

**SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ İNCE CİDARLI ÇELİK
MALZEMEDEN ÜRETİLEN TÜP KESİTLİ (CFST)
YAPI ELEMANLARININ EKSENEL BASINÇ
ALTINDAKİ DAVRANIŞI (DENEYSEL VE ANALİTİK)**

Burak EVİRGEN
Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Temmuz-2012

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1109F143**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Burak Evirgen'in "Soğukta Şekil Verilmiş İnce Cidarlı Çelik Malzemeden Üretilen Tüp Kesitli (CFST) Yapı Elemanlarının Eksenel Basınç Altındaki Davranışı (Deneysel ve Analitik)" başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 13.07.2012 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim- Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı): Prof. Dr. Ahmet TUNCAN	
Üye : Yard. Doç. Dr. Özgür AVŞAR	
Üye : Yard. Doç. Dr. Özlem ÇALIŞKAN	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ İNCE CİDARLI ÇELİK MALZEMEDEN ÜRETİLEN TÜP KESİTLİ (CFST) YAPI ELEMANLARININ EKSENEL BASINÇ ALTINDAKİ DAVRANIŞI (DENEYSEL VE ANALİTİK)

Burak EVİRGİN

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN

2012, 185 sayfa

Yapı elemanlarında yükler ve yükleme durumlarına göre farklı bölgelerde çekme ve basınç gerilmeleri oluşmaktadır. 1850'li yıllardan itibaren bu iki gerilmeyi de aynı kesitte karşılayabilecek en uygun malzemenin kompozit bir yapıya sahip olan donatılı beton olduğu görülmüştür. Fakat son yıllarda beton dolu çelik tüp (Concrete Filled Steel Tube - CFST) elemanlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar yapı mühendisliği açısından önem kazanmıştır. Bu sistem normal bir yapı imalatı sırasında kalıp sistemi sökülmeden yapının hızlı bir şekilde imalatını sağlamaktadır. Çelik eleman betonu sararak etriye mantığı ile yanal genişlemesini engelleyecektir. Çelik tüp kalıp olarak kullanıldığı gibi hem boyuna hem de enine donatı görevi görecektir. İç kısımdaki beton çekirdek ise eksenel kuvvete karşı koymakla birlikte çeliğin içeri doğru burkulmasını engellemektedir.

Bu çalışmada; öncelikle malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi maksadı ile beton basınç, elastisite modülü, çelik çekme ve sürtünme deneyleri yapılmıştır. 64 adet beton dolu çelik tüp numunesi üzerinde eksenel basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerdeki genişlik/kalınlık (b/t) oranı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli değişkenlerinin; eksenel taşıma kapasitesi, maksimum yük, birim kısalma, süneklik ve burkulma üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda b/t oranları 18.75, 30.00, 50.00, 100.00; beton basınç dayanımları 10, 20, 30 MPa ve kesitler dairesel, düzgün altıgen, dikdörtgen ile kare seçilmiştir.

Numunelerin sonlu elemanlar programı (ABAQUS) ile analitik olarak modellenmesi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların; yapı sektörüne çelik ve betonun birlikte kompozit olarak kullanımına ilişkin yenilikçi bir bakış açısı sağlayarak tasarım aşamasında hem ekonomik açıdan hem de mühendislik muhakemesi bakımından avantajlı bir çözüm olanağı sunması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: CFT, CFST, Gerilme, Birim Şekil Değiştirme, Abaqus

ABSTRACT

Master of Science Thesis

BEHAVIOR OF STRUCTURAL MEMBERS PRODUCED THIN WALLED COLD FORMED STEEL TUBULAR SECTIONS (CFST) UNDER AXIAL COMPRESSION (EXPERIMENTAL & ANALYTICAL)

Burak EVİRGEN

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Engineering Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN
2012, 185 pages**

In the structural members tension and compression stresses occur at different regions according to the loads and load conditions. Since 1850s it can be seen that optimum resisting section against these stresses at the same member is the reinforced concrete which has a composite structure. But recent studies about concrete filled steel tubes (CFST) become important in the structural engineering area. This system provides quick construction without removing formwork. Steel member prevents the lateral expansion of concrete as done by stirrups. Steel tube performs both longitudinal and lateral reinforcement as well as is it used as formwork. Concrete core resists axial force, at the same time it prevents buckling of steel to the inside direction of the tube.

In this study compression of concrete, modulus of elasticity, steel coupon and friction tests are performed in order to determine the material properties. Sixty four concrete filled steel tube specimens are used for axial compression tests. Effect of width/thickness (b/t) ratio, compressive strength of concrete and geometrical shape of cross section parameters on axial bearing capacity, ultimate load, strain, ductility and buckling are investigated. Within this purpose 18.75, 30.00, 50.00, 100.00 b/t ratio values; 10, 20, 30 MPa concrete compressive strength values and circular, hexagonal, rectangular and square shaped cross sections are chosen.

Analytical models of specimens are developed using finite element program (ABAQUS) and the results are compared and presented. The presenting of solutions in terms of both economical and engineering point of view, design procedure can be expected that results provide an innovative perspective for using of steel and concrete together as a composite material.

Keywords: CFT, CFST, Stress, Strain, Abaqus

Hayatımın anlamı aileme ithafen...

TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca engin tecrübe, bilgi ve desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet TUNCAN ve Prof. Dr. Mustafa TUNCAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında yardımlarını esirgemeyen, tecrübe ve bilgi birikimiyle sürekli araştırma, geliştirmeye ve sorgulamaya yönelten değerli hocam Yard. Doç. Dr. Özgür AVŞAR' a ve Dr. Kıvanç TAŞKIN' a teşekkür ederim. Deneyler sürecinde tüm sıkıntıları birlikte aştığımız çalışma arkadaşlarım Araş. Gör. Onur TUNABOYU, Araş. Gör. Özgür YURDAKUL, Yavuz AYDOĞAN ve fakülte atölye personeline teşekkür ederim.

Numunelerin üretilmesinde gerekli olan malzemeleri karşılayan Sn. İbrahim YILDIZ (MİPSAN Makine İmalat Mont. Paz. San. ve Tic Ltd. Şti.), Sn. İlkay KARA (HAS BETON A.Ş) ve Sn. Nadir KÜPELİ' ye (KÜPELİLER A.Ş.) özel olarak teşekkür ederim. Bilime verdikleri önemden dolayı kendilerini ayrıca kutlamak gerektiğini düşünmekteyim.

Burak EVİRGEN

Temmuz 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii

1. GİRİŞ	1
1.1.Tarihçe.....	2
1.2.Çelik	3
1.3.Beton Dolu Çelik Kesitler (Concrete Filled Steel Tubes) CFST	12
1.3.1.Süneklik	17
1.3.2.Burkulma	18
1.3.3.Yorulma	19
1.3.4.Gevrek kopma.....	19
1.3.5.Rijitlik ve stabilite.....	20
1.3.6.Yangından koruma.....	20
1.3.7.Korozyondan koruma	20
2.LİTERATÜR TARAMASI	22
2.1.Eksenel Yükleme Durumunda; Sargı etkisi, Süneklik ve Burkulma Davranışlarının Araştırıldığı Çalışmalar	22
2.2.Eğilme Momenti Etkimesi Durumunda Dönme Kapasitesi, Sargı Etkisi, Narinlik limitleri ve Süneklik Davranışlarının Araştırıldığı Çalışmalar	29
2.3.Çevrimsel Yükleme Durumunda, Süneklik ve Burkulma Davranışlarının Araştırıldığı Çalışmalar	32

2.4.Eksenel Yükleme Durumunda Malzeme Mukavemeti, Yük Taşıma Kapasitesi ve Birim Şekil Değiştirme Davranışlarının Araştırıldığı Çalışmalar.....	34
2.5.Bağlantı Elemanları ve Kolon-Kiriş Birleşimine Yönelik Yapılan Çalışmalar.....	46
3.DENEY AŞAMALARI	50
3.1.Beton Basınç Deneyi	50
3.1.1.Beton tasarımı	50
3.1.2.Elastisite modülü deney aşamaları.....	55
3.1.3.Eksenel taşıma kapasitesi deney aşamaları.....	56
3.2.Çelik Çekme Deney Aşamaları	58
3.3.Beton - Çelik Etkileşimi (Sürtünme Deneyleri)	59
3.3.1.Sürtünme kuvveti (sıyrılma) deney aşamaları	59
3.3.2.Statik sürtünme katsayısı (k) deney aşamaları.....	61
3.4.CFST Eksenel Basınç Deneyi	61
3.4.1.Numune özellikleri	61
3.4.2.Numunelerin üretilmesi	65
3.4.3.Numunelerin deneye hazırlanması	73
4. TEST SONUÇLARI	79
4.1.Beton Basınç Deneyi Sonuçları.....	79
4.2.Çelik Çekme Deneyi Sonuçları	81
4.3.Sürtünme Deneyi Sonuçları.....	82
4.3.1.Sürtünme kuvveti.....	82
4.3.2.Statik sürtünme katsayısı	85
4.4.CFST Eksenel Basınç Deneyi Sonuçları	85
5. ANALİTİK MODELLEME	151
6. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	164
KAYNAKLAR	181

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. Sunderland köprüsü.....	3
1.2. Çeliğin üretim aşamaları	4
1.3. Metal kristallerinin hekzagonal ve yüzey merkezli kristal yapıları	5
1.4. Çelik malzeme standart gerilme şekil değiştirme grafiği.....	8
1.5. Çelik yapı elemanları	10
1.6. Tasarım esnasında kullanılan hesap kabulleri. (a) elastisite teorisine göre hesap ve (b) taşıma kapasitesi teorisine göre hesap.....	12
1.7. Tipik çelik kolon kesitleri	14
1.8. Dikdörtgen boş kesitin kiriş olarak kullanımı	16
1.9. Farklı kesit sınıflarının başlık narinliğine bağlı eğilme etkisi altındaki davranışı.....	16
1.10. Başlık narinliğinin fonksiyonu olarak moment kapasitesi	17
2.1. Beton için verilen eşdeğer tek eksenli gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi	22
2.2. Literatürde kullanılan bazı CFT kolon kesitleri	23
2.3. Literatürde çeyrek CFT kolonlarda kullanılan sonlu eleman hasırları.....	24
2.4. Literatürde bulunan örnek yük - deplasman grafiği.....	25
2.5. Yarım CFT kolonlar için sonlu eleman modeli	30
2.6. Eksenel basınç - eksenel kısalma eğrisi	34
2.7. Beton dolu paslanmaz çelik tüp numunesi için kurulan deney düzeneği.....	36
2.8. Birim şekil değiştirme ölçerler ve LVDT 'lerin numune üzerindeki konumları.....	36
2.9. Dairesel CFT kolonlarda gerilme dağılımı	38
2.10. Farklı şekilde güçlendirilmiş kare CFT kolon kesitleri (a) Normal kesit, (b) Güçlendirme şeritli kesit, (c) Kesme çivili kesit, (d) Açılı bağlantı çubuklu kesit.....	39
2.11. 1m uzunluğundaki CFT numuneler için maksimum eksenel yük değerini etkileyen temel parametreler.....	43

2.12. 1m uzunluğunda CFT ler için maksimum yüke ulaşıldığında eksenel kısalma değerini etkileyen temel parametreler	43
2.13. 0.7m uzunluğundaki CFT ler için küp dayanımı ve cidar kalınlığına karşı maksimum noktadaki eksenel yük kontur çizimi	44
2.14. Eğilme davranışına maruz alın birleşimli kanal kesitlerin burkulma modları.....	48
2.15. Numune birleşim detayları.....	49
3.1. Tasarımda kullanılan agregalar (sırasıyla 0-5mm, 5-15mm ve 15-22mm)...	51
3.2: ELE beton basınç cihazı.....	52
3.3. Elastisite modülü beton numune başlıklarının düzlenmesi.....	55
3.4. Elastisite modülü çerçevesi	55
3.5. Elastisite modülü deney düzeneği.....	56
3.6. Kalıp şakülünün kontrolü.....	57
3.7. Beton karışımının hazırlanması	57
3.8. Dayanım ve elastisite modülü tespiti için dökülen beton numuneleri	57
3.9. Kür işlemine bırakılan C10 numuneleri	58
3.10. Çelik çekme deney düzeneği.....	58
3.11. Birim şekil değiştirme ölçer (strain gauge) yapıştırma aşamaları.....	59
3.12. Sürtünme kuvveti numunelerinin hazırlanması	60
3.13. Sürtünme kuvveti deney düzeneği	60
3.14. Statik sürtünme katsayısı deney düzeneği	61
3.15. Kullanılan kesit şekilleri	62
3.16. Sac kesim-büküm işleri	66
3.17. Silindir numunelerin şekillendirilmesi.....	66
3.18. Çeliklere kaynak yuvası açılması.....	67
3.19. Kaynak işleri	67
3.20. Başlık kaynağı yapımı.....	68
3.21. Numunelerin isimlendirilmesi.....	68
3.22. Çelik numuneler (sırasıyla kare, dairesel, dikdörtgen ve altıgen kesitler)....	69
3.23. Çelik numunelerinin içerisine beton dökümü	72
3.24. Beton dökümü tamamlanan CFST numuneleri (sırasıyla C10, C20 ve C30 serileri).....	72

3.25. Numunelerin temizlenmesi	73
3.26. Üst başlıkta beton-çelik etkileşim bölgesindeki boşlukların giderilmesi.....	73
3.27. Birim deformasyon ölçerlerin konumlarının belirlenmesi ve kireçleme	74
3.28. Daire kesitli CFST numunelere yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerin konumları.....	75
3.29. Altıgen kesitli CFST numunelere yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerin konumları.....	75
3.30. Dikdörtgen kesitli CFST numunelere yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerin konumları.....	75
3.31. Kare kesitli CFST numunelere yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerin konumları.....	75
3.32. Birim şekil değiştirme ölçer ve CFST numunelerin kırımdan önceki son hali	76
3.33: CFST eksenel basınç deney düzeneği.....	77
3.34. Birim şekil değiştirme ölçer direnç değeri	78
3.35. Veri toplama cihazı	78
4.1. C10, C20, C30 silindir ve küp numunelerin beton basınç deneyinden sonraki durumları.....	79
4.2. C10, C20, C30 beton numuneler için elastisite modülü deney sonuçları	80
4.3. Çelik fiyonkların deney sonundaki durumları.....	81
4.4. Çelik numuneler için gerilme birim şekil değiştirme grafiği	82
4.5. Sürtünme kuvveti deneyi sonucunda sıyrılan numuneler	83
4.6. Silindir numunelerde sürtünme kuvveti grafiği	84
4.7. Kare numunelerde sürtünme kuvveti grafiği.....	84
4.8. CS1500 numunesi deney öncesi ve sonrası	87
4.9. CS1500 numunesi eksenel gerilme - birim değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma).....	87
4.10. CS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma).....	87
4.11. CS1510 numunesi deney öncesi ve sonrası	88
4.12. CS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma).....	88

4.13. CS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	88
4.14. CS1520 numunesi deney öncesi ve sonrası	89
4.15. CS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	89
4.16. CS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	89
4.17. CS1530 numunesi deney öncesi ve sonrası	90
4.18. CS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	90
4.19. CS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	90
4.20. CS3000 numunesi deney öncesi ve sonrası	91
4.21. CS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	91
4.22. CS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	91
4.23. CS3010 numunesi deney öncesi ve sonrası	92
4.24. CS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	92
4.25. CS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	92
4.26. CS3020 numunesi deney öncesi ve sonrası	93
4.27. CS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	93
4.28. CS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	93
4.29. CS3030 numunesi deney öncesi ve sonrası	94
4.30. CS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	94
4.31. CS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	94

4.32. CS5000 numunesi deney öncesi ve sonrası	95
4.33. CS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	95
4.34. CS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	95
4.35. CS5010 numunesi deney öncesi ve sonrası	96
4.36. CS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	96
4.37. CS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	96
4.38. CS5020 numunesi deney öncesi ve sonrası	97
4.39. CS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	97
4.40. CS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	97
4.41. CS5030 numunesi deney öncesi ve sonrası	98
4.42. CS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	98
4.43. CS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	98
4.44. CS8000 numunesi deney öncesi ve sonrası	99
4.45. CS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	99
4.46. CS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	99
4.47. CS8010 numunesi deney öncesi ve sonrası	100
4.48. CS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	100
4.49. CS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	100
4.50. CS8020 numunesi deney öncesi ve sonrası	101

4.51. CS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	101
4.52. CS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	101
4.53. CS8030 numunesi deney öncesi ve sonrası	102
4.54. CS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	102
4.55. CS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	102
4.56. HS1500 numunesi deney öncesi ve sonrası	103
4.57. HS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	103
4.58. HS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	103
4.59. HS1510 numunesi deney öncesi ve sonrası	104
4.60. HS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	104
4.61. HS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	104
4.62. HS1520 numunesi deney öncesi ve sonrası	105
4.63. HS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	105
4.64. HS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	105
4.65. HS1530 numunesi deney öncesi ve sonrası	106
4.66. HS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	106
4.67. HS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	106
4.68. HS3000 numunesi deney öncesi ve sonrası	107
4.69. HS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	107

4.70. HS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	107
4.71. HS3010 numunesi deney öncesi ve sonrası	108
4.72. HS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	108
4.73. HS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	108
4.74. HS3020 numunesi deney öncesi ve sonrası	109
4.75. HS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	109
4.76. HS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	109
4.77. HS3030 numunesi deney öncesi ve sonrası	110
4.78. HS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	110
4.79. HS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	110
4.80. HS5000 numunesi deney öncesi ve sonrası	111
4.81. HS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	111
4.82. HS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	111
4.83. HS5010 numunesi deney öncesi ve sonrası	112
4.84. HS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	112
4.85. HS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	112
4.86. HS5020 numunesi deney öncesi ve sonrası	113
4.87. HS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	113
4.88. HS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	113

4.89. HS5030 numunesi deney öncesi ve sonrası	114
4.90. HS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	114
4.91. HS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	114
4.92. HS8000 numunesi deney öncesi ve sonrası	115
4.93. HS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	115
4.94. HS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	115
4.95. HS8010 numunesi deney öncesi ve sonrası	116
4.96. HS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	116
4.97. HS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	116
4.98. HS8020 numunesi deney öncesi ve sonrası	117
4.99. HS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	117
4.100. HS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	117
4.101. HS8030 numunesi deney öncesi ve sonrası	118
4.102. HS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	118
4.103. HS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	118
4.104. RS1500 numunesi deney öncesi ve sonrası	119
4.105. RS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	119
4.106. RS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	119
4.107. RS1510 numunesi deney öncesi ve sonrası	120

4.108. RS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısıalma).....	120
4.109. RS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısıalma).....	120
4.110. RS1520 numunesi deney öncesi ve sonrası	121
4.111. RS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısıalma).....	121
4.112. RS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısıalma).....	121
4.113. RS1530 numunesi deney öncesi ve sonrası	122
4.114. RS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısıalma).....	122
4.115. RS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısıalma).....	122
4.116. RS3000 numunesi deney öncesi ve sonrası	123
4.117. RS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısıalma).....	123
4.118. RS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısıalma).....	123
4.119. RS3010 numunesi deney öncesi ve sonrası	124
4.120. RS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısıalma).....	124
4.121. RS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısıalma).....	124
4.122. RS3020 numunesi deney öncesi ve sonrası	125
4.123. RS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısıalma).....	125
4.124. RS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısıalma).....	125
4.125. RS3030 numunesi deney öncesi ve sonrası	126
4.126. RS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısıalma).....	126

4.127. RS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	126
4.128. RS5000 numunesi deney öncesi ve sonrası	127
4.129. RS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	127
4.130. RS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	127
4.131. RS5010 numunesi deney öncesi ve sonrası	128
4.132. RS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	128
4.133. RS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	128
4.134. RS5020 numunesi deney öncesi ve sonrası	129
4.135. RS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	129
4.136. RS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	129
4.137. RS5030 numunesi deney öncesi ve sonrası	130
4.138. RS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	130
4.139. RS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	130
4.140. RS8000 numunesi deney öncesi ve sonrası	131
4.141. RS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	131
4.142. RS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	131
4.143. RS8010 numunesi deney öncesi ve sonrası	132
4.144. RS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma).....	132
4.145. RS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma).....	132

ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. Yapı çeliği mekanik özellikleri	9
1.2. BS 5400de plaka narinliği için verilen üst sınır değerleri.....	19
2.1. AISC 2001 ve 2005 standartlarında verilen CFT limitlerinin karşılaştırılması.....	46
3.1. Agregâ Özellikleri.....	50
3.2. Tasarımda 1m ³ beton için hesaplanan malzeme miktarları.....	51
3.3. Beton dökümünde kullanılan malzeme miktarları	51
3.4. Tasarım numunelerinin ortalama beton basınç dayanımları	53
3.5. HAS betondan temin edilen PÇ42.5R çimento analiz raporu.....	54
3.6. Numune özellikleri.....	63
3.7. Ortalama beton ağırlıkları	69
4.1. Beton basınç deneyi sonuçları.....	79
4.2. Elastisite modülü sonuçları	81
4.3. Deneyde sonucunda belirlenen, çeliğin mekanik özellikleri.....	82
4.4. Sürtünme gerilmesi değerleri	83
4.5. Statik sürtünme katsayı deney sonuçları	85
6.1. CFST numunelerde maksimum yük değeri artış oranları	169
6.2. CFST numunelerde çelik ve beton elemanlara gelen eksenel yük oranları	171
6.3. CFST numunelerde çelik ve beton elemanlara gelen eksenel gerilme değerleri	173
6.4. CFST numunelerin süneklik değerleri	177

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

b	: Genişlik
d	: Çap
t	: Cidar kalınlığı
L	: Boy
E	: Elastisite modülü
σ	: Eksenel gerilmesi
τ	: Kayma gerilmesi
FS	: Güvenlik katsayısı
ν	: Poisson oranı
μ	: Süneklik
G	: Kayma modülü
α	: Sıcaklık katsayısı
ε	: Birim şekil değiştirme
M	: Moment
F	: Kuvvet
P	: Basınç
A	: Alan
V	: Hacim
β	: Başlık narınlığı

Alt ve üst indisler

pl	: Orantılılık limiti (proportionality limit)
y	: Akma (yielding)
u	: Maksimum (ultimate)
f	: Kopma (fracture)
em	: Emniyet
c	: Beton
s	: Çelik
cc	: Sargı etkili beton

1. GİRİŞ

Alp - Himalayalar deprem kuşağında yer alan Türkiye, barındırdığı aktif fay hatları yüzünden geçmişten günümüze şiddetli depremlere maruz kalmıştır. Bilimsel çevreler fay hareketleri ve istatistiki yaklaşımlara bağlı olarak, Marmara Bölgesinde yakın tarihte şiddetli deprem beklemektedirler. Normal şartlar altında yapı ve elemanlarından kaynaklanan sabit yükler ile dış etkenlerden kaynaklanan hareketli yüklerin oluşturduğu içsel kuvvetlere elemanlar yeteri derecede taşıma kapasitesi gösterebilmektedir. Fakat deprem sırasında oluşan sismik hareketlerin meydana getirdiği ek kesme kuvveti ve moment etkileri yapı elemanlarının kapasitelerini zorlamaktadır. Zaman zaman sırf bu gerilmelere karşı koyabilmek için klasik betonarme kesitler, olması gerektiğinden çok daha büyük boyutlarla tasarlanmaktadır. Sismik yüklere karşı yeterli derecede sünek, taşıma kapasitesine sahip ve aynı oranda ekonomik olan CFST yapı elemanları, inşaat mühendisliği açısından gelecek vadeden yeni nesil bir sistemdir. Çelik tüpten kaynaklanan sünek davranış, CFST elemanlarını, Türk Deprem Yönetmeliğinin yapılar için esas tasarım kriteri olan, deprem esnasında insan yaşamını ön planda tutma amaçlı sünek davranış için son derece uygun hale getirmektedir. Bu açıdan çelik veya çelik cidarlı kompozit kesit kullanımı günümüzde giderek yaygınlaşmaktadır.

Yapıların, hem çelik hem de betonarme olarak ayrı ayrı inşası mümkün olduğu gibi birbirlerinin negatif yanlarını en aza indirgeyecek şekilde kompozit teşkili uzun süredir dünyada kullanılan bir yöntemdir. Bu tür yapılar kompozit yapılar olarak adlandırılmaktadır. Kompozit yapılarda, yapının taşıyıcı elemanları donatı veya ince cidarlı çelik elemanlar ile beton kullanılarak imal edilmektedir.

1.1. Tarihçe

İnsanoğlu varoluşundan bu yana temel ihtiyaçlarından birisi olan barınma kavramı üzerinde inanılmaz derecede gelişme göstermiştir. İlkçağlarda doğa ve vahşi yaşamdan korunma unsuru olarak ön plana çıkan mağaralardan, günümüzde refah seviyesi ile doğru orantılı, gösterişli sıra dışı yapılara ulaşılmıştır. Bu süreçte yapı inşası sırasında mevcut dönemlerde yaygın olarak bulunabilen, işlenmesi kolay ve inşaat alanına en yakın yapı malzemeleri kullanılmıştır. Önceleri kullanılan taş ve ahşap yapı elemanları; teknoloji, talep ve tercihlerin değişmesi ile yetersiz kalmıştır. Çok katlı ve geniş inşa alanına sahip yapılara ve dolayısıyla fiziksel-mekanik özellikleri daha yüksek olan yapı malzemelerine ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Özellikle sanayi devriminden sonra çimento ve çelik üretiminde işçiliğin azalıp üretimin çoğalması dünya çapında hızlı bir yapılaşma sürecine girilmesine yol açmıştır. Günümüzde ise gelişen mühendislik bilimleri sayesinde yapılar hayal gücü kadar geniş bir yelpazeye yayılmıştır.

Demir ve çelik çok eski tarihlerden beri bilinmekle beraber mühendislik yapılarında kullanılmaya başlanması iki asırlık bir geçmişe dayanır. Halbuki kagir ve ahşap köprüler MÖ 500 yılında yapılmaya başlanmıştır. 18. yüzyılda İngiltere’de yüksek fırınlarda font ve ham demirin bol miktarda üretilmesinden sonra, demir köprülerde kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra tekniğin ilerlemesine paralel olarak dövme çelik ve en son olarak da dökme çelik yapılarda kullanılagelmiştir [1].

Kabaca bir tasnif yapacak olursak çeliğin gelişimi;

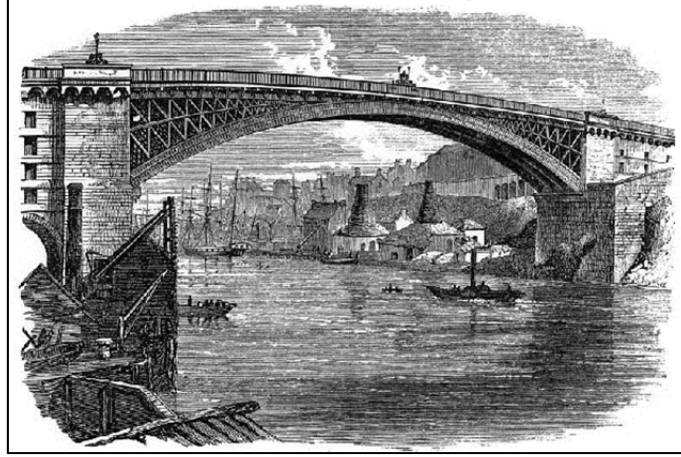
1779 - 1875: Font köprüler

1846 - 1890: Dövme çelik

1890 - : Dökme çelik köprü ve yüksek yapılar, olarak sıralanabilir.

1773-1796 yılları arasında inşa edilen, kemer formu 71.9 m tek açıklıklı Sunderland Köprüsü (İngiltere) font kullanılarak yapılan köprülerden birisidir.

Köprünün ana taşıyıcı sistemini olan ve Şekil 1.1’de görülen dairesel dökme demir elemanlar dev bir tekerleği oluşturmak için pim ve bulonlarla bir araya getirilmiştir. Geniş açıklığı dökme demirle geçmek zor olduğu için köprünün tamamında kısa basınç elemanlarından yararlanılmıştır [2].

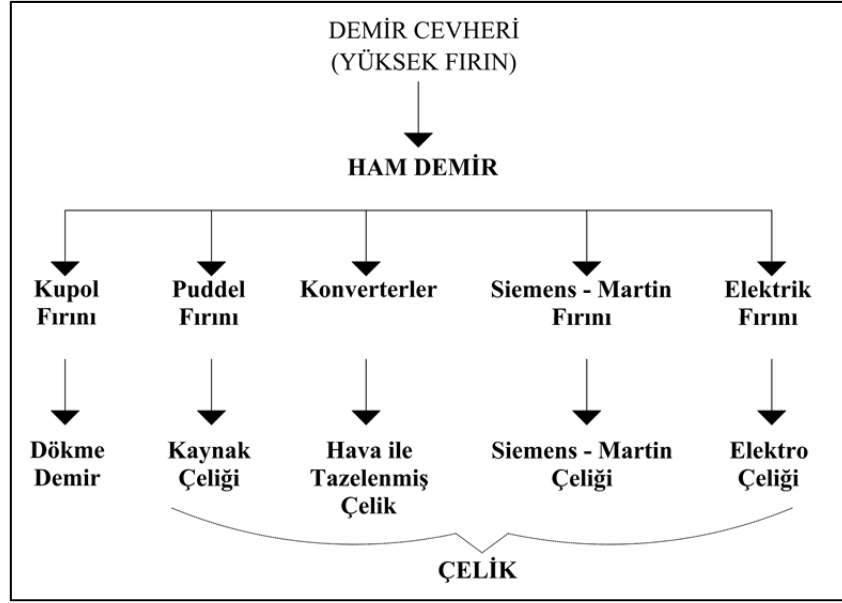


Şekil 1.1. Sunderland köprüsü

Çelik köprülerin modern bir örneği de memleketimizde 1973 yılında İstanbul’da yapılmış olan 1074 m açıklığa sahip asma köprü sisteminde tasarlanan Boğaziçi Köprüsü’dür.

1.2. Çelik

Demir (Fe) ve Karbon (C) dan oluşan çelik alaşımının üretim aşamaları saf haldeki demir cevherinden ham demir elde edilmesi ve sonra ham demirden çeliğin elde edilmesi iki kısımdan oluşmaktadır. Şekil 1.2’deki özel fırınlarda elde edilen çelik kalıplara dökülür ve sonrasında haddeden geçirilerek istenilen şekil verilir.

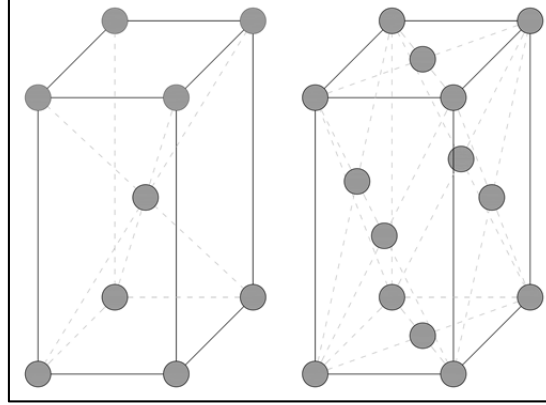


Şekil 1.2. Çeliğin üretim aşamaları

Çeliğin karışımında bulunan zararlı maddeler; fazla karbon, kükürt, fosfor, arsen, bakır, silisyum ve azottur. İstenen özelliklerin sağlanabilmesi için eklenen maddeler ise krom, bakır, manganez, molibden ve silisyumdur. Karbonun, çeliğin mukavemeti ve üzerindeki tesiri çok büyüktür. Karbon miktarı ağırlık itibarıyla 17/1000 den fazla olursa, çeliğin işlenmesi mümkün olmaz. Diğer zararlı maddelerin ve karbonun, yüksek fırınlarda yüzde miktarlarının azaltılmasına çalışılır. Fosfor çeliğin çok gevrek olmasına ve çabuk kırılmasına yol açar. %02 fosfor ihtiva eden bir çelik yere düşerse cam gibi kırılır ve parçalanır. Kükürt ise çeliğin yüksek sıcaklıkta gevremesine ve kırılmasına sebebiyet verir. Her ikisinin toplam olarak değerinin 1/1000 den az olması istenir. Çeliğin elde edilmesi esnasında bazı maddeler ilave edilir. Ayrıca krom ve silisyum mukavemeti artırır. Manganez mukavemeti arttırmakla beraber sıcakta işlenmesini kolaylaştırır. Molibden ise özellikle yüksek sıcaklıklarda çeliğin mukavemetini artırır [3].

İzotrop ve homojen bir malzeme olan çeliğe, Şekil 1.3'te belirtilen kristal yapıya sahip olduğundan dolayı mekanik yöntemlerle kolayca şekil verilebilmektedir. “Haddeleme” çelik kütüklerin silindirler yardımı ile ezilmesi

işlemi olarak tanımlanmaktadır. Şekillendirme metotlarından birisi olan haddelemeden sonra mukavemet ve süneklik özellikleri artmakta, bünyesindeki hava ile gaz boşlukları kapanmaktadır. Malzemenin uygun sıcaklığa kadar ısıtılıp yavaş yavaş soğutulması ile yumuşak ve sünek malzeme elde edilir. Bu işleme ise “tavlama” denir [4].



Şekil 1.3. Metal kristallerinin hekzagonal ve yüzey merkezli kristal yapıları

Erşen [3]’e göre çeliğin üstün ve sakıncalı yönleri aşağıda sıralanmıştır.

Çeliğin Üstünlüğü

1. Ahşap ve betonarmeye nazaran oldukça homojen ve izotrop bir malzemedir, ayrıca mukavemeti de büyüktür.
2. Elastisite modülü ahşapta yaklaşık 10000 MPa, betonarmede yaklaşık 21000 MPa, çelikte ise yaklaşık 210000 MPa’dır. Yani ahşabın 21 katı, betonarmenin 10 katıdır. Bu nedenle daha az sehim yapar, ve daha az malzeme sarfı gerektirir.
3. İşçiliğin büyük bir kısmı atölyelerde yapılabilir.
4. Aynı yükü taşımak için seçilmesi gereken kesit, çelikte betonarmeye nazaran daha küçüktür. Kesit dış ölçüleri belirli bir çelik kolonun taşıma gücü, aynı kesit ölçüleri ve şartlar için yapılan betonarme kolona oranla çok daha fazladır.

5. Kendi zati ağırlığı betonarmeye nazaran az olduğundan sömelleri daha küçük çıkar. Temel zemini sağlam olmayan yerlerdeki yapılar için bazen sadece bu özellik, taşıyıcı iskelet malzemesi olarak çeliğin seçilmesine sebep olabilir.
6. Takviyesi kolaydır, kolayca değişiklikler yapılabilir. Betonarmede bu işlemin sınırları dar, yapılmaları güç hatta bazen imkansızdır.
7. Çelik taşıyıcı elemanlar bulundukları yapıdan kısmen veya tamamen söküldüklerinde, çıkan malzeme bir başka yapıda ve hatta değişik şartlarda zayıtsız tekrar kullanılabilir. Böyle bir yapı herhangi bir nedenle yıkılsa ve enkaz haline gelse, yani içindeki çelik malzeme artık kullanılmayacak hurda niteliğinde olsa bile gene bir değeri mevcuttur.

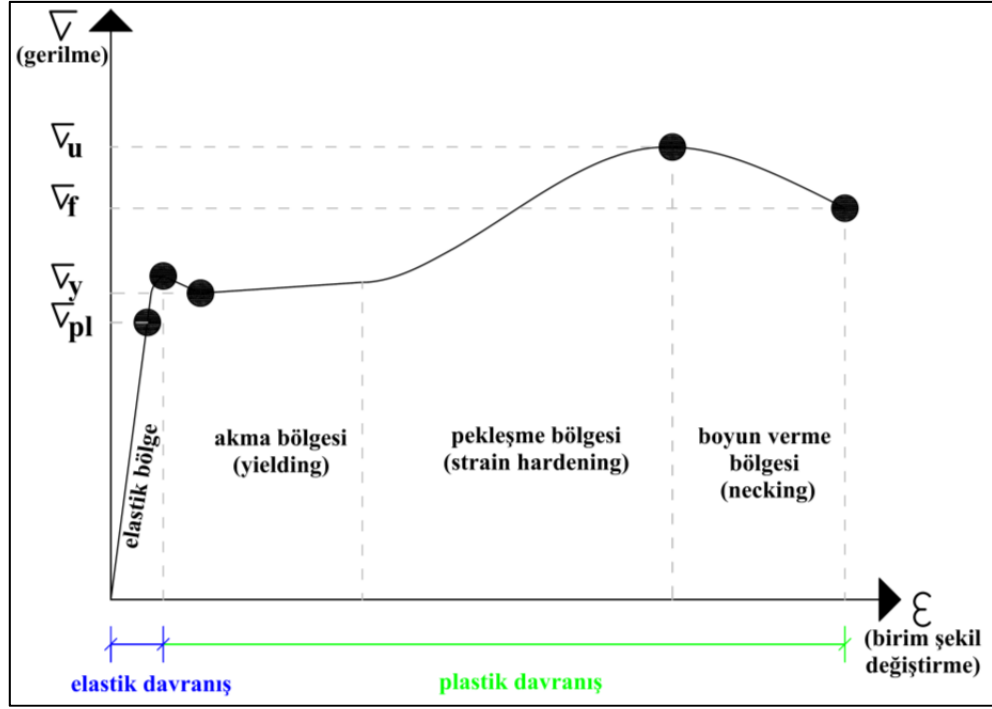
Çeliğin sakıncaları

1. Yangında yıkılmaya karşı mukavemetleri azdır. Yüksek ısı derecelerinde çelik mukavemetini kaybeder. (600 °C’de $\sigma_y \approx 0$) Kapalı hacimlerde çıkan yangınlarda, ısının 500 °C’nin üstüne çıkması halinde çelik bu ısıdan korunmak zorundadır. Mesela çok katlı yapılarda kolon ve kirişleri beton muhafaza içine almalıdır (pas payı $d=4\text{cm}$).
2. Korozyona karşı mukavemeti azdır. Beton muhafaza içine alınırsa korozyona karşı korunmuş olur. Kaplama ve çeşitli maksada hizmet eden boyalar da kullanılabilir.
3. Asit, baz ve tuza karşı mukavemeti çok azdır.

Ayrıca çelik kesitlerinde çok çeşitli alternatiflerin mevcut olması yapıların mimari açıdan geniş ve kullanışlı hale gelmesine olanak tanımaktadır. Tüm maliyetler hesaba katıldığında betonarmeye göre ekonomik olmasının yanı sıra depreme etkisi altında sistemin gösterdiği istikrarlı ve sünek davranış

özellikle yüksek yapılarda çeliğin tercih edilmesini sağlamaktadır. Çelik kuru, temiz ve gürültüsüz şantiye ortamları sağlamaktadır. Kalıp ve donatı işçiliğinin bulunmaması yapı elemanı olarak çeliğin kullanılması adına başka bir üstün taraftır. Fakat çeliğin gerek üretimi gerekse işçiliği tecrübe gerektirmektedir.

Yapı çeliği için çelik çekme deneyi sonucunda elde edilen standart gerilme şekil değiştirme grafiği (stress - strain curve) Şeki 1.4'te verilmiştir. Grafiğin doğrusal olarak artan ilk kısmı elastik bölge olarak tanımlanmakta olup Hooke Kanunu geçerlidir. Elastik bölge içerisinde yük kaldırıldığı zaman eleman ilk haline geri döner. Bu bölgedeki doğrunun eğimi malzemenin elastisite modülünü (E) vermektedir. Orantılılık limitine (proportionality limit) kadar geçerli olan σ_{pl} değeri, başlangıçtan mevcut noktaya kadar doğrusal artan maksimum gerilmeyi göstermektedir. Elastik bölgenin sonundaki maksimum değer elastik limiti göstermektedir ve sınır değer elastisite sınır gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Elastik bölgeden sonra malzemede gerilme artış olmadığı halde deformasyonun ciddi miktarda arttığı ve plastik deformasyonların başladığı akma bölgesi bulunmaktadır. Burada tasarımlarda göz önünde bulundurulacak en önemli unsurlardan birisi olan ve akma bölgesinde en az gerilme değerinin görüldüğü σ_y değeri bulunmaktadır. Daha sonra malzemenin akan kesitindeki birim yoğunluk bağıl olarak arttığından sertleşerek bir miktar daha dayanım göstermektedir. Pekleşme (strain hardening) olarak nitelendirilen bu bölgesinin sonunda malzemenin elastik olmayan davranış altında maksimum dayanım gösterdiği en yüksek gerilme değeri (ultimate stress) olan σ_u 'ya ulaşılır. Bu noktadan sonra elemanda gerilme düşerek birim şekil değiştirme artar ve gözle görülür ciddi deformasyonlar meydana gelir. Son olarak da kopma noktası (rapture point) olarak adlandırılan kısımdaki kopma gerilmesi σ_f değerine ulaşılır.



Şekil 1.4. Çelik malzeme standart gerilme şekil değiştirme grafiği

Yapı çeliği sünek (düktil) bir malzeme olduğu için emniyet gerilmesi tespitinde sınır değer olarak akma sınırı (σ_y) esas alınır. Bu sınır değeri belli bir emniyet katsayısı değeri (FS) ile bölünerek emniyet gerilmeleri bulunur.

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_y}{FS} \quad (1.1)$$

Çelik yapı hesabında iki ayrı yükleme durumu dikkate alınır. Esas yükler (H), tali yükler (Z). Tahkikler bir (H) için, bir de (H+Z) için yapılmalıdır. Bu her iki yükleme durumu için emniyet katsayıları değişmektedir.

Çelik yapılarda en çok kullanılan çelik cinsi St37'dir. Buna normal yapı çeliği de denir. DIN17100'de yapı çeliğinin sahip olması gerekli özellikler Çizelge 1.1'de belirtilmiştir. Buna göre St37 çeliğinin kopma mukavemeti $\sigma_u = 3700 - 4500 \text{ kg/cm}^2$, akma gerilmesi $\sigma_y = 2400 - 2800 \text{ kg/cm}^2$ olmalıdır. 37 değeri,

kg/mm² cinsinden çeliğin sahip olması gereken minimum çekme mukavemetini gösterir [1].

Çizelge 1.1. Yapı çeliği mekanik özellikleri

		σ_{em} (MPa)		τ_{em} (MPa)	
Çelik Cinsi	σ_y (MPa)	H	HZ	H	HZ
St 37	240	140	160	90	105
St 52	360	210	240	35	155

Bütün çelik cinsleri için geçerli olan bazı değerler ise yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir.

Elastisite modülü

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

Poisson oranı

$$\nu = 0,3$$

Kayma modülü

$$G = 81000 \text{ MPa}$$

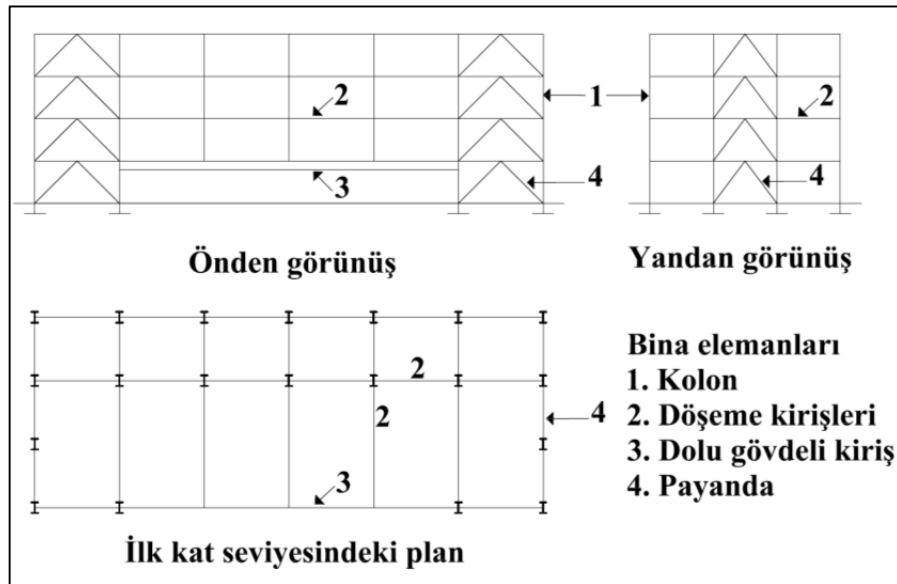
Lineer sıcaklık katsayısı

$$\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6} \text{ (1/}^\circ\text{C)}$$

Çelik binalar yapılara özgü farklı elemanlardan oluşmaktadır:

1. Kirişler ve ana kirişler - bükülme ve makaslama sırasındaki yanal yükleri taşıyan bileşenler;
2. Bağlantılar - gerilme sırasındaki eksenel yükleri taşıyan bileşenler;

3. Payandalar, kolonlar veya kısa dikmeler - basınç/kompresyon sırasındaki eksenel yükleri taşıyan bileşenler. Bu bileşenler basınca olduğu kadar eğilmeye de maruz kalmaktadır;
4. Makaslar ve kafes kirişleri - yanal yükleri taşıyan çerçevesel bileşenler. Bunlar payandalardan ve bağlantılardan oluşmaktadır;
5. Çatı aşığı - çatı örtülerini taşıyan kiriş bileşenleri;
6. Kaplama hatılı - duvar kaplamalarını destekleyen kiriş bileşenleri;
7. Kuşaklar - kolonlarla ve çatı makaslarıyla birlikte rüzgar yüklerine karşı koyan ve böylelikle binanın kararlılığını sağlayan dikey ve yatay makasları oluşturan diyagonal payandalar ve bağlantılar. [5].



Şekil 1.5. Çelik yapı elemanları

Çelik yapı tasarımının gerçekleştirileceği sınır durumlar BS 5950-1: 2000 Bölüm 2’de aşağıdaki gibi belirtilmiştir [5]:

Maksimum (Nihai) Sınır Değerleri

1. Mukavemet (genel akma, kopma, burkulma ve bir mekanizmaya dönüşmeyi içermektedir);

2. Devrilme ve sallanmaya karşı kararlılık;
3. Yorgunluk sonucu kırılma;
4. Gevrek kırılma.

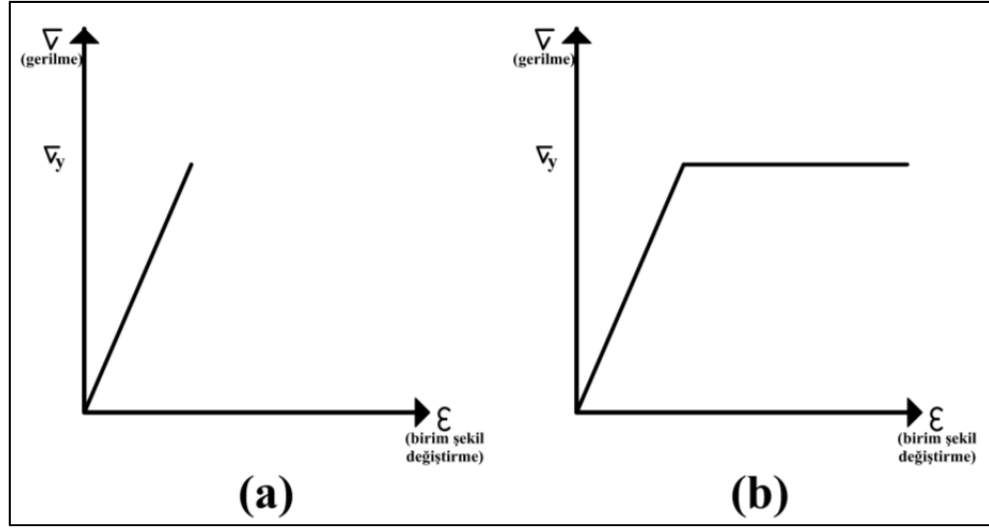
Nihai sınır durumlarının aşılması durumunda, bütün bina veya bir parçası çöker.

Kullanılabilirlik sınır değerleri

5. Eğilme
6. Titreşim (örneğin, rüzgarın neden olduğu salınım);
7. Yorgunluktan kaynaklanan onarılabılır hasar;
8. Korozyon ve dayanıklılık.

Kullanılabilirlik sınır değerleri aşıldığında yapıyı veya bir parçasını kullanılamaz duruma getirir fakat binanın çöktüğü anlamına gelmez. İlgili bütün sınır değerlerin göz önünde bulundurulması gereklidir, fakat nihai yüklemde mukavemet ve kararlılık bazında tasarımın yapıp kullanılabilirlik sınırları içindeki yüklemelerde eğilmenin aşırı olmadığını kontrol etmek genellikle yeterlidir.

Lineer elastik malzeme kabulünde emniyet gerilmesi elastik sınırın altında kaldığı için Şekil 1.6a'da belirtilen metot elastisite teorisine göre hesap olarak adlandırılır. Şekil 1.6b'de ise elasto-plastik malzeme kabulünde elastik sınırın üstündeki akma sınırı ve daha sonra pekleşme bölgesi bulunmaktadır. Kopma ise bu sınırlardan sonra meydana gelmektedir. Hiperstatik sistemlerde herhangi bir elemanda plastikleşmenin meydana gelmesi sistemin tamamen göçeceği anlamına gelmez. Sistemde elastik sınırdan sonraki taşıma kapasitesi rezervinin de kullanılmasıyla yapılan hesaba taşıma gücü metodu denir.



Şekil 1.6. Tasarım esnasında kullanılan hesap kabulleri. (a) elastisite teorisine göre hesap ve (b) taşıma kapasitesi teorisine göre hesap

1.3. Beton Dolu Çelik Kesitler (Concrete Filled Steel Tubes) CFST

Uzun senelerdir ülkemizdeki yapı stoğunu oluşturan betonarme yapıların yanı sıra son yıllarda çelik üretimi, işçiliği ve kullanımının hızla artması ile birlikte özellikle yüksek katlı ve ticari oluşumlarda çelik yapı oranı yükselmektedir. Ülkemizdeki çelik ve çelik ürünlerinin çeşitliliği ile kalitesinin artmasına paralel olarak yapı sektörü; daha ekonomik, kullanışlı ve hızlı inşa sağlayan farklı çözüm arayışlarını da beraberinde getirmektedir.

Dünyada artan ivme ile beraber soğukta şekil verilmiş ince cidarlı çelik yapı malzemeleri ve bunlardan üretilmiş yapı elemanları üzerindeki deneyler önem kazanmıştır. Normal çelikten daha ince ve hafif olmasından dolayı ince cidarlı çelik malzemelerin özellikle çelik çatı ile taşıyıcı eleman olarak kullanıldığı az katlı yapıların inşa edilmesi, yakın gelecekte yapıların tek bir malzemeden değil geniş bir yelpazede malzeme çeşitliğinin kullanılacağını göstermektedir.

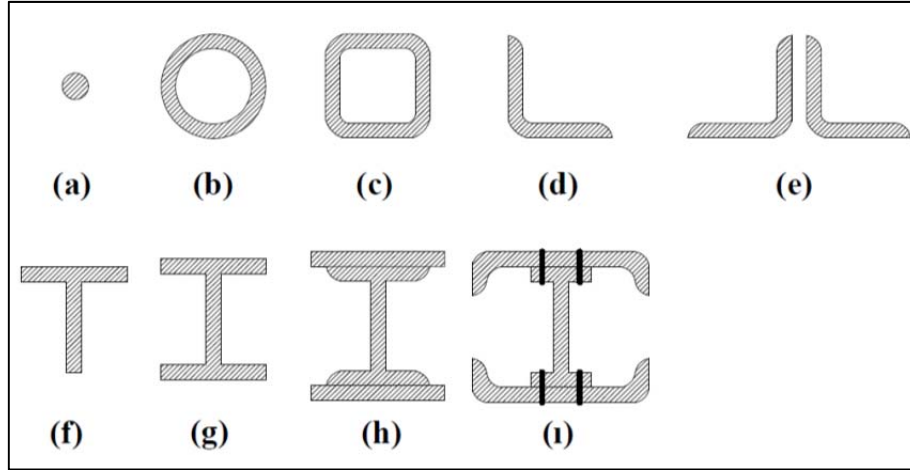
Genel hacminde %0,2 değerinden daha fazla donatı bulunan beton, betonarme (donatılı beton) olarak adlandırılmaktadır. Yapı elemanlarında

meydana gelen çekme gerilmeleri çelik donatılar tarafından karşılanırken, basınç gerilmeleri beton ile karşılanmaktadır. Günümüzde her ne kadar yüksek dayanım özelliklerine sahip malzemeler bulunsada betonarmenin hızlı, kolay uygulanabilir ve özellikle de ucuz oluşu tercih sebebidir. Fakat uygulamada en fazla işçilik yüzdesini donatı ve kalıp işleri oluşturmaktadır. Yine aynı doğrultuda zaman ve maliyetten de kayıp söz konusudur. Bu durum yıllardır süregelen betonarme kullanımının daha verimli hale getirilmesi gerekliliği doğurmaktadır.

Aşağıda genel başlıklar halinde tipik çelik sistemleri ve kullanılan elemanlar verilmiştir;

- a) Hafif kafes ve destek sistemleri: Sırt sırta birleştirilmiş köşebentler ve T profilleri,
- b) Geniş kafes sistemleri: Dairesel boş kesitler, dikdörtgen kesitler, birleşik kesitler ve geleneksel kolonları,
- c) Çerçeve sistemleri: Geleneksel kolonlar, fabrika üretimi donatılı UC kesitleri,
- d) Köprüler: Kutu kesitli kolonları,
- e) Güç istasyonları: Sıkılaştırılmış kutu kesitli kolonları içermektedir [6].

“Eksenel basınç etkisine maruz kalan elemanlar, yapıdaki esas yük taşıma bileşenlerinden biri olan “kolon” olarak tanımlanmaktadır. Yapı çerçevelerinde düşey kolonlar şeklinde, köprü ya da uzay kafes sistemlerinde basınç yükleri taşıyan çubuklar olarak çalışmaktadır. Basınç elemanlarında en önemli faktör burkulmaya karşı tasarımıdır. Şekil 1.7’de görülen çeşitli tipte çelik kesitler basınç gerilmelerine karşı koymak için kullanılmaktadır. Bağlantıların yapılması sırasındaki, işçilik metodu gibi uygulamadaki kısıtlamalar özellikle hafif elemanlar için seçimi etkileyen en önemli faktördür. Ancak, tüp gibi kapalı kesitler teorik olarak en verimli olanlarıdır. Açık kesitlere göre saha birleşimleri daha kolay olmakla beraber minimum oranda tecrübeli işçilik ve özel donanım gerektirir [6].”



Şekil 1.7. Tipik çelik kolon kesitleri

Tüp tipi yapılar, 80 katın üzerindeki yüksekliğe sahip çok uzun binalar için ilk olarak ABD’den Dr. Fazlur Khan tarafından geliştirilmiştir. Genel yapısal sistemde beton çekirdekli çelik karkas kullanıldığında yapının en üst noktasındaki sehim aşırı derecede olabilmektedir. Yapı malzemesi olarak kullanımı ve tasarım sonuçlarının güvenilirliğine bağlı olarak çelik tüp sistemleri geleneksel sistemlerle karşılaştırıldığında son derece verimlidir. Bu sistemde, çevre duvarlar yüksek derecede rijit ya da yatay yüklere karşı dayanım sağlayan destek tüpleri ile inşa edilmektedir. Tek tüplü yapılarda, çevre duvarları tüm yatay yükü ve bunların düşey yük etkilerini taşımaktadır. Tüp elemanların sayısı ve inşasına bağlı olarak çok yüksek yapıların tüp yığınlarıyla tasarımı yapılabilmektedir. Tek tüp kullanıldığında kesme gerilmesi birikiminin düşürülmesi daha ciddi problemler oluşturmaktadır [7].

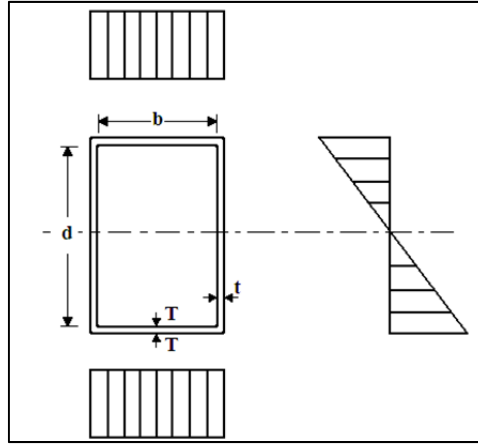
Beton dolu çelik tüp (CFST) sistem; çelik, beton ya da donatılı beton sistemlere göre birçok açıdan avantaja sahiptir. Bu sistemde eleman davranışlarını belirleyen en önemli faktörlerden biri ise malzeme özellikleridir.

Yapılarda yüksek dayanımlı eleman kullanımı gerektiğinde, yumuşak yapı çeliğinden daha fazla akma gerilmesine sahip çelik alaşımların, elemanın kesit alanındaki indirgemesine bağlı olarak kullanımına izin verilmektedir. Alandaki indirgeme ya sabit kalınlıkta yanal boyutlardaki azalma ya da sabit yanal boyutlarda kalınlıktaki azalma şeklinde olabilir. İlk durumda narinlik oranı L/r ’nin

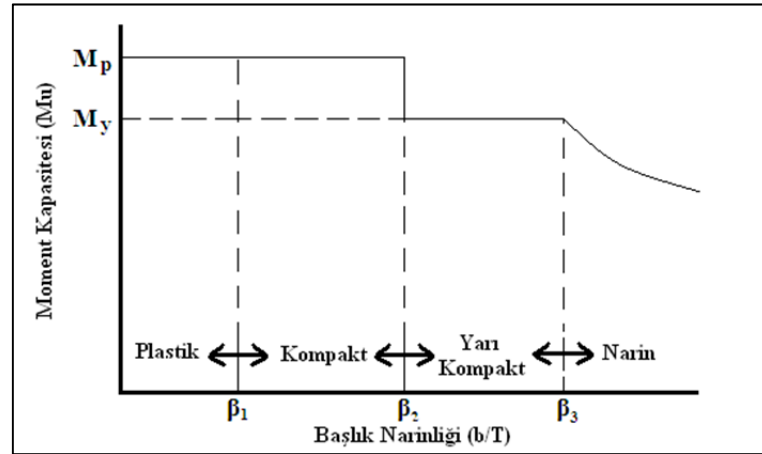
artması sonucu kesit dönme yarıçapı düşürülür. İkinci durumda ise kalınlık/genişlik oranı t/b düşürülür. Çünkü tüm çeliklerin elastisite modülü yaklaşık olarak sabittir. Bundan dolayı dönme yarıçapı “ r ” ya da kalınlık “ t ” değerlerindeki indirgeme, Euler burkulması ya da olası yerel veya burulma burkulması durumlarını değiştirecektir [8].

Çelik elemanların yatay ya da düşey yük taşıma kapasitelerinin kullanımı için, yapısal özelliklerinin gerçekçi olarak kullanılması tasarımda en önemli faktördür. İnce cidarlı yapısal kesitlerde ana unsur, elemanlar arasındaki birleşimlerin uygun şekilde gerçekleştirilmesi gerekliliğidir [7]. Cidarların ince olması kaynak işlemi sırasında çelik elemanın ergimesi, delinmesi ve sıcaklığa bağlı burkulması gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Aynı şekilde bulonlama yapılırken bulonların sıyrılması ve bulon deliklerinin kesitleri yüksek derecede zayıflatma ihtimali bulunmaktadır. Tasarım sırasında işçilik katsayıları bu bağlamda değerlendirilmelidir.

Şekil 1.8’de görülen diyagram dikdörtgen kutu kesitin kiriş olarak kullanımını göstermektedir. Elastik gerilme diyagramı bileşenleri için plaka narinliği oranı, başlık ve açıklıkta b/T ve d/t olarak verilmiştir. Kirişe eşit ve ters yönlü uç momentleri (M) uygulanırsa, moment ve dönme durumuna bağlı olarak Şekil 1.9’da görülen yapısal özellikleri göstermektedir. Açıklıktaki yerel burkulmanın henüz gerçekleşmediği kabul edilen d/t oranı için tepkinin 4 farklı durumu ise Şekil 1.10’da verilen, başlık (flanş) narinliği b/t ’ye uygulanan basınca bağlı olarak gerçekleşebilecek olası 4 durum şu şekilde tarif edilmektedir (β = plaka genişliği / plaka kalınlığı) [6].



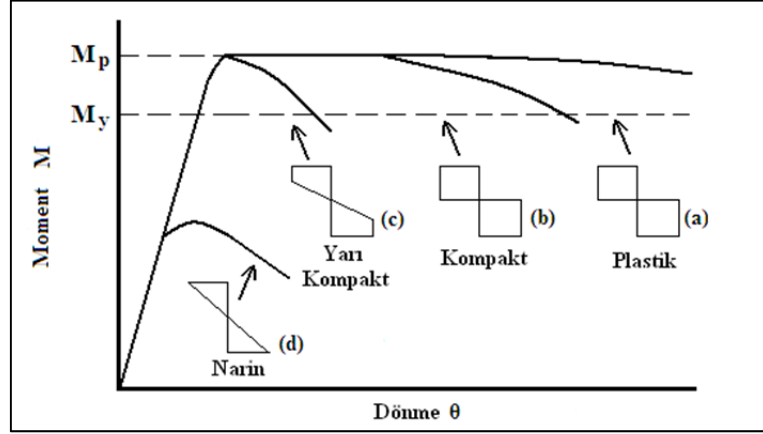
Şekil 1.8. Dikdörtgen boş kesitin kiriş olarak kullanımı



Şekil 1.9. Farklı kesit sınıflarının başlık narinliğine bağlı eğilme etkisi altındaki davranışı

- $b/t \leq \beta_1$, ulaşılmış ve devam eden tamamen plastik moment kapasitesi M_p değeri için, yüksek oranda dönme ile plastik tasarıma uygun elemandır (plastik kesit, sınıf 1)
- $\beta_1 < b/t < \beta_2$, ulaşılmış tamamen plastik moment kapasitesi M_p değeri için, sadece küçük dönme ve tam kapasite kullanımında elastik tasarım için uygun elemandır (gövde uzunluğu kısa - sıkı kesit, sınıf 2)
- $\beta_2 < b/t \leq \beta_3$, ulaşılmış tamamen elastik moment kapasitesi M_y değeri için, sınırlı kapasite kullanımında elastik tasarım için uygundur (yarı sıkı kesit, sınıf 3)

- d) $\beta_3 < b/t$, yerel burkulma limitleri elastik moment kapasitesi M_y değerinden düşük olan elemandır (narin kesit, sınıf 4) [6].



Şekil 1.10. Başlık narinliğinin fonksiyonu olarak moment kapasitesi

Betonarme, çelik ve CFST yapısal elemanlarının gerilme ve deformasyon değerlerini etkileyebilecek unsurlar aşağıda sıralanmıştır.

1.3.1. Süneklik

“Betonarme bir elemanda beton ve çelik, dış yüklerin kesitlerde oluşturduğu etkilere beraberce karşı koyarlar. Bunun sonucu olarak, ileri yük kademelerinde, bir betonarme elemanın davranışına beton ve çeliğin doğrusal olmayan davranışı yansır. Herhangi bir etki altında bulunan bir betonarme kesit veya elemanın davranışında f_y ve Φ_y en büyük elastik yük (etki) ve yerdeğiştirme (şekil değiştirme)ye karşı gelirken, f_u ve Φ_u bu büyüklüklerin dayanımının sona erdiğiindeki değerlerini göstermektedir. Bu değerler cinsinden tanımlanacak

$$\mu = \frac{\Phi_u}{\Phi_y} \quad (1.2)$$

oranı, karşı gelen kesit veya elemanın elastik ötesi şekil değiştirme yapabilme ölçüsünü gösterir ve süneklik olarak isimlendirilir. Sünek bir

yapıda dayanım hemen hemen sabit kalırken önemli şekil değiştirmeler meydana gelir. Deprem ve patlama gibi yükleme durumlarında, ayrıca ortaya çıkan enerjinin yutulması gerektiği için süneklik önemlidir [9].”

1.3.2. Burkulma

elik yapı elemanlarında burkulma davranışının önlenmesi yapının davranışı açısından önemlidir. Galambos’a göre aşağıda sıralanan 3 farklı burkulma olasılığı söz konusudur;

- a) Yanal burkulma: Eleman yüzeyinin genişçe bir parçası stabil durumdan çıkar ve burkulur.
- b) Yerel burkulma: Yüklenmiř nokta, alandaki komřu noktalar arasındaki eğriliğe ters biçimde sehim yapar ya da tamamen kopar.
- c) Eleman burkulması: Eksenel basınç altındaki eleman bireysel olarak burkulur. Eleman tasarımı sırasında dikkate alınmalıdır [7].

Kesiti oldukça ince malzemeden üretilen basınç elemanları genellikle “crippling” olarak adlandırılan yerel burkulma ile göçebilir. Eęer kesit burulmaya karşı zayıf ise burulum (twist-torsion) ile burkulma gerçekleşir. Yerel burkulma gerilmesi plaka elemanın sahip olduğu genişlik (b) ve kalınlık (t), kenarları boyunca geçerli olan destek koşulları, elastisite modülü ve kalınlık/genişlik oranının karesine $(t/b)^2$ bağlıdır. Burulmalı burkulma geleneksel kesitlerde nadiren kritik rol oynar. Kutu ya da tp kesitler, açık I, T ve Z şekilli kesitlerden çok daha fazla burulma rijitliğine sahiptir. Örneğin tp kesitler için burulmalı burkulma modu nadiren gözlenmektedir. İki eksene göre de simetrik olan kesitler, tek eksene göre simetrik olan ya da simetrik olmayan kesitlere göre burulma açısından daha stabildir [8].

Bu doğrultuda, elemanın herhangi bir burkulma moduna gelmeden mümkün olan en yüksek taşıma kapasitesinin sağlanması amacıyla CFT elemanların kullanımı ana amaç olacaktır. Çünkü çelik tüpün yeterli sargı sağlayamadığı ya da beton çekirdeğin yeterli dayanım gösteremediği durumlarda öncelikle yerel burkulma beklenmektedir. Çelik tüp tarafından sağlanan yanal basınca sargı etkisi denilmektedir. Etriye mantığı ile çalışmakta olup eleman burkulma modunu değiştirmektedir. Elemanın boyutlarına bağlı olarak belirlenen narinlik değerleri burkulma modu üzerinde önemli etkiye sahiptir. Çizelge 1.2’de plaka narinliği için verilen üst sınırlar görülmektedir;

Çizelge 1.2. BS 5400de plaka narinliği için verilen üst sınır değerleri [6]

b/t ya da D/t limiti	Rijitleştirilmiş	Rijitleştirilmemiş	Dairesel Boş Kesit (CHS)
$P_y = 355 \text{ N/mm}^2$	12	14	100
$P_y = 275 \text{ N/mm}^2$	14	16	114

b: genişlik, D: dış çap, t: kalınlık

1.3.3. Yorulma

Sürekli değişken yüklere maruz kalan köprüler, havaalanları pistleri, vinç elemanları ve su yapılarında, değeri düşük bile olsa tekrarlı etkilerden kaynaklanan eleman ve sistemde hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu durumda eleman maksimum taşıma kapasitesine ulaşmadan yorulmaya bağlı yerel bir kusurdan dolayı taşıma kapasitesini yitirebilir.

1.3.4. Gevrek kopma

“Yapı çelikleri 10 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda işlenebilir fakat sıcaklık daha da düşükçe giderek daha gevrek hale gelir ve 0 °C’nin altında düşük gerilimlerde bile kopmalar olabilir. Kesitlerde ve gerilim yoğunluklarında sert değişimlerden kaçınılmalıdır [5].”

1.3.5. Rijitlik ve stabilite

“Betonarmenin büyük zati ağırlığına karşılık sehimlerin küçük olması ve rijitliğin büyük olması bir avantajdır. Narin yapıların dinamik yükler altındaki davranışı stabilite bakımından tehlikeli olabilir. Nitekim bir asma köprü (1941 Tacoma Köprüsü) rüzgar tesiriyle yıkılmıştır [4].”

1.3.6. Yangından koruma

“Artan sıcaklığa paralel olarak mukavemetleri azaldığından, yapı çeliklerinin yangın performansı kötüdür. 550 °C’de akma gerilmesi normal sıcaklıklardaki değerinin yaklaşık 0.7’sine düşer; yani, proje gerilimine erişmiştir ve proje yükleri altında çökmeler gerçekleşebilir [5].”

1970 yılında yapımı tamamlanan ve dönemin en yüksek çelik yapılarından birisi olan Dünya Ticaret Merkezi, 11 Eylül 2001 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde yapılan saldırı sonucunda; çeliğin ısı artışına karşı göstermiş olduğu mukavemet kaybı yüzünden kısa bir süre içerisinde yıkılmıştır. Yakın tarihte yaşanan bu olay çelik malzemelerin yangına karşı korunması gerekliliğini açıkça gözler önüne sermektedir. Yangından koruma amacı ile betonarme ve kompozit elemanlarda çelikler betonun içerisinde bırakılmaktadır. Tamamen çelik yapılarda ise yangına karşı koruma sağlayan kimyasallar kullanılmakta ve yapıda yangın çıkma ihtimali en aza indirilmeye çalışılmaktadır.

1.3.7. Korozyondan koruma

“Çeliğe paslanmama özelliği, diğer bir deyişle korozyona dayanım kazandırmak için içerisine en az %10.5 krom ilave edilir. Çeliğin bünyesinde katılan diğer alaşımlara göre farklı kalitelerde paslanmaz çelik üretilir [4].”

Tüm yapılarda zeminden gelebilecek su ve kimyasallara karşı yalıtım yapılmaktadır. Aksi takdirde beton üzerinde sülfat etki, çelik ve donatılar üzerinde de korozyon oluşturmaktadır. Bu durum betonda içsel çatlaklara, çelikte de kesit

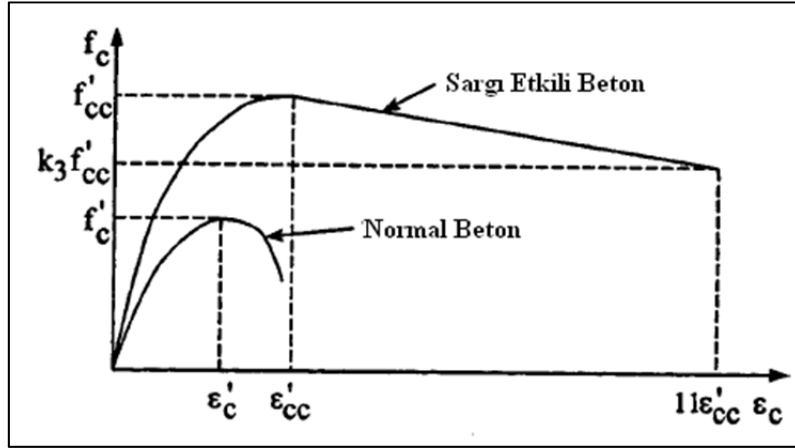
alanı kaybına yol açacağından, her iki elemanda da taşıma gücü kaybı meydana gelerek tasarım yükünden daha düşük yüklerde yapıda hasarların ortaya çıkması ihtimal dahilinde olacaktır. Çeşitli boyalar, kimyasallar, kaplama ve yalıtımlar ile çelik elemanlar korozyondan korunmaya çalışılmalıdır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Değişik malzeme ve geometrik özelliklere sahip, boş (HS - Hollow Sections) ve beton dolu çelik tüplerin (CFT ya da CFST - Concrete Filled Steel Tubes) farklı yükleme koşulları altında davranışlarının incelendiği çalışmalar, araştırılan davranışa göre aşağıda sunulmuştur. Çalışmalar deneysel, teorik veya deneysel ve teorik modelleme şeklinde yapılmaktadır.

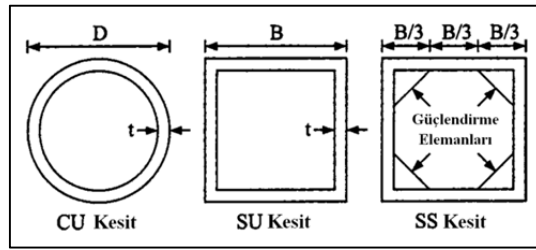
2.1. Eksenel Yükleme Durumunda; Sargı etkisi, Süneklik ve Burkulma Davranışlarının Araştırıldığı Çalışmalar

Hu ve ark. [10] tarafından yapılan çalışmada; eksenel yüklü CFT kolonların sargı etkisi incelenmiştir. CFT kolonları yüksek dayanım, yüksek süneklik ve geniş enerji sönümleme kapasitesi gibi yapısal özellikleri sayesinde sismik mukavemet sağlamaktadır. Beton üç eksenli yükleme durumuna maruz kaldığında Şekil 2.1’de görüldüğü gibi çelik kabuk betona sargı basıncı sağlamaktadır. Diğer yandan çelik tüp beton çekirdek tarafından desteklenmektedir.



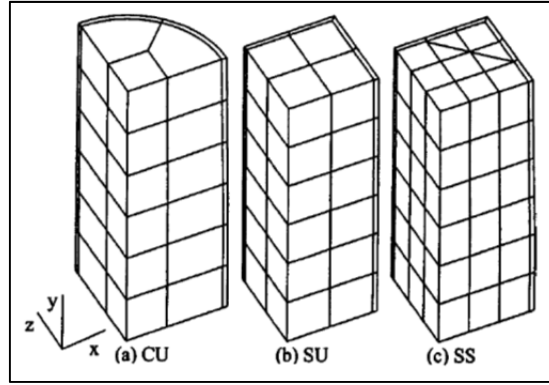
Şekil 2.1. Beton için verilen eşdeğer tek eksenli gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi

Çalışma kapsamında literatürde CFT yapısal elemanların mekanik özelliklerini etkileyen; elemanın geometrik şekli, kesit alanı, kompozit malzemenin aderansı, malzeme kalitesi, kesit bağlantı çubukları, elemanın boyu ve çap/kalınlık oranı gibi değişkenlerden bir veya birkaçı seçilerek değerlendirilmiştir. Elemanların maksimum kapasiteleri incelendiğinden lineer olmayan analiz yapılmıştır. Şekil 2.2’de görülen kesitlerden 6 dairesel, 6 kare ve 12 tane de bağlantı çubuklu kare kesit olmak üzere, D/t oranları 17 ile 150 arasında değişen toplam 24 deney numunesi üzerinde, eksenel yüklü lineer olmayan analiz yapılarak beton dolu çelik (CFT) kolonlarda sargı etkisi irdelenmiştir [10].



Şekil 2.2. Literatürde kullanılan bazı CFT kolon kesitleri

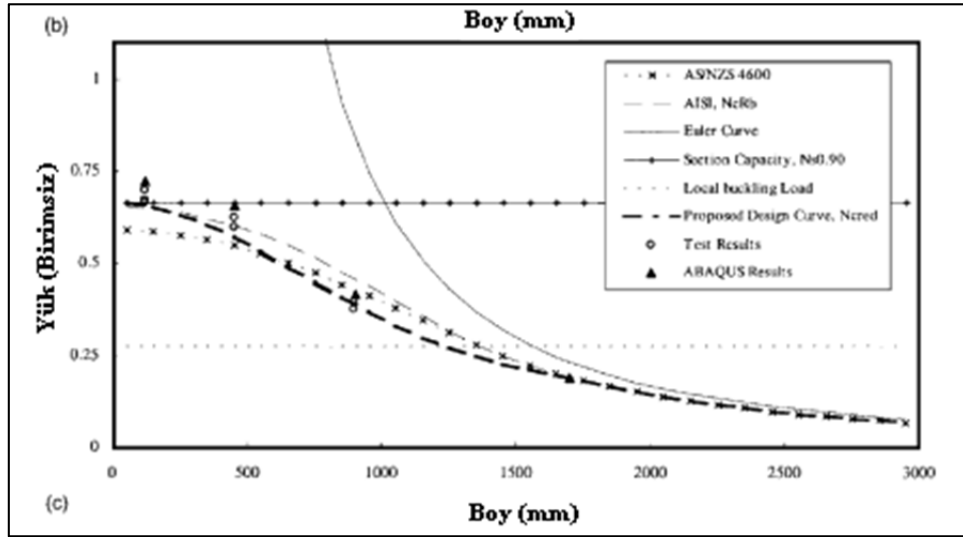
ABAQUS programı ile Şekil 2.3’te görülen modellemeler yapılmış olup farklı kesit tipi ve D/t oranlarına sahip elemanlarda farklı göçme modları gözlemlenmiştir. Sonuçta dairesel kesitlerde ($d/t < 40$) en yüksek sargı etkisi gözlemlenmiştir. Çelik tüpte yerel burkulmalar gerçekleşmemiştir. Kare kesitlerde özellikle $b/t > 30$ durumunda betona yüksek sargı etkisi sağlanamamıştır. Yerel burkulmalar yer almaktadır. Bağlantı çubuklu kesitlerde özellikle çubuk aralığının az ve çubuk sayısının çok ya da çapının geniş olduğu durumlarda sargı etkisi yükselmiştir. Çelik tüpün yerel burkulması çubuklarla engellenmiş ve gerçekleşme olasılığı indirgenmiştir [10].



Şekil 2.3. Literatürde çeyrek CFT kolonlarda kullanılan sonlu eleman hasırları

Yang ve ark. [11] tarafından soğukta şekil verilmiş, akma gerilmesi 550 MPa olan yüksek dayanımlı çelik plakalardan üretilen içi boş uzun kolonlar üzerinde yükleme testleri yapılmıştır. Çelikler Avustralya Standardı AS1397'ye göre G550 sınıfındadır. 0,42 ve 0,60 mm cidar kalınlığına sahip çelik plakalardan üretilen toplam 28 kolon kullanılmıştır. Alışılmış olarak kolon iki şekilde burkulabilmektedir; plakanın burkulmasına bağlı olarak kolonun bileşenleri olan açıklık ve başlıklarda daha kısa yarım dalgalarla gerçekleşen yerel ya da plaka burkulması ve tüm kolonun efektif kolon boyuna eşit yarım dalga boyundaki sehimli ile gerçekleşen yanal burkulmadır. Verilen herhangi bir kolon için burkulmanın, yerel ve yanal burkulmalara karşılık gelen gerilmelerden düşük olanı için gerçekleşmesi beklenir. Ancak, gerçekte bu iki burkulma modu arasındaki etkileşime bağlı olarak doğru değer, burkulma gerilmelerinin ikisinden de düşük olacaktır. Etkileşim burkulmasında kusurlar önemli rol oynamaktadır. Kolon dayanımı, aşırı yanal birim şekil değiştirme göstermeden karşı koyabildiği en yüksek eksenel yüke göre sınıflandırılır. Normalde, soğukta şekil verilmiş çelik kesitler yerel burkulma gerilmesine göre değil, plaka elemanının burkulma sonrası gerilme değeri baz alınarak tasarlanır. Düz plakaların burkulma sonrası dayanımına bağlı olarak, yapı elemanlarında ek yük taşıyabildiği kanıtlanmıştır. Kısa kolonlarda basınç gerilmesi altında yapılan çalışmalarda ise gerilmelerin depolandığı kesitlerde düşük pekleşme değerinin en fazla role sahip olduğu görülmüştür. Elastik yerel burkulma ve yerel burkulma sonrası etkilerin önemli olduğu daha narin kesitlerde Amerikan tasarım önerilerinin aksine, düşük

pekleşme etkisinin çok da önemli olmadığı görülmüştür. Soğukta şekil verilmiş U şekilli çelikler epoksi ile yapıştırılarak oluşturulan kutu kesitler kullanılmıştır. Cidar kalınlığı 0,42 mm olan numunelerin başlık ve açıklık mesafeleri değişmekle birlikte, uzunluğu 549,5 ile 1698,0 mm arasında olan 16 kolon kullanılmıştır. Cidar kalınlığı 0,60 mm numunelerden ise boyları 448,5 ile 898,5 mm arasında olan 12 kolon kullanılmıştır. Nihai yük kapasitesinde test numunelerinin davranışları ve burkulma mekanizmaları incelenmiştir. Sonlu elemanların lineer olmayan analizinde ABAQUS programı kullanılarak, numuneler modellenmiştir. Kesitler için verilen tasarım eğrileri ile deneysel ve analitik olarak elde edilen veriler Şekil 2.4'te görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.4. Literatürde bulunan örnek yük - deplasman grafiği

Plaka narinlik oranı (b/t) 33 ile 119 arasında, kolon narinlik oranı ise (L/r_x) 27 ile 148 arasında değişmektedir. Kolona bağlı olarak meydana gelen yük eksantirisitesi $L/1000$ olarak kullanılmıştır. ABAQUS simülasyonunda test sonuçları, yerel kusurlar ve genel eksantirisite göz önüne alınarak yapılmıştır. Deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki fark tüm kolonlar için ortalama olarak %6'dan düşük çıkmıştır. Analitik sonuçlar yüksek çıktığından, program için daha detaylı kusur değerlendirmesi gerekmektedir. Depolanmış plakalardan üretilen numunelerde tam burkulma meydana geldiğinde yüksek yerel burkulma sonuçları

gözlemlenmiştir. Narin plakalı çok uzun kolonlarda, burkulma yanal burkulma modu ile gerçekleştiğinden daha düşük yerel burkulma değerleri görülmektedir. Yerel ve yanal burkulma arasındaki etkileşim, kolon dayanımını düşürmekte ve test sonuçlarının tasarım eğrilerinden düşük çıkmasına yol açmaktadır. En kötü durumda Avustralya 1996 AS/NZS 4600 ve AISI standartları arasında %14 fark çıkmıştır. Bu durum iki metodun uyuşmadığını göstermektedir. Deney sonuçları ile ABAQUS sonuçları birbirlerini makul değerde onayladığından, uygun makine bulunmadığı durumlarda uzun kolonlarda testlerin simülasyonun için ABAQUS kullanılabilir [11].

Yan ve Young [12] tarafından ankastre mesnetli, soğukta şekil verilmiş kanal kesitli çelik kolonların, aksenal basınç altındaki davranışı incelenmiştir. Numuneler çinko kaplı çelik yapı plakaları ile güçlendirilmiştir. Dört farklı başlık narinliğine sahip kesit kullanılarak toplam 30 numune teste tabii tutulmuştur. Testlerde yerel ve yanal burkulmanın etkileşimi gözlenmiştir. Göçme modları; yerel burkulma, yanal burkulma ve eğilme-dönme burkulmalarını içermektedir. Test sonuçlarına göre bulunan kolon dayanımları Amerikan Standartları ve Avustralya/Yeni Zelanda Standartlarında soğuk şekil verilmiş çelik yapılar için verilen kısıtlamalar ile karşılaştırılmıştır. Tasarım kolon eğrisi çizilmiştir. Amerikan standartlarının kısa ve orta kolonlar için genellikle tutarlı olmadığı gözlenmekle birlikte, Avustralya/Yeni Zelanda standartlarının tüm kolon boyları için genellikle tutarlı olduğu belirlenmiştir. Çünkü, Avustralya/Yeni Zelanda standardı tek eksene göre simetrik kesitlerde burkulmaya karşı ayrı kontrol içermektedir. Soğukta şekil verilmiş kanal kesitli kolonlarda başlıkların boyuna kenarı doğrultusunda süreklilik sağlayan kenar güçlendirme elemanları kullanılarak burkulma gerilmesi değiştirilebilir. Basınç başlıklarına uygun desteği sağlamak için, kenar güçlendirme elemanları yeterli niteliğe sahip olmalıdır. Aksi takdirde eleman sıkı hal alana kadar plakaya dik şekilde burkulabilir. Deneysel olarak yerel burkulma yükünün bulunması için tutarlı sonuç veren elastik sonlu şerit burkulma analizi ile teorik burkulma yüklerinin kullanılabilirliği gözlemlenmiştir.

Zhang [13] kare CFT kısa kolonlarda gerilme dağılımını sonlu eleman metodu ile bulmuş ve etkili beton sargısının köşelerde olduğunu göstermiştir. Etki bu bölgelerin ötesinde aniden düşmekte ve kenar duvar yüzeylerinin ortasında yok olmaktadır.

Knowles ve Park [14] D/t değerleri 15, 22 ve 59 olup, L/D oranları 11'den büyük olan 12'si dairesel 7'si kare toplam 19 kompozit kolonu incelemişlerdir. Kısa dairesel CFT kolonlardaki üç eksenli sargı etkisinin, beton çekirdek için kapsamlı bir sargı etkisi artışı sağladığı görülmüştür.

Tomi ve ark. [15] 270 dairesel, sekizgen ve kare CFT kolonlar hakkında araştırmalarda bulunmuşlardır. Yüksek eksenel kuvvet altında, dairesel ve birçok sekizgen numunede sargı etkisi gözlenmiştir. Fakat kare numuneler gerilmeye membran tipinde (iki eksenle ötelenme, tek eksenle dönme hareketine izin veren model) karşı koyduğu için, sadece kare tüpün duvarları beton basıncına plaka burkulması göstererek karşı koyarak çok düşük sargı etkisi sağlamıştır.

Schneider [16] D/t oranları 17 ile 47 ve L/D oranları 4,0 ile 4,8 arasında değişen, 3 dairesel, 5 kare ve 5 dikdörtgen olmak üzere toplam 15 numune üzerinde deneylerini gerçekleştirmiştir. Sonlu elemanlar metodunu baz alan ABAQUS programı ile lineer olmayan analitik modelleme yapmıştır. Dairesel çelik tüpler, kare veya dikdörtgen kesitli tüplere göre daha fazla akma sonrası eksenel süneklik göstermiştir. Tüm dairesel tüplerin D/t oranı ortalama 20 değerinden küçük olarak modellenmiştir. Cidar burkulmasının kare ve dikdörtgen numunelerde dairesel tüplerden daha önce gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Goggins ve ark. [17] tarafından, tekdüze (monotonik) ve çevrimsel eksenel yüklemeye maruz bırakılan, dikdörtgen ve kare boş kesitli çelik elemanların davranışını incelenmesi amacıyla deneysel çalışma yapılmıştır. Kesit malzeme dayanımının belirlenmesi için ilk olarak kısa numunelere monolitik çekme testi uygulanmıştır. Elde edilen değerler Avrupa ve Kuzey Amerika standartlarındaki kısıtlamalar ile karşılaştırılmıştır. Döngüsel test, farklı uzunluk ve kesit boyutlarına sahip destek elemanlarının davranışının tayin edilmesini içermektedir. İdealize edilmiş sismik yükleme durumlarında performansın değerlendirilmesi bu testlerin esas amacıdır. Genellikle yerel burkulma

gerçekleşene kadar, boş kesitli çelik elemanlar stabil davranış sergilemektedir ve sonra narinliklerine bağlı olarak mukavemet ile süneklik özelliklerinde yüksek derecede bozulma görülmektedir. Deneyler, burkulma sonrası süneklik ve enerji sönmüleme kapasitesindeki anahtar parametreler hakkında bilgi sağlayacağı gibi, çekme ile basınç dayanımlarını içermektedir. Uygun destek-çerçeve düzeni kullanımı ile yapıların sismik mukavemeti etkili biçimde sağlanabilir. Estetik sebeplerden dolayı, genellikle dikdörtgen ve kare boş kesitler destek elemanı olarak kullanılmaktadır. Sismik olaylar sonucunda önemli ölçüde enerji kaybına maruz kalmadan, elastik olmayan çevrimsel birim şekil değiştirme göstermesi beklenen, enerji dağılımındaki kritik eleman ve bileşenlerde, göçme önlenerek bazı onarımlarla genel yapı bütünlüğü sağlanabilmektedir. Kısacası, destekli çerçevelerde kritik elemanlar olan bu çapraz desteklerin, temel sismik tasarım aşamasında detaylı tayini gerekmektedir.

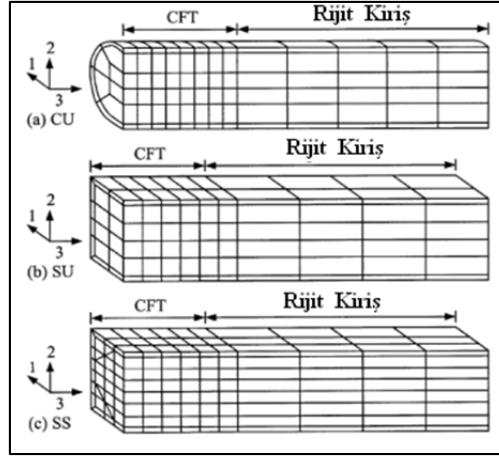
21 adet kısa numune üzerinde monolitik çekme testi ile malzeme özellikleri belirlenmiştir. Boyları 1100 mm ve 3300 mm olacak şekilde 2 set halinde toplam 15 numuneye çevrimsel test uygulanmıştır. Hem çekme hem de basınç dayanım bozunmasını içeren, orta narinliğe sahip çevrimsel yükleme numunelerinde en yüksek çekme dayanımı bozunması görülmüştür. Göçme durumunda, birleşim hatalarından etkilenen numuneler dışındakilerde yer değiştirme - süneklik kapasitesi 5,6 ile 29,7 değerleri arasında gözlemlenmiştir. Süneklik kapasitesinin genellikle B/t oranıyla değil, narinlikle arttığı gözlenmiştir. Diğer yandan, daha fazla enerji sönmüleme kapasitesi depolanan numunelerin, narinliği arttırıp enerjiyi indirgeyerek normalleştirilebildiği gözlenmiştir [17].

Broderick ve ark. [18] tarafından, içi boş ve beton dolu kompozit çelik elemanların monolitik ve çevrimsel eksenel yükler altındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla, kısa numuneler üzerindeki basınç ve çekme dayanımları ile dolu kesitlerdeki yerel burkulma ve süneklik etkilerini incelemek üzere monolitik deneyler yapılmıştır. 3 farklı kesit boyutlarına sahip uzun numuneler üzerinde çevrimsel deneyler yapılmıştır. Beton çekirdeğin göçme moduna etkisi ile kompozit kesitin basınç ve çekme kapasiteleri de araştırılmıştır. Her numunenin süneklik kapasiteleri belirtilmiş; narinlik, malzeme özelliği ile beton dolgu

koşullarına göre karşılaştırmaları yapılmıştır. Sonuçlar uluslar arası standartlar ile karşılaştırılmıştır. İçi dolu kesitlerde numunenin basınç kapasitesi artarken aynı zamanda yerel burkulma önlenerek veya ötelenerek süneklik kapasitesi artışı sağlanmıştır. 4 monolitik basınç, 21 monolitik çekme, 6'sı içi boş 6'sı dolu olmak üzere toplam 12 dikdörtgen ve kare kesitli numuneye çevrimsel yükleme uygulanmıştır.

2.2. Eğilme Momenti Etkimesi Durumunda Dönme Kapasitesi, Sargı Etkisi, Narinlik limitleri ve Süneklik Davranışlarının Araştırıldığı Çalışmalar

Ağır yüklere dayanımından dolayı CFT yüksek yapılarda, köprü ve kıyı yapılarında popülarite kazanmaktadır. Beton kalitesi, çeliğin akma dayanımı ve iki malzemenin birlikte gösterdiği lineer olmayan davranış CFT'nin maksimum dayanımını doğrudan etkilemektedir. Betonun sargı basıncı ve kesitin geometrik özellikleri de doğrudan etkilidir. Değişken sayısının fazla olması; bu değişkenlerin maksimum dayanımı nasıl etkilediğinin incelenmesi gerekliliğini doğurmaktadır. Hu ve ark. [19] tarafından daire, kare, destek çubukları ile güçlendirilmiş kare kesitler üzerinde eksenel basınç ve eğilme momenti kombinasyonunun CFT kolonlara etkisi deneysel olarak incelenmiş ve ABAQUS sonlu elemanlar programı ile numerik analizi yapılarak karşılaştırılmıştır. Kare kesitler için soğukta şekillendirilmiş çelik plakalardan oluşan 2 adet U kesitli profil kaynaklanarak oluşturulmuştur. Kesitler sonlu eleman analizi için modellenirken her iki yönde de simetrik olmasından dolayı Şekil 2.5'te görülen biçimde kesitin çeyreği programa girilmiştir.



Şekil 2.5. Yarım CFT kolonlar için sonlu eleman modeli

Programda hasır (mesh) oluşturulurken sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. İndirgenmiş integrasyon kuralı ile her noktada 3 serbestlik derecesine sahip, 27 noktalı katı element modeli kullanılarak, hem beton çekirdek hem de çelik tüp modellenmiştir. 6 dairesel, 6 kare, 10 bağlantı elemanı ile güçlendirilmiş kare kesit olmak üzere toplam 22 numune üzerinde analizler yapılmıştır. Sonuçta, genellikle eksenel yük oranı (F/F_u) değerinin artmasına bağlı olarak yanal sargı basıncı artmıştır. Eksenel yük oranı düşük olduğunda, çelik tüp beton çekirdeğe düşük yanal destek sağlamaktadır. Bağlantı çubuklu kare kesitin çubuk aralığına bağlı olarak kare ve dairesel kesitten daha fazla yanal sargı basıncı uyguladığı görülmüştür. Kare kesitte maksimum yükleme evresinde düşük sargı etkisine bağlı olarak beton çekirdek ve çelik tüpün birbirleriyle bağlantılarını koruyamadıkları, tüpün üst ve orta açıklık kısımlarındaki yerel burkulmalar ile saptanmıştır. CU ve SS kesitlerde güçlü sargı etkisinden dolayı yerel burkulmalara rastlanmamıştır. Malzeme bozulma parametresi (k_3) ve F/F_u artışı ile eksenel yük oranı düşmektedir. Malzeme bozulma parametresi SS kesitte SU'ya göre yüksek, CU'ya göre düşüktür. Ancak, bağlantı çubuk açıklığı küçük olduğunda SS kesit CU kesitle aynı k_3 değerini sağlayabilme ihtimali vardır. Yük faktörü (k_4), F/F_u düşükse 1'den küçük, yüksekse güçlü sargı etkisine bağlı olarak 1 olabilmektedir. Yük faktörü SS kesitte SU'dan fazla fakat CU'dan düşük olmaktadır [19].

Soğukta şekillendirilmiş boş dairesel kesitlerin (CHS) narinlik limitlerinin daha hassas belirlenmesi için yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Elchalakani ve ark. [20] tarafından CHS kesit narinliklerinin, elastik olmayan eğilme özellikleri üzerine etkisinin araştırılması için eğilme testi serileri uygulanmıştır. Çap/kalınlık (d/t) oranları 37 ile 122 arasında değişen numunelere toplam 12 eğilme testi uygulanmıştır. Bu aralık soğuk şekil verilmiş içi boş daire kesitlerden C350L0 sınıfı için temin edilen fabrika üretim verileridir. Narinlik limitleri sınıf 1 (sıkı), 2, 3 (sıkı olmayan) ve 4 (narin) olarak tanımlanmaktadır. Bu limitler genellikle çelik yapılar için kullanılan dönme kapasitesi için modifikasyon kriteri baz alınarak belirlenmektedir. Numunelerin plastik moment kapasiteleri altında dönme miktarları incelenmiştir. Soğukta şekillendirilmiş CHS'lerin düşük pekleşme ve birim şekil değiştirmenin bileşik etkisine bağlı olarak, fabrika üretimi veya sıkı CHS'lerde plastik moment kapasitesine ulaşamamıştır. Bundan dolayı soğukta şekillendirilmiş CHS'ler için var olan narinlik kriterlerini yeniden düzenlemek gerekmektedir.

Wilkinson ve ark. [21] soğukta şekil verilmiş dikdörtgen boş kesitli (RHS) sınıf 1 (plastik) ve sınıf 2 (sıkıştırılmış) kirişlerin dönme kapasiteleri hakkında sonlu eleman analizi ile çalışmalar yapmışlardır. Bu kapsamda ABAQUS (V 5.7-1) kullanılmıştır. RHS'lerin yerel burkulma modellemeleri için kullanılabilecek en uygun eleman tipi kabuk elemandır. Bu yüzden 4 düğüm noktalı çift eğriliğe sahip genel amaçlı kabuk tanımlanmıştır. Her noktada 5 serbestlik derecesi kullanılarak integrasyon indirgenmiştir. Numunenin doğru geometrik şekli ve modele özgü burkulma değerlerinin elde edilebilmesi için, modelin sonlu elemanlar simülasyonu numune kusurlarını da içermelidir. Sehim kusurları, sinüzoidal değişim kusurları, kusur boyutu ile diğer kusur dizilimleri incelenmiştir. Programlar elde edilen nihai yük değerleri, nümerik modelde aynı malzeme ve geometri özellikleri kabul edildiğinden, deneyde gözlenen verilerden az miktarda düşük çıkmıştır. Kusur boyutları, numunenin dönme kapasitesi değerinde, beklenmedik derecede büyük etkiler oluşturmuştur. DeneySEL gözlenen davranışın ana etkileyici faktörünün RHS üzerine kaynaklanan yükleme plakası yüzünden oluşan kusurlar olduğu gözlenmiştir. ABAQUS modelindeki sinüzoidal

değişim kusurları, fiziksel durumdaki yerel kusurların etkisini modellemektedir. Daha narin kesitlerin deneysel sonuçlarının incelenebilmesi için daha ayrıntılı kusur modellemesi gerekmektedir.

2.3. Çevrimsel Yükleme Durumunda, Süneklik ve Burkulma Davranışlarının Araştırıldığı Çalışmalar

Elchalakani ve ark. [22] tarafından sismik dayanımlı yapı sistemlerinin tasarım ve inşası için uygun narinlik limitlerinin araştırıldığı bir makalede, soğukta şekil verilmiş dairesel boş kesitli kirişlerin elastik olmayan çevrimsel eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Farklı boyutlarda, kesit narinliği (D/t oranı) 13 ile 39 arasında değişen dairesel boş kesitlerde kontrollü çevrilen simetrik döngü uygulanmıştır. Sürekli döngü ile oluşan ovalizasyon artışı, tüpün eğilme rijitliğinde giderek artan bir oranda düşüşe ve stabilite bozukluğu oluşması ihtimaline yol açmaktadır. Dairesel boş kesitli kirişlerde stabilite yerel burkulmaya kadar korunmuş, sonra D/t oranlarına göre dayanım ve süneklikte yüksek oranda bozulma gözlenmiştir. Sismik kapasite parametreleri olan dayanım, sağlamlık, düğüm gecikmesi ve göçme modları her numune için sunulmuştur. Toplam 25 numune üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Numuneler için süneklik düzeyleri belirlenerek süneklik değerleri bulunmuş ve standartlarla karşılaştırılmıştır. Çevrimsel eğilme etkisi altında; ovalizasyon, düşük uzama - sertleşme kapasitesi (strain hardening capacity) ve bağlı gerilme parametreleri; küçük boyutlardaki dairesel boş kesitlerde soğukta şekil verilme ile elektrik rezistansına bağlı olarak eğilme dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Tasarım kurallarında sismik ve statik narinlik limitleri oranı için verilen 0,6-1,0 aralığı test sonuçları ile tutarlılık göstermekte olup, düşük oran ve yüksek süneklik ilişkisine sahip dairesel boş kesitler için uygundur.

Tremblay ve ark. [23] tarafından, soğukta şekil verilmiş dikdörtgen kesitli destek elemanlarından oluşan ortak merkezli çelik çerçevelerin sismik performansının değerlendirilmesi amacıyla çift ve tekil çaprazlı toplam 24 yarı

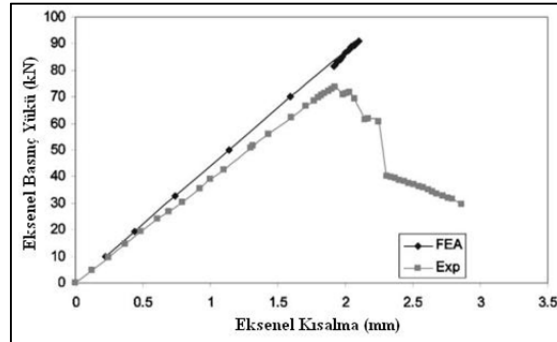
statik (quasistatic) çevrimsel test uygulanmıştır. Yer değiştirme kontrollü yapılan yüklemede sistematik olarak değişen birim şekil değiştirme ve tipik destekli çelik çerçevelerin lineer olmayan dinamik analizinden elde edilen yer değiştirme geçmişi olmak üzere 2 yükleme serisi kullanılmıştır. Desteklerin göçmesinin gerçekleştiği en yüksek eğrilik bölgesinde, tüm numuneler çerçeve düzleminin dışarı burkulmuş ve test sonlandırılmıştır. Çift çaprazlılar için sonuçlar açıkça göstermektedir ki, enerji sönümleme kapasitelerini içeren gecikme davranış karakteristikleri ve basınç dayanımları, çaprazların efektif uzunlukları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Süneklik seviyesinin fonksiyonu olan basitleştirilmiş model, çaprazların düzlem dışı birim şekil değiştirmeyi önlemek için önerilmiştir. Bu modeller daha sonra, dikdörtgen boş kesitlerden üretilen destek elemanlarının göçmesinden önce elastik olmayan birim şekil değiştirme kapasitelerinin ampirik tahmininin gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır. Soğukta şekil verilmiş dikdörtgen boş kesitlerden (Rectangular Hollow Section - RHS) üretilen 14 tek çaprazlı ve 10 çift çaprazlı destek numunesi kullanılmıştır. Çift çaprazlı RHS desteklerde yerel burkulma ve göçme durumları, eşdeğer tekil desteğe göre daha düşük süneklik seviyesinde meydana gelmiştir. Çift çaprazlı destek dizilimi daha yüksek eğrilığe ihtiyaç duymaktadır. RHS elemanların tüm destek dizilimlerinde göçmeyi önlemek için geliştirilmiş veri tabanlı desteklerden ampirik model oluşturulmuştur. Destek düzleminin genişlik - kalınlık oranı ile etkili narinlik oranının fonksiyonu olan göçme durumundan önce, RHS desteklerde tecrübe edilebilen bu model maksimum sünekliğin hesaplanmasına imkan vermektedir.

Elchalakani ve ark. [24] tarafından, ankastre sabitlenmiş tüp kesitli desteklerin, çevrimsel tek merkezli eksenel yükleme altındaki göçmelerinin incelendiği deney serileri uygulanmıştır. Soğukta şekil verilmiş dairesel kesitli destekler (C350L0) 350 MPa akma gerilmesine sahip çelik sınıfındadır. Orta eleman narinliğine sahip ($25 < K.L/r < 41$), çap/kalınlık oranı (D/t) 19 ile 56 arasında bulunan 9 farklı tipte numune test edilmiştir. Toplam 20 döngüsel test uygulanacak olan numuneler yerel burkulmaya kadar stabil gecikme davranışı sergilemiş ve sonrasında $K.L/r$ ile D/t oranlarına bağlı olarak dayanım ve süneklik parametrelerinde kademeli bozunma göstermiştir.

2.4. Eksenel Yükleme Durumunda Malzeme Mukavemeti, Yük Taşıma Kapasitesi ve Birim Şekil Değiştirme Davranışlarının Araştırıldığı Çalışmalar

Narayanan ve Mahendran [25] tarafından, 16 yenilikçi kesite sahip orta boylu soğukta şekil verilmiş çelik kolonda, eksenel basınç kuvveti etkisinde burkulma ve nihai dayanım davranışları incelenmiştir. Bu kolonların tümü çok küçük burkulma sonrası yüklemelerde, burkulma meydana gelerek göçmüştür. Nihai gerilme altında geometrik kusurlar ve ayrılmış gerilmeler araştırılmıştır. Kesit ve burkulma özellikleri sonlu şerit analiz programı THINWALL ile çözümlenmiştir. Sonlu eleman analizinde, bozunma burkulması ve lineer olmayan nihai dayanım özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yine aynı 16 yenilikçi kesit için ABAQUS ile PATRAN programları kullanılmıştır.

Şekil 2.6’da görülen eksenel basınç ve eksenel kısalma ilişkilerine bağlı olarak, bu araştırma göstermiştir ki; ince, yüksek dayanımlı soğukta şekil verilmiş çelikten üretilen yenilikçi kolonlar için standartlarda verilen bozunma burkulması kısıtlamalarının doğruluğunu arttırmak amacıyla, araştırmaların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. (25)

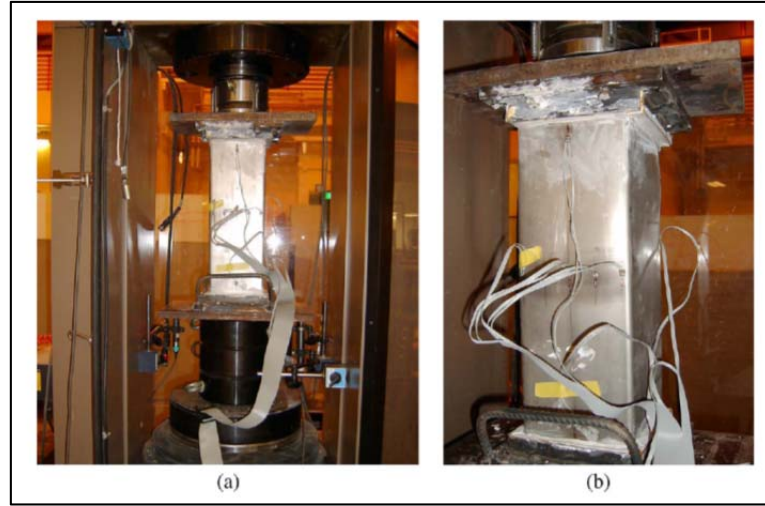


Şekil 2.6. Eksenel basınç - eksenel kısalma eğrisi

Young ve Ellobody [26] tarafından, beton dolu çelik kolonlar (CFT); yüksek dayanım, yüksek süneklik, yüksek sıkılık ve yapı malzemesi olarak komple kullanım sağlamaktadır. Bu avantajlara ek olarak, çelik tüpün beton

kolonu çevrelemesi ile kalıcı kalıp sağlanmakta ve inşa süresi düşürülmektedir. Ayrıca, çelik tüpler betona yüksek derece sargı etkisi sağlayarak, eksenel yük taşımasına yardımcı olmaktadır. Son yıllarda, paslanmaz çelik elemanlar yüksek korozyon dayanımı, inşa ve bakım kolaylığı ile estetik görünümüne bağlı olarak popüler hale gelmektedir. Ancak, beton dolu çelik kolonlar, özellikle yüksek dayanımlı çelik tüpler hakkında literatürde nadir çalışma bulunmaktadır.

Yüksek dayanımlı paslanmaz çelik tüplerin akma gerilmesi ve çekme dayanımı sırasıyla 536 ve 961 MPa'dır. 40 ile 80 MPa arasında değişen farklı beton dayanımları kullanılarak kolonların davranışları incelenmiştir. Testler süresince paslanmaz çelik tüpün şekli, plaka kalınlığı ve beton dayanımının kolon dayanımına etkisi ve davranışı araştırılmıştır. Tüplerin derinlik – cidar kalınlığı oranı 25,7 den (sıkıştırılmış kesitler) 55,8 (bağlı narin kesitler) değerine kadar değişmektedir. Kolonlar farklı boylara sahip olduğundan boy - derinlik oranı genellikle 3 değerinde sabit tutulmuştur. Numunelere düzgün yayılı eksenel basınç kuvveti uygulanmıştır. Kolon dayanımları, yük - eksenel boy değişimi arasındaki ilişki ve göçme modları sunulmuştur. Çelik tüpün malzeme özelliklerinin belirlenmesi için çekme çıkarma testi (tensile coupon test) ve kısa kolon testi (stub column test) uygulanmıştır. Tüpler, yük dayanımlı çift katlı düz şerit ostenitli paslanmaz çelik elemanlardan yapılmıştır. D/t oranları sırasıyla 25,8; 54,1; 48,9; 55,4 ve 45,3 olup, beton kalitesine göre 40 - 60 - 80 MPa'lık her biri 5 set halinde toplam 19 numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Boyları 420, 450, 480 ve 600 mm'dir. Çekme çıkarma testi numuneleri, henüz test edilmemiş numunelerin düz kısımlarından boyuna doğrultuda kaynakla 90°'lik plakanın ortasından alınmıştır. Çekip çıkarılan numune boyutları Avustralya Standardı AS1391'e uygun olarak 12,5mm genişlik ve 90mm ölçü uzunluğuna sahiptir. Çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 2.7'de verilmiştir [26].



Şekil 2.7. Beton dolu paslanmaz çelik tüp numunesi için kurulan deney düzeneği

Her bir numunede eksenel kısalma ve plaka birim şekil değiştirmeleri için 7 si numunenin bir yan yüzünde, 2 si karşı yan yüzünde olmak üzere toplam 9 adet birim şekil değiştirme ölçer (strain gauge) kullanılmıştır. Kolonun eksenel kısalmasını ölçmek için Şekil 2.8’de görülen 3 adet dönüştürücü (transducer-LVDT) kullanılıp ortalaması alınmıştır.



Şekil 2.8. Birim Şekil Değiştirme Ölçerler ve LVDT 'lerin numune üzerindeki konumları

Üst ve alt birim şekil değiştirme ölçerler kolon uçlarından 35mm uzaklığa, ortada bulunanlar kolonun tam ortasına tüplerin dış tarafına yerleştirilmiştir. Veri toplama sistemi; LVDT, birim şekil değiştirme ölçerler ve

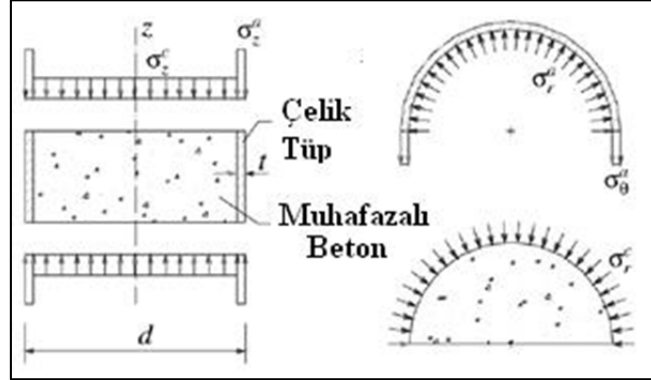
uygulanan yük okumaları düzenli aralıklar halinde test sırasında toplanmıştır. 4600 kN kapasiteli 815Rock mekanik test sistemi eksenel yük uygulamak için kullanılmıştır. Deneyler sonucunda Amerika ile Avustralya/Yeni Zelanda standartlarında verilen tasarım dayanımları, beton dolu soğukta şekil verilmiş yüksek dayanımlı paslanmaz çelik kolonlardaki dayanımları sağlamaktadır [26].

Cai ve He [27] kare kesitli beton dolu çelik kolonların hem düşey hem de yanal yüklere karşı çok katlı ve uzun yapılarda giderek daha fazla kullanılıyor olmasını, dairesel kolonlarla karşılaştırıldığında aşağıdaki avantajlara bağlamışlardır:

- a) Kesit şekli yapının mimari düzlemi için tasarım ihtiyaçlarına iyi uyum sağlamaktadır.
- b) Yapı hesap ve ölçümleri kapsamında kolon-kiriş birleşim sonuçlarında kolay birleşim ve az maliyet sağlamaktadır.
- c) Kesitin yüksek atalet momentine bağlı olarak yanal yüklere karşı daha yüksek oranda rol üstlenmektedir.

Ancak, beton dolu kare çelik kesitler dairesel kesitlere göre daha düşük beton sargı etkisine sahip olduğundan eksenel taşıma kapasitesi daha düşüktür. Şu da bilinen bir gerçektir ki, dairesel kesitli beton dolu çelik kolonlar yüksek dayanım, yüksek süneklik ve enerji emme kapasitesine sahiptir. Eksenel basınç yüklemesi yapıldığında çelik tüp beton çekirdeğe son derece tutarlı ve simetrik sargı etkisi oluşturduğundan, beton çekirdek üç eksenli basınca maruz kalmaktadır. Bu yüzden betonun birim eksenel dayanımı artmaktadır. Bu durum Şekil 2.9'da görülmektedir. Fakat kare CFT kolonlarda bu durum geçerli olmamaktadır. Önerilen destekleme şemasını etkisinin araştırılması amacıyla, 5 adedi normal 10 adedi bağlantı çubuklu toplam 15 kare CFT kolon tatbik edilmiştir. Test programında genişlik/kalınlık oranı B/t , açıklık seviyesi a_s , boyuna açıklık b_s , bağlantı çubuklarını çapı ve çelik tüpün mukavemeti belirlenerek, bu parametrelerin nihai dayanım, başlangıç sıklığı ve süneklik üzerine etkileri incelenmiştir. Kare çelik kesitler 4 adet düz plakanın birlikte kaynaklanmasıyla

fabrikasyon olarak üretilmiştir. Bağlantı çubukları için belirlenen yerler tüp oluşturulmadan önce delinmiştir. Her bağlantı çubuğu çelik tüpün iki ucundan kare şeklindeki sabitleyiciler kullanılarak kaynaklanmıştır [27].



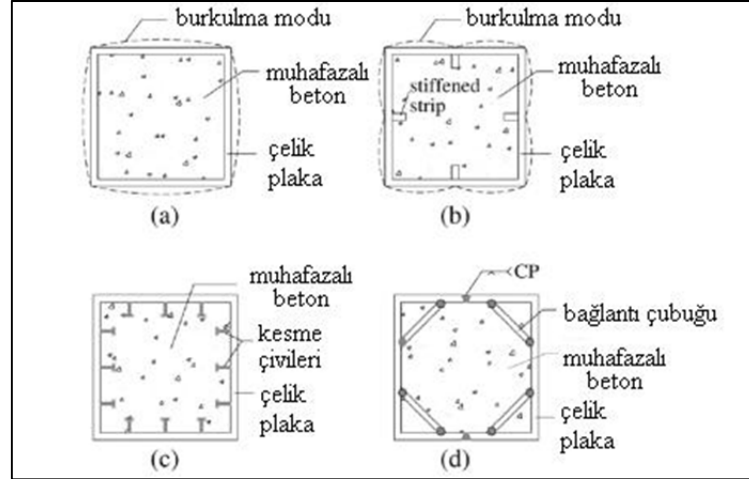
Şekil 2.9. Dairesel CFT kolonlarda gerilme dağılımı

Tüm veriler otomatik aktarma kutusu ile toplanmıştır. Başlangıç elastik bölümde 100 kN/dk oranı ile eksenel yükleme uygulanmıştır. Yük – yer değiştirme eğrisi düz kısımdan çıktıktan sonra, yer değiştirme yük kontrolü 0,5 mm/dk şekline dönüştürülmüştür. Çelik tüpün kalınlığını artmasıyla D/t oranı düşmüş, nihai dayanım ve buna tekabül eden kısalma değeri artmış ve kolon daha sünek olmuştur. Eksenel yük altında normal kesitli CFT kolonlar yerel burkulmalara maruz kalarak oldukça düşük nihai dayanım, plastik birim şekil değiştirme ve süneklik değerleri göstermiştir. Önerilen destekleme şeması CFT kolonların eksenel yük davranışını arttırmıştır. Destekleme çubuklarının özelliklerinin nihai dayanım ve plastik birim şekil değiştirme üzerine önemli etkileri olduğu gözlenmiştir [28].

Li ve ark. [28] deneysel olarak 6 CFT, 2 boş çelik tüp ve 6 beton kolon olmak üzere toplam 14 kare numuneyi içeren deneysel çalışma yapmışlardır. Sonuçlara göre, kare kesitli CFT kolonlarda D/t oranları yüksek olmasına rağmen beton sargı etkisine bağlı olarak nominal yük taşıma kapasitesini %5 ila %30 değerleri arasında aşmıştır.

CFT kolonların dayanım ve yük taşıma kapasitesi değerlerinin artırılması amacıyla, kesitler iç kısımlarından kaynaklanan güçlendirme

elemanlarının olduğu çalışmalar da mevcuttur. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, Ge ve Usami [29] boyuna çelik şeritler (b), Lin ve diğerleri kesme çivileri (c), Huang ve diğerleri 4 adet açılı çelik bağlantı çubuğu (d) yerleştirmişlerdir. Tüm bu çalışmalarda kapasitenin arttığı gözlenmiştir.



Şekil 2.10. Farklı şekilde güçlendirilmiş kare CFT kolon kesitleri (a) Normal kesit, (b) Güçlendirme şeritli kesit, (c) Kesme çivili kesit, (d) Açılı bağlantı çubuklu kesit

1999'da AISC-LRFD, beton dolu çelik kesitler (CFT) için maksimum beton dayanımı (f_c') değerinin 55 MPa olarak sınırlandırmıştı. Bu sınırlandırılmış değerler 2005'te 70 MPa'la yükseltildi. Lue ve ark. [30] LRFD'deki CFT kolon formüllerinin, orta ve uzun kolonlarda yüksek beton dayanımına göre değerlendirmişlerdir. Beton basınç dayanımı 29 - 84 MPa arasında değişen 24 numune test edilmiştir. CFT kolonlar için değişken formüller ve alakalı koşullar tanımlandığında, AISC-LRFD, EC4, AS-5100 ve CSA S16-01 ana standartları incelenerek karşılaştırılmıştır. AISC-LRFD'de belirtilen CFT dayanımı ve ilgili formüller ile test sonuçlarını birbirini sağladığı görülmüştür. 2005'te önerilen 70 MPa sınır değeri beton basınç dayanımı için uygun görülmektedir. 1986 yılında AISC-LRF'de standartları hem çelik hem de beton için geçerli olan limitler koymuştur. Çelik dayanımı (F_y) için üst sınır, beton birim boy değişiminin 0,18%'i için gerekli olan 380 MPa civarında ayarlanmıştır. Standart beton basınç dayanımı (f_c') 21 - 55 MPa arasında özelleştirilmiştir. 1999 yılında F_y değeri 415

MPa, 2005 yılında ise F_y 525 MPa olmakla birlikte f_c 70 MPa değerine yükseltilmiştir. Tabi ki bu değerler hem dairesel hem de dikdörtgensel kesitli şekiller için tasarım kriterlerini içeren minimum çelik duvar kalınlığına (cidar kalınlığı) göre düzenlenmiştir. 2005 yılından sonra, ilk zamanlarda LRFD farklı ayarlanmış efektif sıklık katsayısını içerik olarak benimsemiştir. Minimum çelik oranını düzenli kaplanmış kolonlar için %4'te tutmuş, fakat 1999 ile karşılaştırıldığında CFT kolonlar için %1'den düşük kabul etmiştir. Ayrıca, rezistans faktörünü 0,85 ten 0,75 değerine revize etmiştir. Hem 2005 ACI318 hem de 2004 EC4 ile karşılaştırıldığında 2005 AISC-LRFD değer katan yeni tasarım kriterleri içermemektedir. 1855 mm uzunluğunda 150x100x4,5mm boyutlarında dikdörtgen kesitli, akma dayanımı 379,8 MPa olan 22 adet numune, 4 grup halinde hazırlanmıştır. Beton basınç dayanımı 29; 63; 70 ve 84 MPa olan betonlarla doldurulmuştur.

340x340x20 mm boyutlarında iki taşıma plakası üst ve alt uçlara 8 noktadan kaynaklanmıştır. Üst taraftaki plakada yer alan 70mm çapındaki boşluktan beton dökülmüş ve lastik çekiçe iyice yerleşmesi sağlanmıştır. Numuneler kür için bırakılmıştır. Kür işleminden sonra, betonu küçük rötreye çatlaklarını dengelemek için az miktarda geç priz alan alçı dökülmüştür. 4 adet birim şekil değiştirme ölçer (strain gauge) boyuna kısaltmaları ölçmek için numunenin orta noktalarına yerleştirilmiştir. Kalan 2 birim şekil değiştirme ölçer burkulma yükünün etkisini gözlemlemek için, burkulma eksenlerinin dik doğrultuda yerleştirilmiştir. Sonuçlara göre, 2005 AISC-LRFD'nin 1999'a göre revizyonu gerçekleştirilirken, 70 MPa beton basınç dayanımından yüksek değerler için standarda adapte edilebilir olduğu görülmüştür. 2004 EC4, 2004 AS-5100 ya da 2001 CSA S16-01'de verilen yüksek dayanımlı beton kolonlar için tasarım verilerinin, AISC-LRFD (1999, 2005) değerlerinden daha tutarlı olduğu görülmüştür [30].

Kenny ve ark. [31] 1986 LRFD standartlarında belirtilen sınır çelik akma gerilmesi 380 MPa değerini araştırmışlardır. 380 MPa değerinin 550 MPa değerine yükseltilebileceğini rapor etmişlerdir.

Han [32] 24 adet eksenel yüklü kısa dikdörtgen kesitli CFT numune üzerinde iki ana parametreye odaklanmıştır. Bunlar kısıtlama faktörü ve tüp genişlik limitidir. Karşılaştırmalar sonucunda, dikdörtgen CFT kolonların yük taşıma kapasitesinin AISC-LRFD standartlarına göre düzenlenmesinin uygun olduğunu belirtmiştir.

Mursi ve Uy [33] yüksek dayanımlı beton ($f_c'=65$ MPa) dolu 3 adet narin CFT (Concrete Filled Tube) kare kolon ile 3 adet HSS (Hollow Square Section) kolon üzerinde çalışmışlardır. Narin kompozit ince cidarlı kesitler için karşılaştırma yaparak, mukavemet değerlerini standartlara göre değerlendirmişlerdir.

Liu ve ark. [34] $F_y=550$ MPa ve $f_c'=70-82$ MPa arasında değişen 22 adet dikdörtgen CFT kolonun merkezi yükleme altındaki davranışını incelemişlerdir. EC4, AISC-LRFD ve ACI standartlarına göre hesaplanan değerler ile deneyden elde edilen nihai yük değerlerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalar sonucunda EC4 ile %6'lık bir fark, AISC-LRFD ve ACI ile beklenmedik ölçüde %14'ten fazla fark gözlenmiştir.

Sakino ve ark. [35] 114 numune ile kısa CFT kolonların merkezi yükleme altındaki davranışını incelemişler ve CFT kolonlarda nihai eksenel basınç kapasitesi tahmini için formülasyon önermişlerdir. Deney sonuçları baz alındığında, dairesel CFT kolonların nihai dayanımı ve nominal ezilme değerleri arasındaki farkın, betonun sargısından kaynaklanan tüpün akma dayanımının doğrusal fonksiyonu olarak tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

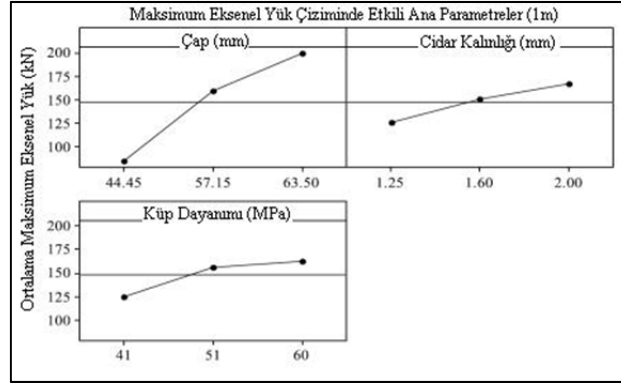
Liu [36] yüksek dayanımlı beton ile dolu 22 adet dikdörtgen CFT kolon ile çalışma yapmıştır. Geçerli standartlarla yapmış olduğu göçme yükü karşılaştırmalarında, ACI ve AISC ile sırasıyla %9 ve %11 oranında, EC4 ile %1 oranında yakın sonuç bulmuştur.

Chitawadagi ve ark. [37] beton dolu tüplerde (CFT) çelik tüpün çapı (D), duvar kalınlığı (t), çekirdek beton dayanımı (f_{cu}) ve tüp boyu (L) değişkenlerinin; nihai eksenel yük (P_{ue}) ve nihai noktadaki eksenel kısalma (δ_{ue}) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deney sayısını azaltmak için L9 sekizgen dizilimli Taguchi'nin yaklaşımı kullanılmıştır. Başlangıç deneylerinin yardımıyla eksenel

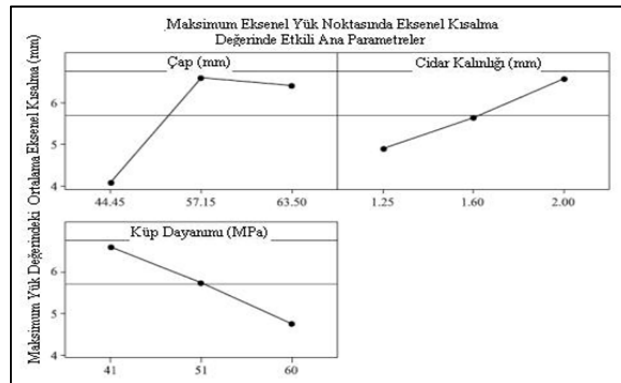
yük ve nihai noktadaki eksenel kısalma değerlerini tahmin edebilmek için doğrusal regresyon modeli geliştirilmiştir. 3 faktörün modellerdeki doğruluğunu kanıtlamak için 3 aşamada toplam 243 dairesel CFT numunesi test edilmiştir. CFT numunelerinin dayanım ve eksenel kısalma değerlerine etki eden en önemli faktörü bulmak için test sonuçları varyans analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada deney tasarım yaklaşımı ile (DOE Approach - Design of Experiments) CFT'lerde nihai eksenel yük taşıma kapasitesi ile alakalı eksenel kısalma ve süneklik değerlerinin etkileyen parametrelerin araştırılması amaçlanmıştır. 1m, 0.7m ve 0.5m olan üç farklı boyda CFT'ler narinlik oranının nihai yük taşıma kapasitesine etkisinin araştırılması için seçilmiştir. Numuneler için boy/çap oranları (L/D) 7.8-22.5 arasında, D/t oranları 22.3-50.8 arasında seçilmiştir. Her boydaki CFT kolonlar için 3 farklı çap, 3 farklı cidar kalınlığı ve 3 farklı çekirdek beton dayanımını içeren 81 kombinasyon test edilmiştir. Bu kombinasyonların, nihai eksenel yük, nihai noktadaki eksenel kısalma ve süneklik değerlerine etkileri incelenerek ($81 \times 3 = 243$) toplam 243 deney gerçekleştirilmiştir. 80-100mm çökme değerine sahip, 100mm boyutlarındaki numuneler M_{30} , M_{40} ve M_{50} olan beton sınıflarını belirlemek için kullanılmıştır. 1000, 700 ve 500mm uzunluğunda, akma dayanımı 250 MPa olan soğukta şekil verilmiş, yumuşak çelik tüpler kullanılmıştır. Tüpler dikiş kaynağı ile kaynaklanmıştır. Korozyonu önlemek için çelik tüplerin dış yüzeyi boyanmıştır. Tüplerin içi tel fırça ile gres ve yağdan temizlenmiştir. CFT numuneler için burkulmanın zamanından önce gerçekleşmesini önlemek amacıyla, EC4 - 1994'te (22) çelik boş kesitleri için tanımlanan D/t oranlarından düşük seçilmiştir. Beton doldurulurken, çelik tüpün arka kısmı ince polietilen örtü ile kapatılmış ve beton yukarıdan yaklaşık olarak 4 eşit tabaka halinde, her tabaka iyice sıkıştırılmış şekilde dökülmüştür. Betonun üstü mala ile düzeltilmiş ve kür havuzuna konmadan önce 24 saat örselenmeden bırakılmıştır. CFT'lerin teorik yoğunlukları karışım kuralları ile hesaplanmış ve gerçek yoğunluklar ile karşılaştırılmış olup sonuçlar yakın bulunmuştur.

1000 kN kapasiteli kolon test makinesi 28 günlük dayanımda kullanılmıştır. Dönüştürücüler (LVDT - Linearly Varying Displacement Transducers) numunenin dörtte biri, ortası ve dörtte üçü yüksekliklerine, yanal

birim şekil değiştirme ölçmek için yerleştirilmiştir. Test makinesinin numuneye tam olarak değmesini sağlamak amacıyla 2-5 kN'luk ön yükleme uygulanmıştır. Şekil 2.11 ve 2.12'de 1m uzunluğundaki CFT numuneli için maksimum yük ve eksenel kısalma değerlerini etkileyen temel parametreler verilmiştir [37].



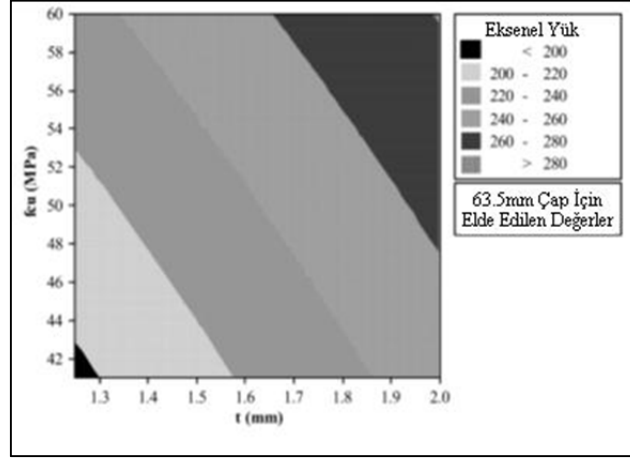
Şekil 2.11. 1m uzunluğundaki CFT numuneler için maksimum eksenel yük değerini etkileyen temel parametreler



Şekil 2.12. 1m uzunluğunda CFT ler için maksimum yüke ulaşıldığında eksenel kısalma değerini etkileyen temel parametreler

Deneysel sonuçlar değişken analizi (ANOVA - Analysis of Variance) tekniği ile değerlendirilmiştir. ANOVA hata varyanslarını düşüren ve baskın haldeki kontrol faktörünü belirleyen istatistik analizidir. Yüzey tepki metodu (RSM - Response Surface Metodu) nihai eksenel yük kapasitesindeki test değişkenleri ile uygun gelen eksenel kısalmadaki etkileşim için uygundur. Nihai

eksenel yük ile küp dayanımı ve cidar kalınlığı arasındaki etkileşim MINITAB (V.14) ile çizilmiştir (Şekil 2.13) [37].



Şekil 2.13. 0.7m uzunluğundaki CFT ler için küp dayanımı ve cidar kalınlığına karşı maksimum noktadaki eksenel yük kontur çizimi

Sonuç olarak, nihai eksenel yük taşıma kapasitesi ve nihai noktadaki eksenel kısılma yüksek doğrulukla önceden tahmin edilebilmiştir. Taguchi yaklaşımı baz alınıp regresyon modeli uygulanarak minimum sayıda deney gerçekleştirilmiştir. Çelik tüp çapının hem nihai eksenel yük hem de alakalı eksenel kısılma üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Test değişkenleri etkileşiminin sayımı için, nihai eksenel yük ve alakalı eksenel kısılma değerlerine göre regresyon modeli, yüzey tepki metodu ile geliştirilmiştir. Yüksek derecede narin CFT'ler için, deneysel ve standartlardan hesaplanan değerler daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu ve standart şartlarının yenilenmesi gerektiğini göstermektedir [37].

Ramana ve Devas [38]'a göre kompozit çelik cidarlı kolonlar; yalın çelik ya da donatılı beton yapı elemanlarından daha iyi yapısal performansa sahiptir. Narin dairesel kompozit kolonların sahip olduğu narinlik oranının artmasıyla kolon dayanımının düştüğünü gösterilmiştir.

Khandaker [39] CFT kolonların sismik bölgelerde yüksek yapılar için uygun olsa bile, dayanım ve elastik olmayan davranışları hakkındaki kesin bilgi

eksikliğinin bu kullanımı sınırlandığını belirtmiştir. Eksenel basınç altında, ince cidarlı kompozit beton dolu kolonlar için, narinlik oranının artmasıyla dayanımın düştüğünü ve eşit ya da daha düşük seviyedeki narin kolonlar için daha yüksek oranda dayanım azalması olduğunu belirtmiştir.

Gupta ve ark. [40] tarafından CFT kolonların yük taşıma kapasitesine ϕ ile D/t oranının etkisinin belirlenmesi amacıyla, D/t oranı 25-39 arasında değişen 81 adet numune test edilmiştir. Daha düşük D/t oranında ϕ tüpün betona daha yüksek sargı etkisi sağladığı görülmüştür.

O'shea ve Bridge [41] ϕ /kalınlık (D/t) oranı arttığında dayanım ile sünekliğin düştüğünü ve yük ile bağ koşullarının eksenel yük davranışını önemli derecede etkilendiğini doğrulamışlardır.

Fujimoto ve ark. [42]'nin yaptıkları çalışmaya göre yüksek dayanımlı beton CFT'nin birim ϕ şekil değiştirme kapasitesini düşürmektedir. Ancak birim ϕ şekil değiştirme kapasitesi, yüksek dayanımlı ϕ tüp ya da sıkıştırılmış ϕ tüp kullanılarak yükseltilebilmektedir. Yüksek dayanımlı ϕ tüp ya da düşük D/t oranına sahip tüpler dâhilinde betonun sahip olduğu sargı etkisi ve süneklik davranışı yükseltilebilecektir.

Giakoumelis ve Lam [43] tarafından, eksenel yük altındaki dairesel CFT kolonlarının deneysel sonuçları ile standartlardan hesaplanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. CFT kolon eksenel dayanımı hakkında Eurocode 4 (EC4)'te verilen hesaplamalar ile iyi tahmin yapıldığı, hesap ve deneysel sonuçlar arasındaki en fazla %17'lik farkla kanıtlanmıştır. ACI (American Concrete Institute) ve AS (Australian Standards) standartlarından hesaplanan sonuçların deneylerle elde edilen sonuçlardan %35 daha düşük olduğu görülmüştür.

Choi ve ark. [44] tarafından, 55-110 MPa dayanıma sahip beton dolu kare kesitli tüplerde P-M (yük-moment etkileşim diyagramı) etkileşim eğrisinin uygun şekilde tespit edilmesini sağlamak için dayanım denklemlerini basitleştirilmesi amaçlanmıştır. Parametrik çalışmalarda beton dayanımının hesaplanması için, normalleştirilmiş maksimum moment (α) ve maksimum momentteki eksenel yük oranı (β) değişkenleri baz alınmıştır. Bu iki değişken tüpün kalınlık/genişlik (b/t) oranı ve ϕ akma dayanımına kadarki bağlı beton

basınç dayanımı (f_c'/F_y) değerlerine bağlı kalınarak formüle edilmiştir. Çizelge 2.1’de verilen standartlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.1. AISC 2001 ve 2005 standartlarında verilen CFT limitlerinin karşılaştırılması

	AISC 2001	AISC 2005
Min A_s	$0.04A_g$	$0.01A_g$
Max b/t	$\sqrt{3E/F_y}$	$2.26\sqrt{3E/F_y}$
Max F_y	415 MPa	525 MPa
Max f_c	55 MPa	70 MPa

Çelik elemanlar için α ve β değerleri sırasıyla 0.9 ve 0.2 olarak hesaplanmıştır. 55-100 MPa arasındaki CFT’ler için 2.1 ve 2.2 numaralı denklemler önerilmektedir [44].

$$\alpha = 0,35 \left(\sqrt{\frac{b}{t}} - 1,5 \right) \frac{f_c'}{F_y} + 0,9 \quad (2.1)$$

$$\beta = 0,35 \left(\sqrt{\frac{b}{t}} - 2,0 \right) \frac{f_c'}{F_y} + 0,2 \quad (2.2)$$

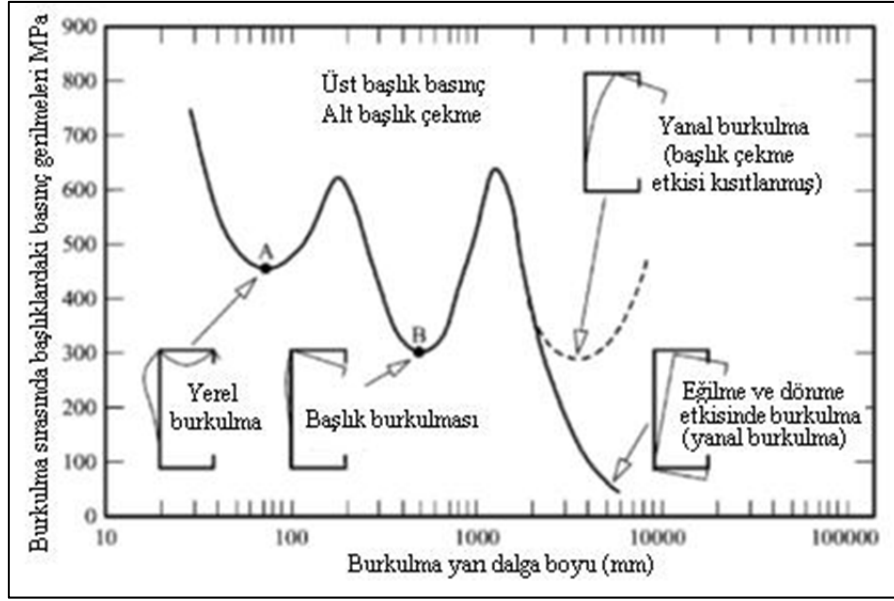
Standartlar ve önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında metodun uygun olduğu görülmüştür [44].

2.5. Bağlantı Elemanları ve Kolon-Kiriş Birleşimine Yönelik Yapılan Çalışmalar

Soğukta şekil verilmiş çelik kafes sistemleri her ne kadar yeni bir sistem olsa da hafif ağırlığına bağlı olarak; yüksek dayanım ve ağırlık oranı, düşürülmüş işçilik maliyeti ve hızlı kurulum gibi büyük avantajları sayesinde kapsamlı bir

teknik olduğunu kanıtlamıştır. Soğukta şekil verilmiş kafes sistemler, genellikle konutlarda kullanılan klasik tahta kafes sistemlere; sıcakta şekil verilmiş çelik kafesler ise endüstri uygulamalarına ekonomik alternatif sunmaktadır. Elemanlar arası bağlantılar; kaynaklama, yapıştırıcı kullanımı, vida ve bulon gibi mekanik bağlantı elemanları ya da baskı birleşimi, rozet birleşimi gibi yaratıcı mekanik birleştirme teknikleri ile yapılmaktadır. Mekanik bağlantı elemanları üretim maliyeti içerisinde hesaplanabileceğinden ve hızlı monte sağladığından en uygun olanlar arasında yer almaktadır. Zaharia ve Dubina [45] tarafından; dönme dayanımının incelenmesi amacıyla her biri 4 bulon içeren T bağlantılar, eksenel ve dönme dayanımının birlikte incelenmesi amacıyla her biri 6 bulon içeren bağlantılarla toplam 27 deney gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, C ve I kesitlerde bulonların burkulma ve sıyrılma dayanımları incelenmiştir. Deneyler sırasında M8, M10, M12, M14 ve M16 bulonlar kullanılmıştır. Deney sonuçlarının teorik sonuçlarla tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir. Deneylerde T birleşimlerde kullanılan 4 bulonlu çözüm, teorik çözümlerle uyushmaktadır. Kanatları C kesitten imal edilen ve açıklıkta tek C kesit kullanılan, bulon birleşimli kafes sistemler her durumda, ek masraf gerektirmeyen ve hızlı kurulum sağlayan uygun çözüm sunmaktadır.

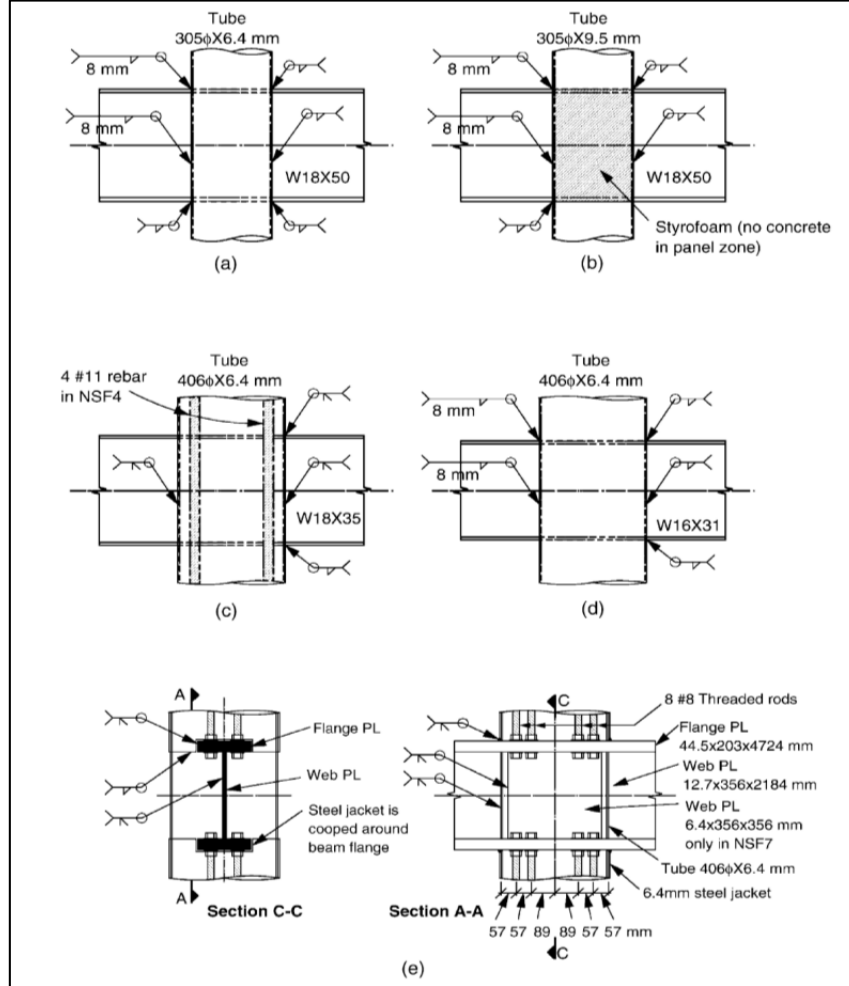
Hancock [46] tarafından, soğukta şekil verilmiş çelik yapılarla ilgili 1999-2001 yılları arasında yapılan 50 adet makale incelenmiştir. Basınç elemanları, bozunma ve eleman burkulması, oluklu ve eğik paneller, eğilmeye karşı çalışan elemanlar ile çatı aşıkları, dönme ve burulma, açıklık birim şekil değiştirme, birleştirme ve bağlama elemanları, mekanik özellikler, kompozit ve alçıpan yapılar, depolama tesislerindeki dişli çarklar, optimizasyon başlıkları altında her yönüyle çelik yapılara değinilmiştir. Şekil 2.14'te kanal kesitlerin burkulma modları verilmiştir. Soğukta şekil verilmiş çelik yapı elemanları ile birleşimleri için önemli araştırma geliştirme çalışmaları sürmektedir. Dünya çapındaki konut yapılarında kullanım artışının bir parçası olarak, soğukta şekil verilmiş çeliğin kullanımındaki artıştan dolayı, sıcakta haddelenmiş çelik yapı elemanlarını önemli ölçüde aşması beklenmektedir.



Şekil 2.14. Eğilme davranışına maruz alın birleşimli kanal kesitlerin burkulma modları

Literatürde CFT kolonlara çelik kirişlerin birleştirilmesi sırasında kiriş, detayı boyunca ideal rijit olarak belirtilir. Bu birleşimin incelenmesi amacıyla Elremaily ve Azizinamini [47] tarafından deneysel olarak 7 adet 2/3 ölçekli Şekil 2.15'te verilen bağlantı detay numunesi test edilmiştir. Yapı içi birleşimi temsil etmesi amacıyla, her numune CFT kolon ve kolondan geçen çelik kiriş içermektedir. Numuneler olası göçme modlarını ve bağlantı dayanımlarını tanımlayabilmek için tasarlanmıştır. Test sonuçlarına göre kiriş-kolon için olası alt montaj göçme modları; kolon göçmesi, kiriş göçmesi ve birleşim kesme göçmesi olarak tanımlanmıştır. Bağlantı kesme dayanımı, birleşim kesme dayanımı yetersizliğinden göçen iki numune baz alınarak hesaplanmıştır. Katlardan gelen reaksiyonların tanımlanması amacıyla kolonlar sabit eksenel yüke maruz bırakılmıştır. Yapının yanal yüklere maruz kalma durumundaki iç birleşimlerin deforme olmuş şekillerini simüle etme amacıyla, kirişlerin bitim noktalarına sabit eksenel yüke eşit ve ters yönde yük uygulanmıştır. Kolon bitim noktaları yatay harekete karşı engellenmiş, fakat yükleme plakası düzleminde dönmesine izin verilmiştir. Tüm numuneler için, öncelikle çelik bileşenler fabrikada üretilmiş ve sonra kolonlar betonla doldurulmuştur. Numune düşey pozisyonda dökülmüş ve

yüksek frekanslı vibratör betonu yerleştirmek için kullanılmıştır. Numuneler uygun sıcaklık ve nemde kür işlemi için bırakılmıştır.



Şekil 2.15. Numune birleşim detayları

Kuvvetli kiriş - zayıf kolon, kuvvetli kolon - zayıf kiriş, kesme göçmesi , malzeme davranışı, bağlanan elemanlardan daha zayıf bağlantı elemanı, birleşim bozulması, çapraz basınç - boy değişimi, başlıkların eksenel boy değişimi, açıklık gerilme dağılımı - bağlantı dayanımı özellikleri incelenmiştir. Güçlü kolon - zayıf kiriş durumu izlendiğinde, geçerli bağlantı detayında tamamen plastik eğilme kapasitesi gerçekleşmiştir. Göçme moduna bakılmaksızın, geçerli bağlantı çok sünek davranış sergilemiştir.

3. DENEY AŞAMALARI

Numune üretimi, malzeme temini, beton dökümü, deney düzeneğinin hazırlanması, numunelerin deneye uygun hale getirilmesi, deneylerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların yorumlanması adımlarını içeren deneysel çalışmalar; tezin yoğun emek ve zaman gerektiren kısmını oluşturmaktadır. Numunelerin gerçek şartlara uygun modellemesini içeren analitik çalışmalar kısmı ise sonlu elemanlar prensibine göre çözüm yapan programların birçok değişkeni içerisinde barındırmasından dolayı ayrıntılı irdlemeyi gerektirmektedir.

3.1. Beton Basınç Deneyi

3.1.1. Beton tasarımı

Tüm beton tasarımı karışım hesapları “TS802 Beton Karışım Tasarımı Hesap Esaslarına” göre yapılmıştır. İleride yapılacak olan çalışmalar için de kullanılması açısından 28 günlük beton basınç dayanımları 10, 20, 30, 40 ve 50 MPa olarak tasarlanmıştır. Tasarımda Küpeliler Beton tarafından temin edilen 0-5 mm, 5-15 mm ve 15-22 mm boyutlarında özellikleri Çizelge 3.1’de özellikleri verilen ve Şekil 3.1’de görülen agregalar kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Agrega özellikleri

Agrega Boyutları (mm)	Birim Hacim Ağırlık (kg/cm ³)	Maksimum Su Muhtevası (%)	Su Emme Kapasitesi (%)	Doygun Yüzey Kuru Agrega İçin Gerekli Su Miktarı (%)
0-5mm	2.49	1.965	4.538	2.573
5-15mm	2.59	0.163	0.513	0.350
15-22mm	2.67	0.130	0.205	0.075



Şekil 3.1. Tasarımda kullanılan agregalar (Sırasıyla 0-5mm, 5-15mm ve 15-22mm)

Yapılan hesaplar sonucunda belirlenen su, çimento ve agrega miktarları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 3.3’de de dökümler sırasında kullanılan malzeme miktarları görülmektedir.

Çizelge 3.2. Tasarımda 1 m³ beton için hesaplanan malzeme miktarları

	C10	C20	C30	C40	C50
Çimento (kg)	240,0	313,0	400,0	514,3	658,1
Su(kg)	238,6	237,1	236,9	236,3	210,6
0-5mm Agregası (kg)	808,9	781,6	749,1	699,5	639,6
0-5mm Agregası (kg)	529,7	511,8	490,6	474,0	436,1
0-5mm Agregası (kg)	441,3	426,3	408,6	396,1	364,4

Çizelge 3.3. Beton dökümünde kullanılan malzeme miktarları

	Çimento (kg)	Su (kg)	15-22 mm Agregası (kg)	5-15 mm Agregası (kg)	0-5 mm Agregası (kg)	Toplam (kg)
C10	47,1	46,8	86,6	104,0	158,8	443,5
C20	61,5	46,6	83,7	100,5	153,5	445,7
C30	78,5	46,5	80,2	96,3	147,1	448,7
Toplam	187,1	139,9	250,6	300,8	459,4	1337,9

Gerekli malzeme miktarları hesaplandıktan sonra düşük dayanımlı C10 numunesi hariç diğer tasarımların her biri için üçü 7 günlük üçü 28 günlük toplam 6 adet 15x30mm boyutlarında silindir numuneler 4 seri halinde dökülmüştür. C20(Seri-1), C30(Seri-2), C40(Seri-3) ve C50(Seri-4) olarak adlandırılmıştır. Beton karışımları reçeteye uygun biçimde yapı laboratuvarında bulunan betoniye kullanılarak hazırlanmıştır. Kalıplara iki tabaka halinde dökülen betonun yerleşmesi vibratör kullanılarak sağlanmıştır. 7 ve 28 günlük numuneler kırım günlerine kadar hidrasyon ısısından kaybettikleri suyu tekrar kazanabilmeleri açısından “TS EN 12390-2” (Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabii Tutulması) standardına uygun olarak kür havuzunda bekletilmiştir. Kırım günü gelen numuneler çıkarılarak başlık yapılmış ve 24 saat kurumaları beklenmiştir. Yapı laboratuvarında bulunan Şekil 3.2’deki 150t’luk ELE beton basınç cihazında “TS EN 12390-3” (Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini) standardına uygun olarak; 0.2-1.0 MPa/s değerinin ortalaması seçilip 0.6MPa/s yükleme hızında kırılan numunelerin ortalama beton basınç dayanımı değerleri Çizelge 3.4’te görüldüğü üzere yaklaşık olarak beklenen değerleri vermiştir. 7 günlük beton basınç dayanımı için dayanımı etkileyebilecek birçok faktör bulunduğu standartlarda kesin bir değer verilmeyip, 28 günlük beton basınç dayanımının yaklaşık %60-80 mertebesi arasında olması beklenmektedir.



Şekil 3.2: ELE beton basınç cihazı

Çizelge 3.4. Tasarım numunelerinin ortalama beton basınç dayanımları

S1 7-Gün: 14,75 MPa 	S1 28-Gün: 19,82 MPa 
S2 7-Gün: 19,89 MPa 	S2 28-Gün: 26,22 MPa 
S3 7-Gün : 29,72 MPa 	S3 28-Gün : 34,67 MPa 
S4 7-Gün : 37,58 MPa 	S28 7-Gün : 51,92 MPa 

7 günlük beton basınç dayanımlarının ortalama olarak %72,4 değeri ile beklendiği gibi 28 günlük dayanımların %60-80'i arasında kaldığı görülmektedir. Fakat 28 günlük değerlerde 30 ve 40 MPa tasarımların kısmen düşük çıktığı görülmüştür. Karışımlarda kullanılan laboratuvaradaki çimentoların işlevini yitirdiğinden dolayı mukavemet kaybı olabileceği düşünülmüş ve esas numunelerin dökümünde kullanılmak üzere HAS Beton A.Ş. tarafından 600 kg PÇ42,5 çimento temin edilmiştir. Firmadan alınan rapor kapsamında çimento özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. HAS betondan temin edilen PÇ42.5R çimento analiz raporu

Numune Cinsi	: CEM I 42.5R	Rapor No :	10
Numunenin Alındığı Tarih	: 5-11/03/2012		
Analizin Yapıldığı Tarih:	: 12.03.2012	Rapor Tarihi :	16.03.2012
Numunenin Alındığı Yer	: SEVKİYAT SİLOSU		
KİMYASAL ANALİZ		FİZİKSEL ANALİZ	
Kızdırma Kaybı	4.02	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.13
Silisyum dioksit (SiO ₂) (%)	19.43	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3569
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃) (%)	4.33	0,090 mm Elek Kalıntısı %	0.2
Demir oksit (Fe ₂ O ₃) (%)	2.62	0,045 mm Elek Kalıntısı %	4.9
Kalsiyum oksit (CaO) (%)	63.30	Standart Kıvam Su Miktarı %	29.2
Magnezyum oksit (MgO) (%)	1.19	Priz Başlama Süresi (Dakika)	210
Potasyum oksit (K ₂ O) (%)	0.64	Priz Sona Erme Süresi (Dakika)	290
Sodyum oksit (Na ₂ O) (%)	0.27	Genleşme (Le Chatelier) (mm.)	0
Kükürt trioksit (SO ₃) (%)	2.79	DAYANIMLAR	
Klorür (Cl ⁻) (%)	0.007	1 Gün (N/mm ²)	16.3
Toplam (%)	98.60	2 Gün (N/mm ²)	27.5
		7 Gün (N/mm ²)	
Toplam Katkı (%)	5.00	28 Gün (N/mm ²)	
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.11	* Verilen sonuçlar yukarıda tanımlanan numuneye aittir. * Bu rapor laboratuvarımızın izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. * Kimyasal analizler TS EN 196-2 ve TS EN 196-21 'e göre yapılmıştır. * Fiziksel analizler ve dayanımlar TS EN 196-1 'e göre yapılmıştır.	
Reaktif Silis (%)			
Serbest Kireç (%)	1.46		
Kristal Su (%)		Proses Kontrol Sorumlusu	
C ₃ S (3CaO.SiO ₂) (%)	63.25		
C ₂ S (2CaO.SiO ₂) (%)	8.01		
C ₃ A (3CaO.Al ₂ O ₃) (%)	7.04		
C ₄ AF (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃) (%)	7.97		
Rapor No : 9		7 Gün :	48.3 N/mm ²
Rapor No : 6		28 Gün :	57.2 N/mm ²

3.1.2. Elastisite modülü deney aşamaları

Tasarım numunelerinin istenen değerleri sağlamasının ardından, aynı karışım miktarları ile esas deneyler esnasında kullanılacak 10x20 cm boyutlarında 3'er adet C10, C20 ve C30 beton numunelerinin dökümü gerçekleştirilmiştir. Kırım günü gelen numunelerin üst kısımları yükün eksantrik basmasını önlemek amacıyla Şekil 3.3'te görüldüğü üzere numunelerin başlık kısımları spiral yardımıyla tesviyelendirilmiştir.



Şekil 3.3. Elastisite modülü beton numune başlıklarının düzlenmesi

Elastisite modülü deneyi için Şekil 3.4'te görülen çerçeve kullanılmıştır. Sistemde karşılıklı yerleştirilen, 2 adet doğrusal değişkenli deplasman ölçer (LVDT) kullanılmış olup sonuçların ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.4. Elastisite modülü çerçevesi

Şekil 3.5’te görülmekte olan deney düzeneği ELE beton basınç cihazında gerçekleştirilmiş olup, TDS303 veri toplama cihazı, 50t kapasiteli TML yük ölçer ve Visual Log statik veri ölçüm yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Elastisite modülü deney düzeneği

3.1.3. Eksenel taşıma kapasitesi deney aşamaları

Beton dolu çelik tüp kesitlerin davranışlarının incelenebilmesi için kompozit numunelerin yanı sıra içi boş çeliklerin ve çekirdek betonu dayanımında ayrıca dökülmüş olan beton numunelerin irdelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda Tablo 3’te verilen beton karışım hesaplarından C10, C20 ve C30 beton karışımları kullanılarak; beton basınç dayanımları için 3’er adet 15x30cm boyutlarında standart silindir ile 3’er adet 15x15x15cm boyutlarında standart küp numuneleri dökülmüştür. Kalıpların şakülü Şekil 3.6’da yatayda ve düşeyde su terazisi yardımıyla sağlanmıştır. Hesaplanan karışım miktarlarına göre agrega, çimento ve su betoniye ile karıştırılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. Kalıp şakülünün kontrolü



Şekil 3.7. Beton karışımının hazırlanması

24 saat sonra prizini alan beton numuneleri (Şekil 3.8), 28 gün sonra kırılmak üzere kür havuzuna bırakılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.8: Dayanım ve elastisite modülü tespiti için dökülen beton numuneleri



Şekil 3.9. Kür işlemine bırakılan C10 numuneleri

3.2. Çelik Çekme Deney Aşamaları

CFST deneyleri sırasında kullanılan çeliklerin akma dayanımı, uzama miktarları, çekme ve kopma dayanımlarının belirlenebilmesi maksadıyla Şekil 3.10'daki A sınıfı kalibrasyonu yapılmış 60t kapasiteli çelik çekme makinesi ile deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Çelik çekme deney düzeneği

Tüplerin üretiminde kullanılan saclardan TS 138 EN 10002-1 (Metalik Malzemeler - Çekme Deneyi - Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu) standardına uygun boyut ve koşullarda 6 adet çelik fiyonk (coupon) kesilmiştir. Birim şekil değiştirme ölçerlerin (strain gauges) çalışma prensibinin anlaşılmasına yarar sağlayacağı düşüncesi ile çelik fiyonktan 3 tanesinin merkezine birer adet yerleştirilmiştir. Birim şekil değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi Şekil 3.11’de görülen; çelik yüzeyinin zımpara ile parlatılması, aseton kullanılarak temizleme, uç kısma kısa devreyi engelleyecek PVC bant yerleştirilmesi ve ekipmanın yüzeye yapıştırılması aşamalarını içermektedir.



Şekil 3.11. Birim şekil değiştirme ölçer (strain gauge) yapıştırma aşamaları

3.3. Beton - Çelik Etkileşimi (Sürtünme Deneyleri)

Numunelerin sonlu elemanlar programı ile analitik olarak modellenmesi sırasında gerekli olan beton ve çelik arasında sürtünme değerlerinin belirlenebilmesi amacıyla sürtünme (yüzey etkileşimi) deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Sürtünme kuvveti (sıyrılma) deney aşamaları

Sürtünme kuvvetinin hesaplanabilmesi için 150x150x400mm boyutlarında kare ve 150x400mm boyutlarında silindir içi boş çeliklere C10, C20 ve C30 beton karışımlarından dökülerek, esas numunelerdeki hazırlama aşamaları izlenmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Sürtünme kuvveti numunelerinin hazırlanması

28 günün ardından sürtünme kuvvetinin hesaplanabilmesi amacıyla beton yüzey alanlarına uygun plakalar ve üst kısımlara kilitleme başlıkları yaptırılmıştır. Çekirdek betonlarını alt kısımdan Enerpac hidrolik piston ile yüklenerek sıyırılması sağlanmıştır. Pistonun üst kısmına yerleştirilen 100t kapasiteli TML yük ölçer yardımıyla Şekil 3.13'deki sistem hazırlanmış ve betonun sıyırılma anındaki maksimum kuvveti hesaplanmıştır.



Şekil 3.13. Sürtünme kuvveti deney düzeneği

3.3.2. Statik sürtünme katsayısı (k) deney aşamaları

Statik sürtünme katsayısı (k) değerinin hesaplanabilmesi için ortalama 130kg ağırlığındaki beton blok çelik sac üzerine yerleştirip makara sistemi ile yüklenerek Şekil 3.14'te görülen deney düzeneği hazırlanmıştır. Alt kısımda bulunan yük platformuna ağırlıklar kademeli olarak yüklenip, betonun hareket ettiği andaki en yüksek kuvvete göre statik sürtünme katsayısı değeri hesaplanmıştır.



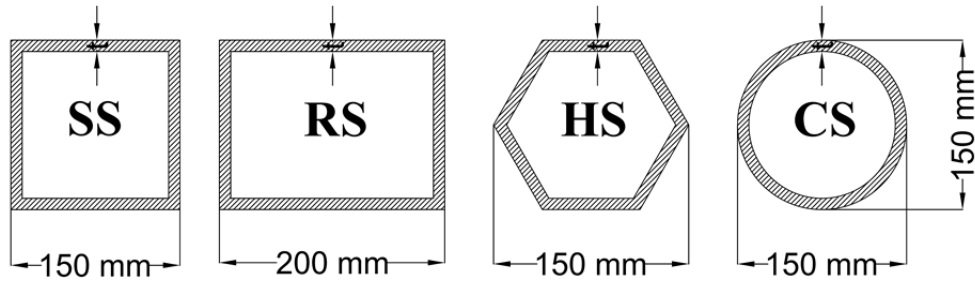
Şekil 3.14. Statik sürtünme katsayısı deney düzeneği

3.4. CFST Eksenel Basınç Deneyi

3.4.1. Numune özellikleri

Tez kapsamındaki elemanların çap/cidar kalınlığı (D/t) ya da genişlik/cidar kalınlığı (b/t), kesit şekilleri, beton basınç dayanımı özellikleri farklı seçilerek; bu değişkenlerin kesit taşıma kapasitesi, burkulma yükü, gerilme-deformasyon özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Numunelerin isimlendirilmesinde sırasıyla numune yatay kesitinin geometrik şekli, çeliğin cidar kalınlığı ve çekirdek betonu basınç dayanımı sistemiği kullanılmıştır. Örneğin; SS1500 ibaresi kare kesitli 1.5mm cidar kalınlığına sahip içi boş numuneyi belirtmektedir. Kesit geometrik şekilleri Şekil 3.15’de verildiği gibi kare (SS: Square Cross Section), dikdörtgen (RS: Rectangular Cross Section), altıgen (HS: Hexagonal Cross Section) ve dairesel (CS: Circular Cross Section) olarak 4 farklı tipte seçilmiştir.



Şekil 3.15. Kullanılan kesit şekilleri

Numune cidar kalınlıkları 1.50 mm, 3.00 mm, 5.00 mm ve 8.00 mm olmak üzere 4 farklı boyutta seçilmiştir. Çekirdek betonları için 28 günlük beton basınç dayanımları 10, 20 ve 30 MPa olarak tasarlanmıştır. Tüm numunelerin boyları sabit tutularak 400mm olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.6’da belirtildiği gibi 4 farklı kesit, 4 farklı cidar kalınlığı ve biri boş olmak üzere 4 farklı beton basınç dayanımı seçilerek, toplamda $4^3 = 64$ adet numune üretilmiştir.

Çizelge 3.6. Numune özellikleri

Numune Adı	Numune Tipi	Adet*	Boyut b x d x h** (mm)	Cidar Kalınlığı (t:mm)	Genişlik/ Cidar Kalınlığı Oranı (b/t)	Çekirdek Beton Basınç Dayanımı (f _{ck} :MPa)***
SS1500	Kare	1	150x150x400	1.5	100.00	Boş
SS1510	Kare	1	150x150x400	1.5	100.00	10
SS1520	Kare	1	150x150x400	1.5	100.00	20
SS1530	Kare	1	150x150x400	1.5	100.00	30
SS3000	Kare	1	150x150x400	3.0	50.00	Boş
SS3010	Kare	1	150x150x400	3.0	50.00	10
SS3020	Kare	1	150x150x400	3.0	50.00	20
SS3030	Kare	1	150x150x400	3.0	50.00	30
SS5000	Kare	1	150x150x400	5.0	30.00	Boş
SS5010	Kare	1	150x150x400	5.0	30.00	10
SS5020	Kare	1	150x150x400	5.0	30.00	20
SS5030	Kare	1	150x150x400	5.0	30.00	30
SS8000	Kare	1	150x150x400	8.0	18.75	Boş
SS8010	Kare	1	150x150x400	8.0	18.75	10
SS8020	Kare	1	150x150x400	8.0	18.75	20
SS8030	Kare	1	150x150x400	8.0	18.75	30
RS1500	Dikdörtgen	1	150x200x400	1.5	100.00	Boş
RS1510	Dikdörtgen	1	150x200x400	1.5	100.00	10
RS1520	Dikdörtgen	1	150x200x400	1.5	100.00	20
RS1530	Dikdörtgen	1	150x200x400	1.5	100.00	30
RS3000	Dikdörtgen	1	150x200x400	3.0	50.00	Boş
RS3010	Dikdörtgen	1	150x200x400	3.0	50.00	10
RS3020	Dikdörtgen	1	150x200x400	3.0	50.00	20
RS3030	Dikdörtgen	1	150x200x400	3.0	50.00	30

Çizelge 3.6. (Devam) Numune özellikleri

Numune Adı	Numune Tipi	Adet*	Boyut b x d x h** (mm)	Cidar Kalınlığı (t:mm)	Genişlik/ Cidar Kalınlığı Oranı (b/t)	Çekirdek Beton Basınç Dayanımı (f _{ck} :MPa)***
RS5000	Dikdörtgen	1	150x200x400	5.0	30.00	Boş
RS5010	Dikdörtgen	1	150x200x400	5.0	30.00	10
RS5020	Dikdörtgen	1	150x200x400	5.0	30.00	20
RS5030	Dikdörtgen	1	150x200x400	5.0	30.00	30
RS8000	Dikdörtgen	1	150x200x400	8.0	18.75	Boş
RS8010	Dikdörtgen	1	150x200x400	8.0	18.75	10
RS8020	Dikdörtgen	1	150x200x400	8.0	18.75	20
RS8030	Dikdörtgen	1	150x200x400	8.0	18.75	30
HS1500	Altıgen	1	150x150x400	1.5	100.00	Boş
HS1510	Altıgen	1	150x150x400	1.5	100.00	10
HS1520	Altıgen	1	150x150x400	1.5	100.00	20
HS1530	Altıgen	1	150x150x400	1.5	100.00	30
HS3000	Altıgen	1	150x150x400	3.0	50.00	Boş
HS3010	Altıgen	1	150x150x400	3.0	50.00	10
HS3020	Altıgen	1	150x150x400	3.0	50.00	20
HS3030	Altıgen	1	150x150x400	3.0	50.00	30
HS5000	Altıgen	1	150x150x400	5.0	30.00	Boş
HS5010	Altıgen	1	150x150x400	5.0	30.00	10
HS5020	Altıgen	1	150x150x400	5.0	30.00	20
HS5030	Altıgen	1	150x150x400	5.0	30.00	30
HS8000	Altıgen	1	150x150x400	8.0	18.75	Boş
HS8010	Altıgen	1	150x150x400	8.0	18.75	10
HS8020	Altıgen	1	150x150x400	8.0	18.75	20
HS8030	Altıgen	1	150x150x400	8.0	18.75	30

Çizelge 3.6. (Devam) Numune Özellikleri

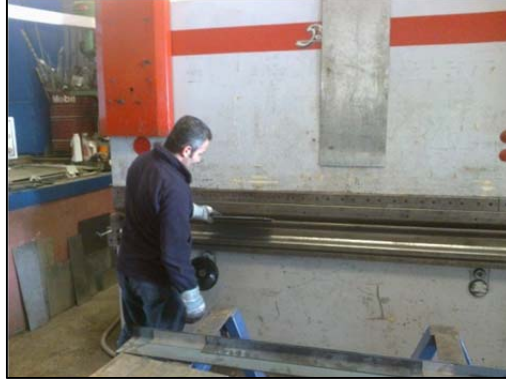
Numune Adı	Numune Tipi	Adet	Boyut b x d x h* (mm)	Cidar Kalınlığı (t:mm)	Genişlik/ Cidar Kalınlığı Oranı (b/t)	Çekirdek Beton Basınç Dayanımı (f _{ck} :MPa)**
CS1500	Dairesel	1	150x400	1.5	100.00	Boş
CS1510	Dairesel	1	150x400	1.5	100.00	10
CS1520	Dairesel	1	150x400	1.5	100.00	20
CS1530	Dairesel	1	150x400	1.5	100.00	30
CS3000	Dairesel	1	150x400	3.0	50.00	Boş
CS3010	Dairesel	1	150x400	3.0	50.00	10
CS3020	Dairesel	1	150x400	3.0	50.00	20
CS3030	Dairesel	1	150x400	3.0	50.00	30
CS5000	Dairesel	1	150x400	5.0	30.00	Boş
CS5010	Dairesel	1	150x400	5.0	30.00	10
CS5020	Dairesel	1	150x400	5.0	30.00	20
CS5030	Dairesel	1	150x400	5.0	30.00	30
CS8000	Dairesel	1	150x400	8.0	18.75	Boş
CS8010	Dairesel	1	150x400	8.0	18.75	10
CS8020	Dairesel	1	150x400	8.0	18.75	20
CS8030	Dairesel	1	150x400	8.0	18.75	30

* Kare, dikdörtgen ve altıgen kesitlerde genişlik: b, boy: d, yükseklik: h harfleriyle; dairesel kesitlerde ise çap: d ve yükseklik: h harfleriyle belirtilmiştir.

** f_{ck}: 28 günlük ortalama beton basınç dayanımıdır.

3.4.2. Numunelerin üretilmesi

Çelik numunelerin üretimi için MİPSAN Ltd. Şti.'nden sponsorluk sağlanmış ve 13 Nisan 2012 tarihinde İstanbul Deri Organize Sanayi Bölgesinde bulunan firmaya gidilerek 2 gün boyunca numunelerin imalatı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak cidar kalınlıkları 1.50mm, 3.00mm, 5.00mm ve 8.00mm olan soğukta haddelenmiş sac plakalar istediğimiz boyutlara uygun olarak kesilip bükülmüştür.



Şekil 3.16. Sac kesim-büküm işleri

Kare, dikdörtgen ve altıgen numuneler kaynak yapılabilmesine olanak sağlamak için y eksenine göre simetrik olarak iki parça halinde kesilmiştir. Silindir numuneler ise tek parça halinde kesilerek Şekil 3.17’te görüldüğü gibi döküm silindirler sayesinde bükülmüş ve kaynaklanmıştır.



Şekil 3.17. Silindir numunelerin şekillendirilmesi

Numuneler taşlanıp düzlendikten sonra beton basınç testine maruz bırakıldığı sırada kaynakların açılmaması amacı ile alın altına puntolanıp 45°’lik açı verilerek kaynak yuvası açılmıştır.



Şekil 3.18. Çeliklere kaynak yuvası açılması

Firmadan alınan bilgiler doğrultusunda çeliklerin kaynaklanması sırasında minimum akma dayanımı 420 N/mm^2 ve minimum çekme dayanımı $500\text{-}640 \text{ N/mm}^2$ mekanik özelliklerine sahip gaz altı kaynağı kullanılmıştır. Şekil 3.19’da kaynak işleri görülmektedir.



Şekil 3.19. Kaynak işleri

Numunelerin alt ve üst başlık kısımlarına 3'er mm kalınlığında kare, dairesel ve altıgen kesitler için 160x160mm, dikdörtgen kesitler için 160x210 mm çelik plakalar kaynaklanmıştır. Üst başlıkta beton dökümünü ve vibratör kullanımını sağlamak için 42mm çapında dairesel boşluk bırakılmıştır. Yükleme sırasında kaynakların atmasını engellemek için Şekil 3.20'de görülen başlık boyunca sürekli kaynak yapılmıştır.



Şekil 3.20. Başlık kaynağı yapımı

64 adet çelik numunesi üretildikten sonra yapı laboratuvarına getirilmesinin ardından 3.4.1 bölümünde belirtilen isimlendirme sistematığına uyularak isimlendirme yapılmıştır.



Şekil 3.21. Numunelerin isimlendirilmesi



Şekil 3.22. Çelik numuneler (sırasıyla kare, dairesel, dikdörtgen ve altıgen kesitler)

Çelik numunelerin dökümden önce ve sonra ağırlıkları tartılarak Çizelge 3.7’de verilmiştir. Toplamda 0,407 m³ hacimdeki boş çelik numune içerisine 864,74 kg beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Buradan dökülen betonun birim hacim ağırlığının 2125 kg/m³ olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.7. Ortalama beton ağırlıkları

Numune	Boş Ağırlık (kg)	Beton Dolu Ağırlık (kg)	Beton Ağırlığı (kg)		Numune	Boş Ağırlık (kg)	Beton Dolu Ağırlık (kg)	Beton Ağırlığı (kg)
SS1500	4,20	4,20	0,00		HS1500	4,14	4,14	0,00
SS1510	4,32	24,72	20,40		HS1510	3,42	16,98	13,56
SS1520	4,26	24,48	20,22		HS1520	3,44	16,96	13,52
SS1530	4,18	25,04	20,86		HS1530	4,16	17,70	13,54
Ortalama	4,24	24,75	20,49		Ortalama	3,79	17,21	13,54
SS3000	6,84	6,84	0,00		HS3000	5,56	5,56	0,00
SS3010	6,84	26,20	19,36		HS3010	5,58	18,98	13,40
SS3020	6,82	26,00	19,18		HS3020	5,60	19,16	13,56
SS3030	6,96	26,44	19,48		HS3030	5,58	19,18	13,60
Ortalama	6,87	26,21	19,34		Ortalama	5,58	19,11	13,52

Çizelge 3.7. (Devam) Ortalama beton ağırlıkları

Numune	Boş Ağırlık (kg)	Beton Dolu Ağırlık (kg)	Beton Ağırlığı (kg)		Numune	Boş Ağırlık (kg)	Beton Dolu Ağırlık (kg)	Beton Ağırlığı (kg)
SS5000	10,36	10,36	0,00		HS5000	8,46	8,46	0,00
SS5010	10,28	28,26	17,98		HS5010	8,56	21,78	13,22
SS5020	10,18	28,26	18,08		HS5020	8,42	21,60	13,18
SS5030	10,40	28,54	18,14		HS5030	8,38	21,76	13,38
Ortalama	10,31	28,35	18,07		Ortalama	8,46	21,71	13,26
SS8000	14,80	14,80	0,00		HS8000	12,90	12,90	0,00
SS8010	14,98	31,44	16,46		HS8010	12,68	25,78	13,10
SS8020	14,94	31,24	16,30		HS8020	12,92	26,02	13,10
SS8030	14,74	31,16	16,42		HS8030	12,92	26,06	13,14
Ortalama	14,87	31,28	16,39		Ortalama	12,86	25,95	13,11
RS1500	4,94	4,94	0,00		CS1500	3,48	3,48	0,00
RS1510	5,04	32,52	27,48		CS1510	3,50	19,04	15,54
RS1520	4,98	32,36	27,38		CS1520	3,46	19,14	15,68
RS1530	4,96	32,32	27,36		CS1530	3,50	19,22	15,72
Ortalama	4,98	32,40	27,41		Ortalama	3,49	19,13	15,65
RS3000	7,98	7,98	0,00		CS3000	5,66	5,66	0,00
RS3010	7,92	34,34	26,42		CS3010	5,64	20,70	15,06
RS3020	8,02	34,54	26,52		CS3020	5,62	20,80	15,18
RS3030	8,08	34,62	26,54		CS3030	5,60	20,80	15,20
Ortalama	8,00	34,50	26,49		Ortalama	5,63	20,77	15,15

Çizelge 3.7. (Devam) Ortalama beton ağırlıkları

Numune	Boş Ağırlık (kg)	Beton Dolu Ağırlık (kg)	Beton Ağırlığı (kg)		Numune	Boş Ağırlık (kg)	Beton Dolu Ağırlık (kg)	Beton Ağırlığı (kg)
RS5000	12,20	12,20	0,00		CS5000	8,68	8,68	0,00
RS5010	12,18	36,62	24,44		CS5010	8,82	23,58	14,76
RS5020	12,16	36,66	24,50		CS5020	8,73	23,44	14,71
RS5030	12,16	36,88	24,72		CS5030	8,81	23,76	14,95
Ortalama	12,18	36,72	24,55		Ortalama	8,76	23,59	14,81
RS8000	17,64	17,64	0,00		CS8000	11,72	11,72	0,00
RS8010	17,66	40,00	22,34		CS8010	11,86	25,76	13,90
RS8020	17,64	40,26	22,62		CS8020	11,64	25,52	13,88
RS8030	17,56	40,16	22,60		CS8030	11,48	25,54	14,06
Ortalama	17,63	40,14	22,52		Ortalama	11,68	25,61	13,95
					TOPLAM	557,14	1421,88	864,74

İçi boş çelik numunelere beton dökümü C10, C20 ve C30 karışımları kullanılarak seriler halinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.23). Her karışımdan 16 adet olmak üzere toplam 48 adet çelik numuneye beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Üst kısımda betonun geçmesi ve vibratör kullanımına olanak sağlayan boşluk kullanılarak döküm yapılmıştır. İki kademe halinde dökülen betonun, her kademede içeriden ve dışarıdan vibratör kullanılarak yerleşmesi sağlanmıştır. Dışarıya kapalı bir sistem olup numune küre tabii tutulamayacağından vibratör işlemine özen gösterilmiştir. Ayrıca dışarıdan çekiçleyerek hava kabarcıklarının çıkması sağlanmıştır.



Şekil 3.23. Çelik numunelerinin içerisine beton dökümü

Beton dökümü biten kompozit numuneler en az 28 gün sonra kırılmak üzere beklemesi için bırakılmışlardır (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Beton dökümü tamamlanan CFST numuneleri (sırasıyla C10, C20 ve C30 serileri)

3.4.3. Numunelerin deneye hazırlanması

Beton prizini aldıktan sonra numunelerin yan yüzeyleri ile üst başlık kısımlarında bulunan beton kalıntıları spiral, tel uçlu matkap, spatula ve tel fırça kullanılarak temizlenmiş ve düz bir yüzey elde edilmiştir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Numunelerin temizlenmesi

Çeliklerin içerisine beton dökülürken her ne kadar yerleşmesine dikkat edilmiş ve üst başlıkta fazladan beton bırakılmış olsa da betonun priz alırken maruz kaldığı hacim kaybından dolayı bazı numunelerin üst kısımlarındaki beton-çelik etkileşim bölgesinde küçük boşluklar oluşmuştur. Boşluklar eksenel basınç kuvvetleri altındaki sonuçlarda tutarsızlık yaratacağından dolayı üst kısımların Şekil 3.26’da görülen akıcı kıvamda beton şerbeti kullanılarak kapanması sağlanmıştır. Akabinde üst başlıklar tekrar spiral yardımıyla temizlenip düzlenmiştir.



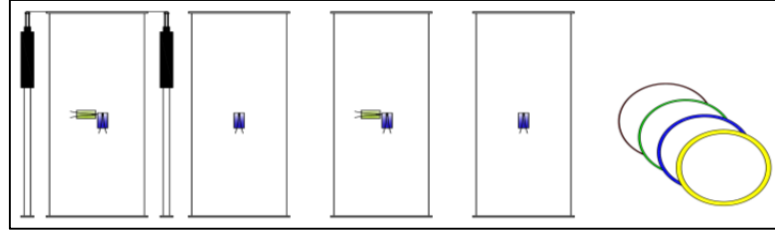
Şekil 3.26. Üst başlıkta beton-çelik etkileşim bölgesindeki boşlukların giderilmesi

Birim deformasyon ölçerlerin (strain gauges) yapıştırılacağı kısımlar ise spiral ve matkap yardımıyla zımparalanmıştır. Deneyler sırasında meydana gelecek deformasyonların numunelerin hangi kısımlarında olduğunu görsel olarak irdeleyebilmek amacıyla yan yüzeyler de kireçle boyanmıştır. Bu doğrultuda deney verilerinin yanı sıra, kirecin çatlamasına bağlı olarak zayıf bölgeler hakkında yorum yapılabilecektir (Şekil 3.27).

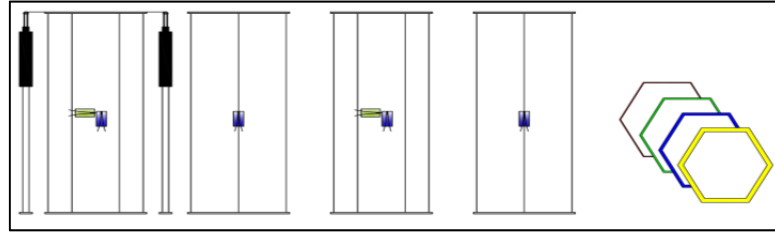


Şekil 3.27. Birim Deformasyon Ölçerlerin Konumlarının Belirlenmesi ve Kireçleme

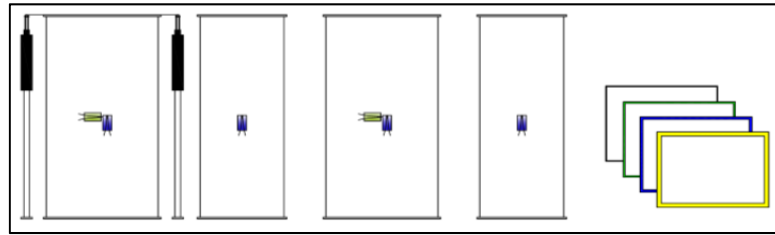
Son aşamada numunelerin her birine konumları Şekil 3.28-29-30-31’de görülmekte olan 6 adet birim deformasyon ölçerler ile 2 adet deplasman ölçer (LVDT-Linear Variable Differential Transducer) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Verilerin bilgisayara aktarılması sırasında 30 kanallı TDS 303 veri toplama cihazı (Data Logger) ve Visual Log Programı (V2.21.4) kullanılmıştır.



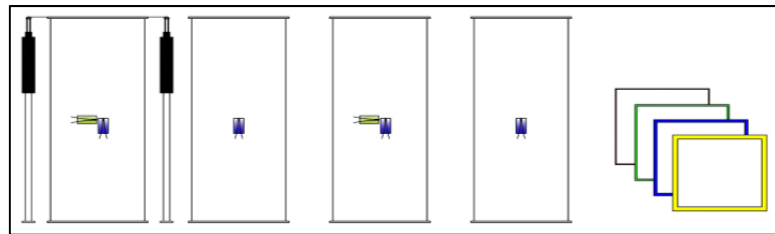
Şekil 3.28. Daire kesitli CFST numunelere yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerin konumları



Şekil 3.29. Altıgen kesitli CFST numunelere yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerin konumları



Şekil 3.30. Dikdörtgen kesitli CFST numunelere yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerin konumları



Şekil 3.31. Kare kesitli CFST numunelere yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçer ve deplasman ölçerlerin konumları

Şekil 3.32’de CFST numunelerine yapıştırılan birim şekil değiştirme donanımı ve numunelerin kırılmadan önceki son halleri görülmektedir.



Şekil 3.32. Birim şekil değiştirme ölçer ve CFST numunelerin kırılmadan önceki son hali

Deneyin gerçekleştirilmesi esnasında kullanılan ekipmanlar ve özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

Basınç presi: Numunelere basıncın verilmesi sürecinde Şahinler marka AT-1020 model hidrolik pres kullanılmıştır. Yükleme prosedürü saniyede 5 mm sabit deplasmana göre tasarlanmış olan presin güç ünitesi devreden çıkarılarak, Şekil 3.33’de ön tarafta görülen harici güç ünitesi eklenmiştir. Deney süresince numune kesit alanlarına ortalama 0,6 MPa/s gelecek şekilde yükleme hızı ayarlanmıştır. Deney sırasında numunelere sadece aksenal basınç kuvvetinin etkilediği kabul edilerek; eksantirik yükleme ile deformasyonlara bağlı oluşabilecek kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ihmal edilmiştir. Numunelerin alt ve üst başlıklardan sabit mesnet olarak mesnetlendiği kabul edilmiştir.



Şekil 3.33: CFST eksenel basınç deney düzeneği

Deplasman ölçer (LVDT): Lineer değişkenli deplasman ölçerler (Linear Variable Displacement Transducer) kendi eksenini doğrultusunda uzama veya kısılmayı ölçmek için kullanılmaktadır. Deneyler süresince her bir numune için eksenel kısılmayı ölçen 2 adet TML marka 2.5mm kapasiteli deplasman ölçer kullanılmıştır.

Birim şekil değiştirme ölçer (strain gauges): Birim şekil değiştirme ölçerler yerleştirildikleri doğrultuda elemanlardaki birim uzama veya kısılmayı ölçen donanımlardır. LVDT genel boy değişimini ölçerken, birim şekil değiştirme ölçerler noktasal boy değişimi değerlerini ölçmektedir. Deneyler süresince her bir numune için 6 adet olmak üzere toplamda 384 adet TML marka FLA-6-11-5L tipi 6mm boyunda birim şekil değiştirme ölçer kullanılmıştır. Şekil 3.34'te görüldüğü üzere mevcut birim şekil değiştirme ölçerlerin sağlıklı çalışabilmesi için ölçüm direncinin $120 \pm 0.5 \Omega$ olması ve kısa devre yapmaması gerekmektedir.



Şekil 3.34. Birim şekil değıştirme ölçer direnç değeri

Yük hücresi (load cell): Numune üzerine prestren tatbik edilen yükün istenilen zamanda, doğru ve hassas biçimde okunabilmesi için yük hücreleri kullanılır. Elastisite modülü deneylerinde 50t, beton basınç ve sürtünme deneylerinde 100t ve CFST deneylerinde 200t kapasiteli TML marka yük hücreleri kullanılmıştır.

Veri toplama cihazı (data logger): Tüm yapı ekipmanlarından aynı anda ve anlamlı veri toplanabilmesi amacıyla Şekil 3.35'te görülen 30 kanallı TDS303 veri toplama cihazı Visual Log statik veri toplama yazılımı ile koordineli olarak kullanılmıştır. Ekipmanların üretici firma tarafından sağlanan kalibrasyon değerleri veri toplama cihazına girilerek okumalar 1sn aralıklarla alınmıştır.



Şekil 3.35. Veri toplama cihazı

4. TEST SONUÇLARI

4.1. Beton Basınç Deneyi Sonuçları

Beton basınç deneyi sonucunda kırımı gerçekleştirilen betonlar (Şekil 4.1), boyutları ve dayanımları Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. C10, C20, C30 silindir ve küp numunelerin beton basınç deneyinden sonraki durumları

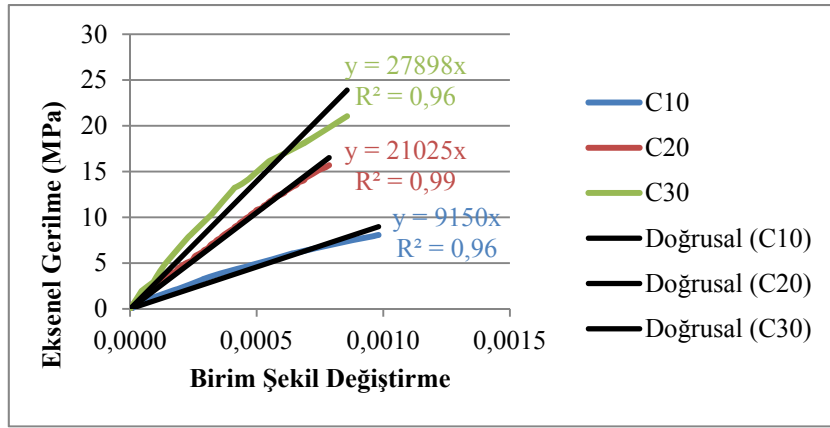
Çizelge 4.1. Beton basınç deneyi sonuçları

	10 MPa Öngörülen Numuneler	20 MPa Öngörülen Numuneler	30 MPa Öngörülen Numuneler
10x20cm Silindir - Numune 1	14,55	21,86	35,08
10x20cm Silindir - Numune 2	12,83	25,64	27,46
10x20cm Silindir - Numune 3	-	23,69	29,20
15x30cm Silindir - Numune 1	15,84	28,88	41,58
15x30cm Silindir - Numune 2	16,15	28,50	43,48
15x30cm Silindir - Numune 3	16,08	28,69	43,77
15x15x15cm Küp - Numune 1	10,32	33,31	38,81
15x15x15cm Küp - Numune 2	12,56	31,37	42,93
15x15x15cm Küp - Numune 3	15,61	31,37	39,33
Ortalama (MPa)	13,28	26,01	35,26

Küp dayanımı değerleri TS498'e göre %20 oranında azaltılarak eşdeğer silindir basıncına dönüştürülüp ortalamaya katılmıştır.

Beton basınç dayanımı sonucunda çıkan değerler beklenen değerlerin üzerindedir.

Şekil 4.2'de C10, C20 ve C30 beton numuneler için elastisite modülü deneyinden elde edilen veriler gösterilmiştir. Betonun gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde elastik sınır içerisinde kalacak şekilde gerilme değerinin %60'ı (FEMA356[48]) ve başlangıç noktası arasında kalan kısım lineer interpolasyon yapılarak doğrusal bir çizgi ile birleştirilmiştir.



Şekil 4.2. C10, C20, C30 beton numuneler için elastisite modülü deney sonuçları

Standartlarda verilen aşağıdaki denklemlere göre hesaplanan elastisite modülü değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

$$E_c = 4.73(\sqrt{f_c}) \quad (4.1)$$

$$E_c = 3.25(\sqrt{f_c}) + 14 \quad (4.2)$$

$$E_c = 3.32(\sqrt{f_c}) + 6.9 \quad (4.3)$$

$$E_c = 10(\sqrt[3]{8 + f_c}) \quad (4.4)$$

$$E_c = 9.5(f_c)^{0.3} \quad (4.5)$$

Çizelge 4.2. Elastisite modülü sonuçları

E (MPa)	Beton Basınç Dayanımı (f_c) (MPa)		
	13.3	26.0	35.3
ACI 318-95 (Denklem 4.1)	17250	24118	28103
TS 500 (Sf 11-Çizelge 3.2)	22410	30400	33050
TS 500 (Denklem 4.2)	25852	30572	33309
ACI 363 (Denklem 4.3)	19008	23829	26625
CEB 90 (Denklem 4.4)	27720	32396	35115
NS 3473 (Denklem 4.5)	20648	25247	27673
Deney Sonucu	9150	21025	27900

Elastisite modülü deneyinden elde edilen verilerin ACI 318-95 (American Concrete Institute - Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary) standardına yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

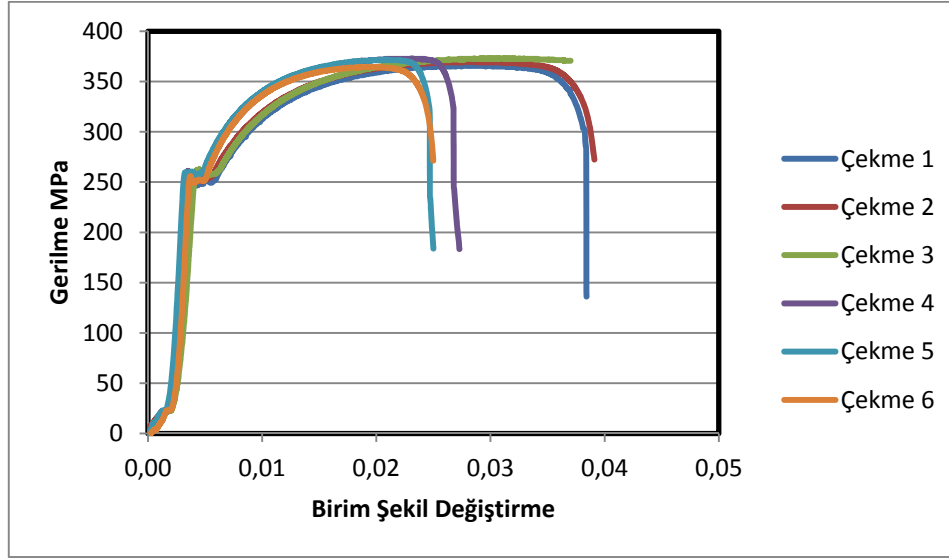
4.2. Çelik Çekme Deneyi Sonuçları

Çelik çekme deneyinden 6 adet fiyonk şeklindeki çeliklerin (Şekil 4.3) sonuçlarından elde edilen ortalama değerler Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Çelik fiyonkların deney sonundaki durumları

Şekil 4.4'te görülen gerilme - birim şekil değiştirme grafiğinde; başlangıçta yüksek şekil değiştirmelerin bulunduğu bölge, çelik numunelerin çekme çenelerine kilitlenmesi sırasındaki boşluklardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4. Çelik numuneler için gerilme birim şekil değiştirme grafiği

Çizelge 4.3. Deneyde sonucunda belirlenen, çeliğin mekanik özellikleri

Akma Dayanımı σ_y (MPa)	Çekme Kuvveti (MPa)	Uzama %	Elastisite Modülü (MPa)
254.7	369.6	32.12	194695

4.3. Sürtünme Deneyi Sonuçları

4.3.1. Sürtünme kuvveti

Yapılan yükleme sonucunda sıyrılan numuneler (Şekil 4.5) için elde edilen sürtünme kuvveti değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Deneyler süresince statik sürtünme kuvveti değeri incelendiğinden betonun hareket etmeye

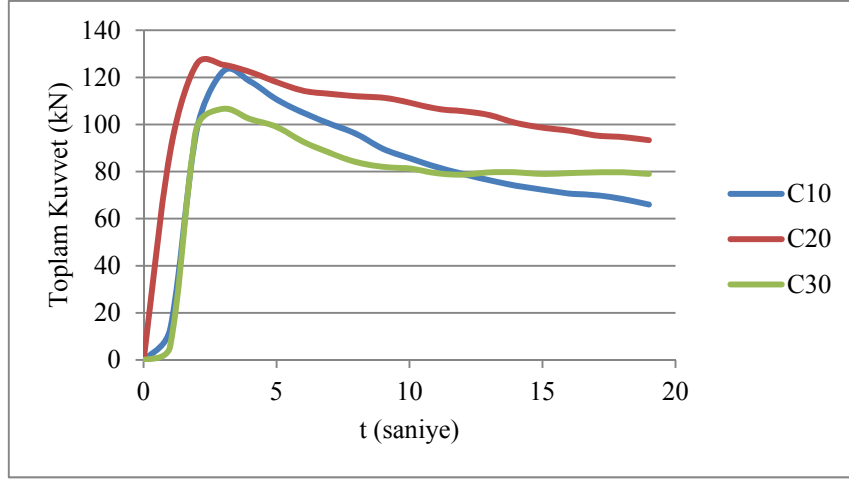
başladığı andaki kuvvet maksimum kuvvet olacaktır. Sıyrılmaya başladıktan sonra dinamik sürtünme kuvveti devreye gireceğinden, statik sürtünme kuvveti değeri azalacaktır. Fakat beton sıyrıldıktan sonra üst kısım boşa çıktığından Şekil 4.6-4.7’de görüldüğü gibi toplam kuvvette azalma görülmektedir.



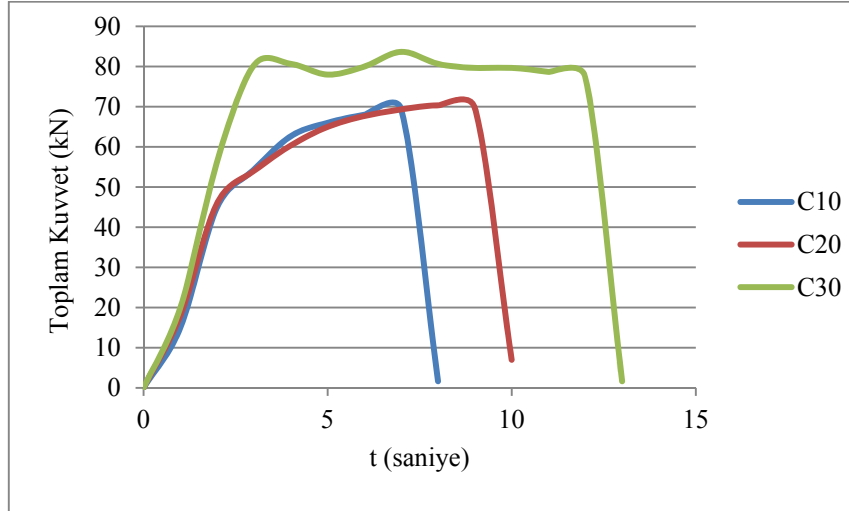
Şekil 4.5. Sürtünme kuvveti deneyi sonucunda sıyrılan numuneler

Çizelge 4.4. Sürtünme gerilmesi değerleri

Numune Şekli	Çekirdek Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Sürtünme Yüzey Alanı (mm ²)	Maksimum Kuvvet (N)	Sürtünme Gerilmesi (MPa)	Ortalama Sürtünme Gerilmesi (MPa)
Silindir	10	188486	122670	0,065	0,063
Silindir	20		125670	0,067	
Silindir	30		106670	0,057	
Kare	10	240000	69330	0,029	0,031
Kare	20		70330	0,029	
Kare	30		83670	0,035	



Şekil 4.6. Silindir numunelerde sürtünme kuvveti grafiği



Şekil 4.7. Kare numunelerde sürtünme kuvveti grafiği

Sürtünme deneylerinde kare numunelerin silindirlere göre %50 daha düşük sürtünme kuvvetinde sıyrıldığı görülmüştür.

4.3.2. Statik sürtünme katsayısı

Yapılan deney sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Statik sürtünme katsayı deney sonuçları

Deney No	Beton Ağırlığı (kg)	Sürtünme Kuvveti (kg)	Statik Sürtünme Katsayısı (μ s)
1.1	129,00	66,00	0,51
1.2		66,00	0,51
1.3		68,00	0,53
2.1	133,50	74,00	0,55
2.2		77,00	0,58
2.3		78,00	0,58
3.1	131,85	70,00	0,53
3.2		70,00	0,53
3.3		68,00	0,52
		Ortalama	0,54

Yapılan deney sonucunda belirlenen 0.54 değeri literatürde 0.6 olarak kabul edilen statik sürtünme katsayısı değerine yakın olarak bulunmuştur.

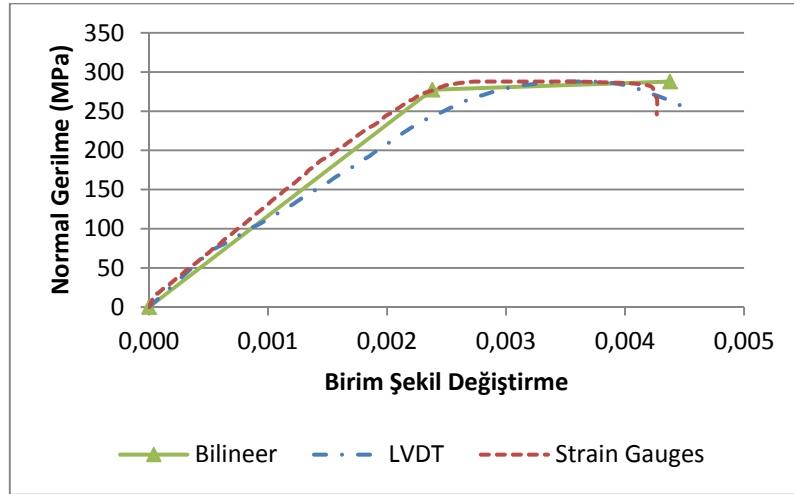
4.4. CFST Eksenel Basınç Deneyi Sonuçları

CFST eksenel basınç deneylerinden elde edilen veriler; bu bölümde sırası ile her bir numunenin deney öncesi ve sonrası durumları, yükleme eksenine paralel ve dik doğrultuda gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri ile sunulmuştur. Beton ve çelikten oluşan kompozit kesit alanı kullanılarak gerilme değerleri bulunmuştur. Eksenel doğrultudaki gerilme birim şekil değiştirme

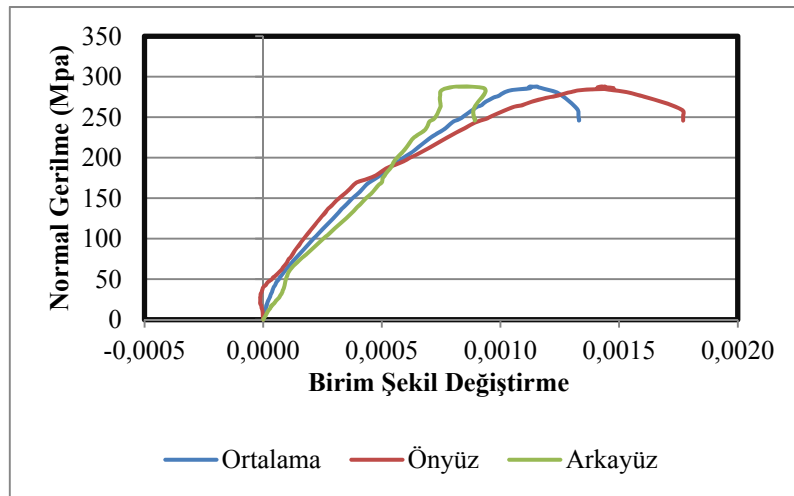
grafikleri kapsamında numunelerde bulunan 2 adet LVDT ortalaması ve 4 adet düşey birim şekil değiştirme ölçerin ortalaması verilmiştir. Kesin değere en yakın tahmini yapabilmek için LVDT ve düşey birim şekil değiştirme ölçerlerin tekrar ortalamaları alınarak FEMA356 [48]'ya göre bilinearizasyon yapılarak ikili lineer doğrulardan oluşan grafikler elde edilmiştir. Eksene dik doğrultuda enine birim şekil değiştirme değerlerinde noktasal uzama, kısalma ve burkulma değerleri söz konusu olduğundan, davranışın açıkça görülmesi açısından her bir numune için yatayda kullanılan 2 adet birim şekil değiştirme ölçerin ortalaması alınarak olduğu gibi aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.8. CS1500 numunesi deney öncesi ve sonrası



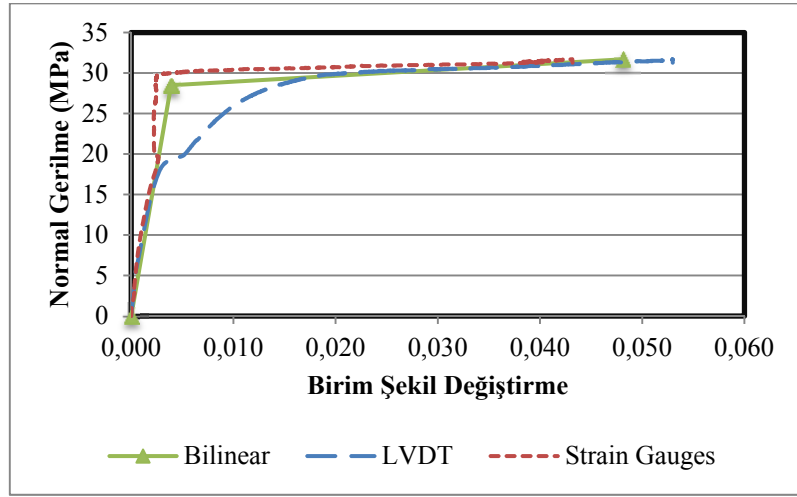
Şekil 4.9. CS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



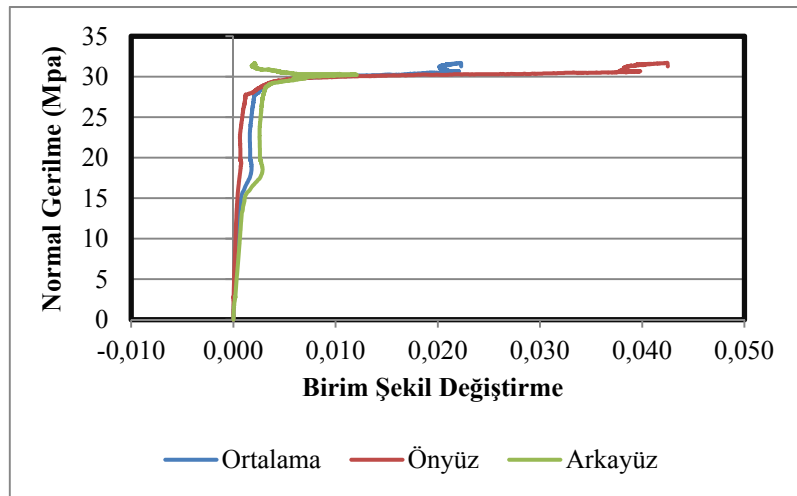
Şekil 4.10. CS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.11. CS1510 numunesi deney öncesi ve sonrası



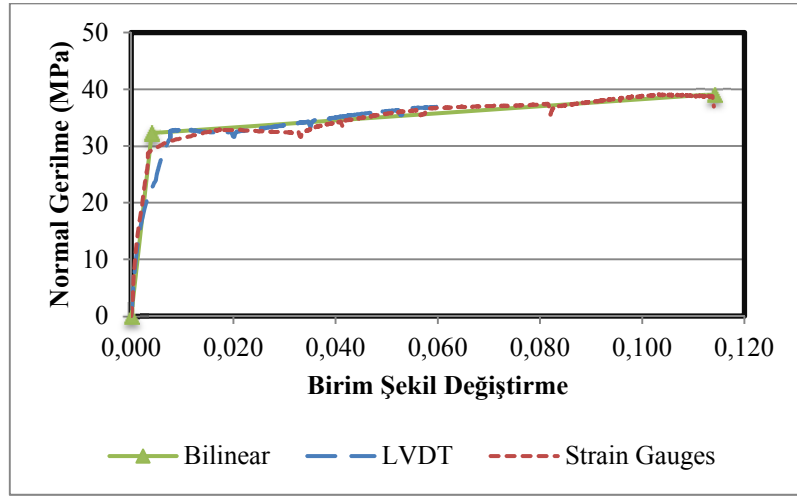
Şekil 4.12. CS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



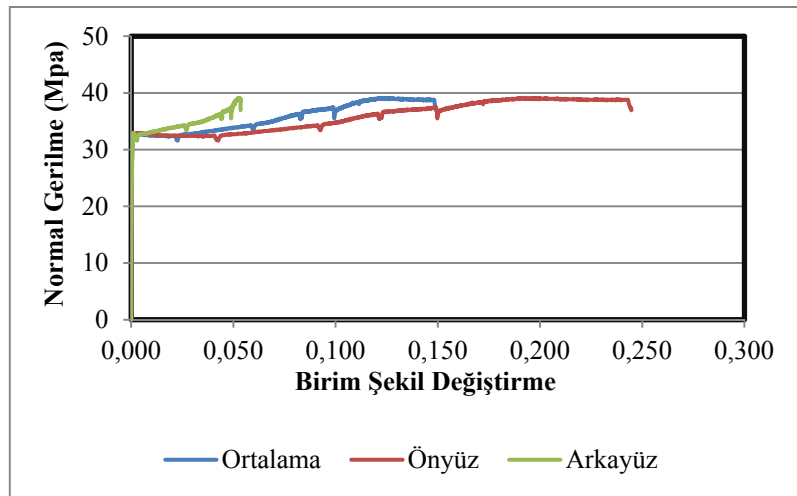
Şekil 4.13. CS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.14. CS1520 numunesi deney öncesi ve sonrası



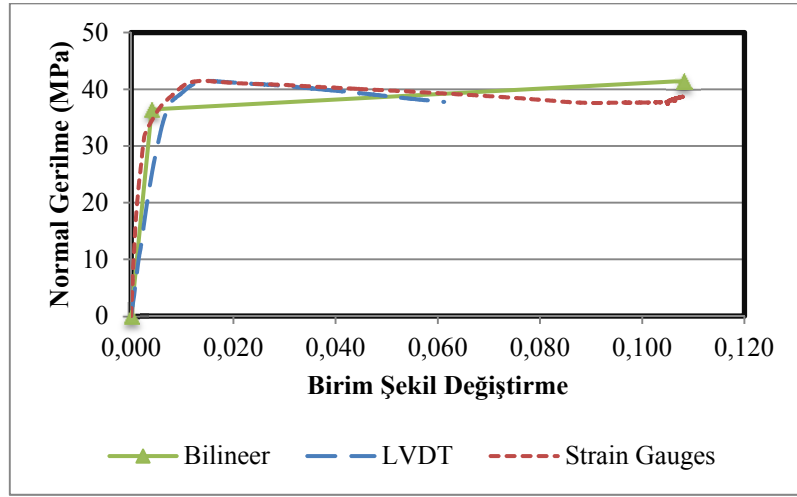
Şekil 4.15. CS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



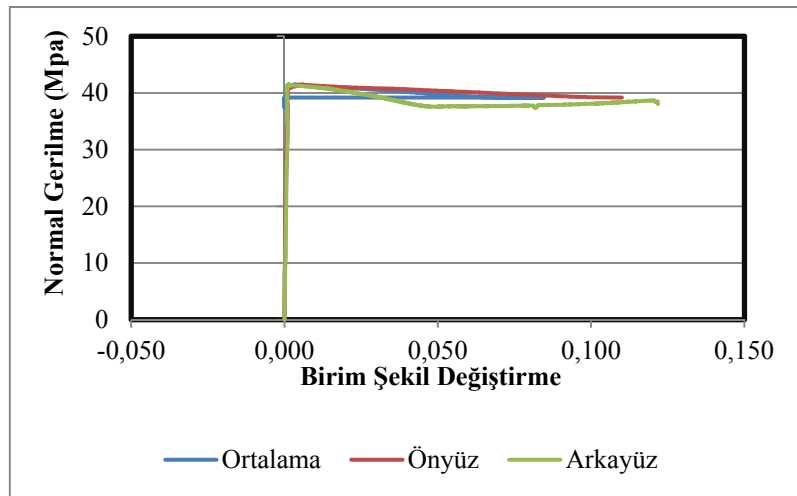
Şekil 4.16. CS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.17. CS1530 numunesi deney öncesi ve sonrası



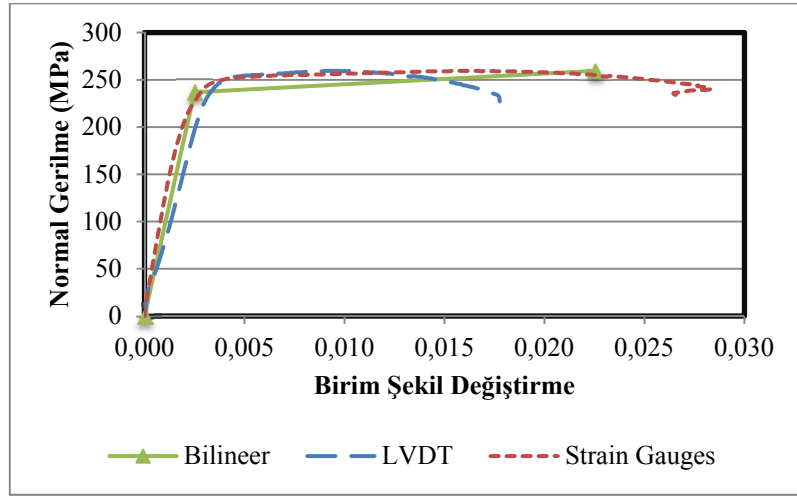
Şekil 4.18. CS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



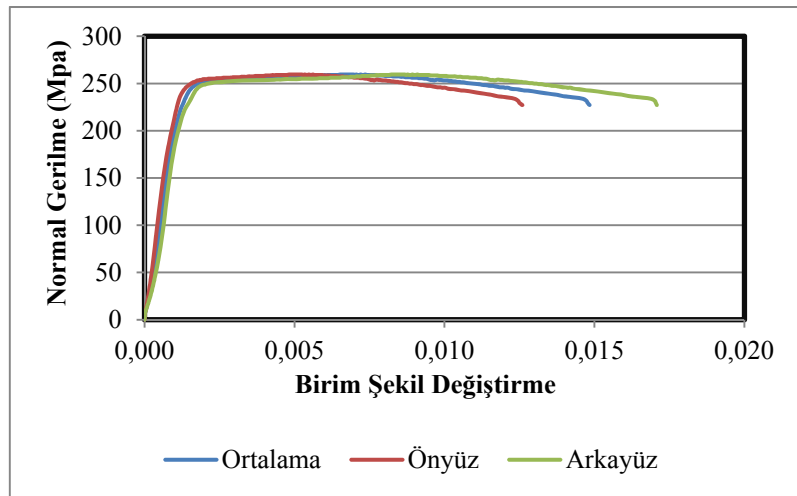
Şekil 4.19. CS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.20. CS3000 numunesi deney öncesi ve sonrası



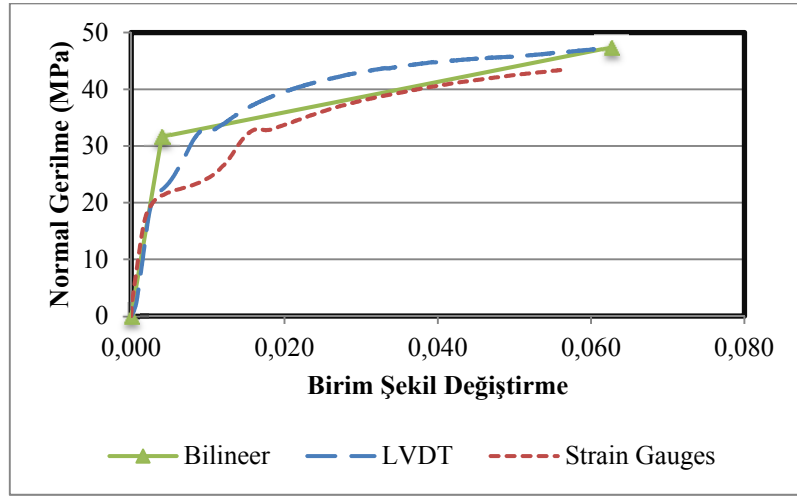
Şekil 4.21. CS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



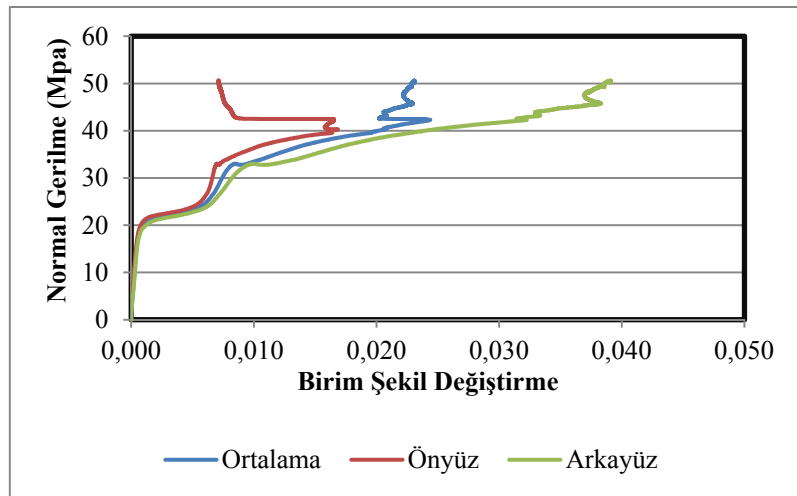
Şekil 4.22. CS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.23. CS3010 numunesi deney öncesi ve sonrası



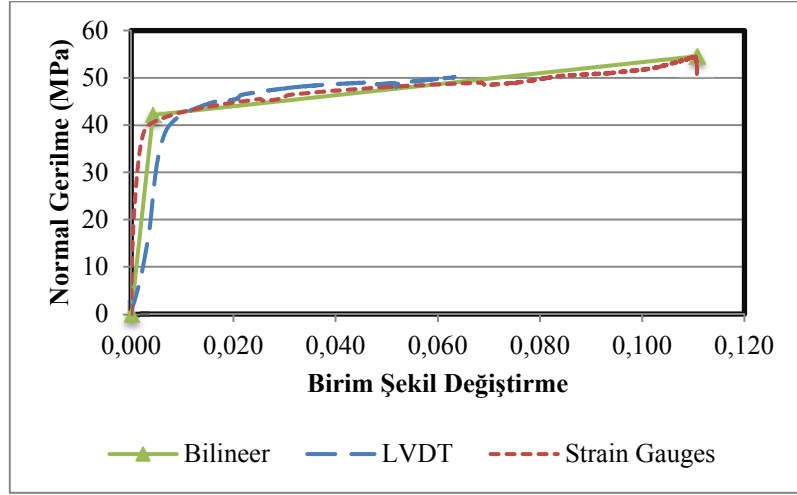
Şekil 4.24. CS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



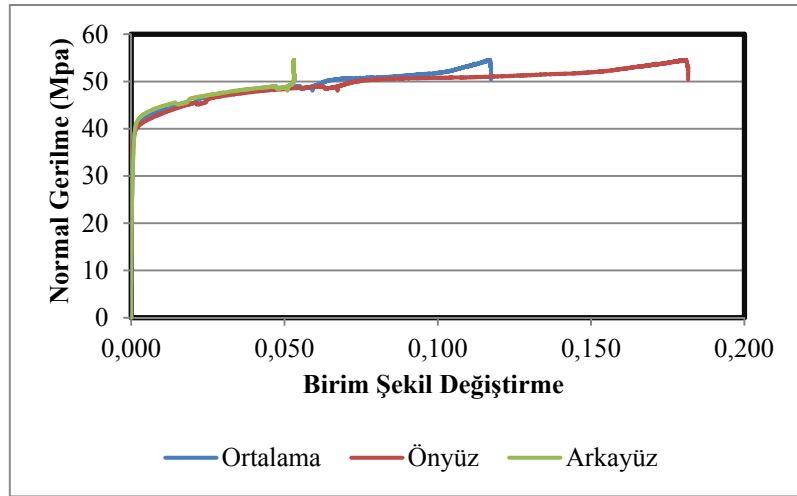
Şekil 4.25. CS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.26. CS3020 numunesi deney öncesi ve sonrası



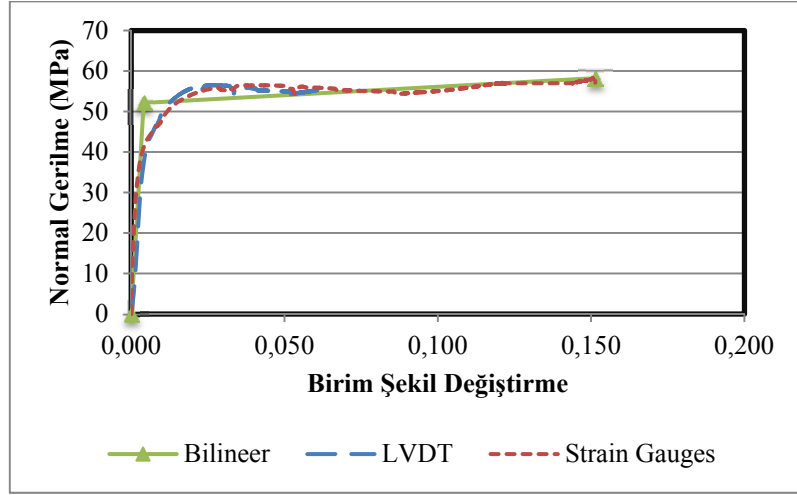
Şekil 4.27. CS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



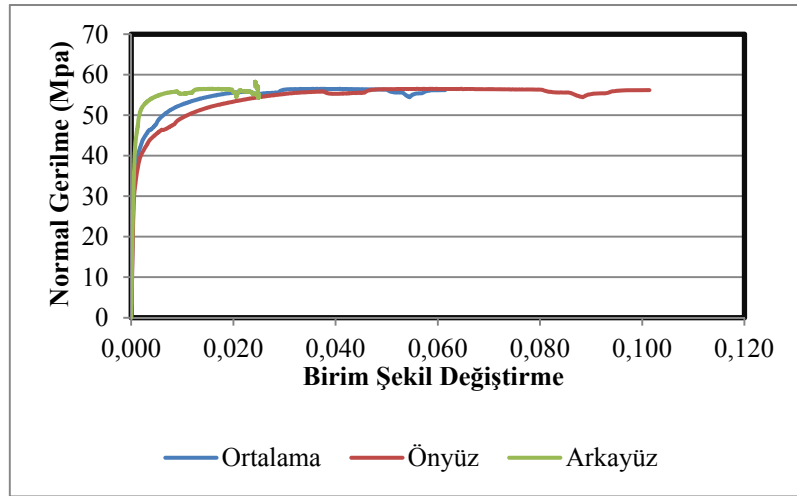
Şekil 4.28. CS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.29. CS3030 numunesi deney öncesi ve sonrası



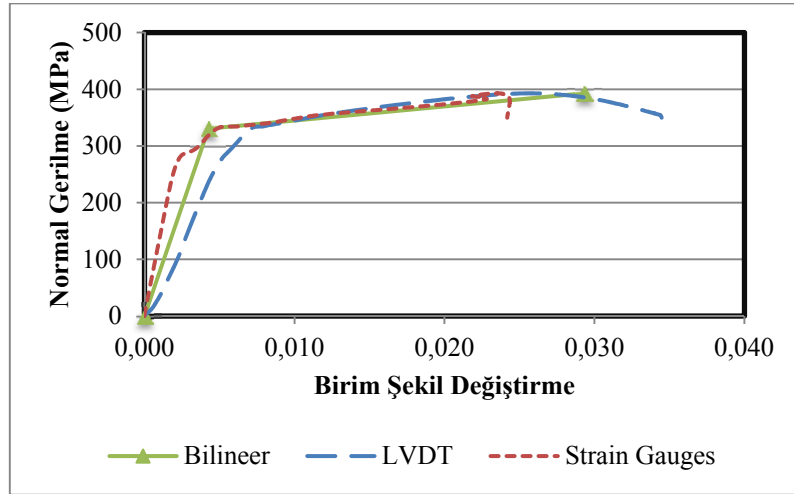
Şekil 4.30. CS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



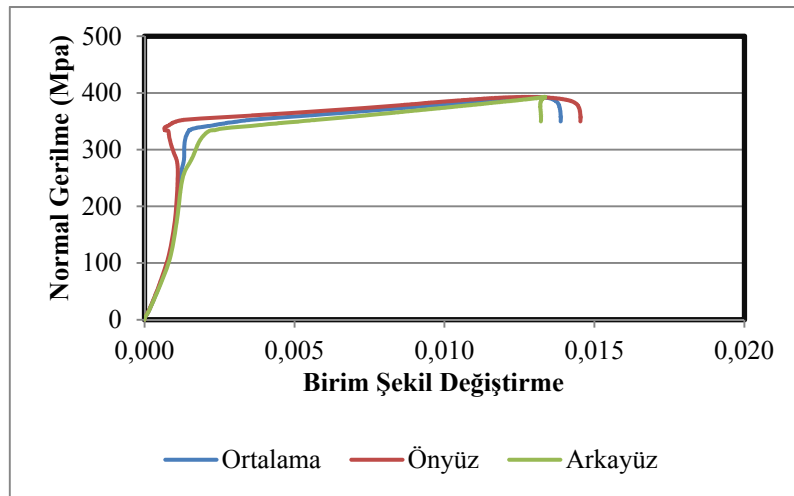
Şekil 4.31. CS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.32. CS5000 numunesi deney öncesi ve sonrası



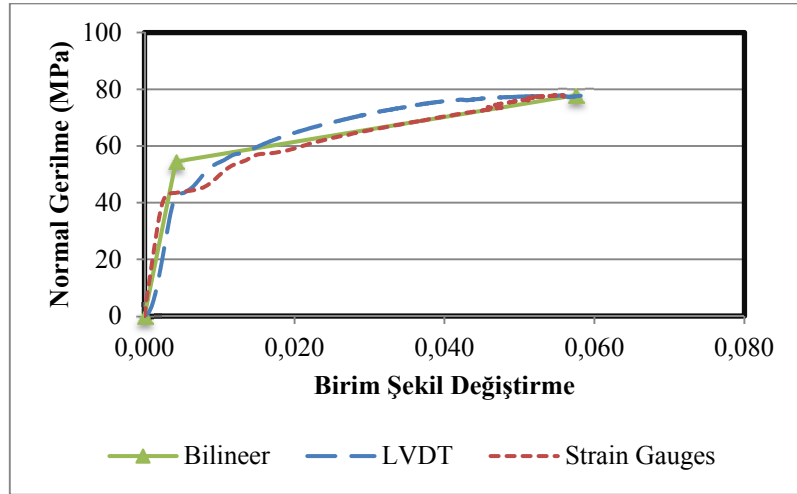
Şekil 4.33. CS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



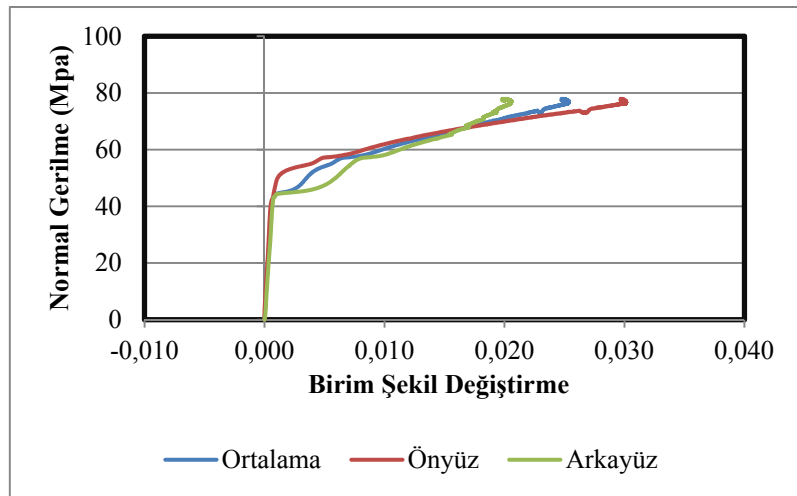
Şekil 4.34. CS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.35. CS5010 numunesi deney öncesi ve sonrası



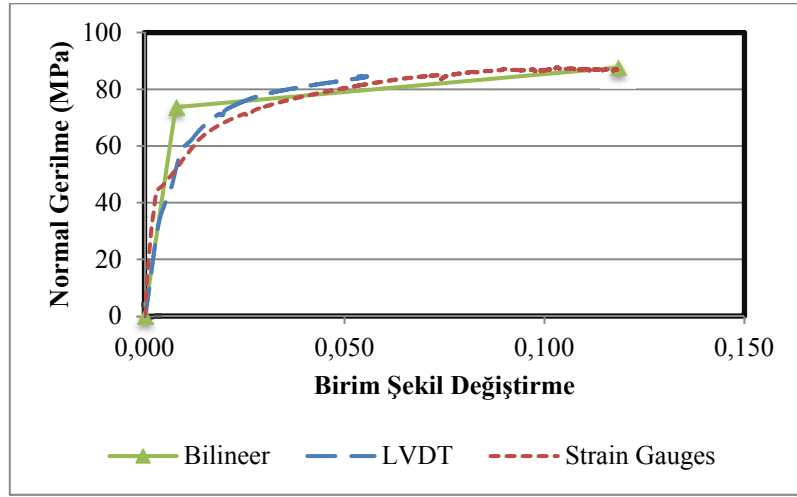
Şekil 4.36. CS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



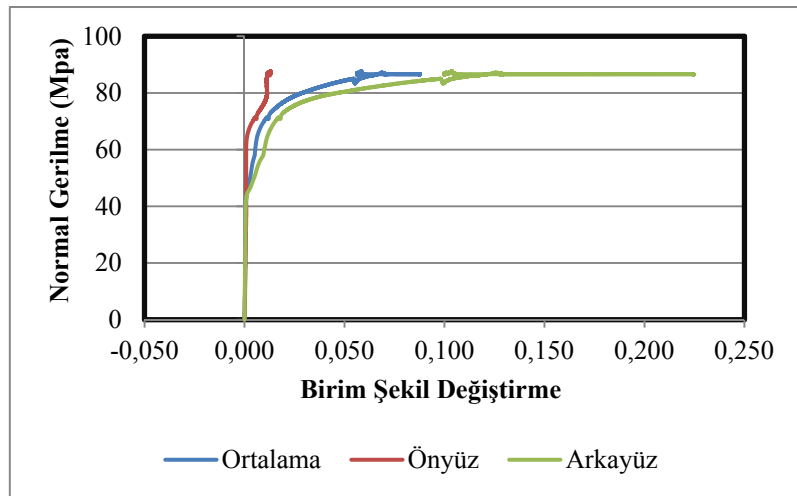
Şekil 4.37. CS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.38. CS5020 numunesi deney öncesi ve sonrası



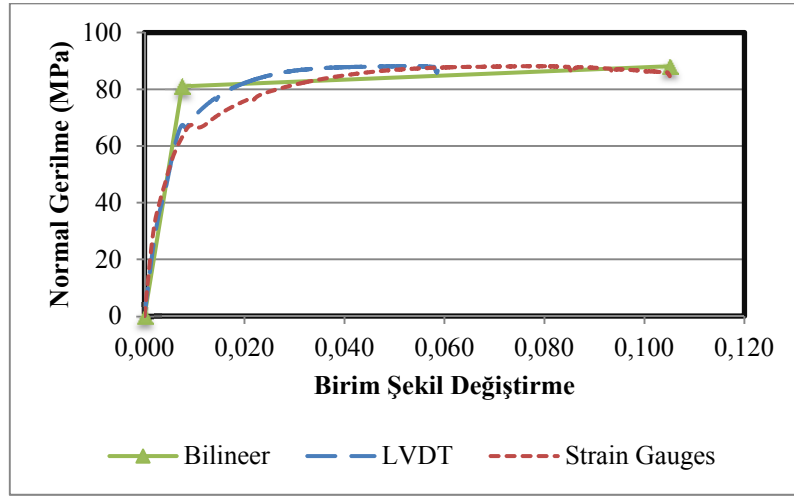
Şekil 4.39. CS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



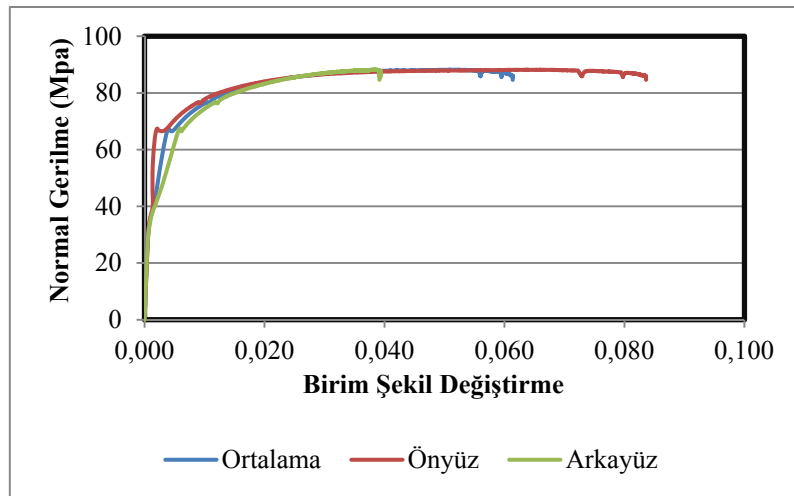
Şekil 4.40. CS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.41. CS5030 numunesi deney öncesi ve sonrası



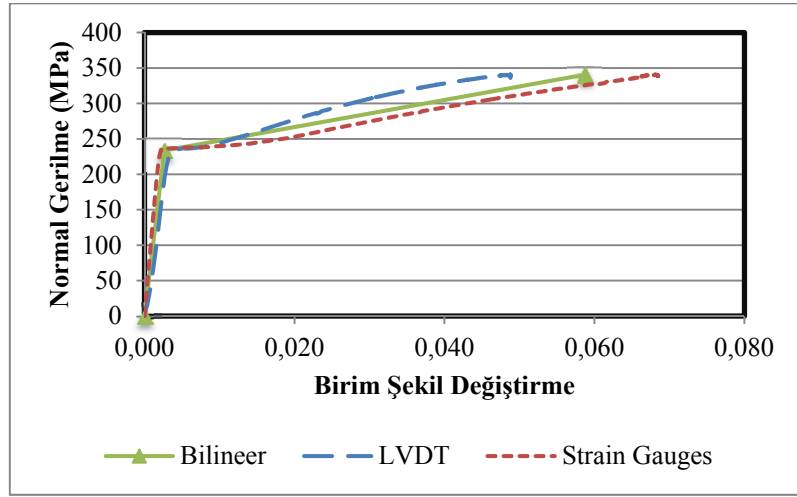
Şekil 4.42. CS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



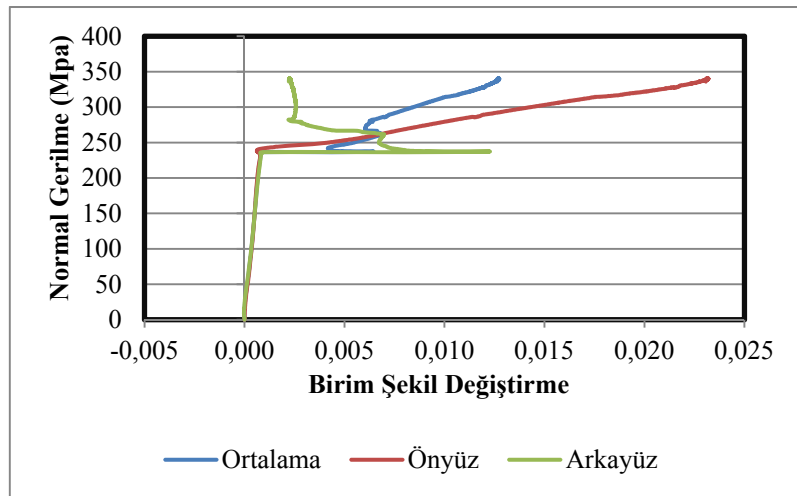
Şekil 4.43. CS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.44. CS8000 numunesi deney öncesi ve sonrası



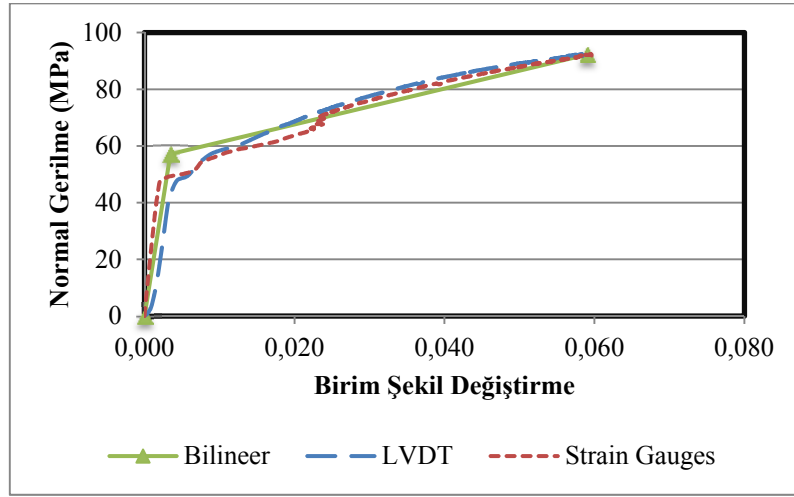
Şekil 4.45. CS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



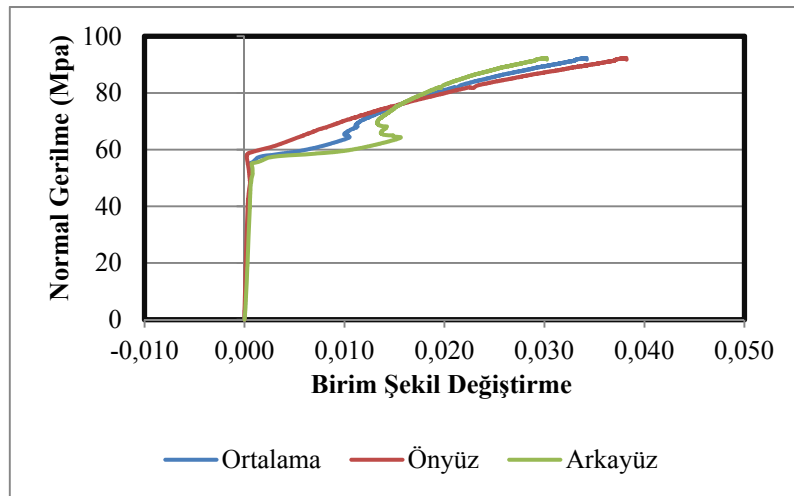
Şekil 4.46. CS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



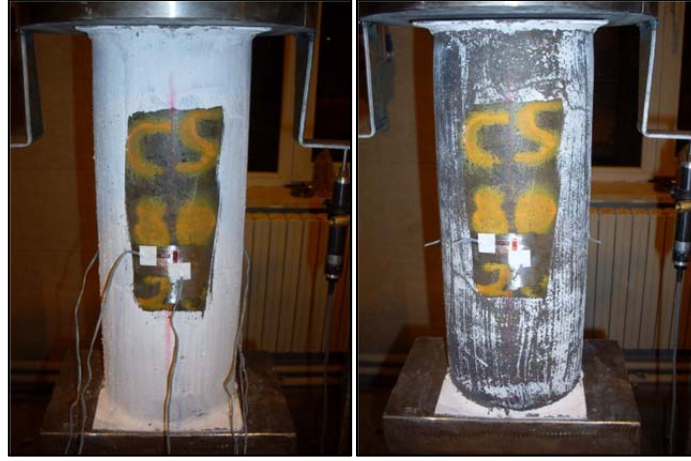
Şekil 4.47. CS8010 numunesi deney öncesi ve sonrası



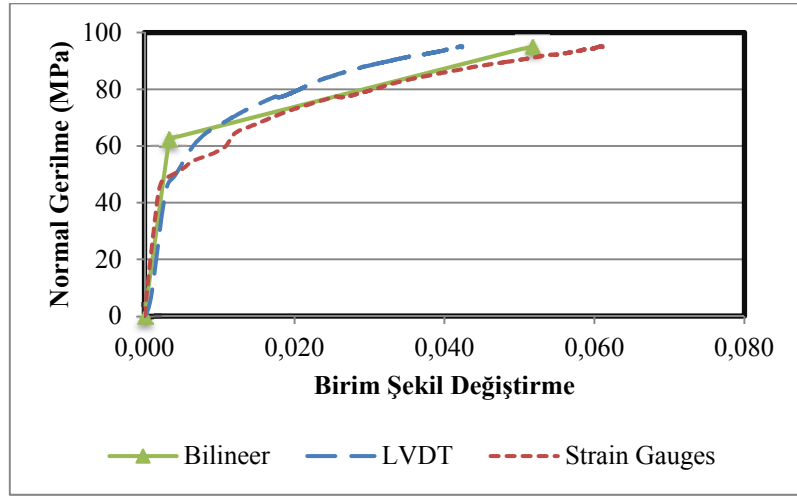
Şekil 4.48. CS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



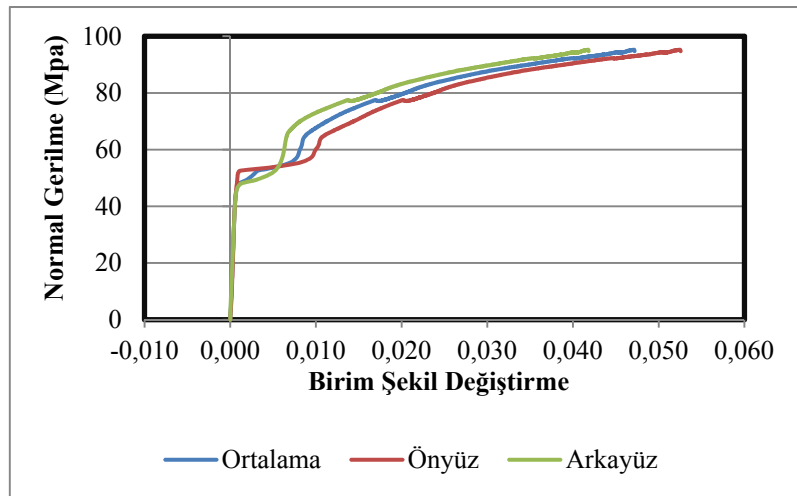
Şekil 4.49. CS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.50. CS8020 numunesi deney öncesi ve sonrası



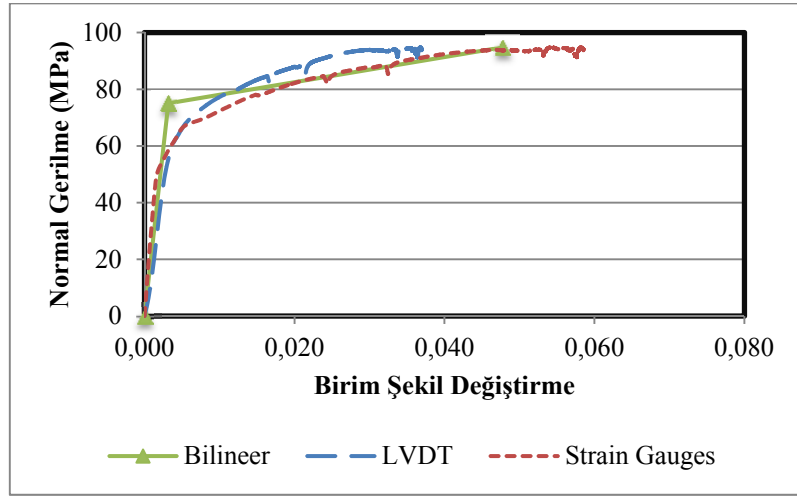
Şekil 4.51. CS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



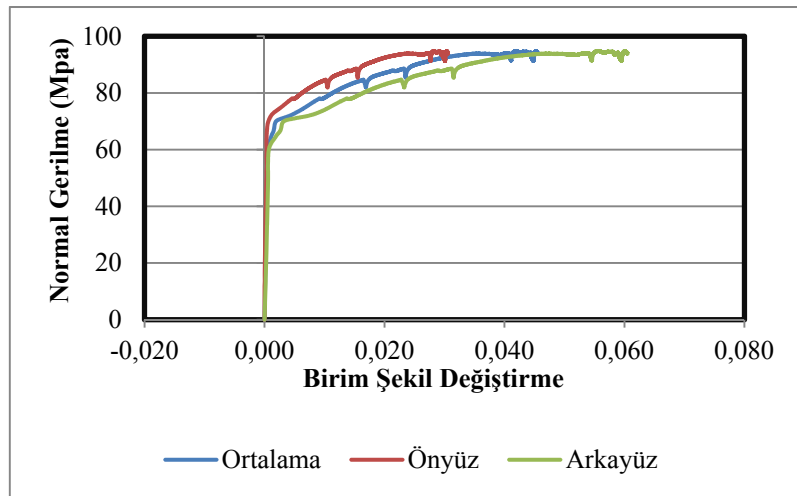
Şekil 4.52. CS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.53. CS8030 numunesi deney öncesi ve sonrası



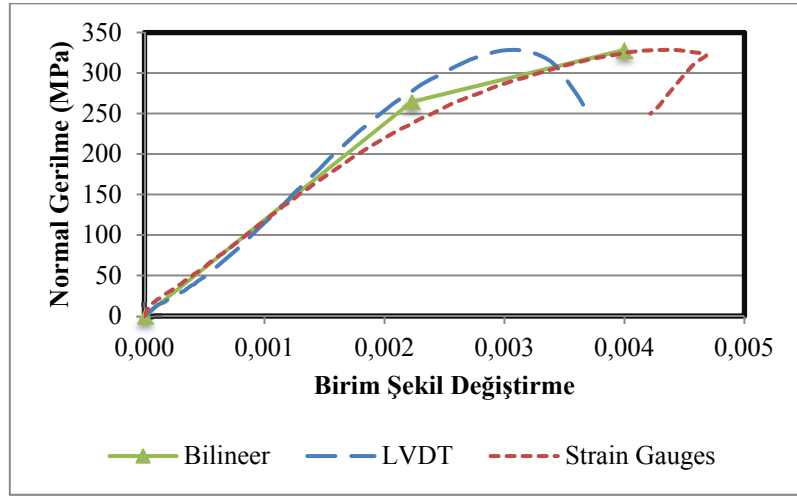
Şekil 4.54. CS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



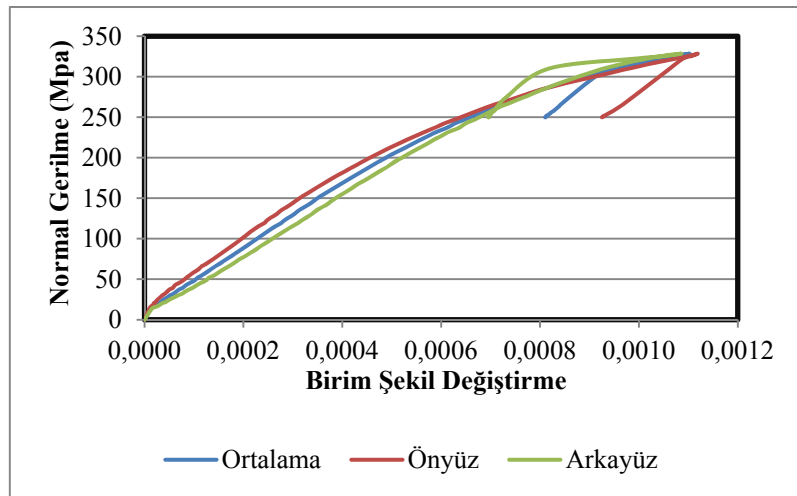
Şekil 4.55. CS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.56. HS1500 numunesi deney öncesi ve sonrası



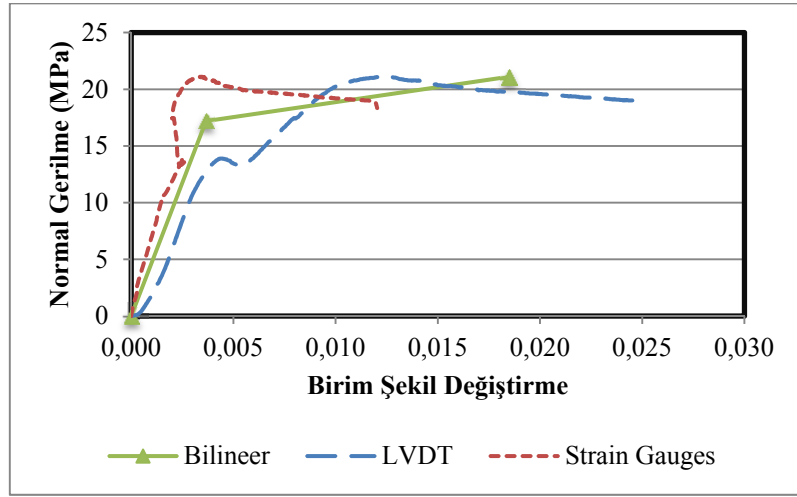
Şekil 4.57. HS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



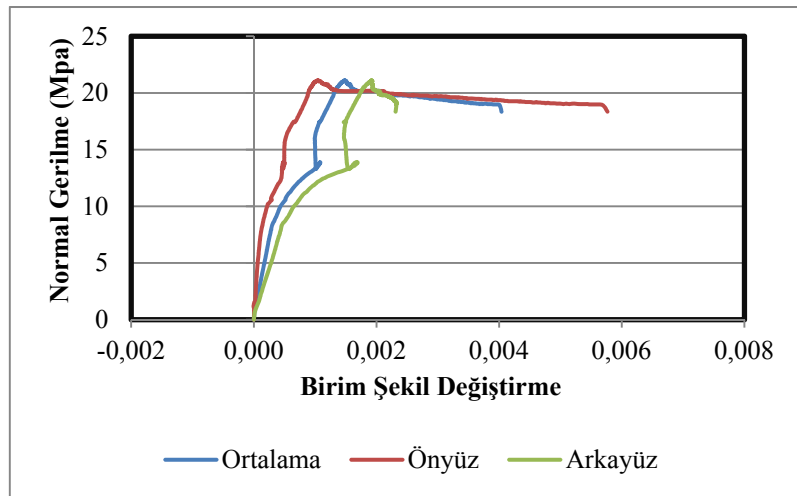
Şekil 4.58. HS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.59. HS1510 numunesi deney öncesi ve sonrası



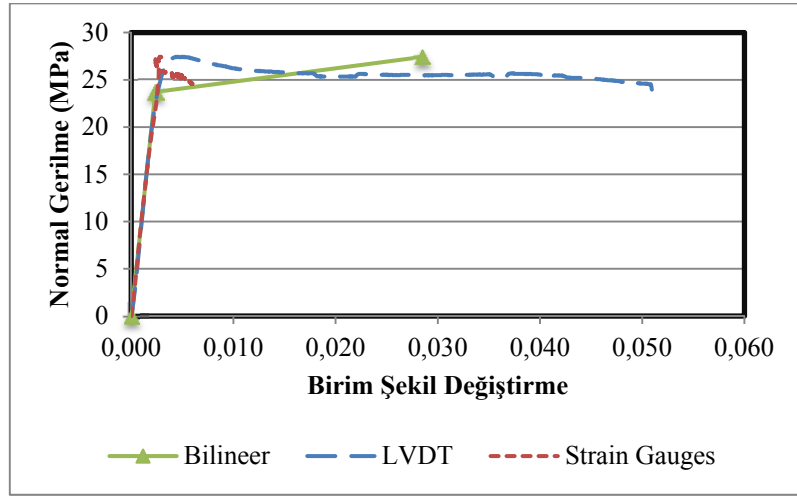
Şekil 4.60. HS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



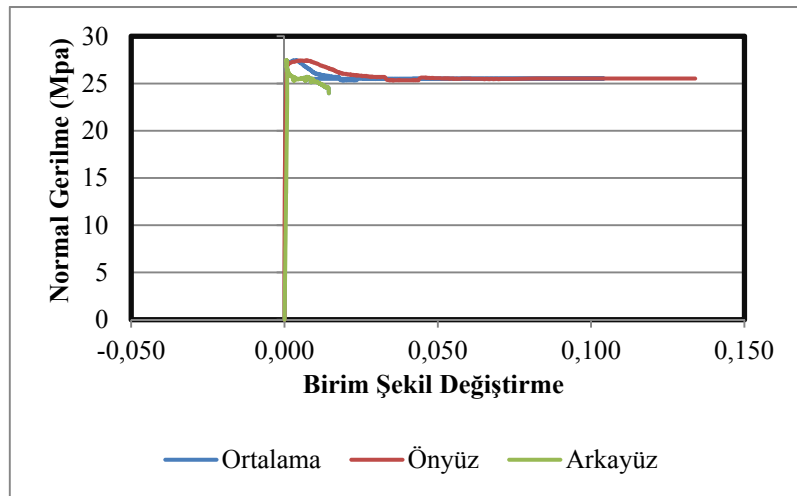
Şekil 4.61. HS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.62. HS1520 numunesi deney öncesi ve sonrası



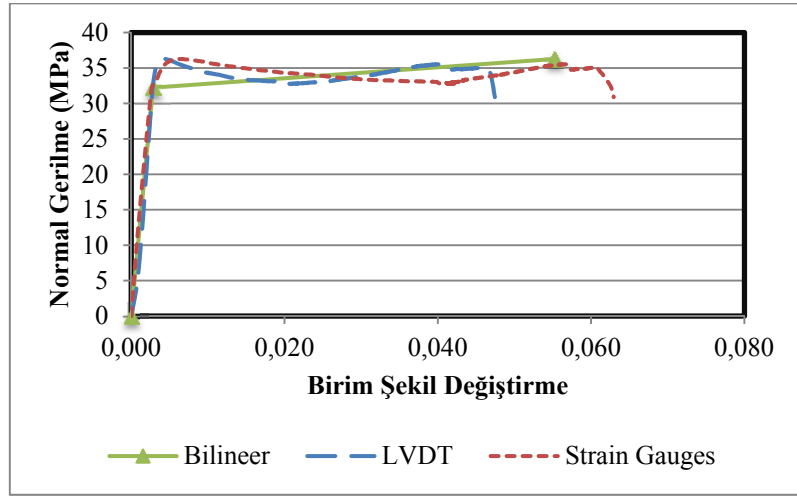
Şekil 4.63. HS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



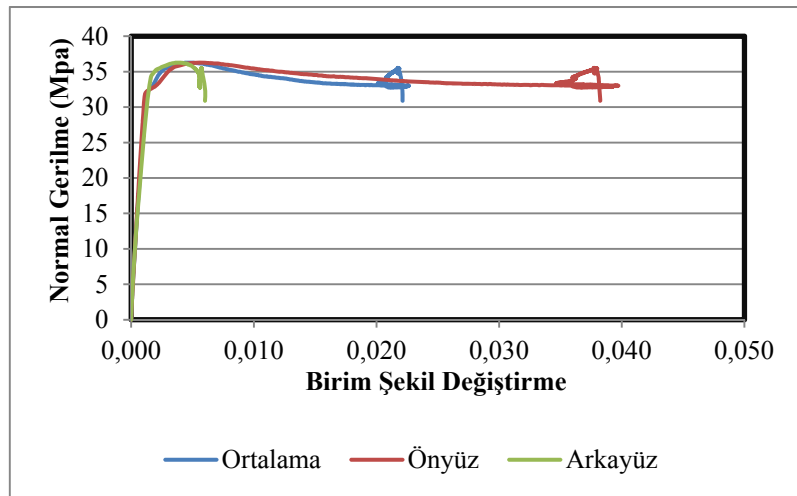
Şekil 4.64. HS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.65. HS1530 numunesi deney öncesi ve sonrası



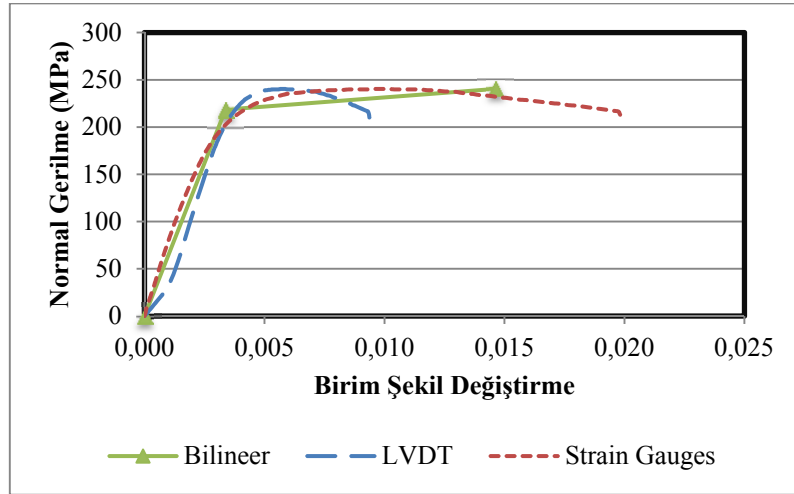
Şekil 4.66. HS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



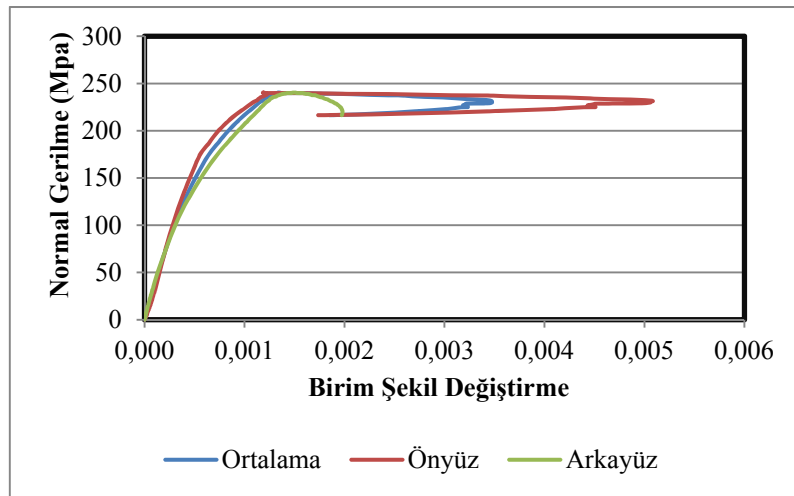
Şekil 4.67. HS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



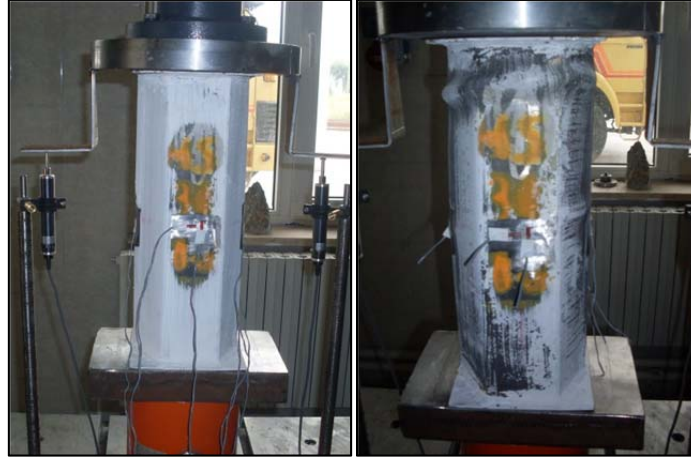
Şekil 4.68. HS3000 numunesi deney öncesi ve sonrası



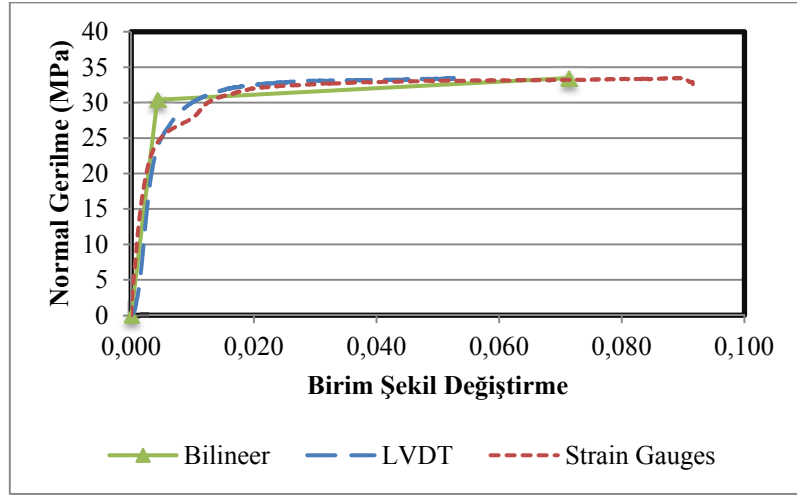
Şekil 4.69. HS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



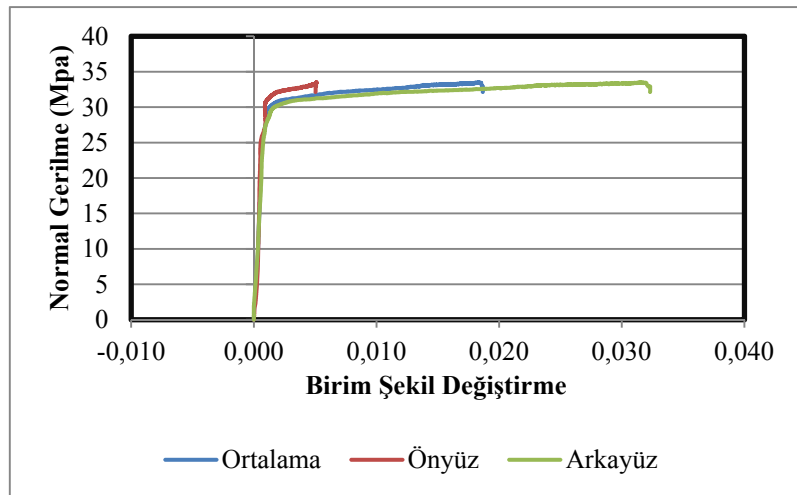
Şekil 4.70. HS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.71. HS3010 numunesi deney öncesi ve sonrası



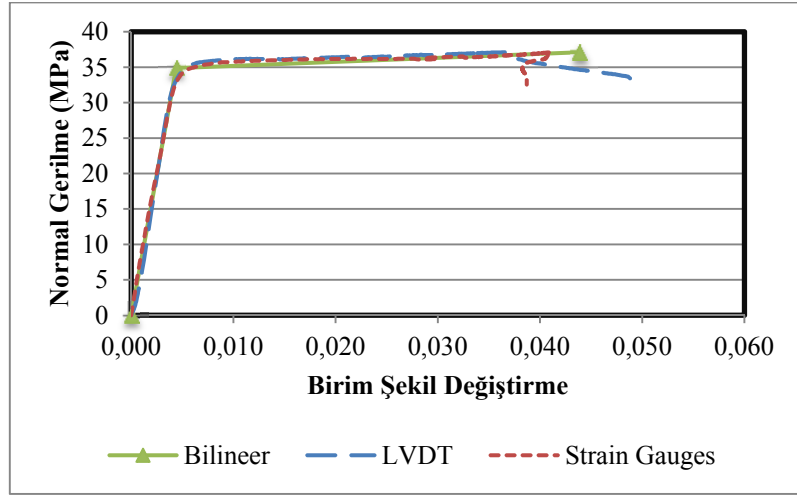
Şekil 4.72. HS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



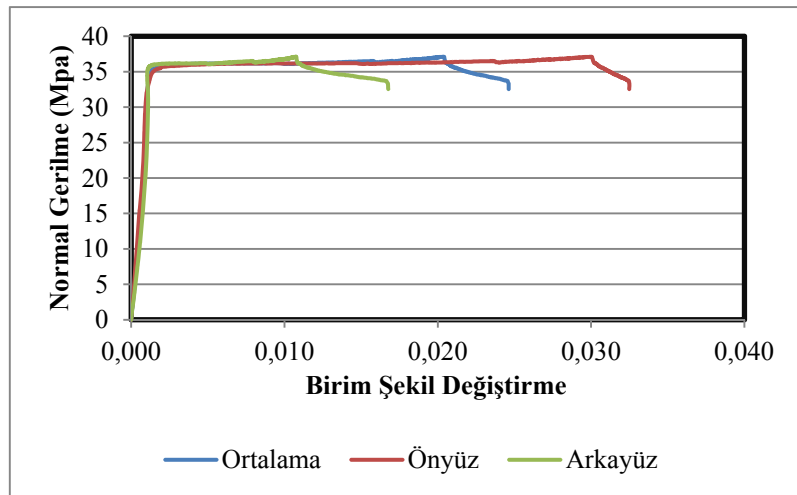
Şekil 4.73. HS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.74. HS3020 numunesi deney öncesi ve sonrası



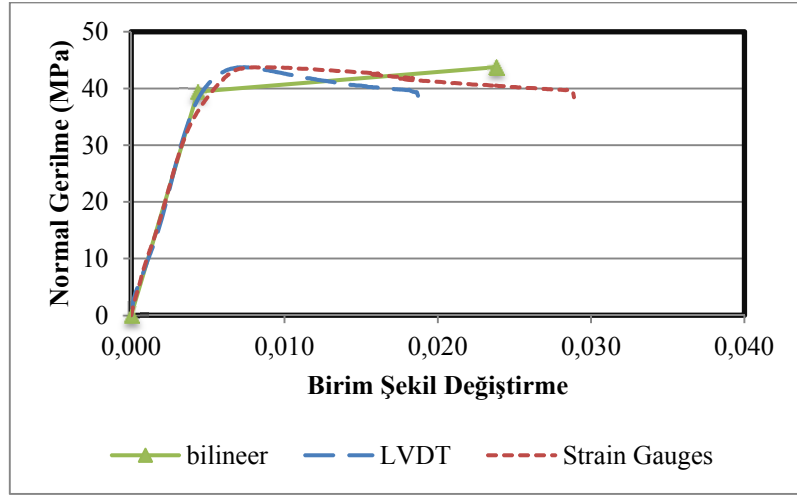
Şekil 4.75. HS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



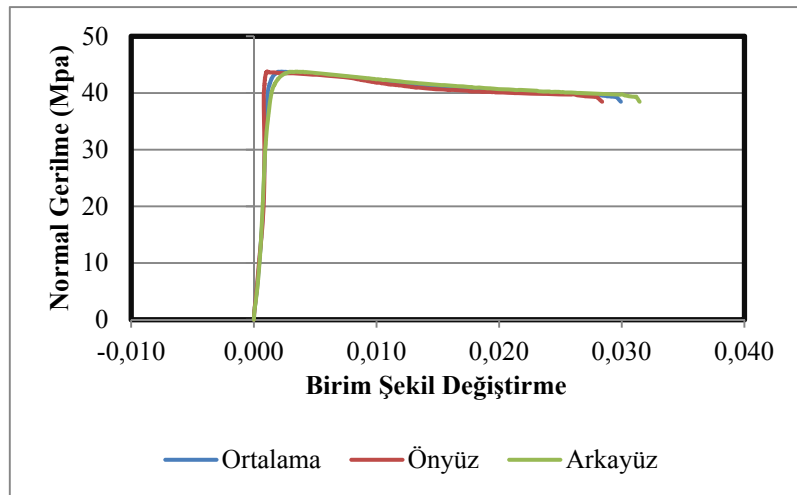
Şekil 4.76. HS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.77. HS3030 numunesi deney öncesi ve sonrası



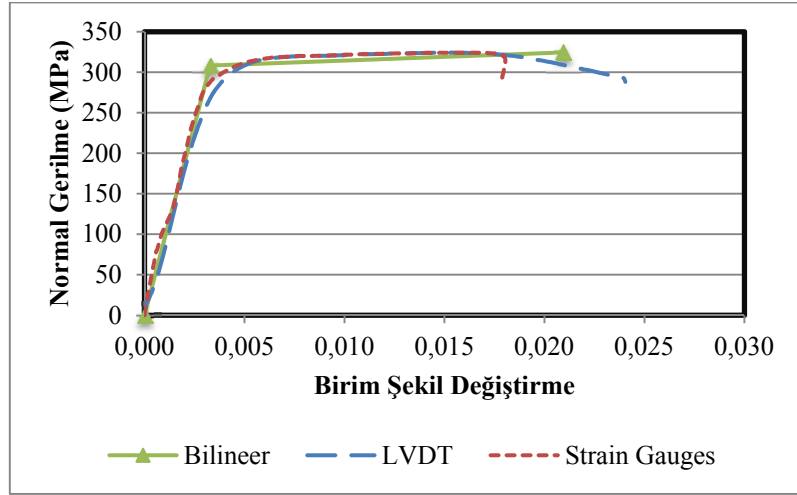
Şekil 4.78. HS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



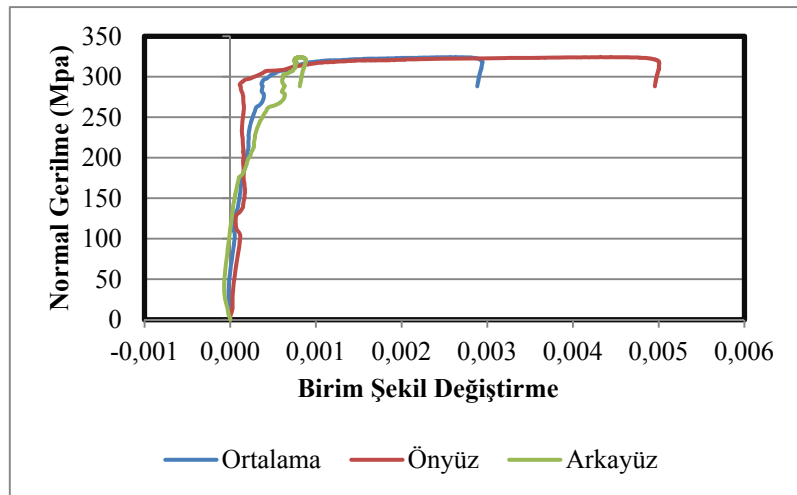
Şekil 4.79. HS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.80. HS5000 numunesi deney öncesi ve sonrası



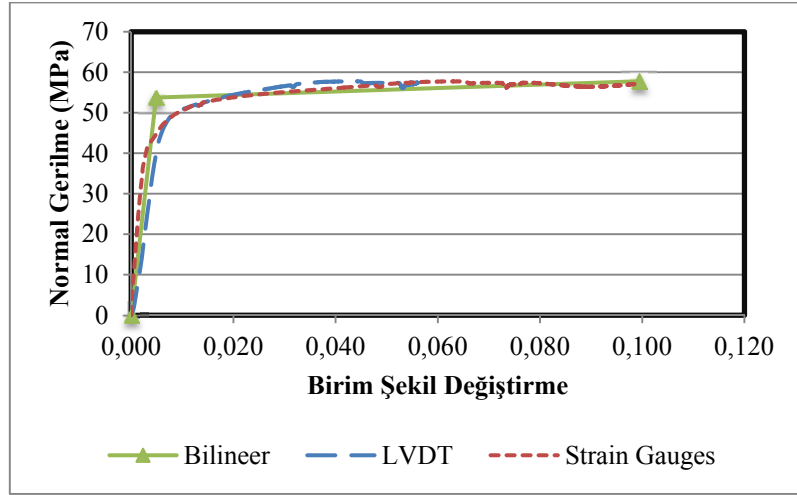
Şekil 4.81. HS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



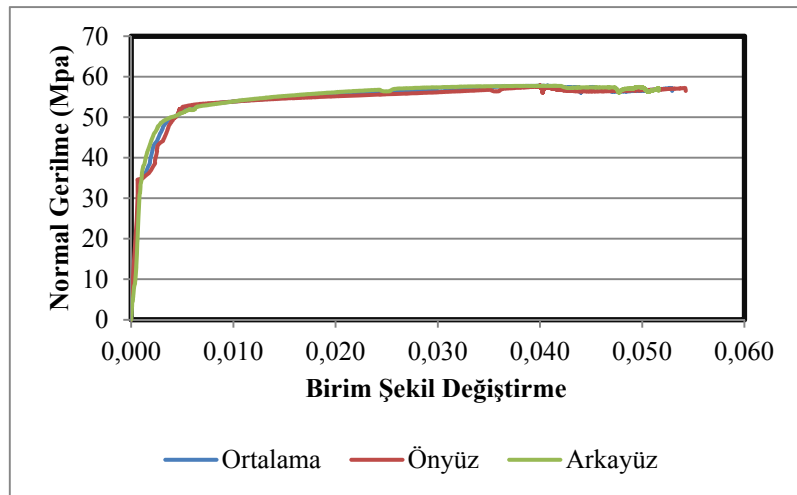
Şekil 4.82. HS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.83. HS5010 numunesi deney öncesi ve sonrası



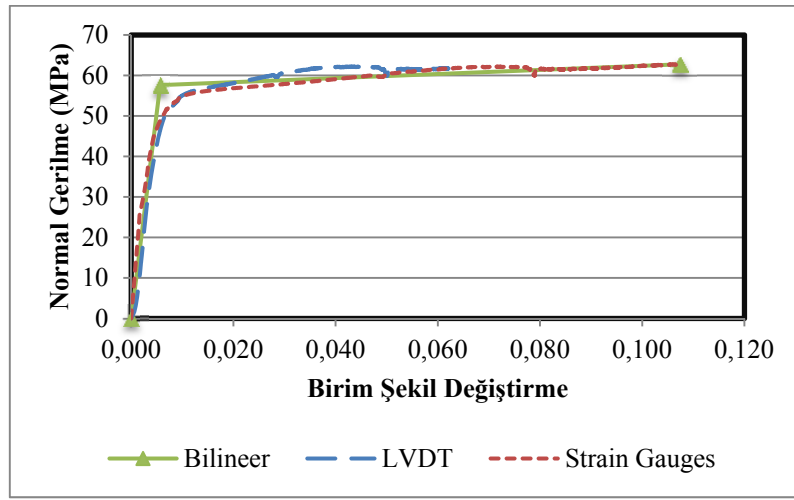
Şekil 4.84. HS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



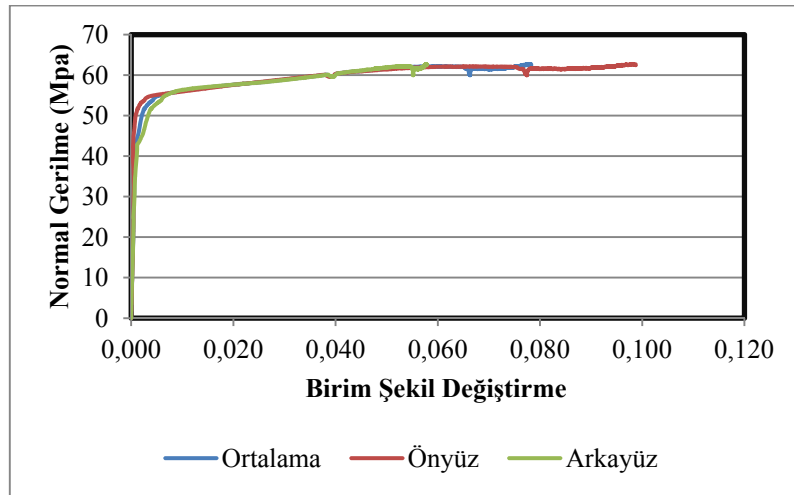
Şekil 4.85. HS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.86. HS5020 numunesi deney öncesi ve sonrası



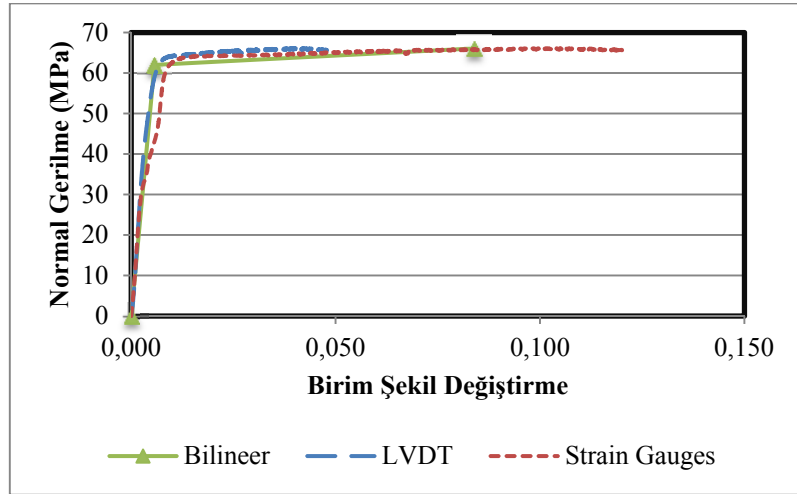
Şekil 4.87. HS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



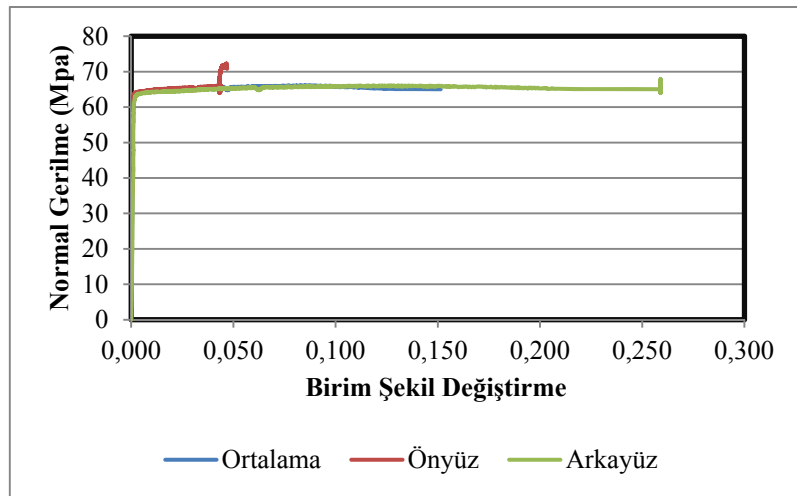
Şekil 4.88. HS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.89. HS5030 numunesi deney öncesi ve sonrası



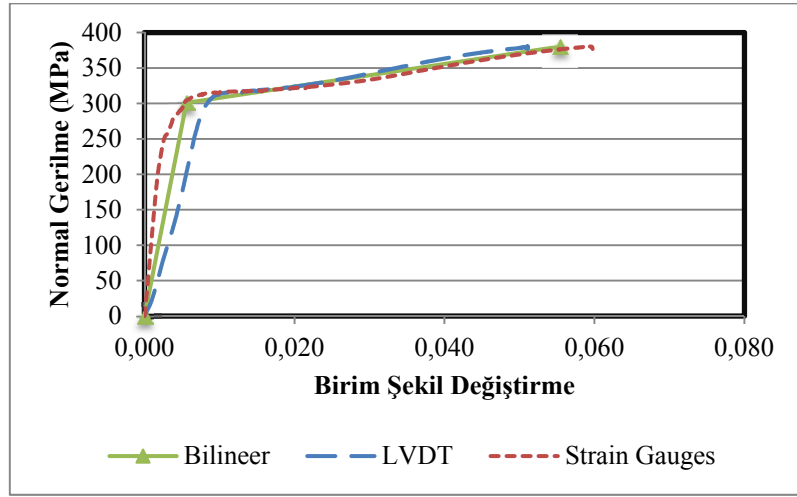
Şekil 4.90. HS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



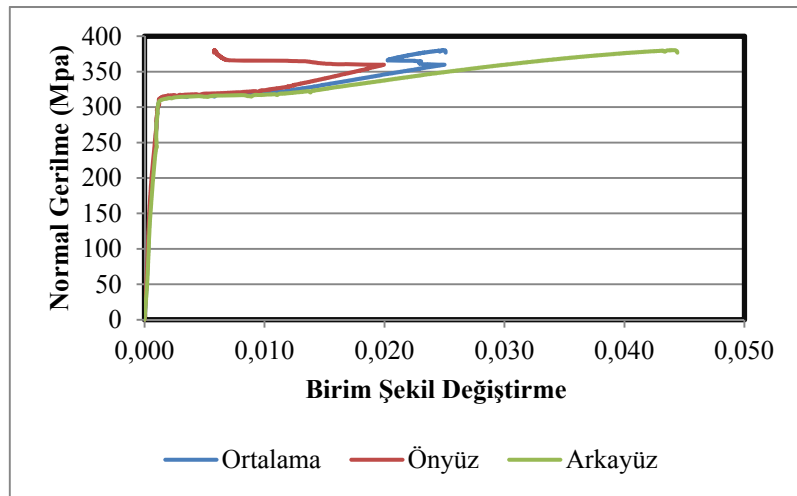
Şekil 4.91. HS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



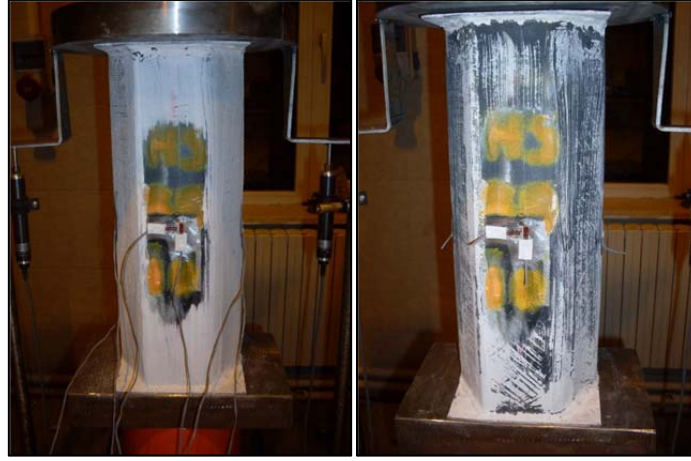
Şekil 4.92. HS8000 numunesi deney öncesi ve sonrası



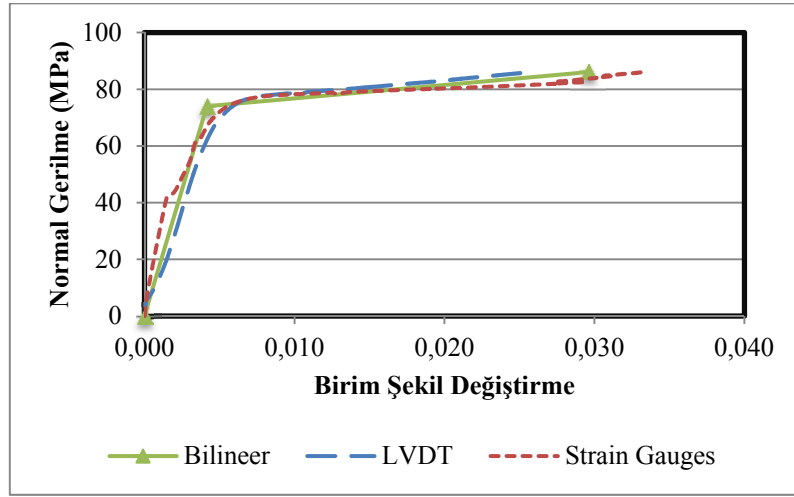
Şekil 4.93. HS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



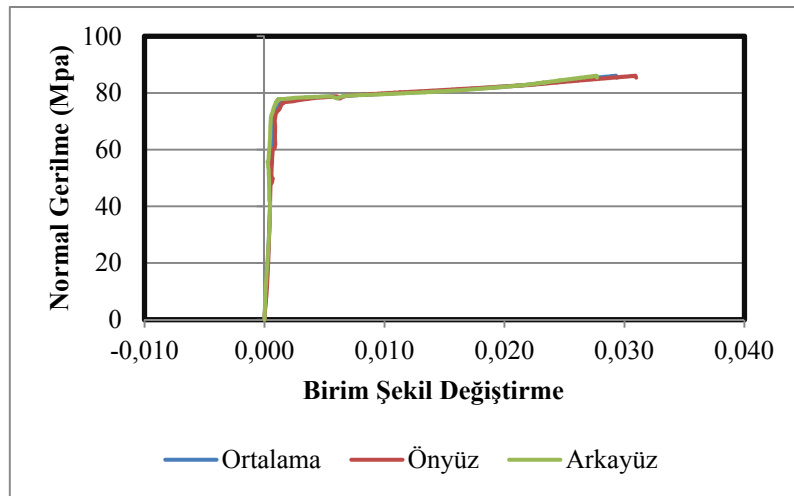
Şekil 4.94. HS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.95. HS8010 numunesi deney öncesi ve sonrası



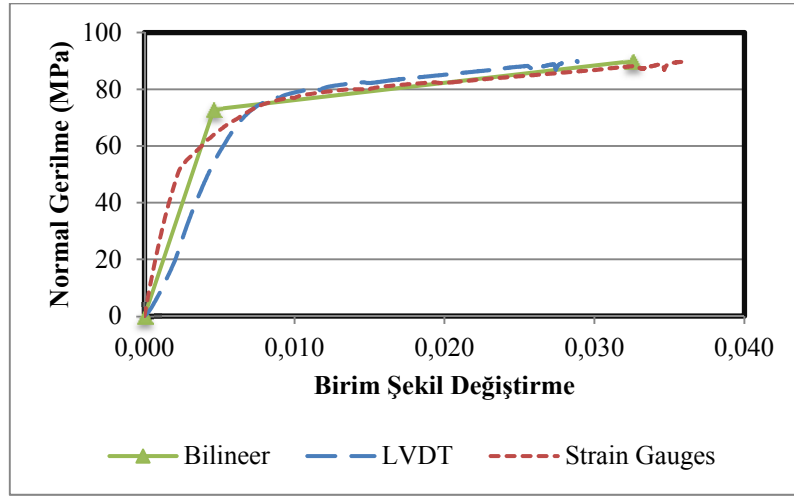
Şekil 4.96. HS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



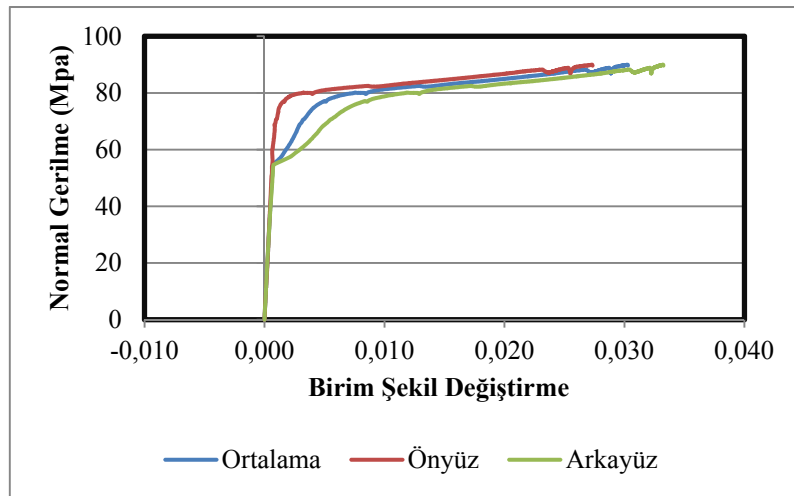
Şekil 4.97. HS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



Şekil 4.98. HS8020 numunesi deney öncesi ve sonrası



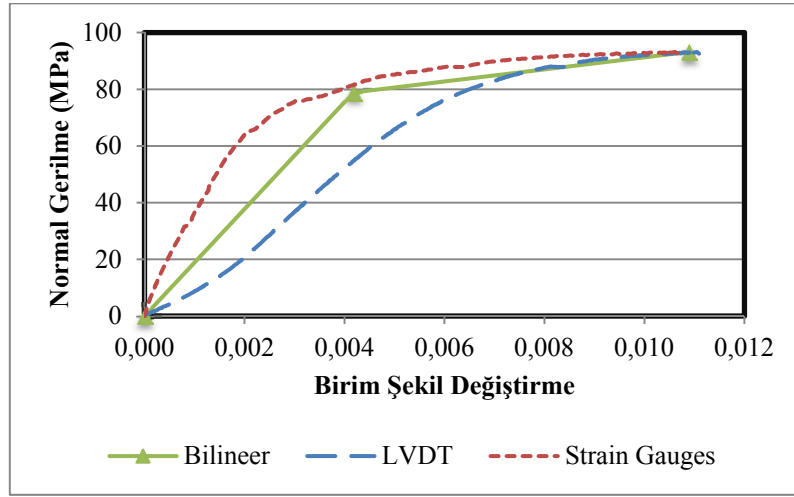
Şekil 4.99. HS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



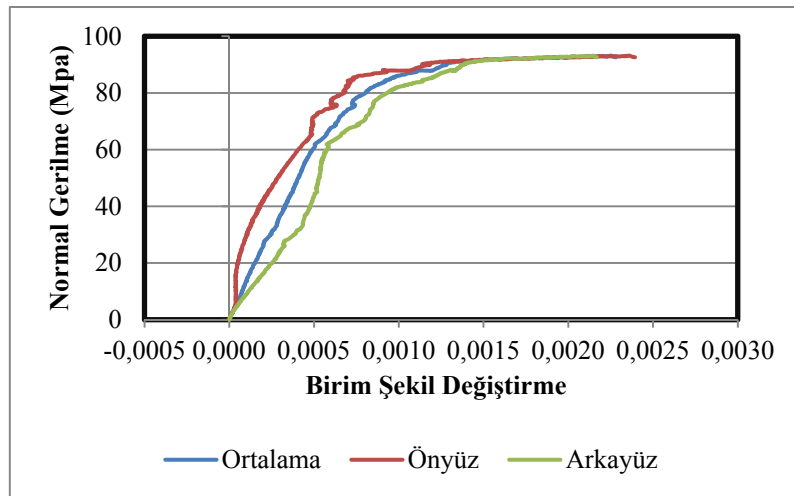
Şekil 4.100. HS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.101. HS8030 numunesi deney öncesi ve sonrası



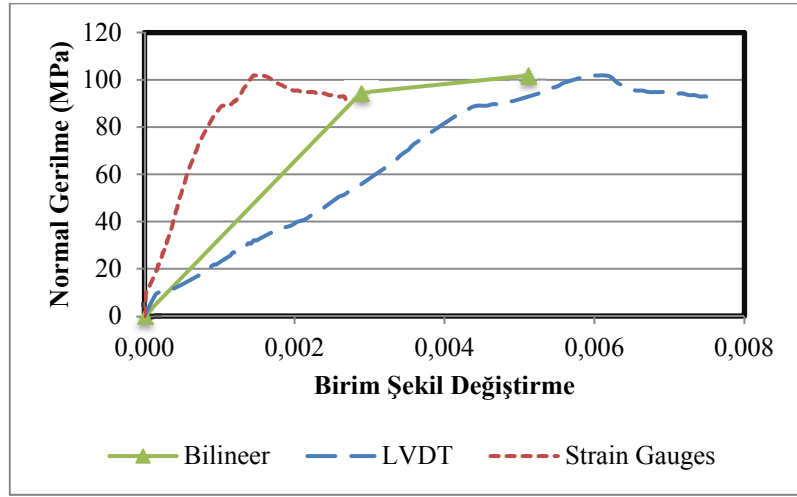
Şekil 4.102. HS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



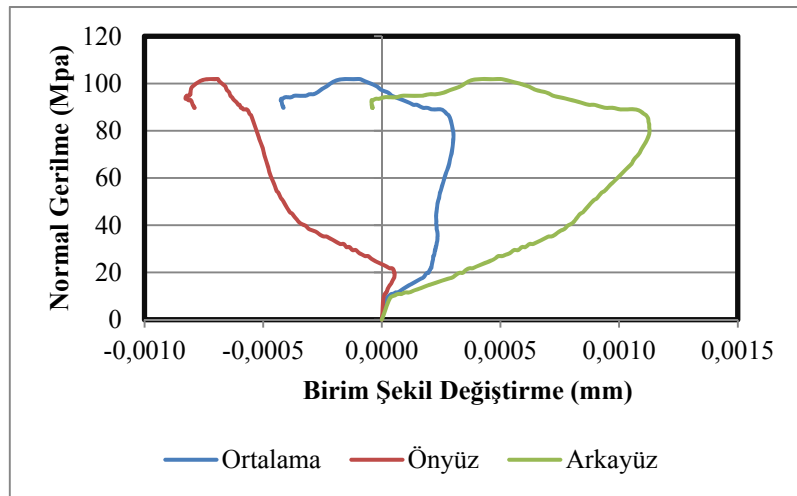
Şekil 4.103. HS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.104. RS1500 numunesi deney öncesi ve sonrası



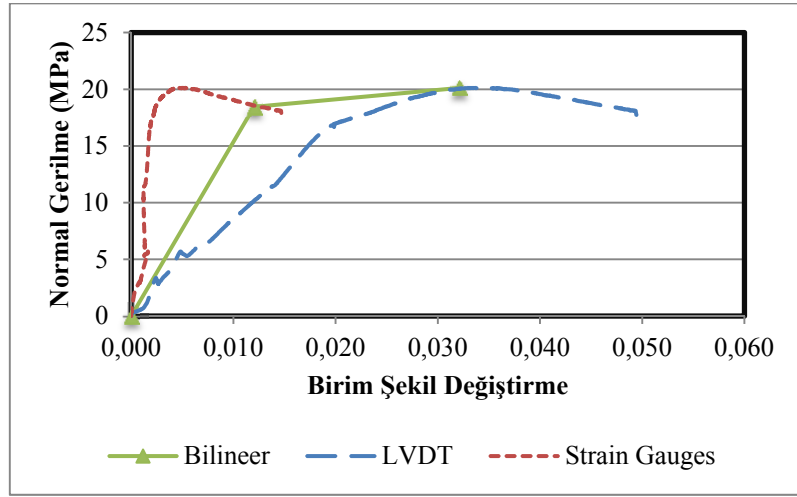
Şekil 4.105. RS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



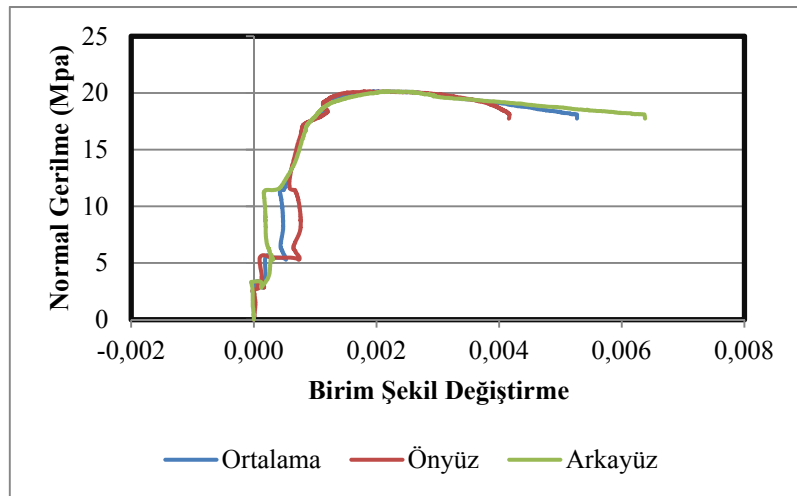
Şekil 4.106. RS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.107. RS1510 numunesi deney öncesi ve sonrası



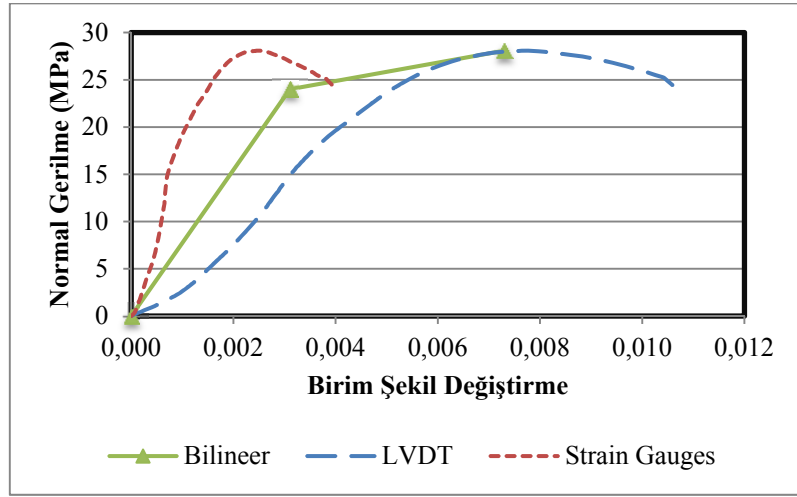
Şekil 4.108. RS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



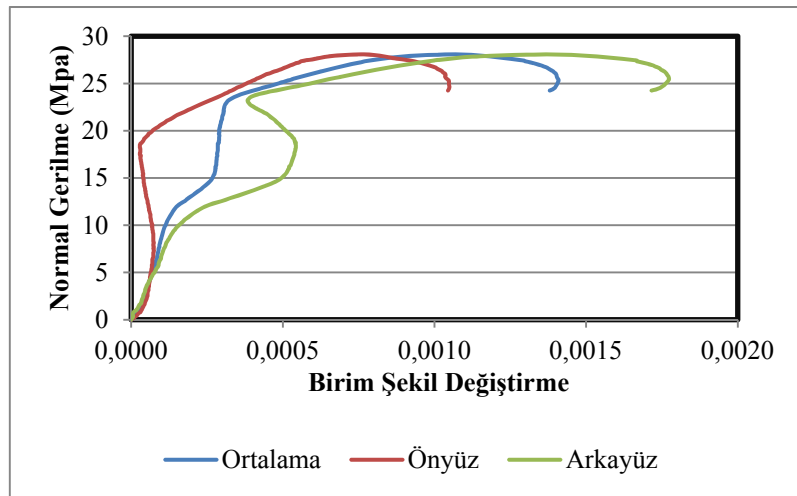
Şekil 4.109. RS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.110. RS1520 numunesi deney öncesi ve sonrası



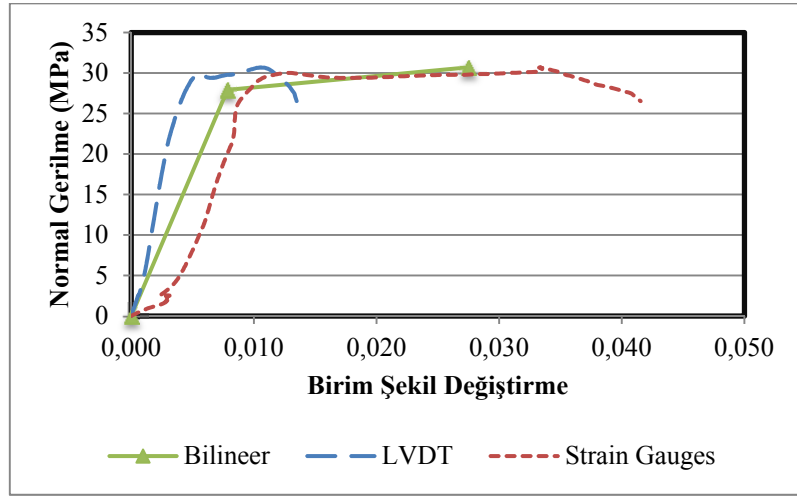
Şekil 4.111. RS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



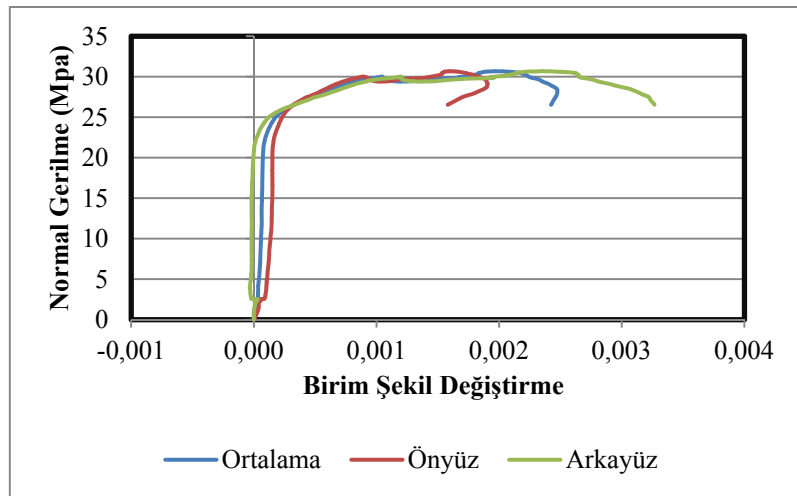
Şekil 4.112. RS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.113. RS1530 numunesi deney öncesi ve sonrası



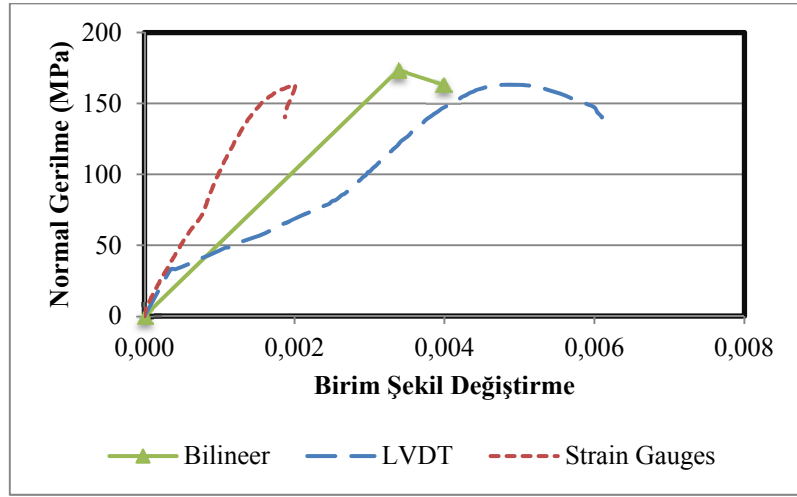
Şekil 4.114. RS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



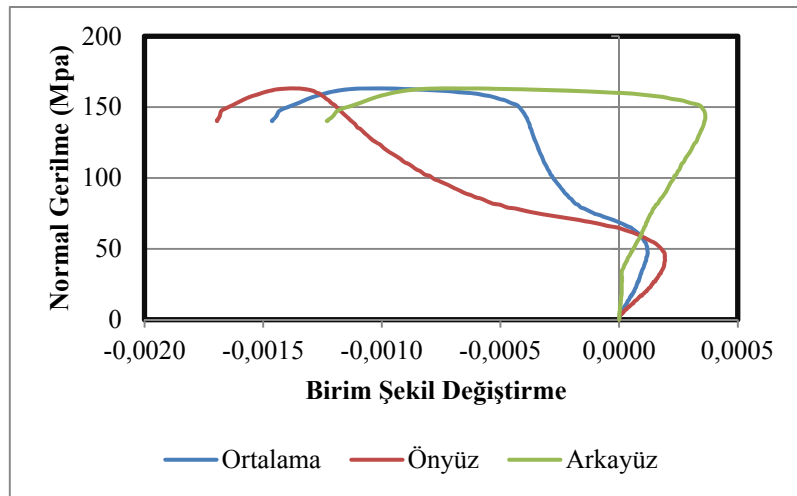
Şekil 4.115. RS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.116. RS3000 numunesi deney öncesi ve sonrası



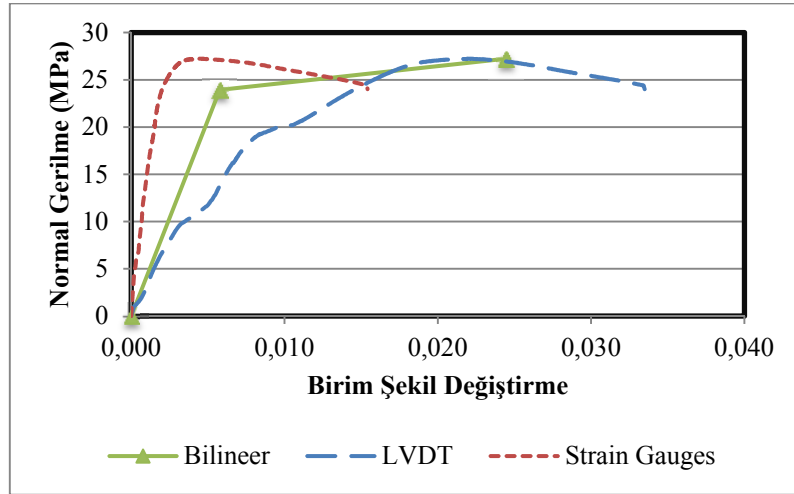
Şekil 4.117. RS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



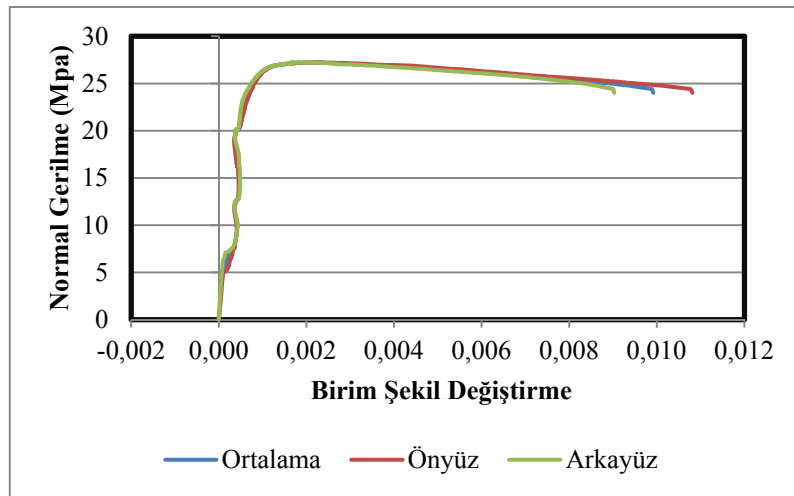
Şekil 4.118. RS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.119. RS3010 numunesi deney öncesi ve sonrası



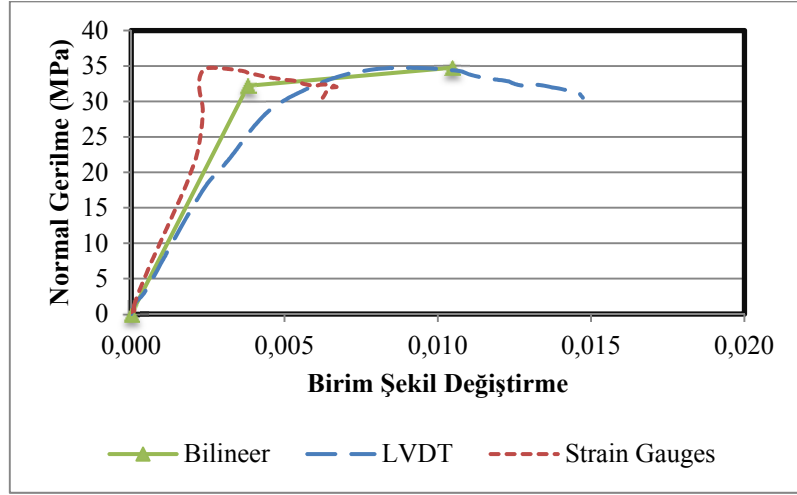
Şekil 4.120. RS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



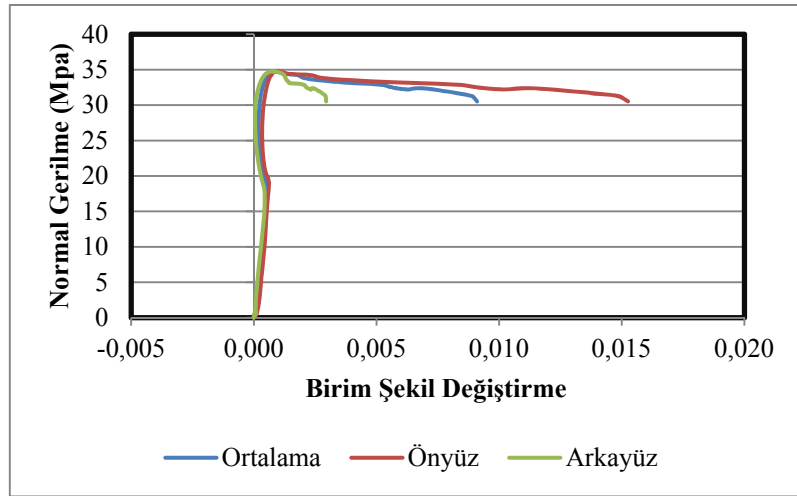
Şekil 4.121. RS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.122. RS3020 numunesi deney öncesi ve sonrası



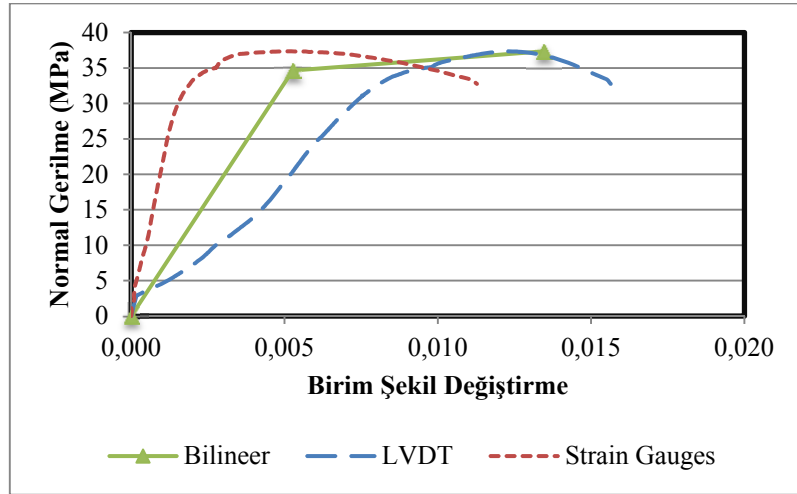
Şekil 4.123. RS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değişirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



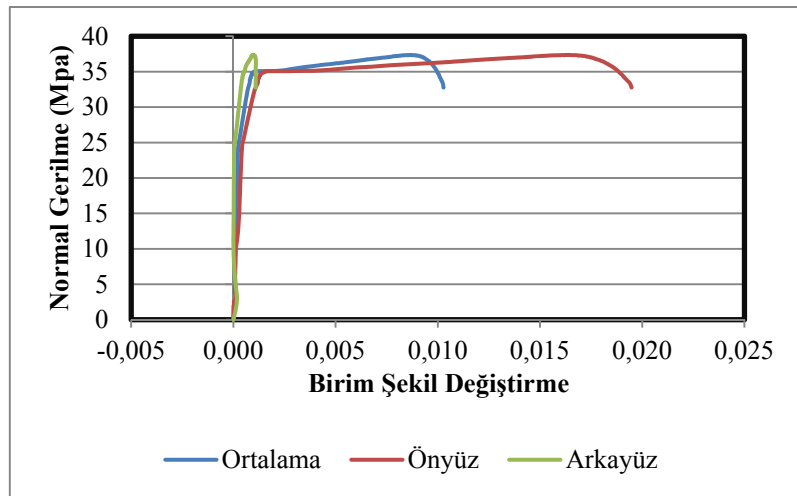
Şekil 4.124. RS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değişirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.125. RS3030 numunesi deney öncesi ve sonrası



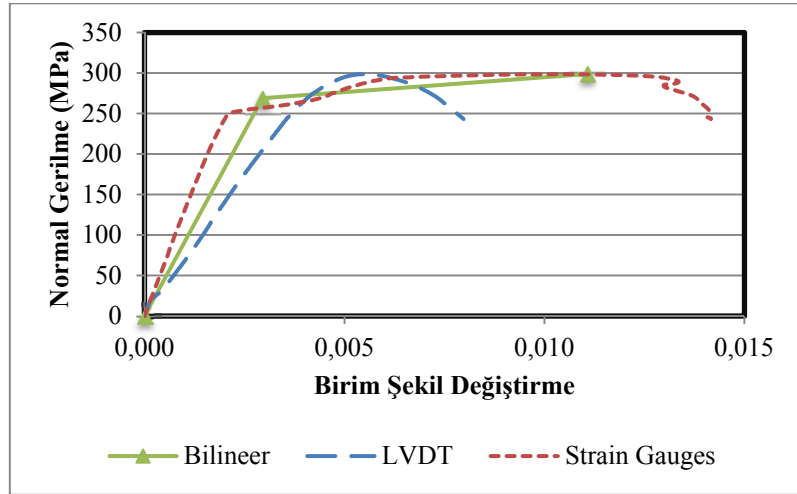
Şekil 4.126. RS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



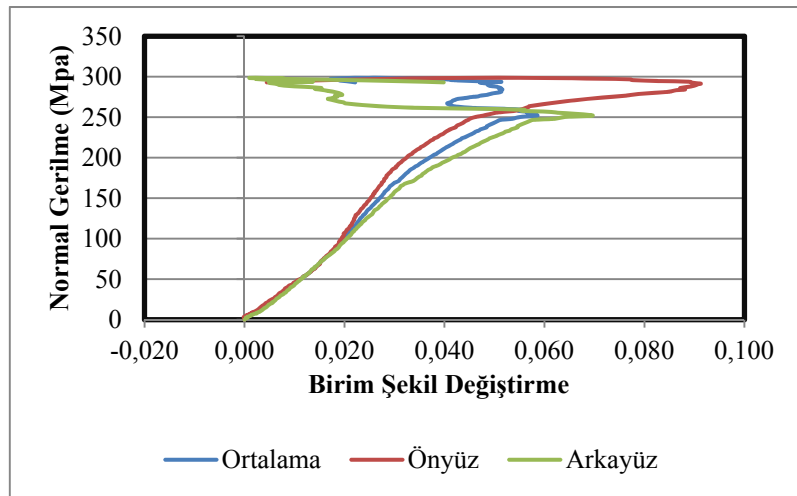
Şekil 4.127. RS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.128. RS5000 numunesi deney öncesi ve sonrası



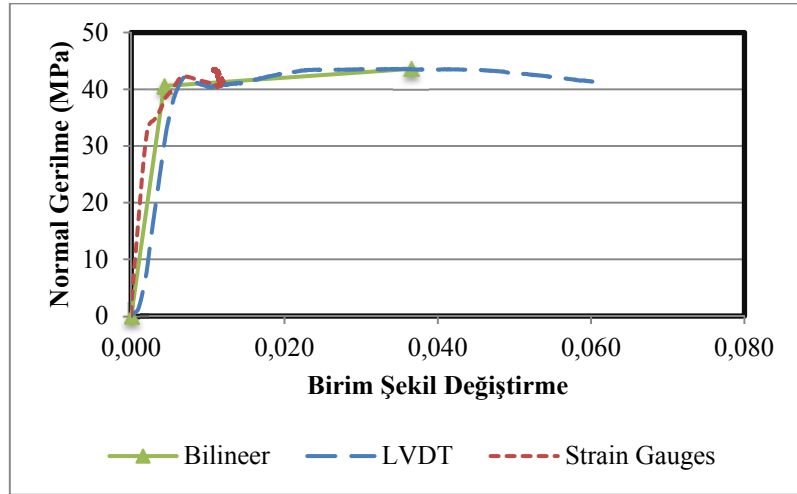
Şekil 4.129. RS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



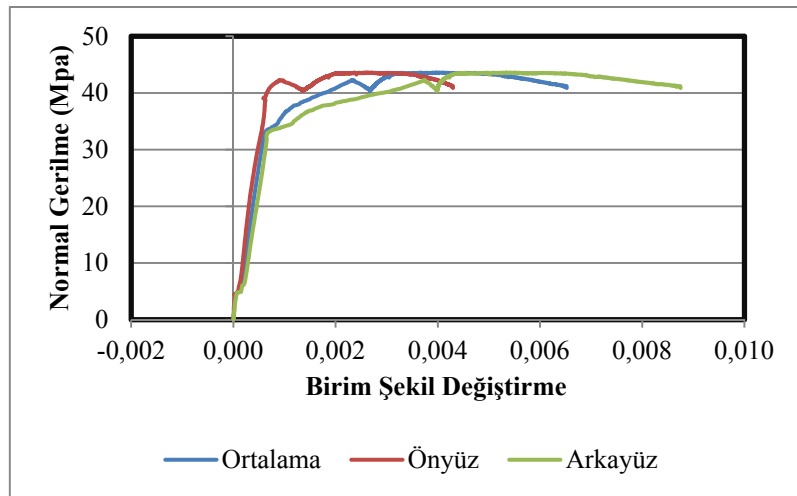
Şekil 4.130. RS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.131. RS5010 numunesi deney öncesi ve sonrası



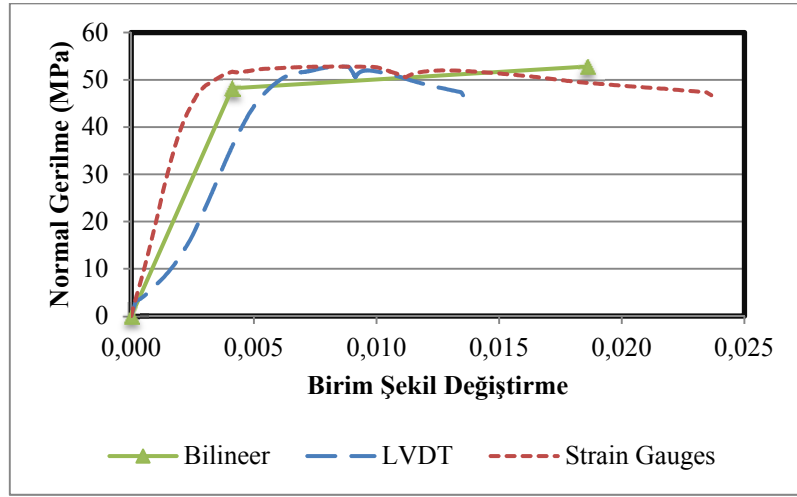
Şekil 4.132. RS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



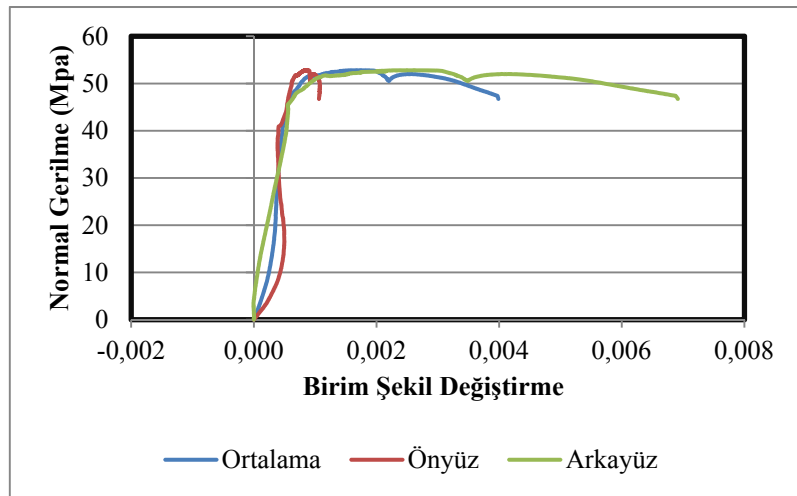
Şekil 4.133. RS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.134. RS5020 numunesi deney öncesi ve sonrası



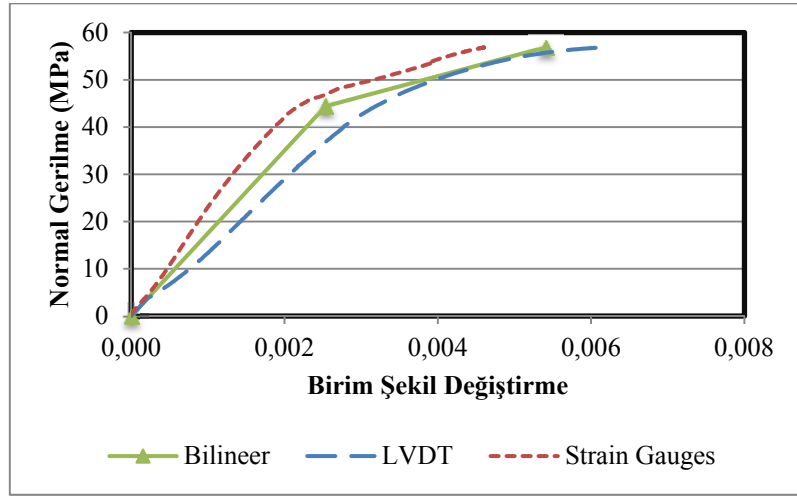
Şekil 4.135. RS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



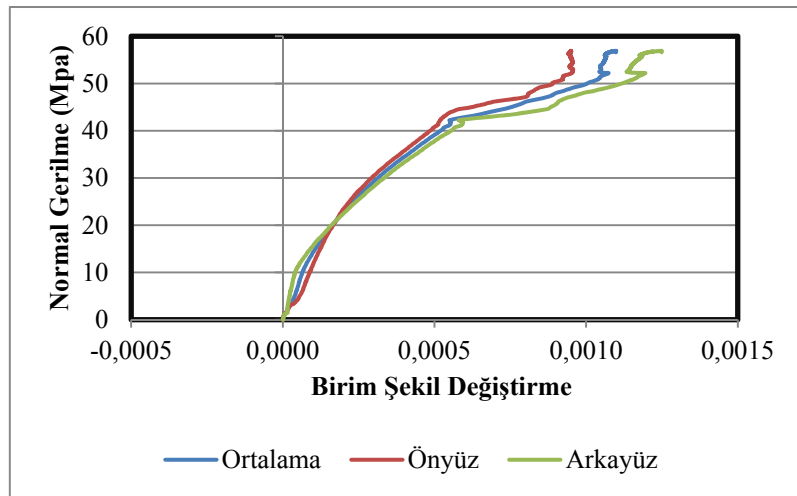
Şekil 4.136. RS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.137. RS5030 numunesi deney öncesi ve sonrası



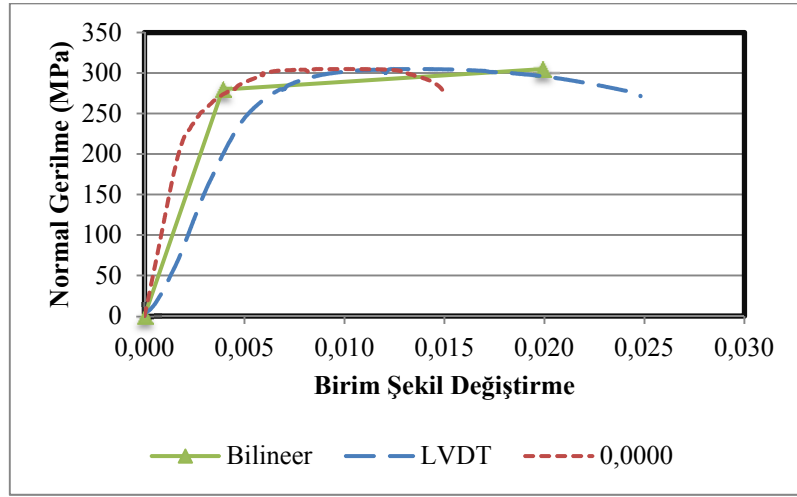
Şekil 4.138. RS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kılma)



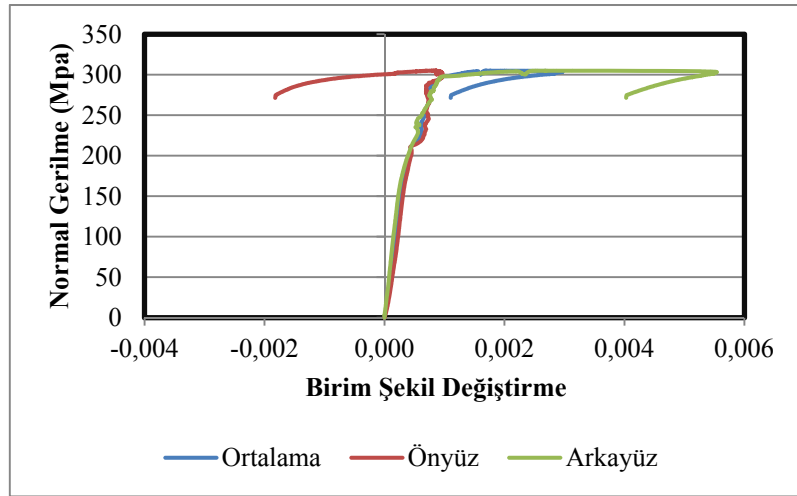
Şekil 4.139. RS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kılma)



Şekil 4.140. RS8000 numunesi deney öncesi ve sonrası



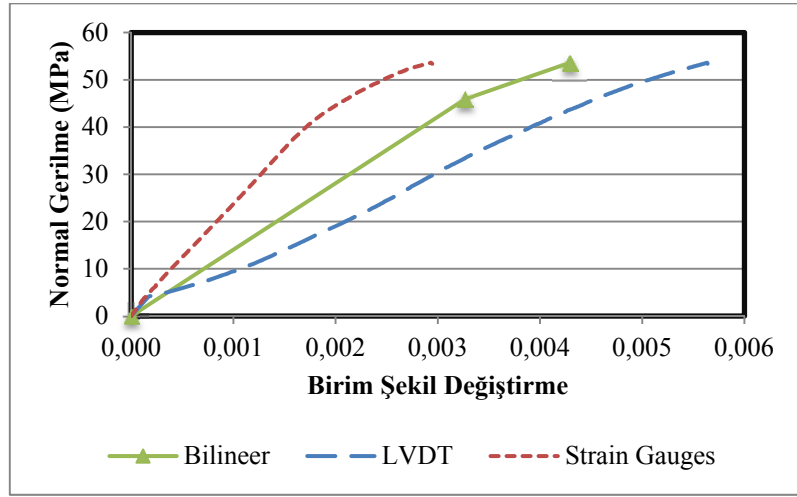
Şekil 4.141. RS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



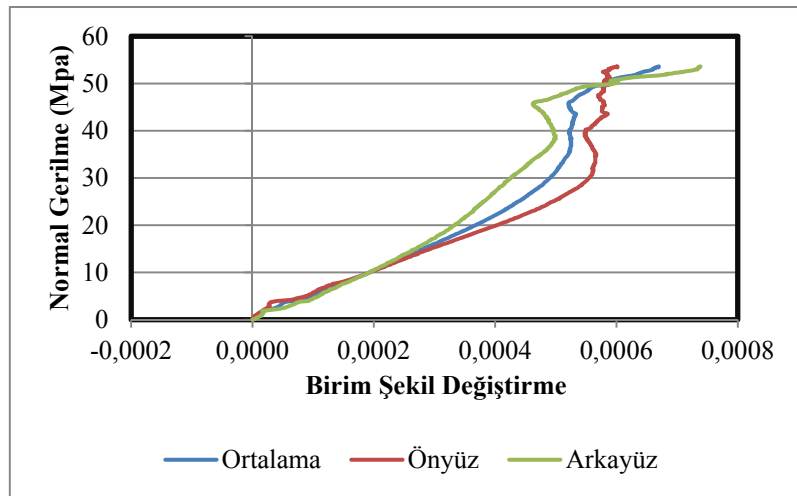
Şekil 4.142. RS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.143. RS8010 numunesi deney öncesi ve sonrası



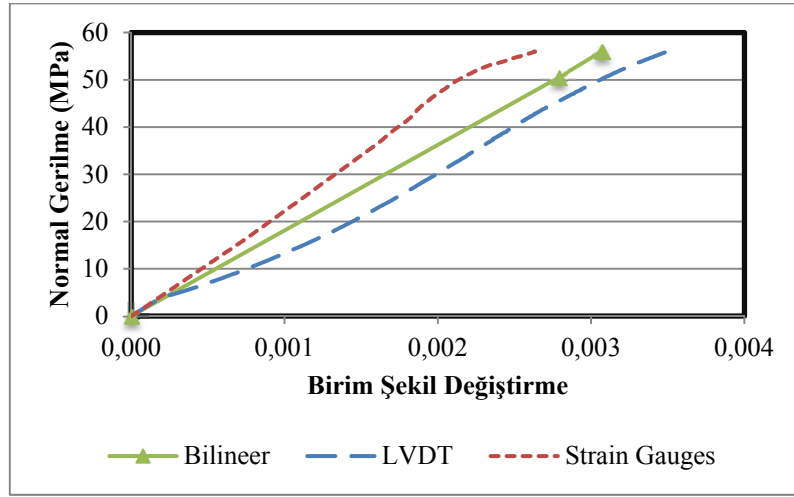
Şekil 4.144. RS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



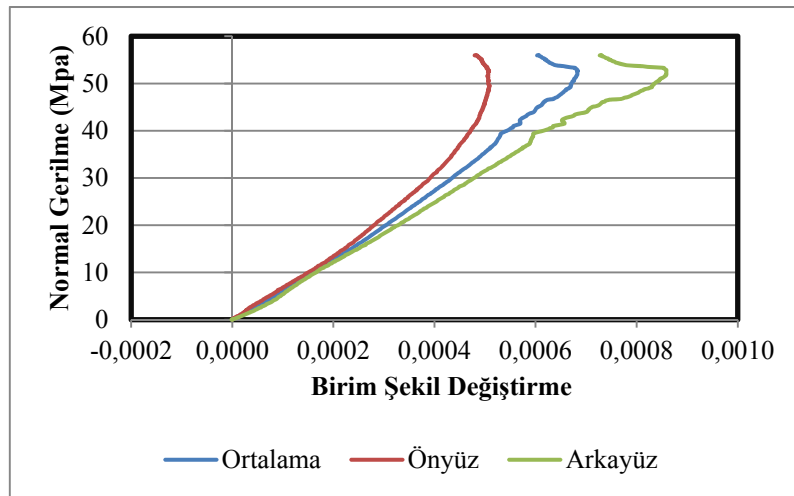
Şekil 4.145. RS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.146. RS8020 numunesi deney öncesi ve sonrası



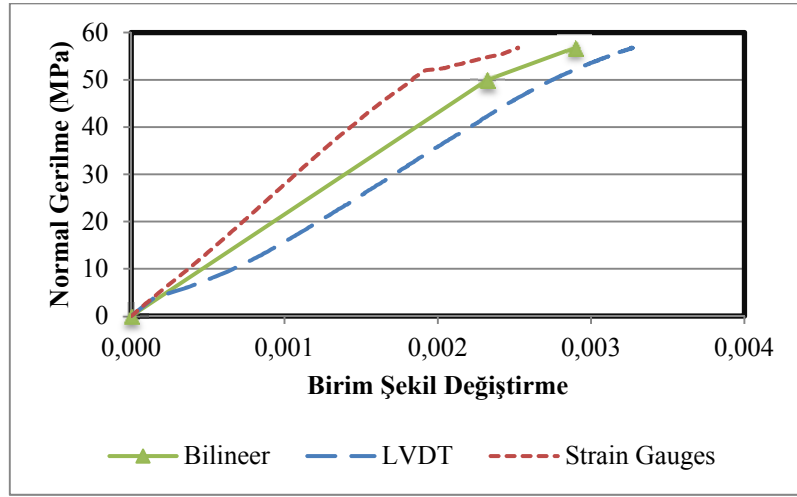
Şekil 4.147. RS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



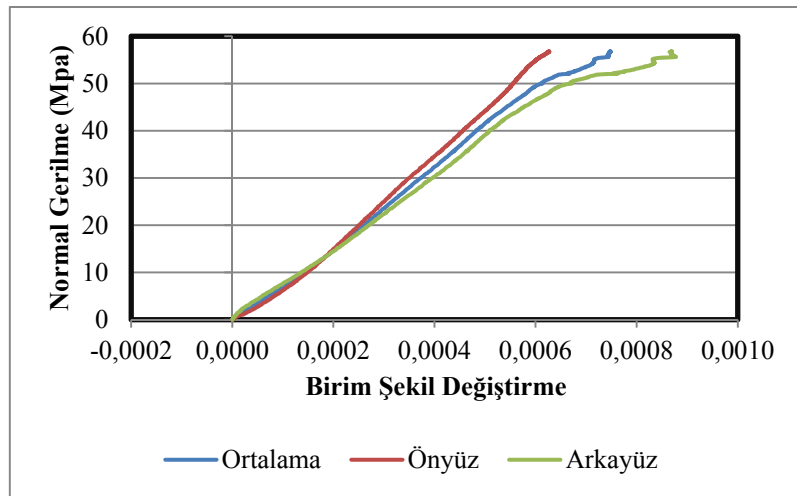
Şekil 4.148. RS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.149. RS8030 numunesi deney öncesi ve sonrası



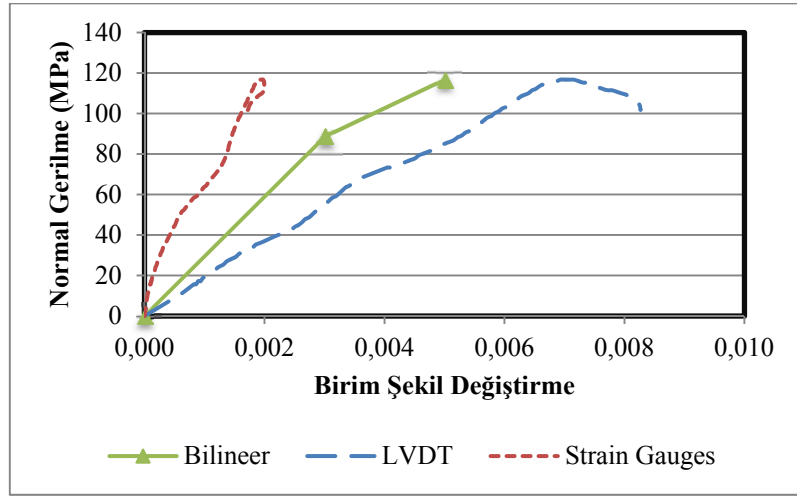
Şekil 4.150. RS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



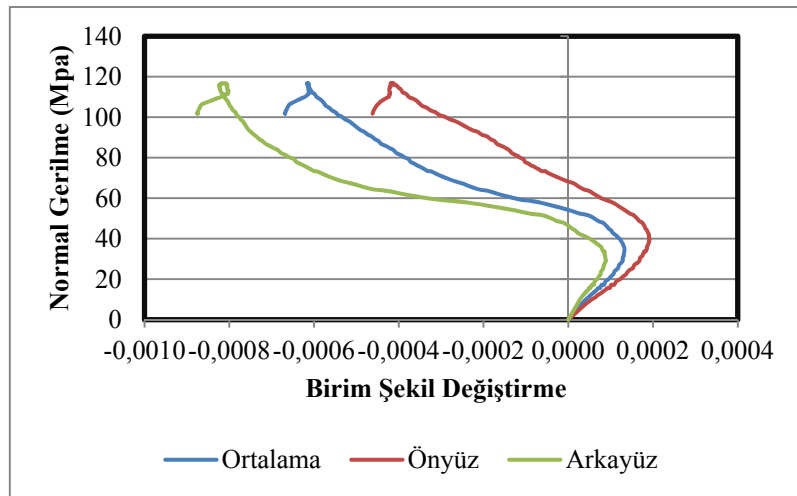
Şekil 4.151. RS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.152. SS1500 numunesi deney öncesi ve sonrası



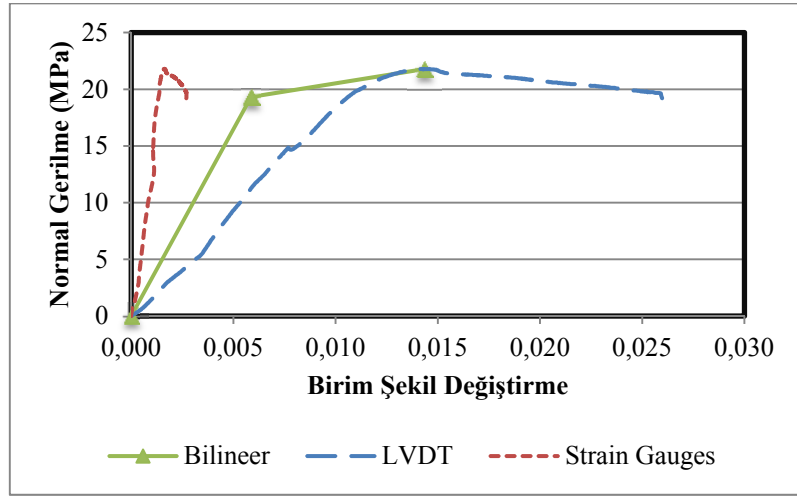
Şekil 4.153. SS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



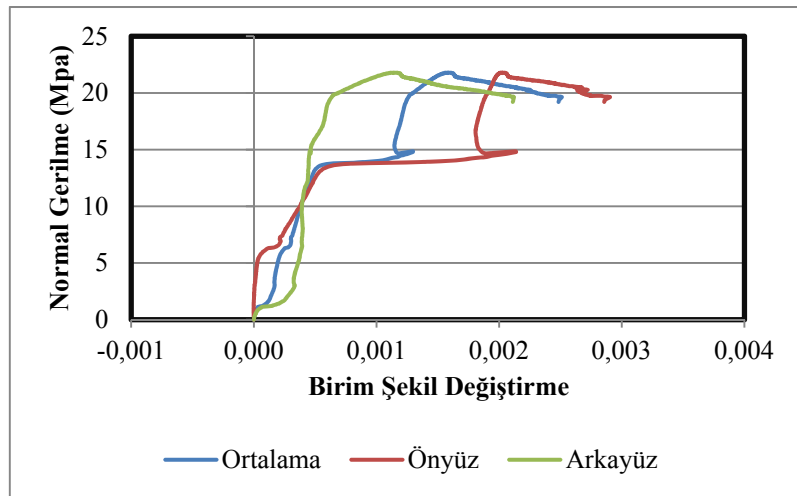
Şekil 4.154. SS1500 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.155. SS1510 numunesi deney öncesi ve sonrası



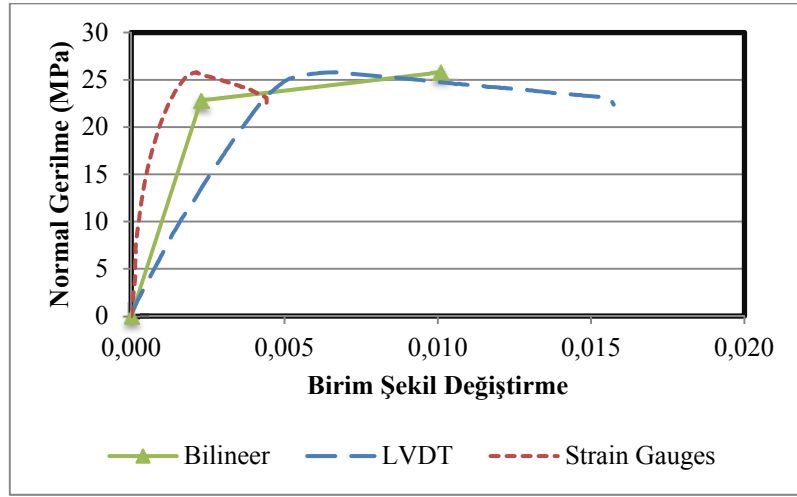
Şekil 4.156. SS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



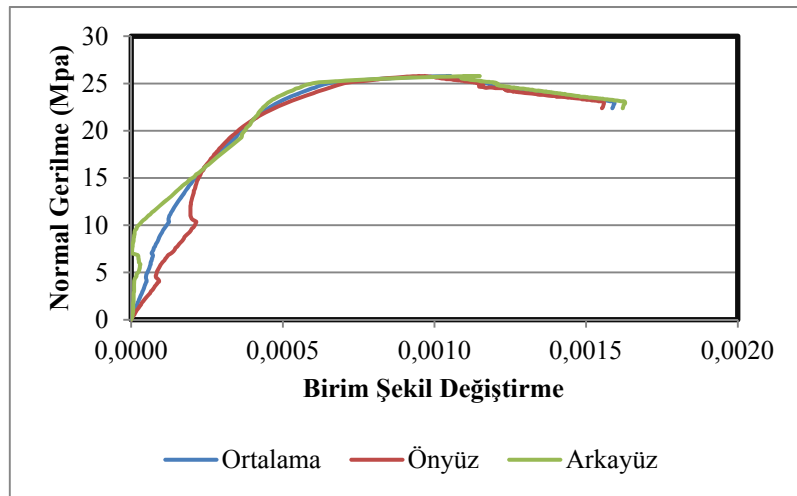
Şekil 4.157. SS1510 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.158. SS1520 numunesi deney öncesi ve sonrası



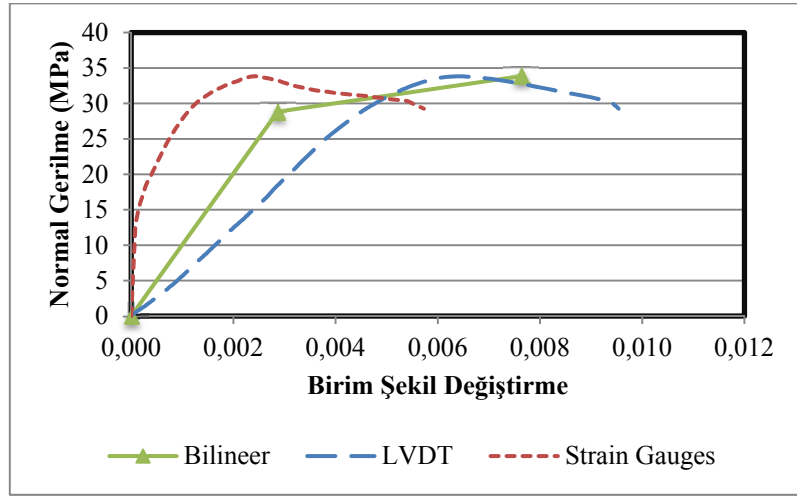
Şekil 4.159. SS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



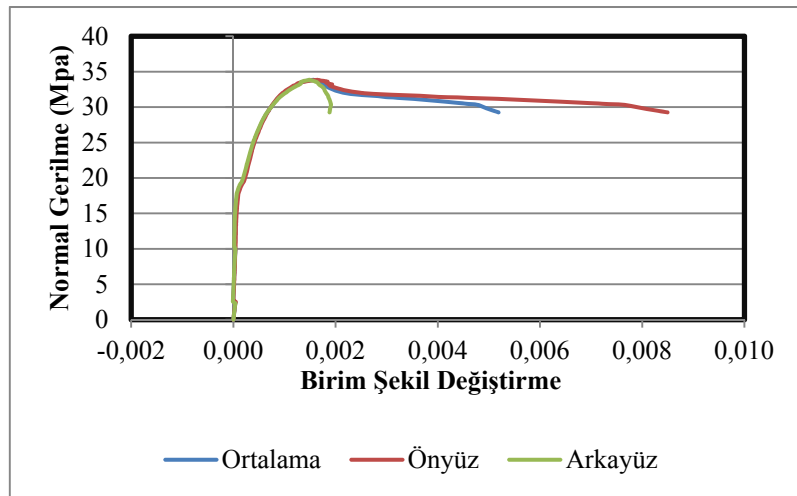
Şekil 4.160. SS1520 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.161. SS1530 numunesi deney öncesi ve sonrası



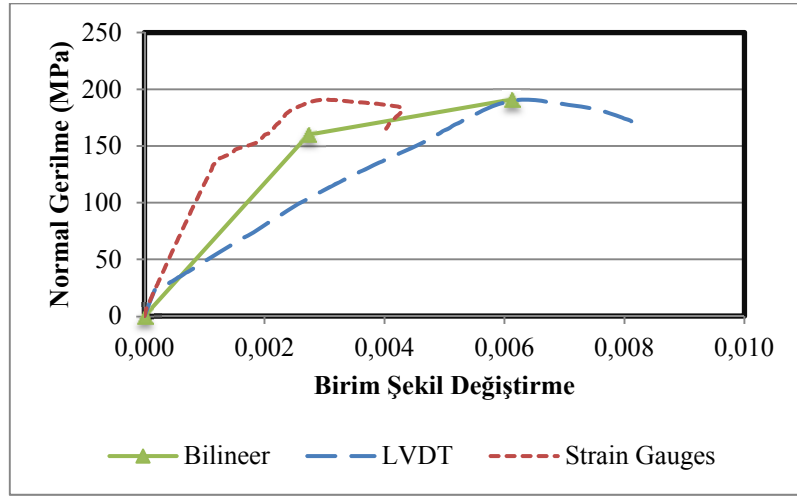
Şekil 4.162. SS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



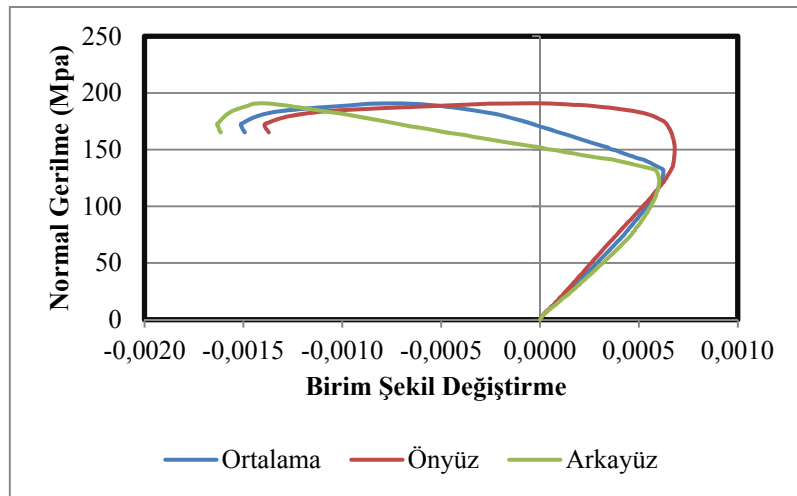
Şekil 4.163. SS1530 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.164. SS3000 numunesi deney öncesi ve sonrası



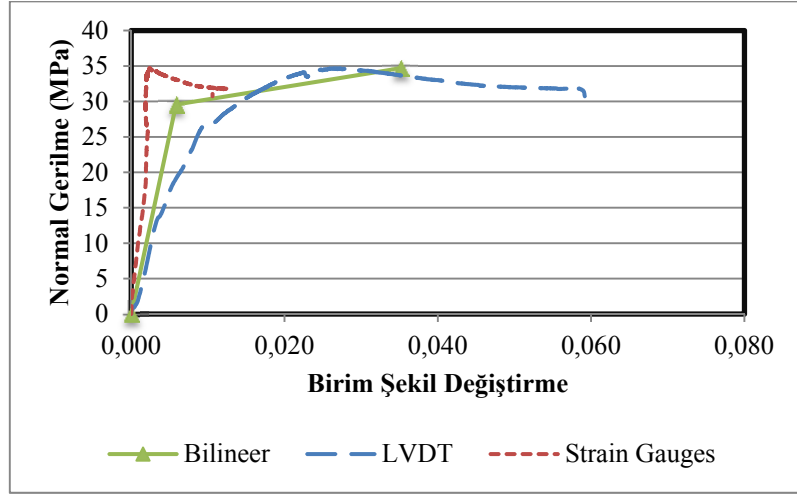
Şekil 4.165. SS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



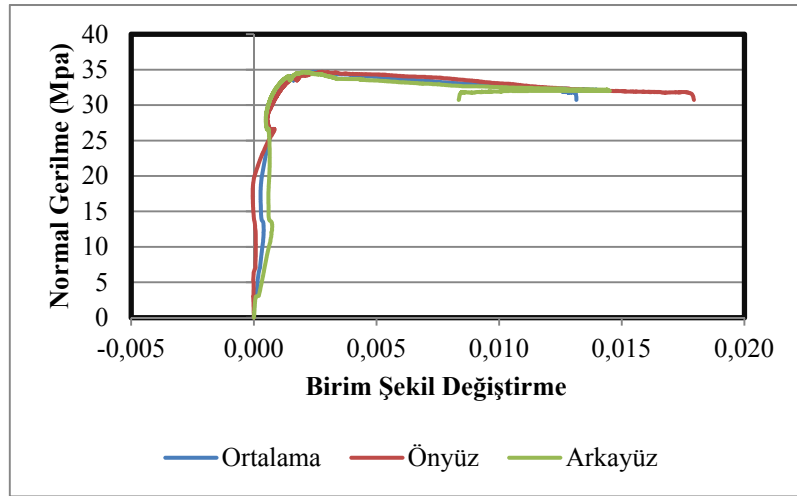
Şekil 4.166. SS3000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.167. SS3010 numunesi deney öncesi ve sonrası



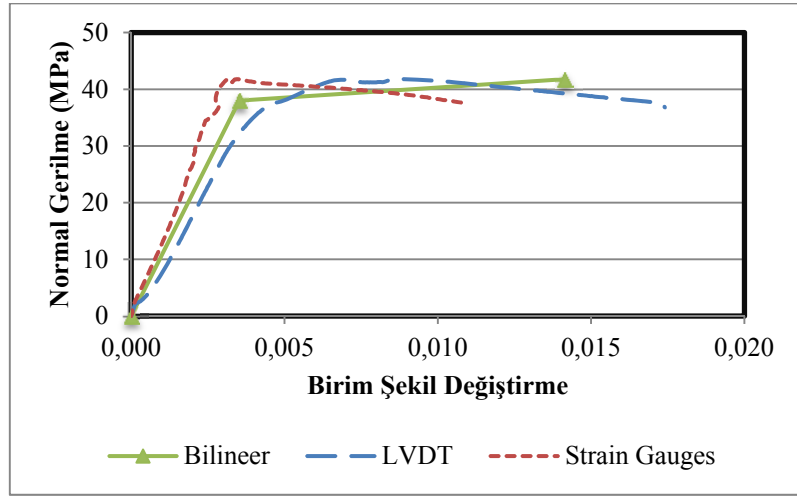
Şekil 4.168. SS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısalma)



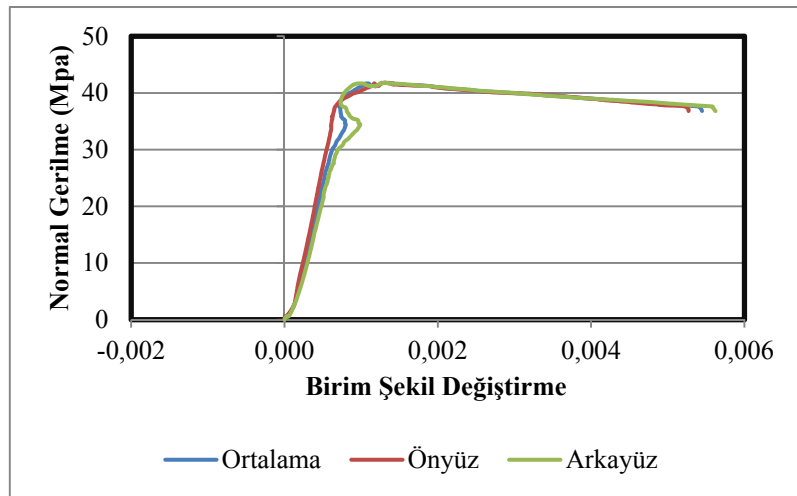
Şekil 4.169. SS3010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısalma)



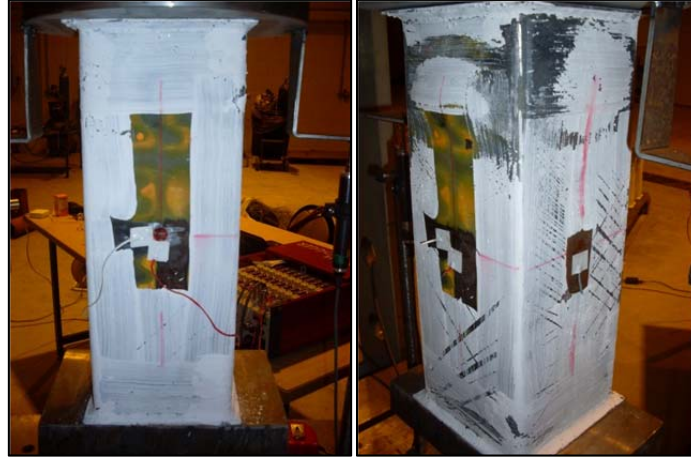
Şekil 4.170. SS3020 numunesi deney öncesi ve sonrası



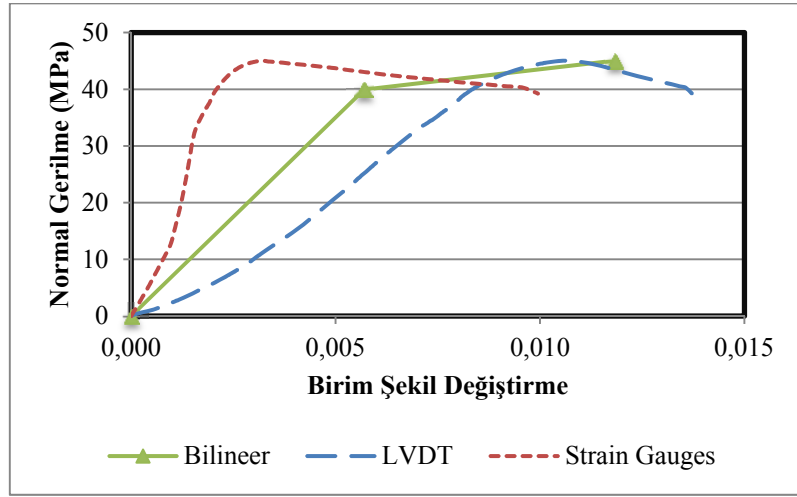
Şekil 4.171. SS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



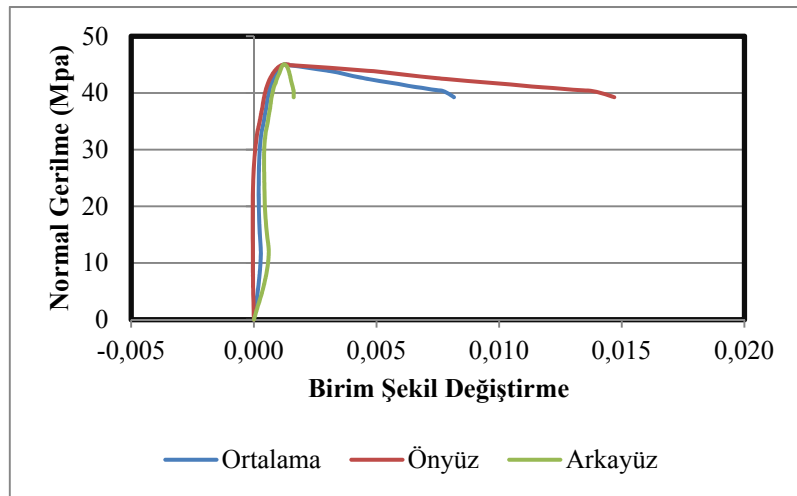
Şekil 4.172. SS3020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.173. SS3030 numunesi deney öncesi ve sonrası



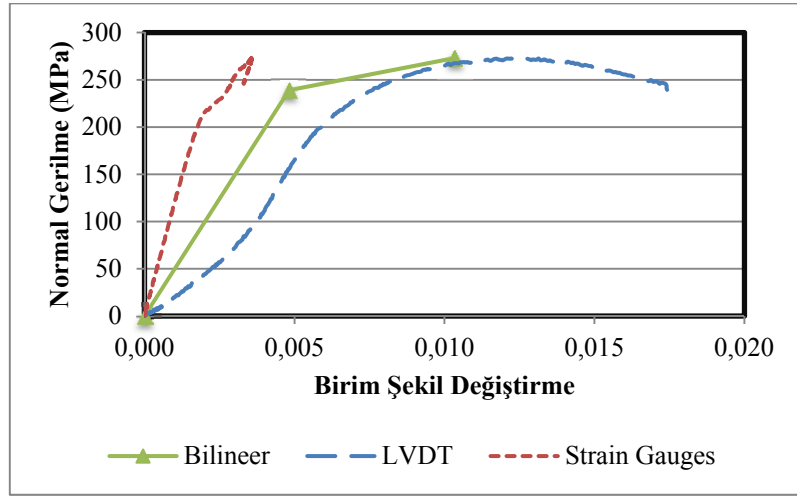
Şekil 4.174. SS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



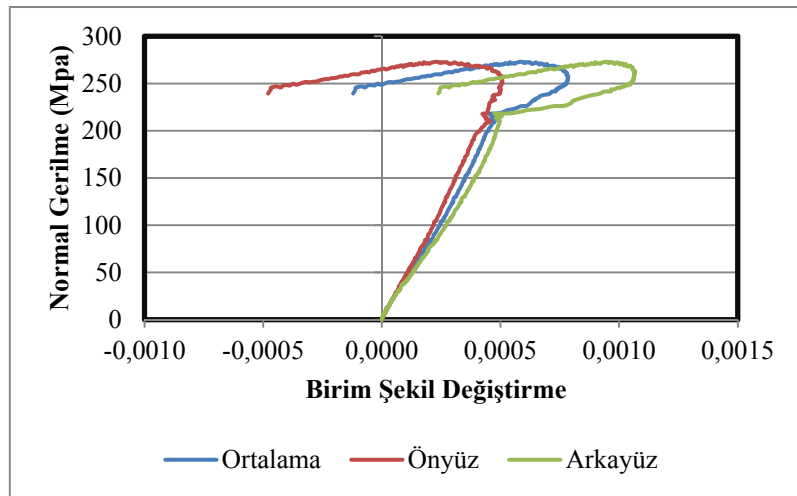
Şekil 4.175. SS3030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.176. SS5000 numunesi deney öncesi ve sonrası



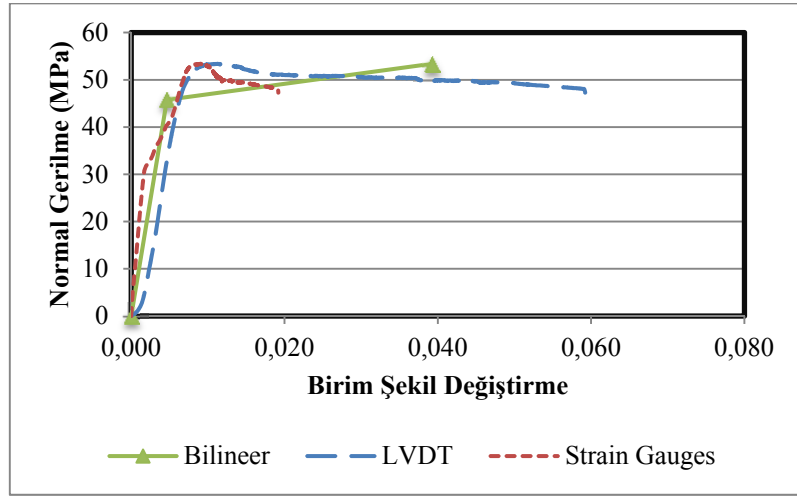
Şekil 4.177. SS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



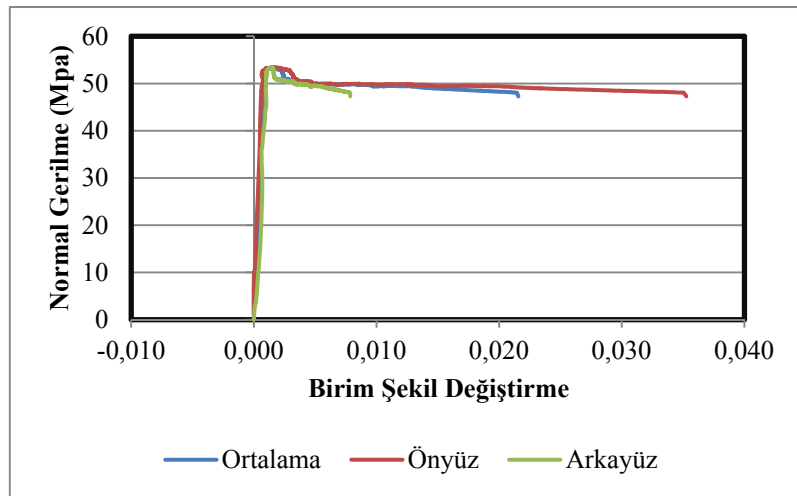
Şekil 4.178. SS5000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.179. SS5010 numunesi deney öncesi ve sonrası



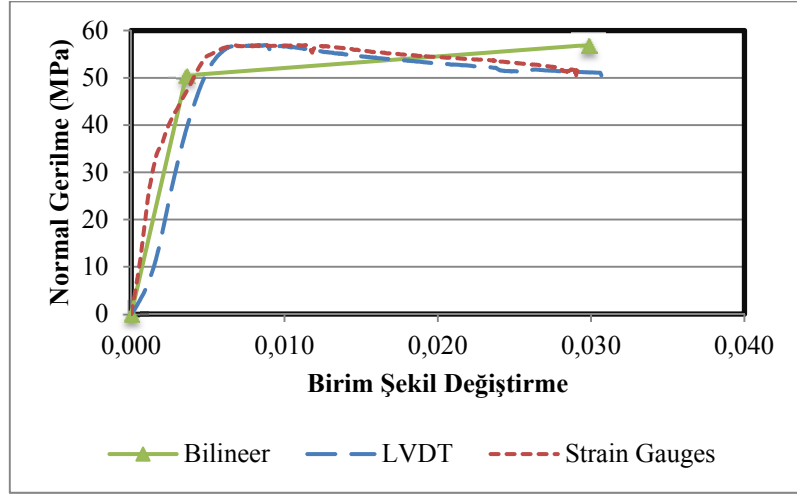
Şekil 4.180. SS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



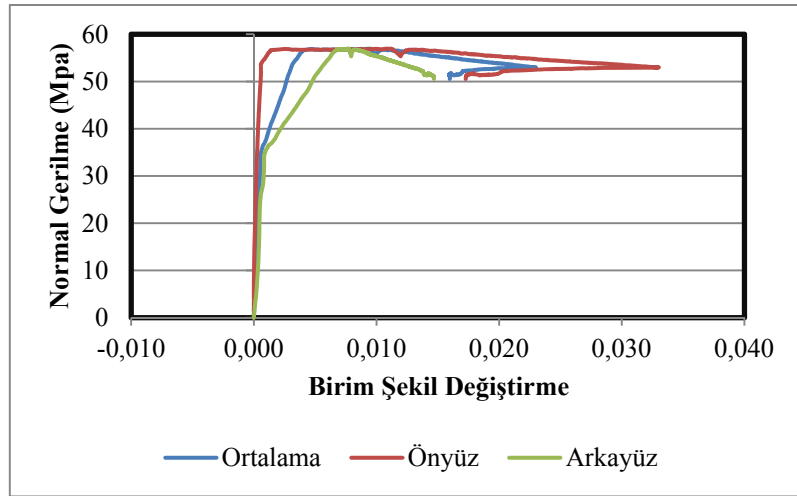
Şekil 4.181. SS5010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.182. SS5020 numunesi deney öncesi ve sonrası



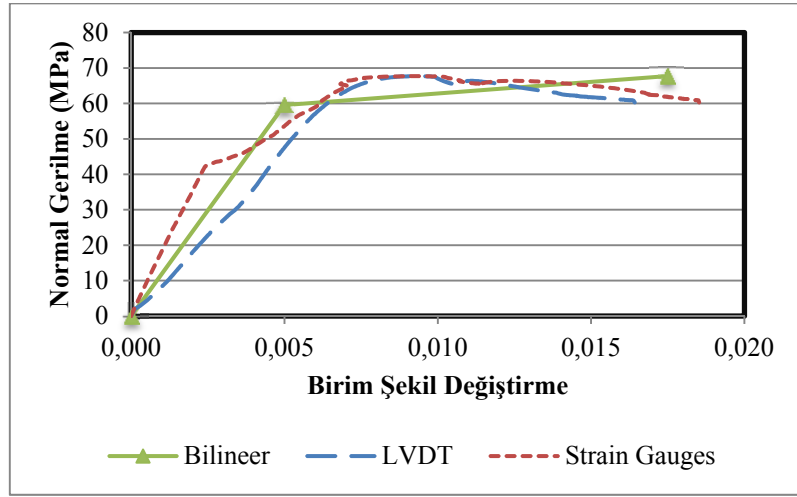
Şekil 4.183. SS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



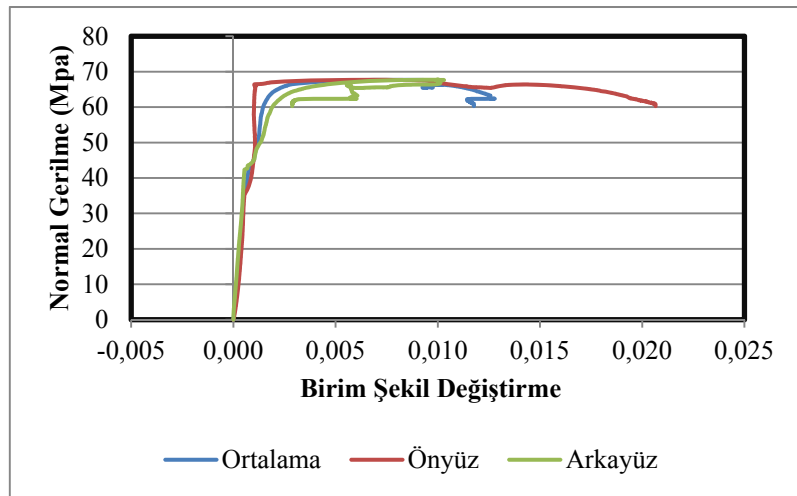
Şekil 4.184. SS5020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.185. SS5030 numunesi deney öncesi ve sonrası



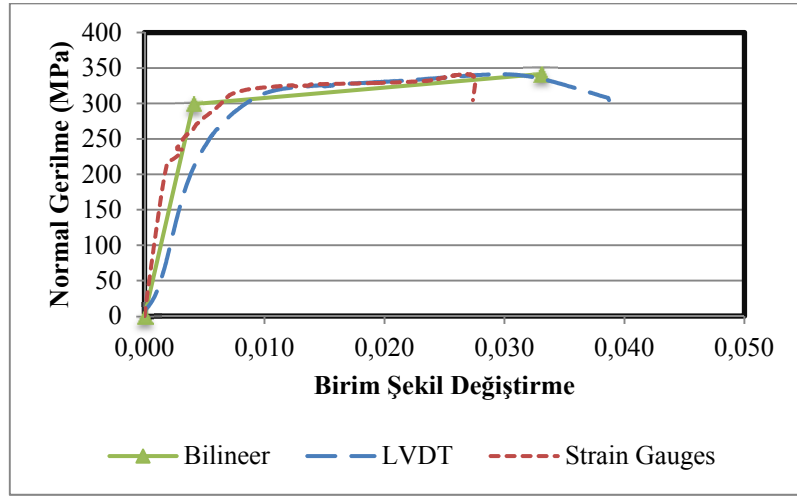
Şekil 4.186. SS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



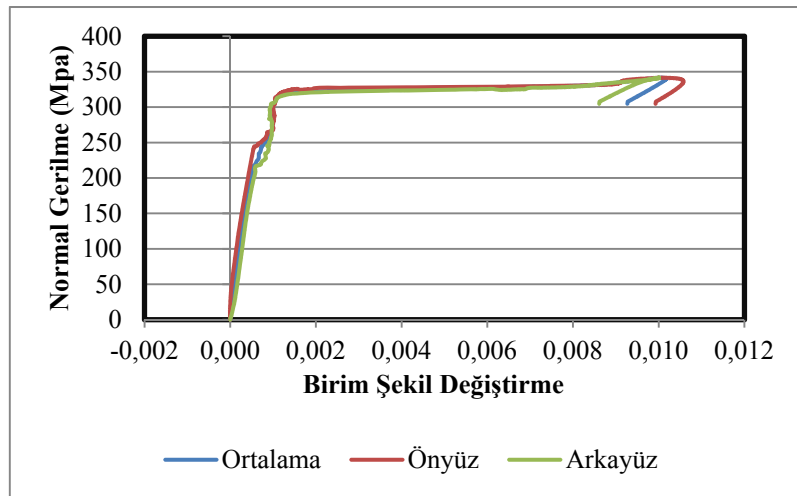
Şekil 4.187. SS5030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.188. SS8000 numunesi deney öncesi ve sonrası



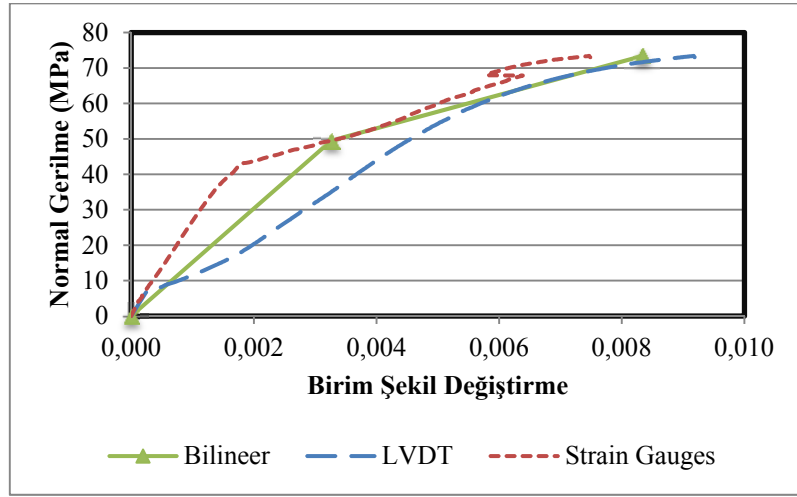
Şekil 4.189. SS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



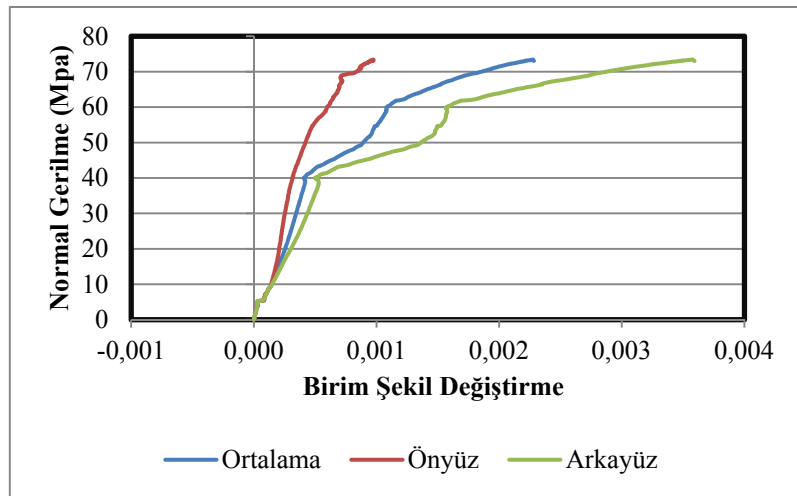
Şekil 4.190. SS8000 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.191. SS8010 numunesi deney öncesi ve sonrası



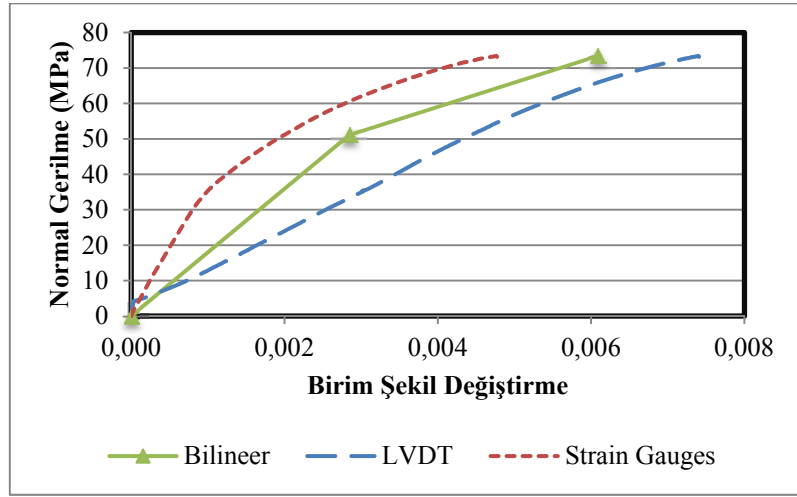
Şekil 4.192. SS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



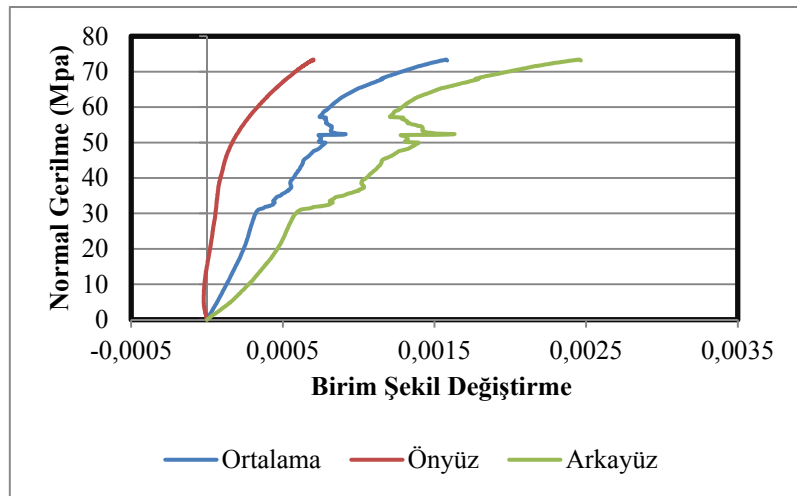
Şekil 4.193. SS8010 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.194. SS8020 numunesi deney öncesi ve sonrası



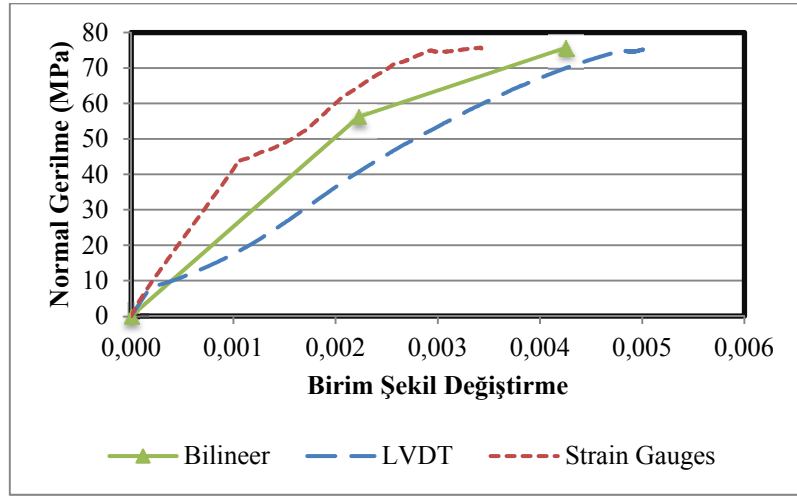
Şekil 4.195. SS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)



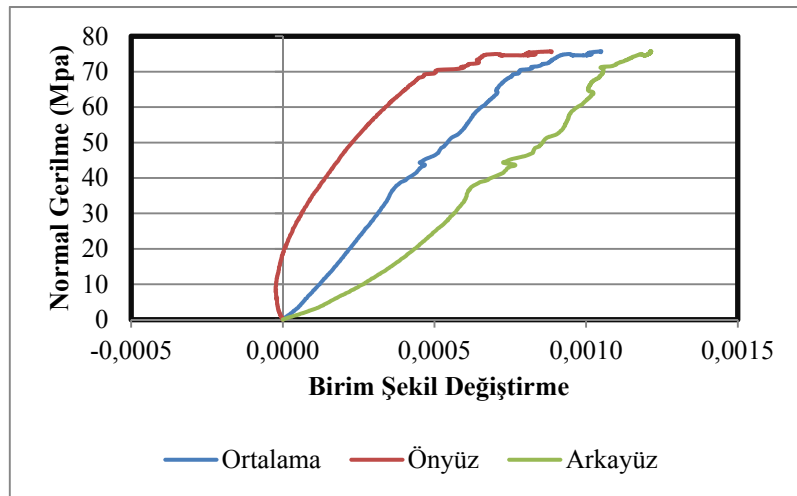
Şekil 4.196. SS8020 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)



Şekil 4.197. SS8030 numunesi deney öncesi ve sonrası



Şekil 4.198. SS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine paralel boyuna kısılma)

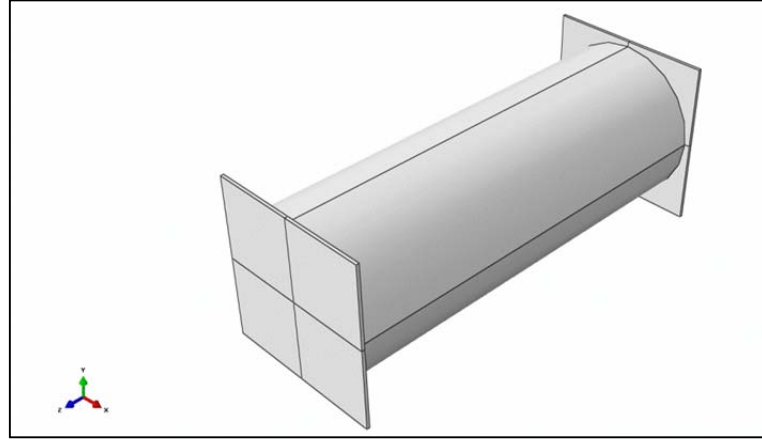


Şekil 4.199. SS8030 numunesi eksenel gerilme - birim şekil değiştirme grafiği (yükleme eksenine dik enine kısılma)

5. ANALİTİK MODELLEME

Numunelerin sonlu elemanlar prensibine göre çözümleme gerçekleştiren ABAQUS yazılımı ile modellemesi yapılarak gerçek model üzerindeki değişkenlerin ne gibi sorunlar ortaya çıkaracağı irdelenmiştir.

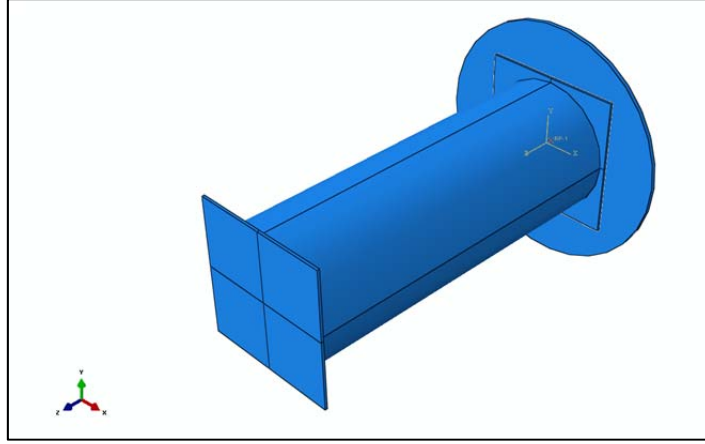
Modelleme sırasında çelik tüp, yükleme tablası, alt ve üst başlık plakalarının geometrik özellikleri tanımlanırken üç boyutlu, deforme olabilen, katı eleman kullanılmıştır. Sonlu elemanlar hasırının düzenli olarak dağıtılabilmesi için kesit geometrik şekillerini basitleştirecek biçimde çelik numune, parçalara ayrılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Çelik numune modeli

Malzeme özellikleri tanımlanırken çeliğin yoğunluğu ortalama 7.836 kg/cm^3 , elastisite modülü 200000 MPa , poisson oranı 0.3 , akma dayanımı 255 MPa olarak kabul edilmiştir. Her bir çelik numunenin deneyinden çıkan sonuçlar plastik malzeme özellikleri olarak ait olduğu numuneye tanımlanarak; akma, gerilme, deformasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Beton malzeme özelliklerinde de deneylerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

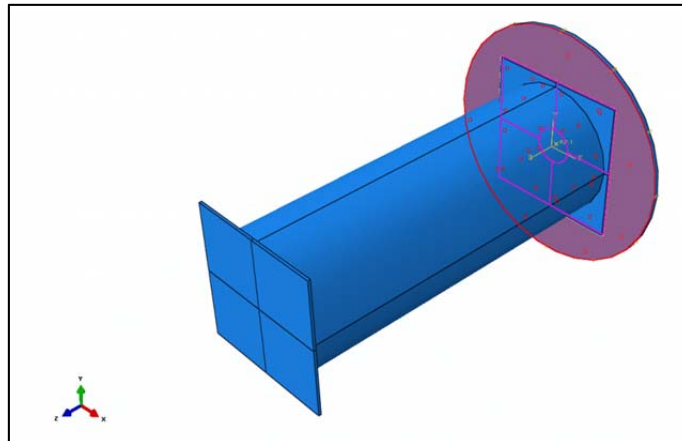
Montaj kısmında Şekil 5.2’de görüldüğü gibi çelik numune ve yükleme plakasının montajı gerçekleştirilerek, kısıtlamaların (constraints) baz alacağı referans noktaları tanımlanmıştır.



Şekil 5.2. Montaj aşaması

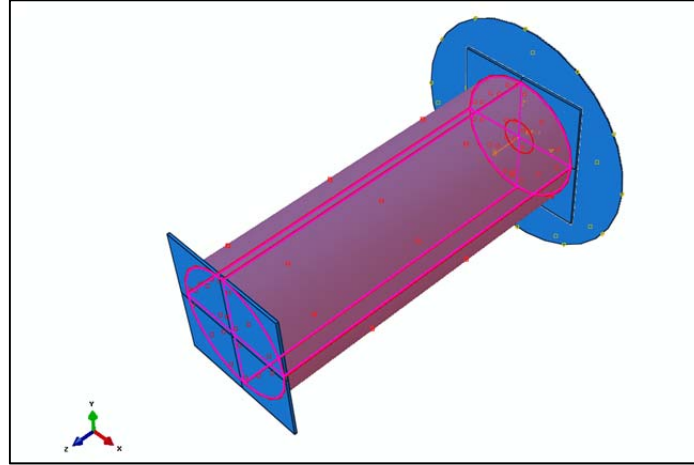
Adım (step) kısmında başlangıç aşamasının dışında “statik, genel” olarak tek aşama tanımlanmıştır. Çözümler sırasında, mevcut deney verilerine göre program sonuçları irdelendiğinden lineer olmayan geometri ve simetrik olmayan çözücü kullanılarak “Full Newton” çözüm tekniği kabul edilmiştir.

Yükleme plakası ile üst başlık arasında kalan kısımda sürtünme eksenine dik ve paralel özellikler girilerek iki yüzey arasında etkileşim tanımlanmıştır. Yüklem plakası rijit plaka olacağından efendi (master) yüzey, başlık ise köle (slave) yüzey olarak seçilmiştir (Şekil 5.3).



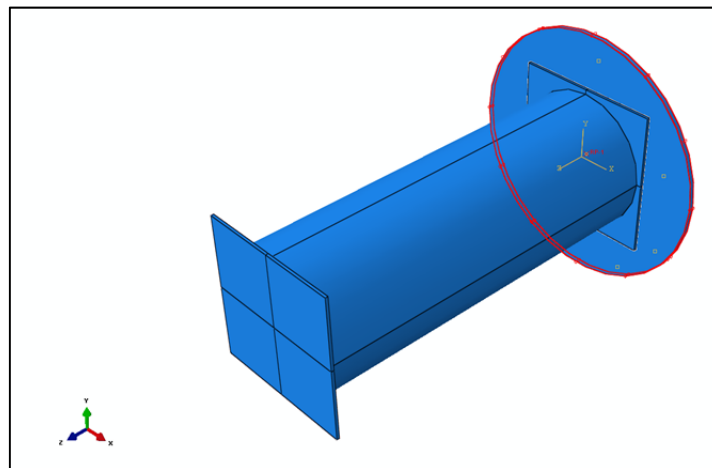
Şekil 5.3. Çelik - çelik etkileşimi

Çekirdek betonu ve çelik tüp arasında kalan bölüme beton - çelik etkileşimi tanımlanmıştır. Elastisite modülü değeri daha yüksek olan çelik, efendi yüzey; beton ise köle yüzey olarak belirtilerek, yüzey - yüzey sürtünmesi tanımlanmıştır. Statik sürtünme katsayısı 0.6 kabul edilerek eksene dik ve paralel olarak sürtünme parametreleri girilmiştir (Şekil 5.4).



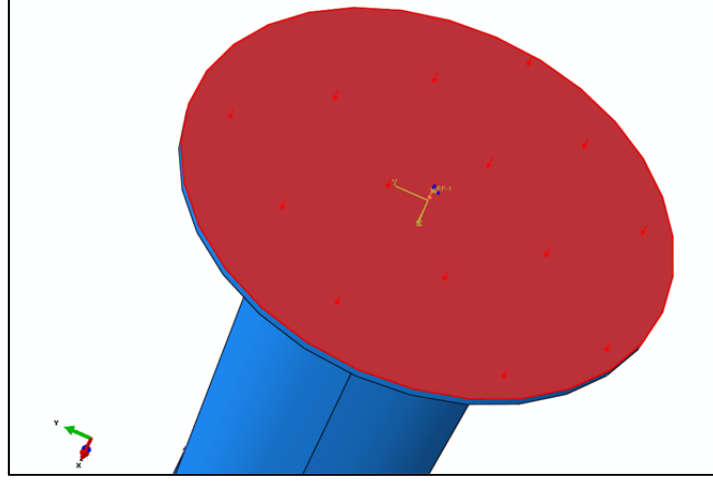
Şekil 5.4. Beton - çelik etkileşimi

Kısıtlamalar (constraints) kısmında Şekil 5.5'te görüldüğü gibi yükleme plakası rijit plaka olarak tanımlanmıştır.



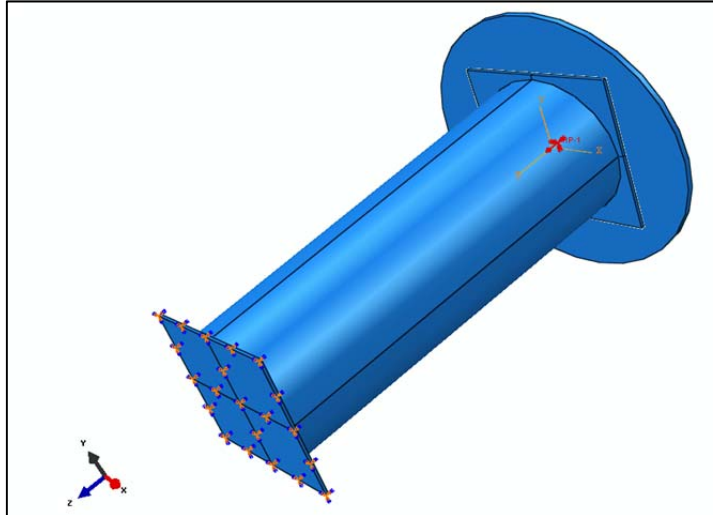
Şekil 5.5. Rijit plaka kısıtlaması

Yükleme adımında deney sonucunda elde edilen yük değeri, rijit yükleme plakasına düzgün yayılı eksenel basınç şeklinde tanımlanmıştır (Şekil 5.6).



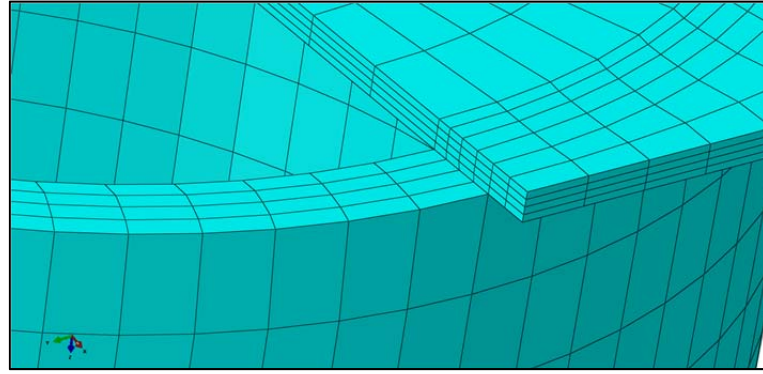
Şekil 5.6. Yükleme aşaması

Sınır koşullarının tanımlanması esnasında numunenin alt başlık kısmı ankastre olarak mesnetlenmiştir. Rijit yükleme plakasının referans noktasının (RP) ise sadece eksenel olarak numuneyi kısıltacak biçimde “z” ekseninde hareket ettiği kabul edilmiştir (Şekil 5.7).

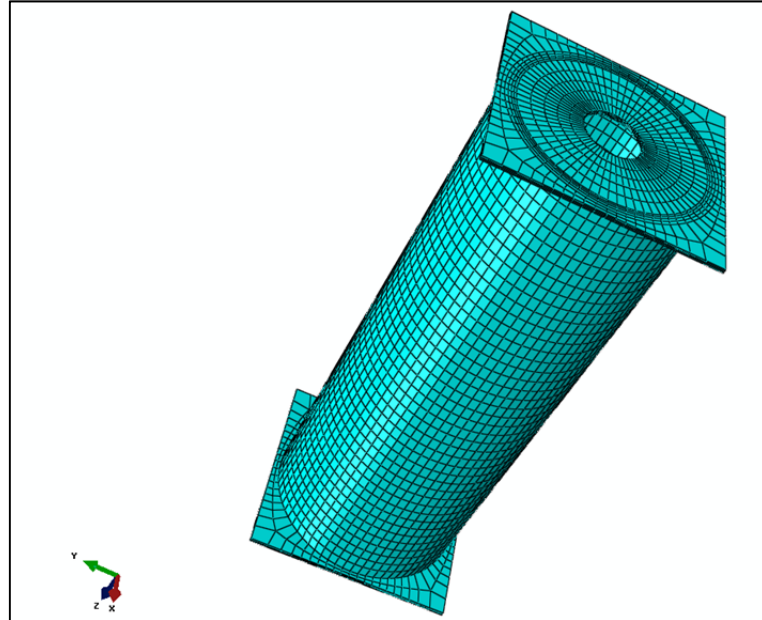


Şekil 5.7. Sınır koşulları

Sonlu elemanlar hasırı (mesh) tanımlanırken Şekil 5.8’de görüldüğü üzere çözümün doğruluğunu artırmak ve çözüm sırasında noktaların birbiri içerisine geçişini önlemek amacı ile çelik cidar kalınlıkları boyunca 4 sıra hasır tanımlanmıştır. Azaltılmış entegrasyonlu 8 düğüm noktalı tuğla eleman (C3D8R) kullanılmış olup, hasırlar oluşturulurken yapısal (structured) veya hasır geçişlerindeki değişiklikleri orta eksenlere göre azaltan “sweep” hasır kontrolleri kullanılmıştır (Şekil 5.9).

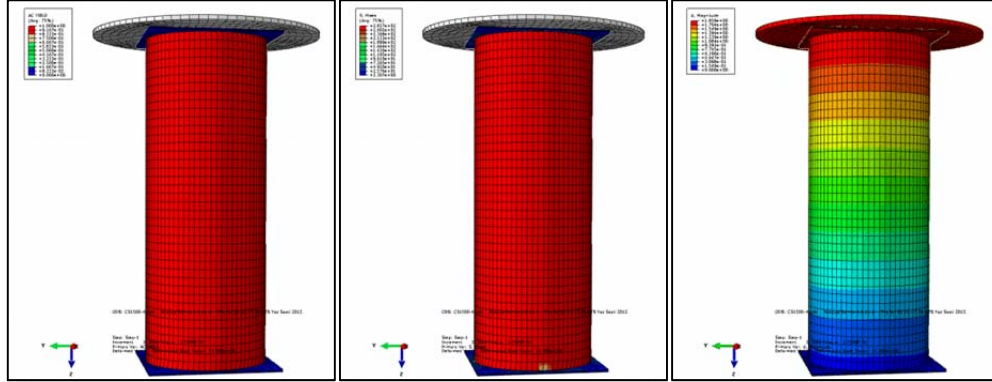


Şekil 5.8. Çelik cidar kalınlığı boyunca dörder sıra tanımlanmış hasırlar

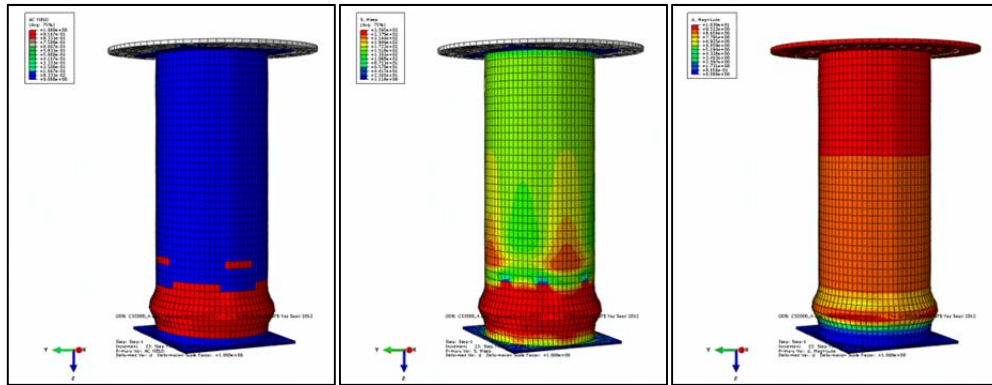


Şekil 5.9. Sonlu elemanlar hasırı (mesh)

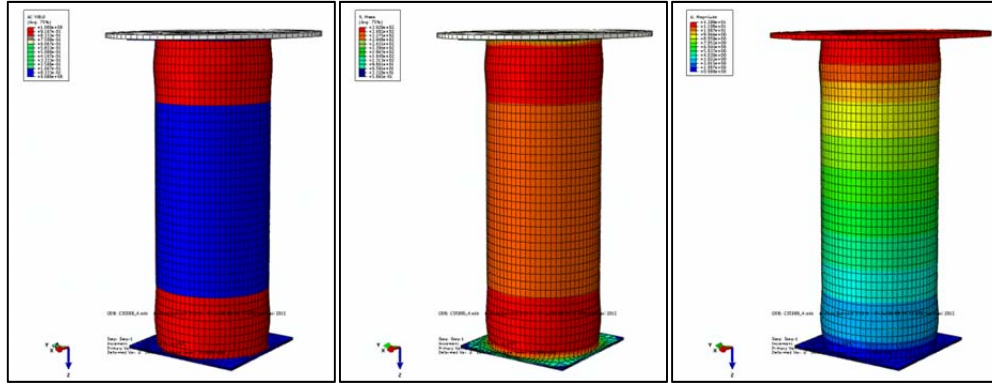
Analitik modelleme sonucunda elde edilen sırasıyla akma, gerilme ve eksenel deformasyon değerleri aşağıdaki kısımda numune isimlerine göre sıralanmıştır. Akma şekillerine bakıldığında içi boş çelik numunelerin tamamında akma sınırının aşıldığını ve bu doğrultuda kesit taşıma kapasitesinin tamamına ulaşıldığı görülmektedir.



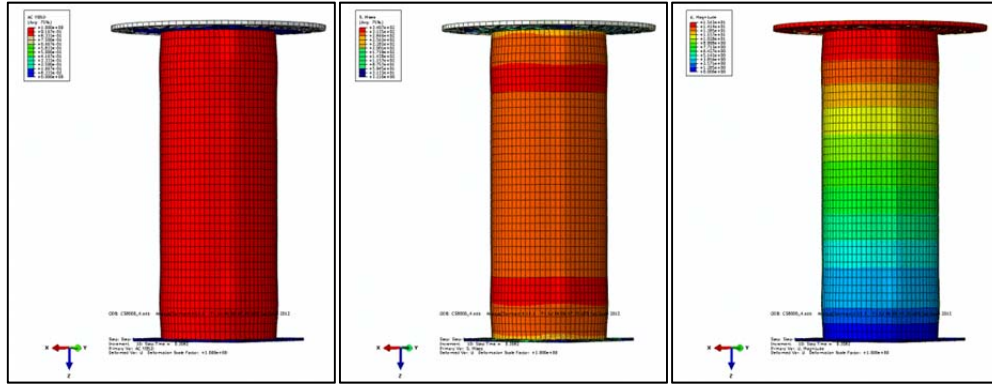
Şekil 5.10. CS1500 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



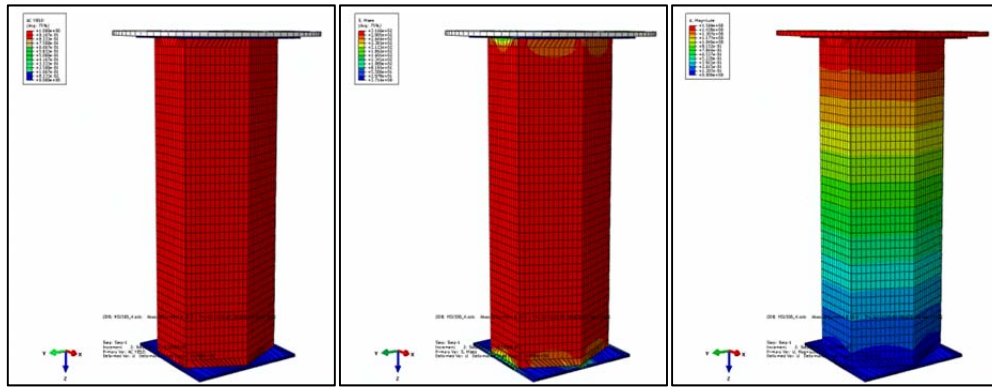
Şekil 5.11. CS3000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



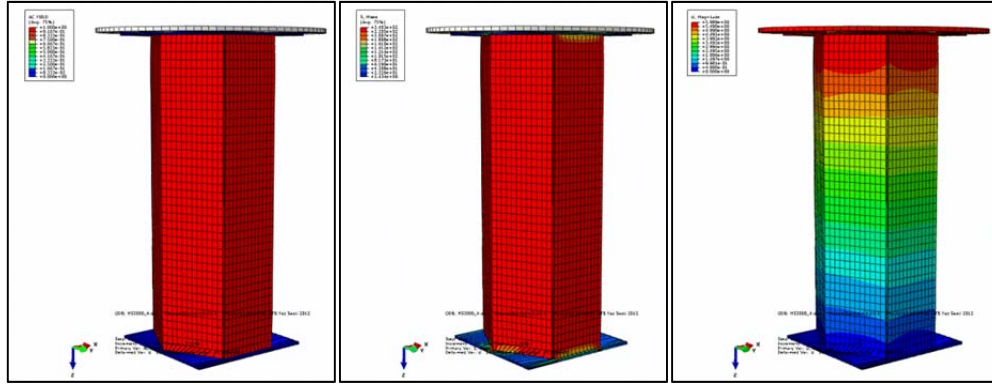
Şekil 5.12. CS5000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



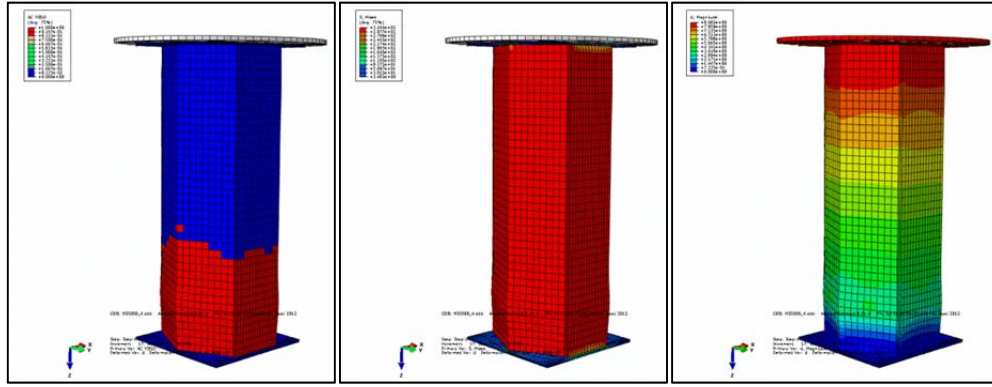
Şekil 5.13. CS8000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



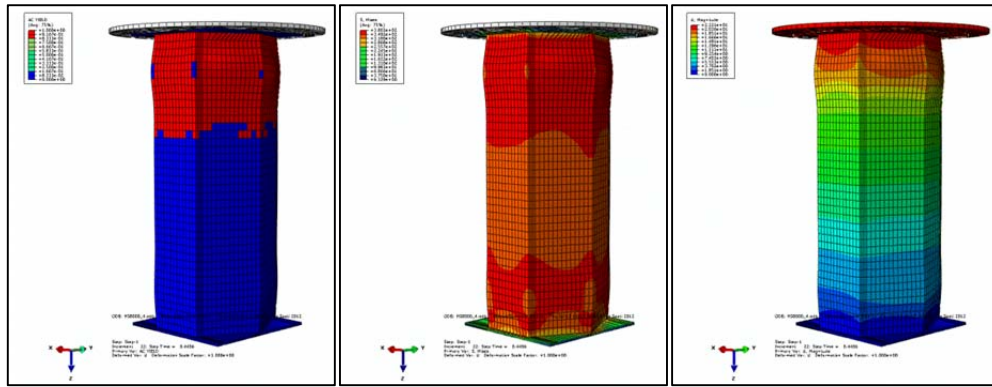
Şekil 5.14. HS1500 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



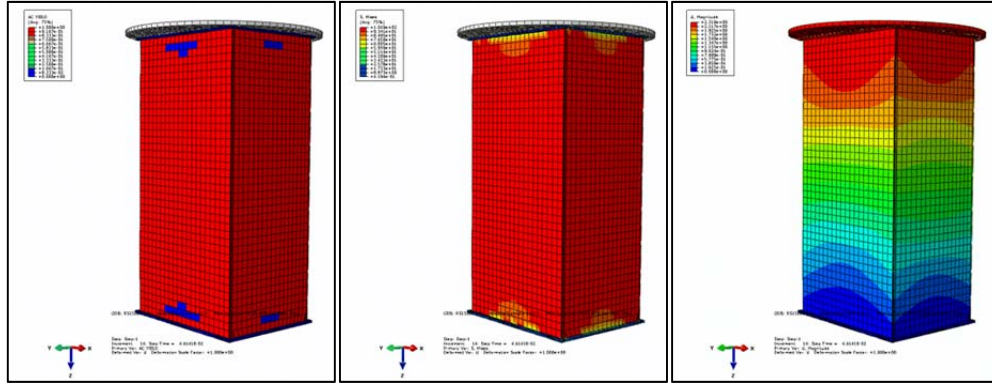
Şekil 5.15. HS3000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



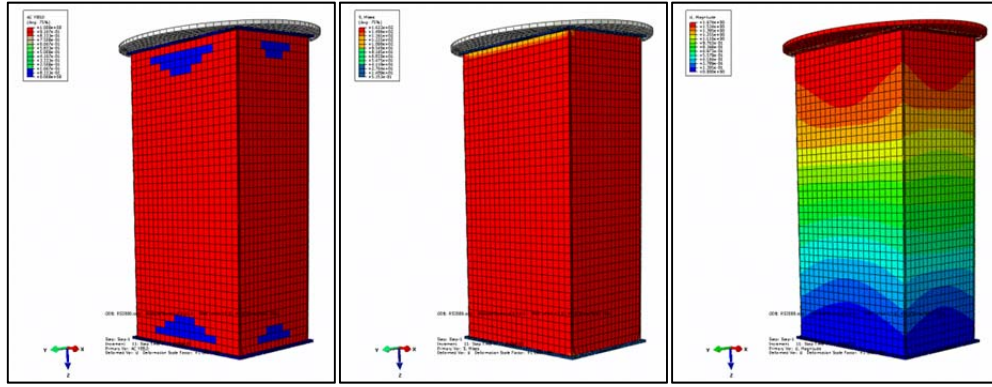
Şekil 5.16. HS5000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



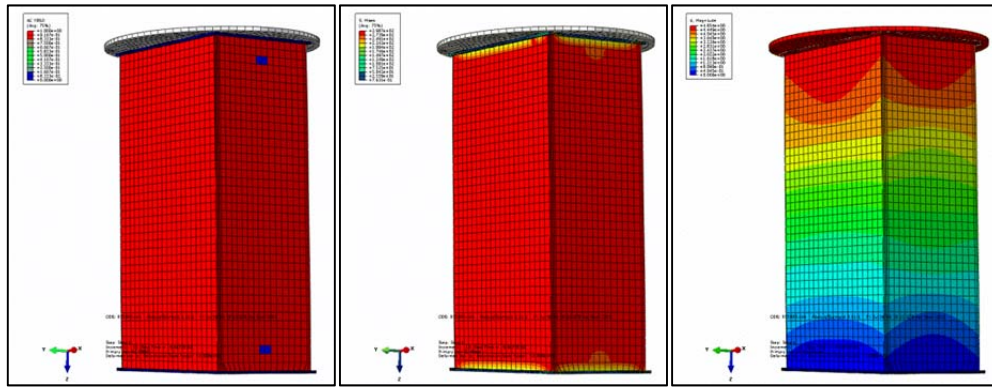
Şekil 5.17. HS8000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



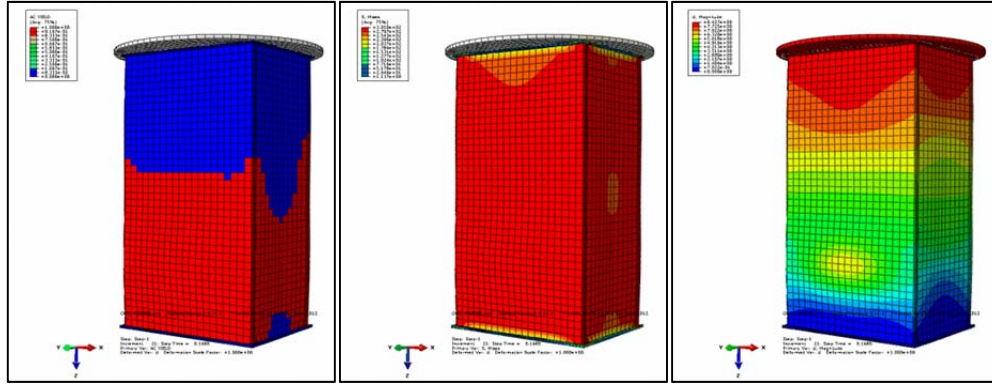
Şekil 5.18. RS1500 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



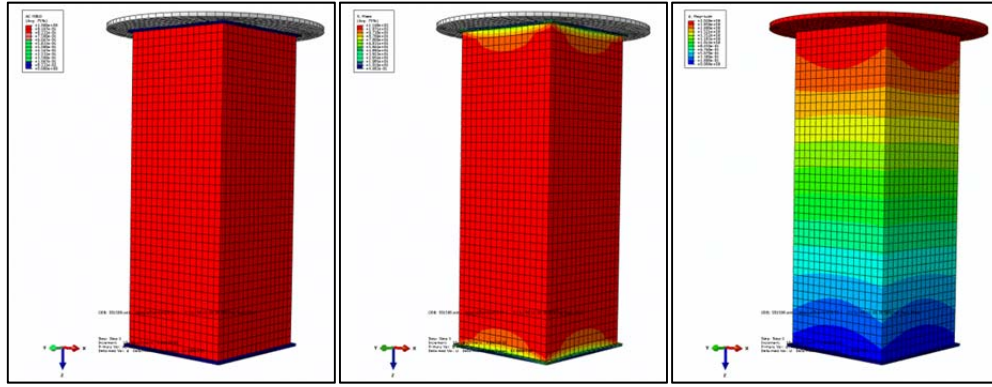
Şekil 5.19. RS3000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



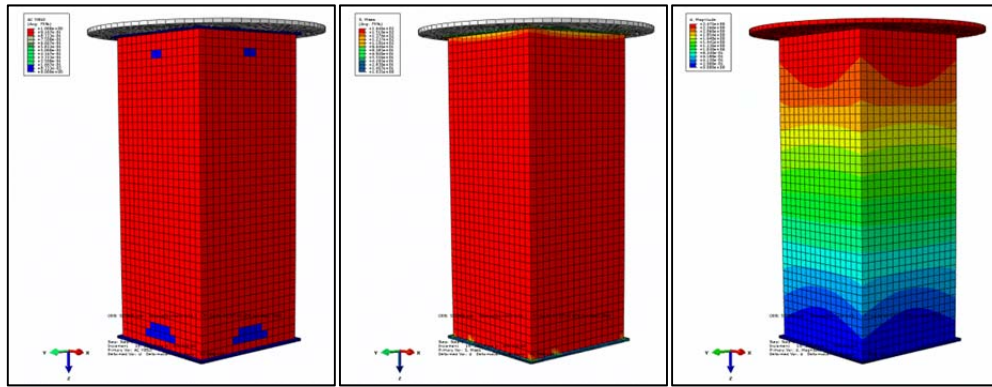
Şekil 5.20. RS5000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



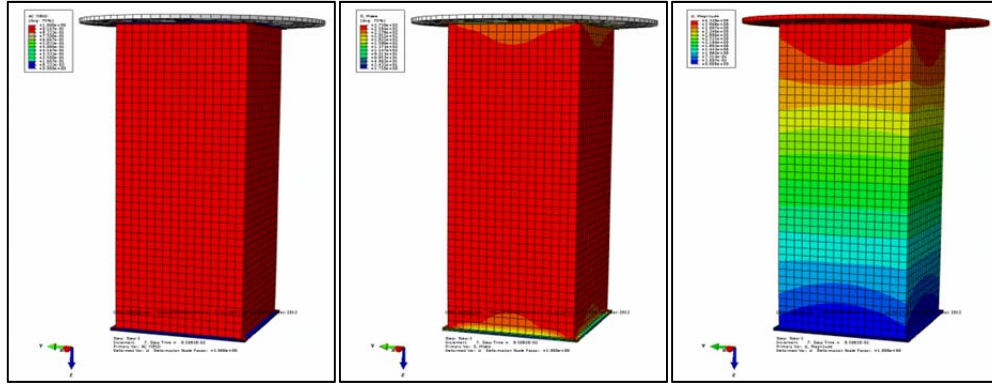
Şekil 5.21. RS8000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



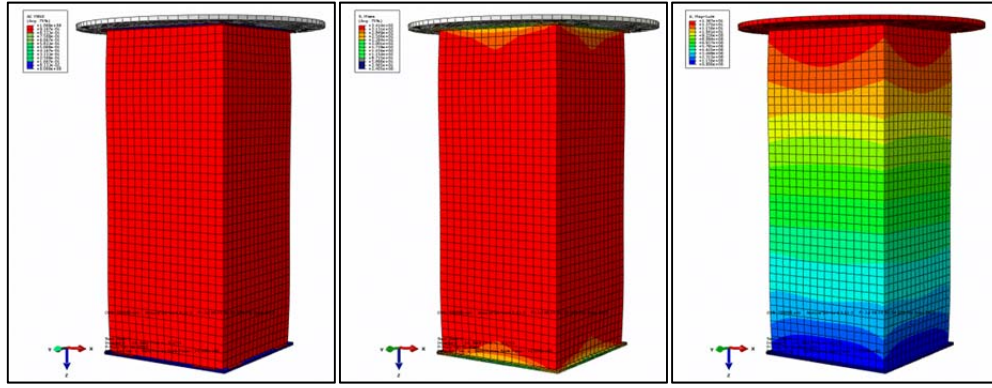
Şekil 5.22. SS1500 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları



Şekil 5.23. SS3000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları

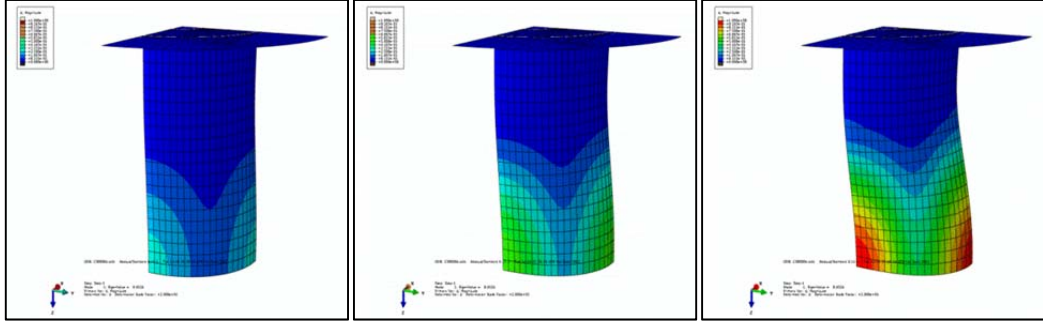


Şekil 5.24. SS5000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları

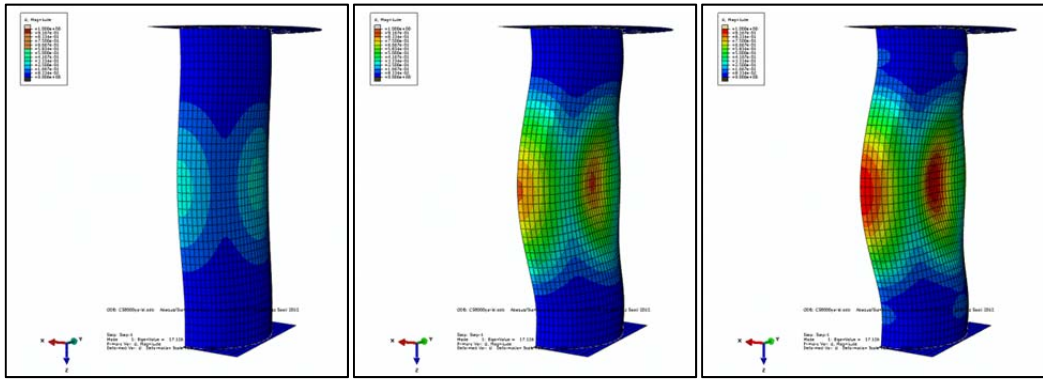


Şekil 5.25. SS8000 numunesi akma (ACyield), gerilme (Smises) ve deformasyon (U) sonuçları

Numune burkulma modlarının incelenmesi amacıyla Abaqus programında burkulma (buckle) çözümü yapılmıştır. Bu adımda çelik numuneler kabuk (shell) eleman olarak tanımlanarak, ilk aşamada 1/8 (Şekil 5.26) ikinci aşamada 1/2 (Şekil 5.27) oranında modellenmiştir. Euler burkulma analizine göre malzemedeki kusurlara bağlı olarak farklı bölgelerde meydana gelebilecek burkulma modları incelenmiştir. Deneyler sonucunda numunelerde görülen burkulmalar, program çıktıları ile örtüşmektedir.

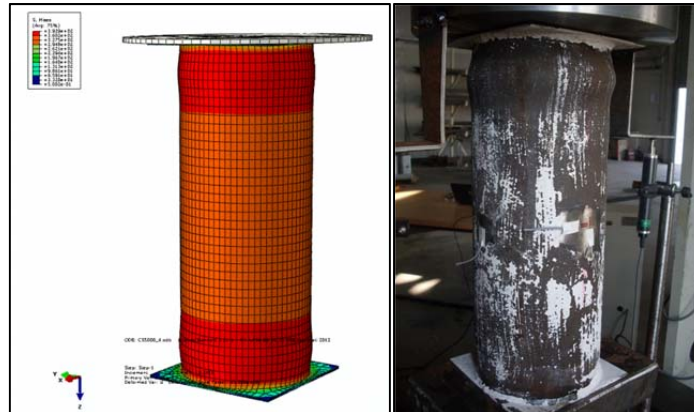


Şekil 5.26. 1/8 numune modelinde burkulma mekanizması

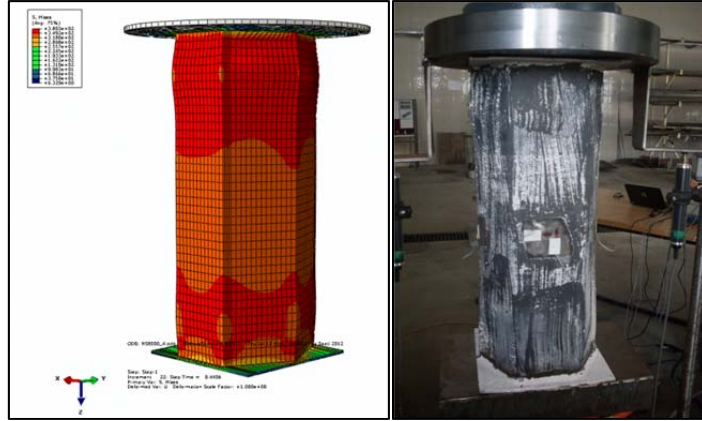


Şekil 5.27. 1/2 numune modelinde burkulma mekanizması

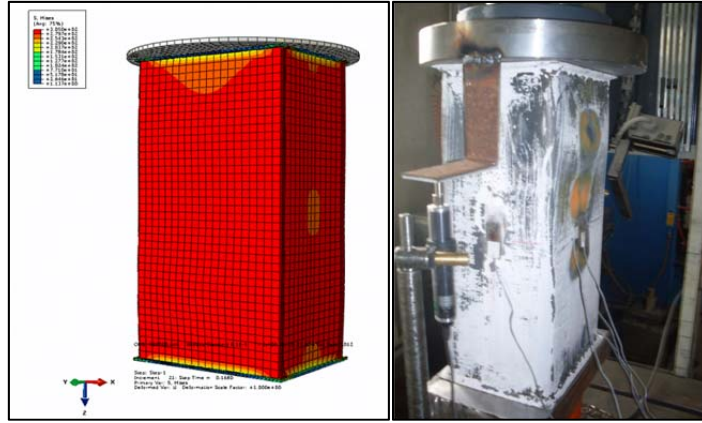
Her kesit şekli için birer adet örnek deney sonucu ve analitik modelleme sonucu karşılaştırması Şekil 5.28-29-30-31’de sunulmuştur.



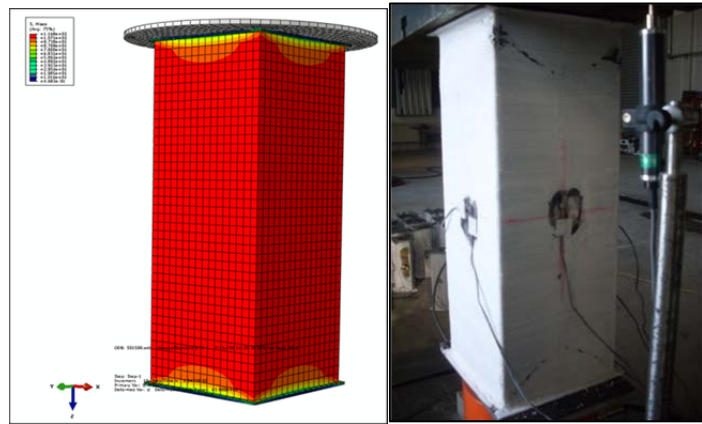
Şekil 5.28. CS5000 numunesi sonlu elemanlar modeli ve deney sonu karşılaştırması



Şekil 5.29. HS8000 numunesi sonlu elemanlar modeli ve deney sonu karşılaştırması



Şekil 5.30. RS8000 numunesi sonlu elemanlar modeli ve deney sonu karşılaştırması

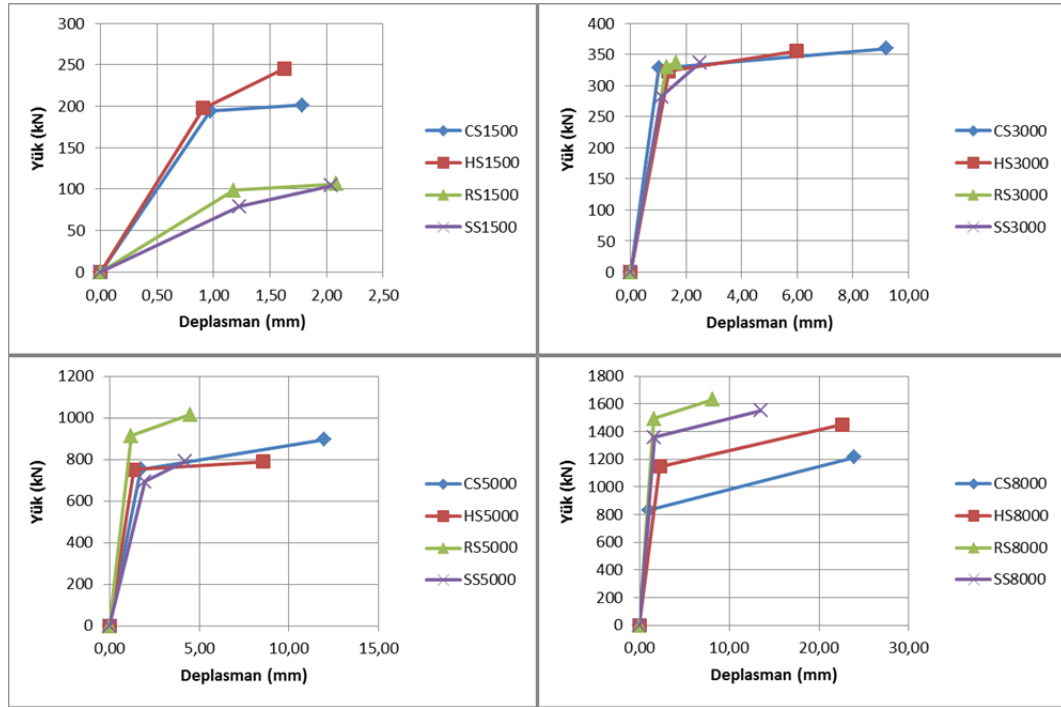


Şekil 5.31. SS1500 numunesi sonlu elemanlar modeli ve deney sonu karşılaştırması

6. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

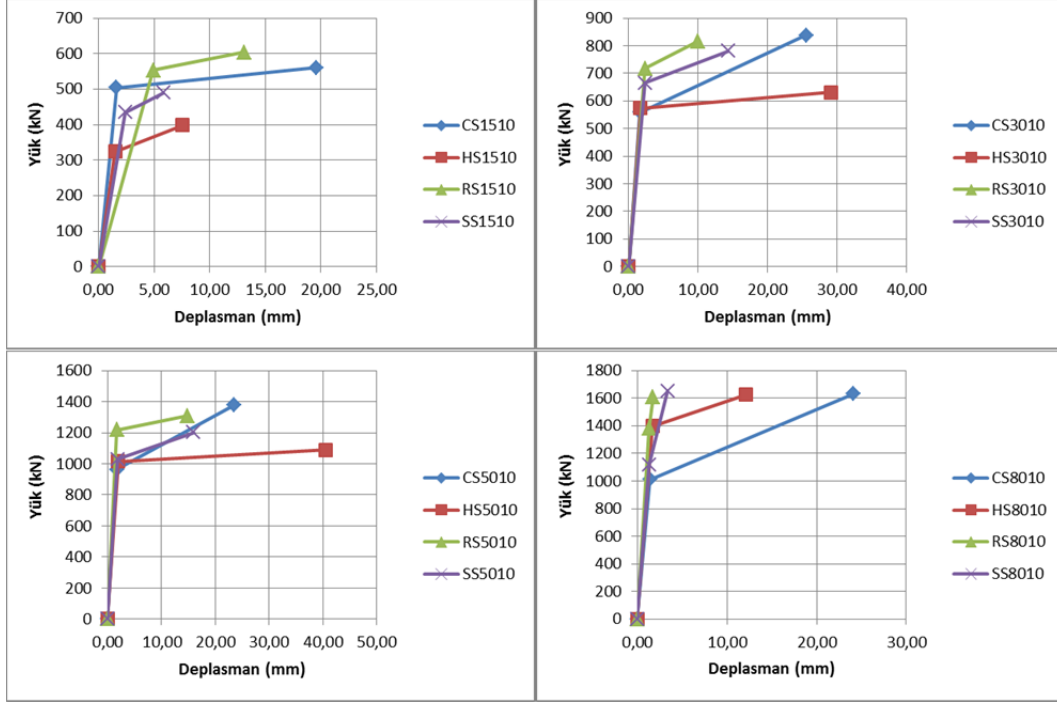
Bu bölümde CFST deneyleri sonucunda elde edilen yük - deplasman grafikleri, maksimum yük, birim şekil değiştirme, süneklik, kompozit kesitlerde çelik ve beton için ayrı ayrı hesaplanan aksenal gerilme ve elastisite modülü değerleri ile tüm çalışma sürecinde elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi 1.5 mm kalınlığında içi boş çelik numunelerde kare ve dikdörtgen kesitlerin maksimum yük miktarı bağıl olarak az, deplasman fazla olmasına rağmen; cidar kalınlığı arttıkça yük artarak deplasman azalmıştır. Daire ve altıgen kesitlerde ise tam tersi söz konusudur.



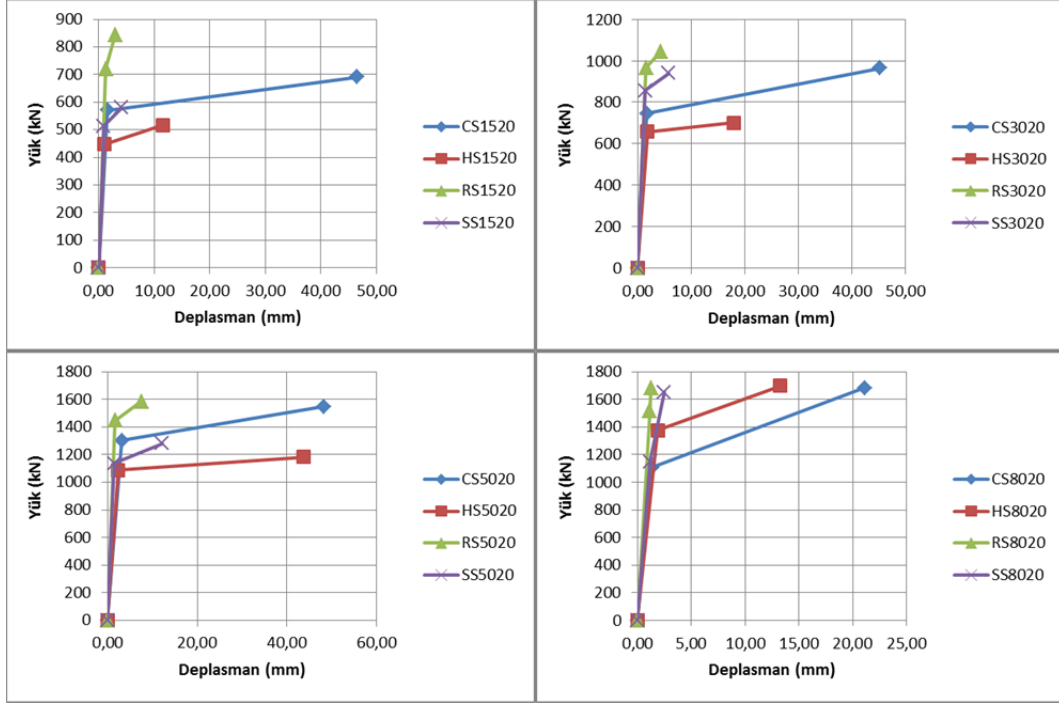
Şekil 6.1. İçi boş çelik numunelerin yük deplasman grafikleri

Şekil 6.2’de görüldüğü gibi C10 (13.3 MPa) beton dolu çelik numunelerde sargı etkisine bağlı olarak daire ve altıgen kesitler, kare ve dikdörtgen kesitlere göre 2-3 kat daha fazla deplasman göstermiştir. Kesit alanı göz önünde bulundurulduğunda en az yük altıgen kesitte görülmüştür.



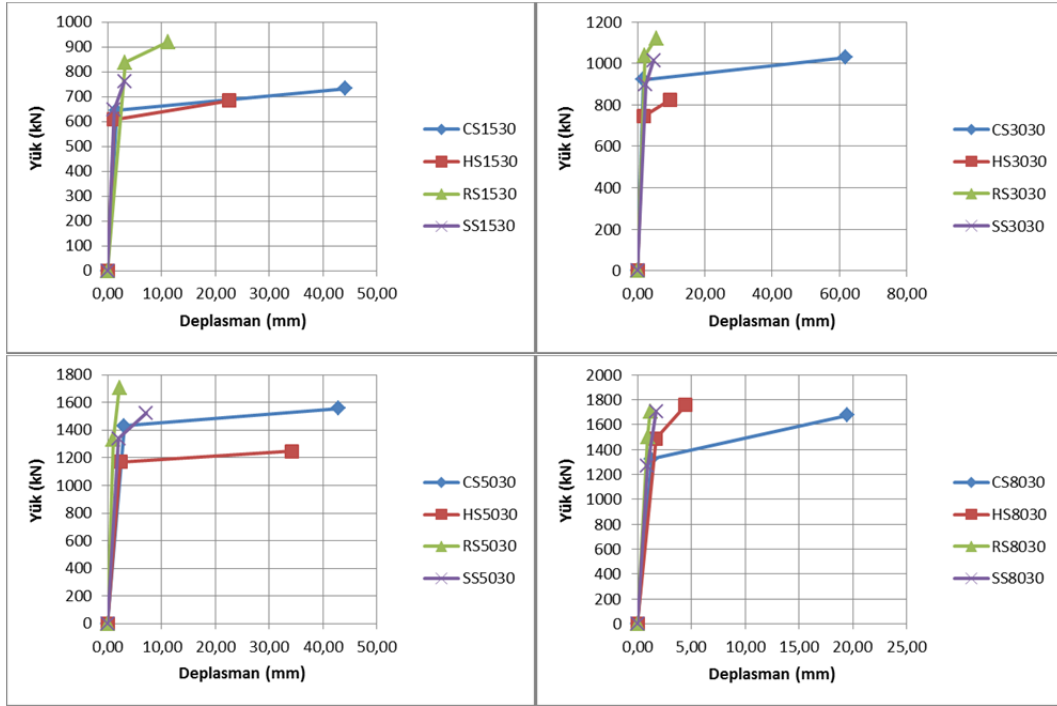
Şekil 6.2. C10 (13.3 MPa) beton dolu çelik numunelerin yük deplasman grafikleri

Şekil 6.3'te görüldüğü gibi C20 (26.0 MPa) beton dolu çelik numunelerde en yüksek deplasman değeri dairesel kesitlerde görülmektedir. Kare ve dikdörtgen kesitler daha fazla yük taşıırken daha az deplasman göstermiştir.



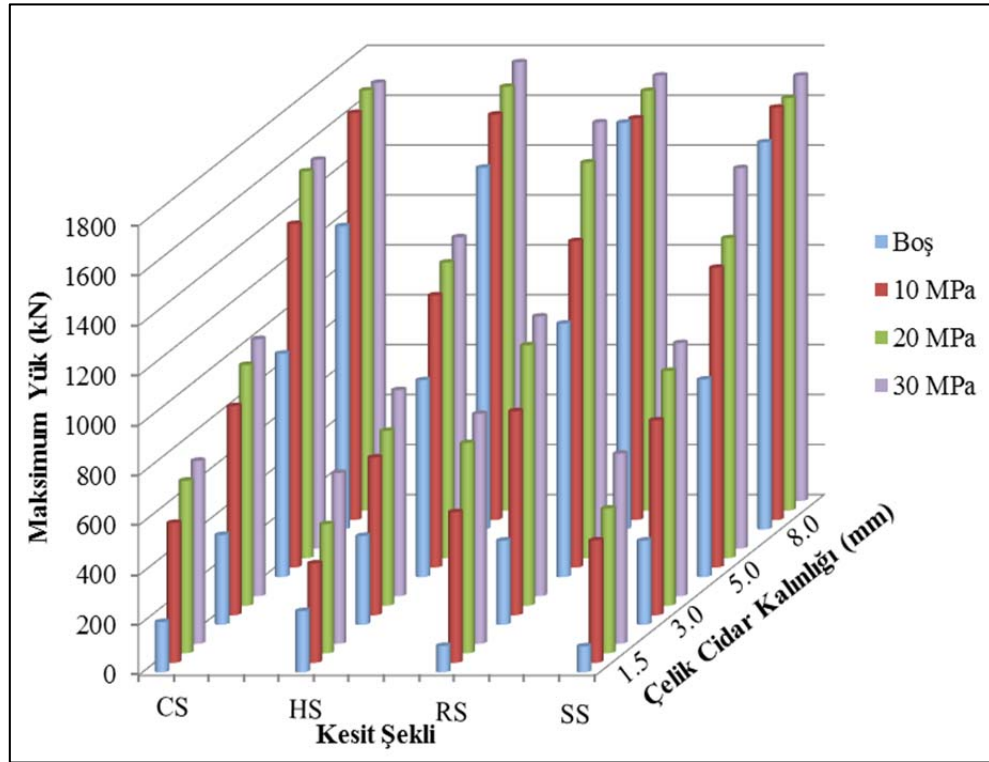
Şekil 6.3. C20 (26.0 MPa) beton dolu çelik numunelerin yük deplasman grafikleri

Şekil 6.4'te görüldüğü gibi C30 (35.3 MPa) beton dolu çelik numunelerde kare ve dikdörtgen kesitlerde yüksek yük kapasitesi, düşük deplasman görülürken; altıgen ve dairesel kesitlerde alana bağlı olarak yüksek deplasman ve daha düşük yük kapasitesi görülmektedir.



Şekil 6.4. C30 (35.3 MPa) beton dolu çelik numunelerin yük deplasman grafikleri

Şekil 6.5'te kesit şekli, çelik cidar kalınlığı ve beton basınç dayanımı parametrelerine göre maksimum yük değerinin değişimi görülmektedir. Maksimum yük değeri doğal olarak beton basınç dayanımı ve çelik cidar kalınlığının artması ile yükselmiştir.



Şekil 6.5. Maksimum yük değerinin çelik cidar kalınlığı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli parametrelerine bağlı değişimi

Tüm numunelerde beton basınç dayanımı ve boş çelik numunelerin maksimum yük değerleri göz önünde bulundurulduğunda, kompozit CFST elemanlarının maksimum yük değerini arttırdığı görülmüştür (Çizelge 6.1). Çelik cidar kalınlığı arttıkça maksimum yük değerlerindeki oranlar azalmıştır. Beton basınç dayanımının artması CFST elemanlardaki maksimum yük değerini ciddi ölçüde etkilememekle birlikte artırmıştır. Kesit geometrik şeklinin değişimi kesit

alanını da değiştirdiğinden maksimum yük değerlerinde her biri kendi içerisinde değerlendirilmiş olup altıgen numuneler hariç diğer numunelerde %50'nin üzerinde artış gözlenmiştir. Grafikte “altı çizili” ve “*italik*” olarak belirtilen 8 mm cidar kalınlığına sahip numunelerin maksimum yük değerleri 1650 - 1700 kN sınırını aştığından dolayı genellikle presin kapasitesini zorlamamak adına deneyler bu sınırdan kesilmiştir. Bu yüzden Çizelge 6.1'deki ortalamalara katılmayarak kendi aralarında değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.1. CFST numunelerde maksimum yük değeri artış oranları

Numune Adı	Maksimum Yük (kN)				Artış Oranı (%)	Ortalama (Cidar Kalınlığına Göre)
	Boş Çelik	Beton	Boş Çelik + Beton	CFST		
CS1510	201,4	13,3	214,7	560	61,7	65,50
CS1520	201,4	26,0	227,4	691	67,1	
CS1530	201,4	35,3	236,7	733	67,7	
CS3010	359,5	13,3	372,7	838	55,5	59,06
CS3020	359,5	26,0	385,5	964	60,0	
CS3030	359,5	35,3	394,7	1030	61,7	
CS5010	895,0	13,3	908,2	1376	34,0	38,28
CS5020	895,0	26,0	921,0	1549	40,6	
CS5030	895,0	35,3	930,2	1558	40,3	
CS8010	1215,1	13,3	1228,4	1631	<u>24,7</u>	<u>25,42</u>
CS8020	1215,1	26,0	1241,1	1683	<u>26,2</u>	
CS8030	1215,1	35,3	1250,3	1675	<u>25,4</u>	
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)						54,28
HS1510	245,4	13,3	258,7	398	35,0	47,18
HS1520	245,4	26,0	271,4	518	47,6	
HS1530	245,4	35,3	280,7	684	59,0	
HS3010	355,5	13,3	368,7	632	41,6	46,60
HS3020	355,5	26,0	381,5	700	45,5	
HS3030	355,5	35,3	390,7	826	52,7	
HS5010	788,9	13,3	802,2	1090	26,4	30,50
HS5020	788,9	26,0	814,9	1184	31,2	
HS5030	788,9	35,3	824,2	1247	33,9	
HS8010	1449,1	13,3	1462,4	1624	<u>9,9</u>	<u>12,85</u>
HS8020	1449,1	26,0	1475,2	1697	<u>13,1</u>	
HS8030	1449,1	35,3	1484,4	1757	<u>15,5</u>	
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)						41,43
RS1510	106,0	13,3	119,3	604	80,2	83,07
RS1520	106,0	26,0	132,1	842	84,3	
RS1530	106,0	35,3	141,3	921	84,7	
RS3010	336,8	13,3	350,1	817	57,1	63,05
RS3020	336,8	26,0	362,8	1043	65,2	
RS3030	336,8	35,3	372,0	1120	66,8	
RS5010	1015,7	13,3	1029,0	1308	21,3	31,34
RS5020	1015,7	26,0	1041,7	1585	34,3	
RS5030	1015,7	35,3	1050,9	1707	38,4	
RS8010	1629,9	13,3	1643,2	1609	<u>-2,2</u>	<u>0,53</u>
RS8020	1629,9	26,0	1655,9	1681	<u>1,5</u>	
RS8030	1629,9	35,3	1665,1	1704	<u>2,3</u>	
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)						59,15

Çizelge 6.1. (Devam) CFST numunelerde maksimum yük değeri artış oranları

Numune Adı	Maksimum Yük (kN)				Artış Oranı (%)	Ortalama (Cidar Kalınlığına Göre)
	Boş Çelik	Beton	Boş Çelik + Beton	CFST		
SS1510	104,0	13,3	117,3	490	76,1	78,45
SS1520	104,0	26,0	130,0	580	77,6	
SS1530	104,0	35,3	139,3	762	81,7	
SS3010	336,8	13,3	350,1	780	55,1	59,95
SS3020	336,8	26,0	362,8	940	61,4	
SS3030	336,8	35,3	372,0	1014	63,3	
SS5010	791,6	13,3	804,9	1201	33,0	38,30
SS5020	791,6	26,0	817,6	1281	36,2	
SS5030	791,6	35,3	826,9	1524	45,7	
SS8010	1551,2	13,3	1564,5	1652	5,3	5,58
SS8020	1551,2	26,0	1577,2	1652	4,5	
SS8030	1551,2	35,3	1586,4	1705	6,9	
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)						58,90

CFST kompozit numunelerde çelik ve beton elemanların toplam eksenel yükün ne kadarını taşıdığını bulabilmek için, Denklem 6.1'den yola çıkarak elemanlara kuvvetler eksenel rijitlikleri ile orantılı olarak dağıtılmıştır. Beton ve çelik elemanlar aynı oranda eksenel kısalmaya maruz kaldığından deplasman miktarları eşit olacaktır. Bu doğrultuda çelik eleman eksenel yükü için Denklem 6.2, beton malzeme eksenel yükü için Denklem 6.3 kullanılmıştır.

$$\delta = \frac{P.L}{A.E} \quad (6.1)$$

$$P_s = \frac{A_s.E_s}{(A_s.E_s + A_c.E_c)} \times P \quad (6.2)$$

$$P_c = \frac{A_c.E_c}{(A_s.E_s + A_c.E_c)} \times P \quad (6.3)$$

Çelik ve beton eleman bazında eksenel yük değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Boş çelik numuneler kompozit kesitlerin ortalamasına katılmamış olup ayrıca değerlendirilmiştir. Beton basınç dayanımı arttıkça (kesit ve cidar kalınlığı sabit) çelik elemana gelen yük miktarı azalarak, beton elemana gelen yük miktarı artmaktadır. Daire, kare ve altıgen kesitlerde eksenel yük değerlerini çelik eleman %54.3, beton eleman ise %45.7 oranında taşımaktadır. Dikdörtgen kesitteki çelik

oranına bağlı olarak bu değerler çelik için %51.2, beton için %48.8 olmuştur. Çelik cidar kalınlığının artmasına bağlı olarak çelik elemana gelen yük oranı artmış olup beton elemana gelen yük oranı azalmıştır.

Çizelge 6.2. CFST numunelerde çelik ve beton elemanlara gelen eksenel yük oranları

Numune Adı	P _{max} (kN)	A _s (mm ²)	A _c (mm ²)	E _s (Mpa)	E _c (Mpa)	P _s (kN)	P _c (kN)	Eksenel Yük Taşıma Oranı (%)		Ortalama (Cidar Kalınlığına Göre)	
								Çelik	Beton	Çelik	Beton
CS1500	201,4	700	0	200000	0	201,4	0,0	100,0	-	100,0	0,0
CS1510	560,2	700	16972	200000	9150	265,5	294,6	47,4	52,6	32,8	67,2
CS1520	691,2	700	16972	200000	21025	194,7	496,5	28,2	71,8		
CS1530	732,9	700	16972	200000	27900	167,2	565,7	22,8	77,2		
CS3000	359,5	1385	0	200000	0	359,5	0,0	100,0	-	100,0	0,0
CS3010	837,6	1385	16286	200000	9150	544,7	292,9	65,0	35,0	49,2	50,8
CS3020	964,3	1385	16286	200000	21025	431,3	533,0	44,7	55,3		
CS3030	1029,7	1385	16286	200000	27900	390,1	639,6	37,9	62,1		
CS5000	895,0	2278	0	200000	0	895,0	0,0	100,0	-	100,0	0,0
CS5010	1376,5	2278	15394	200000	9150	1051,4	325,1	76,4	23,6	62,1	37,9
CS5020	1549,2	2278	15394	200000	21025	905,7	643,5	58,5	41,5		
CS5030	1557,9	2278	15394	200000	27900	801,8	756,0	51,5	48,5		
CS8000	1215,1	3569	0	200000	0	1215,1	0,0	100,0	-	100,0	0,0
CS8010	1630,5	3569	14103	200000	9150	1380,9	249,6	84,7	15,3	73,3	26,7
CS8020	1682,6	3569	14103	200000	21025	1188,7	493,8	70,7	29,3		
CS8030	1675,2	3569	14103	200000	27900	1079,9	595,3	64,5	35,5		
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)										54,3	45,7
HS1500	245,4	747	0	200000	0	245,4	0,0	100,0	-	100,0	0,0
HS1510	398,1	747	18120	200000	9150	188,7	209,4	47,4	52,6	32,8	67,2
HS1520	517,5	747	18120	200000	21025	145,8	371,7	28,2	71,8		
HS1530	684,2	747	18120	200000	27900	156,1	528,1	22,8	77,2		
HS3000	355,5	1479	0	200000	0	355,5	0,0	100,0	-	100,0	0,0
HS3010	631,5	1479	17388	200000	9150	410,7	220,9	65,0	35,0	49,2	50,8
HS3020	700,2	1479	17388	200000	21025	313,2	387,0	44,7	55,3		
HS3030	825,6	1479	17388	200000	27900	312,7	512,9	37,9	62,1		
HS5000	788,9	2432	0	200000	0	788,9	0,0	100,0	-	100,0	0,0
HS5010	1090,4	2432	16435	200000	9150	832,8	257,5	76,4	23,6	62,1	37,9
HS5020	1183,7	2432	16435	200000	21025	692,0	491,7	58,5	41,5		
HS5030	1247,1	2432	16435	200000	27900	641,9	605,2	51,5	48,5		
HS8000	1449,1	3810	0	200000	0	1449,1	0,0	100,0	-	100,0	0,0
HS8010	1623,9	3810	15057	200000	9150	1375,3	248,6	84,7	15,3	73,3	26,7
HS8020	1697,2	3810	15057	200000	21025	1199,1	498,1	70,7	29,3		
HS8030	1757,3	3810	15057	200000	27900	1132,8	624,5	64,5	35,5		
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)										54,3	45,7
RS1500	106,0	1041	0	200000	0	106,0	0,0	100,0	-	100,0	0,0
RS1510	603,5	1041	28959	200000	9150	265,6	338,0	44,0	56,0	30,0	70,0
RS1520	842,3	1041	28959	200000	21025	214,6	627,7	25,5	74,5		
RS1530	921,0	1041	28959	200000	27900	188,7	732,3	20,5	79,5		
RS3000	336,8	2064	0	200000	0	336,8	0,0	100,0	-	100,0	0,0
RS3010	816,9	2064	27936	200000	9150	504,5	312,4	61,8	38,2	45,9	54,1
RS3020	1043,0	2064	27936	200000	21025	430,5	612,5	41,3	58,7		
RS3030	1120,4	2064	27936	200000	27900	387,9	732,4	34,6	65,4		
RS5000	1015,7	3400	0	200000	0	1015,7	0,0	100,0	-	100,0	0,0
RS5010	1307,8	3400	26600	200000	9150	963,1	344,7	73,6	26,4	58,8	41,2
RS5020	1584,5	3400	26600	200000	21025	869,5	715,1	54,9	45,1		
RS5030	1707,2	3400	26600	200000	27900	816,3	890,9	47,8	52,2		
RS8000	1629,9	5344	0	200000	0	1629,9	0,0	100,0	-	100,0	0,0
RS8010	1608,5	5344	24656	200000	9150	1328,2	280,4	82,6	17,4	70,3	29,7
RS8020	1680,6	5344	24656	200000	21025	1131,7	548,9	67,3	32,7		
RS8030	1703,9	5344	24656	200000	27900	1036,7	667,2	60,8	39,2		
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)										51,2	48,8

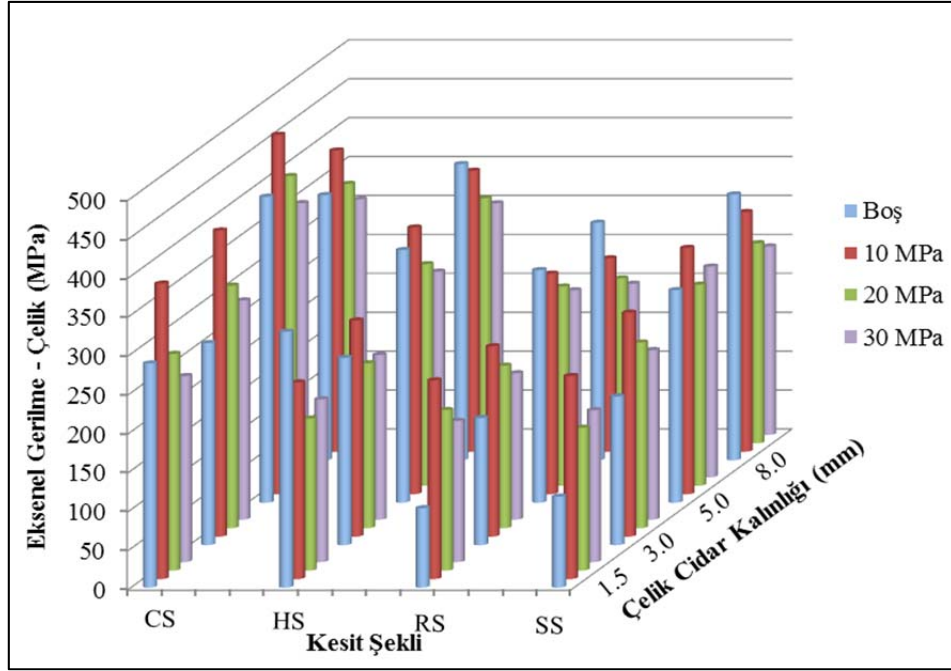
Çizelge 6.2. (Devam) CFST numunelerde çelik ve beton elemanlara gelen eksenel yük oranları

Numune Adı	P _{max} (kN)	A _s (mm ²)	A _c (mm ²)	E _s (Mpa)	E _c (Mpa)	P _s (kN)	P _c (kN)	Eksenel Yük Taşıma Oranı (%)		Ortalama (Cidar Kalınlığına Göre)	
								Çelik	Beton	Çelik	Beton
SS1500	104,0	891	0	200000	0	104,0	0,0	100,0	-	100,0	0,0
SS1510	490,2	891	21609	200000	9150	232,4	257,8	47,4	52,6	32,8	67,2
SS1520	580,2	891	21609	200000	21025	163,5	416,7	28,2	71,8		
SS1530	761,6	891	21609	200000	27900	173,8	587,8	22,8	77,2		
SS3000	336,8	1764	0	200000	0	336,8	0,0	100,0	-	100,0	0,0
SS3010	780,3	1764	20736	200000	9150	507,4	272,9	65,0	35,0	49,2	50,8
SS3020	940,3	1764	20736	200000	21025	420,6	519,7	44,7	55,3		
SS3030	1013,7	1764	20736	200000	27900	384,0	629,7	37,9	62,1		
SS5000	791,6	2900	0	200000	0	791,6	0,0	100,0	-	100,0	0,0
SS5010	1201,1	2900	19600	200000	9150	917,4	283,7	76,4	23,6	62,1	37,9
SS5020	1281,1	2900	19600	200000	21025	749,0	532,1	58,5	41,5		
SS5030	1523,8	2900	19600	200000	27900	784,3	739,5	51,5	48,5		
SS8000	1551,2	4544	0	200000	0	1551,2	0,0	100,0	-	100,0	0,0
SS8010	1651,9	4544	17956	200000	9150	1399,0	252,9	84,7	15,3	73,3	26,7
SS8020	1651,9	4544	17956	200000	21025	1167,1	484,8	70,7	29,3		
SS8030	1704,6	4544	17956	200000	27900	1098,8	605,7	64,5	35,5		
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)										54,3	45,7

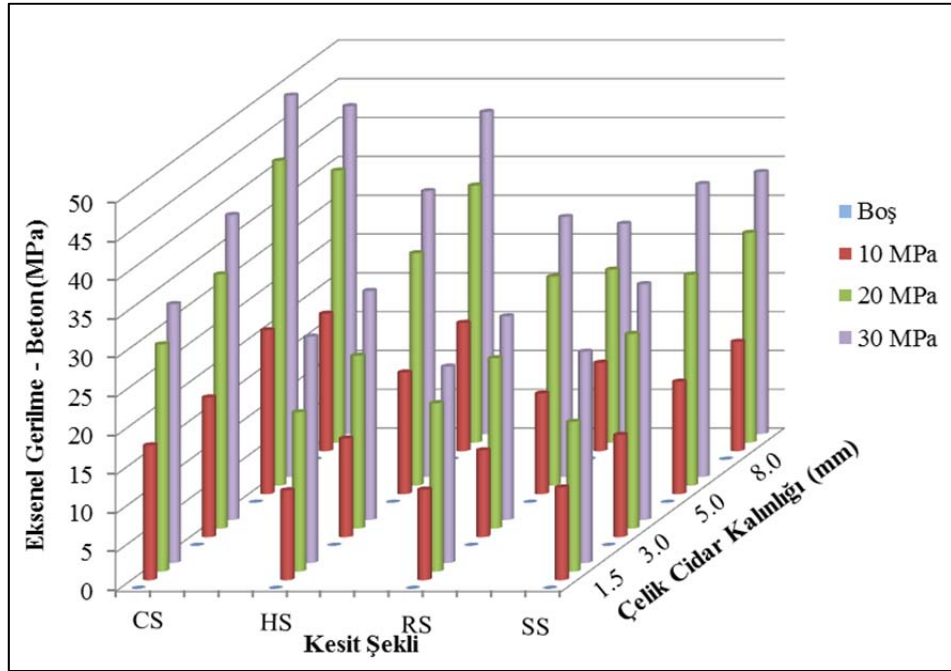
Çizelge 6.3'te deney sonuçlarına bağlı olarak çelik ve beton elemanlar üzerindeki eksenel gerilme değerleri verilmiştir. Kompozit kesitteki çelik cidar kalınlığı değişkeninin artması ile hem çelik hem de beton elemanlarda eksenel gerilme değerleri artmıştır. Çekirdek beton alanının azalmasına rağmen gerilme değeri artışının, çelikteki cidar kalınlığı artışının sargı etkisini de arttırması ile gerçekleştiği düşünülmektedir. En yüksek eksenel gerilme değerleri sargı etkisine bağlı olarak daire numunelerde görülmüştür. Beton basınç dayanımının artması ile çelik tüp üzerindeki gerilme değeri düşerek, çekirdek beton üzerindeki gerilme değeri artmıştır. Şekil 6.6'da çelik eleman, Şekil 6.7'de beton eleman için eksenel gerilme değerleri ayrı ayrı verilmiştir.

Çizelge 6.3. CFST numunelerde çelik ve beton elemanlara gelen eksenel gerilme değerleri

Numune Adı	Eksenel Gerilme (MPa)		Ortalama (MPa) (Cidar Kalınlığına Göre)		Numune Adı	Eksenel Gerilme (MPa)		Ortalama (MPa) (Cidar Kalınlığına Göre)	
	Çelik	Beton	Çelik	Beton		Çelik	Beton	Çelik	Beton
CS1500	287,8	-	287,8	-	RS1500	101,9	-	101,9	-
CS1510	379,5	17,4	298,9	26,6	RS1510	255,1	11,7	214,2	19,5
CS1520	278,3	29,3			RS1520	206,2	21,7		
CS1530	238,9	33,3			RS1530	181,3	25,3		
CS3000	259,5	-	259,5	-	RS3000	163,2	-	163,2	-
CS3010	393,1	18,0	328,7	30,0	RS3010	244,4	11,2	213,7	19,8
CS3020	311,3	32,7			RS3020	208,6	21,9		
CS3030	281,5	39,3			RS3030	187,9	26,2		
CS5000	392,9	-	392,9	-	RS5000	298,7	-	298,7	-
CS5010	461,6	21,1	403,8	37,3	RS5010	283,3	13,0	259,7	24,4
CS5020	397,6	41,8			RS5020	255,7	26,9		
CS5030	352,0	49,1			RS5030	240,1	33,5		
CS8000	340,5	-	340,5	-	RS8000	305,0	-	305,0	-
CS8010	386,9	17,7	340,9	31,6	RS8010	248,5	11,4	218,1	20,2
CS8020	333,1	35,0			RS8020	211,8	22,3		
CS8030	302,6	42,2			RS8030	194,0	27,1		
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)			343,0	31,4	Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)			226,4	21,0
HS1500	328,5	-	328,5	-	SS1500	116,8	-	116,8	-
HS1510	252,6	11,6	218,9	20,4	SS1510	260,8	11,9	213,1	19,5
HS1520	195,1	20,5			SS1520	183,5	19,3		
HS1530	208,9	29,1			SS1530	195,0	27,2		
HS3000	240,3	-	240,3	-	SS3000	190,9	-	190,9	-
HS3010	277,6	12,7	233,6	21,5	SS3010	287,6	13,2	247,9	22,9
HS3020	211,7	22,3			SS3020	238,4	25,1		
HS3030	211,4	29,5			SS3030	217,7	30,4		
HS5000	324,4	-	324,4	-	SS5000	273,0	-	273,0	-
HS5010	342,5	15,7	297,0	27,5	SS5010	316,3	14,5	281,7	26,5
HS5020	284,6	29,9			SS5020	258,3	27,1		
HS5030	264,0	36,8			SS5030	270,5	37,7		
HS8000	380,3	-	380,3	-	SS8000	341,4	-	341,4	-
HS8010	360,9	16,5	324,3	30,4	SS8010	307,9	14,1	268,8	24,9
HS8020	314,7	33,1			SS8020	256,8	27,0		
HS8030	297,3	41,5			SS8030	241,8	33,7		
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)			268,5	24,9	Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)			252,9	23,4

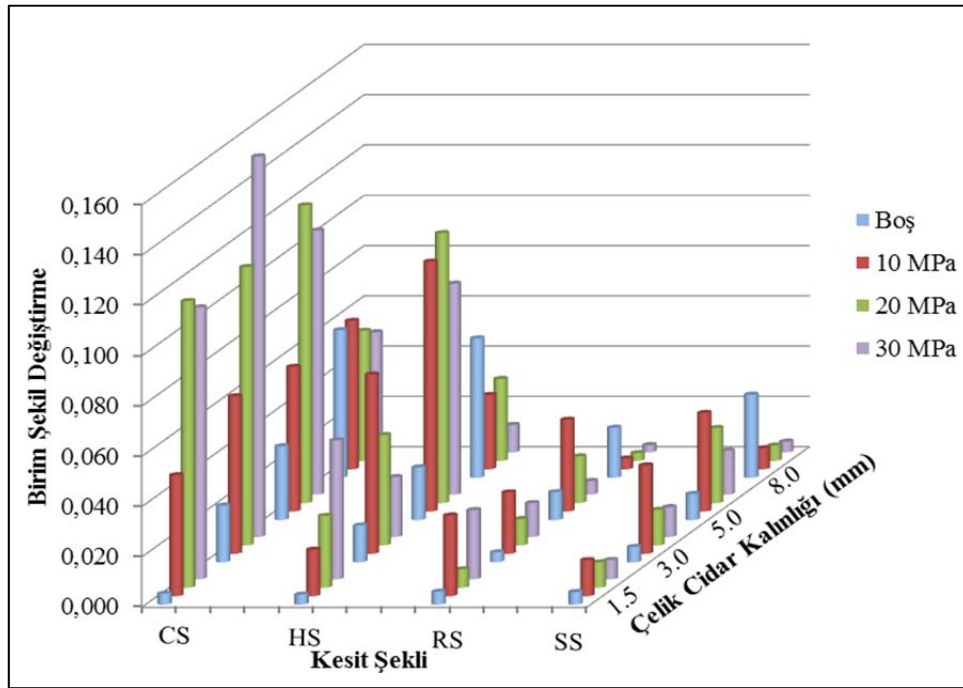


Şekil 6.6. CFST numunelerde çelik tüp üzerindeki eksenel gerilme değerlerinin çelik cidar kalınlığı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli parametrelerine bağlı değişimi



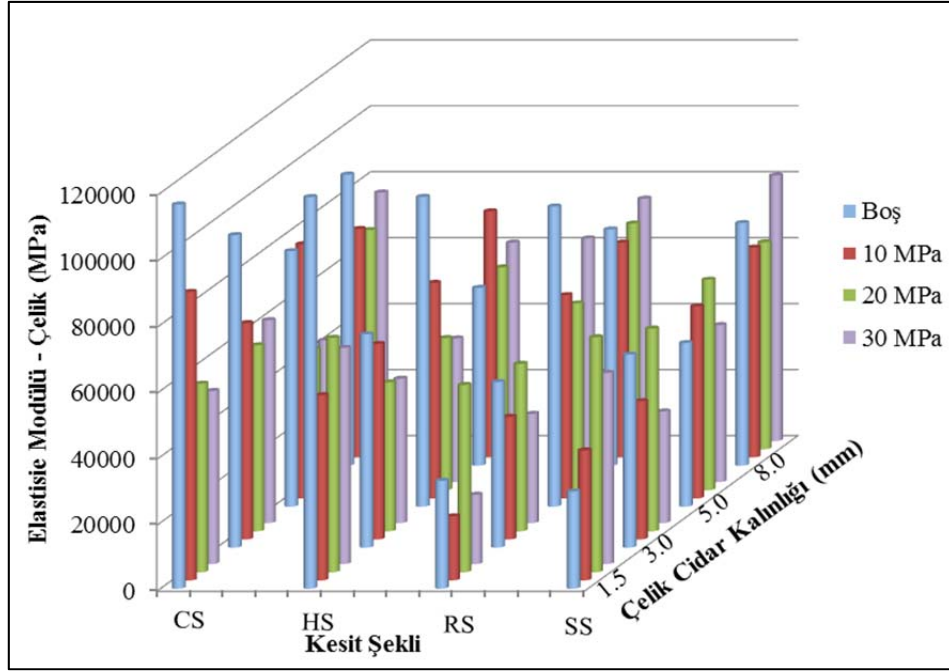
Şekil 6.7. CFST numunelerde çekirdek beton üzerindeki eksenel gerilme değerlerinin çelik cidar kalınlığı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli parametrelerine bağlı değişimi

Şekil 6.8’de verilen birim şekil değiştirme değerleri karşılaştırıldığında en yüksek birim şekil değiştirme sargı etkisine bağlı olarak dairesel kesitlerde meydana geldiği görülmektedir. Yine aynı şekil de geometrik açıdan benzerlik gösteren altıgen kesitlerde de kare ve dikdörtgen kesitlere oranla daha yüksek birim şekil değiştirmeler meydana gelmiştir. Genel olarak beton basınç dayanımının artması ile çelik tüpün içeri doğru burkulması engellendiğinden birim şekil değiştirme değerleri artmıştır. Çelik cidar kalınlığının artmasına bağlı olarak kesitteki sünek malzeme oranı da arttığından birim şekil değiştirme değerleri artmıştır. 8 mm cidar kalınlığındaki numuneler kendi içerisinde değerlendirilmiştir.

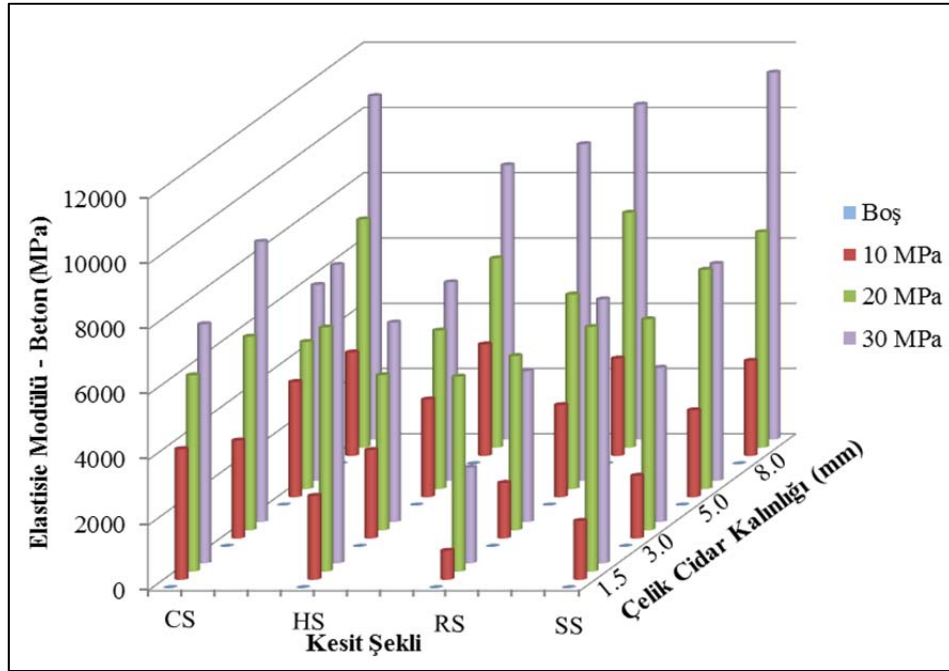


Şekil 6.8. CFST numunelerde birim şekil değiştirme değerlerinin çelik cidar kalınlığı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli parametrelerine bağlı değişimi

Şekil 6.9 ve 6.10’da verilen elastisite modülü değerleri incelendiğinde; kompozit davranışa bağlı olarak (çeliğin beton üzerindeki sargı etkisi ve betonun çeliği burkulmaya karşı engellemesi dikkate alındığında) çelik tüp ve çekirdek betonun standart elastisite modülü değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.9. CFST numunelerde çelik tüp elastisite modülü değerlerinin çelik cidar kalınlığı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli parametrelerine bağlı değişimi

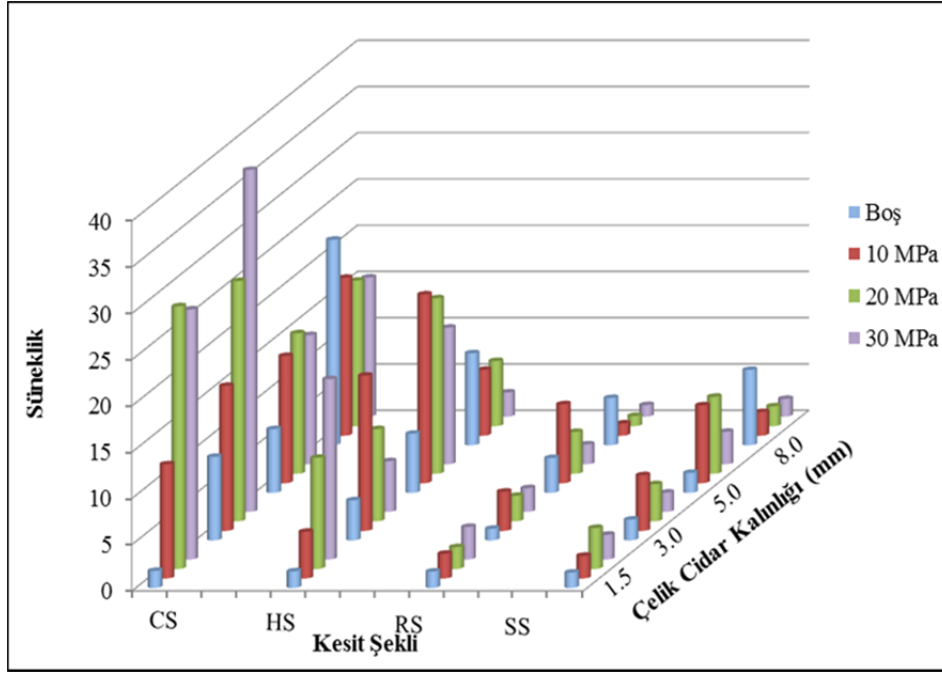


Şekil 6.10. CFST numunelerde beton çekirdek elastisite modülü değerlerinin çelik cidar kalınlığı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli parametrelerine bağlı değişimi

Çizelge 6.4'te verilen süneklik değerleri incelendiğinde; en yüksek süneklik gösteren kesitin daire kesit olduğu görülmektedir. Daha sonra ise benzer kesit özelliği gösteren altıgen kesit gelmektedir. Tüm beton dolu numuneler boş numunelere göre daha sünek davranış göstermiştir. Şekil 6.11'de ise karşılaştırmalı süneklik değerleri verilmiştir. Boş numuneler CFST ortalamalarına katılmayıp kendi içerisinde değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.4. CFST numunelerin süneklik değerleri

Numune Adı	μ	Ortalama (Cidar Kalınlığına Göre)	Numune Adı	μ	Ortalama (Cidar Kalınlığına Göre)
CS1500	1,8	1,8	RS1500	1,8	1,8
CS1510	12,3	22,6	RS1510	2,7	2,8
CS1520	28,4		RS1520	2,4	
CS1530	27,0		RS1530	3,5	
CS3000	9,0	9,0	RS3000	1,3	1,3
CS3010	15,7	26,2	RS3010	4,2	3,2
CS3020	26,0		RS3020	2,8	
CS3030	37,0		RS3030	2,6	
CS5000	6,9	6,9	RS5000	3,7	3,7
CS5010	13,8	14,3	RS5010	8,5	5,1
CS5020	15,2		RS5020	4,5	
CS5030	14,0		RS5030	2,1	
CS8000	22,2	22,2	RS8000	5,1	5,1
CS8010	17,1	15,9	RS8010	1,3	1,2
CS8020	15,7		RS8020	1,1	
CS8030	15,0		RS8030	1,2	
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)		19,8	Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)		3,1
HS1500	1,8	1,8	SS1500	1,7	1,7
HS1510	5,0	12,2	SS1510	2,4	3,2
HS1520	12,0		SS1520	4,4	
HS1530	19,5		SS1530	2,7	
HS3000	4,3	4,3	SS3000	2,2	2,2
HS3010	16,8	10,7	SS3010	6,0	4,0
HS3020	10,0		SS3020	4,0	
HS3030	5,5		SS3030	2,1	
HS5000	6,4	6,4	SS5000	2,1	2,1
HS5010	20,4	18,0	SS5010	8,4	6,7
HS5020	19,0		SS5020	8,3	
HS5030	14,8		SS5030	3,5	
HS8000	9,9	9,9	SS8000	8,1	8,1
HS8010	7,1	5,6	SS8010	2,6	2,2
HS8020	7,0		SS8020	2,1	
HS8030	2,6		SS8030	1,9	
Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)		11,6	Ortalama (Kesit Geometrik Şekline Göre)		4,0



Şekil 6.11. CFST numunelerde süneklik değerlerinin çelik cidar kalınlığı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli parametrelerine bağlı değişimi

CFST deneyleri sonucunda kompozit numuneler ortadan ikiye kesilerek düşey doğrultudaki kesitleri incelenmiştir. Şekil 6.12’de görüldüğü gibi 1.50 mm ve 3.00 mm cidar kalınlığında sahip dairesel ve altıgen kesitler ile tüm kare ve dikdörtgen kesitlerde, çelik tüpte betondan bağımsız olarak yerel burkulmaların gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 6.13’te ise 5.00 mm ve 8.00 mm cidar kalınlığına kompozit numunelerde ise beton basınç dayanımından bağımsız olarak, çelik tüpte yerel burkulmaların gerçekleştiği kısımlara çekirdek betonunun girdiği ve birlikte hareket ettikleri gözlemlenmiştir. Betonun bu şekilde davranmasının çeliğin sargı etkisinden, kompozit kesitin yüksek derecede deformasyon göstermesinden ve malzeme kusurlarına bağlı simetrik olmayan deformasyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Numuneler kesildikten sonra çelik tüp çekirdek betonunun dış çevre ile olan bağlantısını kestiğinden, betonun halen nemli olduğu gözlenmiştir. Ayrıca betonun nemli olmasının da çelik ve betonun birlikte hareket etmesinde rol oynadığı düşünülmektedir. Fakat çeliğin sağladığı sargı etkisinden dolayı bu sorun önem arz etmemektedir.



Şekil 6.12. 1.50 mm ve 3.00 mm cidar kalınlığına sahip daire, altıgen kesitler ile tüm dikdörtgen ve kare kesitlerde çelik tüpün betondan bağımsız gösterdiği burkulma davranışı



Şekil 6.13. 5.00 mm ve 8.00 mm cidar kalınlığına sahip daire ile altıgen kesitlerde çelik tüpün betonla birlikte gösterdiği burkulma davranışı

Sonuç olarak, aksenal yük altındaki CFST kısa kolonlarda tüm numunelerde beton çekirdek çelik tüpün içeri doğru bulkulmasını engellemekte ve aynı anda çelik tüp beton çekirdeğe sargı etkisi sağlamaktadır. Sadece beton veya sadece çelik boş kesitler ile karşılaştırıldığında, tüm CFST numunelerde maksimum aksenal yük, deformasyon, birim şekil değiştirme ve süneklik değerleri artmıştır. Daire kesitlerde sargı etkisi yatay kesite paralel tüm doğrultularda geçerli olduğundan dolayı en yüksek süneklik değeri görülmüştür. Kare ve dikdörtgen kesitlere göre daha yüksek süneklik görülmektedir. Diğer yandan kare ve dikdörtgen kesitler daire ve kare kesitlere göre, kesitlerdeki çelik alanının daha fazla olmasına bağlı olarak, daha yüksek aksenal yük değerleri

taşıyabilmektedir. Deney sonuçlarına göre CFST numunelerin ortalama maksimum yük değerleri, çekirdek beton ve çelik tüp dayanımlarının toplamından daire kesitlerde %54.3, altıgen kesitlerde %41.4, dikdörtgen kesitlerde %59.1 ve kare kesitlerde %58.9 oranında arttığı görülmüştür.

İşçilik, zaman ve maliyetten kazanç sağlayan CFST yapı elemanlarının bireysel ve çerçeve sistemlerde, farklı yük kombinasyonları altındaki davranışlarının ayrıntılı biçimde incelenmesinin ardından, yeni nesil kalıcı bir yapı sistemi olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Karaduman, M., *Çelik Yapılar*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2010.
- [2] Sharp, D., 19th. Century Architecture, ed. Alan Blanc, Michael Mc Evoy, Roger Plank , *Architecture and Construction in Steel*, F & FN Spon, London, 1993.
- [3] Erşen, N., *Çelik Yapılar ve Çözümlemiş Problemler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [4] Eren, Ö., *Çelik Yapılar Tasarım Konstrüksiyon Uygulama*, Arı Sanat Yayınları, İstanbul, 2007.
- [5] Lam, D., Ang, T.C., Chiew S.P., *Newnes Çelik Yapılar Sınır Değer Teorisine Dönük Tasarım*, Birleşim Yayıncılık, İstanbul, 2005.
- [6] Davison, B., Owens, G.W., *Steel Designers' Manuel*, Blackwell Publishing, New Delhi, 2008.
- [7] Al Nageim, H. K., MacGinley T. J., *Steel Structures, Practical Design Studies Third Edition*, Spon Press, Liverpool John Moores University, 2005.
- [8] Bresler, B., Lin, T. Y., *Design of Steel Structures*, John Wiley & Sons Inc. Publishers, Canada, 1968.
- [9] Celep, Z., Kumbasar, N., *Betonarme Yapılar*, Beta Dağıtım, İstanbul , 2005.
- [10] Hu, H.T., Huang, C.S., Wu, M.H., Wu, Y.M., “Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect”, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1329, 2003.
- [11] Yang, D., Hancock, G.J, Rasmussen, K.J.R, “Compression Tests of Cold-Reduced High Strength Steel Sections. II: Long Columns”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1789, 2004.
- [12] Yan, J., Young B., “Column Tests of Cold-Formed Steel Channels with Complex Stiffeners”, *Journal of Structural Engineering*, 745, 2002.
- [13] Zhang, Z.G., “Analysis of Mechanism and Load-Bearing Capacity of Square Concrete-Filled Steel Under Axial Load”, *China Ind Constr*, 2-8, 1989.
- [14] Knowles, R.B., Park, R., “Strength of Concrete-Filled Steel Tubular Columns”, *J Struct Div, ASCE*, 2565-87, 1969.

- [15] Tomii, M., Yoshimura, K., Morishita, Y., “Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns Under Concentric Loading”, Proc, Int. Colloquium Stability of Struct. Under Static and Dynamic Loads, 718-41, 1977.
- [16] Schneider, S.P.; “Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes”, Journal of Structural Engineering ,1125-38, 1998.
- [17] Goggins, J.M., Broderick, B.M., Elghazouli A.Y., Lucas A.S., “Experimental Cyclic Response of Cold-Formed Hollow Steel Bracing Members”, Engineering Structures, 977-989, 2005.
- [18] Broderick, B.M., Goggins, J.M., Elghazouli, A.Y., “Cyclic Performance of Steel and Composite Bracing Members”, Journal of Constructional Steel Research, 493-514, 2005.
- [19] Hu, H.T., Huangb, C.S., Liang, Z., “Finite Element Analysis of CFT Columns Subjected to an Axial Compressive Force and Bending Moment in Combination”, Journal of Constructional Steel Research, 1692-1712, 2005.
- [20] Elchalakani, M., Zhao, X.L., Grzebieta, R., “Bending Tests to Determine Slenderness Limits for Cold-Formed Circular Hollow Sections”, Journal of Constructional Steel Research, 1407-1430, 2002.
- [21] Wilkinson, T., Hancock, G., “Predicting The Rotation Capacity of Cold-Formed RHS Beams Using Finite Element Analysis”, Journal of Constructional Steel Research, 1455-1471, 2002.
- [22] Elchalakani, M., Zhao, X.L., Grzebieta, R., “Cyclic Bending Tests to Determine Fully Ductile Section Slenderness Limits for Cold-Formed Circular Hollow Sections”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1010, 2004.
- [23] Tremblay, R., Archambault, M.H., Filiatrault, A., “Seismic Response of Concentrically Braced Steel Frames Made with Rectangular Hollow Bracing Members”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1626, 2003.
- [24] Elchalakani, M., Zhao, X.L., Grzebieta, R., “Tests of Cold-Formed Circular Tubular Braces under Cyclic Axial Loading”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 507, 2003.

- [25] Narayanan, S., Mahendran, M., “Ultimate Capacity of Innovative Cold-Formed Steel Columns”; *Journal of Constructional Steel Research*, 489-508, 2003.
- [26] Young, B., Ellobody, E., “Experimental Investigation of Concrete-Filled Cold-Formed High Strength Stainless Steel Tube Columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 484-92, 2006.
- [27] Cai, J., He, Z.Q., “Axial Load Behavior of Square CFT Stub Column With Binding Bars, *Journal of Constructional Steel Research*”, 472-483, 2006.
- [28] Li, X.L., Yu, Y., “Study on Behavior of Square Concrete-Filled Steel Under Axial Load Experiment”, *China Build Struct*, 41-3, 1999.
- [29] Ge, H.B., Usami, T., “Strength of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Box Column Experiment”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 3036-54, 1992.
- [30] Lue, D.M., Liu, J.L., Yen, T., “Experimental Study on Rectangular CFT Columns With High-Strength Concrete”, *Journal of Constructional Steel Research*, 37-44, 2007.
- [31] Kenny, J.R., Bruce, D.A., Bjorhovde, R., “Removal of Yield Stress Limitation for Composite Tubular Columns”, *Engineering Journal, AISC*, 1-11, 1994.
- [32] Han, L.H., “Tests on Stub Columns of Concrete-Filled RHS Sections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 353-72, 2002
- [33] Mursi, M., Uy., B. “Strength of Concrete Filled Steel Box Columns Incorporating Interaction Buckling”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 626-39, 2003.
- [34] Liu, D., Gho, W.M., Yuan, J., “Ultimate Capacity of High-Strength Rectangular Concrete-Filled Steel Hollow Section Stub Columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 1499-515, 2003.
- [35] Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S., Nishiyama, I., “Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 180-8, 2004.

- [36] Liu, D., “Tests on High-Strength Rectangular Concrete-Filled Steel Hollow Section Tube Columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 902-11, 2005.
- [37] Chitawadagi, M.V., Narasimhan, M.C., Kulkarni, S.M., “Axial Strength of Circular Concrete-Filled Steel Tube Columns - DOE approach”, *Journal of Constructional Steel Research*, 1248-1260, 2010.
- [38] Ramana, G.S., Devadas, M.P., “Experimental Behaviour of Eccentrically Loaded Slender Circular Hollow Steel Columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 513-20, 2006.
- [39] Khandaker, A.H., “Axial Load Behavior of Thin Walled Composite Columns”, *Composites: Part B*, 715-25, 2003.
- [40] Gupta, P.K., Sarda, S.M., Kumar, M.S., “Experimental and Computational Study of Concrete Filled Steel Tubular Columns Under Axial Loads”, *Journal of Constructional Steel Research*, 182-93, 2007.
- [41] O'Shea, M.D., Bridge, R.Q., “Design of Circular Thin-Walled Concrete Filled Steel Tubes”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1295-303, 2000.
- [42] Fujimoto, T., Mukai, A., Nishiyama, I., Sakino, K., “Behavior of Eccentrically Loaded Concrete-Filled Steel Tubular Columns”, *Journal of Structural Engineering*, 203-12, 2004.
- [43] Giakoumelis, G., Lam, D., “Axial Capacity of Circular Concrete-Filled Tube Columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 1049-68, 2004.
- [44] Choi, Y.H., Kang, S.K., Sung-Mo, C., “Simplified P–M Interaction Curve for Square Steel Tube Filled With High-Strength Concrete”, *Thin-Walled Structures*, 506-515, 2008.
- [45] Zaharia, R., Dubina, D., “Stiffness of Joints in Bolted Connected Cold-Formed Steel Trusses”, *Journal of Constructional Steel Research*, 240–249, 2006.
- [46] Hancock, G.J., “Cold-Formed Steel Structures”, *Journal of Constructional Steel Research*, 473-487, 2003.

- [47] Elremaily, A., Azizinamini, A., “Experimental Behavior of Steel Beam to CFT Column Connections”, Journal of Constructional Steel Research, 1099-1119, 2001.
- [48] FEMA356, *Prestandarts and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Virginia, 2000