

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLAR İÇİN FARKLI
BURKULMAYI ENGELLEME MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ**

K. Burç CİVELEK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OCAK 2020

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLAR İÇİN FARKLI
BURKULMAYI ENGELLEME MEKANİZALARININ İNCELENMESİ**

K. Burç CİVELEK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OCAK 2020

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLAR İÇİN FARKLI
BURKULMAYI ENGELLEME MEKANİZALARININ İNCELENMESİ**

**K. Burç CİVELEK
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

Bu tez TÜBİTAK tarafından 118M820 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tez BAP tarafından FDK-2015-1108 nolu tez projesi ile desteklenmiştir.

OCAK 2020

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLAR İÇİN FARKLI
BURKULMAYI ENGELLEME MEKANİZALARININ İNCELENMESİ**

Kazım Burç CİVELEK
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 06 Ocak 2020 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK (Danışman)

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Doç. Dr. Beyhan BAYHAN

Dr. Öğr. Üyesi Hamid Farrokh GHATTE



ÖZET

BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLAR İÇİN FARKLI BURKULMAYI ENGELLEME MEKANİZALARININ İNCELENMESİ

K. Burç CİVELEK

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Ocak 2020; 122 sayfa

Literatürde, burkulmayı engelleyen mekanizmaya (BEM) sahip, burkulması engellenmiş çelik çaprazların (BEÇÇ) farklı tasarımları bulunmaktadır. Ancak bu tasarımların hiçbiri, mevcut yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilecek fiziki boyutlara sahip değildir. Bu çalışma kapsamında, BEÇÇ’lerde düzlem dışı burkulmanın önlendiği, güçlendirme amaçlı kullanılabilir, yeterli histerik performansa sahip BEÇÇ tasarımlarının geliştirilmesi ve üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda Akdeniz Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda BEM’i modüler prekast beton veya betonarme bloklardan oluşan, tam boyutlu, toplam 7 adet BEÇÇ üretilmiş ve eleman bazında testlere tabi tutulmuştur. Tez çalışması kapsamında, üretilen BEÇÇ elemanlarının çekirdek eleman (ÇE) boyutları aynıdır. Elemanlar arasındaki fark, BEM’in geliştirilmiş olmasıdır. Yeterli histerik performans göstermeyen bir önceki eleman, BEM’inin geliştirilmesi sonrası tekrar teste tabi tutulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında ÇE ile BEM arasında yer alan bağımsız arayüzeyde de farklı yaklaşımlara gidilmiştir. Böylece yeni nesil BEÇÇ’lerin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler göstermektedir ki, BEM’in uygun yöntemlerle güçlendirilmesi durumunda, elemanlar iyi histerik davranış, yeterli yük taşıma kapasitesi ve enerji sönmüleme kapasitesi sergilemişlerdir. Böylece mevcut yapıların güçlendirilmesinde BEÇÇ kullanımı diğer güçlendirme yöntemlerine alternatif olabilir.

ANAHTAR KELİMELE: |Burkulması engellenmiş çelik çapraz, Burkulmayı engelleyen mekanizma, Eleman bazında deney, Global ve lokal burkulma, Histerik performans |

JÜRİ: Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Prof. Dr. İzzet UFUK ÇAĞDAŞ

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Doç. Dr. Beyhan BAYHAN

Dr. Öğr. Üyesi Hamid Farrokh GHATTE

ABSTRACT

EXAMINATION OF DIFFERENT BUCKLING RESTRAINING MECHANISMS FOR BUCKLING RESTRAINED BRACES

K. Burç CİVELEK

Ph.D Thesis in Department of Civil Engineering

Supervisor: Associate Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

January 2020; 122 pages

In the literature, there are buckling restrained braces (BRB) which have different buckling restrained mechanisms (BRM). However, none of these designs have the physical dimensions that can be used to reinforce existing structures. Within the scope of this study, it is aimed to develop and produce BRB designs which prevent out of buckling, that can be used for retrofitting and which have sufficient hysterical performance. For this purpose, 7 BRBs with BRMs consisting of modular precast concrete blocks or reinforced concrete blocks, were produced and tested on uniaxial tests at Structural Mechanics Laboratory of Akdeniz University. Within the scope of the thesis study, core plate (CP) dimensions of the BRBs are the same. The difference between the BRBs is enhancement of BRMs. BRM of the previous element, which does not demonstrate sufficient hysterical performance is developed and retested. In addition, different approaches have been used in the unconnected interface between CP and BRM. Thus, the design parameters of the new generation BRBs were identified. The data obtained from this study show that if BRM is strengthened by appropriate methods, BRBs show good hysterical behavior, sufficient load carrying capacity and energy damping capacity. In this way, the use of BRB in strengthening existing structures may be an alternative to other strengthening methods.

KEYWORDS: Buckling restrained brace, Buckling restrained mechanism, Global and local buckling, Hysterical performance, Uniaxial test

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Assoc. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Assoc. Prof. Dr. Beyhan BAYHAN

Dr. Hamid Farrokh GHATTE

ÖNSÖZ

Doktora tez programımın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr.Ramazan ÖZÇELİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez çalışmamı okuyarak, önerileriyle katkılarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Beyhan BAYHAN ve Sayın Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ başta olmak üzere tüm bölüm hocalarıma verdikleri destek için teşekkür ederim.

Yapmış olduğum tez boyunca benden desteklerini esirgemeyen ve hayatımın en önemli parçaları olan anneme, babama, ablam Burcu CİVELEK YÜCE ve Eşi Engin YÜCE'ye binlerce kez teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Arka Plan.....	1
1.2. Amaç	7
1.3. Kapsam.....	7
1.4. Rapora Genel Bakış	8
2. KAYNAK TARAMASI	9
2.1. BEÇÇ’lerin Davranışı ve Tasarım Parametreleri.....	9
2.2. Kaynak Taramaları.....	17
2.2.1. Eleman bazında testlerin performansı	17
2.2.2. Çerçeve benzeri testlerin performansı.....	26
2.2.3. BEÇÇ’li çerçevelerin sistem performansı.....	30
2.2.4. Betonarme yapıların BEÇÇ ile güçlendirilmesi.....	36
2.2.5. Çelik yapıların BEÇÇ ile güçlendirilmesi.....	37
3. MATERYAL VE METOT	43
3.1. Giriş.....	43
3.2. Test Düzeneği ve Yükleme Protokolü	43
3.3. Deney Elemanları.....	50
3.3.1. Deney elemanı 1.....	57
3.3.2. Deney elemanı 2.....	60
3.3.3. Deney elemanı 3.....	63
3.3.4. Deney elemanı 4.....	66
3.3.5. Deney elemanı 5.....	69
3.3.6. Deney elemanı 6.....	72
3.3.7. Deney elemanı 7.....	75

4. BULGULAR	79
4.1. Deney elemanı 1'e ait bulgular	80
4.2. Deney elemanı 2'ye ait bulgular	84
4.3. Deney elemanı 3'e ait bulgular	88
4.4. Deney elemanı 4'e ait bulgular	92
4.5. Deney elemanı 5'e ait bulgular	96
4.6. Deney elemanı 6'ya ait bulgular	101
4.7. Deney elemanı 7'ye ait bulgular	104
5. TARTIŞMA	110
6. SONUÇLAR	115
7. KAYNAKLAR	117
8. EKLER	121
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar İçin Farklı Burkulmayı Engelleme Mekanizalarının İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

06/01/2020

K. Burç CİVELEK

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_{sc}	: Çekirdek elemanın en kesit alanı
A_i	: ÇE burkulması engellenmiş plastik kısım en kesit alanı
b	: Genişlik
β	: Basınç kapasitesi düzeltme çarpanı
C_{max}	: Maksimum basınç kuvveti
E	: Elastisite modülü
E_t	: Tanjant uzama modülü
E_h	: Toplam histerik enerji
F_{ysc}	: Çekirdek elemanın akma dayanımı
F_{usc}	: Çekirdek elemanın kopma dayanımı
G	: Kesme modülü
I	: Atalet momenti
KL	: Çelik çapraz etkili burkulma uzunluğu
l	: Uzunluk
L	: Kiriş açıklığı
η	: Kümülatif inelastik eksenel deformasyon kapasitesi
P_{abs}	: BEÇÇ'nin eksenel yük kapasitesi
P_{ysc}	: BEÇÇ'nin akma kapasitesi
P_y^+	: Efektif kapasite
P_y^-	: Basınç akma kapasitesi
t	: Kalınlık
T_{max}	: Maksimum çekme kuvveti
ω	: Pekleşme düzeltme çarpanı
Q_b	: BEÇÇ tarafından kirişe uygulanan maksimum yük

σ_{cr} : Kritik yük

Δ_{by} : BEÇÇ'nin eksenel akma deformasyonu

Δ_{bm} : Tasarımsal kat ötelemesine denk gelen BEÇÇ deformasyonu

Δ_b : Deformasyon miktarı

, : Ondalık ayırıcı

Kısaltmalar

AISC : American Institute of Steel Construction

BEÇÇ : Burkulması engellenmiş çelik çapraz

BEM : Burkulmayı engelleyen mekanizma

CSA : Canadian Standards Association

ÇÇ : Çelik çapraz

ÇE : Çekirdek eleman

FEMA : Federal Emergency Management Agency

GÇÇ : Geleneksel çelik çapraz

JIS : Japanese Industrial Standart

LRFD : Load and Resistance Factor Design

MÇÇ : Merkezi çaprazlı çerçeve

NBCC: National Building Code of Canada'nın

NEHRP: National Earthquake Hazards Reduction Program

NTU : National Taiwan Üniversitesi

ODTÜ : Orta Doğu Teknik Üniversitesi

OSHP : Office of Statewide Health, Planing and Development

SEAOC: Office of Statewide Health, Planing and Development

SRMD: Seismic Response Modification Device

TÜBİTAK: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çelik çapraz elemanın çevrimsel davranışı	2
Şekil 1.2. Merkezi çaprazlı çerçevenin davranışı	2
Şekil 1.3. BEÇÇ bileşenleri ve ÇÇ ile histerik davranışlarının karşılaştırılması.....	3
Şekil 1.4. ÇE kısımları ve BEÇÇ en kesiti	4
Şekil 1.5. BEÇÇ'nin bayrak levhasına bağlantı biçimleri	5
Şekil 1.6. Farklı tasarımlara sahip BEÇÇ'lerin en kesitleri.....	6
Şekil 2.1. BEÇÇ'nin artan aksenal kuvvet altındaki davranışı.....	9
Şekil 2.2. BEÇÇ örneğine ait omurga eğrisi.....	12
Şekil 2.3. Eleman bazında ve çerçeve benzeri test düzenekleri.....	14
Şekil 2.4. Chevron tipi BEÇÇ sistemli çerçeve	15
Şekil 2.5. Tipik BEÇÇ histerik davranışı	16
Şekil 2.6. Deney düzeneği	19
Şekil 2.7. BEÇÇ test düzeneği ve histerik davranışı	21
Şekil 2.8. BEÇÇ elemanı ve test düzeneği	22
Şekil 2.9. BEÇÇ elemanları arasındaki farka göre histerik davranış eğrileri	23
Şekil 2.10. Yeni nesil BEÇÇ elemanı.....	24
Şekil 2.11. BEÇÇ elemanları, test düzeneği ve BEÇÇ histerik davranışı	27
Şekil 2.12. BEÇÇ elemanları, test düzeneği ve BEÇÇ histerik davranışı	29
Şekil 2.13. BEÇÇ'li çerçeve konfigürasyonu test düzeneği ve BEÇÇ histerik dav	32
Şekil 2.14. Fraklı BEÇÇ tasarımları	33
Şekil 2.15. Üç katlı, üç açıklıklı çerçeve ve BEÇÇ'li çerçeve boyutları	34
Şekil 2.16. Bayrak levhalarına eklenen berkitmeler	35
Şekil 2.17. Çerçeve benzeri deney düzeneği ve BEÇÇ histerik davranışı.....	36

Şekil 2.18. Diyagonal yerleştirilmiş BEÇÇ sistemli çerçeve	38
Şekil 2.19. BEÇÇ histerik davranışı	39
Şekil 2.20. Bayrak levhasında çatlama ve burkulma	40
Şekil 2.21. BEÇÇ histerik davranışı ve BEÇÇ’de meydana gelen hasarlar	41
Şekil 3.1. Eleman bazında test düzeneği.....	44
Şekil 3.2. Piston ve yük hücresi	45
Şekil 3.3. BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlantı detayı	45
Şekil 3.4. Yükleme ve deplasman sayıları	48
Şekil 3.5. Model 5100B ve Testbox 1001 data logger.....	49
Şekil 3.6. Ölçüm cihazlarının yerleştirilmesi.....	49
Şekil 3.7. LVDT ve gerinim pulu yerleşim planı	50
Şekil 3.8. BEÇÇ kısımları ve en kesitleri	50
Şekil 3.9. ÇE plastik bölge en kesit artırımı ve gerinim pulları.....	51
Şekil 3.10. ÇE burkulması engellenmiş ve engellenmemiş elastik kısımları	52
Şekil 3.11. ÇE’nin izolasyon malzemesi ile kaplanması	55
Şekil 3.12. Kızak imalatı ve kalıp içerisine montajı	56
Şekil 3.13. Deney elemanı 1 ve detay çizimleri.....	58
Şekil 3.14. Kalıp, kızak imalatı ve beton dökümü	59
Şekil 3.15. BEÇÇ’nin montajı ve deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	60
Şekil 3.16. Deney elemanı 2 ve detay çizimleri.....	61
Şekil 3.17. Kızak, kalıp imalatı ve beton dökümü	62
Şekil 3.18. Çerçeve ve BEÇÇ’nin montajı ve deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	63
Şekil 3.19. Deney elemanı 3 ve detay çizimleri.....	64
Şekil 3.20. Ek plakaların kaynaklanması, kızak imalatı ve beton dökümü	65

Şekil 3.21. BEÇÇ'nin montajı ve deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	66
Şekil 3.22. Deney elemanı 4 ve detay çizimleri.....	67
Şekil 3.23. Kızak ve ızgara imalatı, kalıbın hazırlanması ve beton dökümü.....	68
Şekil 3.24. BEÇÇ montajı ve deney düzeneğine yerleştirilmesi	69
Şekil 3.25. Deney elemanı 5 ve detay çizimleri.....	70
Şekil 3.26. Kalıpların hazırlanması, ızgara imalatı ve beton dökümü	71
Şekil 3.27. BEÇÇ'nin montajı ve deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	72
Şekil 3.28. Deney elemanı 6 ve detay çizimleri.....	73
Şekil 3.29. Kafes ve ızgara imalatı, kalıpların hazırlanması ve beton dökümü.....	74
Şekil 3.30. BEÇÇ'nin montajı ve deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	75
Şekil 3.31. Deney elemanı 7 ve detay çizimleri.....	76
Şekil 3.32. Izgara imalatı, kalıpların hazırlanması ve beton dökümü.....	77
Şekil 3.33. Tamir harcı uygulaması ve BEÇÇ'nin CFRP ile kaplanması	78
Şekil 4.1. Deney elemanı 1'e ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği.....	80
Şekil 4.2. ÇE eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	81
Şekil 4.3. Bulon kayma değerleri.....	82
Şekil 4.4. BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasman değerleri	82
Şekil 4.5. BEM yan yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerleri	83
Şekil 4.6. Deney elemanı 1'de meydana gelen burkulmalar	83
Şekil 4.7. Deney elemanı 2'ye ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği.....	84
Şekil 4.8. ÇE eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	85
Şekil 4.9. Bulon kayma değerleri.....	86
Şekil 4.10. BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasman değerleri	86
Şekil 4.11. BEM yan yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerleri.....	87

Şekil 4.12. Deney elemanı 2’de meydana gelen global burkulma.....	87
Şekil 4.13. Deney elemanı 3’e ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	88
Şekil 4.14. ÇE eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	89
Şekil 4.15. Bulon kayma değerleri.....	90
Şekil 4.16. BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasman değerleri	90
Şekil 4.17. BEM yan yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerleri.....	91
Şekil 4.18. Deney elemanı 3’de meydana gelen hasarlar	91
Şekil 4.19. Deney elemanı 4’de ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	92
Şekil 4.20. ÇE eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	93
Şekil 4.21. Bulon kayma değerleri.....	94
Şekil 4.22. BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasman değerleri	94
Şekil 4.23. BEM yan yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerleri.....	95
Şekil 4.24. Deney elemanı 4’ün ÇE’sinde meydana gelen burkulmalar	96
Şekil 4.25. Deney elemanı 4’ün BEM’inde meydana gelen hasarlar	96
Şekil 4.26. Deney elemanı 5’e ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	97
Şekil 4.27. ÇE eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	98
Şekil 4.28. Bulon kayma değerleri.....	99
Şekil 4.29. BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasman değerleri	99
Şekil 4.30. BEM yan yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerleri.....	100
Şekil 4.31. Deney elemanı 5’in BEM’inde meydana gelen hasarlar	100
Şekil 4.32. Deney elemanı 6’ya ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği.....	101
Şekil 4.33. ÇE eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	102
Şekil 4.34. Bulon kayma değerleri.....	102
Şekil 4.35. BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasman değerleri	103

Şekil 4.36. BEM yan yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerleri.....	103
Şekil 4.37. Deney elemanı 6’da meydana gelen hasarlar	104
Şekil 4.38. Deney elemanı 7’ye ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	105
Şekil 4.39. Deney elemanı 7’ye ait yorulma testi grafiği	106
Şekil 4.40. ÇE eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği	107
Şekil 4.41. Bulon kayma değerleri.....	107
Şekil 4.42. BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasman değerleri	108
Şekil 4.43. BEM yan yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerleri.....	108
Şekil 4.44. Deney elemanı 7’de meydana gelen hasarlar	109
Şekil 5.1. BEÇÇ’lere ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafikleri	112

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Numune parametreleri ve dayanım değerleri.	19
Çizelge 3.1. Yükleme protokol listesi örneği.....	47
Çizelge 3.2. ÇE'lere ait kupon testi akma ve kopma dayanımları.....	53
Çizelge 4.1. BEÇÇ örneklerine ait maksimum çekme, basınç değerleri ve basınç kapasitesi, pekleşme düzeltme çarpanları	79
Çizelge 5.1. Örneklere ait bağlantı kayma değerleri ve BEM düşey, yanal deplasman değerleri (mm)	114



1. GİRİŞ

1.1. Arka Plan

Yapıların sismik olarak aktif bölgeler içerisinde bulunması, yapıların güçlü yanal çerçeve sistemleri ile desteklenmesini gerektirebilir. Bu bölgelerde yer alan yapıların, sıklıkla meydana gelen küçük depremleri sınırlı hasar ile atlatabilmesi için yeterli dayanıma ve rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda yapılar, nadir olarak gerçekleşen şiddetli depremler sırasında geniş salınımlı inelastik çevrimli deformasyonları sağlayarak güvenliği ve stabiliteyi ekonomik olarak güvence altına almalıdır. Bu inelastik davranış önemli miktarda enerjinin sönümlenmesini sağlamakla birlikte yapının dinamik tepkilerinin etkisini de hafifletmektedir. Son dönemlerde, enerji sönümlemenin ve inelastik performansın sağlanabilmesi amacı ile birkaç farklı sistem geliştirilmiştir. Bu amaçla en sık kullanılan sistemler moment dayanımlı çerçeveler ve merkezi çaprazlı çerçevelerdir (MÇÇ). Moment dayanımlı çerçeveler oldukça esnek yapılar olmakla birlikte inelastik deformasyonlar kiriş boyunca eğilme ve panel bölgelerinde akma olarak gelişmektedir. MÇÇ'ler ise sert, güçlü, ekonomik yapı sistemleridir ve inelastik yanal tepkileri çelik çaprazların inelastik deformasyonları ile karşılamaktadır. Her iki sistemde de yapısal elemanlar çok büyük kuvvetleri ve deformasyon taleplerini bağlantılara ve kalan yapısal sisteme dağıtmaktadır.

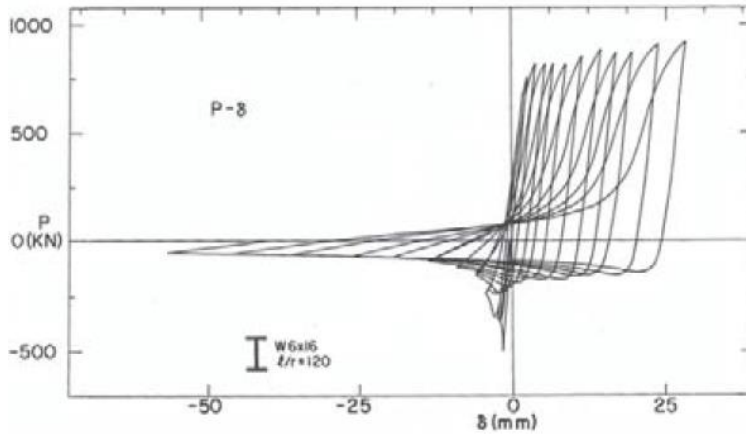
Çelik çaprazlar (ÇÇ) son yıllarda yapılarda sıklıkla kullanılan, depreme ve rüzgara karşı dayanıklılığı arttıran popüler yapı elemanlarından birisidir. Genel olarak bilinmektedir ki ÇÇ'li çerçeveler yapılara etkiyen yatay yükleri aksel rijitlikleri ile orantılı olarak taşımakta ve yapıya yeterli dayanımı ekonomik olarak sağlamaktadır. Ayrıca ÇÇ'li çerçeveler, yapıyı rijitleştirerek deplasmanların azalmasını sağlar. Günümüze kadar sıklıkla uygulanmış sistemlerin birisi geleneksel çelik çaprazlı (GÇÇ) çerçeveler, bir diğeri ise burkulması engellenmiş çelik çaprazlı (BEÇÇ) çerçevelerdir. MÇÇ'lerin tasarımında inelastik deformasyon ve enerjinin sönümlenmesini sağlayan geleneksel burkulabilen ÇÇ'ler kullanılmaktadır. Akbaş vd. (2013)'ün ÇÇ'ler hakkındaki yorumu şöyledir:

“ÇÇ'ler tasarım için gerekli rijitlik ve dayanım şartlarını kolaylıkla sağlamalarına karşılık şiddetli yer hareketleri altında, doğrusal olmayan davranış beklenen taşıyıcı sistemler arasında en tercih edilen taşıyıcı sistem olmamaktadır”.

Akbaş (2011)'de ÇÇ'lerin dez avantajları konusundaki açıklama ise şöyledir:

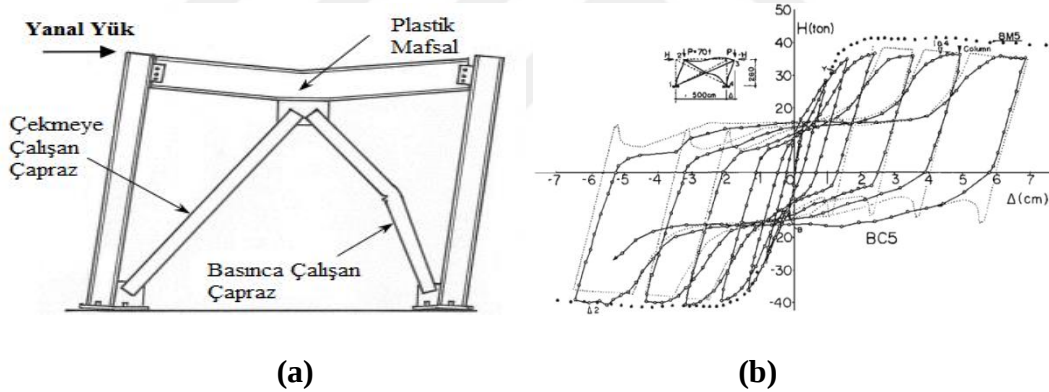
“ÇÇ'ler sınırlı enerji dağıtma kapasiteleri, düşük fazla bağılıkları (redundancy), çevrimsel yüklemeler sırasında çaprazlarda görülen erken kırılma ve çapraz birleşimlerinde gevrek kırılmalar çelik çaprazlar ile ilgili en büyük problemlerdir”.

Bu dezavantajların önemli nedenlerinden birisi ÇÇ'lerin çekme ve basınç kapasitelerinin eşit olmaması, çekme istemleri altında pekleşmesi, basınç istemleri altında ise burkularak yük taşıma kapasitesini hızlı bir şekilde kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere ÇÇ'li çerçeve sisteminde meydana gelen yük taşıma kapasitesindeki ani düşüş nedeni ile çelik çaprazlar şiddetli yer hareketleri altında simetrik histerik davranış gösteremezler.



Şekil 1.1. Çelik çapraz elemanın çevrimsel davranışı (Engelhardt 2007)

Tekil burkulabilen ÇÇ'lerin simetrik olmayan performansı nedeni ile MÇÇ'lerde karşılıklı ÇÇ'ler tasarlanır. Böylece bir ÇÇ çekmede iken diğeri basınca çalışır. Karşılıklı ÇÇ'lerin kullanılması ile histerik eğrilerin çok daha simetrik olması sağlanır. Ancak bu şekilde simetrik histerik davranış geliştirilmiş olsa bile MÇÇ'lerin enerji sönmüleme kapasiteleri sınırlıdır. Şekil 1.2'de ÇÇ'li çerçevenin yanal yük altındaki davranışı görülmektedir.

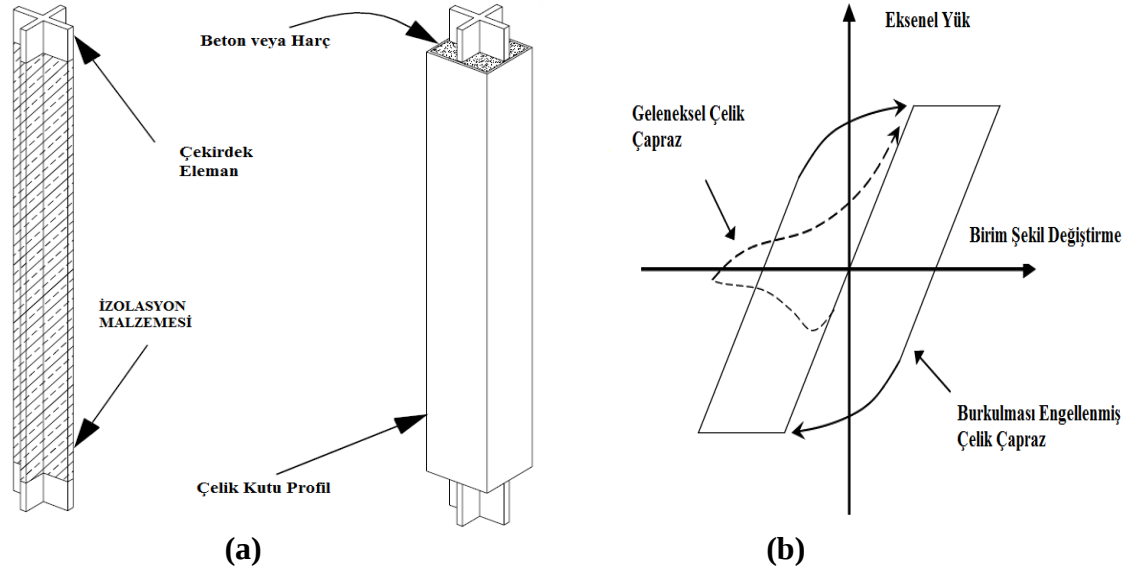


Şekil 1.2. a) Chevron tipi ÇÇ'li çerçevenin yanal yük altındaki davranışı (Bubela vd. 2010); **b)** Tek katlı MÇÇ'nin çevrimsel davranışı (Wakabayashi vd. 1974)

Chevron tipi geleneksel ÇÇ'lerin sismik tasarımda kullanılması, bazı doğal kusurlara neden olabilir. Ortalama yük koşulları altında sistem elastik kalacak, basınca ve çekmeye çalışan çaprazlar eşit yük taşıyacaktır. Ancak daha şiddetli yanal yük koşulları altında, basınca çalışan çaprazdaki eksenel yük, çaprazların yük taşıma kapasitesini aşacak ve çapraz burkulacaktır. Böylece basınca çalışan çaprazın dayanımında ve rijitliğinde önemli kayıplar oluşacaktır. Bu esnada çekmeye çalışan çapraz muhtemelen elastik bölgede yer alacaktır. Ancak basınca çalışan çaprazın burkulması ile birlikte çekmeye çalışan çapraz daha çok eksenel yük taşıyacak ve kiriş ortasında çaprazlı sistemin dengesini bozan bir düşey yük oluşacaktır. Bu durumda Şekil 1.2.a'da görüldüğü gibi kiriş orta bölgesi aşağıya doğru deplasman yapacak, hatta plastik mafsall oluşacaktır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar ise çekirdek eleman adı verilen çelik plakanın burkulmayı engelleyen bir mekanizmayla kaplanması durumunda ÇÇ'ye göre daha yüksek aksel yük kapasitesi elde edildiğini ve çekme, basınç istemleri altında simetrik histerik davranış gözlemlendiğini belirtmektedirler. Bu tip çelik çaprazlar burkulması engellenmiş çelik çaprazlar (BEÇÇ) olarak adlandırılmış olup, yapı içerisine eklenmesi ile birlikte tekrarlı yanal yüklere karşı yapının mukavemetini ve rijitliğini arttırmaktadır.

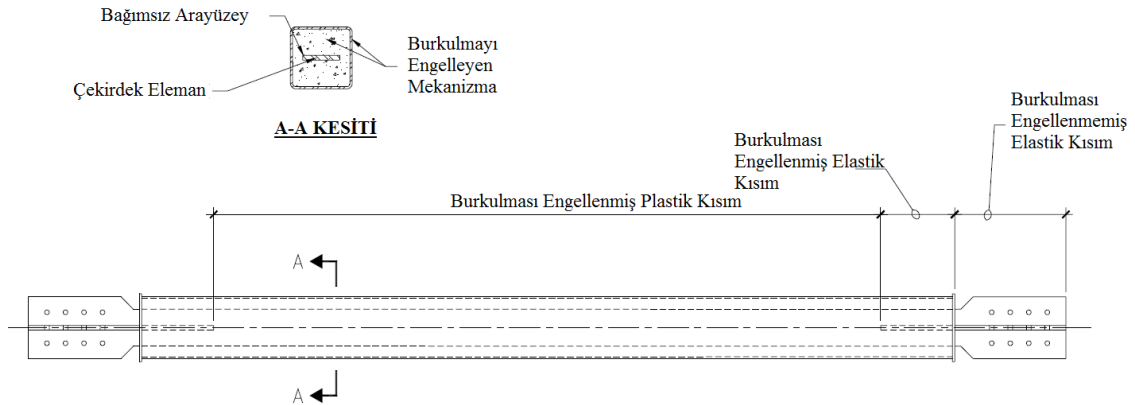
BEÇÇ kavramı ilk olarak 1970'li yıllar da Japonya'da ortaya çıkmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise 2000'li yılların başında kullanılmaya başlanmıştır. 2000'li yıllardan itibaren BEÇÇ'lere olan ilgi ve kullanım hızlı bir şekilde artmıştır. Bu zamana kadar pek çok farklı tipte ve yapıda BEÇÇ'ler incelenmiştir. Fakat en çok kullanılan BEÇÇ tasarımı Şekil 1.3.a'da görüldüğü üzere, çekirdek elemanın (ÇE) kutu profil içerisine yerleştirilmesinden sonra kalan boşlukların beton veya harç doldurulmasıyla elde edilen BEÇÇ tipidir. Bu BEÇÇ tasarımı 1980'li yılların başında Japonya'da geliştirilmiş ve üretilmiştir. Tipik bir BEÇÇ, ince uzun bir çekirdek elemandan (ÇE), çekirdek elemanın aksel basınç kuvvetleri altında burkulmasını önlemesi amacı ile farklı tiplerde mevcut olabilen burkulmayı engelleyen mekanizmadan (BEM) ve çekirdek eleman ile burkulmayı engelleyen mekanizma arasında arzu edilmeyen etkileşimleri engellemek amacı ile bağımsız bir ara yüzeyden oluşmaktadır. ÇÇ ile karşılaştırıldığında, BEÇÇ tasarımında, ÇE'nin lokal ve global burkulmasının önüne geçilerek neredeyse eşit bir çekme ve basınç kapasitesi elde edilmektedir. Sonuç olarak BEÇÇ'lerin geleneksel çelik çaprazlara oranla sismik kapasitesi çok daha etkindir (Corte vd. 2009). Şekil 1.3.b'de geleneksel ÇÇ ile BEÇÇ histerik davranışlarının kıyaslanması görülmektedir.



Şekil 1.3. a) BEÇÇ bileşenleri (Brown vd. 2001); b) ÇÇ ile BEÇÇ davranışlarının karşılaştırılması (Clark vd. 1999)

BEÇÇ'ye uygulanan aksel yükün tamamı ÇE tarafından taşınmaktadır. Yapılan önceki çalışmalarda farklı en kesit şekillerine sahip ÇE'ler üzerinde çalışılmıştır. Ancak en çok karşılaşılan ÇE en kesitleri, Şekil 1.3'de görüldüğü gibi artı (+) şeklinde en kesiti olan ve Şekil 1.5'de görüldüğü gibi ÇE'nin uç en kesiti artı (+),

orta en kesiti ise dikdörtgensel yassı bir plaka şeklinde olanlardır. Şekil 1.4’de görüldüğü üzere ÇE 3 ana kısma ayrılmaktadır. Burkulması engellenmiş plastik kısım; aksenal yükün taşındığı kısımdır. Yüksek aksenal kuvvetler altında oluşan inelastik deformasyonlar bu kısımda görülmektedir. Bu bölgede aksenal basınç kuvveti etkisi ile burkulmalar oluşsa bile burkulmayı engelleyen mekanizmanın çekirdek elemana sağladığı stabilite sonucu aksenal yük taşınmaya devam eder. Bu bölgenin sünek olması beklenir. Burkulması engellenmiş elastik kısım bir geçiş bölgesi olup burkulması engellenmemiş elastik kısım ile burkulması engellenmiş plastik kısım arasında yer almaktadır. Aksenal basınç ve çekme kuvvetleri altında plastik bölgenin burkulması veya pekleşmesi olayları beklenirken bu bölgenin elastik davranış göstermesi beklenir. Genelde bu bölgenin en kesit alanı artırılmış ve bu bölgeye dik ek plakalar kaynaklanmıştır. Burkulması engellenmemiş elastik kısım ise BEÇÇ’nin bayrak levhasına bağlantısının yapıldığı kısımdır. Bu kısım bağlantı detaylarına göre boyutlandırılmaktadır. Burkulması engellenmiş elastik kısımda başlayan ek plakalar bu kısımda da yer almaktadır. Ayrıca diğer kısımlardan farklı olarak bu kısım BEM ile çevrelenmemiştir. Geçmiş çalışmalar bakıldığında farklı BEM tasarımlarına sahip BEÇÇ’ler görülmektedir. Bu amaçla BEM’ler iki ana grup altında toplanabilir. BEÇÇ’lerin çoğunun üretiminde kullanılan BEM’lerden yukarıda bahsetmiştik. Burada BEM’de yer alan çelik kutu profil, BEÇÇ’nin global burkulma olasılığına karşı boyutlandırılır. Ancak bu tip BEM’lerin üretim sürecinde kalite kontrolü ile ilgili problemler ve ÇE’nin her iki ucunda ki tasarım detaylarında esneklik problemleri tespit edilmiştir. (Iwata ve Murai 2006; Eryaşar 2009). ÇE’nin burkulmasını önlemede kullanılan diğer bir seçenek ise sadece çelik profil kullanımıdır. Bu tip BEM’lerde, yüksek gerilmeler altında yeterli histerik davranışı sağlamaktadır (Iwata vd. 2000).

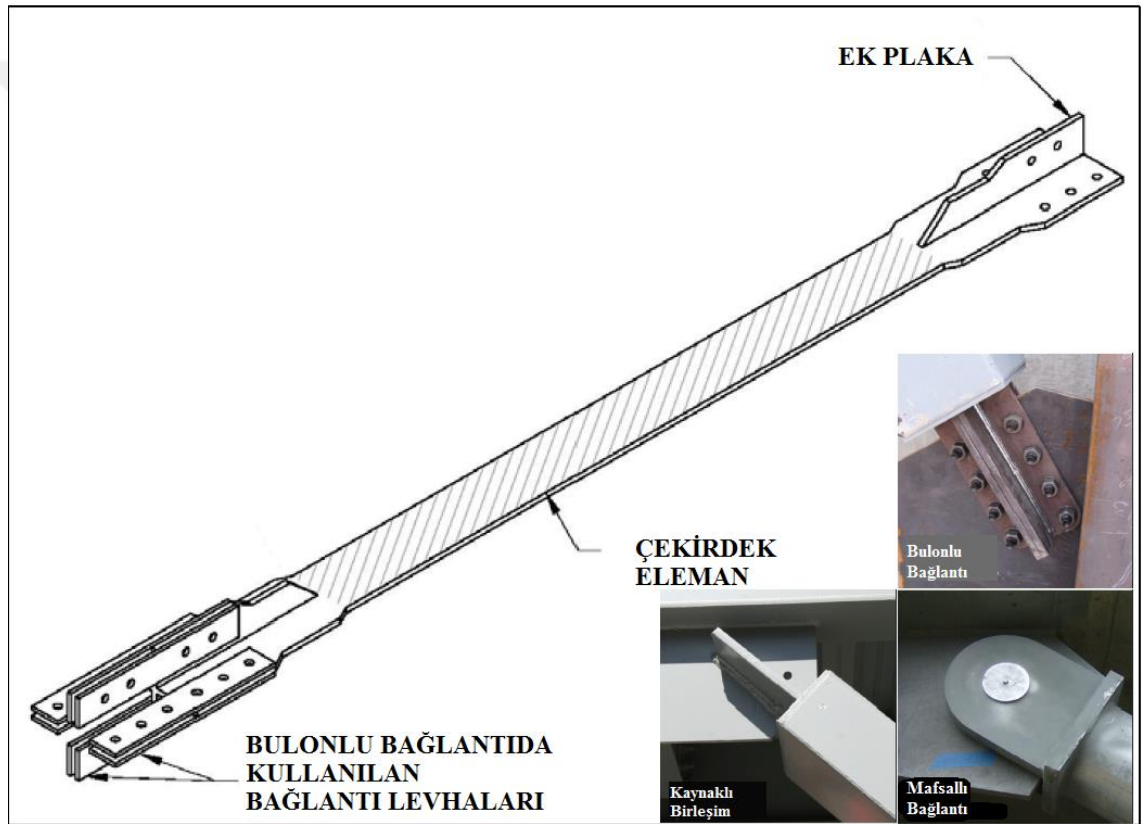


Şekil 1.4. ÇE kısımları ve BEÇÇ en kesiti (Lopez ve Sabelli 2004)

ÇE ile BEM arasında yer alan bağımsız ara yüzeyde kullanılan izolasyon malzemesinin veya hava boşluğunun asıl amacı BEÇÇ’nin çevrimli hareketi sırasında oluşacak kesme kuvveti transferinin engellenmesidir. Bu amaçla ÇE yüzeyine lastik, polietilen, silikon gres veya mastik bant gibi izolasyon malzemelerinin uygulanması geçmiş çalışmalarda ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Ayrıca bağımsız ara yüzey, ÇE bölümünün enine genişlemesine de izin vermektedir. Basınç kuvvetleri altında, ÇE Poisson etkisi ile her iki yönde enine genişler. Bağımsız ara yüzeyin bu genişlemeye izin verecek kalınlıkta olması yeterlidir. Yoksa ÇE ile BEM arasında taşıma etkileri

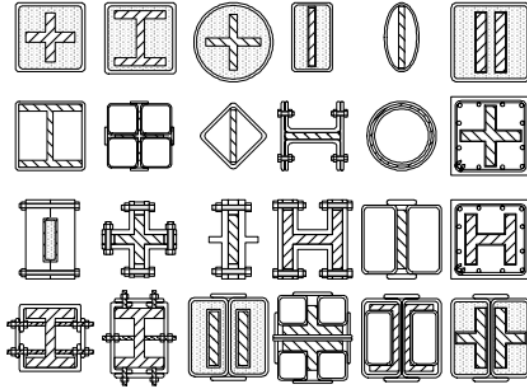
tarafından sürtünme etkileri oluşur ki bu da bir miktar eksenel yükün BEM tarafından karşılanmasına neden olur. Diğer taraftan, bağımsız ara yüzeyin gerekenden fazla olması durumunda ise çevrimli yüklemenin düşük deplasman değerlerinde bile ÇE’de burkulmalar görülebilir.

BEÇÇ’li çerçevelerde, BEÇÇ ile çerçeve arasında bağlantıyı sağlayan bayrak levhalarının tasarımı çok önemlidir. BEÇÇ üzerindeki inelastik talepler, bayrak levhalarında yüksek burkulma taleplerine neden olmaktadır. Bayrak levhaları BEÇÇ ile çerçeve elamanları arasındaki kuvvetlerin geçişini uygun bir şekilde ve ekonomik olarak sağlamalıdır. Bu nedenle bayrak levhaları BEÇÇ’ye yeterli inelastik etkiyi sağlamalı ve aynı zamanda sistem deformasyonlarına da izin vermelidir. BEÇÇ’nin bayrak levhasına montaj biçimleri farklılık göstermektedir. Şekil 1.5’de görüldüğü üzere bağlantılar bulon ve bağlantı levhaları, mafsalsal veya kaynak ile yapılabilmektedir.



Şekil 1.5. BEÇÇ’nin bayrak levhasına bağlantı biçimleri (Christopoulos 2005)

Yukarıda bahsedilen, artı (+) en kesitli ÇE’ye ve çelik kutu profil içerisine beton veya harç dökülmesi ile elde edilen BEM’e sahip BEÇÇ tipinin üretim haklarına, Japonya’da bulunan Nippon Steel firması sahiptir. Son 20 yıldır Amerika Birleşik Devletleri’nde bulunana firmalar ise dikedörgensel ÇE’ye sahip BEÇÇ’lerin üretimi üzerinde durmaktadır. Ayrıca kullanım alanları çok kısıtlı da olsa dünya çapında farklı tasarımlara sahip pek çok BEÇÇ üretilmiş, testleri yapılmış veya tanıtılmıştır. Şekil 1.6’da aynı temel prensiplere dayanan, ancak farklı tasarımlara sahip BEÇÇ en kesitleri görülmektedir.



Şekil 1.6. Farklı tasarımlara sahip BEÇÇ'lerin en kesitleri (Lai ve Tsai 2004)

BEÇÇ tasarımları başta Japonya olmak üzere pek çok ülkede şartnamelere dahil edilmişlerdir. Ancak ülkemizde kullanılan yönetmeliklerde ve Deprem Şartnamesi'nde BEÇÇ'lerin tasarım parametreleri hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise 2005 yılında yayınlanan AISC 341-05 Çelik Yapılar İçin Sismik Şartnamesi'nde BEÇÇ'lere ait tasarım şartları yer almaktadır. Bu şartname için çerçeve benzeri ve eleman bazındaki deney düzeneklerinde, test elemanlarına çevrimli testler uygulanmış ve şartnameye BEÇÇ tasarım parametreleri eklenmiştir. Çerçeve bağlantılarının ve bitişik elemanların tasarım için gerekli olan BEÇÇ'nin gerekli eksenel yük kapasitesi (P_{abs}), AISC 341-05 şartnamesinde aşağıdaki gibi belirtilmiştir;

$$P_{abs} = \beta \omega P_{ysc} \text{ basınç durumunda} \quad (1.1)$$

$$P_{abs} = \omega P_{ysc} \text{ çekme durumunda} \quad (1.2)$$

$$P_{ysc} = F_{ysc} A_{sc} \quad (1.3)$$

Burada F_{ysc} : kupon testinden elde edilen ÇE'nin gerçek akma dayanımı; A_{sc} : ÇE'nin net alanı; β : basınç kapasitesi düzeltme çarpanı; ω : pekleşme düzeltme çarpanı.

BEÇÇ'nin detaylarına bağlı olan düzeltme çarpanları β ve ω kalifikasyon testleri ile belirlenmektedir. BEÇÇ'li sistem güçlü yanal yüklere maruz kaldığında, BEÇÇ'ler kendi akma dayanımı değerlerinden 10 ile 20 kat daha büyük eksenel gerilmelere maruz kalırlar. Ayrıca, üretim detaylarına bağlı olarak, ÇE ile BEM arasında belirli miktarda sürtünme kaçınılmazdır. Bu durumda sürtünme kuvvetinin transferi, BEÇÇ üzerindeki kuvvetin artmasına neden olur. Test elemanının, pekleşme düzeltme çarpanı, ω , kalifikasyon testlerinde ölçülen maksimum çekme kuvvetinin, akma kapasitesine, P_{ysc} , oranıdır. BEÇÇ basınç kuvvetine maruz kaldığında, ÇE'nin enine genişlemesi Poisson etkisine bağlı olarak vuku bulmaktadır. Enine genişlemenin sonucunda temasa bağlı sürtünme direnci artmaktadır. Poisson etkisi nedeni ile aynı deplasman değerlerinde, basınç kuvveti seviyesi çekme kuvveti seviyesinden daha yükseğe ulaşmaktadır. Basınç kapasitesi düzeltme çarpanı, β , test elemanının maksimum basınç kuvvetinin maksimum çekme kuvvetine oranı olarak hesaplanmaktadır. AISC Sismik Şartnamesi, basınç

kapasitesi düzeltme çarpanın, akma deplasmanından daha büyük deplasman değerlerinde β 'nın 1,3'den küçük olması gerektiğini belirtmektedir.

Son yıllarda BEÇÇ kullanımı dünya çapında hızlı bir şekilde artmaktadır. Bunun nedeni diğer enerji sönümleyici içeren sistemlere kıyasla daha güvenilir, kolay inşa edilebilir ve ekonomik olmasıdır. Ayrıca BEÇÇ'ler kullanıldıkları yapıya özel bir görünüm sağlamaktadır. BEÇÇ'lerin tasarım üzerindeki avantajını kullanarak bazı yapılar kendilerine has görünüme kavuşmuşlardır. Bunlara örnek olarak Utah'daki Wallace F. Bennett Federal Binası, California'daki Genom & Biomedical Science Binası, Tianjin'deki Goldin Finance 117 Gökdeleni, Tokyo'daki Takenaka Corporation Binası ve İzmir'deki Folkart Kuleleri verilebilir.

Ülkemizde BEÇÇ'li çerçeve sistemlerinin kullanılması oldukça yeni bir konudur. BEÇÇ'li sistemlerin kullanımının artırılması amacı ile pek çok proje tasarım aşamasında, bu tarz çaprazlardan yararlanılarak tasarlanmıştır. Ancak 2012 senesine kadar bu sistemlerin kullanımı gerçekleşmemiştir. Türkiye'de ilk kez uygulama imkanı İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Yerleşkesi'nde bulunan ETB Teknokent Projesi Arı 6 binasında olmuştur. (Çetinkaya 2013)

1.2. Amaç

Bu tez çalışması 112M820 numaralı, TÜBİTAK 1001 ve FDK-2015-1108, BAP projeleri kapsamında icra edilmiştir. BEÇÇ'lerin eleman bazında testleri Akdeniz Üniversitesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 7 adet BEÇÇ üretilmiş ve çevrimli yükleme deneylerine tabi tutulmuştur.

Bu çalışmanın amacı, BEÇÇ'lerde meydana gelen düzlem dışı burkulmanın önleildiği, güçlendirme amaçlı kullanılabilir, yeterli histerik performansa sahip ve yenilikçi BEÇÇ modellerinin geliştirilmesi ve eleman bazında testlerinin yapılmasıdır. Bu amaç ile literatürde yer alan kusurlu BEÇÇ tasarımlarının iyileştirilmesi ve yeni inşa edilecek veya mevcut betonarme yapıların ekonomik olarak güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında tasarlanan, üretilen ve test edilen BEÇÇ'lerin portatif, kolay imal edilebilir, montaj ve demontajının mümkün olduğunca basit olmasına dikkat edilmiştir.

Bu çalışma ile BEÇÇ'li sistemlerin üretilmesi ve betonarme yapıların güçlendirilmesi hususunda tasarım yöntemleri belirlenecektir. Ayrıca bu çalışmanın TS500 ve Deprem Şartnamesi'nde bulunmayan BEÇÇ üretim parametreleri ve betonarme yapıların BEÇÇ'li sistemler ile depreme karşı güçlendirilmesi konusunda tavsiye niteliğinde olacağı düşünülmektedir.

1.3. Kapsam

BEÇÇ'ler hakkında literatürde geniş çaplı bilgi bulunmasına rağmen mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesi hususunda çok kısıtlı bilgi bulunmaktadır. Ayrıca BEÇÇ boyutları çerçeve elemanlarının boyutlarına göre farklılık göstermesine rağmen ülkemizdeki depreme karşı kusurlu yapı stoku göz önünde bulundurulduğunda, ortalama 3 m uzunluğunda ve 250-500 kg ağırlığında BEÇÇ'lerin mevcut yapı içerisine

uygulanması oldukça zordur. BEÇÇ'lerin yapının dışına uygulanması durumunda ise yapı mimarisi üzerinde olumsuz etkileri olacaktır. Bu nedenle mevcut yapıların güçlendirilmesinde kullanılacak BEÇÇ'lerde yenilikçi bir tasarım ortaya konulmalıdır. Bu çalışma kapsamında Akdeniz Üniversitesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarında modüler prekast betonlardan oluşan BEM'e sahip tam boyutlu (1:1 ölçeğinde) toplam 7 adet BEÇÇ üretilmiş ve eleman bazında testleri gerçekleştirilmiştir.

1.4. Rapora Genel Bakış

Tez çalışması kapsamında, 1. Bölüm'de konuyla ilgili temel hususlar, konunun kapsamı ve amaçları belirtilmiştir. Bu kapsamda BEÇÇ'li sistemlerin diğer enerji sönmüleyen sistemlere göre artıları, genel hatları ile BEÇÇ tasarımı, literatürde mevcut farklı BEÇÇ elemanları, BEÇÇ tasarım parametrelerine genel bakış, BEÇÇ'li sistemlerin uygulandığı örnekler ve bu çalışmadan beklenen faydalar irdelenmiştir.

Bölüm 2'de BEÇÇ'lerin yük altındaki davranışları ve tasarımlarındaki önemli parametreler detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bunlara ek olarak literatürde mevcut olan BEÇÇ'lerin eleman bazında, çerçeve benzeri ve BEÇÇ'li çerçevelerin sistem performansı ayrıca çelik ve betonarme yapıların BEÇÇ'li sistem ile güçlendirilmesi konularında yapılmış önemli çalışmaların özetleri de verilmiştir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların detaylı anlatımı Bölüm 3'de sunulmuştur. Yeni nesil BEÇÇ'lerin tasarım detayları, üretim aşaması ve eleman bazındaki deney düzeneğinden bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde tasarım detaylarına ait AutoCad çizimleri ve üretim aşamasını detaylı bir şekilde gösteren fotoğraflar yer almaktadır.

4. Bölüm'ün ilk kısmında yeni nesil BEÇÇ'lerin eleman bazındaki deneylerinden elde edilen veriler irdelenmiştir. Bu bölüm içerisinde elemanlara ait eksenel yük deplasman ve eksenel yük birim şekil değiştirme grafikleri sunulmuştur. Ayrıca deney sonrası deney elemanlarına ait hasar fotoğrafları da yer almaktadır.

Tartışma başlıklı bölüm 5'de yeni nesil BEÇÇ'lerin literatürde mevcut BEÇÇ'ler ile kıyaslanmasına ve bu tez çalışmasının dahil olduğu Tübitak 1001 projesi kapsamında gerçekleştirilen BEM'i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ ile karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

Son bölüm olan Sonuçlar bölümünde (Bölüm 6) çalışmanın kısa bir özeti ve bu çalışma sonucunda elde edilen nihai bulgulara ve önerilere yer verilmiştir.

Bölüm 7'de tezin yazımında faydalanılan literatür kaynakları sunulmuştur.

2. KAYNAK TARAMASI

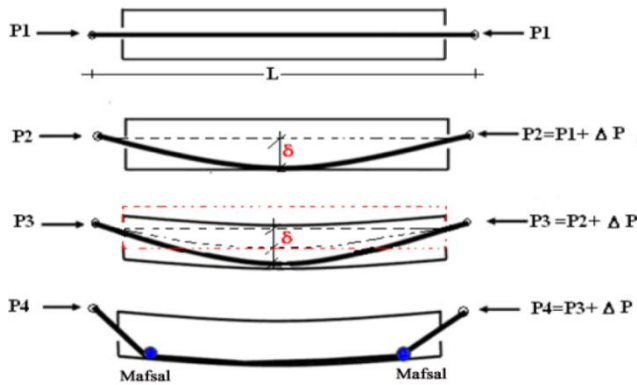
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen BEÇÇ'lerin deneysel çalışmalarına geçmeden önce, literatürde mevcut olan BEÇÇ'lerin tasarım parametrelerini, üretim aşamasını, elaman bazında, çerçeve benzeri deneylerini ve BEÇÇ'li çerçevelerin sistem performansını anlamak oldukça önemlidir. Bu amaçla daha önce yapılmış çalışmaların incelenmesi, bu çalışma dahilinde de üretilecek olan deney elemanlarının tasarım parametrelerinin belirlenmesi açısından yararlı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu literatür taraması ile literatürdeki eksiklerin tespit edilip bu eksiklerin giderilmesine yönelik bir tez çalışması olması hedeflenmiştir.

Bu bölüm, daha önce yapılmış araştırmaların ve dokümanların özetlerini içermektedir. Bu bölümün ilk aşamasında BEÇÇ ve BEÇÇ'li çerçevelerin tasarım parametrelerinin neler olduğu ve bu konuda yapılmış öncü çalışmalar incelenecektir. İkinci bölümde ise literatürde mevcut olan, farklı tasarımlara sahip BEÇÇ'lerin elaman bazında, çerçeve benzeri ve BEÇÇ'li çerçevelerin testleri ve deney sonuçları irdelenecektir. Üçüncü bölümde ise betonarme ve çelik çerçevelerde güçlendirme amaçlı kullanılan BEÇÇ'li çerçevelerin tasarımları, deneysel süreci ve sonuçları irdelenecektir.

2.1. BEÇÇ'lerin Davranışı ve Tasarım Parametreleri

Basınç kuvvetine maruz kalan BEÇÇ elemanının ÇE bileşeninde bir süre sonra doğal olarak eğilme davranışı görülecektir. Bu davranışın etkisi ile ÇE BEM'e temas edecektir. Temas sonucunda tüm BEÇÇ'de düzlem dışı deformasyon artacak ve eğer BEM'in rijitliği ve dayanımı yetersiz ise hedeflenen deplasman miktarına ulaşmadan BEÇÇ elemanının dayanımında bozulma oluşacaktır (Nader ve Behzad 2012). BEÇÇ'lerin davranışı incelendiğinde Çetinkaya (2013) şöyle demektedir:

“Eksenel yük altında burkulmaya başlayan ÇE, BEM'e temas etmesi ile birlikte BEM orta noktasından yüklenmiş basit kiriş davranışı sergilemeye başlar. Yük arttıkça temas yüzeyi genişler ve ÇE, BEM üzerinde daha geniş bir yüzeye yayılmaya başlar. BEÇÇ'nin eksenel yükleme ile birlikte eğilme gerilmesi nedeniyle burkulduğu ve bu davranıştan kaynaklanan momentin temas yüzeyinin artması ile birlikte güçlendirme bölgesi ile akma bölgesi uçlarında yoğunlaştığı görülmüştür”.



Şekil 2.1. BEÇÇ'nin artan eksenel kuvvet altındaki davranışı (Çetinkaya 2013)

“İki ucu mafsallı, iki ucundan yüklü BEÇÇ’de deformasyon ve moment karşılıklı olarak gelişir. Uçtan başlayarak tutulmayan uzunluk boyunca artan moment ÇE’nin BEM’le temas ettiği ilk noktadan sonra azalmaya başlar. Momentin azalmaya başladığı noktadan sonra bir uzunluk belirlemek ve ÇE’yi bu boyda güçlendirmek gerekmektedir. (Yazan 2004)”.

“BEÇÇ’lerin sismik enerjiyi sönümlemesi ancak çekirdek elemanın akma gerilmesine ulaşmasına ve inelastik deformasyon yapmasına bağlıdır. Bu durumda, BEÇÇ’lerin bütün olarak amaçlanan eksenel kuvvete ulaşana kadar, stabilitesini koruması gerekir (Yazan 2004)”.

BEM’i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ’lerin artan eksenel kuvvet altındaki davranışlarını belirledikten sonra stabilite analizlerinin tanımlanması oldukça önemlidir. Bu amaçla iki belirgin burkulma yöntemi tanımlanmıştır: (1) bütün BEÇÇ’nin global eğilme burkulması ve (2) yüksek modlarda ÇE’nin burkulması (Black vd. 2004).

Global eğilme burkulması durumunda kritik yük sadece kutu profilin Euler burkulma yüküdür.

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A_i} = \frac{P_e}{A_i} \approx \frac{\pi^2 E_0 I_0}{A_i (KL)^2} \quad (2.1)$$

Burada A_i = ÇE’nin plastik kısmının en kesit alanıdır. E_0 ve I_0 =sırası ile kutu profilin elastisite modülü ve atalet momentidir; ve KL = BEÇÇ’nin etkili burkulma uzunluğudur.

Yüksek modlarda ÇE’nin burkulmasına bağlı kritik yük aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A_i} = \frac{2 \sqrt{\beta E_t I_i}}{A_i} \quad (2.2)$$

Burada β = boyut ile dağıtılmış yay katsayısıdır. $[F]/[L^2]$ BEM içerisinde kullanılan harcın birim uzunluğu başına rijitliğini temsil etmektedir. E_t = Tanjant uzama modülü; ve I_i = ÇE’nin atalet momentidir.

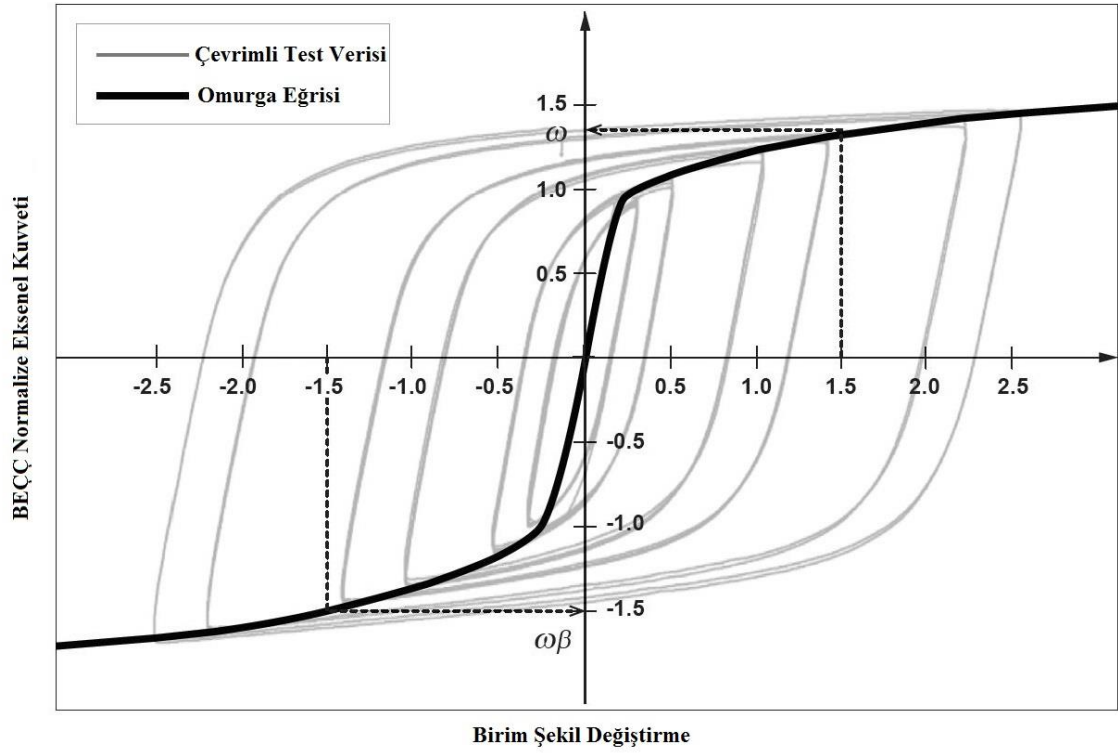
Amerika Birleşik Devletleri’nde BEÇÇ’li çerçeveler eşdeğer-yanal kuvvet yöntemi kullanılarak tasarlanmaktadır. Diğer MÇÇ tipleri için kullanılan tipik tasarım modelinde olduğu gibi, çerçevenin yeterli rijitliğe sahip olduğu kanıtlamak ve gerekli dayanımını belirlemek için lineer elastik model, indirgenmiş sismik yüklere maruz bırakılır. BEÇÇ’li çerçevelerin bu yöntemle göre, elastik ve inelastik deformasyon şekilleri arasındaki fark MÇÇ’lere oranla daha azdır. Bu nedenle inelastik dinamik analiz, elastik analize oranla BEÇÇ süneklilik taleplerinin tahminini çok daha iyi vermesine rağmen, inelastik analize umumiyetle gerek duyulmaz (Fahnestock vd. 2003; Lopez ve Sabelli 2004).

Böyle bir elastik analizin geçerli olması için, analizde kullanılan BEÇÇ elemanın test edilen BEÇÇ elemanı davranışına benzerlik göstermelidir ve benzer olarak BEÇÇ testleri de, analizlerde farz edilen dayanım ve sünekliği doğrulamalıdır. Bu sebeple, BEÇÇ’li çerçevelerin tasarımı, başarılı test sonuçlarına dayanmaktadır (Lopez ve Sabelli 2004).

BEÇÇ’nin tasarım kapasitesi, inelastik deformasyon ve enerji sönümleme gereksinimlerini mutlaka karşılamalıdır. Bu nedenle “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450)” şartnamesinde belirtilen BEÇÇ detaylarına uyulması önemlidir. Bu şartnamede belirtilen detaylar aşağıda verilmiştir.

- ÇE’de kullanılan 2 inch veya daha kalın plakaların, FEMA 450 Bölüm 6.3’de belirtilen tokluk koşullarını yerine getirmesi gerekmektedir.
- ÇE’de ek yapılmasına izin verilmemektedir.
- BEM sistemi ÇE’yi kaplamalıdır. Stabilité hesaplarında, kirişler, kolonlar ve ÇE’ye bağlı bayrak levhaları bu sistemin bir parçası olarak düşünülmelidir.
- BEM sistemi, tasarım kat ötelemesinin 1,5 katına denk deformasyonlar için ÇE’nin lokal ve global burkulmasını sınırlamalıdır.
- BEÇÇ’nin tasarımı, kalifikasyon testleri baz alınarak yapılmalıdır. Prosedür ve kabul etme kriterleri FEMA 450 şartnamesi bölüm 8.6.3.7’de verilmiştir. Kalifikasyon testleri en az iki başarılı çevrimli testten oluşmalıdır. Birinci test FEMA 450 bölüm 8.6.3.7.4 bahsedilen, bağlantı rotasyon taleplerini de içeren, çerçeve benzeri test düzeneğinde BEÇÇ’lerin testleridir. İkinci test ise FEMA 450 bölüm 8.6.3.7.5’de bahsedilen eleman bazında veya çerçeve benzeri deneylerden herhangi birisi olabilmektedir.

BEÇÇ tasarımları yeterli yük kapasitesine göre yapılmaktadır. BEÇÇ’li çerçevenin diğer elemanları ise $2,0\Delta_{bm}$ deformasyonlarına (nonlinear dinamik analizi için $1,0\Delta_{bm}$) denk düzeltilmiş BEÇÇ dayanımına göre tasarlanmaktadır. Bu düzeltilmiş BEÇÇ dayanımı, BEÇÇ tasarım kuvvetinden daha büyük olabilmektedir. Bunun nedeni BEÇÇ’nin aşırı büyüklüğü, direnç çarpanı kullanımı, basınç durumunda aşırı dayanım ve en önemlisi geniş deformasyonlarda ve tekrarlanan çevrimli inelastik yüklemeler altında BEÇÇ’nin pekleşmesi olabilmektedir. Bu düzeltilmiş BEÇÇ dayanımları kalifikasyon deneyleri sonucu elde edilen omurga eğrisi vasıtası ile belirlenmektedir. Şekil 2.2’de benzer bir omurga eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.2. BEÇÇ elemanına ait omurga eğrisi (Kresting vd. 2015)

FEMA 450 şartnamesinde belirtilen kalifikasyon testleri sonucunda elde edilen basınç kapasitesi düzeltme çarpanı (β) ve pekleşme düzeltme çarpanı (ω) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

- FEMA 450 bölüm 8.6.3.7.6.3'de belirtilen kalifikasyon testlerinden ölçülen, (tasarım kat ötelemesinin 1,5 katına denk gelen deformasyonlarda), test elemanlarının maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetine oranı olarak hesaplanmaktadır. BEÇÇ kalifikasyon testlerinden elde edilen β değerlerinden büyük olanı kullanılır. Hiç bir durumda β 1,0'dan küçük olamaz.
- FEMA 450 bölüm 8.6.3.7.6.3'de belirtilen kalifikasyon testlerinden ölçülen, (tasarım kat ötelemesinin 1,5 katına denk gelen deformasyonda), maksimum çekme kuvvetinin, test elemanının nominal akma kapasitesine oranıdır. BEÇÇ kalifikasyon testlerinden elde edilen ω değerlerinden büyük olanı kullanılır.

“Recommended Provisions for Buckling-Restrained Braced Frames” başlıklı AISC/SEAOC şartnamesinde ise BEÇÇ yeterliliğinin tespiti için üç farklı değer kullanılmaktadır. Bu değerler basınç kapasitesi düzeltme çarpanı (β), pekleşme düzeltme çarpanı (ω), kümülatif inelastik eksenel deformasyon kapasitesidir (η). 2.1.4, 2.1.5 ve 2.1.6 eşitlikleri bu değerleri tanımlamaktadır

$$\beta = C_{max}/T_{max} \quad (2.3)$$

$$\omega = T_{max}/(F_{ysc} \times A_{sc}) \quad (2.4)$$

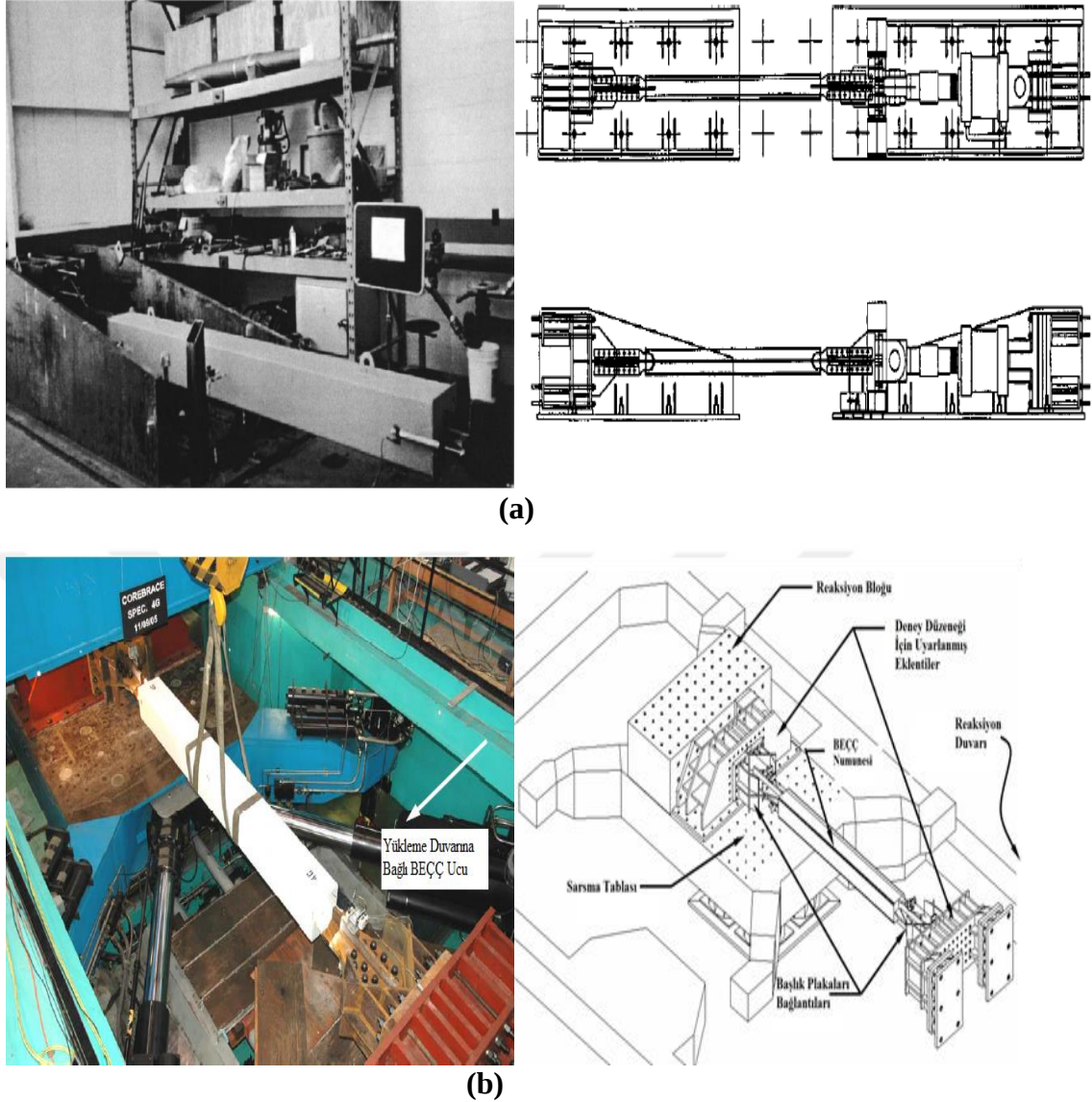
Burada F_{ysc} ÇE'nin nominal akma dayanımı, A_{sc} ise ÇE'nin en kesit alanıdır. C_{max} ve T_{max} test sırasında ölçülen maksimum basınç ve çekme kuvvetleridir. Kümülatif inelastik eksenel deformasyon kapasitesi (η), toplam histerik enerjinin (E_h), BEÇÇ'nin efektif çekme (P_y^+) ve basınç (P_y^-) akma kapasitesi ortalamasına oranın düzeltilmiş ölçümüdür.

$$\eta = E_h/(P_y^* \times \Delta_{by}) \quad (2.5)$$

$$P_y^* = (P_y^+ + P_y^-)/2 \quad (2.6)$$

Toplam histerik enerji (E_h), basitçe testin her bir histerik halkası tarafında sarılmış alanların toplamıdır. Δ_{by} BEÇÇ'nin eksenel akma uzamasıdır ve bu parametre kümülatif inelastik eksenel deformasyonu normalleştirmek için kullanılır. FEMA 450 şartnamesi maksimum β değerini 1,3 ve minimum η değerini 140 (eleman bazında testlerde) olarak belirtmektedir. BEÇÇ'ler sadece eleman bazında testler altında değil ayrıca çerçeve benzeri testler altında da ehil olmalılarıdır. Sadece merkezi eksenel kuvvetlere maruz kalan eleman bazında testlerin yükleme modelleri AISC/SEAOC şartnamesinin ek T'sinde bulunmaktadır. Çerçeve benzeri testlerde BEÇÇ bağlantıları üzerinde eksenel yük ile birlikte rotasyon talepleri de oluşur.

BEÇÇ'lerin eleman bazındaki testlerinin amacı, eksenel yük kapasitesi ve inelastik deformasyonlar için gerekli koşulların yerine getirildiğini kanıtlamaktır. Ayrıca bitişik elemanların tasarımı için maksimum BEÇÇ kuvvetlerinin belirlenmesine de izin vermektedir. Çerçeve benzeri BEÇÇ testlerinin amacı, BEÇÇ tasarımının deformasyon ve rotasyon taleplerini sağlayıp sağlamadığını anlamaktır. Ayrıca, eleman bazında BEÇÇ testlerinde olduğu gibi çerçeve benzeri testlerde test düzeneği içerisinde bulunan BEÇÇ'nin histerik davranışı da görülür. Eleman bazında ve çerçeve benzeri test düzeneklerinin örnekleri şekil 2.3.a ve b'de görülmektedir.

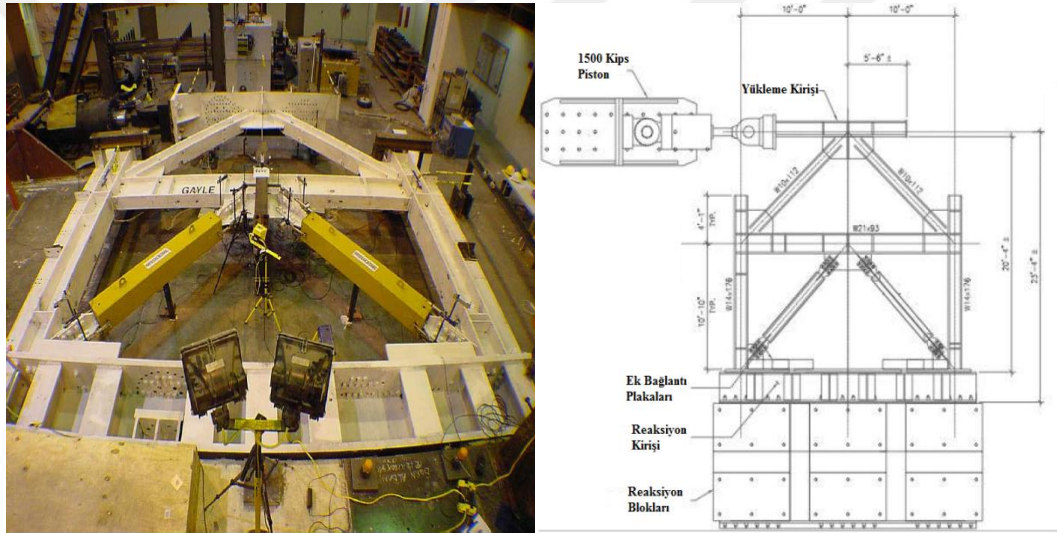


Şekil 2.3. a) Eleman bazında test düzeneği (Black vd. 2004); **b)** Çerçeve benzeri test düzeneği (Newell vd. 2006)

BEÇÇ’li çerçevede K tipi BEÇÇ’li sisteme izin verilmez. V tipi ve chevron tipi BEÇÇ’li çerçevelerde ise BEÇÇ tarafından kesilen kiriş, kolonlar arasında kesintisiz olmalı ve BEÇÇ’lerin bulunmadığını farz ederek, Applicable Bulding Code’da belirtilen yük kombinasyonlarının etkilerine karşı tasarlanmalıdır. Sismik yüklerinde dahil olduğu yük kombinasyonunda yük Q_b , E terimi yerine kullanılabilir. Q_b BEÇÇ tarafından kirişe uygulanan maksimum yük etkisidir. Bu yatay ve düşey yük etkisi basınç durumunda $\beta \omega P_{ysc}$ formülü kullanılarak hesaplanabilir ve ωP_{ysc} ise çekme durumunda kullanılır. Sismik yüklerinde dahil olduğu yük kombinasyonu için gerekli eğilme dayanımı AISC LRFD Bölüm F’de tanımlanan M_y değerini geçmemelidir. $D+Q_b$ yük kombinasyonları altında oluşan kiriş sehim, $L/240$ değerini geçmemelidir. Burada L kolon aksları arasındaki kiriş açıklığıdır. BEÇÇ’nin hesaplanan maksimum deformasyonu, yük altında kirişin düşey sehiminin etkisi ile artış gösterebilmektedir.

Yanal destek, kirişe stabilite gerekli olduğu zaman sağlanabilir. Analizlerde, Q_b ve kirişteki eksenel kuvvet dahil edilmelidir.

BEÇÇ'li çerçevelerin diğer elemanları için gerekli koşullar şartnamelerde belirtilmiştir. Kolon ve kirişin basınca çalışan elemanları AISC Seismic Tablo I-8-1'de bulunan genişlik-kalınlık sınırlarını sağlamalıdır. AISC Seismic Bölüm 8.3'de bulunan koşullara ek olarak, BEÇÇ'li çerçevelerde bulunan kolonların yük kapasite ihtiyacı, Applicable Building Code'da şart koşulmuş yük kombinasyonlarından belirlenmektedir. Ancak sismik eksenel kuvvetler her bir seviye için tanımlanmış maksimum BEÇÇ kuvvetlerinden belirlenmektedir. Gerek duyulan kolon yük kapasitesi sistem tarafından iletilen maksimum kuvveti geçmelidir. Kiriş için gerekli yük kapasitesi ise maksimum BEÇÇ kuvvetine denk eksenel kuvvetler ile ölü ve hareketli yüklerin birleşmesinin etkilerini de içermelidir. Şekil 2.4'de chevron tipi BEÇÇ'li sisteme sahip çerçeve görülmektedir.



Şekil 2.4. Chevron tipi BEÇÇ sistemli çerçeve (Mahin vd. 2004)

Test aşaması için hazırlanan BEÇÇ'ler AISC/SEAOC ek T ve FEMA 450 bölüm 8.6.3.7.6.2 ve 8.6.3.7.6.3'e göre çevrimli yüklemelere maruz bırakılır. Her bir çevrim belirtilen deformasyon değerine kadar tam çekme ve tam basınç uzanımı içermelidir. Testler, eleman üzerine uygulanan eksenel veya rotasyon deformasyonların (Δ_b) seviye kontrolü ile yürütülmektedir. Alternatif olarak, maksimum rotasyon deformasyonu uygulanabilir ve eksenel deformasyon için protokol takip edilerek sürdürülebilir. AISC/SEAOC ek T ve FEMA 450'ye göre yükler test elemanına aşağıdaki deformasyonlar takip edilerek uygulanır. Burada eleman bazında test elemanı için deformasyon ÇE eksenel deformasyonu ve çerçeve benzeri BEÇÇ test elemanı için rotasyonel deformasyon talebidir.

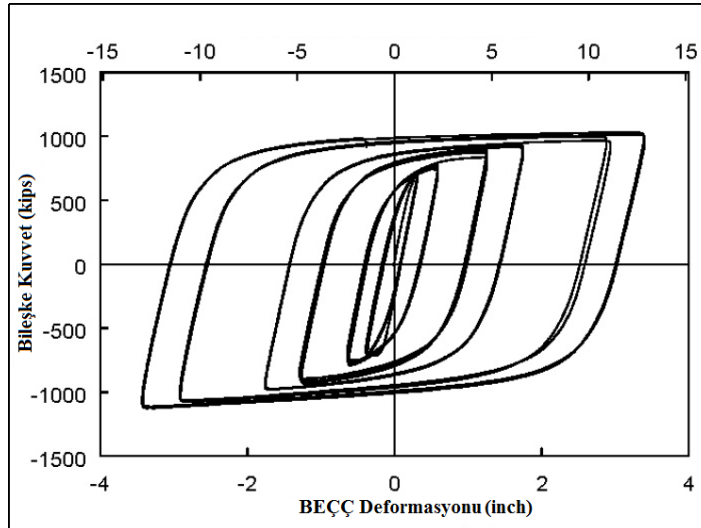
- $\Delta_b = \Delta_{by}$ 'e denk gelen deformasyonda, 6 çevrim yükleme
- $\Delta_b = 0,50 \Delta_{bm}$ 'e denk gelen deformasyonda, 4 çevrim yükleme
- $\Delta_b = 1,0 \Delta_{bm}$ 'e denk gelen deformasyonda, 4 çevrim yükleme
- $\Delta_b = 1,5 \Delta_{bm}$ 'e denk gelen deformasyonda, 2 çevrim yükleme
- $\Delta_b = 1,0 \Delta_{bm}$ 'e denk gelen deformasyonda, ek çevrim yüklemeleri.

Yüklemenin bu ek çevrimleri, BEÇÇ test elemanı akma deformasyonunun en az 140 katı kadar olan kümülatif inelastik eksenel deformasyonu gerçekleştirmek için gereklidir (Çerçeve benzeri test elemanları için gerekli değildir).

Δ_{bm} hesabında tasarım kat ötelemesi, kat yüksekliğinin 0,01 katından daha düşük alınamaz. Δ_{bm} 'nin $5 \Delta_{by}$ 'den daha büyük olmasına da ihtiyaç duyulmamaktadır.

Δ_{by} BEÇÇ'nin ilk önemli akmasındaki deformasyondur. Δ_{bm} BEÇÇ'nin yerleştirildiği açıklığın tasarımsal kat ötelemesi ve Δ_b test elemanının yüklemesini kontrol etmekte kullanılan deformasyon miktarıdır (Christopoulos 2005). Şartnameler bağlantı dönmeleri için açıkça bir yükleme dizinini belirtmezler. Ancak yöntem, BEÇÇ üzerinde yer alacak gerçek talepleri temsil etmelidir. Bu dönme taleplerini uygulamada genel olarak Newell vd. (2006)'da olduğu gibi enine deformasyonlar kullanılmaktadır.

Çok iyi performansa sahip BEÇÇ'lerin test sonuçlarında kararlı davranış görülür. Bu testler Şekil 2.5'de görüldüğü gibi neredeyse mükemmel simetri ile stabil ve tam histerik eğriler gösterirler.



Şekil 2.5. Tipik BEÇÇ histerik davranışı (Christopoulos 2005)

BEÇÇ testleri sunucunda elde edilen kabul kriterleri aşağıda belirtilmiştir.

- BEÇÇ testleri sonucunda elde edilen yük deplasman grafiği, stabil, tekrarlı davranış ile pozitif yönde artan rijitlik göstermelidir.
- Çatlama, BEÇÇ’de kararsızlık veya BEÇÇ uç bağlantılarında bozulma göstermemelidir.
- BEÇÇ testleri için, Δ_{by} ’den daha büyük deformasyonlarda her bir çevrimde maksimum çekme ve basınç kuvvetleri $1,0 P_{ysc}$ değerinden küçük olmamalıdır.
- BEÇÇ testleri için, Δ_{by} ’den büyük deformasyonda her bir çevrimde, maksimum basınç kuvvetinin maksimum çekme kuvvetine oranı 1,3 değerini geçmemelidir.

Fabrikasyon BEÇÇ üretiminde, BEÇÇ üreticileri Çelik Yapılar ve Köprüler için Standart Uygulama Kodu’na uygun kalite kontrol planı tesis etmelidir. BEÇÇ üreticileri önerdikleri kalite kontrol planını yeniden gözden geçirilmesi ve onaylanması için mühendise teslim etmelidir. BEÇÇ’lerin üretiminde kalite kontrol planına uyulmalı ve sadece onaylanmış kalite kontrol planına uygun BEÇÇ’ler yapı içerisinde kullanılmalıdır.

2.2. Kaynak Taramaları

Son 30 yılda, BEÇÇ’lerin geliştirilmesi amacı ile Japonya başta olmak üzere pek çok ülkede hatırı sayılır miktarda araştırmalar yapılmış ve yapılmaktadır. Bu kapsamda BEÇÇ ile ilgili çalışmalar ilk olarak eleman bazında yapılan deneyler ile başlamış, çerçeve benzeri testler ve BEÇÇ’li çerçevelerin testleri ile devam etmiştir.

Bu bölüm kapsamında literatürde mevcut olan eleman bazında, çerçeve benzeri ve BEÇÇ’li çerçeve sistemlerinin testlerine ait özetler verilecektir. Ayrıca betonarme ve çelik yapıların güçlendirilmesi amacı ile yapılmış çalışmalardan örneklerde sunulmuştur. Bu bölüm kapsamında yapılmış öncü çalışmalar diğer çalışmalara göre daha kapsamlı anlatılmıştır.

2.2.1. Eleman bazında testlerin performansı

Wakabayashi vd. (1973) yaptıkları çalışmada, çelik levhalardan üretilmiş çapraz, bir çift prekast betonarme eleman ile sıkıştırarak sandviç denilen bir sistem elde etmişlerdir. Prekast betonarme elemanlar ile çelik levhalar arasında sürtünmesiz yüzey oluşturmuşlar ve çekip çıkartma deneyleri yapmışlardır. Betonarme panellerin rijitlik ve dayanımlarını incelemek amacıyla elemanı çevrimli yük deneylerine maruz bırakmışlardır. Sonuç olarak, çelik plakaların üniform olarak şekil değiştirdiğini, basınçtaki dayanımının çekmedeki dayanımından büyük olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca daha sonra yapılacak çalışmalar da kullanılan prekast beton malzemesinin dayanımının ve rijitliğinin, donatılar üzerindeki etkilerini inceleyerek bu sistemin geliştirilebileceği sonucuna varmışlardır.

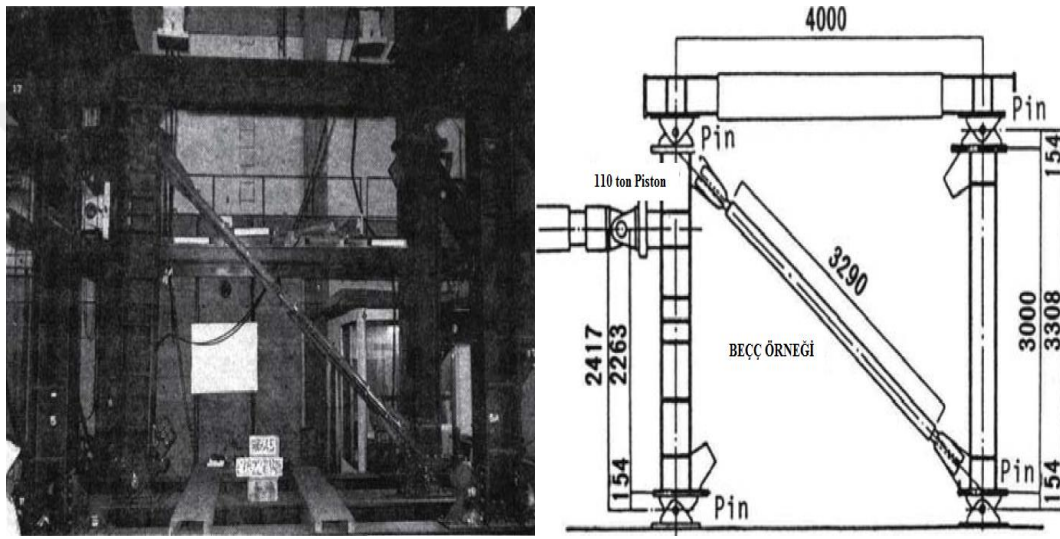
Kimura vd. (1976) çelik çekirdeğin dolgu malzemeli çelik dış tüp ile sarıldığı ilk deneysel çalışmaları yapmışlardır. Geleneksel bir ÇÇ'nin kutu profil içerisine yerleştirilmesi ve kalan boşlukların harç doldurulması ile stabil histerik davranışın başarılabileceğini söylemektedirler. Fakat harcın deformasyonu BEÇÇ'nin akmasından sonra meydana gelen artı (+) en kesitli ÇE'deki deformasyonu sönmölemeye yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Artı (+) en kesitli ÇE eski yerine gelmesinden sonra basınç bölgesindeki yük kapasitesi çekme bölgesindeki yük kapasitesine göre çok daha fazla artış göstermiştir. Bu değişiklikler tekrarlandıkça, BEÇÇ'nin uçları tekrarlı olarak dışarıya doğru hareket etmiş ve bu bölgede lokal burkulmalar ve BEÇÇ'nin eksenel yük kapasitesinde düşüşler meydana gelmiştir. Çalışmanın sonucunda ÇE ve harç arasında sürtünmesiz yüzeyin mutlak surette sağlanması gerektiği ve dış tüpün ÇE'yi burkulmadan koruma konusunda etkili bir çözüm olduğu sonucuna varmışlardır.

Mochizuki vd. (1980) burkulması betonarme elemanla engellenmiş çelik çaprazlar üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada betonun çekirdek elemana yapışmasını izolasyon malzemesi ile engellemişlerdir. Tekrarlanan yükler, burkulması betonarme elemanla engellenmiş çaprazla etkidiğinde beton çatlamakta ve burkulma etkisine karşı ÇE'yi koruyamamaktadır. Bu çalışma sonucunda araştırmacılar tasarımda yeniliğe gitmişlerdir. Yeni tasarım BEÇÇ'de, ÇE kutu profilin ortasına yerleştirilmiş ve kalan boşluklara beton dökülerek BEM elde edilmiştir. BEM ise ÇE'den izolasyon malzemesi ile ayrılmıştır. Böylece ÇE'nin eksenel yükleri, BEM'e aktarmasının önüne geçilmiştir. Bu çalışma sonucunda üretilen kutu profilli BEÇÇ'lerde basınç ve çekme etkisi altında simetrik ve stabil histerik davranış görölmüştür. Ayrıca Kimura vd. (1976)'da olduğu gibi dolgu malzemesi ile ÇE arasında izolasyon malzemesi kullanılması gerektiği ortaya koyulmuştur. Japonya'da literatürde "Unbonded Brace" olarak adlandırılan BEÇÇ tasarımı bu çalışma sonucunda netleşmiştir.

Watanabe vd. (1988) yaptıkları çalışmada, kutu profil içerisine dikdörtgensel en kesitli ÇE'nin yerleştirilmesinden sonra kalan boşlukları beton ile doldurmuşlardır. Sürtünme yolu ile eksenel yüklerin betona transfer olmasını engellemek amacı ile ÇE'yi vinil/mastik bant ile kaplamışlar ayrıca ÇE kalınlığı boyunca 3 mm kalınlığında polyester kullanmışlardır. Bu çalışmada elasto-plastik burkulma analizi ve çelik tüpün burkulma yük kapasitesine karşılık ÇE'nin akma yükünü göz önünde bulundurmuşlardır. Bütün BEÇÇ elemanlarında kullanılan ÇE'lerin en kesit alanları 19*90 mm boyutundadır. ÇE'ler de kullanılan çelik JIS'de (Japanese Industrial Standart) tanımlı SS41 çeliği olup akma dayanımı 2,880 kg/cm²'dir. Kutu profillerde ise JIS'de tanımlı TSK50 çeliği kullanılmış olup, akma dayanımı 3700 kg/cm²'dir. Çizelge 2.1.1'de göröldüğü üzere deneyler toplam beş adet numune üzerine uygulanmıştır. Numunelerin kutu profilin Euler yükünün, Pe, ÇE'nin akma yüküne, Py, oranı 0,55 ile 3,53 arasında değişiklik göstermektedir. Kutu profilin bölgesel alanı değişiklik gösterirken ÇE'nin boyutları sabit kalmıştır.

Deneysel çalışmada, çerçeveye 110 ton'luk piston kullanılarak yatay yükler uygulanmıştır. BEÇÇ'ler izin verilen kalıcı ve geçici tasarım yükleri ve katlar arası yer değiştirme açısı 1/400 den 1/50'ye ulaşınca kadar her iki yönde 8 çevrim içeren tekrarlı yüklere maruz bırakılmıştır. Şekil 2.6'da bu çalışma kapsamında yapılan deney düzeneği görölmektedir.

Deney sonuçlarına bakıldığında, kutu profilin burkulma yük kapasitesinin, ÇE'nin akma yükünü geçtiği numunelerde, basınç bölgesi de dahil olmak üzere, burkulma oluşmamış ve büyük miktarda enerji sönümlenmiştir. Böylece bu elemanlarda histerik davranışın stabil olduğu belirtilmiştir. Burkulma yük kapasitesinin, ÇE'nin akma yükünden küçük olduğu numunelerde ise basınç yüklemesi sırasında ÇE'nin akmasından önce burkulma oluştuğu tespit edilmiştir. Böylece ÇE'nin, akma yükü kapasitesinden 1,5 kat büyük Euler yüküne sahip kutu profil içerisine yerleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca BEÇÇ'nin basınç ve çekme durumunda başlangıç rijitliğinin ve akma yük kapasitesinin belirlenmesinin mümkün olduğunu ve çerçevede büyük miktarda deformasyon oluşmuş olsa da histerik davranışın elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmaya ait eleman parametreleri ve yük kapasiteleri Çizelge 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.6. Deney düzeneği (Watanabe vd. 1990)

Çizelge 2.1. Numune parametreleri ve dayanım değerleri (Watanabe vd. 1988)

No.	Parametre Kutu Profil Boyutları B*D*t mm	Hesaplanmış Dayanım Değerleri					Deneysel Dayanım				
		Kutu Profil		Çekirdek Eleman		P_e/P_y	Çekme Akması		Burkulma		
		Atalet Momenti cm^4	Euler Yüğü P_e ton	Kesit Alanı A cm^2	Akma Kapasitesi P_y ton		Yük P_t ton	P_t/P_y	Yük P_{cr} ton	P_{cr}/P_y	P_{cr}/P_e
1	150*150*4,5	896	171,0	16,84	48,50	3,53	48,6	1,00	-	-	-
2	150*150*4,5	352	67,4	16,84	48,50	1,39	48,3	1,00	-	-	-
3	150*150*3,2	262	50,2	16,84	48,61	1,03	47,6	0,98	-	-	-
4	150*75*4,5	183	35,0	16,88	48,50	0,72	48,3	1,00	46,50	0,96	1,33
5	150*75*3,2	137	36,2	16,62	17,87	0,55	47,9	1,00	43,10	0,90	1,65

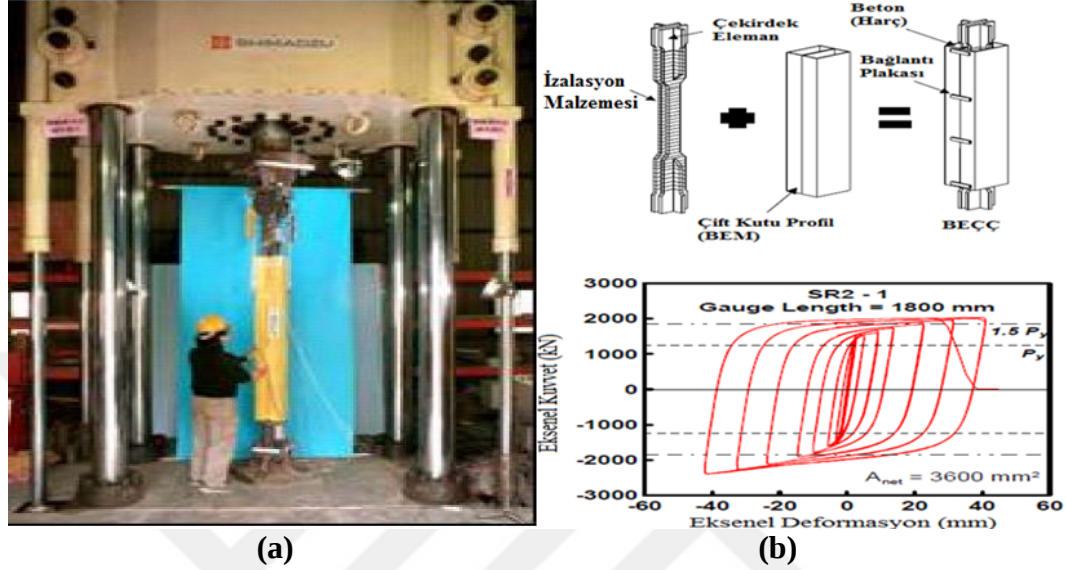
Wada vd. (1990) yaptıkları çalışmada Watanabe vd. (1988) çalışmasına ek olarak BEÇÇ'lerin analiz ve tasarım eşitliklerine ışık tutmuşlardır. Ayrıca Japonya'da bulunan Shinkawa binasının BEÇÇ'li çerçeve sistemlerini incelemişlerdir. Böylece BEÇÇ'li çerçeve sistemlerinin parametrelerini ortaya koymuşlardır. Beton yeterli rijitliğe sahip olması durumunda bile ÇE'nin boşluk içerisinde kaplama malzemesi ile birlikte dalgalı hale gelebildiğini, fakat bu dalgalı şeklin BEÇÇ'nin histerik davranışına etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak eğilme momentinin ÇE'de meydana getirmiş olduğu dalgalı şeklin kutu profilin burkulma direncine ve akma yükü kapasitesine etkisi olmadığını belirtmişlerdir.

Clark vd. (1999) California Üniversitesi'nde UC Davis Planet & Environmental Sciences binasında kullanılacak BEÇÇ'lerin prototiplerini inşa etmişler ve testlere tabi tutmuşlardır. Bu çalışmanın amacı tam boyutlu BEÇÇ'lerin artan genişlikte çevrimli yükler altındaki davranışını belirlemektir. Bu kapsamda 3 adet tam boyutlu BEÇÇ'leri testlere tabi tutmuşlardır. Bütün BEÇÇ'lerde kullanılan ÇE boyları yaklaşık 14,75 ft olmasına rağmen en kesit alanları 4,5 in², 6,0 in² ve 8,0 in² olarak, akma kuvvetleri ise 270 kips, 360 kips ve 470 kips olarak değişiklik göstermektedir. Ayrıca elemanlardan ikisinin ÇE'si dikkörtgensel en kesite sahip iken diğer eleman ise artı (+) şekilli en kesite sahiptir. ÇE'de ve montajda kullanılan bağlantı plakaları JIS'de tanımlı SM 490A çeliğinden imal edilmiştir. Kupon testlerinden çeliğin akma dayanımını 60,7 ksi olarak belirlemişlerdir. Test aşamasında kullanılan yükleme protokolü SAC Steel Project test programından temin edilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışma sonucunda tüm BEÇÇ elemanları çevrimli yükleme testinde stabil histerik davranış gösterdiğini ve test sırasında ölçülen akma dayanımı değerlerinin kupon testinden elde edilenler ile benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Test sonuçlarını incelediklerinde, basınç durumundaki maksimum BEÇÇ kuvvetinin, çekme durumundakine göre biraz daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Üç BEÇÇ elemanında ki çekme yüklemesindeki pik ile basınç yüklemesindeki pik arasındaki farkların %7,3 ile %9,5 arasında değişmektedir. Çalışmanın sonucunda üç BEÇÇ'nin de maruz bırakıldıkları testler sonucunda önceden tahmin edilebilir davranış, yüksek dayanım ve yüksek miktarda enerji sönmleme kapasitesi gösterdiğini belirtmişlerdir.

Lai ve Tsai (2004) National Taiwan Üniversitesi'nde (NTU) yaptıkları çalışmada BEÇÇ'lere ait iki farklı parametrenin BEÇÇ'nin histerik davranışı üzerine etkilerine incelemek maksadı ile detaylı bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu bağlamda, bağımsız ara yüzeyde kullanılan farklı izolasyon malzemelerinin etkilerini araştırmak amacı ile 10 adet BEÇÇ ile bayrak levhaları arasındaki bağlantı detaylarını belirlemek için ise 6 adet BEÇÇ üzerinde eleman bazında testler yapmışlardır. Ayrıca tek katlı tek açıklı BEÇÇ'li çerçevelerin testleri de bu makalede yer almaktadır. Ancak makalenin bu kısmı Bölüm 2.2.3'de ele alınacaktır. NTU'da daha önce yapılmış olan 50'nin üzerinde eleman bazında BEÇÇ deneylerini ve bu kapsamda yapılmış çift ÇE'ye sahip BEÇÇ'leri (Şekil 2.7.b) incelemişlerdir. Çalışmada çift ÇE'li BEÇÇ'lerin üretilmesinin amacı BEÇÇ bağlantı uzunluğunu ve BEÇÇ ile bayrak levhaları arasındaki bulon sayısını düşürmek olduğu belirtilmiştir. Çevrimli testlerde kullanılan standart yükleme protokolünü SAC (1997)'den temin etmişlerdir.

Test düzeneği ve çift ÇE'li BEÇÇ Şekil 2.7.a'da görülmektedir. Çift ÇE'li ve BEM'i çift kutu profil içerisine beton doldurulması ile elde edilen BEÇÇ'lerin şiddetli inelastik çevrimli eksenel yükler altında stabil dayanım gösterdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca bağlantı uzunluğunun kısaltıldığı ve her bir BEÇÇ'nin ucunda bir set bulonun yeterli olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.7. a) BEÇÇ test düzeneği; b) Çift ÇE'li BEÇÇ'nin şeması ve histerik davranışı (Lai ve Tsai 2004)

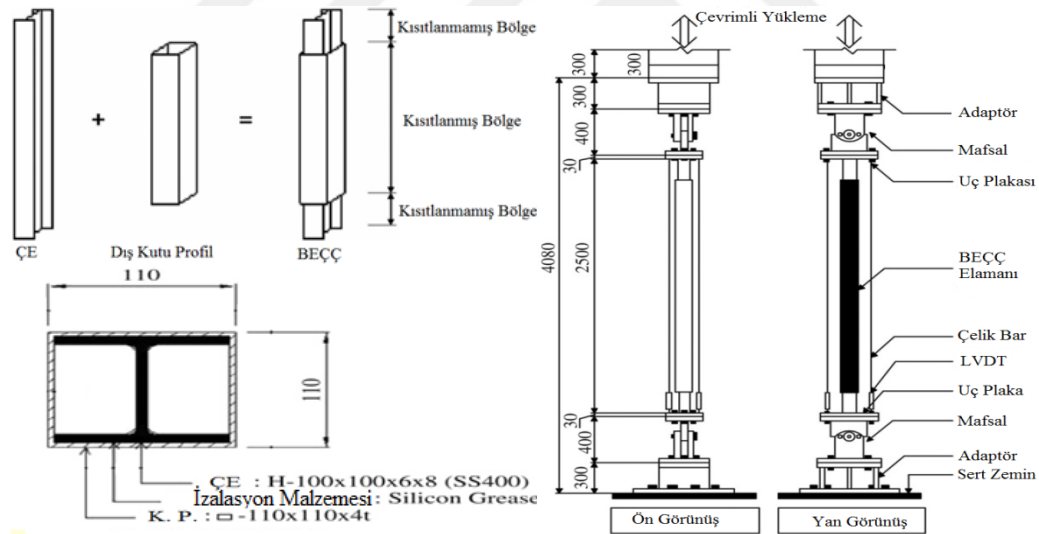
Bu çalışma kapsamında iki farklı pürüzlülük derecesine sahip başlıkların deneyleri de yapılmıştır. BEÇÇ'lerin ve bulonlu bağlantıların kayma yükünün tespiti için BEÇÇ elemanlarında çevrimli artan yükler uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, tasarım için bulon dayanımının 1,5 katının kullanılması durumunda çevrimli yükler altında bağlantı kaymasının önlenebileceğini belirtmişlerdir.

Bağımsız ara yüzeyde kullanılacak izolasyon malzemesinin tespiti için toplam 10 adet BEÇÇ üzerinde testler yapmışlardır. Bu çalışmada kullanılan standart yükleme protokolünü SAC (1997)'den temin etmişlerdir. Sonuçları incelediklerinde 2 mm kalınlığındaki silikon lastik bant kullanımının en az eksenel yük farkına sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Black vd. (2004) yaptıkları çalışmada Clark vd. (1999) çalışmasına ek olarak, Kaiser Santa Clara Medical Center binası için iki adet BEÇÇ tasarlamışlar ve bu elemanların eleman bazında testlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu BEÇÇ'lerde kullanılan ÇE'ler artı (+) en kesitli olup JIS'de tanımlı akma dayanımı 235 MPa ile 355 MPa arasında değişen SN400B çeliği olduğu, BEM'de kullanılan kutu profilin ise JIS'de tanımlı STKR400 çeliği olduğunu belirtmişlerdir. Deney düzeneği Şekil 2.3.a'da görülmektedir. Deney düzeneği, laboratuvar zeminine saptamalar ile montajlanmış iki adet reaksiyon çerçevesi içermekte ve deney elemanlarının 3,100 kN'luk hidrolik piston ile yüklendiğini bildirmişlerdir. Piston $\pm 15,3$ cm yer değiştirme kapasitesine sahip olup, tasarımda kullanılan deprem talepleri için bu kapasitenin yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Test programını iki aşamadan oluşturmuşlardır. İlk aşamada her bir

BEÇÇ'yi Clark vd. (1999)'de kullanılan OSHP (Office of Statewide Health, Planing and Development) yükleme protokolüne maruz bırakmışlardır. Diğer aşamada ise BEÇÇ elemanlarına geniş deformasyon, düşük çevrimli yorulma testi ve simultane deprem deplasman testlerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarını irdelediklerinde her iki BEÇÇ elemanında çevrimli testler boyunca stabil histerik davranış gösterdiğini ve elemanlarda meydana gelen akmanın üniform dağılım gösterdiğini belirtmişlerdir. Maksimum BEÇÇ kuvvetlerini, %13 fark ile çekmede 3,005 kN, basınç da ise 3,400 kN olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak BEÇÇ'lerin yükleme protokolleri altında oldukça iyi performans gösterdiklerini, ÇE'nin plastik bölgesindeki burkulma deformasyonunun en kritik stabilite durumu olduğunu bildirmişlerdir.

Young vd. (2009) yaptıkları çalışmada, H-şekilli ÇE'ye ve dış kutu profile sahip BEÇÇ'lerin yük direnci kapasitelerini, eleman bazındaki testler ile incelemişlerdir. Şekil 2.8'de görüldüğü üzere, çalışma kapsamında ÇE'yi iki ana bölgeye ayırmışlardır. Birinci bölgeyi ÇE'nin ortasında yer alan ve kutu profil ile sarılmış bölüm olan kısıtlanmış bölge, diğer bölgeyi ise ÇE'nin gerekli bağlantılarının yapıldığı kısıtlanmamış bölge olarak belirtmişlerdir. Bu çalışmada toplam 7 adet BEÇÇ'nin eleman bazında testlerini gerçekleştirmişlerdir. BEÇÇ elemanları arasındaki farklar dış kutu profilin kalınlığı ve kısıtlanmamış bölgenin uzunluğudur. Bu gibi tasarım parametrelerinin BEÇÇ'nin maksimum yük ve enerji sönümleme kapasiteleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.



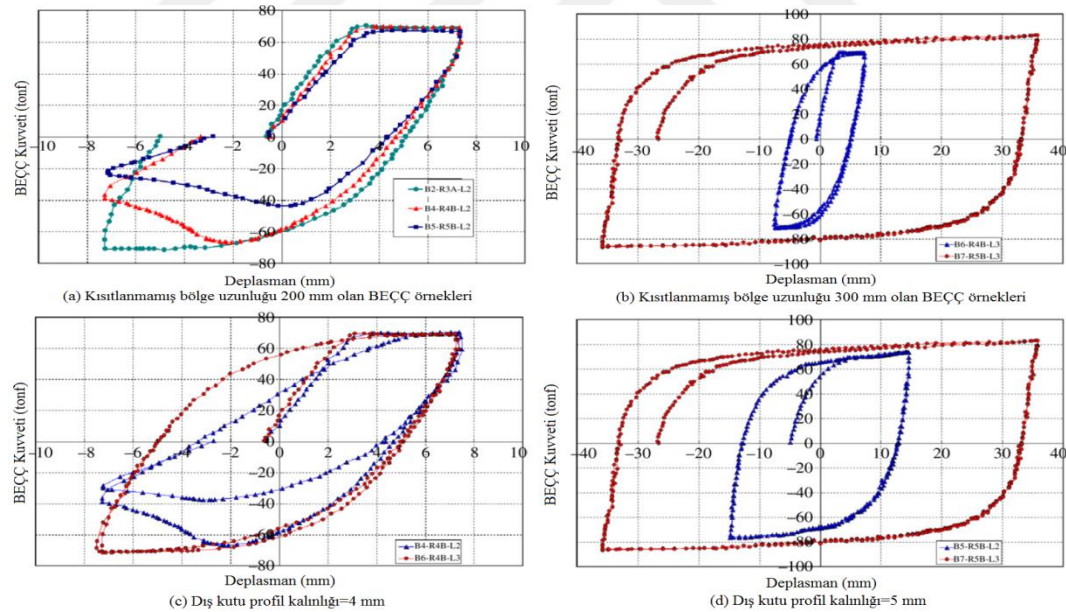
Şekil 2.8. BEÇÇ elamanı ve test düzeneği (Young vd. 2009)

Bu çalışmada BEÇÇ elemanlarında değişmeyen en kesitli, H şekilli ÇE elemanı kullanılmış ve içi harç ile doldurulmamış kutu profil içerisine yerleştirilmiştir. Tüm elemanlarda akma dayanımı 240 MPa olan SS400 çeliği kullanılmış olup H-şekilli ÇE'ler 100*100*6*8 boyutlu kesite sahiptir ve 2,5 m uzunluğundadır. BEÇÇ'de kullanılan yapısal çeliklerin çekme dayanımının belirlenebilmesi için kupon testleri gerçekleştirilmiştir. Flanştan ÇE'yi ve kutu profili temsil edecek şekilde 3mm, 4mm ve 5mm kalınlığında kuponlar alınmış ve test edilmiştir. Test sonuçlarının akma dayanımı değeri ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında BEÇÇ elemanlarının dış kutu profil kalınlıklarında değişikliğe gitmişlerdir. B2 elemanında 3mm, B3, B4 ve B6

elemanlarında 4mm ve B5, B7 elemanlarında ise 5mm kalınlığında dış kutu profil kullanmışlardır. Ayrıca BEÇÇ elemanlarının 1.'sinde (B1) herhangi bir kutu profil kullanılmamış sadece H-şekilli ÇE testlere tabi tutulmuştur. Bir diğer değişken olan kısıtlanmamış bölge uzunluğunun deney elemanlarına göre değişimi ise şöyledir; B2'den B5'e kadar olan BEÇÇ elemanlarında 200 mm boyunda iken B6 ile B7 elemanlarında 300 mm boyundadır. B4'den B7'ye kadar olan elemanlarda kısıtlanmamış bölge çelik plakaların kaynaklanması ile desteklenmiştir. 40 mm kalınlığındaki plakalar BEÇÇ'nin her iki ucuna aksenal yükleri üniform olarak dağıtacak şekilde kaynaklanmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan testlerde maksimum 3000 kN kapasiteli universal test cihazı kullanılmıştır. BEÇÇ elemanlarının aksenal deformasyonları load cell ve iki adet LVDT ile ölçülmüştür. Statik benzeri çevrimli testlerde kullanılan yükleme protokolünde adım adım 0,01mm/s sabit artış gösteren yer değiştirme ile elemanlara uygulanmıştır. Maksimum kümülatif plastik deformasyonun ve enerji sönmleme kapasitesinin hesaplanabilmesi için yük protokolündeki $2,0\Delta_{bm}$ değeri geçilmiş ve bozulma oluşuncaya kadar yüklemeye devam edilmiştir.

Test sonuçları göstermektedir ki H-şekilli ÇE'nin kutu profil içerisine yerleştirilmesi ile elde edilen BEÇÇ'ler de ÇE'nin kısıtlanmamış bölgesi düzgün bir şekilde desteklenir ve kutu profilin kalınlığı yeterli olursa stabil davranış elde edilebilmekte ve burkulma etkili bir şekilde önlenmektedir.



Şekil 2.9. a) Kısıtlanmamış bölge uzunluğu 200 mm olan BEÇÇ elemanları; b) Kısıtlanmamış bölge uzunluğu 300 mm olan BEÇÇ elemanları; c) Dış kutu profil kalınlığı 4 mm olan BEÇÇ elemanları; d) Dış kutu profil kalınlığı 5 mm olan BEÇÇ elemanları (Young vd. 2009)

Wu vd. (2012) farklı en kesitlere sahip ÇE'ler ve ÇE ile BEM arasında boşluk bırakmak amacı ile ayraç plakaları kullanmışlardır. ÇE ve ayraç plakaları CNS SN490B çeliğinden imal edilmiş olup akma dayanımı 344 MPa olduğunu bildirmişlerdir. ÇE'nin merkezinde, 10 mm çaplı ve 15 mm boyunda iki adet durdurucu pini, ÇE yüzeyine kaynaklamışlardır. Burada ki amacın ÇE ile BEM'in paralel doğrultuda hareket etmesini sağlamak olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel çalışma kapsamında İki burkulmayı engelleyen elemanı 25 mm kalınlığında A36 çeliğinden imal etmişlerdir. Burkulmayı engelleyen elemanları, 20 mm çapında S10T yüksek dayanımlı bulonlar ile birbirlerine kenetlemişlerdir. ÇE yüzeyi ve BEM arasında 1mm, ÇE kenarı ve BEM arasında 2 mm boşluk bırakmışlardır. Deneylerde 4900 kN kapasiteli universal test düzeneği kullanmışlardır. Bu test düzeneği ile BEÇÇ'nin eksen boyu boyunca çevrimli aksinel yer değiştirmeler uygulanmıştır. Deformasyon miktarının, ÇE'de meydana gelen dalga uzunluğu değişim miktarı üzerine etkilerini araştırmak amacı ile deneylerde üç farklı yükleme protokolü kullanılmışlardır.

Çalışmanın sonucunda, hızlı muayene edilebilen ve montaj, demontajı kolaylıkla yapılabilen yeni nesil BEÇÇ'lerin tasarımı oldukça etkili olduğunu belirtmişlerdir. ÇE'nin yüksek şekilli burkulma tepkilerini test süresince BEM sökülmeden kolaylıkla gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, önerilen BEM'in tekrar kullanılabilir durumda olduğunu ve BEÇÇ'nin histerik tepkilerini geliştirmek için farklı ÇE en kesit boyutlarının kullanılabileceğini bildirmişlerdir. BEÇÇ elemanlarının tamamında iyi enerji sönümleme kapasitesi görüldüğünü, tüm BEÇÇ elemanlarında basınç ve çekme kapasite pikleri arasındaki oranın 1,22'den küçük olduğunu belirtmişlerdir. Yeni nesil BEÇÇ'ler de ÇE ile BEM arasındaki sürtünme kuvveti oluşumunun büyük oranda engellendiğini tespit etmişlerdir. Test sonuçları göstermiştir ki, uygulanan aksinel basınç kuvvetinin artması, yüksek şekilli burkulma dalga uzunluğunun kısalmasına neden olmaktadır. Ayrıca son uygulanan basınç kuvvetinin bir öncekinden küçük olması durumunda dalga boyunun artmayacağını bildirmişlerdir.

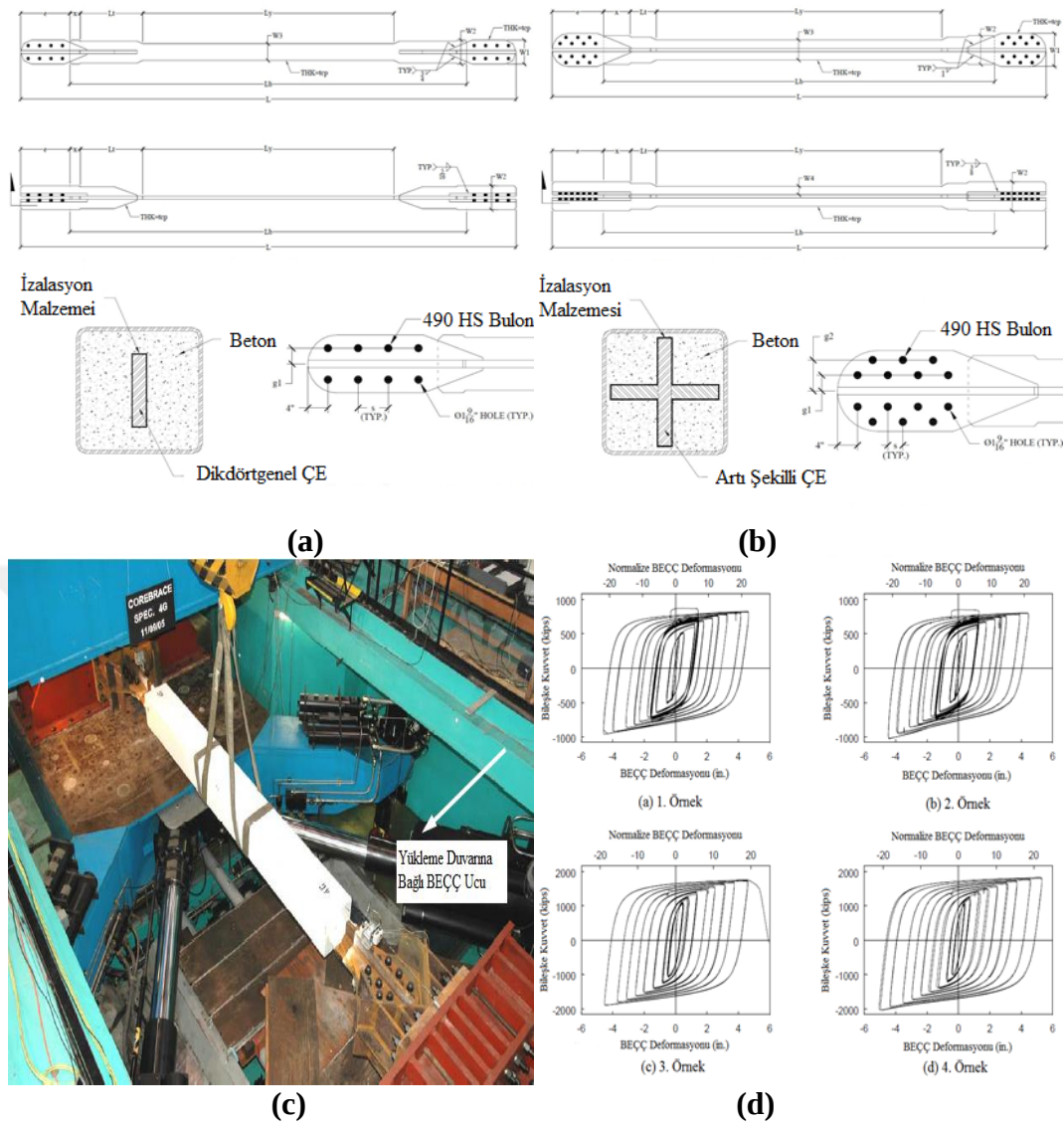
Wang vd. (2012) yaptıkları çalışmada, alüminyumun korozyona karşı dirençli ve hafif olması, özgül ağırlığının çeliğin özgül ağırlığının 3'de 1'i kadar olması nedenleriyle BEÇÇ üretiminde haddelenmiş alüminyum kullanmış ve bu elemanları düşük çevrimli yorulma testine tabi tutmuşlardır. Yaptıkları literatür çalışmasında haddeden çekilmiş alüminyum alaşımlı BEÇÇ üretiminde ve montajında kaynaktan kaçınılması gerektiği ve daha basit BEÇÇ uçlarının tasarlanması gerektiği sonucuna varmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma, neredeyse birbirinin aynısı olan tutucu bulunan (stopper) veya bulunmayan, 10 adet BEÇÇ elemanının düşük çevrimli yorulma performanslarını içermektedir. Bu çalışmanın en önemli noktası tutucuların (stopper) sisteme sağladığı faydadır. Tutucular çelik çekirdeği saran çelik elemanın çelik çekirdek üzerinden kayıp BEÇÇ özelliğini ortadan kaldırmasını engellemektedir. Test sonuçlarına göre, haddelenmiş BEÇÇ stabil ve tekrarlı histerik performansa sahiptir ve kırılma bölgesi ÇE'nin akma bölgesi içerisinde herhangi bir yerde oluşabilmektedir. Haddelenmiş BEÇÇ'nin bozulmasını, çelik BEÇÇ'nin bozulmasıyla karşılaştırıldığında, gevrek kırılma olarak kabul etmek gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca tutucu içeren BEÇÇ'lerin içermeyenlere göre daha yüksek performans sergilediğini belirtmişlerdir. İnelastik kümülatif şekil değiştirmeler incelendiğinde tutucu içeren BEÇÇ'ler %4 şekil değiştirme değerlerine kadar ulaştığı bildirilmiştir. Bu değer inelastik kümülatif şekil değiştirme açısından uygun olduğu, tutucu içermeyen BEÇÇ'lerde aynı şekil

değiştirmeye ulaşamadığı ve sonuç olarak tutucular sayesinde oluşturulan sistemde diğer BEÇÇ'lere yakın histerik eğriler elde edildiğinden bahsedilmiştir.

Sun vd. (2019) yaptıkları çalışmada, ÇE'nin burkulmasını engelleyen geleneksel beton doldurulmuş çelik tüp yerine beton doldurulmuş cam fiber destekli polimer (CFDP) tüp kullanılmışlardır. CFDP tüplü BEM'in avantajlarını şu şekilde belirtmişlerdir; 1) Yüksek dayanımlı ve esnek olan CFDP yapı elemanları için uygundur; 2) Dış kısıtlama malzemesi olarak kullanılması, dış çelik borunun zayıf korozyon direnci için de bir çözümdür. Yaptıkları çalışmada, CFDP tüplü BEÇÇ'lerin histerik davranışı üzerindeki kısıtlama oranları ve CFDP tiplerinin etkilerini araştırmak amacı ile 11 adet beton doldurulmuş CFDP tüplü BEÇÇ elemanı ve 3 adet beton doldurulmuş çelik tüplü BEÇÇ elemanı tasarlamışlardır. Ayrıca, aynı çeper kalınlığına, üç farklı uzunluğa sahip çelik tüplü BEÇÇ'lerin performansını, CFDP tüplü BEÇÇ'lerin performansı ile karşılaştırmışlardır. Bütün CFDP tüplü BEÇÇ elemanlarının aynı dikdörtgensel ÇE'ye sahip olduğunu ve üç farklı uzunluk ve kalınlıkta CFDP tüpü içerdiğini belirtmişlerdir. Orta ve uzun boyda filamentlerin sarılması ile elde edilen CFDP tüplü BEÇÇ elemanlarında global burkulma nedeni ile eleman ortasında çatlaklar oluştuğunu ve testin son aşamasında burkulduklarını gözlemlemişlerdir. Diğer BEÇÇ elemanlarının rijitliğinde ve dayanımında herhangi bir azalma olmadan yükleme protokolünün tüm çevrimleri boyunca burkulma oluşmadığını bildirmişlerdir. ABAQUS kullanılarak BEÇÇ'lerin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuşlar, CFDP tüplü BEÇÇ'lerin sonlu eleman modellerinin, BEÇÇ elemanlarının performansını iyi bir şekilde simültane ettiğini belirtmişlerdir. Tüm elemanların, eleman bazında test düzeneği altında iyi histerik davranış, yeterli yük taşıma kapasitesi, yüksek süneklilik ve enerji sönmleme kapasitesi sergilediğini bildirmişlerdir. CFDP tüplü BEÇÇ'lerin kısıtlama oranını sınırlandırarak çelik tüplü BEÇÇ'ler ile aynı tasarım kriterlerine sahip olabileceğini, CFDP tüpün özellikle sıkı dayanıklılık ihtiyacı duyulan BEÇÇ'ler için geleneksel çelik tüplü BEM'e alternatif olabileceğini bildirmişlerdir.

2.2.2. Çerçeve benzeri testlerin performansı

Newell vd. (2006) yaptıkları çalışmada tam boyutlu 4 adet BEÇÇ'nin çerçeve benzeri testlerini California Üniversitesi, Seismic Response Modification Device (SRMD) test biriminde, sarsma tablası ile gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamın da üretilen BEÇÇ'lerden 1. ve 2. Elemanlar dikdörtgenel ÇE'ye (Şekil 2.11.a) sahip iken 3. ve 4. elemanlar artı (+) şekilli ÇE'ye (Şekil 2.11.b) sahiptir. Tüm elemanların ÇE'leri, akma dayanımı 36 ksi olan A36 çeliğinden üretilmiş olup BEM'de kullanılan kutu profiller A500 Grade B çeliğinden üretilmiştir. Ayrıca BEM'de kullanılan harcın 28 günlük basınç dayanımı 5,000 psi değerindedir. Şekil 2.11.c'de deney düzeneği görülmektedir. Test düzeneğinde BEÇÇ'lerin bir ucu yükleme duvarına bağlanmış, diğer ucu ise eksenel ve çaprazlama yer değiştirme yükleyebilen sarsma tablasına bağlanmıştır. BEÇÇ'lerin bayrak levhalarına montajında kullanılan ek levhalar A572 Grade 50 çeliğinde üretilmiştir. Şekil 2.11.a ve b'de görüldüğü üzere diğer çalışmalardan farklı olarak bu ek levhalar BEÇÇ uçlarına kaynaklanmış, bayrak levhalarına ise A490 yüksek dayanımlı bulonlar ile sabitlenmiştir.



Şekil 2.11. a) 1. ve 2. elemanlarda kullanılan dikdörtgensel ÇE ve bağlantı elemanları; **b)** 3. ve 4. elemanlarda kullanılan artı şekilli ÇE ve bağlantı elemanları; **c)** Deney düzeneği; **d)** Tüm BEÇÇ elemanlarına ait bileşke kuvvet- birim deformasyon grafikleri (Newell vd. 2006).

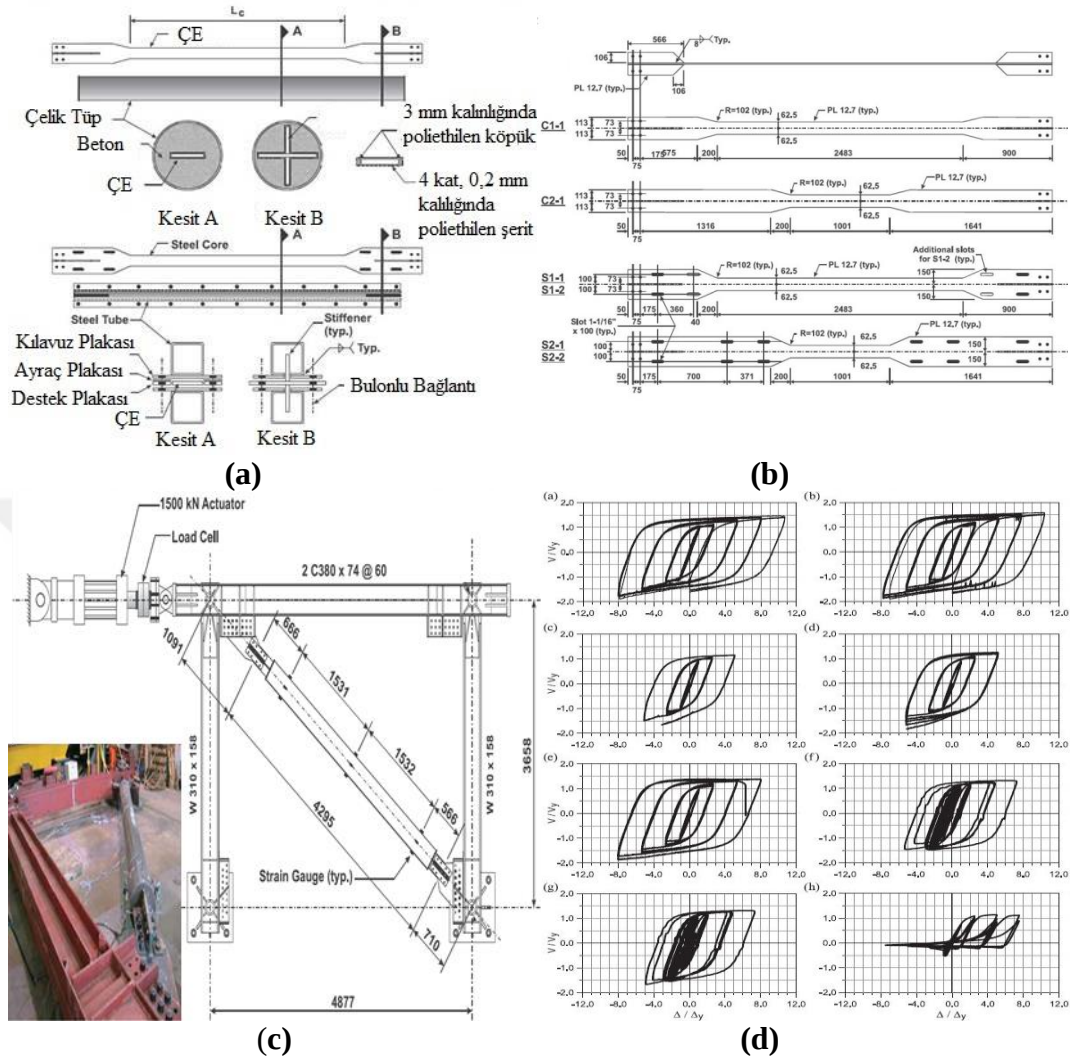
BEÇÇ'ler üzerinde gerçekleştirilen çevrimli testlerde standart yükleme protokolü (AISC 2005, FEMA 450) ve yüksek genişlik yükleme protokolü kullanılmış ayrıca elemanlara düşük çevrimli yorulma testi uygulanmıştır. Yüksek genişlik yükleme protokolünde kullanılan deformasyon talepleri standart yükleme protokolüne göre çok daha yüksektir.

Testlerin sonucunda, Şekil 2.11.d'de görüldüğü üzere bütün BEÇÇ elemanlarının standart yükleme protokolü altında oldukça iyi performans sergilediği belirtilmiştir. 1., 2. ve 4. Elemanların ÇE'lerin de testler sırasında çatlak oluşmadığını gözlemlenmiştir. 3. eleman ÇE'si yüksek genişlik yükleme protokolünün $4,3\Delta_{bm}$ deformasyon miktarı değerine denk gelen ilk eksenel kuvvetinde çatlama tespit

etmişlerdir. BEÇÇ'lerin bulonlu uç bağlantıları 0,031 radyan üzerinde uç rotasyonlara uygun olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda BEÇÇ'lere ait histerik davranışların son derece stabil olduğu ve enerji sönümleme kapasitelerinin oldukça yüksek olduğu ve BEÇÇ elemanlarının AISC şartnamesinin gerektirdiği $200\Delta_{by}$ deformasyon değerinden çok daha fazla kümülatif eksenel deformasyon değerlerini gerçekleştirebileceği kanaatine varılmıştır. Çerçeve benzeri testler sonucunda görülmüştür ki tüm BEÇÇ elemanları FEMA 450 şartnamesinin ve 2005 AISC şartnamesinin EK T bölümünde yer alan kabul kriterlerinin tamamını sağlamıştır.

Tremblay vd. (2006) yaptıkları çalışmada, iki adet BEÇÇ'nin BEM'i çelik tüp içerisine beton dökülmesi ile elde edilmiş, dört adet BEÇÇ'nin BEM'i ise tamamen çelik olmak üzere toplam 6 adet tam boyutlu BEÇÇ üretmişlerdir. Ayrıca geleneksel ÇÇ'ler ile karşılaştırmak amacı ile 1 adet dikdörtgensel içi boş yapısal kesite sahip ÇÇ üretmişler ve tüm elemanları çerçeve benzeri test düzeneğine yerleştirdikten sonra testlere tabi tutmuşlardır. Bu çalışma kapsamında iki farklı uzunlukta burkulması engellenmiş plastik bölgeye sahip ÇE ve iki farklı BEM incelenmiştir. Bu çalışma Ecole Polytechnique of Montreal'de gerçekleştirilmiş olup amaçları şu şekildedir; (i) BEÇÇ elemanlarının realistik yükler altında düzlemsel eğilme taleplerini ve bu talepler altında burkulmayı engelleme koşullarını irdelemek ve bu tip eğilme momentlerinin BEÇÇ performansına etkilerini araştırmaktır. (ii) Eksenel rijitliği artırmak için ÇE'deki burkulması engellenmiş bölge uzunluğu düşürülerek BEÇÇ performansını geliştirmek amaçlanmıştır. (iii) Yeni nesil tamamen çelik BEM'e sahip BEÇÇ'lerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca dinamik sismik yüklemeler altında BEÇÇ'nin tepkisini incelemek ve aynı test koşulları altında geleneksel ÇÇ'lerin tepkisini inceleyerek BEÇÇ'ler ile karşılaştırmaktır.

Yaptıkları çalışma kapsamında, Şekil 2.12.b'de görüldüğü üzere, çelik tüp içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ'ler (C1-1 ve C2-2) arasındaki farkın ÇE plastik bölge uzunlukları olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.12.a'da görüldüğü üzere ÇE boyunca her iki kenarına 3 mm kalınlığında polietilen köpük yerleştirmişler ve ÇE'yi 0,2 mm kalınlığında 4 tabaka halinde polietilen film ile sarmışlardır. Polietilen köpüğün yerleştirilmesindeki amacın, Poisson etkisine bağlı olarak ÇE'nin enine genişlemesine izin verilmesi olarak açıklamışlardır. Bu iki elemanın BEM'in de kullanılan betonun basınç dayanımını 20 MPa olarak belirtmişlerdir. BEM'i tamamen çelik elemanlardan oluşan BEÇÇ'lerin (S1-1, S1-2, S2-1 ve S2-2) üretiminde kullanılan materyaller, BEM'i çelik tüp içerisine beton doldurulması ile elde edilen BEÇÇ'ler ile aynı olduğu vurgulanmıştır. Tamamen çelik elemanlardan oluşan BEÇÇ'lerin BEM'inde burkulmayı önlemek amacı ile iki adet ASTM A500 HSS 127*127*4,8 kutu profil kullanmışlar ve bu profilleri 10 mm*270 mm boyutlarında kılavuz plakalara kaynaklamışlardır. ÇE'nin burkulması engellenmiş plastik kısmı boyunca ayraç ve destek plakaları kullanmışlardır. Bütün plakaları, belirli aralıklara yerleştirilen bulonlar ile birbirlerine bağlamışlardır. S1 ve S2 serileri arasındaki farkın ÇE'nin plastik kısmının uzunluğu (Şekil 2.12.b) olduğu her bir serideki elemanlar arasındaki farkın ise ayraç plakaları ve bulon düzenlemeleri arasındaki farklar olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.12. a) BEÇÇ'ler ve en kesitleri; b) BEÇÇ'lere ait ÇE'lerin detayları; c) Çerçeve benzeri test düzeneği; d) BEÇÇ elemanlarının sırası ile aksenal yük-deplasman grafikleri (Tremblay vd. 2006)

BEÇÇ'leri, ÇE'de beklenen gerilme taleplerine göre boyutlandırmışlar ve boyutlamada 2005 National Building Code of Canada (NBCC) şartnamesini göz önünde bulundurmışlardır. BEÇÇ'lerde kullanılan ÇE'leri Canadian Standards Association (CSA)'da tanımlı akma dayanımı 350 MPa ve çekme dayanımı 450 MPa olan G40.21-350WT çeliği olduğunu belirtmişlerdir. Numunelerin kupon testlerinden elde edilen değerleri ise 370 ve 492 MPa olarak bildirmişlerdir. BEM'de kullanılan dairesel kesitli çelik tüpleri G40.21-350W çeliğinden imal etmişler ve elastik burkulma yükünün 2250 kN olduğunu belirtmişlerdir. Bu değer, ÇE'nin gerçek akma kapasitesinin 3,8 katı olduğunu vurgulamışlardır.

Testlerde iki farklı yük protokolü kullanmışlardır. Bunlar sırası ile statik benzeri çevrimli yük protokolü ve dinamik sismik yük protokolüdür. Kat ötelemelerini çerçeve benzeri test düzeneğine uygulanabilmesi için 1500 kN yük kapasitesine sahip piston kullanmışlardır. BEÇÇ elemanlarını test düzeneğine diyagonal olarak yerleştirmişler ve test düzeneğini laboratuvar zeminine paralel olarak saplamalar ile sabitlemişlerdir. Şekil 2.12.c’de bu çalışmada kullanılan çerçeve benzeri test düzeneği görülmektedir.

Çalışmanın sonucunda çelik tüp içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ elemanlarının statik yükleme protokolü altında tatmin edici performans (Şekil 2.12.d) sergilediklerini belirtmişlerdir. Tamamen çelik elemanlardan oluşan BEÇÇ’lerin ÇE’inde akma dayanımının geçilmesi ile önemli miktarda eksenel kuvvetin, ÇE’de pekleşmeye ve çatlamalara neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu BEÇÇ sistemleri statik ve dinamik yükleme dizinlerinde iyi performans göstermişler ancak ÇE ile BEM arasındaki açıklığın minimumda tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca geleneksel ÇÇ elemanın da iyi performans gösterdiğini ancak çelik tüp içerisine beton doldurularak elde edilmiş BEÇÇ’ler ile karşılaştırıldığında enerji sönümleme kapasitelerinin oldukça sınırlı olduğunu bildirmişlerdir.

Gourd (2015) yaptığı çalışmada 2008 senesinde, Kanada’nın Royal Military College arazisinde bulunan beş katlı betonarme yapının yenilenmesi çalışmalarına başlamıştır. Yenileme çalışmalarında kullanılan elemanlardan birisi sismik güçlendirmedir ki buna 28 kendine has BEÇÇ’nin yapı içerisinde kullanımı dahildir. Bu BEÇÇ’ler yapıya sismik güçlendirme ve enerji sönümleme sistemi olarak tasarlanmış ve eklenmiştir. Bu çalışma 9 m boyunda üç adet tam boyutlu BEÇÇ elemanlarının çerçeve benzeri testlerini içermektedir. Kalifikasyon testleri süresince, üretilen BEÇÇ’nin üretiminde kullanılan materyallerin standartlarda belirtilen 248 MPa akma dayanımı değerini geçtiği ve bunun sonucunda beklenen tasarım kapasitesini geçtiğini belirtmiştir. Kalifikasyon testlerini takiben, betonarme çerçeveli yapının modülünü sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak modellemiş ve statik, dinamik kuvvetlere maruz bırakmıştır. Sonuç olarak tasarlanmış ve inşa edilmiş BEÇÇ’ler çevrimli yükler altında elastik kalmıştır. Ancak 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan National Building Code of Canada’nın (NBCC) belirttiği Uniform Hazard Spectrum’dan 2 ile 5 kat arasında daha büyük sismik yer hareketlerinde plastik davranış gözlemlenmiştir. Ayrıca BEÇÇ’li sistemin genellikle elastik kalması ile birlikte bu sistem, rijit ve etkili sismik güçlendirmeyi başarmıştır. Bu güçlendirme amaçlı kullanılan BEÇÇ’li sistemin betonarme çerçeveye etkili yanal destek ve yeterli rijitliği sağladığını tespit etmiştir. Sismik yüklemeler süresince BEÇÇ’lerin katlar arası ötelemeyi de düşürdüğünü bildirmiştir.

2.2.3. BEÇÇ’li çerçevelerin sistem performans

Fahnestock vd. (2003) yaptıkları çalışmada Lehigh Üniversitesi, ATLSS merkezinde, içi beton doldurulmuş çelik boru şekilli kolonlara sahip çerçevelerin sismik davranışlarını, analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmanın amacı bu tip çerçevelerin sismik performansının araştırılması, tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve analitik model oluşturulmasıdır. Yanal yük dirençli sistem olarak BEÇÇ çerçeveli 4 katlı prototip bina tasarlanmışlardır. Çerçeve kolonlarını dairesel kesitli tüplerin içerisine beton dökerek elde etmişlerdir. Kirişler ise yapısal çelik kesitine sahiptir. Kolonlarda

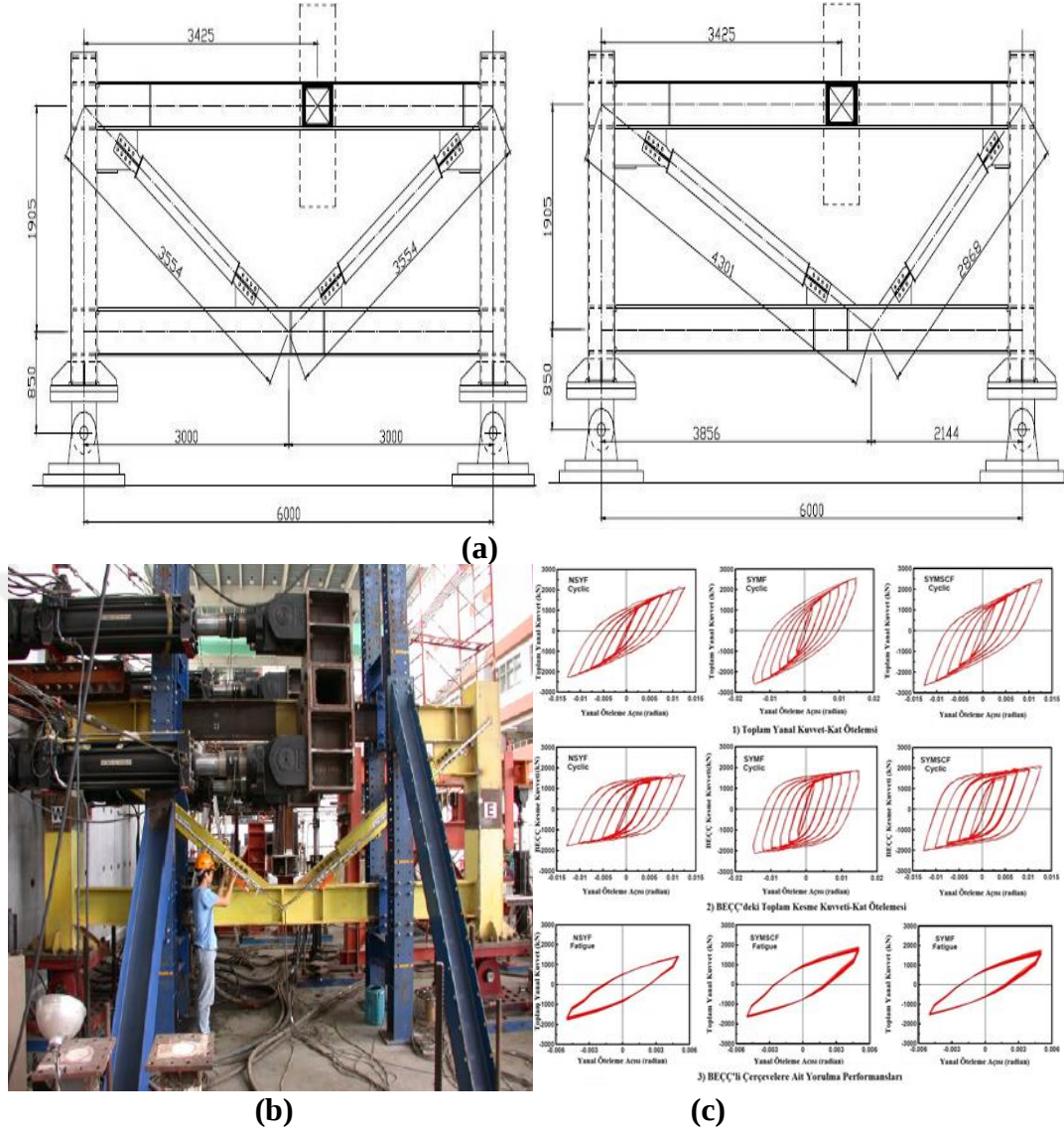
kullanılan çelik A500 Grade B çeliği olup akma dayanımı 317 MPa'dır. Kolonlarda kullanılan betonun basınç dayanımı ise 34,5 MPa'dır. Kirişler A992 çeliği olup akma dayanımı 345 MPa'dır.

BEÇÇ'li çerçeveler için tasarım parametrelerini IBC 2000 ve AISC/SEOC şartnamelerinden temin etmişlerdir. ATLSS laboratuvarında test edilen prototip BEÇÇ'li çerçeve 3/5 ölçeğindedir. Deneysel araştırma için test çerçevesinin üzerinde simultane sismik yükleme kullanarak pseudo-statik testleri gerçekleştirmişlerdir. Test çerçevesinin yanal rijitliği ve dinamik karakteristiğini pseudo-testlerinden önce ve sonra belirlemişlerdir. Deneysel çalışmada kullandıkları 1 açıklıklı prototip BEÇÇ'li çerçeve, yapı analizinde kullandıkları prototip yapıdan çekilmiş olup bir yönde yanal yük dirençli sistemin çeyreğini temsil etmektedir.

Çalışma kapsamında materyal ve geometrik nonlineeritenin de dahil olduğu prototip çerçeve modelinde DRAIN-2DX analiz programını kullanmışlardır. Bu çalışmada kullanılan yer hareketlerini Pasifik Deprem Mühendisliği Merkezi veri tabanından elde etmişlerdir. Deprem kayıtlarını tasarım temelli deprem ve maksimumun göz önüne alındığı deprem olmak üzere iki farklı sismik girdi seviyesinde boyutlandırmışlardır. Tasarım temelli deprem için hedef seviyeyi hayat kurtaran performans seviyesi ve maksimumun göz önüne alındığı deprem için hedef seviyeyi ise çökmeden kaçınma performans seviyesi olarak belirlemişlerdir.

Çalışmanın sonucunda BEÇÇ'li çerçevenin sismik girdi seviyeleri için tanımlanan kriterleri fazlası ile gerçekleştirdiğini tespit etmişlerdir. BEÇÇ'ler yeterli süneklilik kapasitesini göstermişlerdir. Çatı ve kat ötelemeleri kabul edilebilir seviyede kalmış olup tasarım temelli depremden sonra çerçevenin tamiri gerçekleştirilebilir ve ekonomik seviyededir. Benzer olarak maksimumun göz önüne alındığı deprem seviyesinde hareketlerine maruz kalan BEÇÇ'li çerçevenin performansı çökmeden kaçınma performansına göre çok daha iyidir ve hayat kurtarma seviyesine yaklaşmıştır. ÇE'de çatlama olmadan çok daha yüksek maksimum süneklilik talepleri başarılabilceğinden bahsedilmiştir. Sonuç olarak BEÇÇ'li çerçeve üzerine yapılmış analitik ve deneysel çalışmalar yapının depreme karşı direncini geliştirmek hususunda son derece başarılı olduğunu belirtmektedir.

Lai ve Tsai (2004) yaptıkları çalışmada çift ÇE'li BEÇÇ'lerin (Şekil 2.7.b) bayrak levhasına bağlantı detaylarının değerlendirilebilmesi amacı ile üç büyük ölçekli tek açıklıklı V şekilli BEÇÇ'li çerçeve inşa etmişler ve bu çerçeveleri çevrimli yükleme protokolü testlerine maruz bırakmışlardır. Ayrıca her bir çerçevenin farklı uzunluk oranlarında BEÇÇ'lere sahip olduklarını bildirmişlerdir (Şekil 2.13.a). Deney düzeneği Şekil 2.13.b'de görülmektedir.



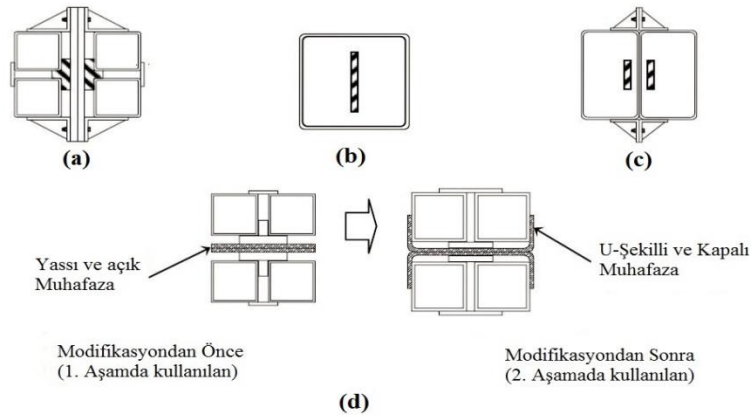
Şekil 2.13. a) Farklı uzunluk oranlarında BEÇÇ'lere sahip çerçeveler; **b)** Tek katlı tek açıklıklı BEÇÇ'li çerçevenin test düzeneği; **c)** 1) Toplam yanal kuvvet-yanal ötelenme açısı (radyan) 2) BEÇÇ kesme kuvveti- yanal ötelenme açısı (radyan) 3) BEÇÇ'li çerçevelerin yorulma performansları (Lai ve Tsai 2004)

Lai ve Tsai bu çalışmanın amaçlarını; 1) farklı uzunluk oranlarında V şekilli BEÇÇ'lere sahip olan tek açıklıklı üç farklı çerçevenin deneysel ve analitik tepkilerinin araştırılması 2) ÇE'de oluşan gerinimler ile katlar arası öteleme ilişkilerinin araştırılması ve 3) şiddetli sismik uygulamalar için BEÇÇ'li çerçevenin tasarımları ve analizleri için tüzüklerin sağlanması olduğunu belirtmişlerdir.

Lai ve Tsai çevrimsel kuvvete karşılık BEÇÇ bileşenlerinin deformasyon tepkisini incelendiklerinde BEÇÇ'lerin oldukça yüksek stabil enerji sönmüleme karakteristiğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sonlu elemanlar programı kullanılarak yaptıkları analizleri BEÇÇ'lerin deneysel sonuçları ile karşılaştırdıklarında çerçeve ve BEÇÇ yanal kuvvet-katlar arası öteleme tepkilerinin hatasız bir şekilde

hesaplanabileceği sonucuna varmışlardır. Mimari fonksiyonlar göz önünde bulundurulduğunda (pencere ve kapı açıklıkları gibi) BEÇÇ'lerin asimetrik olarak ayarlanabileceğini bildirmişlerdir. Çerçeve sisteminin çevrimli veya yorulma performanslarının ve önerilen BEÇÇ bileşenleri ile çerçeve sisteminin oldukça stabil karakteristik gösterdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca geniş kat ötelemelerinde, çekme çubuğundaki çekme deformasyonun, basınç çubuğundaki basınç deformasyonunda her zaman daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır. Bu durumun katlar arası ötelemenin artması ile daha da belirginleştiğini belirtmişlerdir.

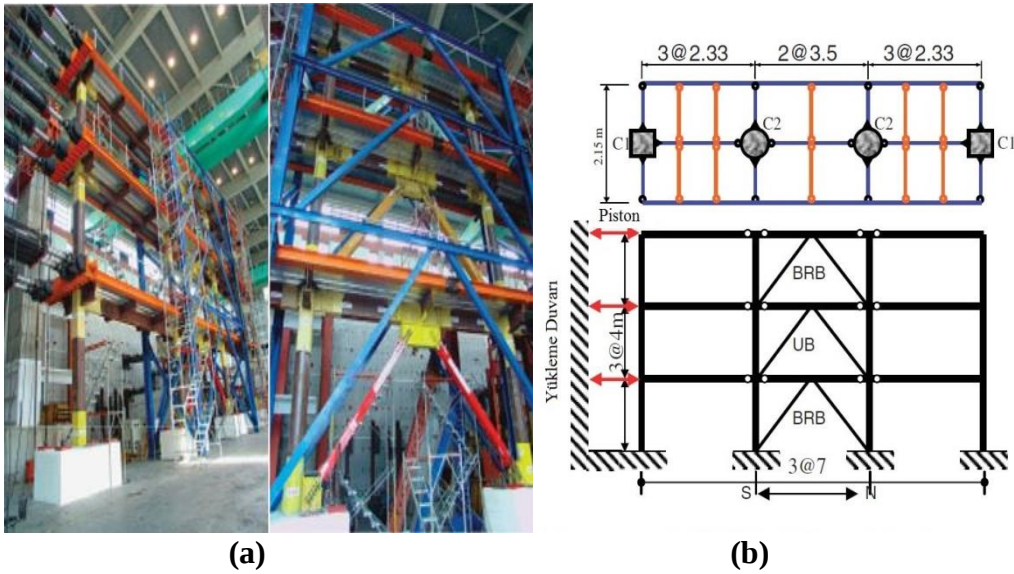
Tsai vd. (2008) yaptıkları çalışmada, deprem mühendisliği üzerine araştırmalar yapan Taiwan National Center'da, beton doldurulmuş tüp kolonlar kullanarak inşa edilen tam boyutlu 3 katlı, 3 açıklıklı BEÇÇ'li çerçevenin dinamik benzeri deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmayı 2 aşamaya ayırmışlardır. 1. aşamada çerçeveye üç farklı tip BEÇÇ yerleştirmişler ve bu BEÇÇ'lerin tiplerini tamamen çelik BEÇÇ'ler, tek ÇE'li BEÇÇ'ler ve çift ÇE'li BEÇÇ'ler olarak belirtmişlerdir. Şekil 2.14'de BEÇÇ'lerin en kesit planları sırası ile gösterilmektedir. Çalışma kapsamında çift ÇE'li BEÇÇ'leri 3. kata, tek ÇE'li BEÇÇ'leri 2. kata, tamamen çelikten oluşan BEÇÇ'leri ise 1. kata yerleştirmişlerdir. 1. aşama testlerinden sonra 6 adet yeni BEÇÇ'yi orijinal çerçeveye 2. aşama için yerleştirmişlerdir. 2. aşamada ise 1. katta iki adet çift ÇE'li tamamen çelik BEÇÇ'ler kullanılırken, 2. ve 3. katlarda 4 adet beton ile doldurulmuş çift ÇE'li BEÇÇ'ler kullanmışlardır. Şekil 2.14.d'de 1. aşamada, 1. katta kullanılan orijinal BEÇÇ en kesitini ve 2. aşamada kullanılan modifiye edilmiş, tamamen çelikten oluşan BEÇÇ en kesiti görülmektedir.



Şekil 2.14. a) 1. katta yer alan tamamen çelik BEÇÇ en kesiti; **b)** 2. katta yer alan tek ÇE'li BEÇÇ en kesiti; **c)** 3. katta yer alan çift ÇE'li BEÇÇ en kesiti; **d)** tamamen çelikten oluşan BEÇÇ'lerin modifikasyonu (Tsai vd. 2008)

Dinamik benzeri deneylerde kullandıkları çerçeve özelliklerini aşağıdaki gibi açıklamışlardır;

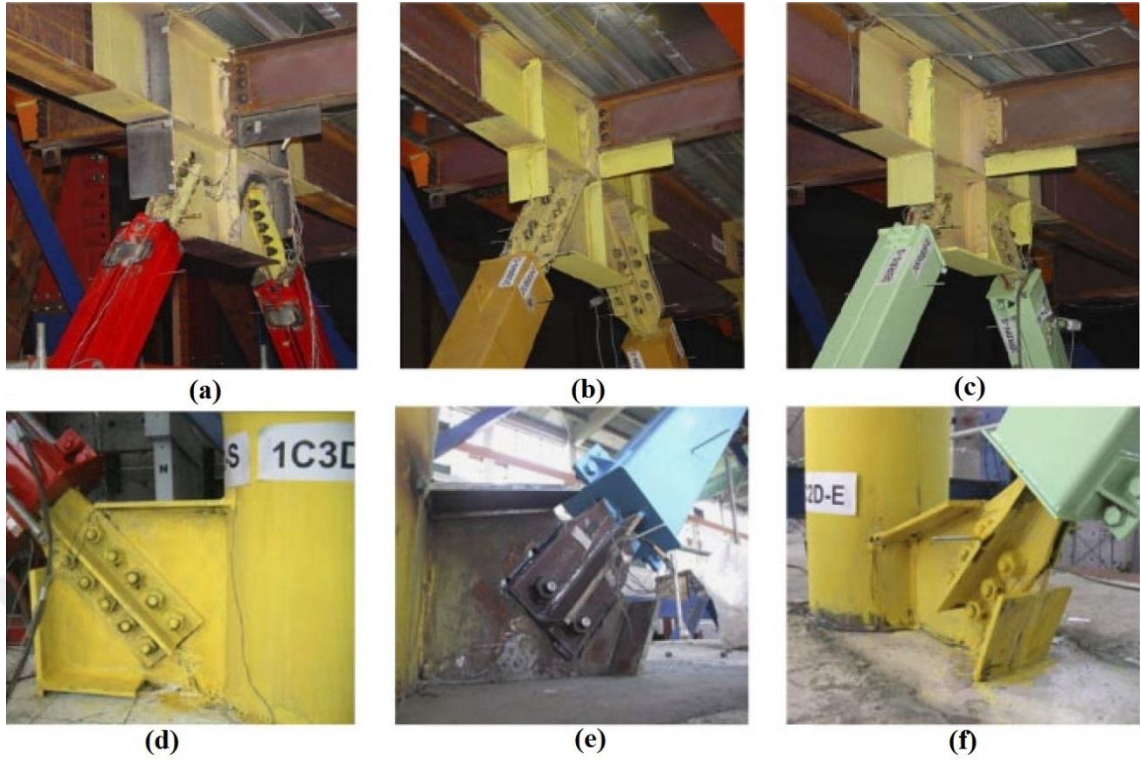
- Çerçeve açıklığının genişliği 7 m ve yüksekliği 4 m'dir
- Çerçeve İlk katta H456*201*10*17 kirişlere, ikinci katta H450*200*9*14 kirişlere ve üçüncü katta H400*200*8*13 kirişlere sahiptir.
- Çerçeve dış kolonları 400*400*9 mm boyutlarında kare en kesitli içi beton doldurulmuş çelik tüplerden (BDT), iç kolonlarda ise 400*900 mm dairesel kesitli BDT'lerden oluşmaktadır.
- Her bir katta dış kirişlerden kolona olan bağlantılarda moment bağlantılar kullanılmışken, iç kirişlerden kolona bağlantılarda mafsallı bağlantı kullanılmıştır.



Şekil 2.15. a) Üç katlı, üç açıklıklı çerçeve ve chevron konfigürasyonlu BEÇÇ'li orta açıklık b) BEÇÇ'li çerçeve boyutları (Tsai vd. 2008)

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen dinamik benzeri deneyler için yer hareketlerini 1999 Chi-Chi ve 1989 Loma Prita depremlerinden ve bu depremlerin üç sismik bölgeyi temsil eden seviyelerden seçmişler ve adapte etmişlerdir.

1. aşama testlerinden önce bağlantıda berkitme kullanmamışlardır. Ancak 1. aşamada 1. kattaki üst bayrak levhası burkularak ekseninden kaydığını tespit etmişlerdir. Daha sonra burkulmuş bayrak levhasını ısıtıp düzeltmişler ve 12 mm kalınlığındaki berkitmeleri her üç kattaki üst bayrak levhalarına eklemişlerdir. Sonuç olarak tüm dinamik benzeri testleri, bayrak levhalarında veya BEÇÇ'lerde herhangi bir bozulma olmadan başarı ile gerçekleştirmişlerdir. Ancak 1. aşamanın son çevrimli testinde 3. kat güney BEÇÇ'sinin alt bayrak levhasında burkulma tespit etmişlerdir. 2. aşamada altı yeni BEÇÇ sisteme eklemişler ve tüm bayrak levhalarına berkitme kaynaklamışlardır. Bunun sonucunda 2. aşamada herhangi bir burkulmaya rastlamamışlardır.



Şekil 2.16. a);b);c) 1. aşamada eklenen berkitmeler d);e);f) 2. aşamada eklenen berkitmeler (Tsai vd. 2008)

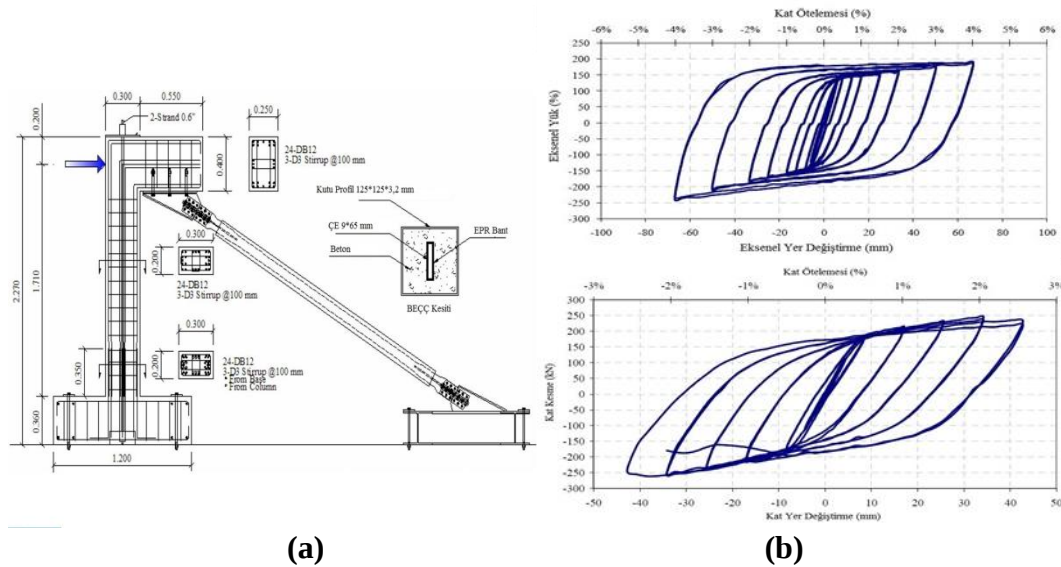
Test ve analizlere bağlı olarak sonuçları aşağıdaki gibi sunmuşlardır;

- Bayrak levhalarına berkitme eklenmesi, bayrak levhalarının burkulma kapasitesini artırarak kaymasını önlemede oldukça etkili bir yöntemdir.
- Analizlerde BEÇÇ bayrak levhası burkulma kapasitesi, bayrak levhası kenarlarına berkitme kaynaklanmadan önce etkili uzunluk faktörünü $K=2,0$ kabul edilmesi ile isabetli bir tahmin yapılabilir.
- Tüm BEÇÇ'ler tamamen histerik tepki göstermişler ve yüksek miktarda enerjiyi sönümlenmişlerdir. Elastik limit içerisinde, BEÇÇ'ler toplam kat kesme kuvvetinin yaklaşık %80'i oranında direnç göstermişlerdir.
- Test sonuçları göstermiştir ki, BEÇÇ'ler deprem yükünün çeşitli seviyelerinde yapısal sistem üzerine etkileyen enerjinin çoğunu sönümlenmişlerdir.
- Bütün BEÇÇ'ler 250 ile 350 arasında değişen geniş kümülatif plastik deformasyon kapasitesine sahiptirler. Çerçeveye yerleştirilmiş BEÇÇ'lerin kümülatif plastik deformasyonu, eleman bazındaki testlerden elde edilenlere göre daha düşüktür.
- Test sonuçlarına göre BEÇÇ uç rotasyonları oldukça büyüktür. Bu talepler kat öteleme taleplerinin %30 ile %96'sı arasında değişiklik göstermektedir.

2.2.4. Betonarme yapıların BEÇÇ ile güçlendirilmesi

Yooprasertchai ve Warnitchai (2008) yaptıkları çalışmada, BEÇÇ'lerin düşük katlı, betonarme çerçeveli yapılara uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmanın temel amacını, sünek olmayan yapı elemanlarındaki (kolon gibi) inelastik deformasyon taleplerini düşürerek, yapının enerji sönümleme kapasitesini arttırmak olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında basit fakat etkili olan dikdörtgensel kesitli ÇE'nin içi harç doldurulmuş kutu profil ile kaplanmasından oluşan BEÇÇ'ler üretmişler ve bir seri statik benzeri çevrimli yükleme testine tabi tutmuşlardır. İlk BEÇÇ'yi mevcut şartname ve daha önce yapılmış çalışmalar baz alınarak tasarlamışlardır. Ancak ilk BEÇÇ'nin akma bölgesi uçlarında meydana gelen beklenmedik hatalar nedeni ile çok zayıf performans göstermesi, tasarımda yeniliğe gitmelerine neden olmuştur. Bu hataların düzeltilmesi ile 3. BEÇÇ'nin çekme durumunda başarılı bir şekilde akma davranışı gösterdiğini bildirmişlerdir. Çalışmanın ikinci aşamasında iyi performans gösteren BEÇÇ'yi, betonarme kolon içeren çerçeve benzeri test düzeneğine diyagonal olarak yerleştirilmişler ve statik benzeri yüklemelere maruz bırakmışlardır.

Çalışma kapsamında üretilen BEÇÇ'ler de 9*65 mm kesitli dikdörtgensel ÇE ve 125*125*3.2 mm kutu profil kullanılmışlardır. 1. BEÇÇ'nin ÇE plastik bölge uzunluğu 2380mm iken, 2. ve 3. BEÇÇ'lerin ÇE plastik bölge uzunluğu 1995 mm olup, ethilen propilen lastik bant ile sarıldığını bildirmişlerdir. BEM'de kullanılan betonun 28 günlük basınç dayanım 40 MPa'dır. Çalışmanın ikinci aşamasında iyi performans gösteren BEÇÇ deney düzeneğine diyagonal şekilde yerleştirilmiştir. Çerçeve benzeri test düzeneğinde kullanılan kolon betonarme olup dikey yönde 200*300 mm boyutundadır. Çerçeve benzeri test düzeneğinin detayları şekil 2.17'de görülmektedir. Test düzeneğinde 500 kN'luk MTS hidrolik piston kullanılmış olup testlerde kullanılan yükleme protokolü AISC 341-05'den uyarlanmıştır.



Şekil 2.17. a) 3. BEÇÇ ve betonarme kolonlu çerçeve benzeri deney düzeneği; **b)** Sırası ile 3. BEÇÇ'nin eksenel yük-deplasman grafiği ve çerçeve benzeri deney düzeneğinin kat kesme kuvveti-deplasman grafiği (Yooprasertchai ve Warnitchai 2008)

İlk BEÇÇ elemanının sonuçlarını incelediklerinde akmanın tam olarak gerçekleşmediğini ve ÇE'nin genişleyen bölgesinin yeterli miktarda BEM içerisinde yer almadığını tespit etmişler, bu nedenle 2. BEÇÇ'nin tasarımında değişikliğe gitmişlerdir. Ancak 2. BEÇÇ'de, deney sırasında, BEM'de yer alan betonun, kutu profil içerisinden kaydığını ve BEÇÇ'nin üst ucunda BEM'in kaybolduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun sonucunda 3. BEÇÇ'nin ÇE'sine, BEM'in kaymasını önlemek amacı ile kesme levhaları kaynaklanmıştır. Böylece çevrimli yüklemeler altında stabil davranış ve eksenel çekme kuvvetleri altında üniform akma davranışı gösteren 3. BEÇÇ'yi elde etmişlerdir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise sismik detayı bulunmayan betonarme kolon ve bu kolona BEÇÇ'nin montajı gerçekleştirmişler ve statik benzeri çevrimli yüklemeler altında test etmişlerdir. Çalışmanın sonuçları göstermektedir ki, betonarme kolona çaprazlama yerleştirilen BEÇÇ elemanı, bozulmaya dair herhangi bir işaret olmaksızın, küçükten büyüğe doğru genişleyen öteleme seviyelerinde oldukça iyi stabil çevrimli halkalar göstermiştir. Ancak %2,5 ötelenmede, kolonun tamamında bozulma başlamıştır. BEÇÇ'nin sistem içerisine eklenmesi ile birlikte dayanım ve rijitlikte artış görüldüğü gibi enerji sönümleme miktarı da artmıştır. BEÇÇ ile betonarme çerçeve arasındaki bağlantıda kullanılan bulonlu kimyasal ankaraj, çevrimli yükler altında stabil ve memnun edici davranış göstermiştir. Test sonuçlarına göre sünek olmayan betonarme yapıların güçlendirilmesinde BEÇÇ'li sistemlerin kullanılması alternatif bir yöntemdir.

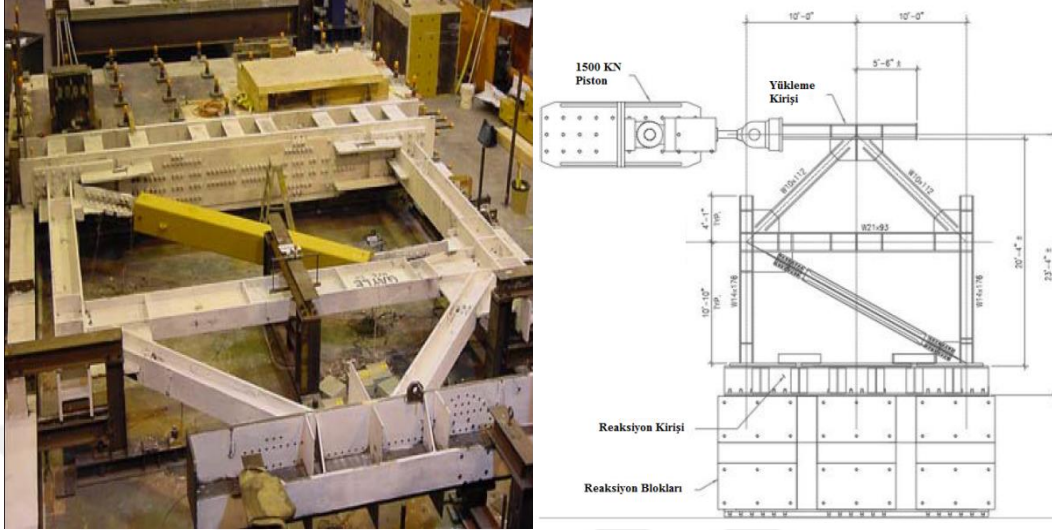
Guerrero vd. (2018) yaptıkları çalışmada BEÇÇ'lerin, betonarme modeller üzerindeki etkilerini araştırmak amacı ile iki adet 1/3 ölçekli dört katlı çerçevenin sarsma tablası deneyi gerçekleştirmişlerdir. 1. Model BEÇÇ içermeyen ve Meksika'daki yaygın uygulamaya göre tasarlanmıştır. 2. Modeli ise BEÇÇ ile güçlendirilmiş ve deplasman tabanlı metodolojiyi baz alarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada BEÇÇ'lerin faydalarını açıklamak amacı ile iki model arasındaki birkaç karşılaştırmayı sunmuşlardır. Modellerin temel frekansları, sönüm oranları ve sismik tepkilerini izlenmişlerdir. Modelleri iki tip yer hareketine maruz bırakılmışlardır. Bu çalışmada elde ettikleri en önemli bulgular şunlardır; (1) liner elastik tepki için, BEÇÇ'lerin sönümleme oranı önemli miktarda artmıştır; (2) BEÇÇ'lere bağlı olarak sismik tepki iyileştirilmiştir.

2.2.5. Çelik yapıların BEÇÇ ile güçlendirilmesi

Mahin vd. (2004) 2002 senesi ocak ayı başında yaptıkları çalışmada üç tam boyutlu BEÇÇ'li çerçevenin bir dizi testini California-Berkeley Üniversitesi'nde yürütmüşlerdir. Bu çalışma kapsamında şu soruları yanıtlamaya çalışmışlardır; (1) BEÇÇ uç rotasyonlarının tüm BEÇÇ davranışına etkileri nelerdir? (2) Çerçeve içerisinde yer alan BEÇÇ'nin histerik davranışı, eleman bazındaki testlerden elde edilen histerik davranış ile aynı mıdır? (3) Beklenen yapı ötelemelerinde BEÇÇ ile bayrak levhası arasındaki bağlantının performansı nasıldır?

Test programında tek katlı, tek açıklıklı BEÇÇ'li çerçevenin davranışını araştırmışlardır. Bu amaçla iki farklı BEÇÇ konfigürasyonunda üç farklı çerçeve deneyi gerçekleştirmişlerdir. Bu konfigürasyonların ilki (No. 1) chevron tipi BEÇÇ konfigürasyonuna sahip (Şekil 2.4) iken ikinci ve üçüncü konfigürasyonlar (No.2, No.3)

diyagonal konfigürasyona (Şekil 2.18) sahiptir. Tüm konfigürasyonlar aynı kolon-kiriş bileşenlerine sahiptir, ancak her biri farklı BEÇÇ tasarımlarına sahiptir. BEÇÇ'lerin ÇE en kesit ve plastik bölge alanında değişikliğe gitmişlerdir.



Şekil 2.18. Diyagonal yerleştirilmiş BEÇÇ sistemli çerçeve (Mahin vd. 2004)

Test düzeneğinde 6700 kN'luk piston kullanmışlar ve bu pistonu daha iyi bir çerçeve ve bağlantı karakteristiği elde edebilmek için başlık çubuğuna (hat brace) bağlamışlardır. Bu çalışmada kullanılan çerçeve düzeneği, gerçek yapılarda kullanılan çerçevelerin %70'i kadardır. Her üç testte de aynı çerçeveyi kullanılmış olsalar da her bir test konfigürasyonu için yeni bayrak levhaları kaynaklamışlardır. Testlere ait genel parametreleri aşağıdaki gibi belirtmişlerdir.

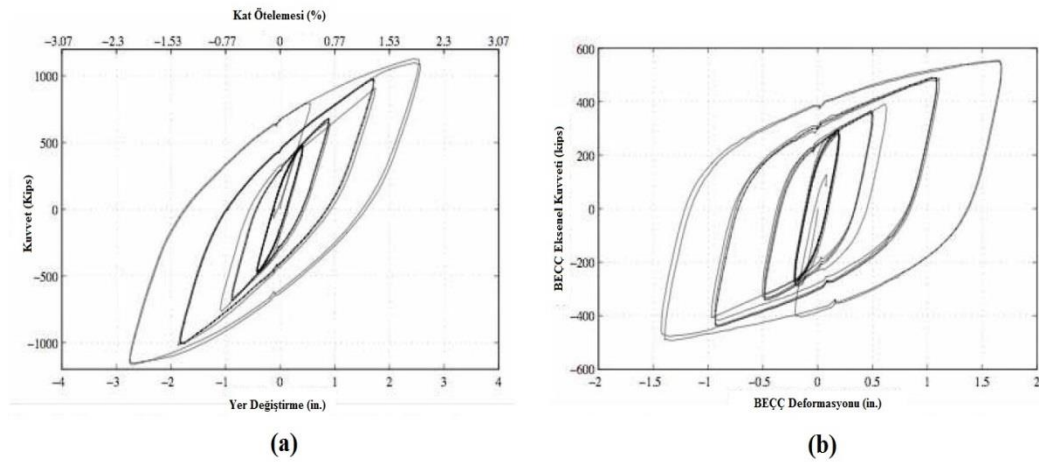
- Çerçeve W14*176 kolanlarla birlikte W21*93 kirişi kapsamaktadır.
- Çerçeve açıklığının yüksekliği 3,3 m ve genişliği ise 6,1 m'dir.
- Yanal yükler W10*122 boyutunda çaprazlar boyunca transfer edilmiştir.
- BEÇÇ ile bayrak levhası bağlantısında 32 mm A490 bulonlar kullanılmıştır.
- Kiriş flanşlarının bulunduğu kiriş kolon bağlantılarında tam nüfuzlu kaynak kullanılmıştır.

Mahin vd. bu çalışma kapsamında üç farklı BEÇÇ tasarlamışlar ve incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda kullandıkları tüm BEÇÇ'ler Nippon Steel firması tarafından üretilen BEM'i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ'lerdir. Çalışma kapsamında Test No.1 chevron konfigürasyonlu BEÇÇ sistemine sahip olup BEÇÇ'lerden birisi dikdörtgensel diğeri ise artı (+) en kesitli ÇE'ye sahiptir. Test No 2 BEÇÇ'si 4080 mm²'lik dikdörtgensel en kesitli ÇE plastik bölge alanına sahip iken Test No. 3. BEÇÇ'si artı (+) en kesitli 7540 mm² plastik bölge alanına sahiptir. Tüm BEÇÇ'lerin ÇE'leri JIS'da tanımlı SN400B çeliği olup akma dayanımı 280 MPa'dır. 1 ve 2 numaralı BEÇÇ'lerin akma kuvveti 1150 kN, 3 numaralı elemanın ise 2130 kN'dur.

Bütün testlerde BEÇÇ elemanlarını bayrak levhalarına bulon ve bağlantı levhaları yardımı ile bağlamışlar, bayrak levhasını ise çerçeveye kaynaklamışlardır. Ancak test 3’de bayrak levhası ile çerçeve arasındaki serbest kenara küçük berkitmeler eklemişlerdir.

Üç testin tamamında kullanılan yükleme protokollerini Recommended Provisions’ı baz alarak hazırlamışlardır. Bu testler, BEÇÇ’lere en az tasarım deformasyonuna eşit maksimum deformasyon uygulayabilmek ve en az 140 toplam kümülatif plastik süneklilik talebine göre ayarlamışlardır. Test programı için maksimum öteleme oranlarını, nonlinear statik analizden elde etikleri öteleme oranları ile yaklaşık aynı tutmuşlardır.

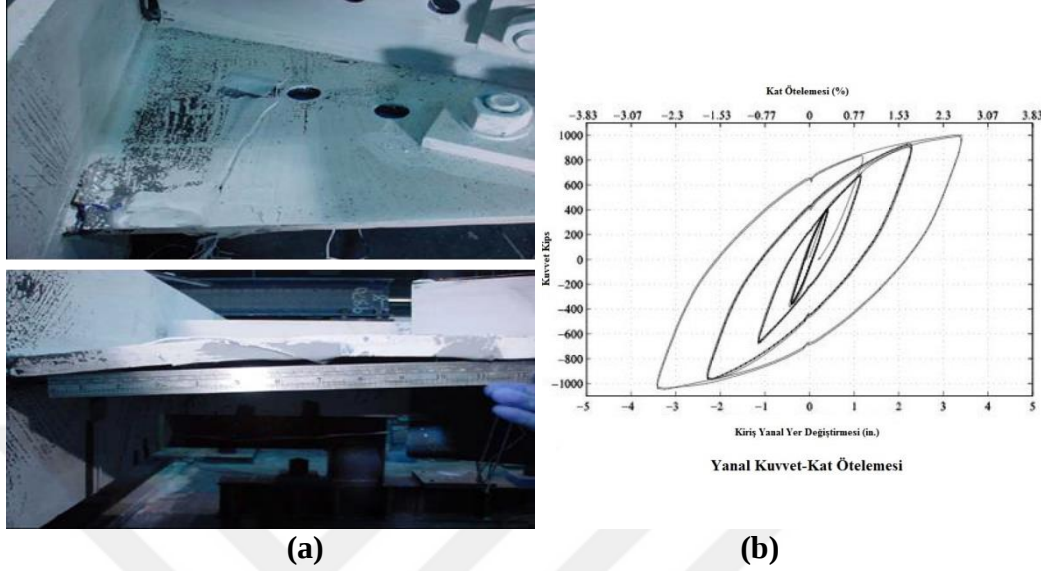
Test No. 1 çerçeve konfigürasyonunda, test süresince oldukça iyi davranış gözlemlenmişler, BEÇÇ’ler de ise tekrarlı stabil histerik davranış gözlemlenmişlerdir. Her iki yönde de çerçeve pik kuvvetlerinin oldukça tutarlı olduğunu belirtmişlerdir. %2 ötelemeye denk gelen çevrimde, alt bayrak levhalarında akma tespit etmişler, fakat çatlama veya burkulma gözlemlenmemişlerdir. Kirişin ortasında yer alan üst bayrak levhasında akma görülmemiş, ancak kirişte küçük miktarda yukarı aşağı hareket gözlemlenmişlerdir. Bu çevrimler süresince BEÇÇ’de ve bayrak levhalarında herhangi bir başarısız durum belirtmemişlerdir.



Şekil 2.19. a) Test No. 1 yanal kuvvet-kat yanal ötelemesi; b) Test No 1 BEÇÇ histerik davranışı (Mahin vd. 2004)

Test No. 1’in tamamlanmasından hemen sonra BEÇÇ’leri ve bayrak levhalarını sökmüşler, yerine yeni bayrak levhalarını ve diyagonal BEÇÇ’yi yerleştirilmişlerdir. Test No. 2 çerçevesinde yükleme geçmişi süresince iyi davranış ve BEÇÇ’de tekrarlı stabil histerik davranış gözlemlenmişlerdir. BEÇÇ tarafından desteklenen toplam kümülatif plastik deformasyonun yaklaşık 299 olduğunu belirtmişlerdir. Çerçeve pik kuvvetlerinin oldukça tutarlı olduğunu ve BEÇÇ’nin çekme, basınç davranışının neredeyse simetrik olduğunu belirtmişlerdir. Çerçevede başlangıç akmasını %0,87 ötelemeye denk gelen çevrimde üst ve alt bayrak levhalarında gözlemlenmişlerdir. %1,72 ötelemeye denk gelen çevrimde kolonun tabanından başlayıp tüm kolon uzunluğu boyunca dağılan akma çizgileri gözlemlenmişlerdir. Şekil 2.20.a’da görüldüğü üzere,

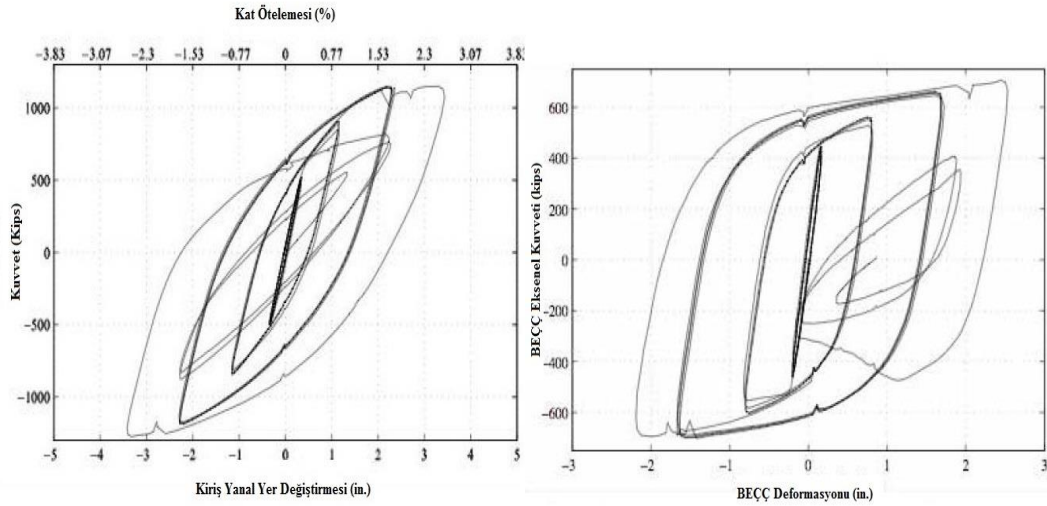
%2,6 öteleme çevrimleri süresince çerçeve hareketine bağlı olarak her iki bayrak levhasında da çatlaklar meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca üst bayrak levhasının serbest kenarlarında burkulma meydana geldiği bildirmişlerdir.



Şekil 2.20. a) Bayrak levhasında çatlama ve burkulma; **b)** Test No.2 yanal kuvvet-kat yanal ötelemesi (Mahin vd. 2004)

Test No. 2'nin tamamlanmasından sonra BEÇÇ ve bayrak levhalarını sökmüşler ve yerlerine yeni bayrak levhaları ve artı (+) şekilli ÇE'ye sahip BEÇÇ'yi diyagonal olarak çerçeve içerisine yerleştirmişlerdir. Test No. 2'de bayrak levhasının burkulması ve kaynak çatlamlarının oluşması nedeni ile bayrak levhalarına dikdörtgensel berkitmeler kaynaklamışlardır. %1,72 ötelemeye denk gelen çevrimde, çerçevede çeşitli hasarların oluştuğunu bildirmişlerdir. İlk olarak kolon tabanlarında ve kolon taban berkitmelerinde akma gözlemlenmiştir. %2,6 ötelemeye denk gelen çevrimde, Şekil 2.21.c'de görüldüğü üzere, ana kirişin aşağı tarafındaki flanşın tamamı kirişten kolona doğru çatlamıştır. Bu çatlama BEÇÇ'nin üst ucunda kiriş-bayrak levhası bölgesinde burulma stabilitesinin kaybına neden olduğunu belirtmişlerdir. Böylece Şekil 2.21.d'de görüldüğü üzere kirişteki çatlağın BEÇÇ'de düzlem dışı deformasyona neden olduğunu, yüklemenin sonunda, çatlamanın dokuya yayıldığını ve BEÇÇ'nin sert bir şekilde düzlem dışına kaydığını bildirmişlerdir.

Bir kaç küçük bölgesel çatlağa rağmen, çerçevede %0,87 ötelemesine denk gelen çevrimin tamamlanmasına kadar oldukça iyi performans gözlemlenmiştir. BEÇÇ kiriş flanşında çatlak oluşmasına kadar oldukça iyi davranış gözlemlenmişler ancak bu noktadan sonra lokal çatlama emaresi olmaksızın, çok geniş plastik rotasyonları birkaç çevrimde tespit etmişlerdir. Kiriş flanşının ve bayrak levhasının yanal deplasmanı nedeni ile BEÇÇ'nin sonraki histerik davranışını geleneksel ÇÇ'ye benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak kiriş çatlamasından sonra çok büyük inelastik rotasyonların ve eksenel deformasyonların BEÇÇ'nin uçlarına yakın bölgelerde oluştuğunu tespit etmişlerdir.



(a)

(b)



(c)



(d)

Şekil 2.21. a) Test No. 3 kuvvet-kiriş yanal deplasmanı grafiği; **b)** Test No. 3 BEÇÇ histerik davranışı; **c)** Kirişte meydana gelen çatlama; **d)** BEÇÇ'nin düzlem dışı burkulması (Mahin vd. 2004)

Bu çalışmanın sonuçlarını şu şekilde açıklamışlardır;

Üç adet BEÇÇ'li çerçevede sismik yanal sistem olarak oldukça iyi performans göstermişlerdir. BEÇÇ'ler testlerde yüksek enerji sönümleme kapasiteli, sünek bir BEÇÇ'li çerçeve sağlamışlardır.

Çerçeve içerisindeki BEÇÇ'ler üç testin tamamında oldukça iyi performans göstermişlerdir. BEÇÇ'lerin histerik ve uzama davranışları, çerçevenin yüklenmesi ile oluşan birleşik eksenel ve rotasyon taleplerinden etkilenmemektedir. Test No. 1 sonuçlarını incelediklerinde farklı ÇE en kesitine sahip chevron konfigürasyonlu BEÇÇ'ler arasında gözle görülür bir farklılık tespit etmemişlerdir. Test sonuçları incelendiğinde chevron ve diyagonal ayarlanmış ve farklı ÇE en kesitlerine sahip

BEÇÇ'lerin davranışlarında önemli bir fark görülmemiştir. Cehvron düzene sahip BEÇÇ'li çerçevenin kirişinin orta bölümünde küçük miktarda dengesiz kuvvet görülmüştür.

Test çerçeveleri No.1 ve 2 testlerinin bütün öteleme seviyelerinde iyi performans göstermiştir. Test No. 3'de ise tasarım kat öteleme seviyeleri süresince kiriş kolon bağlantısında çatlak gelişmiştir. Tasarım seviyesi ötelemesini geçen ilk çevrimde kiriş alt flanşı BEÇÇ bayrak levhası bağlantısının dış kenarından çatlamıştır. Meydana gelen çatlama burulma stabilitesinin bozulmasına neden olmuş, bayrak levhası bölgesinde ve BEÇÇ'nin ucunda burkulmaya neden olmuştur.



3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışması kapsamında BEÇÇ performansının belirlenebilmesi için toplam 7 adet deney elemanın histerik davranışları ve performansı eleman bazında test düzeneği ile belirlenmiş ve Bölüm 3.1’de ele alınmıştır. Bu bölümde BEÇÇ üretiminde kullanılan materyallerin özellikleri, tasarım detayları, BEÇÇ’lerin üretim aşamaları, eleman bazındaki test düzeneği ve BEÇÇ elemanlarının maruz bırakıldığı çevrimli yüklemeler hususunda bilgiler verilecektir.

3.1. Giriş

BEÇÇ ve BEÇÇ’li sistemlerin ülkemizde kullanımının çok yeni olması nedeni ile BEÇÇ tasarım parametreleri, üretim aşamaları ve yapı içerisinde kullanımı konusundaki bilgiler oldukça kısıtlıdır. Bölüm 2’de görüldüğü üzere literatürde mevcut olan farklı tasarımlara sahip BEÇÇ’ler mevcuttur. Bu BEÇÇ’ler incelendiğinde genel olarak farklılıkların ÇE’nin en kesiti, kullanılan izolasyon malzemesi ve kalınlığı veya BEM’in kutu profil içerisine beton dökülerek elde edilmesi (Watanabe vd. 1988, Mahin vd. 2004 ve Yooprasertchai vd. 2008) yada tamamen çelik profillerden oluşan BEM’lere (Tremblay vd. 2006 ve Young vd. 2009) sahip olmasıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda araştırmacılar BEÇÇ elemanlarının bazılarında lokal burkulmalar tespit etmişlerdir. Bu nedenle lokal burkulmaların önüne geçildiği, daha stabil davranış gösteren BEÇÇ tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca literatürde çelik yapıların güçlendirilmesi hususunda yeterli kaynak bulunmasına rağmen mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilecek, yapı içerisinde kolaylıkla montajının yapılabileceği BEÇÇ’ler konusunda literatür kaynakları yok denecek kadar azdır.

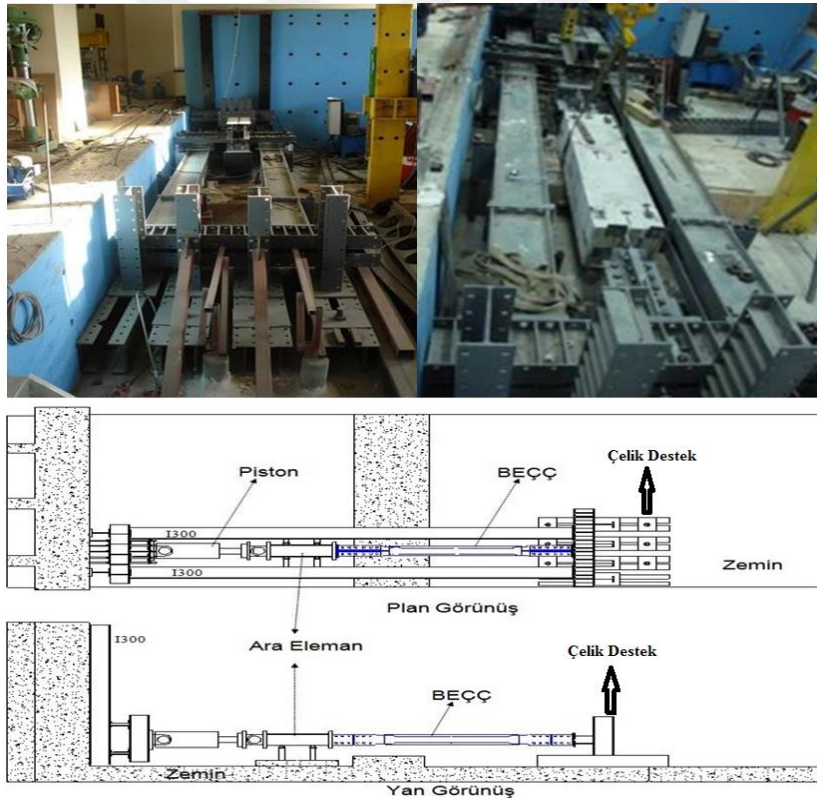
Tez çalışması kapsamında yapılan tam boyutlu, yeni nesil BEM tasarımına, detaylarına ve bağımsız ara yüzeyde kullanılan boşluk hacmine veya izolasyon malzemesi kalınlığına sahip toplam 7 adet BEÇÇ’nin eleman bazındaki testleri incelenmiştir. Bu amaçla literatürde sıklıkla karşılaşılan BEÇÇ kusurları iyileştirilmiş, ekonomik, kolay imal edilebilir, yeterli histerik davranışa sahip BEÇÇ’lerin üretilmesi ve bu BEÇÇ’lerin mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılabılır olması hedeflenmiştir. Tez çalışmasını deneysel çalışmaları Akdeniz Üniversitesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. BEÇÇ elemanlarının her birisinin histerik davranışlarının tespiti için çevrimli yüklemelere maruz bırakılmış ve deneysel çalışma sonucunda çıkan veriler bulgular bölümünde irdelenmiştir.

3.2. Test Düzeneği ve Yükleme Protokolü

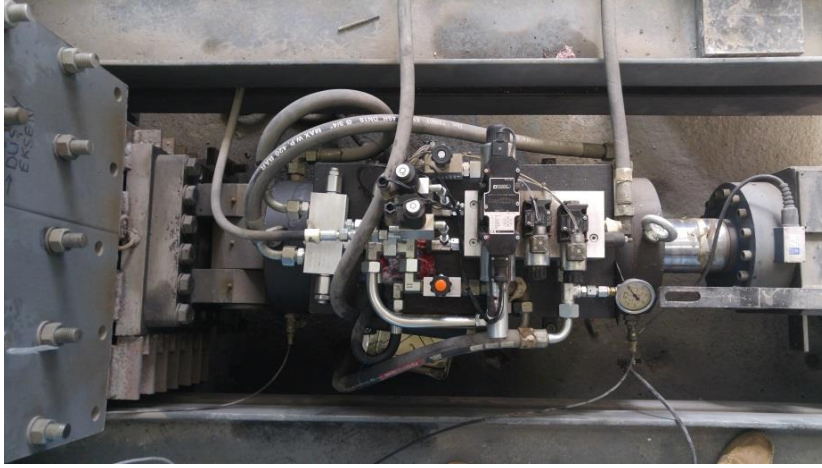
Akdeniz Üniversitesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda yer alan eleman bazında test düzeneği şekil 3.1’de görülmektedir. Görüldüğü üzere sistem, bir ucu yükleme duvarına diğer ucu ara elemana bağlı piston, pistondan aldığı yükleri BEÇÇ elemanına ileten ve deney esnasında pistonun düzlem dışı hareketinden kaynaklanabilecek hasarların oluşmasını önleyen ara elemandan ve BEÇÇ elemanının bir ucunun bağlı olduğu çelik destekten oluşmaktadır. Çelik destek farklı I profillerin kaynak ve bulonlar vasıtasıyla birleştirilmesiyle oluşmuş ve saplamalarla laboratuvar sert zeminine sabitlenmiştir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere BEÇÇ elemanlarına çekme ve basınç yükleri 1000 kN kapasiteli piston vasıtası ile uygulanmıştır. Piston ile ara eleman

arasında 100 ton kapasiteli yük hücresi bulunmaktadır. BEÇÇ elemanları zemine paralel olacak şekilde test düzeneğine bağlanmıştır. BEÇÇ elemanlarının toplam boyu 3 m'dir. BEÇÇ elemanları deney düzeneğine yerleştirilmeden önce, BEÇÇ uçlarına bulon ve bağlantı levhaları vasıtası ile başlıklar takılmıştır (Şekil 3.3.a). Daha sonra vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilmiş ve M 24 10,9 bulonlar ile deney düzeneğine havalı bulon sıkma, sökme makinası ile bağlanmıştır (Şekil 3.3.b).

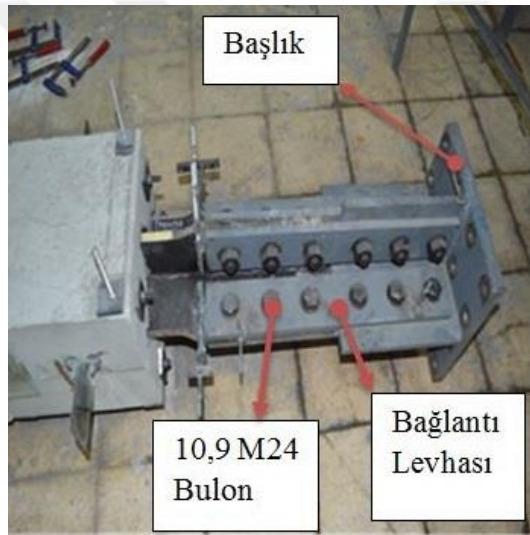
Deney düzeneğinin zemine paralel yerleştirilmesinin nedeni, deney düzeneğinin dik yerleştirilmesi durumunda (eleman boyu, piston boyu ve elemanın bağlanacağı çelik destek veya yükleme duvarı nedenleri ile) deney düzeneğinin yüksek olmasıdır. Bu durumda, Deney düzeneği Akdeniz Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nın fiziki şartlarına uygun olmayacaktır. Dikey yerleştirilmiş deney düzeneğinin örneği 2004 senesinde Lai ve Tsai'ni yapmış olduğu çalışmada net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca yaklaşık 500 kg ağırlığa sahip elemanların yatay deney düzeneğine yerleştirilmesi ve montajı dikey düzeneğine göre çok daha kolay olacaktır. Black ve dig. (2004) yapmış olduğu çalışmada görüldüğü gibi deney düzeneğinin yatay olmasının sağladığı bir diğer fayda ise sistem kendi içerisinde yük aktarımı yapabileceği için ek bir yükleme duvarına ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu tasarım ile deney sırasında eleman basınca çalışırken sistemin hareketi kolaylıkla engellenmiş olacaktır.



Şekil 3.1. Eleman bazında test düzeneği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)



Şekil 3.2. Piston ve yük hücresi (112M820 numaralı projeden alınmıştır)



(a)



(b)

Şekil 3.3. a) Bulon ve bağlantı levhaları ile başlık montajı; **b)** BEÇÇ'nin deney düzeneğine montajı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Bütün BEÇÇ elemanları kademeli olarak artış gösteren statik benzeri yükleme protokolüne maruz bırakılmıştır. AISC Seismic Provisions (2005) şartnamesi çevrimli BEÇÇ testlerinde kullanılabilir yükleme protokolü sunmaktadır. AISC şartnamesi ilk önemli akmadaki deformasyon miktarını (Δ_{by}) ve tasarım kat ötelemesine denk gelen deformasyon miktarını (Δ_{bm}) baz alır. AISC şartnamesine göre BEÇÇ elemanlarına tasarım kat ötelemesine denk iki katı deformasyona kadar artan eksenel deplasmanlarda çevrimler uygulanmıştır. Yükleme protokolü düzenlemek için tasarım seviyesindeki deplasman değerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Tremblay vd. tarafından hazırlanan makalede araştırmacılar ÇE üzerinde beklenen gerinim taleplerine çalışmışlardır. Bu araştırmacılar gerinim taleplerinin yapının bazı geometrik, materyal ve sismik tasarım karakteristiklerinden etkilendiğini kanıtlamışlardır. Tremblay vd. yaptıkları çalışmada ÇE gerinim taleplerinin, ÇE önemli ölçüde kısa yapılmadığı sürece genel olarak %1-2 değişim sınırları içerisinde kaldığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan test protokolü Eryaşar vd. (2009) ve Tremblay vd. (2006)'nin yapmış oldukları çalışmalar baz alınarak oluşturulmuştur. Dolayısıyla bu çalışmada da tasarım seviyesindeki gerinim talebi %1 olarak belirlenmiştir. AISC yükleme protokolüne benzer fakat biraz farklı bir yükleme protokolü uygulanmıştır. Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere yükleme protokolü listesi, plastik, elastik ve stroke deplasmanı olmak üzere üç farklı deplasman değeri içermektedir. Plastik deplasman, 1702,5 mm uzunluğunda, en kesit alanı 2250 (15×150) mm² olan ÇE'nin burkulması engellemiş bölgesinin yaptığı deplasman, elastik deplasman ise 660 (330×2) mm uzunluğunda, en kesit alanı 6855 ((110,5×15×4)+(15×15)) mm² olan burkulması engellenmiş elastik bölgenin yaptığı deplasmandır. Stroke deplasmanı bu iki bölgenin yaptığı toplam deplasman olarak hesaplanır. Şekil 3.4'de görüldüğü üzere bu yükleme protokolünde BEÇÇ elemanları 10 farklı eksenel deplasman seviyesine kadar deplasman kontrollü piston ile yüklenmiştir. Bu eksenel deplasman seviyeleri; 1/3 δ_y , 2/3 δ_y , δ_y ve 0,33 $\delta_{str\ 0,01}$ (%0,33), 0,5 $\delta_{str\ 0,01}$ (%0,5), 1,0 $\delta_{str\ 0,01}$ (%1), 1,5 $\delta_{str\ 0,01}$ (%1,5), 2 $\delta_{str\ 0,01}$ (%2), 2,5 $\delta_{str\ 0,01}$ (%2,5) ve 3 $\delta_{str\ 0,01}$ (%3)'dir. Her bir deplasman seviyesinde iki çevrimli yükleme uygulanmıştır. Burada δ_y ÇE'nin akma eksenel deplasmanını ($\delta_y=1702,5 \times F_{ysc}/E$), $\delta_{str\ 0,01}$ ise ÇE'nin %1 gerinim değerindeki deplasmanını göstermektedir ($\delta_{str\ 0,01}=1702,5 \times 0,01 \approx 17,03$ mm). F_{ysc} ÇE'de kullanılan çeliğin akma dayanımını, E ise çeliğin elastisite modülünü (200,000 MPa) temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan akma dayanımı değerleri için bu protokol AISC Seismic Provisions (2005) şartnamesi tarafından şart koşulan akma deplasmanın 200 katını geçen kümülatif eksenel deformasyon seviyelerini üretmektedir. AISC protokolünde BEÇÇ elemanları birinci ve ikinci deplasman seviyelerinde sırasıyla akma deplasmanına ve tasarım kat ötelemesine denk deplasmanın %50'sine yüklenmektedir. Bu çalışmada ise düşük gerinim değerinde elemanların davranışı belirlenebilmesi için ek üç çevrim yükleme protokolüne eklenmiştir. Bu ek çevrimler akma deplasmanının 1/3, 2/3'ü ve 0,33 Δ_{bm} (0,33) deformasyonuna denk deplasman değeridir. Düşük gerinim seviyelerindeki çevrimler elemanlar üzerindeki eksenel gerinimin miktarını adım adım artırmak için gereklidir. Ayrıca AISC Seismic Provisions (2005)'den farklı olarak protokole 2,5 Δ_{bm} ve 3 Δ_{bm} deformasyonlarına denk deplasman seviyeleri de eklenmiştir. 3 Δ_{bm} deformasyonuna denk deplasman seviyesi piston kapasitesinin yeterli olmaması nedeni ile elemanlara uygulanamamıştır. 2,5 Δ_{bm} deformasyonuna denk ek çevriminin amacı ise Black vd. (2002) tarafından da çalışıldığı gibi maksimum inelastik deformasyonların belirlenmesidir. Ayrıca faya yakın bölgelerde güçlü yer hareketlerinin meydana gelmesi durumunda, BEÇÇ'ler şartnamelerde şart koşulandan daha geniş deformasyon taleplerine maruz kalabilir. Bu durumda BEÇÇ tasarım deformasyonunun geçilmesi burkulma gibi zayıf BEÇÇ davranışlarına neden olabilir. Geniş deformasyonlar için BEÇÇ'leri detaylandırmak ve test etmek daha yüksek bir güvenilirlik ve daha iyi performans sağlamaktadır.

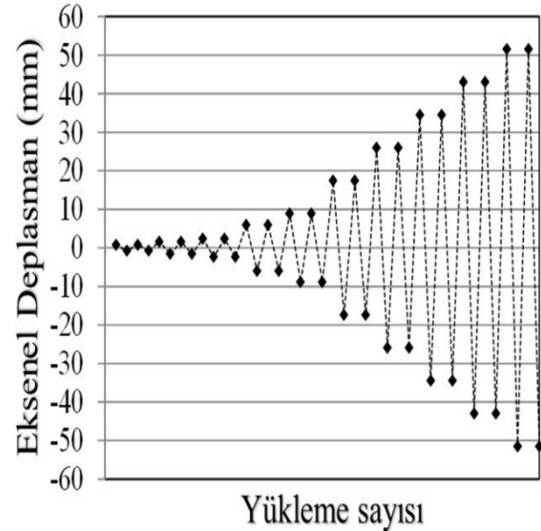
Deney sırasında yüklemelerin ilk 8 çevrimde hız %30 tutulmuş iken geri kalan çevrimlerde hız %50'de tutulmuştur. Bir testin tamamlanma süresi yaklaşık 10 ile 15 dakika arasında değişmektedir.

Çizelge 3.1. Yükleme protokol listesi örneği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Protokol Parametresi	Yükleme Sayısı	Plastik Deplasman (mm)	Elastik Deplasman (mm)	Storke Deplasman (mm)
$1/3 \delta_y$	1	0,695	0,088	0,783
	2	-0,695	-0,088	-0,783
	3	0,695	0,088	0,783
	4	-0,695	-0,088	-0,783
$2/3 \delta_y$	5	1,389	0,177	1,566
	6	-1,389	-0,177	-1,566
	7	1,389	0,177	1,566
	8	-1,389	-0,177	-1,566
δ_y	9	2,084	0,265	2,349
	10	-2,084	-0,265	-2,349
	11	2,084	0,265	2,349
	12	-2,084	-0,265	-2,349
$0,33 \delta_{str 0,01}$	13	5,620	0,356	5,976
	14	-5,620	-0,356	-5,976
	15	5,620	0,356	5,976
	16	-5,620	-0,356	-5,976
$0,5 \delta_{str 0,01}$	17	8,515	0,359	8,874
	18	-8,515	-0,359	-8,874
	19	8,515	0,359	8,874
	20	-8,515	-0,359	-8,874
$1,0 \delta_{str 0,01}$	21	17,030	0,370	17,400
	22	-17,030	-0,370	-17,400
	23	17,030	0,370	17,400
	24	-17,030	-0,370	-17,400
$1,5 \delta_{str 0,01}$	25	25,545	0,381	25,926
	26	-25,545	-0,381	-25,926
	27	25,545	0,381	25,926
	28	-25,545	-0,381	-25,926
$2,0 \delta_{str 0,01}$	29	34,060	0,392	34,452
	30	-34,060	-0,392	-34,452
	31	34,060	0,392	34,452
	32	-34,060	-0,392	-34,452
$2,5 \delta_{str 0,01}$	33	42,575	0,403	42,978
	34	-42,575	-0,403	-42,978
	35	42,575	0,403	42,978
	36	-42,575	-0,403	-42,978
$3,0 \delta_{str 0,01}$	37	51,090	0,413	51,503
	38	-51,090	-0,413	-51,503
	39	51,090	0,413	51,503
	40	-51,090	-0,413	-51,503

Çevrim Sayısı	Deplasman
1. Çevrim	$1/3 \delta_v$
2. Çevrim	$2/3 \delta_v$
3. Çevrim	$1,0 \delta_v$
4. Çevrim	$0,33 \delta_{str 0,01}$
5. Çevrim	$0,5 \delta_{str 0,01}$
6. Çevrim	$1,0 \delta_{str 0,01}$
7. Çevrim	$1,5 \delta_{str 0,01}$
8. Çevrim	$2,0 \delta_{str 0,01}$
9. Çevrim	$2,5 \delta_{str 0,01}$
10. Çevrim	$3,0 \delta_{str 0,01}$

(a)



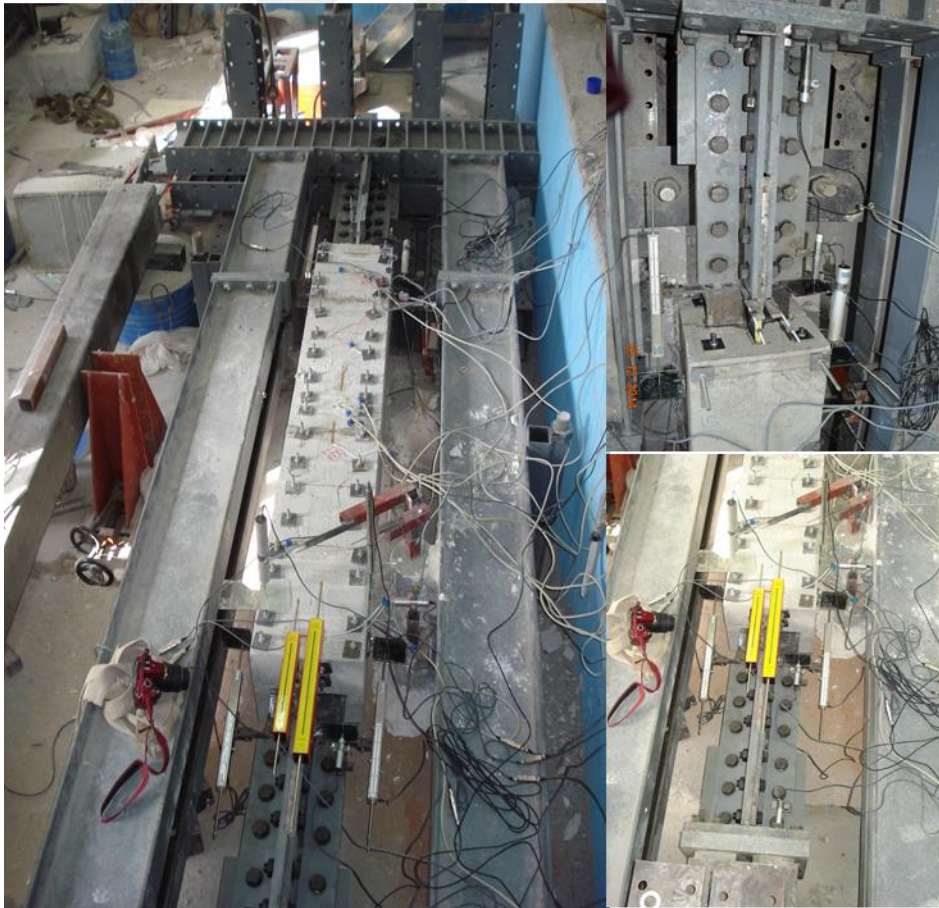


(a)

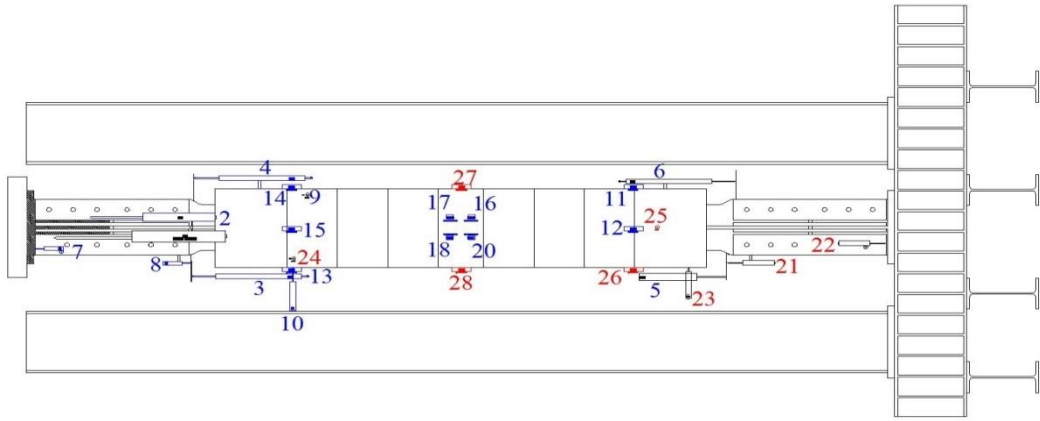


(b)

Şekil 3.5. a) Model 5100B data logger (BAP FDK-2015-1108 nolu projeden temin edilmiştir.); **b)** Testbox 1001 data logger (112M820 numaralı projeden alınmıştır)



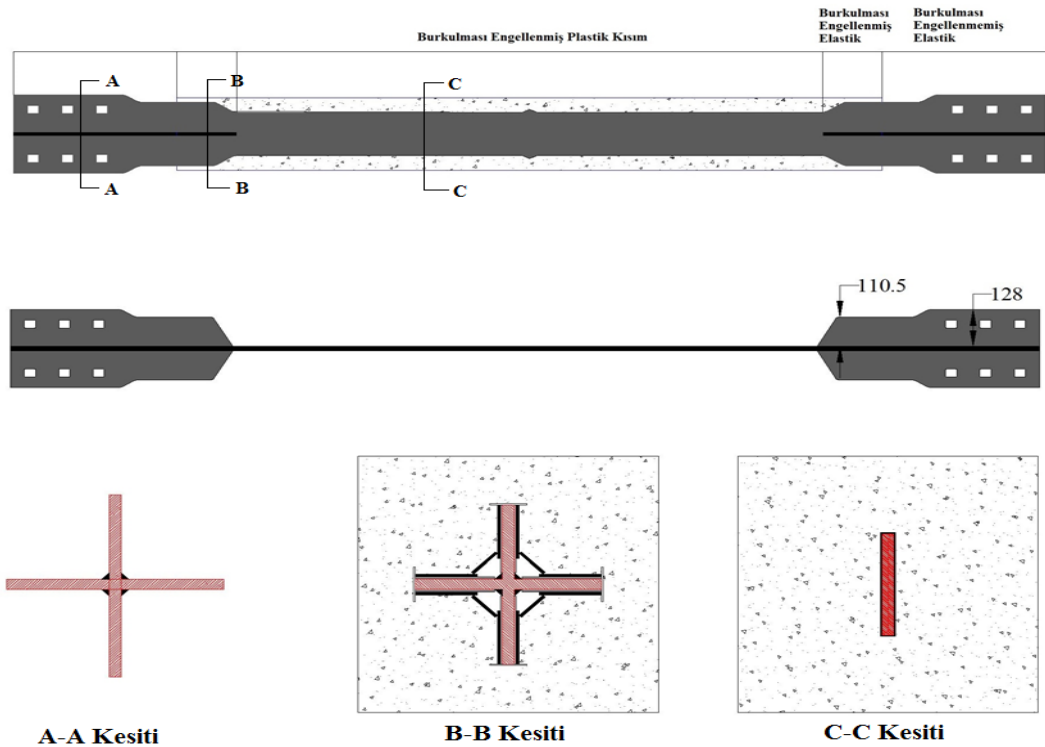
Şekil 3.6. Ölçüm cihazlarının yerleştirilmesi (112M820 numaralı projeden alınmıştır)



Şekil 3.7. LVDT ve gerinim pulu yerleşim planı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

3.3. Deney Elemanları

Bu bölümde Akdeniz Üniversitesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen yeni nesil BEÇÇ elemanlarının özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın kolay anlaşılır olması için ilk olarak tez çalışması kapsamında üretilen BEÇÇ'lerin genel özellikleri sunulmuş, daha sonra her bir BEÇÇ elemanına ait detaylar alt başlıklar halinde detaylı bir şekilde belirtilmiştir.



Şekil 3.8. BEÇÇ kısımları ve en kesitleri

Çalışma kapsamında BEÇÇ'ler Şekil 3.8'de görüldüğü üzere 5 kısma ayrılmıştır. Bu kısımları kısaca inceleyecek olursak;

Burkulması engellenmiş plastik kısım, BEÇÇ'de eksenel yükün taşındığı kısımdır. Eksenel basınç ve çekme deformasyonları esnasında plastikleşmesi beklenmektedir. Basınç durumunda yüksek burkulma modunda burkularak da eksenel yük taşıyabilmektedir. Bu kısım malzeme olarak sünek ve akma gerilmesi değeri fazla değişim göstermeyen çelikten olmalıdır Özçelik (2015). Deneysel çalışmadan kullanılan BEÇÇ elemanlarının tamamında bu kısım 1702,5 mm uzunluğunda ve 2250 (15×150) mm² en kesit alanına sahiptir. ÇE'nin orta kısmında en kesit arttırılmış olup amacı ÇE ile BEM arasındaki göreceli hareketin engellenmesidir (Şekil 3.9.a). Ayrıca Bölüm 3.2'de bahsedilen 16, 17, 18 ve 20 numaralı gerinim pulları bu kısımda yer almaktadır (Şekil 3.9.b).

BEÇÇ boyutlarının belirlenmesinde dört farklı kriter göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar daha önce yapılmış çalışmalarda kullanılan BEÇÇ tasarımları, piston kapasitesi (1000 kN), yükleme sistemi kapasitesi ve ÇE için kullanılacak malzemenin teminidir.

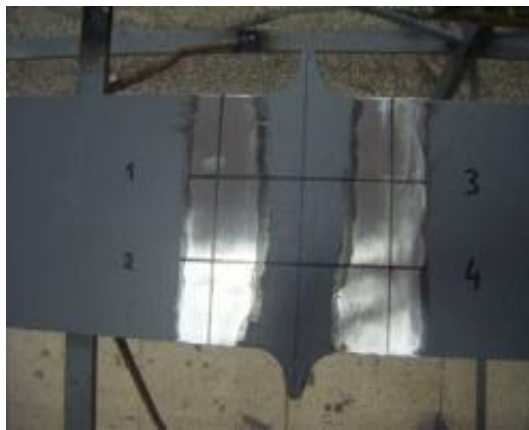
F_y : 235 MPa (St 37 çeliği akma dayanımı)

D_a : 1,2 (arttırma katsayısı, DBYBHY 2007 Tablo 4.1)

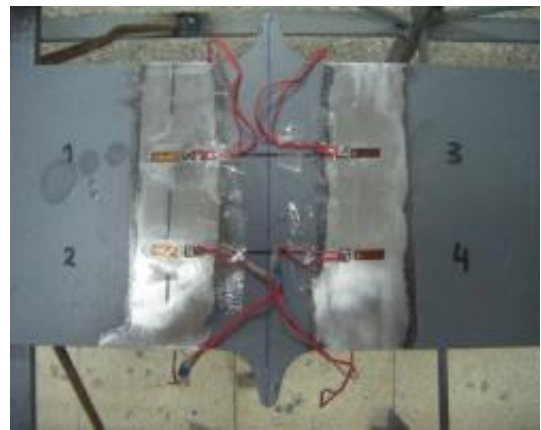
$A_{çe}$: Maksimum eksenel yük/($F_y \times D_a$) (Maksimum ÇE plastik kısım net alanı)

$A_{çe}$: $1000000/(1,2 \times 235) = 3546 \text{ mm}^2$

Maksimum ÇE alanı yukarıda görüldüğü gibi 3546 mm² olarak belirlenmiştir. Piyasada mevcut çelik saclar incelendiğinde 15 mm'lik sacın kolay şekilde temin edilebildiği görülmüştür. Bu durumda 15×150 mm'lik (2250 mm²) ÇE plastik bölge en kesit alanına sahip BEÇÇ'lerin bu çalışma kapsamında kullanılması uygun görülmüştür. Ayrıca belirlenen ÇE en kesit alanının literatür ile uyumlu olduğu da belirlenmiştir. ÇE enkesit alanının YDKT'ye göre detaylı hesabı bölüm 8.2'de yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.9. a) ÇE plastik bölge en kesit arttırımı; **b)** ÇE orta açıklığında yer alan 4 adet gerinim pulu (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Burkulması engellenmiş elastik kısım, ÇE’de geçiş kısmı olup BEM ile çevrelenmiştir. Tez çalışması kapsamında ÇE genişliği bu kısımda arttırılmıştır (Şekil 3.10.a). ÇE uç bölgelerine kaynaklanan ek plakalar bu bölgeden itibaren başlamaktadır ve bu kısımdaki ek plaka kalınlığı 15 mm, boyu ise 110,5 mm’dir (Şekil 3.8). Bu tasarım, literatürde yapılmış önceki çalışmalar ile uyumludur. Bu kısım hem ek plakanın hem de BEM’in etkisi ile oldukça rijit bir yapıya sahip olmuştur. Deneyisel çalışmalar sonucunda bu kısımda herhangi bir burkulma gözlemlenmemiştir.

Burkulması engellenmemiş elastik kısım, BEÇÇ’nin bayrak levhasına bağlantısının sağlandığı kısımdır. Bu kısım bağlantı detaylarına göre boyutlandırılmıştır. Kaynaklanan ek plakalar bu kısımda da yer almaktadır. Artı şekilli en kesite sahip bu kısımda ÇE genişliği burkulması engellenmiş plastik kısma göre arttırılmıştır (Şekil 3.10.b). Bu kısım BEM ile kaplanmamış olup burkulmaya karşı önlem ek plakalar ve montaj sırasında kullanılan bağlantı levhaları ile sağlanmaktadır. Ayrıca bu kısımda AISC LRFD Tablo J3.3M’de belirtildiği gibi 27×32 mm boyutlarında kısa-slot delikleri kullanılmıştır. Bulon delikleri yerine kısa-slot deliklerinin kullanılmasındaki amaç montaj kolaylığının sağlanmasıdır.



(a)



(b)

Şekil 3.10. a) Burkulması engellenmiş elastik kısım; b) Burkulması engellenmemiş elastik kısım (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

ÇE’nin burkulması engellenmiş ve engellenmemiş elastik bölgelerinde ÇE’ye dik iki adet 649 mm uzunluğunda, burkulması engellenmiş bölgede 110,5 mm, burkulması engellenmemiş bölgede ise 128 mm boyuna sahip ek plakalar kaynaklanmıştır (Şekil 3.8). Böylece BEÇÇ’nin her iki ucu artı (+) şekilli akmayan bölgeler haline gelmiştir. Ek plakalar ile ÇE arasındaki kaynakta elektrik arkı kaynağı ve sıvalı elektrod kullanılmıştır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde Watanabe vd. (1988) 1096 kN, Black vd. (2004) 3100 kN, Mahin vd. (2004) 6700 kN, Young vd. (2009) 3000 kN, Eryaşar vd. (2009) 250 kN ve Wu vd. (2012) 4900 kN’luk pistonlar kullanmışlardır. Görüldüğü üzere literatür çalışmalarında kullanılan piston kapasitesi BEÇÇ elemanlarının

boyutlarına, materyallerine ve test düzeneğine göre oldukça geniş bir dağılım göstermektedir. Bu çalışma kapsamında üretilen BEÇÇ elemanları ve test düzeneği göz önünde tutulduğunda Akdeniz Üniversitesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarı içerisinde bulunan 1000 kN kapasiteli piston yeterli görülmüştür.

BEÇÇ’lerde kullanılan çelik plakaların düzgün ve hassas kesilmesi elemanın davranışında önemli rol oynamaktadır. ÇE’nin düzgün kesilmemesi durumunda, ÇE yüzeyi pürüzlü olacak ve tekrarlı yükler altında BEÇÇ performansı olumsuz etkilenecektir. Dolayısı ile ÇE’yi oluşturan plakaların kesiminde lazer kesim yapılması daha uygun görülmüştür. Lazer kesim tezgahları genel olarak 3 m ve 5 m olarak piyasada mevcut olmasına rağmen en çok kullanılan 3 m’lik tezgahlardır. Özellikle bu çalışmanın yürütüldüğü şehirde (Antalya) sadece 3m’lik kesim yapan tezgahların bulunmasından ötürü ÇE’nin toplam boyu 3 m seçilmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında test edilecek BEÇÇ’lerin çerçeve içerisine chevron tipi yerleştirilmesi durumunda yaklaşık çerçeve yüksekliği 3,5 m ve genişliği ise 6 m olacaktır. Bu çerçeve boyutları hem literatür hem de Türkiye’deki mevcut yapı stoğu ile uyumludur.

ÇE, TS EN 10025 standardında tanımlı St 37 çeliğinden imal edilmiş olup akma dayanımı (F_{ysc}) ve kopma dayanımı değerleri (F_{usc}) Çizelge 3.2’de belirtilmiştir. Akma ve kopma dayanımlarının belirlenmesinde ÇE’yi temsil edecek kupon örnekleri alınmış ve bu örnekler ODTÜ, Yapı Malzemeleri Laboratuvarı’nda çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında çok sayıda BEÇÇ üretimi planlandığı için ÇE’ler parça parça tedarik edilmiştir. Bu nedenle ÇE’lere ait akma dayanımı ve kopma dayanımı değerleri farklılık göstermektedir.

Çizelge 3.2. ÇE’lere ait kupon testi sonucunda elde edilen akma ve kopma dayanımları (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

	D. E. 1	D. E. 2	D. E. 3	D. E. 4	D. E. 5	D. E. 6	D. E. 7
F_{ysc} (MPa)	332	362	340	337	332	332	332
F_{usc} (MPa)	403	389	397	414	397	392	392

Bağımsız ara yüzey, ÇE ile BEM arasında ince bir tabaka halinde bulunan materyal veya hava boşluğudur. Bu ara yüzey ÇE’nin uzaması ve kısılması sırasında kesme kuvveti transferini engellemektedir. Ayrıca ÇE basınca çalışırken Poisson etkisi ile enine genişleyecektir. Bağımsız ara yüzey bu genişlemeye izin vererek ÇE ile BEM arasında oluşabilecek sürtünme kuvvetini engellemektedir. Tez çalışması kapsamında üretilen BEÇÇ elemanların da 2 mm kalınlığında polietilen lastik şerit veya farklı hacimlerde boşluk kullanılmıştır. BEÇÇ üretiminin ilk aşamasında, ÇE’nin burkulması engellenmiş elastik ve plastik bölgesini kaplayacak şekilde 4,5 mm kalınlığında hava boşluğu kullanılmıştır. Bağımsız arayüzey kalınlığı, sağ ve sol prekast betonarme bloklarda kullanılan plaka kalınlıklarının toplamından ÇE kalınlığının çıkartılarak ikiye bölünmesi ile elde edilmiştir ($((2 \times 12) - 15) / 2$). Deneyisel çalışma sonuçları incelendiğinde hava boşluk oranı düşürülmüş ve 2,5 mm ($((2 \times 10) - 15) / 2$) kalınlığa indirilmiştir. Ayrıca ÇE stabilitesinin sağlanamaması üzerine ÇE’nin burkulması engellenmiş elastik kısmı 2

mm (Şekil 3.11.a), burkulması engellenmiş plastik bölgesi ise 2 tabaka halinde 2 mm kalınlığında (toplam 4 mm) poliethilen şerit ile kaplanmıştır (Şekil 3.11.b). Bu kaplama ÇE yüzeyi boyunca (ÇE üzerindeki gerinim pulları için gerekli boşluklar bırakılmıştır.) olup ÇE kenarları ise çift taraflı bant ile kaplanmıştır (Şekil 3.11.c). Poliethilen şeridin ÇE'ye yapıştırılmasında Mitre Apel marka hızlı yapıştırıcı kullanılmıştır. Son olarak ÇE yüzeyine yapıştırılan poliethilen şerit ile kenarlara yapıştırılan çift taraflı bandın birlikte hareket etmesi amacı ile izolasyon malzemeleri koli bandı ile sarılmıştır (Şekil 3.11.d).

AISC 341-05 ve FEMA 450 şartnameleri bağımsız ara yüzeyde kullanılacak izolasyon malzemesi ve kalınlığı konusunda herhangi bir bilgi vermemektedir. Literatür kaynakları incelendiğinde ise farklı kalınlıkta hava boşluklarının veya izolasyon malzemelerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu konuda en kapsamlı araştırma Lai ve Tsai'nin 2004 senesinde yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmanın sonucunda 2 mm kalınlığındaki silikon lastik bant kullanımının en az aksenal yük farkına sahip olduğunu bildirmişlerdir. Diğer çalışmalar baktığımızda ise Watanabe vd. (1988) 3 mm kalınlığında polyester, Iwata ve Murai (2004) 1 mm kalınlığında izolasyon malzemesi, Eryaşar ve Topkaya (2009) çalışmasında ise 1 mm kalınlığında hava boşluğunu kullandıklarını görmekteyiz. Dolayısıyla izolasyon malzemesini ve kalınlığını belirlemek için kalifikasyon testlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasının da dahil olduğu Tübitak Projesi kapsamında yapılan BEM'i kutu profil içerisine beton harcı dökülerek oluşturulan ilk deneyde ÇE'nin zayıf ekseni boyunca uygulanan 2 mm kalınlığındaki lastik şeritlerin üzerine gres yağı uygulanmıştır. Ancak deney sonuçları incelendiğinde ÇE ile BEM arasında yeterli izolasyonun sağlanamadığı belirlenmiştir. Ayrıca deney elemanın BEM'i açıldığında gres malzemesinin olmadığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile gres malzemesinin uygulanmasından vazgeçilmiştir. Yukarıda belirtilen çalışmalarda kullanılan BEÇÇ'lerin BEM'leri ya kutu profil içerisine beton harcı dökülmesi ile yada çelik kutu profillerden veya levhalardan oluşmaktadır. Bu durumda izolasyon malzemesi ile BEM'in teması yüzeyi düzgün olmaktadır. Ancak bu çalışmada kullanılan prekast betonarme blokların iç yüzeyleri ne kadar mastarlanmış olsa da diğer deney elemanları gibi düzgün bir yüzey elde edilememektedir. Temas etmesi durumunda ise pürüzlü BEM yüzeyi izolasyon malzemesine zarar vermekte ve BEÇÇ elemanından beklenen sismik performans sağlanamamaktadır. Ayrıca prekast betonarme blokların iç yüzeyleri her noktada aynı yükseklikte değildir. Düşük bağımsız ara yüzey kalınlığı kullanılması durumunda prekast betonarme blokların montajında sorunlarla karşılaşmakta ve prekast betonarme bloklar tam olarak kapanmamaktadır. Bu durumda BEM, ÇE'ye yeterli stabiliteyi sağlayamamaktadır.



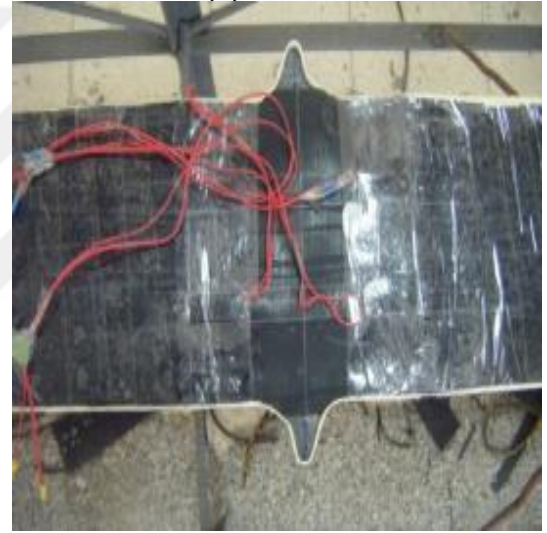
(a)



(b)



(c)

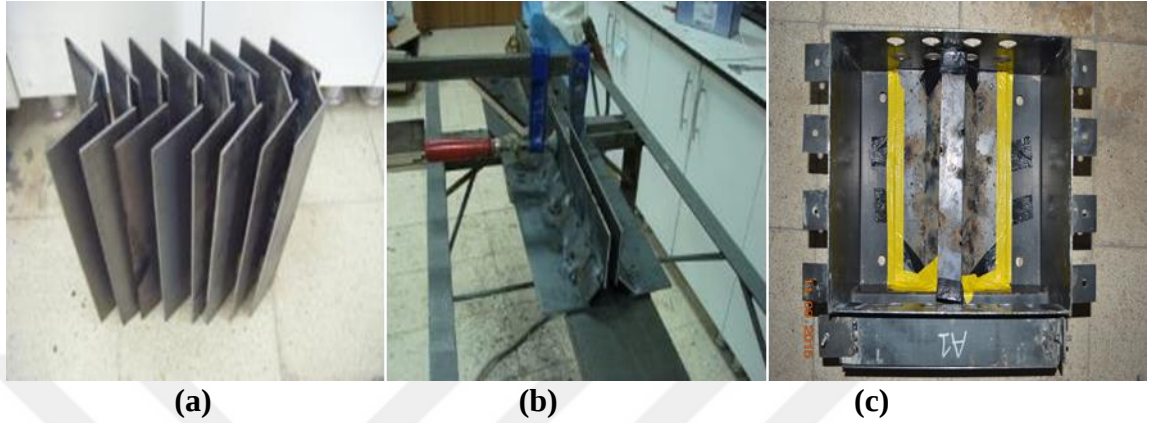


(d)

Şekil 3.11. a) Burkulması engellenmiş plastik kısmın izolasyon malzemesi ile kaplanması; b) Burkulması engellenmiş elastik kısmın izolasyon malzemesi ile kaplanması; c) ÇE kenarlarının çift taraflı bant ile kaplanması; d) İzolasyon malzemelerinin koli bandı ile sarılması (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

ÇE ile BEM arasındaki sürtünmeyi engellemek, ÇE'nin aksel basınç yükü altında enine genişlemesini sağlamak, BEM'in ÇE üzerinde kaymasını sağlamak ve lokal burkulmaları sınırlandırmak amaçları ile ÇE'nin burkulması engellenmiş elastik bölgesini ve plastik bölgenin uçlarını kapsayacak şekilde kızak imalatı gerçekleştirilmiştir. Kızak imalatında artı (+) şekilli en kesitin kaplanması için $400 \times 79 \times 4$ mm ve $400 \times 43 \times 4$ mm levhalar kullanılmıştır (Şekil 3.12.a). Şekil 3.12'de görüldüğü üzere levhalar birbirlerine kaynaklanmıştır. BEÇÇ üretiminde kızak imalatı ilk olarak ÇE üzerinde iki parça halinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12.b). Daha sonra kızak parçaları, prekast beton blok kalıplarının içerisine yerleştirildikten sonra beton dökümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12.c). Böylece kızak sağ ve sol prekast beton blokların içerisinde yer almaktadır. Kızak imalatında dikkat edilmesi gereken yer ÇE ile

kızak arasına beton harcı veya agreganın girişinin önlenmesidir. Bunun nedeni girecek beton harcının kızak ile ÇE arasında sürtünme kuvvetleri oluşturacak olması ve kızığın altındaki poliethilen şeride zarar verecek olmasıdır. Bu durumda maksimum basınç kapasitesi, maksimum çekme kapasitesinden çok daha yüksek çıkacak ve BEÇÇ'nin histerik davranışına olumsuz etkisi olacaktır.



Şekil 3.12. a) Kızak imalatında kullanılan levhalar; **b)** Kızığın ÇE üzerinde kaynaklanması; **c)** Kızığın kalıp içerisine yerleştirilmesi (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

BEM, aksenal yükü taşıyan ÇE'ye yanal destek sağlayarak ÇE'nin burkulmasını önlemektedir. Bu çalışma kapsamında yeni nesil BEÇÇ'lerin davranışı incelenmiştir. Yeni nesil BEÇÇ'lerin tasarım amaçları, literatürde yok denecek kadar az olan mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde BEÇÇ'li çerçeve sistemlerinin kullanımınıdır. Literatürde mevcut BEÇÇ tasarımları incelendiğinde mevcut yapı içerisine yerleştirilemeyecek kadar büyük boyutlarda olması ve ancak vinç yardımı ile taşınabileceğinden (her biri yaklaşık 250-500 kg) ötürü bu çalışma kapsamında BEM tasarımında radikal değişimlere gidilmiştir. Bu amaçla, BEÇÇ'nin diğer bileşenlerinden daha büyük ve ağır olan BEM'in parçalara (prekast beton blok) ayrılarak yapı içerisinde saplama, gijon veya CFRP (karbon fiber destekli polimer) yardımı ile birleştirilmesi ön görülmüştür. Bu tasarımda önemli olan prekast beton blokların bir kişi tarafından taşınabilecek ağırlıkta olması ve yapı içerisinde montajının kolay olmasıdır. Bu durumun test edilebilmesi için laboratuvar içerisine tek katlı tek açıklı çelik çerçeve inşa edilmiş, BEÇÇ'nin ÇE'si bu çerçeve içerisine diyagonal olarak yerleştirilmiş ve prekast beton bloklar ÇE üzerine monte edilmiştir. BEÇÇ'lere ait detaylı incelemeler ilerideki bölümlerde sunulmuştur.

AISC 341-05 ve FEMA 450 şartnameleri incelendiğinde BEM'de kullanılacak beton sınıfı hakkında herhangi bir bilgi yer almamaktadır. AISC 341-05 şartnamesi BEM'in tasarım kat ötelemesinin 2 katına denk gelen birim deformasyonlarda ÇE'nin lokal ve global burkulmasının önlenmesi gerektiğini ve BEM'in yeterliliğinin testler ile gösterilmesi gerektiğini belirtmektedir. Türk deprem yönetmeliği DBYBHY 2007'de ise deprem bölgelerinde yapılacak tüm binalarda C20'den daha düşük dayanımlı beton kullanılmayacağını belirtmektedir. Ayrıca literatür kaynakları incelendiğinde, Tremblay vd. (2006)'da olduğu gibi genelde BEM'de kullanılan beton sınıfının C20

olduğu görülmüştür. Dolayısıyla çalışma kapsamında C20 beton sınıfının kullanılması uygun görülmüştür.

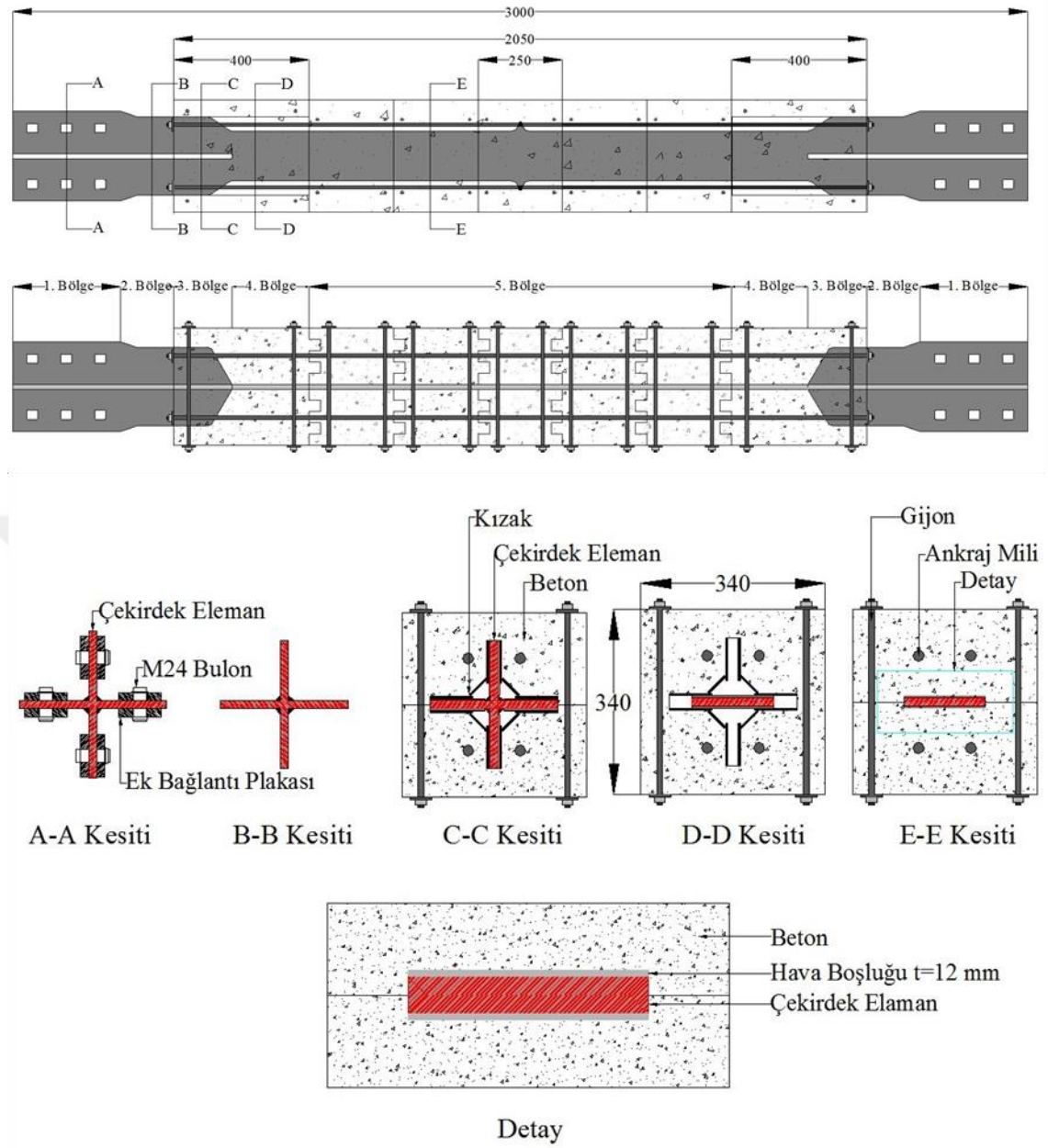
Deneyisel çalışma kapsamında, BEÇÇ'lerin tasarımında AISC 341, FEMA 450 yönetmelikleri ve bu konuda yapılmış literatür çalışmaları göz önünde bulundurulmuştur. Literatürde bulunan BEÇÇ'lerde meydana gelen hasarlar incelenmiş ve BEÇÇ elemanlarında lokal veya global burkulmaya karşı önlem alınmıştır. Ancak çalışmada tasarlanan yeni nesil BEÇÇ'nin BEM'ine ait daha önce yapılmış benzer bir çalışma olmaması ayrıca BEM'in çok parçalı ve farklı bileşenlere sahip olması BEÇÇ davranışının önceden tahminini neredeyse olanaksız kılmaktadır. Bu nedenle deney sırasında BEÇÇ elemanında meydana gelen hasar bölgeleri tespit edilmiş ve bu bölgelerin güçlendirilmesi için BEÇÇ yeniden tasarlanmış ve üretilip tekrar teste tabi tutulmuştur.

BEÇÇ elemanlarının test düzeneğine ve tek katlı tek açıklıklı çelik çerçeveye montajında her bir sırada 6 adet, her bir BEÇÇ ucunda 24 adet toplamda ise 48 adet yüksek dayanımlı M24 10,9 bulonlar (BS 3692, 2001) ve her bir BEÇÇ ucunda 8 toplamda 16 adet 62,5×10×1,5 cm boyutlarında bağlantı levhaları kullanılmıştır. Bulonların sökölüp takılmasında Özen marka 100 lt'lik hava kompresörü ve Osaka marka havalı somun sıkma tabancası kullanılmıştır. Böylece BEÇÇ elemanın her iki ucunda meydana gelebilecek rotasyon taleplerine karşı tamamen sabit bir bağlantı detayı sağlanmıştır. Akdeniz Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneylerde kullanılan bulonların hesabı Bölüm 8'de yer almaktadır.

Günümüze kadar, BEÇÇ'li çerçeve sistemlerinin kullanımında inşa edilecek çelik yapıların güçlendirilmesi hedeflenmiş ve bu konuda pek çok araştırma yapılmıştır. Ancak BEÇÇ'li sistemlerin ekonomik ve kolay uygulanabilir olması ayrıca tasarım parametrelerinin pek çok ülkenin standartlarına da girmiş olması araştırmacıları BEÇÇ'li sistemlerin betonarme yapılarda kullanılabilirliği konusunda çalışmalara yöneltmektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalar oldukça sınırlı olmasına rağmen, genel olarak araştırmacılar BEÇÇ'li sistemlerin betonarme yapıların güçlendirilmesinde iyi bir alternatif yöntem olabileceği sonucuna varmışlardır (Yooprasertchai ve Warnitchai 2008). Tez çalışması kapsamında üretilcek BEÇÇ'lerin inşa edilecek çelik yapıların ve mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilir tasarıma sahip olması hedeflenmiştir.

3.3.1. Deney elemanı 1

Yeni nesil BEÇÇ tasarımının ilk elemanın detayları Şekil 3.13'de görülmektedir. Prekast modüler BEM'e sahip BEÇÇ elemanlarının ÇE dışındaki tasarımları literatürde mevcut olan BEÇÇ tasarımlarından tamamen farklıdır. Bunun nedeni BEÇÇ'li sistemin mevcut betonarme yapılar içerisinde kullanılmasının hedeflenmiş olmasıdır. Böylece depreme karşı kusurlu yapıların ekonomik bir şekilde güçlendirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.13. Deney elemanı 1 ve detay çizimleri

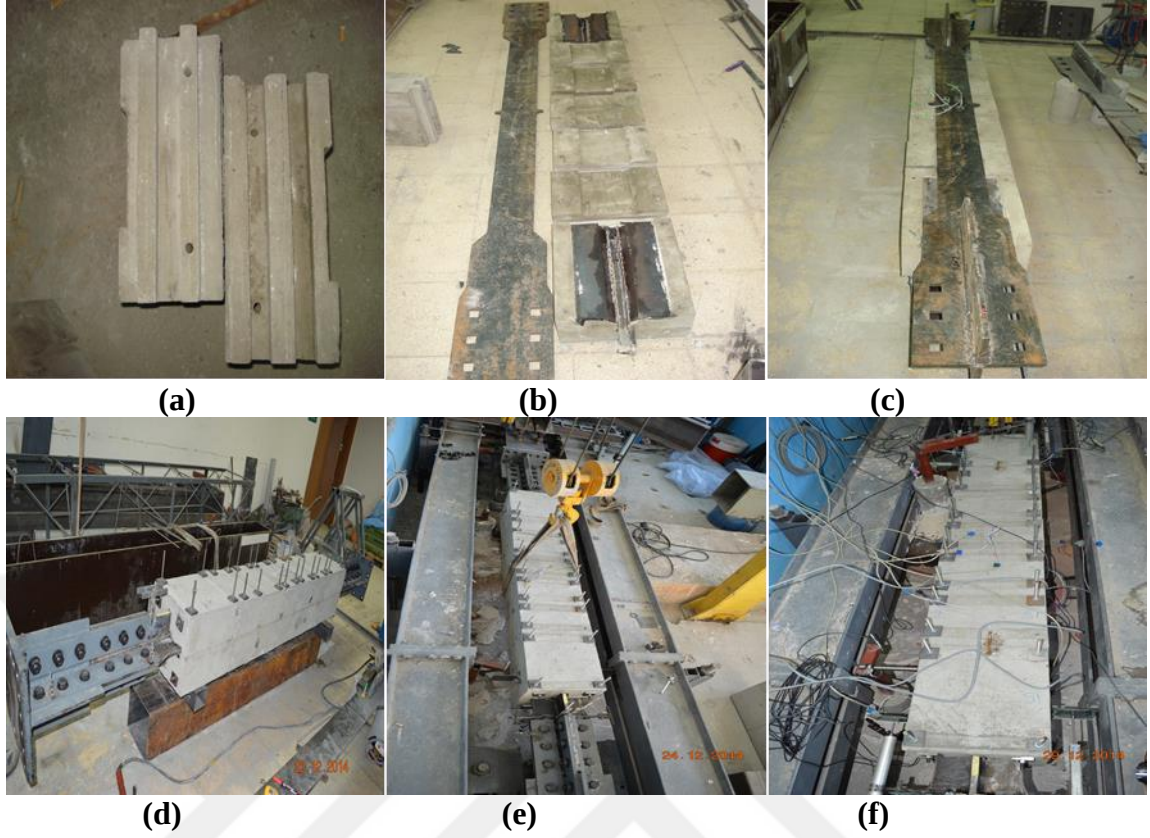
Bu BEÇÇ elemanında, Bölüm 3.3’de belirtildiği gibi ÇE üzerine ek plakalar kaynaklanmış ve ÇE orta açıklığına dört adet gerinim pulu yapıştırılmıştır. Ancak bu tasarımda, literatürde mevcut tasarımlardan farklı olarak ÇE’nin üzerinde herhangi bir izolasyon malzemesi kullanılmamıştır. Bu aşamadan sonra BEM’i oluşturacak prekast modüllerin imalatında kullanılacak olan kalıplarının inşasına geçilmiştir. Bu amaçla 12 mm kalınlığında suntalam plakalar kullanılmıştır. Plakaların istenilen boyut ve şekilde kesilmesinden sonra hızlı yapıştırıcı ile birbirlerine yapıştırılmışlardır (Şekil 3.14.a, b). Kalıpların oluşturulmasını takriben kızak imalatına geçilmiştir. Kızaklar iki parça halinde ÇE üzerinde kaynaklandıktan sonra kalıp içerisine yapıştırılmıştır (Şekil 3.14.c, d). Her bir kalıp içerisine gerekli bağımsız ara yüzeyi sağlayacak 12 mm kalınlığında ahşap plakalar yapıştırılmıştır (Şekil 3.14.e). Hedef basınç dayanımı 20 MPa olan beton

dökümü gerçekleştirildikten sonra 3 gün süre ile betonun priz alması beklenmiştir (Şekil 3.14.f).



Şekil 3.14. a) Suntalam plakaların kesimi; b) Kalıp imalatı; c) Kızak imalatı; d) Kızakların kalıp içerisine yapıştırılması; e) Beton dökümü öncesi kalıplar; f) Beton dökümü (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

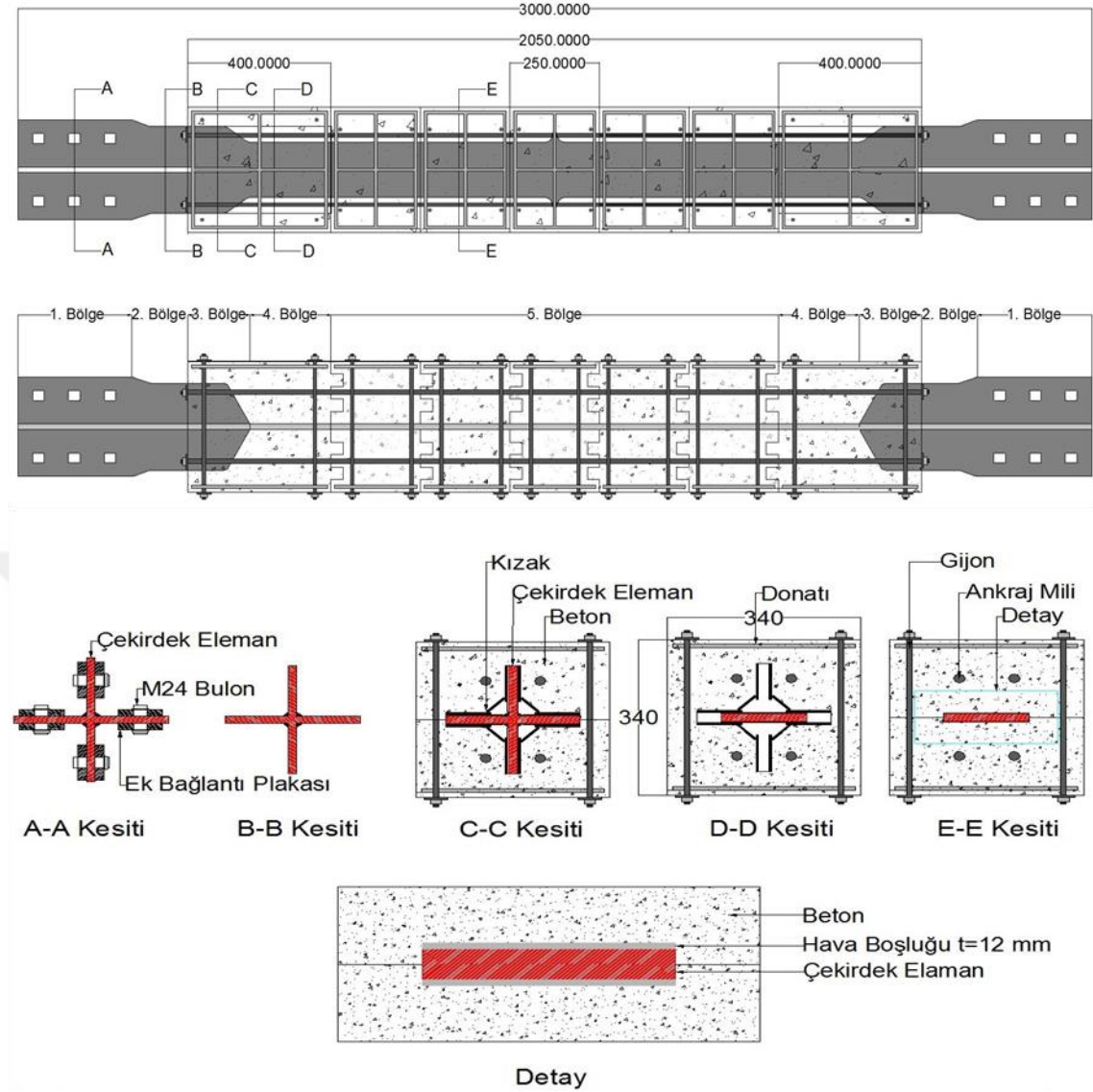
3. gün sonunda kalıplardan çıkarılan prekast beton bloklara belirli aralıklarla kür uygulanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus prekast beton blokların dişli imal edilmiş olmasıdır (Şekil 3.15.a). Bunun nedeni ÇE'nin burkulması sırasında, beton blokların birbirlerinden ayrılma durumlarının önüne geçilmesidir. Betonun 20 MPa değerine ulaşmasından sonra BEM'in montajına geçilmiştir. Şekil 3.13'de görüldüğü üzere BEM uçlarında 400 mm aralarda ise 250 mm uzunluğunda toplam 14 adet prekast beton blok imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu beton blokların 7 adedi BEM'in üst kısmını diğer 7 adedi ise BEM'in alt kısmını oluşturmaktadır. Alt prekast beton bloklar yerleştirildikten sonra ÇE blokların üzerine yerleştirilmiş ve daha sonra üst bloklar yerleştirilmiştir (Şekil 3.15.b, c). 10 mm çapında 4 adet boyuna ankraj milinin montajından sonra 10 mm çapında gijonların montajı gerçekleştirilmiştir. Böylece her bir prekast beton blok birbiri ile bağlantılı bir durum almıştır (Şekil 3.15.d). Ölçüm cihazlarının ayakları ve yerlerinin ayarlanması için beton blok üzerinde gerekli delikler matkap ile açılmış ve cihaz ayakları epoksi ile yapıştırılmıştır. Bu aşamadan sonra BEÇÇ'nin başlıkları monte edilmiş ve BEÇÇ vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilmiştir (Şekil 3.15.e). Ölçüm cihazlarının montajını takriben BEÇÇ elemanına 300 kg ön çekme yükü uygulanmış ve akabinde statik benzeri deneye geçilmiştir (Şekil 3.15.f).



Şekil 3.15. a) Dişli prekast beton bloklar; **b)** kızak ve alt bloklar; **c)** BEÇÇ'nin montajı; **d)** Ankarj mili, gijon ve başlıkların montajı; **e)** BEÇÇ'nin vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilmesi; **f)** Ölçüm cihazlarının montajı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

3.3.2. Deney elemanı 2

Yeni nesil ilk BEÇÇ eleman deneyinin ardından prekast beton blokların güçlendirilmesine karar verilmiştir. Bu amaçla, ilk elemenda beklenenden zayıf performans gösteren prekast beton blokların güçlendirilmesi amacı ile bu blokların içerisine ızgara şeklinde donatı yerleştirilmiştir. Ayrıca aşağıda belirtildiği üzere üretimin daha stabil ve kolay olması amacı ile imalat aşamasında bir takım farklılıklara gidilmiştir. 2. BEÇÇ elemanın detayları Şekil 3.16'de görülmektedir.



Şekil 3.16. Deney elemanı 2 ve detay çizimleri

Prekast betonarme bloklardan oluşan bu BEÇÇ elemanının imalatına diğer elemanda olduğu gibi ÇE'nin uç bölgelerine ek plakaların kaynaklanması ve ÇE orta bölgesine dört adet gerinim pulunun yapıştırılması ile başlanmıştır. Bir önceki elemanda olduğu gibi bu elemanda da izolasyon malzemesi kullanılmamıştır. ÇE'nin hazırlanmasından sonra kızak imalatına geçilmiştir Şekil (3.17.a). Kızaklar diğer eleman ile aynı boyutlara sahiptir ve bir önceki elemanda olduğu gibi ÇE üzerinde imal edildikten sonra kalıp içerisine yerleştirilmişlerdir. Kızak imalatı tamamlandıktan sonra kalıp imalatına geçilmiştir. Bu BEÇÇ elemanında diğer elemanda farklı olarak kalıplar suntalamdan değil 2 mm kalınlığında sac levhadan imal edilmiştir. Kalıp imalatı lazer kesimle yapılmış daha sonra belirli bölgelerden 90° bükülerek kalıplar hazırlanmıştır (Şekil 3.17.b). Kalıpların bağlantı yerlerinde gijonlu bağlantı kullanılmış, ayrıca beton dökümü sırasında beton harcının dışarıya kaçmaması için kenarlar silikon ve bantla kaplanmıştır. Bu elemanda sac kalıbın tercih edilme nedenleri, ahşap kalıbın beton dökümü sırasında karışım suyunu emerek şişmesi sonucu prekast beton bloklarda

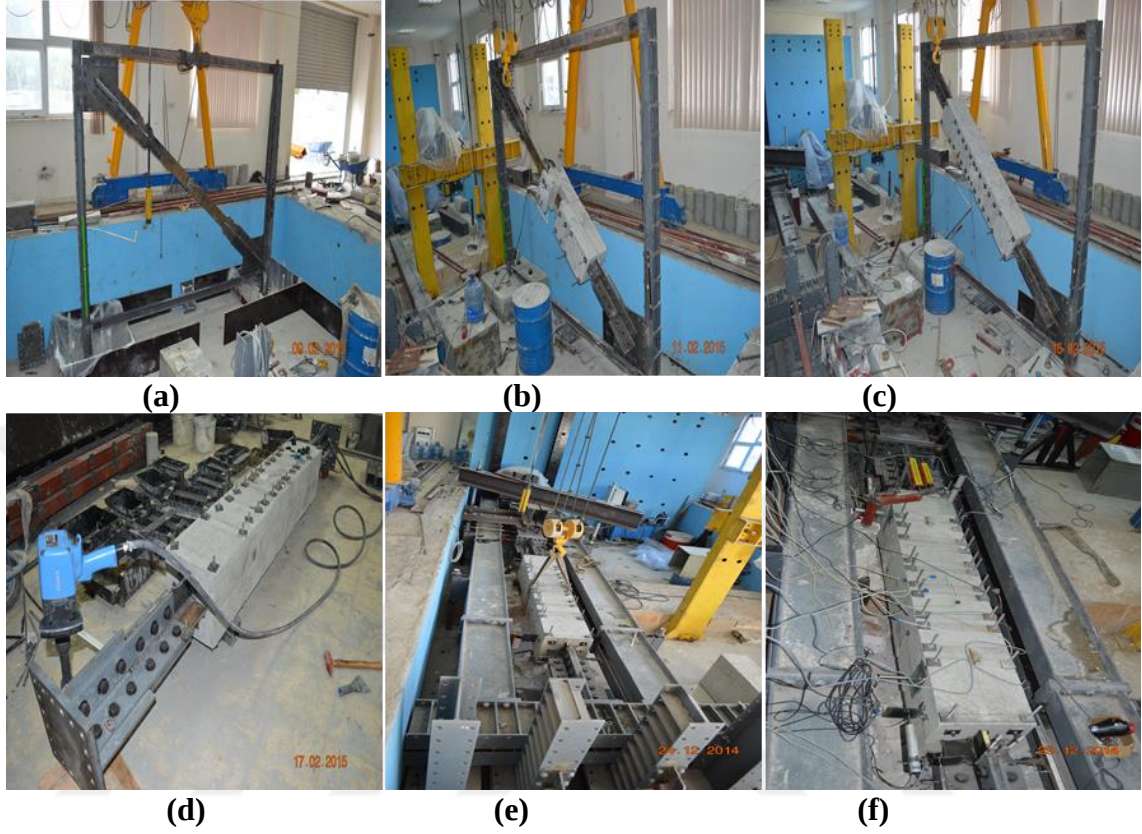
istenilen boyutların sağlanamamış olması ve beton blokların kalıp içerisinden çıkarılırken kalıpların zarar görmesi sonucunda yeniden kalıp imalatına geçilmesidir. Bu durum maliyet ve zaman kaybına yol açacağı için sac kalıplar tercih edilmiştir. Kalıpların imalatından sonra kalıp içerisine ÇE ile BEM arasındaki bağımsız ara yüzeyin sağlanması amacı ile kızak ve suntalam plakalar yapıştırılmıştır (Şekil 3.17.c). Ayrıca bir önceki elemandan farklı olarak 8 mm çapında donatılardan ızgaralar imal edilerek, kalıp içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.17.d, e). Kalıpların yağlanmasından sonra 20 MPa hedef dayanımlı beton dökümüne geçilmiştir (Şekil 3.17.f). Beton dökümünün ardından 3 gün süre ile betonun priz alması beklenmiş daha sonra betonarme bloklar kalıp içerisinden çıkarılarak belirli aralıklarla kür uygulanmıştır.



Şekil 3.17. a) Kızak imalatı; b) Kalıp imalatı; c) Suntalam plakaların kalıp içerisine yapıştırılması; d) Izgara imalatı; e) Izgaraların kalıp içerisine yerleştirilmesi; f) Beton dökümü (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Bu elemanda diğer elemandan farklı olarak BEÇÇ'nin montajında çelik çerçeve kullanılmıştır (Şekil 3.18.a). 3,8 m açıklığa ve 3,2 m yüksekliğe sahip bu çerçevenin kullanılmasındaki amaç BEÇÇ montajının mevcut yapılara uygunluğunun tespit edilmesidir. Bu kapsamda ÇE ilk önce çelik çerçeve içerisine monte edilmiştir. Daha sonra hedef dayanımı sağlamış olan prekast betonarme bloklar bir önceki elemandan farklı olarak ÇE'nin sağ ve soluna yerleştirilmiş (monaj kolaylığı sağlamaktadır) ve 10 mm paslanmaz gijonlar ve ankraj milleri ile sabitlenmiştir (Şekil 3.18.b, c). BEÇÇ'nin imalatının tamamlanmasından sonra BEÇÇ çerçeveden sökülerek havalı bulon sıkma sökme makinası ile başlıklar takılmış ve ölçüm cihazlarının ayakları BEÇÇ üzerine monte edilmiştir (Şekil 3.18.d). Vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilen BEÇÇ

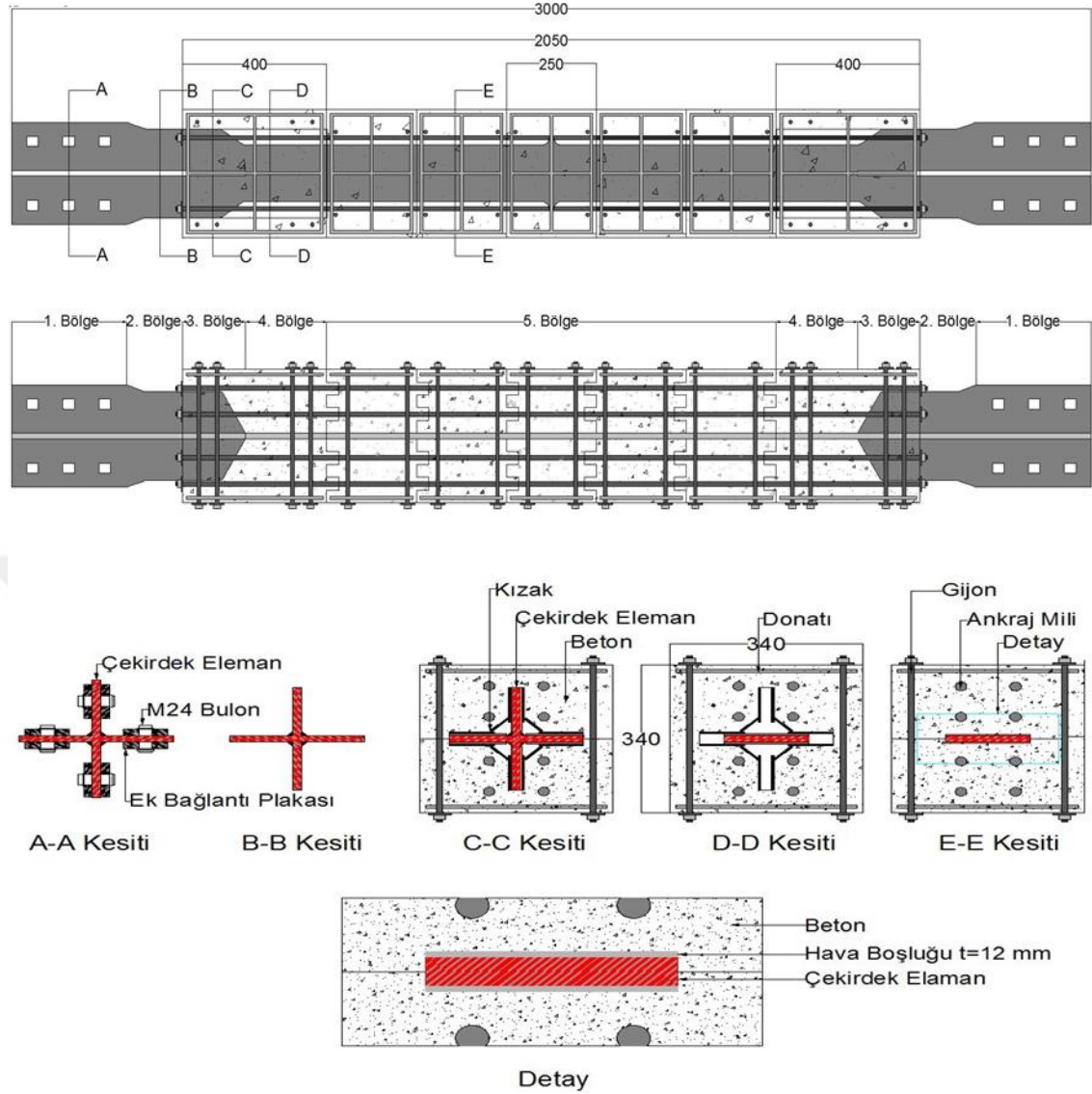
elemanına ölçüm cihazlarının montajı gerçekleştirilmiş ve ardından 300 kg değerinde ön çekme yükü uygulanmıştır (Şekil 3.18.e, f). Yükleme protokolünün sisteme girilmesini takriben statik benzeri deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18. a) Çelik çerçeve imalatı ve ÇE'nin çerçeve içerisine montajı; b) Prekast betonarme blokların ÇE üzerine montajı; c) Çelik çerçeveye bağlı BEÇÇ elemanı; d) Başlıkların havalı bulon sıkma sökme makinası ile montajı; e) BEÇÇ elemanın vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilmesi; f) Ölçüm cihazlarının montajı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

3.3.3. Deney elemanı 3

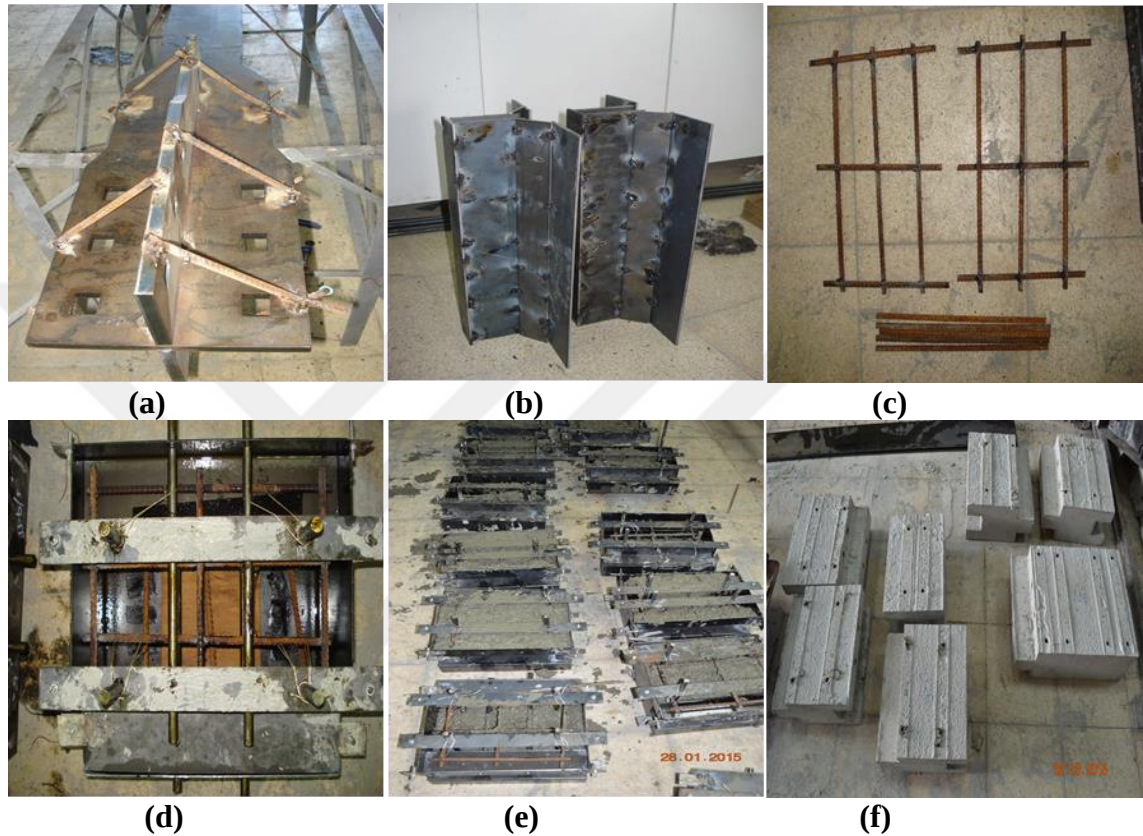
Yeni nesil BEÇÇ tasarımına sahip 3. elemanın detayları Şekil 3.19'de görülmektedir. Deney elemanı 2'nin BEM'in de meydana gelen hasarlar, bu elemanın tasarımında değişikliklere gidilmesine neden olmuştur. Bu doğrultuda yeni tasarım BEÇÇ'de prekast betonarme blokların imalatında, kullanılan donatı miktarında, ankraj mili ve paslanmaz gijon sayılarında değişikliğe gidilmiştir. Bu değişiklikler aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 3.19. Deney elemanı 3 ve detay çizimleri

Deney elemanı 3'ün imalatına, diğer elemanlarda olduğu gibi ÇE'ye ek plakaların kaynaklanması (Şekil 3.20.a) ve ÇE orta açıklığına dört adet gerinim pulunun yapıştırılması ile başlanmıştır. ÇE'nin tamamlanmasının ardından kızak imalatına geçilmiştir. Diğer elemanlarda olduğu gibi kızak imalatı ÇE üzerinde gerçekleştirilmiş ve daha sonra kalıp içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.20.b). Bu elemanın boyutları, diğer iki yeni nesil eleman ile aynı olduğu için ayrıca bir kalıp imalatı gerçekleştirilmemiştir. Ancak bir önceki elemanda, sökülen kalıpların tekrar montajı gerçekleştirilmiş ve bu tasarımda gerekli görülen ek delikler kalıp üzerinde açılmıştır (Şekil 3.20.d). Kalıp içerisine yerleştirilecek ızgara imalatında bir önceki elemandan farklı olarak $\phi 8$ donatılar birbirlerine tel ile değil kaynak ile tutturulmuştur (Şekil 3.20.c). Böylece beton dökümü sırasında donatılar, vibratörün etkisi ile hareket etmemişlerdir. Ayrıca bu elemanda dışlara ek $\phi 8$ donatılar yerleştirilmiştir. Buradaki amaç bir önceki deneyde meydana gelen dışlardaki hasarın önüne geçmek ve prekast betonarme bloklar arasındaki bağlantının daha stabil olmasını sağlamaktır. Kalıpların

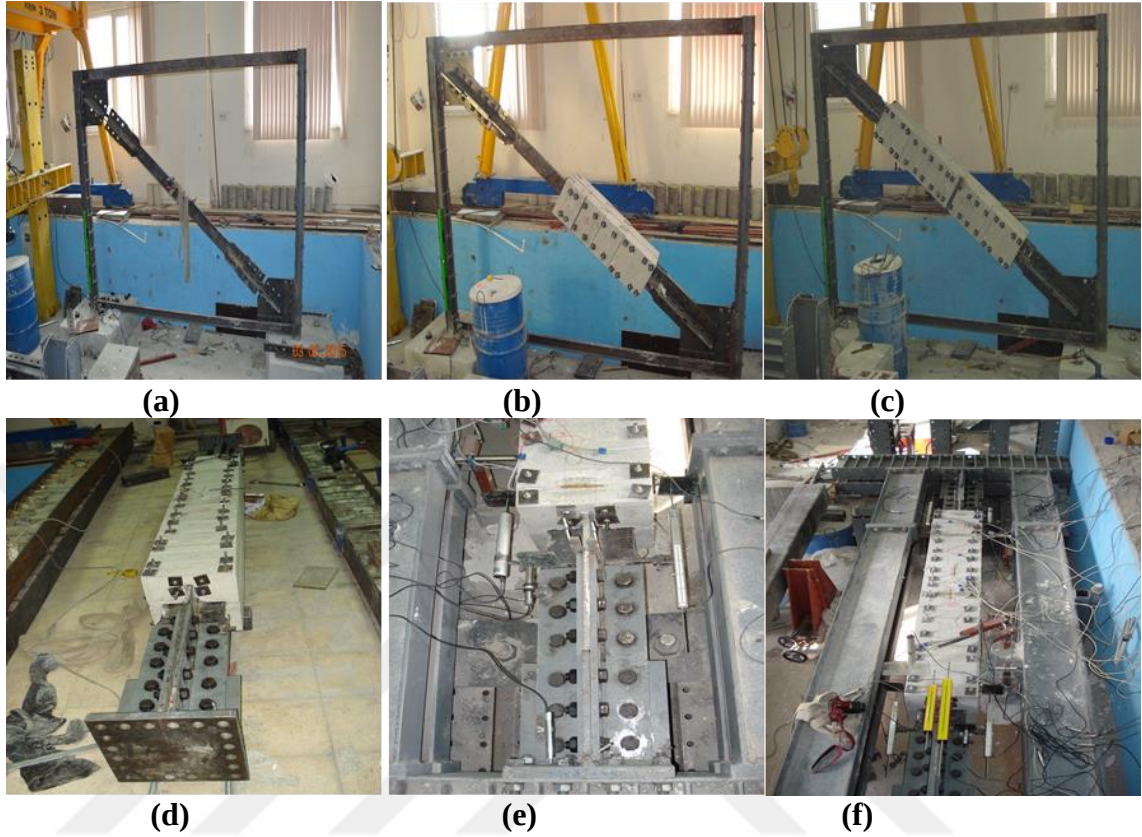
içerisine donatıları yerleştirilmesi ve 12 mm kalınlığındaki ahşap plakaların ve kızakların yapıştırılmasını müteakip beton dökümüne geçilmiştir (Şekil 3.20.d). Önceki deney elemanlarında olduğu gibi burada da hedeflenen beton basınç dayanımı 20 MPa olup beton harcının kalıp içerisine boşluksuz yerleşmesi için vibrasyon uygulanmıştır (Şekil 3.20.e). Beton kalıp içerisinde 3 gün süre ile bekletilmiş, priz almasından sonra kalıp içerisinden çıkarılarak betonarme bloklara belirli aralıklarla kür uygulanmıştır (Şekil 3.20.f).



Şekil 3.20. a) Ek plakaların ÇE'ye kaynaklanması; b) Kızak imalatı; c) Izgara imalatı; d) Kalıpların hazırlanması; e) Beton dökümü; f) Prekast betonarme bloklar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

ÇE'nin çelik çerçeveye montajından sonra prekast betonarme bloklar ÇE üzerinde $\phi 10$ paslanmaz gijonlar ve ankraj milleri ile sabitlenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus önceki elemanlardan farklı olarak lokal burkulma nedeni ile BEÇÇ uçlarındaki 400 mm uzunluğundaki prekast betonarme bloklarda meydana gelen hasarı azaltmak amacı ile $4\phi 10$ paslanmaz gijon sayısı $8\phi 10$ 'a çıkarılmıştır. Ayrıca elemandaki global burkulmayı sınırlandırmak ve prekast betonarme bloklar arasındaki bağı kuvvetlendirmek amacı ile ankraj mili sayısı $4\phi 10$ 'dan $8\phi 10$ 'a çıkarılmıştır (Şekil 3.21.a, b, c). BEÇÇ montajının tamamlanmasını takriben başlıklar havalı somun sıkma sökme makinası ile takılmış ve ölçüm cihazlarının ayakları monte edilmiştir (Şekil 3.21.d). Vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilen eleman yine havalı somun sıkma sökme makinası ile bağlantıları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.21.e). Ölçüm cihazlarının montajından sonra elemana 300 kg ön çekme yükü uygulanmıştır. Yükleme

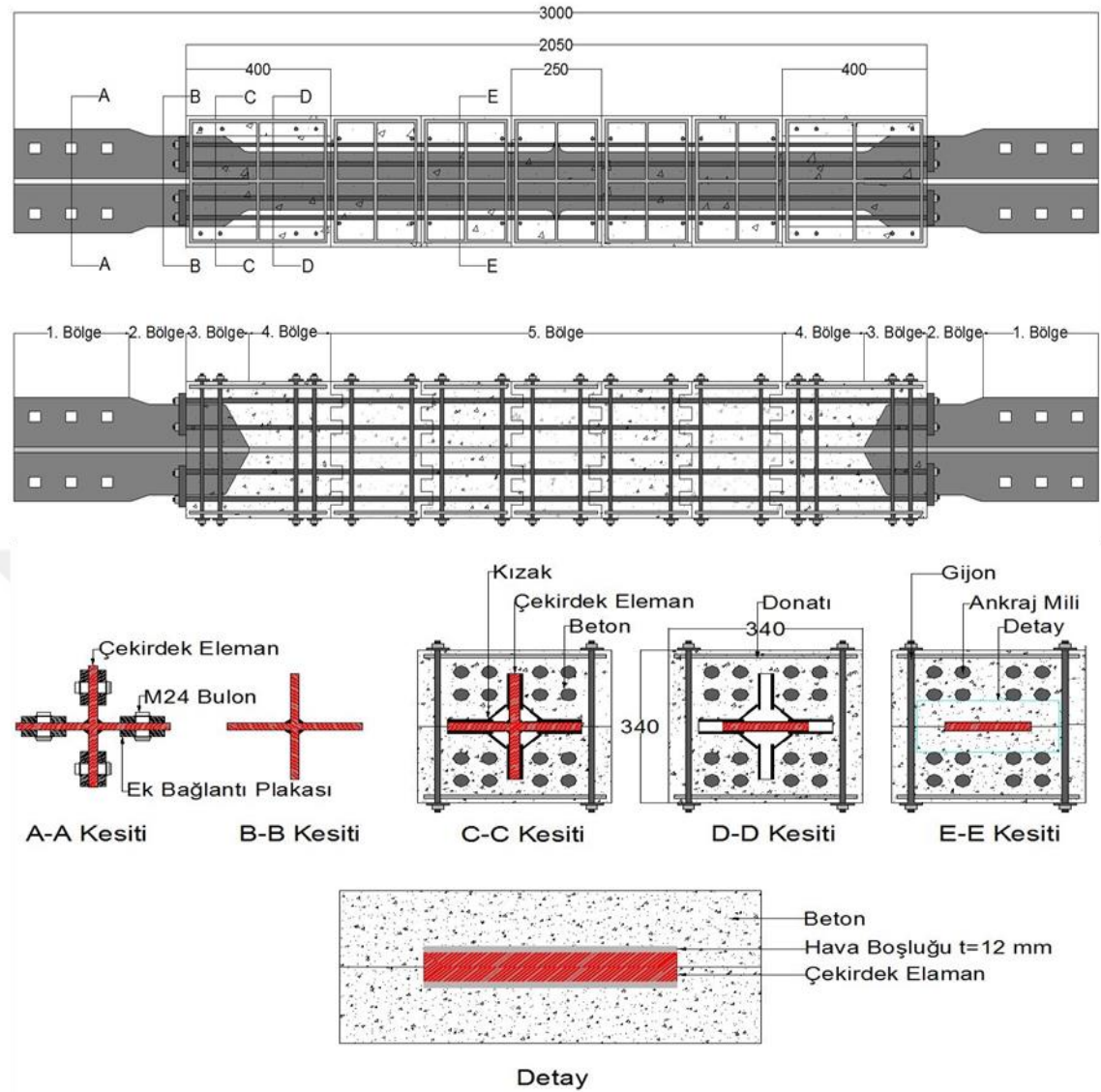
protokolünün sisteme girilmesinin ardından statik benzeri deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.21.f).



Şekil 3.21. a) ÇE'nin çelik çerçeveye montajı; b) Prekast betonarme blokların ÇE üzerine montajı; c) BEÇÇ elemanı; d) Başlıkların montajı; e) BEÇÇ elemanın deney düzeneğine montajı ve ölçüm cihazlarının montajı; f) BEÇÇ elemanın statik benzeri test öncesi görünümü (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

3.3.4. Deney elemanı 4

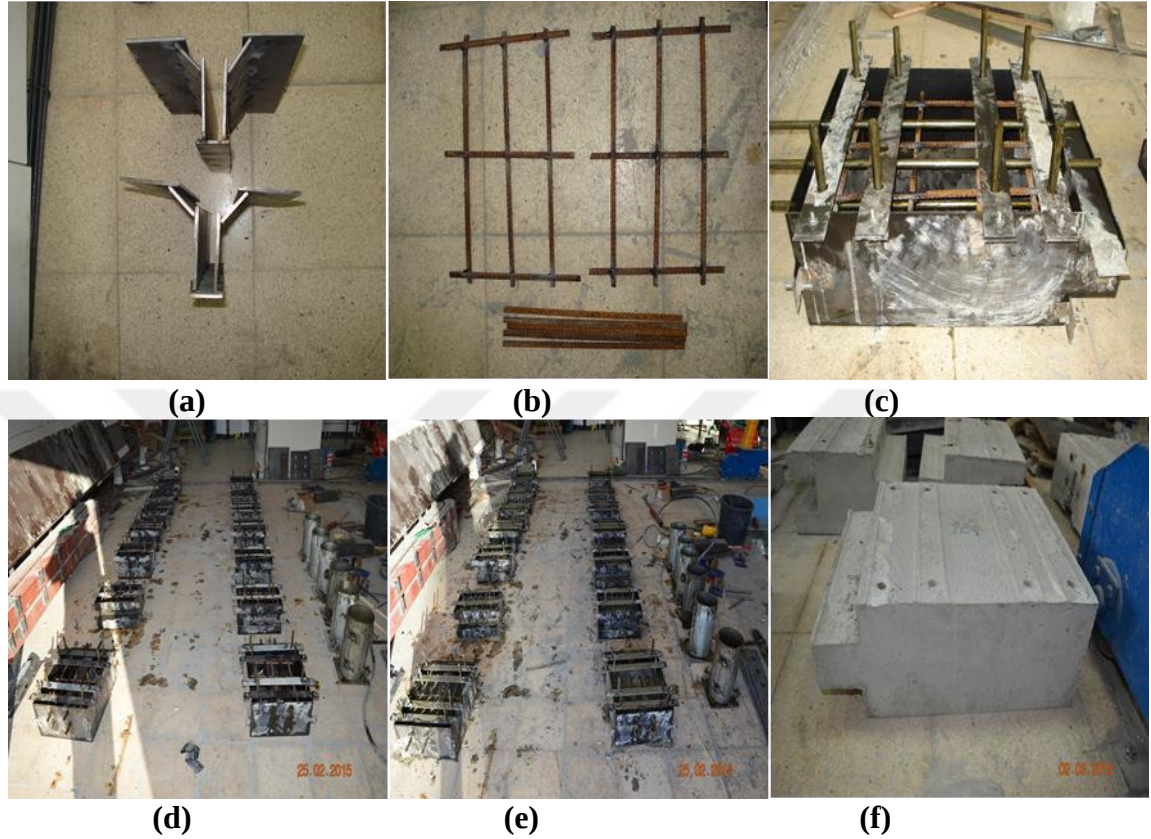
Deney elemanı 3'de, deney sırasında meydana gelen hasarlar nedeni ile prekast betonarme bloklı BEM'den oluşan bu elemanın tasarımında değişikliklere gidilmiştir. Bu eleman boyutları diğer prekast betonarme bloklı elemanlarla aynı olup özellikle prekast betonarme bloklar arasındaki bağlantıyı sağlayan ve BEÇÇ'de global burkulma oluşumunu engelleyen ankraj millerinin çapında ve sayısında değişikliğe gidilmiştir. Ayrıca aşağıda detaylı bir şekilde bahsedilmiş olan ankraj mili pullarında da önemli değişikliklere gidilmiştir. Deney elemanı 4'ün detayları Şekil 3.22'de görülmektedir.



Şekil 3.22. Deney elemanı 4 ve detay çizimleri

Deney elemanı 4'ün imalatına diğer elemanlarda olduğu gibi ÇE'ye ek plakaların kaynaklanması ve ÇE orta açıklığına gerinim pullarının yapıştırılması ile başlanmıştır. Bu elemanda da diğer prekast betonarme blokları elemanlarda olduğu gibi izolasyon malzemesi kullanılmamıştır. BEM boyutları aynı olduğu için eleman 2 ve 3'de kullanılan kalıplar kullanılmıştır. Ancak ankraj mili sayısı ve boyutları değiştiği için kalıplarda ki mevcut deliklerin boyutları artırılmış ve gerekli yeni delikler açılmıştır (Şekil 3.23.c). Bu elemanda da diğer elemanlarda olduğu gibi kızak imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.23.a). Kızakların ve 12 mm kalınlığındaki ahşap plakaların kalıpların içerisine hızlı yapıştırıcı ile yapıştırılmasının ardından ızgara imalatına geçilmiştir. Izzaraların imalatında $\phi 8$ donatılar kullanılmış, ayrıca prekast betonarme blokların dış açıklıklarına yerleştirilecek olan yine aynı boyuttaki donatılar hazırlanmıştır (Şekil 3.23.b). Donatıların kalıplar içerisine yerleştirilmesinden ve yağlanmasından sonra beton dökümüne geçilmiştir (Şekil 3.23.d). Hedef basınç

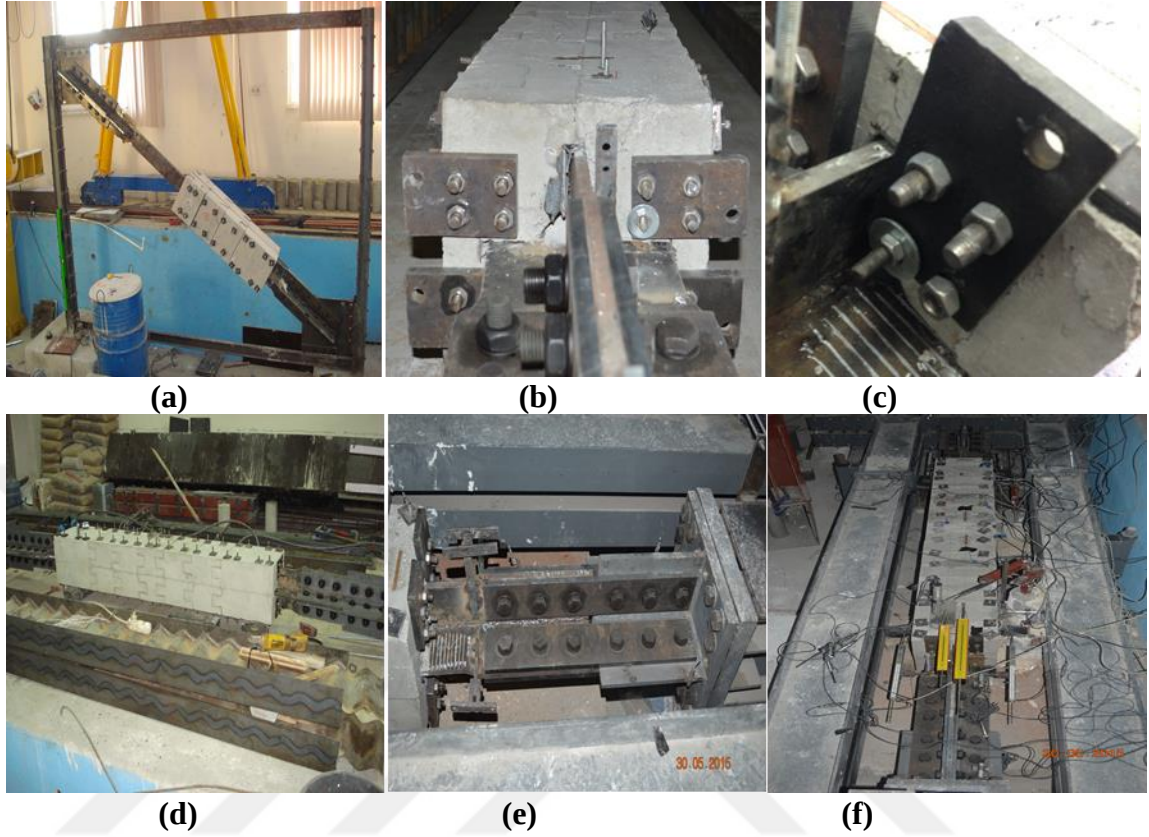
dayanımı 20 MPa olan, diğer elemanlarla aynı beton karışım oranlarına sahip beton harcı hazırlanmış ve vibratör vasıtası ile kalıp içerisinde boşluk kalmayacak şekilde beton dökümü tamamlanmıştır (Şekil 3.23.e). Beton kalıp içerisinde 3 gün süre ile bekletilmiş ardından kalıptan çıkarılarak gerekli küreleme uygulanmıştır (Şekil 3.23.f).



Şekil 3.23. a) Kızak imalatı; **b)** Izgara imalatı; **c)** Kalıbın hazırlanması; **d)** Beton dökümü öncesi kalıpların yağlanması; **e)** Beton dökümü; **f)** Prekast betonarme bloklar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

ÇE'nin çelik çerçeveye bağlanmasından sonra prekast betonarme blokların montajına geçilmiştir (Şekil 3.24.a). Bu amaçla 36 adet $\phi 10$ paslanmaz gijon ve 16 adet $\phi 14$ ankraj mili kullanılmıştır (Şekil 3.24.b). Burada dikkat edilmesi gereken husus ankraj millerinin çapının ve sayısının değiştirilmiş olmasıdır. Bunun nedeni bir önceki elemenda deney esnasında şiddetli global burkulmanın oluşmasıdır. Ankraj milleri gerekli uzunluklarda kesilmiş ve uç bölgelerine kılavuz ve pafta ile dış açımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ankraj millerin prekast betonarme bloklara montajında kullanılan pulların tasarımında da değişikliğe gidilmiştir. 20 mm kalınlığında sac plakalardan imal edilen pullar her bölgedeki ankraj millerinin koordinasyonlu hareketini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.24.c). Bu amaçla toplam 8 adet pul imal edilmiş ve her 4 adet ankraj milinin başında ve sonunda olmak üzere 2 adet pul kullanılmıştır. Çelik çerçeveden sökülen BEÇÇ'ye bulon ve bağlantı plakaları kullanılarak başlıklar takılmış ve saat ayaklarının montajı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.24.d). Vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilen BEÇÇ elemanın deney düzeneğine bağlantısı somun sıkma sökme makinası ile yapılmıştır (Şekil 3.24.e).

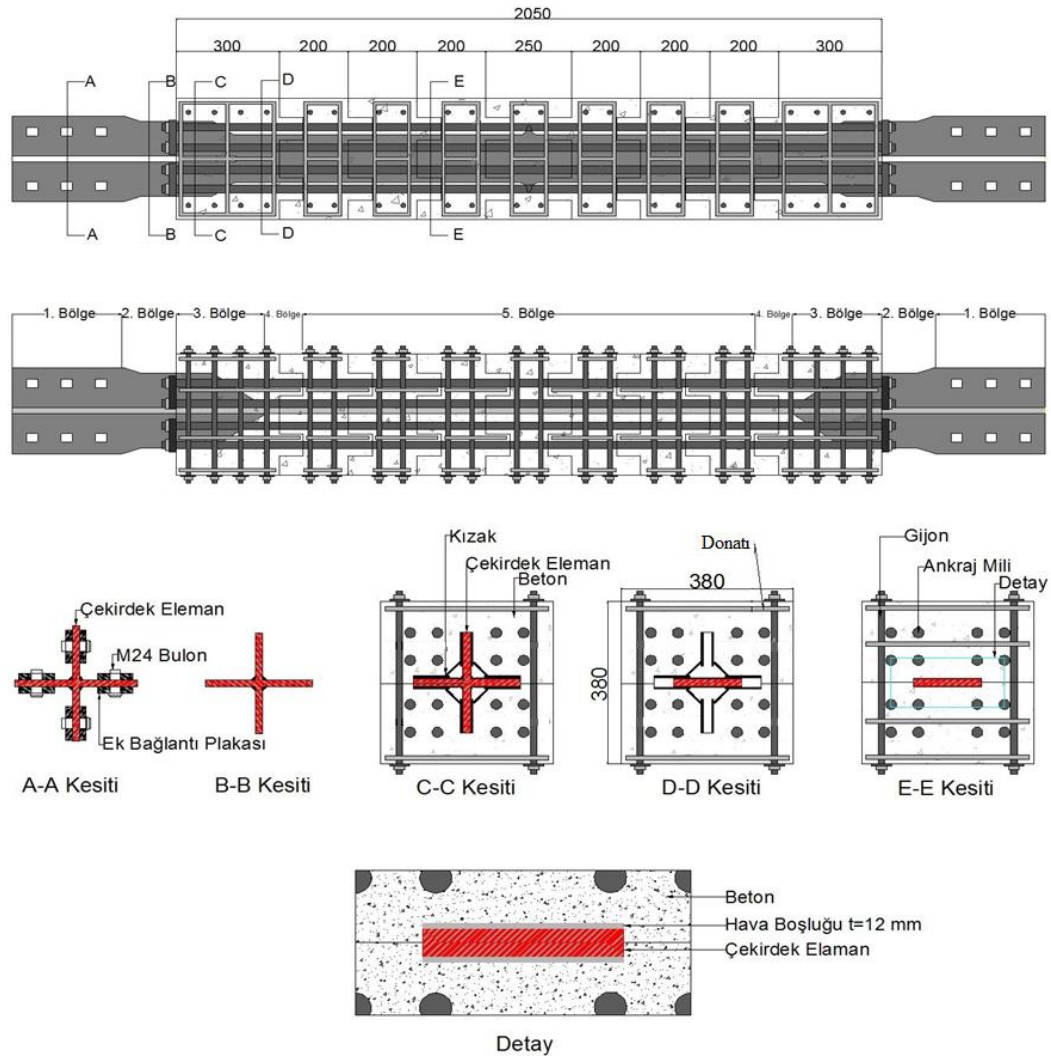
Sisteme yükleme protokolü girildikten sonra elemana 300 kg ön çekme yükü uygulanmış ve akabinde statik benzeri deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.24.f).



Şekil 3.24. a) Prekast betonarme blokların motajı; **b)** $\phi 14$ Ankraj milleri; **c)** Pul montajı; **d)** Başlıkların montajı; **e)** BEÇÇ'nin deney düzeneğine montajı; **f)** Ölçüm cihazlarının montajı (112M820 numaralı projeden alınmıştır.)

3.3.5. Deney elemanı 5

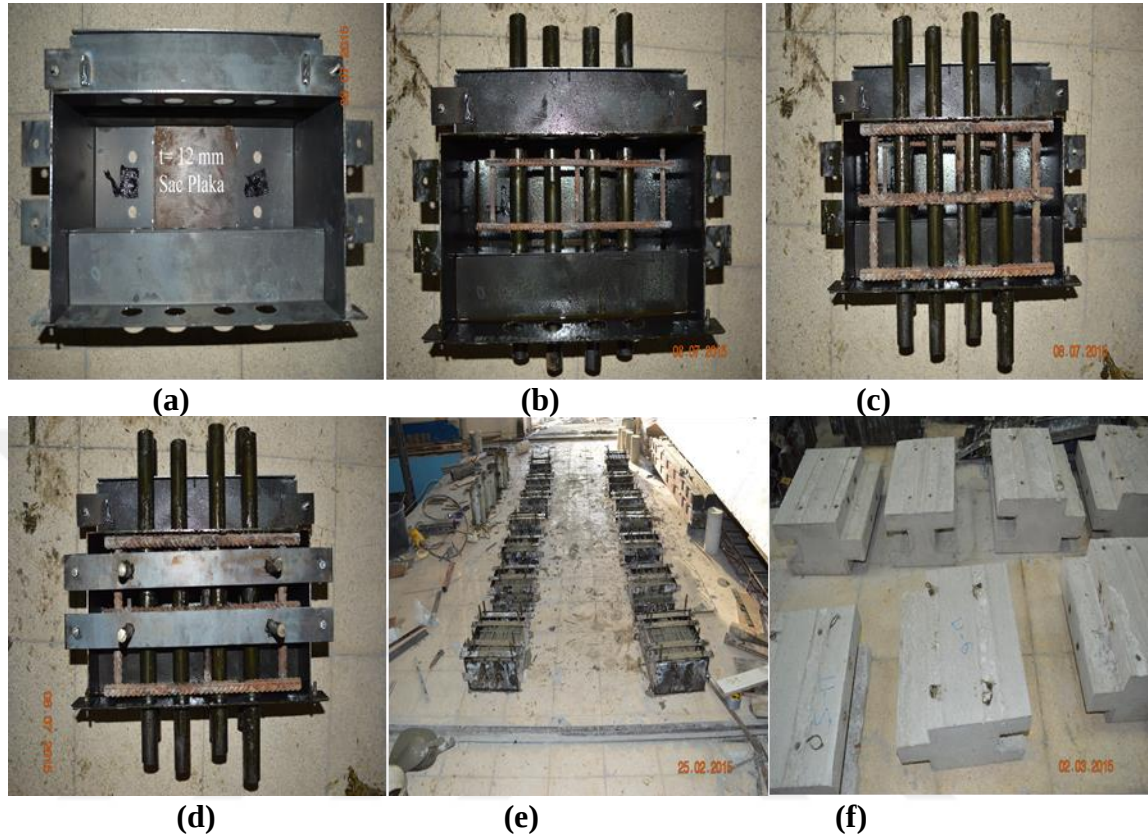
Daha önce bahsedilen prekast betonarme bloklu elemanların testlerinden istenilen histerik performans ve stabilitenin elde edilememesi nedeni ile bu elemanın BEM'inde radikal değişimlere gidilmesine karar verilmiştir. İlk aşamada BEM yeniden tasarlanmıştır. BEM'in imalatında kullanılan toplam 14 adet prekast betonarme bloğun boyları kısaltılarak sayısı toplam 18 adede çıkarılmıştır. Böylece betonarme blokların ağırlıklarının düşürülmesi hedeflenmiştir. Özellikle BEM'in uç bölgelerinde bulunan 400 mm uzunluğundaki prekast betonarme blokların boyları 300 mm'ye düşürülerek montaj kolaylığı sağlanmıştır. Ancak BEM'in en kesit boyutlarının 34×34 cm'den 38×38 cm'ye çıkarılması arzu edilen montaj kolaylığının tam olarak sağlanamamasına neden olmuştur. Ayrıca prekast betonarme blokların güçlendirilmesinde kullanılan ızgara sayısı ve boyutlarında, BEÇÇ'nin montajında kullanılan ankraj mili boyutlarında ve pul tasarımında önemli değişikliklere gidilmiştir. Deney elemanı 5'in tasarımında gidilen değişiklikler aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmış olup detaylı çizimi Şekil 3.25'de görülmektedir.



Şekil 3.25. Deney elemanı 5 ve detay çizimleri

Diğer elemanlarda olduğu gibi deney elemanı 5'in imalatına da ÇE'ye ek plakaların kaynaklanması ve ÇE orta açıklığına gerinim pullarının yapıştırılması ile başlanmıştır. Bu elemanda da bağımsız ara yüzeyde herhangi bir izolasyon malzemesi kullanılmamıştır. Bundan önceki elemanlarda BEM en kesit boyutları 34×34 cm iken bu elemandan sonra boyutlar 38×38 cm olarak güncellenmiştir. Boyutların değişmesi nedeni ile yeniden kalıp tasarlanmış ve imal edilmiştir. 2 mm sacdan hazırlanan kalıpların üzerine gerekli delikler açılmıştır. Bu elemanın imalatında diğer elemanlardan farklı olarak bağımsız ara yüzeyi oluşturan ahşap kalıplar yerine 12 mm kalınlığında sac plakalar kullanılmıştır (Şekil 3.26.a). Bunun nedeni ahşap kalıpların beton dökümünde karışım suyunu emerek şişmesi ve daha geniş bir bağımsız ara yüzey oluşturmaya neden olmasıdır. Bu elemanda kullanılan kızakların imalatında herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. Sac plakaların ve kızakların kalıpların içerisine yapıştırılmasından sonra prekast betonarme blok içerisinde yer alan ızgaraların imalatına geçilmiştir. Bu elemanda ızgaraların imalatında köklü değişimlere gidilmiştir. Bu kapsamda iki farklı ızgara imalatı gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi $\phi 8$ donatıların kaynaklanması ile oluşan ve kalıp ortasına yerleştirilen ızgara (Şekil 3.26.b), diğeri ise $\phi 14$ donatıların

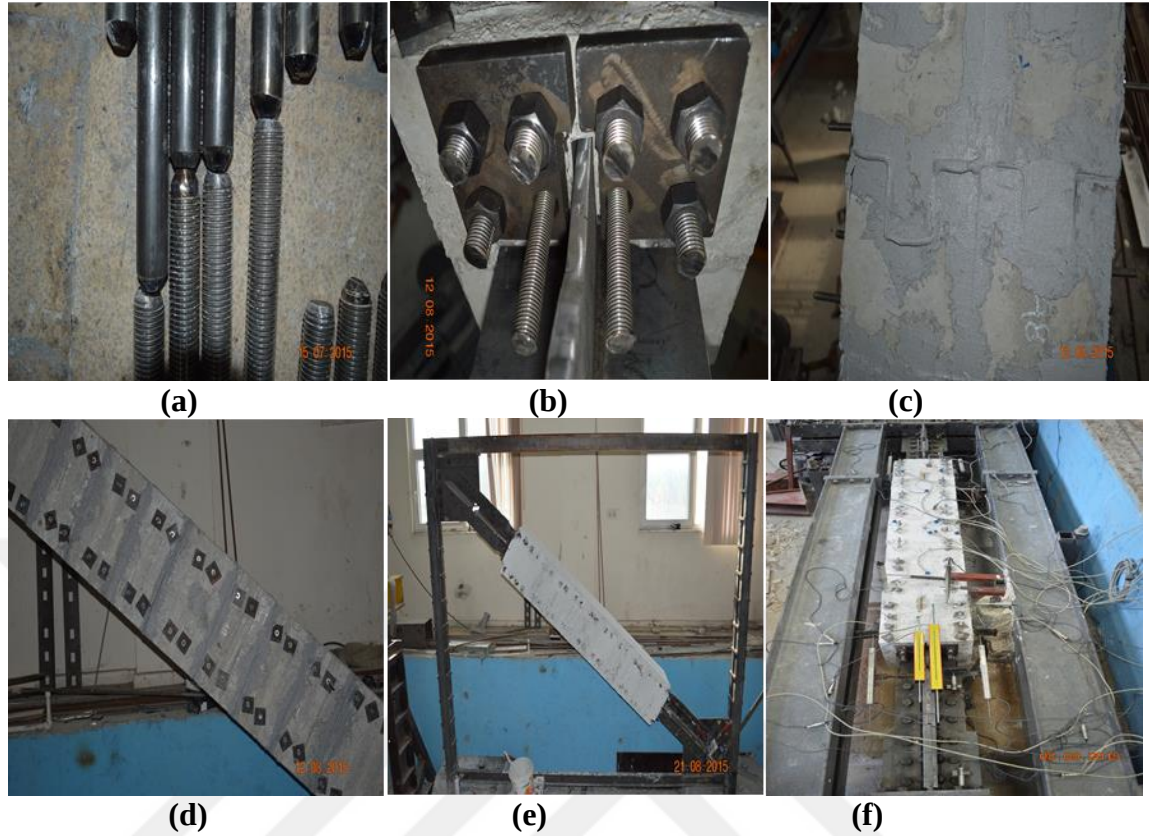
kaynaklanması ile oluşan ve kalıp üzerine yerleştirilen ızgaralardır (Şekil 3.26.c). Şekil 3.26.d’de görüldüğü üzere diğer elemanlara göre hem ızgara miktarı hem de kullanılan donatı çapı arttırılmıştır.



Şekil 3.26. a) Yeni tasarım kalıp ve 12 mm kalınlığında sac plaka; b) Kalıp orta açıklığına yerleştirilen $\phi 8$ donatılardan imal edilmiş ızgara; c) Kalıp üzerine yerleştirilmiş $\phi 14$ donatılardan imal edilmiş ızgara; d) Beton dökümü öncesi kalıp; e) Beton dökümü; f) Prekast betonarme bloklar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Kalıpların yağlanmasını takriben beton dökümüne geçilmiştir. Hedef basınç dayanımı 20 MPa olan diğer elemanlarla aynı karışım oranlarına sahip beton harcı kalıpların içerisine vibratör yardımı ile tam olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.26.e). 3 gün süre ile kalıp içerisinde bekletilen prekast betonarme bloklar, kalıp içerisinden çıkarıldıktan sonra gerekli kür uygulanmıştır (Şekil 3.26.f).

ÇE’nin çelik çerçeveye bağlanmasını müteakip BEÇÇ’nin montajına başlanmıştır. Enine kullanılan $\phi 10$ paslanmaz gijonlar değişmezken, önceki elemanlarda $\phi 10$ ve $\phi 14$ kullanılan ankraj mili çapı bu elemanda $\phi 24$ ’de çıkarılmıştır. Toplam 16 adet kullanılan $\phi 24$ ankraj millerinin bağlantısında kılavuz ve pafta ile dış açılmasının zor olması nedeni ile $\phi 24$ paslanmaz gijonlar ankraj millerinin uçlarına kaynaklanmıştır. Burada hem ankraj milinin hem de gijonların uçları konik şekilde açılmış ve elektrikli kaynak makinası ile bağlantıları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.27.a). Bir önceki elemanda deney sırasında pulların olduğu bölgede betonarme bloklarda ezilmeler ve kırılmalar tespit edilmiştir. Bunun önüne geçilmek amacı ile yeni pul tasarlanmış ve 20 mm kalınlığında sac plakadan pul imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.27.b).



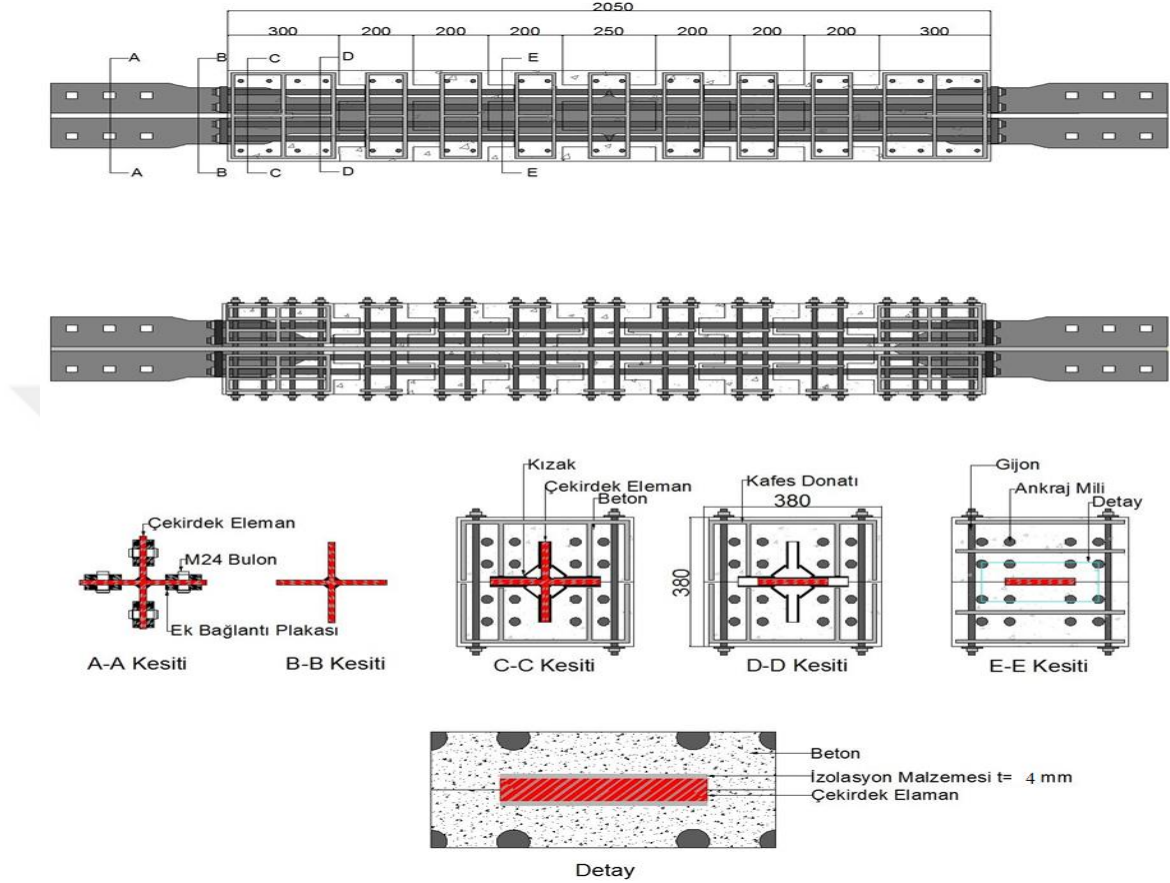
Şekil 3.27. a) $\phi 24$ ankraj mili ve $\phi 24$ gijon; **b)** 20 mm kalınlığında pul; **c)** Epoksi esaslı tamir harcının BEÇÇ’de kullanımı; **d)** Prekast beton blok aralarının tamir harcı ile kapatılması; **e)** BEÇÇ’nin kireç ile sıvanması; **f)** Ölçüm cihazlarının montajı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Bu elemanlarda diğer elemanlardan farklı olarak ilk defa tamir harcı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Concretive 1406 marka epoksi esaslı ankraj ve montaj harcı ile prekast betonarme blokların arası doldurulmuştur (Şekil 3.27.c, d). Üzeri kireç ile sıvanan BEÇÇ elemanı (Şekil 3.27.e) sökölerek başlıkların ve ölçüm cihazı ayaklarının yerleştirilmesinden sonra vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Havalı somun sıkma sökme makinası ile bağlantıları yapılan BEÇÇ elemanın ölçüm cihazları monte edilmiştir (Şekil 3.27.f). Sisteme yükleme protokolünün girilmesinin ardından BEÇÇ elemanına 300 kg ön çekme yükü uygulanmış ve buna müteakip statik benzeri deney gerçekleştirilmiştir.

3.2.6. Deney elemanı 6

Deney elemanı 5, deneylerde iyi histerik performans göstermiş olsa da arzu edilen kapasite değerlerini vermemesinden ötürü aynı boyutlara sahip 6 numaralı BEÇÇ elemanı tasarlanmıştır. Bu elemanda diğer elemanlardan farklı olarak izolasyon malzemesi kullanılmış ve bağımsız ara yüzey kalınlığı düşürülmüştür. Ayrıca bir önceki elemanda lokal burkulmaların olduğu bölgelerdeki prekast betonarme blokların yan yüzeylerinde hasar tespit edilmiştir. Bu nedenle özellikle BEM’in uç kısımlarında bulunan prekast betonarme blokların, $\phi 14$ ve $\phi 8$ donatılardan imal edilen kafesli sistem

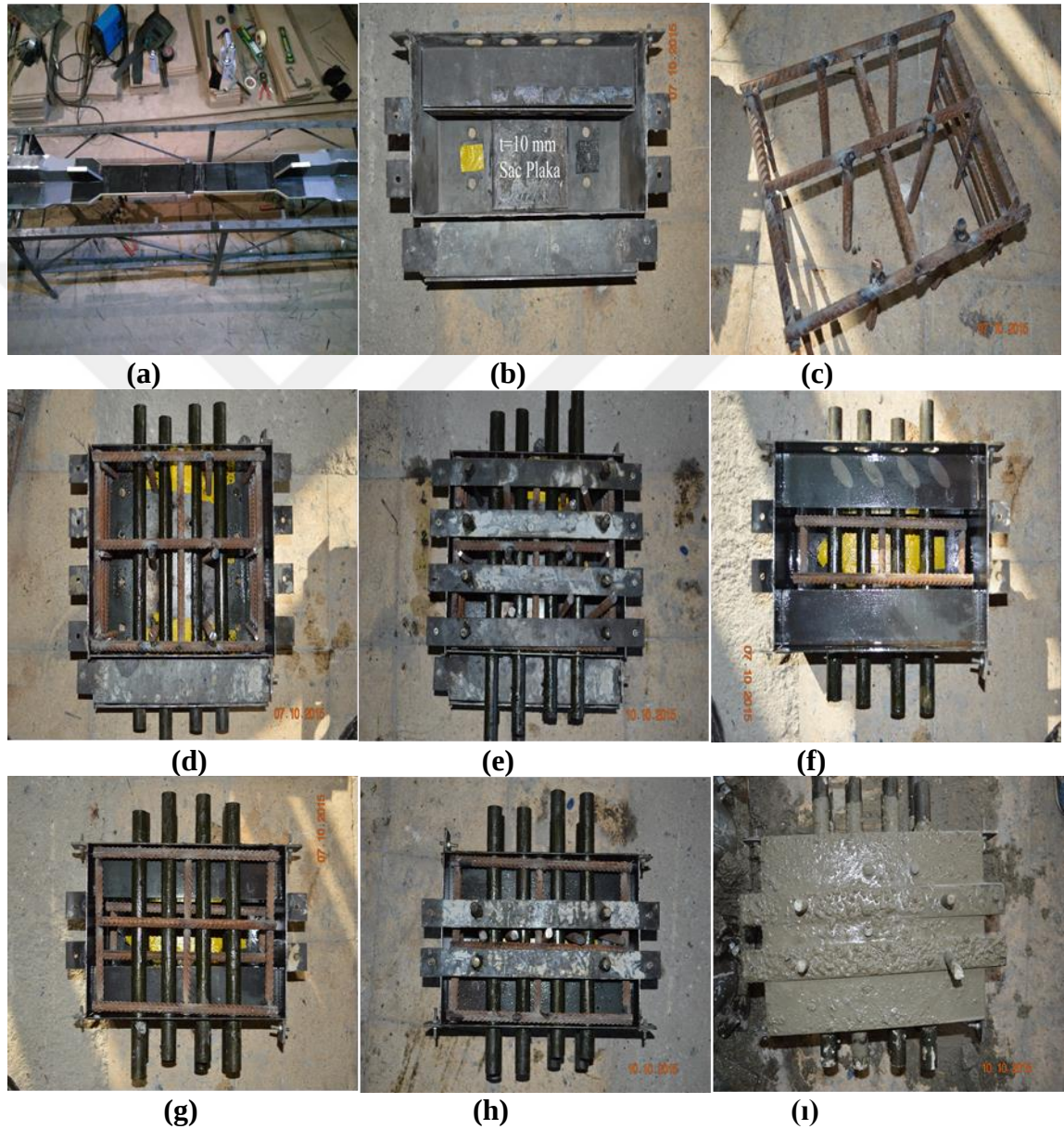
ile güçlendirilmesi yoluna gidilmiştir. Bir önceki deneyde pulların ve ankraj millerinin istenilen davranışı göstermesi ile bu elemanda kullanılan pul ve ankraj mili sayısında ve boyutlarında herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. Deney elemanı 6'nın detaylı çizimi Şekil 3.28'de görülmektedir.



Şekil 3.28. Deney elemanı 6 ve detay çizimleri

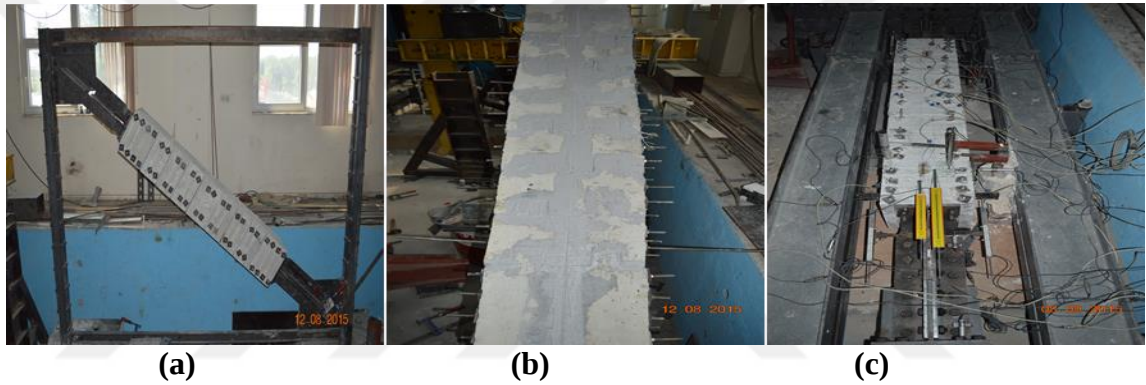
Deney elemanı 6'nın imalatında diğer elemanlarda olduğu gibi ÇE'ye ek plakaların kaynaklanması ve ÇE orta açıklığına gerinim pullarının yapıştırılması ile başlanmıştır. Buna müteakip kızak imalatı gerçekleştirilmiştir. Kızak imalatında herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. Ancak bu elemanda, diğer elemanlardan farklı olarak ilk defa ÇE üzerine izolasyon malzemesi uygulaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.29.a). Daha önceki elemanlarda ÇE stabilitesinin sağlanamamış olması ve burkulmaların önüne geçilememesi, bu elemanda izolasyon malzemesi kullanımını ve bağımsız ara yüzey genişliğinin daraltılması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle bu elemanda daha önce 12 mm kalınlığında olan sac plakaların kalınlığı 10 mm'ye düşürülmüş ve ÇE'nin plastik bölgesinde iki kat 4 mm, elastik bölgesinde ise tek kat 2 mm kalınlığında poliethilen şerit uygulanmıştır. BEM boyutlarının bir önceki elemanla aynı olması nedeni ile yeni kalıp tasarlanmamıştır. Bu elemanda mevcut BEM'in donatılarla güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Kalıpların içerisine kızak ve 10 mm kalınlığında plakaların yapıştırılmasını müteakip donatıların imalatına geçilmiştir (Şekil 3.29.b). Bir önceki deneyde BEM'in uçlarındaki prekast betonarme blokların yan yüzeylerinde makro çatlaklar ve betonda pul pul atmalar tespit edilmiştir. Bunun önüne

geçebilmek amacı ile kalıpların içerisine $\phi 14$ ve $\phi 8$ donatıların kaynaklanması ile elde edilen kafes sistemi yerleştirilmiştir (Şekil 3.29.c, d). Buna ek olarak BEM uç bölgelerinde yer alan blokların kalıbına $9\phi 14$ ek donatılar dik bir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.29.e). Diğer prekast betonarme bloklarda ise, kalıbın orta açıklığında ve üzerinde yer alan ızgaralar $\phi 14$ donatılardan imal edilmiştir (Şekil 3.29.f, g). Ayrıca BEM orta kısmında yer alan her bir bloğun kalıbına $5\phi 14$ ek donatılar dik bir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.29.h).



Şekil 3.29. a) ÇE'nin izolasyon malzemesi ile kaplanması; b) 10 mm kalınlığında sac plakaların kalıp içerisine yapıştırılması; c) Kafes imalatı; d) Kızak ve kafesin kalıp içerisine yerleştirilmesi; e) $9\phi 14$ ek donatılar; f) Kalıp orta açıklığındaki $\phi 14$ ızgara; g) Kalıp üzerinde yer alan $\phi 14$ ızgara; h) $5\phi 14$ ek donatıların kalıp içerisine yerleştirilmesi; i) Beton dökümü (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

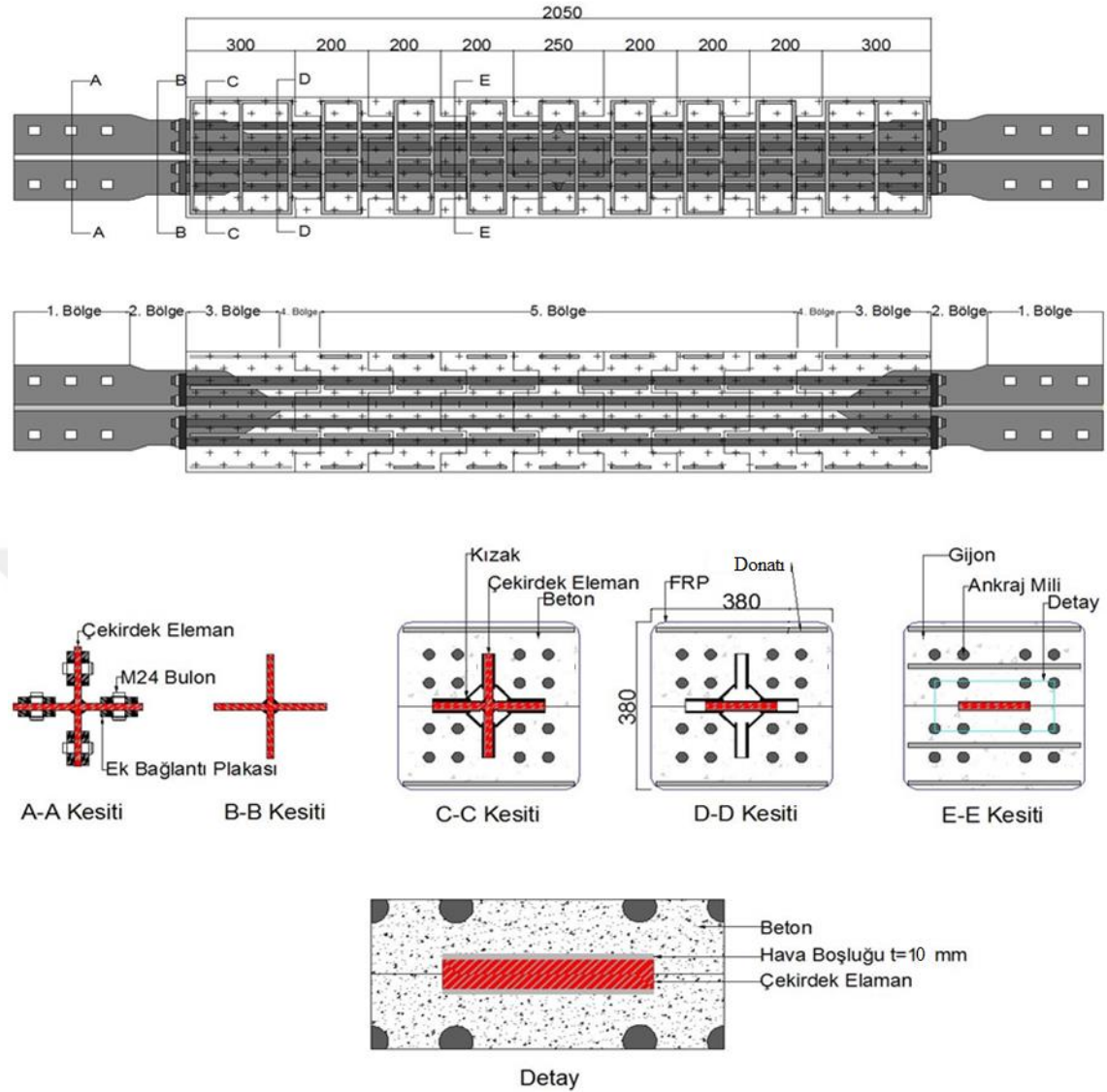
Kalıpların yağlanması sonrasında 20 MPa hedef basınç dayanımlı beton dökümüne geçilmiştir (Şekil 3.29.ı). Beton karışım oranları diğer elemanlarla aynı olup beton harcının kalıp içerisine boşluksuz yerleşmesi için el tipi vibratör kullanılmıştır. 3 gün süre ile kalıp içerisinde bekletilen prekast betonarme bloklar çıkarılarak gerekli kür uygulanmıştır. ÇE'nin çelik çerçeveye yerleştirilmesinin ardından BEÇÇ'nin montajına geçilmiştir. Prestek betonarme blokların ÇE üzerine yerleştirilmesinin ardından $\phi 10$ paslanmaz gijonlar ve $\phi 24$ ankraj milleri ile montaj gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.30.a). Bu elemanda kullanılan ankraj mili ve 20 mm kalınlığındaki pullar Deney elemanı 5 ile aynıdır. Deney elemanı 5'de olduğu gibi bu elemanda da epoksi esaslı tamir harcı uygulaması gerçekleştirilmiş ve buna müteakip BEM kireç ile sıvanmıştır (Şekil 3.30.b). BEÇÇ'ye başlıkların ve ölçüm cihaz ayaklarının montajından sonra BEÇÇ vinç yardımı ile deney düzeneğine yerleştirilmiş ve somun sıkma sökme makinası ile gerekli bağlantılar yapılmıştır. Ölçüm cihazlarının BEÇÇ üzerine montajlanmasını müteakip yükleme protokolü sisteme girilmiş ve BEÇÇ'ye 300 kg ön çekme yükü uygulanmıştır (Şekil 3.30.c). Bu aşamadan sonra statik benzeri deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.30. a) BEÇÇ'nin montajı; b) BEÇÇ'ye tamir harcı uygulaması; c) Ölçüm cihazlarının montajı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

3.3.7. Deney elemanı 7

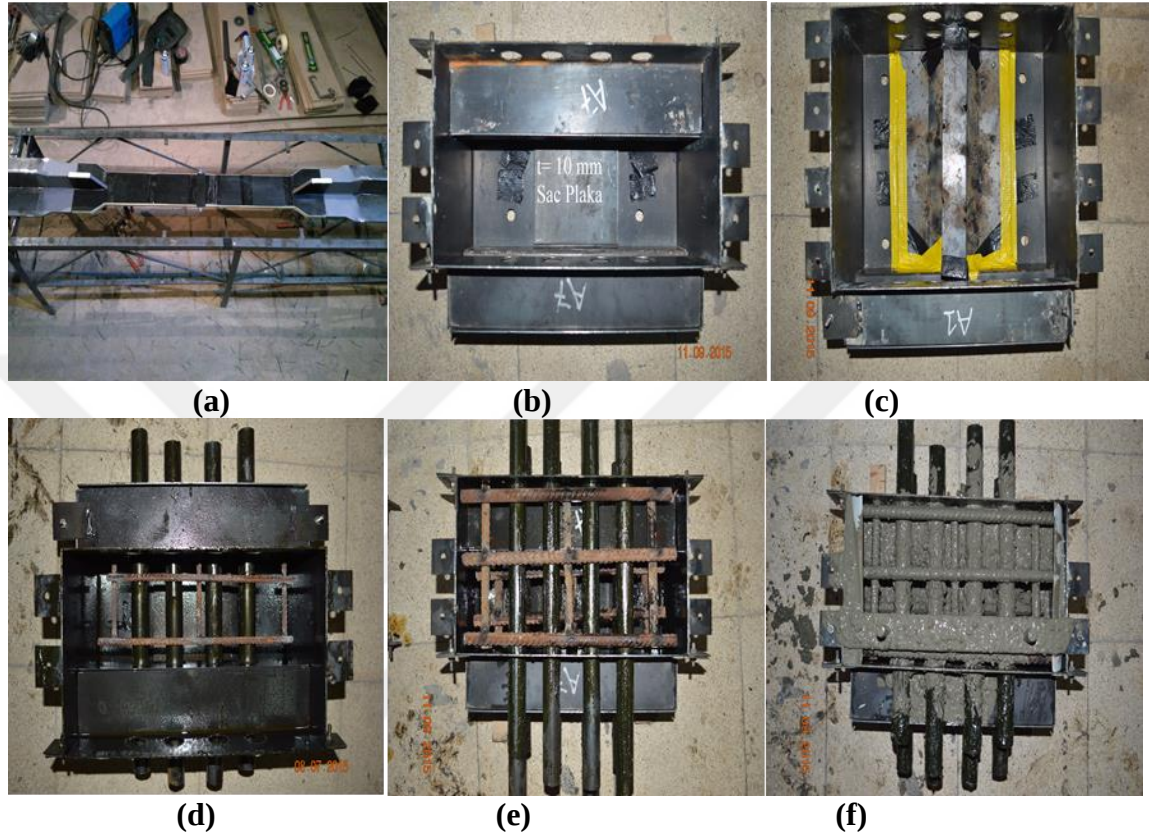
Tez çalışması kapsamında üretilen son prekast betonarme bloklu BEÇÇ numunesi olan Deney elemanı 7'de en büyük farklılık BEM'in CFRP (karbon fiber destekli polimer) ile kaplanmasıdır. Deney elemanı 7'nin prekast betonarme bloklarının imalatı Deney elemanı 5 ile benzerdir. Deney elemanı 5'den farklı olarak bağımsız ara yüzey kalınlığı 10 mm'ye indirilmiş ve ÇE elastik bölgede 2 mm, plastik bölgede ise 4 mm kalınlığında izolasyon malzemesi kullanılmıştır. Deney elemanı 7'nin BEM'i önceki iki eleman gibi 38×38 cm en kesit boyutlarına ve 18 adet prekast betonarme bloğa sahiptir. BEM'de yapılan en büyük değişiklik CFRP'nin zarar görmemesi amacı ile prekast betonarme blokların köşelerinin taşlanması ve montajda $\phi 10$ gijonların kullanılmamasıdır. Deney elemanı 7'nin BEM'inde kullanılan ızgaralar, ankraj milleri ve pulların tasarımı, boyutları ve sayıları Deney elemanı 5 ile aynıdır.



Şekil 3.31. Deney elemanı 7 ve detay çizimleri

Diğer elemanlarda olduğu gibi Deney elemanı 7'nin imalatına da ÇE'ye ek plakaların kaynaklanması ve ÇE orta açıklığına gerinim pullarının yapıştırılması ile başlanmıştır. Bu aşamadan sonra Deney elemanı 6 ile aynı olarak ÇE burkulması engellenmiş plastik ve elastik yüzeyleri izolasyon malzemesi ile kaplanmıştır (Şekil 3.32.a). Deney elemanı 7'nin BEM'i eleman 5 ve 6'da olduğu gibi 38×38 en kesit alanına sahiptir. Böylece kalıplarda herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. Deney elemanı 7'nin bağımsız ara yüzey kalınlığı eleman 6'da olduğu gibi 10 mm kalınlığında sac levhalar ile sağlanmıştır (Şekil 3.32.b). Bu elemanda kullanılan kızakların imalatında herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir (Şekil 3.32.c). Sac plakaların ve kızakların kalıpların içerisine yapıştırılmasından sonra prekast betonarme blok içerisinde yer alan ızgaraların imalatına geçilmiştir. Bu elemanda kullanılan ızgaralar Deney elemanı 5 ile aynıdır. Prekast betonarme blokların orta açıklığında $\phi 8$ donatılarının kaynaklanması ile elde edilen ızgara sistemi kullanılırken blokların üst kısmında $\phi 14$ ızgara kullanılmıştır (Şekil 3.32.d, e). Kalıpların yağlanması takriben beton dökümüne

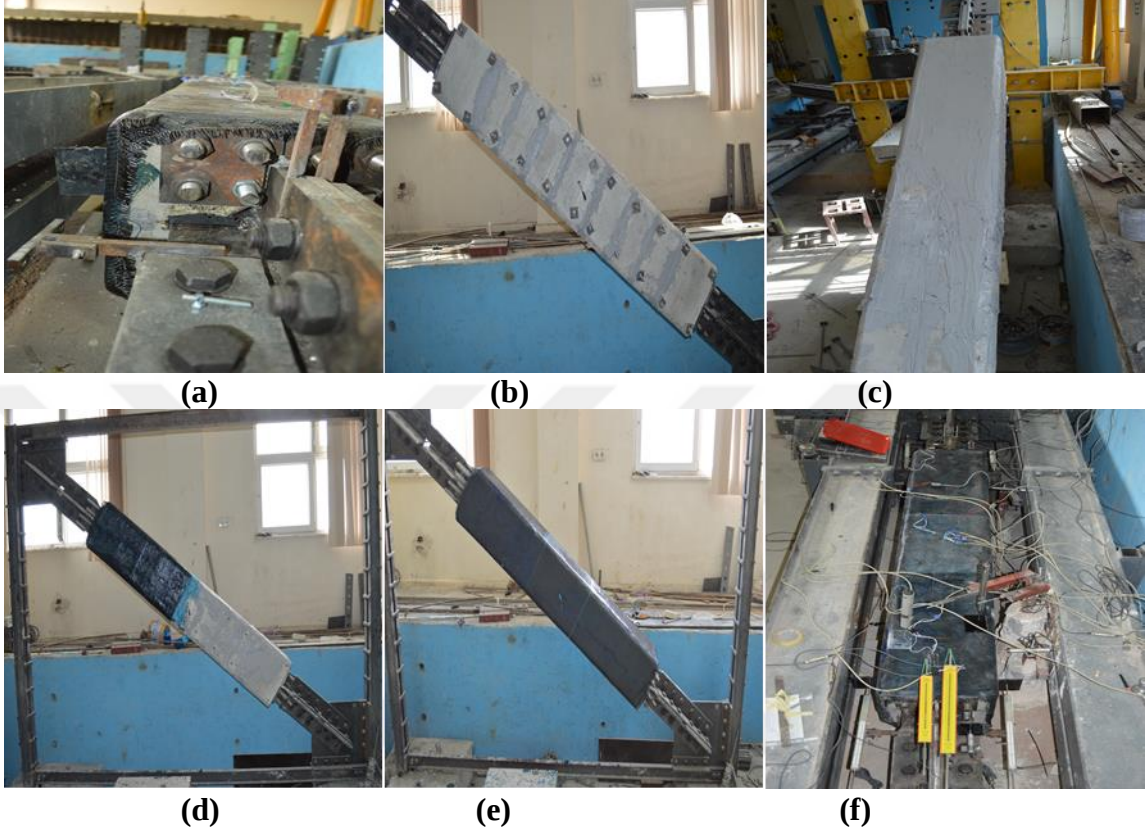
geçilmiştir. Hedef basınç dayanımı 20 MPa olan diğer elemanlarla aynı karışım oranlarına sahip beton harcı kalıpların içerisine vibratör yardımı ile tam olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.32.f). 3 gün süre ile kalıp içerisinde bekletilen prekast betonarme bloklar, kalıp içerisinden çıkarıldıktan sonra gerekli kür uygulanmıştır. Gerekli dayanım değerine ulaşan prekast betonarme blokların kenarları taşlanmıştır.



Şekil 3.32. a) ÇE'nin İzolasyon malzemesi ile kaplanması; b) 10 mm kalınlığında sac levha montajı; c) kızak montajı; d) $\phi 8$ ızgara; e) $\phi 14$ ızgara; f) Beton dökümü (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

ÇE'nin çelik çerçeveye bağlanmasını müteakip BEÇÇ'nin montajına başlanmıştır. Enine kullanılan $\phi 10$ paslanmaz gijonlar ilk aşamada BEÇÇ elemanının montajında kullanılmıştır. $\phi 10$ gijonların montajını takriben $\phi 24$ ankraj millerinin montajı gerçekleştirilmiştir. $\phi 24$ ankraj millerinin montajında Deney elemanı 5 ve 6'da olduğu gibi aynı tasarıma sahip 20 mm kalınlığında pullar kullanılmıştır (Şekil 3.33.a) Bu elemanda da diğer elemanlarda olduğu gibi tamir harcı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Coneresive 1406 marka epoksi esaslı ankraj ve montaj harcı ile prekast betonarme blokların arası doldurulmuştur (Şekil 3.33.b). 1 gün süre ile tamir harcının kuruması beklenmiş daha sonra $\phi 10$ gijonlar sökülüştür. Buna müteakip BEM'in CFRP ile kaplanması işlemine geçilmiştir. İlk aşamada BEM'in üzeri tamir harcı ile kaplanmış (Şekil 3.33.c) daha sonra 3 kat CFRP ile sarılmıştır (Şekil 3.33.d, e). Her bir kat CFRP sarımında MasterBrace sat 450 marka epoksi kullanılmıştır. Bu aşamada CFRP'nin BEM üzerine sıkı bir şekilde sarılmasına özen gösterilmiştir. CFRP ile sarımı gerçekleştirilen BEÇÇ elemanı çerçeveden sökülüştür. Başlıkların ve ölçüm cihazlarının ayakları montajını takriben BEÇÇ elemanın deney düzeneğine bağlantısı

vinç yardımı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.33.f). Ölçüm cihazlarının montajı gerçekleştirilmiş ve sisteme yükleme protokolü girilmiştir. Statik benzeri deneyi hasarsız atlatan Deney elamanı 7 diğer elemanlardan farklı olarak yorulma testine de tabi tutulmuştur.



Şekil 3.33. a) 20 mm kalınlığında pul; b) prekast betonarme blokların arasına tamir harcı uygulaması; c) BEM'in üzerine tamir harcı uygulaması; d) BEM'in üzerine CFRP uygulaması; e) BEM'in 3 kat CFRP ile sarılması; f) Ölçüm cihazlarının montajı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

4. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında üretilen her bir BEÇÇ elemanının deneylerinin tamamlanmasının ardından her iki data logger'dan elde edilen veriler birleştirilmiştir. Her bir deney 10 ile 15 dakika arasında sürmüş ve her bir ölçüm cihazından saniyede 2 veri alınmıştır. Bu verilerin kolay bir şekilde incelenebilmesi amacı ile Excel programında grafikler hazırlanmıştır. Aşağıda görüleceği üzere her bir elemana ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafikleri, ÇE'nin plastik kısmı için tanımlanmış eksenel yük—birim şekil değiştirme grafikleri ve BEÇÇ'nin deney düzeneğine bulonlu bağlantısında kayma olup olmadığının tespiti için, BEÇÇ'nin her iki ucuna ait eksenel yük-deplasman grafikleri verilmiştir. Ayrıca bu bölümde deney esnasında BEÇÇ'lerde meydana gelen hasarların tespiti için deney elemanı bileşenlerine ayrılmıştır. BEÇÇ'lerde oluşan hasarların detaylı fotoğrafları bölüm içerisinde yer almaktadır.

Deneysel çalışma sonucunda belirlenen BEÇÇ elemanlarına ait maksimum çekme, basınç değerleri ve basınç kapasitesi (β), pekleşme (ω) düzeltme çarpanları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Basınç kapasitesi düzeltme çarpanları ve pekleşme düzeltme çarpanları eşitlik 2.1.4 ve 2.1.5'de belirtilen denklemlere göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan ÇE'lere ait akma dayanımı değerleri Çizelge 3.2'de yer almaktadır.

Çizelge 4.1. BEÇÇ elemanlarına ait maksimum çekme, basınç değerleri ve basınç kapasitesi, pekleşme düzeltme çarpanları (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

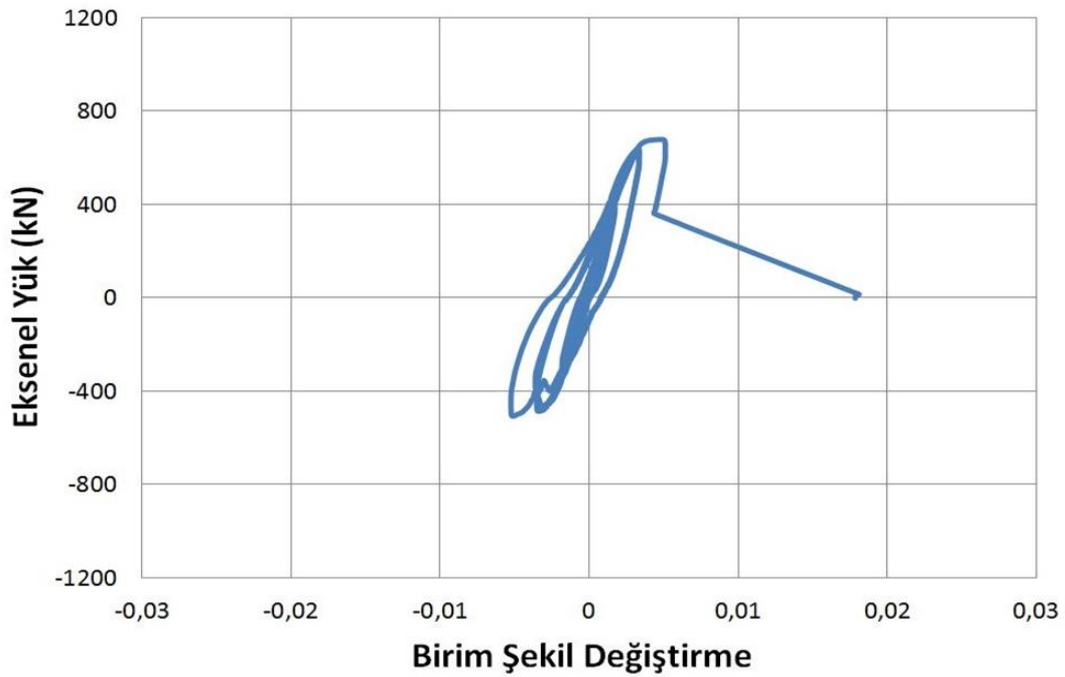
	$P_{\text{mak. Çekme}}$ (kN)	$P_{\text{mak. Basınç}}$ (kN)	β ($P_{\text{basınç}}/P_{\text{çekme}}$)	ω ($P_{\text{çekme}}/F_{\text{yvc}}A_{\text{sc}}$)
Den. Ele. 1	678,7	507,2	0,74	0,91
Den. Ele. 2	678	576	0,85	0,71
Den. Ele. 3	800	818	1,02	1,05
Den. Ele. 4	842	893,9	1,06	1,11
Den. Ele. 5	772,6	958,7	1,24	1,03
Den. Ele. 6	912,6	957,4	1,05	1,22
Den. Ele. 7	904	1022	1,13	1,21

Bu tez çalışmasının da dahil olduğu, Tübitak 1001 projesi kapsamında BEM'i kutu profil içerisine beton harcı dökülerek elde edilen BEÇÇ elemanında statik benzeri deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda yeni nesil BEÇÇ'lerin, çekme, basınç kapasitesi ve deplasman sınır değerlerinin standartlarda yer almamasından ötürü, bu değerlerin BEM'i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ'den elde edilen değerlere yakın olması beklenmektedir. Bu amaçla; (i) BEÇÇ maksimum çekme, basınç kapasitesi deney düzeneği kapasitesine yakın veya onu aşan kapasite değerlerini vermelidir. (ii) BEÇÇ'nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan elemanlarda meydana gelen kaymaların 0,3 mm'nin altında kalması, (iii) BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasman değerlerinin 7 mm'nin altında kalması, (iiii) ÇE'nin poisson etkisi ile enine genişlemesi sonucu oluşan BEM yan yüzey deplasmanların ise 3 mm'nin altında kalması beklenmektedir.

4.1. Deney Elemanı 1'e Ait Bulgular

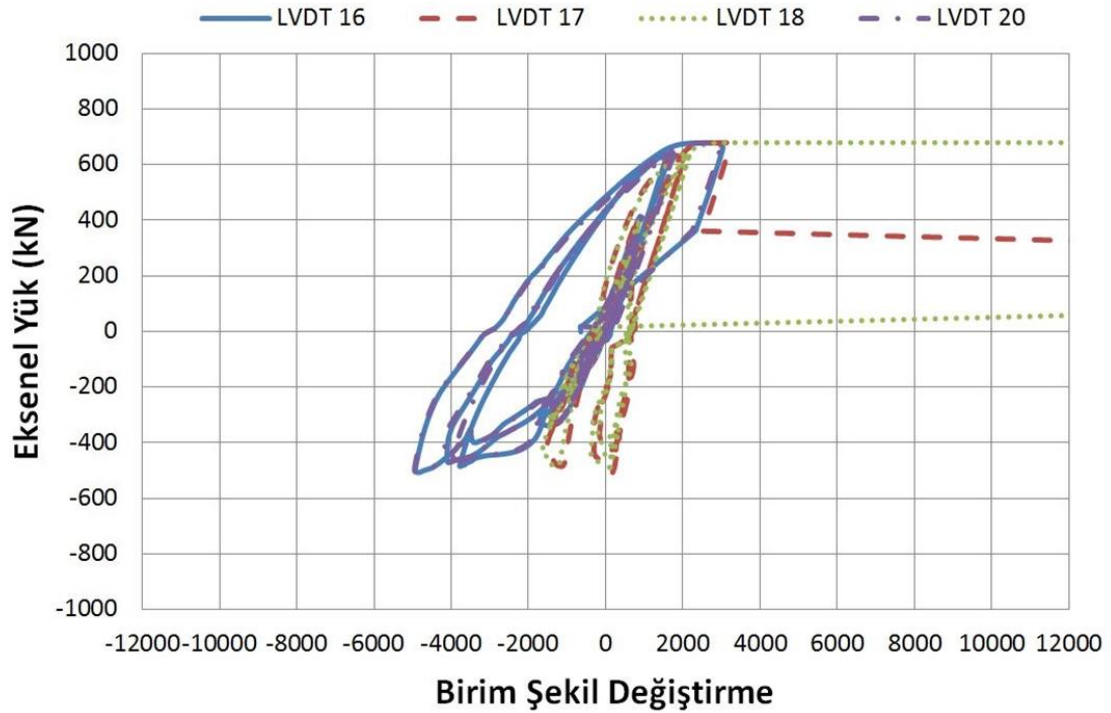
Deney elemanı 1'in BEM'i prekast beton blokların, ÇE üzerinde gijon ve ankraj milleri vasıtasıyla birleştirilmesi ile oluşmaktadır. Bu elemanın eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere BEÇÇ'den beklenen histerik davranışı sağlanamamıştır. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere deney elemanı 1'in çekme ve basınç kapasiteleri sırası ile 678,7 ve 507,2 kN'dur. Bu sonuçlara göre basınç kapasitesi düzeltme çarpanı (β) 0,74 çıkmıştır. Bölüm 2.1'de belirtildiği üzere FEMA 450 standardı, basınç kapasitesi düzeltme çarpanının 1'den küçük olamayacağını belirtmektedir. Bunun nedeni maksimum $P_{\text{basınç}}$ değerinin her zaman maksimum $P_{\text{çekme}}$ 'den büyük olması gerektiğidir. AISC/SEAOC şartnamesi ise bu değer 1,3'den küçük olması gerektiğini belirtmektedir. Yani bu şartnamelere göre bu değer 1 ile 1,3 arasında olması gerekmektedir. Bu elemanın sonuçlarından elde edilen 0.74 değeri FEMA 450 şartnamesinin belirttiği değerden küçüktür.

Statik benzeri deney sürecinin ilk aşamalarından itibaren BEM'in uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda çatlamlar meydana gelmiştir. Bunun nedeni, ÇE'de meydana gelen lokal burkulmaların, prekast beton bloklar tarafından engellenemeyerek hasara uğramalarıdır. İlerleyen deplasman değerlerinde prekast beton bloklarda meydana gelen çatlamlar genişleyerek prekast beton blokların ortadan kırılmasına neden olmuştur. Bu aşamadan sonra BEM, ÇE'ye yeterli stabiliteyi sağlayamayacağı için deney sonlandırılmıştır. Ayrıca prekast beton blokların bağlantısında kullanılan ankraj milleri, pistonun uyguladığı eksenel yük sonucu ÇE'de oluşan burkulmayı karşılayamamış ve BEÇÇ'nin tamamında global burkulma meydana gelmiştir.



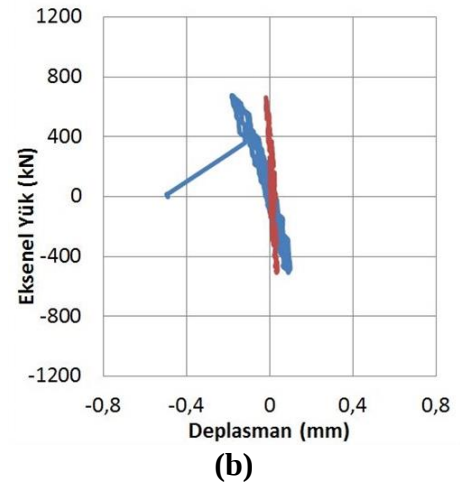
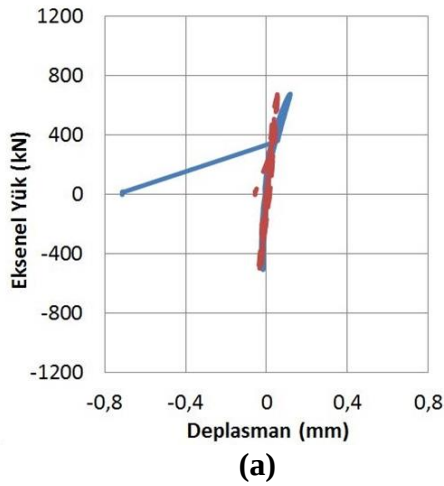
Şekil 4.1. Deney elemanı 1'e ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen veriler ile ÇE’nin eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Yukarıda belirtildiği üzere ÇE’nin plastik kısmının orta açıklığında 4 adet gerinim pulu yer almaktadır. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere ÇE’nin plastik bölgesinde beklenen histerik davranış sağlanamamıştır. Bunun nedeni prekast betonarme blokların deneyin ilk aşamalarından itibaren ÇE’ye stabilite sağlayamamış olması ve ÇE’nin burkularak BEM’e temas etmesi sonucunda ÇE ile BEM arasında sürtünme kuvvetleri nedeni ile yük transferinin oluşmasıdır.



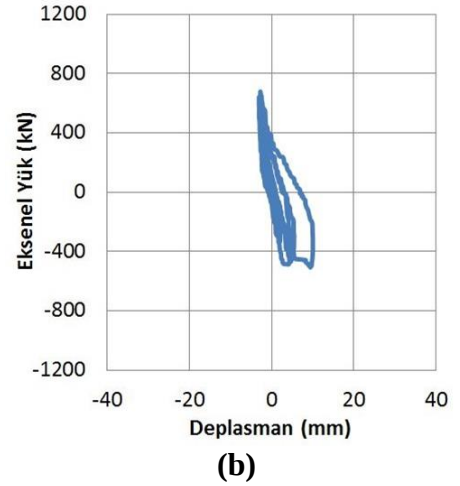
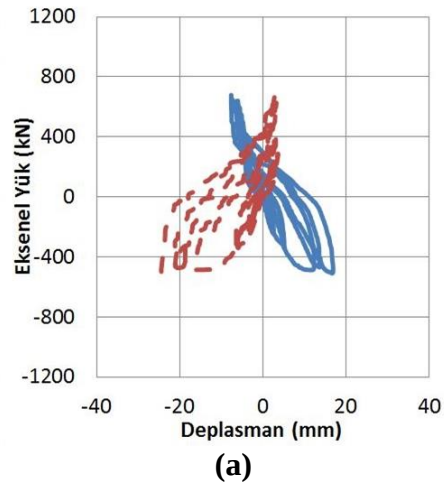
Şekil 4.2. ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (10^{-6}) (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.3’de BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan bulon ve bağlantı levhalarındaki kayma miktarları görülmektedir. Şekil 4.3.a BEÇÇ’nin piston tarafındaki (güney) ucunun kayma miktarını gösterirken, Şekil 4.3.b çelik destek ucundaki (kuzey) kayma miktarlarını göstermektedir. Deney elemanı 1’in her iki ucunda da önemli miktarda kayma görülmemektedir. BEÇÇ güney ucunda, basınç durumunda maksimum 0,1 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda maksimum 0,057 mm kayma meydana gelmiştir. BEÇÇ kuzey ucunda ise basınç durumunda maksimum 0,097 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda 0,02 mm kayma meydana gelmiştir. Bu kayma değerleri uygulanan deplasman değerlerine oranla çok düşük olmaları nedeni ile BEÇÇ uçlarında kayma meydana gelmediği söylenebilir.



Şekil 4.3. a) Güney ucu bulon kayma değeri; **b)** Kuzey ucu bulon kayma değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

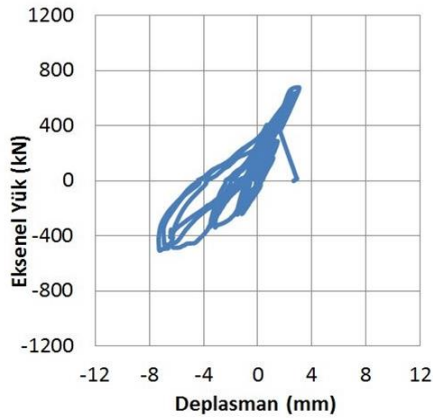
Şekil 4.4’de, Deney elemanı 1’in BEM’ine ait deplasman değerleri görülmektedir. BEM’in güney ucunda maksimum 24,44 mm deplasman görülürken kuzey ucunda maksimum 10 mm deplasman gözlemlenmiştir. Bu deplasmanların nedeni ÇE’de meydana gelen lokal burkulmalar sonucunda BEM’in ucunda yer alan Prekast betonarme blokların düşey hareketidir. Ayrıca global burkulmanın da bu düşey hareket üzerinde etkisi vardır. Şekil 4.4’de görülen deplasman miktarları beklenenin üzerindedir ve BEM mekanizması tasarımında yeniliğe gidilmesi gerektiğini göstermektedir.



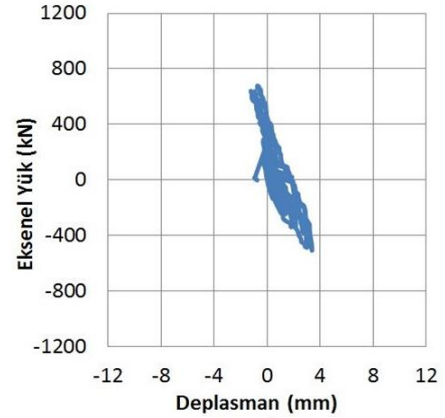
Şekil 4.4. a) BEM güney ucu deplasman değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır); **b)** BEM kuzey ucu deplasman değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.5’de basınç durumunda Poisson etkisi ile ÇE’nin enine genişlemesi sonucunda BEM’in yan yüzeylerinde meydana gelen deplasman değerleri görülmektedir. BEM yan yüzeyi güney ucunda maksimum 3 mm, kuzey ucunda ise 3,6

mm deplasman gözlemlenmiştir. Bu deplasman değerleri düşey deplasman değerlerine oranla düşük olmasına rağmen beklenenin üzerindedir.



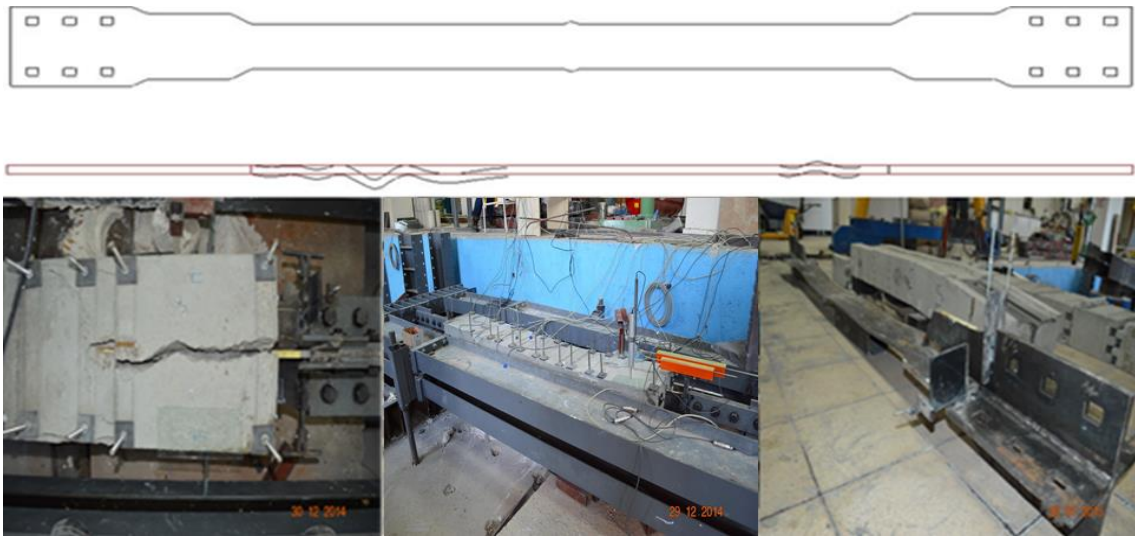
(a)



(b)

Şekil 4.5. a) BEM yan yüzeyi güney ucu deplasmanı; **b)** BEM yan yüzeyi kuzey ucu deplasmanı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Statik benzeri deney sonucunda BEÇÇ’de lokal ve global burkulmalar tespit edilmiştir. Bu eleman deneyinde yükleme protokolünün ilk adımlarında BEÇÇ uç bloklarında ÇE’den kaynaklanan ve beton bloklarda oluşan eğilme istemleri beton blokların çatlamasına sebep olmuştur. Beton bloklarda meydana gelen kılcal çatlakların daha da genişlemesi ile BEM özelliğini yitiren beton bloklar ÇE’ye yeterli stabiliteyi sağlayamamıştır. Ayrıca BEM üzerinde yer alan LVDT ve gerinim pullarının verileri incelendiğinde BEM’de önemli miktarda deplasman olduğu görülmüştür. Bu aşamadan sonra Şekil 4.6’da görüldüğü üzere ÇE’de meydana gelen burkulmaların tespiti amacı ile BEÇÇ elemanının BEM’i ortadan ikiye ayrılmıştır. Deney elemanı 1’in ÇE’sinde büyük dalgalar halinde burkulmalar tespit edilmiştir. Burkulmalar ÇE’nin plastik yüzeyi boyunca olup elastik bölgede burkulma gözlemlenmemiştir.

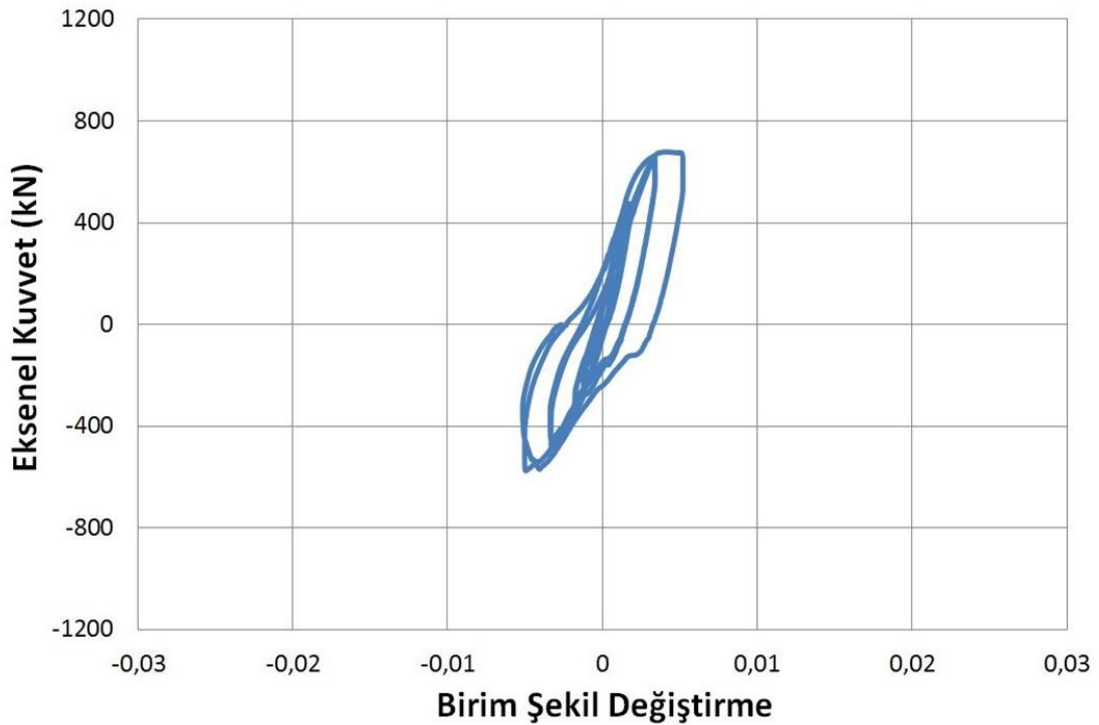


Şekil 4.6. Deney elemanı 1’de meydana gelen burkulmalar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

4.2. Deney Elemanı 2'ye Ait Bulgular

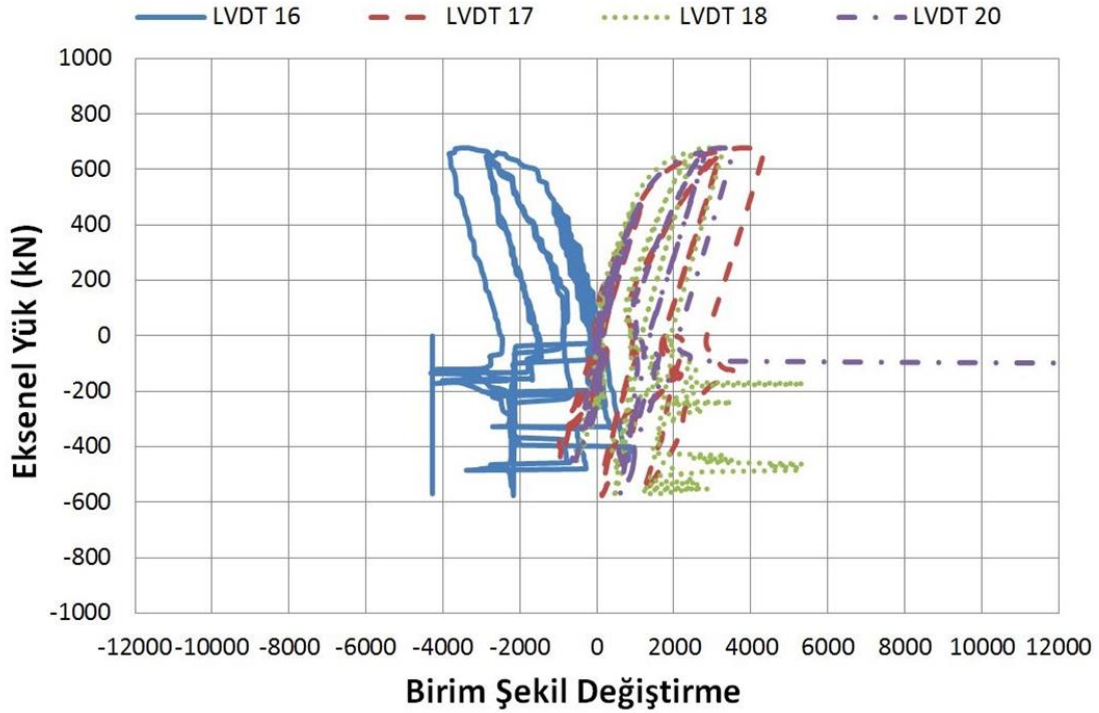
Deney elemanı 1'in BEM'in de meydana gelen hasarlardan sonra deney elemanı 2'nin BEM'in de revizyona gidilmesine karar verilmiştir. Bu amaçla oluşturan prekast betonarme bloklara donatı eklenmesine karar verilmiştir. Eklenen donatılar $\phi 8$ donatılardan imal edilen ızgaradır. Bu ızgara ile BEM'in uç kısımlarında bulunan prekast betonarme bloklarında meydana gelen çatlama ve kırılma hadiselerinin önüne geçilmek hedeflenmiştir.

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere deney elemanı 2, deney elemanı 1'e göre daha iyi bir histerik davranış göstermiştir. Ancak beklenen histerik davranış bu elemenda da sağlanamamıştır. Çizelge 4.1'de belirtildiği üzere maksimum çekme ve basınç kapasiteleri sırası ile 678 kN ve 576 kN'dur. Bu değerlere göre basınç kapasitesi düzeltme çarpanı 0,85 çıkmıştır. Bu değer hem AISC/SEAOC hem de FEMA 450 şartnamelerinin belirttiği değerlerden küçüktür. Statik benzeri deney sırasında meydana gelen büyük miktarda global burkulma nedeni ile 1000 kN'luk deney düzeneği kapasitesine ulaşılmadan deney durdurulmuştur. Global burkulmanın nedeni prekast betonarme bloklarda meydana gelen çatlamlar ve özellikle prekast betonarme blokların dışlarında meydana gelen hasarlar olduğu düşünülmektedir. Ayrıca BEM boyunca kullanılan ankraj millerinin de ÇE'de meydana gelen burkulmayı karşılayamayarak eğildiği tespit edilmiştir.



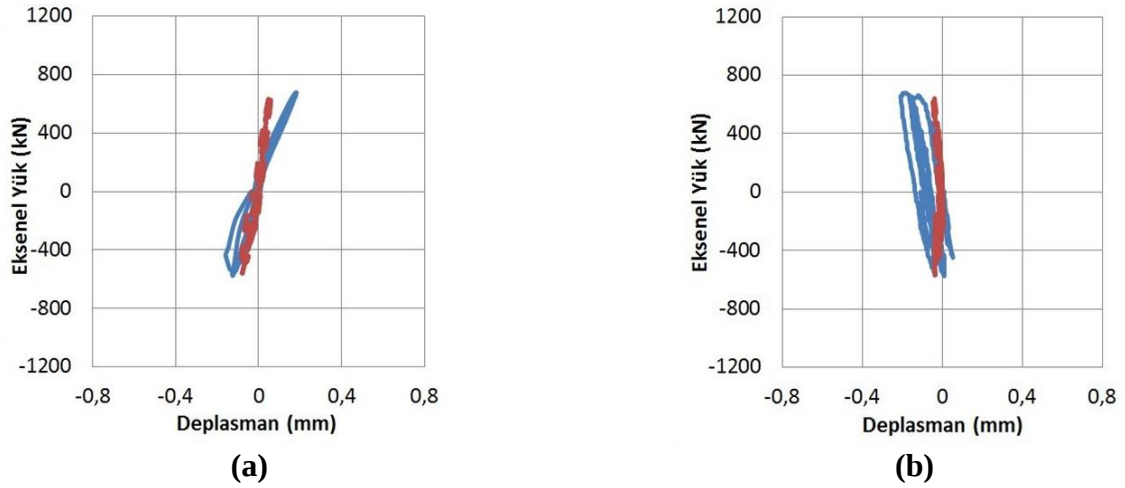
Şekil 4.7. Deney elemanı 2'ye ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen veriler ile ÇE’nin eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere ÇE’den beklenen histerik davranış sağlanamamıştır. Bunun nedeni prekast betonarme blokların deneyin ilk aşamalarından itibaren ÇE’ye stabilite sağlayamamış olması ve ÇE’nin burkularak BEM’e temas etmesi sonucunda ÇE ile BEM arasında sürtünme nedeni ile kuvvet aktarımının oluşmasıdır.



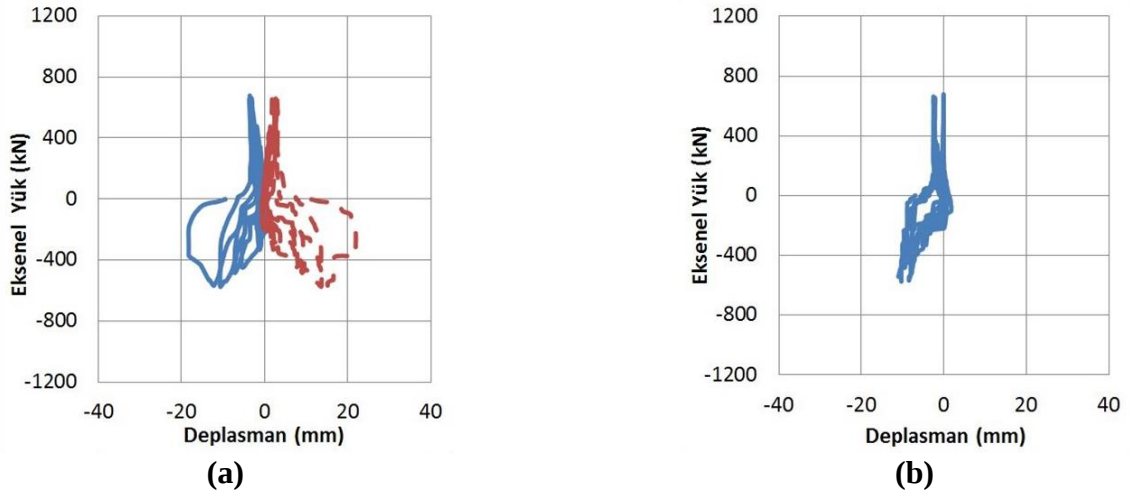
Şekil 4.8. ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (10^{-6}) (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.9’de BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan bulon ve bağlantı levhalarındaki kayma miktarları görülmektedir. Deney elemanı 2’nin her iki ucunda da önemli miktarda kayma görülmemektedir. BEÇÇ güney ucunda, basınç durumunda maksimum 0,18 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda maksimum 0,15 mm kayma meydana gelmiştir. BEÇÇ kuzey ucunda ise basınç durumunda maksimum 0,05 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda 0,02 mm kayma meydana gelmiştir. Bu kayma değerleri uygulanan deplasman değerlerine oranla çok düşük olmaları nedeni ile BEÇÇ uçlarında kayma meydana gelmediği söylenebilir.



Şekil 4.9. a) Güney ucu bulon kayma değeri; **b)** Kuzey ucu bulon kayma değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

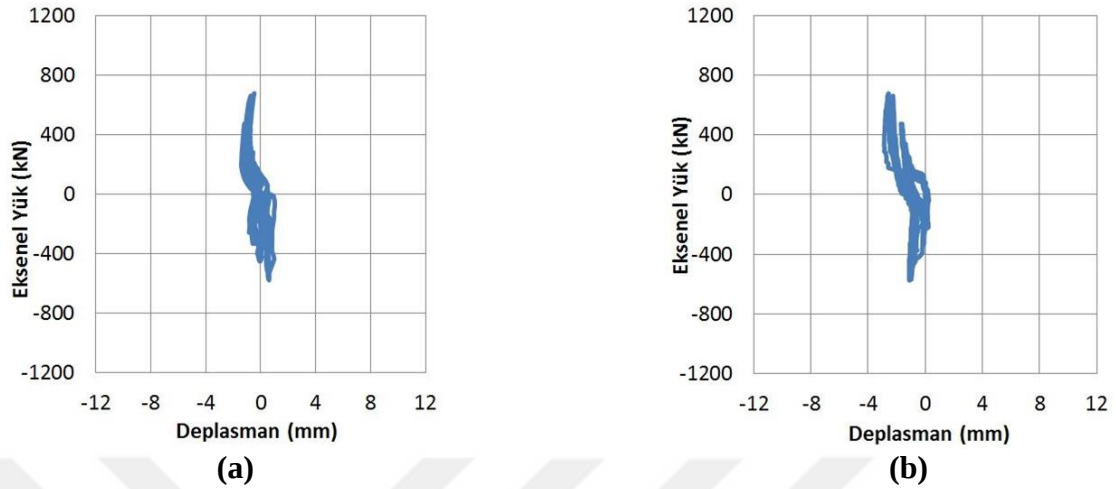
Şekil 4.10’de, deney elemanı 2’nin BEM’ine ait deplasman değerleri görülmektedir. BEM’in güney ucu yukarı hareketinde maksimum 22 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde maksimum 18,93 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM’in kuzey ucunda ise yukarı doğru hareketinde maksimum 1,8 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde 11 mm deplasman gözlemlenmiştir. Deplasman miktarlarını yüksek çıkmasının nedeni deney elemanı 2’de meydana gelen global burkulmadır. Şekil 4.10’de görülen deplasman miktarları beklenenin üzerindedir ve BEM mekanizması tasarımında yeniliğe gidilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.10. a) BEM güney ucu deplasman değeri; **b)** BEM kuzey ucu deplasman değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.11’de basınç durumunda ÇE’nin Poisson etkisi ile enine genişlemesi sonucunda BEM’in yan yüzeylerinde meydana gelen deplasmanlar görülmektedir. BEM yan yüzeyi güney ucunda maksimum 1,4 mm, kuzey ucunda ise maksimum 2,5 mm

deplasman gözlemlenmiştir. Bu deplasman değerleri arzu edilen deplasman değerleri ile uyumludur.



Şekil 4.11. a) BEM yan yüzeyi güney ucu deplasmanı; **b)** BEM yan yüzeyi kuzey ucu deplasmanı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Statik benzeri deney sonucunda BEÇÇ’de global burkulma tespit edilirken lokal burkulmalar yok denecek kadar azdır. Ayrıca BEM üzerinde yer alan LVDT ve gerinim pullarında elde edilen veriler incelendiğinde BEM’de önemli miktarda deplasman olduğu görülmüştür. Şekil 4.12’de görüldüğü üzere deney elemanı 2’de sınırlı lokal burkulmalar meydana geldiği için BEM’in uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda düşük miktarda hasar meydana gelmiştir. Bu hasarların özellikle dışlarda meydana gelmiş olması nedeni ile dışların donatılar ile güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Beton blokların içine eklenen donatılar, beton bloklarda meydana gelen çatlakları sınırlandırılmıştır. Ancak beton bloklarda meydana gelen global eğilme kontrol edilememiştir. Bu aşamadan sonra Şekil 4.12’de görüldüğü üzere ÇE’de meydana gelen burkulmanın tespiti amacı ile BEÇÇ elemanının BEM’i ortadan ikiye ayrılmıştır. Deney elemanı 2’nin ÇE’sinde büyük bir dalga halinde burkulma tespit edilmiştir. Burkulma ÇE’nin plastik yüzeyi boyunca olup elastik bölgede burkulma gözlemlenmemiştir.

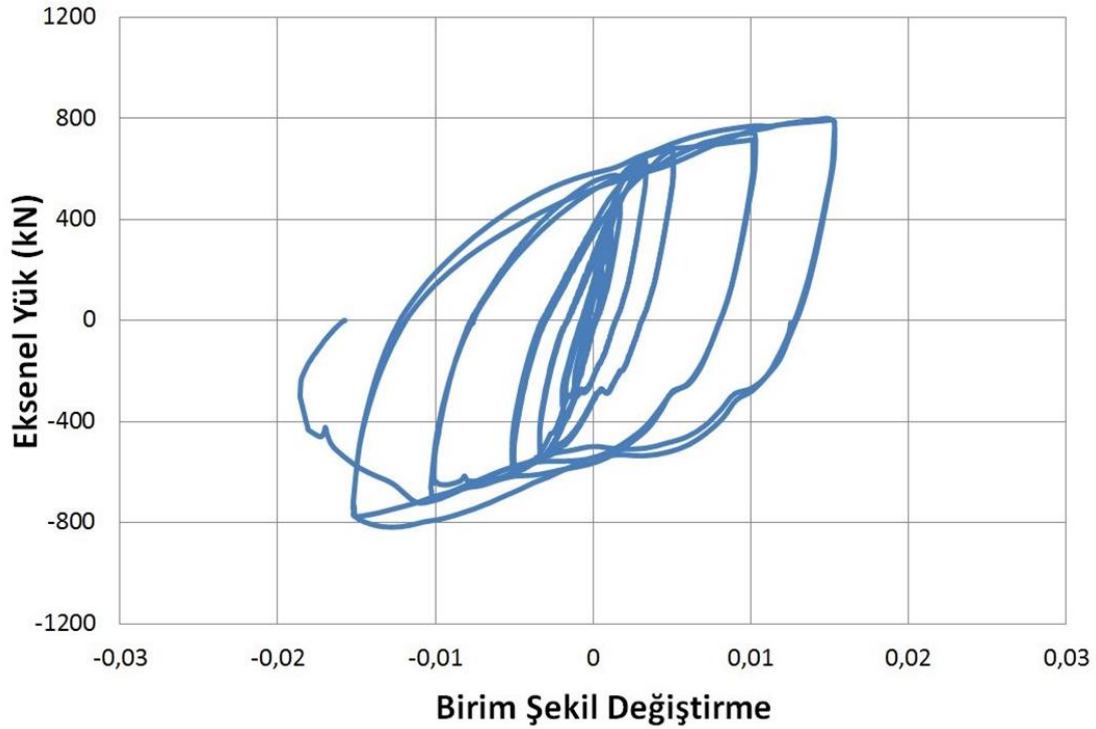


Şekil 4.12. Deney elemanı 2’de meydana gelen global burkulma (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

4.3. Deney Elemanı 3'e Ait Bulgular

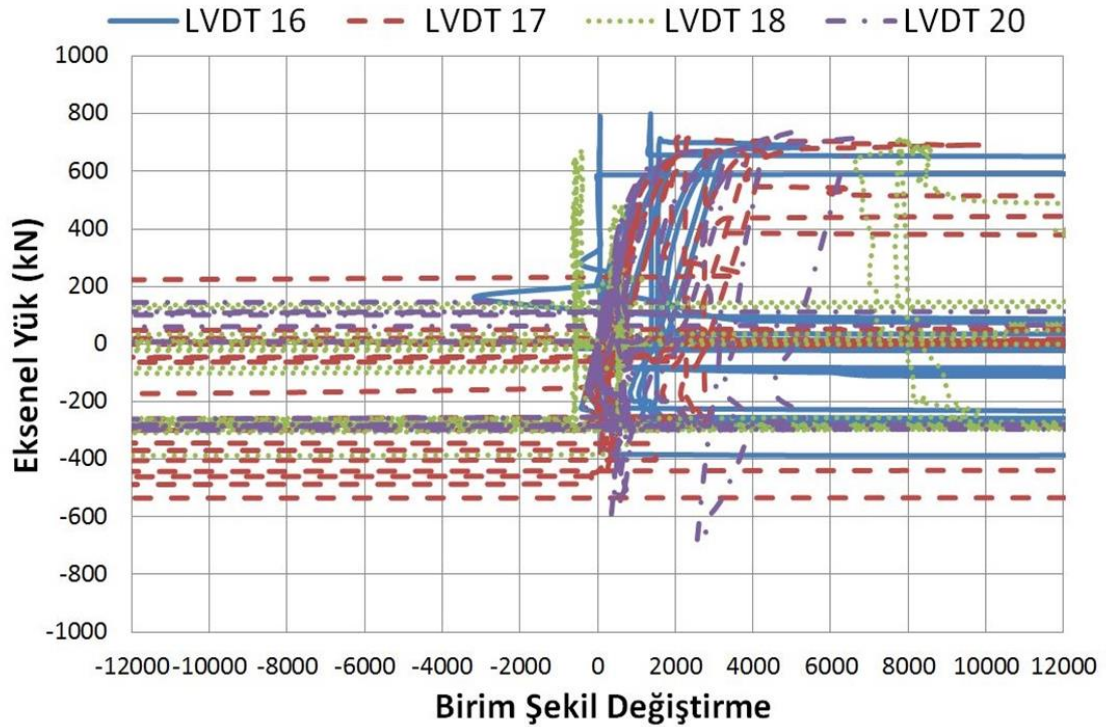
Deney elemanı 2'de meydana gelen hasarlar, şiddetli global burkulma, BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda çatlama ve prekast betonarme blokların dışlarında kırılmalarıdır. Deney elemanı 3'de bu hasarların önüne geçebilmek amacı ile BEM boyunca yer alan ankraj mili sayısı 4'den 8'e çıkarılmış, BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklardaki gijon sayısı arttırılmış ve prekast betonarme blokların dış kısımlarına donatı eklenmiştir. BEM'de yapılan bu yeniliklerle, Şekil 4.13'de görüldüğü üzere deney elemanı 3'ün histerik davranışı deney elemanı 2'ye oranla iyileştirilmiştir. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere sırası ile maksimum çekme ve basınç kapasiteleri 800 kN ve 818 kN'dur. Bu değerlere göre basınç kapasitesi düzeltme çarpanı (β) 1,02 çıkmaktadır. Bu değer hem AISC/SEAOC hem de FEMA 450 şartnameleri ile uyumludur.

Statik benzeri deney sonrası BEÇÇ elemanı incelendiğinde global burkulmanın büyük ölçüde engellendiği görülmüştür. Ancak meydana gelen lokal burkulmalar nedeni ile deney, sistem performansı olan 1000 kN'a ulaşmadan sonlandırılmıştır. Deneye elemanı 3 incelendiğinde özellikle BEM'in kuzey ucunda şiddetli hasar tespit edilmiştir. BEM'in güney ucunda ise çatlama meydana geldiği görülmüştür. BEM uç bölgelerinde meydana gelen hasarlara, ÇE'nin lokal burkulmasına ek olarak ankraj millerinin birbirleri ile koordinasyonsuz çalışmasının neden olduğu düşünülmektedir. Ancak bu elemanda ilk iki elemana oranla çok daha stabil bir davranış gözlemlenmiştir. Bir sonraki eleman için BEM'in donatı ve ankraj milleri ile daha çok desteklenmesine karar verilmiştir.



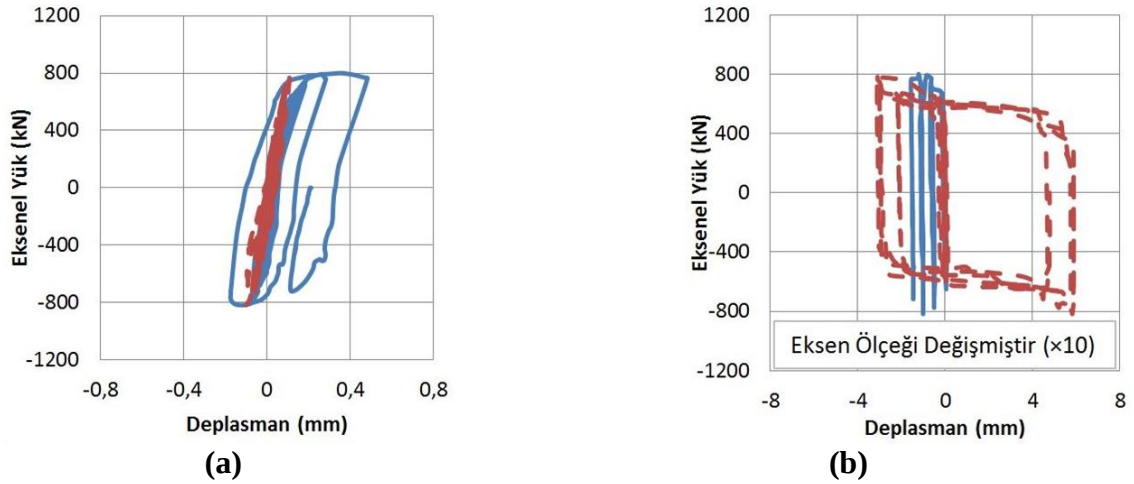
Şekil 4.13. Deney elemanı 3'e ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.14’de görüldüğü üzere ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen veriler ile ÇE’nin eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Şekil 4.14’de görüldüğü üzere ÇE’den beklenen histerik davranış sağlanamamıştır. Bunun nedeni ÇE’nin burkularak BEM’e temas etmesi sonucunda ÇE ile BEM arasında sürtünme nedeni ile kuvvet aktarımının oluşmasıdır. BEÇÇ’nin çekme ve basınç kapasitesi artış göstermiş olsa da BEM, sistem kapasitesine ulaşıncaya kadar ÇE’ye yeterli stabiliteyi sağlayamamıştır.



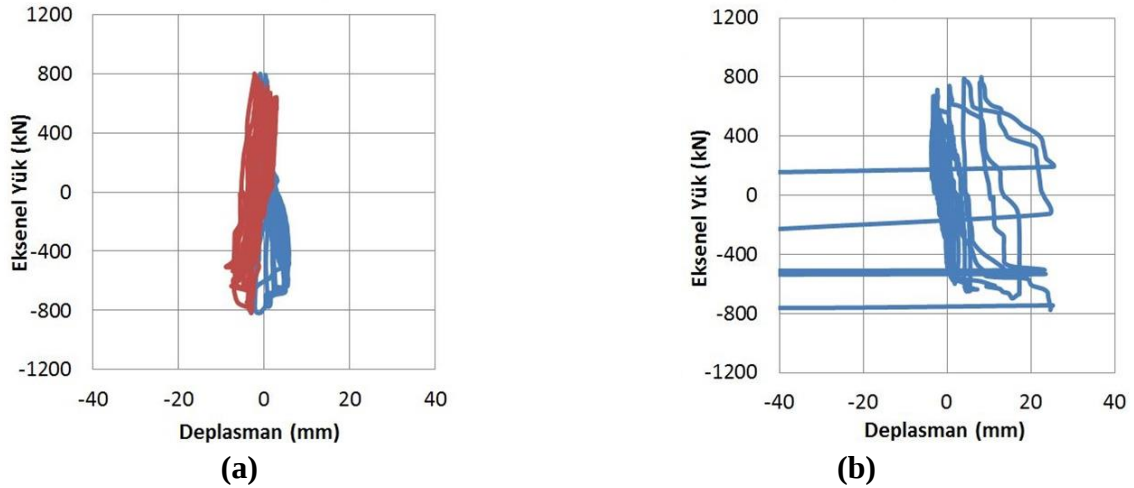
Şekil 4.14. ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (10^{-6}) (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.15’de BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan bulon ve bağlantı levhalarındaki kayma miktarları görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere deney elemanı 3’ün her iki ucunda da önemli miktarda kayma meydana gelmiştir. BEÇÇ güney ucunda, basınç durumunda maksimum 0,2 mm kayma meydana gelirken, çekme durumunda maksimum 0,5 mm kayma meydana gelmiştir. BEÇÇ kuzey ucunda ise basınç durumunda maksimum 3,12 mm kayma meydana gelirken, çekme durumunda 5,88 mm kayma meydana gelmiştir. Özellikle BEÇÇ kuzey ucunda kayma değerleri beklenenin oldukça üzerindedir. Bunun nedeni BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan bulon, somun ve rondelaların hasar görmüş olması ve BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlanması sırasında yanlışlıkla yüksek dayanımlı bulonlar yerine normal bulonların kullanılmasıdır. Bu nedenle bir sonraki deneyde bulonların yeni yüksek dayanımlı bulonlar ile değiştirilmesine karar verilmiştir. Ancak piston deplasman değerlerini okuyan 300’lük LVDT’nin burkulması engellenmiş plastik ve elastik bölgeden ölçüm alması, bu kayma değerlerinin deplasman değerlerini etkilemesini önlemiştir.



Şekil 4.15. a) Güney ucu bulon kayma değeri; **b)** Kuzey ucu bulon kayma değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

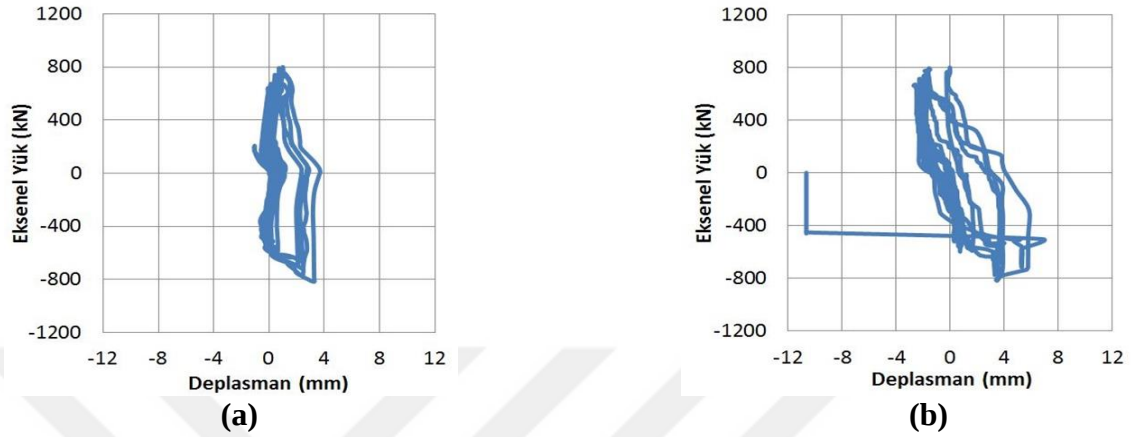
Şekil 4.16’de, deney elemanı 3 BEM’ine ait deplasman değerleri görülmektedir. BEM’in güney ucu yukarı hareketinde maksimum 5,9 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde maksimum 8,8 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM’in kuzey ucunda ise yukarı doğru hareketinde maksimum 25 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde 64 mm deplasman gözlemlenmiştir. Özellikle BEM kuzey ucunda deplasman miktarları oldukça yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda oluşan kırılmalar sonucunda BEM’in ÇE’ye yeterli stabiliteyi sağlayamamaya lokal burkulmaların oluşmasıdır.



Şekil 4.16. a) BEM güney ucu deplasman değeri; **b)** BEM kuzey ucu deplasman değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.17’de basınç durumunda ÇE’nin enine genişlemesi sonucunda BEM’in yan yüzeylerinde meydana gelen deplasmanlar görülmektedir. BEM yan yüzeyi güney ucunda maksimum 3,6 mm, kuzey ucunda ise maksimum 6,8 mm deplasman gözlemlenmiştir. Bu deplasman değerleri arzu edilenin üzerindedir. Özellikle BEM

kuzey ucunda meydana gelen deplasman değerleri oldukça yüksektir. Bunun nedeni BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda lokal burkulma sonucu meydana gelen hasardır. Buna bağlı olarak Poisson etkisi ile ÇE'nin enine genişlemesi kızak sistemini dışarıya doğru hareket ettirerek, BEM yan yüzeyinde meydana gelen hasarı arttırmıştır.



Şekil 4.17. a) BEM yan yüzeyi güney ucu deplasmanı; **b)** BEM yan yüzeyi kuzey ucu deplasmanı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

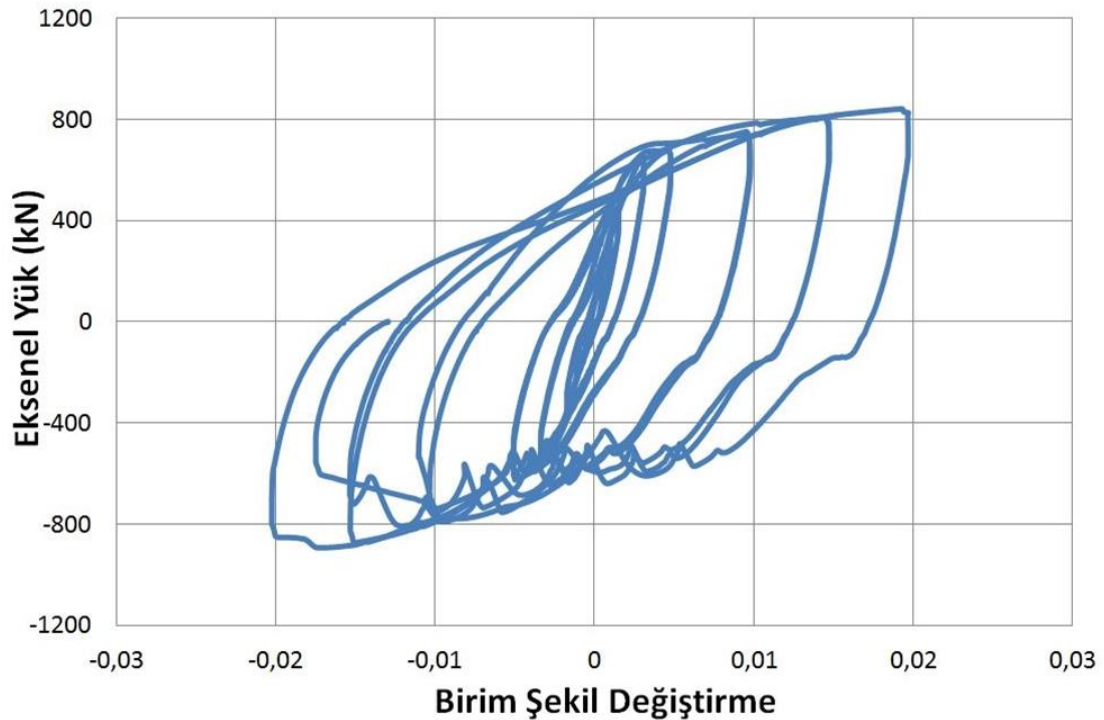
Statik benzeri deney sonucunda BEÇÇ'de global burkulma görülmez iken özellikle BEÇÇ kuzey ucunda lokal burkulmalar oldukça şiddetlidir. Ayrıca BEM üzerinde yer alan LVDT ve gerinim pullarından elde edilen veriler incelendiğinde BEM'de önemli miktarda deplasman olduğu görülmüştür. Şekil 4.18'de görüldüğü üzere deney elemanı 3 BEM'nin kuzey ucunda prekast betonarme bloklar ağır hasar görmüştür. Prekast betonarme blokların gijon bağlantı bölgeleri en çok hasarın tespit edildiği bölgelerdir. Bunun nedeninin millerin koordineli çalışmaması ve ÇE'nin burkulması ile birlikte ankraj mili pullarının olduğu bölgede gerilmelerin artması olduğu düşünülmektedir. Ankraj mili sayısının $4\phi 10$ 'dan $8\phi 10$ 'a çıkarılması ile global burkulma sınırlandırılmıştır. Şekil 4.18'de görüldüğü üzere ÇE'de meydana gelen burkulmanın tespiti amacı ile BEÇÇ elemanının BEM'i ortadan ikiye ayrılmıştır. Deney elemanı 3'ün ÇE'sinde yüksek dalgalar halinde lokal burkulmalar tespit edilmiştir. Burkulma ÇE'nin plastik yüzeyi boyunca olup elastik bölgede burkulma gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.18. Deney elemanı 3'de meydana gelen hasarlar

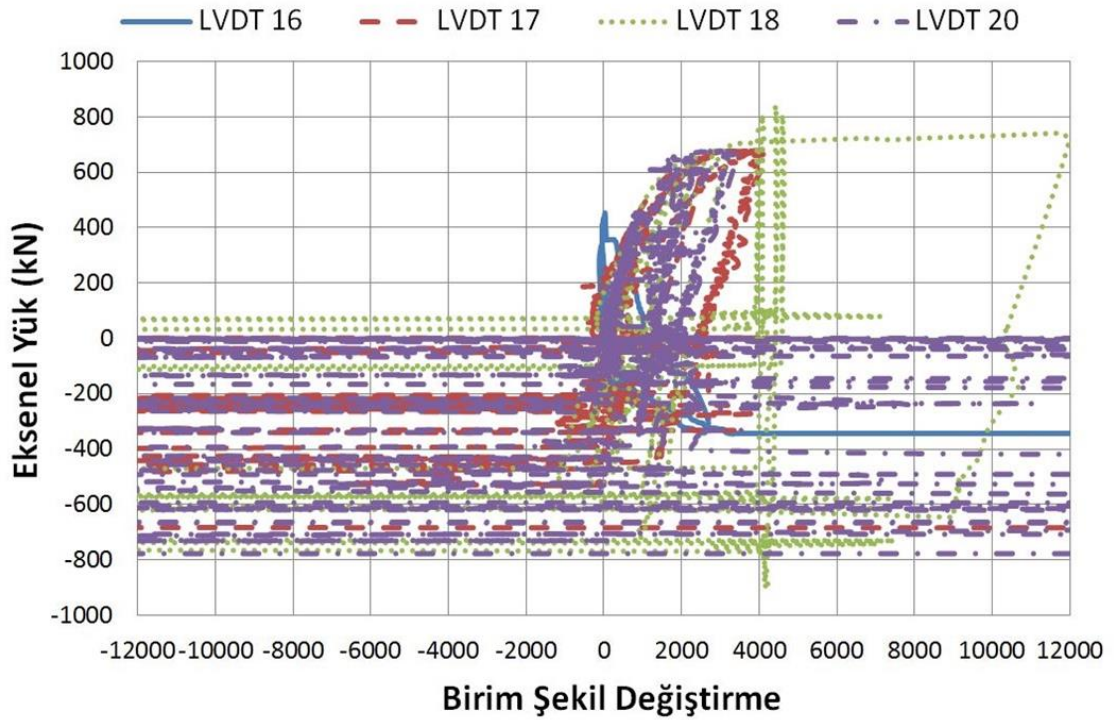
4.4. Deney Elemanı 4'e Ait Bulgular

Deney elemanı 3'ün BEM'inde meydana gelen şiddetli lokal burkulmaların engellenmesi amacı ile deney elemanı 4'de BEM boyunca yer alan ankraj millerinin sayısı 8'den 16'ya çıkarılmış ve çapı $\phi 10$ 'dan $\phi 14$ 'e arttırılmıştır. Ayrıca bu millerin her bir bölgede koordineli çalışması ve pulların yer aldığı bölgelerdeki hasarların azaltılması amacı ile aynı bölgedeki ankraj millerinde ortak pul kullanılmıştır. Böylece BEÇÇ'ye etkileyen aksel yük altında ÇE'de meydana gelecek lokal ve global burkulma miktarlarının düşürülmesi hedeflenmiştir. Şekil 4.19'de görüldüğü üzere deney elemanı 4'ün histerik davranışı diğer elemanlara göre daha iyidir. Ancak bu elemanda da beklenen performans elde edilememiştir. Ayrıca her çevrimin maksimum basınç kapasitesi değerinde beklenen stabilite sağlanamamıştır. Bunun nedeni prekast betonarme blok dişleri arasındaki boşluklar olduğu düşünülmektedir. BEÇÇ'ye etkileyen aksel yük ile ÇE burkulmakta, bunun sonucunda ÇE, BEM'e temas etmekte ve prekast betonarme blok dişleri arasındaki boşluklar nedeni ile BEM ÇE'ye istenilen stabiliteyi sağlayamamaktadır. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere deney elemanı 4 diğer elemanlara oranla daha yüksek maksimum çekme ve basınç kapasitesi değerleri vermiştir. Deney elemanı 4'ün maksimum çekme ve basınç kapasiteleri sırası ile 842 kN ve 893,9 kN'dur. Bu değerlere göre basınç kapasitesi düzeltme çarpanı (β) 1,06 çıkmıştır. Bu değer FEMA 450 ve AISC/SEAOC şartnamelerinin belirttiği değerler ile uyumludur.



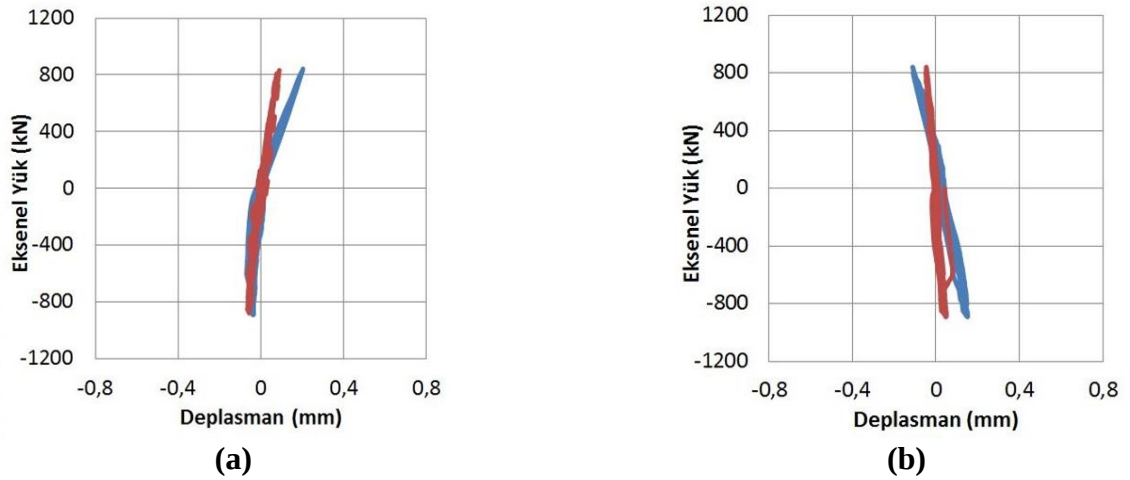
Şekil 4.19. Deney elemanı 4'e ait aksel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen veriler ile ÇE’nin eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Şekil 4.20’de görüldüğü üzere ÇE’den beklenen histerik davranış sağlanamamıştır. Bunun nedeni ÇE’nin burkularak BEM’e temas etmesi sonucunda ÇE ile BEM arasında sürtünme neden ile kuvvet aktarımının oluşmasıdır. BEÇÇ’nin çekme ve basınç kapasitesi artış göstermiş olsa da BEM, ÇE’ye yeterli stabiliteyi sağlayamamıştır.



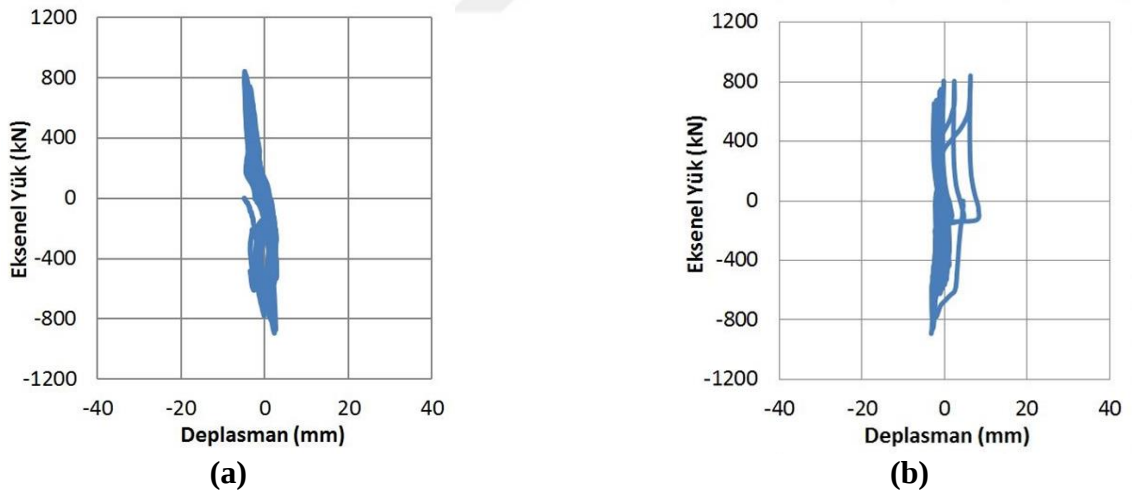
Şekil 4.20. ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (10^{-6}) (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.21’de BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan bulon ve bağlantı levhalarındaki kayma miktarları görülmektedir. Deney elemanı 4’ün her iki ucunda da önemli miktarda kayma görülmemektedir. BEÇÇ güney ucunda, basınç durumunda maksimum 0,2 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda maksimum 0,07 mm kayma meydana gelmiştir. BEÇÇ kuzey ucunda ise basınç durumunda maksimum 0,15 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda 0,08 mm kayma meydana gelmiştir. Bu kayma değerleri uygulanan deplasman değerlerine oranla çok düşük olmaları nedeni ile BEÇÇ uçlarında kayma meydana gelmediği söylenebilir. Bir önceki deneyde yanlışlıkla kullanılan normal bulonlar yerine bu deneyde yeni yüksek dayanımlı bulonların kullanılması bağlantıda kaymayı etkili bir şekilde engellediği tespit edilmiştir.



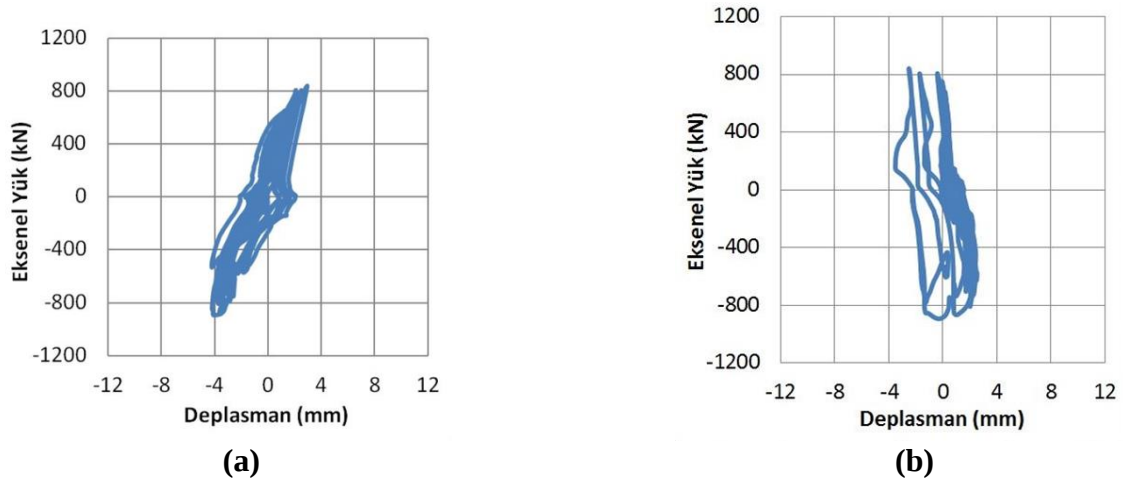
Şekil 4.21. a) Güney ucu bulon kayma değeri; b) Kuzey ucu bulon kayma değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.22’de, deney elemanı 4’ün BEM’ine ait deplasman değerleri görülmektedir. BEM’in güney ucu yukarı hareketinde maksimum 4,9 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde maksimum 2,9 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM’in kuzey ucunda ise yukarı doğru hareketinde maksimum 3,6 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde 3,2 mm deplasman gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre ÇE’de meydana gelen lokal burkulmalar önceki deneylere göre sınırlandırılmıştır. Bu nedenle BEM uç bölgelerinde beklenen deplasman seviyelerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.22. a) BEM güney ucu deplasman değeri; b) BEM kuzey ucu deplasman değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.23’de basınç durumunda Poisson etkisi ile ÇE’nin enine genişlemesi sonucunda BEM’in yan yüzeylerinde meydana gelen deplasmanlar görülmektedir. BEM yan yüzeyi güney ucunda maksimum 4,2 mm, kuzey ucunda ise maksimum 3,5 mm deplasman gözlemlenmiştir. Bu deplasman değerleri arzu edilen deplasman değerlerinin üzerindedir ve BEM yan yüzeylerinde çatlama ve betonda pul pul atmalar tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. a) BEM yan yüzeyi güney ucu deplasmanı; b) BEM yan yüzeyi kuzey ucu deplasmanı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Statik benzeri deney sonucunda BEÇÇ’de global ve lokal burkulmalar meydana gelmiş olsa da BEM üzerinde yer alan LVDT ve gerinim pullarından elde edilen veriler incelendiğinde BEM’de önemli miktarda deplasman oluşmadığı görülmüştür. Ancak BEM’de meydana gelen düşük miktarda deplasmanların nedeni ÇE’de meydana gelen lokal ve global burkulmalardır. Bu burkulmaların önüne ankraj milleri sayısının ve çaplarının artırılması ile geçilememiştir. Bunun nedeni burkulma sonucu ankraj millerinin esnek davranarak prekast betonarme bloklar arasındaki boşlukları giderememesidir. Bu nedenle deney elemanı 5’de prekast betonarme blok aralarının tamir harcı ile kapatılmasına karar verilmiştir. Ayrıca ankraj millerinde ortak pul kullanımı, pulların yer aldığı bölgelerdeki hasar miktarını düşürmüş ve gijonların daha koordineli ve stabil davranmasını sağlamıştır. Ancak prekast betonarme blokların hasar almasını engellemek amacı ile daha çok donatı kullanılması gerekmektedir. Bu durum da daha büyük boyutlarda BEM imalatına neden olmaktadır. Bu nedenle bundan sonraki elemanlarda BEM en kesiti 34×34 cm’den 38×38 cm’ye çıkarılmıştır. Ancak montaj kolaylığının sağlanması amacı ile prekast betonarme blok sayısı 14’den 18’e çıkarılarak prekast betonarme blok boyları düşürülmüştür.

Şekil 4.24’da görüldüğü üzere ÇE’de meydana gelen burkulmanın tespiti amacı ile BEÇÇ elemanının BEM’i ortadan ikiye ayrılmıştır. Deney elemanı 4’ün ÇE plastik bölgesi boyunca global burkulma görülmektedir. Ayrıca ÇE plastik bölge uçlarında kısa dalgalar halinde lokal burkulmalar tespit edilmiştir. ÇE ve BEM’de meydana gelen eğilme istemleri beton blokların çatlamasına neden olmuştur. Bu durumda BEM, ÇE’ye yeterli satbilite sağlayamamış ve BEÇÇ’nin eksenel yük kapasitesi piston kapasitesi değerine ulaşamamıştır. Hem global eğilme hem de beton bloklarda meydana gelen hasarlar sebebi ile BEÇÇ elemanı basınç yüklemesi altında eksenel rijitliğini kaybetmiştir. Burkulmalar ÇE’nin plastik yüzeyi boyunca olup elastik bölgede burkulma gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.24. Deney elemanı 4'ün ÇE'sinde meydana gelen burkulmalar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Statik benzeri deney sonrası BEÇÇ elemanı incelendiğinde global ve lokal burkulmalar nedeni ile BEM'de hasarlar meydana geldiği tespit edilmiştir. Hasarların yoğunlaştığı bölgeler BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklar (betonda çatlama ve patlamalar) ve BEM orta bölgesinde yer alan prekast betonarme bloklardır (betonda yoğun makro çatlaklar). BEM'de meydana gelen bu hasarlar nedeni ile BEM ÇE'ye yeterli stabilite sağlayamamış ve deney sistem performansı olan 1000 kN'a ulaşmadan sonlandırılmıştır. Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda BEM'in ilk aşamadan itibaren tasarımında değişikliğe gidilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

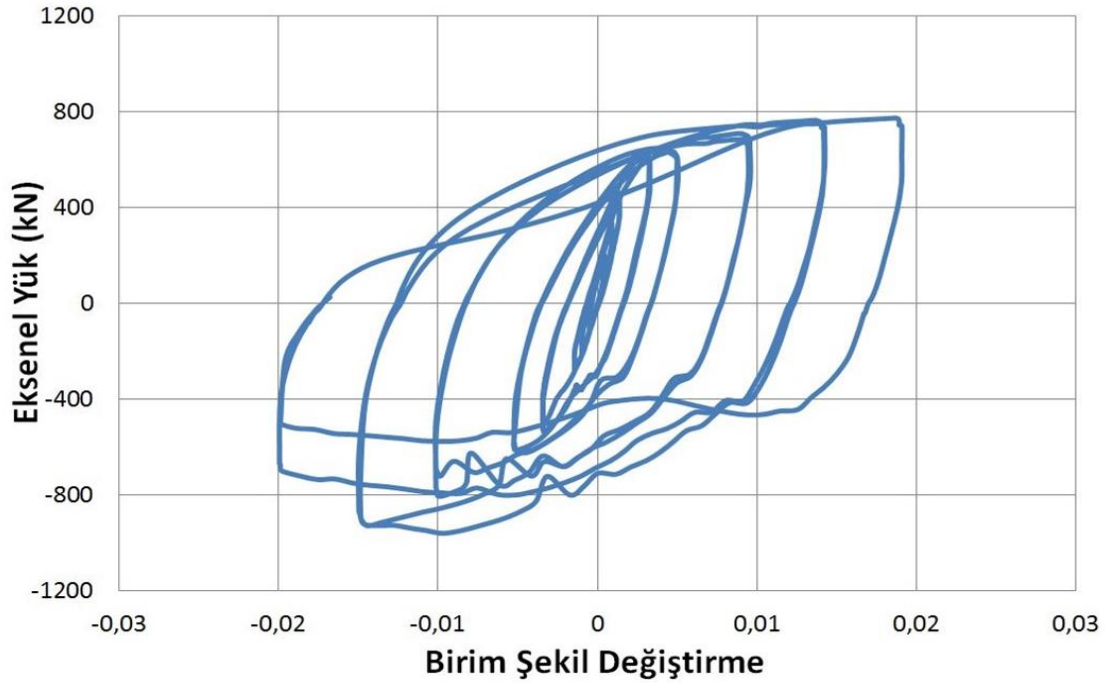


Şekil 4.25. Deney elemanı 4'ün BEM'inde meydana gelen hasarlar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

4.5. Deney Elemanı 5'e Ait Bulgular

Deney elemanı 5'den itibaren BEM tasarımında köklü değişikliklere gidilmiştir. Bu köklü değişikliklerden en önemlileri BEM en kesit alanının artırılmış olması ve BEM'de kullanılan prekast betonarme blok sayısının 14'den 18'e çıkarılmış olmasıdır. Ayrıca bu elemanda kullanılan donatı miktarı da diğer elemanlara göre oldukça fazladır. Deney elemanı 5'in imalatında prekast betonarme bloklarda $\phi 8$ ve $\phi 14$ çapında donatılardan elde edilen çift ızgara ve bu blokların montajında 16 $\phi 24$ ankraj milleri kullanılmıştır. Buna ek olarak deney elemanı 4'de belirtildiği üzere prekast betonarme bloklar arasında ki boşlukların giderilmesi amacı ile tamir harcı kullanılmıştır.

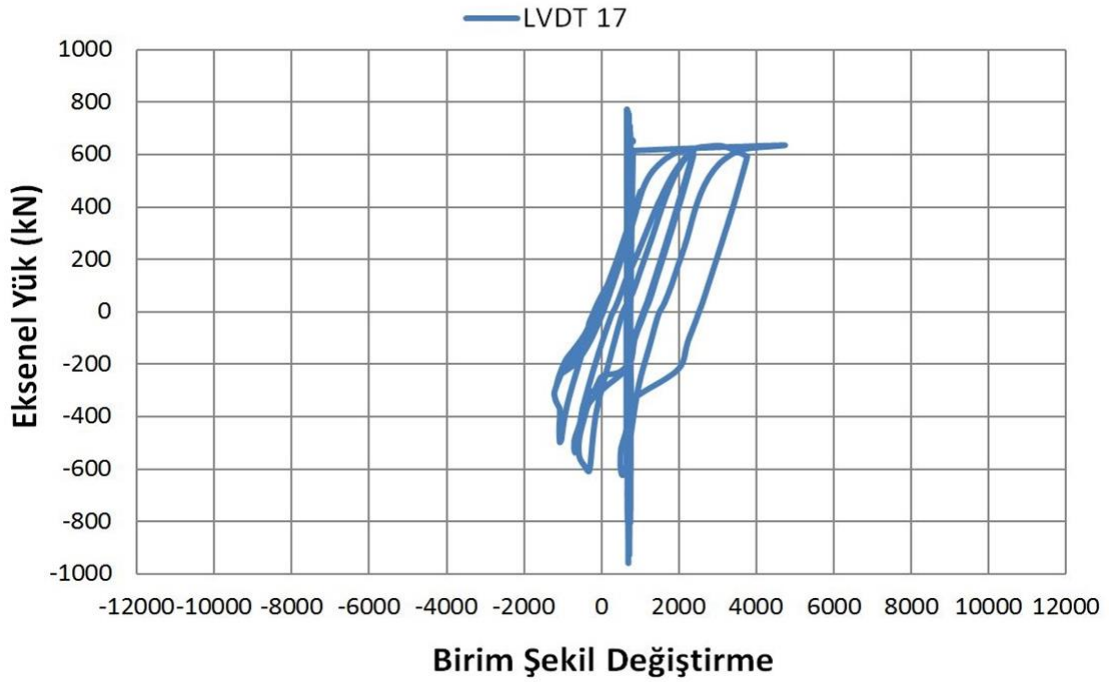
Şekil 4.26’da görüldüğü üzere deney elemanı 5’in histerik davranışı diğer elemanlara göre daha iyidir. Son çevrimde meydana gelen burkulmalar BEM’de hasara neden olmuş ve BEÇÇ stabilitesini kaybetmiştir. Ancak deney elemanı 5, son çevrime kadar oldukça iyi bir performans sergilemiştir. Prekast betonarme blokların arasındaki boşluklara yerleştirilen epoksi bazlı tamir harcı BEÇÇ’nin eksenel yük taşıma kapasitesini artırırken, her çevrimin maksimum değerlerinde BEÇÇ’ye daha stabil bir davranış sağlamıştır. Ayrıca prekast betonarme bloklarda kullanılan ızgara miktarının da, BEÇÇ yük taşıma kapasitesi artışında önemli etkisi vardır. Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere, deney elemanı 5 diğer elemanlara oranla daha yüksek eksenel basınç kapasitesi vermiştir. Çekme kapasitesi ise bir miktar düşmüştür. Ancak bu durumun basınç kapasitesi ve pekleşme düzeltme çarpanları üzerinde olumsuz bir etkisi mevcut değildir. Deney elemanı 5’in maksimum çekme ve basınç kapasiteleri sırası ile 772,6 kN ve 958,7 kN’dur. Bu değerlere göre basınç kapasitesi düzeltme çarpanı (β) 1,24 çıkmıştır. Bu değer FEMA 450 ve AISC/SEAOC şartnamelerinin belirttiği değerler ile uyumludur.



Şekil 4.26. Deney elemanı 5’e ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

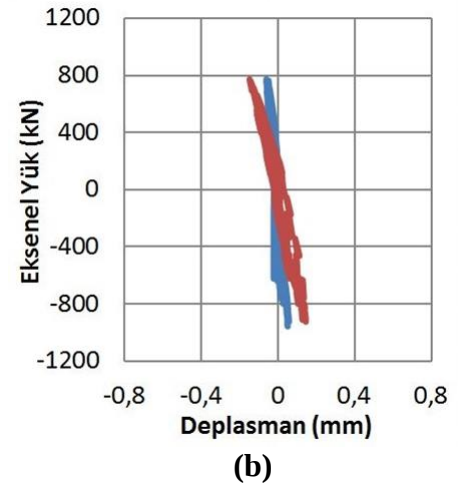
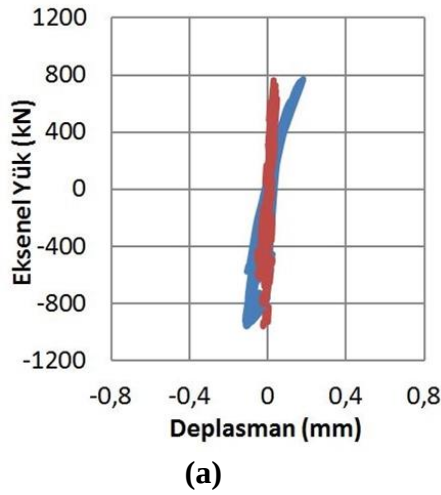
Deney elemanı 5’in üretimi sırasında meydana gelen hatalar nedeni ile ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından sadece birisinden (LVDT 17) veri alınabilmektedir. Şekil 4.27’de görüldüğü üzere ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pulundan elde edilen veriler ile ÇE’nin eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Şekil 4.27’de görüldüğü üzere ÇE’den beklenen histerik davranış diğer elemanlara göre daha iyi performans sergilemiş olsa da beklenen performans bu elemanda da sağlanamamıştır. Deney elemanı 5’de ÇE’nin diğer elemanlara göre daha iyi performans sergilemiş olmasının en büyük nedeni bağımsız ara yüzeyi sağlayan ahşap kalıplar yerine sac levhaların kullanılmış olmasıdır. Böylece prekast betonarme

bloklarda bağımsız ara yüzey boyunca daha düzgün bir yüzey elde edilmiş, dolayısı ile BEM ile ÇE arasında sürtünme nedeni ile oluşan yük transferi minimize edilmiştir. Ayrıca ahşap kalıpların karışım suyunu emerek şişmesi sonucunda oluşan daha büyük hacimli bağımsız ara yüzeyin önüne geçilmiştir. Deney elemanı 5'in basınç kapasitesinde artış görülürken çekme kapasitesinde düşüş görülmüştür. BEM'in yüzeylerinde meydana gelen hasarlar nedeni ile BEM ÇE'ye yeterli stabiliteyi sağlayamamıştır.



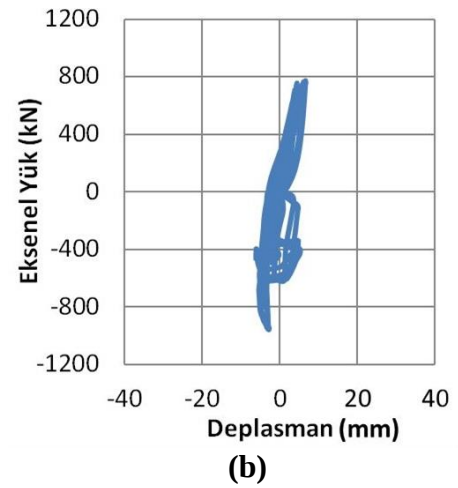
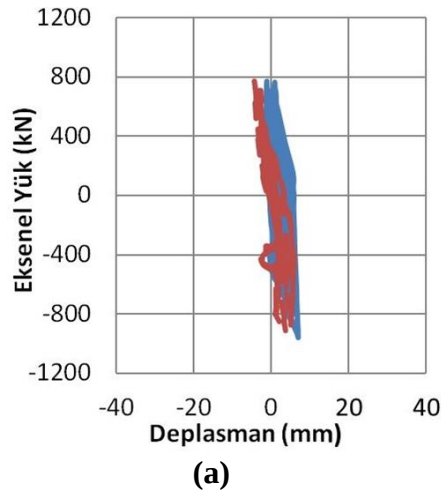
Şekil 4.27. ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pulundan elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (10^{-6}) (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.28'de BEÇÇ'nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan bulon ve bağlantı levhalarındaki kayma miktarları görülmektedir. Deney elemanı 5'in her iki ucunda da önemli miktarda kayma görülmemektedir. BEÇÇ güney ucunda, basınç durumunda maksimum 0,11 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda maksimum 0,18 mm kayma meydana gelmiştir. BEÇÇ kuzey ucunda ise basınç durumunda maksimum 0,15 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda 0,14 mm kayma meydana gelmiştir. Bu kayma değerleri uygulanan deplasman değerlerine oranla çok düşük olmaları nedeni ile BEÇÇ uçlarında kayma meydana gelmediği söylenebilir.



Şekil 4.28. a) Güney ucu bulon kayma değeri; **b)** Kuzey ucu bulon kayma değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

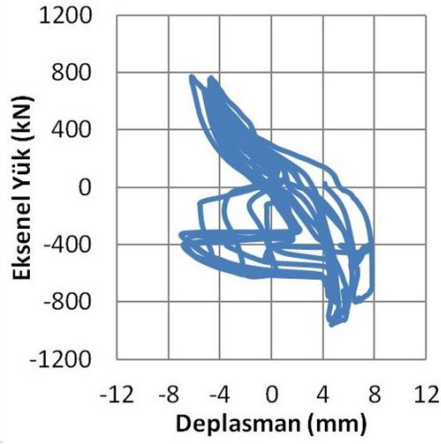
Şekil 4.29’da, deney elemanı 5 BEM’ine ait uç bölgelerinin deplasman değerleri görülmektedir. BEM’in güney ucu yukarı hareketinde maksimum 7 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde maksimum 4,3 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM’in kuzey ucunda ise yukarı doğru hareketinde maksimum 6,7 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde 6 mm deplasman gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre ÇE’de meydana gelen lokal burkulmalar önceki deneylere oranla sınırlandırılmış ve istenilen seviyeye düşürülmüştür.



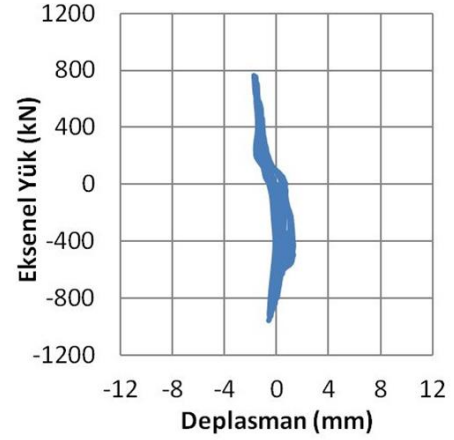
Şekil 4.29. a) BEM güney ucu deplasman değeri; **b)** BEM kuzey ucu deplasman değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.30’da basınç durumunda ÇE’nin enine genişlemesi sonucunda BEM’in yan yüzeylerinde meydana gelen deplasmanlar görülmektedir. BEM yan yüzeyi güney ucunda maksimum 7 mm, kuzey ucunda ise maksimum 1,7 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM yan yüzeyi güney ucunda meydana gelen deplasman değeri arzu

edilenin üzerindedir. Bunun nedeni eksenel basınç kuvveti altında Poisson etkisi ile ÇE'nin her iki yönde enine genişlemesidir.



(a)



(b)

Şekil 4.30. a) BEM yan yüzeyi güney ucu deplasmanı; **b)** BEM yan yüzeyi kuzey ucu deplasmanı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

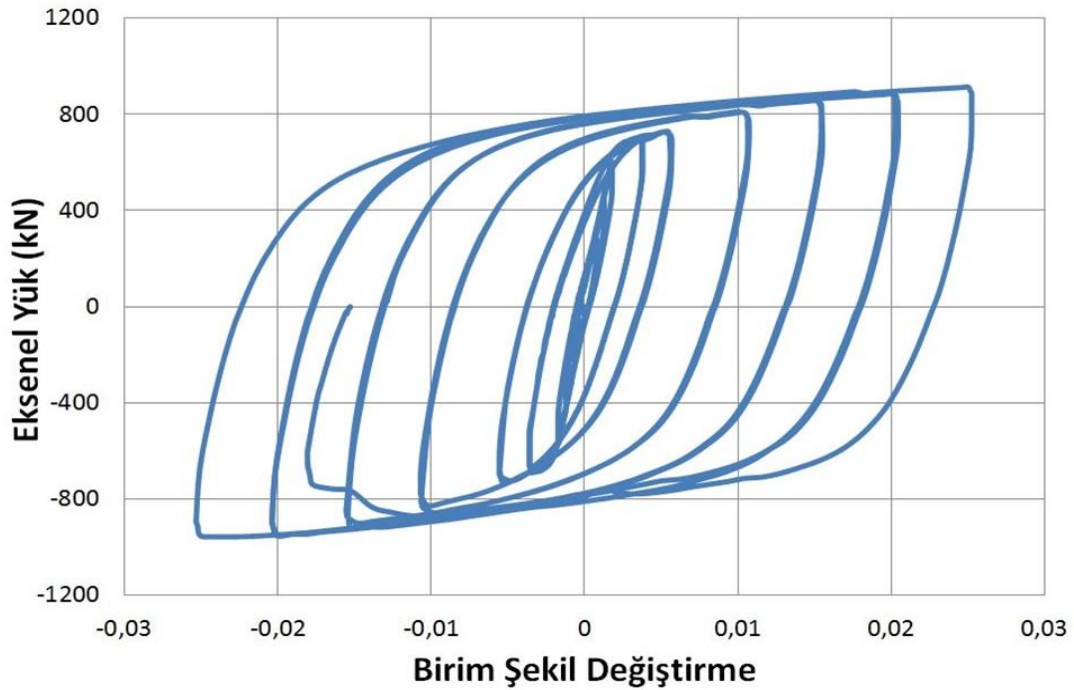
Statik benzeri deney sonucunda BEÇÇ'de global burkulmaya rastlanmazken lokal burkulmalar oldukça sınırlandırılmıştır. Ayrıca BEM üzerinde yer alan LVDT ve gerinim pullarından elde edilen veriler incelendiğinde BEM'deki hasarın önemli miktarda önlendiği görülmüştür. BEM'in uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme blokların üst yüzeylerinde kılcal çatlaklar tespit edilmişken, yan yüzeylerinde ÇE'nin enine genişlemesine bağlı BEM'de çatlama ve pul pul atmalar tespit edilmiştir. Bu nedenle bir sonraki elemanda bu bölgelerin kafes sistem ile güçlendirilmesine karar verilmiştir. Ayrıca ankarj mili çaplarının artırılmasının ve prekast betonarme bloklar arasına yerleştirilen epoksi bazlı tamir harcının BEÇÇ'nin stabilitesi üzerine oldukça önemli katkısı olmuştur. Bu elemanda kullanılan pul tasarımı ile BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme blokların pul bölgelerinde hasar meydana gelmesinin önüne geçilmiştir.



Şekil 4.31. Deney elemanı 5'in BEM'inde meydana gelen hasarlar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

4.6. Deney Elemanı 6'ya Ait Bulgular

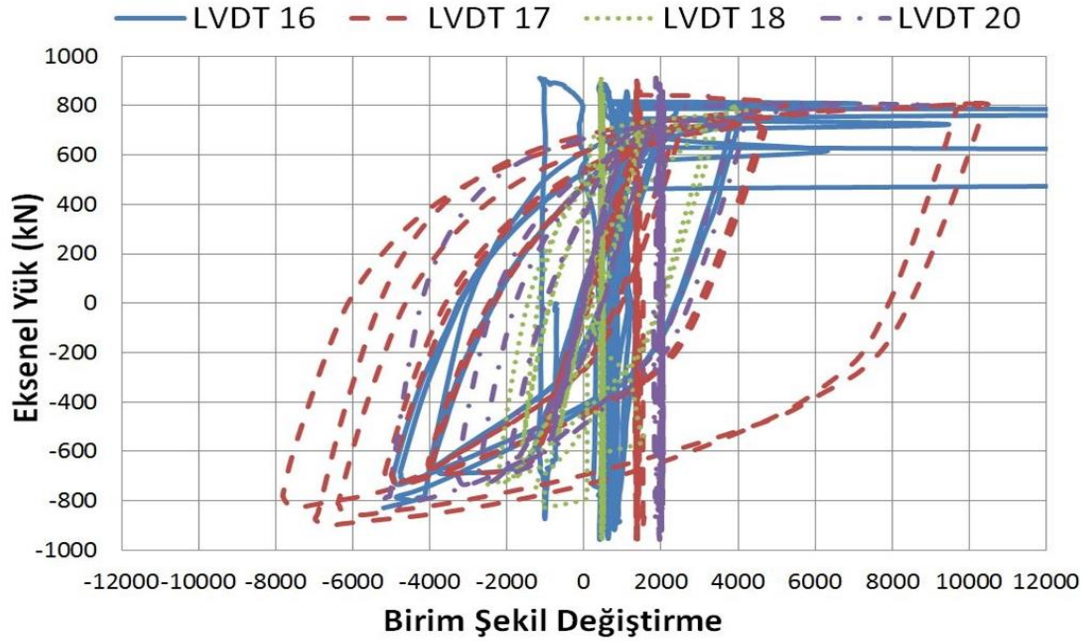
Deney elemanı 6, deney elemanı 5 ile benzer tasarımlara sahip olsa da en büyük farklılıkları BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda kullanılan kafes sistemi, $\phi 8$ ızgaraların $\phi 14$ 'e çıkarılmış olması ve bağımsız ara yüzey kalınlığının düşürülerek izolasyon malzemesinin kullanılmış olmasıdır. Deney elemanı 5 statik benzeri deney sırasında iyi performans göstermiş olsa da deney sonunda BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme blokların yan yüzeylerinde şiddetli hasarlar tespit edilmiştir. Bu nedenle deney elemanı 6'nın BEM uç prekast betonarme bloklarında ÇE'nin hem enine genişlemesini hem de burkulmasını engelleyebilecek olan kafes sistemi kullanılmıştır. Ayrıca deney elemanı 6'da bir önceki elemenda olduğu gibi prekast betonarme blokların arası tamir harcı ile kapatılmıştır. Şekil 4.32'de görüldüğü üzere bu uygulamalar sonucunda deney elemanı 6'nın eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği son derece stabil çıkmıştır. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere deney elemanı 6'nın maksimum çekme ve basınç kapasiteleri diğer elemanlara oranla oldukça yüksek çıkmıştır. Bu çizelgeye göre maksimum çekme ve basınç kapasiteleri sırası ile 912,6 kN ve 957,4 kN'dur. Basınç kapasitesi düzeltme çarpanı ise 1,05 çıkmıştır. Bu değer FEMA 450 ve AISC/SEAOC şartnamelerinin belirttiği değerler ile uyumludur.



Şekil 4.32. Deney elemanı 6'ya ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

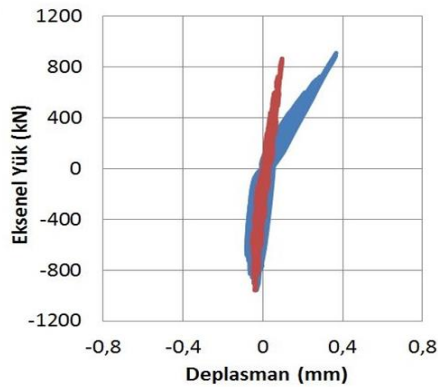
Şekil 4.33'de görüldüğü üzere ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen veriler ile ÇE'nin eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Şekil 4.33'de görüldüğü üzere ÇE'de izolasyon malzemesi kullanımı ile BEM ile ÇE arasında sürtünme nedeni ile oluşan kuvvet aktarımı minimuma indirilmiş ve ÇE'den

beklenen histerik davranış tam olarak sağlanmıştır. ÇE'nin çekme ve basınç kapasitesi artış göstermiş ve BEM, ÇE'ye yeterli stabiliteyi sağlamıştır.

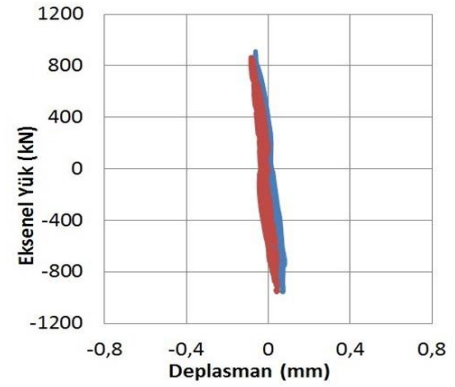


Şekil 4.33. ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (10^{-6}) (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.34'de BEÇÇ'nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan bulon ve bağlantı levhalarındaki kayma miktarları görülmektedir. Deney elemanı 6'nın her iki ucunda da önemli miktarda kayma görülmemektedir. BEÇÇ güney ucunda, basınç durumunda maksimum 0,3 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda maksimum 0,08 mm kayma meydana gelmiştir. BEÇÇ kuzey ucunda ise basınç durumunda maksimum 0,08 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda 0,09 mm kayma meydana gelmiştir. Bu kayma değerleri uygulanan deplasman değerlerine oranla çok düşük olmaları nedeni ile BEÇÇ uçlarında kayma meydana gelmediği söylenebilir.



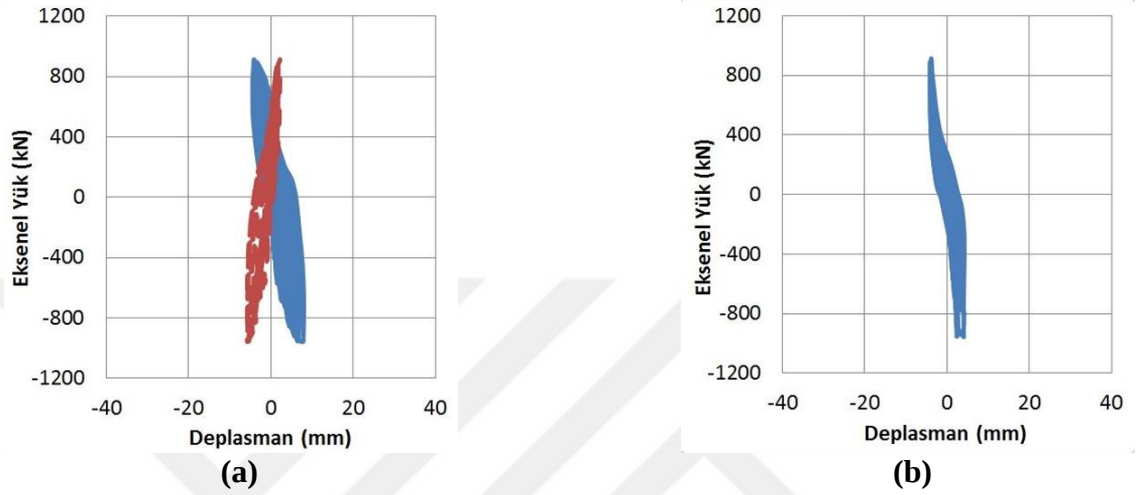
(a)



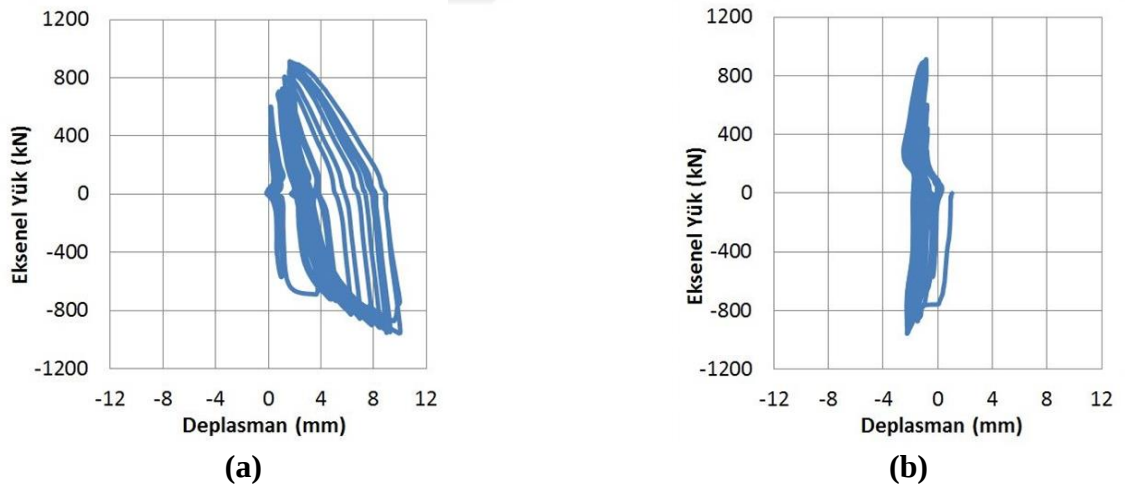
(b)

Şekil 4.34. (a) Güney ucu bulon kayma değeri; (b) Kuzey ucu bulon kayma değeri

Şekil 4.35’de, deney elemanı 6 BEM’ine ait deplasman değerleri görülmektedir. BEM’in güney ucu yukarı hareketinde maksimum 5,7 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde maksimum 7 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM’in kuzey ucunda ise yukarı doğru hareketinde maksimum 4 mm deplasman görülürken aşağı doğru hareketinde 4,2 mm deplasman gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre BEM uç bölgelerinde meydana gelen deplasmanlar beklenen değerler ile uyumludur ve ÇE’ye yeterli stabiliteyi sağlamıştır.



Şekil 4.35. a) BEM güney ucu deplasman değeri; b) BEM kuzey ucu deplasman değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)



Şekil 4.36. a) BEM yan yüzeyi güney ucu deplasmanı; b) BEM yan yüzeyi kuzey ucu deplasmanı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.36’da basınç durumunda Poisson etkisi ile ÇE’nin enine genişlemesi sonucunda BEM’in yan yüzeylerinde meydana gelen deplasmanlar görülmektedir. BEM yan yüzeyi güney ucunda maksimum 10 mm, kuzey ucunda ise maksimum 2,5 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM yan yüzeyi güney ucunda meydana gelen deplasman değeri arzu edilenden yüksektir. Ancak kafes sistem, betonu tutarak BEM yan

yüzeyinde meydana gelebilecek hasarı önlemiştir. Kafes sistemin BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme blokların hasara uğramasını engellemede kullanılabilecek oldukça etkili bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir.

Statik benzeri deney sonucunda deney elemanı 6 iyi bir histerik davranış göstermiştir. Yapılan değişiklikler ile BEM ÇE'ye yeterli stabiliteyi sağlamıştır. Özellikle bağımsız ara yüzeyin daraltılması ve izolasyon malzemesi kullanımı ÇE stabilitesinin sağlanmasında en büyük rolü üstlenmiştir. Ankraj millerinin bağlantısında kullanılan pullar, deney elemanı 5'de olduğu gibi prekast betonarme bloklarda hasarın oluşmasını engellemiş ve ankraj millerinin koordineli çalışmasını sağlamıştır.

Statik benzeri deney sırasında, deney elemanı 6 ÇE'sinde meydana gelen lokal burkulmalar nedeni ile BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda hasarlar tespit edilmiş ve deney sonlandırılmıştır. Ancak deney elemanı 6'nın basınç kapasitesi, deney düzeneği kapasitesi ile yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Deney elemanı 6'da global burkulma görülmez iken lokal burkulmalarda büyük oranda engellenmiştir. Bağımsız ara yüzey kalınlığının düşürülmesinin lokal burkulmaları engellemede oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca deney elemanı 6'da kullanılan kafes sistemin BEM yan yüzey hasarlarının engellenmesinde oldukça etkili bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir. Prekast betonarme bloklar arasında kullanılan tamir harcı BEM'de meydana gelen eğilmelerin önüne geçmiş böylece BEM ÇE'ye yüksek miktarda stabilite sağlamıştır.

Şekil 4.37'de görüldüğü üzere ÇE'de meydana gelen burkulmanın tespiti amacı ile BEÇÇ elemanının BEM'i ortadan ikiye ayrılmıştır. Deney elemanı 6'da global burkulma tespit edilmez iken lokal burkulmalar ÇE plastik bölgesi boyunca kısa ve sık haldedir. ÇE elastik bölgede burkulmaya rastlanmamıştır.



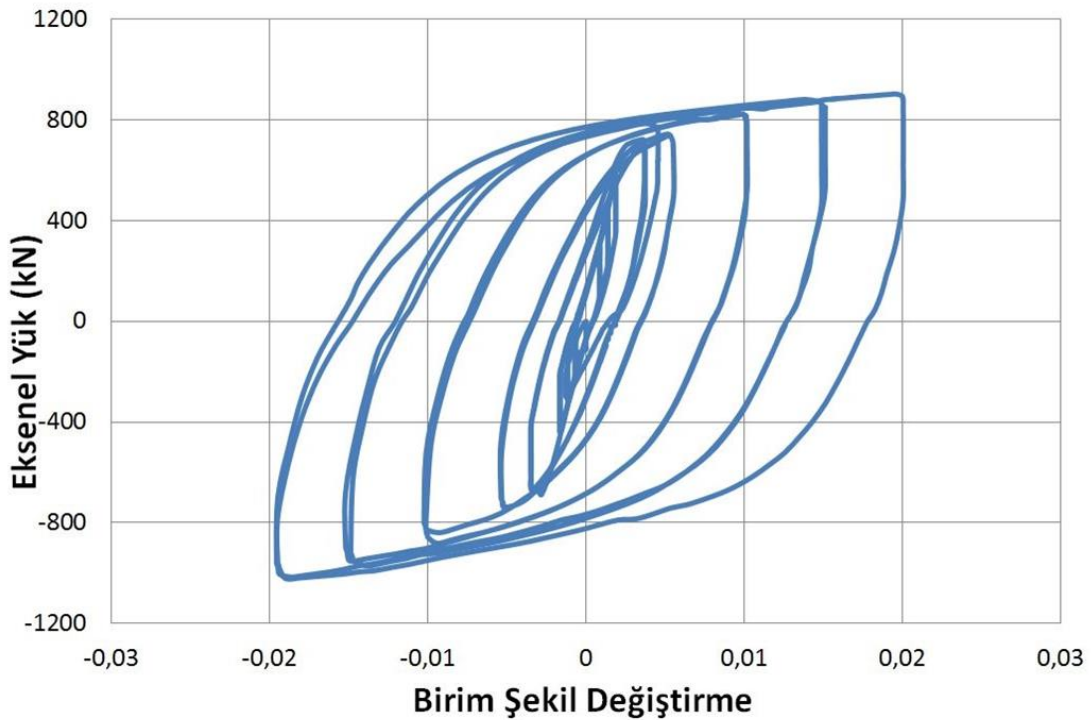
Şekil 4.37. Deney elemanı 6'da meydana gelen hasarlar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

4.7 Deney Elemanı 7'ye Ait Bulgular

Deney elemanı 7, deney elemanı 5 ile benzer tasarımlara sahiptir. Ancak bu elemanda farklı olarak ÇE izolasyon malzemesi ile kaplanmış ve bağımsız ara yüzey kalınlığı 4,5 mm'den 2 mm'ye düşürülmüştür. Ayrıca BEM'de meydana gelen hasarlar nedeni ile BEM'in bütünüyle tamir harcı ile sıvanmasına ve daha sonra CFRP ile

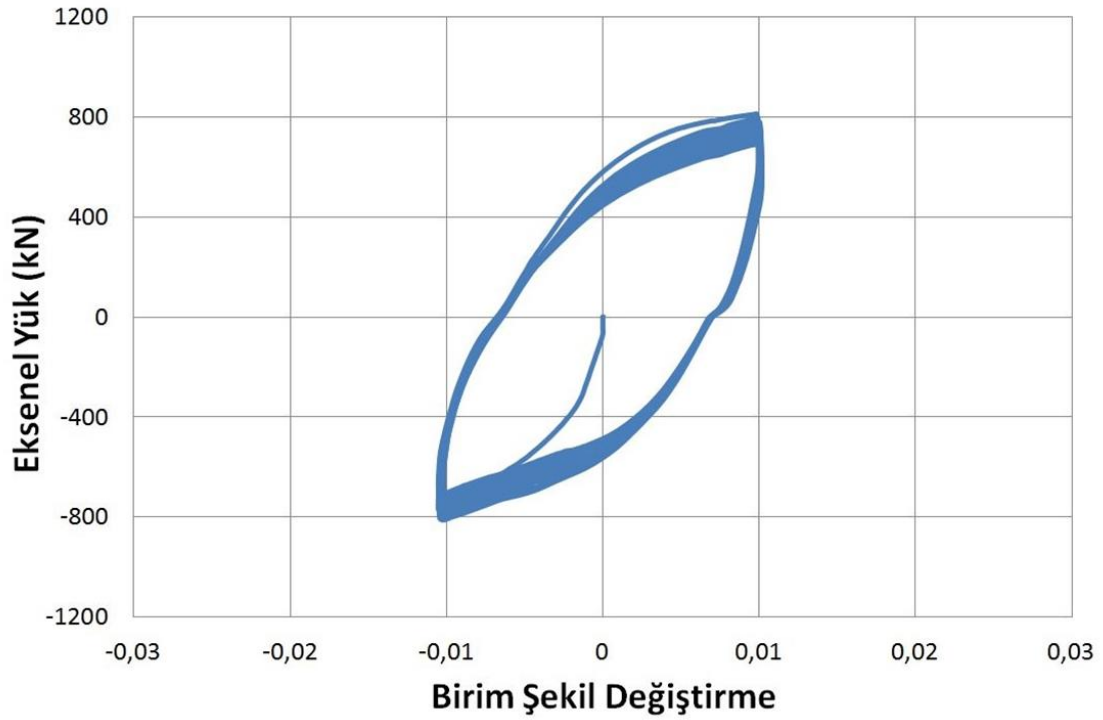
kaplanmasına karar verilmiştir. Ancak CFRP'nin aksel yüklemesi sırasında zarar görmemesi amacı ile prekast betonarme blokların kenarları taşlanmış ve bundan önceki elemanlarda kullanılan $\phi 10$ paslanmaz gijonlar BEM'in montajından çıkarılmıştır. Bunların dışında BEM'de kullanılan ankraj mili boyutu ve sayısı, pul tasarımı ve ızgara miktarı deney elemanı 5 ile aynıdır.

Şekil 4.38'de görüldüğü üzere bu uygulamalar sonucunda deney elemanı 7'nin aksel yük-birim şekil değiştirme grafiği son derece stabil çıkmıştır. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere deney elemanı 7'nin maksimum çekme ve basınç kapasiteleri diğer elemanlara oranla oldukça yüksek çıkmıştır. Bu çizelgeye göre maksimum çekme ve basınç kapasiteleri sırası ile 904 kN ve 1022 kN'dur. Basınç kapasitesi düzeltme çarpanı ise 1,13 çıkmıştır. Bu değer FEMA 450 ve AISC/SEAOC şartnamelerinin belirttiği değerler ile uyumludur. Statik benzeri deney sonunda BEÇÇ elemanında herhangi bir hasara rastlanmamıştır. %2,5 birim şekil değiştirmeye denk gelen deplasman değerinde, 1000 kN'luk piston kapasitesine ulaşılmış ve deney elemanı 7'de gözle görülür herhangi bir hasara rastlanmamıştır. Daha ileriki deplasman değerlerinde deney düzeneğinin zarar görebilmesi ihtimali bulunduğu için statik benzeri deney sonlandırılmıştır.



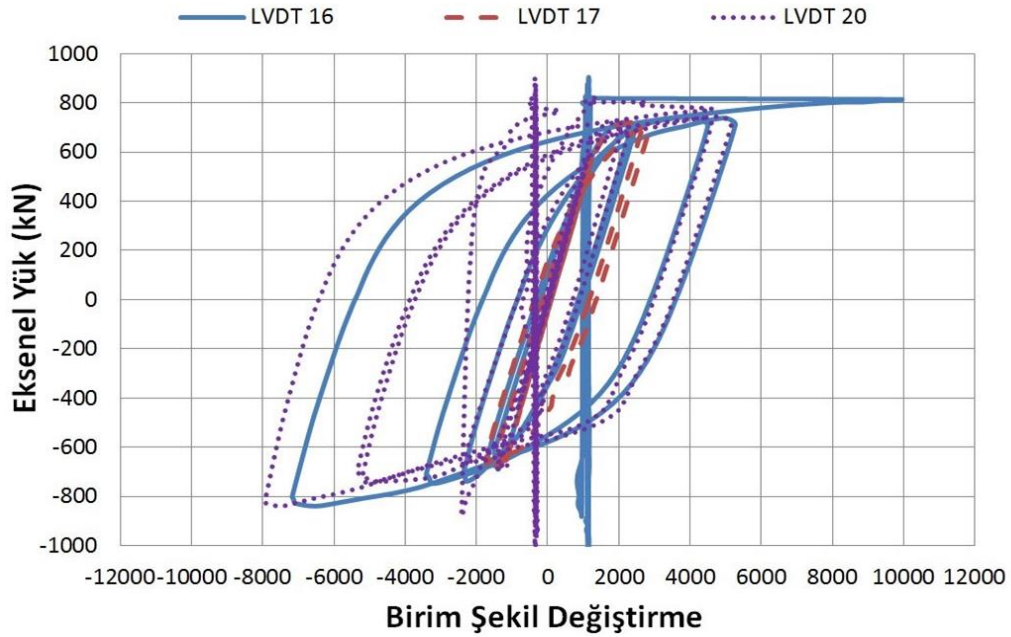
Şekil 4.38. Deney elemanı'ye ait aksel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Deney elemanı 7'nin statik benzeri deneyden hasarsız çıkması sonucunda Şekil 4.39'da görüldüğü üzere deney elemanı 7 yorulma testine tabi tutulmuştur. Yorulma testinde BEÇÇ elemanına %1 şekil değiştirmede toplam 40 çevrimli yükleme uygulanmıştır. Yorulma testi sonucunda elemanda gözle görülür herhangi bir hasar tespit edilmemiştir.



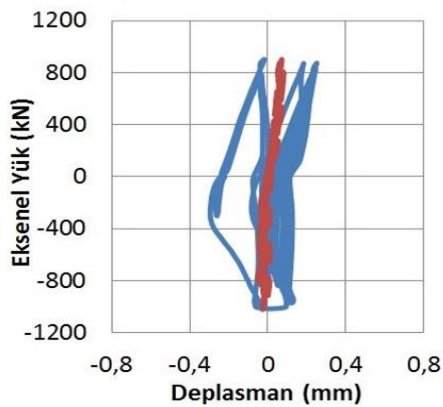
Şekil 4.39. Deney elemanı 7'ye ait yorulma testi eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.40'da görüldüğü üzere ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen veriler ile eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Yukarıda belirtildiği üzere ÇE'nin plastik kısmının orta açıklığında 4 adet gerinim pulu yer almaktadır. Ancak bu elemanın imalatı sırasında 18 numaralı gerinim pulu arızalanmış ve deney sırasında ölçüm alınamamıştır. Bu nedenle bu bölgedeki üç adet gerinim pullundan elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği aşağıda yer almaktadır. Şekil 4.40'da görüldüğü üzere ÇE'de izolasyon malzemesi kullanımı ile BEM ile ÇE arasında sürtünme kuvveti nedeni ile oluşan istenmeyen etkiler minimuma indirilmiş ve ÇE'den beklenen histerik davranış tam olarak sağlanmıştır.

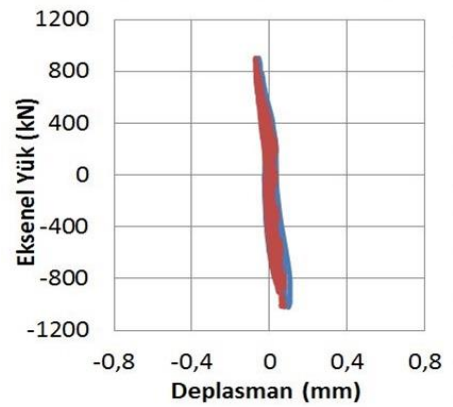


Şekil 4.40. ÇE orta açıklığında yer alan gerinim pullarından elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (10^{-6}) (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.41’de BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlantısında kullanılan bulon ve bağlantı levhalarındaki kayma miktarları görülmektedir. LVDT 7 ayağında bağlantı hatası olması nedeni ile LVDT 7’nin ölçümleri baz alınmamıştır. Deney elemanı 7’nin her iki ucunda da önemli miktarda kayma görülmemektedir. BEÇÇ güney ucunda, basınç durumunda maksimum 0,048 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda maksimum 0,085 mm kayma meydana gelmiştir. BEÇÇ kuzey ucunda ise basınç durumunda maksimum 0,07 mm kayma meydana gelirken çekme durumunda 0,1 mm kayma meydana gelmiştir. Bu kayma değerleri uygulanan deplasman değerlerine oranla çok düşük olmaları nedeni ile BEÇÇ uçlarında kayma meydana gelmediği söylenebilir.



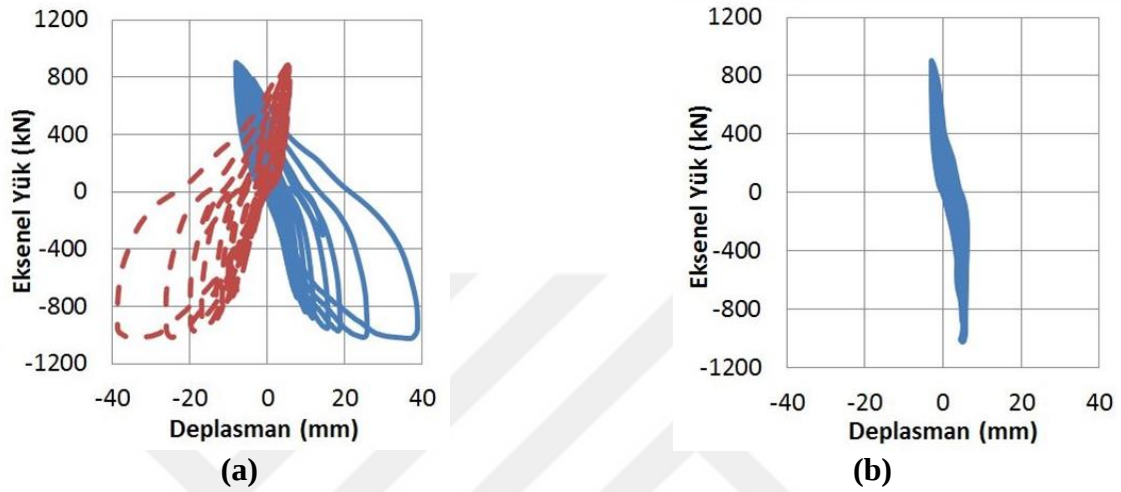
(a)



(b)

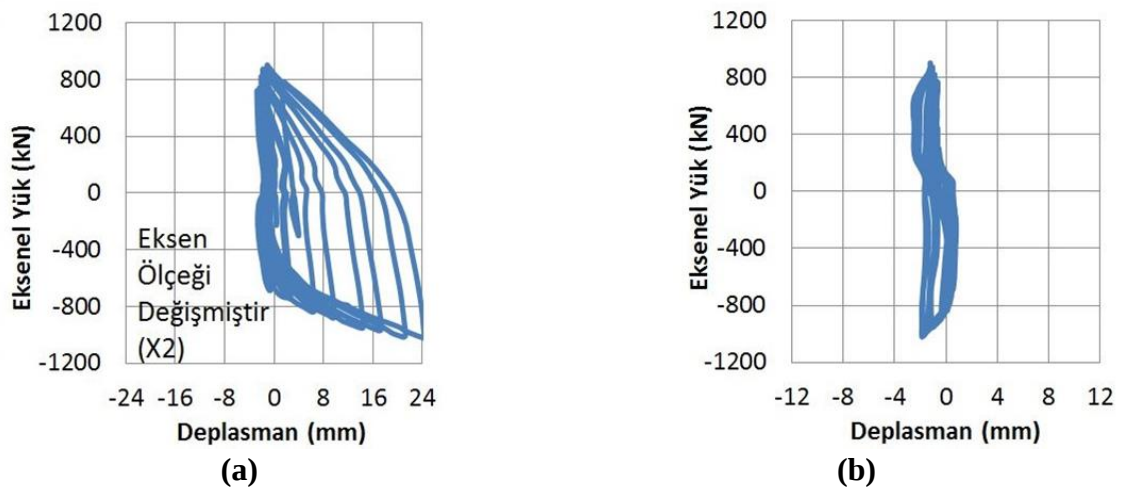
Şekil 4.41. a) Güney ucu bulon kayma değeri; **b)** Kuzey ucu bulon kayma değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.42’de, deney elemanı 7’nin BEM’ine ait deplasman değerleri görülmektedir. BEM’in güney ucunda maksimum 38,77 mm deplasman görülürken kuzey ucunda maksimum 6,2 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM’in güney ucunda meydana gelen deplasman değeri beklenenin üzerindedir. Bunun nedeni ÇE’de meydana gelen lokal burkulmalar sonucunda CFRP’nin esneyerek BEM’in iki parça halinde hareket etmesi olduğu düşünülmektedir. Ancak bu durumun BEÇÇ’nin stabilitesine herhangi bir olumsuz etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.42. a) BEM güney ucu deplasman değeri; b) BEM kuzey ucu deplasman değeri (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Şekil 4.43’de basınç durumunda ÇE’nin enine genişlemesi sonucunda BEM’in yan yüzeylerinde meydana gelen deplasmanlar görülmektedir. BEM yan yüzeyi güney ucunda maksimum 24,3 mm, kuzey ucunda ise 2,5 mm deplasman gözlemlenmiştir. BEM yan yüzeyi güney ucunda meydana gelen deplasman değeri beklenenin oldukça üzerindedir.



Şekil 4.43. a) BEM yan yüzeyi güney ucu deplasmanı; b) BEM yan yüzeyi kuzey ucu deplasmanı (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Statik benzeri deney ve yorulma testi sonucunda deney elemanı 7 oldukça iyi bir histerik davranış göstermiştir. Yapılan değişiklikler ile BEM ÇE'ye yeterli stabiliteyi sağlamıştır. Bağımsız ara yüzeyde kullanılan izolasyon malzemesi ve BEM'de kullanılan CFRP, ÇE stabilitesinin sağlanmasında en büyük rolü üstlenmişler ve BEÇÇ'nin çekme, basınç kapasitelerini artırmışlardır. Ankraj millerinin bağlantısında kullanılan pullar deney elemanı 5'de olduğu gibi BEM uç bölgelerindeki prekast betonarme bloklarda hasar oluşumunu engellemiş ve ankraj millerinin koordineli çalışmasını sağlamıştır.

Şekil 4.44'de görüldüğü üzere yorulma testi sonrasında BEÇÇ bileşenlerine ayrılmıştır. Deney elemanı 7'nin güney ucunda meydana gelen kısa çatlaklar dışında BEM'de herhangi bir hasara rastlanmamıştır. ÇE'de ise global burkulma görülmezken lokal burkulmalar ÇE plastik bölgesi boyunca kısa ve sık haldedir. CFRP kullanımı önceki elemanlarda meydana gelen BEM uç bölge prekast betonarme blok hasarlarına karşı oldukça etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tasarımda $\phi 10$ paslanmaz gijonların çıkarılarak yerine CFRP kullanılması durumunda BEM'de meydana gelen hasarlar düşüş göstermiş olsa da BEM güney ucu deplasman değerleri beklenenin oldukça üzerindedir.



Şekil 4.44. Deney elemanı 7'de meydana gelen hasarlar (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının dahil olduğu Tübitak 1001 projesi kapsamında farklı BEM tasarımlarına sahip toplam 20 adet BEÇÇ elemanı üretilip eleman bazında deneylere tabi tutulmuştur. Yukarıda belirtildiği üzere; bu çalışma kapsamında 7 adet yeni nesil BEÇÇ elemanın üretimi ve deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir.

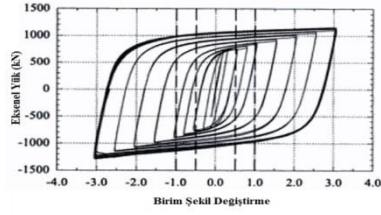
Bu bölümde tez çalışması kapsamında üretilmiş BEÇÇ elemanlarının birbirleri ile ve bu elemanların Tübitak 1001 projesi kapsamında üretilmiş, BEM’i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ elemanı ile kıyaslanmasına yer verilmiştir. Ayrıca literatürde yeni nesil BEÇÇ elemanlarının tasarımına benzer bir çalışma bulunmaması nedeni ile ancak güçlendirme amaçlı kullanılabilen BEÇÇ’ler ile karşılaştırma yapılabilmektedir.

Çizelge 4.1 incelendiğinde, deney elemanı 7’nin maksimum basınç kapasitesi değeri deney düzeneği kapasitesini aşmış ve amaçlanan kapasite değerinin üzerine çıkmıştır. Deney elemanları 5 ve 6’nın ise deney düzeneği kapasite değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Sırasıyla deney elemanları 1, 2, 3 ve 4’ün çekme ve basınç kapasitelerinde artışı görülse de hedeflenen değerlere ulaşamamıştır. Tübitak 1001 projesi kapsamında üretilen BEM’i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ ise deney elemanı 7’de olduğu gibi sistem kapasitesini aşan maksimum çekme ve basınç değerlerine ulaşmıştır. CFRP kullanılmayan yeni nesil BEÇÇ’de hedeflenen kapasite değerlerine ulaşılmış olsa da, yüksek sismik talepler altında BEM’i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ’ler kadar yüksek kapasite değerleri beklenmemektedir. Ancak BEM’de CFRP kullanımı ile yeni nesil BEÇÇ’lerin deprem riski yüksek bölgelerde de kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Betonarme yapıların güçlendirilmesi konusunda Yooprasertchai ve Warnitchai (2008) yapmış oldukları çalışmada (Bölüm 2.2.4.) BEM’i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ ‘lere 250 kN’a kadar ters çevrimli yükler uygulamışlardır. Bu yüklemelerde oldukça iyi performans gösteren elemanın betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilecek alternatif bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışma kapsamında üretilen deney elemanı 6 ise maksimum 912,6 kN çekme ve 957,4 kN basınç kapasitesi değerine kadar oldukça iyi performans göstermiştir.

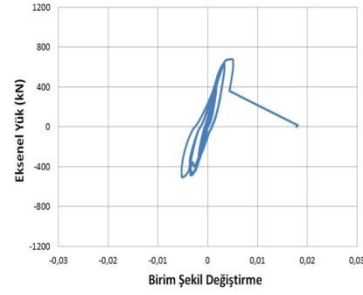
Çizelge 4.1’de yer alan basınç kapasitesi düzeltme çarpanı (β) incelendiğinde deney elemanları 1 ve 2 dışındaki tüm elemanların ASIC/SEAOC ve FEMA 450 standartlarının belirttiği değerleri sağladığı görülmektedir. FEMA 450 ve AISC/SEAOC standartları maksimum basınç kapasitesinin, maksimum çekme kapasitesine oranın 1 ile 1,3 arasında olması gerektiğini vurgulamaktadır. Deney elemanları 1 ve 2’de akma deplasmanına denk gelen ilk çevrimde ÇE burkulmuş ve BEÇÇ yük taşıma kapasitesini hızlı bir şekilde kaybetmiştir. Deney elemanı 3’den itibaren ise BEM’in güçlendirilmesi ile birlikte ÇE akma deplasmanından büyük deplasman değerlerinde burkulmuştur. Dolayısı ile BEM, ÇE’ye yeterli stabiliteyi sağlamış ve β değeri standartlarda belirtilen aralığa ulaşmıştır. Ancak bu seferde deney elemanları 3, 4 ve 5’in ÇE’sinde beklenen histerik davranış sağlanamamıştır. Bunun nedeni bağımsız ara yüzey kalınlığının fazla olması sonucunda ÇE’de yüksek miktarda burkulmaların meydana gelmesi ve burkulma sonucunda ÇE’nin BEM’e temas ederek belirli miktar eksenel kuvvetin sürtünme nedeni ile ÇE’den BEM’e transfer olmasıdır. Bu sorun ise deney elemanları 6 ve 7’de

bağımsız ara yüzey kalınlığının düşürülmesi ve ÇE üzerinde izolasyon malzemesi kullanımı ile çözülmüştür. Yine aynı çizelgede yer alan pekleşme düzeltme çarpanı değerleri incelendiğinde ω çarpanında artış olduğu görülmektedir. ω çarpanı hususunda yönetmeliklerde herhangi bir kriter yer almamaktadır. Ancak Eryasar ve Topkaya (2009) çalışması incelendiğinde deney elemanı 3'den itibaren benzer değerlerin elde edildiği görülmektedir. Eryasar (2009) tez çalışmasına göre ω çarpanı, materyal özelliklerinden ve bağımsız ara yüzeydeki sürtünme miktarından etkilenmektedir. Tez çalışmasında kullanılan ÇE'lerin akma dayanımlarının farklı olması nedeni ile bu çalışmada ω için referans değeri tespiti oldukça zordur.

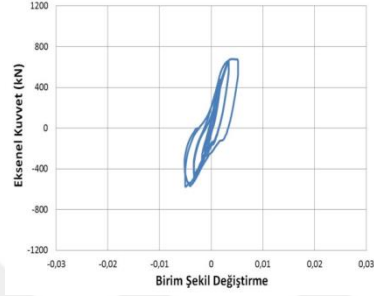
Elemanlara ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 5.1'de görülmektedir. FEMA 450 standardı BEÇÇ deneylerinden elde edilen eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiklerinin stabil, tekrarlı davranış ile pozitif yönde artan rijitlik göstermesi gerektiğini belirtmektedir. Şekil 5.1.a'da Iwata vd. (2000) çalışması kapsamında üretilen BEM'i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ'nin eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği bu tanıma uygun olup yeni nesil BEÇÇ'lerde de benzer grafiğin elde edilmesi hedeflenmiştir. Deney elemanları 6 ve 7'de benzer grafikler elde edilmiş ancak diğer elemanlar çevrimli yükler altında stabil davranış ve iyi performans sergileyememişlerdir.



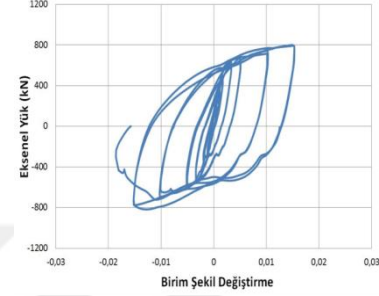
(a)



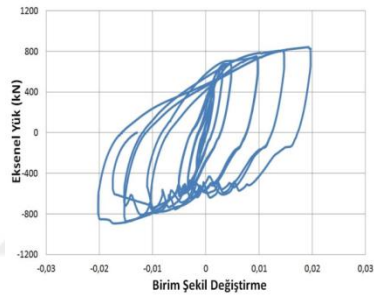
(b)



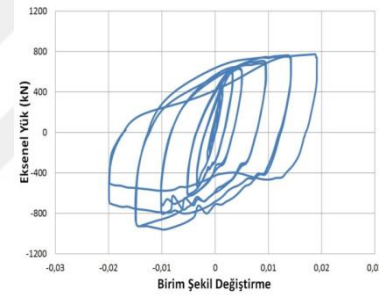
(c)



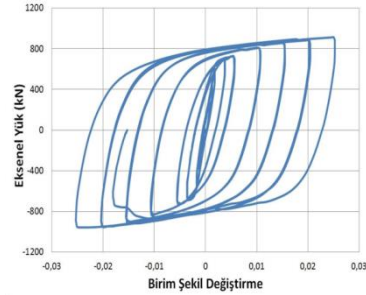
(d)



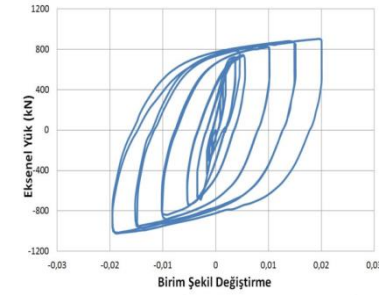
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 5.1. a) BEM’i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ’nin eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (Iwata vd. 2000); b) Deney elemanı 1 eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği; c) Deney elemanı 2 eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği; d) Deney 3 elemanı eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği; e) Deney elemanı 4 eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği; f) Deney elemanı 5 eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği; g) Deney elemanı 6 eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği; h) Deney elemanı 7 eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

Çizelge 5.1’de elemanlara ait bağlantı kayma değerleri görülmektedir. Deney elemanı 3’ün kuzey ucunda çekme ve basınç durumlarında ciddi kayma meydana geldiği, diğer elemanlarda ise elemana uygulanan deplasman miktarları ile karşılaştırıldığında önemli miktarda kayma meydana gelmediği görülmektedir. Deney elemanı 3’ün deney düzeneğine bağlantısında oluşan kaymanın nedeni ise montajda kullanılan bulon, rondela ve somunlarda meydana gelen hasarlar ve yanlışlıkla normal bulon, rondela ve somun kullanılmasıdır. Deney elemanı 3’ün statik benzeri deneyinden sonra bağlantı elemanları yeni yüksek dayanımlı bulon rondela ve somunlar ile değiştirilmiş böylece daha sonraki elemanlarda oluşabilecek bağlantıda kayma sorunun önüne geçilmiştir. Şekil 3.7’de görüldüğü üzere pistonla bağlı olan ve deplasman değerlerinin BEÇÇ üzerine uygulanmasını sağlayan LVDT, BEÇÇ burkulması engellenmiş plastik ve elastik bölge üzerinde yer almaktadır. Bu nedenle Deney elemanı 3 bağlantısında meydana gelen kaymanın BEÇÇ davranışı üzerine önemli bir etkisi olmamıştır. Ayrıca BEÇÇ’lerin çerçeveye bağlantısında mutlak surette yüksek dayanımlı bulon, rondela ve somun kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.1’de her bir elemana ait ÇE’nin burkulması sonucunda BEM’de oluşan düşey deplasman değerleri ve Poisson etkisi ile ÇE’nin enine genişlemesi sonucunda BEM’de oluşan yan yüzey deplasman değerleri verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde deney elemanı 1’den deney elemanı 6’ya kadar oluşan düşey deplasman miktarlarının düşürüldüğü görülmektedir. Özellikle deney elemanı 6 hem performans açısından hem de deplasman değerleri açısından oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Tübitak 1001 projesi kapsamında yapılan BEM’i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ ile karşılaştırıldığında, deney elemanı 6’nın bu BEÇÇ’ye yakın deplasman değerleri verdiği görülmüştür. Deney elemanı 7 ise beklenenin aksine en büyük deplasman değerlerini vermiştir. Bunun nedeni $\phi 10$ paslanmaz gijonların BEM’de yer almaması ve CFRP’nin esneyerek BEM’in iki parça halinde davranması olarak düşünülmektedir. Ancak bu durumun, deney elemanı 7’nin histerik davranışına olumsuz etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bunun sonucu olarak $\phi 10$ paslanmaz gijonların CFRP’ye oranla BEM’i daha sıkı tuttuğu sonucuna varılmıştır. Ancak $\phi 10$ paslanmaz gijonların, BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme blokları sadece kenarlarından tutmaları BEM’i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ’inin BEM’inde yer alan kutu profil veya CFRP gibi betonu sarmamaları nedeni ile ÇE’nin burkulması sonucunda deney elemanı 3’de (Şekil 4.18) olduğu gibi BEM uç bölümlerinde yer alan prekast betonarme bloklarda yüksek miktarda hasar meydana gelmektedir.

Çizelge 5.1. Elemanlara ait bağlantı kayma değerleri ve BEM düşey, yanal deplasman değerleri (mm) (112M820 numaralı projeden alınmıştır)

	Bağlantı Kayma Değerleri				BEM Max. Düşey Dep.		BEM Max. Yanal Dep.	
	BEM Güney Ucu		BEM Kuzey Ucu		Güney Ucu	Kuzey Ucu	Güney Ucu	Kuzey Ucu
	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme				
D. E. 1	0,1	0,057	0,097	0,02	24,44	10	3	3,6
D. E. 2	0,18	0,15	0,05	0,02	22	11	1,4	2,5
D. E. 3	0,2	0,5	3,12	5,88	8,8	64	3,6	6,8
D. E. 4	0,2	0,07	0,15	0,08	4,9	3,6	4,2	3,5
D. E. 5	0,11	0,18	0,15	0,14	7	6,7	7	1,7
D. E. 6	0,3	0,08	0,08	0,09	7	4	10	2
D. E. 7	0,048	0,085	0,07	0,1	38,77	6,2	24,3	2,5

BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda kullanılan kızak sistemi ilk elemandan itibaren BEM'in ÇE üzerinde kaymasını sağlayarak, ÇE'nin elastik bölgesi ile BEM arasında oluşabilecek sürtünme kuvvetlerini azaltmış ve burkulması engellenmiş plastik bölgede oluşan lokal burkulmaları sınırlandırmıştır. Ancak Poisson etkisi ile ÇE'de meydana gelen enine genişleme sırasında kızak dışarıya doğru hareket ederek BEM yan yüzeyinde oluşan deplasman değerlerini bir miktar arttırmıştır. Özellikle deney elemanı 5'de olduğu gibi BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme blokların ızgaralar ile güçlendirilmesi durumunda BEM'de oluşan düşey deplasman miktarı düşmüş ancak BEM yan yüzeylerinde hasarlar meydana gelmiştir. Ancak deney elemanı 6 da olduğu gibi BEM'in uç bloklarında kafes sistem kullanımında veya deney elemanı 7'de olduğu gibi BEM'in CFRP ile sarılması durumunda, BEM yan yüzey deplasmanları artış göstermiş fakat BEM yan yüzeylerinde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. BEM uç bölgesinde yer alan prekast betonarme bloklarda, ÇE'nin burkulması sonucunda meydana gelen hasarların önlenmesinde, kafes sistem veya CFRP kullanımının oldukça etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Yeni nesil BEÇÇ BEM'leri ilk 4 elemanda ÇE'ye yeterli stabiliteyi sağlayamamışlardır. Bu amaçla her bir deneyde kullanılan boyuna ankraj mili sayısı ve çapı arttırılmıştır. Ancak bu millerin esnek davranmasından ötürü ÇE'de oluşan lokal ve global burkulmaların önüne geçilememiştir. BEM yüzeyi boyunca, prekast betonarme blokların arasında epoksi bazlı tamir harcı kullanımı BEM'in rijitliğini arttırmış ve tek bir parça halinde davranmasını sağlamıştır. Bu nedenle ankraj millerinin yanında, epoksi bazlı tamir harcı kullanımı oldukça önemlidir.

Her bir elemana ait deneylerin tamamlanması ardından BEM ortadan ikiye ayrılarak ÇE'de meydana gelen burkulmalar incelenmiştir. Deney elemanı 5'e kadar ÇE'de oluşan lokal ve global burkulmalar ÇE burkulması engellenmiş plastik yüzey boyunca sık ve yüksek dalgalar şeklindedir. Tübitak 1001 projesi kapsamında üretilen BEM'i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ'lerde ise burkulmalar, burkulması engellenmiş plastik yüzey uçlarında kısa ve az miktardadır. Bu elemana en yakın burkulma şeklini deney elemanı 7 vermiştir. Deney elemanı 6'nın burkulma şekli benzer olsa da lokal burkulmalar daha yüksek dalgalar halindedir.

6. SONUÇLAR

BEÇÇ'li çerçevelerin yeni bir yapısal sistem olması nedeni ile toplam sistem performansını temsil eden deneysel çalışmalar literatürde oldukça azdır. Ayrıca çelik yapıların BEÇÇ'li sistem ile güçlendirilmesi konusunda literatürde çalışmalar mevcut olsa da betonarme yapıların BEÇÇ'li sistem ile güçlendirilmesi hususunda yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma sonucunda elde edilen verilerin mevcut kusurlu yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilecek BEÇÇ tasarımlarının geliştirilmesi, yapı içerisinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve ülkemizde kullanılan Deprem Şartnamesi'ne uyarlanması hedeflenmiştir. Ayrıca güçlendirmede BEÇÇ kullanımının mevcut kusurlu yapıların performansına etkisinin araştırılması ve tasarımda dikkat edilmesi gereken hususların belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın TS648, TS500 yönetmeliklerine ve Deprem Şartnamesi'ne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışması iki aşamadan oluşmakta olup mevcut kusurlu betonarme yapıların güçlendirilmesinin araştırılması amacı ile 7 adet tam boyutlu BEM'i prekast betonarme bloklardan oluşan BEÇÇ'lerin statik benzeri deneylerini içermektedir. Gerçekleştirilen geniş kapsamlı deneysel çalışma sonucunda yeni nesil BEÇÇ'lerin davranışlarının ve betonarme yapıların BEÇÇ ile güçlendirilme çalışmalarında uygulanacak yöntemin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında bu iki aşamaya ait sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Uygun BEM tasarımına sahip yeni nesil BEÇÇ'ler çevrimli yükler altında yeterli performans göstermişlerdir. Modüler tasarımlı bu BEÇÇ'lerin mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilecek alternatif bir tasarım olabileceği düşünülmektedir. Ancak yeni nesil BEÇÇ'lerin çekme ve basınç kapasiteleri diğer BEÇÇ'lere (BEM'i kutu profil içerisine beton dökülmesi ile elde edilen BEÇÇ'ler veya tamamen çelik profillerden oluşan BEÇÇ'ler) göre daha sınırlıdır.
- Yeni nesil BEÇÇ'lerin BEM'ini oluşturan prekast betonarme bloklar mutlak surette donatılar ile güçlendirilmelidir. Deneysel çalışma sırasında görülmüştür ki en büyük hasar BEM uç bölgelerinde yer alan bloklarda meydana gelmiştir. Bu nedenle bu blokların hem yan yüzeylerinde hem de alt ve üst yüzeylerinde meydana gelen hasarı sınırlandıran kafes donatıların kullanılması tasarım açısından önemlidir.
- BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda kullanılan kızak sistemi ilk elemandan itibaren BEM'in ÇE üzerinde kaymasını sağlayarak ÇE elastik bölgesi ile BEM arasında oluşabilecek sürtünme kuvvetlerini azaltmış ve burkulması engellenmiş elastik bölgede oluşabilecek lokal burkulmaları sınırlandırmıştır. Bu nedenle, BEM uç bölgelerinde yer alan prekast betonarme bloklarda kızak kullanımı oldukça önem arz etmektedir. Ancak deney elemanı 5'de olduğu gibi ÇE'nin Poisson etkisi ile enine genişlemesi durumunda ÇE ile kızak arasındaki hava boşluğu miktarı yeterli olmaz ise ÇE kızığa temas ederek

kızağı BEM dışına doğru hareket ettirmektedir. Bu nedenle ileriki çalışmalarda ÇE ile BEM arasındaki boşluğun daha geniş tutulmasına karar verilmiştir.

- BEM'in ÇE'ye yeterli stabiliteyi sağlayabilmesi için; BEM boyunca prekast betonarme blokların birleştirilmesinde kullanılan ankraj mili çapı ve sayısı yeterli olmalı ve blokların arası epoksi esaslı tamir harcı ile kapatılmalıdır. Ankraj milleri düşük deplasman değerlerinde etkili olsa da yüksek deplasman değerlerinde esneyerek ÇE'nin burkulmasını önleyememektedir (prekast betonarme bloklar arasındaki boşluklar nedeni ile). Bu nedenle bu boşlukların epoksi bazlı tamir harcı ile kapatılması gerekmektedir. Böylece BEM'in mukavemeti ve rijitliği artırılarak ÇE'ye yeterli stabilite sağlanabilir.
- FEMA 450 ve AISC/SEAOC standartlarında belirtilen basınç kapasitesi düzeltme çarpanı (β) değerleri ve ÇE'nin histerik davranışı göz önünde bulundurulduğunda, bağımsız ara yüzey kalınlığının minimum seviyede tutulması ve ÇE'nin elastik bölgede 2 mm, plastik bölgede ise 4 mm kalınlığında polietilen şerit ile kaplanması, sadece bağımsız ara yüzey boşluğu kullanımına oranla BEÇÇ'nin çevrimli yükler altında daha iyi performans göstermesini sağlamıştır.
- Ekonomik kaygısını taşınmadığı ve yüksek sismik hareketlere maruz kalabilecek kusurlu yapıların güçlendirilmesinde BEM'in CFRP ile sarılmasının daha uygun olduğu düşünülmektedir.
- BEÇÇ'nin bayrak levhasına bağlantısını sağlayan bağlantı levhalarının kalınlığı ve genişliğinin yeterli seviyede olması önemlidir. Ayrıca bağlantı bölgelerinde kayma meydana gelmemesi için mutlak surette yüksek dayanımlı bulon, rondela ve somun kullanılması gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

- AISC 341-05. 2005. Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- AISC 360-10. 2010. Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- AISC-LRFD 360. 2009. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, American Society for Testing and Materials, USA.
- AISC-SEAOC. 2003. Recommended provisions for buckling restrained braced frames, Structural Engineers Association of California and American Institute of Steel Construction, California, USA.
- Akbaş, B. 2011. Endüstriyel Çelik Yapıların Sismik Detaylandırılması. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı. ss. 1-18,11-14 Ekim, Ankara.
- Akbaş, B., Sutchiewcharn, N., Wen, R. ve Shen, J. 2013. Comparative study of special and ordinary braced frames. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22 (13): 989-1022.
- Black, J.C., Makris, N. ve Aiken, D.I. 2002. Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained braces. Rapor, No: PEER 2002/08 (yayınlanmış), University of California, Berkeley.
- Black, J.C., Makris, N. ve Aiken, D.I. 2004. Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling restrained braces. *Journal of Structural Engineering*, 130 (6): 880-894.
- Brown, P.A., Aiken, D.I. ve Jafarzadeh, J.F. 2001. Buckling restrained braces provide the key to the seismic retrofit of the Wallace F. Bennett Federal Building. [Http://www.reaveley.com/news/publications/overview_bennettbuilding_parry_brown.pdf](http://www.reaveley.com/news/publications/overview_bennettbuilding_parry_brown.pdf). [Son erişim tarihi:06.06.2016]
- Bubela, K.R., Ventura, E.C. ve Prion, G.L.H. 2010. Cyclic testing of steel chevron braces with vertically slotted beam connection. *International Journal of Structural Engineering*, 2 (1): 49-69.
- BS-3692. 2001. ISO metric precision hexagon bolts, screws and nuts – Specification, British Constructional Steelwork Association, London, UK.
- Christopoulos, S.A. 2005. Improved seismic performance of buckling restrained braced frames. Master of Science Thesis, University of Washington, 229 p.
- Clark, P., Aiken, I., KO, E., Kasai, K. ve Kimura, I. 1999. Design Procedures for Buildings Incorporating Hysteretic Damping Devices. SEAOC 1999 Kongresi, ss. 355-372, 30 Eylül-3 Ocak, Santa Barbara CA.

- Corte, D.G., D'aniello, M. ve Mazzolani, F.M. 2009. "All-Steel" Buckling Restrained Braces for Seismic Upgrading of Existing Reinforced Concrete Buildings. ANIDIS 2009 Kongresi, Bologna, İtalya.
- Çetinkaya, S. 2013. Çelik çekirdekli bir burkulması önlenmiş çaprazın (BÖÇ) histeretik davranışı ve BÖÇ'lü bir çelik bina tasarımı. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 166 s.
- Anonymous 1: Deprem Bölgerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007 file online. <http://yapiisleri.erzincan.edu.tr/wp-content/uploads/2016/07/DBYBHY-2007-KOERI.pdf> [Son erişim tarihi: 23.06.2017]
- Engelhardt, M.D. 2007. Design of seismic-resistant building Structures: concentrically braced frames, University of Texas at Austin.
- Eryaşar, M.E. 2009. Experimental and numerical investigation of buckling restrained braces. Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Üniversitesi, Ankara, 65s.
- Eryaşar, M.E. ve Topkaya, C. 2010. An experimental study on steel encased buckling restrained brace hysteretic dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39: 561-581.
- Fahnestock, L., Sause, R., Ricles, J. ve Lu, W. 2003. Ductility demands on buckling-restrained braced frames under earthquake loading. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2 (2): 255-268.
- FEMA 450. 2003. NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450). Building Seismic Safety Council National Institute of Building Sciences, Washington D.C., USA.
- Fujimoto, M., Wada, A., Saeki, E., Takeuchi, T. ve Watanabe A. 1990. Development of unbonded brace. Tokyo Institute Research Repository, ss. 91-96, Tokyo
- Gourd, R.M. 2015. Buckling restrained braces for the seismic strengthening of a five-storey reinforced concrete frame structure. Master of Applied Science Thesis, Royal Military College of Canada, 80 p.
- Guerrero, H., Ji, T., Escobar, A., ve Teran-Gilmore, A. 2018. Effects of Buckling Restrained Braces on Reinforced Concrete Precast Models Subjected to Shaking Table Excitation. *Engineering Structures*, 163: 294-310
- Iwata, M. ve Murai, M. 2006. Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35 (14): 1807-1826.
- Iwata, M., Kato, T., ve Wada, A. 2000. Buckling-Restrained Braces as Hysteretic Dampers. Proceedings of the Third International Conference STESSA 2000, ss. 33-39, 21-24 Ağustos, Montreal.

- Keresting, R. A., Fahnestock L. A. ve Lopez W. A. 2015 Seismic Design of Steel Buckling Restrained Braced Frames. NIST Raporu, No:15-917-34 (yayınlanmış), California.
- Lai, J.W. ve Tsai, K.C. 2004. Research and Application of Buckling Restrained Braces in Taiwan. Proceedings of 2004 ANCER Meeting: Networking of Young Earthquake Engineering Researchers and Professionals, 15 Mart, Honolulu/Hawaii.
- Lopez, W.A. ve Sabelli R. 2004. Sismic design of buckling restrained braced frames. Steel Tips Structural Steel Educational Council; Technical Information and Product Service, ss. 1-66, Temmuz, Oakland, California.
- Mahin, S., Uriz, P., Aiken, I., Field, C. ve Ko, E. 2004. Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frame Systems. 13th World Conference on Earthquake Engineering, ss. 1-14, 1-6 Ağustos, Vancouver/Canada.
- Murata, Y., Mochizuki, N., Andou, N. ve Takahashi, S. 1980. An Experimental Study on Buckling of Unbonded Braces Under Centrally Applied Loads. Annual Meeting Architectural Institute of Japan, ss. 1913-1914, Eylül, Japonya.
- Nader, H. ve Behzad, R. 2012. Overall buckling of all-steel buckling restrained braces. Journal of Constructional Steel Research, 79: 151-158.
- Newell, J., Uang, M.C. ve Benzon, G. 2006. Subassembly testing of corebrace buckling-restrained braces (G series). University of California, Rapor No: TR-06/01 (yayınlanmış), San Diego.
- Özçelik, R. 2015. Burkulması engellenmiş çelik çaprazlar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3): 160-170.
- SAC. 1997. Protocol for fabrication, inspection, testing and documentation of beam column connection tests and other experimental specimens. SAC Joint Venture, Rapor No: SAC/BD-97/02, California.
- Sun, H., Jia, M., Zhang, S. ve Yuyin, W. 2019. Study of Buckling Restrained Braces With Concrete Infilled GFRP Tubes. *Thin Walled Structures*, 136: 16-33.
- Takeda, Y., Kimura, Y., Yoshioka, K., Furuya, N. ve Takemoto, Y. 1976. An Experimental Study on Braces Encased In Steel Tube and Mortar. Annual Meeting Architectural Institute of Japan, ss. 1041-1042, Ekim, Japonya.
- TIMOSHENKO, S. ve GERE, J.M. 1961. Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill Yayınları, New York, 541 s.
- TS 500. 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

- Tsai, K.C., Hsiao, P.C., Wang, K.J., Weng, Y.T., Lin, K.C., Chen, C.H., Lai, J.W. ve Lin, S.L. 2008. Pseudo dynamic tests of a full scale CFT/BRB frame-partI: specimen design, experiment and analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37: 1081-1098.
- Tsai, K.C. ve Hsiao, P.C. 2008. Pseudo dynamic tests of a full scale CFT/BRB frame-partII: seismic performance of buckling restrained braces and connections. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 37: 1099-1115.
- Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R. ve Devall, R. 2006. Seismic testing and performance of buckling restrained bracing systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33 (2): 183-198.
- Wakabayashi, M., Matsui, C., Minami, K. ve Mitani, I. 1974. Inelastic behavior of full-scale steel frames with and without bracings. *Bulletin of Disaster Prevention Research Institute*, 24:1, 1-23.
- Wakabayashi, M., Nakamura, T., kashibora, A., Morizono, T. ve Yokoyama, H. 1973. Experimental Study of Elasto-Plastic Properties of Precast Concrete Wall Panels with Built-in Insulating Braces. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, ss. 1041-1044, Japonya.
- Wang, C., Usami, T., Funayama, J. ve Imase F. 2012. Low-cycle fatigue testing of extruded aluminium alloy buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 46: 294-301.
- Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E. ve Wada, A. 1988. Properties of Brace Encased In Buckling-Restraining Concrete and Steel Tube. Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, ss.719-724, 2-9 Augustos, Tokyo.
- Wu, A., Lin, P. ve Tsai, K. 2012. A Type of Buckling Brace for Convenient Inspection and Replacement. 15th World Conference on Earthquake Engineering, ss.1-10, 24-28 Eylül, Lisbon, Portekiz.
- Yazan, T. 2005. Merkezi Güçlendirilmiş Çerçevelerde Sürtünmesiz Çelik Basınç Çubukları. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 436: 47-52.
- Yooprasertchai, E. ve Warnitchai, P. 2008. Seismic Retrofitting of Low-Rise Nonductile Reinforced Concrete Buildings by Buckling-Restrained Braces. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, ss. 1-8, 12-17 Ekim, Beijing, Çin.
- Young, K.J., Myeong-han, K., Jinkoo, K. ve Sang-dae, K. 2009. Component tests of buckling-restrained braces with unconstrained length. *Engineering Structures*, 31(2):507-516. |

8. EKLER

8.1. Eleman bazında deney düzeneğinde bağlantı tasarımı

AISC 360-10'da geçerli kayma direnci şu şekilde hesaplanır:

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (8.1)$$

Yükün yönüne dik standart boyutlu ve kısa slotlu delikler için;

$$\phi = 1.00 \text{ (LRFD)} \quad \Omega = 1.50 \text{ (ASD)}$$

μ = A sınıfı ortalama sürtünme katsayısı (galvanize ve pürüzlü yüzey) = 0,30

$$D_u = \text{Çarpan} = 1,13$$

T_b = Tablo J3.1M'de verilen minimum bağlantı gerilmesi (10,9 bulonlar) = 205 kN

h_f = Besleme levhaları için çarpan = 1,0

n_s = Kayma yüzeyi sayısı = 2

$$R_n = 0,3 \times 1,13 \times 205 \times 1,0 \times 2 = 139 \text{ kN}$$

Güvenlik katsayısı $\Omega = 1.50$ (ASD) $139/1,5 = 93 \text{ kN}$

$1000/93 = 10,75$ yani 11 bulona ihtiyaç vardır. Bulon sayısının çift olması gerektiği için 12 adet alınmıştır.

Her bir bulonun sağladığı kayma direnci; $1000/12 = 83,3 \text{ kN}$

Ezilme gerilmesi tahkiki;

$$R_n = 1.2 l_c t F_u \leq 2.4 d t F_u$$

$$R_n = 1,2 \times 3,7 \times 1,5 \times 3,7 \leq 2,4 \times 2,4 \times 1,5 \times 3,7$$

$$R_n = 24,64 \leq 32 \text{ OK}$$

8.2. ÇE enkesit alanının hesabı

σ : Dayanım katsayısı

T_n : Karakteristik dayanım

F_y : Karakteristik akma gerilmesi

F_u : Karakteristik çekme gerilmesi

A_g : Brüt alan

A_n : Etkin net enkesit alanı

Akma sınır durumu;

$$\sigma \times T_n = F_y \times A_g \quad (8.2)$$

$$0,9 \times 1000000 = 235 \times A_g$$

$$A_g = 3830 \text{ mm}^2$$

Kopma sınır durumu;

$$\sigma \times T_n = F_u \times A_e \quad (8.3)$$

ÇE enkesit alanında kayıp olmadığı için $A_e = A_g$ alınmıştır.

$$0,75 \times 1000000 = 350 \times A_e$$

$$A_e = 2142,86 \text{ mm}^2$$

Deneyisel çalışma esnasında ÇE'nin akmasını ancak kopmamasını istiyoruz. Ayrıca 1000000 N yük altında maksimum inelastik davranışı gözlemlemek istiyoruz. Bu nedenlerle enkesit alanını, A_e enkesit alanına en yakın değeri seçtik.

ÖZGEÇMİŞ

K. BURÇ CİVELEK

burccivelek@akdeniz.edu.tr



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2010-2020	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Antalya
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2007-2010	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Antalya
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi
2001-2005	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi	Akdeniz Üniversitesi
2007-2016	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1-Civelek, K.B, “Analysis Of Uniaxial And System Performance Tests Of Buckling-Restrained Braces With Different Designs”, European International Journal of Science and Technology, 6 (2): 80-93.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Civelek, K.B., Eroğlu Azak T., Türker F., "The Use of Sewage Sludge in Cement Mortar Production", 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM, Albena, BULGARISTAN, 15-26 Haziran 2015, vol.1, no.4, pp.589-596

2-Özçelik R., Dikiciaşık Y., Civelek K.B., "BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN UÇ STABİLİTELERİNİN ARTTIRILMASI", XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ, TRABZON, TÜRKİYE, 24-28 Ağustos 2015, ss.1-9

3- Özçelik R., Dikiciaşık Y., Civelek K.B., "Yeni Nesil Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazların Histeretik Davranışları", 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, ESKİŞEHİR, TÜRKİYE, 9-11 Aralık 2015, ss.329-340

4- Özçelik R., Dikiciaşık Y., Civelek K.B., "FARKLI BURKULMAYI ENGELLEYEN MEKANİZMAYA SAHİP BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLAR", 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İZMİR, TÜRKİYE, 14-16 Ekim 2015, ss.1-9

5- Özçelik R., Dikiciaşık Y., Civelek K.B., "Buckling Restrained Braces with New Casing System", 12. International Congress on Advances in civil Engineering, İSTANBUL, TÜRKİYE, 21-23 Eylül 2016, pp.1-10

6- Özçelik R., Erdil E.F., Civelek K.B., "Pseudo Dynamic Test of RC Frame Retrofitted With Buckling Restrained Brace", 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, İSTANBUL, TÜRKİYE, 21-23 Eylül 2016, pp