



**Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazların Geliştirilmesi Ve  
Betonarme Binaların Depreme Karşı Güçlendirilmesinde  
Kullanımının Araştırılması**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 112M820**

Proje Yürütücüsü:  
**Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK**

Mayıs 2016  
ANTALYA



## ÖNSÖZ

112M820 numaralı ve Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazların Geliştirilmesi ve Betonarme Binaların Depreme Karşı Güçlendirilmesinde Kullanımının Araştırılması isimli proje TÜBİTAK tarafından 219.500 TL ile desteklenmiştir. Bu proje 15.03.2013 tarihinde başlamış ve 15.03.2016 tarihinde başarıyla tamamlanmıştır. Bu proje ekibinde Prof. Dr. Barış BİNİCİ danışman, Prof. Dr. Cem TOPKAYA araştırmacı, Yağmur DİKİCİAŞIK, Elif Firuze ERDİL ve Kazım Burc CİVELEK bursiyer doktora öğrencisi olarak görev almışlardır. Bu projeden 2 adet hakemli uluslararası, 3 adet hakemli ulusal konferans makalesi basılmıştır. Ayrıca 2 adet makale hakemli uluslararası konferansda kabul almış, 3 uluslararası dergi makalesi üzerinde de çalışılmaktadır. Bu proje kapsamında Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarında eleman bazında toplam 22 adet Burkulması Engellenmiş Çelik Çapraz (BEÇÇ) deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yine Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarında üretilen 6 adet BEÇÇ elemanı Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı ve Deprem Laboratuvarında üretilen 3 açıklık ve 3 katlı betonarme çerçeveye güçlendirme amaçlı monte edilmiş ve BEÇÇ'li çerçeve dinamik benzeri yükleme altında test edilmiştir. Eleman bazında yapılan BEÇÇ deneylerinde BEÇÇ'leri oluşturan Burkulmayı Engelleyen Mekanizma (BEM), izolasyon malzemesi ve kalınlığı araştırılmıştır. BEÇÇ'ler kullanılarak yetersiz betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın yanında gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar neticesinde BEÇÇ'li yapıların performans kriterleri irdelenmiş ve BEÇÇ ile güçlendirmede tasarımların hangi koşullar altında yapılabileceği belirlenmiştir. BEÇÇ ve BEÇÇ ile güçlendirmeye ilişkin tasarım öneriler getirilmiştir.



## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLolar.....	iv
ŞEKİLLER.....	v
ÖZET.....	xI
ABSTRACT.....	xII
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. BEÇÇ'lerin Geliştirilmesi Ve Çeşitleri .....	3
1.2. BEÇÇ'lerin Eleman ve Çerçeve Benzeri Sistem Bazında Davranışı .....	4
1.3. BEÇÇ'lerin Çerçeve Sistemi İçerisindeki Deneyleri.....	16
<b>2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>21</b>
2.1. ELEMEN BAZINDA YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA.....	21
2.2. 1. Grup BEÇÇ Elemanları .....	26
2.3. 2. Grup BEÇÇ Elemanları .....	41
2.4. 3. Grup BEÇÇ Elemanları .....	46
2.5. Yükleme Protokolü .....	56
2.6. Deney Sonuçları ve Gözlemler .....	59
2.6.1. 1. Grup BEÇÇ Elemanlarına ait Deney Sonuçları ve Gözlemler.....	59
2.6.2. 2. Grup BEÇÇ Elemanlarına ait Deney Sonuçları ve Gözlemler.....	82
2.6.3. 3. Grup BEÇÇ Elemanlarına ait Deney Sonuçları ve Gözlemler.....	89
<b>3. DİNAMİK BENZERİ DENEYLER .....</b>	<b>104</b>
3.1. GİRİŞ.....	104
3.2. DENEY DÜZENEGİ.....	104



<b>3.3.</b>	<b>REFERANS ÇERÇEVESİ.....</b>	<b>111</b>
<b>3.4.</b>	<b>GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇERÇEVELER.....</b>	<b>111</b>
3.4.1.	GİRİŞ.....	111
3.4.2.	BEÇÇ'ler İLE GÜÇLENDİRME.....	112
3.4.3.	DENEYSEL YÖNTEM.....	121
<b>3.5.</b>	<b>DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>123</b>
3.5.1.	GİRİŞ.....	123
3.5.2.	REFERANS DENEY ELEMANI.....	124
3.5.3.	BEÇÇ'LER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DENEY ELEMANI.....	127
<b>4.</b>	<b>SAYISAL SİMULASYONLAR VE PERFORMANS İRDELEMESİ.....</b>	<b>146</b>
<b>4.1.</b>	<b>BEÇÇ ELEMANLARIN SİMULASYONLARI.....</b>	<b>146</b>
<b>4.2.</b>	<b>REFERANS VE BEÇÇ'Lİ ÇERÇEVELERİN MODELİ.....</b>	<b>147</b>
<b>4.3.</b>	<b>ANALİZ SONUÇLARI.....</b>	<b>150</b>
4.3.1.	REFERANS DENEY ELEMANI MODELİ.....	150
4.3.2.	BEÇÇ'li DENEY ELEMANI MODELİ.....	150
4.3.3.	ÖRNEK BİNA ÇALIŞMASI.....	152
4.3.2.1.	ÖRNEK BİNA YAPISAL DETAYLARI.....	152
4.3.2.2.	ÖRNEK BİNANIN BEÇÇ'LERLE GÜÇLENDİRİLMESİ.....	153
4.3.2.3.	ANALİZ VE PERFORMANS SONUÇLARI.....	155
<b>5.</b>	<b>ÖZET.....</b>	<b>162</b>
<b>5.1.</b>	<b>BEÇÇ ELEMANLARININ TARTIŞILMASI.....</b>	<b>163</b>
<b>5.2.</b>	<b>BEÇÇ'Lİ GÜÇLENDİRME SİSTEMİNİN TARTIŞILMASI.....</b>	<b>164</b>
<b>5.3.</b>	<b>BEÇÇ VE BEÇÇ'Lİ GÜÇLENDİRME SİSTEMİ İÇİN TASARIM.....</b>	<b>165</b>
5.3.1.	BEÇÇ'LERİN TASARIMI.....	165
5.3.2.	BEÇÇ'Lİ ÇERÇEVELERİN TASARIMI.....	166
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>167</b>
<b>7.</b>	<b>EKLER.....</b>	<b>171</b>



## TABLULAR

Tablo 2. 1. 1. Grup deney elemanları .....	27
Tablo 2. 2. 2. Grup BEÇÇ Elemanları.....	41
Tablo 2. 3. 3. Grup BEÇÇ Elemanları.....	47
Tablo 2. 4. Yükleme Protokolü .....	57
Tablo 2. 5. 1. Grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük değerleri.....	59
Tablo 2. 6. 2. Grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük değerleri.....	82
Tablo 2. 7. 3. Grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük değerleri.....	89
Tablo 3. 1. Max. Yer ivmeleri.....	122
Tablo 3. 2. BEÇÇ'li çerçeve deney sonucu.....	128
Tablo 3. 3. Referans (Mutlu 2012) ve BEÇÇ'li çerçevenin karşılaştırması .....	128
Tablo 5.1 Test elemanları.....	162



## ŞEKİLLER

Şekil 1.1. a; Çelik çaprazlı çerçeve, b; Çelik çaprazın histeretik davranışı ([1]'den adapte edilmiştir), c; BEÇÇ'nin histeretik davranışı ([2] 'den adapte edilmiştir). ....	1
Şekil 1.2. BEÇÇ boyutları ve en kesitleri ([3] ve [4]'den adapte edilmiştir) .....	3
Şekil 1.3. a) BEÇÇ [9], b) Prekast BEÇÇ [7] için çizim ve fotoğraf .....	3
Şekil 1.4. BEÇÇ'lerin enkesit gösterimleri. ([6]'dan ve [8]'den adapte edilmiştir) .....	4
Şekil 1.5. [11] tarafından test edilen BEÇÇ'lerin deney düzeneği, kesit görünüşleri ve histeretik (Eksenel yük-birim uzama) davranışları. ([11]'den adapte edilmiştir).....	6
Şekil 1.6. a)Deney düzeneği, Eksenel yük-eksenel deformasyon grafiği, b) Deney elemanı T-1, c) Deney elemanı specimen 00-12. ( [2] ve [12]'den abapte edilmiştir).....	6
Şekil 1.7. a) Deney düzeneği, b) BEÇÇ'nin boyutları, ÇE ve ek plakalar, c) A-A enkesit gösterimi, d) B-B en kesit gösterimi, e) BEÇÇ'nin uç detayı, f) Deney elemanı BIB-L1'nin histeretik davranışı ([13]'den adapte edilmiştir.).....	8
Şekil 1.8. a) SPÇ test elemanı Tip 1, b) SPÇ test elemanı Tip 2, c) SPÇ kesit görünümü, d) Test elemanı Tip 2'nin histeretik davranışı. ([15]'den adapte edilmiştir.).....	9
Şekil 1.9. a) BEÇÇ, b) BEÇÇ'nin enkesit gösterimi, c) Deney elemanı Specimen B7-R5B-L3'e ait histeretik davranış. ([16]'dan adapte edilmiştir). ....	9
Şekil 1.10. a) BEÇÇ'nin kısımları, b) Deney elemanın (T2_420SN_A) histeretik davranışı, c) BEÇÇ'nin enkesitleri, d) Test çerçevesi, e) BEÇÇ'nin bağlantı detayı, f) Deprem kaydı altında histeretik davranışı, g) Statik yük protokolü, h) Statik yük altında histeretik davranış, i) BEÇÇ'de burkulma ([17]'den adapte edilmiştir.).....	11
Şekil 1.11. a) Test çerçevesi, b) BEÇÇ ve c)BEÇÇ enkesit gösterimi, d) Normalize edilmiş yatay yük-yatay deplasman grafiği, d) Boru profil üzerinde ölçülen yük ve deplasman ([18]'den adapte edilmiştir). ....	12
Şekil 1.12. a) Beton-boru profilden oluşan BEM'li BEÇÇ'lar, b) Plaka-kutu profilden oluşan BEM'li BEÇÇ, c) BEÇÇ'lerin ÇE boyutları ([19]'dan adapte edilmiştir. ....	13
Şekil 1.13 a) C1-1'in histeretik davranışları, b) C1-1 boru profildeki aksenal yük değişimi, c) S1-1 ve S2-1'nin histeretik davranışları ([19]'dan adapte edilmiştir.).....	14
Şekil 1.14. a) Test çerçevesi, b) Test 1 fotoğraf, c) Test 2 ve 3 fotoğraf, d) Test 1 için histeretik davranış, e) Test 2 için histeretik davranış f) Test 1, bayrak levhası ve sol kolon üst birleşiminde yırtılma, g) Test 2, Üst sol bayrak levhasında burkulma, h) Test 3, sol-üst düğüm noktasında kiriş alt başlığında yırtılma, i) Test 3, Üst-sol düğüm noktasında dönme [20, 21 ve 22]. ....	15
Şekil 1.15. a) Deney düzeneği ve BEÇÇ enkesitleri, b) Deney 1 ve c) Deney 3 için histeretik davranış ([23]'den adapte edilmiştir.).....	15

Şekil 1.16. a) Çerçevenin analitik gösterimi, b) BEÇÇ'nin testten önceki durumu, c) Reference BRB'nin histeretik davranışı, d) ve e) Test esnasında BEÇÇ'nin belirtilen uçlarda kayması, e) BEÇÇ'nin uç kısmında plastikleşme ve dönme ([25]'den adapte edilmiştir.).....	17
Şekil 1.17. a)Deney çerçevesinin plan görünümü, b)Deney çerçevesinin fotoğrafı, c)Deneyde kullanılan BEÇÇ'ler, d-k)Deney esnasında gözlenen deformasyonlar ve bayrak levhasına eklenen plakalar ([26]'dan ve [27]'den adapte edilmiştir). .....	19
Şekil 1.18. Bayrak levhasındaki kuvvetler ([26]'dan adapte edilmiştir.).....	20
Şekil 1.19. a) Bayrak levhası ve ek plakalar, b) Deney çerçevesi çizimi, c) Deney çerçevesi yükleme yönleri ([32]'den adapte edilmiştir.).....	20
Şekil 1.20. a) Deney çerçevesi çizimi, b) Bağlantı detayı 1, c) Bağlantı detayı 2 ([33]'den adapte edilmiştir).....	21
Şekil 2.1. Bu rapor kapsamında test edilen BEÇÇ boyu, plaka kalınlığı=15mm .....	24
Şekil 2.2. Bu rapor kapsamında test edilen BEÇÇ'nin çelik çerçeve içerisine yerleştirilmesi	24
Şekil 2.3. Deneysel çalışmanın yapılacağı Yapı Laboratuvarı.....	25
Şekil 2.4. Deney düzeneğine ait detay çizimler.....	25
Şekil 2.5. Deney düzeneğine ait detay fotoğraflar .....	26
Şekil 2.6. 1. BEÇÇ_1 elemanı detay çizimleri.....	29
Şekil 2.7. 1. BEÇÇ_1 üretim süreci .....	29
Şekil 2.8. 10.9 M24 bulon sıkma kalibrasyonu için deney düzeneği.....	31
Şekil 2.9. BEÇÇ ve deney düzeneği bağlantısı.....	31
Şekil 2.10. 2. BEÇÇ_1 elemanı detay çizimleri.....	32
Şekil 2.11. 2. BEÇÇ_1 elemanı üretim aşaması.....	33
Şekil 2.12. 4. BEÇÇ_1 elemanı detay çizimleri.....	34
Şekil 2.13. 4. BEÇÇ_1 elemanı üretim aşaması.....	34
Şekil 2.14. 5. BEÇÇ_1 elemanı detay çizimleri.....	35
Şekil 2.15. 5. BEÇÇ_1 elemanı yapım detayı.....	36
Şekil 2.16. 7. BEÇÇ_1 elemanı detay çizimleri.....	37
Şekil 2.17. 7. BEÇÇ_1 eleman yapım detayı.....	38
Şekil 2.18. 8. BEÇÇ_1 elemanı detay çizimleri.....	39
Şekil 2.19. 8. BEÇÇ_1 eleman yapım detayı.....	39
Şekil 2.20. 9. BEÇÇ_1 elemanı detay çizimleri.....	40
Şekil 2.21. 9. BEÇÇ_1 eleman yapım detayı.....	41
Şekil 2.22. 1. BEÇÇ_2 elemanı detay çizimleri.....	42
Şekil 2.23. 1. BEÇÇ_2 eleman yapım detayı.....	42
Şekil 2.24. 1. BEÇÇ_2 elemanı detay çizimleri.....	45
Şekil 2.25. 1. BEÇÇ_2 eleman yapım detayı.....	45
Şekil 2.26. 2. BEÇÇ_2 elemanı detay çizimleri.....	46



Şekil 2.27. 2. BEÇÇ_2 eleman yapım detayı .....	46
Şekil 2.28. 1. BEÇÇ_3 elemanı detay çizimleri.....	48
Şekil 2.29. 1. BEÇÇ_3 eleman yapım detayı .....	48
Şekil 2.30. BEÇÇ için çerçeve yapımı ve PP'lerin birleştirilmesi .....	49
Şekil 2.31. 2. BEÇÇ_3 elemanı detay çizimleri.....	50
Şekil 2.32. 2. BEÇÇ_3 eleman yapım detayı .....	50
Şekil 2.33. 3. BEÇÇ_3 elemanı detay çizimleri.....	51
Şekil 2.34. 3. BEÇÇ_3 eleman yapım detayı .....	51
Şekil 2.35. 4. BEÇÇ_3 elemanı detay çizimleri.....	52
Şekil 2.36. 4. BEÇÇ_3 eleman yapım detayı .....	52
Şekil 2.37. 5. BEÇÇ_3 elemanı detay çizimleri.....	53
Şekil 2.38. 5. BEÇÇ_3 eleman yapım detayı .....	53
Şekil 2.39. 6. BEÇÇ_3 elemanı detay çizimleri.....	54
Şekil 2.40. 6. BEÇÇ_3 eleman yapım detayı .....	54
Şekil 2.41. 7. BEÇÇ_3 elemanı detay çizimleri.....	55
Şekil 2.42. 7. BEÇÇ_3 eleman yapım detayı .....	55
Şekil 2.43. Yükleme protokolü (2. BEÇÇ_1).....	57
Şekil 2.44. Ölçüm sisteminin yerleştirilmesi .....	58
Şekil 2.45. 1.-10. BEÇÇ_1 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği .....	66
Şekil 2.46. 2., 3., 6., 8. ve 9. BEÇÇ_1 Elemanlarına ait yorulma testi (8. BEÇÇ_1 10 ters çevirim, diğerleri 40 ters çevirim) .....	70
Şekil 2.47. 1. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	71
Şekil 2.48. 2. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	71
Şekil 2.49. 3. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	72
Şekil 2.50. 4. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	72
Şekil 2.51. 5. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	73
Şekil 2.52. 6. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	73
Şekil 2.53. 7. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	73
Şekil 2.54. 8. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	74
Şekil 2.55. 9. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	74
Şekil 2.56. 10. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları .....	75
Şekil 2.57. 1-10. BEÇÇ_1 elemanlarındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı (Devam ediyor.) .....	76
Şekil 2.58. 1-10. BEÇÇ_1 elemanlarındaki ÇE Birim Şekil Değiştirme (Devam Ediyor).....	77
Şekil 2.59. 1-10. BEÇÇ_1 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar (Devam Ediyor).....	79
Şekil 2.60. 1.-3. BEÇÇ_2 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği .....	84





Şekil 2.61. 1. BEÇÇ_2 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	85
Şekil 2.62. 2. BEÇÇ_2 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	85
Şekil 2.63. BEÇÇ_2 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	85
Şekil 2.64. 1-3. BEÇÇ_2 elemanlarındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı.....	86
Şekil 2.65. 1-3. BEÇÇ_2 elemanlarındaki ÇE Birim Şekil Değişirme .....	87
Şekil 2.66. 1-3. BEÇÇ_2 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar.....	88
Şekil 2.67. 1.-7. BEÇÇ_3 Elemanlarına ait aksenal yük-birim şekil değişirme grafiği (Devam Ediyor).....	93
Şekil 2.68. 1. BEÇÇ_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	96
Şekil 2.69. 2. BEÇÇ_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	96
Şekil 2.70. 3. BEÇÇ_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	96
Şekil 2.71. 4. BEÇÇ_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	97
Şekil 2.72. 5. BEÇÇ_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	97
Şekil 2.73. 6. BEÇÇ_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	97
Şekil 2.74. 7. BEÇÇ_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	98
Şekil 2.75. 1-7. BEÇÇ_3 elemanlarındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı.....	99
Şekil 2.76. 1-7. BEÇÇ_3 elemanlarındaki ÇE Birim Şekil Değişirme .....	100
Şekil 2.77. 1-7. BEÇÇ_3 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar (Devam Ediyor).....	101
Şekil 3.1. Prototip Yapı ve Deney Çerçevesi Seçimi (Mutlu 2012).....	105
Şekil 3.2 Betonarme çerçeve ve kolon kiriş kesitleri .....	106
Şekil 3.3. Test çerçevesinin yapım aşaması.....	107
Şekil 3.4. Test çerçevesinin bitmiş hali, güçlendirmeye başlamadan öncesi.....	108
Şekil 3.5. Deney düzenegi.....	109
Şekil 3.6. Veri toplama sistemi ve kontrol ünitesi (ODTÜ Yapı Lab.) .....	109
Şekil 3.7. Yükleme ve ölçüm sistemi .....	110
Şekil 3.8. Referans çerçevesi (Mutlu 2012) .....	111
Şekil 3.9. Kolon dibinde bağlantı detayı.....	114
Şekil 3.10. Kiriş orta açıklığında bağlantı detayı .....	115
Şekil 3.11. Kolon-kiriş düğüm noktasında bağlantı detayı.....	116
Şekil 3.12. Bağlantı detayları.....	117
Şekil 3.13. Whitmore genişliği ( $I_w$ ) (Whitmore (1952), AISC (2005)'den alınmıştır) .....	118
Şekil 3.14. Eleman bazında test edilen BEÇÇ'ler .....	120
Şekil 3.15. Dinamik Benzeri Deney Sistemi.....	121
Şekil 3.16. Dinamik benzeri deneylerde kullanılan ivme-zaman dizisi.....	122
Şekil 3.17. Dinamik benzeri deneylerde kullanılan ve Türk Deprem Yönetmeliği (TDY 2007) ivme spektrumları .....	123



Şekil 3.18. Referans çerçevesine ait yatay yük-tepe deplasman grafiği, deney esnasında çerçevede meydana gelen hasarlar (Mutlu 2012).....	124
Şekil 3.19. Referans çerçevesinde 3. Katta meydana gelen yapısal hasarlar (Mutlu 2012)	125
Şekil 3.20. Referans çerçevesine ait GKÖO (Mutlu 2012).....	126
Şekil 3.21. Referans çerçevesine ait kat kesme kuvveti-GKÖO ve taban kesme kuvveti-tepe deplasman grafikleri (Mutlu 2012) .....	127
Şekil 3.22. 72 Z1 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri.....	131
Şekil 3.23. 475 Z1 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri.....	131
Şekil 3.24. 475 Z3 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri.....	132
Şekil 3.25. 2475 Z1 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri.....	132
Şekil 3.26. 4 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri.....	133
Şekil 3.27. 72 Z1 deprem etkisi altında görel kat ötelenme oranları (%) .....	133
Şekil 3.28. 475 Z1 deprem etkisi altında görel kat ötelenme oranları (%) .....	134
Şekil 3.29. 475 Z3 deprem etkisi altında görel kat ötelenme oranları (%) .....	134
Şekil 3.30. 2475 Z1 deprem etkisi altında görel kat ötelenme oranları (%) .....	135
Şekil 3.31. 4 deprem etkisi altında görel kat ötelenme oranları (%) .....	135
Şekil 3.32. Toplam Kesme Kuvveti – Tepe Deplasman grafikleri.....	136
Şekil 3.33. Bütün deneylerin tepe deplasman-yatay kuvvet grafiği .....	136
Şekil 3.34. 72 Z1 deprem etkisi altında 1. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme .....	137
Şekil 3.35. 475 Z1 deprem etkisi altında 1. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	137
Şekil 3.36. 475 Z3 deprem etkisi altında 1. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	138
Şekil 3.37. 2475 Z1 deprem etkisi altında 1. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	138
Şekil 3.38. 72 Z1 deprem etkisi altında 2. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme .....	139
Şekil 3.39. 475 Z1 deprem etkisi altında 2. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	139
Şekil 3.40. 475 Z3 deprem etkisi altında 2. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	140
Şekil 3.41. 2475 Z1 deprem etkisi altında 2. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	140
Şekil 3.42. 72 Z1 deprem etkisi altında 3. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme .....	141
Şekil 3.43. 475 Z1 deprem etkisi altında 3. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	141
Şekil 3.44. 475 Z3 deprem etkisi altında 3. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	142
Şekil 3.45. 2475 Z1 deprem etkisi altında 3. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme.....	142
Şekil 3.46. BEÇÇ'lere ait birim şekil değiştirme .....	143
Şekil 3.47. 1. ve 2. Katta Bulunana Yüksek Mukavemetli Bulonlarda Kayma Miktarı.....	144
Şekil 3.48. Deney esnasında meydana gelen hasar.....	145
Şekil 4.1. BEÇÇ elemanın OPENSEES programı ile simülasyonu .....	146
Şekil 4.2. Referans çerçevesinin OPENSEES modeli için eleman detayı .....	148
Şekil 4.3. Kolon ve kirişler için OPENSEES modeli .....	148
Şekil 4.4. BEÇÇ'li çerçevenin OPENSEES modeli için eleman detayı.....	149



Şekil 4.5. OPENSEES Modeli.....	149
Şekil 4.6. Referans çerçevesinin simülasyonu (yatay kuvvet – tepe deplasman).....	150
Şekil 4.7. BEÇÇ’li çerçevenin simülasyonu (yatay kuvvet – tepe deplasman) .....	151
Şekil 4.8. BEÇÇ’li çerçevenin simülasyonu (kat deplasmanları) .....	151
Şekil 4.9. İncelenen binanın kalıp planı .....	152
Şekil 4.10. OPENSEES 3 boyutlu model.....	153
Şekil 4.11. BEÇÇ’lerin yerleştirildiği akslar .....	153
Şekil 4.12. Düzce Depremi İvme Kaydı, Düzce İvme Spektrumu.....	155
Şekil 4.13. Mevcut Bina ve BEÇÇ’li binaların tepe deplasman-zaman grafiği .....	156
Şekil 4.14. Mevcut Bina ve BEÇÇ’li Binaların GKÖÖ.....	156
Şekil 4.15. BEÇÇ’lerin aksel birim uzama değerleri.....	157
Şekil 4.16. Kirişlerin performans Değerlendirmesi (Beton) .....	158
Şekil 4.17. Kirişlerin performans Değerlendirmesi (Donatı) .....	159
Şekil 4.18. Kolonların Performans Değerlendirmesi (Beton).....	160
Şekil 4.19. Kolonların Performans Değerlendirmesi (Donatı).....	161



## ÖZET

Bu çalışmada Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar (BEÇÇ'ler) ve mevcut kusurlu betonarme yapıların BEÇÇ'ler ile güçlendirilmesi, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Eleman bazında yapılan deneylerdeki BEÇÇ tasarımında Burkulmayı Engelleyen Mekanizma (BEM), izolasyon malzemesi ve kalınlığı incelenen ana parametrelerdir. BEM olarak uçları ek profil ve plaka ile güçlendirilen kutu profil+beton, sargılı ve sargısız beton, çok parçalı basınç çubuğu ve prekast paneller (PP'ler) incelenmiştir. BEM'i kutu profil+beton, sargılı beton ve stabil hale getirilen PP'lerden oluşan BEÇÇ'lerin kararlı histeretik davranışa sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bir adet ½ ölçekli 3 katlı-3açıklık kusurlu betonarme çerçeve BEÇÇ'ler ile güçlendirilmiş ve dinamik benzeri deney yöntemi ile test edilmiştir. Artan yatay istemler altında BEÇÇ'li çerçevenin BEÇÇ elemanlarının plastikleşmesi sayesinde yeterli sismik performans gösterdiği yapılan deneylerde tespit edilmiştir. BEÇÇ'li çerçeve doğrusal olmayan zaman tanım alanında yapılan analizleri ile simüle edilmiş ve performans kriterleri belirlenmiştir. Benzer şekilde, gerçek bir binanın BEÇÇ ile güçlendirilmesi ve analizleri BEÇÇ'lerin mevcut kusurlu betonarme yapıların güçlendirilmesinde alternatif bir eleman niteliğinde olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, BEÇÇ eleman ve BEÇÇ ile güçlendirme tasarımının nasıl yapılabileceği tartışılmıştır.

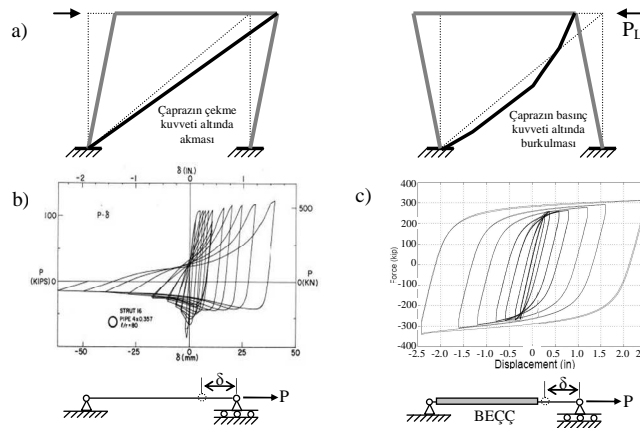


## ABSTRACT

This study investigates the buckling restrained braces (BRBs) and seismic strengthening of existing deficient reinforced concrete (RC) frames by using BRBs. Both experimental methods and nonlinear numerical simulations were employed. The main parameters investigated during the member based BRB tests were casing system, gap material and gap between core plate and casing. The steel tube filled with mortar, plain and confined concrete, built-up member and precast panels (PPs) were the main members for the casing studied. It was observed from the member based BRB tests, the BRBs whose casing consisted of steel tube filled with mortar, confined concrete and stiff precast panels (PPs) performed stable hysteretic behavior. In addition to BRB tests, a ½ scale three story three bay frame strengthened with BRBs tested with pseudo dynamic methods. The braced frame sustained sufficient seismic performance by BRB yielding under increasing lateral demands during test. Furthermore, nonlinear time history analysis was conducted for the braced frame and an existing deficient building in order to estimate limit states of members and test frames. The tests and analysis indicated that the BRB is one of the alternatives for the seismic strengthening of the deficient RC structures. Finally, the design methods for the BRB and seismic strengthening of RC structures with BRBs were recommended.

## 1. GİRİŞ

Çelik çaprazlar yapılaraya etkiyen rüzgar ve deprem kuvvetlerine karşı kullanılan yatay yük taşıyıcı elemanlardır. Bu çaprazların dizayn edilmesi esnasında karşılaşılan en büyük sıkıntılardan birisi, kullanılan çelik çaprazların yüksek deformasyon istemleri esnasında çekme ve basınç kapasitelerinin eşit olmamasıdır. Yapılarda kullanılan çelik çaprazlar genel olarak çekme deformasyonu etkisi altında plastikleşmekle (çeliğin akması) beraber, basınç deformasyonu esnasında burkulmaktadır. Çaprazların burkulmasından sonra eksenel yük taşıma kapasitelerinde büyük azalma meydana gelmektedir. Şekil 1-a'da görüldüğü gibi çelik çaprazlı çerçeveye yatay kuvvet (PL) uygulandığı zaman, çelik çapraz, uygulanan yatay deplasmana bağlı olarak eksenel çekme ve basınç yüklerine maruz kalmaktadır. Bu çaprazın eksenel çekme deformasyonu etkisiyle plastikleştiği, eksenel basınç etkisi altında ise burkulduğu görülmektedir. Şekil 1.1-b, tekil eleman bazında tekrarlanan eksenel deformasyonlar ( $\delta$ ) altında yapılan çelik çapraz deneyinden elde edilen histeretik davranışı göstermektedir. Bu şekilde de açıkça görüldüğü gibi, çelik çapraz eksenel çekme deformasyonu altında plastikleşmekte; ancak eksenel basınç deformasyonu altında burkulmakta ve çaprazın eksenel basınç kapasitesi büyük oranda azalmaktadır. Çelik çaprazların burkulmasının önlenmesi ile birlikte eksenel basınç kapasitesinin değişeceği gerçeği araştırmacıları bu konu üzerine yönlendirmiştir. Çelik çaprazın burkulmasının önlenmesi ile birlikte tekrarlanan eksenel deformasyon etkisi altındaki davranışı Şekil 1.1-c görülmektedir.



Şekil 1.1. a; Çelik çaprazlı çerçeve, b; Çelik çaprazın histeretik davranışı ([1]'den adapte edilmiştir), c; BECC'nin histeretik davranışı ([2] 'den adapte edilmiştir).

Bu şekilde de görüldüğü gibi BECC'nin eksenel çekme ve basınç deformasyonları altındaki davranışları hemen hemen eşit olmasının yanında enerji sönümlenme kapasiteleri de diğer



çelik çaprazlara göre oldukça stabil ve yüksektir. BEÇÇ'ler genel olarak Şekil 1.2'de görüldüğü gibi beş kısma ayrılmaktadır.

a) Burkulması engellenmiş plastik kısım: Bu kısım BEÇÇ'de aksenal yükün taşındığı çekirdek elamandır (ÇE). Aksenal basıç ve çekme deformasyonları esnasında plastikleşmesi beklenmektedir. Basınç durumunda yüksek burkulma modunda burkularak da aksenal yük taşıyabilmektedir. Bu kısım malzeme olarak sünek ve akma gerilmesi değeri fazla değişim göstermeyen çelikden olmalıdır.

b) Burkulması engellenmemiş elastik kısım: Bu kısım çaprazın çerçeve elemanına (bayrak levhası) bağlantısını sağlayacak şekilde tasarlanır. ÇE'nin aksenal çekme ve basınç deformasyonları altında plastikleşmesi ve pekleşmesi sırasında elastik davranış göstermektedir. Bu kısım, çelik çaprazın bayrak levhasına bağlanma özelliğine göre bulonlu, mafsallı veya kaynaklı birleşimleri sağlayacak şekilde farklı tiplerde olabilir. Şantiye ortamında çaprazın çerçeveye montajını kolaylaştıracak şekilde tasarlanır. Bu kısmın enkesit alanı ve eğilme rijitliği, ÇE'nin bu bölgede enkesit alanının artırılması veya ÇE'ye dik ek plaka eklenmesiyle daha büyüktür.

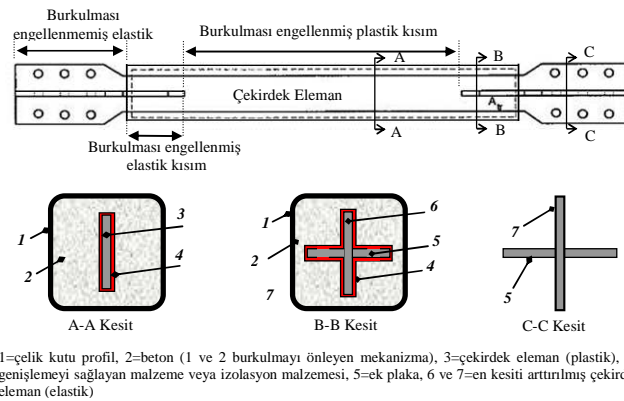
c) Burkulması engellenmiş elastik kısım: Bu kısım, çerçeveye bağlantı yapan "b" deki kısım ile plastikleşmenin olduğu ÇE arasında bir geçiş bölgesidir. Genelde ÇE'nin enkesit alanının artırılması veya ÇE'ye dik yönde ek plaka kaynatılarak elde edilir.

d) Burkulmayı engelleyen kısım (mekanizma): Bu kısım ÇE'nin burkulmasını engelleyen kısımdır. Burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) için bir çok araştırmacı tarafından farklı teknikler kullanılmıştır. Şekil 1.2 gösterilen sürtünmesiz BEÇÇ'lere bir örnek olup, BEM: çelik kutu profil ve bu profilin içine beton veya beton harcı doldurularak oluşturulmuştur. BEM ÇE'nin aksenal deformasyonları esnasında, ÇE'ye yeterli stabilite sağlamalıdır. BEM ve ÇE arasında sürtünmenin engellenmesi gerekmektedir. Bu kısım için kullanılan farklı kesit özellikleri ve dizayn parametreleri ileriki kısımlarda verilecektir.

e) Genişlemeyi sağlayan boşluk ve izolasyon malzemesi: Bu kısım için ÇE'nin yüzeyi ince bir malzeme ile kaplanabileceği gibi BEÇÇ'lerin yapımı aşamasında BEM ile ÇE'nin arasında belli bir mesafede boşluk bırakılarak da oluşturulabilir. Bu kısım ile ilgili olarak ince lastik, polietilen, silikon gres, band şerit vb. gibi farklı malzemeler denenmiştir. Hangi malzeme kullanılırsa kullanılsın, burada önemli olan BEM ile ÇE arasında sürtünmeden kanaklanan kuvvet aktarımının engellenmesidir. Bu kuvvetin kısmen dahi olsa engellenmemesi durumunda BEÇÇ'lerin basınç kapasitesi çekme kapasitesinden büyük olacaktır. ÇE ve BEM arasında, ÇE'nin yüksek modda burkulmasına izin verilecek kadar mesafe bırakılabilir. Ancak bu boşluğun fazla olması durumunda ise lokal burkulmalar ve buna bağlı olarak ÇE'nin yorulma ömrü kısılması ve sürtünmeden kaynaklanan ek aksenal basınç kapasite artımı meydana gelebilir. Basınç deformasyonu altında poizon etkisi ile ÇE'de meydana

gelecek hacimsel değişim dikkate alınmalıdır ve ÇE'nin elastik durumu için 0.3, plastikleşme durumu için 0.5 alınabilir [5].

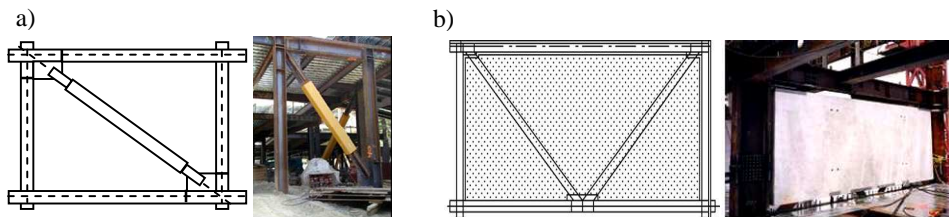
BEÇÇ'lerin geliştirilmesi ve uygulama alanları günümüz mühendisleri tarafından geniş şekilde araştırılmaktadır. BEÇÇ'ler ile ilgili çalışmalar ilk olarak eleman bazında (sadece aksenal deformasyonlar uygulanarak) ve çerçeve benzeri sistem bazında (hem aksenal deformasyon hemde uç dönmeler uygulanarak) yapılan deneylerle başlamıştır. Bu çalışmaları BEÇÇ'lerin çerçeve sistemi içerisinde yapılan deneyler izlemiştir. Bu makale BEÇÇ'lerin geliştirilmesine yönelik eleman bazında, çerçeve benzeri sistem bazında ve çerçeve sistemi içerisinde yapılan bazı test sonuçlarını özetlemektedir.



Şekil 1.2. BEÇÇ boyutları ve en kesitleri ([3] ve [4]'den adapte edilmiştir)

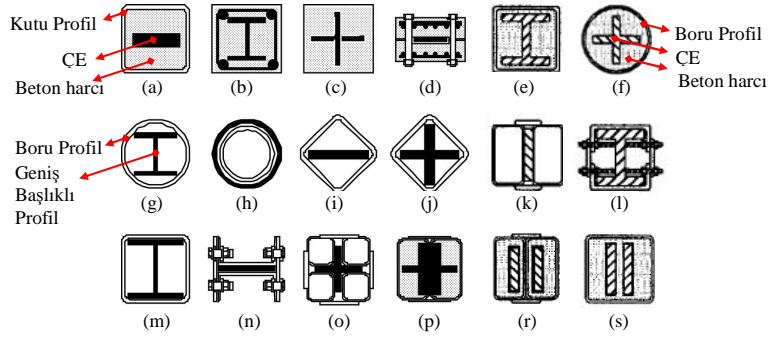
## 1.1. BEÇÇ'LERİN GELİŞTİRİLMESİ VE ÇEŞİTLERİ

BEÇÇ'lerin geliştirilmesi ile ilgili ilk çalışmalar 1970'li yıllarda Japonya'da başlamıştır [5, 6 ve 7], diğer çalışmalar ise Taiwan [8] ve ABD'de yapılan kapsamlı araştırmalarla devam etmiştir. BEÇÇ'ler genel olarak iki kısma ayrılmaktadır (Şekil 1.3). İlk kısımdaki BEÇÇ'ler: genel olarak ÇE'nin BEM (Çelik kutu veya boru profil ve uygun şekilde hazırlanmış betonarme plakalar) ile arasında sürtünmeyi engelleyici mazleme ve hava boşluğu kullanılarak oluşturulmaktadır (Şekil 1.3-a). Diğer BEÇÇ tipi ise: ÇE'nin prekast beton paneller arasında yerleştirilmesi ile elde edilmektedir (Şekil 1.3-b). Bu çalışmada ilk kısımdaki BEÇÇ'ler incelenecektir.



Şekil 1.3. a) BEÇÇ [9], b) Prekast BEÇÇ [7] için çizim ve fotoğraf





Şekil 1.4. BEÇÇ'lerin enkesit gösterimleri. ([6]'dan ve [8]'den adapte edilmiştir)

Şekil 1.4 araştırmacılar tarafından incelenmiş bazı BEÇÇ'lerin enkesitlerini göstermektedir. Şekil 1.4-a ve f'de görülen BEÇÇ tipinde: ilk olarak ÇE'nin yüzeyi sürtünmeyi engelleyici malzemele ile kaplanır ve daha sonra kutu veya boru profil içerisine yerleştirilir ve beton harcı profilin içine dökülür. Burada ÇE Şekil 1.4-a'da görüldüğü gibi dikdörtgen kesitli bir eleman olabileceği gibi bu kesit "+" şeklinde de olabilir. Şekil 1.4-p'de gösterildiği gibi ÇE yatık "T" şeklinde iki ayrı BEÇÇ'nin birleştirilmesiyle oluşturulabilir ve bu tip BEÇÇ'ler bayrak levhasına bağlantılarının daha kolay olmasından dolayı da tercih edilmektedir. BEM tamamen çelik yapı elemanları kullanılarak da elde edilebilir (Şekil 1.4-k, l, n ve o). Bunların yanında, kutu veya boru profil içerisine (beton harcı koymadan) ÇE olarak, geniş başlıklı profil, kutu veya boru profil yerleştirilerek de BEÇÇ elde edilebilir (Şekil 1.4-g, h, i, j, m). Bu enkesitlere ek olarak, tasarımcı mühendis tarafından da BEÇÇ tasarlanabilir. Burada önemli olan enkesit koşulları değil, elde edilen BEÇÇ'lerin belirli standartlarda göstermiş olduğu histeretik davranıştır. Bu konu hakkında gelecek bölümlerde ayrıntılı bilgi verilecektir.

## 1.2. BEÇÇ'LERİN ELEMAN VE ÇERÇEVE BENZERİ SİSTEM BAZINDA DAVRANIŞI

Kare ve dikdörtgen kutu profil içerisine beton doldurulmasıyla (Profil-beton) oluşan BEM'e sahip BEÇÇ'lerin global burkulmasını önlemek için Watanaba ve diğ. (1988) beş adet test yapmışlardır ve Denklem 1'i önermişlerdir [10].

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 \quad (1)$$

$$P_e = \frac{\pi^2 \times E \times I_{sc}}{(l_{sc})^2} \quad (2)$$

$$P_y = \sigma_y \times A_c \quad (3)$$

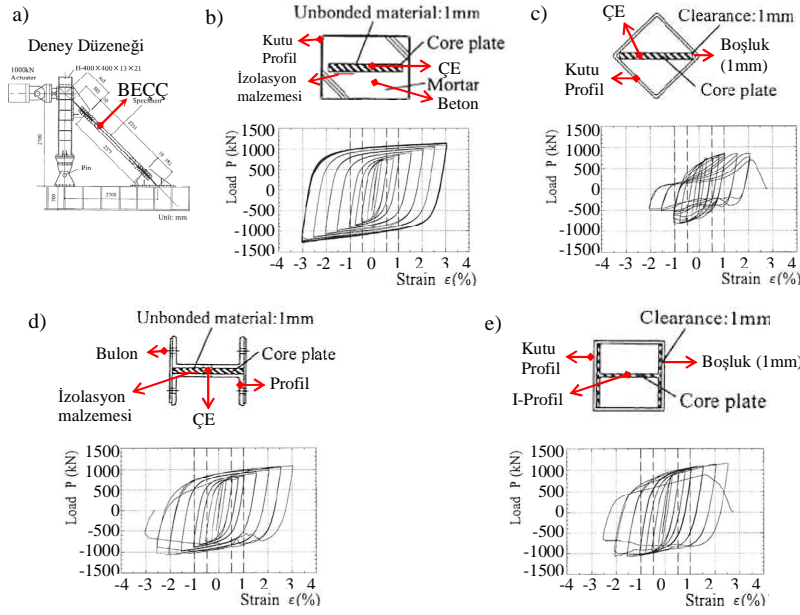


Tablo 1. 1  $P_e/P_y$  oranları ([10]'dan alınmıştır)

Specimen No.	$P_e/P_y$
1	3.53
2	1.39
3	1.03
4	0.72
5	0.55

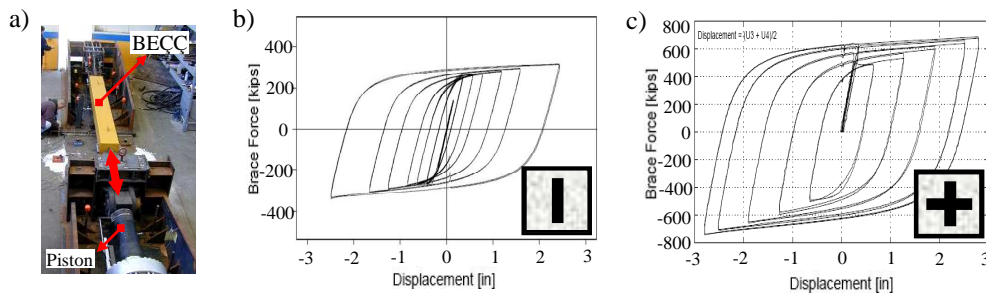
Burada  $P_e$  BEM'in (Kutu profil) Euler yük kapasitesi (Denklem 2),  $P_y$  ise ÇE'nin akma kapasitesidir (Denklem 3). Bu denklemlerde:  $E$  çeliğin elastisite modülü,  $I_{sc}$  BEM'nin atalet momenti,  $I_{sc}$  çapraz uzunluğu,  $\sigma_y$  ÇE'nin akma gerilmesi,  $A_c$  ÇE'nin plastik bölgedeki enkesit alanıdır. Bu test elemanlarının kesit özellikleri Şekil 1.4-a'dakine benzemekle beraber farklı  $P_e/P_y$  oranlarına sahiptirler (Tablo 1). Tablo 1'de görüldüğü gibi bu oran test elemanları 4 ve 5 için birden küçüktür. Bunun sonucu olarak bu iki test elemanında deney esnasında global burkulma meydana gelmesine rağmen diğer ilk üç elemanda basınç ve çekme deformasyonları altında kararlı ve simetrik histeretik davranış elde edilmiştir. Watanaba ve diğ. (1988) deney çalışmalarına ek olarak yapmış oldukları analitik çalışmalarda  $P_e/P_y$  oranının birden büyük olmasına rağmen ÇE'deki geometrik kusur gibi etkilerden dolayı bu değerlerin yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Watanaba ve diğ. (1988) pratik olarak  $P_e/P_y$  oranının 1.5'den büyük olmasını önermişlerdir [10].

Iwata ve diğ. (2000) ticari olarak Japonya'da bulunan dört farklı tipdeki BEÇÇ'leri Şekil 1.5-a'daki deney düzeneğinde test etmişlerdir [11]. Burada test edilen BEÇÇ'lerin enkesitleri ve histeretik davranışları Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Burada test edilen BEÇÇ'lerin ÇE kesit alanları eşittir ve akma gerilmesi 263 MPa'dır (SN400 çelik sınıfı). Şekil 1.5-b'deki BEÇÇ'de, ÇE ile beton harcı arasında 1 mm kalınlığında yumuşak lastik şeritler bulunmaktadır. Şekil 1.5-c ve e'de görüldüğü gibi ÇE (dikdörtgen şeklinde plaka ve geniş başlıklı profil) ile BEM arasında sürtünmeyi önleyici madde yerine hava boşluğu bulunmaktadır. Şekil 1.5-b'deki BEÇÇ daha önce [10] tarafından test edilen BEÇÇ ile aynı kesit özelliğine sahiptir. Şekil 1.5-d'de test edilen BEÇÇ'de, ÇE iki "U" profil içerisine 1 mm'lik yumuşak plastik şeritler kullanılarak yerleştirilmiştir. U profiller iki plaka yardımıyla yüksek mukavemetli bulonlarla birleştirilerek ÇE'nin burkulması önlenmiştir. Şekil 1.5-b'de görüldüğü gibi test elemanı kararlı histeretik davranışa sahiptir. Bu test elemanı ÇE'nin her iki uçunda lokal burkulmadan dolayı kapasitesine ulaşmıştır. Şekil 1.5-c ve e'deki test elemanları lokal burkulmalardan dolayı diğerlerine göre performansları daha düşüktür. Şekil 1.5-d'de verilen test elemanı yüksek mukavemetli bulonların kopması ile kapasiteye ulaşılmıştır [11].



Şekil 1.5. [11] tarafından test edilen BEÇÇ'lerin deney düzeneği, kesit görünüşleri ve histeretik (Eksenel yük-birim uzama) davranışları. ([11]'den adapte edilmiştir).

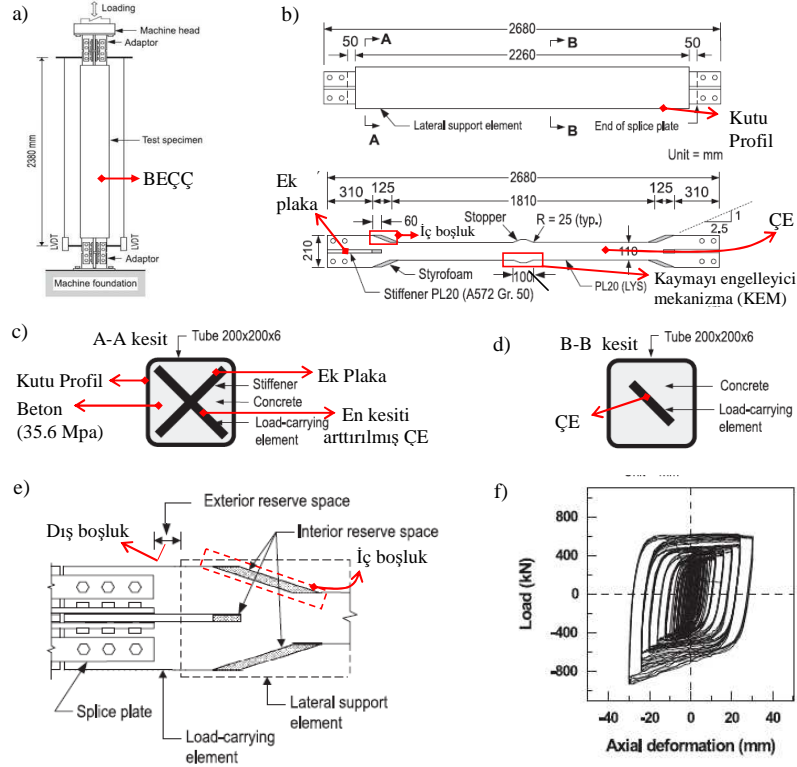
Amerika Birleşik Devletleri'nde BEÇÇ deneyleri ilk olarak 1999 yılında Kalifornia Üniversitesi'nde (Berkeley) Clark ve diğ. (1999) tarafından yapılmıştır [12]. Bu çalışmada profil-beton birleşiminden oluşan BEM'e sahip üç adet BEÇÇ test edilmiştir. Bu BEÇÇ'ler dikdörtgen ve "+" şeklinde ÇE'lere sahiptirler. ÇE'lerin akma gerilmesi 419 MPa'dır. Bu çalışmanın devamı olarak "+" şeklinde 285 MPa akma gerilmesine sahip ÇE'den oluşan iki adet test Black ve diğ. (2002) tarafından yapılmıştır [2]. [2]'de yapılan çalışmada ayrıca BEÇÇ'lerin stabilite alanizleri geniş olarak ele alınmıştır. Kalifornia Üniversitesinde yapılan deneyler Şekil 1.6-a'daki deney düzeneğinde görüldüğü gibi zemine paralel olarak yapılmıştır ve iki test elemanın histeretik davranışı Şekil 1.6-b ve c'de gösterilmiştir. Ayrıca bu şekil üzerinde BEÇÇ'lerin orta açıklıkdaki kesit görünüşleri de verilmiştir. BEÇÇ'lerin birim uzamaları yaklaşık olarak %2 civarındadır.



Şekil 1.6. a)Deney düzeneği, Eksenel yük-eksenel deformasyon grafiği, b) Deney elemanı T-1, c) Deney elemanı specimen 00-12. ([2] ve [12]'den adapte edilmiştir).

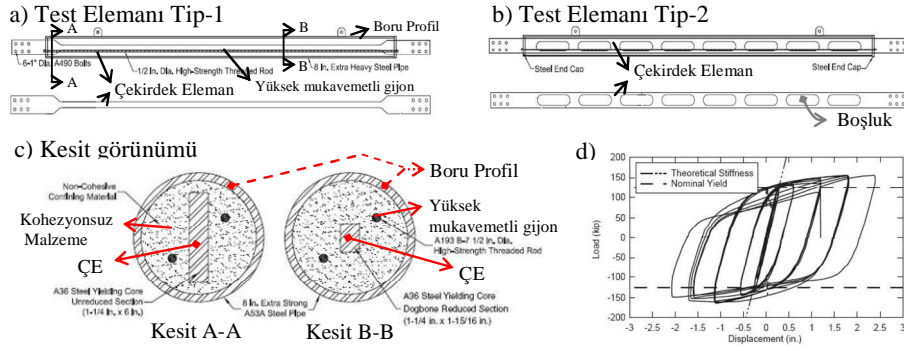


Chen ve diğ. (2001) ÇE'nin akma gerilmesinin (100 MPa) düşük ve sünek çelikten (%50 birim uzama kapasitesi) oluşan BEÇÇ'leri Şekil 1.7-a'da görülen düşey eksendeki deney düzeneğinde test etmişlerdir [13]. Bu tip malzeme kullanılarak elde edilen BEÇÇ'li çerçeveler düşük kat ötelemelerinde BEÇÇ'lerin plastikleşmeye başlaması ve ÇE'nin sünek olmasından dolayı yüksek enerji sönmüleme özelliğinde olduğu belirtilmiştir [13]. BEÇÇ'lerdeki ÇE, çerçeve davranışına bağlı olarak maruz kaldığı aksenal basınç ve çekme deformasyonları ile kısalmakta ve uzamaktadır. Bunun yanında BEM'de herhangi bir yük istemi bulunmadığı için aksenal deformasyon söz konusu değildir. Bu durumda, BEÇÇ'lerin iç kısmında, ÇE'nin kesitinin arttırıldığı burkulması engellenmiş elastik kısım (Şekil 1.7-c, d ve e), BEM'e (Beton) temas etmesine izin vermemek için Şekil 1.7-b ve e'deki iç boşluk ve çelik kutu profil ile bağlantı elemanlarının temasını engellemek için dış boşluk bırakılmıştır. İç boşluk, BEÇÇ'nin hazırlanışı esnasında beton dökümünden önce yumuşak bir malzeme (suni köpük) yerleştirilerek yapılmıştır. ÇE ile beton arasındaki sürtünmenin engellenmesi için ÇE'nin üzerine işçiliğinin kolay olmasından dolayı silikon gres sürülmüştür (bu durumda da beton ve ÇE arasındaki boşluk çok az olmaktadır). Bu işlem sonucunda ÇE sürtünmesiz olarak BEM içerisinde basınç ve çekme istemine göre hareket edebilmektedir. Bu esnada, ÇE'nin ve BEM'in orta açıklıklarındaki göreceli olarak hareketine izin verilmemelidir. Bu göreceli kayma hareketini engellemek için ÇE'nin orta açıklığında enkesit alanı arttırılarak kaymayı engelleyici mekanizma (KEM) oluşturulmuştur (Şekil 1.7-b). Aksi halde, BEM'nin, BEÇÇ'nin çerçeveye bağlandığı durumda düşey ekseninde kayması söz konusu olmaktadır. Şekil 1.7-f'de görüldüğü gibi BEÇÇ'nin histeretik davranışı -20 mm'den sonra simetrik değildir. Bunun en önemli sebebi, beton ve ÇE arasındaki boşluğun (Silikon gres) çok az olmasından dolayı basınç deformasyonu altında poison etkisinden dolayı meydana gelen genişlemeden kaynaklanmaktadır [13]. Bu tip BEÇÇ'lerin V ve ters V çelik çaprazlı (chevron brace) çerçeveler yerine diagonal merkezi çerçevelerde kullanılması daha uygundur [13].



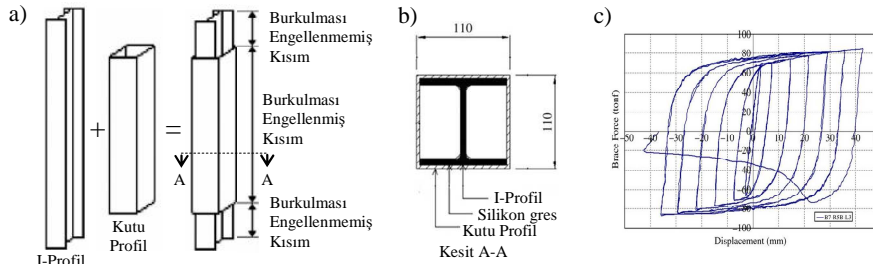
Şekil 1.7. a) Deney düzeneği, b) BEÇÇ'nin boyutları, ÇE ve ek plakalar, c) A-A enkesit gösterimi, d) B-B en kesit gösterimi, e) BEÇÇ'nin uç detayı, f) Deney elemanı BIB-L1'nin histeretik davranışı ([13]'den adapte edilmiştir.).

Higgins ve Newell (2002) yukarıda bahsedilen profil-beton'dan oluşan BEM'den farklı olarak, ÇE'nin kohezyonsuz malzeme içerisine yerleştirerek elde ettikleri sargılı plastik çaprazları (SPÇ) geliştirip test etmişlerdir [14]. Higgins ve Newell ilk olarak ölçeklendirilmiş [14] ve daha sonra tam ölçekli [15] SPÇ'leri test etmişlerdir. Bu çalışmadaki SPÇ'lerin BEÇÇ'lerden farkı: Boru profil içerisine, beton harcı yerine, kohezyonsuz madde (kum ve çakıl karışımı) yerleştirilip sıkıştırılmasıdır (Şekil 1.8-c). Kullanılan ÇE'nin malzeme sınıfı A36 olup akma ve en yüksek gerilme değeri sırasıyla 357 ve 497 MPa'dır. İki farklı ÇE geometrisine (Şekil 1.8-a ve b) sahip toplam 14 adet SPÇ, Şekil 1.6-a'dakine benzer bir deney düzeneğinde test edilmiştir [15]. Bu testlerde, kohezyonsuz malzeme ve sıkıştırma yöntemi, ÇE'nin geometrisi ve uygulanan yükleme protokolünün SPÇ'lerin performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir [15]. Yapılan testlerde SPÇ'lerin performanslarının büyük oranda kullanılan kohezyonsuz malzemenin dane boyutuna ve şekline bağlı olduğu görülmüştür. Şekil 1.8-d gösterilen ve test elemanı 2'ye ait olan histeretik davranışın oldukça stabil olmasına karşın bazı deneylerde basınç ve çekme kapasitelerinde büyük farklar oluşmuştur [15].



Şekil 1.8. a) SPÇ test elemanı Tip 1, b) SPÇ test elemanı Tip 2, c) SPÇ kesit görünümü, d) Test elemanı Tip 2'nin histeretik davranışı. ([15]'den adapte edilmiştir.)

Geniş başlıklı I-profilin betonsuz kutu profilden oluşan BEM içine, sürtünmeyi engellemek için silikon gres kullanılarak oluşturulan ve bir örneği Şekil 1.9-a ve b'de gösterilen BEÇÇ'ler Young ve diğ. (2009) tarafından test edilmiştir [16]. Şekil 1.7-a'daki deney düzeneğine benzer bir sistemde test edilen BEÇÇ'lerin ÇE'leri 240 MPa nominal akma gerilmesine sahiptir. KEM I-profilin başlıklarına eklenen plakalar ile sağlanmıştır. Bu çalışmada, BEÇÇ'lerin uç kısımlarının (burkulması engellenmemiş kısım) güçlendirilmemesi, farklı boylarda güçlendirilmesi ve kutu profilin et kalınlığı gibi parametreler incelenmiştir. Şekil 1.9-c'de görüldüğü gibi söz konusu elemanın histeretik davranışı oldukça karardır. Bunun en önemli sebebi, bu eleman için kullanılan kutu profilin et kalınlığı diğerlerine göre daha büyüktür ve BEÇÇ uçları ek plakalarla güçlendirilmiştir. Kutu profilin et kalınlığı daha ince olan diğer elemanlarda lokal ve global burkulmalar görülmüştür ve bu BEÇÇ'lerin histeretik davranışları oldukça düşüktür.



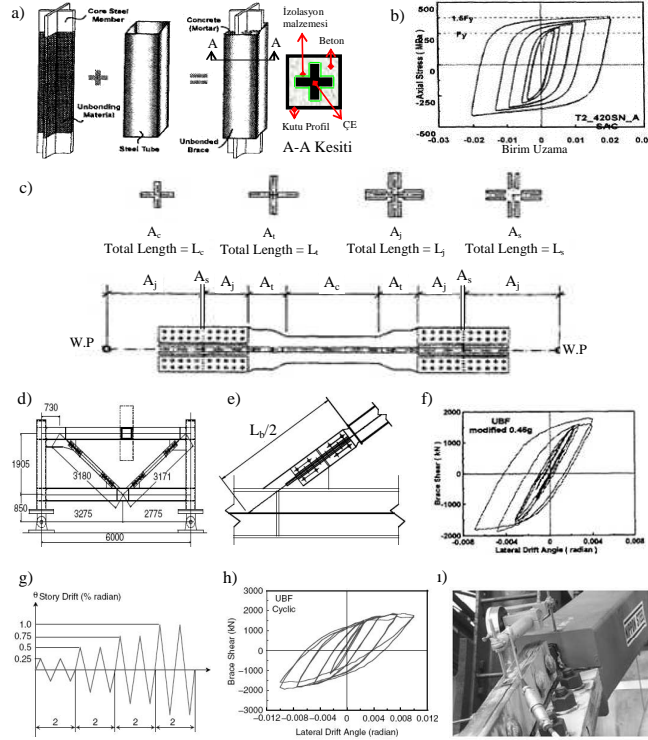
Şekil 1.9. a) BEÇÇ, b) BEÇÇ'nin enkesit gösterimi, c) Deney elemanı Specimen B7-R5B-L3'e ait histeretik davranış. ([16]'dan adapte edilmiştir.)

Tsai ve diğ. (2002) Taipei'de bulunan 33 katlı çelik binayı güçlendirmek için kullanılan 562 BEÇÇ'den rastgele seçilen 27 adet BEÇÇ'yi hem eleman bazında hem de 1/2 ölçekli sistem bazında test etmişlerdir (Şekil 1.10) [17]. Eleman bazındaki çalışmanın amacı BEÇÇ'lerin kalite kontrolünü, elastik rijitliklerini ve elastik olmayan davranışlarını belirlemektir. ÇE'lerin malzeme sınıfı olarak LYP235 (222 MPa akma gerilmesi) ve SN400B (252 MPa akma gerilmesi) kullanılmıştır. Eleman bazında yapılan deneylerde kullanılan deney düzeneği Şekil 1.7-a'dakine benzer özelliktedir. BEÇÇ'lerin elastik rijitliğini belirlemek için BEÇÇ'ler, ÇE'nin

akma kapasitesinin %40 kadar aksel olarak yüklenmiştir (deneyden sonra bu BEÇÇ'ler binaya monte edilmiştir) ve uygulanan kuvvetin çaprazda meydana gelen uzamaya oranı deneysel aksel elastik rijitlik olarak kabul edilmiştir. Teorik olarak BEÇÇ'lerin aksel rijitliği Şekil 1.10-c'de gösterilen uzunluklar ve alanlar dikkate alınarak Denklem 4'den hesaplanmıştır. Bu denklemde,  $K_{eff}$  teorik rijitlik,  $A_c$ ,  $A_t$ ,  $A_j$  ve  $A_s$  sırasıyla BEÇÇ'nin plastik bölgesi, geçiş bölgesi, burkulması engellenmiş ve engellenmemiş elastik bölgesi, BEÇÇ'nin bayrak levhasına bağlandığı noktadaki geçiş bölgesi olmak üzere Şekil 10-c'de gösterilen bölgelerdeki alanlar ve bu bölgelerdeki uzunluklarda  $L_c$ ,  $L_t$ ,  $L_j$  ve  $L_s$ 'dir. Bu çalışmada deneysel ve teorik rijitlikler arasındaki hata %5'den daha azdır. Elastik deneylere ek olarak, Şekil 10-b'de %85 civarında ölçeklendirilmiş BEÇÇ'nin histeretik davranışı, ÇE'nin aksel gerilme aksel birim uzama cinsinden grafiği görülmektedir. Bu grafikten de görüldüğü gibi BEÇÇ eleman bazında stabil ve simetrik histeretik davranışa sahiptir. Eleman bazındaki deneylere ek olarak Tsai ve diğ. (2002) ½ ölçekli sistem bazında BEÇÇ'leri test etmiştir (çalışmanın bu kısmı sistem bazındaki deneysel çalışmalara bir örnektir). Şekil 1.10- d'de görüldüğü gibi kutu profilden oluşan çerçeve elemanlarına, BEÇÇ'lerden biri düğüm noktasına mimari sebeplerden dolayı 730 mm'lik dış merkezlik olacak şekilde bağlanmıştır. BEÇÇ'lerin çerçeve elemanlarına bağlantısını gösteren ayrıntı Şekil 1.10-e'de görülmektedir. Bu çerçeve ilk önce iki farklı deprem kaydına göre yatay olarak yüklenmiştir (Şekil 1.10-f). Bu yükleme sonunda çerçevede ve BEÇÇ'de herhangi bir hasar oluşmamasından dolayı, aynı çerçeve statik olarak test edilmiştir. Statik test esnasında uygulanan yatay deplasman (kat ötelemesi cinsinden) ve elde edilen histeretik davranış Şekil 1.10-g ve h'de görülmektedir. Şekil 1.10-h'de görüldüğü gibi BEÇÇ'li çerçeve % 1 kat ötelemesinde ilk tersinir yüklemeye kadar stabil histeretik davranış göstermesine rağmen aynı kat ötelemesinin ikinci tersinir yüklemesinde BEÇÇ'de Şekil 10-i'da görüldüğü gibi burkulma meydana gelmiştir. Şekil 10-i'da meydana gelen burkulmanın olduğu ÇE ve ek plakaların geçiş bölgesinde, Şekil 1.10-e'de gösterilen  $L_b$  uzunluğu dikkate alınarak hesaplanan Euler burkulma yükü (Denklem 5) ÇE'nin aksel akma kapasitesinden 1.5 kat daha büyüktür. Bu oranın düşük olması bu bölgedeki burkulmaya sebep olmuş olabileceği [17] tarafından belirtilmiştir. Denklem 5'de:  $P_{e-trans}$  Şekil 1.10-e'de görülen geçiş bölgesinin Euler yük kapasitesi,  $P_{Cmax}$  BEÇÇ'nin maksimum basınç kapasitesi,  $k$  etkili boy katsayısı,  $L_{trans}$  ve  $L_b$  Şekil 1.10-e'de görülen geçiş bölgesinin atalet momenti ve uzunluğudur. Tek ÇE'li (Şekil 1.4-a) BEÇÇ'lere ek olarak çift ÇE'li (Şekil 1.4-ı) BEÇÇ'ler bayrak levhasına bağlantısının kolay olmasından dolayı özellikle Taiwan Üniversitesi ve Taiwan Deprem Araştırma Enstitüsünde kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu araştırmalar Tsai ve diğ. (2004) tarafından özetlenmiştir [8].

$$K_{eff} = \frac{1}{\frac{L_c}{EA_c} + \frac{L_t}{EA_t} + \frac{L_j}{EA_j} + \frac{L_s}{EA_s}} \quad (4)$$

$$P_{e-trans} = \frac{\pi^2 EI_{trans}}{(kL_b)^2} \geq P_{C \max} \quad (5)$$

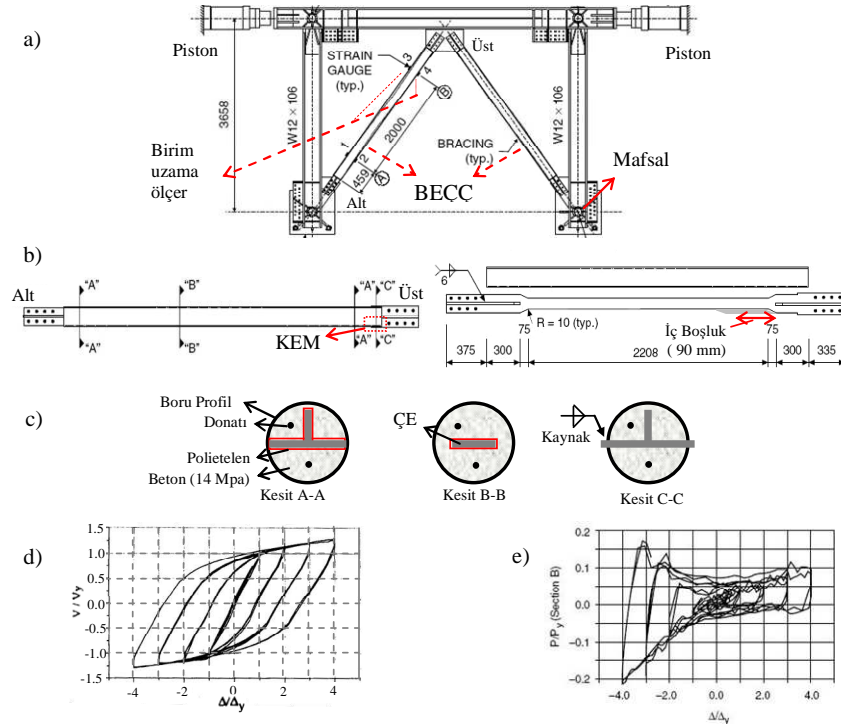


Şekil 1.10. a) BEÇÇ'nin kısımları, b) Deney elemanın (T2\_420SN\_A) histeretik davranışı, c) BEÇÇ'nin enkesitleri, d) Test çerçevesi, e) BEÇÇ'nin bağlantı detayı, f) Deprem kaydı altında histeretik davranışı, g) Statik yük protokolü, h) Statik yük altında histeretik davranış, i) BEÇÇ'de burkulma ([17]'den adapte edilmiştir.).

Tremblay ve diğ. (1999) dört katlı çelik bir binayı güçlendirmek için tasarladıkları BEÇÇ'leri tek açıklıklı ve tek katlı, dört düğüm noktasında mafsalı olan çelik çerçeve benzeri sistem içerisinde test etmişlerdir (Şekil 1.11-a) [18]. Şekil 1.11-b ve c'de test edilen BEÇÇ'lerin boyutları ve kesitleri görülmektedir. Buradaki çalışmada beton harcı içerisine ek olarak donatı da eklenmiştir (Şekil 1.11-c). Kullanılan ÇE'nin akma ve en büyük gerilme kapasiteleri sırasıyla 357 ve 517 MPa'dır. ÇE ve beton arasında sürtünmeyi engellemek için ÇE her biri 0.2 mm olan dört kat polyester malzemesi ile sarılmıştır. BEM'nin düşey ekseninde ÇE üzerinde hareketini engellemek için ÇE ve boru profil üst düğüm noktasında birbirine kaynaklanmıştır (Şekil 1.11-b). Şekil 1.11-d test edilen BEÇÇ'li çerçevenin normalize edilmiş yatay yük-deplasman grafiğini göstermektedir (bu grafikte V yatay yükü, Δ yatay deplasmanı ve alt y akma değerini göstermektedir). Bu şekilden de görüldüğü gibi çerçevenin histeretik davranışı oldukça stabil ve simetriktir. Burada kullanılan BEÇÇ'lerin, deney esnasında boru profil üzerine yapıştırılan birim uzma ölçerlerden (Şekil 1.11-a) elde edilen bilgiler



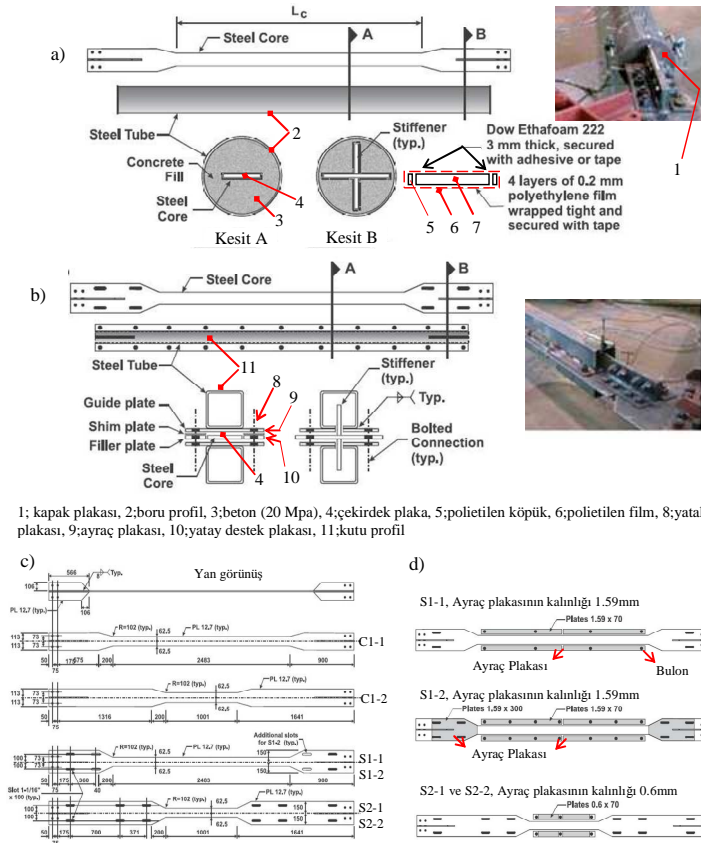
doğrultusunda, çelik boru profilde ÇE'nin akma kapasitesinin % 20'si kadar aksel yük taşıdığı görülmüştür (Şekil 1.11-e).



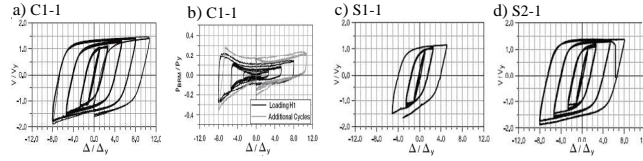
Şekil 1.11. a) Test çerçevesi, b) BEÇÇ ve c)BEÇÇ enkesit gösterimi, d) Normalize edilmiş yatay yük-yatay deplasman grafiği, e) Boru profil üzerinde ölçülen yük ve deplasman ([18]'den adapte edilmiştir).

Tremplay ve diğ. (2006) tarafından yapılan başka bir deneysel çalışmada altı adet BEÇÇ Şekil 1.11-a'da gösterilen çerçeve benzeri sistem içerisinde test edilmiştir [19]. Ancak bu çalışmada ters V çelik çapraz yerine diyagonal merkezi çapraz olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmanın genel amacı, BEÇÇ'lere etkileyen eğilme momentleri ve bunların BEÇÇ'ler üzerinde etkileri, ÇE'nin plastik bölge uzunluğu ve bu uzunluğun aksel rijitliğe ve yorulma kapasitesine etkisi ve değişik BEM'lerin incelenmesidir. [19] tarafından incelenen BEÇÇ'lerin ilk iki tanesinde beton-boru profilden (Şekil 1.12-a, C1-1 ve C2-1) ve diğer dört BEÇÇ'de çelik plaka-kutu profil birleşimden oluşan (Şekil 1.12-b, S1-1, S1-2, S2-1 ve S2-2) BEM kullanılmıştır. Şekil 1.12-a'da görüldüğü gibi [19]'da test edilen ilk iki BEÇÇ, [18]'de test edilen BEÇÇ'lere benzemektedir. [19]'da ve [18]'de kullanılan BEÇÇ'lerin arasındaki fark: [19]'da ÇE'nin poison etkisinden dolayı genişlemesi sırasında meydana gelecek hacimsel değişim beton içerisinde karşılanabilmesi için ÇE'nin altına ve üstüne 3 mm kalınlığında polietilen köpük yerleştirilmiştir (Şekil 1.12-a) ve buna ek olarak BEM'nin ÇE üzerinde kaymasını engellemek için [19]'da ilk olarak BEÇÇ'nin iki ucundan sadece bir ucunda boru profil, üzerinde slotlar açılan kapak plakaya kaynatılıp daha sonra ÇE bu kapak plakaya kaynatılmıştır (Şekil 1.12-a). [19]'da test edilen ilk iki BEÇÇ'lerin arasındaki fark ise ÇE'nin

plastik kısmının uzunluğudur (Şekil 1.12-c, C1-1 ve 2). Bu BEÇÇ'lerde iç boşluk 100mm'dir. Bu çalışmada kullanılan ÇE'nin akma ve en yüksek gerilme kapasitesi 370 ve 492 MPa'dır. Diğer dört BEÇÇ'de kullanılan BEM'de Şekil 1.12-b görüldüğü gibi ÇE, kutu profile kaynatılmış iki yatak plaka arasına hem altta hem de üstte boşluk (ayraç plakası sayesinde) ve her iki yan tarafta (yatay destek plakası ile ÇE arasında) boşluk kalacak şekilde yerleştirilip yatak plakaları bulonlarla sıkılmıştır. Dört deneyden S1-1 ve 2'de ÇE'nin plastik kısmının uzunluğu (Şekil 12-c), bulonlar arasındaki mesafe, ayraç plakası ve ÇE üzerindeki bölge, S2-1 ve 2'da ayraç plakasının kalınlığı ve yükleme protokolü incelenmiştir (Şekil 1.12-d). Şekil 1.13-a, C1-1 için normalize edilmiş yatay kuvvet - yatay deplasman grafiğini göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi BEÇÇ stabil ve simetrik histeretik davranış göstermektedir. Şekil 1.13-b'de BEM'in taşıdığı aksel yükün ÇE'nin akma kapasitesine oranı ve normalize edilmiş yatay deplasman grafiğini gösterilmektedir. Bu grafikten anlaşıldığı gibi boru profilinde, ÇE'nin akma kapasitesinin yaklaşık %30'u kadar aksel yük ölçülmüştür. Buna ek olarak, boru profil üzerinde eğilme istemlerinin BEÇÇ'ler üzerinde çok fazla etkili olmayabileceği belirtilmiştir [19].



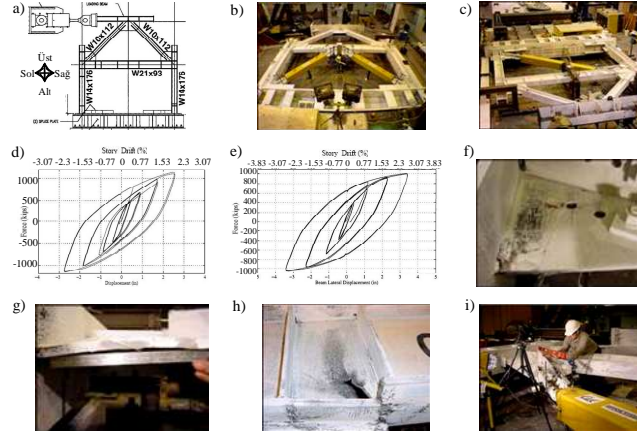
Şekil 1.12. a) Beton-boru profilden oluşan BEM'li BEÇÇ'lar, b) Plaka-kutu profilden oluşan BEM'li BEÇÇ, c) BEÇÇ'lerin ÇE boyutları ([19]'dan adapte edilmiştir.



Şekil 1.13 a) C1-1'in histeretik davranışları, b) C1-1 boru profildeki aksenal yük değişimi, c) S1-1 ve S2-1'nin histeretik davranışları ([19]'dan adapte edilmiştir.).

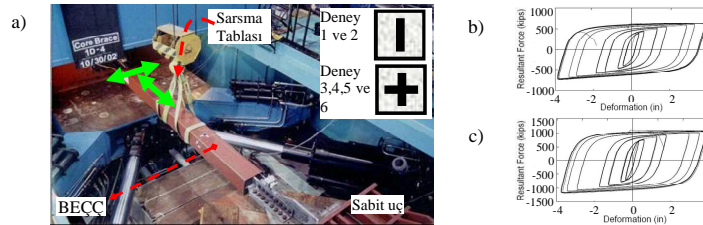
Şekil 1.13-c S1-1 deneyinden elde edilen normalize yatay yük-deplaman grafiği gösterilmektedir. S1-1'de, ÇE'nin her iki ucunda, ayraç plakasının kalınlığının ve bolunlar arasındaki mesafenin fazla olmasından dolayı lokal burkulmalar meydana gelmiştir ve bu sebepten deney protokolü tamamlanamamıştır. S1-2'de bulonlar arası mesafe azaltılmasına ve ek ayraç plakası (Şekil 1.13-d) kullanılmasına rağmen BEÇÇ'nin basınç kapasitesi ÇE ve BEM arasındaki sürtünmeden dolayı beklenen değerini aşmıştır ve deney tamamlanamamıştır. Şekil 1.13-d S2-1'den elde edilen histeretik davranışı göstermektedir. S2-1'de ÇE'nin plastik kısmının kısa olmasından dolayı bu bölgede aşırı plastikleşme meydana gelmiş ve ÇE kopmuştur. S2-2 uygulanan dinamik yükleme altında stabil davranmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan beton-kutu profilden oluşan BEM ve beton-ÇE arasındaki sürtünmeyi engellemek için kullanılan malzemelerin BEÇÇ'ler için kabul edilebilir oranda çalıştığı görülmüştür. Plaka ve kutu profilden oluşan BEM'li BEÇÇ'lerde ÇE'nin lokal burkulmasının ve dolayısı ile sürtünmenin engellenmesi ve plastikleşmenin ÇE'nin plastik kısmı boyunca yayılması gerektiği ortaya çıkmıştır [19].

Kalifornia Üniversitesi'nde, Şekil 1.14-a'daki çerçeve sistemi kullanılarak, Şekil 1.14-b ve c'de gösterilen bir adet ters V çelik çapraz (dikdörtgen şeklinde ÇE'ye sahip) ve iki adet diagonal çelik çaprazlı (dikdörtgen ve "+" şeklinde ÇE'ye sahip) çerçeve deneyi yapılmıştır [20, 21 ve 22]. BEÇÇ'lerde beton-kutu profilden oluşan BEM kullanılmıştır. Her üç deney için sadece bir çelik çerçeve (Şekil 1.14-a) imal edilmesinden dolayı kolon ve kiriş kesitleri olması gerekenden daha büyük seçilmiştir (daha rijit çerçeve sistemi oluşturulmuştur). Bu çalışmada, Test 1'de bayrak levhasında plastikleşme haricinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir ve %2 kat ötelemesine kadar çerçeve yatay deplasman yapabilmıştır (Şekil 1.14-d). Şekil 1.14-e'de histeretik davranışı gösterilen Test 2'de yaklaşık olarak % 1.7 kat ötelemesinde, bayrak levhası ve sol kolon üst birleşiminde kaynak yırtılması ve % 2.6 kat ötelemesinde bayrak levhasında burkulma meydana gelmiştir (Şekil 1.14-f ve g). Bu test bayrak levhasının tasarımında kapasitesinin yeterli olmasına karşın çerçevenin sünek elastik olmayan davranış yapabilmesi için yeterli olmadığını göstermiştir. Test 3'de kiriş alt başlığında yırtılma ve bunu takiben üst-sol düğüm noktasında eksende olmayan dönme meydana gelmiştir (Şekil 1.14-h ve i).



Şekil 1.14. a) Test çerçevesi, b) Test 1 fotoğraf, c) Test 2 ve 3 fotoğraf, d) Test 1 için histeretik davranış, e) Test 2 için histeretik davranış f) Test 1, bayrak levhası ve sol kolon üst birleşiminde yırtılma, g) Test 2, Üst sol bayrak levhasında burkulma, h) Test 3, sol-üst düğüm noktasında giriş alt başlığında yırtılma, i) Test 3, Üst-sol düğüm noktasında dönme [20, 21 ve 22].

Merit ve diğ. (2003) BEÇÇ'nin aksenal deformasyona ve uç dönmeye maruz kalacak şekilde hazırladıkları deney düzeneğinde iki adet dikdörtgen ve dört adet "+" şeklinde ÇE'ye ve beton-kutu profilden oluşan BEM'e sahip toplam altı adet test yapmışlardır [23]. Şekil 1.15-a'da deney düzeneğine ait fotoğrafın üstünde BEÇÇ'lerin orta açıklıklarındaki enkesitleri gösterilmiştir. Bu şekilde yine görüldüğü gibi BEÇÇ'nin bir ucu sabit olarak reaksiyon duvarına bağlıyken diğer ucu sarsma tablasına bağlanmıştır. Bu sayede BEÇÇ'ye hem yanal hem de aksenal deformasyon uygulanabilmektedir. Bu deney sayesinde BEÇÇ'nin çelik çerçeve içerisinde maruz kalabileceği deformasyonlar elde edilerek BEÇÇ'lerin davranışı incelenmiştir. ÇE'de kullanılan çeliğin akma gerilmesi 297 MPa (A36), BEM'de kullanılan betonun basınç dayanımı 28 MPa'dır. Test edilen BEÇÇ'ler en yüksek 0.02 birim uzamaya kadar artan tersinir deformasyonlar altında stabil ve kararlı davranmışlardır (Şekil 1.15-b ve c).



Şekil 1.15. a) Deney düzeneği ve BEÇÇ enkesitleri, b) Deney 1 ve c) Deney 3 için histeretik davranış ([23]'den adapte edilmiştir.).

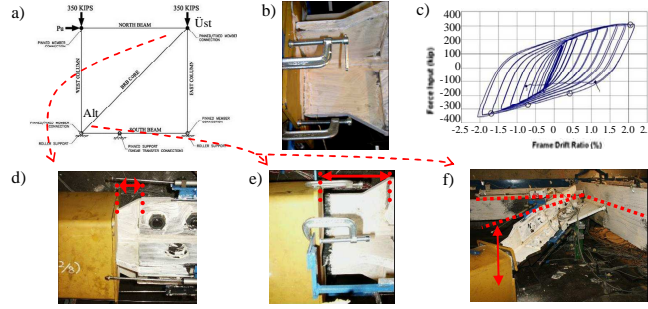
Elde edilen herhangi bir BEÇÇ dizaynının BEÇÇ olarak kabul edilebilmesi için [24] tarafından belirlenen minimum performans kriterlerini sağlaması gerekmektedir. [24]'de hem eleman bazında hem de çerçeve benzeri sistem bazında yapılacak olan deneylerde



izlenecek yükleme protokolü, deney elemanın boyutları, elde edilen histeretik davranışın hangi şartlarda kabul edilebilirliği gibi düzenlemeler bulunmaktadır. Buna göre BEÇÇ'lerin herhangi bir çelik çaprazlı yapı içerisine konulması durumunda BEÇÇ'lerin bayrak levhasına bağlantısı, eleman boyu, ÇE en kesit alanı, çaprazlı çelik yapının yapacağı maksimum yatay ötelenme anında çaprazda meydana gelecek eksenel uzama/kısalma, çapraz uç bağlantı bölgelerinde meydana gelen dönme istemlerinin tamamen görülebileceği çerçeve benzeri sistem içerisinde en az bir test yapılmalıdır. Çerçeve benzeri sistem içerisinde ve eleman bazında test edilecek olan deney elemanı ile gerçek yapıda kullanılacak BEÇÇ'lerin eksenel yük kapasiteleri, ÇE en kesit özellikleri (kare yada "+" şeklinde kesit), malzeme özellikleri ve tasarım parametreleri (kolon, kiriş ve bayrak levhası stabilite, lokal ve global burkulma hesap yöntemleri) eşit olmalıdır. Eleman bazında yapılacak olan deneyde ÇE plastik bölgesinde meydana gelecek olan uzama için yükleme protokolü şu şekilde olmalıdır; ( $\delta y$ ), ( $0,5\delta t$ ), ( $1,0\delta t$ ), ( $1,5\delta t$ ), ( $2,0\delta t$ ).  $\delta y$  ÇE akma uzaması,  $\delta t$  gerçek yapı tasarımında kullanılan göreceli kat ötelenmesindeki ÇE uzamasıdır. Bu deplasman değerlerinin her birinde iki kez ters çevirimli histeretik yükleme yapılmalıdır. Ayrıca toplam plastik uzama en az 200 akma uzaması kadar olmalıdır eğer bu durum yukarıdaki protokolda elde edilemezse  $1,5\delta t$  deplasman değerinde gerekli kadar ters çevirimli yükleme yapılmalıdır. BEÇÇ deneylerinin sonunda elde edilen eksenel kapasite-ksenel uzama/kısalma histeretik davranışın her bir deplasman değerinde stabilite ve pozitif rijitlik elde edilmelidir. Deney sonunda BEÇÇ ve bağlantılarında kopma ve stabilite sorunu gözlenmemelidir.  $\delta y$  yüklemesinden sonra yapılacak olan yüklemelerde elde edilen kapasite ÇE'nin nominal kapasiteden az olmamalıdır.  $\delta y$  yüklemesinden sonra her bir deplasman değerinde basma ve çekme kapasiteleri arasındaki oran 1,3'den daha büyük olmamalıdır. [24]'e göre, test edilen BEÇÇ'lerin yukarıda bahsedilen şartları sağlaması durumunda yeterli histeretik davranışa sahip olduğu kabul edilmektedir.

### 1.3. BEÇÇ'LERİN ÇERÇEVE SİSTEMİ İÇERİSİNDEKİ DENEYLERİ

BEÇÇ'lerin eleman ve çerçeve benzeri sistem bazında davranışlarının yukarıda da görüldüğü gibi genel olarak kararlı olmasına karşın, BEÇÇ'lerin çerçeve içinde davranışlarında aynı kararlı histeretik davranış tam olarak görülememiştir. Bu konu ile ilgili olarak yapılmış olan bazı deneysel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.



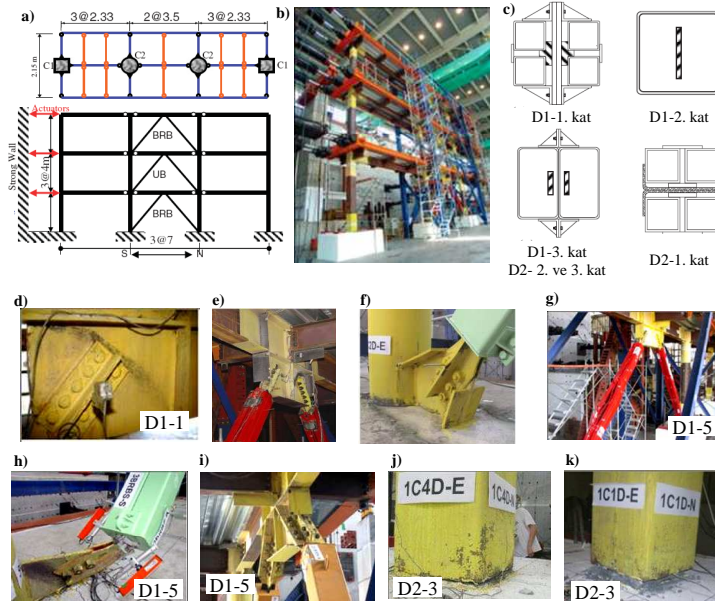
Şekil 1.16. a) Çerçevenin analitik gösterimi, b) BEÇÇ'nin testten önceki durumu, c) Reference BRB'nin histeretik davranışı, d) ve e) Test esnasında BEÇÇ'nin belirtilen uçlarda kayması, e) BEÇÇ'nin uç kısmında plastikleşme ve dönme ([25]'den adapte edilmiştir.).

Christopoulos (2005) beş adet diagonal BEÇÇ'li çerçeveyi, zemine paralel olarak hazırladığı deney düzeneğinde test etmiştir (Şekil 1.16-a ve f) [25]. Çerçeve sisteminin zemine paralel olmasına karşın beton-kutu profilden oluşan BEM, ÇE üzerinde yeterli KEM'nin olmamasından dolayı alt düğüm noktasından üst düğüm noktasına doğru hareket etmiştir. Şekil 1.16-b deney başında, Şekil 1.16-d ve e deney sonundaki BEM ve ÇE arasındaki mesafeleri göstermektedir. Bu şekilllerden de görüldüğü gibi BEÇÇ'nin alt uçundaki iç boşluk diğer uca göre artmıştır. Buna ek olarak [25]'de de belirtildiği gibi alt kirişin düğüm noktasına sağladığı stabilitenin de yetersiz olmasının da etkisiyle BEÇÇ'nin uç kısmında plastik mafsallaşma oluşmuş ve %1.5 kat ötelemesinden sonra düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir (Şekil 1.16-f). Şekil 1.16-c referans deneyinden elde edilen histeretik davranışı göstermektedir. Bütün deneylerde yaklaşık % 2 kat ötelemesinden sonra BEÇÇ'nin aşırı dönmesinin sonucunda zemine temas etmesiyle yüklemeye son verilmiştir (Şekil 1.16-f).

Tam ölçekli, üç açıklı üç katlı BEÇÇ'li çerçeve, dinamik benzerli yükleme yapılarak Tsai ve diğ. (2008) tarafından test edilmiştir (Şekil 1.17-a ve b) [26-27]. Bu çalışmadaki çelik çerçeve, beton döşeme, çelik kiriş ve kompozit kolonlardan oluşmaktadır. Dinamik benzerli yüklemelerde 1999 Chi-Chi (CC) ve 1989 Loma Prieta (LP) deprem kayıtları kullanılmıştır. Bu deprem kayıtları 50 yılda aşılma olasılığı %50-10-2 olmak üzere ölçeklendirilmiştir. Buradan da anlaşıldığı gibi deprem kayıtların aşılma olasılıklarına göre yani yatay yük istemleri artırılarak deneyler yapılmıştır. Çerçeve elemanı değiştirilmeden iki kısımda deneyler yapılmıştır ve bu kısımlarda kullanılan BEÇÇ'lerin enkesitleri Şekil 1.17-c'de gösterilmektedir (D1-2. kat; 1. kısımdaki deneyde 2. katdaki BEÇÇ). 1. kısımdaki 1. deney CC deprem kaydının 50 yılda %50 aşılma olasılığı (bu ifadeye kısaca D1-1-CC-50/50 olarak adlandırılıp diğer deneylerde benzer şekilde kısaltılmıştır) olacak şekilde ölçeklendirilerek yapılmıştır. Bu deneyin hemen başında 1. katta BEÇÇ'nin kiriş ile birleştiği bayrak levhasında burkulma (Şekil 1.17-d) ve ayrıca 1. kat sağ kolon dibinde BEÇÇ-bayrak levhasının birleşimde düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir. Bu testten sonra her katta kiriş orta



noktasında bulunan bayrak levhalara ek plakalar kaynatılarak bayrak levhalarının burkulma kapasiteleri arttırılmıştır (Şekil 1.17-e) ve BEÇÇ ısıtma işlemi ile onarılmıştır. Bu işlemlerden sonra bu test tekrarlanmıştır. Deney D1-2-LP-10/50: Bu deneyde kolon-BEÇÇ birleşim bölgesindeki döşemede çatlaklar meydana gelmiştir. Deney D1-3-CC-2/50: Bu deneyde yine 1. kat sol kolon-BEÇÇ'nin birleştiği noktada BEÇÇ'de eğilme gözlenmiştir ve deney durdurularak 1. kat kolon dibindeki bayrak levhaları ek plakalar ile güçlendirilmiştir (Şekil 1.17-f). Daha sonra test devam etmiştir. Deney D1-4-LP-10/50: Bu deney esnasında 1. kat sol BEÇÇ'de hafif de olsa yüksek modda burkulma görülmüştür. Deney D1-5: Bu deney yukarıdaki deneyler tamamlandıktan sonra statik olarak tekrarlanan tersinir yatay yük uygulanarak yapılmıştır. Sırasıyla dörder kez %1, 1.25, 2.0, 2.52 ve son olarakda iki kez % 3.75 kat ötelemesine kadar tekrarlanan tersinir deplasman uygulanmıştır. %2 kat ötelemesi kadar deplasman uygulandığında 1. kattaki BEÇÇ'de yüksek modda burkulma gözlenmiştir (Şekil 1.17-g). Bunun yanında 3. katta BEÇÇ-kolon birleşiminde bayrak levhasında burkulma meydana gelmiştir (Şekil 1.17-h). %2.5 kat ötelemesinde 2. kat giriş ortasında, guse levhası-BEÇÇ birleşiminde BEÇÇ'nin uç kısmında Şekil 1.17-i'de görülen düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir. Bu beş deneylik ilk fazdan sonra sadece BEÇÇ'ler değiştirilip 2. ve 3. kat kolon diplerindeki bayrak levhalarına ek plakalar kaynatılarak burkulma kapasiteleri arttırılmıştır (Şekil 1.17-f). İkinci kısımdaki deneyler aynı deprem kayıtlarının farklı ölçeklendirme metodu kullanılarak yapılmıştır. Deney D2-1-CC-10/50: Bu deney esnasında giriş kolon birleşiminde plastikleşme meydana gelmiştir. Deney D2-2-LP-2/50: Bu deney esnasında giriş-kolon birleşim noktasında döşemede çatlaklar meydana gelmiştir. Deney D2-3: Bu deney yine yukarıdaki 2. kısımdaki iki deney tamamlandıktan sonra statik olarak tekrarlanan tersinir yatay yük uygulanarak yapılmıştır. Bu deneyin %2.5 kat ötelemesine geldiğinde, kolon-temel birleşimdeki profilde yırtılma meydana gelmiştir ve %3.75 kat ötelemesinde kolon tamamen kopmuştur (Şekil 1.17-j-k). Sonuç olarak, oldukça düşük yatay yük istemlerine sahip deney D1-1-CC-50/50'nin hemen başında meydana gelen bayrak levhasındaki burkulma, kullanılan dizayn metodlarında soru işareti oluşturmuştur.



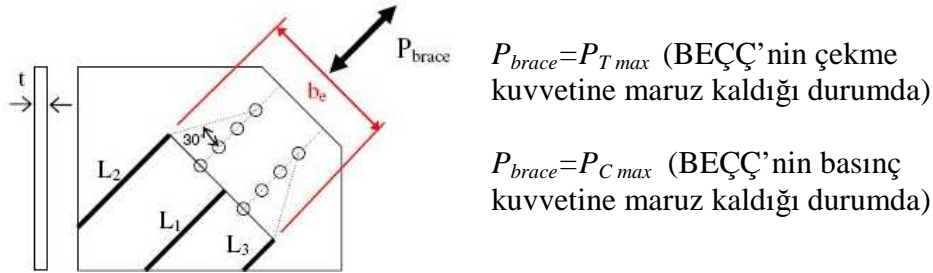
Şekil 1.17. a)Deney çerçevesinin plan görünümü, b)Deney çerçevesinin fotoğrafı, c)Deneyde kullanılan BEÇÇ'ler, d-k)Deney esnasında gözlenen deformasyonlar ve bayrak levhasına eklenen plakalar ([26]'dan ve [27]'den adapte edilmiştir).

Bayrak levhasının tasarımı yapılırken, BEÇÇ'nin çekme kuvveti altında Whitmore (1952) kesiti dikkate alınmıştır [28]. Bu kesit Şekil 1.18'de gösterildiği gibi  $b_e$  ve  $t$  ile sınırlanan kesittir. Denklem 6 sağlanarak, bayrak levhasının bu sınırlanan Whitmore kesiti boyunca plastikleşmesine izin verilmez. Bu denklemde:  $P_y$ Gusset,  $F_y$ ,  $b_e$  ve  $t$  sırasıyla bayrak levhasının akma kapasitesi, malzeme akma gerilmesi, bayrak levhası üzerindeki Whitmore kesiti genişliği ve kalınlığıdır.  $P_T$  max ve  $P_C$  max: BEÇÇ'nin maksimum çekme ve basınç kapasitesi,  $\Omega$ ,  $\Omega_h$  ve  $P_y$  sırasıyla ÇE'nin malzeme büyütme, pekleşme katsayısı ve akma kapasitesidir.  $P_{cr}$ : bayrak levhasının burkulma kapasitesi,  $L_{gc}$ : Şekil 1.18'de gösterilen mesafelerden en uzununu,  $r$ : atalet yarıçapı ve  $\beta$ : BEÇÇ'nin eleman bazında yapılan deneyden elde edilen maksimum basınç ve çekme kapasitesi arasındaki oran (bu oran [24]'de 1.3 olarak verilmiştir). BEÇÇ'nin basınç kuvveti etkisi altında bayrak levhasının hesaplarında Thornton (1984) tarafından önerilen ve Şekil 1.18'de bayrak levhası üzerinde gösterilen L1, L2 ve L3 uzunluklarından en büyük olanı kritik boy ( $L_{gc}$ ) olarak alınır [29]. Bu kritik boy kullanılarak, Denklem 7 BEÇÇ'nin basınç durumu için sağlanmalıdır. Denklem 7'deki etkili boy katsayısı ( $k$ ), [29] tarafından önerilen 0.65 olarak alınması durumunda hesaplanan değerler, deneyde kullanılan BEÇÇ'lerin aksel basınç yüklerinden daha büyük olmasına rağmen [26 ve 27]'de bahsedilen burkulmalar meydana gelmiştir. Bu çalışma sonunda 0.65 olan etkili boy katsayısının bayrak levhasına ek plakalar eklenmesi ile kullanılabilceği, eğer ek plaka kullanılmazsa bu katsayının 2 olarak kullanılabilceği belirtilmiştir [27].



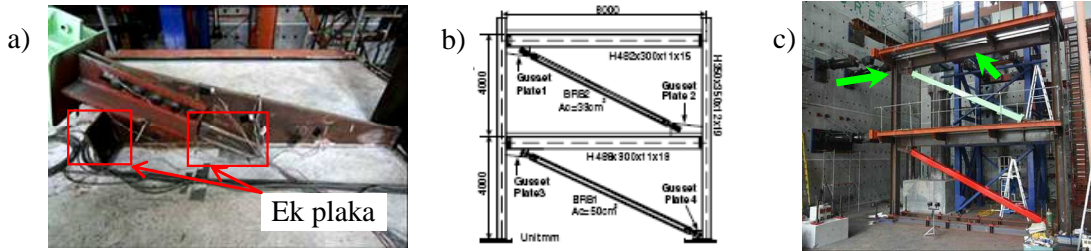
$$P_{yGusset} = F_y \times b_e \times t \geq P_{Tmax} (= \Omega \times \Omega_h \times P_y) \quad (6)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E}{(kL_{gc}/r)^2} \times b_e \times t \geq P_{Cmax} (= \beta \times \Omega \times \Omega_h \times P_y) \quad (7)$$



Şekil 1.18. Bayrak levhasındaki kuvvetler ([26]'dan adapte edilmiştir.).

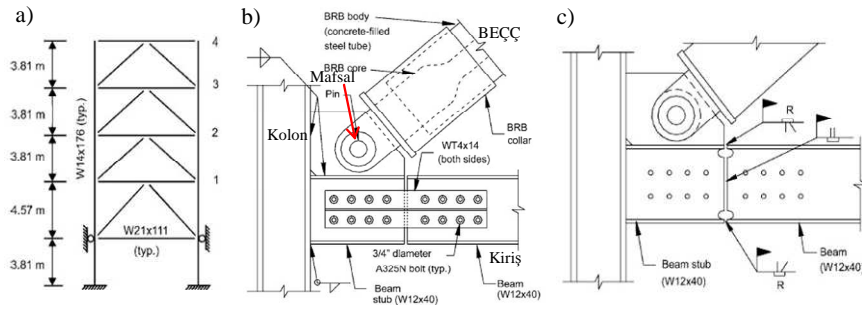
Tsai ve diğ. [26 ve 27] tarafından yapılan deneyde ilk yükleme esnasında bayrak levhasında meydana gelen burkulmadan sonra BEÇÇ'li çerçevelerde bağlantı detayını incelemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Lin ve diğ. (2005 ve 2006) tarafından analitik çalışmalar yapılmıştır [30, 31]. Bu analitik çalışmada bayrak levhasının ek plakalarla burkulmaya karşı güçlendirilebileceği belirtilmiştir. Ek plaka kullanılması durumunda (Şekil 1.19-a), etkili boy katsayısı için 0.65 katsayısı önerilmiş olup, bu analitik çalışma dikkate alınarak Şekil 19-b'de gösterilen çerçeve, hem çerçeve ekseninde hemde çerçeve eksenine dik yönde yatay istemlerin uygulandığı (Şekil-1.19-c) dinamik benzeri yükleme altında Tsai ve diğ. (2006) tarafından test edilmiştir [32]. Bu deneylerde kolon-bayrak levhasındaki kaynakta çatlama meydana gelmesine rağmen, çerçeve yeterli performans göstermiştir.



Şekil 1.19. a) Bayrak levhası ve ek plakalar, b) Deney çerçevesi çizimi, c) Deney çerçevesi yükleme yönleri ([32]'den adapte edilmiştir.).

Çerçeve benzeri sistem bazında ve çerçeve düzeyindeki deneysel çalışmalarda genel olarak bayrak levhası-BEÇÇ arasındaki bağlantı bulonlar yapılmaktadır ve benzer özellik taşımaktadır (Şekil 1.10-ı, Şekil 1.11-a, Şekil 1.12-a, Şekil 1.14-i, Şekil 1.15-a, Şekil 1.16-f, Şekil 1.17-h, Şekil 19-a). Fahnestock ve diğ. (2007), Şekil 1.20-a görünen, 0.6 ölçekli dört katlı ve tek açıklıklı çerçeveyi test etmişlerdir [33]. Bu çalışmada yapılan deneylerin ilk kısmında (Hibrid dinamik benzeri yükleme) Şekil 1.20-b'deki, diğer kısımda (statik yükleme) ise Şekil 1.20-c'deki bağlantı detayı kullanılmıştır. Bu bağlantı detaylarında, diğer çalışmalardan farklı olarak, giriş bayrak levhası kadar bir kısımda kolona bağlanmış ve daha

sonra kirişin devamı bu ilk kısma, ilk deneyde moment aktarmayacak şekilde sadece profil gövdesinden bulonlarla (Şekil 1.20-b), diğer deneyde moment aktaracak şekilde profil başlıklarından kaynatılarak bağlanmıştır (Şekil 1.20-c). Bunun yanında bu çalışmada kullanılan BEÇÇ'ler bayrak levhasına diğer çalışmalardaki bulonlu birleşimden farklı olarak mafsallı şekilde bağlanmıştır. Bu deneylerin ilkinde ikinci katta % 4.8 ve diğer deneyde aynı katta % 5 kat ötelemesine kadar çerçeve stabil şekilde yük taşımaya devam etmiştir. Her iki deneyde de bayrak levhasında herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Bu davranış, BEÇÇ'nin mafsallı olarak bağlanması ve bu bağlantı boyunun kısa olmasının yanında Şekil 1.20'de verilen bağlantı detayının etkili olduğu belirtilmiştir [33].



Şekil 1.20. a) Deney çerçevesi çizimi, b) Bağlantı detayı 1, c) Bağlantı detayı 2 ([33]'den adapte edilmiştir).

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu proje kapsamında yapılan çalışmalar Akdeniz Üniversitesi ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi yapı laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Eleman bazında yapılan BEÇÇ testleri Akdeniz Üniversitesi'nde, BEÇÇ ile güçlendirilmiş 3 açıklıklı ve 3 katlı betonarme çerçeve deneyi ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 22 adet eleman bazında BEÇÇ testi yapılmıştır.

### 2.1. ELEMAN BAZINDA YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA

BEÇÇ'lerin eleman bazındaki deneysel çalışmaları Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında bu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında test edilen BEÇÇ elemanları üç gruba ayrılmıştır.



1. Grup BEÇÇ'ler: Bu gruptaki BEÇÇ'lerin BEM sistemleri kutu profil içine beton dökülmüş kesit, sargılı ve sargısız betondan oluşmaktadır. Bu grup için toplam 10 BEÇÇ deneyi yapılmıştır.
2. Grup BEÇÇ'ler: Bu gruptaki BEÇÇ'lerin BEM sistemleri çok parçalı basınç çubuğu özelliğindedir. Bu grup için toplam 3 BEÇÇ deneyi yapılmıştır.
3. Grup BEÇÇ'ler: Bu gruptaki BEÇÇ'lerin BEM sistemleri prekast panellerden (PP'lerden) oluşmaktadır. Bu grup için toplam 7 BEÇÇ deneyi yapılmıştır.

Söz konusu 3 gruptaki BEÇÇ elemanlarının en kesit özellikleri birbiri ile aynı olup aralarında fark BEM sistemi ve izolasyon malzemesinin kalınlığıdır. BEÇÇ boyutlarının belirlenmesinde başlıca dört faktör dikkate alınmıştır: literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan BEÇÇ'ler, piston kapasitesi, yükleme sistemi kapasitesi ve BEÇÇ için kullanılacak olan malzemenin temin edilmesi. Bu proje kapsamında test edilen BEÇÇ'lerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri EK1'de mevcuttur.

Literatürde test edilen BEÇÇ tipleri: Fahnestock ve diğ. (2007) çalışmasında yaklaşık 3.8 m yükseklik 9 m genişliğindeki çerçeve sistemine ters V çapraz olacak şekilde ve 356-1245 kN akma kapasitesine sahip BEÇÇ kullanmışlardır. Tremblay ve diğ. (2006) çalışmasında 1588 mm<sup>2</sup> ve 587 kN akma kapasitesine sahip ÇE'den oluşan BEÇÇ'leri 3.65 m yüksekliğinde ve 4.87 m genişliğindeki çerçeve sistemine diyagonal çapraz olacak şekilde bağlantısının yapıldığı elemanları test etmişlerdir. Bu test elemanlarındaki ÇE'nin plastik kısmı 1.0 m ile 2.83 m arasında değişmektedir. Tsai ve diğ. (2008) tam ölçekli 3 katlı ve 3 açıklıklı (3 m yükseklik, 7 m açıklık) çelik çerçeveye 1., 2. ve 3. katlara sırasıyla 3000, 2500 ve 1500 mm<sup>2</sup> ÇE alanına sahip BEÇÇ'leri ters V çelik çapraz olacak şekilde bağlayarak test etmişlerdir. Burada kullanılan BEÇÇ'lerdeki ÇE'nin plastik bölge uzunluğu 2.605 m – 3.22 m arasında değişmektedir. Merritt ve diğ. (2003) test çalışmalarında 2500-18500 mm<sup>2</sup> ve 4.55 m - 4.70 m arasında ÇE alan ve plastik bölge uzunluğu olan BEÇÇ'ler test etmişlerdir. Clark ve diğ. (1999) 3 katlı 4 açıklıklı (4 m yükseklik, 9 m açıklık) çelik çerçeveye 3500 -6700 mm<sup>2</sup>'lik ÇE'ye sahip BEÇÇ'lerin eklenmesi durumunda analizler yapmışlardır. Berkeley Üniversitesinde 1999-2000 yıllarında ÇE alanları 2907-7125 mm<sup>2</sup> arasında, plastik bölge uzunluğu 3-3.4 m arasında, akma kapasitesi 1217-2155 kN arasında olan BEÇÇ'ler test edilmiştir (Blak ve diğ. 2004). Young ve diğ. (2009) 650 kN akma kapasitesi ve 2.5 m eleman uzunluğu olan BEÇÇ'leri eleman bazında test etmişlerdir. Yooprasertchai ve Warnitchai (2008) 585 mm<sup>2</sup> alan ve 2.4-2.8 m boyundaki BEÇÇ'leri test etmişlerdir. Christopoulos (2005) tek katlı (3.6 m) tek açıklık (3.6 m) çelik çerçeve içerisine 3.6m uzunluğunda ve 979 kN kapasitesinde BEÇÇ'ler ekleyerek test yapmıştır. Literatüre bakıldığı zaman BEÇÇ uzunluğu ve ÇE en kesit alanı için geniş bir dağılım söz konusudur. Bu proje



kapsamında test edilmesi planlanan elemanların boyu, ÇE alanı ve akma kapasitesi literatür geneline bakıldığında sırasıyla 2.5-5.0 m, 1500-3500 mm<sup>2</sup> ve 500-1500 kN aralığında olması durumunda tam ölçekli BEÇÇ elde edilebileceği görülmüştür.

Piston kapasitesi: Projede belirlenen piston kapasitesi 1000 kN'dur. Pistonun aksenal basma ve çekme kapasitesinin 1000 kN olması test edilecek olan BEÇÇ elemanlarının da kapasitelerini belirleyici olmuştur. Bu proje kapsamında temin edilen deplasman kontrollü pistonun stroke hareketleri kontrol sistemine tanıtılan bir adet LVDT ile sağlanmıştır. Piston stroke'nun kontrol edildiği LVDT'nin ise direk olarak BEÇÇ üzerine yerleştirilmesi ile deney düzeneği üzerindeki diğer deplasmanlardan yalıtılmış olacağı düşünülmüştür.

Yükleme sistemi kapasitesi: Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında gerekli yükleme sistemini oluşturacak alan mevcut olup yükleme sistemi kapasitesi test edilecek BEÇÇ elemanına göre tasarlanmıştır. Bu durumda piston kapasitesi (1000 kN) yükleme sisteminin taşıyıcı elemanlarının en kesitleri için belirleyici olmuştur.

BEÇÇ için kullanılacak olan malzemenin temini: BEÇÇ'lerde kullanılan çelik plakaların düzgün ve hassas kesilmesi üretilecek olan elemanın davranışında önemli rol oynamaktadır. ÇE'nin yüzeyindeki muhtemel pürüzler sürtünmeyi arttıracak düşünölmüştür. Bu durum BEÇÇ performansı için olumsuz bir koşul yaratmaktadır. Dolayısı ile BEÇÇ plakalarının ve özellikle ÇE'nin kesiminde lazer kesim yapılması daha uygun görölmüştür. Lazer kesim tezgahları genel olarak 3 m ve 5 m olarak piyasada mevcut olmasına rağmen en çok kullanılanı 3 m'lik tezgahlardır. Özellikle projenin yürütöldüğü şehirde (Antalya) sadece 3 m'lik lazer kesim yapan makinalar mevcuttur. Dolayısı ile BEÇÇ boylarının ÇE'nin elastik ve plastik kısmının toplamı olarak 3 m olması uygun görölmüştür. ÇE'nin plastik bölgedeki alanı ise piston kapasitesi ile uyumlu olması gerekmektedir. Bu durumda ÇE en kesit alanı şu şekilde belirlenmiştir.

$$A_{\text{ÇE}} = \text{Maks. Aksenal Yük} / a_0 \times f_y \quad (1)$$

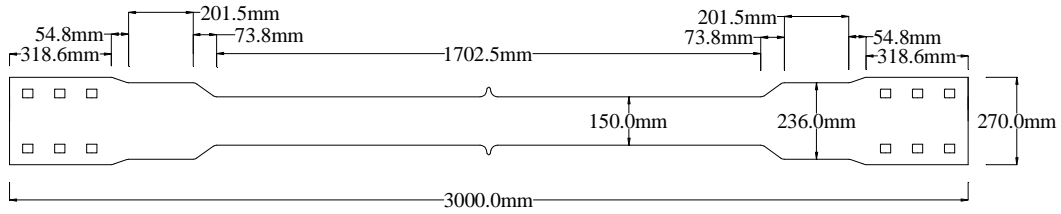
$f_y=235$  Mpa ; ÇE'nin ST37 çeliğinden üretilmesi durumunda akma gerilme kapasitesi,  
 $a_0=1.4$  ; aşım oranı

$A_{\text{ÇE}}=\text{Maks. Aksenal Yük} / (f_y \times a_0)$  ; maksimum ÇE plastik alanı (Şekil 1.1, 4. bölge)

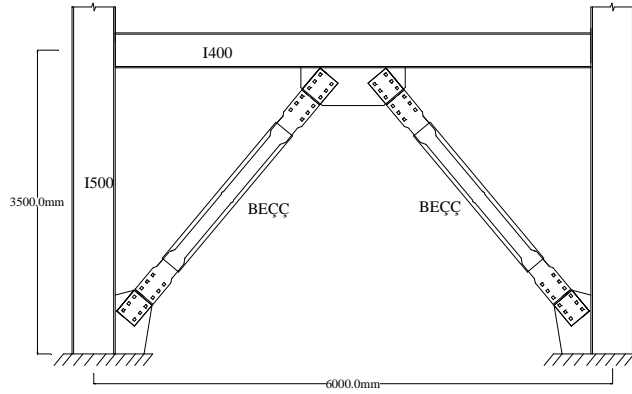
$$A_{\text{ÇE}}= 1000000 / (1.4 \times 235) = 3039 \text{ mm}^2$$

Maksimum ÇE alanı yukarıda göröldüğü gibi 3039mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Piyasa kullanılan çelik saçlara bakıldığı zaman 15mm'lik sacın kolay şekilde temin edilebildiği görölmüştür.

Ayrıca BEM için kullanılacak olan kutu profil kesiti piyasada en fazla 300 mm'ye kadar mevcut olduğu görülmüştür. Bu durumda 15x150mm'lik (alan=2250 mm<sup>2</sup>) ÇE plastik bölge en kesit alanına sahip BEÇÇ'lerin bu proje kapsamında test edilmesi yukarıda belirtilen gerekceler dikkate alındığın uygun görülmüştür. 15x150 mm'lik ÇE en kesitine sahip BEÇÇ'nin muhtemel akma kapasitesi kullanılan çelik saça bağlı olarak 500-750 kN arasında olması öngörülmüştür. Bu durumda da proje kapsamında test edilecek olan BEÇÇ'ler gerçek boyutdaki bir BEÇÇ olarak görülebilir. Bunun yanında proje kapsamında test edilecek olan BEÇÇ'lerin çelik çerçeve içerisine yerleştirilmesi durumunda 3.5 m yüksekliğinde ve 6 m açıklığında bir çerçeve içerisine yerleşebilir durumda olması literatürdeki test çerçeveleri ile de uyumlu olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile proje kapsamında test edilmesi planlanan, 3000 mm boyuna ve 2250 mm<sup>2</sup> en kesit alanına sahip BEÇÇ'ler literatürde test edilmiş ve analitik çalışmalarda kullanılan BEÇÇ'lerle uyumludur.



Şekil 2.1. Bu rapor kapsamında test edilen BEÇÇ boyu, plaka kalınlığı=15mm



Şekil 2.2. Bu rapor kapsamında test edilen BEÇÇ'nin çelik çerçeve içerisine yerleştirilmesi durumunda BEÇÇ'li çerçeve boyutları

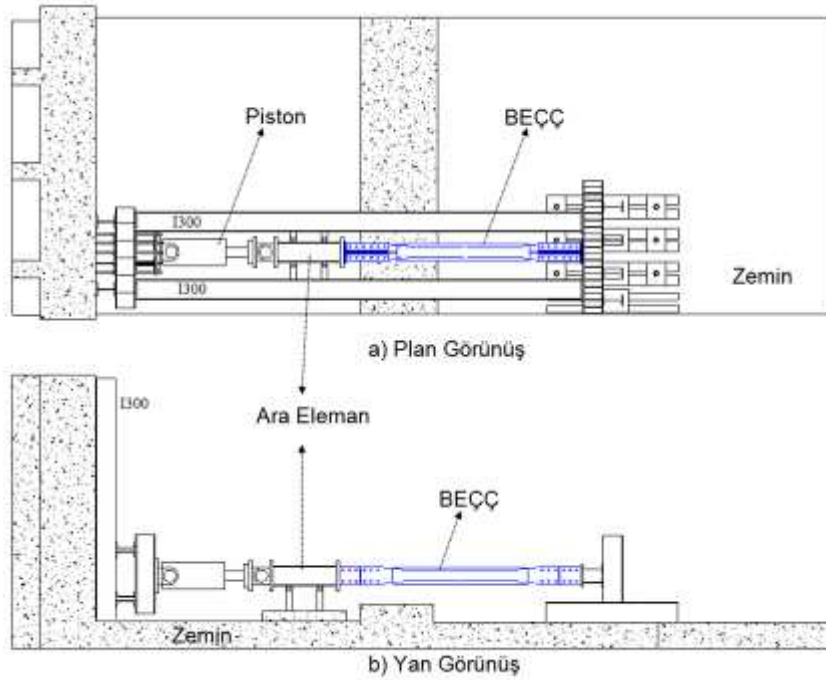
Şekil 2.1'de görüldüğü gibi BEÇÇ'nin orta noktasında en kesit alanı arttırılmıştır. Bu kısım BEM'in ÇE üzerinde göreceli hareketini engellemektedir. ÇE'nin plastik bölge uzunluğu ise Şekil 2.2'de görüldüğü gibi 1700 mm civarındadır. Bu değer literatürde çalışılmış BEÇÇ'ler ile uyumludur. Burada önemli diğer bir durum ise BEÇÇ'nin bağlantısını sağlayacak olan bulonların slot olarak açılmış olmasıdır. Bu durum şantiye ortamında bağlantıyı kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır. Elastik bölge ise Şekil 2.2'de görüldüğü gibi 270 mm

olup kolaylıkla 250x250 kesitindeki kutu profilin içinden geçebilecek özelliğindedir. Daha detaylı bilgi BEÇÇ eleman detaylarında mevcuttur.

BEÇÇ boyutlarının belirlenmesinden sonra yükleme düzeneğinin hazırlanmasına başlanmıştır. Yükleme düzeneğinin hazırlanacağı Yapı Laboratuvarındaki bölge deney düzeneğinin hazırlanmasından önceki ve sonraki hali Şekil 2.3'de görülmektedir. Detaylı çizimler ise Şekil 2.4'de görülmektedir.

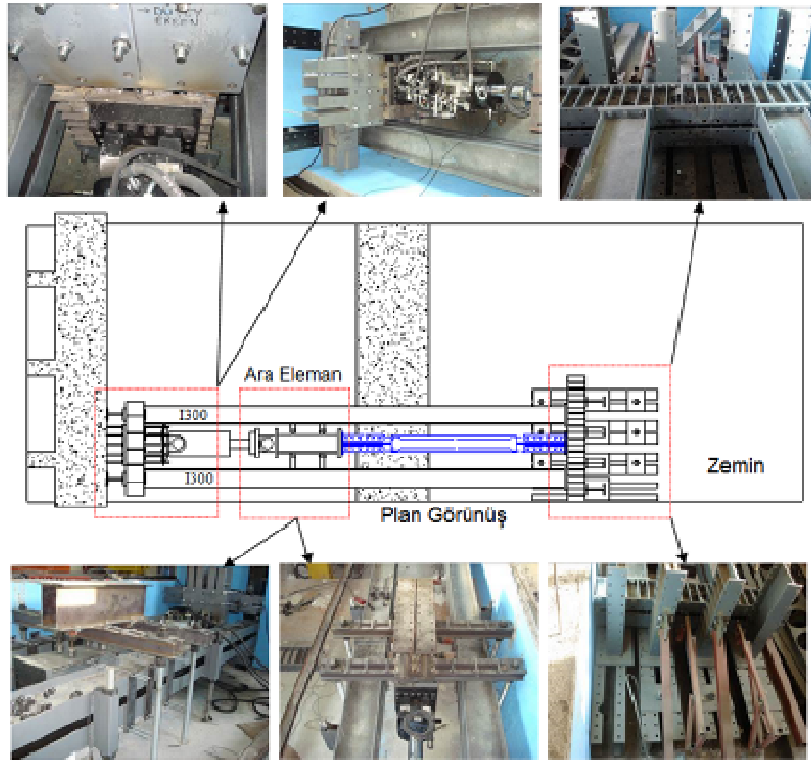


Şekil 2.3. Deneyel çalışmanın yapılacağı Yapı Laboratuvarı



Şekil 2.4. Deney düzeneğine ait detay çizimler

Deney düzeneğine ait detay birleşimler Şekil 2.5'de görülmektedir. Yükleme düzeneğinin kendi içinde yük aktaran bir sistem olarak çalışması planlanmıştır. Bu kapsamda I 300, IPE 300, yapma I profil, U 300 profili ve muhtelif boyutlarda ve kalınlıkta çelik plakalar kullanılmıştır. Söz konusu yapısal elemanlar gerek kaynak ve gerekse bulonlarla birleştirilmiştir. Şekil 2.4 ve 2.5'de görüldüğü gibi piston ve BEÇÇ arasında her yönden kayıcı bilyalarla tutulmuş ara eleman yerleştirilmiştir. Bu ara eleman sayesinde hem BEÇÇ'nin hemde pistonun kendi ağırlıkları taşınmış hemde pistonun düzlem dışı hareketinden kaynaklanabilecek pistonda olası hasarların oluşması önlenmiş olacaktır. Söz konusu ara eleman BEÇÇ'nin davranışı üzerinde herhangi bir etkisi olmayacağı düşünülmüştür.



Şekil 2.5. Deney düzeneğine ait detay fotoğraflar

## 2.2. 1. GRUP BEÇÇ ELEMANLARI

Literatürde oldukça sık kullanılan ve bazı deneysel çalışmalarda iyi performans göstermesine karşın bazılarında yetersiz histeretik performans gösteren BEÇÇ modelinin ek BEM uygulaması ile yetersiz olan performansının stabil hale getirilmesi planlanmaktadır. Bu BEÇÇ tiplerinin hem çelik yapılarda hemde betonarme yapıların sadece dış akslarından (yapının dışından) yapılacak olan güçlendirmelerde kullanılabilir özelliktedir. Burada üretilmesi düşünülen BEÇÇ'lerde BEM kutu profil içine beton dökülmesi, sargısız betondan, lifli polimer (LP) ile sarılmış sargılı betondan, etriye ile sarılmış sargılı betondan meydana gelmektedir.



Deney elemanlarına ait parametreler Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Bu tip bir BEÇÇ'lerin yapı içerisinde (iç akslara bağlanması) güçlendirme amacıyla kullanılması gerek fiziksel ve gerekse ağırlık bakımından pek kolay olmayacağı düşünülmektedir (yaklaşık ağırlığı 250-500 kg civarındadır).

Tablo 2 1. 1. Grup deney elemanları

1. Grup BEÇÇ	BEM	İzolasyon Malzemesi	EK BEM sistemi	EK BEM sistemi uzunluğu (mm)
1. BEÇÇ_1	Kutu Profil + Beton	2 mm lastik	Kutu profil	400
2. BEÇÇ_1	Kutu Profil + Beton	4 mm lastik	Kutu profil	400
3. BEÇÇ_1	Kutu Profil + Beton	4 mm lastik	Kutu profil	400
4. BEÇÇ_1	Kutu Profil + Beton	4 mm lastik	Kutu profil	240
5. BEÇÇ_1	Kutu Profil + Beton	4 mm lastik	Plaka	400
6. BEÇÇ_1	Kutu Profil + Beton	4 mm lastik	Plaka	400
7. BEÇÇ_1	Sargısız Beton	4 mm lastik	Plaka	400
8. BEÇÇ_1	LP sargılı beton	4 mm lastik	Plaka	400
9. BEÇÇ_1	Etriye Sargılı Beton	4 mm lastik	Plaka	400
10. BEÇÇ_1	Etriye Sargılı Beton	4 mm lastik	Plaka	400

### 1. BEÇÇ\_1 Elemanı

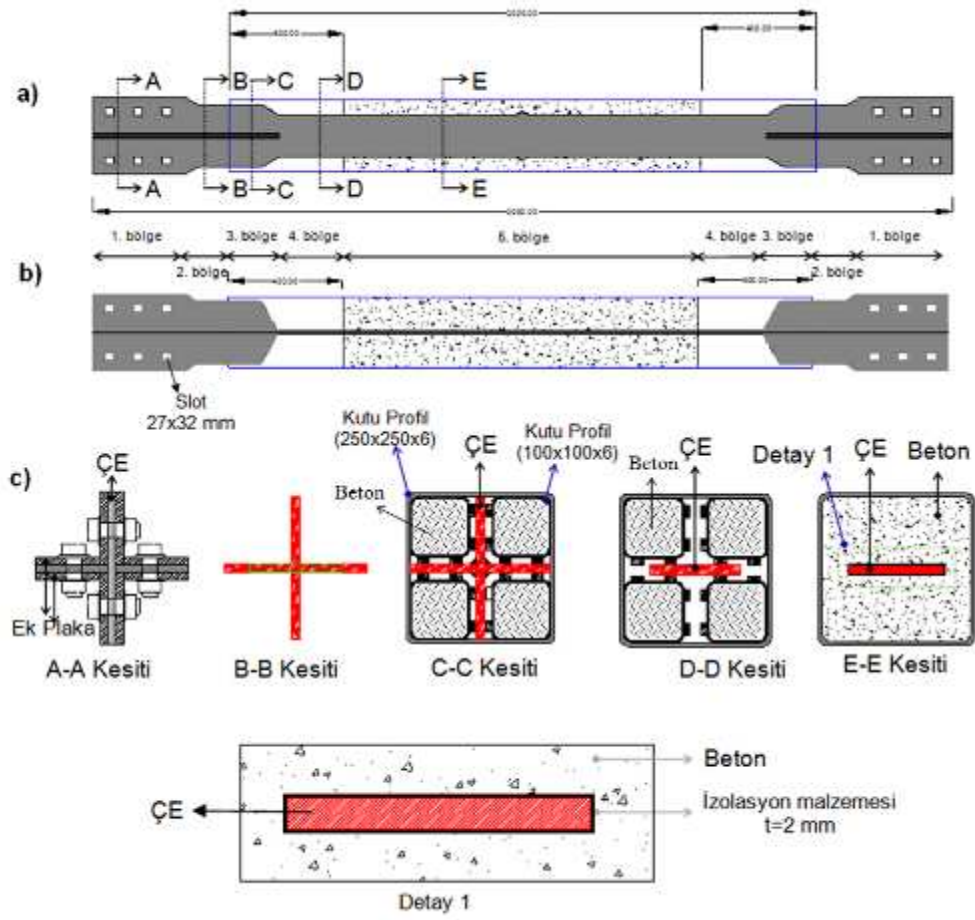
1. BEÇÇ\_1 modeline ait detaylar Şekil 2.6'da görülmektedir. Şekil 2.6'da gösterilen BEÇÇ'nin 3. (C-C kesiti) ve 4. (D-D kesiti) bölgesinde 4 adet 400 mm uzunluğunda 100x100x6 mm'lik kutu profil yerleştirilmiştir. Bu kutu profilin ÇE ile 2 mm civarında boşluk kalmasını sağlamak amacıyla her bir parçaya C-C kesiti ve D-D kesitinde görüldüğü gibi dört adet 10x10 mm'lik lamalar kaynatılmıştır. Bu sayede ÇE'nin bu profil-lama sisteminden oluşan bölgede sürtünmesi en aza indirilmiştir. En dışta ise 250x250x6 mm'lik kutu profil burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) olarak kullanılmıştır. Ayrıca BEM 5. bölgede 20 Mpa betondan ve kutu profilden oluşturulmuştur. Betonun 3. ve 4. bölgeye taşmasını engellemek için 4. ve 5. bölge arasında kapak plakaları yerleştirilmiştir. Bu elemanın imalat süreci ise ilk olarak Şekil 2.7-a, d ve j'de gösterilen ve Şekil 2.6-c'de A-A kesiti olarak verilen en kesitin elde edilmesi için ÇE'ye dik iki adet üzerinde slot açılmış plaka kaynatılmıştır. Daha sonra ÇE'nin plastik bölgesindeki birim uzamaları ölçebilmek için ÇE orta noktası civarına 4 adet birim uzama yapııştırılmıştır (Şekil 2.7-b) ve eleman antipas ile boyanmıştır (Şekil 2.7-c). Boyanın kurummasından sonra ÇE'nin plastik bölgesi (Şekil 2.6, 4. ve 5. bölge) 2 mm lastik şeritlerle kaplanmıştır. Bu sayede BEM içerisindeki ÇE'nin poizon oranından kaynaklı hacim değişimi ve sürtünmeden kaynaklı basınç kapasite artımı en aza indirilmesi sağlanmıştır. Bu işlemler sırasında birim uzama ölçerlerin zarar görmemesi için üzerleri örtülerek küçük bir boşluk elde edilmiştir (Şekil 2.7-e). Bunun yanında yine ÇE ile BEM arasındaki sürtünmenin en aza indirilebilmesi için ÇE üzerindeki lastik tamamen gres ile kaplanmıştır (Şekil 2.7-f). Gresin beton dökümü sırasında yıkanmasını önlemek için gres sürülmüş bölge tamamen streç naylon film ile kaplanmıştır (Şekil 2.7-g). ÇE bu işlemten sonra 250x250x6 mm olan kutu profil (Şekil 2.6-c) içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 2.7-h). Bu



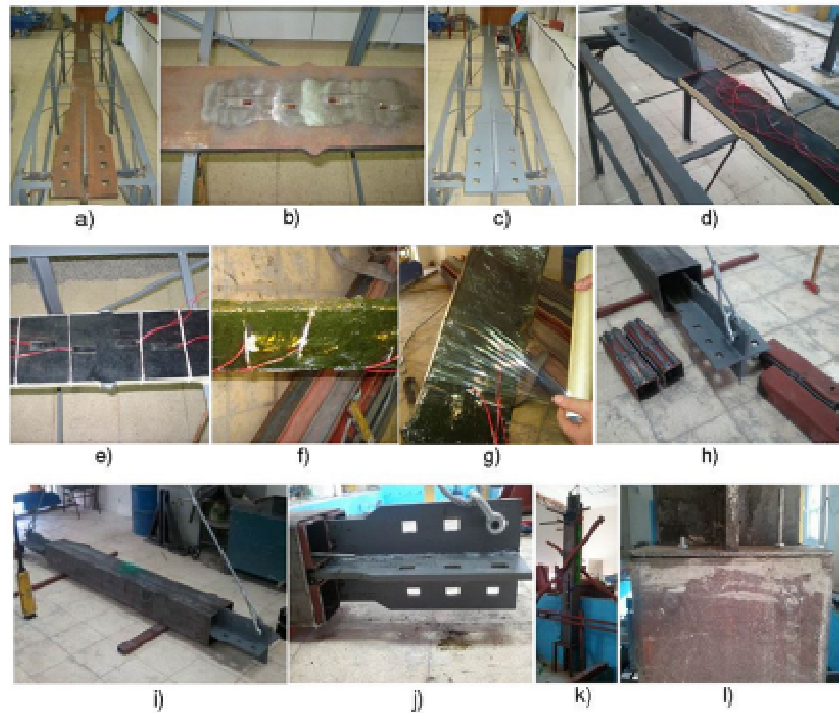


işlemden sonra Şekil 2.6-c'de gösterilen C-C kesitindeki 400 mm uzunluğundaki 100x100x6 kutu profilleri 250x250x6 mm'lik kutu profil ve ÇE arasına yerleştirilmiştir. Daha sonra Şekil 2.6-a ve b'de gösterilen 5. bölge betonun döküm işlemi yapılmıştır (Şekil 2.7-k). Son aşama olarak BEÇÇ'deki 250x250x6 mm'lik kutu profilin iki ucuna kapak plakaları monte edilmiştir (Şekil 2.6-l). Beton dökümünden sonra beton dayanımının 20 Mpa olması için bekleme sürecine geçilmiştir.

Şekil 2.6-a'da görüldüğü gibi ÇE'nin en kesit alanı arttırılmıştır. Bu sayede BEM ile ÇE arasındaki göreceli hareket engellenmiştir (BEM'in ÇE üzerinde göreceli hareket etmesi durumunda literatürdeki çalışmalarda ÇE'nin yukarıda 2. ve 3. bölge olarak tanımlanan kısımda lokal burkulmalar meydana gelmiştir). Literatürde 3. ve 4. bölgede bu çalışmada önerilen BEÇÇ modeli kadar etkin BEM yoktur (Literatür özetindeki (Chen ve diğ. 2001, Uriz 2005, Lopez ve diğ (2004), Aiken ve diğ. 2002 ve Christopoulos 2005). Şekil 2.6'deki 3. ve 4. bölgede lokal burkulmaların önlenmesi için 4 adet 400 mm uzunluğunda kutu profil kullanılarak ÇE'nin elastik kısımdan plastik kısma geçtiği bu bölgede oldukça etkin bir BEM oluşturulmuştur (Literatürde bu kısımlar genelde boşluk olarak bırakılmaktadır (Chen ve diğ. 2001, Uriz 2005, Lopez ve diğ (2004), Aiken ve diğ. 2002, Christopoulos 2005 ve Yooprasertchai ve Warnitchai 2008).



Şekil 2.6. 1. BEÇÇ\_1 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.7. 1. BEÇÇ\_1 üretim süreci



BEÇÇ'nin deney düzeneğine bağlantısı için ön-germeli bağlantı sistemi kullanılmıştır. Bu sistemin seçilmesinde proje kapsamında geliştirilecek olan güçlendirme amaçlı BEÇÇ'lerin gerçek uygulamasında montajın kolay olabilmesi için ÇE üzerine slot açılması daha uygundur (Şekil 2.6-b). Dolayısı ile bu rapor kapsamında test edilen BEÇÇ'lerin projenin devamında test edilmesi düşünülen güçlendirme amaçlı BEÇÇ'ler ile daha iyi karşılaştırma yapılabilmesi için slotlu birleşim detayı tercih edilmiştir. Bu rapor kapsamında bahsedilen BEÇÇ'lerdeki slot genişliği 27x32 mm (kısa slot) American Institute of Steel Construction (AISC) 2005 referansından alınmıştır. BEÇÇ ve deney düzeneğine bağlantısının slotlu birleşim ile yapılmasından dolayı bulonlar ön-germeli (Sürtünme Etkili (Kayma Kontrollü) Birleşim/slip-critical) yöntem kullanılarak plakaların sıkma işlemi yapılmıştır. Denklem 2 (AISC 2005) kullanılarak BEÇÇ ve deney düzeneği arasındaki bağlantı için gerekli bulon sayısı hesaplanmıştır. Denklem 2'de sadece bir bulunun ön-germe yaparak Şekil 2.6-c'deki A-A kesitindeki plakaları sıkarak sağlayacağı ÇE çekme yükü yaklaşık olarak 144 kN'dur. Güvenlik katsayısı olarak 1.5 kullanılırsa tek bir 10.9 M24 bulunun sağlayacağı kuvvet 96 kN olmaktadır. 1000 kN'luk bir BEÇÇ yapılması durumunda bile güvenli şekilde yükün taşınabilmesi için ( $1000/96=10.4$ ) 11 bulona ihtiyaç duyulmaktadır. Proje kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda ise bağlantılar 12 adet 10.9 M24 bulon kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$R_n = \mu \times \Delta u \times h_{sc} \times N_s \times T_b \quad (2)$$

$\mu$ ; 0.35 (yağı giderilmiş ve tel fırça ile sürtülmüş yüzeyler için)

$\Delta u=1.13$

$h_{sc}=0.85$  (kısa slot kullanılması durumunda)

$N_s=2$  (kayma yüzeyi, Şekil 2.6-c'de A-A kesiti)

$T_b=215$  kN (10.9 M24 bulon için ön-germe, sıkıştırma yükü)

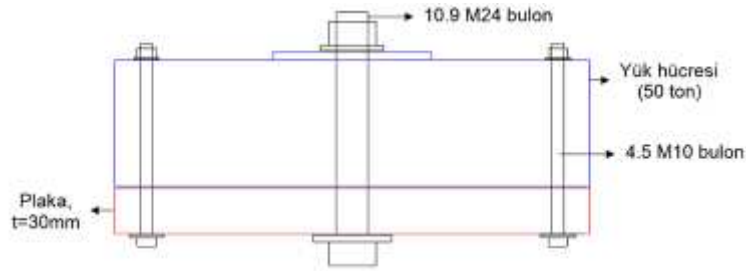
Denklem 2'de görüldüğü gibi 10.9 M24 bulunun ön-germe değeri 215 kN'dur. Dolayısı ile söz konusu bulonlara belirlenen yükde ön-germe uygulanması gerekmektedir. Bu işlem için en az 1100 NM'lik bir torka ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sıkma işlemi havalı somun sıkma-sökme makinası yardım ile gerçekleştirilmiştir. Sıkma miktarından emin olmak için basit bir deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 2.8). Bu sistemde 50 ton'luk yük hücresi 30 mm kalınlığındaki bir plakaya bağlanmıştır. Plakanın orta noktasında 10.9 M24 bulunun geçebileceği delik bulunmaktadır. Yük hücresinin üst kısmına kadar uzanan 10.9 M24 bulon bu noktada havalı somun sıkma-sökme makinası ile sıkılmıştır. Veri toplama sistemine bağlı yük hücresi sayesinde havalı somun sıkma-sökme makinasının kademelerinin ne kadarlık bir sıkma

kapasitesinde olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile havalı somun sıkma-sökme makinası 215 kN'luk sıkma yapabilmesi için gerekli kademesi elde edilmiş ve deney elemanlarının bütün bağlantılarında aynı kademe kullanılmıştır. BEÇÇ elemanının deney düzeneğine bağlantısı Şekil 2.9'da görülmektedir.

Bu tasarımlardan sonra BEM'in global burkulmasının önlenmesi gerekmektedir. BEM için kullanılan 250x250x6 mm'lik kutu profil denklem 3' sağlamalıdır Watanabe ve diğ. (1988).

$$P_e/P_y \geq 1, P_e = \pi^2 \times E \times I_{sc} / (l_{sc})^2, P_y = \sigma_y \times A_c \quad (3)$$

Burada  $P_e$  BEM'in (Kutu profil) Euler yük kapasitesi,  $P_y$  ÇE'nin akma kapasitesi,  $E$  çelik yong modülü,  $I_{sc}$  BEM'nin atalet momenti,  $l_{sc}$  çapraz uzunluğu,  $\sigma_y$  ÇE'nin akma gerilmesi,  $A_c$  ÇE'nin plastik bölgedeki enkesit alanıdır. Proje kullanılan kutu profil ve ÇE için  $P_e / P_y$  oranı 17 civarındadır. Bu oran oldukça yüksektir. Bu oranı düşürmek için daha küçük kutu profil kullanılmalıdır ancak piyasada istenilen boyutta bir kutu profil bulunamamıştır. Dolayısı ile 250x250x6 mm'lik profil ile BEM uygulamaları yapılmıştır.



Şekil 2.8. 10.9 M24 bulon sıkma kalibrasyonu için deney düzeneği



Şekil 2.9. BEÇÇ ve deney düzeneği bağlantısı

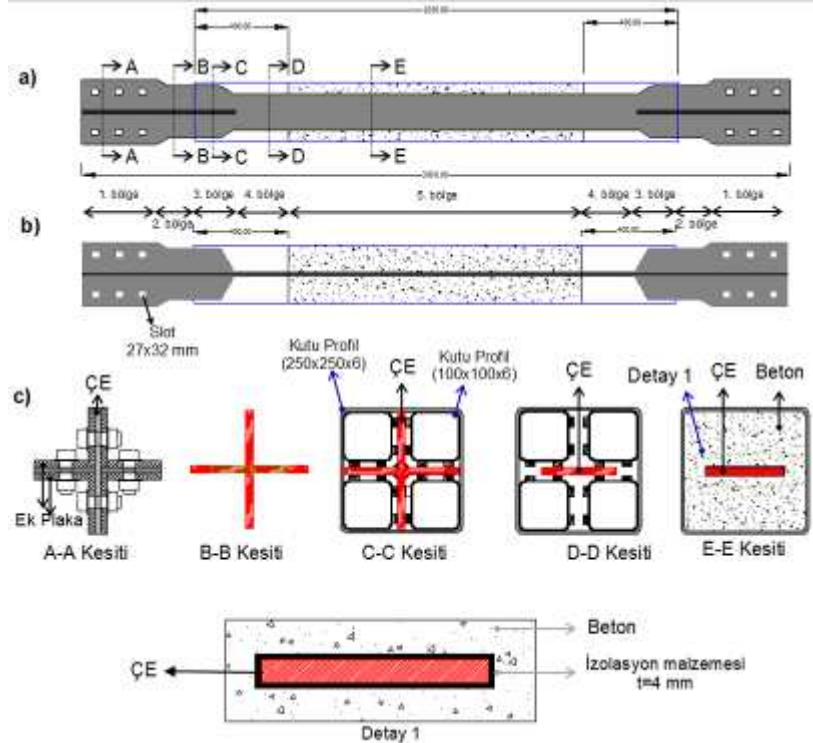
## 2. BEÇÇ\_1 Elemanı

1. BEÇÇ\_1 modelinin test esilmesinden sonra 1. BEÇÇ\_1 modelindeki bazı tasarım parametrelerinin değiştirilmesi uygun görülmüştür. Detayları deney sonuçlarında verilecek olan 1. BEÇÇ\_1 deneyinde BEÇÇ'nin aksenal basınç kapasitesi çekme kapasitesinden fazla çıkmıştır. Dolayısı ile 1. BEÇÇ\_1 elemanı test sonuçlarından 2. BEÇÇ\_1 elemanında

sürtünmenin daha da azaltılması gerektiği sonucu dikkate alınarak BEÇÇ tasarımında değişiklik yapılmıştır. 2. BEÇÇ\_1 modeli 1. BEÇÇ\_1 modeli ile hemen hemen aynı tasarım parametrelerine sahiptir. Aralarındaki farklar; 1. BEÇÇ\_1 modelinde ÇE izolasyonu için kullanılan lastik 2 mm kalınlığında olmasına karşı 2. BEÇÇ\_1 modelinde 2 kat lastik şerit kullanılmış ve toplam 4 mm'lik bir izolasyon boşluğu oluşturulmuştur (Şekil 2.6 ve Şekil 2.10, detay 1). Buna ek olarak 1. BEÇÇ\_1'de izolasyon için kullanılan lastik şeritler Şekil 2.6-a'daki 4. ve 5. bölgelerde ÇE üzerine yapıştırılmıştır ancak 2. BEÇÇ\_1'de bu şeritler sadece 5. bölgeye uygulanmıştır (Şekil 2.10 ve 11). Son olarak 1. BEÇÇ\_1 modelinde lastik şeritlerin üzerine uygulanan gres malzemesi ve streç naylon 2. BEÇÇ\_1 modelinde uygulanmamıştır. Bunun en önemli sebebi 1. BEÇÇ\_1 deneyinden sonra BEÇÇ\_1'nin içi açılmıştır ve ortamda gres malzemesine ratlanmamıştır (lastik şerit ile reaksiyona girdiği veya lastik şerit tarafından absorbe edildiği/emildiği düşünülmektedir.). Dolayısı ile zamana bağlı olarak etkisini yitiren bir malzemenin sadece deney esnasında sürtünmeyi önlemesi uzun yıllar yapıda kalacak olan BEÇÇ'lerin davranışları hakkında yanıltıcı bilgiye sebep olacağı düşünülmüştür.

### 3. BEÇÇ\_1 Elemanı

3. BEÇÇ\_1 elemanı 2. BEÇÇ\_1 elemanı ile aynı özellikte olup, 2. BEÇÇ\_1'nin tekrarıdır.



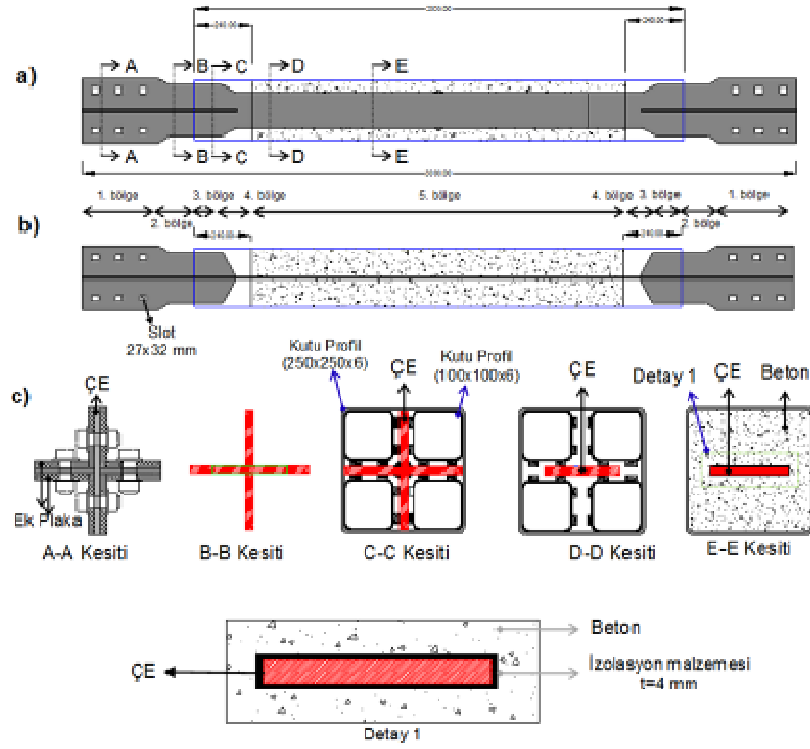
Şekil 2.10. 2. BEÇÇ\_1 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.11. 2. BEÇÇ\_1 elemanı üretim aşaması

#### 4. BEÇÇ\_1 Elemanı

4. BEÇÇ\_1 eleman detayı 2. ve 3. BEÇÇ\_1 eleman detayı ile sadece bir parametre bakımından farklıdır. 4. BEÇÇ\_1 eleman detayında 3. ve 4. bölgeyi oluşturan ve 1.-3. BEÇÇ\_1 eleman detaylarında 400 mm uzunluğunda 100x100x6 mm'lik kutu profilin kullanıldığı bu kısmın uzunluğu 240 mm'ye düşürülmüştür (Şekil 2.12 ve 2.13). Sadece tek bir parça için 160 mm'lik malzeme daha az kullanılmış olmakla beraber toplamda 1.3 m'lik 100x100x6 mm'lik kutu profil, 2.5 m'lik 10x10 mm'lik lama profilden ve işçilikten tasarruf sağlanması hedeflenmiştir.



Şekil 2.12. 4. BEÇÇ\_1 elemanı detay çizimleri

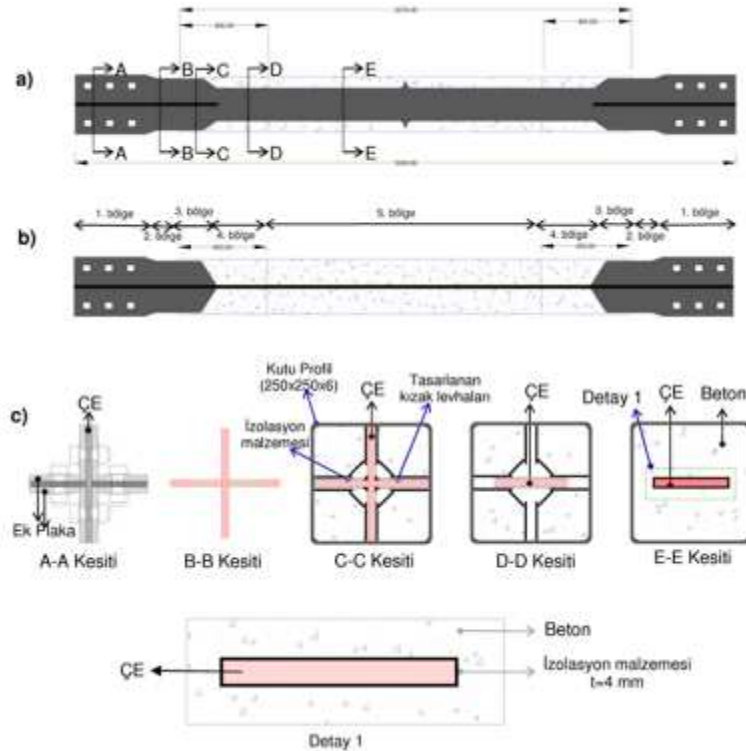


Şekil 2.13. 4. BEÇÇ\_1 elemanı üretim aşaması

## 5. BEÇÇ\_1 Elemanı

5. BEÇÇ\_1 eleman detayı 2. ve 3. BEÇÇ\_1 eleman detayı ile benzerdir. 5. BEÇÇ\_1 elemanında uç stabilite için 2. ve 3. BEÇÇ\_1 elemanlarında kullanılan 400 mm uzunluğundaki 100x100x6 mm'lik kutu profil yerine 400 mm uzunluğunda levhalarla dizayn edilen kızaklı sistem kullanılmıştır. 100\*100\*6mm'lik kutu profillerin yerine kullanılan kızak levhaları ve 5. bölgeyi 4. bölgeden ayıran iç kapağın (2. ve 3. BEÇÇ\_1 elemanlarında görülebilir) kullanılmamasıdır (bu sayede malzeme tasarrufu, imalat sürecinin kolaylaştırılması ve hızlandırılması sağlanmıştır). İzolasyon malzemesi ÇE'nin BEM içerisinde kalan 3, 4 ve 5. bölgeleri boyunca ana elemana çift kat, uç kısımların yanal

yüzeylerine ise tek kat olarak yapıştırılmıştır. Birim deformasyon ölçerlerin çalışma prensibini etkilememesi için uygun boşluklar çıkarılmış ve yapıştırıldıktan sonra laboratuvarın elverdiği koşullarda malzemeler ve işkencelerle sıkılarak tamamen yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 2.14). Yapıştırıcının kuruması için gereken süre kadar bekletildikten sonra fazla kısımları kesilerek yan yüzeylere tek kat çift taraflı bant uygulaması yapılmış ve izolabant ile kaplanarak BEM içine konurken herhangi bir zarar görmesi engellenmiştir (Şekil 2.14-15). Şekil 2.14'de 3. ve 4. bölgede oluşturulacak olan kızak sistemindeki kızakların her biri 3 adet levhanın kaynaklı birleşimi ile oluşturulmuştur (Şekil 2.15). Bu levhalar için belirlenen optimum ebatlar 400x79x4 mm ve 400x43x4 mm'dir. Bu sistemin içerisine beton girmemesi için ek plakalar sisteme kaynatılmıştır. Kızak sisteminin ÇE üzerindeki ve BEM olan 250x250x6 mm kare kutu profilin içine yerleştirilmiş hali Şekil 2.15'de görülmektedir. ÇE'nin üzerinde bulunan birim deformasyon ölçerlerin kablolarının çıkabilmesi için 250x250x6 mm kare kutu profile 14 mm çapında delik açılmıştır. 250x250x6 mm kare kutu profilin bir ucuna beton dökümünden önce diğer ucunda beton dökümünden sonra t=8 mm kalınlığında tasarlanan kapaklar kaynatılmıştır (Şekil 2.15). Vinç yardımı ile dikey hale getirilen BEÇÇ elemanına beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Beton dökümünden sonra diğer kapak plakası 250x250x6 mm'lik kutu profile kaynatılmıştır. Bu işlemin ardından 5. BEÇÇ\_1 elemanı deneye hazır hale gelmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.14. 5. BEÇÇ\_1 elemanı detay çizimleri





Şekil 2.15. 5. BEÇÇ\_1 elemanı yapım detayı

## 6. BEÇÇ\_1 Elemanı

6. BEÇÇ\_1 elemanı 5. BEÇÇ\_1 elemanı ile aynı özellikte olup, 5. BEÇÇ\_1'nin tekrarıdır.

## 7. BEÇÇ\_1 Elemanı

Bu BEÇÇ modelinde BEM tamamen değiştirilmiştir. Daha önce BEM olarak kullanılan 250x250x6 mm'lik profil yerine bu modelde donatısız beton kullanılmıştır. Bu sayede oldukça ekonomik bir BEM çözümü elde edilmesi planlanmıştır. Şekil 2.16 ve 2.17'de görüldüğü gibi 7. BEÇÇ\_1 modelinde BEM tamamen beton kesitten oluşmaktadır. BEM'i oluşturan beton kesit ise 380x380 mm'dir. Bu BEÇÇ tipinde Şekil 2.16 ve 2.17'de görüldüğü gibi 3. ve 4. bölgelerde 5. BEÇÇ\_1'dekine benzer kızak levhaları mevcuttur. Kızak levharının 3. ve 4. bölgelerde oluşturulmasından sonra BEÇÇ elemanı ahşap kalıp içerisine konularak beton dökülmüştür (Şekil 2.16 ve 2.17). Beton dökümünden 4 gün sonra numune kalıptan çıkartılmış ve kür yapılmıştır. Beton dayanımının 20 MPa değerine ulaşmasından sonra deney öncesi işlemlere başlanmıştır (deney günü beton dayanımı 23.5 MPa). 7. BEÇÇ\_1 modelinde yapılan tasarım hesapları şu şekildedir. BEM'in global burkulmasının önlenmesi gerekmektedir. BEM için kullanılan 380x380 mm'lik kesitin Denklem 1'i sağlamalıdır (Watanabe ve diğ. (1988)).

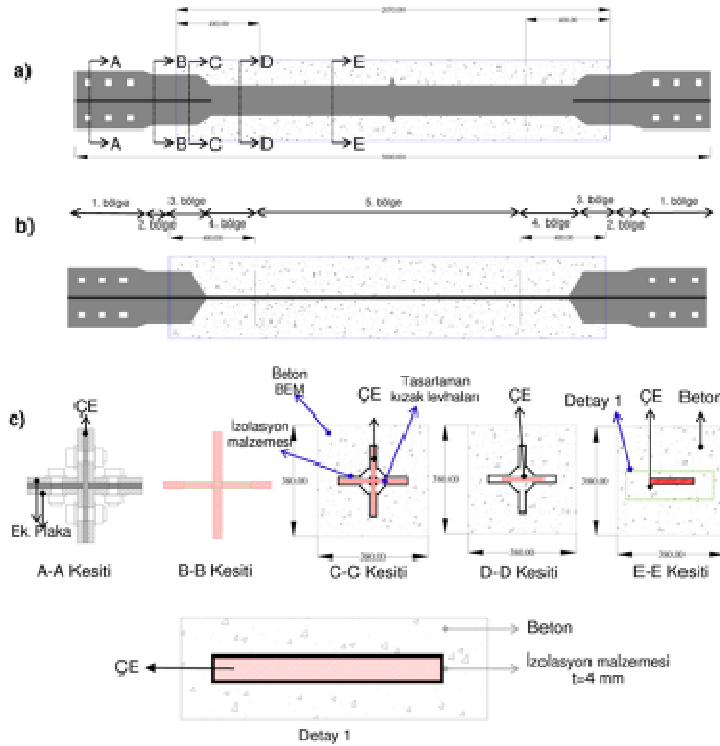
$$P_e/P_y \geq 2, \quad P_e = \pi^2 \times E \times I_{sc} / (l_{sc})^2, \quad P_y = \sigma_y \times A_c \quad (1)$$

$$E = 14000 + 3250\sqrt{f_c} = 14000 + 3250\sqrt{20} = 28500 \text{ MPa}$$

$$I_{sc} = 1/12 \times 380 \times 380^3 = 1737613333 \text{ mm}^4$$

$$P_e = \pi^2 \times 28500 \times 1737613333 / (2050)^2 = 121403759 \text{ N} \quad P_y = \sigma_y \times A_c = 2250 \times 325 = 731250 \text{ N} \quad (4)$$

Burada  $P_e$  BEM'in (beton kesit) Euler yük kapasitesi,  $P_y$  ÇE'nin akma kapasite,  $E$  beton yong modülü (TS 500 formülü kullanılmış olup tasarımda kullanılan beton dayanımı 20 MPa'dır),  $I_{sc}$  BEM'nin atalet momenti,  $l_{sc}$  çapraz uzunluğu (BEM uzunluğu olarak alınmıştır, 2050 mm),  $\sigma_y$  ÇE'nin akma gerilmesi,  $A_c$  ÇE'nin plastik bölgedeki enkesit alanıdır. Bu eleman için  $P_e / P_y$  oranı 158 civarındadır. Bu oranın çok yüksek olması özellikle BEÇÇ'nin elastik bölgesindeki "+" şeklinin geniş olmasından kaynaklanmaktadır.



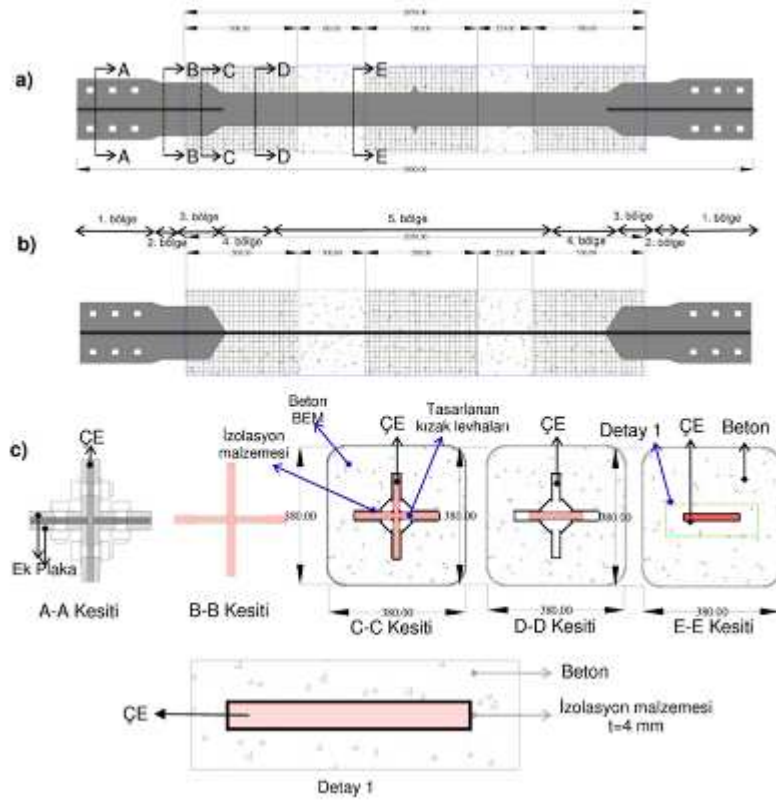
Şekil 2.16. 7. BEÇÇ\_1 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.17. 7. BEÇÇ\_1 eleman yapım detayı

### 8. BEÇÇ\_1 Elemanı

Bu BEÇÇ\_1 modelinde BEM 7. BEÇÇ\_1 modeli ile aynıdır. Ancak 7. BEÇÇ\_1 modelinde test esnasında beton BEM'de meydana gelen hasar dikkate alınarak 8. BEÇÇ\_1 modelinde beton BEM'in üç farklı bölgeden FRP ile sarılması uygun görülmüştür (Şekil 2.18 ve 2.19). Bu sayede 7. BEÇÇ\_1'den daha az ekonomik ancak yine de ekonomik bir BEM çözümü elde edilmesi planlanmıştır. Şekil 2.18'de görüldüğü gibi 8. BEÇÇ\_1 modelinde BEM tamamen beton kesitten oluşmaktadır. BEM'i oluşturan beton kesit ise 380x380 mm'dir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Bina Türü Yapılar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007'de belirtildiği üzere FRP ile sarılacak olan beton kesitlerinin köşelerinin yuvarlatılması gereklidir. Dolayısı ile 380x380 mm'lik kesitin köşelerinin yuvarlatılması için beton dökümünden önce kalıp köşelerine 100 mm çapındaki plastik boru dört parçaya bölünerek montajlanmıştır (Şekil 2.18 ve 2.19). Bu işlemden sonra kalıplara beton dökülmüştür. Beton dökümünden 4 gün sonra numune kalıptan çıkartılmış ve kür yapılmıştır. Beton dayanımının 20 MPa değerine ulaşmasından sonra deney elemanı tamamen kuramaya bırakılmıştır. Beton yüzeyinin iyice kurumasından sonra beton BEM'in iki ucuna ve ortasına 50 cm'lik FRP sarılmıştır. Bunun için ilk önce tamir harç beton üzerine sürülmüştür ve tamir harcının sertleşmesinden önce hem tamir harcının üzerine hemde FRP üzerine epoksi sürülerek FRP sarma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.18. 8. BEÇÇ\_1 elemanı detay çizimleri

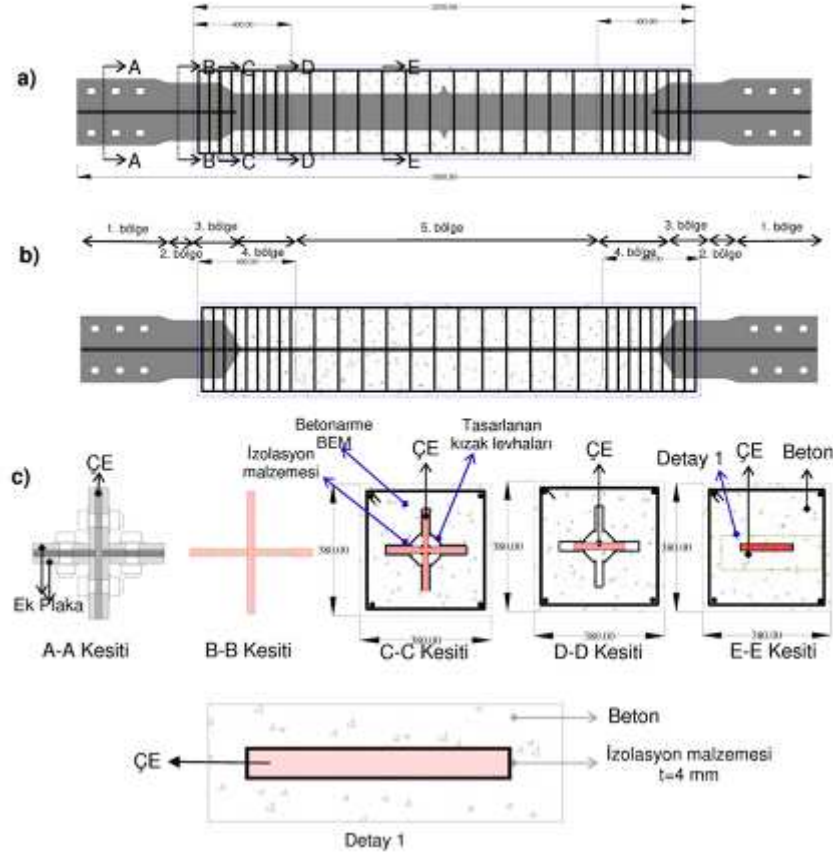


Şekil 2.19 8. BEÇÇ\_1 eleman yapım detayı

### 9. BEÇÇ\_1 Elemanı

Bu BEÇÇ modelinde BEM 7. BEÇÇ\_1 modeli ile aynıdır. Ancak 7. ve 8. BEÇÇ\_1 modellerinde test esnasında beton BEM'de meydana gelen hasar dikkate alınarak 9.

BEÇÇ\_1 modelinde beton BEM'in etriyeler ile sargılı beton halinde kullanılması uygun görülmüştür (Şekil 2.20 ve 2.21). Bu sayede 7. BEÇÇ\_1'den daha az ekonomik ancak 8. BEÇÇ\_1'den daha ekonomik bir BEM çözümü elde edilmesi planlanmıştır. BEM'i oluşturan beton kesite yerleştirilecek olan etriye aralıkları kızak bölgesinde yani Şekil 2.20 ve 2.21'de 3. ve 4. bölgede 5 cm 5. bölgede ise 10 cm'dir. Etriye aralıkları Deprem Bölgelerinde Yapılacak Bina Türü Yapılar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007'de belirtilen minimum ve maksimum aralıklar olup kullanılan etriye çapı yine 8 mm'dir. Etriyelerin montajını sağlamak için ise 4 adet 8 mm'lik boyuna donatı kullanılmıştır. Donatının bağlanmasından sonra BEÇÇ kalıba yerleştirilerek beton dökülmüştür (Şekil 2.20-2.21). Beton dökümünden 4 gün sonra numune kalıptan çıkartılmış ve kür yapılmıştır.



Şekil 2.20. 9. BEÇÇ\_1 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.21. 9. BEÇÇ\_1 eleman yapım detayı

### 10. BEÇÇ\_1 Elemanı

10. BEÇÇ\_1 elemanı 9. BEÇÇ\_1 elemanı ile aynı özellikte olup, 9. BEÇÇ\_1'nin tekrarıdır.

## 2.3. 2. GRUP BEÇÇ ELEMANLARI

Bu grup BEÇÇ'lerde BEM Çok Parçalı Basınç Çubuğu (ÇPBÇ) olacak şekilde tasarlanmıştır. Deney elemanlarına ait parametreler Tablo 2.2'de özetlenmiştir. Bu tip bir BEÇÇ'lerin yapı içerisinde (iç akslara bağlanması) güçlendirme amacıyla kullanılması mümkün olarak görülmektedir.

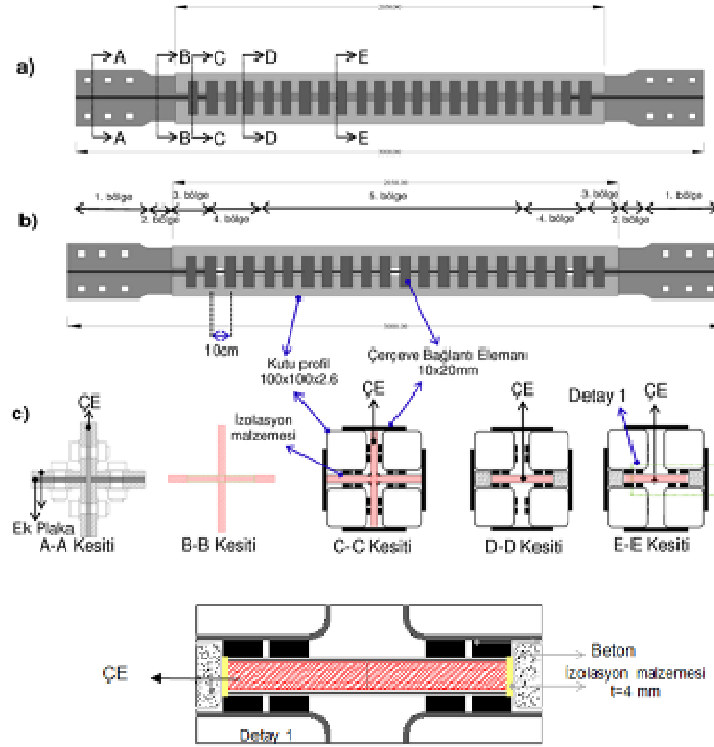
Tablo 2 2 2. Grup BEÇÇ Elemanları

2. Grup BEÇÇ	BEM	İzolasyon Malzemesi	ÇPBÇ en kesit
1. BEÇÇ_2	Çerçeve Bağlantılı ÇPBÇ	4 mm lastik	Kutu profil
2. BEÇÇ_2	Çerçeve Bağlantılı ÇPBÇ	4 mm lastik	Kutu profil+beton
3. BEÇÇ_2	Çapraz Bağlantılı ÇPBÇ	4 mm lastik	Kutu profil+beton

### 1. BEÇÇ\_2 Elemanı

Bu BEÇÇ modelinde BEM 1. Grup kapsamında test edilen bütün BEÇÇ'lerden farklıdır. Bu modelde BEM için 4 adet 100x100x2.6 mm'lik kutu profil (KP 100x2.6) kullanılmıştır (Şekil 2.22 ve 2.23). Bu kutu profiller çerçeve bağlantı elemanı kullanarak birbirine bağlanmıştır.

Kutu profillerin bağlanmasında kullanılan çerçeve bağ elemanlarının tasarımı TS 648 çok parçalı basınç çubukları bölümüne göre yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda çerçeve bağ elemanlarının arası 10 cm olarak belirlenmiştir. Bağ elemanlarının en kesitleri ise 10x50 mm'dir. ÇE'nin güçlü yönde burkulmasının engellenmesi için 100x100x2.6 mm'lik kutu profillerin arasına beton doldurulmuş 760 mm boyunda 40x40x1.2mm kare kutu profiller iki parça halinde yerleştirilmiştir. BEM'in uç kısımlarına 8 mm kalınlığında kapak plakaları kaynatılmıştır.



Şekil 2.22. 1. BEÇÇ\_2 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.23. 1. BEÇÇ\_2 eleman yapım detayı

$$\lambda = \frac{KL}{i} \quad (1)$$

$$\lambda^2 = \frac{(KL)^2}{i^2} \quad (2)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3)$$

$$\lambda^2 = \frac{(KL)^2}{\frac{I}{A}} \quad (4)$$

$$\frac{\lambda^2}{A} = \frac{(KL)^2}{I} \quad (5)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} \quad (6)$$

$$\frac{P_{cr}}{A} > 2 \quad (7)$$

$$P_y = 2250 \text{ mm}^2 \times 250 \text{ N/mm}^2 = 562500 \text{ N}$$

$E=210000 \text{ N/mm}^2$   $A=990 \times 4=3960 \text{ mm}^2$  (4 Kutu profilin toplam kesit alanı)

$S=10 \text{ cm}$  bağ levha aralığı dikkate alınır

$$\lambda_{1y} = \frac{S_1}{i_1} = \frac{S_1}{3,85} \approx 3, \quad S_1 = 10 \text{ cm} \quad i_1 = 3,85(8)$$

$$\lambda_{yi} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{\pi^2}{2} \lambda_{1y}^2} \quad (9)$$

$$\lambda_{xi} = \sqrt{\lambda_x^2 + \frac{\pi^2}{2} \lambda_{1y}^2} \quad (10)$$

100.100.2,6 için  $I=155 \text{ cm}^4$ ,  $i=3,85 \text{ cm}$ ,  $F=9,9 \text{ cm}^2$  (TS910)

$$I=4 \times 155 + 4 \times 9.9 \times (6.95)^2=2532.78 \text{ cm}^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{2532,78}{4 \times 9,9}} = 7,99 \text{ cm}$$



$$\lambda_y = \frac{k \cdot l}{i} = \frac{2 \times 205}{7,99} = 51,31, \quad k=2$$

$$\lambda_{1y}=3$$

$$\lambda_{y1} = \sqrt{\frac{2}{2} \cdot 3 + 51,31^2} = 51,4$$

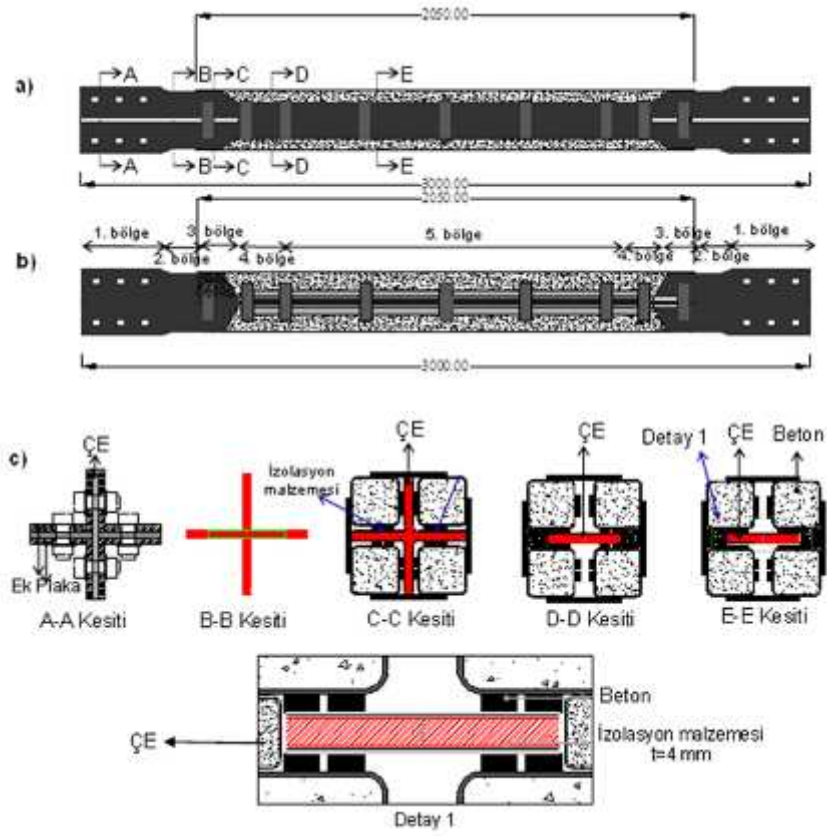
$$\frac{P_{cr}}{P_y} = \frac{(\pi^2 \cdot E \cdot I) / \lambda^2}{562200} = 5,52$$

(11)

Yukarıdaki hesaplamalarda görüldüğü gibi 10 cm'lik ara ile bağ levhalarının yerleştirilmesi durumunda  $P_{cr}/P_y$  değeri 5.52 çıkmaktadır. Ancak buradaki hesaplarda “s; çerçeve bağ elemanları arası mesafe” değerini 20 cm'ye çıkarırsak  $P_{cr}/P_y$  değeri 5.45 çıkmaktadır. Dolayısı ile seçilen kutu profilin  $P_{cr}/P_y$  oranı “s” aralığından bağımsız olduğu görülmektedir. Ancak 1. BEÇÇ\_2 tasarımında bu aralığın 10 cm olması uygun görülmüştür.

## 2. BEÇÇ\_2 Elemanı

Burada test edilen 2. BEÇÇ\_2 elemanı 1. BEÇÇ\_2 elemanı ile yaklaşık aynıdır. Aralarındaki 2 temel fark mevcuttur: 1. BEÇÇ\_2 elemanında deney esnasında KP 100x2.6'lık profillerde meydana gelen lokal deformasyonların engellenmesi için 2. BEÇÇ\_2 elemanında KP 100x2.6'ların içine beton dökülmüştür. Ayrıca çerçeve bağ elemanlarının aralığı arttırılmıştır (Şekil 2.24 ve 2.25).



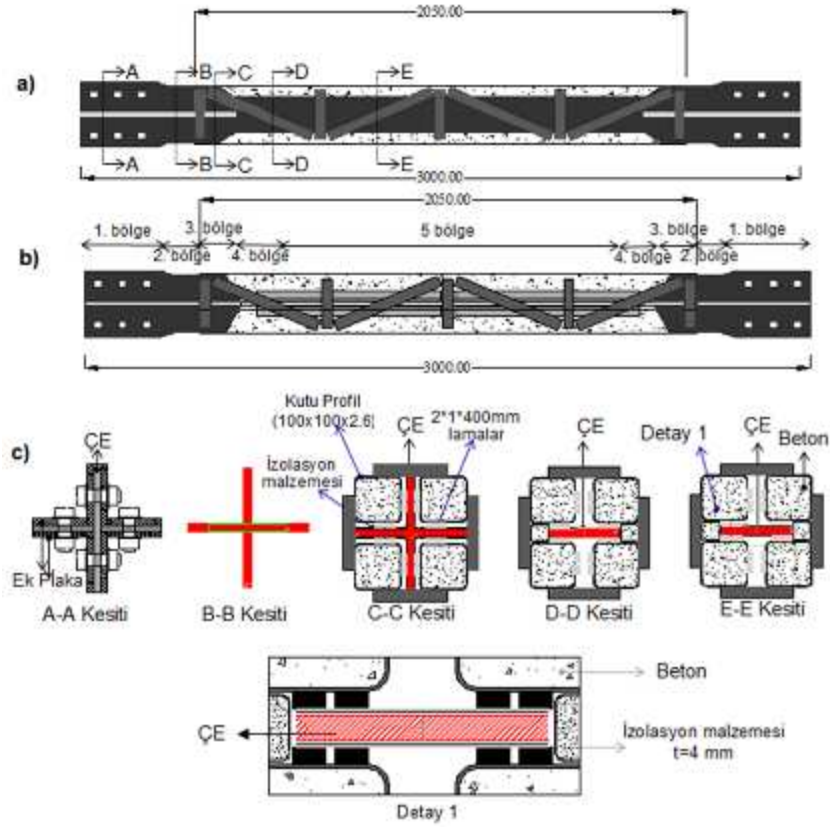
Şekil 2.24. 1. BEÇÇ\_2 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.25. 1. BEÇÇ\_2 eleman yapım detayı

### 3. BEÇÇ\_2 Elemanı

Bu BEÇÇ elemanı 2. BEÇÇ\_2 elemanı ile benzerdir. Aralarındaki tek fark 3. BEÇÇ\_2'de BEM için kullanılan ÇPBÇ çapraz bağ elemanları kullanılarak elde edilmiştir. Bu çapraz bağ elemanları 30x30x3 mm köşebentlerden oluşmuştur (Şekil 2.26 ve 2.27).



Şekil 2.26. 2. BEÇÇ\_2 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.27. 2. BEÇÇ\_2 eleman yapım detayı

## 2.4. 3. GRUP BEÇÇ ELEMANLARI

Bu BEÇÇ modellerinde BEM tamamen değiştirilmiştir. Daha önce BEM olarak kullanılan tüm modellerde çelik profiller, ÇPBC, sargılı ve sargısız beton yer almaktadır, bu gruptaki elemanlarda ise prekast paneller (PP'ler) kullanılmıştır. Deney elemanlarına ait parametreler



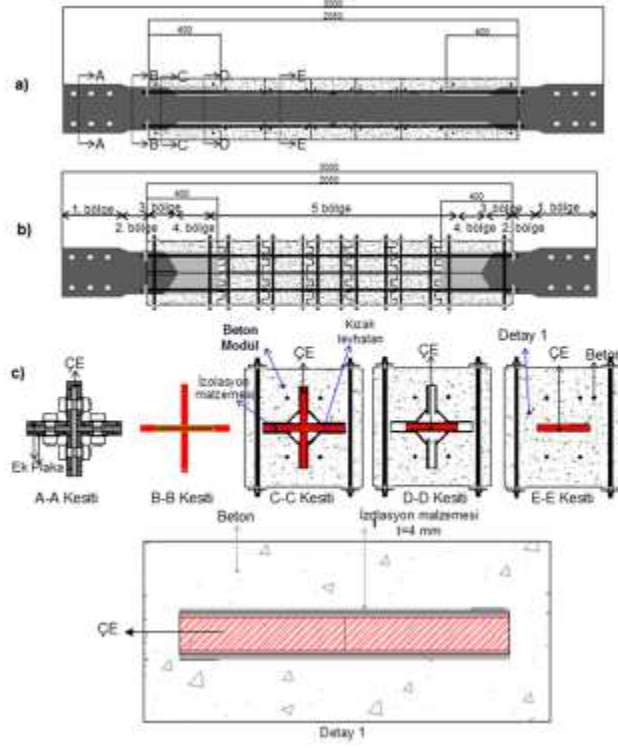
Tablo 2.3'de özetlenmiştir. Bu tip BEÇÇ'lerin yapı içerisinde (iç akslara bağlanması) güçlendirme amacıyla kullanılması mümkün olarak görülmektedir. 1. Grup BEÇÇ'ler yaklaşık olarak 600-700 kg civarındadır. Dolayısı ile bu ağırlıkta bir BEÇÇ'yi yapı içerisine montajının oldukça zor olduğu görülmektedir. 3. Grup BEÇÇ'ler uygulamasında ise ilk önce ÇE (80-90 kg civarında) yapıya ankrajlanan bayrak levhasına montaj edilecektir. Daha sonra BEM'i oluşturan PP'ler (45 kg civarında) ÇE üzerine yerleştirilerek enine ve boyuna donatılar sıkılacaktır. Sonuç olarak bu BEÇÇ tipinin yapı içerisindeki uygulaması oldukça pratik ve ekonomik olacağı düşünülmektedir. PP'lerin hafif beton ile üretilmesi durumunda ise uygulamanın daha da pratik olacağı düşünülmektedir.

Tablo 2 3 3. Grup BEÇÇ Elemanları

3. Grup BEÇÇ	BEM	PP Donatısı	PP En Kesit (mm)	Boyuna Ankraj	PP dış sayısı	BEM-ÇE arası Boşluk (mm)
1. BEÇÇ_3	Prekast Panel	Donatısız	340x340	4 / $\phi$ 8	4	4
2. BEÇÇ_3	Prekast Panel	$\phi$ 8	340x340	4 / $\phi$ 8	2	4
3. BEÇÇ_3	Prekast Panel	$\phi$ 8	340x340	8 / $\phi$ 10	2	4
4. BEÇÇ_3	Prekast Panel	$\phi$ 8	340x340	16 / $\phi$ 12	2	4
5. BEÇÇ_3	Prekast Panel	$\phi$ 14	380x380	16 / $\phi$ 24	2	4
6. BEÇÇ_3	Prekast Panel	$\phi$ 14	380x380	16 / $\phi$ 24	2	2
7. BEÇÇ_3	Prekast Panel + LP	$\phi$ 14	380x380	16 / $\phi$ 24	2	2

### 1. BEÇÇ\_3 Elemanı

Bu BEÇÇ modelinde BEM PP'lerden oluşmuştur. PP'ler 34x34 cm en kesit sahip olup ahşap kalıplara dökülmüş (Şekil 2.28-2.29) ve daha sonra ÇE üzerine 10 mm çapında gijonlarla ankrajlanarak bağlantısı sağlanmıştır. BEÇÇ'lerin uç kısımlarında yine daha önce denenmiş kızaklı plaka sistemi yerleştirilmiştir (Şekil 2.29). Kızak levhası dışarıda kaynak işlemleri yapıldıktan sonra BEÇÇ elemanı ahşap kalıp içerisine konularak beton dökülmüştür. Dişliler halinde birbirine geçmeli olarak tasarlanan bu modüller uçlarda dört adet 40 cm, diğer parçaları 25 cm boyunda olan toplamda 14 adet olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.29). Beton modüllerin boyutları iki işçi tarafından kaldırılıp ÇE üzerine konulabilecek kadar ağırlığa sahip olması prensibi gereğince belirlenmiştir. Beton dökümünden 3 gün sonra numune kalıptan çıkartılmış ve kür yapılmıştır. PP'lerin üretiminden sonra 3. Gruptaki BEÇÇ'lerin ÇE'lerinin takılacağı çerçeve üretilmiştir (Şekil 2.30). Elde edilen çerçeveye ilk olarak ÇE takılmıştır (Şekil 2.30) ve PP'ler ÇE üzerine yerleştirilmiştir. Bunların yedi tanesi ÇE'nin üstünde yedi tanesi ise altında konumlandırılarak enine ve boyuna 10mm çapında ankrajlarla bağlanmıştır. Beton modüllerin birleşiminden sonra BEÇÇ elemanı çerçeveden alınmış (Şekil 2.30) ve test sistemine bağlantısında kullanılan bulonlar tüm deneylerde olduğu gibi havalı somun sıkma-sökme makinası ile gereken devirde sıkılmıştır.



Şekil 2.28. 1. BEÇÇ\_3 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.29. 1. BEÇÇ\_3 eleman yapım detayı



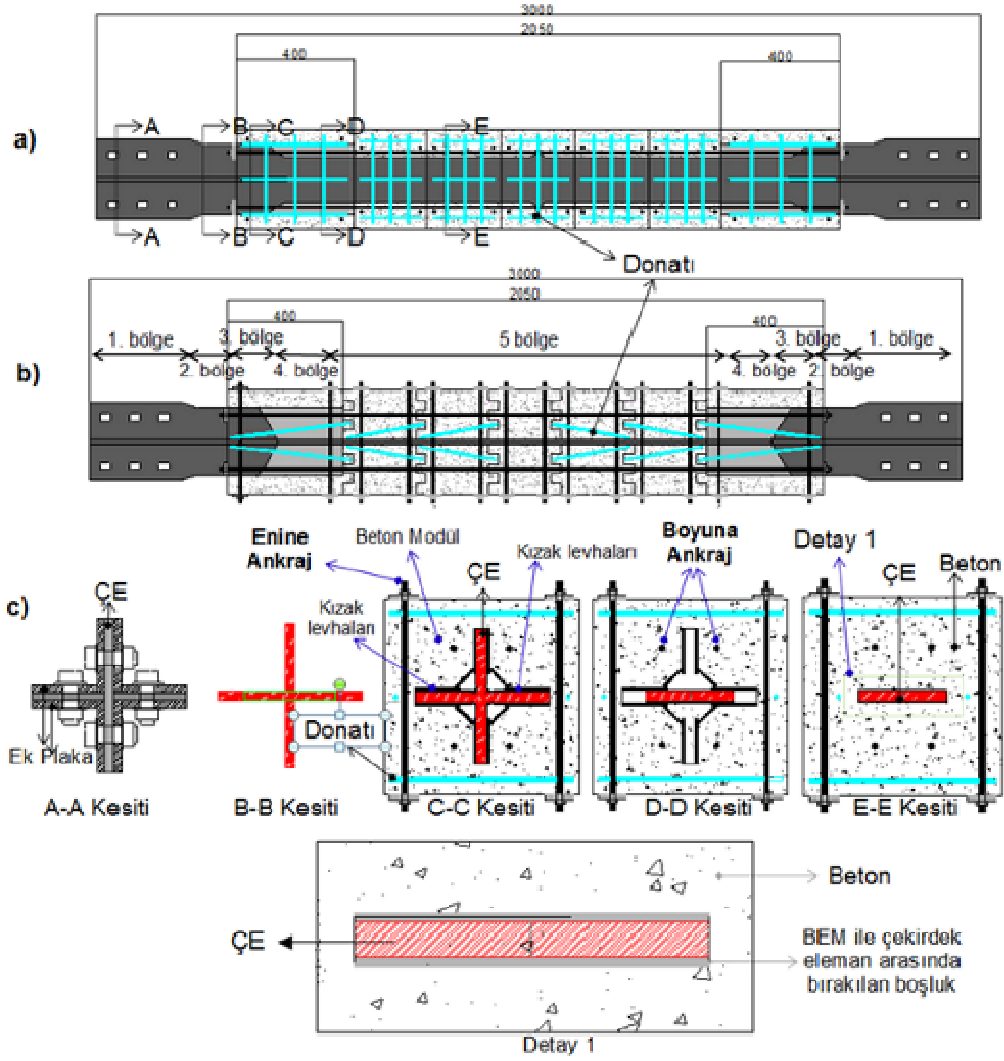
Şekil 2.30. BEÇÇ için çerçeve yapımı ve PP'lerin birleştirilmesi

## 2. BEÇÇ\_3 Elemanı

Bu BEÇÇ elemanı 1. BEÇÇ\_3 ile genel olarak aynıdır. 2. BEÇÇ\_3 elemanında BEM için kullanılan PP'lerde donatı kullanılmıştır (Şekil 2.31-2.32). 1. BEÇÇ\_3 elemanında deney esnasından PP'lerde meydana gelen hasarlar dikkate alınarak 2. BEÇÇ\_3 elemanında PP'ler içerisine  $\phi 8$  donatılar eklenmiştir. 2. BEÇÇ\_3 elemanındaki bütün tasarım parametreleri ve yapım tekniği 1. BEÇÇ\_3 elemanın ile aynıdır.

## 3. BEÇÇ\_3 Elemanı

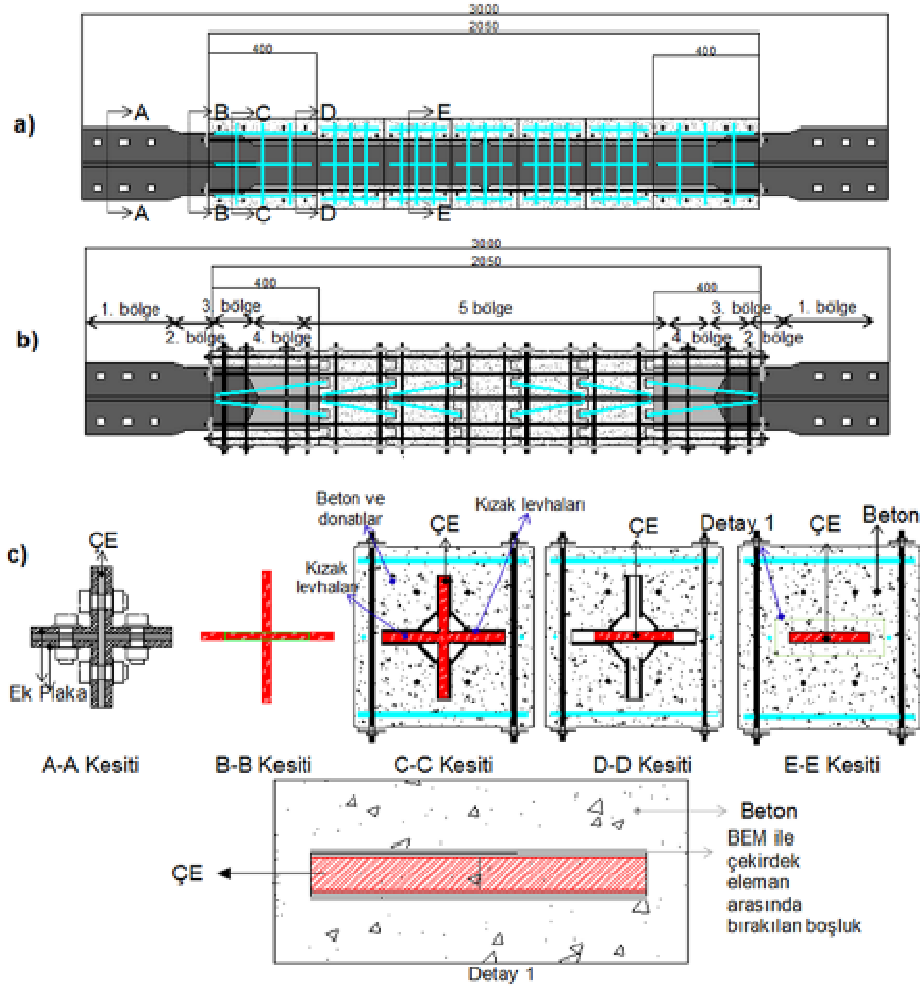
3. BEÇÇ\_3 elemanı genel olarak 2. BEÇÇ\_3 elemanı ile aynıdır. 3. BEÇÇ\_3 elemanının 2. BEÇÇ\_3 elemanından farkı beton modüllerin ilk ve son modüllerinde enine ankraj sayısı arttırılmıştır (Şekil 2.33-2.34). Ayrıca 3. BEÇÇ\_3 elemanında boyuna donatı sayısı 4'ten 8'e çap ise  $\phi 8$ 'den  $\phi 10$ 'a çıkarılmıştır. Bu uygulamaya gidilmesinin sebebi 1. BEÇÇ\_3 ve 2. BEÇÇ\_3 elemanlarında meydana gelen global burkulmadır.



Şekil 2.31. 2. BEÇÇ\_3 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.32. 2. BEÇÇ\_3 eleman yapım detayı



Şekil 2.33. 3. BEÇÇ\_3 elemanı detay çizimleri

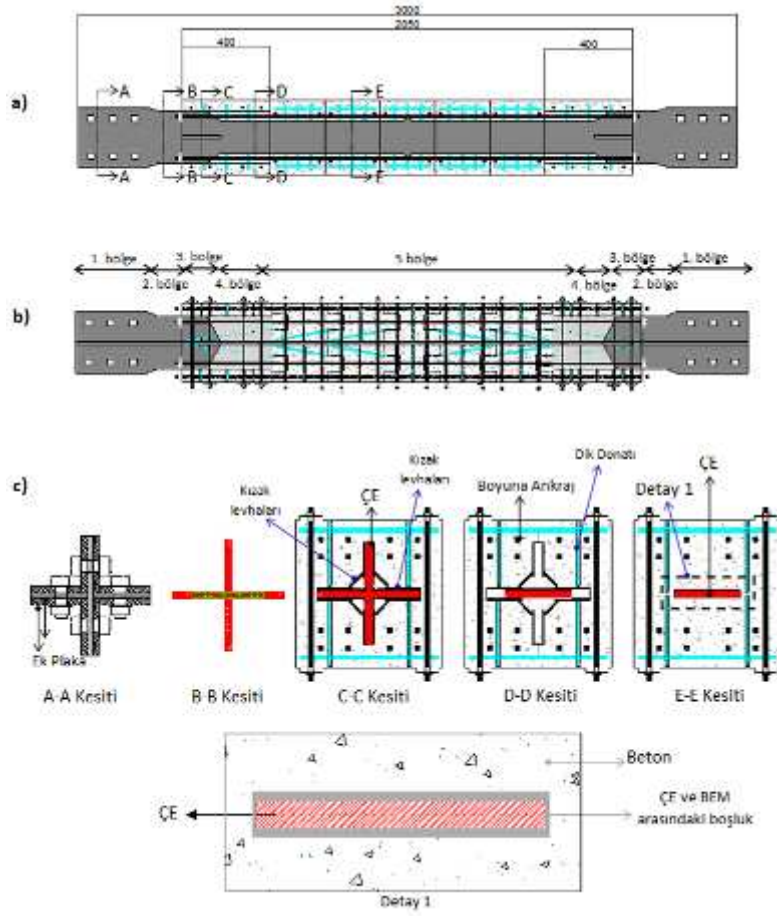


Şekil 2.34. 3. BEÇÇ\_3 eleman yapım detayı

#### 4. BEÇÇ\_3 Elemanı

4. BEÇÇ\_3 elemanı genel olarak 3. BEÇÇ\_3 elemanı ile aynıdır. 4. BEÇÇ\_3 elemanının 3. BEÇÇ\_3 elemanından farkı boyuna ankraj sayısı ve çapıdır (Şekil 2.35-2.36). 4. BEÇÇ\_3 elemanında boyuna donatı sayısı 8'den 16'ya, çap ise  $\phi 10$ 'dan  $\phi 12$ 'ye çıkarılmıştır. Bu uygulamaya gidilmesinin sebebi 1.-3. BEÇÇ\_3 elemanlarında meydana gelen global burkulmadır. Bunlara ek olarak 4. BEÇÇ\_3 elemanında PP'lerin dik yönündede  $\phi 8$  ek donatı kullanılmıştır (Şekil 2.35).





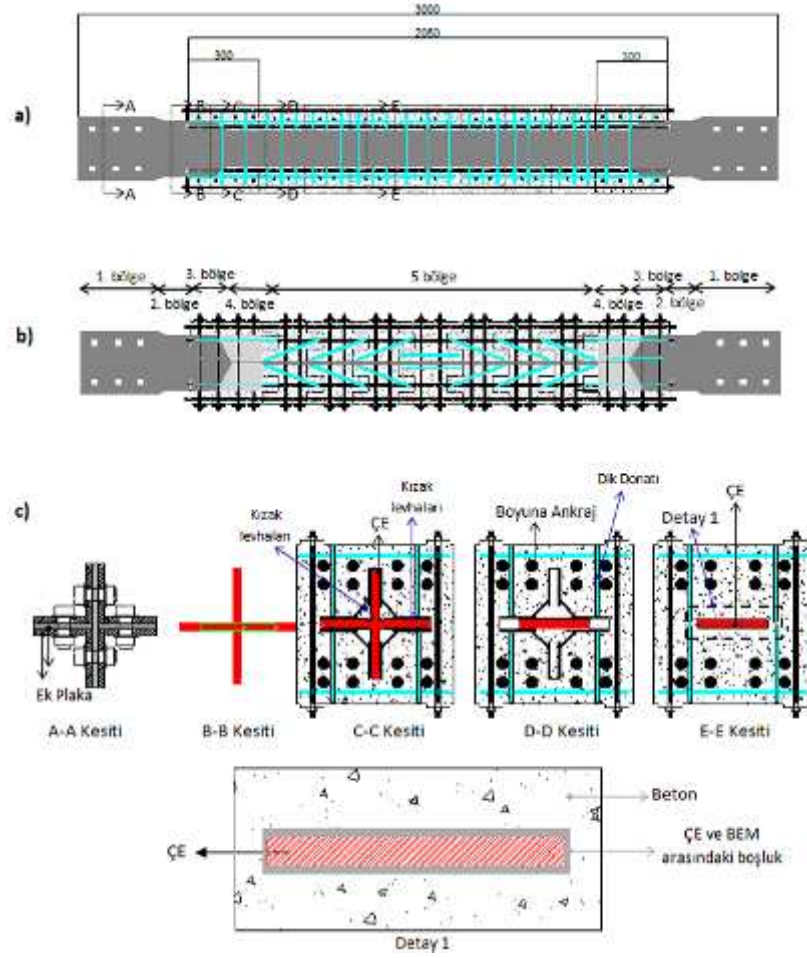
Şekil 2.35. 4. BEÇÇ\_3 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.36. 4. BEÇÇ\_3 eleman yapım detayı

## 5. BEÇÇ\_3 Elemanı

5. BEÇÇ\_3 elemanı genel olarak 4. BEÇÇ\_3 elemanı ile aynıdır. 5. BEÇÇ\_3 elemanının 4. BEÇÇ\_3 elemanından farkı boyuna ankraj çapıdır (Şekil 2.37-2.38). 5. BEÇÇ\_3 elemanında boyuna donatı çapı  $\phi 12$ 'den  $\phi 24$ 'e çıkarılmıştır. Bunlara ek olarak 5. BEÇÇ\_3 elemanında PP'ler arasına tamir harcı sürülerek ek bağlantı sağlanmıştır (Şekil 2.38) ve PP'lerin içindeki donatı çapı  $\phi 8$ 'den  $\phi 14$ 'e çıkartılmıştır.



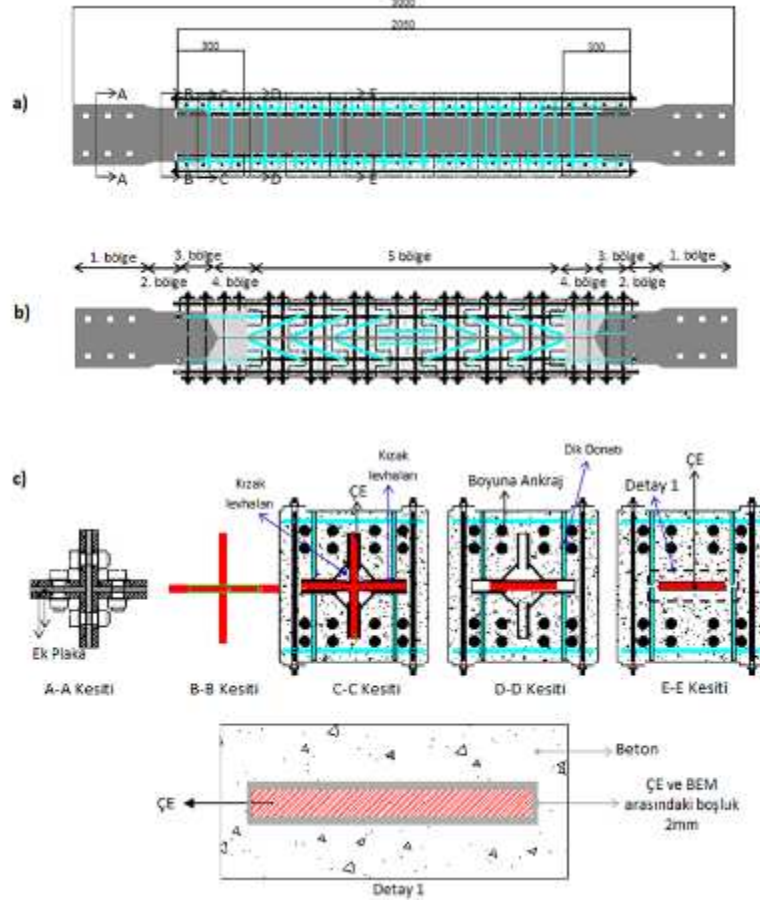
Şekil 2.37. 5. BEÇÇ\_3 elemanı detay çizimleri



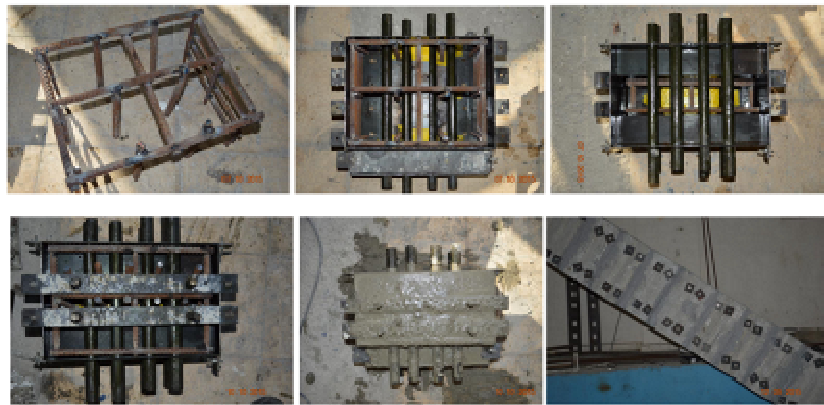
Şekil 2.38. 5. BEÇÇ\_3 eleman yapım detayı

## 6. BEÇÇ\_3 Elemanı

6. BEÇÇ\_3 elemanı genel olarak 5. BEÇÇ\_3 elemanı ile aynıdır. 6. BEÇÇ\_3 elemanının 5. BEÇÇ\_3 elemanından farkı ÇE ve BEM (PP) arasında bırakılan boşluktur (Şekil 2.39-2.40). 6. BEÇÇ\_3 elemanında bu boşluk 4 mm'den 2mm'ye düşürülmüştür. Bunlara ek olarak 6. BEÇÇ\_3 elemanında PP'lerde kullanılan  $\phi 14$  donatı sayısı artırılmış ve PP'lerin her iki yüzüne yerleştirilmiştir (Şekil 2.40).



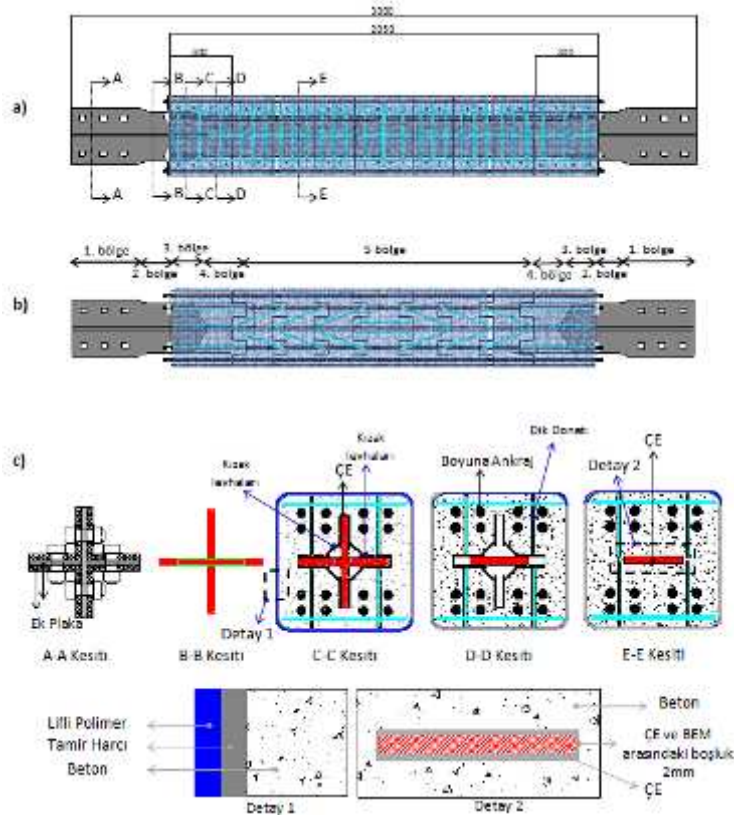
Şekil 2.39. 6. BEÇÇ\_3 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.40. 6. BEÇÇ\_3 eleman yapım detayı

## 7. BEÇÇ\_3 Elemanı

7. BEÇÇ\_3 elemanı genel olarak 6. BEÇÇ\_3 elemanı ile aynıdır. 7. BEÇÇ\_3 elemanının 6. BEÇÇ\_3 elemanından farkı PP'ler lifli polimer ile sarılmıştır. (Şekil 2.41-2.42). Lifli polimer uygulamasından önce PP'lerin köşeleri taşlanarak yuvarlatılmıştır. Lifli polimer uygulaması için ilk olarak PP'lerin yüzetine tamir harcı sürülmüştür. Daha sonra tamir harcı katılaşmadan Lifli Polimer epoksi sürülerek PP'lerin etrafı sarılmıştır. Toplam 3 kat katman olacak şekilde PP'ler Lifli polimer ile sarılmıştır.



Şekil 2.41. 7. BEÇÇ\_3 elemanı detay çizimleri



Şekil 2.42. 7. BEÇÇ\_3 eleman yapım detayı



## 2.5. YÜKLEME PROTOKOLÜ

BEÇÇ'lerin yükleme protokolleri için literatürde kullanılmış farklı yöntemlerin olduğu ve ülkemizde kullanılan şartnamelerde ise BEÇÇ'ler ve bu elemanlar için uygulanması gerekli test protokolleri hakkında bilgi bulunmadığı bir önceki raporda belirtilmiştir. Bu proje kapsamında Eryaşar ve Topkaya, 2010 tarafından daha önce yapılmış olan çalışmada kullanılan test protokolü kullanılmıştır. Bu protokole göre ÇE'nin plastik bölge uzaması için bir önceki raporda olduğu gibi iki farklı parametre kullanılmıştır. Bunlar ÇE'nin plastik bölgesinin akması ( $\delta_y$ ) ve 0.01 birim şekil değiştirme ( $\delta_{str\ 0.01}$ ) değerleridir. Şekil 2.43'de gösterildiği gibi her bir deplasman değerine iki kez ters çevirilmiş yüklemeler yapılmıştır. BEÇÇ'lerin plastik bölge uzunluğu 1702 mm'dir. Yükleme protokolü proje kapsamında alınan deplasman kontrollü piston sayesinde BEÇÇ elemanlarına uygulanmıştır. Yükleme protokolündeki değerler ÇE elemanı üzerindeki uzama değerleri olduğu için pistonun strokunu kontrol eden LVDT bu bölgeye yerleştirilmiştir. Dolayısı ile piston strokunun kontrol edildiği LVDT, alanı 2250 mm<sup>2</sup> uzunluğu 1702.5 mm ve alanı 6855 mm<sup>2</sup> ve uzunluğu 660 mm (2x330 mm) olan bir bölgeyi ölçmektedir.

(1/3) $\delta_y$ , (2/3) $\delta_y$ , (1.0) $\delta_y$ , (1/3) $\delta_{str\ 0.01}$ , (0.5) $\delta_{str\ 0.01}$ , (1.0) $\delta_{str\ 0.01}$ , (1.5) $\delta_{str\ 0.01}$ , (2.0) $\delta_{str\ 0.01}$ , (2.5) $\delta_{str\ 0.01}$ , (3.0) $\delta_{str\ 0.01}$ , (3.5) $\delta_{str\ 0.01}$ , (4.0) $\delta_{str\ 0.01}$

$$\delta_y = 1702.5 \times f_y / E$$

$$\delta_{str\ 0.01} = 1702.5 \times 0.01 = 17.03\ mm$$

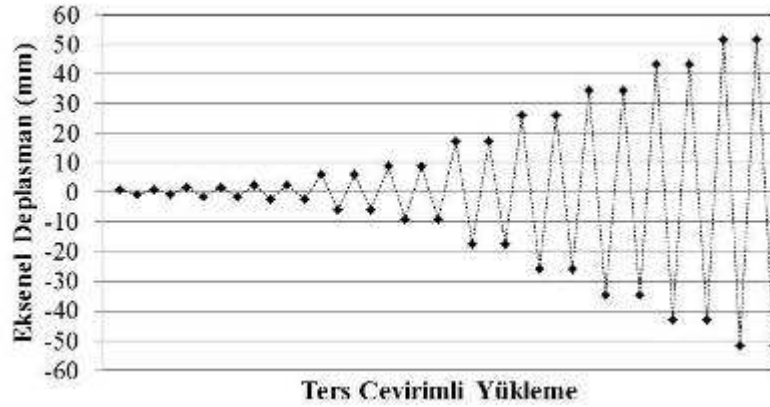
$$E=210\ 000\ Mpa$$

$f_y$ : ÇE için kullanılan malzemenin akma gerilmesi

Protokol deplasmanları ise sadece 1702.5 mm alan için uygulanması öngörülmektedir. Söz konusu 6855 mm<sup>2</sup>'lik alanda meydana gelen uzama ise protokole eklenmesi gerekmektedir (Tablo 2.4). Eksenel yükün 1000 kN olmasında dahi bu alan elastik kalmaktadır ve 1000 kN'luk eksenel yük altında 0.458 mm kadar uzayabilmektedir. Bu 6855 mm<sup>2</sup>'lik alandaki elastik bölge uzaması özellikle ÇE'in plastik kısmın yükleme protokolünün başlarındaki elastik ters çevirim değerlerinde ((1/3) $\delta_y$ , (2/3) $\delta_y$ , (1.0) $\delta_y$ ) önem arz etmektedir. Bu değerlerin eklenmemesinde ise yaklaşık %10'luk bir hata oluşumu söz konusu olabilmektedir. Ancak 6855 mm<sup>2</sup>'lik alandaki elastik bölge uzaması protokolün büyük deplasmanlarında ((1/3) $\delta_{str\ 0.01}$ , (0.5)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (1.0)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (1.5)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (2.0)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (2.5)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (3.0)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (3.5)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (4.0)  $\delta_{str\ 0.01}$ ) etkisini kaybetmektedir.

Eksenel yük BEÇÇ ve piston stroku arasına yerleştirilen 100 ton'luk yük hücresi kullanılarak elde edilmiştir. Yükleme protokolünün eleman üzerindeki ölçümleri Şekil 2.44-b'de görüldüğü gibi 5 adet LVDT kullanılarak, ön-germe sistemi ile sıkılan 10.9 M24 bulonlarda kayma

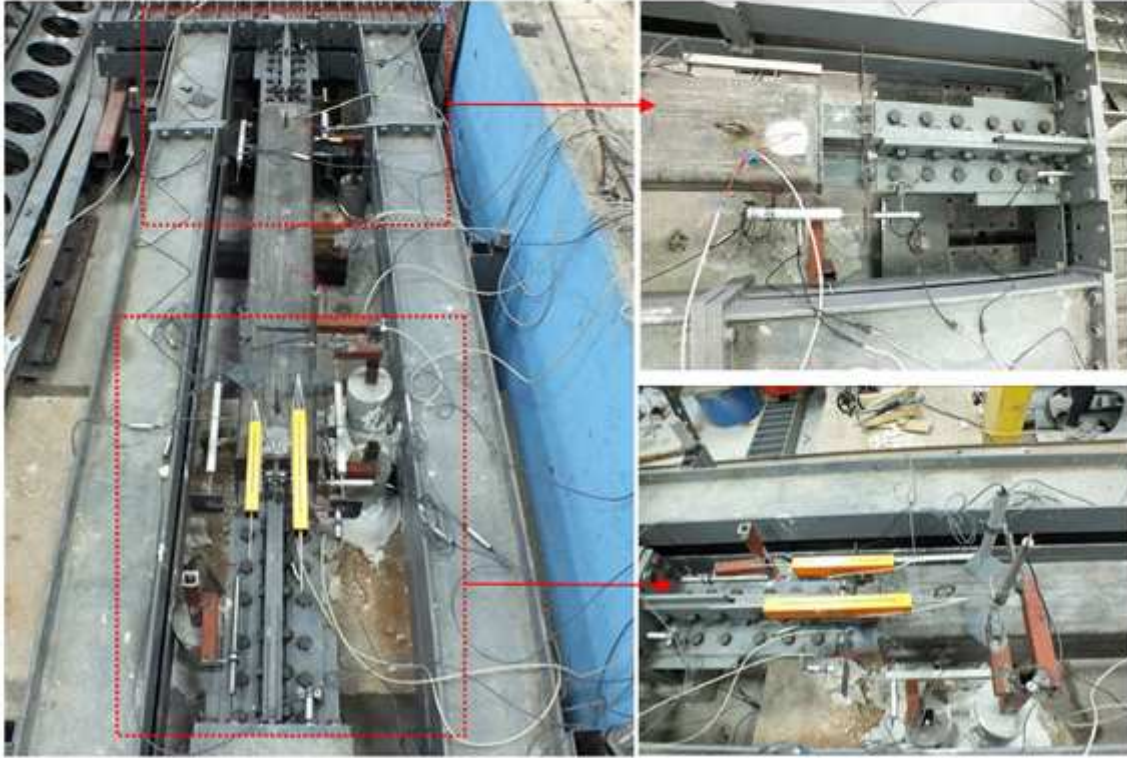
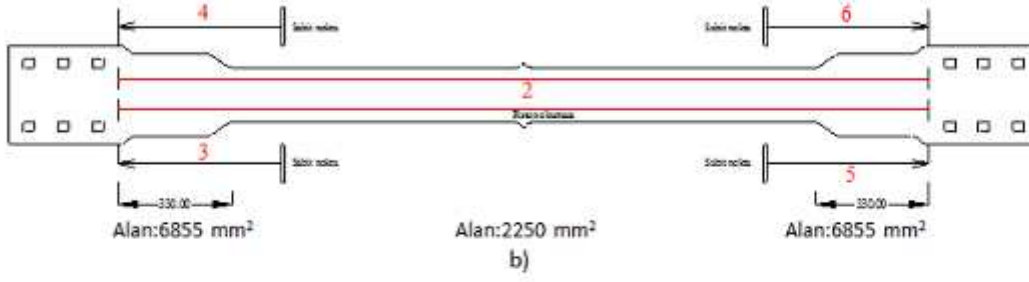
meydana gelip gelmediği ise yine deney elemanı üzerine yerleştirilen LVDT'ler (Şekil 2.44-a, 7, 8, 9. ve 10. LVDT) kullanılarak, ÇE'nin plastik bölgedeki birim uzamaları 4 adet birim uzama ölçer (Şekil 2.44-a, 16, 17, 18 ve 19 LVDT), BEÇÇ'deki global deformasyonları BEM üzerine yerleştirilen yatay ve düşey hareketi kontrol eden LVDT (Şekil 2.44-a, 11, 12, 13, 14, 15. LVDT ) ve birim uzama ölçerler kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerin detayları deney sonuçları kısmında verilmiştir.



Şekil 2.43. Yükleme protokolü (2. BEÇÇ\_1)

Tablo 2 4 Yükleme Protokolü

Protokol Parametresi	Yükleme Sayısı	Plastik Deplasman(mm)	Elastik Deplasman(mm)	Stroke Deplasman(mm)
0.33 $\delta_y$	1	0.876	0.111	0.987
	2	-0.876	-0.111	-0.987
	3	0.876	0.111	0.987
	4	-0.876	-0.111	-0.987
	5	1.752	0.223	1.974
0.66 $\delta_y$	6	-1.752	-0.223	-1.974
	7	1.752	0.223	1.974
	8	-1.752	-0.223	-1.974
1 $\delta_y$	9	2.627	0.334	2.962
	10	-2.627	-0.334	-2.962
	11	2.627	0.334	2.962
0.33 $\delta_{\text{maks}}$	12	-2.627	-0.334	-2.962
	13	5.620	0.356	5.975
	14	-5.620	-0.356	-5.975
0.50 $\delta_{\text{maks}}$	15	5.620	0.356	5.975
	16	-5.620	-0.356	-5.975
	17	8.515	0.359	8.874
1 $\delta_{\text{maks}}$	18	-8.515	-0.359	-8.874
	19	8.515	0.359	8.874
	20	-8.515	-0.359	-8.874
1.5 $\delta_{\text{maks}}$	21	17.030	0.370	17.400
	22	-17.030	-0.370	-17.400
	23	17.030	0.370	17.400
2 $\delta_{\text{maks}}$	24	-17.030	-0.370	-17.400
	25	25.545	0.381	25.926
	26	-25.545	-0.381	-25.926
2.5 $\delta_{\text{maks}}$	27	25.545	0.381	25.926
	28	-25.545	-0.381	-25.926
	29	34.060	0.392	34.452
3 $\delta_{\text{maks}}$	30	-34.060	-0.392	-34.452
	31	34.060	0.392	34.452
	32	-34.060	-0.392	-34.452
3.5 $\delta_{\text{maks}}$	33	42.575	0.403	42.978
	34	-42.575	-0.403	-42.978
	35	42.575	0.403	42.978
4 $\delta_{\text{maks}}$	36	-42.575	-0.403	-42.978
	37	51.090	0.413	51.503
	38	-51.090	-0.413	-51.503
4.5 $\delta_{\text{maks}}$	39	51.090	0.413	51.503
	40	-51.090	-0.413	-51.503
	41	59.605	0.424	60.029
5 $\delta_{\text{maks}}$	42	-59.605	-0.424	-60.029
	43	59.605	0.424	60.029
	44	-59.605	-0.424	-60.029
45	62.120	0.435	68.555	



Şekil 2.44. Ölçüm sisteminin yerleştirilmesi

## 2.6. DENEY SONUÇLARI VE GÖZLEMLER

Eleman bazında test edilen BEÇÇ elemanlarının histeretik davranışları elemanlar üzerinde alınan veriler ışığında değerlendirilmiştir. Deney sonuçları BEÇÇ'lerin aksenal yük-aksenal deplasman, ön-germe sistemi ile sıkılan 10.9 M24 bulonlarda meydana gelen kayma ve global deplasmanlar bakımından incelenmiştir.

### 2.6.1. 1. GRUP BEÇÇ ELEMANLARINA AIT DENEY SONUÇLARI VE GÖZLEMLER

1. Grup BEÇÇ elemanlarına ait aksenal yük kapasiteleri Tablo 2.5'de görülmektedir. BEÇÇ'lerin histeretik davranışları BEÇÇ elemanlarına uygulanan aksenal yüke karşılık ÇE'nin plastik kısmı için ölçülen deplasmanların (Şekil 2.44'de 2., 3., 4., 5. ve 6. LVDT'lerden okunan değerler) birim uzama değerlerine çevrilmiş hali ile yük hücresinden elde edilen verilerin gösterimi Şekil 2.45'de verilmiştir. Ayrıca 2., 3., 6., 8. ve 9. BEÇÇ\_1 elemanlarına ait yorulma testi sonucu ise Şekil 2.46'da görülmektedir. Test elemanlarının deneyden sonraki fotoğrafları Şekil 2.47-56'de verilmiştir. Deney esnasında ön-germe yöntemiyle sıkılan 10.9 M24 bulonlarda meydana gelen kayma değerleri Şekil 2.57'de gösterilmektedir. ÇE'nin plastik kısmının orta noktasındaki birim uzama değerleri (bu noktalara yapıştırılan birim uzama ölçerler sayesinde alınan ölçümler) Şekil 2.58'de verilmiştir. BEM'i oluşturan sistemlerin her iki ucunda meydana gelen deplasmanlar ise Şekil 2.59'da gösterilmiştir. Eleman bazında değerlendirmeler ise aşağıda yapılmıştır.

Tablo 2.5. 1. Grup BEÇÇ elemanlarına ait aksenal yük değerleri

1. Grup BEÇÇ	Çekme (kN)	Basınç (kN)	$P_{\text{çekme}}/P_{\text{basınç}}$
1. BEÇÇ_1	671	-926	1.38
2. BEÇÇ_1	865	-966	1.12
3. BEÇÇ_1	882	-1020	1.16
4. BEÇÇ_1	687	-685	1.00
5. BEÇÇ_1	824	-894	1.08
6. BEÇÇ_1	869	-1026	1.18
7. BEÇÇ_1	886	-948	1.07
8. BEÇÇ_1	842	-1005	1.19
9. BEÇÇ_1	889	-1012	1.14
10. BEÇÇ_1	864	-979	1.13



**1. BEÇÇ\_1:** Şekil 2.45 görüldüğü gibi 1. BEÇÇ\_1 modelinde eleman basıç kapasitesi çekme kapasitesinden fazla çıkmıştır. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 671 kN ve 926 kN'dur. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran 1.38 değerindedir. Bu değer AISC 2005'de verilen sınır değer olan 1.3'den fazladır. Dolayısı ile bu eleman için elde edilen test sonuçları ÇE'nin BEM içerisinde sürtünmesinin daha da azaltılması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. 1. BEÇÇ\_1 modeli basınç/çekme kapasitesinin 1.3 oranını aşması ve 1000 kN (piston kapasitesi) sınırına yaklaşmasından dolayı daha ileri deplasmanlara yüklenmemiştir. Deney sonrası eleman içerisindeki deformasyonların görülebilmesi için elemanın içi açılmıştır (Şekil 2.47). Bu şekilde ÇE elemanının plastik kısmında yüksek modda burkulmaların meydana geldiği görülmektedir. Söz konusu burkulmalar ÇE'nin plastik uç kısımlarında daha fazla orta açıklığa doğru daha azdır. ÇE'nin hem basınç hemde çekme altında plastikleştiği görülmektedir (Şekil 2.58). ÇE ve BEM'i oluşturan elemanlarda herhangi bir lokal deformasyon görülmemiştir. Ön germe işlemi başarılı şekilde yapıldığı Şekil 2.57'de görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi kayma miktarı sınırlı seviyede kalmıştır. BEM'i oluşturan kutu profil üzerinden elde edilen düzlem dışı deplasmanlar Şekil 2.59'da görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi 1.BEÇÇ\_1 elemanı düzlem dışı deplasman yapmasına rağmen BEM ve ÇE elemanlarında lokal deformasyon meydana gelmemiştir. Bunun en büyük sebebi BEM sisteminin uç bölgelerinin stabiliteyi kutu profiller ile arttırılmasıdır.

**2. BEÇÇ\_1:** Eleman detaylarında da bahsedildiği gibi 2. BEÇÇ\_1 modelinin oluşturulmasında 1. BEÇÇ\_1 modelinde meydana gelen basınç-çekme farkının azaltılması için ÇE üzerine 2 kat lastik şerit uygulanmıştır. Bu lastik şeritlerin ÇE ve BEM arasında daha fazla boşluk oluşturmuştur. Şekil 2.45 görüldüğü gibi 2. BEÇÇ\_1 modelinde eleman basıç kapasitesi çekme kapasitesine oldukça yakındır. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 865 kN ve 966 kN'dur. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran 1.12 değerindedir. Bu değer AISC 2005'de verilen sınır değer olan 1.3'den azdır. Dolayısı ile bu eleman için elde edilen test sonuçları ÇE'nin BEM içerisinde sürtünmesinin 2 kat lastik şerit kullanılmasıyla yeteri kadar önlendiğini ortaya çıkarmıştır. 2. BEÇÇ\_1 modeli ÇE'nin plastik kısmında %2.5 (0.025) birim şekil değiştirme değerine kadar yüklenmiştir (Şekil 2.45). Bu değer ilerisine gidilmesi planlanmış ancak yükün 1000 kN (yük hücresinin kapasitesi 1000 kN'dur) sınırına yaklaşması ile teste devam edilmemiştir. Literatürde BEÇÇ modelinin %2.0 birim şekil değiştirmeye kadar yüklendiği bir çok çalışma mevcuttur. 2. BEÇÇ\_1 modelinde hasar meydana gelmemesinden dolayı protokole ek yorulma testi uygulanmıştır (Şekil 2.46). Yorulma testi ÇE'nin %1.0 birim şekil değiştirmeye karşılık gelen aksenal basma ve çekme deplasmanlarına kadar ters çevirimli yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma testinde toplam 30 ters çevirimli deplasman uygulaması yapılmıştır. Yorulma testinden sonra eleman



açılmış ve meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Şekil 2.48’de görüldüğü gibi ÇE’nin plastik kısmının uç bölgelerinde yüksek modda burkulma meydana gelmiştir. Burkulma mekanizması orta açıklığa doğru azalmıştır. Ayrıca BEÇÇ bağlantısında kullanılan ön germe tekniği ile sıkılan 10.9 M24 bulonların yeterli seviyede çalıştığı görülmektedir (Şekil 2.57). BEM’i oluşturan kutu profil üzerinden elde edilen düzlem dışı deplasmanlar Şekil 2.59’da görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi 2.BEÇÇ\_1 elemanı düzlem dışı deplasman (5-9mm) yapmasına rağmen BEM ve ÇE elemanlarında lokal deformasyon meydana gelmemiştir. Yukarıda da açıklandığı üzere bunun en büyük sebebi BEM sisteminin uç bölgelerinin stabiliteyi kutu profiller ile artırılmasıdır. Bu deney sonucunda elde edilen BEÇÇ’nin literatürde kullanılan ve başarılı olan diğer BEÇÇ tiplerine uygulama ve tasarım açısından bir alternatif olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

**3. BEÇÇ\_1:** Bu eleman 2.BEÇÇ\_1’in tekrarı olduğu için deney sonuçları 2.BEÇÇ\_1 ile benzerdir. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 882 kN ve 1020 kN’dur. 3. BEÇÇ\_1 modeli ÇE’nin plastik kısmında %2.5 (0.025) birim şekil değiştirme değerine kadar yüklenmiştir (Şekil 2.45). Bu değer ilerisine gidilmesi planlanmış ancak yükün 1000 kN (yük hücresinin kapasitesi 1000 kN’dur) sınırına yaklaşması ile teste devam edilmemiştir. Deney elemanında hasar meydana gelmemesinden dolayı ek yorulma testi yapılmıştır (Şekil 2.46). Diğer sonuçlar 2.BEÇÇ\_1 elemanı ile benzer olup bu model BEÇÇ’nin literatürde kullanılan ve başarılı olan diğer BEÇÇ tiplerine uygulama ve tasarım açısından bir alternatif olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

**4. BEÇÇ\_1:** Bu elemana ait aksenal yük ÇE birim uzama grafiği Şekil 2.45’de verilmiştir. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 687 kN ve 685 kN’dur. Bu BEÇÇ için yapılan test esnasında yükleme protokolünün 20. değerinden 21. değerine geçerken BEÇÇ’nin piston tarafındaki ucunda düşey yönde aşırı deplasman meydana gelmiştir (Şekil 2.50). Şekil 2.45’de de görüldüğü gibi yük değeri azalmış ve deney sonlandırılmıştır. 3. BEÇÇ\_1 modelinin histeretik performansının istenilen seviyede olması bu eleman için daha ekonomik çözüme ayışına yönelmiştir. ÇE’nin elastik ve plastik bölgeye geçişi esnasında kullanılan 100x100x6 mm’lik kutu profil boyları 2. BEÇÇ\_1 modelinde 400 mm iken 3. BEÇÇ\_1 modelinde 240 mm olarak alınmıştır. Bu kısımda 100x100x6 mm’lik kutu profilde yapılan değişiklik söz konusu elemanın stabilitesini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Deney sonrası elemanın içi açıldığında ÇE’nin 100x100x6 mm’lik kutu profilin (Şekil 2.50) uç kısmında aşırı derecede lokal deformasyona uğradığı görülmüştür (Şekil 2.50). Ancak BEÇÇ’nin diğer ucunda herhangi bir hasar görülmemiştir. Deneyin sonlandırılmasına kadar olan kısımda ön germe tekniği başarılı olmuştur. Ancak meydana gelen lokal deformasyon



en uç 10.9 M24 bulona ve birleşim plakalarına ek istem uygulamış ve kayma miktarı diğer deneylere göre bir miktar daha fazla olmuştur (Şekil 2.57).

**5. BEÇÇ\_1:** Şekil 2.45'de görüldüğü gibi 5. BEÇÇ\_1 elemanı %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 5. BEÇÇ\_1 elemanı Tablo 2.5'da görüldüğü gibi sırasıyla 824 ve -894 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.08 civarında elde edilmiştir (Bu değerler AISC 2005'de verilen sınır değer olan 1.3'den küçüktür). %2.0 birim şekil değiştirmeden sonra BEÇÇ elemanında meydana gelen hasardan dolayı eksenel yük kapasitesi düşmeye başlamış ve deney sonlandırılmıştır. Şekil 2.51'de görüldüğü gibi 5. BEÇÇ\_1 elemanında BEM'i oluşturan 250x250x6 mm'lik kutu profil lokal olarak eğilmiştir. Bu eğiklik çekirdek elemanın elastik kısmındaki "+" şeklinin kutu profile temas etmesi ile başlamıştır. Bu bölgedeki hasarın beton dökümünde meydana gelen beton ayrışmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ancak %2.0'lik bir birim şekil değiştirme değerine kadar histeretik davranışta bir sorun görülmemiş olması tasarımın yeterli seviyede olduğunu göstermektedir. Yüksek mukavemetli bulonların öngerme sistemi ile bağlantısının yeterli olup olmadığını kontrol etmek için deney esnasında yapılan ölçümler Şekil 2.57'de gösterilmektedir. Yapılan ölçümlerde 5. BEÇÇ\_1 modelinde Şekil 2.57'de görüldüğü gibi beklenenden fazla kayma meydana gelmiştir. Bunun sebebi kullanılan rondelanın yüksek mukavemetli olmamasıdır. Bu deney için kullanılan rondela hata sonucu normal dayanıma sahip rondela olduğu farkedilmiştir. Ancak piston stroke kontrolü Şekil 2.44'de görüldüğü çekirdek elemanın üzerinden olduğu için buradaki kayma miktarı deney sonuçlarını etkilememiştir. Bunun yanında öngerme sisteminde kullanılan malzemelerin yüksek kalitede olması gerektiği ortaya çıkmış olmaktadır. Başka bir deyişle somun, bulon ve rondela üçlüsünden oluşan öngerme sisteminin başarılı şekilde gerçekleştirilebilmesi için bu üç bileşeninde yüksek mukavemetli olması gereklidir. Şekil 78'de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin çekirdek eleman boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle basınç kuvveti altında çekirdek elemanın orta bölgesinde plastikleşmenin meydana gelmiş olması çekirdek elemanın plastik kısmının tamamında enerji sönmüleme yapabileceğini göstermektedir. Şekil 2.59'da BEM'in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Buradan da görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde yaklaşık 10-20 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 10-20 mm'lik dış merkezlik halinde bile lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır.

**6. BEÇÇ\_1:** Şekil 2.45 ve Tablo 2.5'da görüldüğü gibi 6. BEÇÇ\_1 elemanı için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 869 kN ve 1026 kN'dur. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran 1.18 değerindedir. Bu değer AISC 2005'de verilen sınır değer olan 1.3'den azdır. 6.

BEÇÇ\_1 modeli ÇE'nin plastik kısmında %2.5 (0.025) birim şekil değiştirme değerine kadar yüklenmiştir (Şekil 2.45). Bu değer ilerisine gidilmesi planlanmış ancak yükün 1000 kN (yük hücresinin kapasitesi 1000 kN'dur) sınırına yaklaşması ile teste devam edilmemiştir. 6. BEÇÇ\_1 modelinde hasar meydana gelmemesinden dolayı protokole ek yorulma testi uygulanmıştır (Şekil 2.46). Yorulma testi ÇE'nin %1.0 birim şekil değiştirmeye karşılık gelen aksenal basma ve çekme deplasmanlarına kadar ters çevirimli yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma testinde toplam 40 ters çevirimli deplasman uygulaması yapılmıştır. Yorulma testi sonucunda da hasar meydana gelmemesinden sonra test durdurulmuştur. Yorulma testinden sonra eleman açılmış ve meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Şekil 2.52'de görüldüğü gibi ÇE'nin plastik kısmının uç bölgelerinde yüksek modda burkulma meydana gelmiştir. Burkulma mekanizması orta açıklığa doğru azalmıştır. Ayrıca BEÇÇ bağlantısında kullanılan ön germe tekniği ile sıkılan 10.9 M24 bulonların yeterli seviyede çalıştığı görülmektedir (Şekil 2.57). BEM'i oluşturan kutu profil üzerinden elde edilen düzlem dışı deplasmanlar Şekil 2.59'da görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi 6. BEÇÇ\_1 elemanı düzlem dışı deplasman (3-7mm) yapmasına rağmen BEM ve ÇE elemanlarında lokal deformasyon meydana gelmemiştir. Yukarıda da açıklandığı üzere bunun en büyük sebebi BEM sisteminin uç bölgelerinin stabiliteleri ek plakalar ile artırılmasıdır. Bu deney sonucunda elde edilen BEÇÇ'nin literatürde kullanılan ve başarılı olan diğer BEÇÇ tiplerine uygulama ve tasarım açısından bir alternatif olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

**7. BEÇÇ\_1:** Şekil 2.45'de görüldüğü gibi 7. BEÇÇ\_1 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 7. BEÇÇ\_1 elemanı Tablo 2.5'de görüldüğü gibi sırasıyla 886 ve -948 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.07 civarında elde edilmiştir. %2.0 birim şekil değiştirmeden sonra %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesinde basınç yükünde bir azalma meydana gelmiştir. Devam eden yüklemelerde elemana %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesine kadar çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu çekme kuvvetinin sıfırlanıp basma kuvvetinin artırıldığı noktada BEM'i oluşturan sargısız beton eleman ortadan yarılmıştır ve deney sonlandırılmıştır. Şekil 2.53'de görüldüğü gibi 7. BEÇÇ\_1 elemanında BEM'i oluşturan sargısız beton ÇE'nin lokal burkulmasını kontrol edememiş ve dışa doğru genişlemeye başlamıştır. Bu genişlemeyi kontrol edecek sargı olmadığı için beton çatlamaya başlamış ve sonunda boydan boya ortadan yarılmıştır. Ancak %2.0'lik bir birim şekil değiştirme değerine kadar histeretik davranışta bir sorun görülmemiş olması sargısız olarak elde edilen beton BEM'in oldukça etkili bir sistem olabileceğini göstermiştir. Fakat betonun kontrolsüz şekilde çatlamaya başlaması ve yarılmaları elde edilen BEM sisteminin geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir. 7.

BEÇÇ\_1 modelinde Şekil 2.57'de görüldüğü gibi yüksek mukavemetli bulonlarda kayma miktarının genel olarak oldukça düşük seviyede kaldığı görülmektedir. Şekil 2.58'de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin çekirdek eleman boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 2.59'da BEM'in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Buradan da görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde yaklaşık 5-10 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 5-10 mm'lik dış merkezlik halinde bile lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır. Bu şekillerdeki ani deplasman artışı betonun yarılması esnasında meydana gelmiştir.

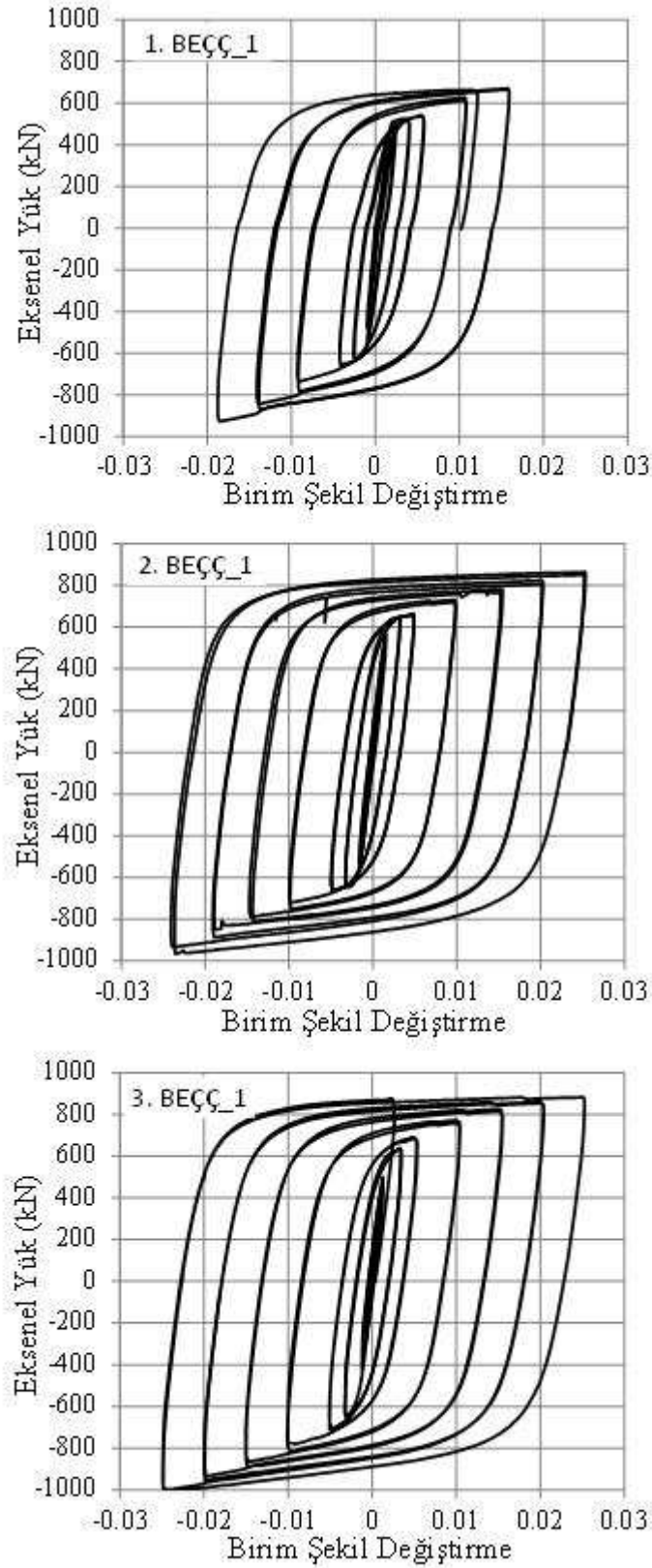
**8. BEÇÇ\_1:** Şekil 2.45'de görüldüğü gibi 8. BEÇÇ\_1 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %2.5 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 8. BEÇÇ\_1 elemanı Tablo 2.5'de görüldüğü gibi sırasıyla 842 ve -1005 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.19 civarında elde edilmiştir. %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesinden sonra yük hücresinin 1000 kN'luk kapasitesinin çok aşılacağından deneye devam edilememiştir. BEÇÇ elemanında %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesi yapılmasına rağmen hasar tespiti yapılamadığı için 8. BEÇÇ\_1 elemanına Şekil 2.46'da görüldüğü gibi yorulma testi uygulanmıştır. Yorulma testi esnasında basınç yükünde azalma meydana gelmiştir. Şekil 2.46'da görüldüğü gibi 8. BEÇÇ\_1 elemanında BEM'i oluşturan kısmı sargılı betonda iki sargı bölgesinin arasında hasar meydana gelmiştir. 205 cm'lik BEM elemanında 50 cm'lik genişliğinde lifli polimer (LP veya FRP) BEM'in iki ucunda ve orta noktasında sargı olarak kullanılmıştır. Hasar ise sargının yapılmadığı ara bölgelerde meydana gelmiştir. Dolayısı ile kısmı dahi olsa sargı yapılmayan bölgelerin ÇE tarafından uygulanan genişleme istemlerini kontrol edemediği görülmüştür. 8. BEÇÇ\_1 testinden sonra sargının tam olarak yapıldığı 4. BEÇÇ'nin tasarlanması gerektiği deney sonucunda ortaya çıkmıştır. 8. BEÇÇ\_1 modelinde Şekil 2.57'de görüldüğü gibi yüksek mukavemetli bulonlarda kayma miktarının bir bölge hariç oldukça düşük seviyede kaldığını göstermektedir. Ancak sadece bir bölgede 3 mm'lik bir kayma meydana gelmesi yüksek mukavemetli bulonların sıkma işlemi esnasında uygulama hatasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu proje kapsamında yüksek mukavemetli bulonlar havalı somun sökme sıkma makinesi ile yapılmaktadır. Dolayısı ile hava kompresörünün tam dolu olması ve yeterli hava miktarının olmaması sıkma derecesini etkilemektedir. Bu kısmi bölgede meydana gelen kaymanın hava kompresörünün tam dolu olmadığı andaki sıkılan bulonlar olduğu düşünülmektedir. 8. BEÇÇ\_1 deneyinde çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri istenilen seviyede elde edilememiştir. Şekil 2.59'da görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde düzlem içi ve dışı yaklaşık



5-10 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 5-10 mm'lik dış merkezlik halinde bile lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır.

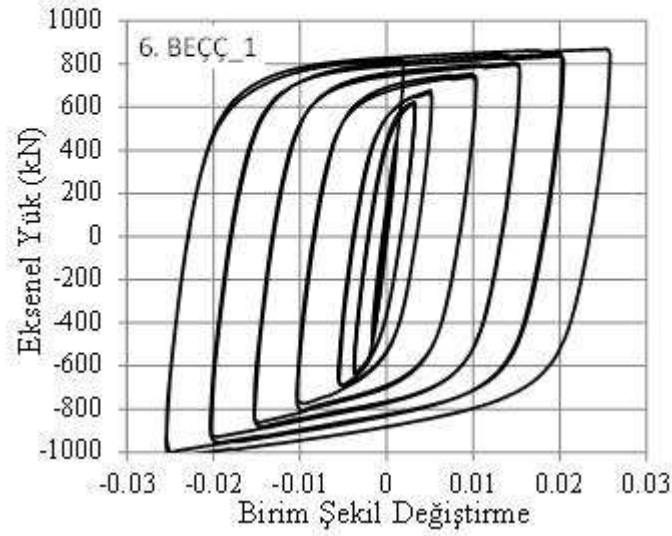
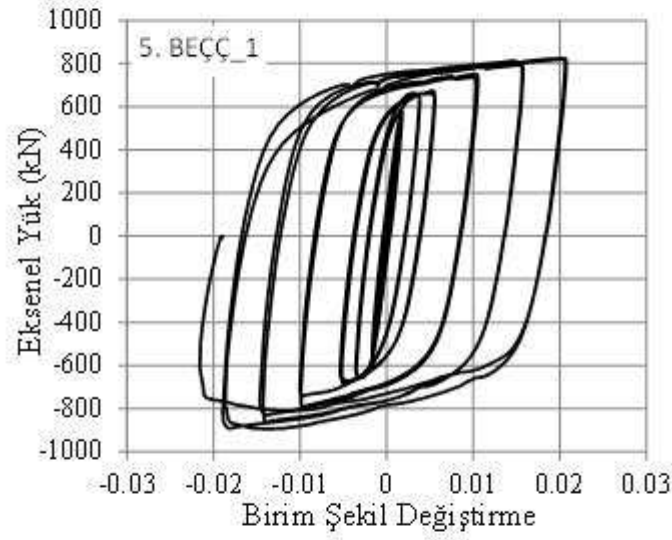
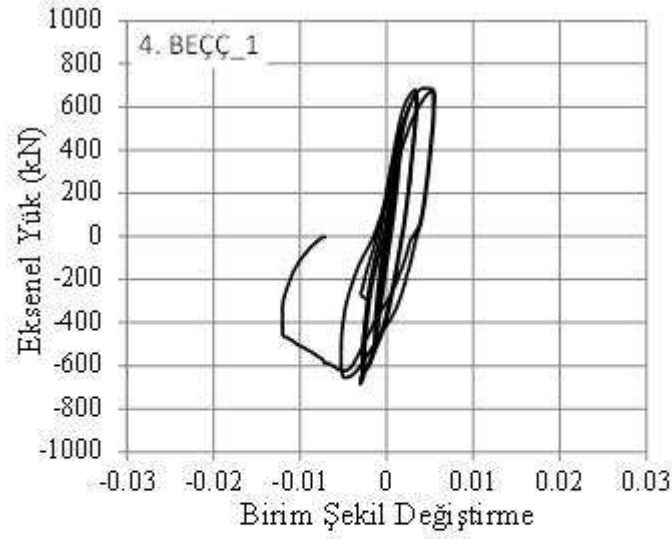
**9. BEÇÇ\_1:** Şekil 2.45'de görüldüğü gibi 9. BEÇÇ\_1 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 9. BEÇÇ\_1 elemanı Tablo 6'da görüldüğü gibi sırasıyla 889 ve -1012 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.14 civarında elde edilmiştir. %2.0 birim şekil değiştirme yüklemesinden sonra yük hücresinin 1000 kN'luk kapasitesinin çok aşılacağından deneye devam edilememiştir. BEÇÇ elemanında %2.0 birim şekil değiştirme yüklemesi yapılmasına rağmen hasar tespiti yapılamadığı için 9. BEÇÇ\_1 elemanına Şekil 2.46'da görüldüğü gibi yorulma testi uygulanmıştır. Yorulma testi esnasında toplam 40 çevirimli yük uygulaması yapılmasına rağmen elemanda herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. BEÇÇ'nin akma noktasından sonra 300 kez daha fazla plastik davranış göstermesinden sonra deney sonlandırılmıştır. Şekil 2.55'de görüldüğü gibi 9. BEÇÇ\_1 elemanında herhangi bir hasar görülmemektedir. Olası lokal burkulmaların belirlenebilmesi için BEÇÇ elemanı ortandan yarılmıştır (Şekil 2.55). 9. BEÇÇ\_1 modelinde yüksek mukavemetli bulonlarda kayma miktarının oldukça düşük seviyede kaldığını Şekil 2.57'de görülmektedir. Şekil 2.58'de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin çekirdek eleman boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 2.59'da görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde düşlem içi ve dışı yaklaşık 5-25 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 5-25 mm'lik dış merkezlik halinde bile lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır.

**10. BEÇÇ\_1:** Şekil 2.45'de görüldüğü gibi 10. BEÇÇ\_1 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 10. BEÇÇ\_1 elemanı Tablo 2.5'de görüldüğü gibi sırasıyla 864 ve -979 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.14 civarında elde edilmiştir. %2.0 birim şekil değiştirme yüklemesinden sonra %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesinin 2. yüklemesinde BEM'i oluşturan betonda çatlama meydana gelmiş ve BEM hasar almıştır (Şekil 2.56). 10. BEÇÇ\_1 modelinde yüksek mukavemetli bulonlarda kayma miktarının oldukça düşük seviyede kaldığını Şekil 2.57'de görülmektedir. Şekil 2.59'da görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde düşlem içi ve dışı yaklaşık 5-15 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 5-25 mm'lik dış merkezlik halinde bile ÇE'nin %2 birim şekil değiştirmesine kadar lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır.



Şekil 2.45. 1.-10. BEÇÇ\_1 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değişirme grafiği

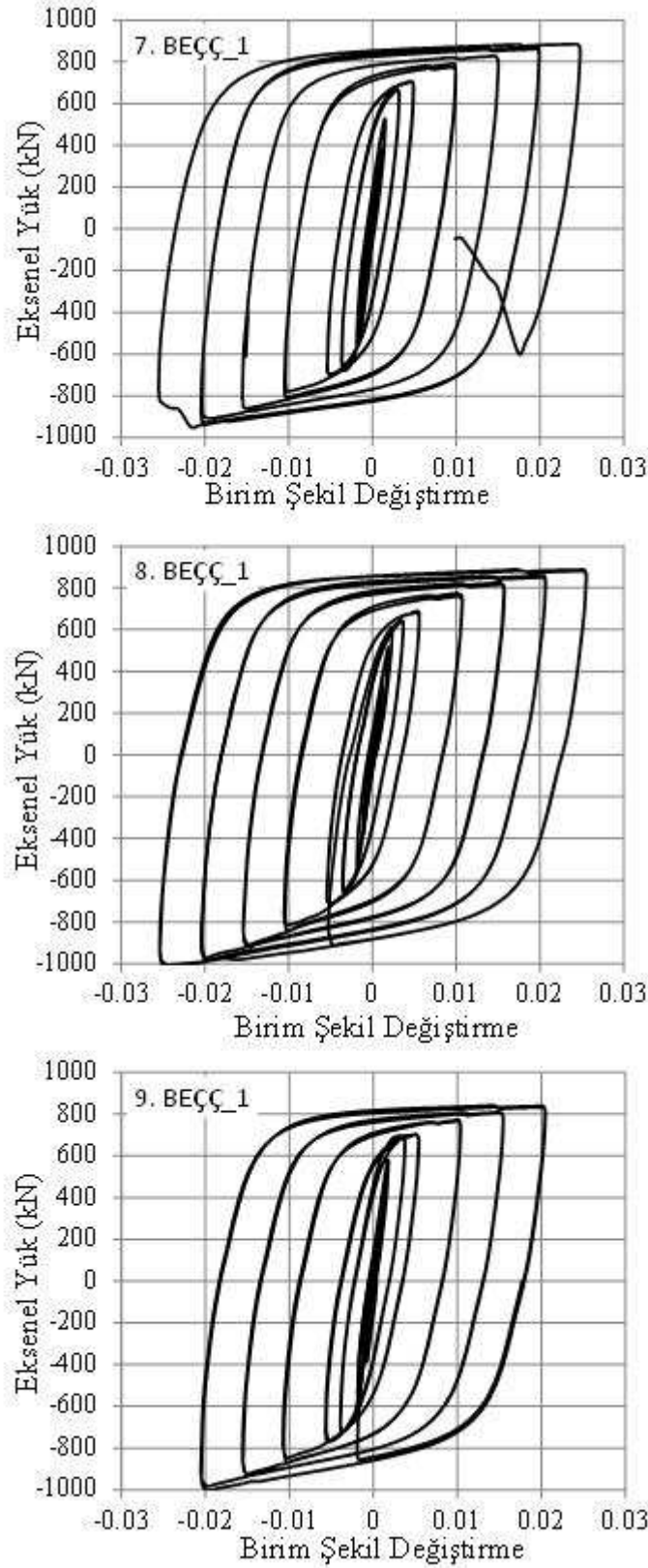
Devam Ediyor



Şekil 2.45. 1.-10. BEÇÇ\_1 Elemanlarına ait aksenal yük-birim şekil değişirme grafiği

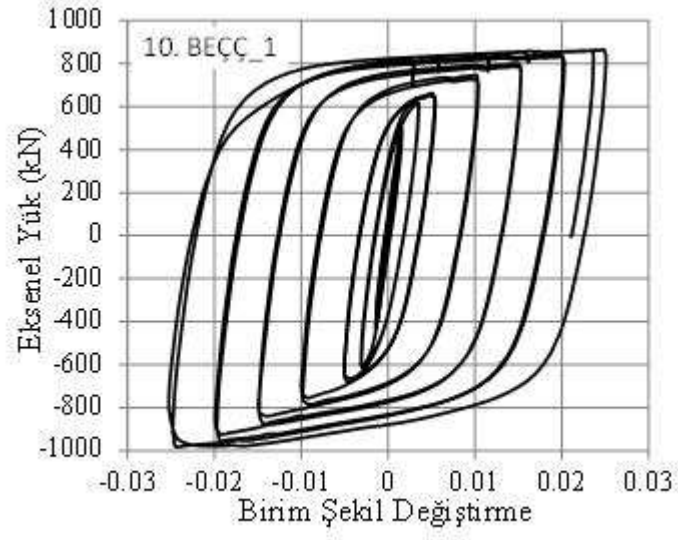
Devam Ediyor



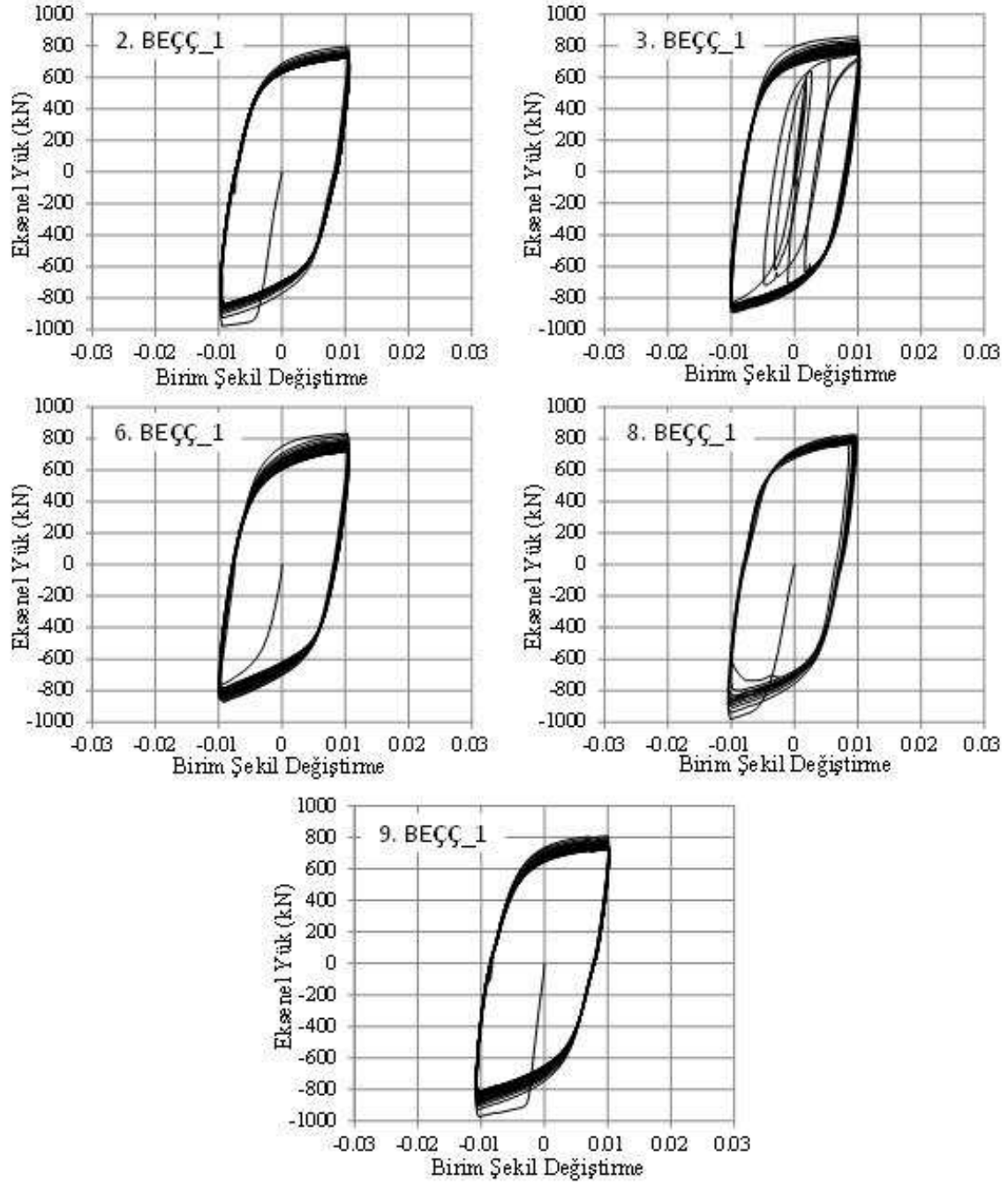


Şekil 2.45. 1.-10. BEÇÇ\_1 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değişirme grafiği

Devam Ediyor



Şekil 2.45 1.-10. BEÇÇ\_1 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 2.46. 2., 3., 6., 8. ve 9. BEÇÇ\_1 Elemanlarına ait yorulma testi (8. BEÇÇ\_1 10 ters çevirim, diğerleri 40 ters çevirim)



Şekil 2.47. 1. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.48. 2. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.49. 3. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.50. 4. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.51. 5. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.52. 6. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.53. 7. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.54. 8. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları

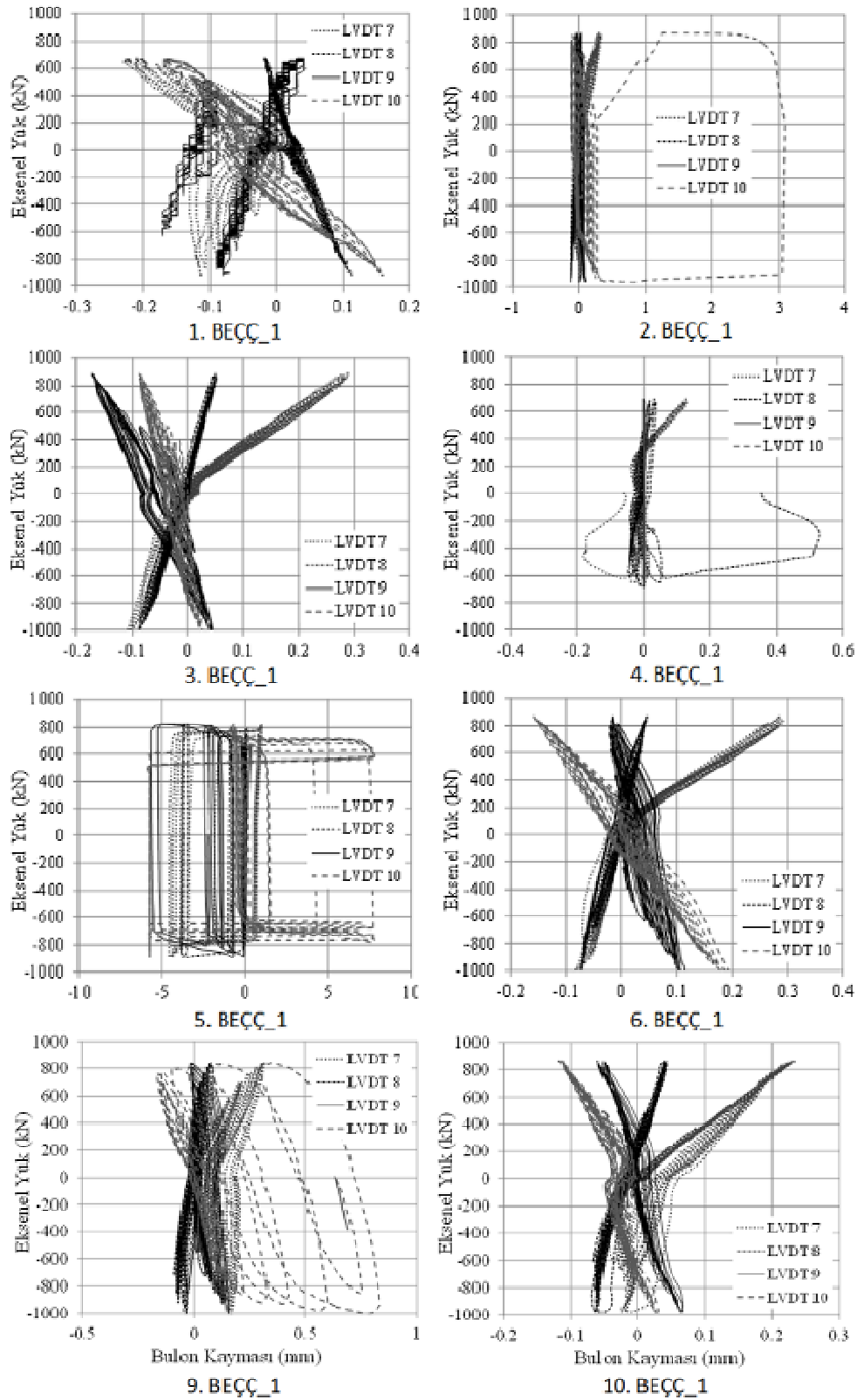


Şekil 2.55. 9. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları

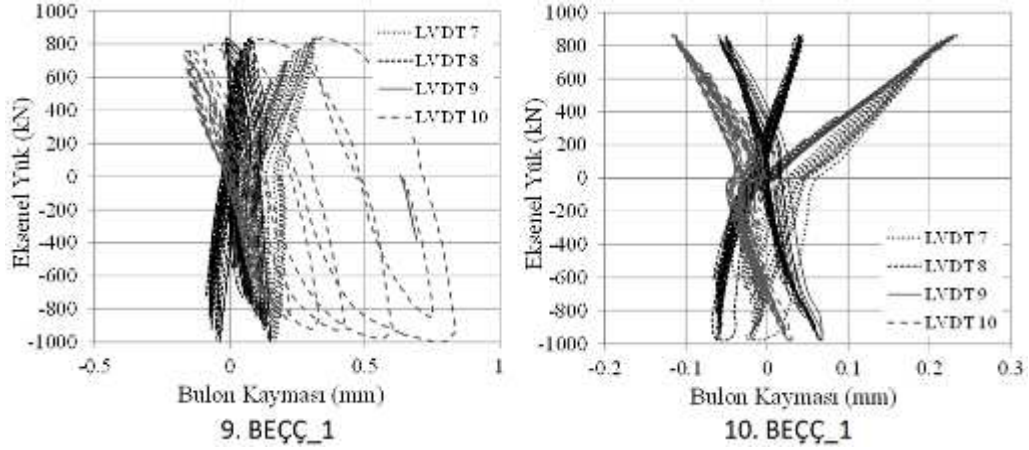


Şekil 2.56. 10. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları

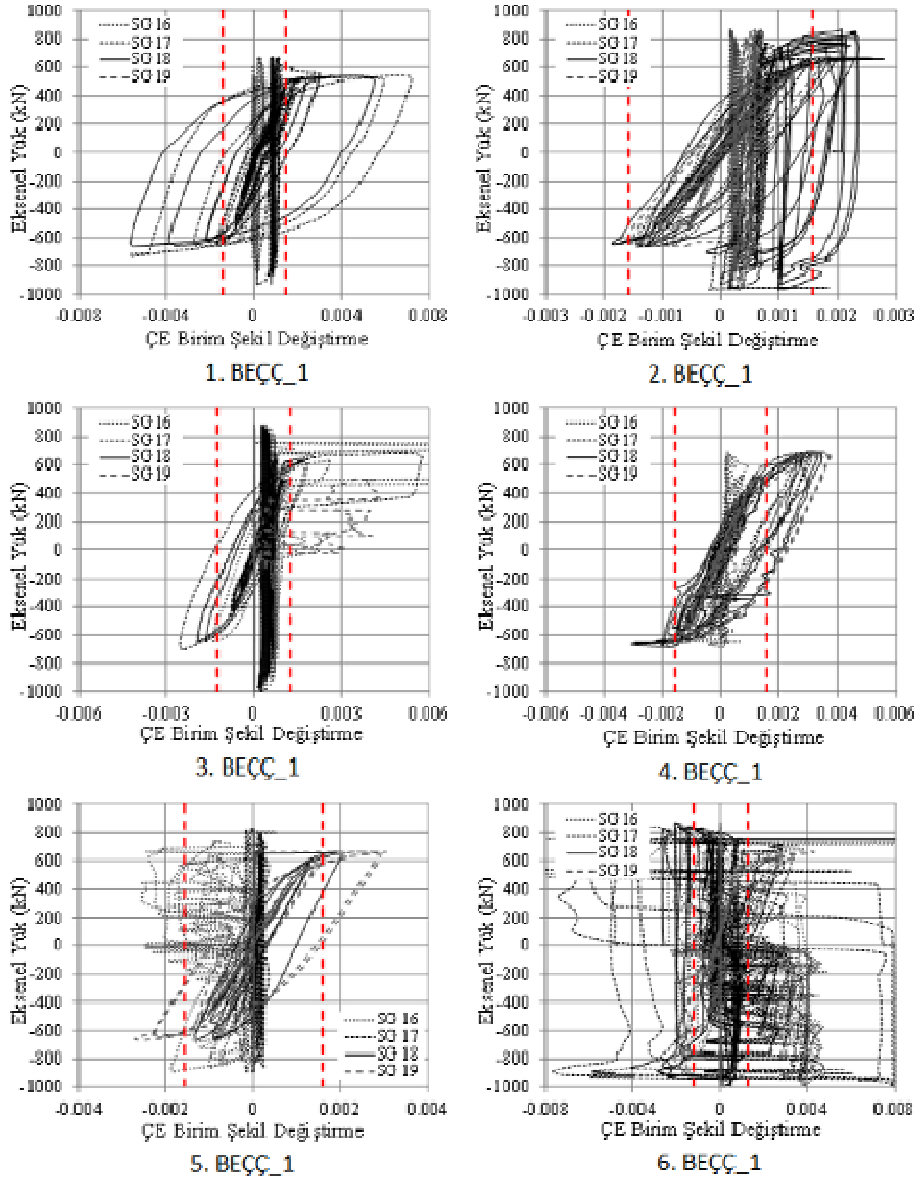




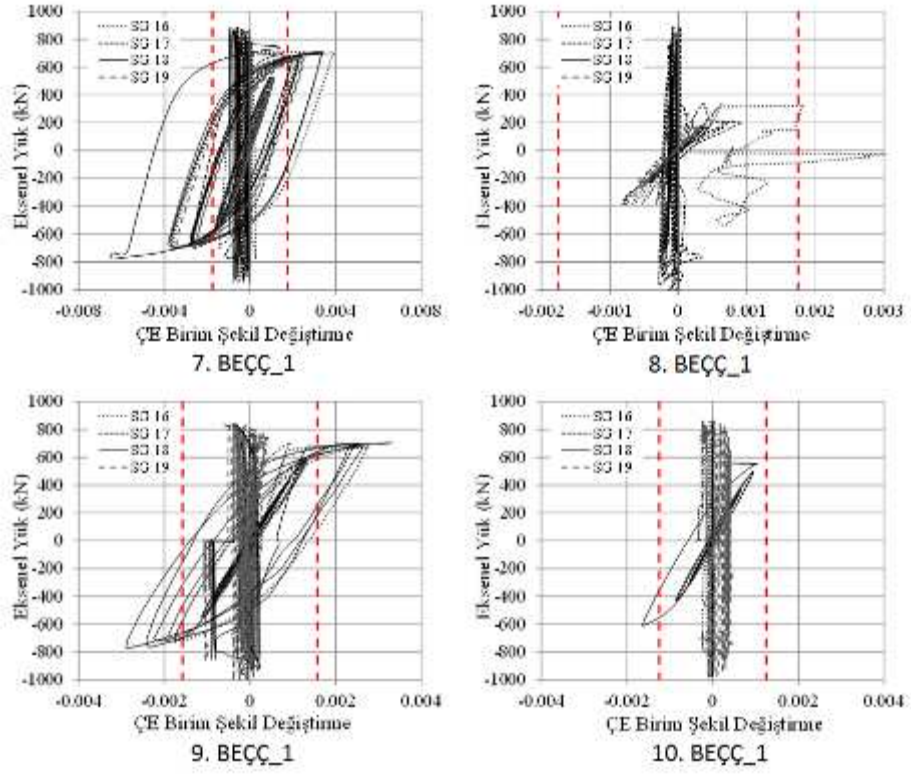
Şekil 2.57. 1-10. BEÇÇ\_1 elemanlarındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı (Devam ediyor.)



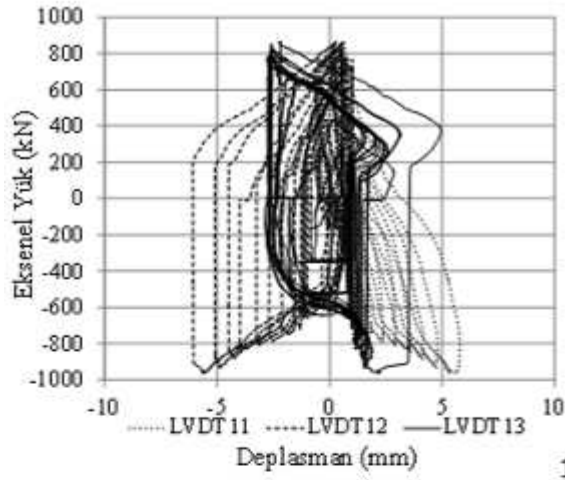
Şekil 2.57. 1-10. BEÇÇ\_1 elemanlarındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı



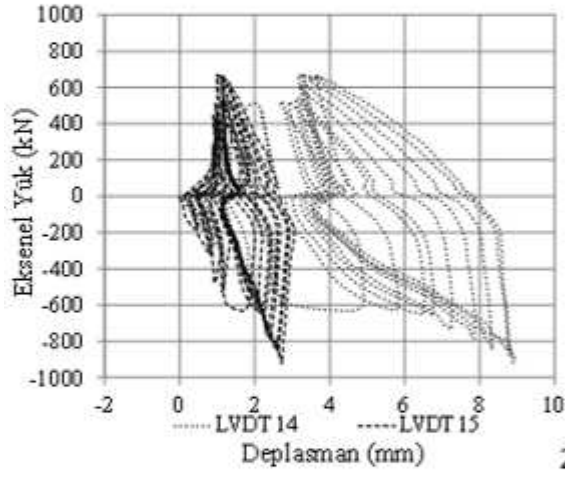
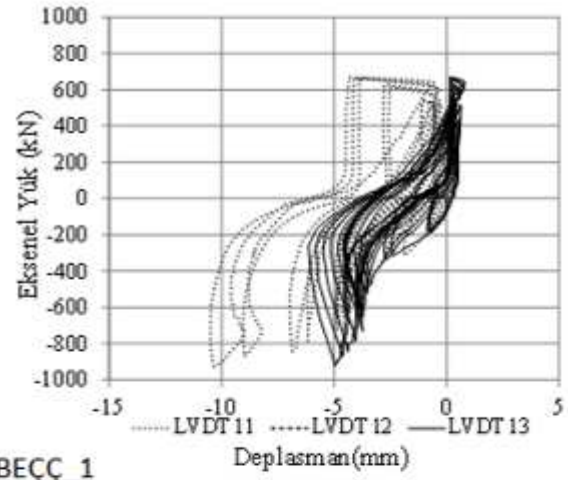
Şekil 2.58. 1-10. BEÇÇ\_1 elemanlarındaki ÇE Birim Şekil Değişirme (Devam Ediyor)



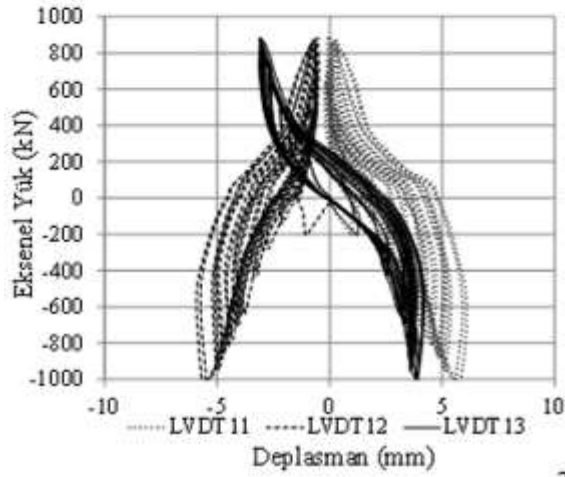
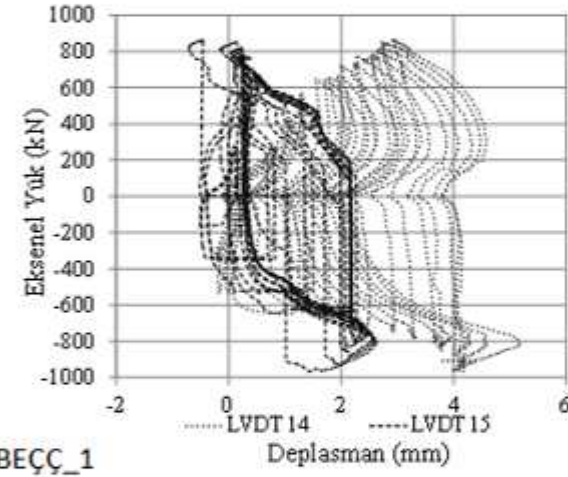
Şekil 2.58. 1-10. BEÇÇ\_1 elemanlarındaki ÇE Birim Şekil Değişirme



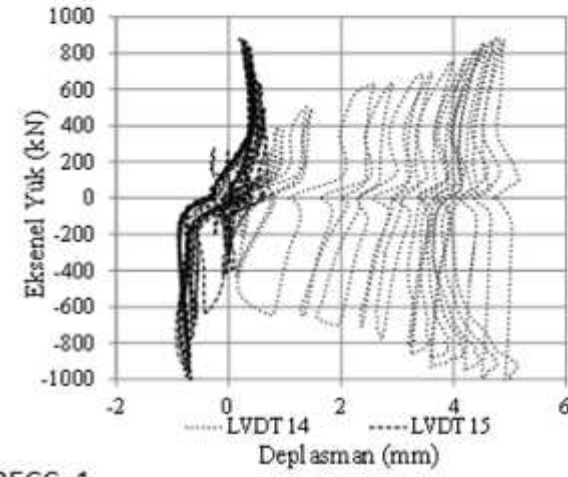
1. BEÇÇ\_1



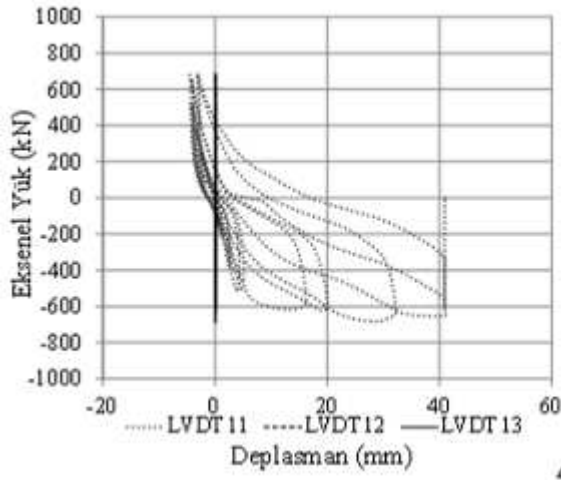
2. BEÇÇ\_1



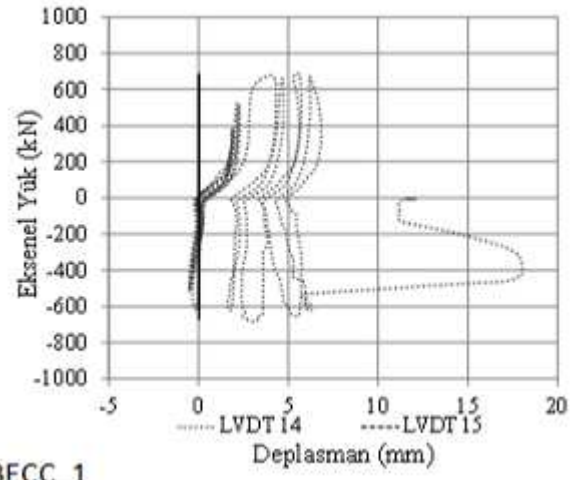
3. BEÇÇ\_1



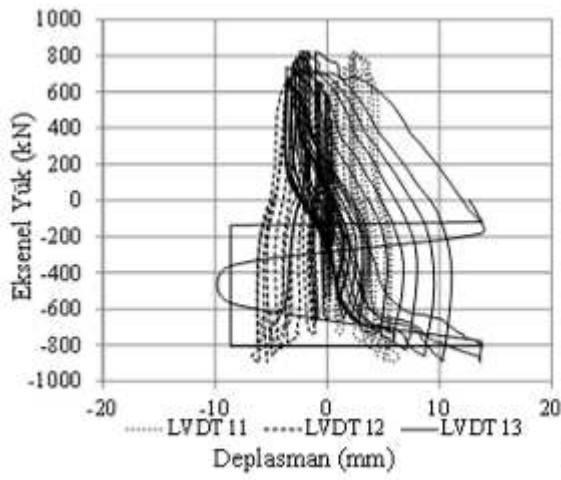
Şekil 2.59. 1-10. BEÇÇ\_1 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar (Devam Ediyor)



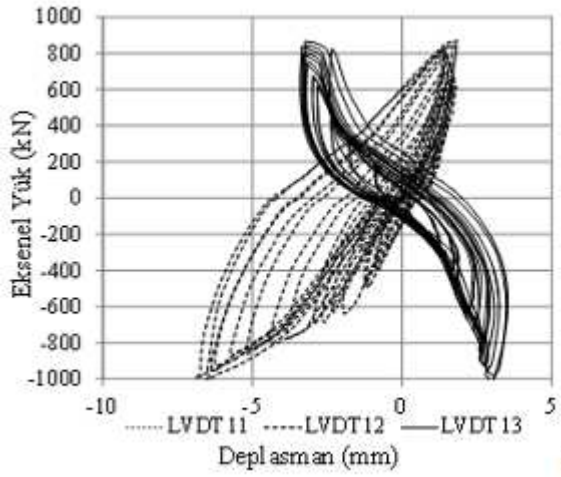
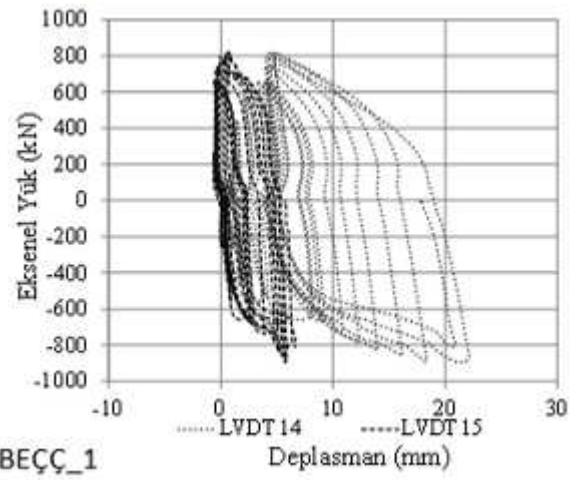
4. BEÇÇ\_1



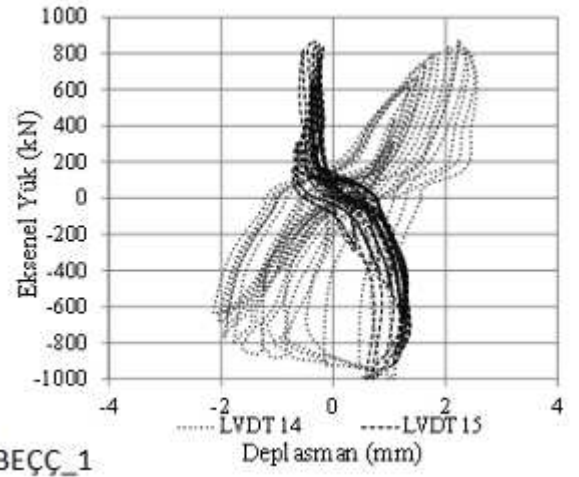
5. BEÇÇ\_1



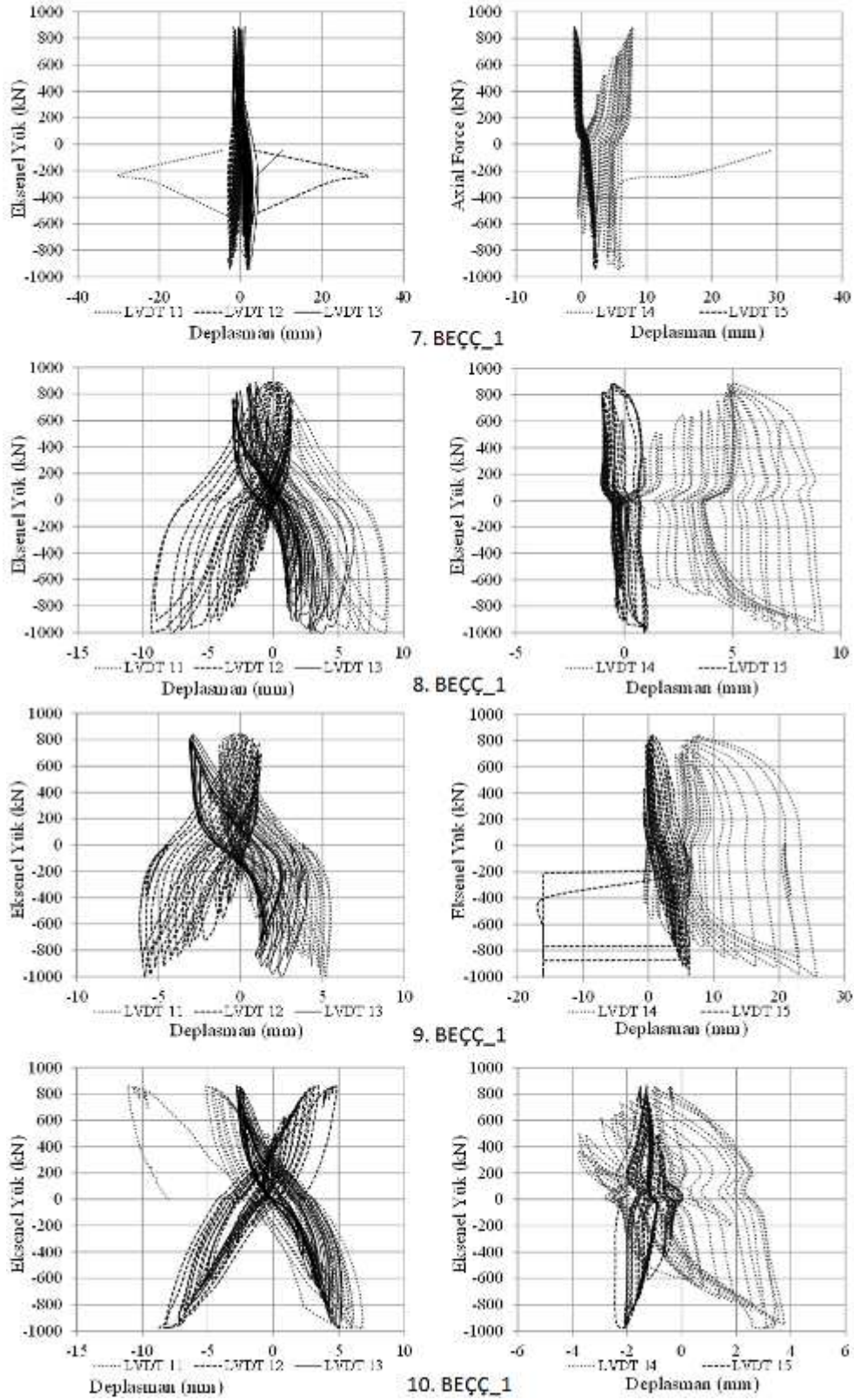
6. BEÇÇ\_1



8. BEÇÇ\_1



Şekil 2.59. 1-10. BEÇÇ\_1 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar (Devam Ediyor)



Şekil 2.59. 1-10. BEÇÇ\_1 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar



## 2.6.2. 2. GRUP BEÇÇ ELEMANLARINA AIT DENEY SONUÇLARI VE GÖZLEMLER

2. Grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük kapasiteleri Tablo 2.6'de görülmektedir. BEÇÇ'lerin histeretik davranışları Şekil 2.60'de verilmiştir. Test elemanlarının deneyden sonraki fotoğrafları Şekil 2.61-2.63'de verilmiştir. Deney esnasında ön-germe yöntemiyle sıkılan 10.9 M24 bulonlarda meydana gelen kayma değerleri Şekil 2.64'de gösterilmektedir. ÇE'nin plastik kısmının orta noktasındaki birim uzama değerleri (bu noktalara yapıştırılan birim uzama ölçerler sayesinde alınan ölçümler) Şekil 2.65'de verilmiştir. BEM'i oluşturan sistemlerin her iki ucunda meydana gelen deplasmanlar ise Şekil 2.66'da gösterilmiştir. Eleman bazında değerlendirmeler ise aşağıda yapılmıştır.

Tablo 2 6. 2. Grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük değerleri

2. Grup BEÇÇ	Çekme (kN)	Basınç (kN)	$P_{çekme}/P_{basınç}$
1. BEÇÇ_2	650	-584	0.90
2. BEÇÇ_2	837	-901	1.08
3. BEÇÇ_2	668	-759	1.14

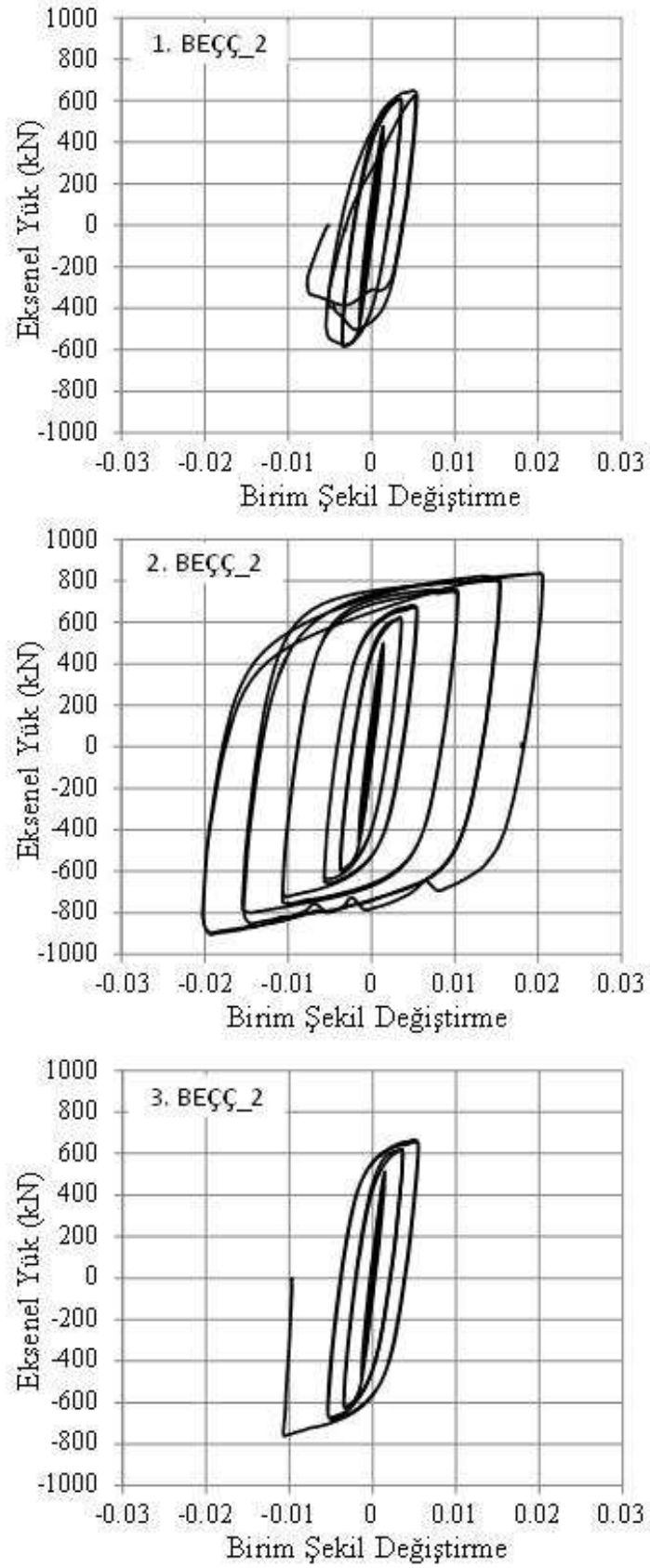
**1. BEÇÇ\_2:** Şekil 2.65'de görüldüğü gibi 1. BEÇÇ\_2 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %0.005 birim şekil değiştirme değerinden sonra BEÇÇ'de meydana gelen lokal hasarlardan dolayı test edilememiştir. 1. BEÇÇ\_2 elemanı Tablo 2.6'da görüldüğü gibi sırasıyla 650 ve -584 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Bu BEÇÇ tipinde ÇE elemanda plastikleşme meydana gelmiştir ancak BEM'den dolayı ileri deformasyonlara kadar sistem stabil kalamamıştır. 1. BEÇÇ\_2 elemanında Şekil 2.61'de görüldüğü gibi BEM'i oluşturan 100x100x2.6 mm'lik kutu profillerde (KP 100x2.6) lokal ezilmeler meydana gelmiştir. Söz konusu hasarın meydana gelmesinin sebebi ise KP 100x2.6 eleman et kalınlığının yeterli olmasıdır. Deneyin bu kısmında kadar çerçeve bağlantı elemanlarında herhangi bir hasar tespit edilememiştir. Yüksek mukavemetli bulonların öngerme sistemi ile bağlantısının yeterli olup olmadığını kontrol etmek için deney esnasında yapılan ölçümler Şekil 2.64'de gösterilmektedir. Şekil 2.65'de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin ÇE boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 2.66'da BEM'in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Deney sınırlı seviye yapılabildiğinden BEM'in uç bölgelerinde düzlem dışı hareket 5 mm seviyelerinde kalmıştır.



**2. BEÇÇ\_2:** Şekil 2.65'de ve Tablo 2.6'da görüldüğü 2. BEÇÇ\_2 elemanı sırasıyla 837 ve -901 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.08 civarında elde edilmiştir. 2. BEÇÇ\_2 modelinde % 2.0 birim şekil değiştirme değerinden sonra çerçeve bağ elemanlarında kaynak kopması meydana gelmiştir. Bu durumda BEM etkisini kaybetmiştir ve % 2.0 birim şekil değiştirmeden sonra deney sonlandırılmıştır. BEM'i oluşturan KP 100x2.6'lık profillerin arasına izolasyon için kullanılan miktarın fazla olmasından dolayı ÇE yüksek modda burkulmaya maruz kalmıştır (Şekil 2.62). Dolayısı ile BEM'i çok parçalı basınç çubuğu olan BEÇÇ'lerde izolasyon malzemesinin kalınlığının biraz daha az olması gerektiği ortaya çıkmıştır. Basınç yüklemesi altında kapasite düşüşleri yüksek mod burkulmasının bir göstergesi olarak görülebilir. Ayrıca çekme bölgesine geçildiğinde ise rijitlik kaybı yine yüksek modda burkulmuş ÇE'nin ilk olarak tam düz hale gelmesi ve sonra eksenel olarak tam yük almaya başlamasından kaynaklanmıştır. 1. BEÇÇ\_1'e göre KP 100x2.6'lık profillerin içi beton ile doldurulduğundan 2. BEÇÇ\_2'de BEM'de lokal ezilme/deformasyon meydana gelmemiştir. Yüksek mukavemetli bulonların kayma miktarı Şekil 2.64'de gösterilmektedir. Bulon kaymasının sadece bir bağlantıda ciddi seviyede meydana geldiği görülmüştür. Şekil 2.65'de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin ÇE boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 2.66'da BEM'in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Bu deplasmanlar incelendiğinde içi beton doldurulmuş KP 100x2.6'lık profillerden elde edilen ve çerçeve bağ elemanları ile oluşturulan BEM sisteminin yaklaşık 10 mm'lik düzlem dışı harekette dahi global stabiliteyi sağladığı görülmektedir.

**3. BEÇÇ\_2:** Bu elemanın Tablo 2.6'da görüldüğü gibi sırasıyla 668 ve -759 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.14 civarında elde edilmiştir. 3. BEÇÇ\_2 elemanında % 1.0 birim şekil değiştirme değerinde global burkulmadan dolayı deney sonlandırılmıştır (Şekil 2.63). Çapraz bağ elemanları ile elde edilen çok parçalı basınç çubuğundan oluşan BEM mekanizması global olarak deformasyona uğraması bu yapı tekniğinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. %2.0'lik bir birim şekil değiştirme değerine kadar histeretik davranışın stabil olmaması tasarımın henüz yeterli seviyede olmadığını göstermektedir. Şekil 2.66'da BEM'in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Buradan da görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde düzlem dışı hareket global stabilitenin kaybolduğunu göstermektedir.





Şekil 2.60. 1.-3. BEÇÇ\_2 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değişirme grafiği



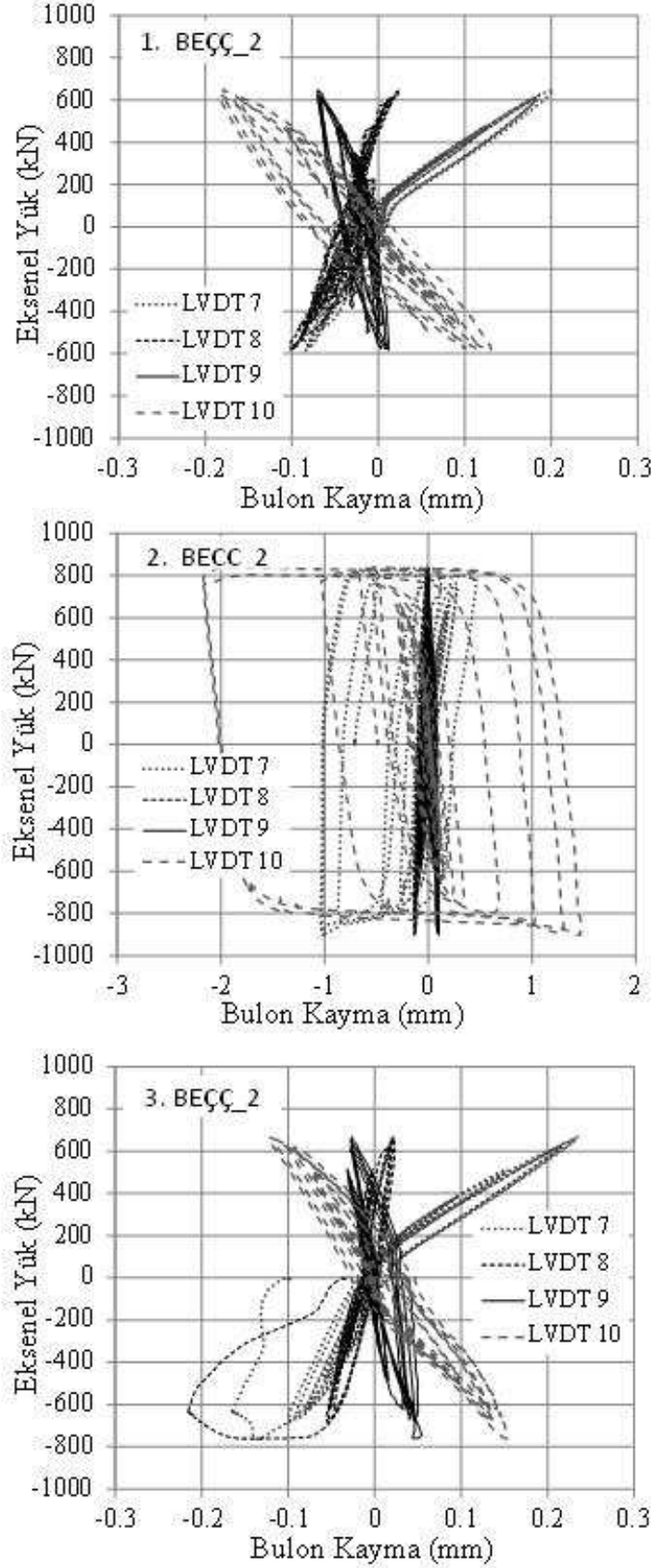
Şekil 2.61. 1. BEÇÇ\_2 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



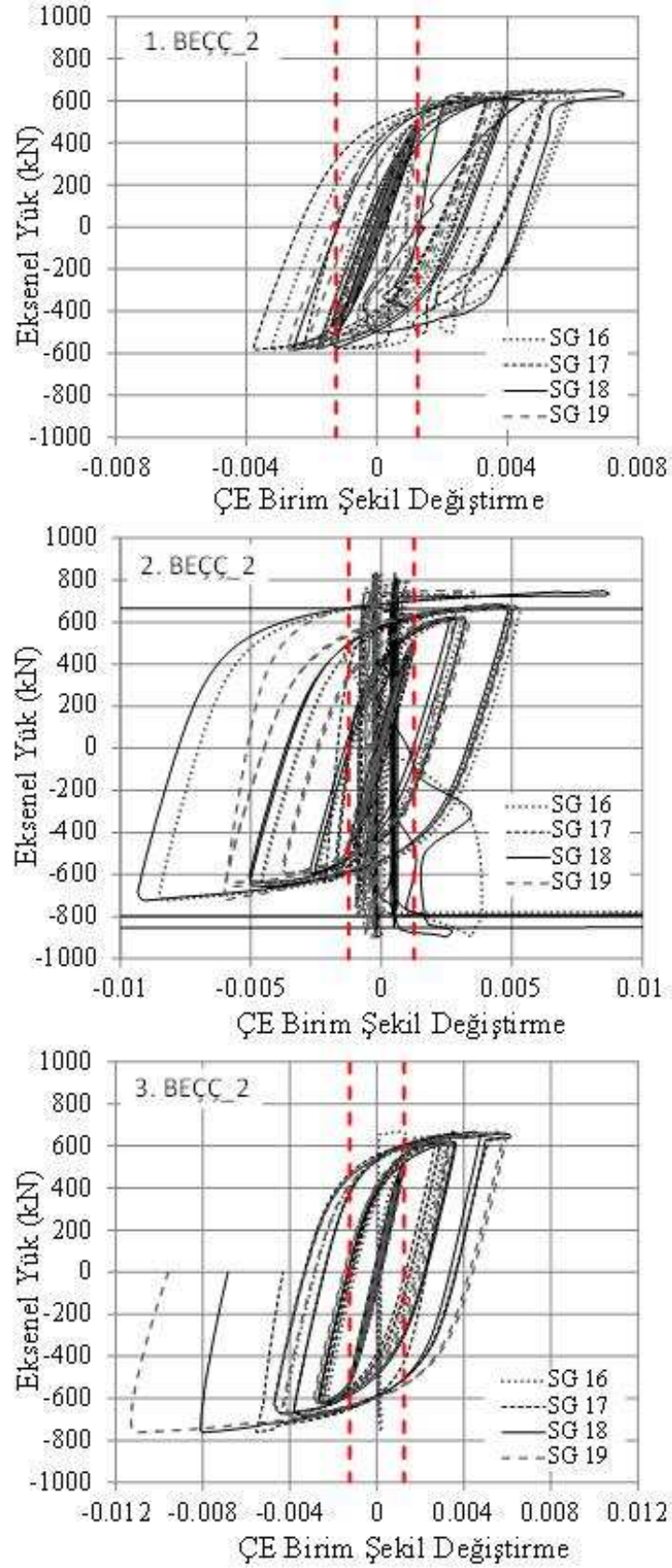
Şekil 2.62. 2. BEÇÇ\_2 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



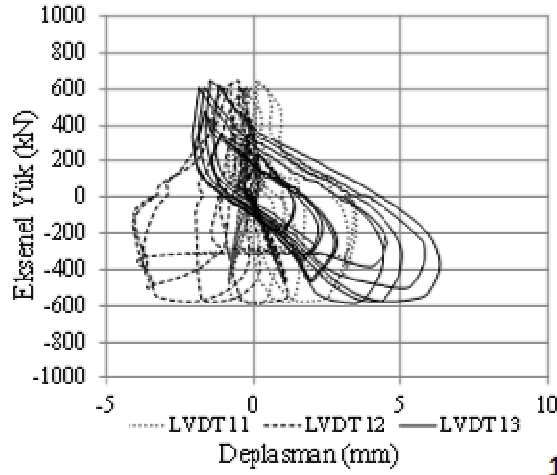
Şekil 2.63. BEÇÇ\_2 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



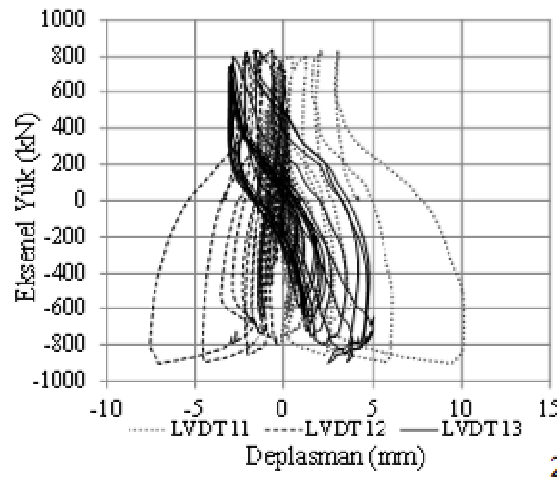
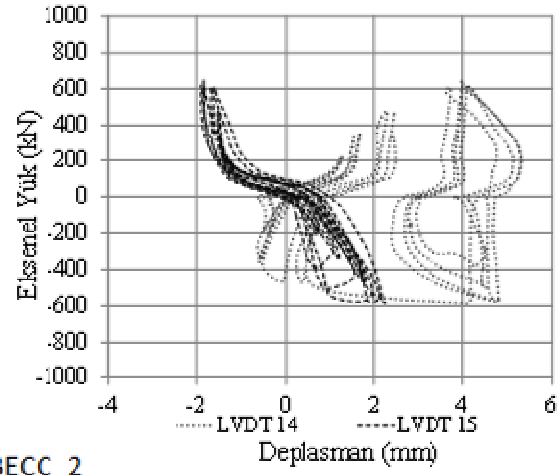
Şekil 2.64. 1-3. BEÇÇ\_2 elemanlarındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı



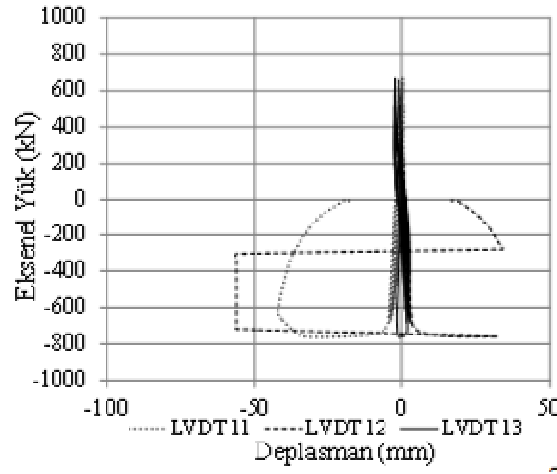
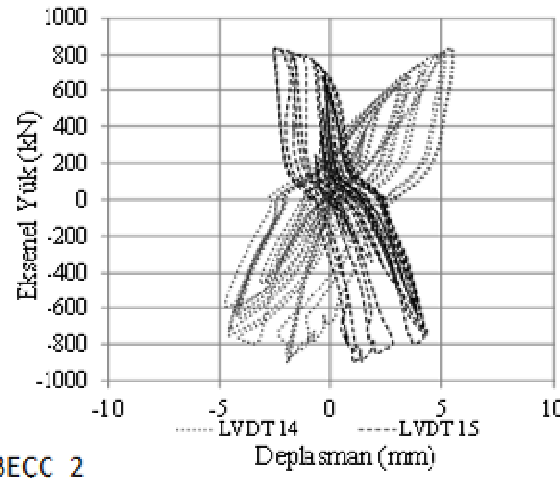
Şekil 2.65. 1-3. BEÇÇ\_2 elemanlarındaki ÇE Birim Şekil Değişirme



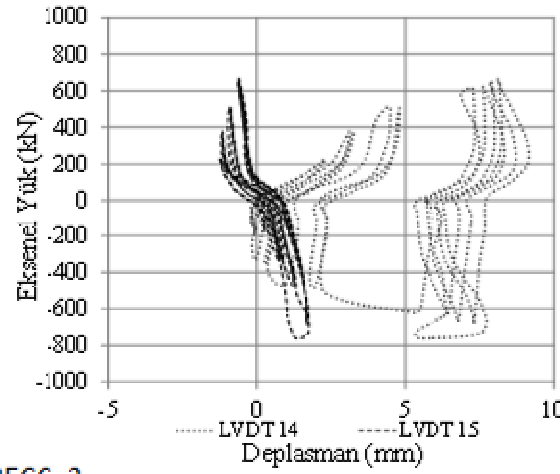
1. BEÇÇ\_2



2. BEÇÇ\_2



3. BEÇÇ\_2



Şekil 2.66. 1-3. BEÇÇ\_2 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar



### 2.6.3. 3. GRUP BEÇÇ ELEMANLARINA AIT DENEY SONUÇLARI VE GÖZLEMLER

3. Grup BEÇÇ elemanları Prekast Panellerden (PP'lerden) meydana gelmiştir. Bu elemanlara ait aksenal yük kapasiteleri Tablo 2.7'de görülmektedir. BEÇÇ'lerin histeretik davranışları Şekil 2.67'de verilmiştir. Test elemanlarının deneyden sonraki fotoğrafları Şekil 2.68-2.74'de verilmiştir. Deney esnasında ön-germe yöntemiyle sıkılan 10.9 M24 bulonlarda meydana gelen kayma değerleri Şekil 2.75'de gösterilmektedir. ÇE'nin plastik kısmının orta noktasındaki birim uzama değerleri Şekil 2.76'da verilmiştir. BEM'i oluşturan sistemlerin her iki ucunda meydana gelen deplasmanlar ise Şekil 2.77'de gösterilmiştir. Elaman bazında değerlendirmeler ise aşağıda yapılmıştır.

Tablo 2 7. Grup BEÇÇ elemanlarına ait aksenal yük değerleri

3. Grup BEÇÇ	Çekme (kN)	Basınç (kN)	$P_{\text{basınç}}/P_{\text{çekme}}$
1. BEÇÇ_3	666	-497	0.75
2. BEÇÇ_3	665	-565	0.85
3. BEÇÇ_3	784	-802	1.02
4. BEÇÇ_3	825	-876	1.06
5. BEÇÇ_3	758	-940	1.24
6. BEÇÇ_3	895	-939	1.05
7. BEÇÇ_3	887	-1002	1.13

**1. BEÇÇ\_3:** Tablo 2.7'de görüldüğü gibi 1. BEÇÇ\_1 elemanı sırasıyla 666 ve -497 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 0,75 civarında elde edilmiştir. Basınç yüklemesinin ilk deplasmanlarından itibaren global burkulma oluşumu gözlenmiştir. Global burkulma Şekil 2.67'de de görüldüğü gibi aksenal basınç rijitliğinde düşüşe sebep olmuştur. ÇE'nin ise basma istemleri altında plastikleşmediği görülmektedir (Şekil 2.67). Bu basınç istemlerinde ÇE'de global burkulmaya bağlı olarak eğilme deformasyonları meydana gelmiş olup Şekil 2.76'da görüldüğü gibi birim uzama ölçerlerden elde edilen değerler akma birim uzama değerlerinden yüksektir. Bu durum aksenal kısalmadan değil global burkulma sonucu eğilmeden meydana gelmiştir. ÇE'nin % 0,5 birim şekil değiştirmeden sonra BEÇÇ elemanında global burkulma ve PP'lerde aşırı lokal hasarlar meydana gelmiştir (Şekil 2.68). Söz konusu global burkulmanın meydana gelmesi boyuna kullanılan ankrajların yetersiz olması ve PP'lerin donatısının olmamasından kaynaklanmıştır. PP'lerde ÇE'nin burkulmasını engelleme işlemi esnasında ÇE'den PP'lere aktarılan çekme istemleri donatısız beton tarafından karşılanamamış ve ani kırılmalar



meydana gelmiştir (Şekil 2.68). Sonuç olarak donatısız betonun çekme istemleri altında yetersiz kalması PP'lerin donatılandırılması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

**2. BEÇÇ\_3:** 2. BEÇÇ\_3 elemanı Tablo 2.7'de görüldüğü gibi sırasıyla 665 ve -565 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 0,85 civarında elde edilmiştir. % 0,5 birim şekil değiştirme yüklemesi ile birlikte BEÇÇ elemanında meydana gelen hasardan dolayı (uç PP'lerin tamamen parçalanması ve PP bağlantılarındaki hasar) deney sonlandırılmıştır. Şekil 2.69'da görüldüğü gibi 2. BEÇÇ\_3 elemanında BEM'i oluşturan uç PP'lerde deformasyonlar ve global burkulma meydana gelmiştir. Her ne kadar 1. BEÇÇ\_3'e göre 2. BEÇÇ\_3'de PP'lerin içerisine donatı eklense de, söz konusu donatı PP'lerin aşırı hasar almasını engellenmiştir (PP'ler çatlamıştır ancak çatlak ilerlememiştir.) ancak global burkulmayı engelleyememiştir/etkilememiştir. Dolayısı ile hem 1. BEÇÇ\_3 hemde 2. BEÇÇ\_3 deneylerinden boyuna yönde kullanılan ankrajın öngerme kuvvetinin yetersiz olduğu ve bu kuvvetin artırılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu yüzden diğer BEÇÇ elemanlarında boyuna yönde kullanılan ankrajların artırılması planlanmıştır.

**3. BEÇÇ\_3:** 3. BEÇÇ\_3 elemanı Tablo 7'de görüldüğü gibi sırasıyla 784 ve -802 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1,02 civarında elde edilmiştir. % 1,50 birim şekil değiştirmeden (Şekil 2.67) sonra BEÇÇ elemanında meydana gelen hasardan dolayı (PP'lerin aşırı ezilmesi, Şekil 2.70) eksenel yük kapasitesi düşmeye başlamış ve deney sonlandırılmıştır. 3. BEÇÇ\_3 elemanı 1. ve 2. BEÇÇ\_3 elemanına göre daha kararlı histeretik davranış göstermiştir. Boyuna doğrultuda eklenen ek ankraj çubukları (1. ve 2. BEÇÇ\_3'de 4φ10, 3. BEÇÇ\_3'de 8φ10 kullanılmıştır) global burkulmayı tam olarak kontrol altına alamamış olmasına rağmen global burkulmanın histeretik davranışına etkisi 1. ve 2. BEÇÇ\_3'ye göre çok daha az olmasını sağlamıştır. Boyuna ankraj çubuklarının uyguladığı öngerme ve eğilmeden kaynaklı istemler her iki uç PP'de kayma deformasyonları oluşturmuş ve PP'ler kesme etkisi ile yarılmıştır. Bu mekanizmanın yani PP'lerin yarılmasında boyuna ankraj çubuklarının PP en kesit dışına (pas payı) çok yakın olmasında etkili olmuştur. BEM'in her iki ucudaki PP'lerin enine ankraj (1. ve 2. BEÇÇ\_3'de 4φ10, 3. BEÇÇ\_3'de 8φ10 kullanılmıştır) sayısının artırılması bu iki PP'nin deformasyon seviyelerinin kontrol edilebilmesini sağlamıştır.

**4. BEÇÇ\_3:** Tablo 7'de görüldüğü gibi 4. BEÇÇ\_3 elemanı sırasıyla 825 ve -876 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1,06 civarında elde edilmiştir. % 2,0 birim şekil değiştirmeden (Şekil 2.67) sonra BEÇÇ elemanında meydana gelen hasardan dolayı (PP'lerin aşırı ezilmesi, Şekil 2.71) eksenel yük kapasitesi düşmeye başlamış ve deney sonlandırılmıştır. 4. BEÇÇ\_3 elemanı 1.- 3. BEÇÇ\_3



elemanına göre daha kararlı histeretik davranış göstermiştir. Boyuna doğrultuda eklenen ek ankraj çubukları (3. BEÇÇ\_3'de 8φ10, 4. BEÇÇ\_3'de 16φ12 kullanılmıştır) global burkulmayı tam olarak kontrol altına alamamış olmasına rağmen global burkulmanın histeretik davranışına etkisi 3. BEÇÇ\_3'ye göre çok daha az olmasını sağlamıştır. BEM'in her iki ucundaki PP'lerin enine ankraj (1. ve 2. BEÇÇ\_3'de 4φ10, 3. ve 4. BEÇÇ\_3'de 8φ10 kullanılmıştır) sayısının artırılması bu iki PP'nin deformasyon seviyelerinin kontrol edilebilmesini sağlamıştır. Ancak istenilen hasar seviyesine kadar düşürememiştir. Bu yüzden ankrajların paspayı artırılması gerektiği ve sonuç olarak PP'lerin en kesitlerinin artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**5. BEÇÇ\_3:** Tablo 7'de görüldüğü gibi 5. BEÇÇ\_3 elemanı sırasıyla 758 ve -940 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1,24 civarında elde edilmiştir. % 2,0 birim şekil değiştirmeden (Şekil 2.67) sonra BEÇÇ\_3 elemanında meydana gelen hasardan dolayı (en uçtaki iki PP'nin birleştiği bölgede aşırı ezilmesi, Şekil 2.72) eksenel yük kapasitesi düşmeye başlamış ve deney sonlandırılmıştır. 5. BEÇÇ\_3 elemanı 4. BEÇÇ\_3 elemanına göre daha kararlı histeretik davranış göstermiştir. Boyuna doğrultudaki ankraj çubuklarının çapının artırılması (4. BEÇÇ\_3'de 16φ12, 5. BEÇÇ\_3'de 16φ24 kullanılmıştır) global burkulmayı tam olarak kontrol altına alamamış olmasına rağmen global burkulmanın histeretik davranışına etkisi 4. BEÇÇ\_3'ye göre çok daha az olmasını sağlamıştır. BEM'in oluşturan PP'lerin en kesitlerinin artırılmasına rağmen PP'lerdeki deformasyonları kontrol altına alınamaması ÇE'nin PP'lere uyguladığı istemlerin kısıtlanması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Dolayısı ile 5. BEÇÇ\_3 deneyinden sonra BEM ve ÇE arasındaki boşluğun daraltılmasının ÇE'nin BEM'e yani PP'lere uyguladığı istemleri sınırlayacağı sonucuna varılmıştır.

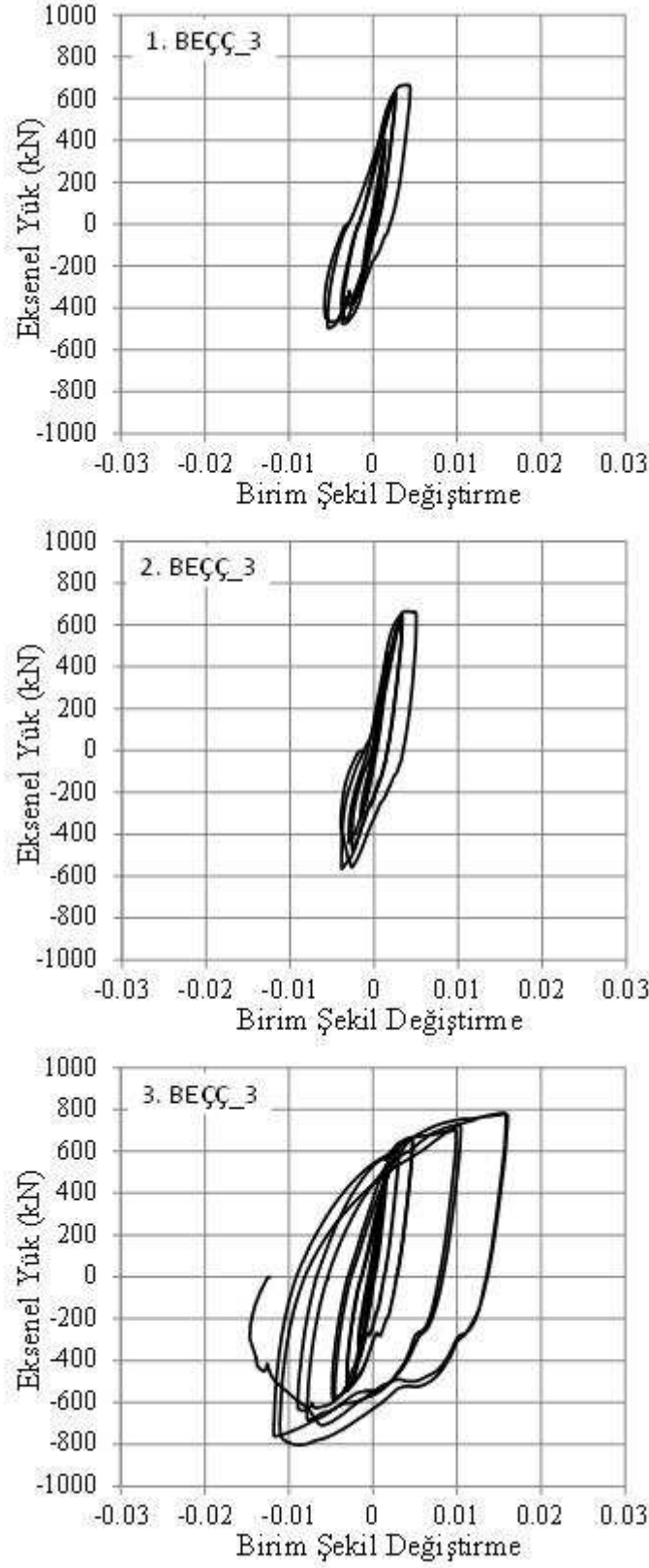
**6. BEÇÇ\_3:** Tablo 7'de görüldüğü gibi 6. BEÇÇ\_3 elemanı sırasıyla 895 ve -939 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1,05 civarında elde edilmiştir. % 2,5 birim şekil değiştirme deplasmanının ilk basınç yüklemesinden sonra ikinci basınç yüklemesinde Şekil 2.67 ve 2.73'de görüldüğü gibi PP'lerin birleşim bölgelerinde ağır hasar meydana gelmiş ve eksenel yük düşmüştür. 6. BEÇÇ\_3 elemanı Şekil 2.67'de görüldüğü gibi % 2,0 birim şekil değiştirme değerine kadar oldukça stabil bir histeretik davranışa sahiptir. Bu histeretik davranış 1. – 5. BEÇÇ\_3 elemanlarında yapılan değişiklikler sonucunda elde edilmiştir. Şekil 2.73'de görüldüğü gibi ÇE elemanında hasar gören PP'lerin birleşim noktasında aşırı lokal burkulma meydana gelmiştir. Bunun yanında ÇE'de plastik bölge boyunca yüksek modda burkulma da meydana gelmiştir ve elde edilen BEM sisteminin bu istemlerin karşılanmasında etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca BEM sistemindeki yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanların 5-10 mm olmasına rağmen elde



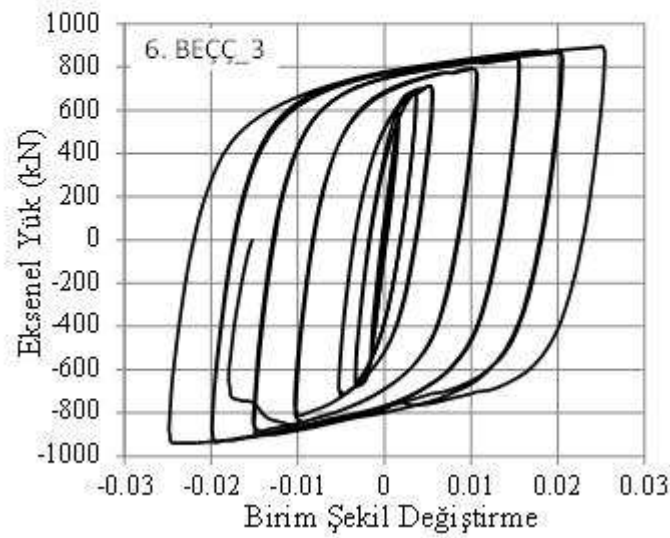
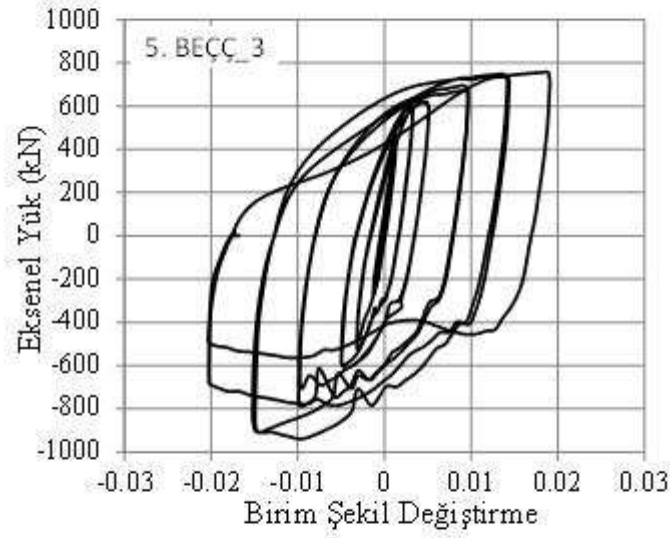
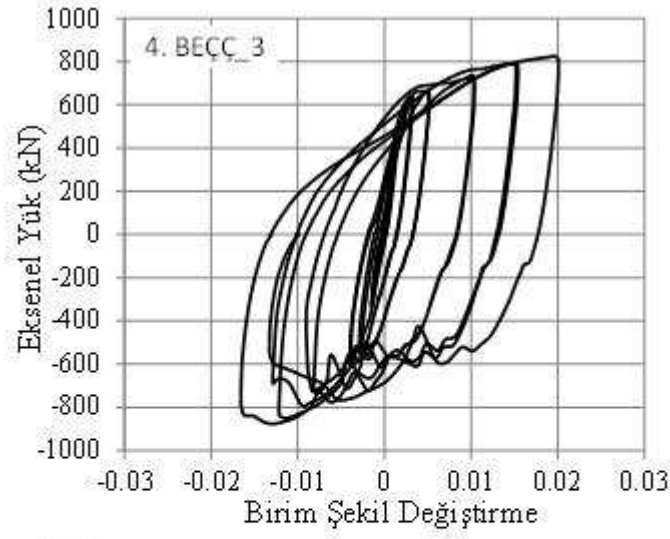


edilen BEM sisteminin bu düzlem dışı deplasmanların BEÇÇ'nin histeretik davranışını bozmayacak seviyede olduğunu göstermektedir. Yüksek mukavemetli bulonlarda meydana gelen kayma miktarı ise Şekil 2.75'de görüldüğü gibi sınırlı seviyede kalmıştır. Şekil 2.76'da ÇE'deki plastikleşme ÇE orta noktasındaki birim uzama ölçerlerden de görülmektedir. 6. BEÇÇ\_3 elemanının göstermiş olduğu histeretik davranış bu elemanın uygun bir BEÇÇ elemanı olarak tasarlanabileceğini göstermektedir.

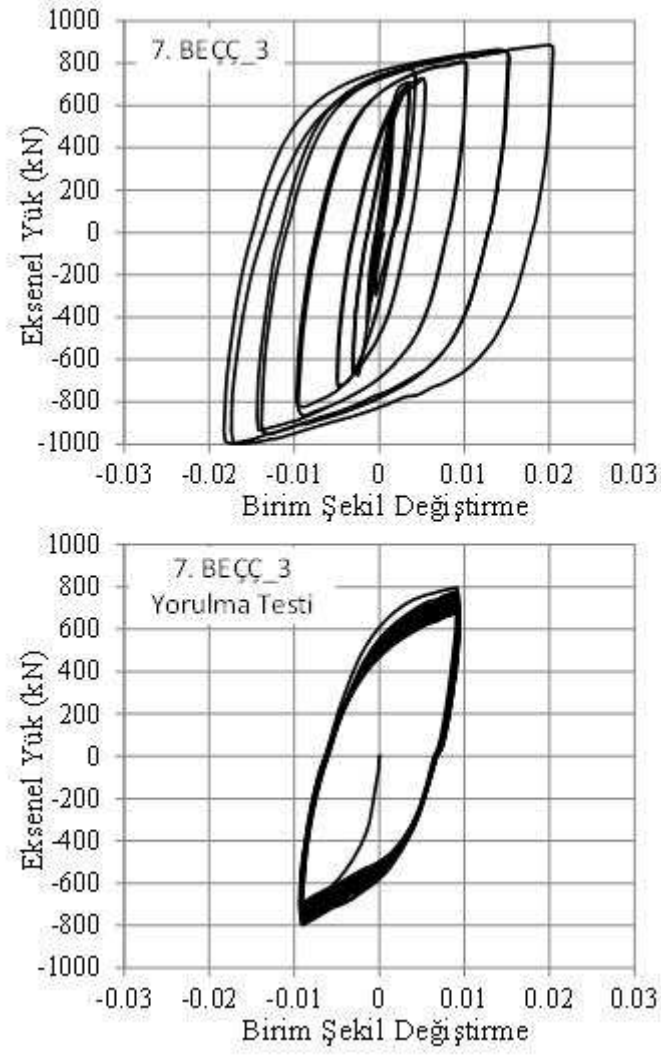
**7. BEÇÇ\_3:** Tablo 7'de görüldüğü gibi 7. BEÇÇ\_3 elemanı sırasıyla 887 ve -1002 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1,13 civarında elde edilmiştir. % 2,0 birim şekil değiştirme deplasmanından sonra yük hücresinin sınır değerine ulaşılması ile deney sonlandırılmıştır (Şekil 2.67). BEÇÇ elemanında herhangi bir hasar gözlemlenmediği için 7. BEÇÇ\_3 elemanına yorulma testi uygulanmıştır. Yorulma tetstinde 40 ters çevirimli yükleme yapılmış ancak elemanda belirgin bir hasar gözlenmemiştir ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 2.67). Yorulma testinden sonra BEÇÇ elemanı açılmış ve meydana gelen hasar incelenmiştir. Şekil 2.74'ten görüldüğü gibi BEM oluşturan uç PP'lerin çatladığı ancak çatlak genişlemesinin lifli polimer ile kontrol edildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca aynı şekilde ÇE elemanında lokal burkulmalar görülmektedir. Bu burkulmalar PP'leri çatlatmış ancak lifli polimerin yırtılmasını sağlayamamıştır. Dolayısı ile lifli polimer uygulaması PP'lerin stabil kalması ve ÇE'nin lokal deformasyonları ile BEM'e uyguladığı istemelerin karşılanmasında oldukça etkin olduğu deney sonucundan görülmüştür. Ayrıca BEM sistemindeki yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanların 20-40 mm olmasına rağmen elde edilen BEM sisteminin bu düzlem dışı deplasmanların BEÇÇ'nin histeretik davranışını bozmayacak seviyede olduğunu göstermektedir. Yüksek mukavemetli bulonlarda meydana gelen kayma miktarı ise Şekil 2.75'de görüldüğü gibi sınırlı seviyede kalmıştır. Şekil 2.76'da ÇE'deki plastikleşme ÇE orta noktasındaki birim uzama ölçerlerden de görülmektedir. 7. BEÇÇ\_3 elemanının göstermiş olduğu histeretik davranış bu elemanın uygun bir BEÇÇ elemanı olarak tasarlanabileceğini göstermektedir.



Şekil 2.67. 1.-7. BEÇÇ\_3 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değişirme grafiği (Devam Ediyor)



Şekil 2.67. 1.-7. BEÇÇ\_3 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (Devam Ediyor)



Şekil 2.67. 1.-7. BEÇÇ\_3 Elemanlarına ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği ve 7. BEÇÇ\_3 yorulma testi sonucu



Şekil 2.68. 1. BEÇÇ\_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.69. 2. BEÇÇ\_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.70. 3. BEÇÇ\_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.71. 4. BEÇÇ\_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



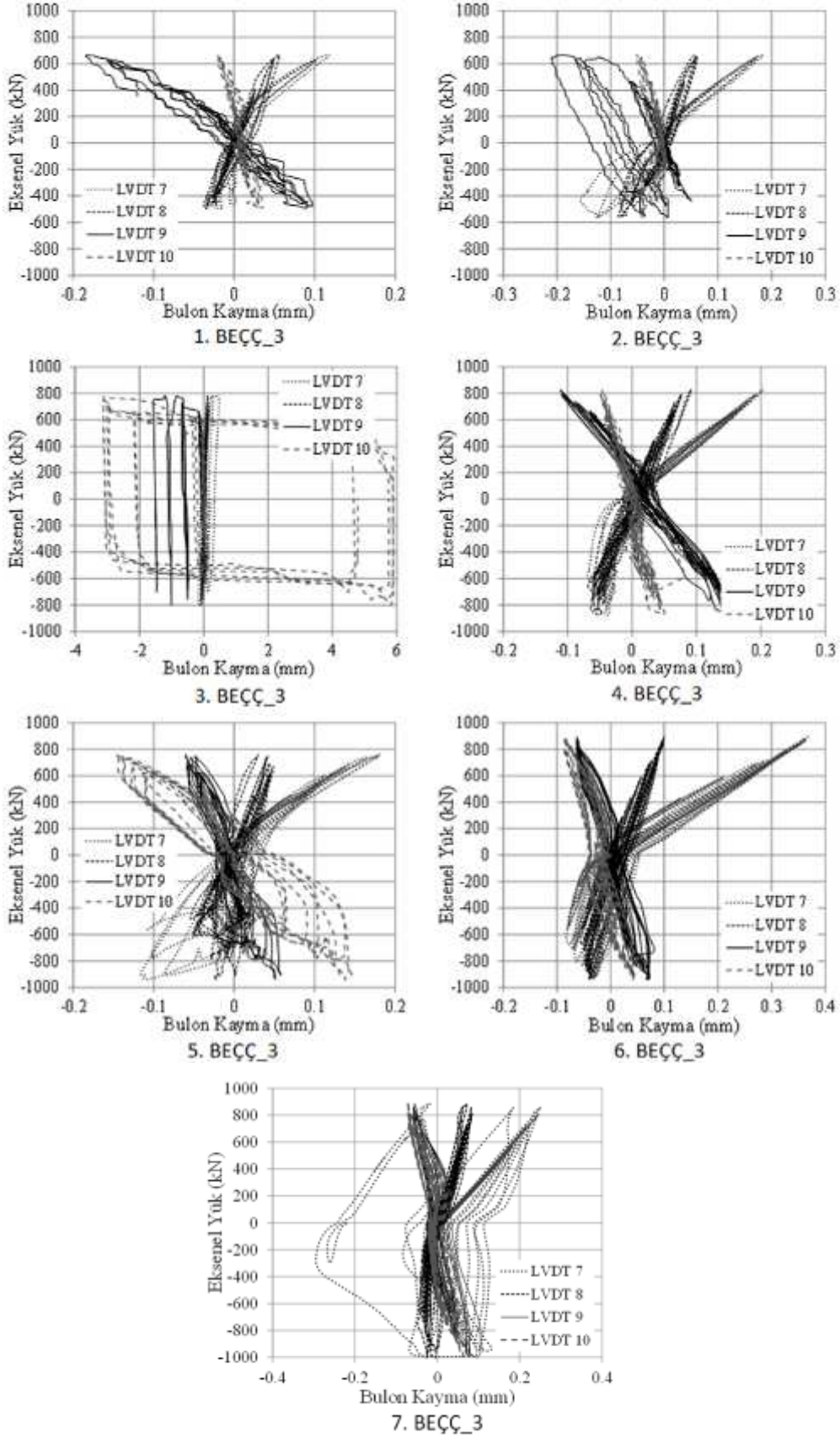
Şekil 2.72. 5. BEÇÇ\_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 2.73. 6. BEÇÇ\_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları

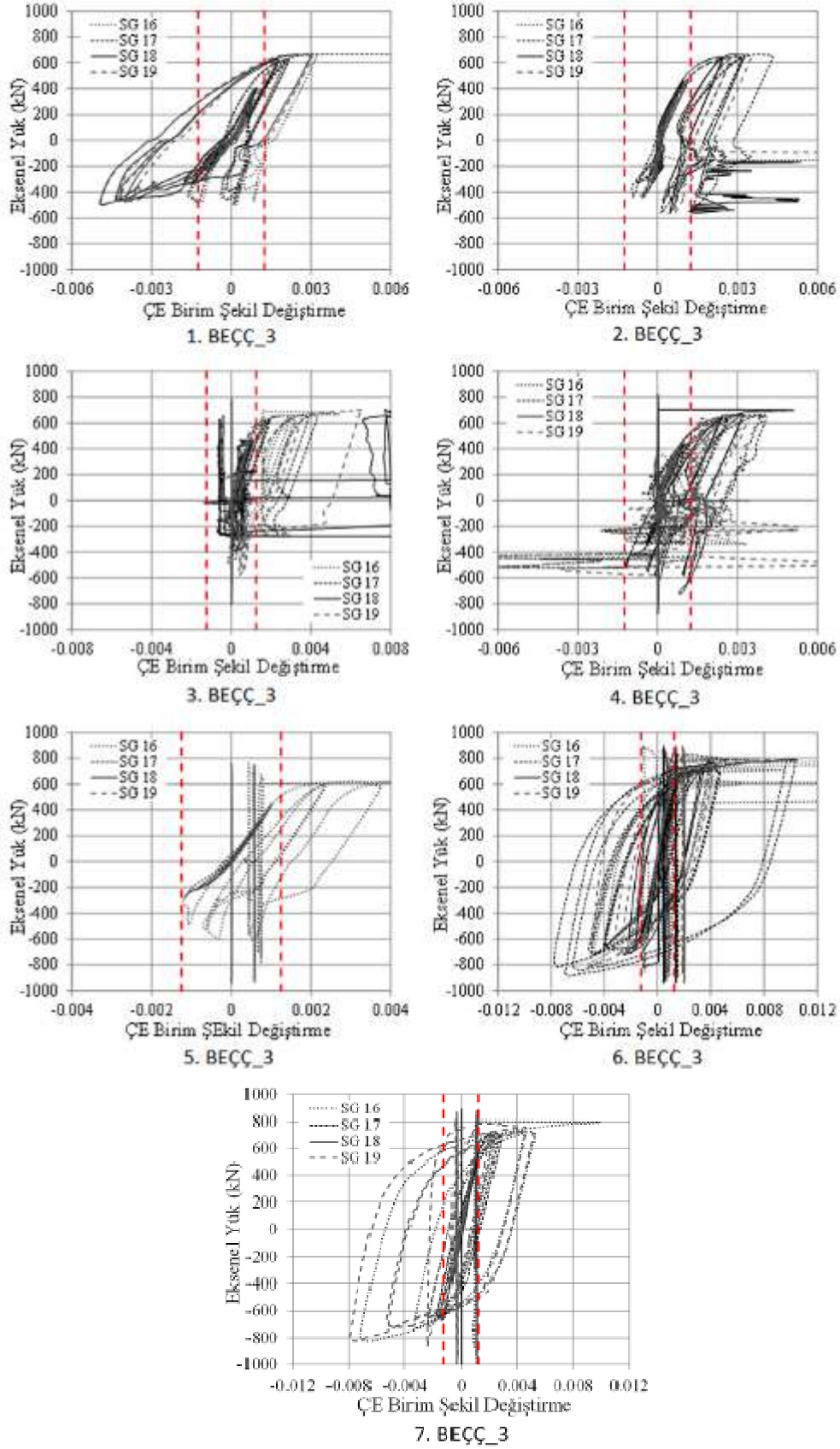


Şekil 2.74. 7. BEÇÇ\_3 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları

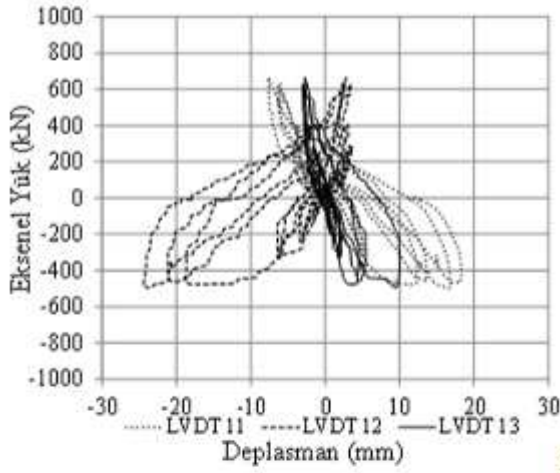


Şekil 2.75. 1-7. BEÇÇ\_3 elemanlarındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı

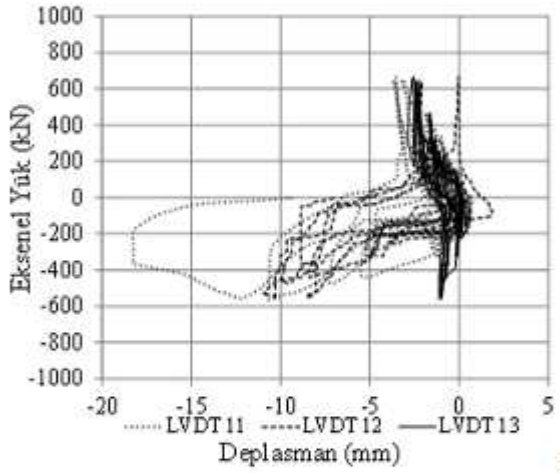
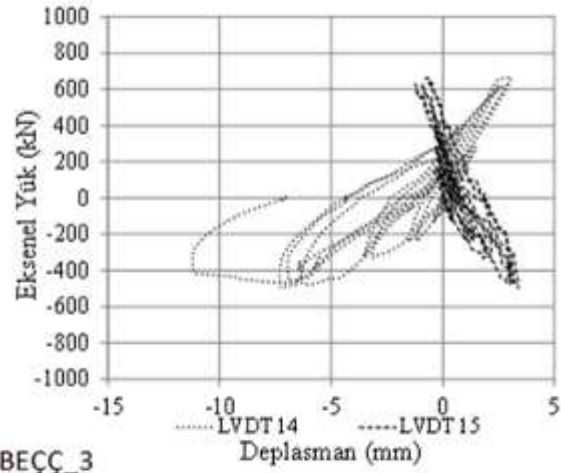




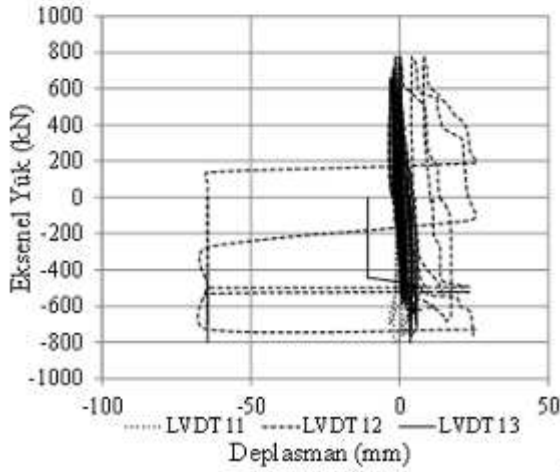
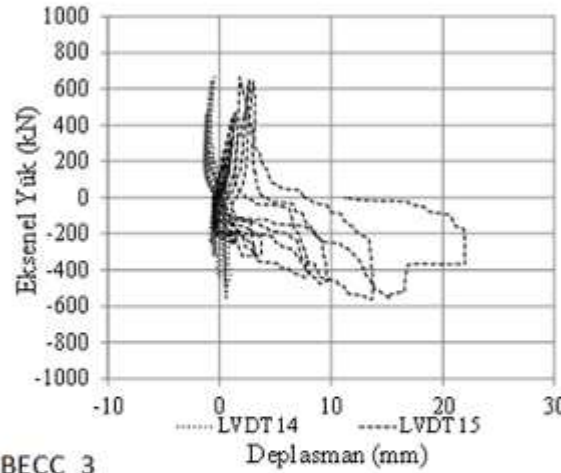
Şekil 2.76. 1-7. BEÇÇ\_3 elemanlarındaki ÇE Birim Şekil Değiştirme



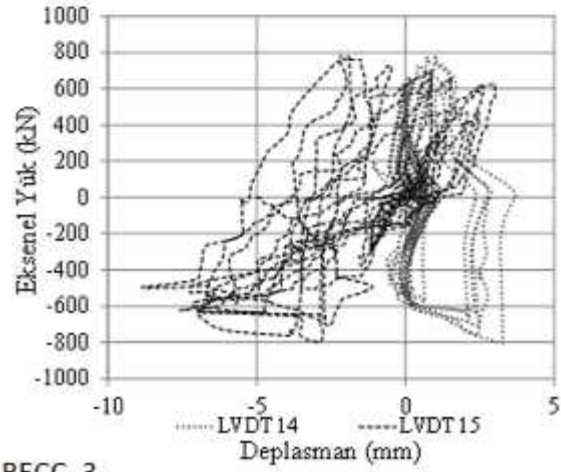
1. BEÇÇ\_3



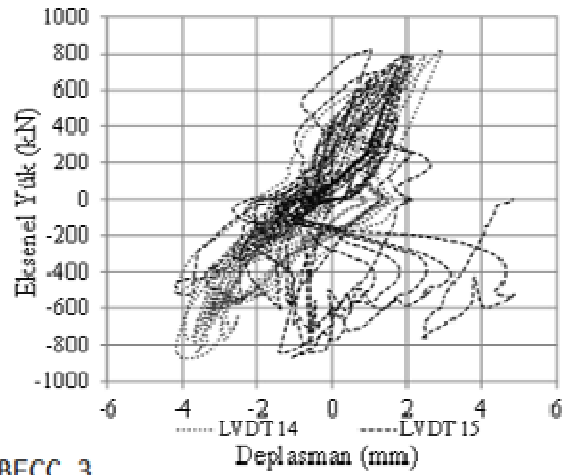
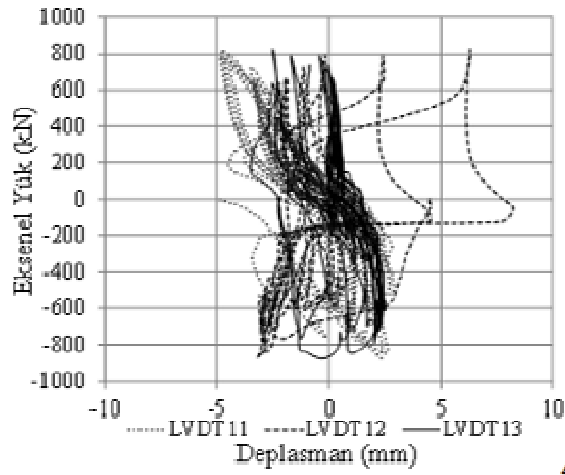
2. BEÇÇ\_3



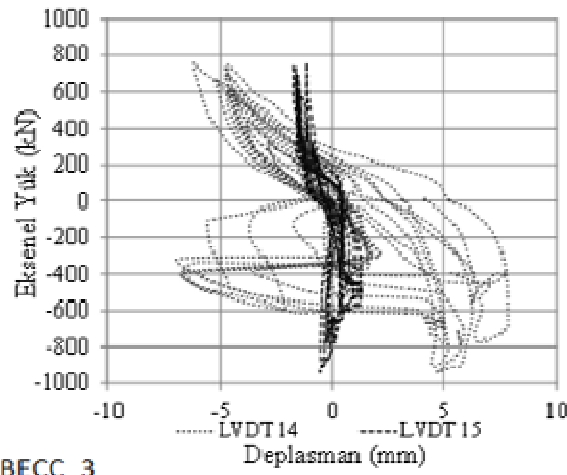
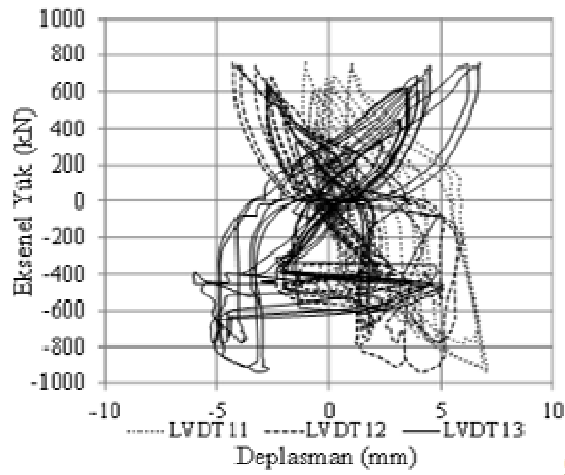
3. BEÇÇ\_3



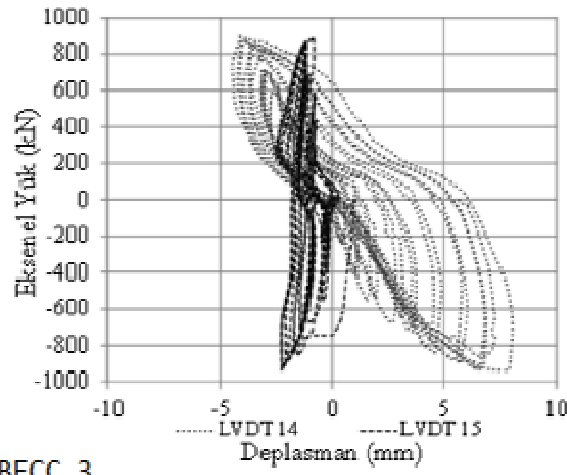
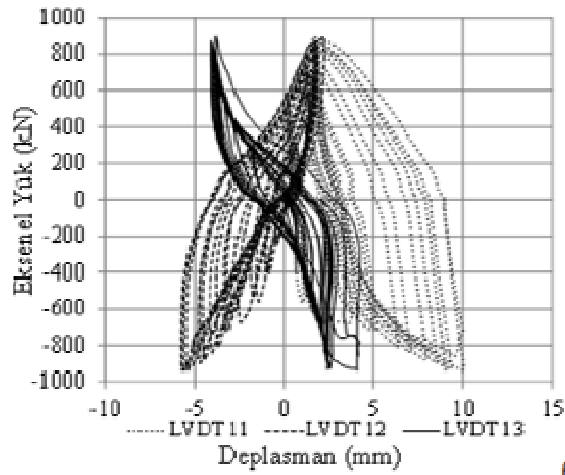
Şekil 2.77. 1-7. BEÇÇ\_3 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar (Devam Ediyor)



4. BEÇÇ\_3

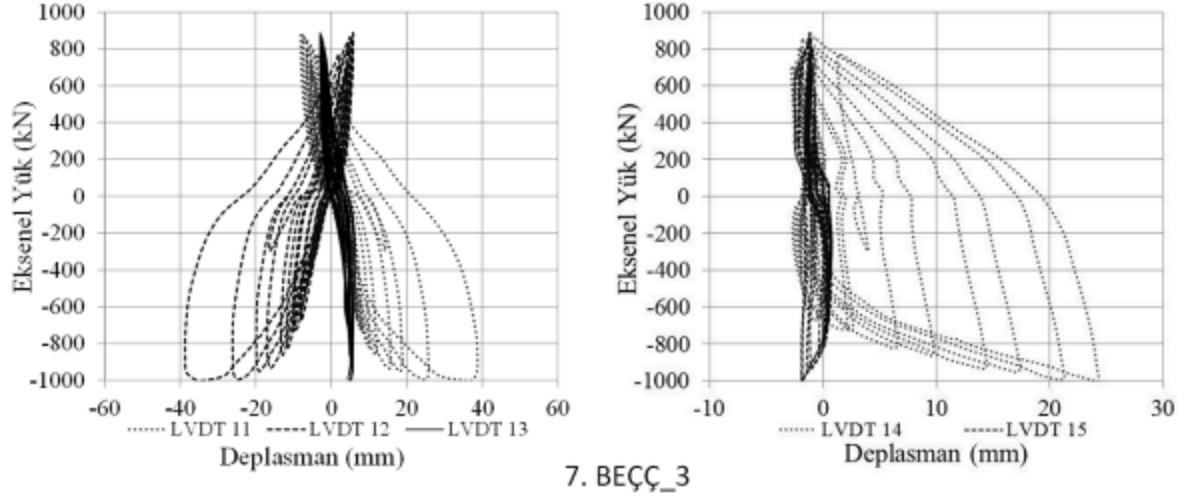


5. BEÇÇ\_3



6. BEÇÇ\_3

Şekil 2.77. 1-7. BEÇÇ\_3 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar (Devam Ediyor)



Şekil 2.77. 1-7. BEÇÇ\_3 elemanlarına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar



### 3. DİNAMİK BENZERİ DENEYLER

#### 3.1. GİRİŞ

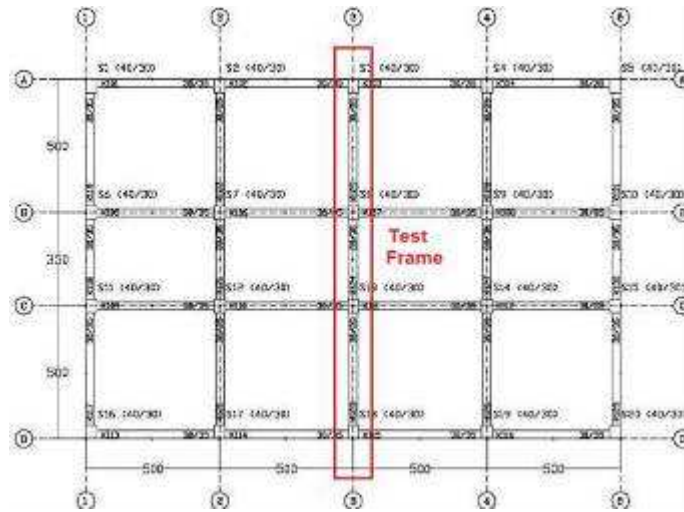
Proje kapsamında eleman bazında testlerin tamamlanmasından sonra BEÇÇ'ler ile güçlendirilmiş ½ ölçekli 3 açıklıklı ve 3 katlı betonarme çerçeve dinamik benzeri deney yöntemi ile test edilmiştir. Bu proje kapsamında referans çerçevesi test edilmemiştir. Referans çerçevesi bu proje ekibinde yer alan Prof. Dr. Barış BİNİCİ'nin de görev aldığı TÜBİTAK 108G034 proje nolu ve "Yeni Nesil Deprem Yönetmelikleri İçin Performans Esaslı Değerlendirme ve Güçlendirme Yöntemlerinin Araştırılması ve Geliştirilmesi" başlıklı projede test edilmiştir. Ayrıca referans çerçevesi ile ilgili diğer detaylı çalışmalar Mutlu (2012)'de mevcuttur. Referans çerçevesinin bu proje kapsamında yapılmayıp diğer çalışmalardan alınması maliyet bakımından daha uygun görülmüştür. BEÇÇ'ler betonarme çerçeveye ters V çelik çapraz (TVÇÇ) konfigürasyonunda bağlanmış olup bu bölümde güçlendirme metotlarının uygulama detayları, deney sonuçları ve deney esnasında elde edilen hasarlar ile bu hasarların performans ile ilişkilendirilmesi anlatılacaktır.

#### 3.2. DENEY DÜZENEGİ

Deney çerçevesi Şekil 3. 1'de kat planı görülen 3 katlı prototip bir yapının orta aksından alınmıştır. Söz konusu çerçevenin ½ ölçeklendirilmiş hali Şekil 3. 2'de görülmektedir. Aynı çerçeve, proje ekibinde yer alan Prof. Dr. Barış BİNİCİ'nin de görev aldığı TÜBİTAK 108G034 proje nolu ve "Yeni Nesil Deprem Yönetmelikleri İçin Performans Esaslı Değerlendirme ve Güçlendirme Yöntemlerinin Araştırılması ve Geliştirilmesi" başlıklı projenin de referans çerçevesi olup ortak kullanılmıştır.

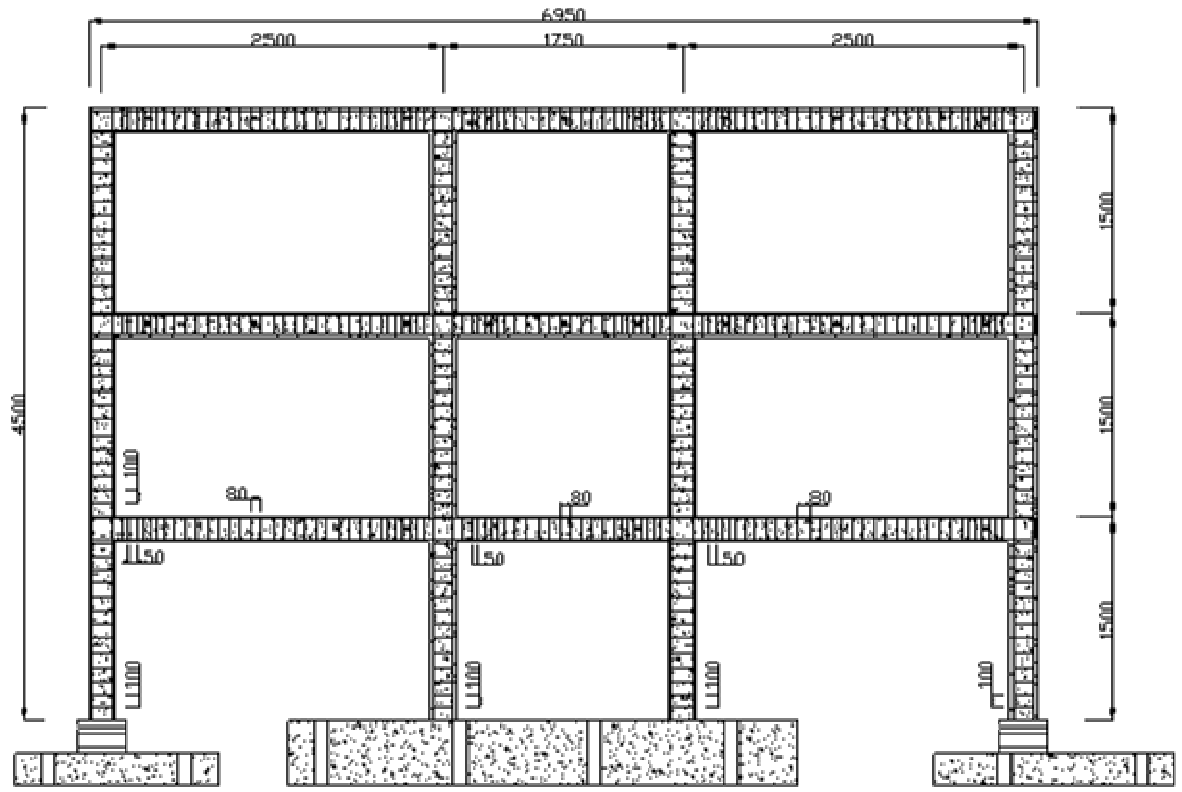
Şekil 3. 2'de görüldüğü gibi test çerçevesinin kolon boyutları 150x200 mm ve kiriş boyutları 150x175 mm'dir. Kolonların boyuna donatısı 8φ8'den oluşmaktadır. Kirişlerin donatısı ise mesnetlerde 7φ10'dan, açıklıkta ise 5φ10'dan meydana gelmektedir. Kiriş ve kolon donatısının yerleşimi Şekil 3. 2'de gösterilmektedir. Betonarme kirişler 60 mm kalınlığında ve 500 mm genişliğinde döşeme ile birlikte dökülmüştür. Döşeme için φ4 düz donatı her iki yönde döşeme donatısı olarak 50 mm'lik ara ile kullanılmıştır. φ8 düz demirlerin/donatıların mekanik özellikleri bakıldığı zaman akma dayanımı 320 MPa, kapasitesi ise 460 MPa olarak, φ10 düz demirlerin/donatıların mekanik özellikleri bakıldığı zaman akma dayanımı 355 MPa, kapasitesi ise 555 MPa olarak elde edilmiştir (Mutlu 2012). Kolonlarda 100 mm aralıkla ve

90 derece kancalı, 4 mm çaplı düz demir etriyeler kullanılmıştır (Şekil 3. 2). Kolon kiriş birleşim bölgesinde kolon etriyeleri yerleştirilmemiştir. Donatı detayları ve yaklaşık 12 MPa hedef beton dayanımına sahip olan test çerçevesi ülkemizdeki kusurlu yapı olarak nitelendirilen yapı stoğunun bir temsili olarak üretilmiştir. Dolayısı ile test çerçevesi ülkemizde yaygın olarak karşılaşılan ve güncel deprem şartnamesine (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (TDY 2007)) uygun olmayan sismik detaylara sahip yapılara temsil etmektedir. Beton paspayı boyuna donatısının merkezinden beton yüzeyine kadar olan mesafe yaklaşık 20 mm alınmıştır. Tasarlanan beton basınç dayanımı 12 MPa'dır (Mutlu 2012).

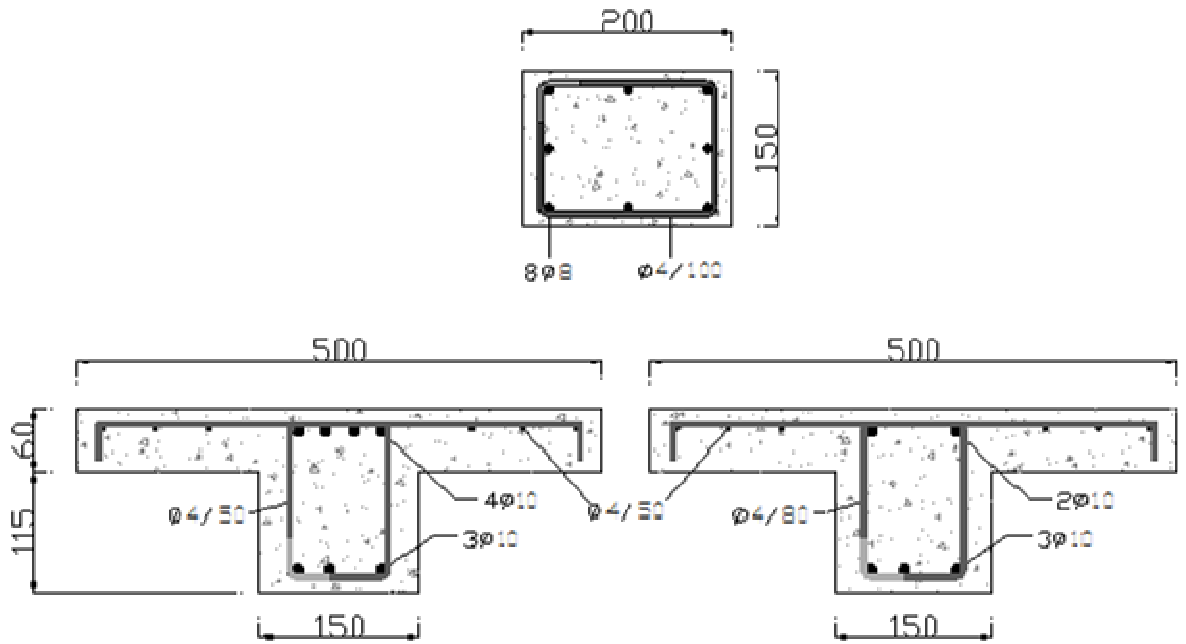


Şekil 3.1. Prototip Yapı ve Dene Çerçevesi Seçimi (Mutlu 2012)

Şekil 3. 3'de 3 açıklıklı ve 3 katlı çerçeve elemanın oluşturulması esnasındaki fotoğrafları göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ilk olarak betonarme çerçevenin etrafına ani göçmeleri önlemek ve betonarme çerçevenin düzlem dışı hareketini de engellemek amacıyla ek çelik bir çerçeve yapılmıştır. Çerçeve temeli birden fazla kullanılmasından dolayı ve her seferinde yeni bir temel üretimi yapmamak için deney elemanındaki boyuna donatılar temel üzerine sabitlenmiş çelik plakaya kaynatılmıştır. Bu durumda boyuna donatıdaki bindirme boyu problemi bu deneysel çalışmada bir kusur olarak incelenmemiş olmaktadır. 1. Kat betonu döküldükten sonra, 2. katın kalıp işlemleri başlamadan önce, beton dayanımı yeterli seviyeye gelince (1. Kat kirişlere iskele yardımı ile alt destek uygulaması yapılmıştır.) 1. kata çelik bloklar yerleştirilmiştir. 1. Kata çelik bloklar yerleştirildikten sonra 2. Kat kalıp işlemleri ve beton dökümü yapılmıştır. Benzer işlemler 3. Kat için yapıldı deney çerçevesi oluşturulmuştur (Şekil 3. 3). Güçlendirme öncesi çerçevenin görüntüsü Şekil 3. 4'de gösterilmektedir.



a) Deney Çerçevesi



b) Kolon ve Kiriş Kesitleri

Şekil 3.2 Betonarme çerçeve ve kolon kiriş kesitleri



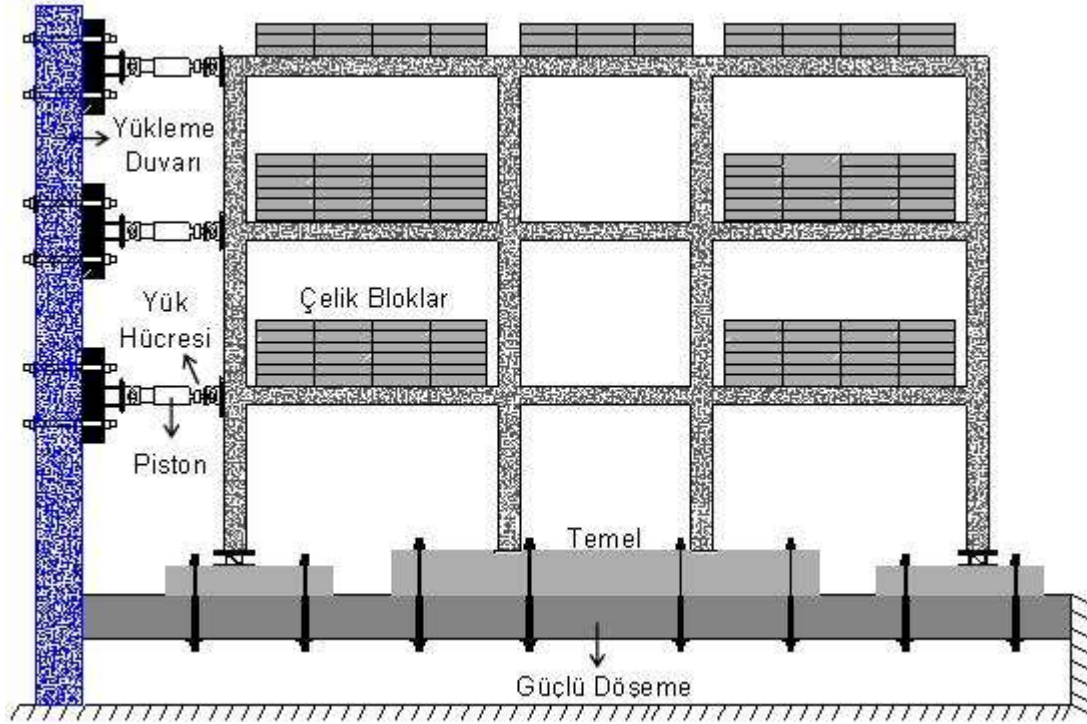
a) kalıp kurulumundan önce, b) kenar kolon dibinde donatı detayı, c) kenar kolon dibinde donatı detayı d) boyuna donatı e) kalıp içerisine yerleştirilmiş donatı, f) kiriş donatısının yerleşimden önce, g) kolon kiriş birleşimi, h) kiriş donatısının yerleştirilmiş hali, i) 1. Kat kat beton dökümünden önce, j) 1. Kat beton dökümü, k) 1. kat bet. Dökülmüş hali, m) çelik blokların yerleştirilmesinden önce, n) 2. Kat kalıp, o) 1. Kat çelik blok yerleşimi, p) 1. Kat yükleri, r) 2. Kat beton dökümünden sonra, s) 3. Kat kalıp, t) 3. Kat beton dökümünden sonra, v) 2. Kat yük yerleşimi

Şekil 3.3. Test çerçevesinin yapım aşaması





Şekil 3.4. Test çerçevesinin bitmiş hali, güçlendirmeye başlamadan öncesi



Şekil 3.5. Deney düzeneği

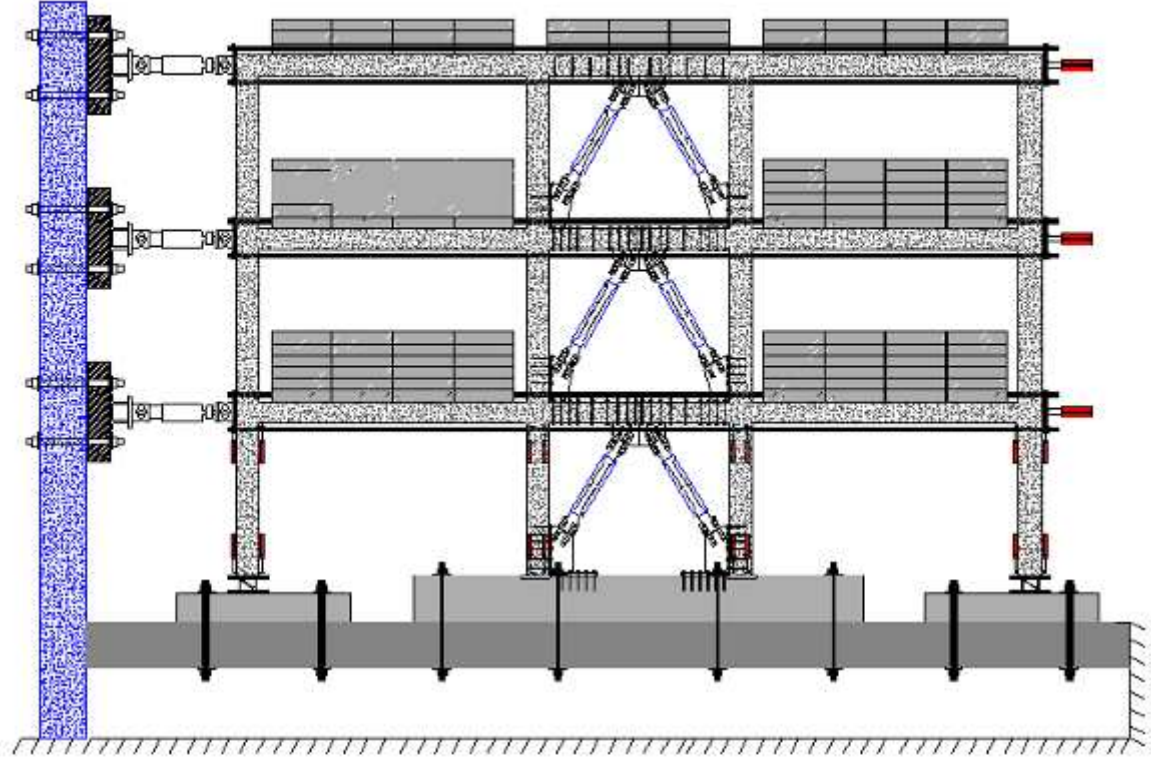
Şekil 3. 5 deney düzeneğini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi mevcut yapıların temsil edilebilmesi için çerçeve çelik bloklar ile yüklenmiştir. Güçlendirme işlemi bu aşamadan sonra başladığından mevcut yapıdaki durumun birebir temsil edilmesi sağlanmıştır. Söz konusu çelik blokların ağırlıkları dikkate alınarak dinamik benzeri deney yönteminde kullanılacak olan kütle matrisi çıkartılmıştır.



Şekil 3.6. Veri toplama sistemi ve kontrol ünitesi (ODTÜ Yapı Lab.)

Dinamik benzeri deney yöntemi ile 3 açıklıklı-3 katlı çerçeveyi test edebilmek için uygulanacak yatay yük her kata giriş merkezinden bağlanmış bilgisayar sistemi tarafından kontrol edilen 3 adet piston ile uygulanmaktadır (Şekil 3. 6, 7). Pistonların kontrol edildiği kontrol ünitesi ve verilerin toplandığı veri toplama sistemi Şekil 3. 6'da görülmektedir. Kolon alt ve üst uçlarında muhtemel plastik mafsallaşma alanı olan bölgede LVDT'ler 150-200

mm'lik içerisinde ortalama birim uzamayı ölçmek için yerleştirilmiştir. Katlarda meydana gelen yatay ötelenmeler her bir kata yerleştirilen iki adet LVDT yardımı ile ölçülmüştür (Şekil 3. 7). Pitonlar ve LVDT'ler kiriş merkezi ile çakışmaktadır dolayısı ile buradan elde edilen deplasmanlar göreceli kat ötelenmelerin hesaplanmasında kullanılmıştır. Kolon ve kiriş uçlarına yerleştirilen LVDT'ler sayesinde söz konusu elemanların eğrilikleri hesaplanmıştır. BEÇÇ'lerde meydana gelen birim şekil değiştirmeler ve ÇE uzamaları birim uzama ölçer (stain gage) ve LVDT'ler yardımıyla elde edilmiştir (Şekil 3. 7).



Şekil 3.7. Yükleme ve ölçüm sistemi

### 3.3. REFERANS ÇERÇEVESİ

Bu proje kapsamında referans çerçevesi test edilmemiştir. Bunun yerine daha önce aynı koşullarda test edilmiş bir çerçeve referans çerçevesi olarak kullanılmıştır (Mutlu 2012). Referans çerçevesine ait bilgiler Mutlu 2012'den alınmıştır. Aşağıda verilen fotoğraf, veri vb. bilgiler söz konusu bu kaynaktan alınmıştır (Şekil 3. 8).

Referans çerçevesinin üretim şekli yukarıda bahsedildiği gibi yapılmış olup üretim süreçleri Şekil 3. 2-4'de verildiği yapılmıştır. Referans çerçevesinin ortalama beton basınç dayanımı 11.9 MPa'dır. Dolayısı ile bu proje kapsamında hedeflenen beton basınç dayanımı da 12 MPa olarak seçilmiştir.



Şekil 3.8. Referans çerçevesi (Mutlu 2012)

### 3.4. GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇERÇEVELER

#### 3.4.1. GİRİŞ

Bu proje kapsamında bir adet 3 açıklık-3 katlı betonarme çerçeve BEÇÇ ile güçlendirilmiş ve dinamik benzeri deney yöntemi ile test edilmiştir. BEÇÇ elemanlarının detayı proje kapsamında daha önce test edilen 1. Grupta bulunan 5.-6. BEÇÇ\_1 olarak adlandırılan elemanlardan seçilmiştir. Ancak bu elemanlar ölçeklendirilerek üretilmiş ve betonarme çerçeveye bağlanmıştır. Güçlendirme çalışmasına geçmeden önce daha sonraki bölümlerde bahsedileceği gibi ilk olarak referans ve BEÇÇ ile güçlendirilmiş çerçevelerin zaman tanım



alanında analizleri yapılmıştır. Daha sonra BEÇÇ elemanlarının en kesitleri belirlenmiş ve bu en kesite sahip BEÇÇ'ler eleman bazında test edilmiştir. Bu işlemlerden sonra çerçeve güçlendirme işlemine geçilmiş olup detaylı bilgi bu bölümde verilecektir. Yapılan analitik çalışma ise bir sonraki bölümde verilmiştir.

### 3.4.2. BEÇÇ'LER İLE GÜÇLENDİRME

Bu proje kapsamında güçlendirilen çerçeveye BEÇÇ elemanları ters v çelik çapraz (TVÇÇ) olarak bağlanmıştır. Güçlendirilen aks orta açıklık olduğu için söz konusu aksta çelik bloklar mevcut değildir. Söz konusu açıklıkta normal bir yapı içerisinde tuğla duvar veya boş olması beklenmektedir. BEÇÇ ile güçlendirilmesi sonrası güçlendirilen aks alçıpan vb. malzemeler ile kapatılabilirdi ancak yapısal hasarın deney esnasında gözlenebilmesi için bu kapatma uygulaması yapılmamıştır.

BEÇÇ ve betonarme elemanlar arasındaki bağlantı; kolon-temel birleşim noktasındaki bağlantı (Şekil 3.9), kiriş orta açıklığındaki bağlantı (Şekil 3.10), ve betonarme kolon-kiriş düğüm noktasındaki bağlantı (Şekil 3.11) olmak üzere üç farklı şekilde oluşmaktadır. Bağlantılardaki ankraj işlemlerinde kullanılan epoksi için piyasada kolaylıkla ulaşılabilen, orta kıvamda (akıcı olmayan) ve ekonomik ticari bir ürün kullanılmıştır. Bağlantı detaylarının yapım aşamaları aşağıda özetlenmektedir.

Kolon-temel birleşim noktasındaki bağlantıda (Şekil 3.9) ilk olarak 10 mm kalınlığında taban plakası betonarme temele  $\phi 10$  paslanmaz gijon kullanılarak ankrajlanmıştır. Ankraj işlemlerindeki uygulama ise; ilk olarak betonarme eleman (temel, kolon, kiriş) uygun çapta delinmiştir. Buradaki delik çapı ankraj çubuğu çapından 2 mm daha büyük olacak şekilde tasarlanmıştır. Açılan ankraj delikleri piyasa şartlarına uygun olacak şekilde sadece basınçlı hava ile temizlenmiştir. Aslında bu uygulama basınçlı hava-tel fırça-basınçlı hava şeklinde yapılması gerekmektedir (Özçelik vd. 2012, 2013). Ancak ülkemizdeki uygulamalarda genelde ya temizlik yapılamadan yada sadece basınçlı hava ile temizlik yapılarak ankraj işlemleri yapılmaktadır. Dolayısı ile bu proje kapsamında sadece basınçlı hava ile ankraj deliklerinin temizlenmesinin piyasa uygulamaları açısından daha gerçekçi olacağı düşünülmüştür. Delik ile ankraj çubuğu arasında kalan boşluk ise epoksi ile doldurulmuştur (Şekil 3.9). Bir sonraki aşamada betonarme kolonlara Şekil 3.9'da görüldüğü gibi ankraj uygulaması yapılmıştır. Ankrajlar kolon içerisine 150 mm derinliğe kadar uzatılmıştır (Şekil 3.12). Kolonlara ankrajlanan ankraj çubukları ( $\phi 10$  paslanmaz gijon) yardımı ile bayrak levhasının kaynaklandığı plaka bağlanmıştır. Hem temeldeki hemde kolondaki plakalar birbirine kaynaklanarak kolon-temel birleşimi elde edilmiştir. Son olarak bayrak levhasının

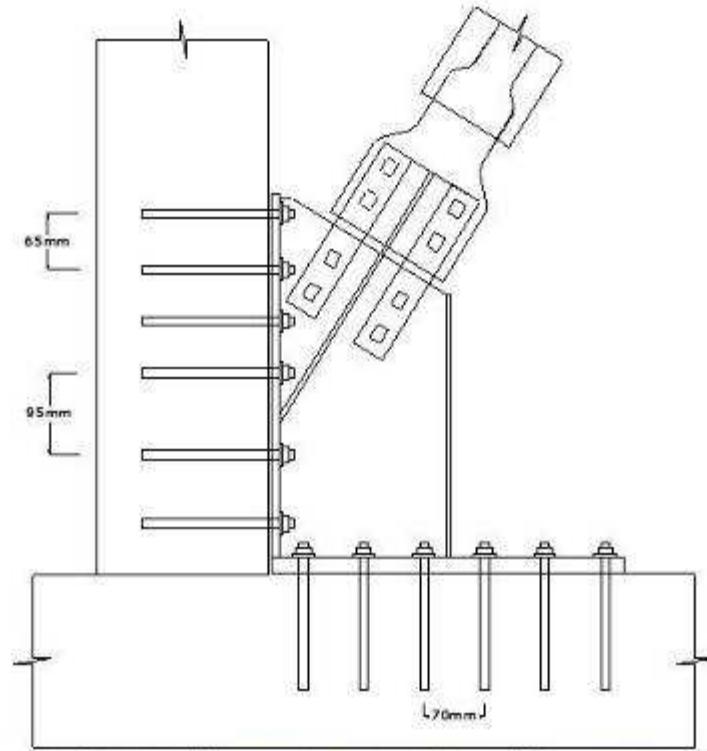


burkulmasını engellemek için kullanılan güçlendirme plakaları (stiffener) bayrak levhasına kaynaklanmıştır. Bayrak levhasının burkulma kapasitesi Whitmore kesiti (Şekil 3. 13) ve bu kesitin yüksekliği (Thornton 1984) ile sınırlandırılan plaka üzerinde hesaplanmıştır. Ayrıca bayrak levhasının betonarme çerçeveye bağlatısı ise Eşdeğer Kuvvet Metodu (AISC Load and Resistance Factor Design Şartnamesinde Uniform Force Method olarak geçmektedir) göre yapılmıştır.

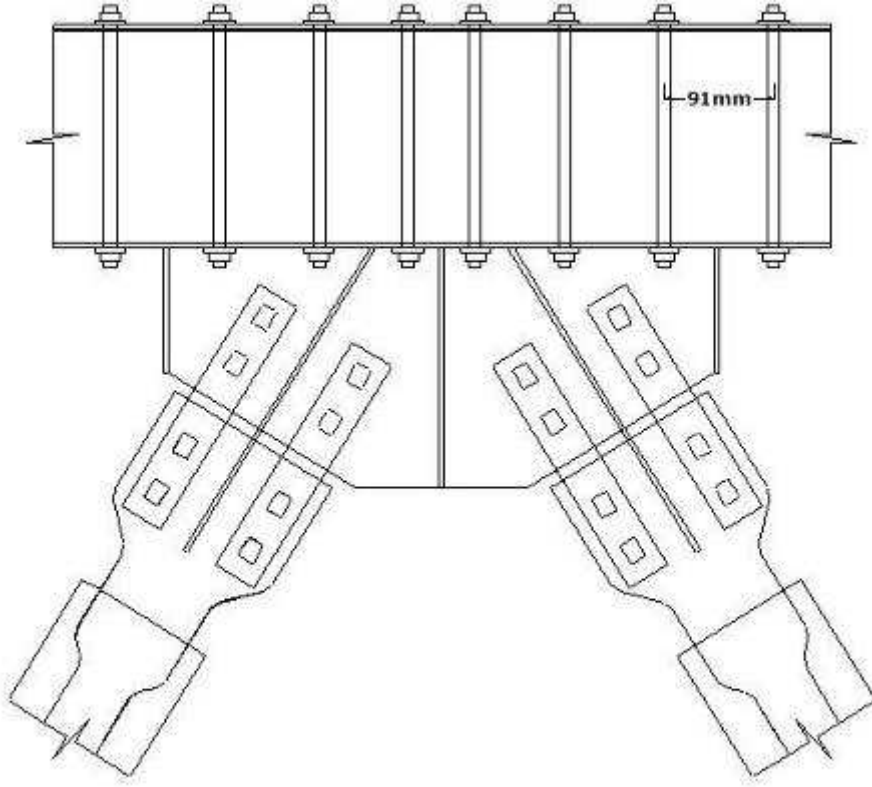
Kiriş orta açıklığında bağlantı detayı (Şekil 3.10) bayrak levhasının kirişe ankrajlanmış plakaya bağlanması ile meydana gelmiştir. Bunun için öncelikle kiriş, yüksekliği boyunca boydan boya  $\phi 12$  mm çapında delinmiştir. Bu işlemin ardından betonarme kirişin alt ve üst yüzeyine tamir harcı sürülmüştür. Tamir harcı kullanılması özellikle ankraj delme işlemi sırasında kirişde meydana gelen hasarın onarılmasında da etkili bir uygulamadır (Şekil 3.10). Tamir harcı katılaşmadan kiriş üst ve alt plakasını (bayrak levhasının kaynaklandığı) birleştiren ankrajlar ( $\phi 12$ ) sıkılmış ve bağlantı gerçekleştirilmiştir.

Kolon-kiriş düğüm noktasındaki bağlantı (Şekil 3.11) betonarme kolon-kiriş bağlantı noktasına bayrak levhasının plakalar yardımı ile ankrajlanması ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem kiriş alt ve üst plakaların yerleştirilmesinden sonra başlamıştır. İlk olarak betonarme kolonlara Şekil 3. 12'de gösterildiği aralıklarla 150 mm derinliğinde ve  $\phi 12$  mm çapında ankraj delikleri açılmıştır (ankraj için  $\phi 10$ mm paslanmaz gijon kullanılmıştır). Delikler daha önce açıklandığı gibi basınçlı hava ile temizlenmiştir. Daha sonra ankraj çubukları epoksi yarmı ile deliklere yerleştirilmiştir. Bu işlemden sonra bayrak levhasının kaynatıldığı plaka ankrajların sıkılmasıyla kolon-kiriş birleşim noktasına bağlanmıştır (Şekil 3.11). Son olarak bayrak levhası kiriş üstünde bulunan plakaya kaynatılmıştır.

Güçlendirme çalışmalarında önemli olan bir husus ise mevcut betonarme çerçeve ile bu çerçevelere eklenen yeni yatay yük taşıyıcı sistemin birlikte çalışmasıdır. Bunun sağlanabilmesi için mevcut ve eklenecek olan yapısal elemanların uygun şekilde ankrajlanması gerekmektedir. Yukarıda bahsedilen ankraj detayları daha önce yapılan deneysel çalışmalarda (Özçelik vb. 2012, 2013) kullanılmış olup bu deneysel çalışmalarda herhangi bir sorun yaşanmamıştır.

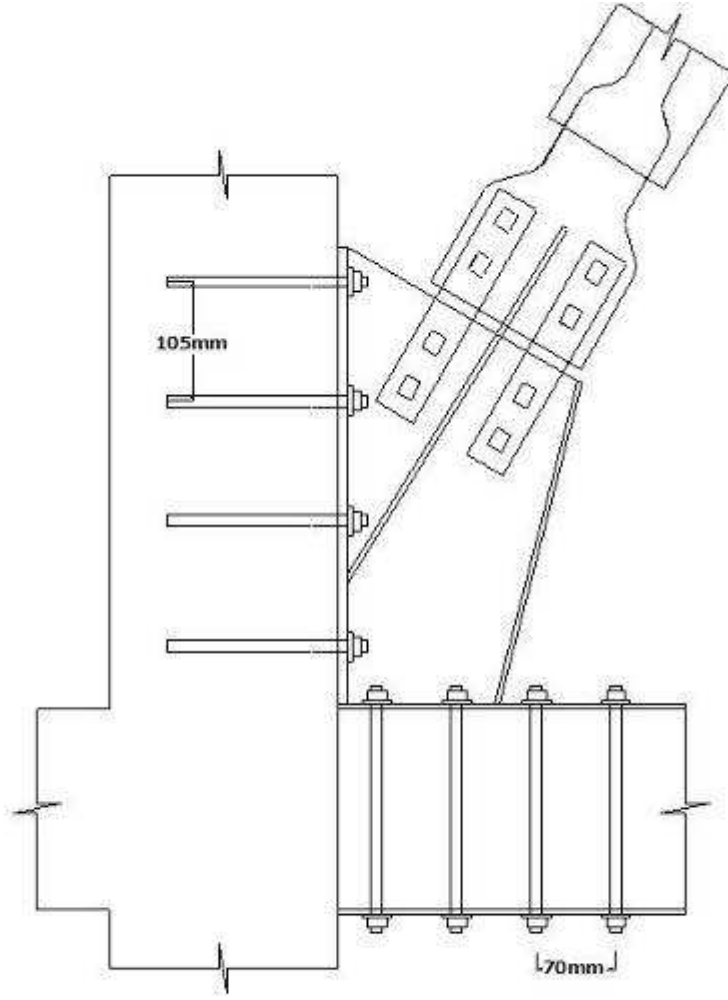


Şekil 3.9. Kolon dibinde bağlantı detayı

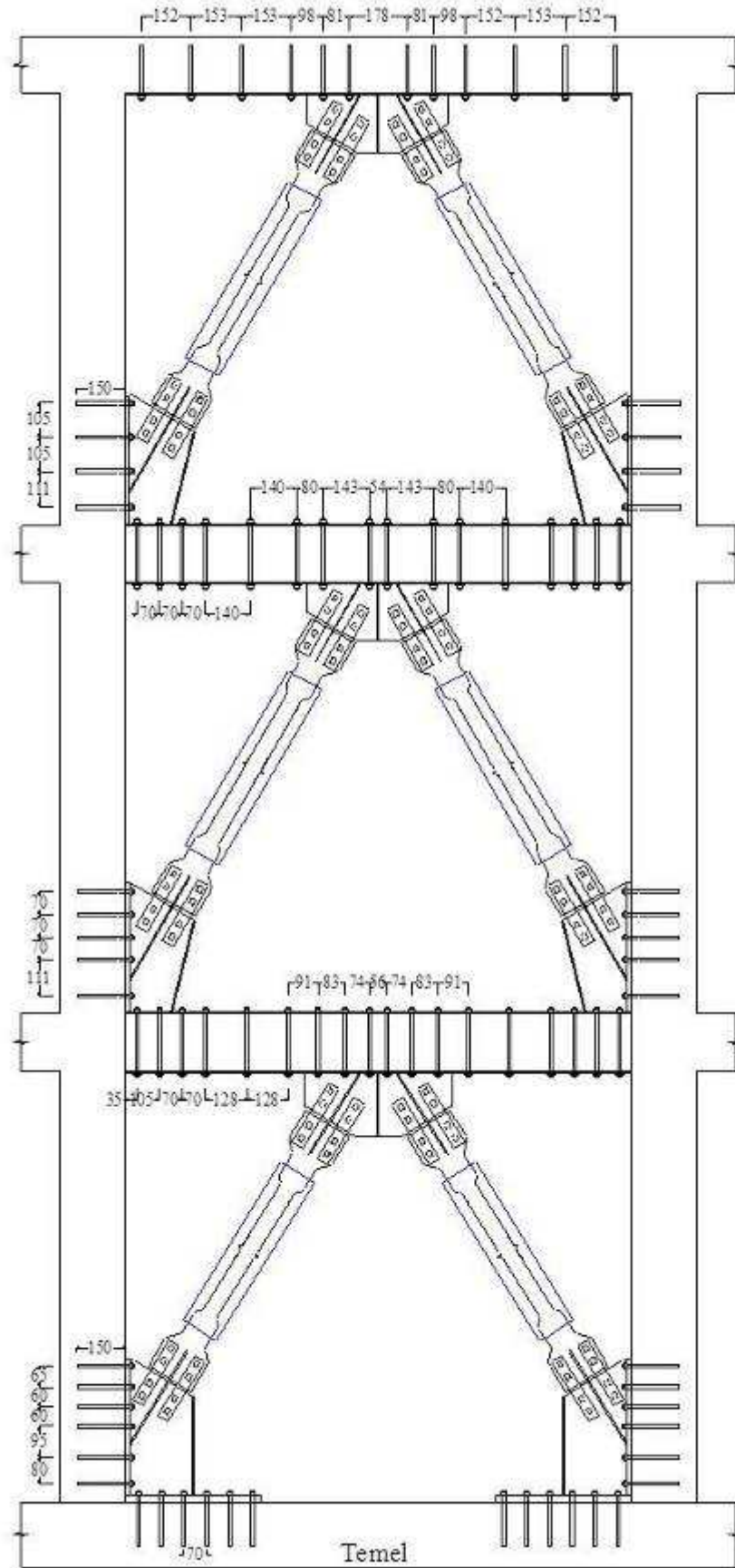


Şekil 3.10. Kiriş orta açıklığında bağlantı detayı

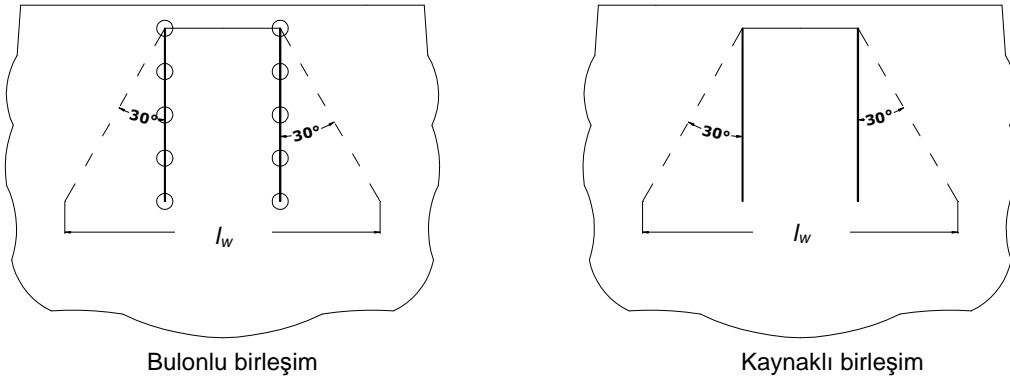




Şekil 3.11. Kolon-kiriş düğüm noktasında bağlantı detayı



Şekil 3.12. Bağlantı detayları



Şekil 3.13. Whitmore genişliği ( $I_w$ ) (Whitmore (1952), AISC (2005)'den alınmıştır)

Referans çerçevesinin beton dayanımının 12 MPa civarında olmasından dolayı bu proje kapsamında üretilen çerçevenin hedef beton dayanımı 12 MPa olması planlanmıştır. Dinamik benzeri deneyler öncesi yapılan beton testlerinden güçlendirilen çerçevenin beton basınç dayanımı 1., 2. ve 3. kat için sırasıyla 7.6, 9.2 ve 11.0 MPa olduğu görülmüştür. 1. kat için elde edilen beton basınç dayanımı hedef beton basınç dayanımdan daha düşük olması beklenmeyen bir sonuç olmakla beraber BEÇÇ ile güçlendirme açısından bu değer düşük olması yapılacak olan güçlendirmenin daha düşük dayanımlı yapılarda da kullanılabileceğini göstermektedir.

BEÇÇ ile güçlendirilen kusurlu betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesinde ve rijitliğinde artış sağlanması hedeflenmiştir. Özellikle rijitlik artışı ile görelî kat ötelenmelerinin belirli seviyelere indirilmesi veya belli aralığa çekilmesi planlanmıştır. Dolayısı ile BEÇÇ elemanlarının en kesitlerinin belirlenmesinde bu iki durum etkili olmuştur. Bunun yanında BEÇÇ'lerin de plastikleşerek enerji yutması BEÇÇ özelliğinin güçlendirmeye yansması olarak görülmektedir. Bunları dikkate alınması için bu proje kapsamında analitik çalışma gerçekleştirilmiştir. Detayları 4. Bölüm verilen analitik çalışmada ilk olarak referans çerçevesi OPENSEES programı ile modellenmiş ve zaman tanım alanında analizleri yapılmıştır. Bu analizleri deney sonuçlarına yaklaştırabilmek için beton ve donatı modellerinde gerekli kalibrasyonlar yapılmıştır. Bir sonraki aşamada referans çerçevesi için elde edilen OPENSEES modeline BEÇÇ elemanları ters V çelik çapraz olacak şekilde bağlanmış ve zaman tanım alanında analizler yapılarak BEÇÇ'li betonarme çerçevenin performansına bakılmıştır (4. Bölüm). BEÇÇ'li çerçevenin yatay yük kapasitesinin daha önce aynı deney düzeneğinde test edilmiş ve ülkemizdeki deprem şartnamesine uygun olarak tasarlanmış çerçevenin (Mutlu 2012) yatay yük kapasitesine eşitlenmesi/yaklaştırılması uygun görülmüştür. Bu kapsamda BEÇÇ'li çerçevenin yatay yük kapasitesinin yaklaşık 150 kN olması gerekmektedir. Referans çerçevesinin yatay yük kapasitesi ise yaklaşık 70 kN'dur (Mutlu 2012). Sonuç olarak BEÇÇ tarafından BEÇÇ'li sisteme eklenmesi gereken yatay yük



katkısının 80-100 kN civarında olması öngörülmüştür. BEÇÇ en kesit alanı ise BEÇÇ'lerin eşit basınç-çekme kapasitesine sahip olmasından dolayı şu şekilde yapılabilir:

$$2 \times A_1 \times f_y \times \cos \alpha = 80000N \Rightarrow A_1 = 75483 / f_y$$

$$2 \times A_2 \times f_y \times \cos \alpha = 100000N \Rightarrow A_2 = 94353 / f_y$$

1. Durum

$$f_y = 235MPa \Rightarrow A_1 = 321mm^2$$

2. Durum

$$f_y = 235 \times 1.4 = 329MPa \Rightarrow A_1 = 230mm^2$$

3. Durum

$$f_y = 235MPa \Rightarrow A_2 = 401mm^2$$

4. Durum

$$f_y = 235 \times 1.4 = 329MPa \Rightarrow A_2 = 286mm^2$$

Burada  $\alpha$  BEÇÇ'nin yatay ile yaptığı açıdır ( $58^\circ$ ),

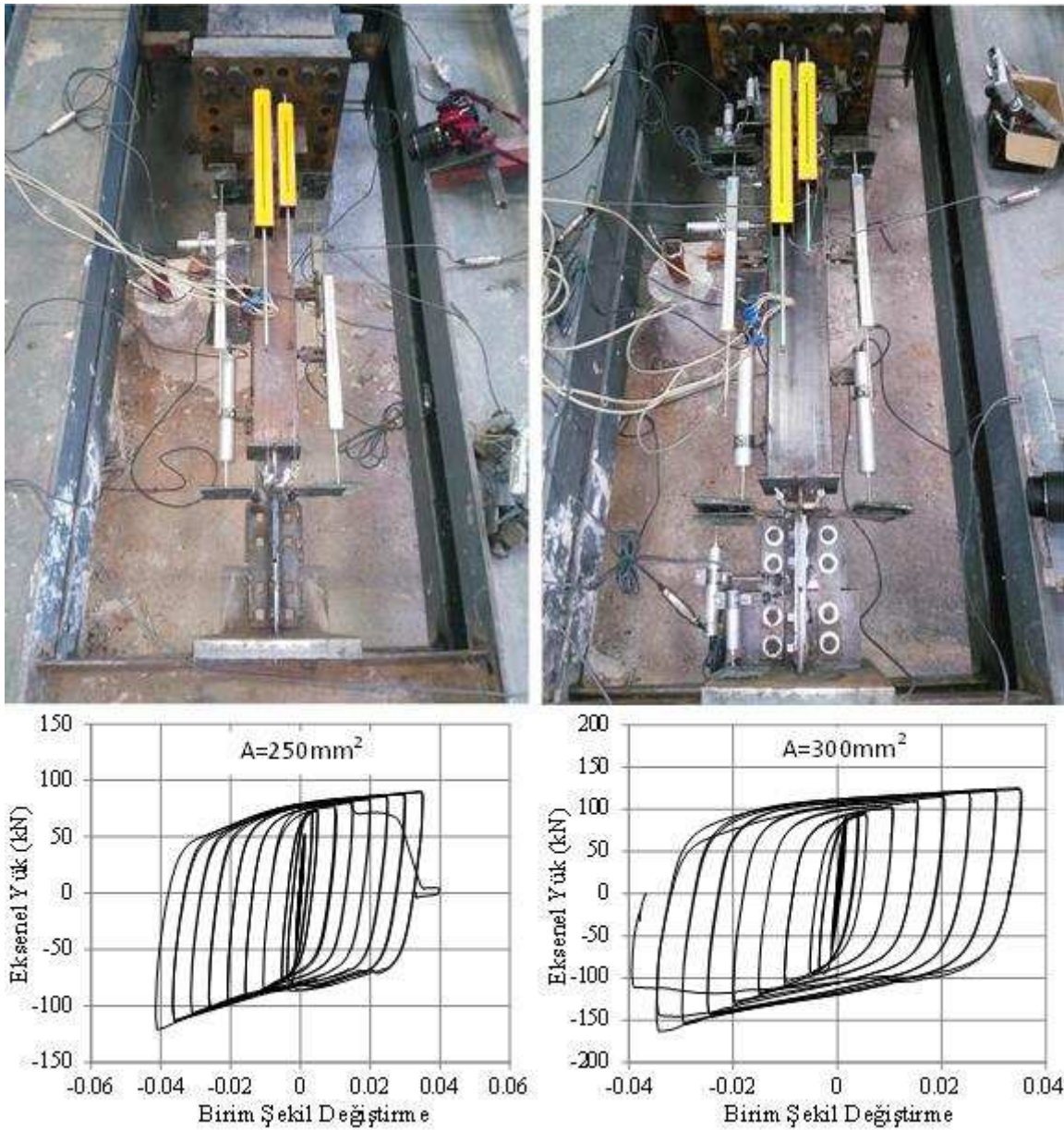
$A_1, A_2$ ; muhteme ÇE en kesiti,

$f_y$ ; ÇE'nin akma dayanımı.

ÇE için kullanılacak çelik plakaların ST37 çeliğinden olması planlanmıştır. Ancak piyasadan alınan çelikler genelde daha yüksek mukavemete sahiptirler. Bu durumda  $f_y$  değerinin 250-300 MPa alınarak hesaplamaların yapılması uygun görülmüştür. Yukarıda hesaplanan en kesitlere bakıldığında ÇE en kesit alanının  $300 \text{ mm}^2$  olması uygun görülmüştür. 1. Katta kullanılacak olan BEÇÇ'lerin ÇE enkesitlerinin  $300 \text{ mm}^2$  olmasından sonra 2. ve 3. Kat BEÇÇ'lerin en kesitlerinin azaltılması öngörülmüştür. Bu en kesit azalmasında öncelikle BEÇÇ'lerin üst katlarda da plastikleşmesi istenmektedir. Ayrıca en kesitin azaltılması ile kullanılacak olan ankraj sayısı da azalacaktır (Şekil 3. 12). Bunun yanında ardgerme için kullanılacak olan bulon çapları ve kaliteleride aynı oranda azalacaktır. Söz konusu ÇE en kesit azalması BEÇÇ'li uygulamada önemli ekonomi kazandırmıştır. Ancak bu işlemlerin yapılması durumunda çerçeve davranışında yumuşak kat oluşumunda kontrol edilmeli ve izin verilmemelidir. Yapılan analizlerde 2. ve 3. Kat BEÇÇ'lerin ÇE en kesit alanlarının  $250$  ve  $200 \text{ mm}^2$  olacak şekilde tasarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak her bir katta kullanılan BEÇÇ'lerin ÇE en kesit alanları 1., 2. ve 3. Katlar için sırasıyla  $300, 250$  ve  $200 \text{ mm}^2$  olarak elde edilmiştir. Bu durumda BEÇÇ-bayrak levhası arasındaki bağlantının sağlanabilmesi için kullanılan yüksek mukavemetli bulon kaliteleri 1. Kat için M12-10.9

olurken, 2. ve 3. Kat için M12-8.8 olarak değişmiştir. Bu birleşimlerde Bölüm 2’de olduğu gibi “Sürtünme Etkili (Kayma Kontrollü) Birleşim” kullanılmıştır.

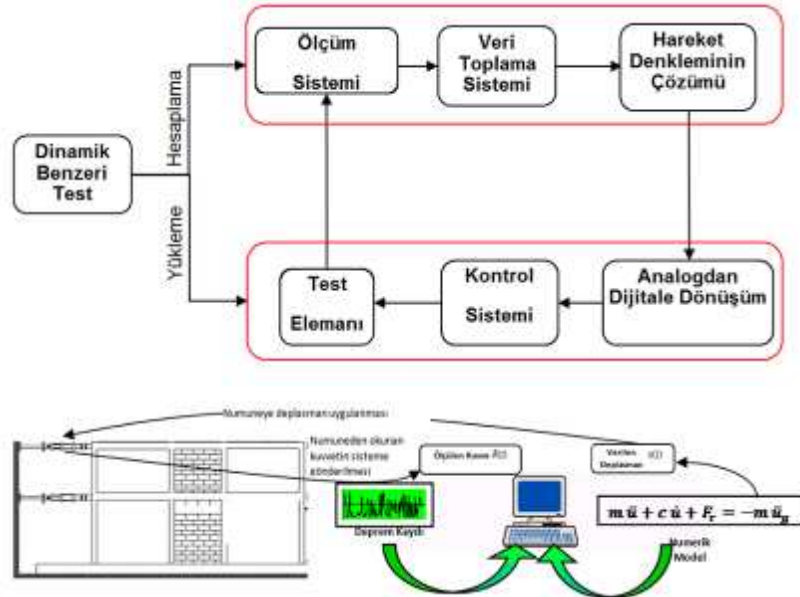
300, 250 ve 200 mm<sup>2</sup>’lik en kesitlere sahip BEÇÇ’ler daha önce test edilmediğinden 3 açıklık-3 katlı betonarme çerçeveye bağlanacak olan BEÇÇ’lerin eleman bazında test edilmesi uygun görülmüştür. Şekil 3.14’de görüldüğü gibi 2 adet BEÇÇ üretilmiş ve test edilmiştir. Bu BEÇÇ’lerin ÇE en kesit alanları sırasıyla 250mm<sup>2</sup> ve 300 mm<sup>2</sup>’dir. Bu test sonuçlarına bakıldığında 1. Kat için kullanılacak olan BEÇÇ’den betonarme çerçeveye gelecek olan yatay yük katkısının 80-150 kN arasında olacağı görülmüştür.



Şekil 3.14. Eleman bazında test edilen BEÇÇ’ler

### 3.4.3. DENEYSSEL YÖNTEM

Dinamik benzeri (Pseudo Dynamic Test) deney yönteminde öncelikle bir deprem kaydı elde edilir. Buradan ivme-zaman kaydı önceden belirlenmiş zaman adımlarına bölünür. Deprem ivmelerinden kaynaklanan atalet kuvvetleri her zaman adımı için belirlenir ve bir evvelki adım değerleri kullanılarak kuvvetlerin yaratacağı yer değiştirmeler bilgisayarlar tarafından hesaplanarak hidrolik pistonlar vasıtasıyla yapıya kontrol-geribesleme sistemi kullanılarak uygulanır (Şekil 3.15). Bir sonraki adımda pistonlar tarafından uygulanan yerdeğiştirmelerden dolayı yapının kat kesme kuvvetleri yük hücreleri tarafından ölçülür ve bu yeni değerler, bir sonraki zaman adımında yapıya uygulanacak yerdeğiştirmelerin hesaplanmasında kullanılır. Bu işlem döngüsü deprem sonlanıncaya kadar tekrar edilir. Dolayısı ile her bir zaman adımında hareket denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Hareket denklemindeki kütle ifadesi (kütle matrisi) numerik olarak hesaplara dahil edilmektedir ve hareket denkleminin çözümünde Newmark metodu kullanılır. Dinamik benzeri deney yönteminde deney süresi gerçek deprem süresinin n kere yavaşlatılmış şekli olduğundan deney sırasında hasar gözlemi de rahatlıkla yapılabilir. Dinamik benzeri yöntem gerçek bir deprem kaydının yapıya uygulanarak performansın gerçeğe daha yakın olarak elde edilmesi sağlanır. Dinamik benzeri deney yöntemleri ile ilgili detaylı bilgi Molina vd. (1999-a) ve Molina vd. (1999-b) 'de bulunabilir.



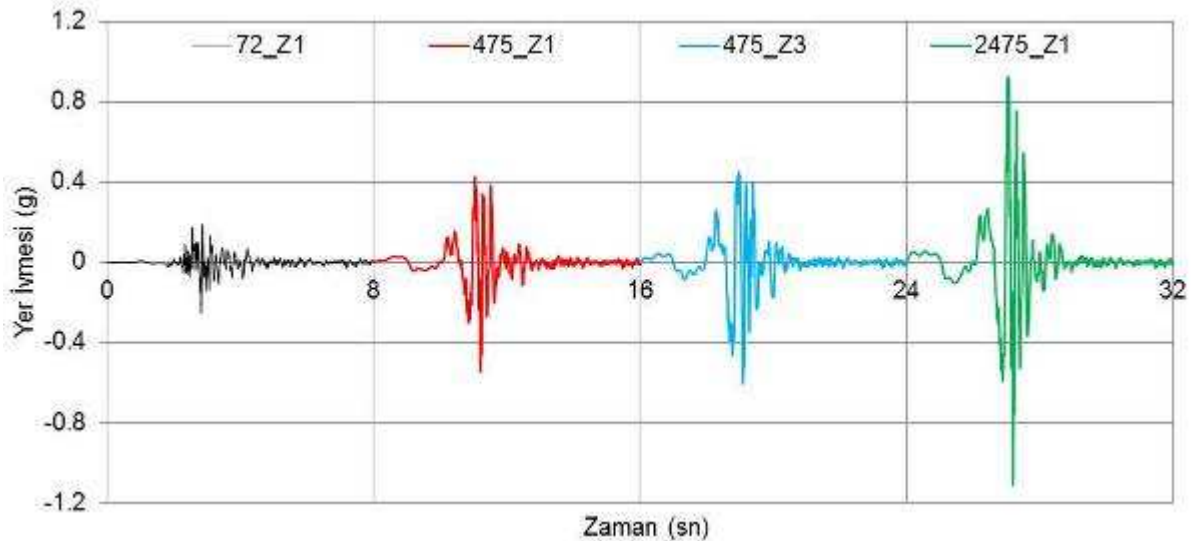
Şekil 3.15. Dinamik Benzeri Deney Sistemi

Referans ve BEÇÇ'ler ile güçlendirilmiş çerçevelerin dinamik benzeri deneylerinde kullanılan deprem yer hareketleri ve spektrumları Şekil 3.16 ve 17'de görülmektedir. Kullanılan kayıtların maksimum yer ivmeleri ise Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

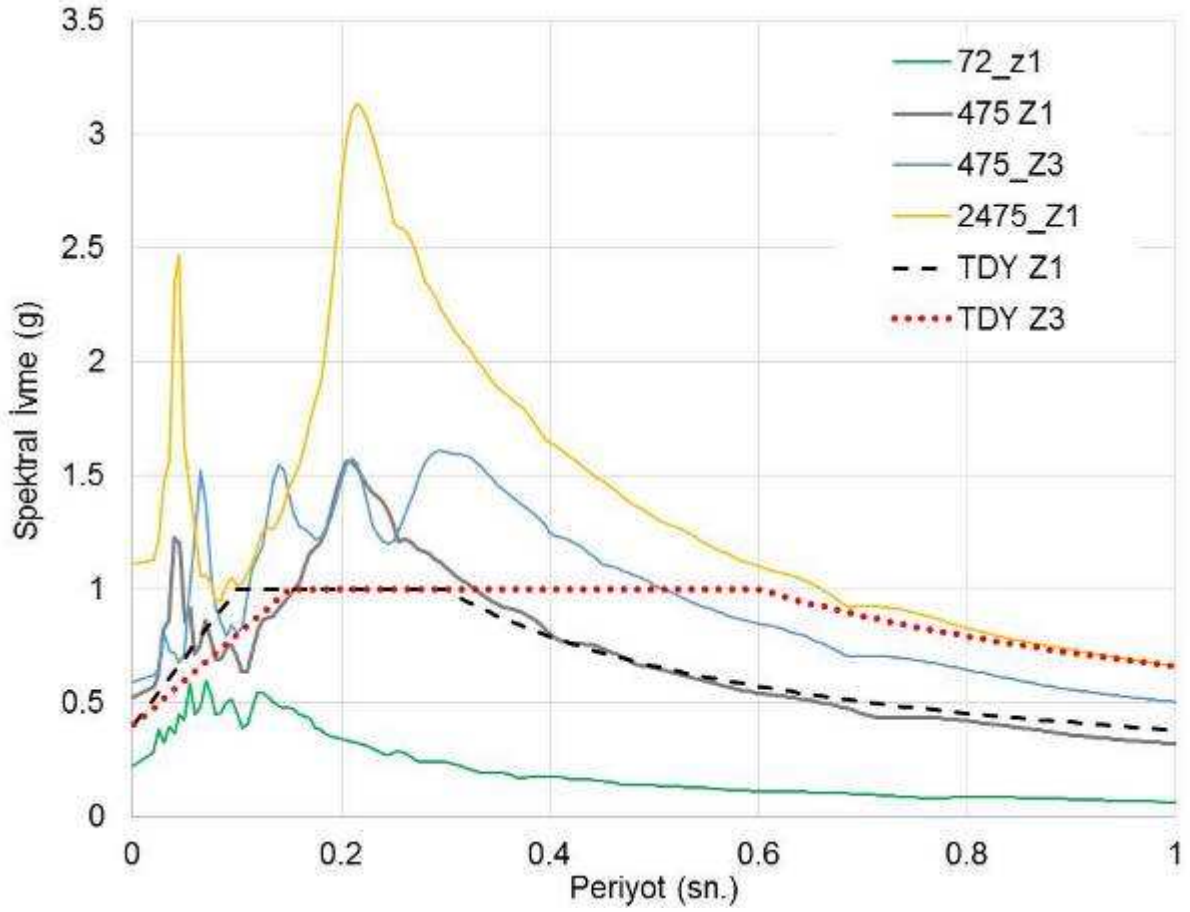
Tablo 3. 1 Max. Yer ivmeleri

Deprem	Zemin Sınıfı	Max. Yer İvmesi (g)
D1= 72_Z1	Z1	0.254
D2= 475_Z1	Z1	0.545
D3= 475_Z3	Z3	0.604
D4= 2475_Z1	Z1	1.111

Tablo 3.1 ve Şekil 3.16 ve 17'den görüldüğü gibi D1-D4 depremlerine doğru gidilginde uygulanan deprem ivmesi artmaktadır. Böylece deney elemanındaki hasar seviyeleri her bir deprem için rahatlıkla belirlenebilecektir. Ayrıca çerçevelerin performans seviyeleride her bir deprem için belirlenebilecektir. D4 depremi ise BEÇÇ'li çerçevenin limit davranışını (yatay yük taşıma ve deplasman yapabilme kapasitesi) göstermesi bakımında çerçeveye uygulanmıştır. Söz konusu bu D4 depremi referans çerçevede meydana gelen ağır hasarlardan dolayı uygulanamamıştır. Bu proje kapsamında ise BEÇÇ'li çerçevenin ileri hasar seviyelerinde nasıl bir performans göstereceğini belirleyebilmek için D4 testi yapılmıştır. Şekil 3.17'de deneyde kullanılan ivme kayıtlarından elde edilmiş spektral ivmeler TDY 2007 ile karşılaştırılmıştır. Referans çerçevesinin periyot değeri deneysel çalışmada 0.35-0.4 aralığında elde edilmiştir (Mutlu 2012). Yapılan analizlerde ise BEÇÇ'li çerçevenin periyot değeri 0.2 olarak bulunmuştur. Dolayısı ile BEÇÇ'li çerçeve dinamik benzeri deneyde kullanılan deprem kaydının en yüksek spektral ivmesine maruz kalmıştır.



Şekil 3.16. Dinamik benzeri deneylerde kullanılan ivme-zaman dizisi



Şekil 3.17. Dinamik benzeri deneylerde kullanılan ve Türk Deprem Yönetmeliği (TDY 2007) ivme spektrumları

### 3.5. DENEY SONUÇLARI

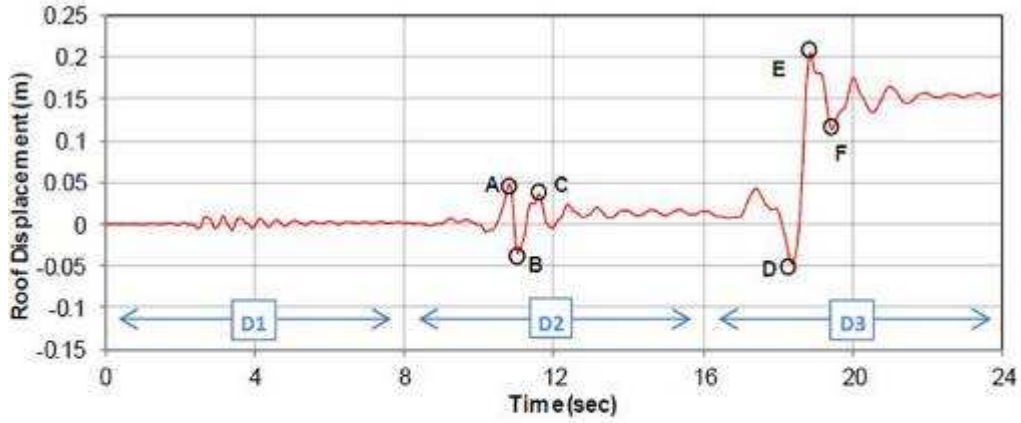
#### 3.5.1. GİRİŞ

Bu bölümde dinamik benzerli test yöntemi ile test edilen referans ve BEÇÇ'li çerçevelerin test sonuçları ve deneyler esnasında gözlemlenen çerçeve hasarı incelenecektir. Test sonuçları, yatay deplasmanlar, kat ötelenmesi, taban kesme kuvveti, BEÇÇ birim uzamaları gibi mühendislik parametreleri için sunulmuştur. Deneyler esnasında çekilen fotoğraflar sayesinde çerçeve hasarında ve yatay istemlerin gözlemlenen hasar ile korelasyonu deney sonuçları içerisinde incelenmiştir. Deney sonuçları genel olarak artan ivmeyi yansıtan D1-D4 veya 72Z1-475Z1-475Z3-2475Z1 şeklinde özetleyen grafikler şeklinde sunulacaktır.

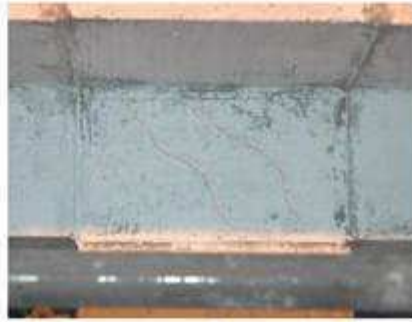


### 3.5.2. REFERANS DENEY ELEMANI

Daha önce bahsedildiği gibi bu proje kapsamında referans çerçevesi test edilmemiştir. Bu referans çerçevesinin yerine daha önce test edilmiş çerçeve test sonuçları kullanılacaktır. Bu sonuçlar Mutlu 2012'den alınmış olup daha detaylı bilgi ilgili referansta mevcuttur.



A



B



C



D



E



F

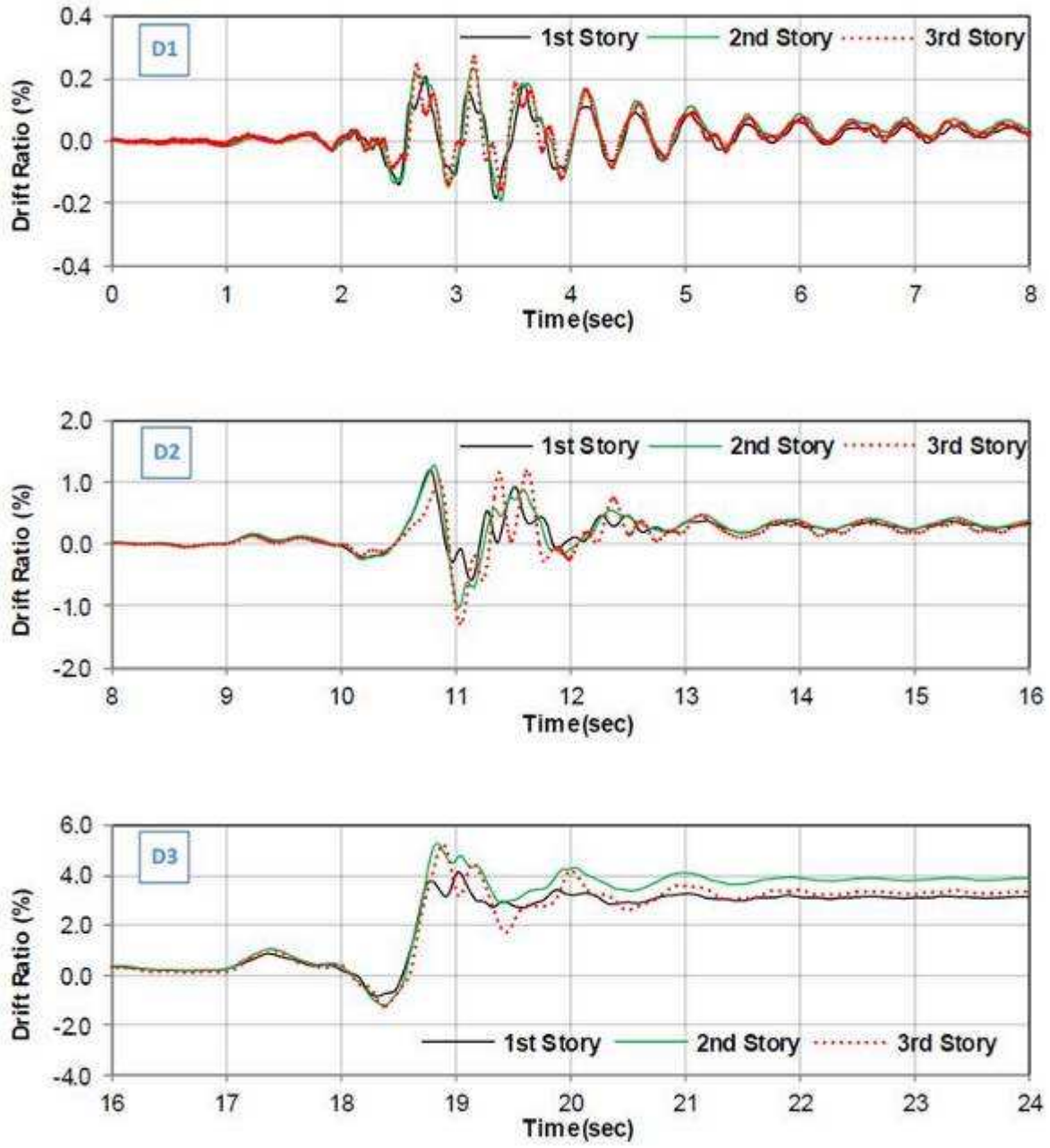
Şekil 3.18 Referans çerçevesine ait yatay yük-tepe deplasman grafiği, deney esnasında çerçevede meydana gelen hasarlar (Mutlu 2012)

Referans çerçevesine bakıldığı zaman D1 depreminde yapı elastik kalmış ve maks. görelî kat ötelenme oranı (GKÖÖ) %0.3'den daha az seviyede olduğu görülmüştür (Şekil 3.18). Bu

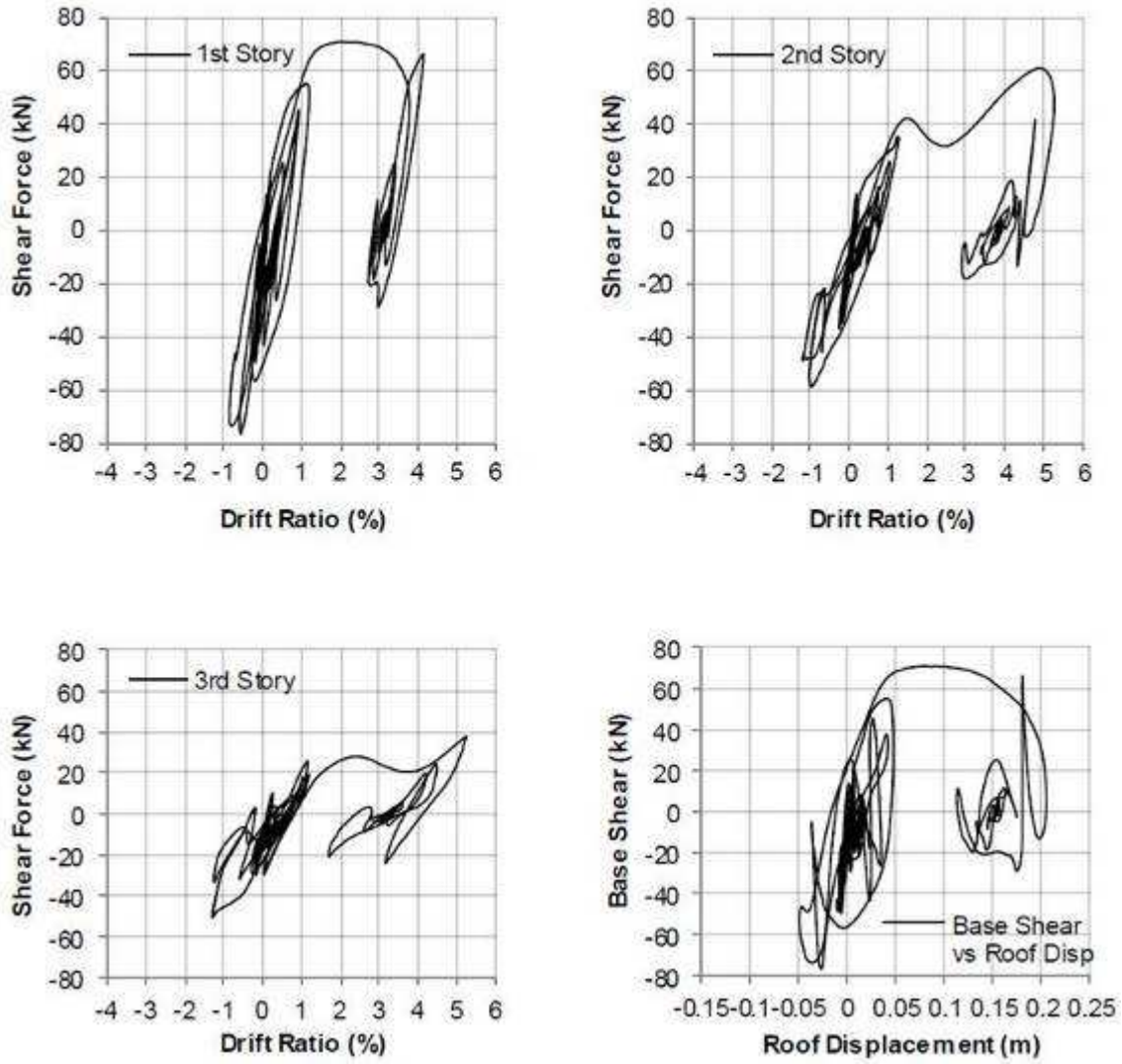
deneyde görülen maks. tepe deplasman 9.4 mm olarak ölçülmüştür. D2 depreminde ise referans çerçevesinde belirgin hasar oluşumu gözlenmiştir. Şekil 3.18'den de görüldüğü gibi D2 depreminin uygulandığı deneyde referans çerçevesinde yapısal hasarlar oluşmaya başlamıştır (Şekil 3.18-19). Bu deneyde meydana gelen maks. GKÖO % 1.3 civarında olup maks. tepe deplasman değeri yaklaşık 49 mm olarak ölçülmüştür. D3 depreminin uygulandığı deneyde referans çerçevesi yaklaşık 206 mm tepe deplasman değerine kadar ötelenmiştir. 1. Kat maks. GKÖO %4.1 değerine kadar ulaşırken üst katlarda meydana gelen maks. GKÖO %5.0 değerini aşmıştır (Şekil 3.20). Referans çerçevesinin kolon ve kirişlerinde hem eğilme hemde kesme çatlakları oluşmuş ve bu çatlaklar genişlemiştir (Şekil 3.18). D3 depreminin uygulandığı deneyden sonra çerçevede yatayda artık deplasmanlar (residual displacement) kalmıştır. Bütün deneylere ait kat kesme kuvvetleri ve GKÖO Şekil 3.21'de gösterilmektedir. Bu şekilden de görüleceği gibi referans çerçevesinin taban kesme kuvveti kapasitesi yaklaşık 70 kN civarındadır. Bu deneyden sonra yapılan gözlemsel değerlendirmede referans çerçevesinin ağır hasar aldığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.19. Referans çerçevesinde 3. Katta meydana gelen yapısal hasarlar (Mutlu 2012)



Şekil 3.20. Referans çerçevesine ait GKÖO (Mutlu 2012)



Şekil 3.21. Referans çerçevesine ait kat kesme kuvveti-GKÖO ve taban kesme kuvveti-tepe deplasman grafikleri (Mutlu 2012)

### 3.5.3. BEÇÇ'LER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DENEY ELEMANI

BEÇÇ'ler ile güçlendirilmiş 3 açıklık-3 katlı betonarme çerçeveye ait deney sonuçları bu bölümde incelenecektir. Buradaki BEÇÇ'li çerçeve deneylerinde toplam 4 deney (D1-D4) yapılmıştır referans deneyinde ise 3 deney (D1-D3) yapılmıştır. BEÇÇ'li çerçevede 4. Deneyin yapılmasının sebebi D1-D3 deneylerinde hasarın sınırlı kalması, BEÇÇ'lerde herhangi bir hasarın meydana gelmemesidir. Dolayısı ile D4 deneyi aslında BEÇÇ'li bir çerçevenin gidebileceği en son performans seviyesinin belirlenebilmesi için yapılmıştır. Dinamik benzeri deney yöntemi ile test edilen BEÇÇ'li çerçevenin deney sonuçları Tablo 3.2'de özetlenmiştir ayrıca Tablo 3.3'de referans ve BEÇÇ'li çerçevenin karşılaştırması verilmiştir. Deneyler esnasında BEÇÇ'li çerçeveden elde edilen kat kesme kuvveti-zaman grafiği Şekil 3.22-26'da, GKÖO-zaman grafiği Şekil 3.27-31, D1-D4 deneyleri için yatay

kuvvet-tepe deplasman grafiği Şekil 3.32-33'de, 1. Kat BEÇÇ'lerde meydana gelen birim şekil değiştirme-zaman grafiği Şekil 3.34-37'de, 2. Kat BEÇÇ'lerde meydana gelen birim şekil değiştirme-zaman grafiği Şekil 3.38-41'de, 3. Kat BEÇÇ'lerde meydana gelen birim şekil değiştirme-zaman grafiği Şekil 3.42-45'de, BEÇÇ'lerin birim şekil değiştirme değerlerinin özeti Şekil 3. 46'da ve yüksek mukavemetli bulonlardaki kayma miktarı Şekil 3.47'de görülmektedir.

Tablo 3. 2 BEÇÇ'li çerçeve deney sonucu

Deprem	Kat	Maks. Kat Kesme Kuvveti (kN)	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Maks. GKÖ (%)	Maks. Tepe Deplasman (mm)	ÇE Birim Şekil Değiştirme (%)	
						1. BEÇÇ	2. BEÇÇ
D1 (72_Z1)	1. kat	41.6	67.8	0.12	6.1	-0.15	0.10
	2. kat	38.9		0.16		0.09	-0.11
	3. kat	37.6		0.17		-0.04	-0.08
D2 (475_Z1)	1. kat	53.7	135.8	0.84	25.2	-1.30	0.97
	2. kat	77.8		0.54		0.57	-0.52
	3. kat	56.6		0.31		-0.07	-0.09
D3 (475_Z3)	1. kat	73.4	171.9	1.68	44.5	-2.71	2.05
	2. kat	71.5		0.95		1.06	-0.92
	3. kat	73.9		0.39		-0.13	-0.12
D4 (2475_Z1)	1. kat	83.8	177.6	2.86	76.4	-4.75	3.51
	2. kat	104.1		1.71		2.03	-1.60
	3. kat	77.4		1.06		-0.12	-0.21

Tablo 3. 3 Referans (Mutlu 2012) ve BEÇÇ'li çerçevenin karşılaştırması

Deprem	Taban Kesme Kuvveti (kN)		1. Kat Maks. GKÖ (%)		Maks. Tepe Depls. (mm)	
	Referans Çerç.	BEÇÇ'li Çerç.	Referans Çerç.	BEÇÇ'li Çerç.	Referans Çerç.	BEÇÇ'li Çerç.
D1 (72_Z1)	49.7	67.8	0.2	0.12	9.4	6.1
D2 (475_Z1)	76.8	135.8	1.2	0.84	48.7	25.2
D3 (475_Z3)	73.8	171.9	4.1	1.68	206.0	44.5
D4 (2475_Z1)	-	177.6	-	2.86	-	76.4

Bu verilere göre maksimum taban kesme kuvveti bütün deneyler (D1-D4) için sırayla 67.8 kN, 135.8 kN, 171.9 kN ve 177.6 kN'dur. Görüldüğü gibi deney öncesi yatay yük taşıma kapasitesini belirlemek için yapılan basit hesaplar yatay yük kapasitesinin tahmininde oldukça etkilidir. 1. kat maksimum GKÖ sırasıyla %0.12, 0.84, 1.68 ve 2.86'dır. Tablo 3.2'de önemli olan diğer veri ise BEÇÇ'lerin ÇE'lerinde meydana gelen birim şekil değiştirmelerdir. Bu değerler BEÇÇ'li sistemin enerji sönmülemde ne kadar etkili olduğunu ortaya koymaktadır. İlk deneyde BEÇÇ'lerin ÇE'lerinde 1. Katta %0.15'lik bir birim uzama değerine kadar BEÇÇ'nin yük aldığı görülmektedir. Diğer deneylerde ise ölçülen maksimum birim uzama değerleri sırasıyla %1.3, 2.71 ve 4.75'dir.

İlk deneyde BEÇÇ'li çerçeve elemanı referans çerçevesi gibi elastik davranış göstermiştir. Söz konusu deneyde herhangi bir yapısal hasar gözlenmemiştir. GKÖO ise % 0.17 olarak ölçülmesi BEÇÇ'li çerçevenin elastik sınırdaki kaldığını göstermektedir. Maksimum taban kesme kuvveti 68 kN civarında ölçülmüştür. BEÇÇ elemanlarında sadece 1. Kattaki BEÇÇ'de kısmi bir plastikleşme ölçülmüştür (Şekil 3.34, Tablo 3.2). Söz konusu plastikleşme sınır bir değerde olup deney süresinin çok kısa bir zaman aralığında meydana gelmiştir.

D2 deneyinde BEÇÇ'li çerçevede yapısal hasarlar meydana gelmiştir. Bu yapısal hasarlar genel olarak kolon ve kirişte meydana gelen eğilme çatlaklarıdır (Şekil 3.48). Bu deneyde BEÇÇ'li çerçeve elemanlarında ve BEÇÇ'de plastikleşmeler başlamıştır. Maksimum taban kesme kuvveti 135.8 kN civarındadır. 1. Katta meydana gelen GKÖO %0.84'dür. BEÇÇ'lerde ise ciddi derecede plastikleşme meydana gelmiştir ve 1. Kattaki BEÇÇ'lerde %1.3 ile 0.97 birim şekil değiştirme değerlerine kadar ÇE'de uzaman ve kısalma meydana gelmiştir (Tablo 3.2, Şekil 3.35). BEÇÇ elemanlarında herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Ayrıca bulon kayma miktarları da oldukça sınırlı seviyede kalmıştır. Bunun yanında ÇE en kesitinin 2. Katta azaltılması bu kattaki BEÇÇ'ninde plastikleşmesine olanak sağlamıştır. 2. Kattaki BEÇÇ'lerde ise ÇE'ler %0.57 ile 0.52 birim şekil değiştirme değerlerine kadar uzamış ve kısalmıştır (Tablo 3.2, Şekil 3.39). Dolayısıyla katlar arası BEÇÇ elemanlarındaki ÇE en kesitinin azaltılması hem plastikleşmenin oluşmasını hemde üretim aşamasında ekonomi (kullanılan ankraj sayısını, yüksek mukavemetli bulonların 10.9'dan 8.8' düşürülmesi vb.) sağlamıştır. Ayrıca BEÇÇ'li çerçevede BEÇÇ elemanları çerçevenin yatay rijitliğini arttırdığı için GKÖO'ları da referans çerçevesine göre azalmıştır. Tablo 3.3'de görüleceği gibi 1. Kattaki GKÖO referans çerçevede %1.2 iken bu değer BEÇÇ'li çerçevede %0.84 seviyesinde kalmıştır. Dolayısıyla tepe deplasman değerleride benzer şekilde 48.7 mm'den 25.2 mm'ye düşmüştür. Bu değerler BEÇÇ'li çerçevede güçlendirme amaçlı kullanılan BEÇÇ'lerin yapının GKÖO'larını etkili bir şekilde kontrol ettiğini göstermektedir. Bunun yanında BEÇÇ elemanları betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini 76.8 kN'dan 135.8 kN'na çıkartmıştır.

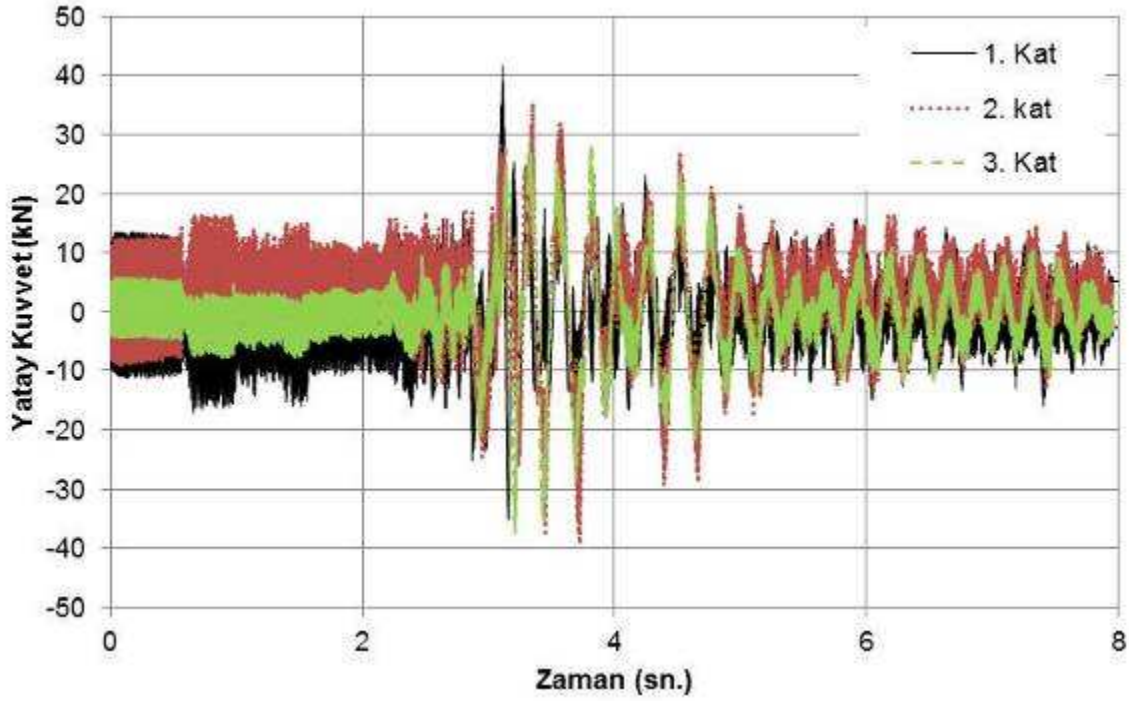
D3 deneyinde yapısal hasarlarda artış meydana gelmiştir. Kolon ve kirişlerde yeni çatlaklar oluşmuş, mevcut çatlaklar genişlemiştir. Bunun dışında ağır herhangi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir. BEÇÇ'lerde deney esnasında ve sonrasında herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Bu deneyde maksimum taban kesme kuvveti 171.9 kN'dur. 1. Katta meydana gelen GKÖO %1.68'dir. 2. Katta ise GKÖO % 0.95 olup bu kattaki yapısal hasarların meydana geldiğini göstermektedir. BEÇÇ'ler ciddi derecede plastikleşmiştir ve 1. Kattaki BEÇÇ'lerde %2.71 ile 2.05 birim şekil değiştirme değerlerine kadar ÇE'de uzaman ve



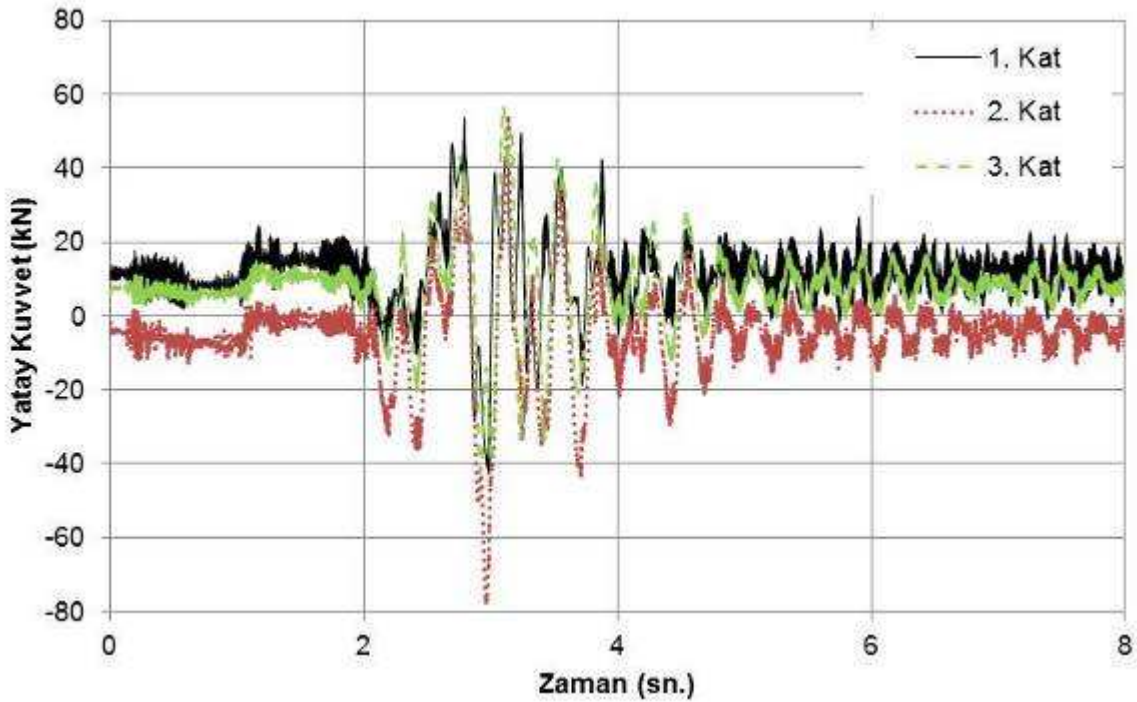
kısalma meydana gelmiştir (Tablo 3.2, Şekil 3.36). Söz konusu deplasman değerlerinde BEÇÇ'lerde herhangi bir hasar (lokal, global burkulma meydana gelmemiştir.) Şekil 3.36'dan da görüldüğü gibi ÇE'ler deney esnasında ciddi derecede akmış ve yaklaşık %1.0 birim şekil değiştirme değerinde artık birim şekil değiştirme (residual strain) ÇE üzerinde kalmıştır. BEÇÇ'lerdeki plastikleşme deney süresinin büyük bir kısmında devam etmiştir. Bu durumda BEÇÇ'lerin ciddi enerji sönümlediklerini göstermektedir. Deney elemanı deney sonunda Şekil 3. 29'da görüldüğü gibi yaklaşık %0.5 GKÖO değerinde yatayda deplasman yapmış halde kalmıştır. BEÇÇ elemanlarında meydana gelen pekleşmeden dolayı yatay yük taşıma kapasitesi/tabana kesme kuvveti bir önceki deneye göre artmış ve 171.9 kN olmuştur.

D4 deneyinde BEÇÇ'li çerçevede meydana gelen en önemli hasar iç kolonda pas payının dökülmesi ve boyuna donatının ortaya çıkmasıdır (Şekil 3.48). Bu şekilden de görüldüğü gibi paspayı dökülmesi kolon dibinde değil kolona bağlanan bayrak levhasının üst seviyesinde meydana gelmiştir. Bunun sebebi bayrak levhasının ankrajı için kullanılan çelik plakaların kolon dibinde meydana getirdiği ek eğilme kapasitesidir. Şekil 3.33'de de görüleceği gibi betonarme kolonda meydana gelen paspayı dökülmesi BEÇÇ'li çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesine etkisi olmamıştır. Bunun sebebi ise BEÇÇ'li çerçevenin yatay yük ve rijitliğini kontrol eden BEÇÇ elemanlarının olmasıdır. Dolayısı ile BEÇÇ'lerde deney esnasında ve deney sonrasında herhangi bir hasar görülmediği için BEÇÇ'li çerçeve davranışı D4 deneyi boyunca oldukça karardır. Hasar seviyesi ise betonarme elemanlarda ek çatlakların oluşumu ve mevcut çatlakların genişlemesi ve ilerlemesi şeklindedir. BEÇÇ'li çerçevede 1. Kat GKÖO %2.86 seviyesine kadar çıkmıştır. Diğer üst katlarda ise bu değer %1.71 ile 1.06 seviyesindedir. Dolayısı ile BEÇÇ'li çerçeve referans çerçevesine uygulanan D3 depreminden daha büyük ivmeye sahip D4 depreminde bile referans çerçevesinin yapmış olduğu % 4.75 GKÖO'dan daha az seviyede yanal ötelenme yapmıştır. Bu sonuçta BEÇÇ'li çerçevelerde BEÇÇ'lerin ciddi anlamda GKÖO'nı kontrol ettiğini göstermektedir. Ayrıca BEÇÇ'ler hem GKÖO'larını kontrol ederken diğer taraftan enerji sönümlemeye devam etmektedir. Şekil 3.37 ve 46'da görüldüğü gibi BEÇÇ'ler ciddi derecede plastikleşmiştir ve 1. Kattaki BEÇÇ'lerde %4.75 ile 3.51 birim şekil değiştirme (Tablo 3.2) değerlerine kadar ÇE'de uzaman ve kısalma meydana gelmiştir. Deney sonunda yaklaşık %3.0 birim şekil değiştirme değerinde artık birim şekil değiştirme (residual strain) ÇE üzerinde kalmıştır. Ayrıca Şekil 3. 31'den de görüldüğü gibi BEÇÇ'li çerçevede bütün deneylerin sonunda %2.0 GKÖO'da artık deplasman meydana gelmiştir. Şekil 3.32 ve 33'de görüldüğü gibi BEÇÇ'li çerçevenin maksimum yatay yük taşıma kapasitesi (tabana kesme kuvveti) 178 kN civarındadır. Dolayısı ile BEÇÇ'lerin yatay yük taşıma kapasitesine katkısı yaklaşık 100 kN civarında olduğu görülmektedir. Bu veriler BEÇÇ'lerin tasarımında yapılan basit hesaplar ile uyumludur.

Deneyler sonunda BEÇÇ'li çerçevede meydana gelen hasarların gözlemsel değerlendirmesine göre BEÇÇ'li çerçeve D1-D2 depremlerinde: Hemen Kullanım, D3-D4 depremlerinde: Can Güvenliği performans seviyesinde olduğunu sinucuna varılmıştır. Ayrıca bu gözlemsel değerlendirme TDY 2007'de verilen GKÖO sınır değerleri ile uygundur.

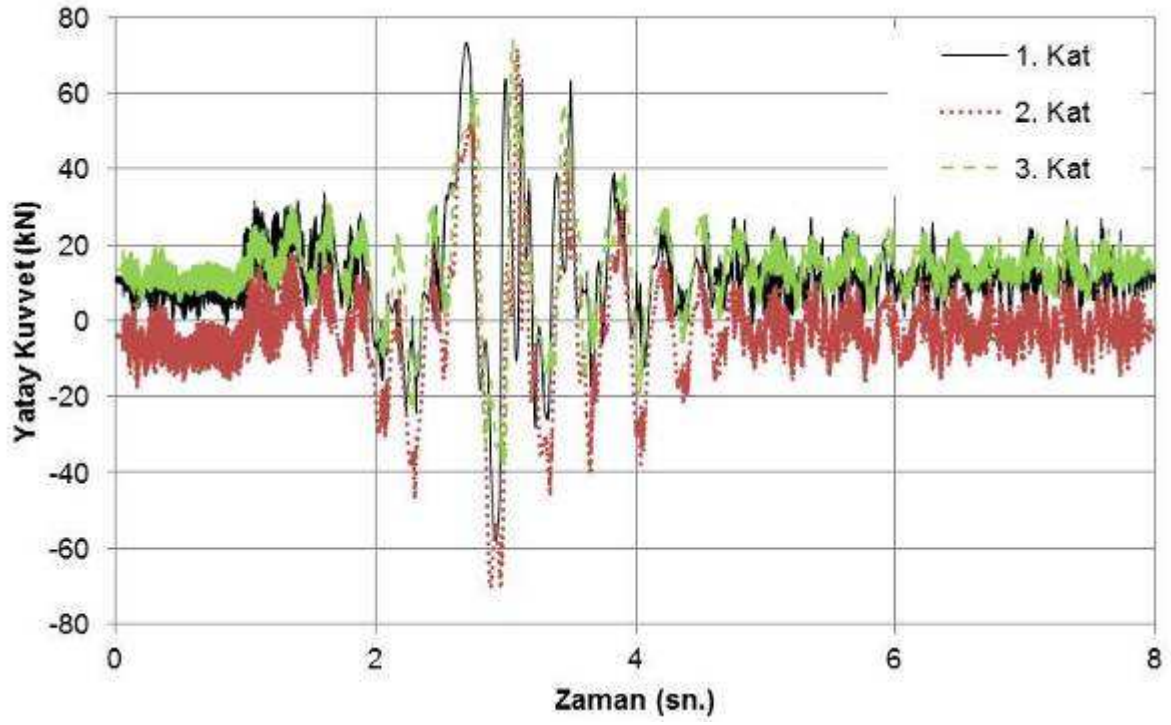


Şekil 3.22. 72 Z1 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri

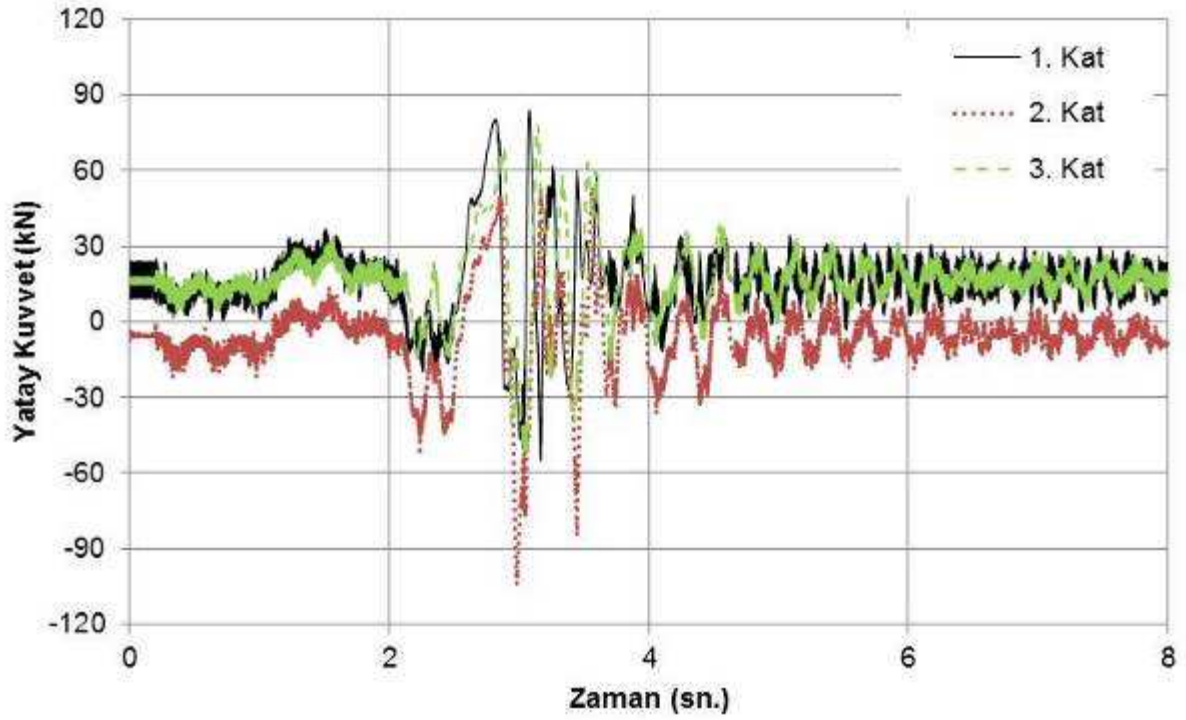


Şekil 3.23. 475 Z1 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri

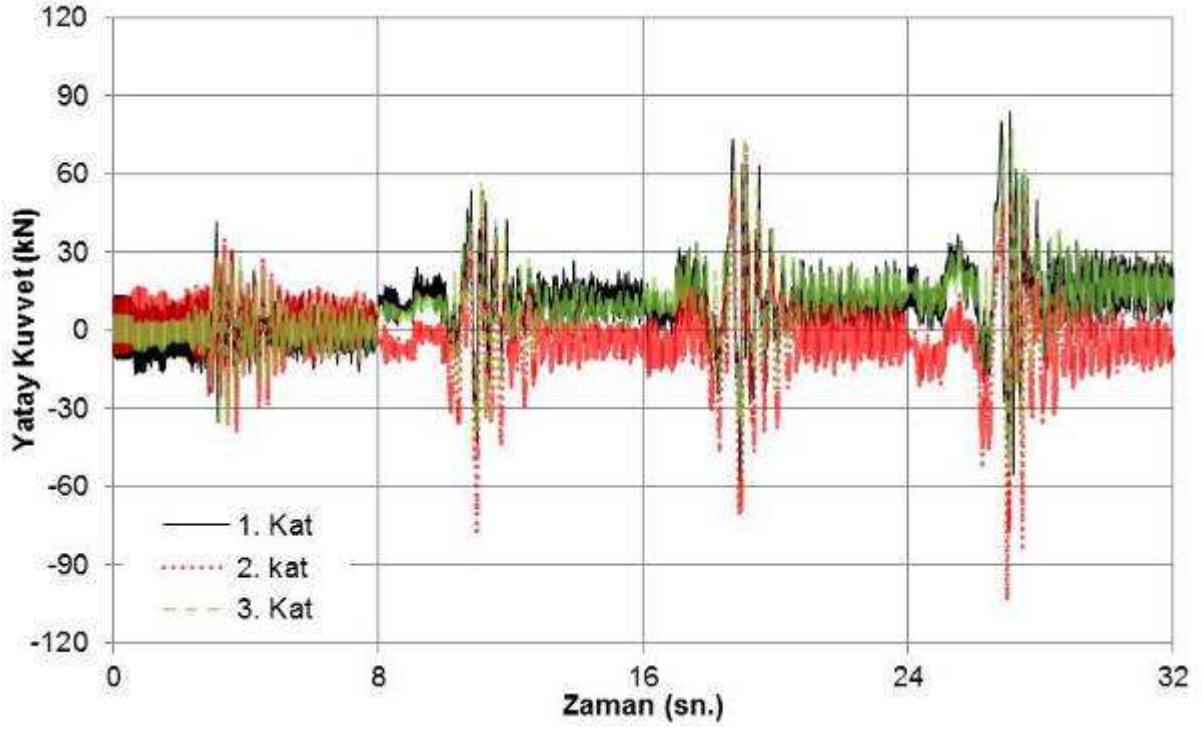




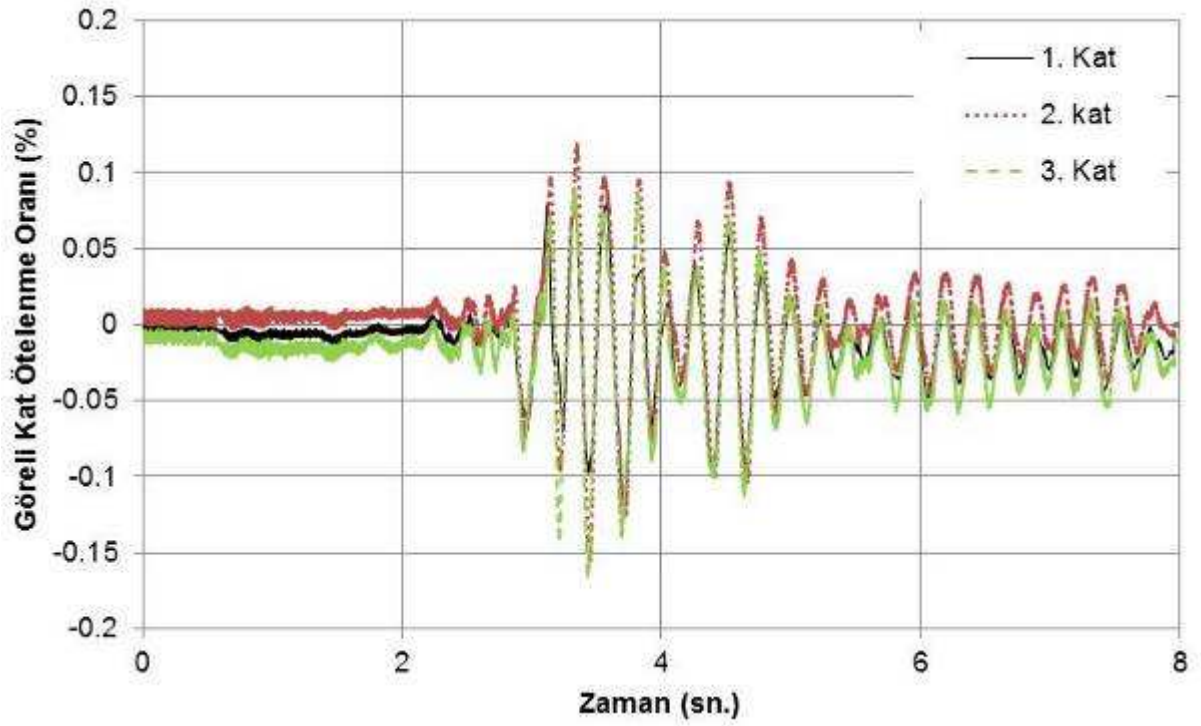
Şekil 3.24. 475 Z3 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri



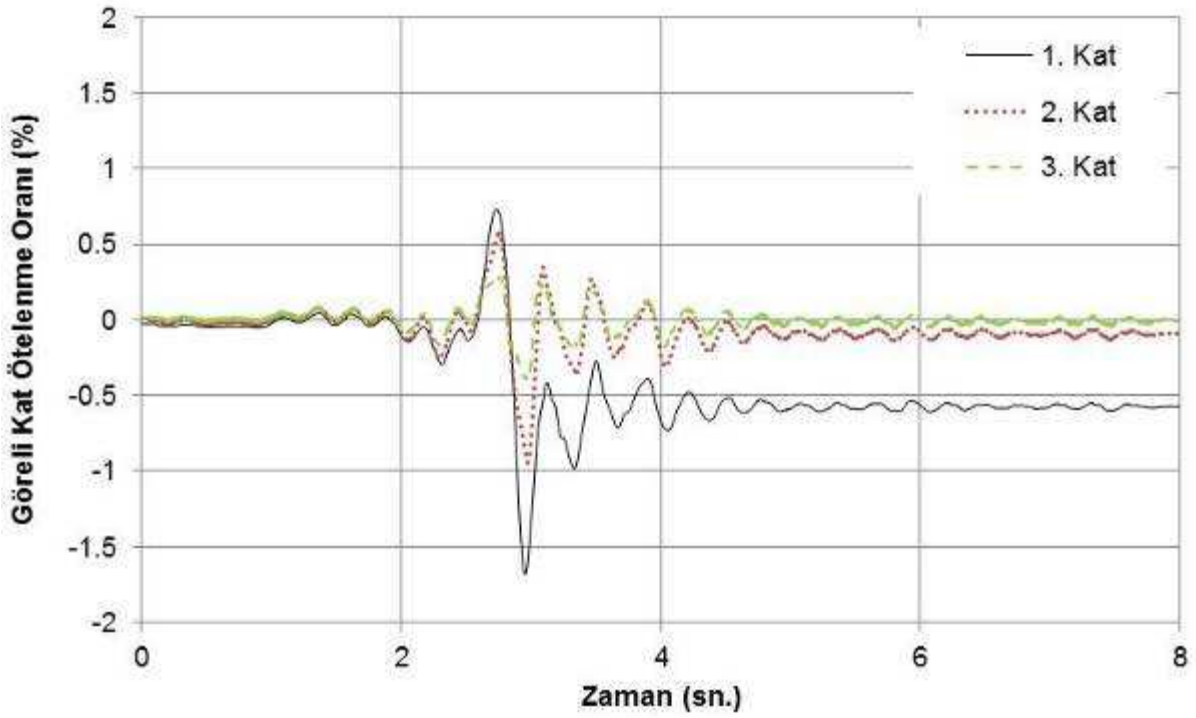
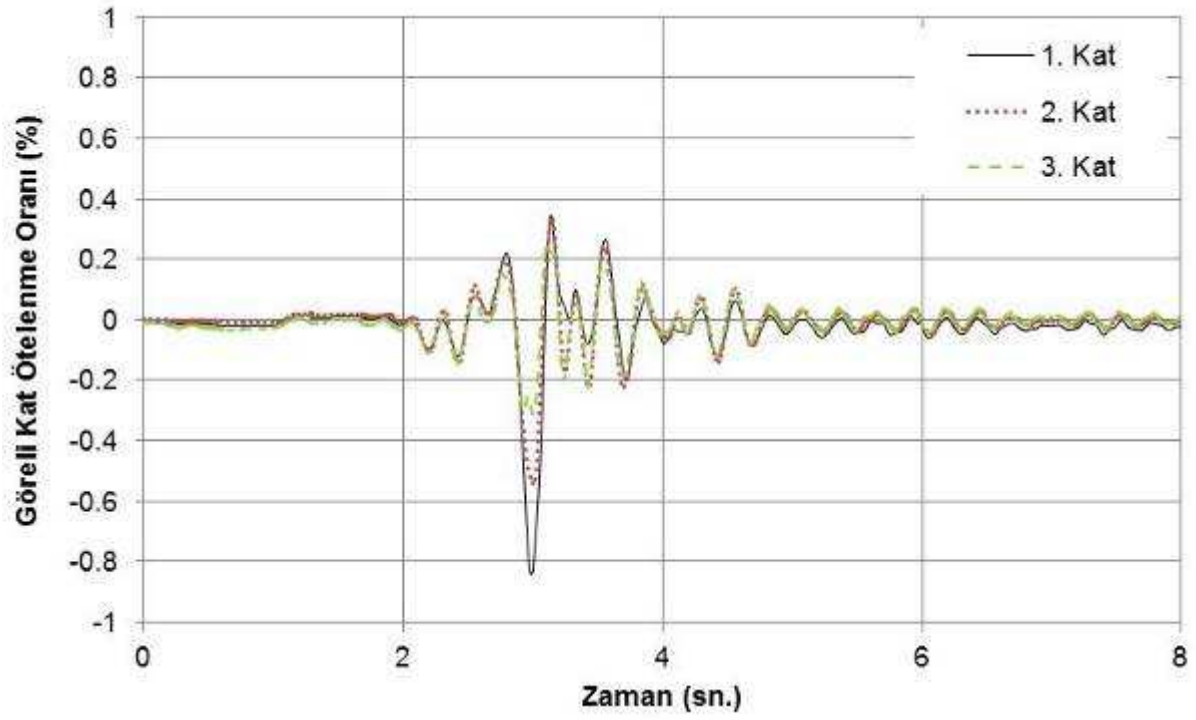
Şekil 3.25. 2475 Z1 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri

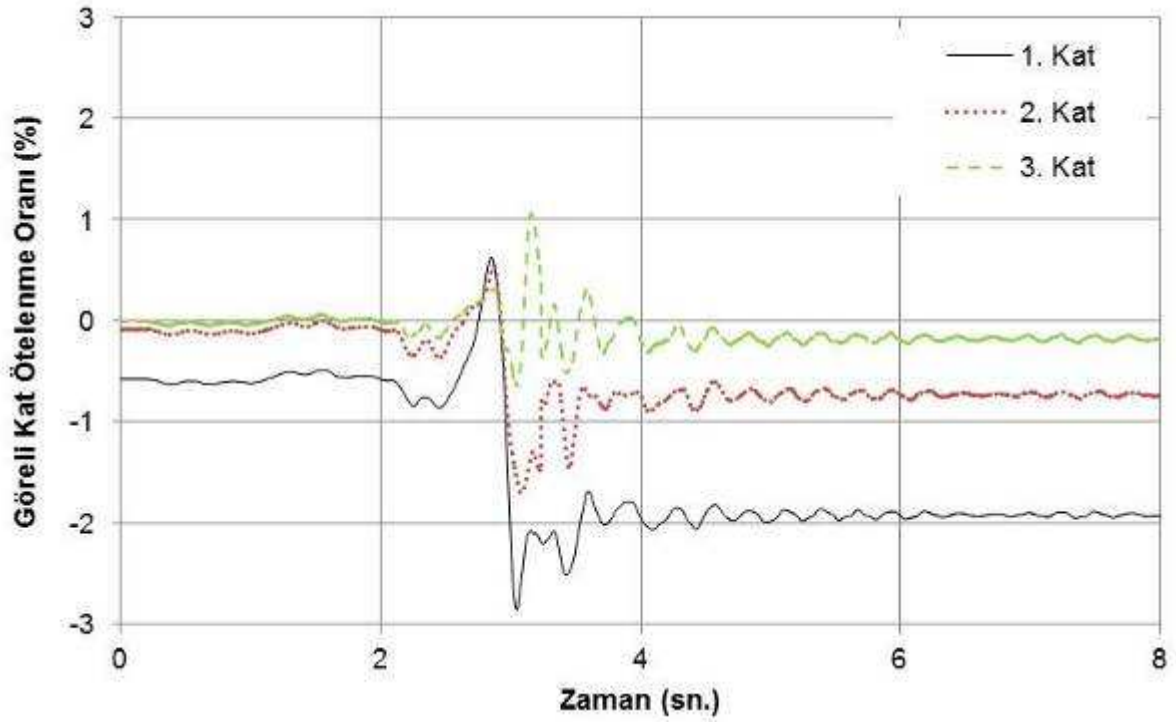


Şekil 3.26. 4 deprem etkisi altındaki kat kesme kuvvetleri

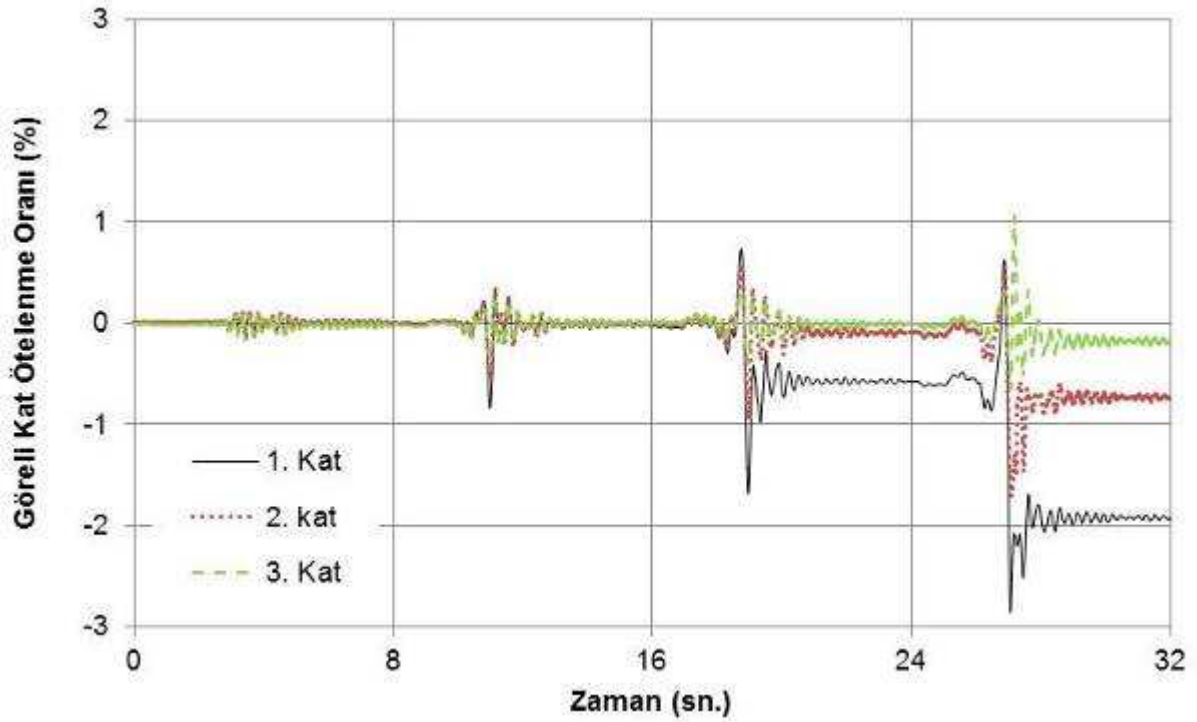


Şekil 3.27. 72 Z1 deprem etkisi altında görel kat ötelenme oranları (%)

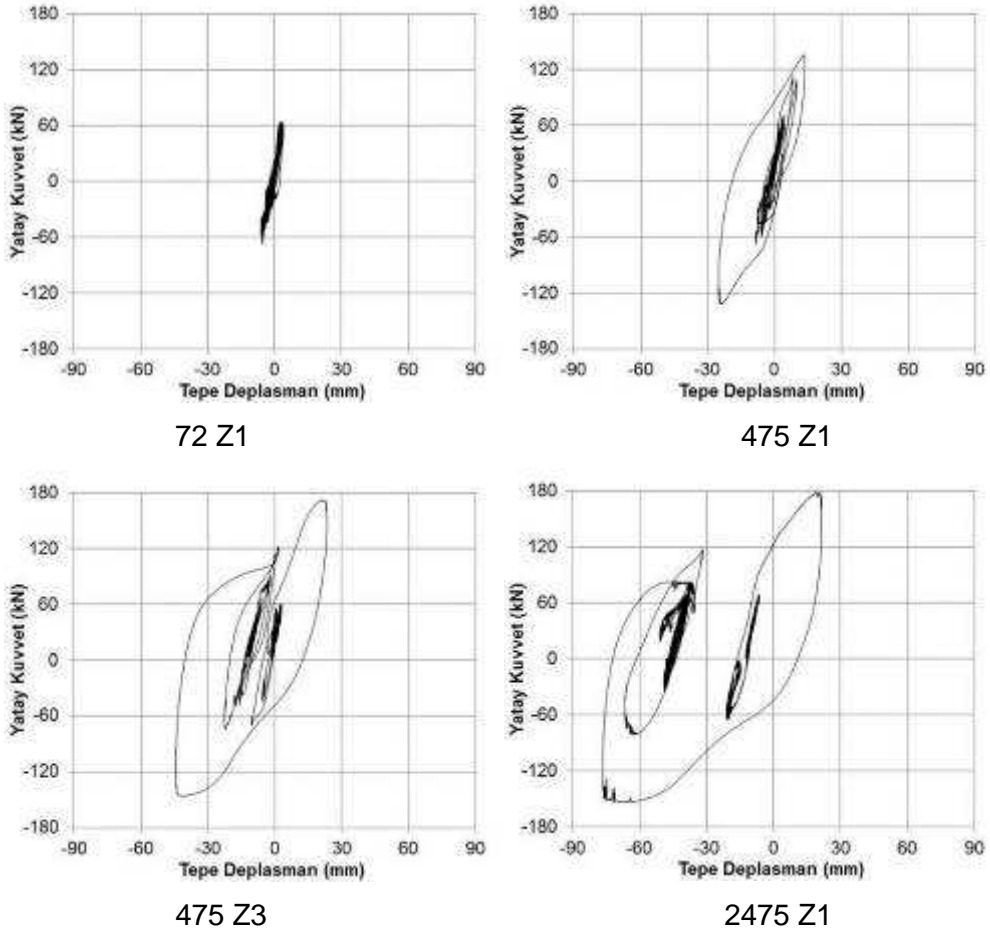




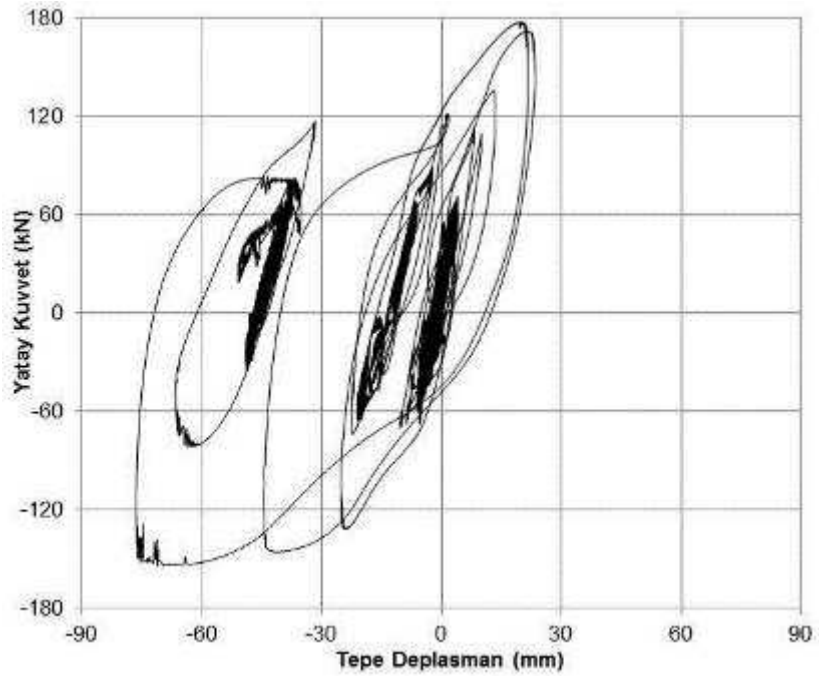
Şekil 3.30. 2475 Z1 deprem etkisi altında görel kat ötelenme oranları (%)



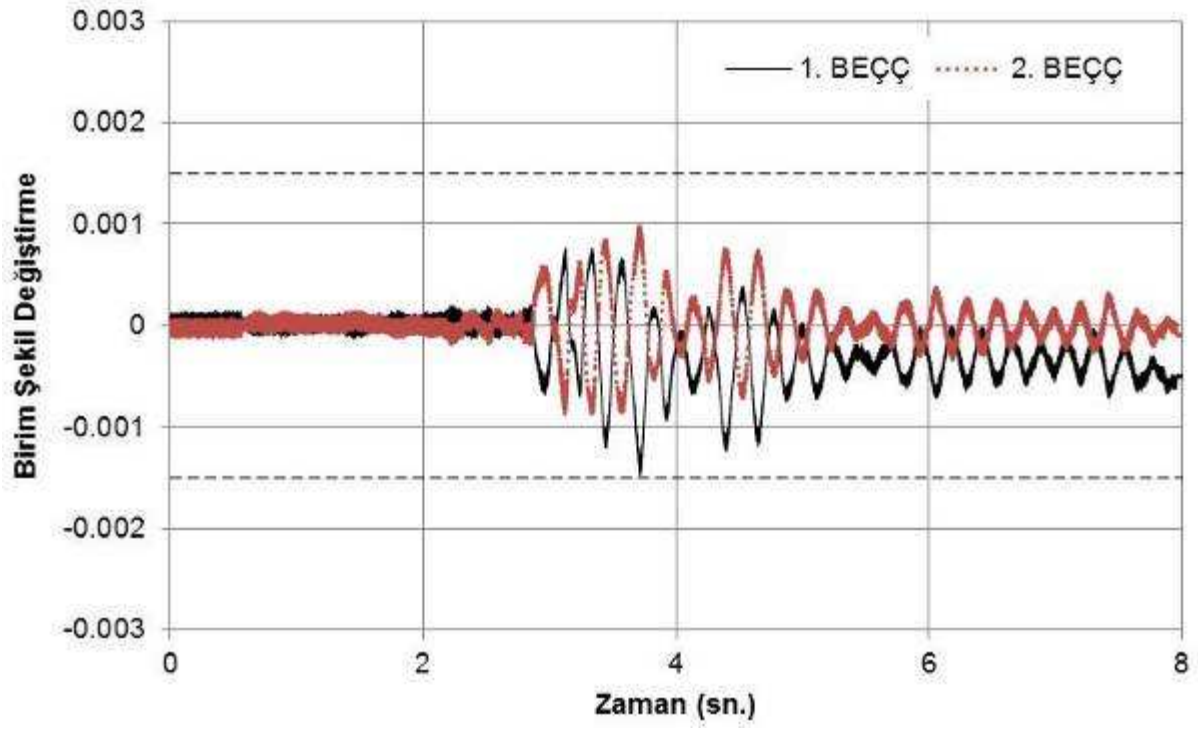
Şekil 3.31. 4 deprem etkisi altında görel kat ötelenme oranları (%)



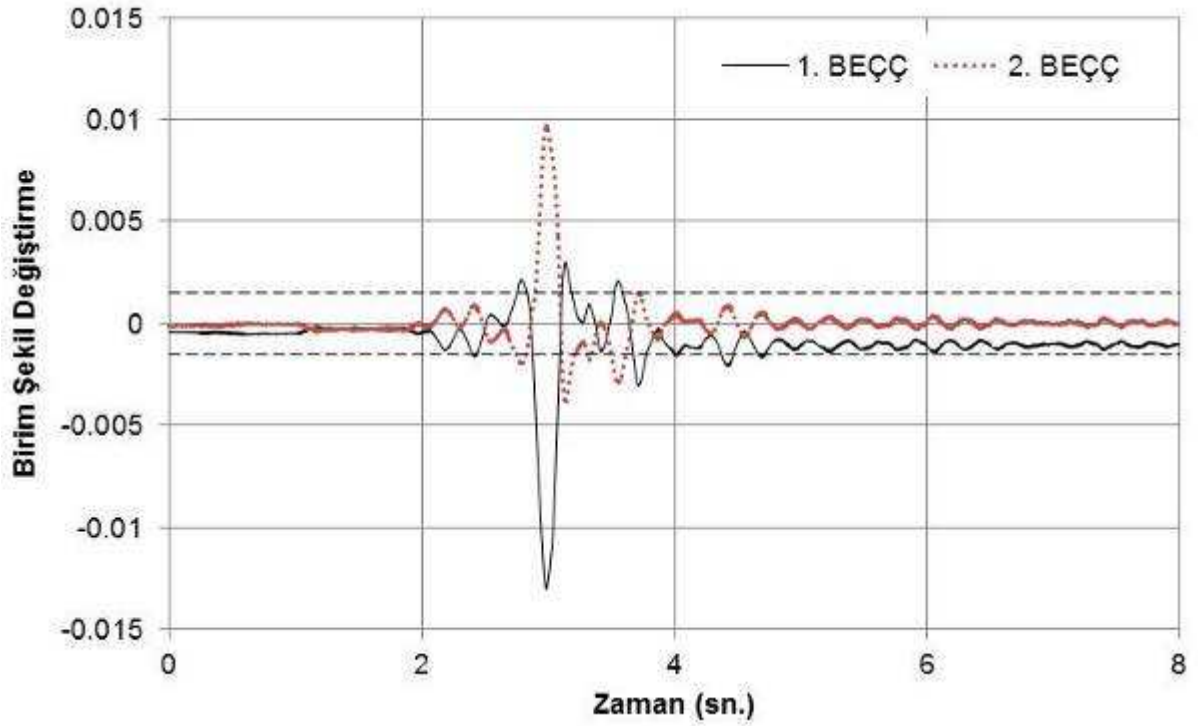
Şekil 3.32. Toplam Kesme Kuvveti – Tepe Deplasman grafikleri



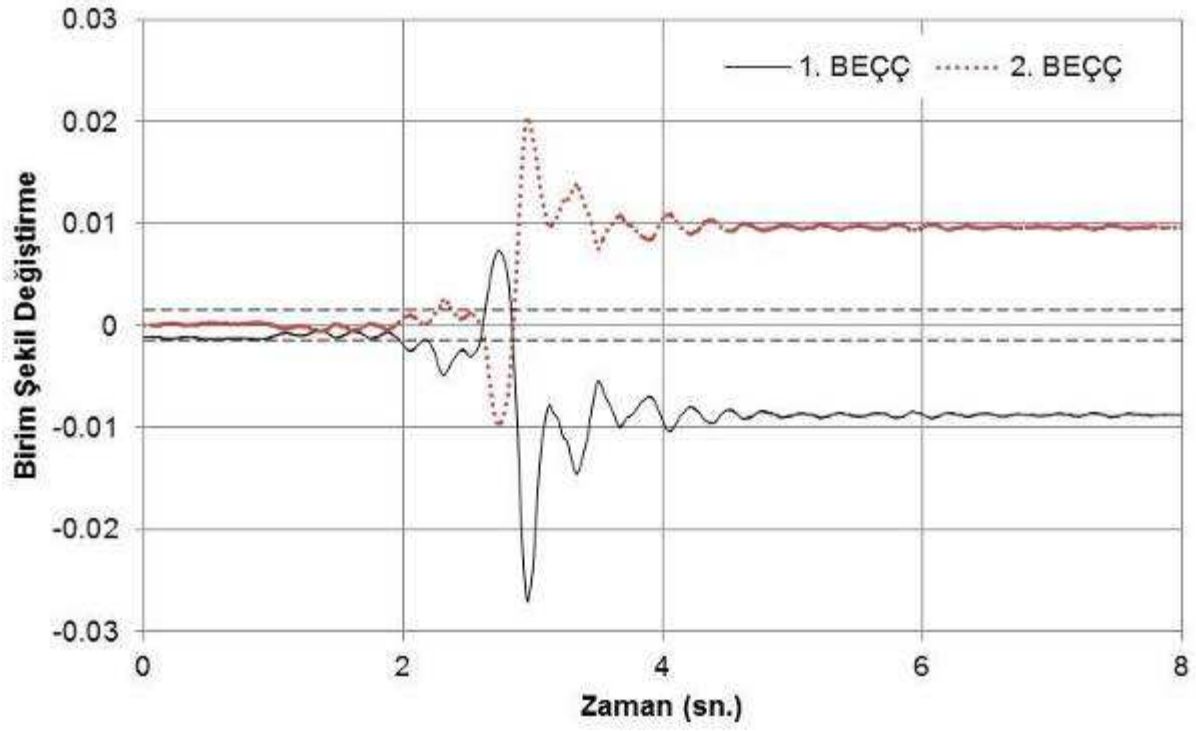
Şekil 3.33. Bütün deneylerin tepe deplasman-yatay kuvvet grafiği



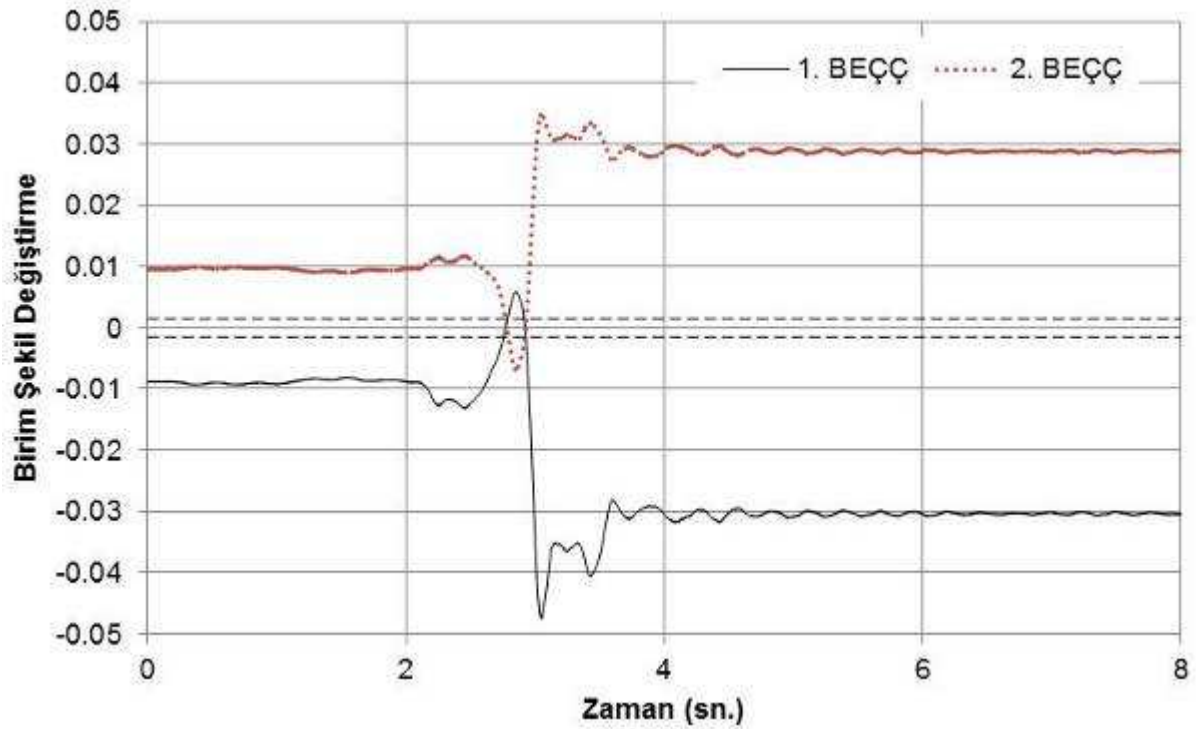
Şekil 3.34. 72 Z1 deprem etkisi altında 1. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme



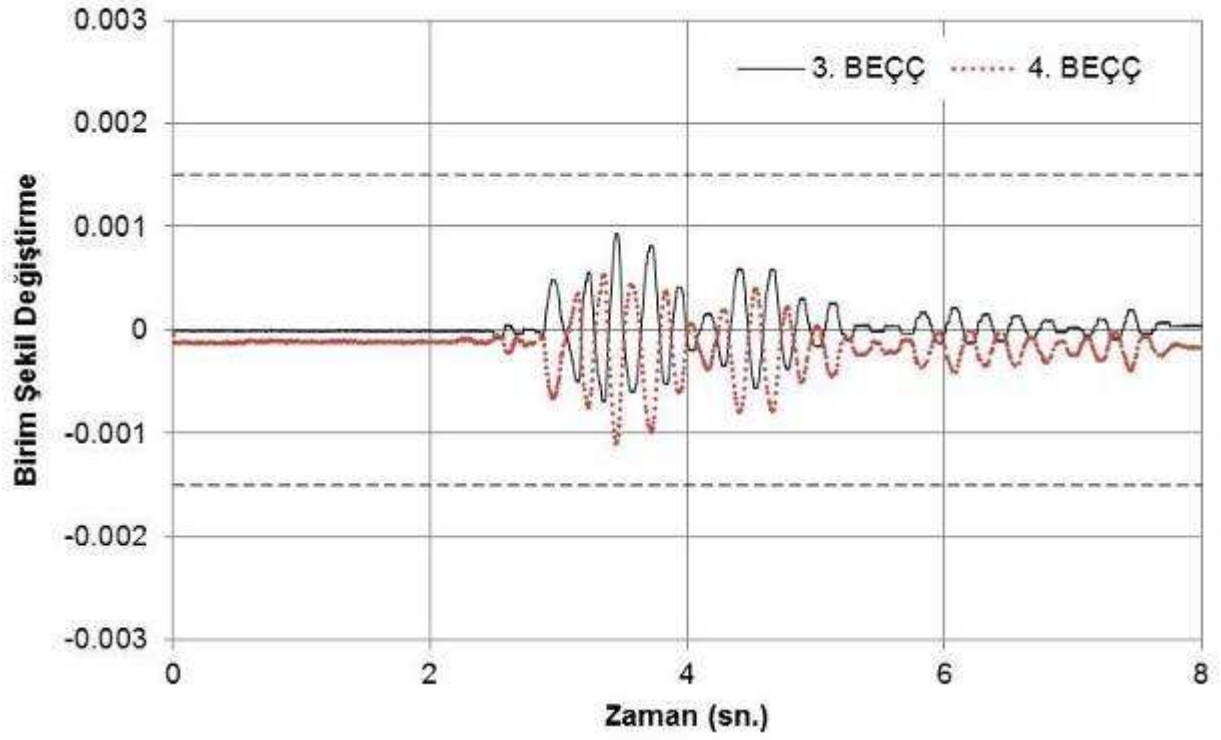
Şekil 3.35. 475 Z1 deprem etkisi altında 1. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme



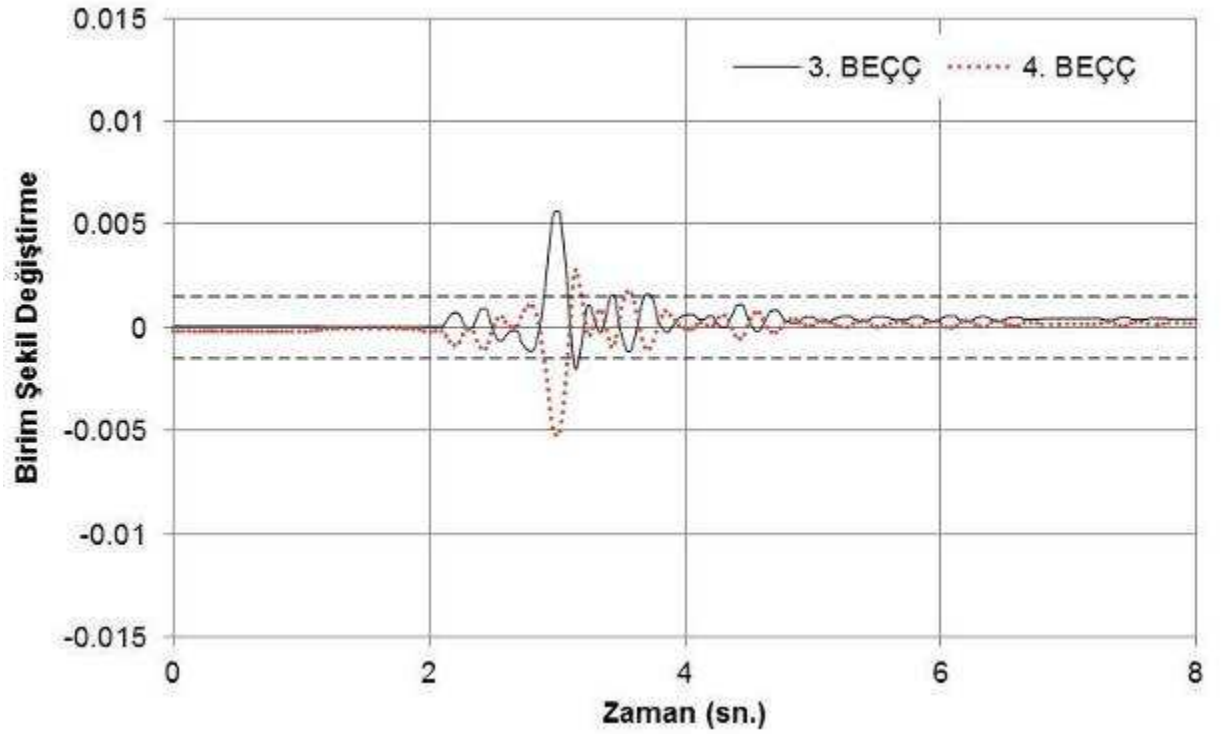
Şekil 3.36. 475 Z3 deprem etkisi altında 1. Kat BEÇÇ birim şekil değişirme



Şekil 3.37. 2475 Z1 deprem etkisi altında 1. Kat BEÇÇ birim şekil değişirme

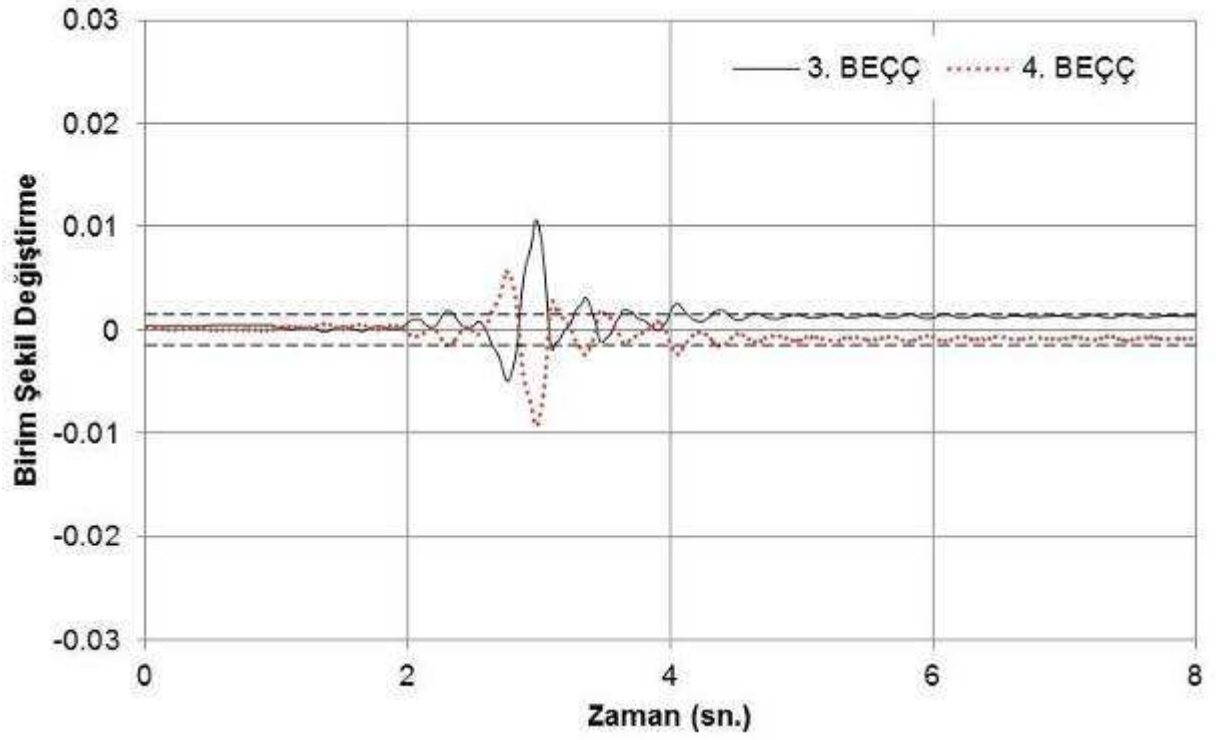


Şekil 3.38. 72 Z1 deprem etkisi altında 2. Kat BEÇÇ birim şekil değişirme

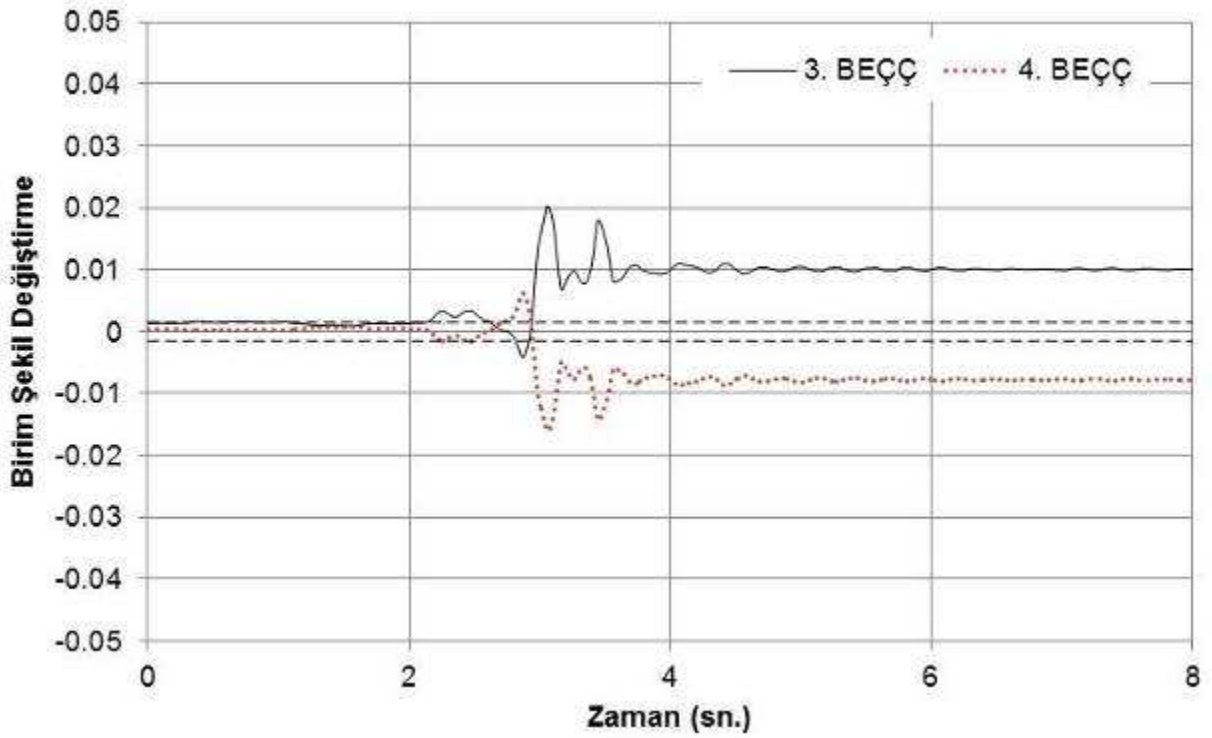


Şekil 3.39. 475 Z1 deprem etkisi altında 2. Kat BEÇÇ birim şekil değişirme

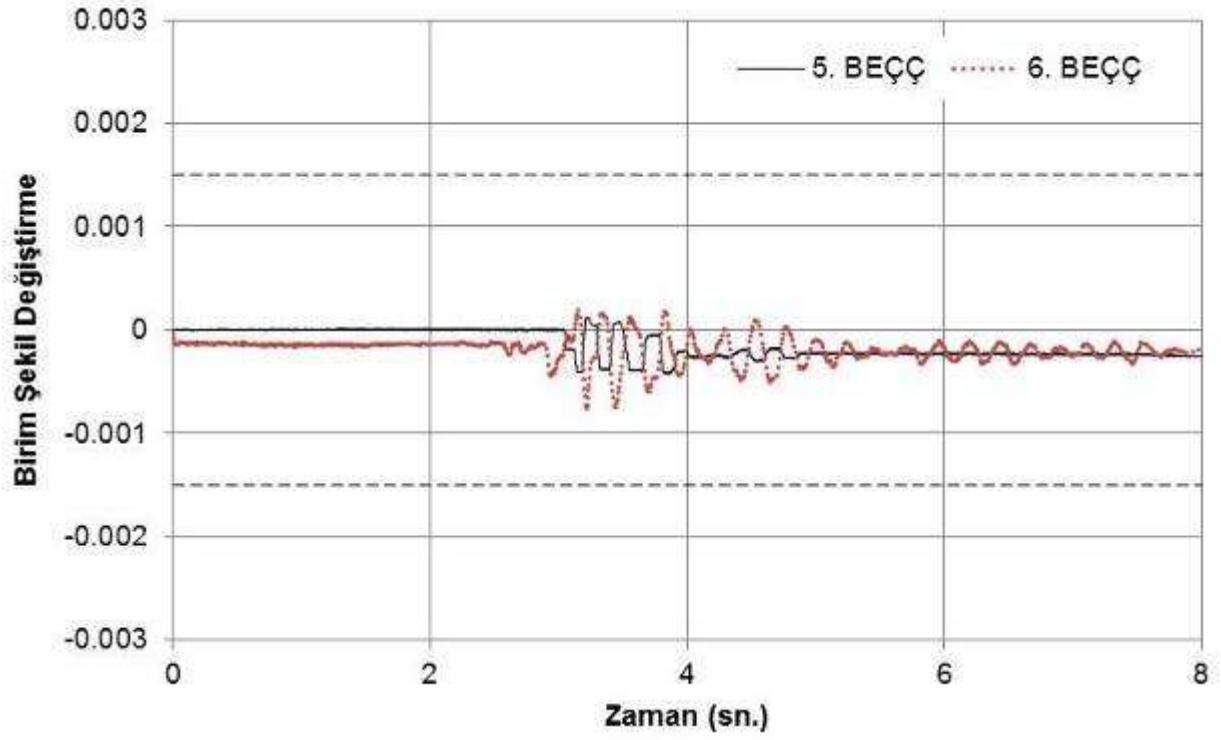




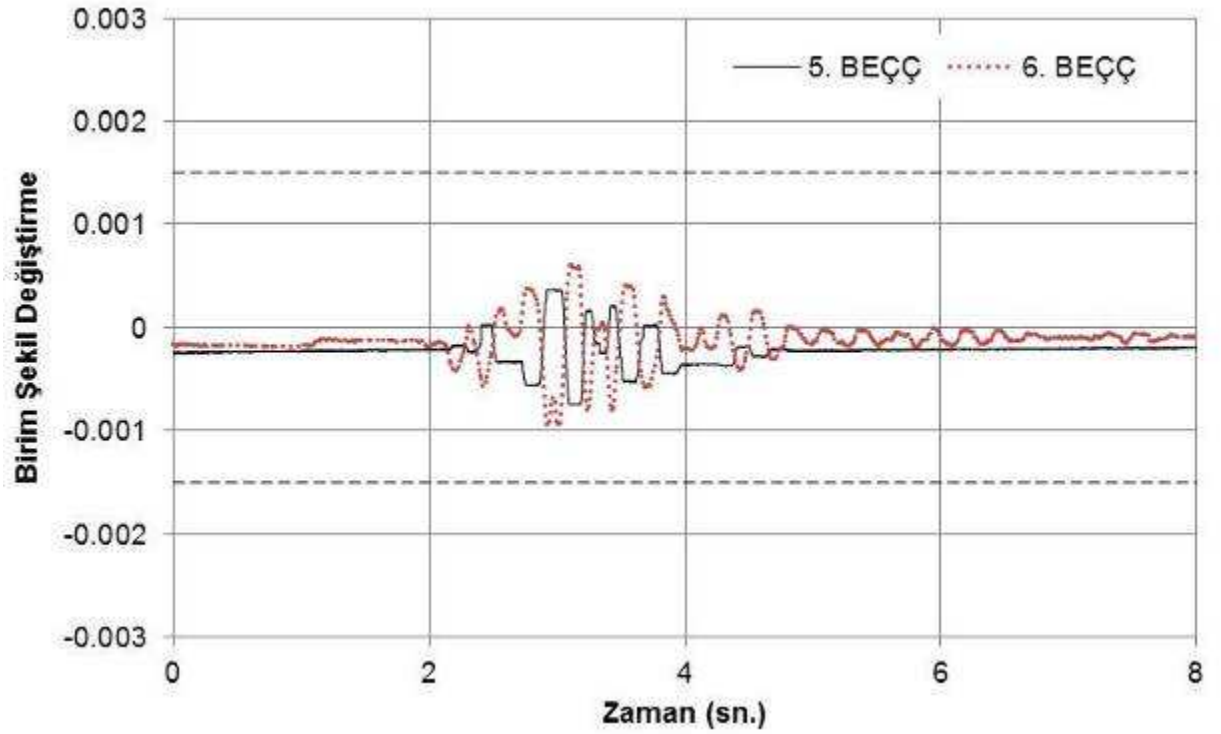
Şekil 3.40. 475 Z3 deprem etkisi altında 2. Kat BEÇÇ birim şekil değişirme



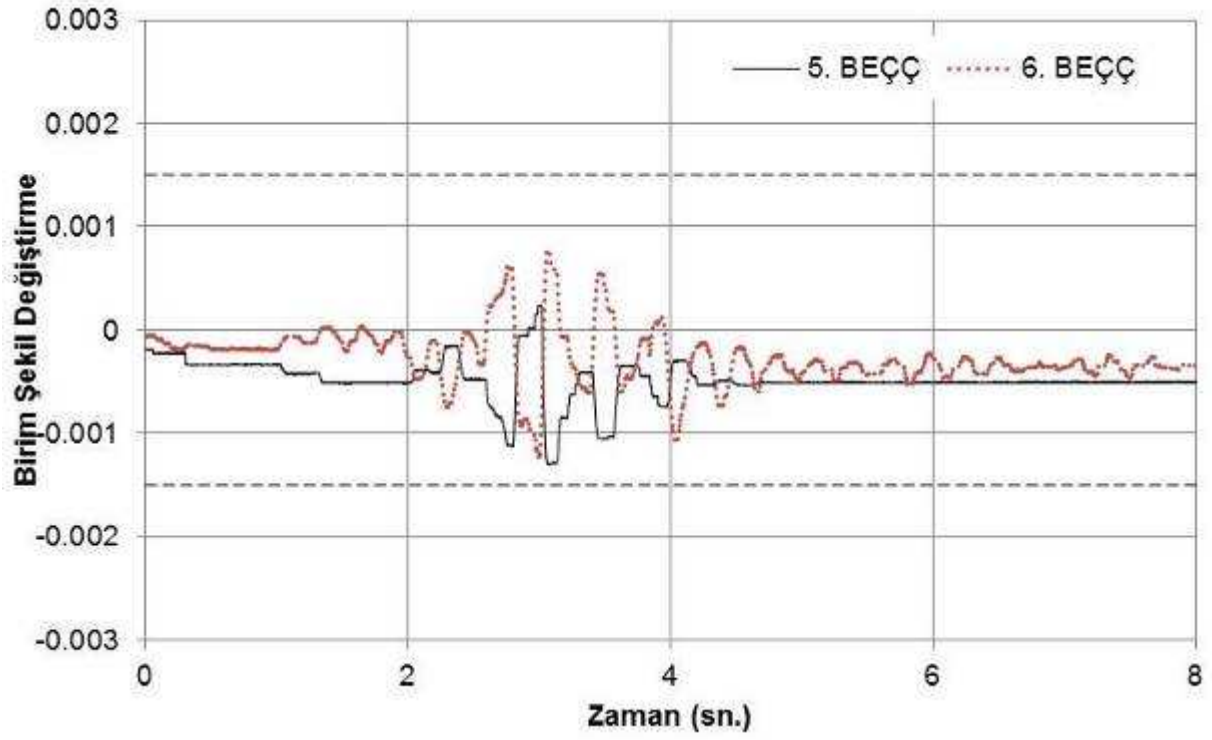
Şekil 3.41. 2475 Z1 deprem etkisi altında 2. Kat BEÇÇ birim şekil değişirme



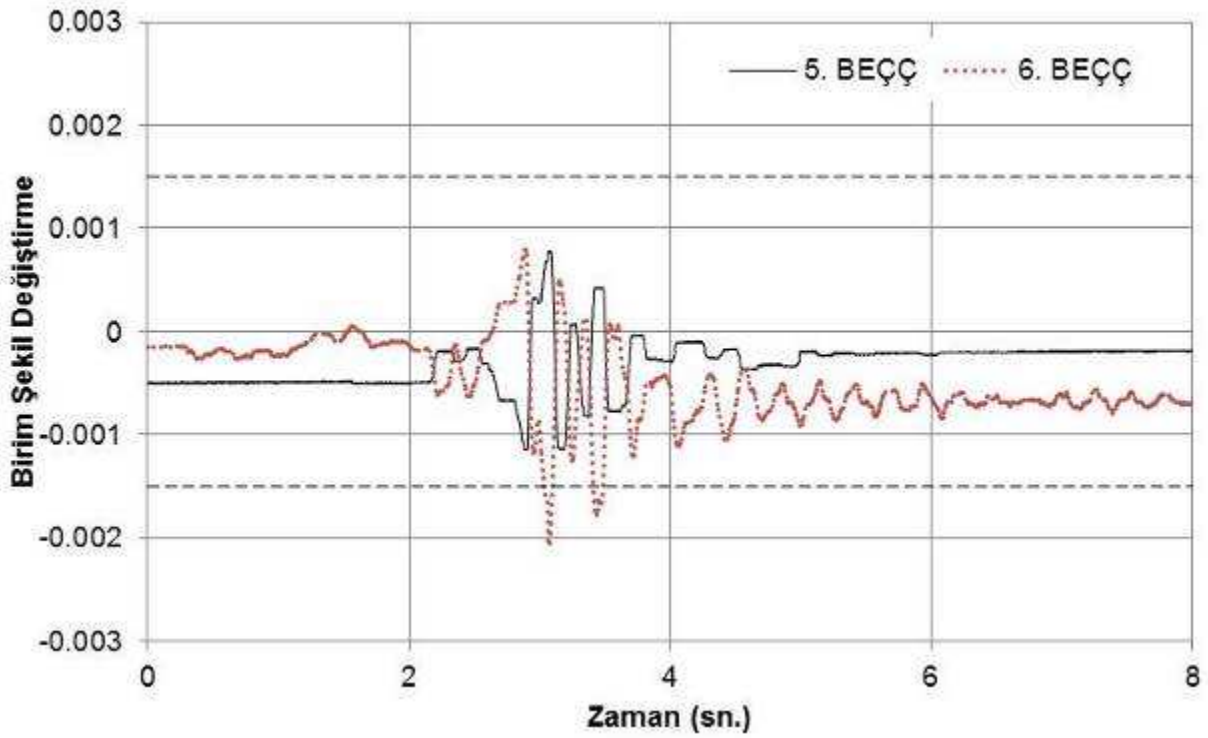
Şekil 3.42. 72 Z1 deprem etkisi altında 3. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme



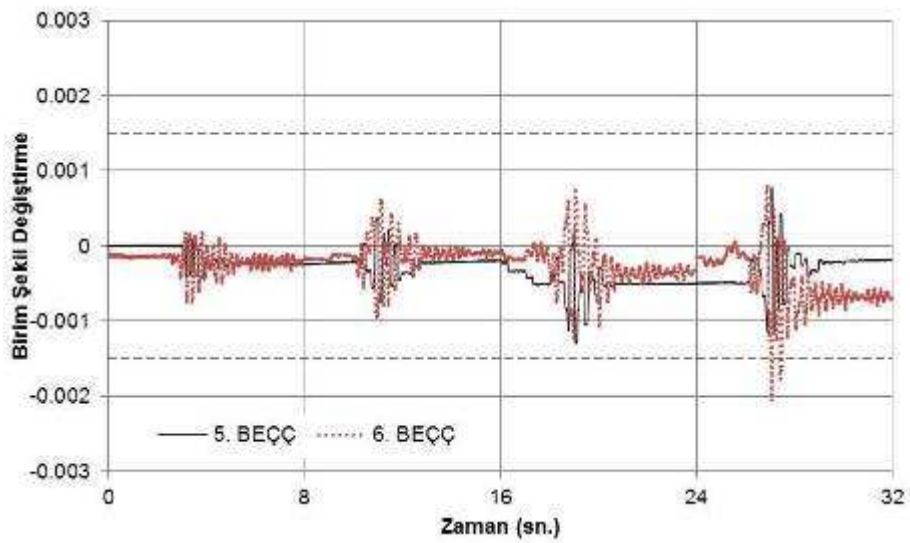
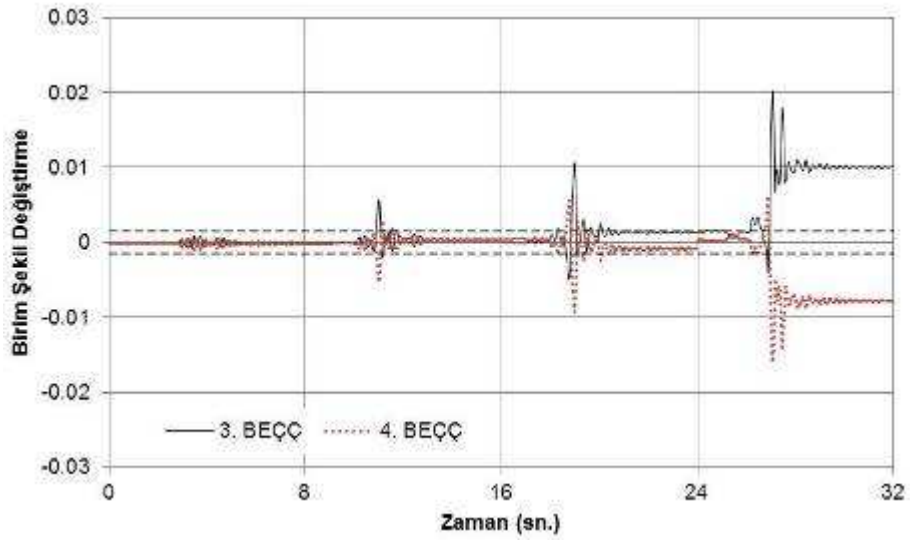
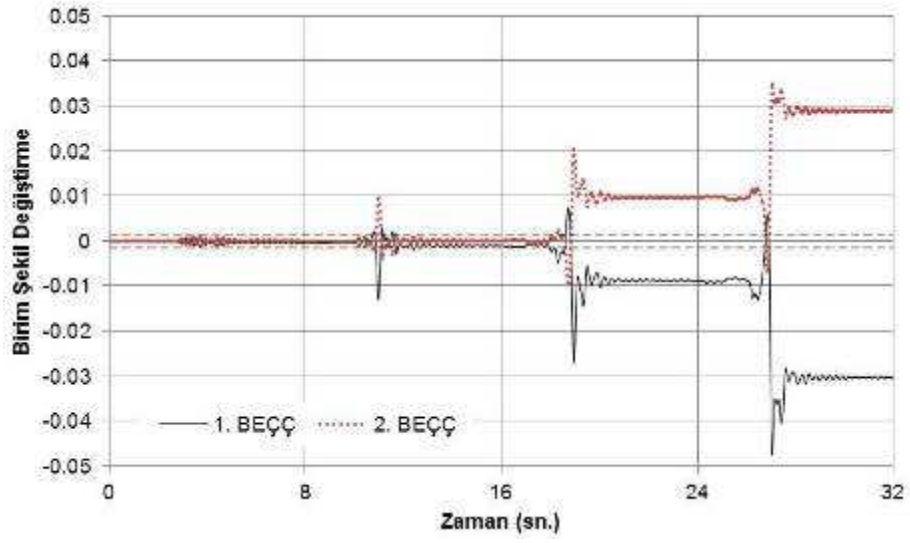
Şekil 3.43. 475 Z1 deprem etkisi altında 3. Kat BEÇÇ birim şekil değiştirme



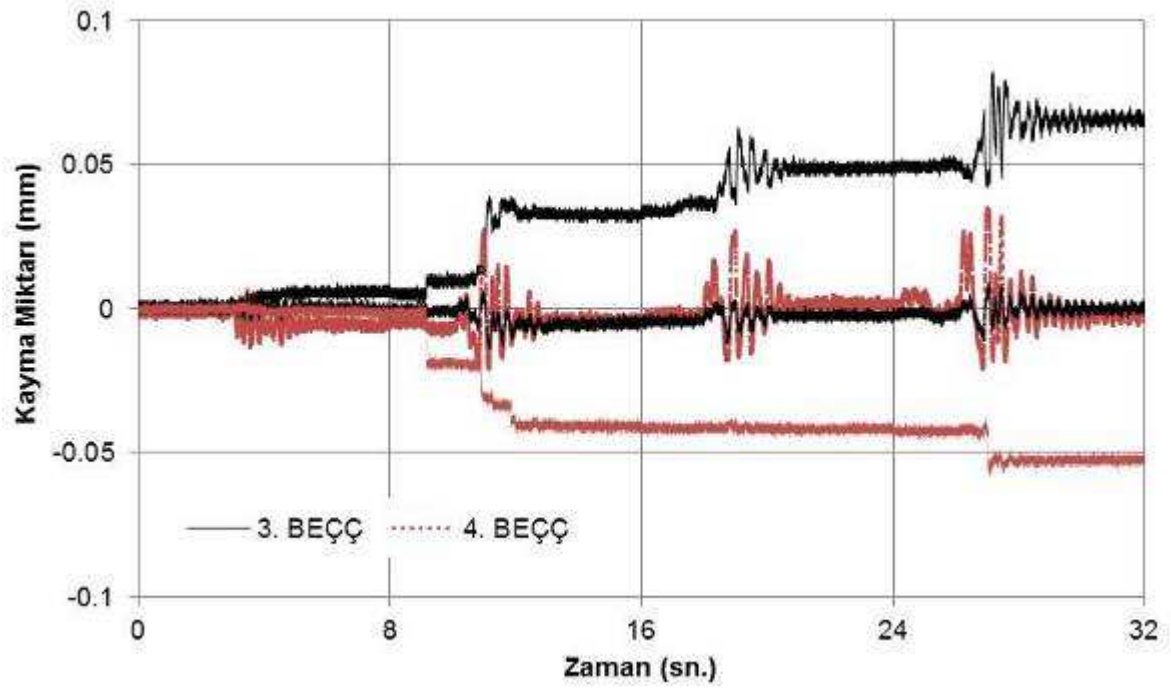
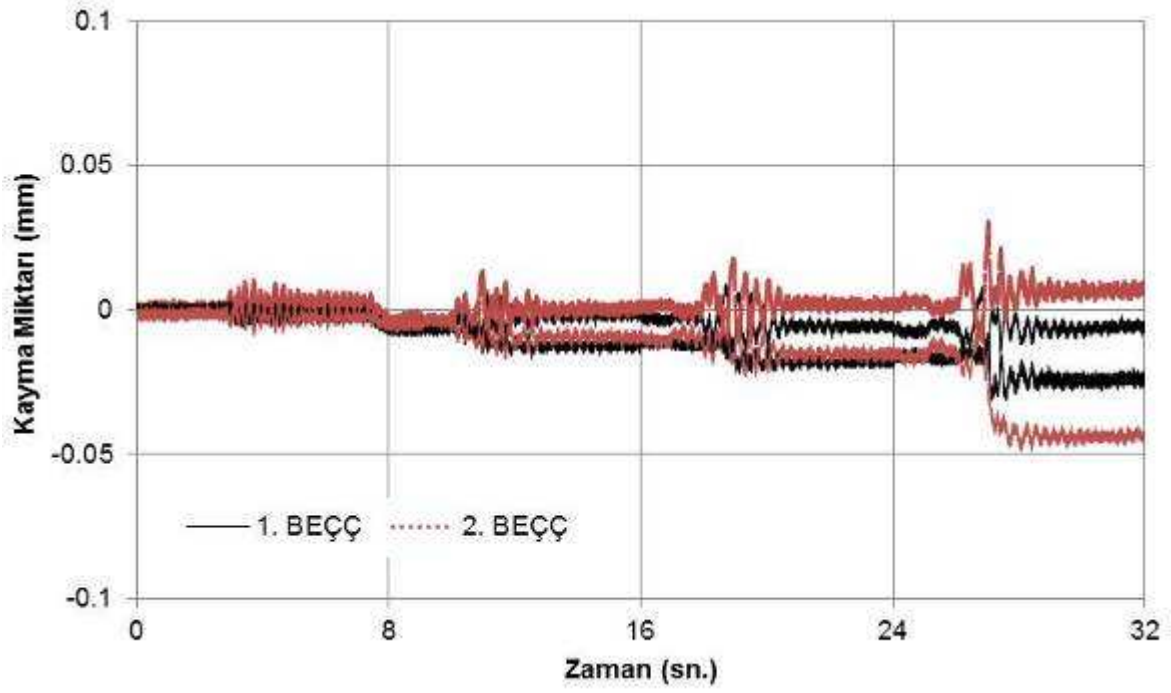
Şekil 3.44. 475 Z3 deprem etkisi altında 3. Kat BEÇÇ birim şekil değişirme



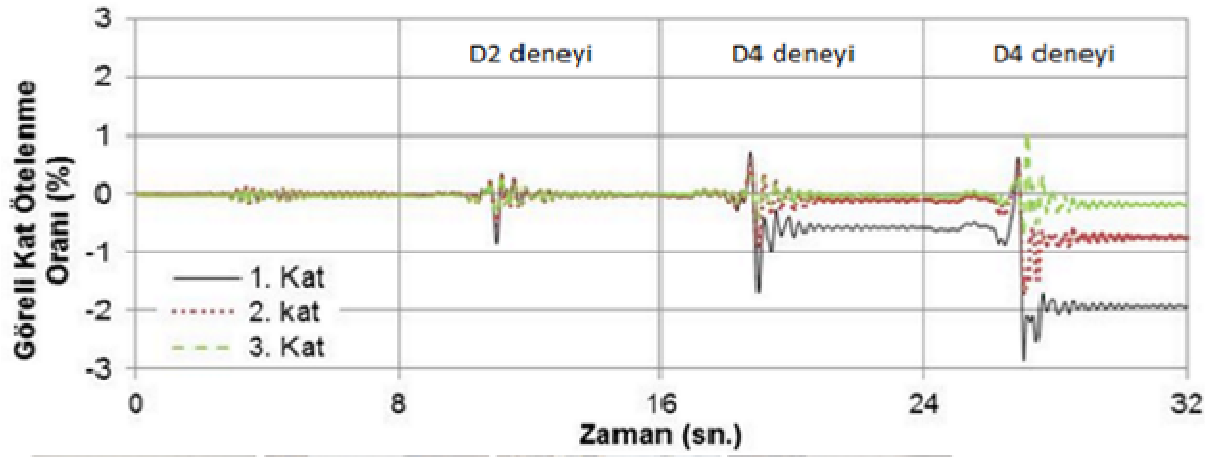
Şekil 3.45. 2475 Z1 deprem etkisi altında 3. Kat BEÇÇ birim şekil değişirme



Şekil 3.46. BEÇÇ'lere ait birim şekil değiştirme



Şekil 3.47. 1. ve 2. Katta Bulunana Yüksek Mukavemetli Bulonlarda Kayma Miktarı



D2 deneyi



D3 deneyi



D4 deneyi

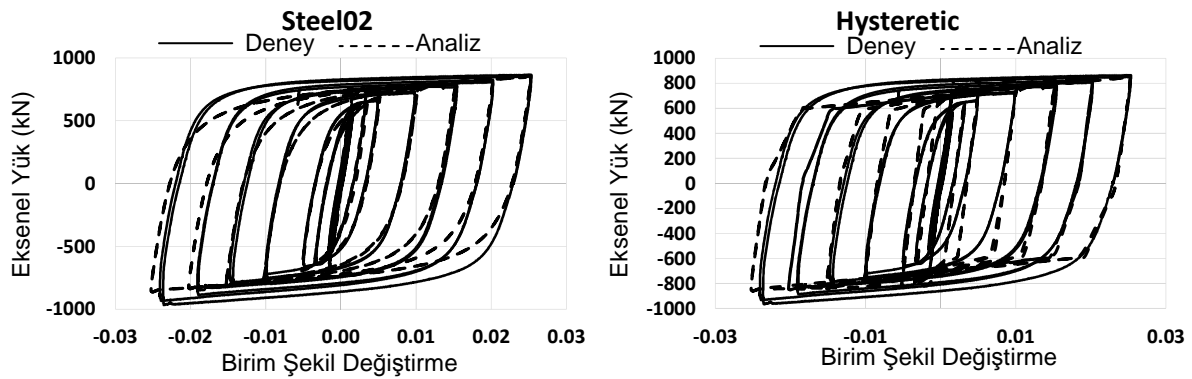
Şekil 3.48. Deney esnasında meydana gelen hasar

#### 4. SAYISAL SİMULASYONLAR VE PERFORMANS İRDELEMESİ

Sayısal simülasyonlar çalışmasında hem BEÇÇ'li çerçeve hemde gerçek bir yapının BEÇÇ ile güçlendirilmesi durumunda söz konusu yapıların davranışı ve performansı değerlendirilmiştir. Öncelikle Bölüm 2'de test edilen BEÇÇ elemanlarının sayısal simülasyonu yapılmıştır ve kalibrasyon parametreleri çıkartılmıştır. Daha sonra 3 açıklıklı 3 katlı referans ve BEÇÇ ile güçlendirilmiş çerçeve simülasyonları yapılmıştır. Bu bölümde ayrıca 3 katlı gerçek bir yapının BEÇÇ ile güçlendirilmiş ve performansı incelenmiştir. Bu bölümdeki sayısal simülasyonlarda OPENSEES açık sümulasyon platformu programı kullanılmıştır.

##### 4.1. BEÇÇ ELEMANLARIN SİMULASYONLARI

Betonarme yapıların BEÇÇ ile güçlendirilmesi durumunda BEÇÇ elemanları çerçeve içerisine diyagonal veya ters V çelik çapraz (chevron brace) olacak şekilde bağlanmaktadır. Bu bağlantının moment aktarmayan mafsallı özelliğinde olması zaten kusurlu olan betonarme çerçeve elemanlarına ek istemlerin yaratılmaması bakımından önemlidir. Dolayısı ile BEÇÇ'li çerçevelerin sayısal simülasyonlarında BEÇÇ elemanının plastikleşen kısmını kafes eleman (truss) olarak modellenmesi mümkündür. BEÇÇ elemanları aksenal basınç altında burkulmadığı için kafes olarak modellenebilir. Bu durumda Bölüm 2'de yapılan eleman bazındaki deneylerden birinin sayısal simülasyonu yapılmıştır. Bu işlem özellikle BEÇÇ ile güçlendirilecek 3 katlı 3 açıklıklı betonarme çerçeve ve gerçek bir yapının simülasyonlarının daha doğru ve gerçekçi elde edilmesi bakımından önem arz etmektedir.



Şekil 4.1. BEÇÇ elemanın OPENSEES programı ile simülasyonu

OPENSEES programında Bölüm 2'de test edilen eleman kafes eleman olarak birebir modellenmiştir. Bu modelde *Steel02* ve *Hysteretic* olmak üzere iki farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan yükleme protokolü altında BEÇÇ elemanının aksenal yük

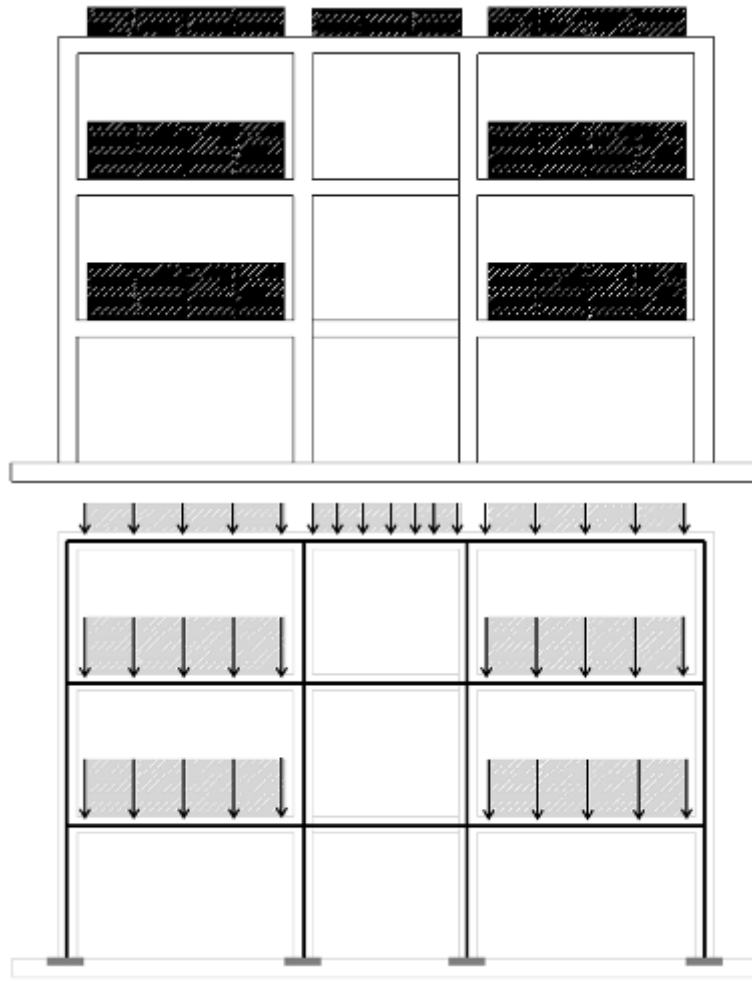


eksenel deplasman değişimi Şekil 4.1'de görülmektedir. Şekil 4.1'den de görüleceği gibi BEÇÇ elemanın histeretik davranışı hem Steel02 hemde Hysteretic malzeme modelinin kalibrasyonu yapılarak yeterli seviyede temsil edilebilmiştir. Sonuç olarak gerek BEÇÇ'li deney elemanının ve gerekse BEÇÇ ile güçlendirilecek gerçek yapının modellenmesinde BEÇÇ elemanın hangi parametrelere bağlı olarak modelleneceği ortaya çıkarılmıştır.

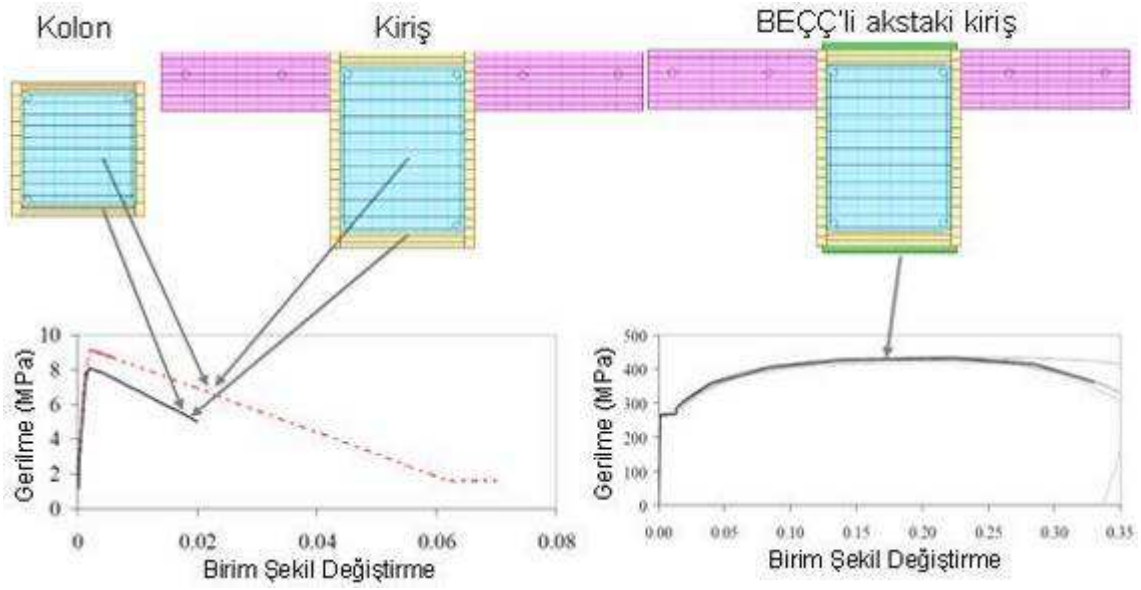
#### 4.2. REFERANS VE BEÇÇ'Lİ ÇERÇEVELERİN MODELİ

BEÇÇ'li çerçeve simulasyonun yapılabilmesi için ilk olarak referans çerçevesinin simulasyonu yapılmıştır. Referans çerçevesinin eleman boyutları ve kesitleri deney ile aynı olacak şekilde belirlenmiştir. Çerçeve kolon ve kiriş elemanları OPENSEES programında mevcut olan *nonlinearBeamColumn* eleman modeli ile modellenmiştir. Kent ve Park (1979)'un sargılı ve sargısız modelleri betonarme kolonların ve kirişlerin beton malzeme modeli olarak kullanılmıştır. Eksenel yük altındaki kolonlar için ikinci mertebeye etkileri (P- $\Delta$  etkisi) dikkate alınırken kirişler için bu etki dikkate alınmamıştır. Yapı üzerindeki yükler deney elemanına nasıl etki ettirilmiş ise o şekilde kirişlere uygulanmıştır (Şekil 4.2). Ayrıca kolon ve kirişlerin kendi ağırlıklarında analizlerde hesaba katılmıştır. Analizlerde kütleler düğüm noktalarında yığılı olarak alınmış ve %5 oranında Rayleigh kritik sönüm verilmiştir. Referans ve BEÇÇ'li çerçevedeki kolon ve kirişler sargılı ve sargısız beton bölgeleri gerekli sayıda liflere (fiber) bölünmüştür (Şekil 4.3). Ayrıca Şekil 4.3'den de görüleceği üzere BEÇÇ'li çerçevenin orta aksındaki kirişin altına ve üstüne Bölüm 3'de bahsedildiği gibi 5mm plaka eklenmiştir. Bu plakaların kiriş elemana bağlantısına bakıldığında kompozit eleman davranışı göstereceği için kiriş ve plakaların birlikte çalıştığı bir model oluşturulmuştur. BEÇÇ elemanlarının kolon ve kolon-kiriş birleşim düğüm noktasına bağlantısı bayrak levhaları ile sağlanmıştır. Söz konusu bayrak levhaları ise elastik davranış göstermektedir. Dolayısı ile BEÇÇ modellenmesinde BEÇÇ'nin plastik kısmı (ÇE'nin plastik kısmı) OPENSEES'deki *truss* elemanı, plastik bölgeden kolon kiriş birleşim noktasına kadar olan kısmı ise rijit eleman olarak modellenmiştir (Şekil 4.4). OPENSEES programı ile hem referans çerçevesi hemde BEÇÇ'li çerçeve linear olmayan zaman tanım alanında analizleri yapılmıştır (Şekil 4.5).

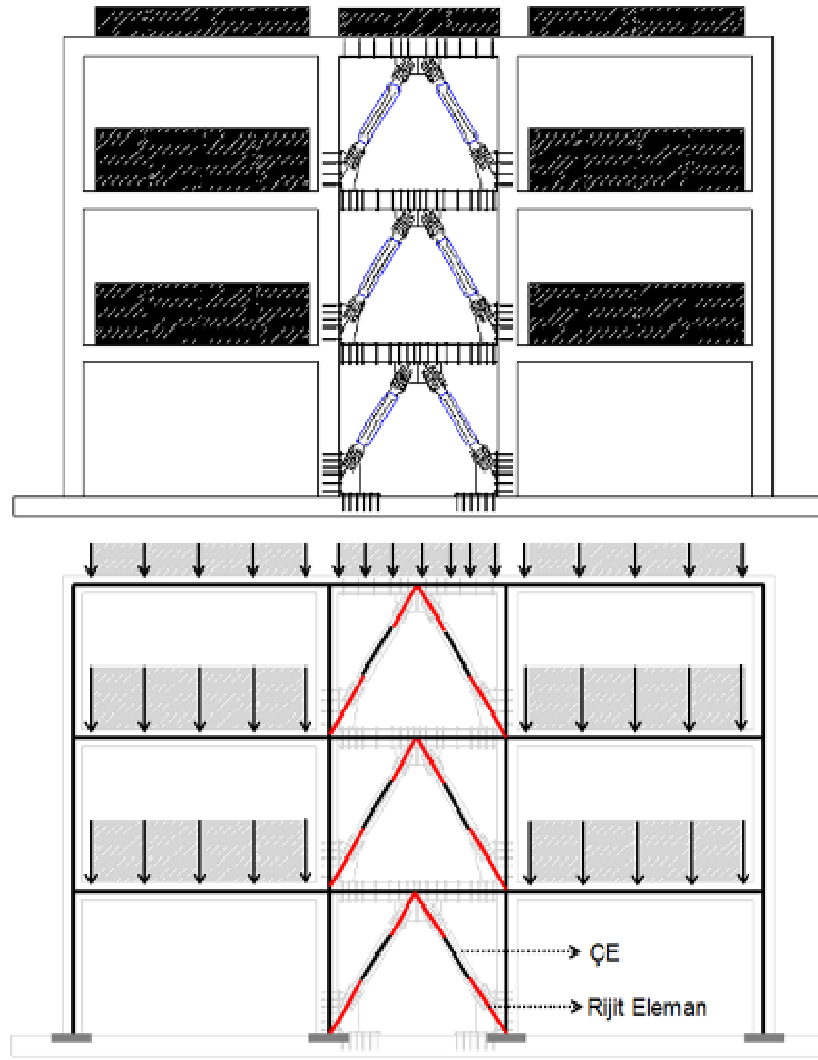




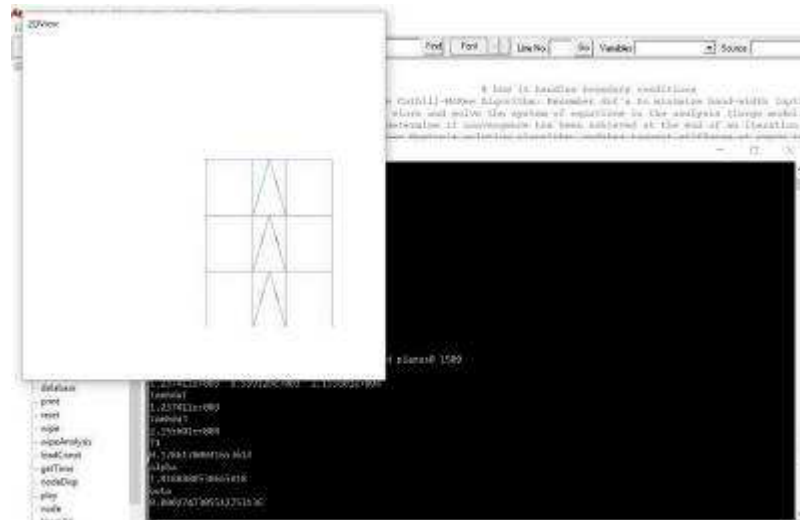
Şekil 4.2. Referans çerçevesinin OPENSEES modeli için eleman detayı



Şekil 4.3. Kolon ve kirişler için OPENSEES modeli



Şekil 4.4. BEÇÇ'li çerçevenin OPENSEES modeli için eleman detayı

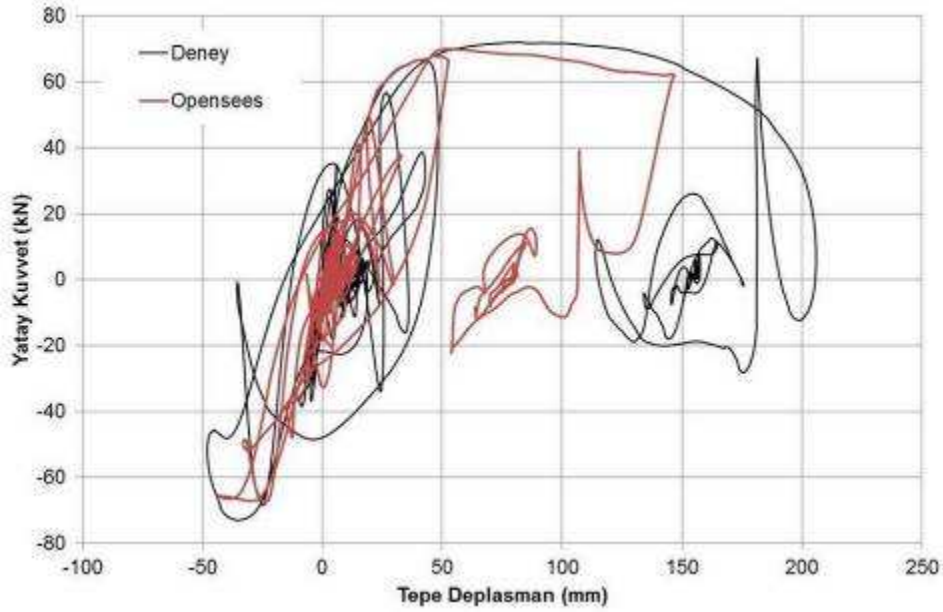


Şekil 4.5. OPENSEES Modeli

### 4.3. ANALİZ SONUÇLARI

#### 4.3.1. REFERANS DENEY ELEMANI MODELİ

Referans çerçevesi için oluşturulan model ile yapılan analizlerde deney sonuçları belli bir yakınlığa kadar tahmin edilebilmiştir. Şekil 4.6'de görüldüğü gibi OPENSEES modeli referans çerçevesinin yatay yük taşıma kapasitesini oldukça iyi simule edebildiği halde aynı başarı deplasman bakımından yakalanamamıştır.

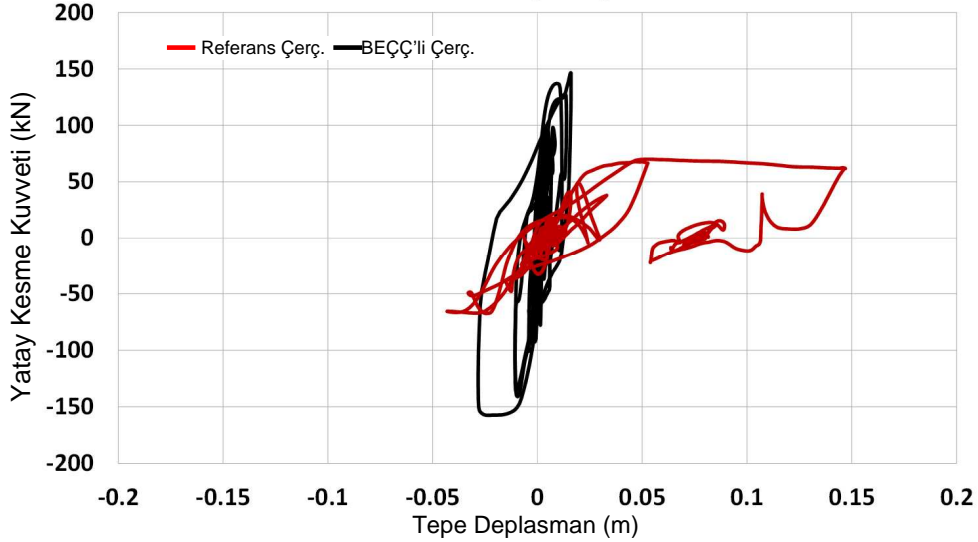


Şekil 4.6. Referans çerçevesinin simülasyonu (yatay kuvvet – tepe deplasman)

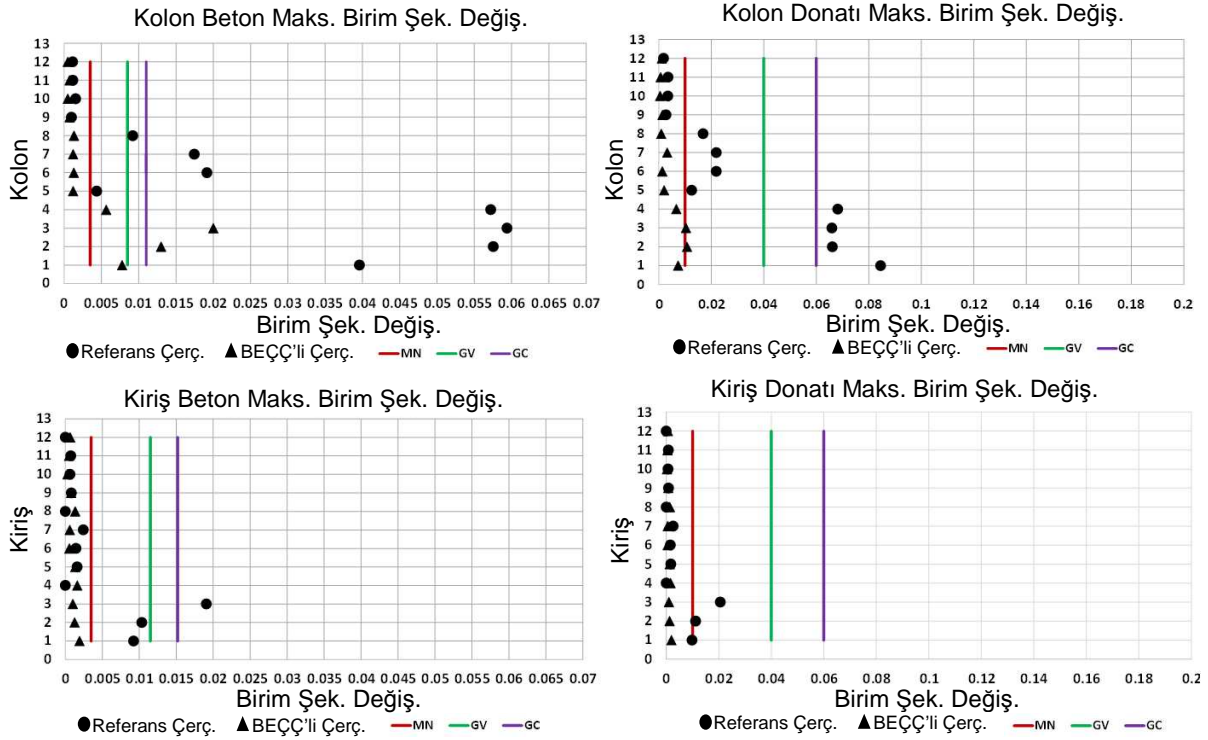
#### 4.3.2. BEÇÇ'Lİ DENEY ELEMANI MODELİ

BEÇÇ'li çerçeve için oluşturulan model ile yapılan analizlerde deney sonuçları belli bir yakınlığa kadar tahmin edilebilmiştir. Şekil 4.7'de görüldüğü BEÇÇ'li çerçevesinin yatay yük taşıma kapasitesini oldukça iyi simule edebildiği halde aynı başarı deplasman bakımından yakalanamamıştır. Şekil 4.8 referans ve BEÇÇ'li çerçevenin OPENSEES programı ile elde edilen analiz sonuçlarını beton ve donatı birim uzama bakımında göstermektedir. Aynı grafikte TDY 2007'ye göre eleman bazında performans değerlendirmesinde kullanılan beton ve donatı birim şekil değiştirme limitleri mevcuttur. Dolayısı ile bu şekilden de görüleceği üzere referans çerçevesi yapılan analizlerde yeterli sismik dayanıma sahip değildir. BEÇÇ ile güçlendirildikten sonra ise yatay kapasite ve rijitliği artmış (deneyde olduğu gibi) ve eleman bazında yapılan değerlendirmede performans seviyesi yeterli seviyeye çıkmıştır. Analizlerden elde edilen yatay kapasite deneysel sonuçlar ile benzerlik göstermesine rağmen deplasman

tahminleri deney verisi ile oldukça uzaktır. Bunun en büyük sebeplerinden biri 1. Kat BEÇÇ'lerin kolon dibinde sınırlı seviyede de olsa taban plakasının BEÇÇ'nin çekme istemleri altında yukarı deplasman yapmasıdır. Ayrıca kullanılan beton modellerinin de bu sonuçlara etkisi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Referans ve BEÇÇ'li çerçevenin simulasyonu (yatay kuvvet – tepe deplasman)



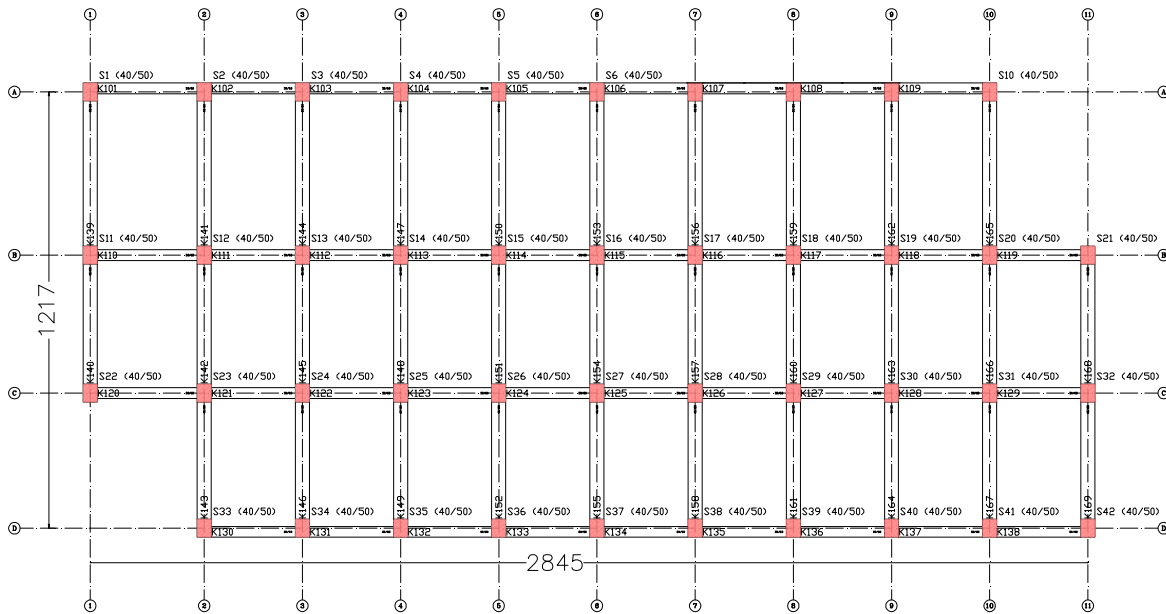
Şekil 4.8. Referans ve BEÇÇ'li çerçevenin TDY 2007'ye göre performansı

### 4.3.3. ÖRNEK BİNA ÇALIŞMASI

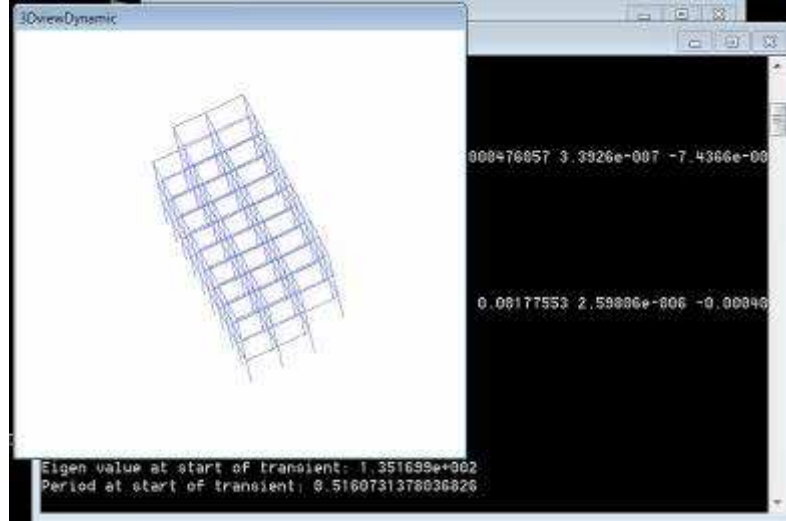
Bu çalışma kapsamında hem referans çerçevesi hemde BEÇÇ'li çerçevenin simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında BEÇÇ ile güçlendirmenin bina güçlendirilmesinde nasıl sonuçlar verebileceğinin araştırılması maksadıyla örnek bir betonarme yapı seçilmiş ve bu yapı üzerinde bir dizi liner olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. İncelenen binanın sadece bir yöndeki aksları güçlendirilmiştir. Uygulanan modelleme tekniği ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

#### 4.3.2.1. ÖRNEK BİNA YAPISAL DETAYLARI

İncelenen bina 3 katlı betonarme bir kamu binasıdır. Binanın planı yaklaşık 12x28 m'dir (Şekil 4.9). Bütün kolonlar 40x50 cm, kirişler ise 30x60 cm'dir. Binadan alınan karot örneklerinin ortama basınç dayanımı 14 MPa olarak belirlenmiştir. Yapının bulunduğu zeminde iki adet sondaj yapılmış ve zemin sınıfı Z1 olarak belirlenmiştir. Kolonlarda 8- $\phi$ 14 düz donatı ve  $\phi$ 8/20 cm etriye kullanıldığı yerinde yapılan kolon sıyırma işlemi ile belirlenmiştir. Etriyelerin 90 derece bükülmüştür. Paspayı yaklaşık 40 mm'dir. Kolondan alınan boyuna donatının çekilme testi sonucunda boyuna donatının akma dayanımı 250 MPa olarak bulunmuştur. Söz konusu bina OPENSEES programı kullanılarak üç boyutlu (Şekil 4.10) olarak yukarıda deney elemanlarında bahsedildiği gibi modellenmiştir.



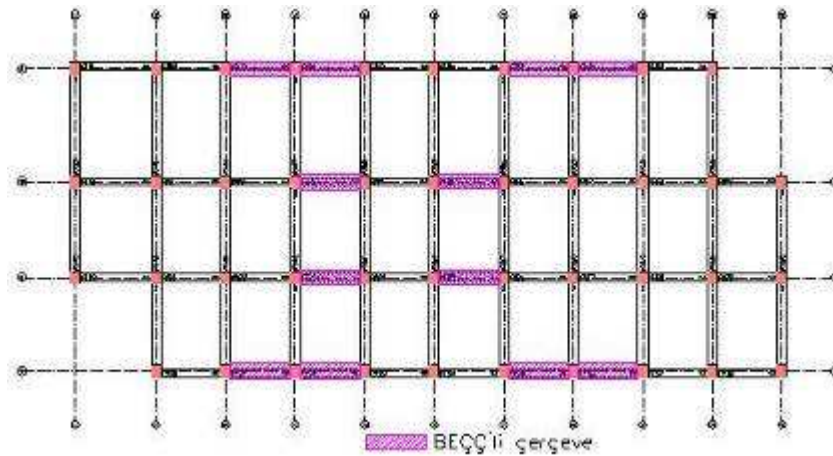
Şekil 4.9. İncelenen binanın kalıp planı



Şekil 4.10. OPENSEES 3 boyutlu model

#### 4.3.2.2. ÖRNEK BİNANIN BEÇÇ'LERLE GÜÇLENDİRİLMESİ

OPENSEES programında modellenen binanın örnek güçlendirmesi sadece binanın bir yönünde (uzun yönü) yapılmıştır. Mimari sebeplerden dolayı sadece 12 adet açıklığa BEÇÇ elemanı eklenmiştir (Şekil 4.11). Bu elemanlar diyagonal konfigürasyonda yapıya bağlanmıştır. Bağlantı detayları daha önce anlatılan detaylara uyularak gerçekleştirilmiştir. Bu durumda BEÇÇ elemanı OPENSEES modelinde truss eleman olarak modellenmiştir. Truss elemanı ise sacede ÇE'nin plastik bölgedeki uzunlu kadar alınmış olup diğer birleşim bölgeleri (kolon-kiriş-BEÇÇ bayrak levhası) rijit olarak alınmıştır.



Şekil 4.11. BEÇÇ'lerin yerleştirildiği akslar

BEÇÇ elemanları ile betonarme binaların güçlendirilmesi konusunda detaylı bir kaynak bulunmamaktadır. Dolayısı ile güçlendirilecek binaya eknecek olan BEÇÇ'lerin en kesitleri ancak deneme yanılma yolu ile belirlenebilecektir. Dolayısı ile bu durumda tasarımın uzun

süre almasına sebep olacaktır. Bu sürenin kısaltılması için bu çalışma kapsamında izlenen yol şu şekildedir. Öncelikle bina toplam ağırlığı bulunmuştur (1100\*9.807 kN). Bu binaya eklenecek olan BEÇÇ'lerin R=1.5 ve R=3 değerleri kullanılması ile elde edilen taban kesme kuvvetlerinin tamamını taşıdığı varsayılmıştır. Söz konusu binaya eklenen BEÇÇ'ler binanın yatay rijitliğini arttıracığı için S(T) değerinin maksimum olacağı varsayılmıştır (TDY 2007'ye göre S(T)=2.5). Bina Antalya merkezde olduğu için 2. Derece deprem bölgesindedir. Bina ofis olarak kullanıldığında bina önem katsayısı 1'dir. Bu durumda şu şekilde hesaplama yapılmıştır.

$$V_t = \frac{10787 \times (A_o \times S(T) \times I)}{R} = \frac{10787 \times (0.3 \times 2.5 \times 1)}{1.5} = 5394 \text{ kN}$$

$$A_{BEÇÇ-R=1.5} = \frac{V_t}{12 \times f_y \times x \cos \theta} = \frac{5394}{12 \times 290 \times \cos 45} = 2191 \text{ mm}^2$$

$V_t$ : Taban kesme kuvveti

$A_o$ : Etkin yer ivme katsayısı, 2. Derece deprem bölgesi

$S(T)$ : Spektrum katsayısı, maksimum değeri 2.5 alınmıştır

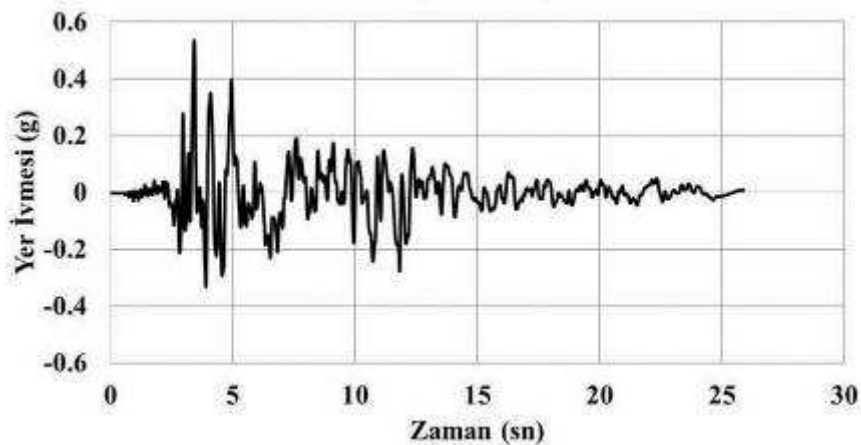
$I$ : bina önem katsayısı

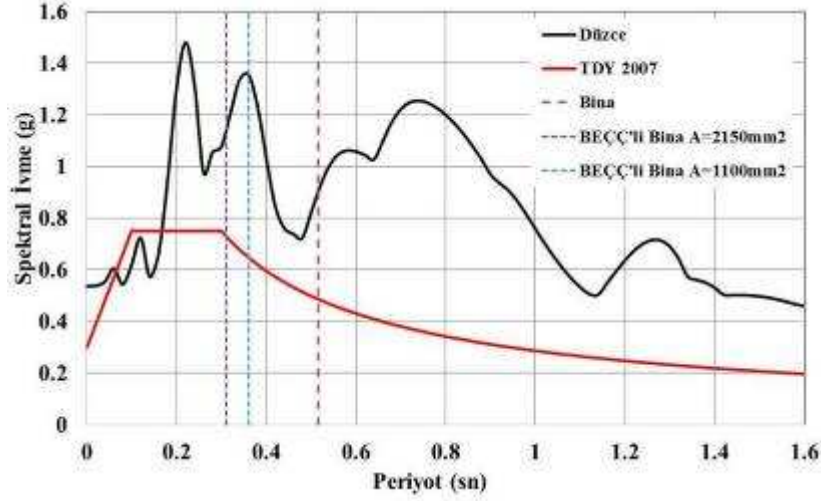
$A_{BEÇÇ}$ : BEÇÇ ÇE en kesit alanı

$f_y$ : akma dayanımı

$\theta$ : BEÇÇ'nin yatay ile açısı

R=1.5 olarak alındığında yapıya gelen tabana kesme kuvveti 5394 kN'dur. Bu kuvvetin BEÇÇ'ler tarafından taşındığı düşünülürse bu durumda  $A_{BEÇÇ}=2191 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanır. Benzer hesaplar R=3 olarak yapılırsa  $A_{BEÇÇ}=1095 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanır. Bina analizlerinde alınan BEÇÇ alanları ise R=1.5'de  $A_{BEÇÇ}=2150 \text{ mm}^2$ , R=3'de  $A_{BEÇÇ}=1100 \text{ mm}^2$ 'dir, Dolayısı ile BEÇÇ'li binanın güçlendirilmesinde kullanılacak olan ÇE en kesit alanı yukarıda bahsedilen basit hesaplamalar ile başlanmıştır.





Şekil 4.12. Düzce Depremi İvme Kaydı, Düzce İvme Spektrumu

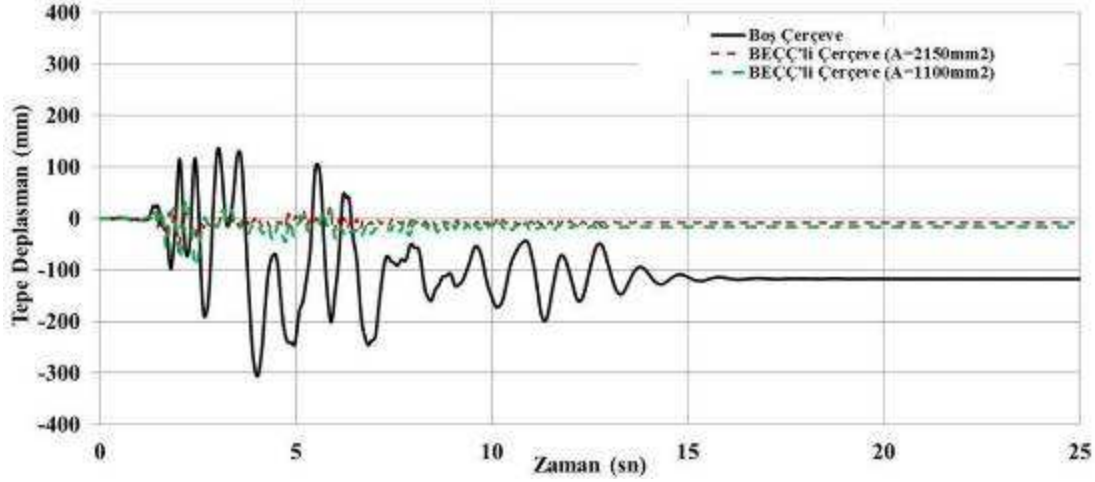
Bu ÇE en kesit alanına sahip BEÇÇ elemanları bina modeline eklenmiş ve binanın düzce deprem kaydı (Şekil 4.12) altında liner olmayan zaman tanım alanında analizleri yapılmıştır. Şekil 4.12'den de görüleceği gibi Düzce deprem kaydından oluşturulan spektral ivme değerleri hem mevcut bina hemde BEÇÇ'li binalar için daha yüksektir (mevcut ve BEÇÇ'li binalara ait periyot değerleri şekil üzerinde gösterilmiştir). Analizlerden beton ve donatı için elde edilen birim şekil değiştirmeler deprem şartnamesinde verilen sınır değerlerle karşılaştırılmış ve yapının yeterli performans sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir.

#### 4.3.2.3. ANALİZ VE PERFORMANS SONUÇLARI

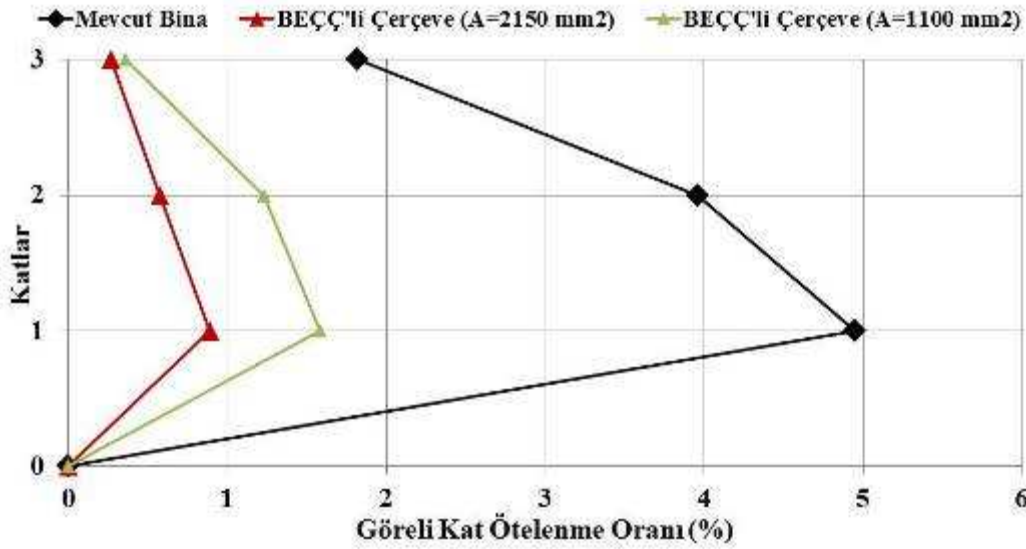
Mevcut ve BEÇÇ'ler ile güçlendirilmiş binanın analiz sonuçları Şekil 4.13'de tepe deplasman-zaman olarak verilmiştir. Şekil 4.14 analiz yapılan mevcut ve BEÇÇ'li binalara ait GKÖO'larını göstermektedir. Her iki şekildedeki görüldüğü gibi BEÇÇ elemanları beklenildiği gibi kat deplasmanlarının ötelenmesini kontrol altına alabilmektedir. Mevcut bina yaklaşık %5 gibi bir GKÖO'na kadar giderken BEÇÇ'li binalar %1.5 ile 1.0 civarında kalmıştır. GKÖO ise kullanılan BEÇÇ en kesiti ile orantılı şekilde azalmaktadır. Şekil 4.15 BEÇÇ elemanlarında meydana gelen birim şekil değiştirmeleri göstermektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere 1. Kat BEÇÇ elemanlarının ÇE'leri %0.8 ile 1.5 civarında birim uzama değerine kadar uzama veya kısalma göstermişlerdir. Bu değerler ise Bölüm 2 test edilen BEÇÇ'ler tarafından elde edilen birim uzama değerlerinden küçüktür. Başka bir deyişle Bölüm 2'de geliştirilen BEÇÇ'ler söz konusu bu yapı için kullanılabilir seviyede olduğu yapılan OPENSEES analizlerinde anlaşılmaktadır. Şekil 4.16 ve 4.17 mevcut ve BEÇÇ'li binalardaki kirişlerin ülkemizde kullanılan deprem şartnamesine göre eleman bazında performans değerlendirmelerini göstermektedir. Bunun yanında Şekil 4.18 ve 4.19 mevcut ve BEÇÇ'li binalardaki kolonların ülkemizde kullanılan deprem şartnamesine göre eleman bazında



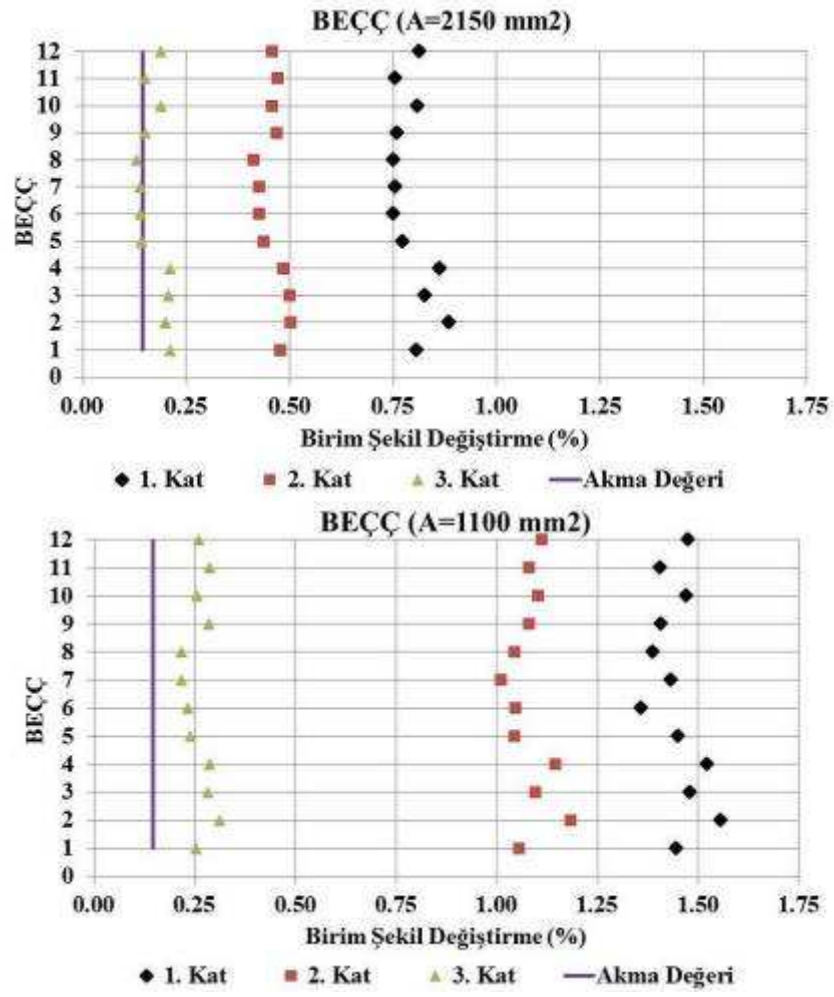
performans değerlendirmelerini göstermektedir. Bu şekillerden de görüleceği gibi mevcut bina mevcut hali ile yetersiz performans seviyesine sahiptir. Dolayısı ile mevcut binanın uygun bir güçlendirme yöntemi ile güçlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Mevcut bina BEÇÇ'ler ile güçlendirildikten sonra ise performans seviyesi ülkemizde kullanılan deprem şartnamesine (TDY 2007) göre yeterli seviyeye gelmektedir. Sonuç olarak BEÇÇ ile güçlendirilen bina düzce deprem kaydı altında yeterli performansa sahiptir.



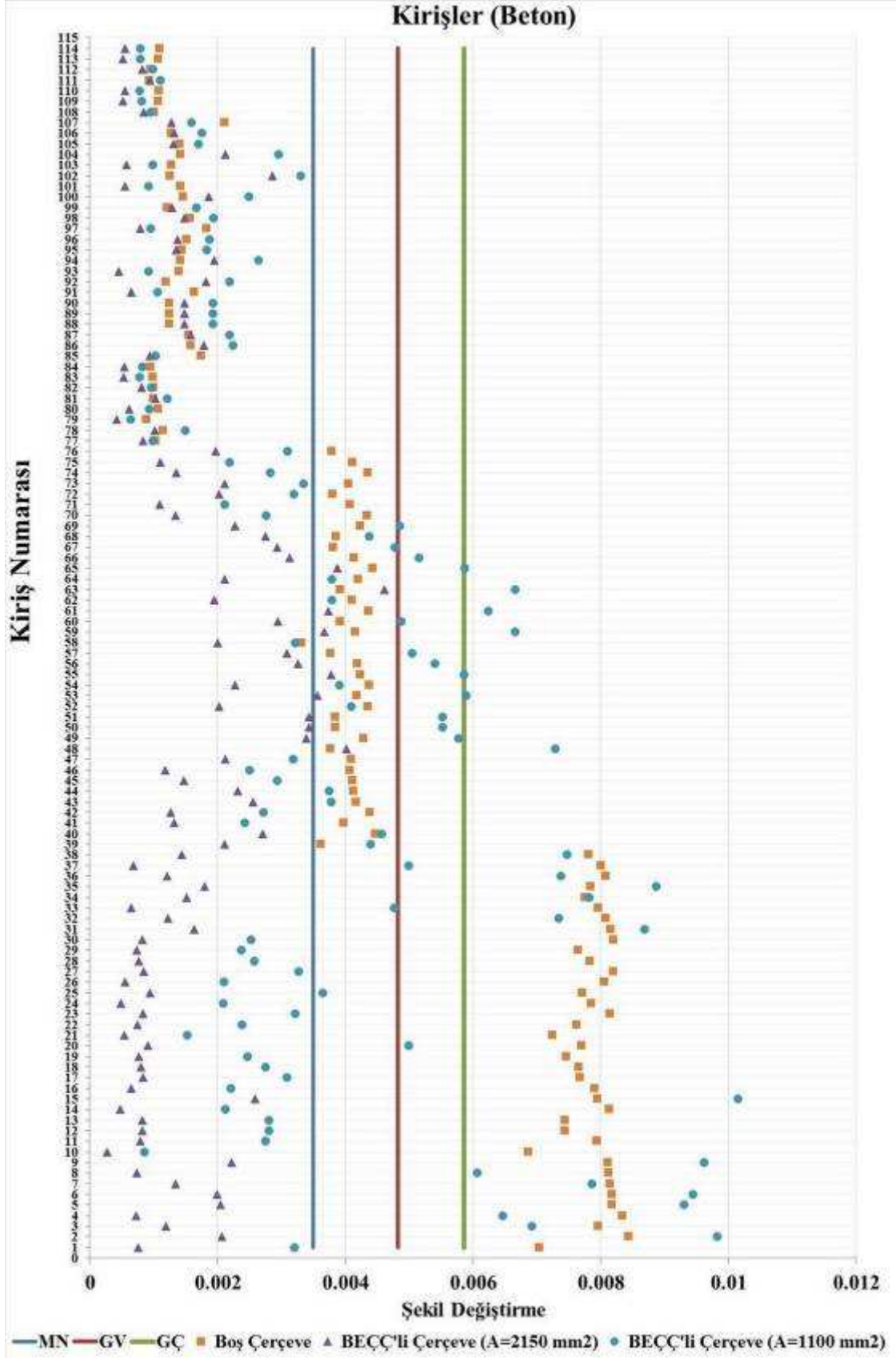
Şekil 4.13. Mevcut Bina ve BEÇÇ'li binaların tepe deplasman-zaman grafiği



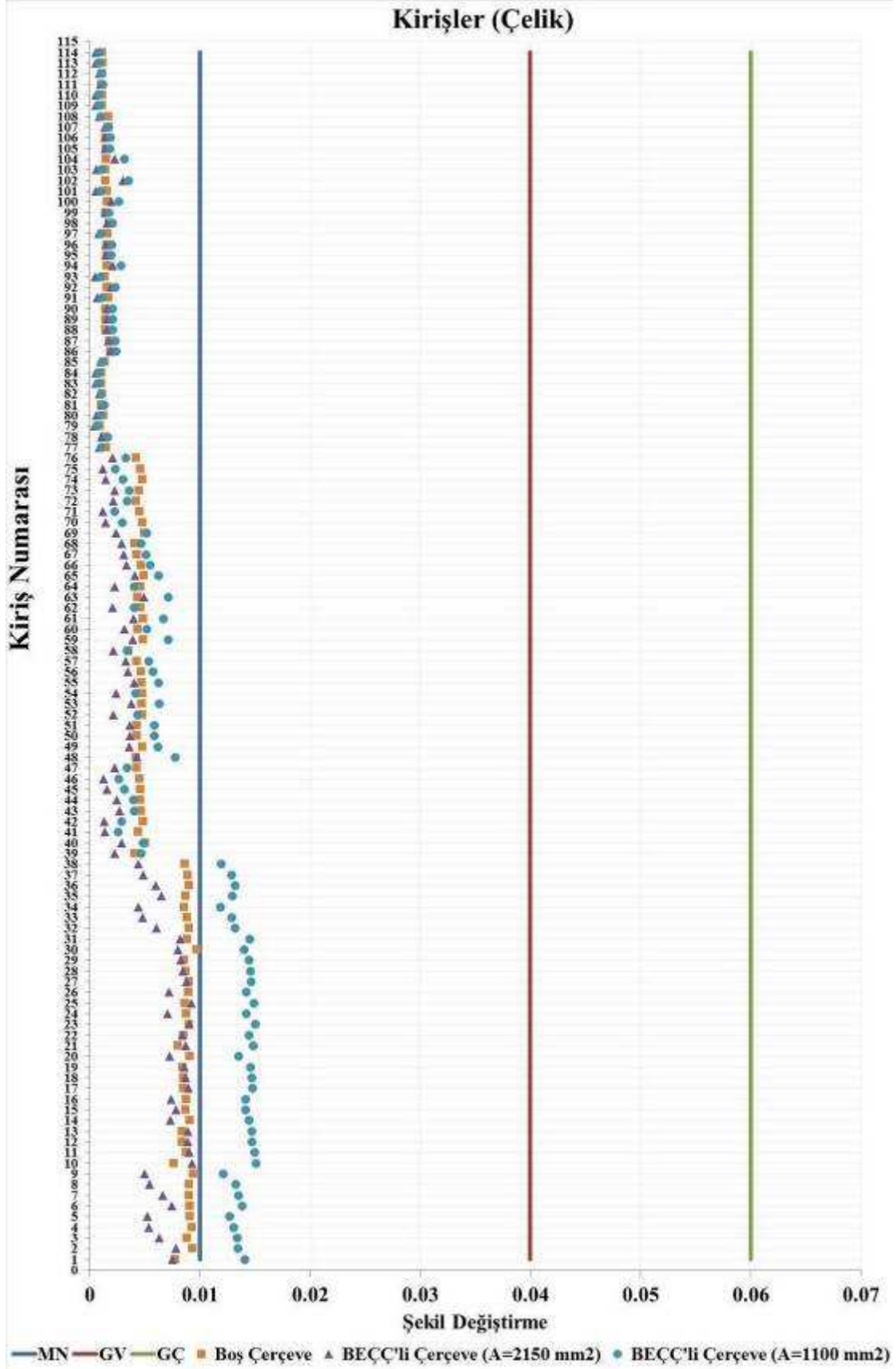
Şekil 4.14. Mevcut Bina ve BEÇÇ'li Binaların GKÖO



Şekil 4.15. BEÇÇ'lerin aksenal birim uzama değerleri

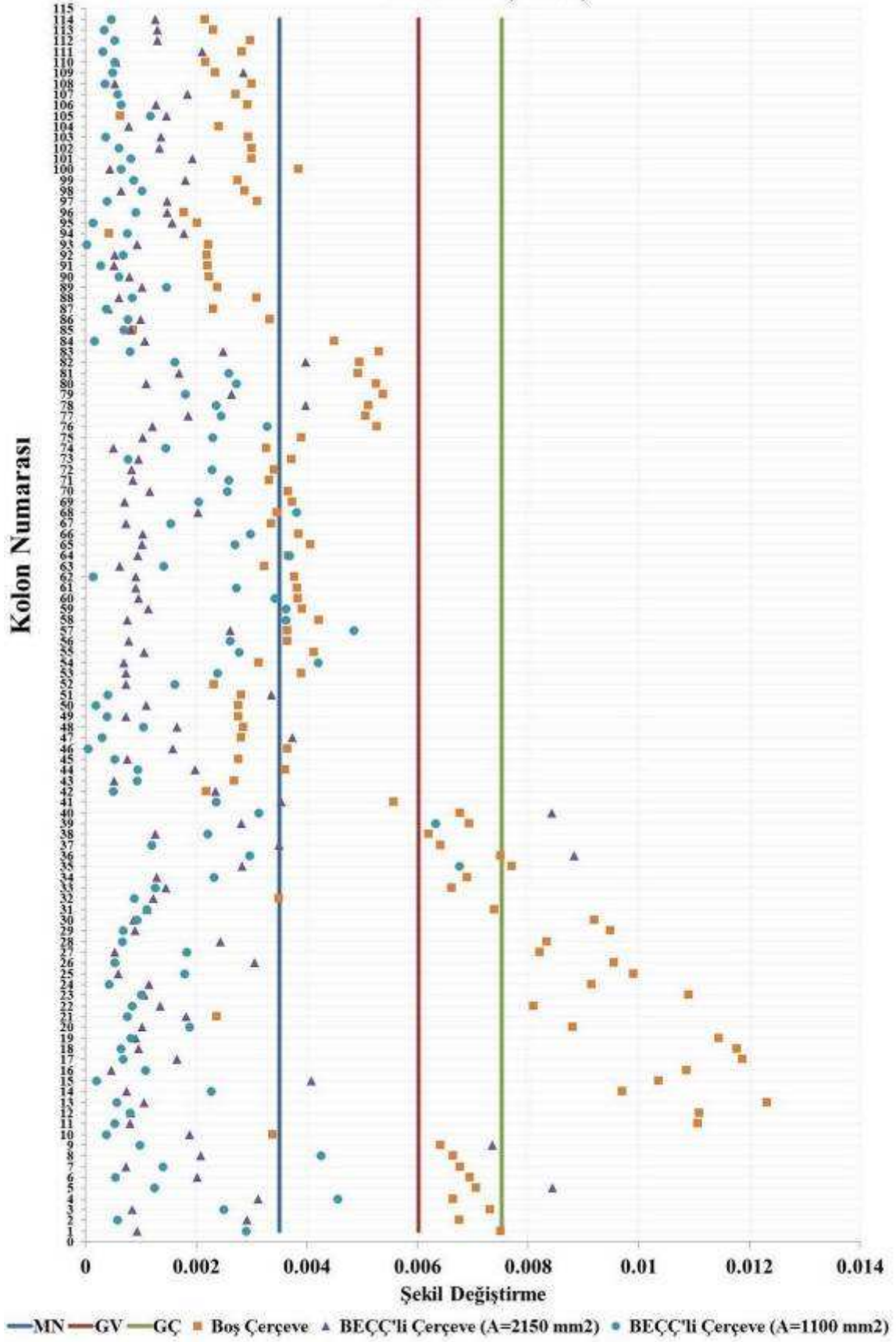


Şekil 4.16. Kirişlerin performans Değerlendirmesi (Beton)



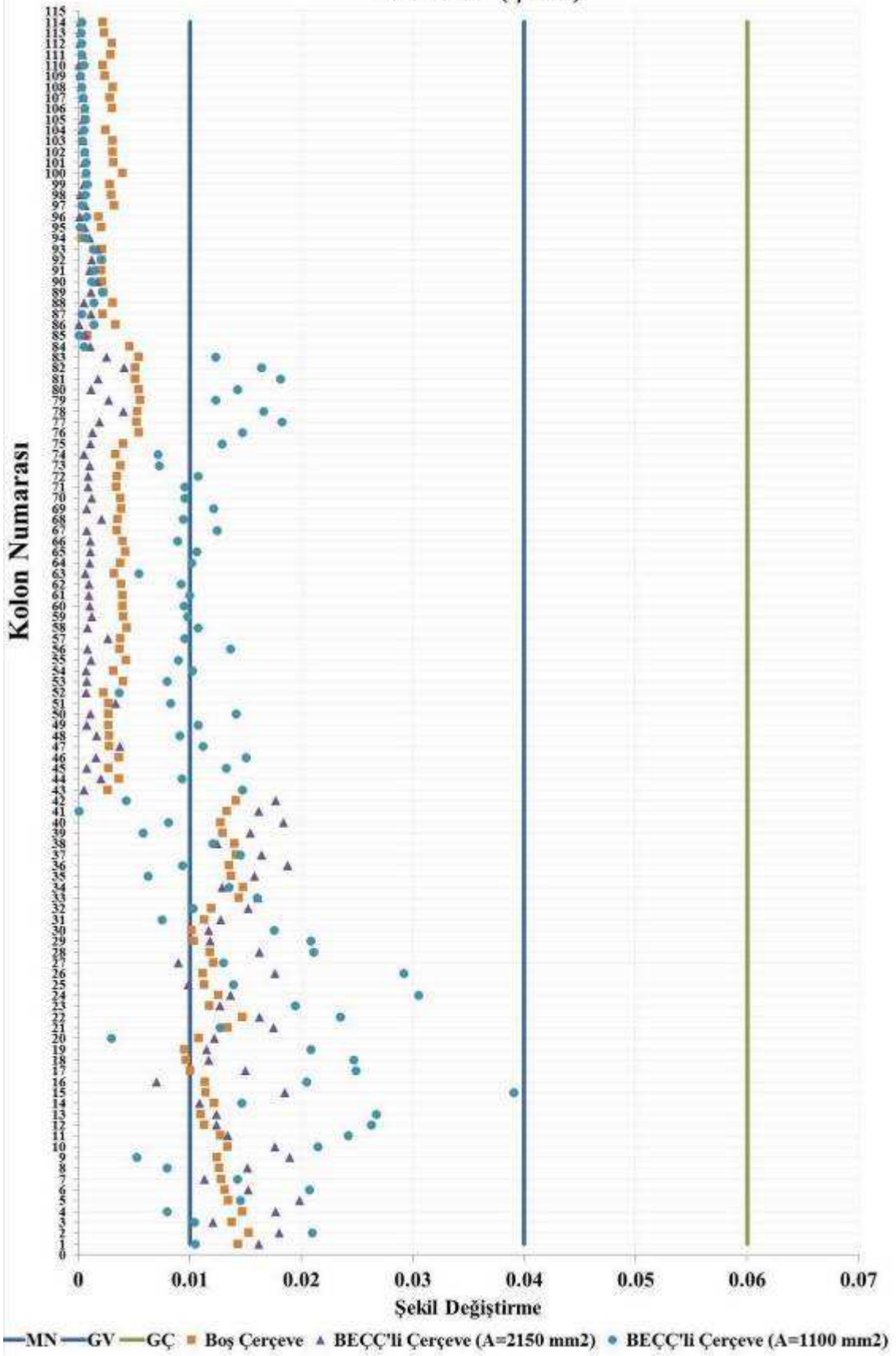
Şekil 4.17. Kirişlerin performans Değerlendirmesi (Donatı)

### Kolonlar (Beton)



Şekil 4.18. Kolonların Performans Değerlendirmesi (Beton)

### Kolonlar (Çelik)



Şekil 4.19. Kolonların Performans Değerlendirmesi (Donatı)



## 5. ÖZET

Bu proje kapsamında yeni nesil çelik çaprazlar olarak nitelendirilen burkulması engellenmiş çelik çaprazların (BEÇÇ'lerin) eleman bazında testleri ve BEÇÇ'ler ile 3 açıklık ve 3katlı kusurlu bir betonarme çerçeve güçlendirilip dinamik benzeri deney yöntemi ile testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca test edilen BEÇÇ'li çerçeve ve gerçek bir bina için analitik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel kısımda Tablo 5.1'de görüldüğü gibi toplam 20 adet eleman bazında BEÇÇ, 2 adet BEÇÇ'li çerçeve öncesi deneme amaçlı BEÇÇ (BEÇÇ'li çerçeveye monte edilecek olan 6 adet BEÇÇ üretilmiştir (1.-6. BEÇÇ\_4)) ve 1 adet 3 açıklıklı ve 3 katlı BEÇÇ'li betonarme çerçeve test edilmiştir.

Tablo 5.1 Test elemanları

Test Elemanları	Özelliği	Üretim ve test yer
1. BEÇÇ_1	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
2. BEÇÇ_1	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
3. BEÇÇ_1	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
4. BEÇÇ_1	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
5. BEÇÇ_1	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
6. BEÇÇ_1	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
7. BEÇÇ_1	BEM: Sargısız Beton	Akdeniz Üniv.
8. BEÇÇ_1	BEM: LP sargılı beton	Akdeniz Üniv.
9. BEÇÇ_1	BEM: Etriye Sargılı Beton	Akdeniz Üniv.
10. BEÇÇ_1	BEM: Etriye Sargılı Beton	Akdeniz Üniv.
1. BEÇÇ_2	BEM: Çerçeve Bağlantılı ÇPBÇ	Akdeniz Üniv.
2. BEÇÇ_2	BEM: Çerçeve Bağlantılı ÇPBÇ	Akdeniz Üniv.
3. BEÇÇ_2	BEM: Çapraz Bağlantılı ÇPBÇ	Akdeniz Üniv.
1. BEÇÇ_3	BEM: Prekast Panel	Akdeniz Üniv.
2. BEÇÇ_3	BEM: Prekast Panel	Akdeniz Üniv.
3. BEÇÇ_3	BEM: Prekast Panel	Akdeniz Üniv.
4. BEÇÇ_3	BEM: Prekast Panel	Akdeniz Üniv.
5. BEÇÇ_3	BEM: Prekast Panel	Akdeniz Üniv.
6. BEÇÇ_3	BEM: Prekast Panel	Akdeniz Üniv.
7. BEÇÇ_3	BEM: Prekast Panel + LP	Akdeniz Üniv.
1. BEÇÇ_deneme1	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
2. BEÇÇ_deneme2	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
1. BEÇÇ_4	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
2. BEÇÇ_4	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
3. BEÇÇ_4	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
4. BEÇÇ_4	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
5. BEÇÇ_4	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
6. BEÇÇ_4	BEM: Kutu Profil + Beton	Akdeniz Üniv.
BEÇÇ'li Çerçeve	2. BEÇÇ_1 ile güçlendirilmiş 3 açıklık-3katlı betonarme çerçeve	ODTÜ

Proje kapsamında ayrıca BEÇÇ'li çerçevelere ait sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 3 katlı-3açıklık referans çerçevesi (OPENSEES açık simülasyon platformu)



modellenmiş ve liner olmayan zaman tanım alanında dinamik analizleri yapılmıştır. Bu modellemenin belli bir başarı seviyesinde deney elemanının dinamik benzerli test verilerini taklit etmesi, aynı çerçevenin BEÇÇ'ler ile güçlendirilip analiz edilebilmesi için olanak sağlamıştır. Bütün bu kalibre edilmiş modellemeler sayesinde mevcut kusurlu bir bina mevcut ve güçlendirilmiş hali ile yine ülkemizde meydana gelen yıkıcı bir deprem olan Düzce depremi altında Opensees programı kullanılarak liner olmayan zaman-tanım alanı analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonunda mevcut çerçevenin TDY 2007'de belirlenen Can Güvenliği (iş yeri 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremler altında sağlanması gerekli olan performans seviyesi) performans kriterini sağlamadığı görülmesine karşı güçlendirilmiş çerçevelerin Can Güvenliği performans seviyesini sağladığı görülmüştür.

### 5.1. BEÇÇ ELEMANLARININ TARTIŞILMASI

BEÇÇ elemanları 3 grupta incelenmiştir. İlk gruptaki elemanlardan Tablo 5.1'de de görülen 2., 3, 5., 6., 9. ve 10. BEÇÇ\_1 elemanları oldukça kararlı histeretik davranışa sahiptirler. Bu elemanların genel özellikleri BEM sisteminin uç bölgelerde gerek ek kutu profil ve gerekse plakalar ile stabilitelerinin artırılmasıdır. Ayrıca bu elemanlarda ÇE %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar sorunsuz olarak test edilebilmiştir. Bölüm 4'te yapılan analizlerden de görüleceği gibi herhangi bir yapının BEÇÇ'ler ile güçlendirilmesi durumunda yeterli performansla sahip olması için kullanılan BEÇÇ'lerin ÇE'leri yaklaşık %1.5-2.5 birim şekil değiştirme değerine kadar yüklenmektedir. Dolayısı ile bu proje kapsamında test edilen BEÇÇ'ler ise %2.0'da daha ileri seviyelere kadar yüklenmiş veya %1.0 değerinde yorulma testleri yapılmıştır. 2. Grupta bulunan BEÇÇ elemanlarının tasarımda ÇE ve BEM arasındaki izolasyon miktarının tekrar gözden geçirilmesi gereklidir. Yapılan eleman bazındaki testlerde ÇE-BEM arası boşluğun daha da azaltılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca BEM'de meydana gelen lokal deformasyonlar çelik profil et kalınlığının artırılması gerektiği sonucunu vermektedir. Dolayısı ile bu durumda maliyet bakımından BEM'in artmasına sebep olacaktır. Bu tip BEÇÇ'ler için ek çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. 3. Grup BEÇÇ'ler prekast panellerden (PP'lerden) meydana gelmiştir. Bu grupta yapılan testler PP'lerin istenilen seviyede BEM niteliğine kavuşuncaya kadar tekrarlanmıştır. Bu gruptaki BEÇÇ'lerin BEM'leri ancak donatılı, yüksek miktarda ardgerme ve tamir harcı ile birbirine bağlanmış PP'lerden meydana gelmesi durumunda yeterli stabiliteyi sağlayabilmektedir. Bu gruptaki 6. ve 7. BEÇÇ\_3 elemanları oldukça kararlı histeretik davranışa sahiptirler. Maliyet açısından bakıldığında 1. ve 3. Grup BEÇÇ'lerin bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. 1. Grup BEÇÇ'lerde dış kutu profil, ek iç kutu profil, ek plaka, işçilik ve beton maliyeti belirlemektedir. Bunlardan en yüksek maliyetli olanı dış kutu profil ile işçilik olarak görülebilir. 3. Gruptaki BEÇÇ'ler ise kalıp, enine ve boyuna kullanılan gijon, donatı, tamir harcı, lifli polimer ve işçilik





maliyet kalemlerinin en önemlileridir. Ancak kalıpların tekrarlı kullanılması maliyeti düşürücü niteliktedir. Bu BEÇÇ'ler için ise tamir harcı, lifli polimer ve işçilik maliyeti en büyük kalemlerdir. Ancak önemli olan bir diğer husus ise 3. Grup BEÇÇ'ler mevcut yapıda yapıların iç akslarında yapılacak olan bir güçlendirme için uygun bir eleman detayına sahiptir. 1. Gruptaki BEÇÇ'lerin ağırlık probleminden dolayı yapı içinde montajı 3. BEÇÇ'lere göre çok daha zordur. Bağlantıda kullanılan slot detayı BEÇÇ'lerin montajında büyük kolaylık sağlamaktadır. Özellikle BEÇÇ ile güçlendirilen çerçeveye monte edilmesi için üretilen BEÇÇ'lerin çerçeveye montajı slot deliklerden dolayı kolay şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu durumda da yüksek mukavemetli bulonlar ardgerme olacak şekilde bağlantı detayında kullanılmıştır. Yüksek mukavemetli bulonlar ise maliyeti kısmen yüksek birleşim araçları olup teşkil edilmeside ek ekipmana ihtiyaç duymaktadır.

## 5.2. BEÇÇ'Lİ GÜÇLENDİRME SİSTEMİNİN TARTIŞILMASI

Bu çalışmada incelenen güçlendirme metodu kusurlu çerçevenin yatay yükler altındaki davranışını oldukça değiştirmiştir. BEÇÇ'ler ile güçlendirilen çerçeveye etkiyen yatay kuvvetler, ÇÇ'lere aksel istemler olarak aktarılmış. Çelik yapı elemanlarının aksel rijitlikleri yüksek olduğu için fazla maliyet getirmeden kusurlu yapının yatay rijitlik ve yük taşıma kapasitesi artışları kolayca mümkün olmuştur. BEÇÇ'ler, aksel yük taşıma kapasitelerinin yüksek olmasından dolayı yatay öteleme kolayca kontrol altına alabilmektedir. Dolayısı ile etkin bir yatay yük taşıyıcı sistem konumuna gelebilmektedir. Ayrıca BEÇÇ'lerin burkulma problemi olmadığından yapının her iki yönde yapacağı deplasmanlar altında yapıya ihtiyacı olan stabil histeretik davranışı sunabilmektedir. BEÇÇ'lerin özellikle terz V çelik çapraz (chevron brace) konfigürasyonunda yapıya monte edilmesi giriş orta açıklığında dengelenmemiş çapraz aksel yük istemlerini minimuma indirmekte ve ekonomik bir giriş tasarımına olanak sağlamaktadır. BEÇÇ'li çerçeve tasarımında özellikle ÇE plastikleşmesi sağlanmalıdır. Bu durumda ÇE'ler yüksek miktarda enerji sönmüleyebilir hale gelmektedir. Ancak ÇE'nin plastikleşmesi ile kaybedilen yatay rijitlik yapının GKÖÖ'larının da kontrol edilmesi anlamına gelmektedir. GKÖÖ %1.0-1.5 civarında tutulması BEÇÇ'li sistemlerin etkin şekilde çalışmasını olanak sağladığı görülmektedir. ÇE'de plastikleşmenin istenilen bir durum olmasından dolayı test edilen BEÇÇ'li çerçevede olduğu gibi ÇE enkesitleri azalmakta ve BEÇÇ-çerçeve bağlantı maliyeti düşmektedir. Bunların yanında BEÇÇ'li çerçeve tasarımında ÇE enkesiti üst katlara gittikçe azaltılması bu katlarda BEÇÇ'lerin plastikleşmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca tekrardan ÇE en kesitin azalması bağlantı maliyetini de azaltmaktadır. Bu durumda klasik çelik profillerden meydana gelen çelik çaprazlara göre BEÇÇ kullanımı oldukça ekonomik bir güçlendirme



sunmaktadır. Daha doğru bir ifade ile BEÇÇ'lerde kullanılan BEM maliyeti uygulamada klasik çaprazlara göre fazlalık olarak görülsede klasik çelik çaprazların bağlantı maliyeti ile birbirine yakın maliyetler elde edileceği sonucuna varılabilir. Ancak BEÇÇ'li sistemelerde temel istemlerinin de azaldığı yapılan deneysel çalışmada görülmüştür. Daha önce benzer bir çalışmada (Özçelik vd. 2012) temel gereksini klasik çapraz uygulamasından dolayı daha fazla olduğu görülmüştür. Dolayısı ile BEÇÇ ile güçlendirme mevcut yapıların güçlendirilmesi için tavsiye edilen bir metoddur.

### **5.3. BEÇÇ VE BEÇÇ'Lİ GÜÇLENDİRME SİSTEMİ İÇİN TASARIM**

Bu proje kapsamında yapılan eleman bazında deneyler, çerçeve testleri ve analitik çalışmalar sonucunda BEÇÇ ve BEÇÇ'li çerçevelerin tasarım detayları geliştirilmiştir. BEÇÇ elemanları mevcut BEÇÇ'lerin histeretik davranışlarının geliştirilmesi ve yeni tip BEÇÇ'ler olmak üzere iki farklı BEÇÇ eleman grubu bu proje kapsamında geliştirilmiştir. Ayrıca BEÇÇ'ler ile güçlendirilen kusurlu bir betonarme çerçevenin hangi aşamalarda hangi tasarım parametrelerinin kullanılması gerektiği yine bu proje kapsamında ortaya çıkarılmıştır.

#### **5.3.1. BEÇÇ'LERİN TASARIMI**

BEÇÇ'ler genel olarak ÇE ve BEM olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Buna göre ÇE yumuşak ve sünek bir çelikten elde edilmelidir. ÇE'de bağlantı için uç bölgelerde en kesit artımına gidilmelidir. ÇE'nin plastik bölge dışında kalan kısımları tasarıma göre uygun bağlantıyı sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. ÇE'nin plastik kısmında en kesit sabit olmalı ve herhangi bir enkesit daralması veya genişlemesi olmamalıdır. Ancak BEM'in her iki BEÇÇ ucuna göre görelî hareketinin engellenmesi için ise ÇE'nin orta açıklığında en kesit artışı yapılmalıdır. BEM'in kutu profil+beton olduğu BEÇÇ'lerde betonun kutu profil içinde kaymasını engellemek için küçük bir lama, kutu profilin içinde bir bölgeye kaynatılmalıdır. Bu tip BEÇÇ'lerde uç bölgeler gerek kutu profil ve gerekse ek plakalar ile uç stabiliteleri arttırılmalıdır. BEM'in sargılı betondan meydana gelmesi durumunda BEM'i oluşturan betona yeterli sargı sağlanmalıdır. Bu sargı etriyeler veya lifli polimer ile sağlanabilir. BEM'in prekast panellerden (PP'ler) meydana gelmesi durumunda ise PP'lere hem enine hemde boyuna yeterli stabilite sağlanmalıdır. Ayrıca PP'lerin birleşim bölgelerinde tamir harcı ile ek bağlantı sağlanmalıdır. Gerekli durumda PP'ler lifli polimer ile sarılabilir. PP'lerin hacimsel büyüklükleri taşınabilir seviyede tutulmalıdır. Ayrıca PP'lere hacimsel olarak yeteri kadar donatı eklenmelidir. Üretilen BEÇÇ'lerin aralarından rastgele seçilen BEÇÇ'ler eleman bazında test edilmelidir. Bu test detayları AISC 2005'de mevcuttur.



### 5.3.2. BEÇÇ'Lİ ÇERÇEVELERİN TASARIMI

BEÇÇ'li yapıların tasarımında ilk olarak mevcut yapı modellenmelidir. Mevcut yapı TDY 2007'deki "bölüm 7 Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi" kısmındaki modelleme esaslarına göre modellenebilir. Mevcut yapının TDY 2007'ye göre performansı yeterli değilse güçlendirme çalışmasına başlanmalıdır. Eklenecek olan BEÇÇ elemanlarının yerleri ve dolayısı ile sayısı belirlenmelidir. BEÇÇ'lerin ÇE en kesitleri belli olmadığı için deneme yanılma yöntemi ile ÇE en kesitleri belirlenmelidir. Bunun için ilk olarak bir ÇE en kesit alınmalı ve TDY 2007'ye göre performans analizi yapılarak yapının yeterli performansa sahip olup olmadığı belirlenmelidir. Bu işlem çok uzun süreceği için ÇE enkesit alanının başlangıç tercihi şu şekilde yapılabilir: İlk olarak  $R=1.5-3$  arasında bir değer ile TDY 2007'ye göre yapıya gelecek olan toplam kesme kuvveti belirlenmelidir ( $S(T)=2.5$  alınabilir). Bu kesme kuvvetinin tamamının BEÇÇ'ler tarafından taşındığı varsayılarak her bir BEÇÇ'nin taşıması gerekli olan yatay yük değeri belirlenmelidir. Bu değer yardımı ile ÇE için ilk enkesit alanı tayin edilmiş olacaktır. Bu işlem ardından yapının performans analizi yapılacak ve yeterli performansa sahip olup olmadığı belirlenecektir. Bu işlem yapının yeterli performansa sahip olmasına kadar tekrarlanacaktır. Gerekli ÇE enkesit belirlendikten sonra BEÇÇ-çerçeve bağlantısına geçilecektir. İlk olarak bayrak levhası tasarımı Eşdeğer Kuvvet Metodu (AISC Load and Resistance Factor Design Şartnamesinde Uniform Force Method olarak geçmektedir) göre yapılabilir. Bayrak levhası tasarımında kullanılan Eşdeğer Kuvvet Metodu sayesinde betonarme kolon ve kiriş için ankraj sayısı ve çapı belirlenecektir. Bayrak levhası tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer hususlar ise bayrak levhasının BEÇÇ'lerin aksenel çekme ve basma istemeleri altında stabil kalmasıdır. Bunun sağlanabilmesi için bayrak levhası boyutlarının tasarımında Whitmore (1952) ve Thornton (1984) çalışmalarından faydalanılabilir. BEÇÇ elemanları hem basma hemde çekme istemleri altında benzer davranış gösterdikleri için BEÇÇ'li çerçeve modelinde makas/çapraz (truss member) olarak tanımlanabilir. Analiz sonuçlarında BEÇÇ'lerde meydana gelen birim şekil değiştirme değerlerinin BEÇÇ üretimde test edilmiş elemanlar tarafından da yeterli histeretik stabilite ile sağladıklarından emin olunması gerekmektedir. ÇE kesit boyutları belirlenmiş olan BEÇÇ'nin ters V çelik çapraz olarak kullanılması durumunda ankraj tasarımları Bölüm 3'te sunulduğu üzere yapılabilir. Dikkat edilmesi gereken husus kirişin ankraj delme esnasında hasar alması ve bu hasarın tamir harcı ile giderilmesidir. Ayrıca kiriş alt ve üstüne yerleştirilen plakalar kirişe tam kenetlenmelidir bunun için plakaları ankrajında tamir harcı ve epoksi kullanılması gerektiği belirtilmelidir. Bu işlemi bayrak levhasının betonarme kolona ve kiriş plakasına bağlanması işlemi takip etmelidir. Bayrak levhasına BEÇÇ'lerin monajı (kaynak, yüksek mukavemetli bulon) ile güçlendirme işlemi tamamlanır.



## 6. KAYNAKLAR

- [1] Black GR, Wenger BA, Popov EP. "Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversals". Tech. Rep. UCB/EERC-80/40, EERC, Berkeley, CA, October 1980.
- [2] Black CJ, Makris N, Aike, ID. "Component Testing, Stability Analysis and Haracterization of Buckling Restrained Braces". Rep. No. PEER 2002/08, Univ. of California, Berkeley, Calif., 2002.
- [3] López WA. "Design Of Unbonded Braced Frames". Proceedings 70th Annual Convention, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, 2001.
- [4] Wada A, Saeki E, Takeuchi T, Watanabe AC. "Development of Unbonded Brace, Nippon Steel's Unbonded Braces". Nippon Steel Corporation Building Construction and Urban Development Division, Tokyo, Japan, pp. 1-16, 1998
- [5] Uang CM, Nakashima M. Earthquake Enginnering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. Editors: Bozorgnia Y, Bertero VV. CRC Press, 2004
- [6] Qiang X. "State of the Art of Buckling-Restrained Braces in Asia". Journal of Constructional Steel Research, 61, 727–748, 2005.
- [7] Uang CM, Nakashima M, Tsai KC. "Research and Application of Buckling Restrained Brace Frames". Steel Structures, 4, 301-313, 2004.
- [8] Tsai KC, Lai JWYC, Lin SL, Weng, CH. "Research and Application of Double-Core Cuckling Restrained Braces in Taiwan". Proc., 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, pn 2179, 2004.
- [9] <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Image/CR0310>
- [10] Watanabe A, Hitomi Y, Yaeki E, Wada A, Fujimoto M. "Properties of Brace Encased in Buckling-Restraining Concrete and Steel Tube". Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, IV, 19–724, 1988.
- [11] Iwata M, Kato T, Wada A. "Buckling-Restrained Braces as Hysteretic Dampers". Proc. STESSA, Quebec, PQ, pp. 33–38, 2000.
- [12] Clark P, Aiken I, Kasai K, Ko E, Kimura I. "Design Procedures for Buildings Incorporating Hysteretic Damping Devices". Proc. 69th Annual Convention of SEAOC, Sacramento, CA, 1999.
- [13] Chen CC, Chen SY, Liaw JJ. "Application of Low Yield Strength Steel on Controlled Plastification Ductile Concentrically Braced Frames". Can. J. Civ. Eng., 28, 823–836, 2001.
- [14] Higgins C, Newell J. "Development of Two New Hysteretic Dampers". Proc. 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Engineering Research Institute, Oakland, CA, 2002.
- [15] Higgins C, Newell J. "Confined Steel Brace for Earthquake Resistance Design". AISC Engineering Journal, Fourth Quarter, 41(4), 187-202, 2004.



- [16] Young KJ, Kim, MH, Kim J, Kim, SD. "Component Tests of Buckling-Restrained Braces with Unconstrained Length". *Engineering Structures*, 31, 507-516, 2009
- [17] Tsai KC, Hwang YC, Weng CS, Shirai T, Nakamura H. "Experimental Tests of Large Scale Buckling Restrained Braces and Frames". *Proc., Passive Control Symposium*, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2002.
- [18] Tremblay R, Degrange G, Blouin J. "Seismic Rehabilitation of a Four-Story Building with a Stiffened Bracing System". *Proceedings of the 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, 549–554, 1999.
- [19] Tremblay R, Bolduc P, Neville R, DeVall R. "Seismic Testing and Performance of Buckling Restrained Bracing Systems". *Can. J. Civ. Eng*, 33, 183–198, 2006.
- [20] Uriz P. *Towards Earthquake Resistance Design of Concentrically Braced Steel Structures*. Theses Doctor of Philosophy, University of California, Berkeley, 2005.
- [21] Lopez WA, DS Lauck, TW, Saunders M. "Structural Design and Experimental Verification of a Buckling Restrained Braced Frame System". *AISC Engineering Journal*, 4. Quarter, 177-186, 2004.
- [22] Aiken ID, Mahin SA, Uriz P. "Large-Scale Testing of Buckling-Restrained Braced Frames". *Proc. Japan Passive Control Symposium*, Tokyo Institute of Technology, Japan, 35-44, 2002.
- [23] Meritt S, Uang CM, Benzoni G. "Subassemblage Testing of Star Seismic Buckling Restrained Braces". *Repor no TR-2003/04*, University of California, San Diego, La Jolla, CA, 2003.
- [24] AISC (American Institute of Steel Construction). "Seismic Provisions for Structural Steel Building". AISC, Chicago, IL, 2005.
- [25] Christopoulos AS. *Improved Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frames*. Master of Science in Civil Engineering University of Washington, 2005.
- [26] Tsai KC, Hsiao PC. "Pseudo-Dynamic Test of a Full-Scale CFT/BRB Frame—Part II: Seismic Performance of Buckling-Restrained Braces and Connections". *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 37, 1099–1115, 2008.
- [27] Tsai KC, Hsiao PC, Wang KJ, Weng YT, Lin ML, Lin KC, Chen CH, Lai JW, Lin SL. "Pseudo-Dynamic Tests of a Full-Scale CFT/BRB Frame—Part I: Specimen Design Experiment and Analysis". *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 37, 1081–1098, 2008.
- [28] Whitmore RE. "Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates". *Bulletin No.16*, Engineering Experiment Station, University of Tennessee, 1952.
- [29] Thornton WA. "Bracing Connections for Heavy Construction". *Engineering Journal of AISC*, Vol.21, 1984.



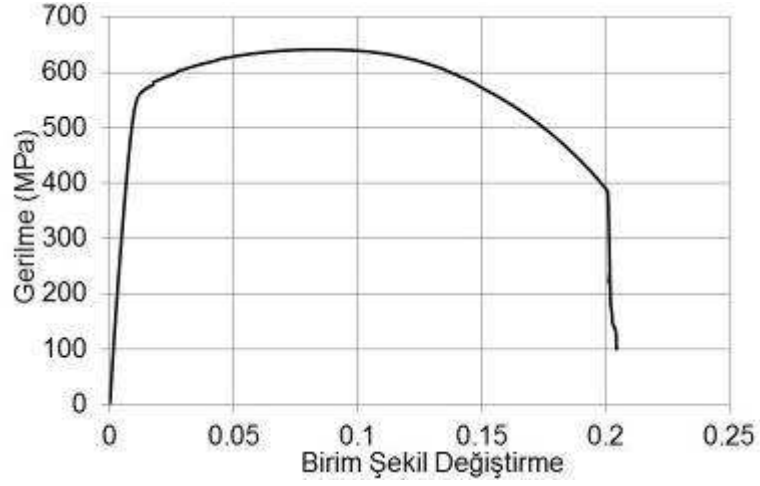
- [30] Lin ML, Tsai KC, Hsiao PC, Tsai CY. "Compressive Behavior of Buckling-Restrained Brace Gusset Connections". The First Conference on Advanced in Experimental Structural Engineering, Nagoya, Japan, 2005.
- [31] Lin ML, Tsai KC, Tsai CY. "Bi-Directional Sub-Structural Pseudo-Dynamic Testing of a Full-Scale 2-Story BRBF, Part 2: Compressive Behavior of Gusset Plates". Proc. of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA, USA, pn.1642, 2006.
- [32] Tsai KC, Weng YT, Wang KJ, Tsai CY, Lai JW. "Bi-Directional Sub-Structural Pseudo-Dynamic Testing of a Full Scale 2-Story BRBF, Part 1: Seismic Design, Analytical and Experimental Performance Assessments". Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA, USA, pn.1097, 2006.
- [33] Fahnstock LA, Ricles JM, Sause R. "Experimental Evaluation of a Large-Scale Buckling-Restrained Braced Frame". Journal of Structural Engineering, 133, 1205-1214, 2007.
- [34] R. Ozcelik, B. Binici & O. Kurç (2012). Pseudo Dynamic Testing of an RC Frame Retrofitted with Chevron Braces, Journal of Earthquake Engineering, 16:4, 515-539.
- [35] R. Ozcelik, B. Binici & O. Kurç (2013). Pseudo dynamic test of a deficient reinforced concrete frame upgraded with internal steel frames. Earthquake Engng Struct. Dyn. 2013; 42:763–778.
- [36] MOLINA FJ, Verzeletti G, Magonette G, Buchet PH, Geradin M. Bi-Directional pseudodynamic test of a full-size three-storey building. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28(12):1541-1566, (1999).
- [37] MOLINA FJ, Pegon P, Verzeletti G. Time-domain identification from seismic pseudodynamic test results on civil engineering specimens. 2nd International Conference on Identification in Engineering Systems, University of Wales, Swansea, (1999).
- [38] Türk Deprem Yönetmeliği (TDY 2007). "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", 2007.
- [39] WHITMORE, R.E., Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates, Bulletin No.16, Engineering Experiment Station, University of Tennessee, (1952).
- [40] AMERICAN Society of Civil Engineers, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, Report No.ASCE/SEI 41-06, Reston, Virginia, United States, (2007).
- [41] KENT, D.C. and Park, R., Flexural Members with Confined Concrete, Journal of Structures Division, ASCE, 97(ST7), 1969–1990, (1971).
- [42] OPENSEES Mazzoni, S., McKenna, H., Scott, M.H. and Fenves, G.L., OpenSees Manual, Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://opensees.berkeley.edu>, (2010).



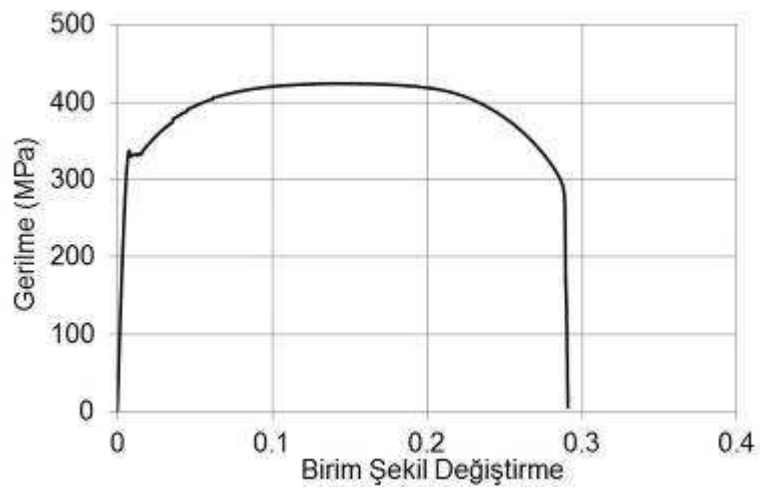
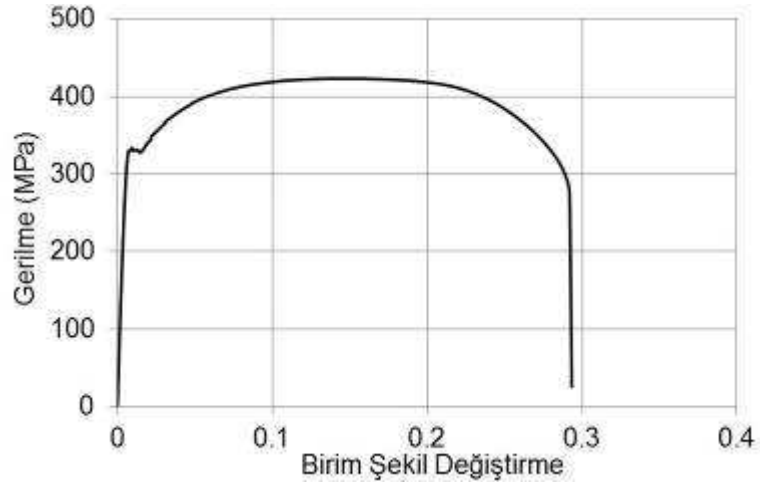
[43] THORNTON, W.A., Bracing Connections for Heavy Construction, Engineering Journal of AISC, Vol.21, 1984.

## 7. EKLER

BEÇÇ'lere ait malzeme test sonuçları.

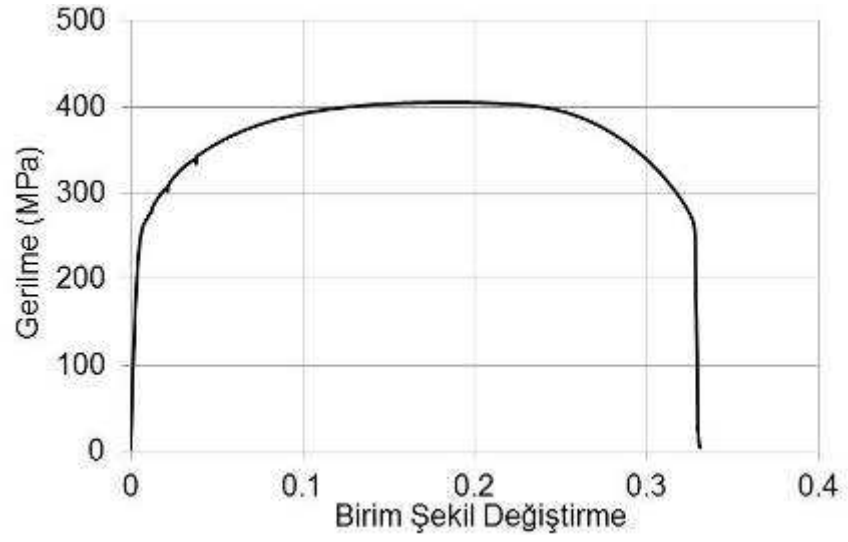
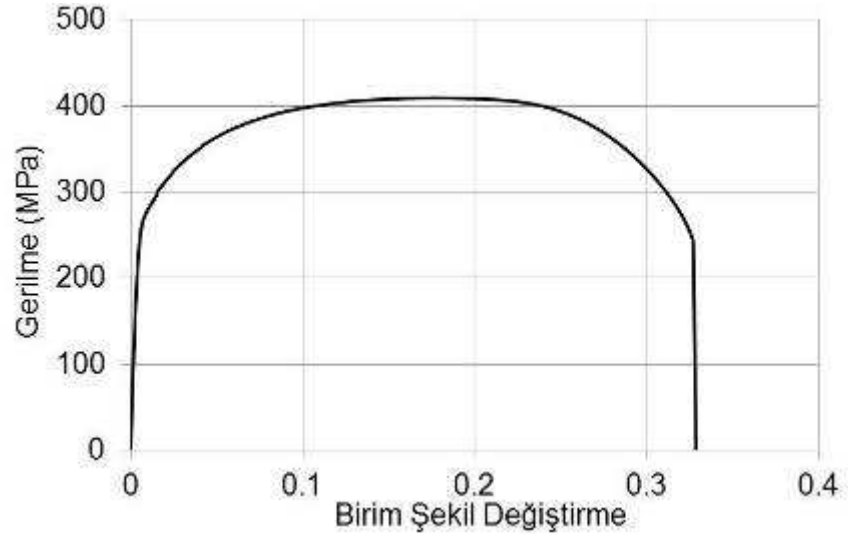


1. BEÇÇ\_1

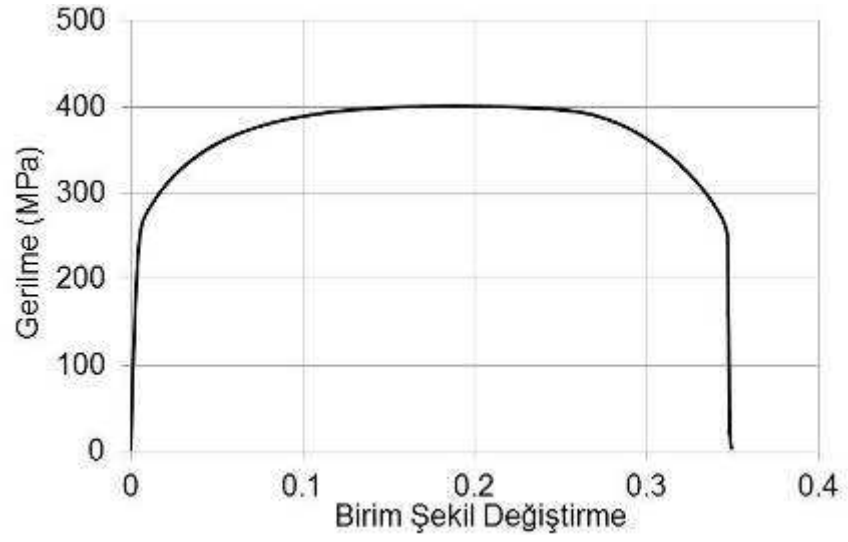
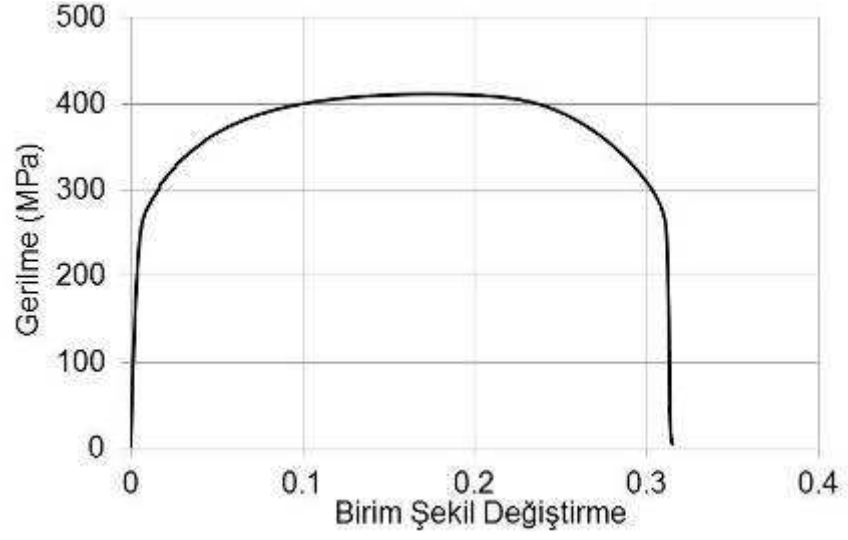


4. BEÇÇ\_1, 1. - 4. BEÇÇ\_3

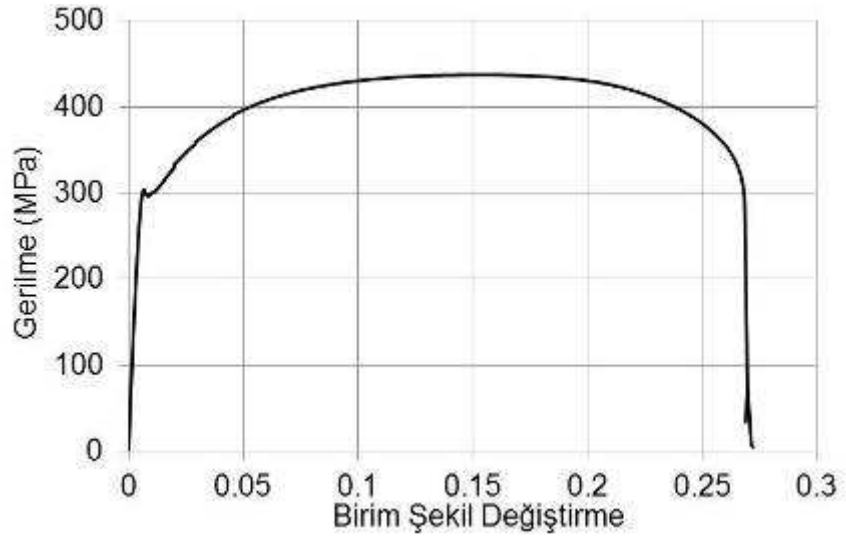
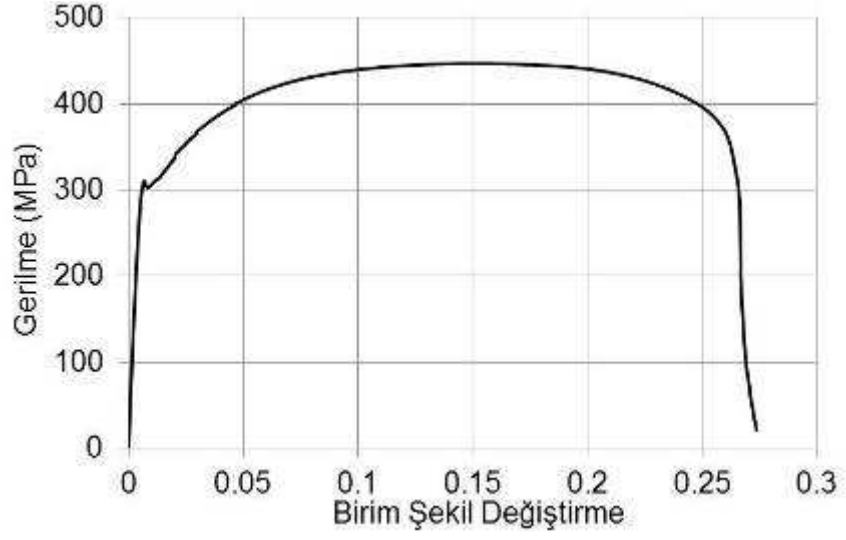




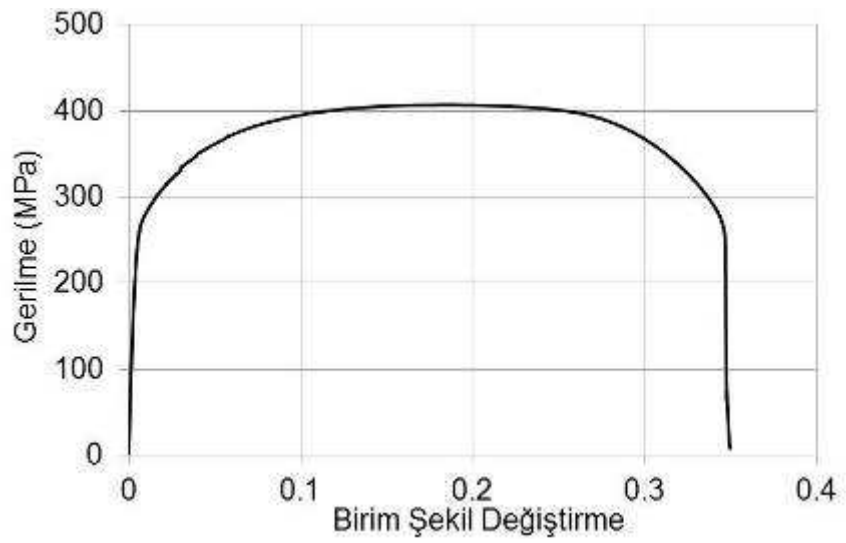
8. BEÇÇ\_1



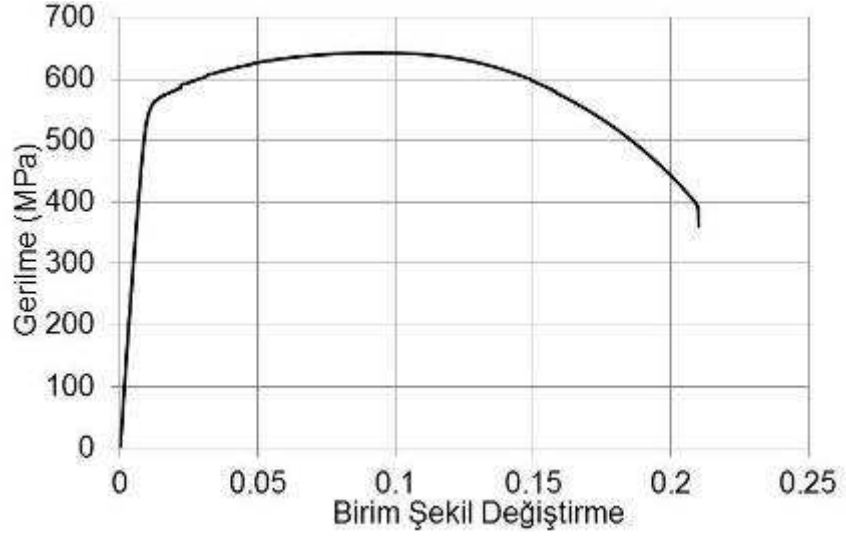
6. BEÇÇ\_1, 3. BEÇÇ\_1, 10. BEÇÇ\_1



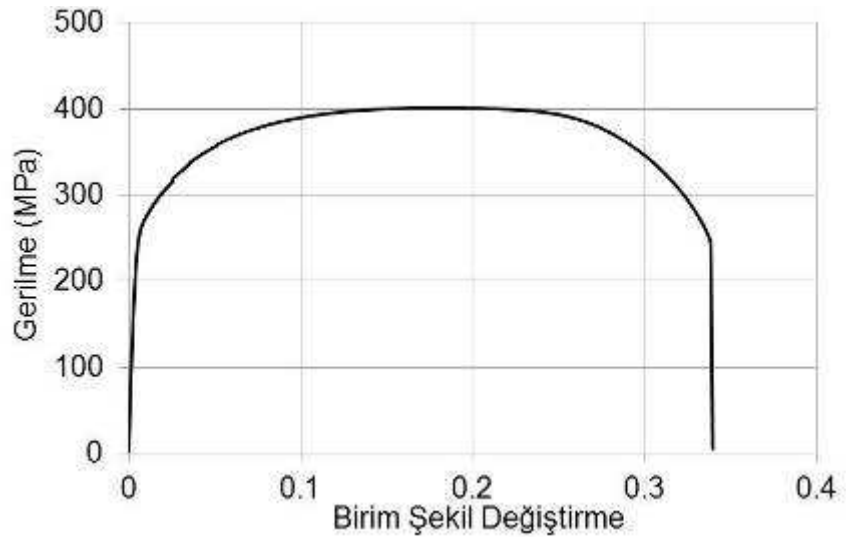
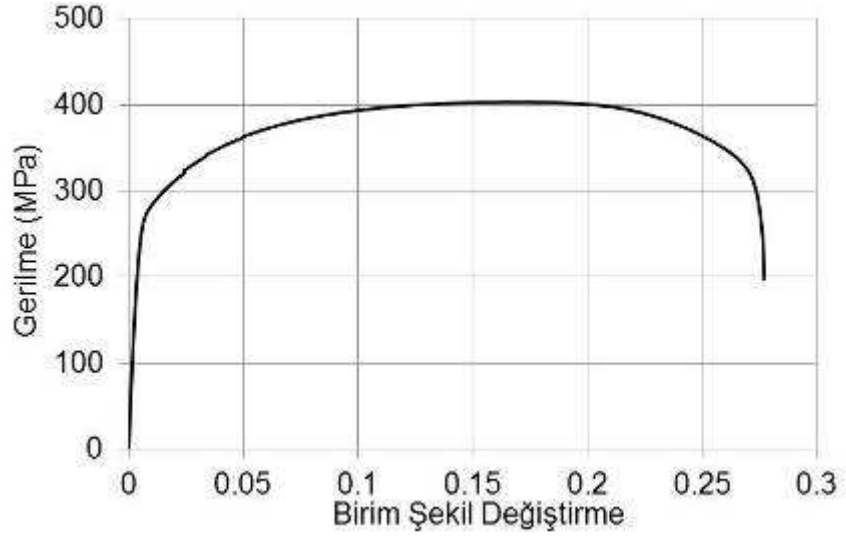
6. ve 7. BEÇÇ\_3



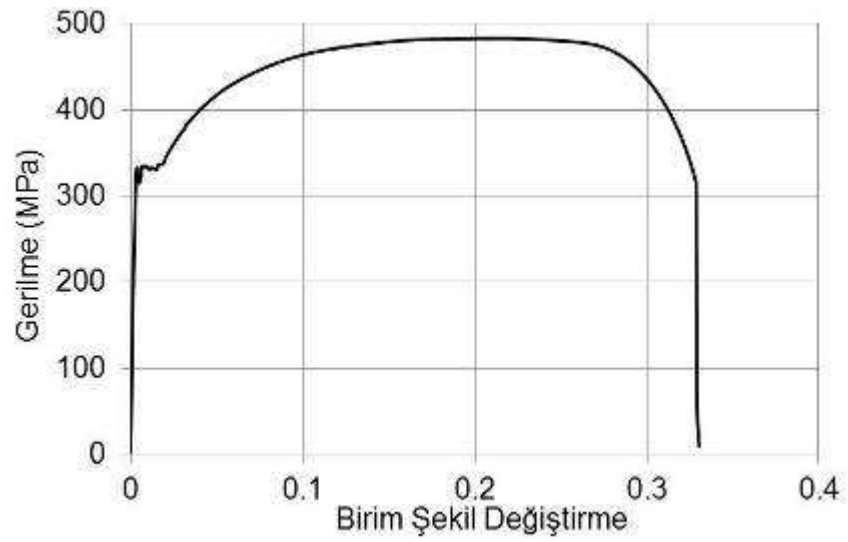
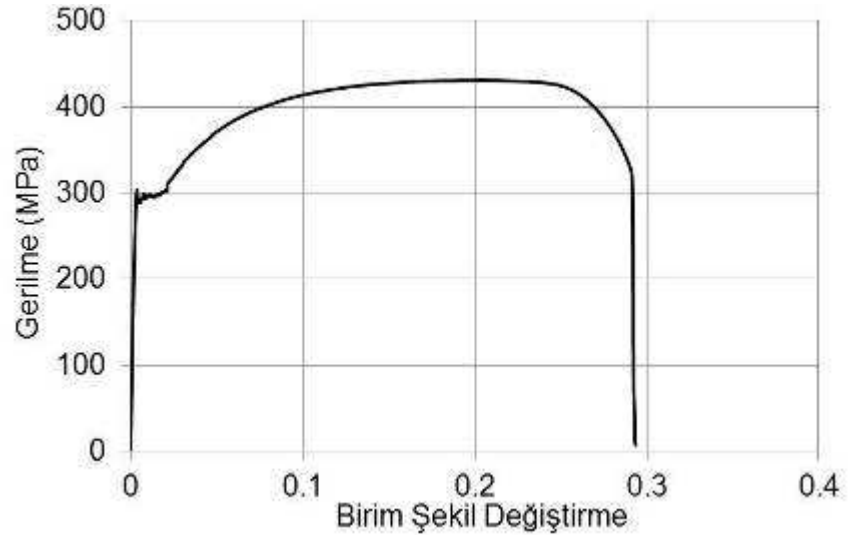
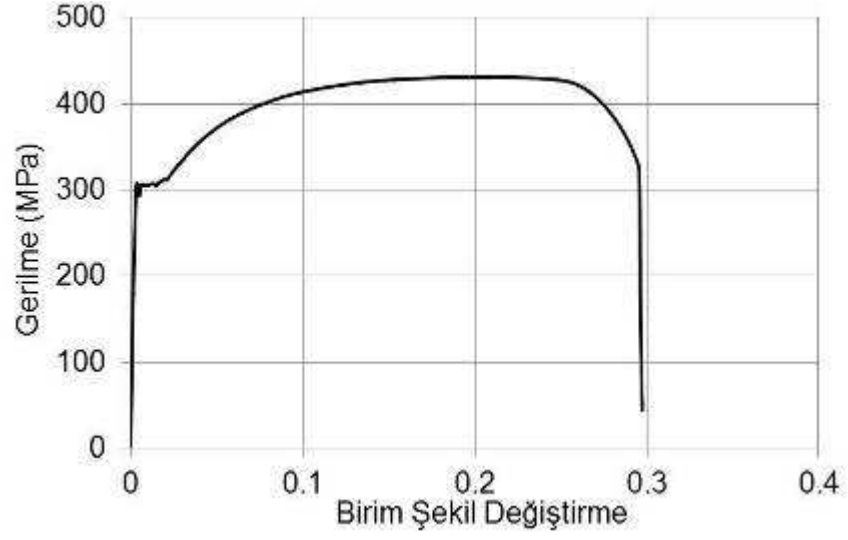
5. BEÇÇ\_3



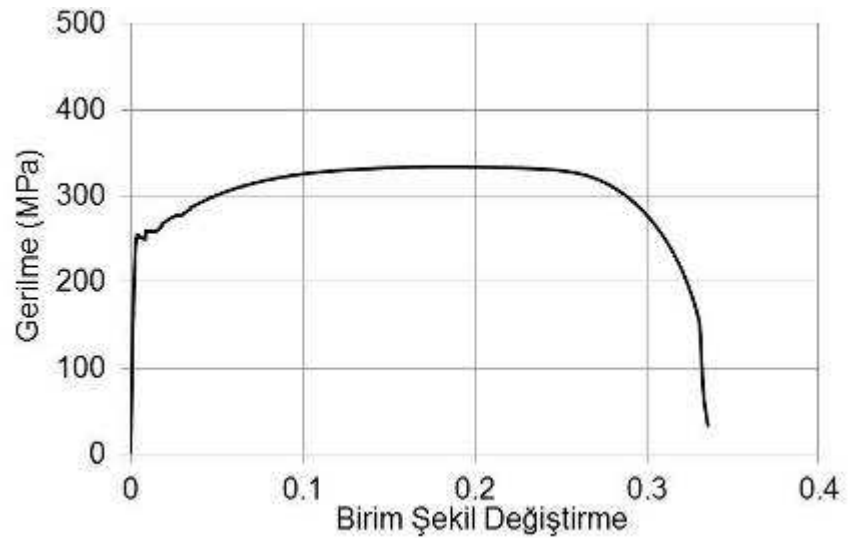
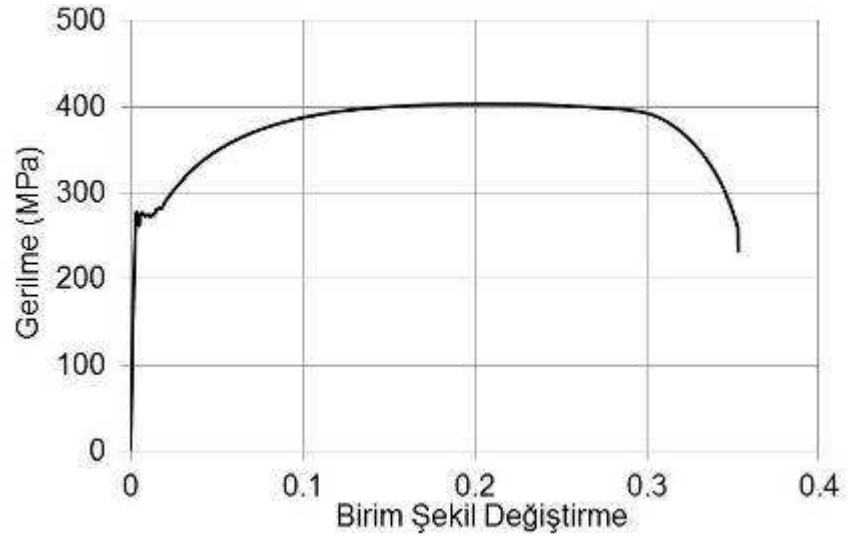
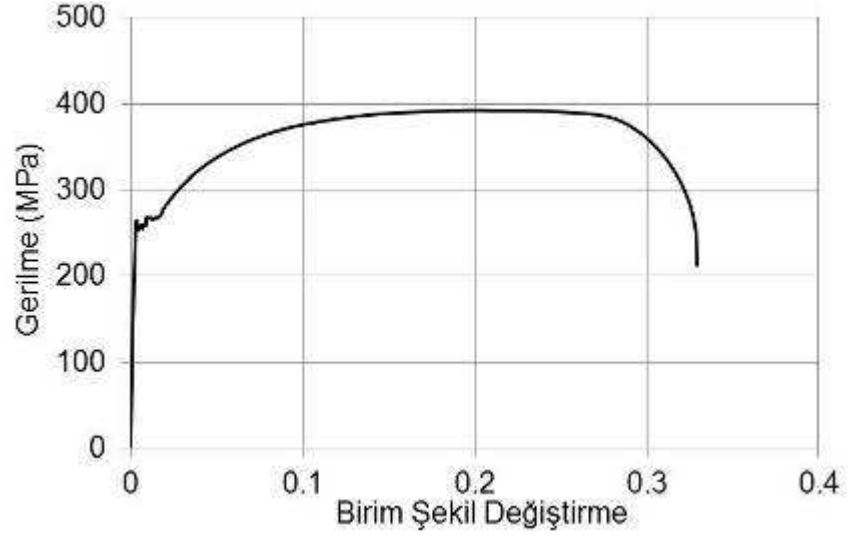
5. BEÇÇ\_1, 9. BEÇÇ\_1, 7. BEÇÇ\_1



1. BEÇÇ\_2, 3. BEÇÇ\_2, 2. BEÇÇ\_2



BEÇÇ'li çerçeve 2. ve 3. Kat BEÇÇ elemanlarının ÇE



BEÇÇ'li çerçeve 1. Kat BEÇÇ elemanlarının ÇE

**TÜBİTAK  
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. RAMAZAN ÖZÇELİK
Proje No:	112M820
Proje Başlığı:	Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazların Geliştirilmesi Ve Betonarme Binaların Depreme Karşı Güçlendirilmesinde Kullanımının Araştırılması
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	CEM TOPKAYA
Danışmanlar:	BARIŞ BINİCİ
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	AKDENİZ Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2013 - 15/03/2016
Onaylanan Bütçe:	298600.0
Harcanan Bütçe:	260362.7
Öz:	<p>Bu çalışmada Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar (BEÇÇ?ler) ve mevcut kusurlu betonarme yapıların BEÇÇ?ler ile güçlendirilmesi, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Eleman bazında yapılan deneylerdeki BEÇÇ tasarımında Burkulmayı Engelleyen Mekanizma (BEM), izolasyon malzemesi ve kalınlığı incelenen ana parametrelerdir. BEM olarak uçları ek profil ve plaka ile güçlendirilen kutu profil+beton, sargılı ve sargısız beton, çok parçalı basınç çubuğu ve prekast paneller (PP?ler) incelenmiştir. BEM?i kutu profil+beton, sargılı beton ve stabil hale getirilen PP?lerden oluşan BEÇÇ?lerin kararlı histeretik davranışa sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bir adet ½ ölçekli 3 katlı-3açıklık kusurlu betonarme çerçeve BEÇÇ?ler ile güçlendirilmiş ve dinamik benzeri deney yöntemi ile test edilmiştir. Artan yatay istemler altında BEÇÇ?li çerçevenin BEÇÇ elemanlarının plastikleşmesi sayesinde yeterli sismik performans gösterdiği yapılan deneylerde tespit edilmiştir. BEÇÇ?li çerçeve doğrusal olmayan zaman tanım alanında yapılan analizleri ile simüle edilmiş ve performans kriterleri belirlenmiştir. Benzer şekilde, gerçek bir binanın BEÇÇ ile güçlendirilmesi ve analizleri BEÇÇ?lerin mevcut kusurlu betonarme yapıların güçlendirilmesinde alternatif bir eleman niteliğinde olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, BEÇÇ eleman ve BEÇÇ ile güçlendirme tasarımının nasıl yapılabileceği tartışılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Deprem, Çelik ve Betonarme Yapılar, Burkulması Engellenmiş Çelik Çapraz, Yapıların Güçlendirilmesi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- THE DEVELOPMENT OF THE BUCKLING RESTRAINED BRACES WITH NEW END RESTRAINS (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),