Yıldırım, O., Baştürk, A., ve Arslan, A. (2011). Kömürhan Köprüsü'nde Yerdeğiştirmeler, 2. *Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu*, Eskişehir, 83.
9. Şener, S., Çağlar, Y., Benzer, M.A., ve Şener, K.C. (2010). Vertical Displacement of Collapsed Bridge in Palau, *ACE 2010, 9th Int. Conf. on Advances in Civil Eng.*, Trabzon, 239.
10. Şener, S., Çağlar, Y., ve Şener, K.C. (2009). Palau Köprüsü'nün Göçme Nedenleri, İMO-İTÜ, *Prof. Dr. Nahit Kumbasar için Betonarme Yapılar Semineri*, İstanbul, 63-72.

11. Doğan, O., Çağlar, Y., Çağlar, E., ve Doğan, F. (2008). Betonarme Yapı Elemanlarında Donatı Çevresindeki Aderans Yorulması, *21. Yüzyılın Başında 2. Kırıkkale Sempozyumu*, 406-416.
12. Doğan, O., Çağlar, Y., Çağlar, E., ve Doğan, F. (2008). Kırıkkale'deki Betonarme Yapıların Durumu, *21. Yüzyılın Başında 2. Kırıkkale Sempozyumu*, 395-405.
13. Çağlar, Y., Doğan, O., ve Koçak, A. (2006). Çelik Plaklar ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar ile Analizi, *Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu*, Pamukkale Üni., Denizli, 71-75.
14. Doğan, O., Koçak, A., ve Çağlar, Y. (2006). Fay Hatlarına Yakın Bölgelerde Yapı Tasarımı, *Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu*, Pamukkale Üni., Denizli, 71-75.

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, elektronik, masa tenisi.



GAZİ GELECEKTİR..