



T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN GLOBAL VE  
LOKAL STABİLİTELERİNİN İNCELENMESİ**

**Yağmur DİKİCİAŞIK**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ARALIK 2017**

**ANTALYA**

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

**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN GLOBAL VE  
LOKAL STABİLİTELERİNİN İNCELENMESİ**

**Yağmur DİKİCİAŞIK**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**  
**DOKTORA TEZİ**

**Bu tez Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından  
112M820 nolu proje ile ve Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FDK-2015-634 nolu proje ile  
desteklenmiştir.**

**ARALIK 2017**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN GLOBAL VE  
LOKAL STABİLİTELERİNİN İNCELENMESİ

Yağmur DİKİCİAŞIK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 22/12/2017 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK (Danışman)

Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Doç. Dr. Ali Haydar KAYHAN

Yrd. Doç. Dr. Barış ERDİL

Yrd. Doç. Dr. Ferhat ERDAL



## ÖZET

### BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN GLOBAL VE LOKAL STABİLİTELERİNİN İNCELENMESİ

Yağmur DİKİCİAŞIK

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Aralık 2017, 98 sayfa

Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar (BEÇÇ'ler) sismik bölgelerde yapılara gelen yatay istemlerin ve titreşime maruz kalan yapıların güvenliğini sağlamak için kullanılan yeni nesil yapısal elemanlardır. Burkulması engellenmiş çelik çaprazların (BEÇÇ'lerin) aksenal basınç ve çekme kapasiteleri eşit olmasının yanında BEÇÇ'ler yüksek enerji sönmleme özelliğine de sahiptirler. Bu bakımdan deprem bölgelerinde kullanılmaları giderek artmaktadır. BEÇÇ'lerin geliştirilmesine ait çalışmalar ilk olarak 1970'li yıllarda Japonya'da başlamıştır ve daha sonra özellikle deprem bölgesi üzerindeki ülkelerde devam etmiştir. BEÇÇ'ler burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) ve çekirdek elemandan (ÇE'den) meydana gelmektedirler. ÇE genel olarak çelik plaka veya profillerden, BEM ise içine beton dökülmüş çelik kutu veya boru profilden, sargılı ve sargısız betondan ve çok parçalı basınç çubuğundan meydana gelebilmektedir. BEÇÇ'lere gelen aksenal basma ve çekme istemleri altında BEM herhangi bir yük taşımayacak şekilde dizayn edilmektedir ve bütün aksenal istemler ÇE elemanı tarafından taşınmaktadır. Dolayısı ile ÇE elastik ve plastik davranış gösterebilmektedir. BEM ise ÇE'nin elastik ve plastik davranış gösterdiği durumda burkulmasını engelleyerek ÇE'ye stabilite sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında farklı BEM'lere sahip BEÇÇ'lerin aksenal istemler altında histeretik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Eleman bazında yapılan deneylerdeki BEÇÇ tasarımında Burkulmayı Engelleyen Mekanizma (BEM), izolasyon malzemesi ve kalınlığı incelenen ana parametrelerdir. BEM olarak uçları ek profil ve plaka ile güçlendirilen kutu profil+beton, sargılı ve sargısız beton, çok parçalı basınç çubuğu incelenmiştir. BEÇÇ'leri oluşturan Burkulmayı Engelleyen Mekanizma (BEM), izolasyon malzemesi ve kalınlığı araştırılarak BEÇÇ'ye ilişkin tasarım önerileri getirilmiştir. Çekirdek Eleman (ÇE) olarak hazır hadde lama profil kullanılarak BEÇÇ'ler için ekonomik çözüm önerisi getirilmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında deney elemanlarının yapım ve bağlantı detayları da verilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Bağlantı detayı, Burkulması engellenmiş çelik çapraz, Çelik yapılar, Deneysel çalışma, Enerji sönmleyici

**JÜRİ:** Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK  
Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ  
Doç. Dr. Ali Haydar KAYHAN  
Yrd. Doç. Dr. Barış ERDİL  
Yrd. Doç. Dr. Ferhat ERDAL

**ABSTRACT**  
**INVESTIGATION OF GLOBAL AND LOCAL STABILITIES OF BUCKLING  
RESTRAINED BRACES (BRBs)**

**Yagmur DIKICIASIK**

**PhD. Thesis in CIVIL ENGINEERING**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ramazan OZCELİK**

**December 2017, 98 pages**

In this study, the Buckling Restrained Braces (BRBs) with different casing systems were investigated experimentally. Buckling restrained braces (BRBs) have high energy dissipation capacity and equal tension and compression axial load capacity. Therefore, the application of BRBs has gained popularity in seismic regions. The first studies on BRBs started in Japan in 1970 and since then more studies have been undertaken in other earthquake prone countries. The BRBs consist of core plate (CP) and casing member (CM). The CM prevents the CP from buckling. Hence, the CP can yield under tension and compression demands. The component tests for four BRBs were performed in order to exam the different casing systems namely steel tube-concrete, confined and unconfined concrete and built-up sections. In unbounded steel tube-concrete BRB, steel hollow sections were attached on the restrained elastic and plastic part on the CP to prevent the local buckling. The built-up section were consisted of four steel hollow sections connected to each other via batten plates. The confined and unconfined concrete were used for CM of BRBs to obtain economical and practical casing systems. This study presents experimental investigation of buckling restrained braces (BRBs) with different casing systems. The main parameters investigated during the member based BRB tests were casing system, gap material and gap between core plate and casing. The component tests for four BRBs were performed in order to exam the different casing systems namely steel tube-concrete, confined and unconfined concrete and built-up sections. In unbounded steel tube-concrete BRB, steel hollow sections were attached on the restrained elastic and plastic part on the CP to prevent the local buckling. The built-up section were consisted of four steel hollow sections connected to each other via batten plates. The confined and unconfined concrete were used for CM of BRBs to obtain economical and practical casing systems. An economic solution was proposed to use as a ready-rolled profile Core Plate(CP). Furthermore, the connection details namely slip critical, isolation materials, and their application techniques have also been investigated for the improved BRB design in this study.

**KEYWORDS:** Buckling restrained brace, Connection detail, Energy dissipater, Experimental study, Steel structures

**COMMITTEE:** Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK  
Assoc. Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ  
Assoc. Prof. Dr. Ali Haydar KAYHAN  
Assist. Prof. Dr. Barış ERDİL  
Assist. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

## ÖNSÖZ

Bu tez Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 112M820 nolu proje ile ve Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FDK-2015-634 nolu proje ile desteklenmiştir.

TÜBİTAK 112M820 projesinde doktora tezi kapsamında eleman bazında yapılan 13 adet BEÇÇ deneyi ile BEÇÇ'leri oluşturan Burkulmayı Engelleyen Mekanizma (BEM), izolasyon malzemesi ve kalınlığı araştırılmıştır. BEÇÇ'ye ilişkin tasarım önerileri getirilmiştir.

Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında ÇE olarak hazır hadde lama profil kullanılarak lazer kesim işlemine gerek kalmadan BEÇÇ üretimi hedeflenmiş ve bu sayede istenilen uzunlukta BEÇÇ pahalı bir kesim olan lazer kesim kullanılmadan elde edilmiştir. Dolayısı ile BEÇÇ'lerin lazer kesime ihtiyaç duyulmadan lama hadde çeliklerden üretilmesi ile BEÇÇ'ler için ekonomik çözüm önerisi getirilmiştir.

Tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam sayın Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK'e; bilimin ve bilim insanının destekçileri Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ .....	iii
AKADEMİK BEYAN .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK TARAMASI .....	4
2.1. BEÇÇ'lerin Geliştirilmesi Ve Çeşitleri .....	4
2.2. BEÇÇ'lerin Eleman Ve Çerçeve Benzeri Sistem Bazında Davranışı .....	5
2.3. BEÇÇ'lerin Çerçeve Sistemi İçerisindeki Deneyleri .....	18
3. MATERYAL VE METOD .....	24
3.1. TÜBİTAK 112M820 Projesi Kapsamında Yapılan Deneysel Çalışmalar .....	24
3.1.1. Birinci grup BEÇÇ elemanları.....	25
3.1.2. İkinci grup BEÇÇ elemanları .....	45
3.2. BAP Projesi Kapsamında Yapılan Deneysel Çalışmalar .....	50
3.3. Yükleme Protokolü.....	52
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	56
4.1. TÜBİTAK 112M820 Projesi Kapsamında Yapılan Testler .....	56
4.1.1. Birinci grup BEÇÇ elemanlarına ait deney sonuçları ve gözlemler.....	56
4.1.2. İkinci grup BEÇÇ elemanlarına ait deney sonuçları ve gözlemler.....	78
4.2. BAP Projesi Kapsamında Yapılan Testler .....	86
5. SONUÇLAR .....	89
6. KAYNAKLAR .....	91
7. EKLER.....	96
ÖZGEÇMİŞ .....	



## AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘**BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN GLOBAL VE LOKAL STABİLİTELERİNİN İNCELENMESİ**’ adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tđm bilgilerin kaynağını gđsterdiđimi beyan ederim.

22/12/2017

Yağmur Dikiciaşık

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

m : metre

kg : kilogram

s : saniye

Ondalık ayırıcı olarak nokta kullanılmıştır.

### Kısaltmalar

ÇÇ : Çelik Çapraz

BEM : Burkulmayı Engelleyen Mekanizma

ÇE : Çekirdek Eleman

BEÇÇ : Burkulması Engellenmiş Çelik Çapraz

AISC : American Institute Of Steel Construction

SPÇ : Sargılı Plastik Çapraz

TVÇÇ : Ters V Çelik Çapraz

KEM : Kayma Engelleyici Mekanizma

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 1.1.</b> a) Çelik çaprazlı çerçeve; b) Çelik çaprazın histeretik davranışı; c) BEÇÇ'nin histeretik davranışı. ....	1
<b>Şekil 1.2.</b> BEÇÇ boyutları ve en kesitleri .....	3
<b>Şekil 2.1.</b> a) BEÇÇ; b) Prekast BEÇÇ için çizim ve fotoğraf.....	4
<b>Şekil 2.2.</b> BEÇÇ'lerin en kesit gösterimleri.....	4
<b>Şekil 2.3.</b> Iwata vd. (2000) tarafından test edilen BEÇÇ'lerin deney düzeneği, kesit görünüşleri ve histeretik davranışları.....	6
<b>Şekil 2.4.</b> a) Deney düzeneği; b) Deney elemanı T-1 için eksenel yük-eksenel deformasyon grafiği; c) Deney elemanı specimen 00-12 .....	7
<b>Şekil 2.5.</b> a) Deney düzeneği; b) BEÇÇ'nin boyutları, ÇE ve ek plakalar; c) A-A en kesit gösterimi; d) B-B en kesit gösterimi; e) BEÇÇ'nin uç detayı; f) Deney elemanı BIB-L1'in histeretik davranışı .....	8
<b>Şekil 2.6.</b> a) SPÇ test elemanı Tip 1; b) SPÇ test elemanı Tip 2; c) SPÇ kesit görünümü; d) Test elemanı Tip 2'nin histeretik davranışı. ....	9
<b>Şekil 2.7.</b> a) BEÇÇ; b) BEÇÇ'nin en kesit gösterimi; c) Deney elemanı Specimen B7-R5B-L3'e ait histeretik davranış. ....	10
<b>Şekil 2.8.</b> a) BEÇÇ'nin kısımları; b) Deney elemanın histeretik davranışı; c) BEÇÇ'nin en kesitleri; d) Test çerçevesi; e) BEÇÇ'nin bağlantı detayı; f) Deprem kaydı altında histeretik davranışı; g) Statik yük protokolü; h) Statik yük altında histeretik davranış; ı) BEÇÇ'de burkulma.....	12
<b>Şekil 2.9.</b> a) Test çerçevesi; b) BEÇÇ; c) BEÇÇ en kesit gösterimi; d) Normalize edilmiş yatay yük-yatay deplasman grafiği; d) Boru profil üzerinde ölçülen yük ve deplasman.....	13
<b>Şekil 2.10.</b> a) Beton-boru profilden oluşan BEM'li BEÇÇ'ler; b) Plaka-kutu profilden oluşan BEM'li BEÇÇ; c) BEÇÇ'lerin ÇE boyutları.....	15
<b>Şekil 2.11.</b> a) C1-1'in histeretik davranışları; b) C1-1 boru profildeki eksenel yük değişimi; c) S1-1 ve S2-1'nin histeretik davranışları.....	16
<b>Şekil 2.12.</b> a) Test çerçevesi; b) Test 1 fotoğraf; c) Test 2 ve 3 fotoğraf; d) Test 1 için histeretik davranış; e) Test 2 için histeretik davranış; f) Test 1, bayrak levhası ve sol kolon üst birleşiminde yırtılma; g) Test 2, üst sol bayrak levhasında burkulma; h) Test 3, sol üst düğüm noktasında kiriş alt başlığında yırtılma; i) Test 3, üst sol düğüm noktasında dönme.....	17

<b>Şekil 2.13.</b> a) Deney düzeneği ve BEÇÇ en kesitleri; b) Deney 1 için histeretik davranış; c) Deney 3 için histeretik davranış.....	18
<b>Şekil 2.14.</b> a) Çerçevenin analitik gösterimi; b) BEÇÇ'nin testten önceki durumu; c) Referans BRB'nin histeretik davranışı; d-e) Test esnasında BEÇÇ'nin belirtilen uçlarda kayması; f) BEÇÇ'nin uç kısmında plastikleşme ve dönme.....	19
<b>Şekil 2.15.</b> a) Deney çerçevesinin plan görünümü; b) Deney çerçevesinin fotoğrafı; c) Deneyde kullanılan BEÇÇ'ler; d-k) Deney esnasında gözlenen deformasyonlar ve bayrak levhasına eklenen plakalar .....	21
<b>Şekil 2.16.</b> Bayrak levhasındaki kuvvetler .....	22
<b>Şekil 2.17.</b> a) Bayrak levhası ve ek plakalar; b) Deney çerçevesi çizimi; c) Deney çerçevesi yükleme yönleri.....	22
<b>Şekil 2.18.</b> a) Deney çerçevesi çizimi; b) Bağlantı detayı 1; c) Bağlantı detayı 2.....	23
<b>Şekil 3.1.</b> Akdeniz Üniversitesi Yapı Laboratuvarı .....	24
<b>Şekil 3.2.</b> Lazer kesim yapılacak çekirdek elemanın genel görünüşü .....	26
<b>Şekil 3.3.</b> Bu tez kapsamında test edilen BEÇÇ boyu, plaka kalınlığı $t=15\text{mm}$ .....	26
<b>Şekil 3.4.</b> Tez kapsamında test edilen BEÇÇ'nin çelik çerçeve içerisine yerleştirilmesi durumunda BEÇÇ'Lİ çerçeve boyutları .....	27
<b>Şekil 3.5.</b> Deneysel çalışmanın yapılacağı Yapı Laboratuvarı .....	28
<b>Şekil 3.6.</b> Deney düzeneğine ait detay çizimleri.....	28
<b>Şekil 3.7.</b> Deney düzeneğine ait detay fotoğrafları.....	29
<b>Şekil 3.8.</b> Eleman 1. BEÇÇ_1 için detay çizimleri.....	32
<b>Şekil 3.9.</b> Eleman 1. BEÇÇ_1 için üretim süreci.....	32
<b>Şekil 3.10.</b> M24 10.9 kalite bulon sıkma kalibrasyonu için deney düzeneği.....	34
<b>Şekil 3.11.</b> BEÇÇ ve deney düzeneği bağlantısı.....	34
<b>Şekil 3.12.</b> Eleman 2. BEÇÇ_1 için detay çizimleri.....	35
<b>Şekil 3.13.</b> Eleman 2. BEÇÇ_1 için üretim aşaması.....	35
<b>Şekil 3.14.</b> Eleman 4. BEÇÇ_1 için detay çizimleri.....	36
<b>Şekil 3.15.</b> Eleman 4. BEÇÇ_1 için üretim aşaması.....	36

<b>Şekil 3.16.</b> Eleman 5. BEÇÇ_1 için detay çizimleri.....	38
<b>Şekil 3.17.</b> Eleman 5. BEÇÇ_1 için yapım detayı.....	38
<b>Şekil 3.18.</b> Eleman 7. BEÇÇ_1 için detay çizimleri.....	40
<b>Şekil 3.19.</b> Eleman 7. BEÇÇ_1 için yapım detayı.....	40
<b>Şekil 3.20.</b> Eleman 8. BEÇÇ_1 için detay çizimleri.....	42
<b>Şekil 3.21.</b> Eleman 8. BEÇÇ_1 için yapım detayı.....	42
<b>Şekil 3.22.</b> Eleman 9. BEÇÇ_1 için detay çizimleri.....	44
<b>Şekil 3.23.</b> Eleman 9. BEÇÇ_1 için yapım detayı.....	44
<b>Şekil 3.24.</b> Eleman 1. BEÇÇ_2 için detay çizimleri.....	46
<b>Şekil 3.25.</b> Eleman 1. BEÇÇ_2 için yapım detayı.....	46
<b>Şekil 3.26.</b> Eleman 2. BEÇÇ_2 için detay çizimleri.....	48
<b>Şekil 3.27.</b> Eleman 2. BEÇÇ_2 için yapım detayı.....	48
<b>Şekil 3.28.</b> Eleman 3. BEÇÇ_2 için detay çizimleri.....	49
<b>Şekil 3.29.</b> Eleman 3. BEÇÇ_2 için yapım detayı.....	49
<b>Şekil 3.30.</b> Lama profilli BEÇÇ elemanı detay çizimleri .....	52
<b>Şekil 3.31.</b> Lama profilli BEÇÇ eleman yapım detayları .....	52
<b>Şekil 3.32.</b> Yükleme protokolü (2. BEÇÇ_1).....	54
<b>Şekil 3.33.</b> Ölçüm sisteminin yerleştirilmesi .....	55
<b>Şekil 4.1.</b> Eleman 1.-10. BEÇÇ_1 için aksenal yük-birim şekil değiştirme grafiği .....	62
<b>Şekil 4.2.</b> Eleman 2, 3, 6, 8 ve 9. BEÇÇ_1 için yorulma testi .....	66
<b>Şekil 4.3.</b> Eleman 1. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	67
<b>Şekil 4.4.</b> Eleman 2. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	67
<b>Şekil 4.5.</b> Eleman 3. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	68
<b>Şekil 4.6.</b> Eleman 4. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	68

Şekil 4.7. Eleman 5. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	69
Şekil 4.8. Eleman 6. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	69
Şekil 4.9. Eleman 7. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	69
Şekil 4.10. Eleman 8. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	70
Şekil 4.11. Eleman 9. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	70
Şekil 4.12. Eleman 10. BEÇÇ_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	71
Şekil 4.13. Eleman 1-10. BEÇÇ_1 için bulonlarda meydana gelen kayma miktarı.....	72
Şekil 4.14. Eleman 1-10. BEÇÇ_1 için ÇE birim şekil değiştirme.....	73
Şekil 4.15. Eleman 1-10. BEÇÇ_1 için yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar.....	75
Şekil 4.16. Eleman 1.-3. BEÇÇ_2 için eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği.....	80
Şekil 4.17. Eleman 1. BEÇÇ_2 için deney sonrası çekilmiş fotoğraflar.....	81
Şekil 4.18. Eleman 2. BEÇÇ_2 için deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	81
Şekil 4.19. Eleman 3. BEÇÇ_2 için deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	82
Şekil 4.20. Eleman 1-3. BEÇÇ_2 için bulonlarda meydana gelen kayma miktarı.....	83
Şekil 4.21. Eleman 1-3. BEÇÇ_2 için ÇE birim şekil değiştirme.....	84
Şekil 4.22. Eleman 1-3. BEÇÇ_2 için yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar.....	85
Şekil 4.23. BEÇÇ_BAP elemanına ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği.....	87
Şekil 4.24. BEÇÇ_BAP deney sonrası çekilmiş fotoğrafları.....	87
Şekil 4.25. BEÇÇ_BAP elemanındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı.....	87
Şekil 4.26. BEÇÇ_BAP elemanına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar.....	88
Şekil 7.1. Eleman 1. BEÇÇ_1 için malzeme testi grafiği.....	96
Şekil 7.2. Eleman 4. BEÇÇ_1 için malzeme testi grafikleri.....	96
Şekil 7.3. Eleman 8. BEÇÇ_1 için malzeme testi grafikleri.....	97
Şekil 7.4. Eleman 6. BEÇÇ_1, 3. BEÇÇ_1 ve 10. BEÇÇ_1 için malzeme testi grafikleri.....	97

**Şekil 7.5.** Eleman 5. BEÇÇ\_1, 9. BEÇÇ\_1 ve 7. BEÇÇ\_1 için malzeme testi grafiği ..... 98

**Şekil 7.6.** Eleman 1. BEÇÇ\_2, 3. BEÇÇ\_2 ve 2. BEÇÇ\_2 için malzeme testi grafikleri ..... 98

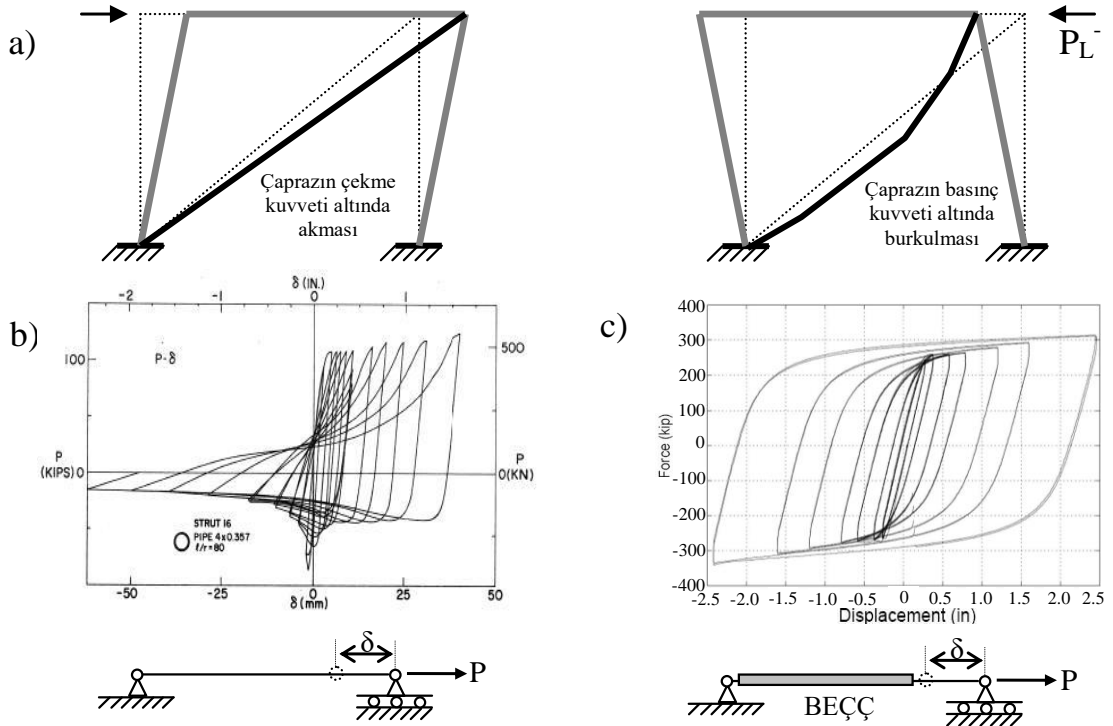
## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. $P_e/P_y$ oranları.....	5
Çizelge 3.1. Birinci grup deney elemanları .....	30
Çizelge 3.2. İkinci grup BEÇÇ elemanları .....	45
Çizelge 3.3. BAP projesi kapsamında test edilen eleman özelliği.....	50
Çizelge 3.4. Yükleme protokolü değerleri.....	54
Çizelge 4.1. Birinci grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük değerleri.....	56
Çizelge 4.2. İkinci grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük değerleri .....	78
Çizelge 4.3. BEÇÇ_BAP elemanına ait eksenel yük değerleri .....	86
Çizelge 5.1. Test elemanları.....	89



## 1. GİRİŞ

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



**Şekil 1.1. a)** Çelik çaprazlı çerçeve; **b)** Çelik çaprazın histeretik davranışı (Black vd. (1980)'den adapte edilmiştir); **c)** BEÇÇ'nin histeretik davranışı (Black vd. 2002'den adapte edilmiştir)

Bu şekilde de görüldüğü gibi BEÇÇ'nin aksel çekme ve basınç deformasyonları altındaki davranışları hemen hemen eşit olmasının yanında enerji sönmeme kapasiteleri de diğer çelik çaprazlara göre oldukça stabil ve yüksektir. BEÇÇ'ler genel olarak Şekil 1.2'de görüldüğü gibi beş kısma ayrılmaktadır:

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

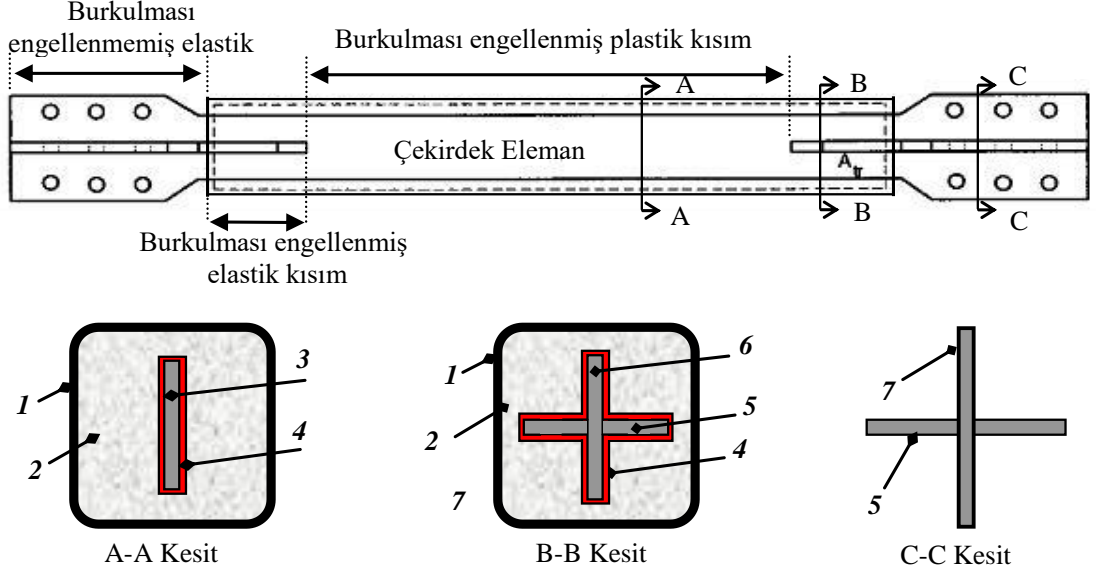
b) Burkulması engellenmemiş elastik kısım: Bu kısım çaprazın çerçeve elemanına (bayrak levhası) bağlantısını sağlayacak şekilde tasarlanır. ÇE'nin aksel çekme ve basınç deformasyonları altında plastikleşmesi ve pekleşmesi sırasında elastik davranış göstermektedir. Bu kısım, çelik çaprazın bayrak levhasına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

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

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

e) Genişlemeyi sağlayan boşluk ve izolasyon malzemesi: Bu kısım için ÇE'nin yüzeyi ince bir malzeme ile kaplanabileceği gibi BEÇÇ'lerin yapımı aşamasında BEM ile ÇE'nin arasında belli bir mesafede boşluk bırakılarak da oluşturulabilir. Bu kısım ile ilgili olarak ince lastik, polietilen, silikon gres, band şerit vb. gibi farklı malzemeler denenmiştir. Hangi malzeme kullanılırsa kullanılsın, burada önemli olan BEM ile ÇE arasında sürtünmeden kanaklanan kuvvet aktarımının engellenmesidir. Bu kuvvetin kısmen dahi olsa engellenmemesi durumunda BEÇÇ'lerin basınç kapasitesi çekme kapasitesinden büyük olacaktır. ÇE ve BEM arasında, ÇE'nin yüksek modda burkulmasına izin verilecek kadar mesafe bırakılabilir. Ancak bu boşluğun fazla olması durumunda ise lokal burkulmalar ve buna bağlı olarak ÇE'nin yorulma ömrü kısalmaları ve sürtünmeden kaynaklanan ek aksel basınç kapasite artımı meydana gelebilir. Basınç deformasyonu altında poisson etkisi ile ÇE'de meydana gelecek hacimsel değişim dikkate alınmalıdır ve ÇE'nin elastik durumu için poisson oranı 0.3, plastikleşme durumu için 0.5 alınabilir (Uang ve Nakashima 2004).

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



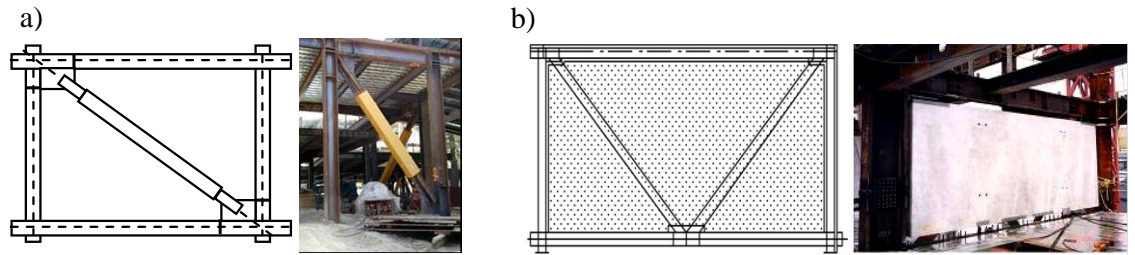
1=çelik kutu profil, 2=beton (1 ve 2 burkulmayı önleyen mekanizma), 3=çekirdek eleman (plastik), 4=genişlemeyi sağlayan malzeme veya izolasyon malzemesi, 5=ek plaka, 6 ve 7=en kesiti arttırılmış çekirdek eleman (elastik)

**Şekil 1.2.** BEÇÇ boyutları ve en kesitleri (Wada vd. 1998; Lopez 2001'den adapte edilmiştir)

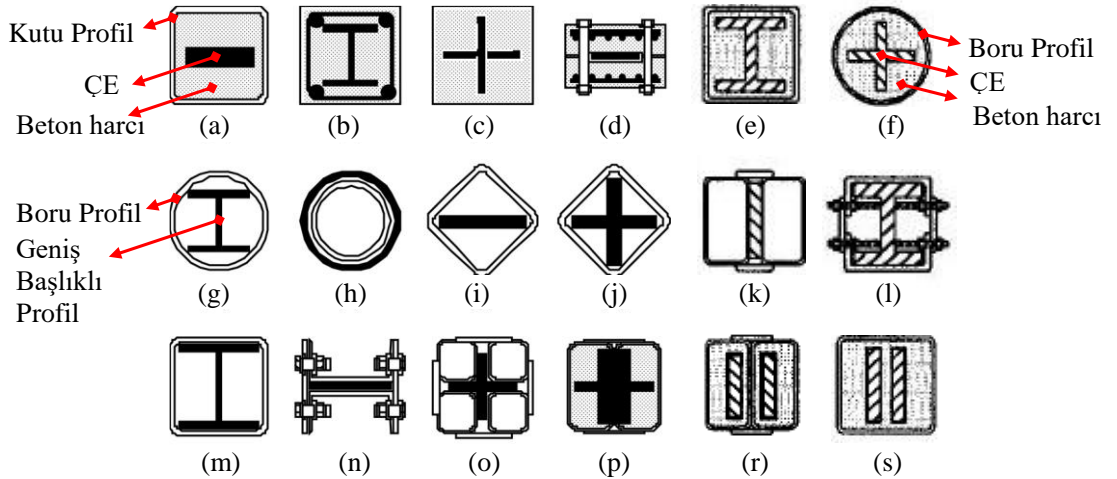
## 2. KAYNAK TARAMASI

### 2.1. BEÇÇ'lerin Geliştirilmesi Ve Çeşitleri

BEÇÇ'lerin geliştirilmesi ile ilgili ilk çalışmalar 1970'li yıllarda Japonya'da başlamıştır (Uang ve Nakashima 2004; Uang vd. 2004; Qiang 2005), diğer çalışmalar ise Taiwan (Tsai vd. 2004) ve ABD'de yapılan kapsamlı araştırmalarla devam etmiştir. BEÇÇ'ler genel olarak iki kısma ayrılmaktadır (Şekil 2.1). İlk kısımdaki BEÇÇ'ler: genel olarak ÇE'nin BEM (Çelik kutu veya boru profil ve uygun şekilde hazırlanmış betonarme plakalar) ile arasında sürtünmeyi engelleyici malzeme ve hava boşluğu kullanılarak oluşturulmaktadır (Şekil 2.2.a). Diğer BEÇÇ tipi ise: ÇE'nin prekast beton paneller arasına yerleştirilmesi ile elde edilmektedir (Şekil 2.1.b). Bu çalışmada ilk kısımdaki BEÇÇ'ler incelenecektir.



Şekil 2.1. a) BEÇÇ (http://nisee.berkeley.edu); b) Prekast BEÇÇ (Uang vd. 2004) için çizim ve fotoğraf



Şekil 2.2. BEÇÇ'lerin en kesit gösterimleri (Tsai vd. 2004; Qiang 2005'den adapte edilmiştir)

Şekil 2.2 araştırmacılar tarafından incelenmiş bazı BEÇÇ'lerin en kesitlerini göstermektedir. Şekil 2.2.a ve f'de görülen BEÇÇ tipinde: ilk olarak ÇE'nin yüzeyi sürtünmeyi engelleyici malzemele ile kaplanır ve daha sonra kutu veya boru profil içerisine yerleştirilir ve beton harcı profilin içine dökülür. Burada ÇE Şekil 2.2.a'da görüldüğü gibi dikdörtgen kesitli bir eleman olabileceği gibi bu kesit "+" şeklinde de olabilir. Şekil 2.2.p'de gösterildiği gibi ÇE yatık "T" şeklinde iki ayrı BEÇÇ'nin

birleştirilmesiyle oluşturulabilir ve bu tip BEÇÇ'ler bayrak levhasına bağlantılarının daha kolay olmasından dolayı da tercih edilmektedir. BEM tamamen çelik yapı elemanları kullanılarak da elde edilebilir (Şekil 2.2.k, l, n ve o). Bunların yanında, kutu veya boru profil içerisine (beton harcı koymadan) ÇE olarak, geniş başlıklı profil, kutu veya boru profil yerleştirilerek de BEÇÇ elde edilebilir (Şekil 2.2.g, h, i, j, m). Bu en kesitlere ek olarak, tasarımcı mühendis tarafından da BEÇÇ tasarlanabilir. Burada önemli olan en kesit koşulları değil, elde edilen BEÇÇ'lerin belirli standartlarda göstermiş olduğu histeretik davranıştır. Bu konu hakkında gelecek bölümlerde ayrıntılı bilgi verilecektir.

## 2.2. BEÇÇ'lerin Eleman Ve Çerçeve Benzeri Sistem Bazında Davranışı

Kare ve dikdörtgen kutu profil içerisine beton doldurulmasıyla (profil-beton) oluşan burkulma engelleme mekanizmasına sahip BEÇÇ'lerin global burkulmasını önlemek için Watanabe vd. (1988) beş adet test yapmışlardır ve Denklem 2.1'i önermişlerdir.

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 \quad (2.1)$$

$$P_e = \frac{\pi^2 \times E \times I_{sc}}{(l_{sc})^2} \quad (2.2)$$

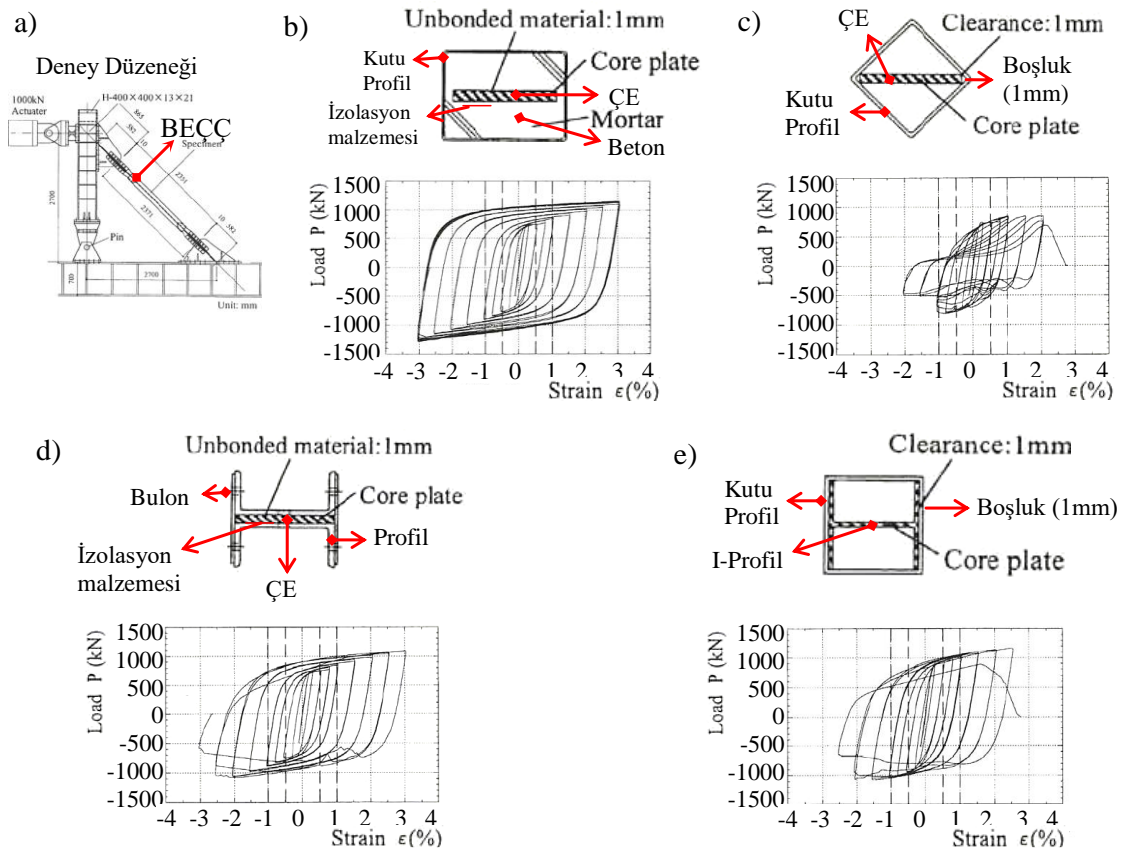
$$P_y = \sigma_y \times A_c \quad (2.3)$$

**Çizelge 2.1.**  $P_e/P_y$  oranları (Watanabe vd. 1988'den alınmıştır)

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

Burada  $P_e$  BEM'in (kutu profil) Euler yük kapasitesi (Denklem 2.2),  $P_y$  ise ÇE'nin akma kapasitesidir (Denklem 2.3). Bu denklemlerde: E çeliğin elastisite modülü,  $I_{sc}$  BEM'nin atalet momenti,  $l_{sc}$  çapraz uzunluğu,  $\sigma_y$  ÇE'nin akma gerilmesi,  $A_c$  ÇE'nin plastik bölgedeki en kesit alanıdır. Bu test elemanlarının kesit özellikleri Şekil 2.2.a'dakine benzemekle beraber farklı  $P_e/P_y$  oranlarına sahiptirler (Çizelge 2.1). Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi bu oran test elemanları 4 ve 5 için birden küçüktür. Bunun sonucu olarak bu iki test elemanında deney esnasında global burkulma meydana gelmesine rağmen diğer ilk üç elemanda basınç ve çekme deformasyonları altında kararlı ve simetrik histeretik davranış elde edilmiştir. Watanabe vd. (1988) deney çalışmalarına ek olarak yapmış oldukları analitik çalışmalarda  $P_e/P_y$  oranının birden büyük olmasına rağmen ÇE'deki geometrik kusur gibi etkilerden dolayı bu değer yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Watanabe vd. (1988) pratik olarak  $P_e/P_y$  oranının 1.5'ten büyük olmasını önermişlerdir.

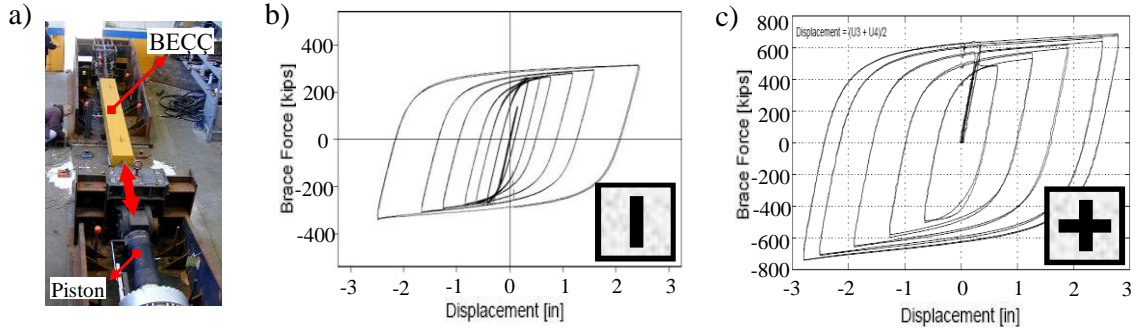
Iwata vd. (2000) ticari olarak Japonya’da bulunan dört farklı tipdeki BEÇÇ’leri Şekil 2.3.a’daki deney düzeneğinde test etmişlerdir (Iwata vd. 2000). Burada test edilen BEÇÇ’lerin en kesitleri ve histeretik davranışları Şekil 2.3’te gösterilmektedir. Test edilen BEÇÇ’lerin ÇE kesit alanları eşittir ve akma gerilmesi 263 MPa’dır (SN400 çelik sınıfı). Şekil 2.3.b’deki BEÇÇ’de, ÇE ile beton harcı arasında 1 mm kalınlığında yumuşak lastik şeritler bulunmaktadır. Şekil 2.3.c ve e’de görüldüğü gibi ÇE (dikdörtgen şeklinde plaka ve geniş başlıklı profil) ile BEM arasında sürtünmeyi önleyici madde yerine hava boşluğu bulunmaktadır. Şekil 2.3.b’deki BEÇÇ daha önce Watanabe vd. (1988) tarafından test edilen BEÇÇ ile aynı kesit özelliğine sahiptir. Şekil 2.3.d’de test edilen BEÇÇ’de, ÇE iki “U” profil içerisine 1 mm’lik yumuşak plastik şeritler kullanılarak yerleştirilmiştir. U profiller iki plaka yardımıyla yüksek mukavemetli bulonlarla birleştirilerek ÇE’nin burkulması önlenmiştir. Şekil 2.3.b’de görüldüğü gibi test elemanı kararlı histeretik davranışa sahiptir. Bu test elemanı ÇE’nin her iki ucunda lokal burkulmadan dolayı kapasitesine ulaşmıştır. Şekil 2.3.c ve e’deki test elemanları lokal burkulmalardan dolayı diğerlerine göre performansları daha düşüktür. Şekil 2.3.d’de verilen test elemanı yüksek mukavemetli bulonların kopması ile kapasiteye ulaşmıştır (Iwata vd. 2000).



**Şekil 2.3.** Iwata vd. (2000) tarafından test edilen BEÇÇ’lerin deney düzeneği, kesit görünüşleri ve histeretik (eksenel yük-birim uzama) davranışları

Amerika Birleşik Devletleri’nde BEÇÇ deneyleri ilk olarak 1999 yılında Kalifornia Üniversitesi’nde (Berkeley) Clark vd. (1999) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada profil-beton birleşiminden oluşan BEM’e sahip üç adet BEÇÇ test edilmiştir.

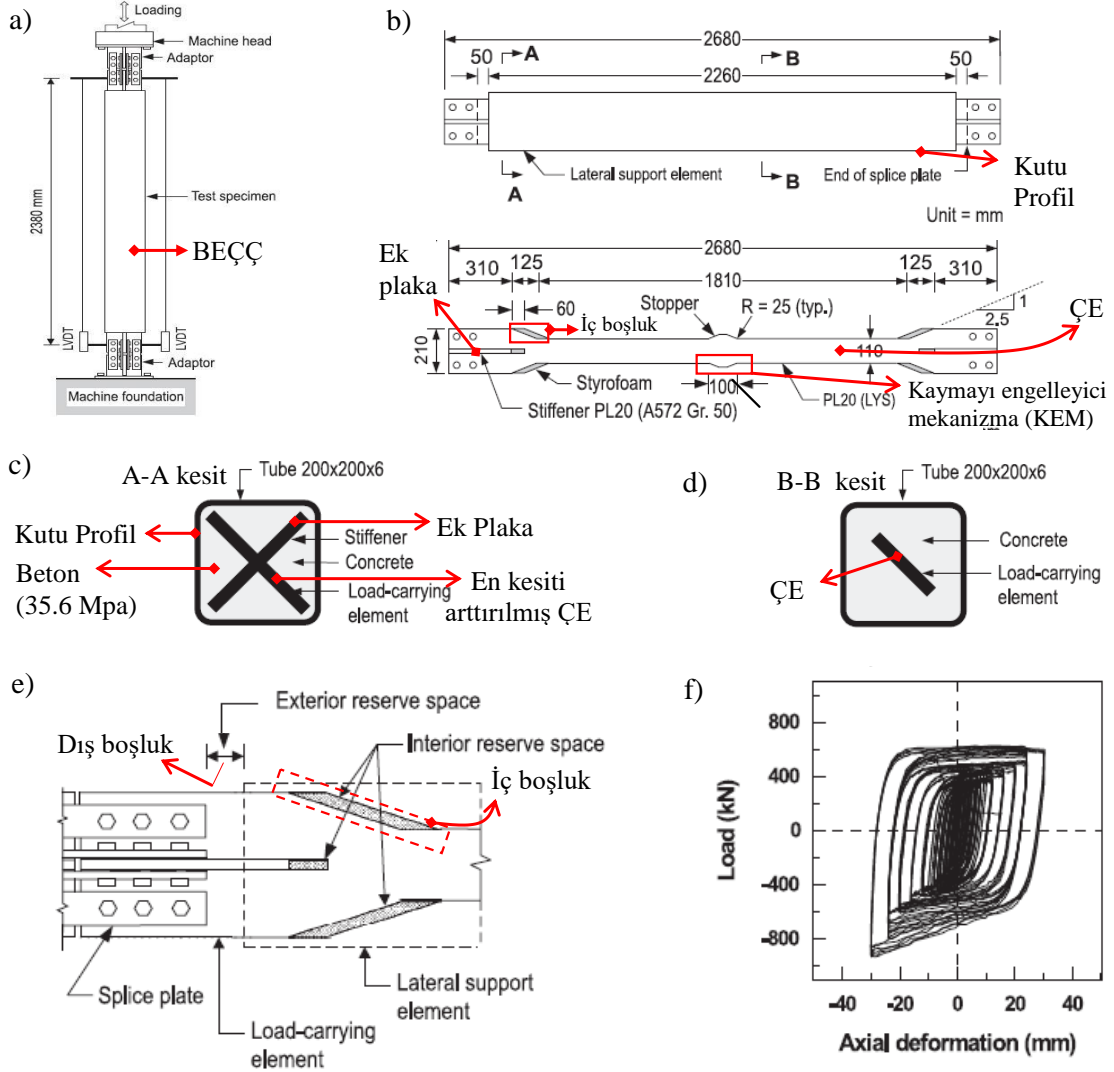
Bu BEÇÇ'ler dikdörtgen ve "+" şeklinde ÇE'lere sahiptirler. ÇE'lerin akma gerilmesi 419 MPa'dır. Bu çalışmanın devamı olarak "+" şeklinde 285 MPa akma gerilmesine sahip ÇE'den oluşan iki adet test Black vd. (2002) tarafından yapılmıştır. Black vd. (2002)'de yapılan çalışmada ayrıca BEÇÇ'lerin stabilite alanizleri geniş olarak ele alınmıştır. Kalifornia Üniversitesinde yapılan deneyler Şekil 2.4.a'daki deney düzeneğinde görüldüğü gibi zemine paralel olarak yapılmıştır ve iki test elemanın histeretik davranışı Şekil 2.4.b ve c'de gösterilmiştir. Ayrıca bu şekil üzerinde BEÇÇ'lerin orta açıklıktaki kesit görünüşleri de verilmiştir. BEÇÇ'lerin birim uzamaları yaklaşık olarak %2 civarındadır.



**Şekil 2.4.** a) Deney düzeneği; b) Deney elemanı T-1 için eksenel yük-eksenel deformasyon grafiği; c) Deney elemanı specimen 00-12 (Clark vd. 1999; Black vd. 2002'den adapte edilmiştir)

Chen vd. (2001) ÇE'nin akma gerilmesinin (100 MPa) düşük ve sünek çelikten (%50 birim uzama kapasitesi) oluşan BEÇÇ'leri Şekil 2.5.a'da görülen düşey eksenindeki deney düzeneğinde test etmişlerdir (Chen vd. 2001). Bu tip malzeme kullanılarak elde edilen BEÇÇ'li çerçeveler düşük kat ötelemelerinde BEÇÇ'lerin plastikleşmeye başlaması ve ÇE'nin sünek olmasından dolayı yüksek enerji sönmleme özelliğinde olduğu belirtilmiştir (Chen vd. 2001). BEÇÇ'lerdeki ÇE, çerçeve davranışına bağlı olarak maruz kaldığı eksenel basınç ve çekme deformasyonları ile kısalmakta ve uzamaktadır. Bunun yanında BEM'de herhangi bir yük istemi bulunmadığı için eksenel deformasyon söz konusu değildir. Bu durumda, BEÇÇ'lerin iç kısmında, ÇE'nin kesitinin arttırıldığı burkulması engellenmiş elastik kısım (Şekil 2.5.c, d ve e), BEM'e (Beton) temas etmesine izin vermemek için Şekil 2.5.b ve e'deki iç boşluk ve çelik kutu profil ile bağlantı elemanlarının temasını engellemek için dış boşluk bırakılmıştır. İç boşluk, BEÇÇ'nin hazırlanışı esnasında beton dökümünden önce yumuşak bir malzeme (sumi köpük) yerleştirilerek yapılmıştır. ÇE ile beton arasındaki sürtünmenin engellenmesi için ÇE'nin üzerine işçiliğinin kolay olmasından dolayı silikon gres sürülmüştür (bu durumda da beton ve ÇE arasındaki boşluk çok az olmaktadır). Bu işlem sonucunda ÇE sürtünmesiz olarak BEM içerisinde basınç ve çekme istemine göre hareket edebilmektedir. Bu esnada, ÇE'nin ve BEM'in orta açıklıklarındaki göreceli olarak hareketine izin verilmemelidir. Bu göreceli kayma hareketini engellemek için ÇE'nin orta açıklığında en kesit alanı arttırılarak kaymayı engelleyici mekanizma (KEM) oluşturulmuştur (Şekil 2.5.b). Aksi halde, BEM'in, BEÇÇ'nin çerçeveye bağlandığı durumda düşey ekseninde kayması söz konusu olmaktadır. Şekil 2.2.f'de görüldüğü gibi BEÇÇ'nin histeretik davranışı -20 mm'den sonra simetrik değildir. Bunun en önemli sebebi, beton ve ÇE arasındaki boşluğun (silikon gres) çok az

olmasından dolayı basınç deformasyonu altında poisson etkisinden dolayı meydana gelen genişlemeden kaynaklanmaktadır (Chen vd. 2001). Bu tip BEÇÇ'lerin V ve ters V çelik çaprazlı (chevron brace) çerçeveler yerine diagonal merkezi çerçevelerde kullanılması daha uygundur (Chen vd. 2001).

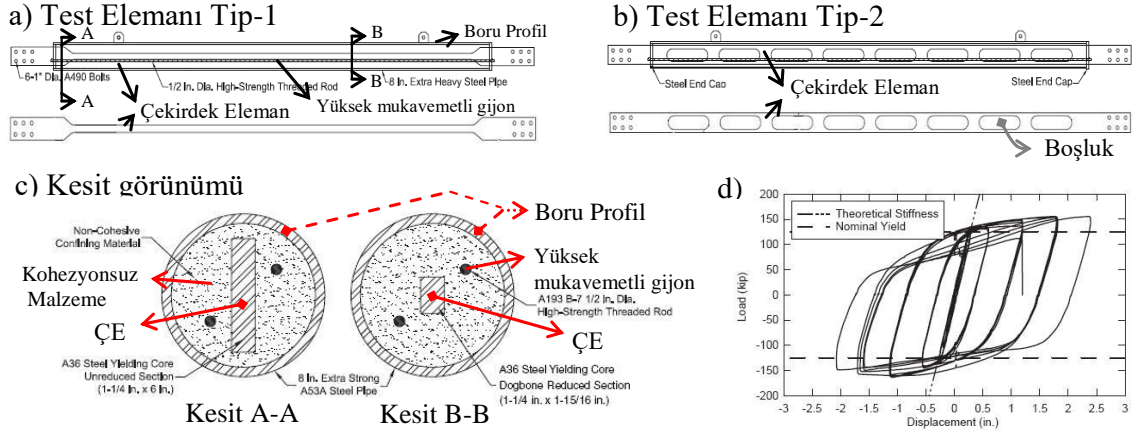


**Şekil 2.5.** a) Deney düzeneği; b) BEÇÇ'nin boyutları, ÇE ve ek plakalar; c) A-A en kesit gösterimi; d) B-B en kesit gösterimi; e) BEÇÇ'nin uç detayı; f) Deney elemanı BIB-L1'nin histeretik davranışı (Chen vd. 2001'den adapte edilmiştir)

Higgins ve Newell (2002) yukarıda bahsedilen profil-beton'dan oluşan BEM'den farklı olarak, ÇE'yi kohezyonsuz malzeme içerisine yerleştirerek elde ettikleri sargılı plastik çaprazları (SPÇ) geliştirip test etmişlerdir (Higgins ve Newell 2002). Higgins ve Newell ilk olarak ölçeklendirilmiş (Higgins ve Newell 2002) ve daha sonra tam ölçekli (Higgins ve Newell 2004) SPÇ'leri test etmişlerdir. Bu çalışmadaki SPÇ'lerin BEÇÇ'lerden farkı: Boru profil içerisine, beton harcı yerine, kohezyonsuz madde (kum ve çakıl karışımı) yerleştirilip sıkıştırılmasıdır (Şekil 2.6.c). Kullanılan ÇE'nin malzeme sınıfı A36 olup akma ve en yüksek gerilme değeri sırasıyla 357 ve 497 MPa'dır. İki farklı ÇE geometrisine (Şekil 2.6.a ve b) sahip toplam 14 adet SPÇ, Şekil

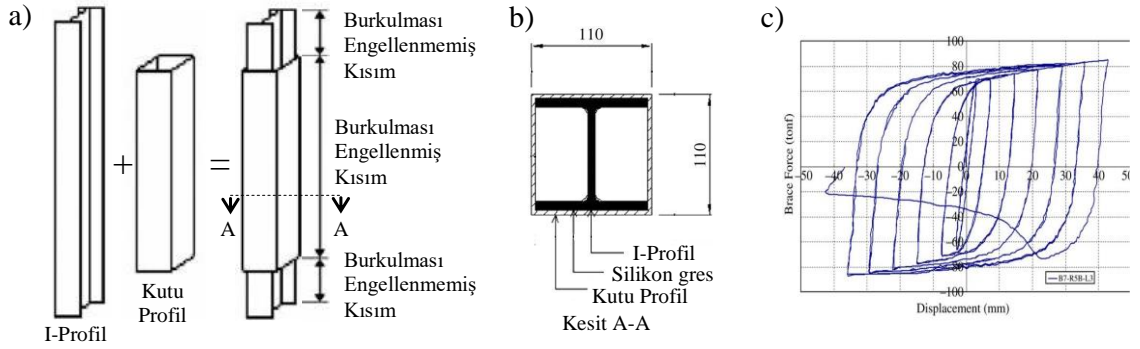


2.4.a'dakine benzer bir deney düzeneğinde test edilmiştir (Higgins ve Newell 2004). Bu testlerde, kohezyonsuz malzeme ve sıkıştırma yöntemi, ÇE'nin geometrisi ve uygulanan yükleme protokolünün SPÇ'lerin performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir (Higgins ve Newell 2004). Yapılan testlerde SPÇ'lerin performanslarının büyük oranda kullanılan kohezyonsuz malzemenin dane boyutuna ve şekline bağlı olduğu görülmüştür. Şekil 2.6.d gösterilen ve test elemanı 2'ye ait olan histeretik davranışın oldukça stabil olmasına karşın bazı deneylerde basınç ve çekme kapasitelerinde büyük farklar oluşmuştur (Higgins ve Newell 2004).



**Şekil 2.6.** a) SPÇ test elemanı Tip 1; b) SPÇ test elemanı Tip 2; c) SPÇ kesit görünümü; d) Test elemanı Tip 2'nin histeretik davranışı (Higgins ve Newell 2004'ten adapte edilmiştir)

Geniş başlıklı I-profilin betonsuz kutu profilden oluşan BEM içine, sürtünmeyi engellemek için silikon gres kullanılarak oluşturulan ve bir örneği Şekil 2.7.a ve b'de gösterilen BEÇÇ'ler Young vd. (2009) tarafından test edilmiştir. Şekil 2.5.a'daki deney düzeneğine benzer bir sistemde test edilen BEÇÇ'lerin ÇE'leri 240 MPa nominal akma gerilmesine sahiptir. KEM I-profilin başlıklarına eklenen plakalar ile sağlanmıştır. Bu çalışmada, BEÇÇ'lerin uç kısımlarının (burkulması engellenmemiş kısım) güçlendirilmemesi, farklı boylarda güçlendirilmesi ve kutu profilin et kalınlığı gibi parametreler incelenmiştir. Şekil 2.7.c'de görüldüğü gibi söz konusu elemanın histeretik davranışı oldukça karardır. Bunun en önemli sebebi, bu eleman için kullanılan kutu profilin et kalınlığı diğerlerine göre daha büyüktür ve BEÇÇ uçları ek plakalarla güçlendirilmiştir. Kutu profilin et kalınlığı daha ince olan diğer elemanlarda lokal ve global burkulmalar görülmüştür ve bu BEÇÇ'lerin histeretik davranışları oldukça düşüktür.



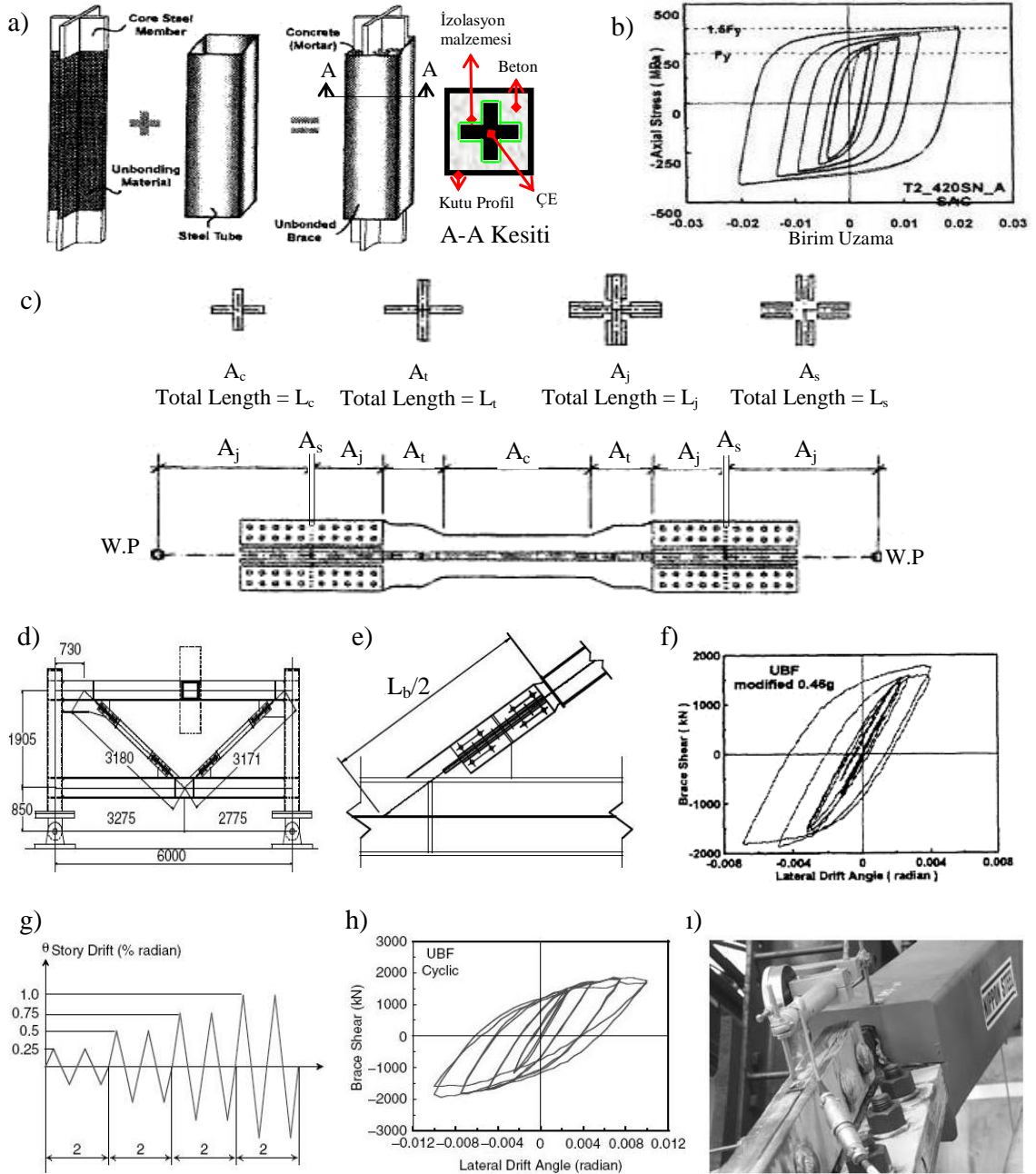
**Şekil 2.7. a) BEÇÇ; b) BEÇÇ'nin en kesit gösterimi; c) Deney elemanı Specimen B7-R5B-L3'e ait histeretik davranış (Young vd. 2009'dan adapte edilmiştir)**

Tsai vd. (2002) Taipei'de bulunan 33 katlı çelik binayı güçlendirmek için kullanılan 562 BEÇÇ'den rastgele seçilen 27 adet BEÇÇ'yi hem eleman bazında hem de  $\frac{1}{2}$  ölçekli sistem bazında test etmişlerdir (Şekil 2.8) (Tsai vd. 2002). Eleman bazındaki çalışmanın amacı BEÇÇ'lerin kalite kontrolünü, elastik rijitliklerini ve elastik olmayan davranışlarını belirlemektir. ÇE'lerin malzeme sınıfı olarak LYP235 (222 MPa akma gerilmesi) ve SN400B (252 MPa akma gerilmesi) kullanılmıştır. Eleman bazında yapılan deneylerde kullanılan deney düzeneği Şekil 2.5.a'dakine benzer özelliktedir. BEÇÇ'lerin elastik rijitliğini belirlemek için BEÇÇ'ler, ÇE'nin akma kapasitesinin %40 kadar aksel olarak yüklenmiştir (deneyden sonra bu BEÇÇ'ler binaya monte edilmiştir) ve uygulanan kuvvetin çaprazda meydana gelen uzamaya oranı deneysel aksel elastik rijitlik olarak kabul edilmiştir. Teorik olarak BEÇÇ'lerin aksel rijitliği Şekil 2.8.c'de gösterilen uzunluklar ve alanlar dikkate alınarak Denklem 2.4'den hesaplanmıştır. Bu denklemde,  $K_{eff}$  teorik rijitlik,  $A_c$ ,  $A_t$ ,  $A_j$  ve  $A_s$  sırasıyla BEÇÇ'nin plastik bölgesi, geçiş bölgesi, burkulması engellenmiş ve engellenmemiş elastik bölgesi, BEÇÇ'nin bayrak levhasına bağlandığı noktadaki geçiş bölgesi olmak üzere Şekil 2.8.c'de gösterilen bölgelerdeki alanlar ve bu bölgelerdeki uzunluklar  $L_c$ ,  $L_t$ ,  $L_j$  ve  $L_s$ 'dir. Bu çalışmada deneysel ve teorik rijitlikler arasındaki hata %5'den daha azdır. Elastik deneylere ek olarak, Şekil 2.8.b'de %85 civarında ölçeklendirilmiş BEÇÇ'nin histeretik davranışı, ÇE'nin aksel gerilme aksel birim uzama cinsinden grafiği görülmektedir. Bu grafikten de görüldüğü gibi BEÇÇ eleman bazında stabil ve simetrik histeretik davranışa sahiptir. Eleman bazındaki deneylere ek olarak Tsai vd. (2002)  $\frac{1}{2}$  ölçekli sistem bazında BEÇÇ'leri test etmiştir (çalışmanın bu kısmı sistem bazındaki deneysel çalışmalara bir örnektir). Şekil 2.8.d'de görüldüğü gibi kutu profilden oluşan çerçeve elemanlarına, BEÇÇ'lerden biri düğüm noktasına mimari sebeplerden dolayı 730 mm'lik dış merkezlik olacak şekilde bağlanmıştır. BEÇÇ'lerin çerçeve elemanlarına bağlantısını gösteren ayrıntı Şekil 2.8.e'de görülmektedir. Bu çerçeve ilk önce iki farklı deprem kaydına göre yatay olarak yüklenmiştir (Şekil 2.8.f). Bu yükleme sonunda çerçevede ve BEÇÇ'de herhangi bir hasar oluşmamasından dolayı, aynı çerçeve statik olarak test edilmiştir. Statik test esnasında uygulanan yatay deplasman (kat ötelemesi cinsinden) ve elde edilen histeretik davranış Şekil 2.8.g ve h'de görülmektedir. Şekil 2.8.h'de görüldüğü gibi BEÇÇ'li çerçeve % 1 kat ötelemesinde ilk tersinir yüklemeye kadar stabil histeretik davranış göstermesine rağmen aynı kat ötelemesinin ikinci tersinir yüklemesinde BEÇÇ'de Şekil 2.8.i'da görüldüğü gibi burkulma meydana gelmiştir. Şekil 2.8.i'da meydana gelen burkulmanın olduğu ÇE ve ek plakaların geçiş bölgesinde, Şekil 2.8.e'de gösterilen  $L_b$  uzunluğu dikkate alınarak

hesaplanan Euler burkulma yükü (Denklem 2.5) ÇE'nin aksel akma kapasitesinden 1.5 kat daha büyüktür. Bu oranın düşük olması bu bölgedeki burkulmaya sebep olmuş olabileceği Tsai vd. (2002) tarafından belirtilmiştir. Denklem 2.5'de:  $P_{e-trans}$  Şekil 2.8.e'de görülen geçiş bölgesinin Euler yük kapasitesi,  $P_{Cmax}$  BEÇÇ'nin maksimum basınç kapasitesi,  $k$  etkili boy katsayısı,  $I_{trans}$  ve  $L_b$  Şekil 2.8.e'de görülen geçiş bölgesinin atalet momenti ve uzunluğudur. Tek ÇE'li (Şekil 2.2.a) BEÇÇ'lere ek olarak çift ÇE'li (Şekil 2.2.1) BEÇÇ'ler bayrak levhasına bağlantısının kolay olmasından dolayı özellikle Taiwan Üniversitesi ve Taiwan Deprem Araştırma Enstitüsünde kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu araştırmalar Tsai vd. (2004) tarafından özetlenmiştir.

$$R_n = \mu \times \Delta_u \times h_{sc} \times N_s \times T_b \quad (2.4)$$

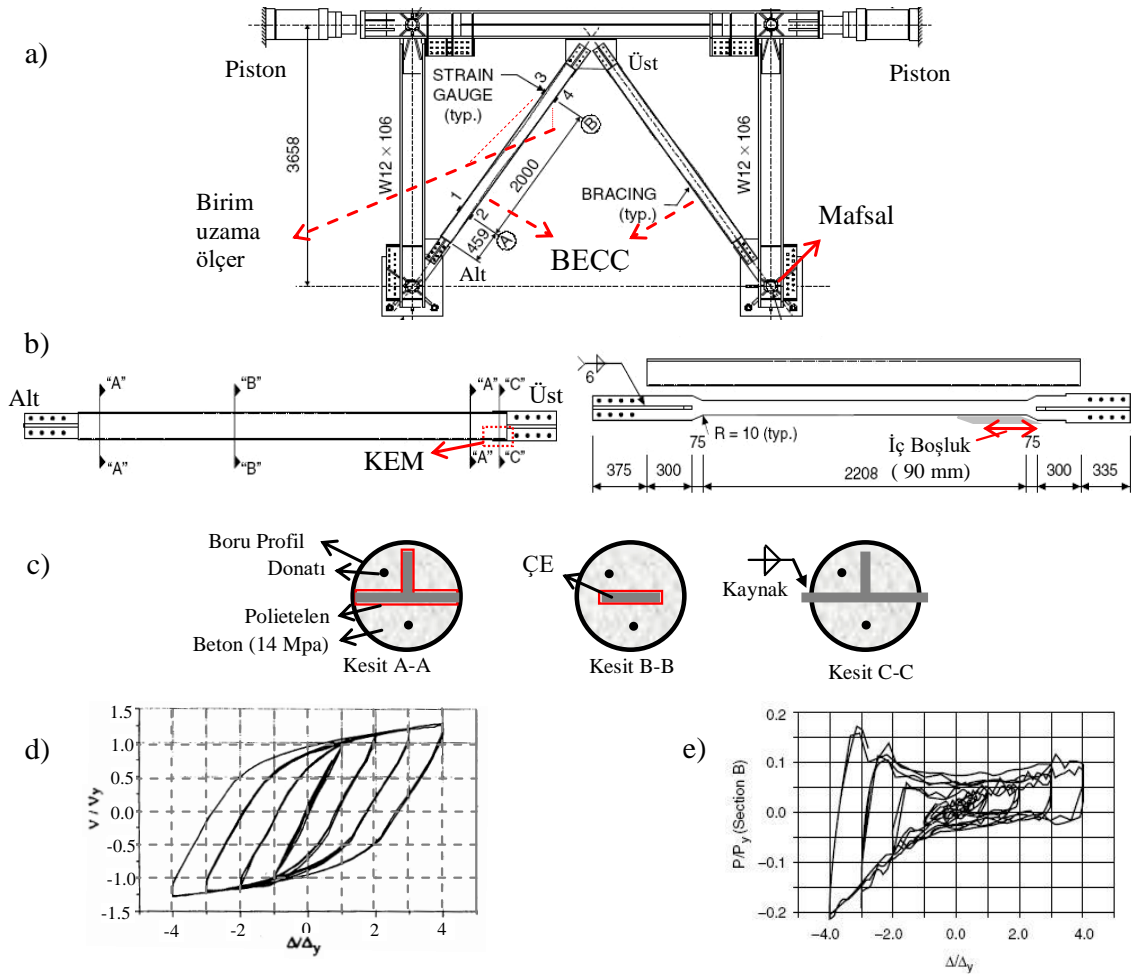
$$P_{e-trans} = \frac{\pi^2 EI_{trans}}{(kL_b)^2} \geq P_{Cmax} \quad (2.5)$$



**Şekil 2.8.** a) BEÇÇ'nin kısımları; b) Deney elemanın (T2\_420SN\_A) histeretik davranışı; c) BEÇÇ'nin en kesitleri; d) Test çerçevesi, e) BEÇÇ'nin bağlantı detayı, f) Deprem kaydı altında histeretik davranışı; g) Statik yük protokolü; h) Statik yük altında histeretik davranış; i) BEÇÇ'de burkulma (Tsai vd. 2002'den adapte edilmiştir)

Tremblay vd. (1999) dört katlı çelik bir binayı güçlendirmek için tasarladıkları BEÇÇ'leri tek açıklıklı ve tek katlı, dört düğüm noktasında mafsallı olan çelik çerçeve benzeri sistem içerisinde test etmişlerdir (Şekil 2.9.a). Şekil 2.9.b ve c'de test edilen BEÇÇ'lerin boyutları ve kesitleri görülmektedir. Buradaki çalışmada beton harcı içerisine ek olarak donatı da eklenmiştir (Şekil 2.9.c). Kullanılan ÇE'nin akma ve en büyük gerilme kapasiteleri sırasıyla 357 ve 517 MPa'dır. ÇE ve beton arasında sürtünmeyi engellemek için ÇE her biri 0.2 mm olan dört kat polyester malzemesi ile

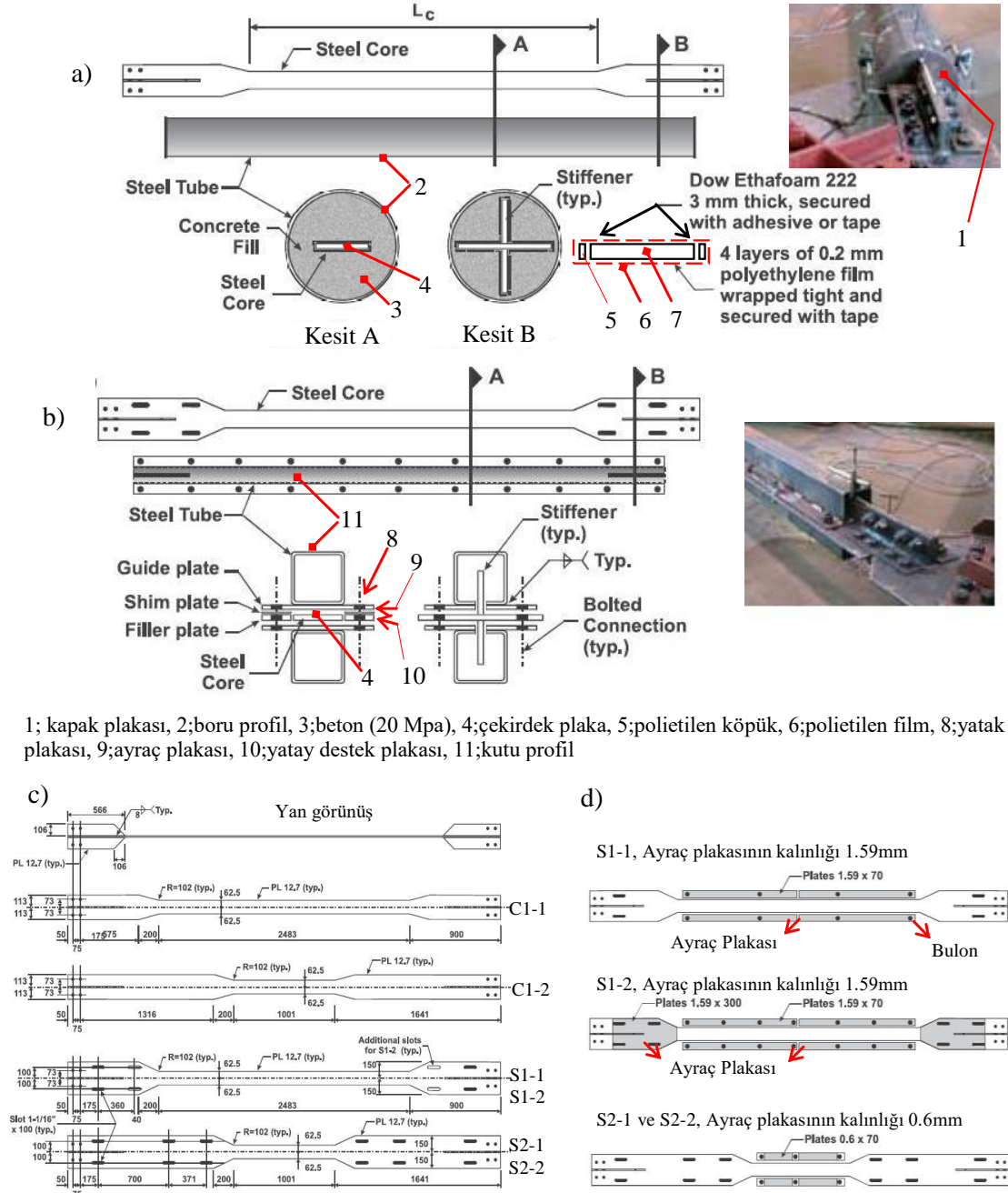
sarılmıştır. BEM'nin düşey ekseninde ÇE üzerinde hareketini engellemek için ÇE ve boru profil üst düğüm noktasında birbirine kaynaklanmıştır (Şekil 2.9.b). Şekil 2.9.d test edilen BEÇÇ'li çerçevenin normalize edilmiş yatay yük-deplasman grafiğini göstermektedir (bu grafikte V yatay yükü,  $\Delta$  yatay deplasmanı ve alt y akma değerini göstermektedir). Bu şekilden de görüldüğü gibi çerçevenin histeretik davranışı oldukça stabil ve simetrik. Burada kullanılan BEÇÇ'lerin, deney esnasında boru profil üzerine yapıştırılan birim uzama ölçerlerden (Şekil 2.9.a) elde edilen bilgiler doğrultusunda, çelik boru profilde ÇE'nin akma kapasitesinin % 20'si kadar aksel yük taşıdığı görülmüştür (Şekil 2.9.e).



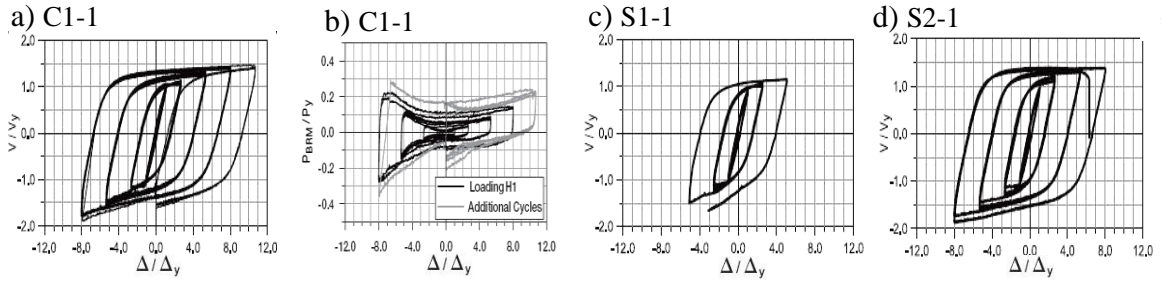
**Şekil 2.9.** a) Test çerçevesi; b) BEÇÇ c)BEÇÇ en kesit gösterimi; d) Normalize edilmiş yatay yük-yatay deplasman grafiği; e) Boru profil üzerinde ölçülen yük ve deplasman (Tremblay vd. 1999'dan adapte edilmiştir)

Tremblay vd. (2006) tarafından yapılan başka bir deneysel çalışmada altı adet BEÇÇ Şekil 2.9.a'da gösterilen çerçeve benzeri sistem içerisinde test edilmiştir. Ancak bu çalışmada ters V çelik çapraz yerine diyagonal merkezi çapraz olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmanın genel amacı, BEÇÇ'lere etkiyen eğilme momentleri ve bunların BEÇÇ'ler üzerinde etkileri, ÇE'nin plastik bölge uzunluğu ve bu uzunluğun aksel rijitliğe ve yorulma kapasitesine etkisi ve değişik BEM'lerin incelenmesidir. Tremblay vd. (2006) tarafından incelenen BEÇÇ'lerin ilk iki tanesinde beton-boru profilden (Şekil

2.10.a, C1-1 ve C2-1) ve diğer dört BEÇÇ’de çelik plaka-kutu profil birleşimden oluşan (Şekil 2.10.b, S1-1, S1-2, S2-1 ve S2-2) BEM kullanılmıştır. Şekil 2.10.a’da görüldüğü gibi Tremblay vd. (2006)’da test edilen ilk iki BEÇÇ, Tremblay vd. (1999)’da test edilen BEÇÇ’lere benzemektedir. Tremblay vd. (2006)’da ve Tremblay vd. (1999)’da kullanılan BEÇÇ’lerin arasındaki fark: Tremblay vd. (2006)’da ÇE’nin poisson etkisinden dolayı genişlemesi sırasında meydana gelecek hacimsel değişim beton içerisinde karşılanabilmesi için ÇE’nin altına ve üstüne 3 mm kalınlığında polietilen köpük yerleştirilmiştir (Şekil 2.10.a) ve buna ek olarak BEM’nin ÇE üzerinde kaymasını engellemek için Tremblay vd. (2006)’da ilk olarak BEÇÇ’nin iki ucundan sadece bir ucunda boru profil, üzerinde slotlar açılan kapak plakaya kaynatılıp daha sonra ÇE bu kapak plakaya kaynatılmıştır (Şekil 2.10.a). Tremblay vd. (2006)’da test edilen ilk iki BEÇÇ’lerin arasındaki fark ise ÇE’nin plastik kısmının uzunluğudur (Şekil 2.10.c, C1-1 ve 2). Bu BEÇÇ’lerde iç boşluk 100mm’dir. Bu çalışmada kullanılan ÇE’nin akma ve en yüksek gerilme kapasitesi 370 ve 492 MPa’dır. Diğer dört BEÇÇ’de kullanılan BEM’de Şekil 2.10.b görüldüğü gibi ÇE, kutu profile kaynatılmış iki yatak plaka arasına hem altta hem de üstte boşluk (ayraç plakası sayesinde) ve her iki yan tarafta (yatay destek plakası ile ÇE arasında) boşluk kalacak şekilde yerleştirilip yatak plakaları bulonlarla sıkılmıştır. Dört deneyden S1-1 ve 2’de ÇE’nin plastik kısmının uzunluğu (Şekil 2.10.c), bulonlar arasındaki mesafe, ayraç plakası ve ÇE üzerindeki bölge, S2-1 ve 2’de ayraç plakasının kalınlığı ve yükleme protokolü incelenmiştir (Şekil 2.10.d). Şekil 2.11.a, C1-1 için normalize edilmiş yatay kuvvet - yatay deplasman grafiğini göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi BEÇÇ stabil ve simetrik histeretik davranış göstermektedir. Şekil 2.11.b’de BEM’in taşıdığı aksenal yükün ÇE’nin akma kapasitesine oranı ve normalize edilmiş yatay deplasman grafiği gösterilmektedir. Bu grafikten anlaşıldığı gibi boru profilde, ÇE’nin akma kapasitesinin yaklaşık %30’u kadar aksenal yük ölçülmüştür. Buna ek olarak, boru profil üzerinde eğilme istemlerinin BEÇÇ’ler üzerinde çok fazla etkili olmayabileceği belirtilmiştir (Tremblay vd. 2006).



**Şekil 2.10.** a) Beton-boru profilden oluşan BEM’li BEÇÇ’lar; b) Plaka-kutu profilden oluşan BEM’li BEÇÇ; c) BEÇÇ’lerin ÇE boyutları (Tremblay vd. 2006’dan adapte edilmiştir)

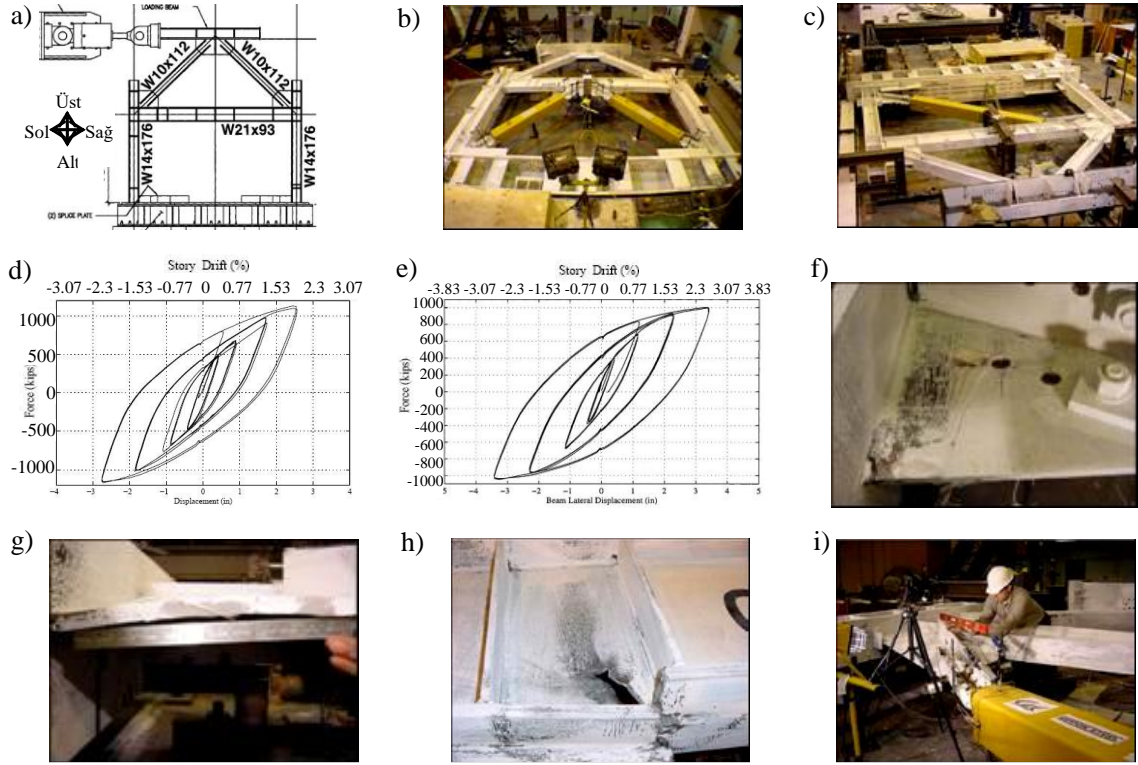


**Şekil 2.11.** a) C1-1'in histeretik davranışları; b) C1-1 boru profildeki eksenel yük değişimi; c) S1-1 ve S2-1'nin histeretik davranışları (Tremblay vd. 2006'dan adapte edilmiştir)

Şekil 2.11.c S1-1 deneyinden elde edilen normalize yatay yük-deplaman grafiği gösterilmektedir. S1-1'de, ÇE'nin her iki ucunda, ayraç plakasının kalınlığının ve bolunlar arasındaki mesafenin fazla olmasından dolayı lokal burkulmalar meydana gelmiştir ve bu sebepten deney protokolü tamamlanamamıştır. S1-2'de bolunlar arası mesafe azaltılmasına ve ek ayraç plakası (Şekil 2.11.d) kullanılmasına rağmen BEÇÇ'nin basınç kapasitesi ÇE ve BEM arasındaki sürtünmeden dolayı beklenen değerini aşmıştır ve deney tamamlanamamıştır. Şekil 2.11.d S2-1'den elde edilen histeretik davranışı göstermektedir. S2-1'de ÇE'nin plastik kısmının kısa olmasından dolayı bu bölgede aşırı plastikleşme meydana gelmiş ve ÇE kopmuştur. S2-2 uygulanan dinamik yükleme altında stabil davranmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan beton-kutu profilden oluşan BEM ve beton-ÇE arasındaki sürtünmeyi engellemek için kullanılan malzemelerin BEÇÇ'ler için kabul edilebilir oranda çalıştığı görülmüştür. Plaka ve kutu profilden oluşan BEM'li BEÇÇ'lerde ÇE'nin lokal burkulmasının ve dolayısı ile sürtünmenin engellenmesi ve plastikleşmenin ÇE'nin plastik kısmı boyunca yayılması gerektiği ortaya çıkmıştır (Tremblay vd. 2006).

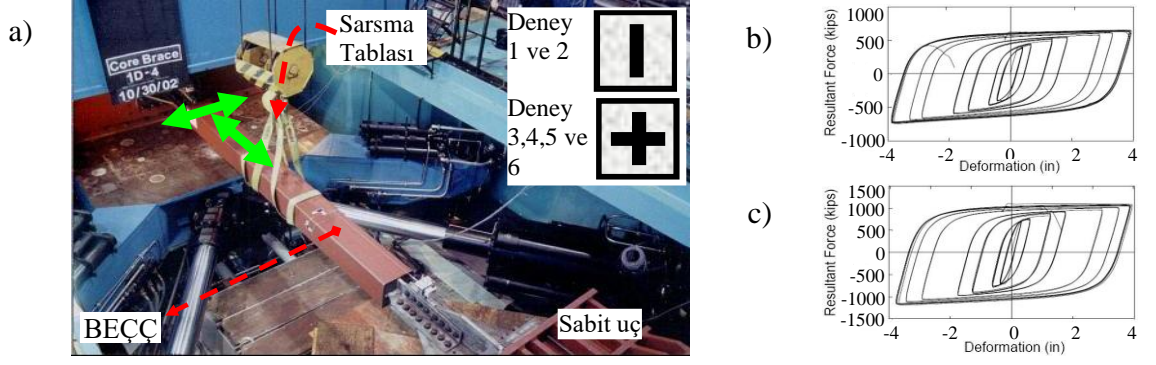
Kalifornia Üniversitesi'nde, Şekil 2.12.a'daki çerçeve sistemi kullanılarak, Şekil 2.12.b ve c'de gösterilen bir adet ters V çelik çapraz (dikdörtgen şeklinde ÇE'ye sahip) ve iki adet diagonal çelik çaprazlı (dikdörtgen ve "+" şeklinde ÇE'ye sahip) çerçeve deneyi yapılmıştır (Aiken vd. 2002; Lopez vd. 2004; Uriz 2005). BEÇÇ'lerde beton-kutu profilden oluşan BEM kullanılmıştır. Her üç deney için sadece bir çelik çerçeve (Şekil 2.12.a) imal edilmesinden dolayı kolon ve kiriş kesitleri olması gerekenden daha büyük seçilmiştir (daha rijit çerçeve sistemi oluşturulmuştur). Bu çalışmada, Test 1'de bayrak levhasında plastikleşme haricinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir ve %2 kat ötelemesine kadar çerçeve yatay deplasman yapabilmıştır (Şekil 2.12.d). Şekil 2.12.e'de histeretik davranışı gösterilen Test 2'de yaklaşık olarak % 1.7 kat ötelemesinde, bayrak levhası ve sol kolon üst birleşiminde kaynak yırtılması ve % 2.6 kat ötelemesinde bayrak levhasında burkulma meydana gelmiştir (Şekil 2.12.f ve g). Bu test bayrak levhasının tasarımında kapasitesinin yeterli olmasına karşın çerçevenin sünek elastik olmayan davranış yapabilmesi için yeterli olmadığını göstermiştir. Test 3'de kiriş alt başlığında yırtılma ve bunu takiben üst-sol düğüm noktasında eksende olmayan dönme meydana gelmiştir (Şekil 2.12.h ve i).





**Şekil 2.12.** a) Test çerçevesi; b) Test 1 fotoğrafı; c) Test 2 ve 3 fotoğrafı; d) Test 1 için histeretik davranış; e) Test 2 için histeretik davranış; f) Test 1, bayrak levhası ve sol kolon üst birleşiminde yırtılma; g) Test 2, üst sol bayrak levhasında burkulma; h) Test 3, sol üst düğüm noktasında kiriş alt başlığında yırtılma; i) Test 3, üst sol düğüm noktasında dönme (Aiken vd. 2002; Lopez vd. 2004; Uriz 2005)

Merritt vd. (2003) BEÇÇ'nin aksel deformasyona ve uç dönmeye maruz kalacak şekilde hazırladıkları deney düzeneğinde iki adet dikdörtgen ve dört adet "+" şeklinde ÇE'ye ve beton-kutu profilden oluşan BEM'e sahip toplam altı adet test yapmışlardır (Merritt vd. 2003). Şekil 2.13.a'da deney düzeneğine ait fotoğrafın üstünde BEÇÇ'lerin orta açıklıklarındaki en kesitleri gösterilmiştir. Bu şekilde yine görüldüğü gibi BEÇÇ'nin bir ucu sabit olarak reaksiyon duvarına bağlarken diğer ucu sarsma tablasına bağlanmıştır. Bu sayede BEÇÇ'ye hem yanal hem de aksel deformasyon uygulanabilmektedir. Bu deney sayesinde BEÇÇ'nin çelik çerçeve içerisinde maruz kalabileceği deformasyonlar elde edilerek BEÇÇ'lerin davranışı incelenmiştir. ÇE'de kullanılan çeliğin akma gerilmesi 297 MPa (A36), BEM'de kullanılan betonun basınç dayanımı 28 MPa'dır. Test edilen BEÇÇ'ler en yüksek 0.02 birim uzamaya kadar artan tersinir deformasyonlar altında stabil ve kararlı davranmışlardır (Şekil 2.13.b ve c).



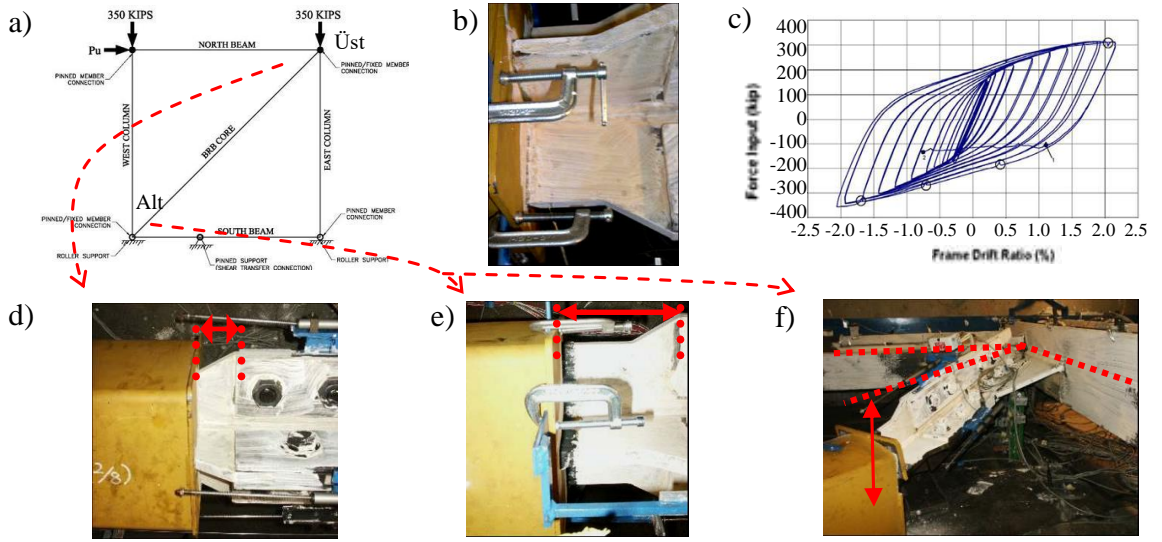
**Şekil 2.13. a) Deney düzeneği ve BEÇÇ en kesitleri; b) Deney 1 için histeretik davranış c) Deney 3 için histeretik davranış (Merritt vd. 2003’den adapte edilmiştir)**

Elde edilen herhangi bir BEÇÇ dizaynının BEÇÇ olarak kabul edilebilmesi için AISC (2005) tarafından belirlenen minimum performans kriterlerini sağlaması gerekmektedir. AISC (2005)’de hem eleman bazında hem de çerçeve benzeri sistem bazında yapılacak olan deneylerde izlenecek yükleme protokolü, deney elemanın boyutları, elde edilen histeretik davranışın hangi şartlarda kabul edilebilirliği gibi düzenlemeler bulunmaktadır. Buna göre BEÇÇ’lerin herhangi bir çelik çaprazlı yapı içerisine konulması durumunda BEÇÇ’lerin bayrak levhasına bağlantısı, eleman boyu, ÇE en kesit alanı, çaprazlı çelik yapının yapacağı maksimum yatay ötelenme anında çaprazda meydana gelecek aksel uzama/kısalma, çapraz uç bağlantı bölgelerinde meydana gelen dönme istemlerinin tamamen görülebileceği çerçeve benzeri sistem içerisinde en az bir test yapılmalıdır. Çerçeve benzeri sistem içerisinde ve eleman bazında test edilecek olan deney elemanı ile gerçek yapıda kullanılacak BEÇÇ’lerin aksel yük kapasiteleri, ÇE en kesit özellikleri (kare ya da “+” şeklinde kesit), malzeme özellikleri ve tasarım parametreleri (kolon, kiriş ve bayrak levhası stabilite, lokal ve global burkulma hesap yöntemleri) eşit olmalıdır. Eleman bazında yapılacak olan deneyde ÇE plastik bölgesinde meydana gelecek olan uzama için yükleme protokolü şu şekilde olmalıdır; ( $\delta y$ ), ( $0,5\delta t$ ), ( $1,0\delta t$ ), ( $1,5\delta t$ ), ( $2,0\delta t$ ).  $\delta y$  ÇE akma uzaması,  $\delta t$  gerçek yapı tasarımında kullanılan görelî kat ötelenmesindeki ÇE uzamasıdır. Bu deplasman değerlerinin her birinde iki kez ters çevirimli histeretik yükleme yapılmalıdır. Ayrıca toplam plastik uzama en az 200 akma uzaması kadar olmalıdır. Eğer bu durum yukarıdaki protokolde elde edilemezse  $1,5\delta t$  deplasman değerinde gerekli kadar ters çevirimli yükleme yapılmalıdır. BEÇÇ deneylerinin sonunda elde edilen aksel kapasite-aksel uzama/kısalma histeretik davranışın her bir deplasman değerinde stabilite ve pozitif rijitlik elde edilmelidir. Deney sonunda BEÇÇ ve bağlantılarında kopma ve stabilite sorunu gözlenmemelidir.  $\delta y$  yüklemesinden sonra yapılacak olan yüklemelerde elde edilen kapasite ÇE’nin nominal kapasiteden az olmamalıdır.  $\delta y$  yüklemesinden sonra her bir deplasman değerinde basma ve çekme kapasiteleri arasındaki oran 1.3’ten daha büyük olmamalıdır. AISC (2005)’e göre, test edilen BEÇÇ’lerin yukarıda bahsedilen şartları sağlaması durumunda yeterli histeretik davranışa sahip olduğu kabul edilmektedir.

### 2.3. BEÇÇ’lerin Çerçeve Sistemi İçerisindeki Deneyleri

BEÇÇ’lerin eleman ve çerçeve benzeri sistem bazında davranışlarının yukarıda da görüldüğü gibi genel olarak kararlı olmasına karşın, BEÇÇ’lerin çerçeve içinde

davranışlarında aynı kararlı histeretik davranış tam olarak görülememiştir. Bu konu ile ilgili olarak yapılmış olan bazı deneysel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

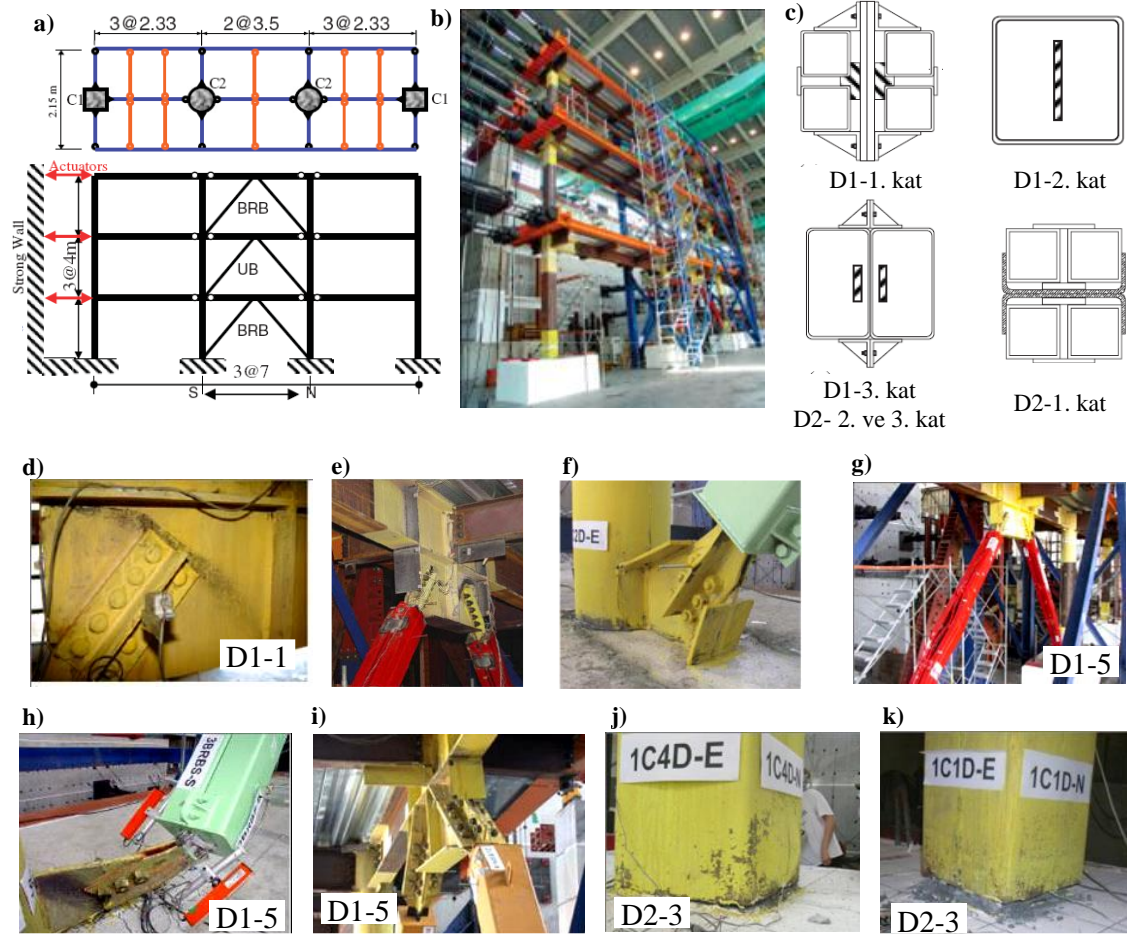


**Şekil 2.14.** a) Çerçevenin analitik gösterimi; b) BEÇÇ'nin testten önceki durumu; c) Reference BRB'nin histeretik davranışı; d) ve e) Test esnasında BEÇÇ'nin belirtilen uçlarda kayması; f) BEÇÇ'nin uç kısmında plastikleşme ve dönme (Christopoulos 2005'den adapte edilmiştir)

Christopoulos (2005) beş adet diagonal BEÇÇ'li çerçeveyi, zemine paralel olarak hazırladığı deney düzeneğinde test etmiştir (Şekil 2.14.a ve f)(Christopoulos 2005). Çerçeve sisteminin zemine paralel olmasına karşın beton-kutu profilden oluşan BEM, ÇE üzerinde yeterli KEM'in olmamasından dolayı alt düğüm noktasından üst düğüm noktasına doğru hareket etmiştir. Şekil 2.14.b deney başında, Şekil 2.14.d ve e deney sonundaki BEM ve ÇE arasındaki mesafeleri göstermektedir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi BEÇÇ'nin alt uçundaki iç boşluk diğer uca göre artmıştır. Buna ek olarak Christopoulos (2005)'de de belirtildiği gibi alt kirişin düğüm noktasına sağladığı stabilitenin de yetersiz olmasının etkisiyle BEÇÇ'nin uç kısmında plastik mafsallaşma oluşmuş ve %1.5 kat ötelemesinden sonra düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir (Şekil 2.14.f). Şekil 2.14.c referans deneyinden elde edilen histeretik davranış göstermektedir. Bütün deneylerde yaklaşık % 2 kat ötelemesinden sonra BEÇÇ'nin aşırı dönmesinin sonucunda zemine temas etmesiyle yüklemeye son verilmiştir (Şekil 2.14.f).

Tam ölçekli, üç açıklı üç katlı BEÇÇ'li çerçeve, dinamik benzerli yüklemeye yapılarak Tsai vd.(2008) tarafından test edilmiştir (Şekil 2.15.a ve b) (Tsai ve Hsiao 2008; Tsai vd. 2008). Bu çalışmadaki çelik çerçeve, beton döşeme, çelik kiriş ve kompozit kolonlardan oluşmaktadır. Dinamik benzerli yüklemelerde 1999 Chi-Chi (CC) ve 1989 Loma Prieta (LP) deprem kayıtları kullanılmıştır. Bu deprem kayıtları 50 yılda aşılma olasılığı %50-10-2 olmak üzere ölçeklendirilmiştir. Buradan da anlaşıldığı gibi deprem kayıtların aşılma olasılıklarına göre yani yatay yük istemleri artırılarak deneyler yapılmıştır. Çerçeve elemanı değiştirilmeden iki kısımda deneyler yapılmıştır ve bu kısımlarda kullanılan BEÇÇ'lerin en kesitleri Şekil 2.15.c'de gösterilmektedir (D1-2. kat; 1. kısımdaki deneyde 2. katdaki BEÇÇ). 1. kısımdaki 1. deney CC deprem

kaydının 50 yılda %50 aşılma olasılığı (bu ifadeye kısaca D1-1-CC-50/50 olarak adlandırılıp diğer deneylerde benzer şekilde kısaltılmıştır) olacak şekilde ölçeklendirilerek yapılmıştır. Bu deneyin hemen başında 1. katta BEÇÇ'nin giriş ile birleştiği bayrak levhasında burkulma (Şekil 2.15.d) ve ayrıca 1. kat sağ kolon dibinde BEÇÇ-bayrak levhasının birleşimde düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir. Bu testten sonra her katta giriş orta noktasında bulunan bayrak levhalara ek plakalar kaynatılarak bayrak levhalarının burkulma kapasiteleri arttırılmıştır (Şekil 2.15.e) ve BEÇÇ ısıtılma işlemiyle onarılmıştır. Bu işlemlerden sonra bu test tekrarlanmıştır. Deney D1-2-LP-10/50: Bu deneyde kolon-BEÇÇ birleşim bölgesindeki döşemede çatlaklar meydana gelmiştir. Deney D1-3-CC-2/50: Bu deneyde yine 1. kat sol kolon-BEÇÇ'nin birleştiği noktada BEÇÇ'de eğilme gözlenmiştir ve deney durdurularak 1. kat kolon dibindeki bayrak levhaları ek plakalar ile güçlendirilmiştir (Şekil 2.15.f). Daha sonra test devam etmiştir. Deney D1-4-LP-10/50: Bu deney esnasında 1. kat sol BEÇÇ'de hafif de olsa yüksek modda burkulma görülmüştür. Deney D1-5; Bu deney yukarıdaki deneyler tamamlandıktan sonra statik olarak tekrarlanan tersinir yatay yük uygulanarak yapılmıştır. Sırasıyla dörder kez %1, 1.25, 2.0, 2.52 ve son olarak iki kez % 3.75 kat ötelemesine kadar tekrarlanan tersinir deplasman uygulanmıştır. %2 kat ötelemesi kadar deplasman uygulandığında 1. kattaki BEÇÇ'de yüksek modda burkulma gözlenmiştir (Şekil 2.15.g). Bunun yanında 3. katta BEÇÇ-kolon birleşiminde bayrak levhasında burkulma meydana gelmiştir (Şekil 2.15.h). %2.5 kat ötelemesinde 2. kat giriş ortasında, guse levhası-BEÇÇ birleşiminde BEÇÇ'nin uç kısmında Şekil 2.15.i'de görülen düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir. Bu beş deneylik ilk fazdan sonra sadece BEÇÇ'ler değiştirilip 2. ve 3. kat kolon diplerindeki bayrak levhalarına ek plakalar kaynatılarak burkulma kapasiteleri arttırılmıştır (Şekil 2.15.f). İkinci kısımdaki deneyler aynı deprem kayıtlarının farklı ölçeklendirme metodu kullanılarak yapılmıştır. Deney D2-1-CC-10/50: Bu deney esnasında giriş kolon birleşiminde plastikleşme meydana gelmiştir. Deney D2-2-LP-2/50: Bu deney esnasında giriş-kolon birleşim noktasında döşemede çatlaklar meydana gelmiştir. Deney D2-3: Bu deney yine yukarıdaki 2. kısımdaki iki deney tamamlandıktan sonra statik olarak tekrarlanan tersinir yatay yük uygulanarak yapılmıştır. Bu deneyin %2.5 kat ötelemesine geldiğinde, kolon-temel birleşimdeki profilde yırtılma meydana gelmiştir ve %3.75 kat ötelemesinde kolon tamamen kopmuştur (Şekil 2.15.j-k). Sonuç olarak, oldukça düşük yatay yük istemlerine sahip deney D1-1-CC-50/50'nin hemen başında meydana gelen bayrak levhasındaki burkulma, kullanılan dizayn metodlarında soru işareti oluşturmuştur.



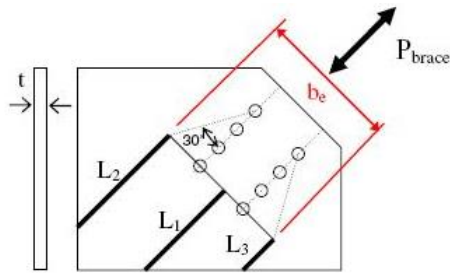
**Şekil 2.15. a)** Deney çerçevesinin plan görünümü; **b)** Deney çerçevesinin fotoğrafı; **c)** Deneyde kullanılan BEÇÇ'ler; **d-k)** Deney esnasında gözlenen deformasyonlar ve bayrak levhasına eklenen plakalar (Tsai ve Hsiao 2008; Tsai vd. 2008'den adapte edilmiştir)

Bayrak levhasının tasarımı yapılırken, BEÇÇ'nin çekme kuvveti altında Whitmore (1952) kesiti dikkate alınmıştır. Bu kesit Şekil 2.16'da gösterildiği gibi  $b_e$  ve  $t$  ile sınırlanan kesittir. Denklem 2.6 sağlanarak, bayrak levhasının bu sınırlanan Whitmore kesiti boyunca plastikleşmesine izin verilmez. Bu denklemde:  $P_y$  Gusset,  $F_y$ ,  $b_e$  ve  $t$  sırasıyla bayrak levhasının akma kapasitesi, malzeme akma gerilmesi, bayrak levhası üzerindeki Whitmore kesiti genişliği ve kalınlığıdır.  $P_{Tmax}$  ve  $P_{Cmax}$ : BEÇÇ'nin maksimum çekme ve basınç kapasitesi,  $\Omega$ ,  $\Omega_h$  ve  $P_y$  sırasıyla ÇE'nin malzeme büyütme, pekleşme katsayısı ve akma kapasitesidir.  $P_{cr}$ : bayrak levhasının burkulma kapasitesi,  $L_{gc}$ : Şekil 2.16'da gösterilen mesafelerden en uzununu,  $r$ : atalet yarıçapı ve  $\beta$ : BEÇÇ'nin eleman bazında yapılan deneyden elde edilen maksimum basınç ve çekme kapasitesi arasındaki oran (bu oran AISC (2005)'de 1.3 olarak verilmiştir). BEÇÇ'nin basınç kuvveti etkisi altında bayrak levhasının hesaplarında Thornton (1984) tarafından önerilen ve Şekil 2.16'da bayrak levhası üzerinde gösterilen  $L_1$ ,  $L_2$  ve  $L_3$  uzunluklarından en büyük olanı kritik boy ( $L_{gc}$ ) olarak alınır (Thornton 1984). Bu kritik boy kullanılarak, Denklem 2.7 BEÇÇ'nin basınç durumu için sağlanmalıdır. Denklem 2.7'deki etkili boy katsayısı ( $k$ ), Thornton (1984) tarafından önerilen 0.65 olarak alınması durumunda hesaplanan değerler, deneyde kullanılan BEÇÇ'lerin aksenal

basınç yüklerinden daha büyük olmasına rağmen Tsai ve Hsiao (2008); Tsai vd. (2008)'de bahsedilen burkulmalar meydana gelmiştir. Bu çalışma sonunda 0.65 olan etkili boy katsayısının bayrak levhasına ek plakalar eklenmesi ile kullanılabilceği, eğer ek plaka kullanılmazsa bu katsayının 2 olarak kullanılabilceği belirtilmiştir (Tsai vd. 2008).

$$P_{yGusset} = F_y \times b_e \times t \geq P_{Tmax} (= \Omega \times \Omega_h \times P_y) \quad (2.6)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E}{\left( \frac{kL_{gc}}{r} \right)^2} \times b_e \times t \geq P_{Cmax} (= \beta \times \Omega \times \Omega_h \times P_y) \quad (2.7)$$

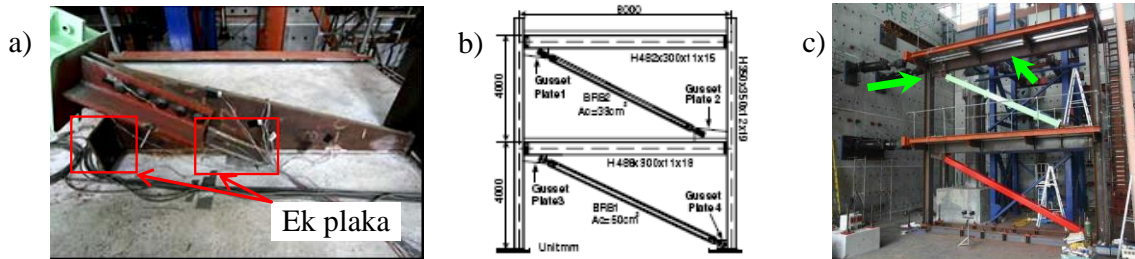


$P_{brace} = P_{Tmax}$  (BEÇÇ'nin çekme kuvvetine maruz kaldığı durumda)

$P_{brace} = P_{Cmax}$  (BEÇÇ'nin basınç kuvvetine maruz kaldığı durumda)

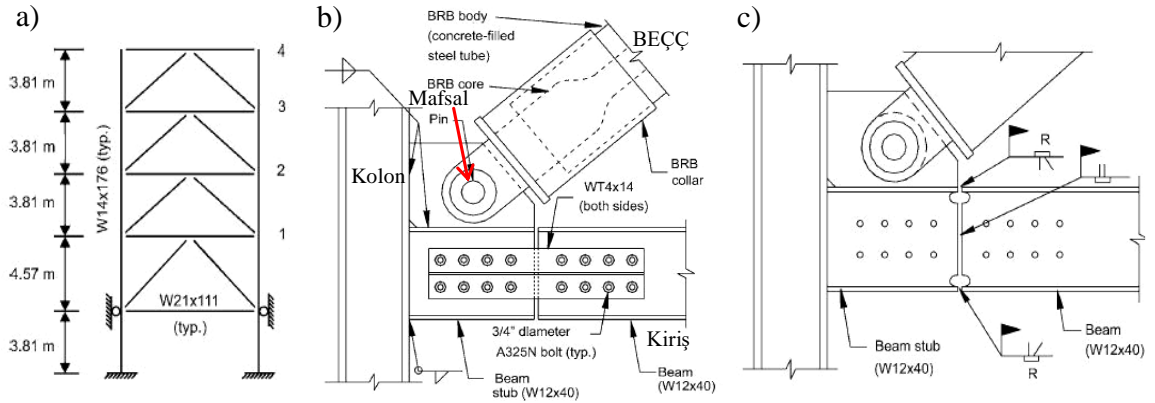
**Şekil 2.16.** Bayrak levhasındaki kuvvetler (Tsai vd. 2008'den adapte edilmiştir)

Tsai vd. (2008) tarafından yapılan deneyde ilk yükleme esnasında bayrak levhasında meydana gelen burkulmadan sonra BEÇÇ'li çerçevelerde bağlantı detayını incelemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Lin vd. (2005,2006) tarafından analitik çalışmalar yapılmıştır (Lin vd. 2005,2006). Bu analitik çalışmada bayrak levhasının ek plakalarla burkulmaya karşı güçlendirilebileceği belirtilmiştir. Ek plaka kullanılması durumunda (Şekil 2.17.a), etkili boy katsayısı için 0.65 katsayısı önerilmiş olup, bu analitik çalışma dikkate alınarak Şekil 2.17.b'de gösterilen çerçeve, hem çerçeve ekseninde hem de çerçeve eksenine dik yönde yatay istemlerin uygulandığı (Şekil 2.17.c) dinamik benzeri yükleme altında Tsai vd. (2006) tarafından test edilmiştir (Tsai vd. 2006). Bu deneylerde kolon-bayrak levhasındaki kaynakta çatlama meydana gelmesine rağmen, çerçeve yeterli performans göstermiştir.



**Şekil 2.17.** a) Bayrak levhası ve ek plakalar; b) Deney çerçevesi çizimi; c) Deney çerçevesi yükleme yönleri (Tsai vd. 2006'dan adapte edilmiştir)

Çerçeve benzeri sistem bazında ve çerçeve düzeyindeki deneysel çalışmalarda genel olarak bayrak levhası-BEÇÇ arasındaki bağlantı bulonları ile yapılmaktadır ve benzer özellik taşımaktadır (Şekil 2.8.ı, Şekil 2.9.a, Şekil 2.10.a, Şekil 2.12.i, Şekil 2.13.a, Şekil 2.14.f, Şekil 2.15.h, Şekil 2.17a). Fahnestock vd. (2007), Şekil 2.18.a görünen, 0.6 ölçekli dört katlı ve tek açıklıklı çerçeveyi test etmişlerdir (Fahnestock vd. 2007). Bu çalışmada yapılan deneylerin ilk kısmında (Hibrid dinamik benzeri yükleme) Şekil 2.18.b'deki, diğer kısmında (statik yükleme) ise Şekil 2.18.c'deki bağlantı detayı kullanılmıştır. Bu bağlantı detaylarında, diğer çalışmalardan farklı olarak, kiriş bayrak levhası kadar bir kısımda kolona bağlanmış ve daha sonra kirişin devamı bu ilk kısma, ilk deneyde moment aktarmayacak şekilde sadece profil gövdesinden bulonlarla (Şekil 2.18.b), diğer deneyde moment aktaracak şekilde profil başlıklarından kaynatılarak bağlanmıştır (Şekil 2.18.c). Bunun yanında bu çalışmada kullanılan BEÇÇ'ler bayrak levhasına diğer çalışmalardaki bulonlu birleşimden farklı olarak mafsallı şekilde bağlanmıştır. Bu deneylerin ilkinde ikinci katta % 4.8 ve diğer deneyde aynı katta % 5 kat ötelemesine kadar çerçeve stabil şekilde yük taşımaya devam etmiştir. Her iki deneyde de bayrak levhasında herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Bu davranış, BEÇÇ'nin mafsallı olarak bağlanması ve bu bağlantı boyunun kısa olmasının yanında Şekil 2.18'de verilen bağlantı detayının etkili olduğu belirtilmiştir (Fahnestock vd. 2007).



**Şekil 2.18. a)** Deney çerçevesi çizimi; **b)** Bağlantı detayı 1; **c)** Bağlantı detayı 2 (Fahnestock vd. 2007'den adapte edilmiştir)

### 3. MATERYAL VE METOD

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar Akdeniz Üniversitesi Yapı Laboratuvarında (Şekil 3.1) gerçekleştirilmiştir. Eleman bazında yapılan bu BEÇÇ testlerinden 13 adedi TÜBİTAK 112M820 Projesi kapsamında ve bir adedi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında olmak üzere toplam 14 adet eleman bazında BEÇÇ testi yapılmıştır.



Şekil 3.1. Akdeniz Üniversitesi Yapı Laboratuvarı

#### 3.1. TÜBİTAK 112M820 Projesi Kapsamında Yapılan Deneysel Çalışmalar

TÜBİTAK 112M820 Projesi kapsamında test edilen BEÇÇ elemanları iki gruba ayrılmıştır:

1. Grup BEÇÇ'ler (BEÇÇ\_1): Bu gruptaki BEÇÇ'lerin BEM sistemleri kutu profil içine beton dökülmüş kesit, sargılı ve sargısız betondan oluşmaktadır. Bu grup için toplam 10 BEÇÇ deneyi yapılmıştır.
2. Grup BEÇÇ'ler (BEÇÇ\_2): Bu gruptaki BEÇÇ'lerin BEM sistemleri çok parçalı basınç çubuğu özelliğindedir. Bu grup için toplam 3 BEÇÇ deneyi yapılmıştır.

Söz konusu 2 gruptaki BEÇÇ elemanlarının en kesit özellikleri biribiri ile aynı olup aralarındaki fark BEM sistemi ve izolasyon malzemesinin kalınlığıdır. BEÇÇ boyutlarının belirlenmesinde başlıca dört faktör dikkate alınmıştır: literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan BEEÇ'ler, piston kapasitesi, yükleme sistemi kapasitesi ve BEÇÇ için kullanılacak olan malzemenin temin edilmesi. Bu proje kapsamında test edilen BEÇÇ'lerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri EK-1'de mevcuttur.

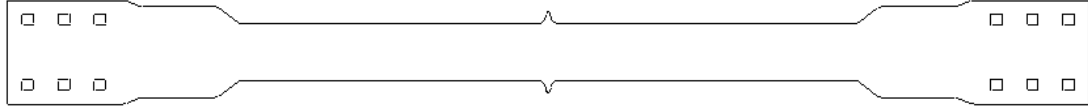


Literatürde test edilen BEÇÇ tipleri: Fahnestock vd. (2007) çalışmasında yaklaşık 3.8 m yükseklik 9 m genişliğindeki çerçeve sistemine ters V çapraz olacak şekilde ve 356-1245 kN akma kapasitesine sahip BEÇÇ kullanmışlardır. Tremblay vd. (2006) çalışmasında 1588 mm<sup>2</sup> ve 587 kN akma kapasitesine sahip ÇE'den oluşan BEÇÇ'leri 3.65 m yüksekliğinde ve 4.87 m genişliğindeki çerçeve sistemine diyagonal çapraz olacak şekilde bağlantısının yapıldığı elemanları test etmişlerdir. Bu test elemanlarındaki ÇE'nin plastik kısmı 1.0 m ile 2.83 m arasında değişmektedir. Tsai vd.. (2008) tam ölçekli 3 katlı ve 3 açıklıklı (3 m yükseklik, 7 m açıklık) çelik çerçeveye 1., 2. ve 3. katlara sırasıyla 3000, 2500 ve 1500 mm<sup>2</sup> ÇE alanına sahip BEÇÇ'leri ters V çelik çapraz olacak şekilde bağlayarak test etmişlerdir. Burada kullanılan BEÇÇ'lerdeki ÇE'nin plastik bölge uzunluğu 2.605 m – 3.22 m arasında değişmektedir. Merritt vd. (2003) test çalışmalarında 2500-18500 mm<sup>2</sup> ve 4.55 m - 4.70 m arasında ÇE alan ve plastik bölge uzunluğu olan BEÇÇ'ler test etmişlerdir. Clark vd. (1999) 3 katlı 4 açıklıklı (4 m yükseklik, 9 m açıklık) çelik çerçeveye 3500 -6700 mm<sup>2</sup>'lik ÇE'ye sahip BEÇÇ'lerin eklenmesi durumunda analizler yapmışlardır. Berkeley Üniversitesinde 1999-2000 yıllarında ÇE alanları 2907-7125 mm<sup>2</sup> arasında, plastik bölge uzunluğu 3-3.4 m arasında, akma kapasitesi 1217-2155 kN arasında olan BEÇÇ'ler test edilmiştir (Black vd. 2004). Young vd. (2009) 650 kN akma kapasitesi ve 2.5 m eleman uzunluğu olan BEÇÇ'leri eleman bazında test etmişlerdir. Yooprasertchai ve Warnitchai (2008) 585 mm<sup>2</sup> alan ve 2.4-2.8 m boyundaki BEÇÇ'leri test etmişlerdir. Christopoulos (2005) tek katlı (3.6 m) tek açıklık (3.6 m) çelik çerçeve içerisine 3.6m uzunluğunda ve 979 kN kapasitesinde BEÇÇ'ler ekleyerek test yapmıştır. Literatüre bakıldığı zaman BEÇÇ uzunluğu ve ÇE en kesit alanı için geniş bir dağılım söz konusudur. Bu proje kapsamında test edilmesi planlanan elemanların boyu, ÇE alanı ve akma kapasitesi literatür geneline bakıldığında sırasıyla 2.5-5.0 m, 1500-3500 mm<sup>2</sup> ve 500-1500 kN aralığında olması durumunda tam ölçekli BEÇÇ elde edilebileceği görülmüştür.

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

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

BEÇÇ için kullanılacak olan malzemenin temini: BEÇÇ'lerde kullanılan çelik plakaların düzgün ve hassas kesilmesi üretilecek olan elemanın davranışında önemli rol oynamaktadır. ÇE'nin yüzeyindeki muhtemel pürüzler sürtünmeyi arttıracak şekilde düşünülmüştür. Bu durum BEÇÇ performansı için olumsuz bir koşul yaratmaktadır. Dolayısı ile BEÇÇ plakalarının ve özellikle ÇE'nin kesiminde lazer kesim yapılması daha uygun görülmüştür.



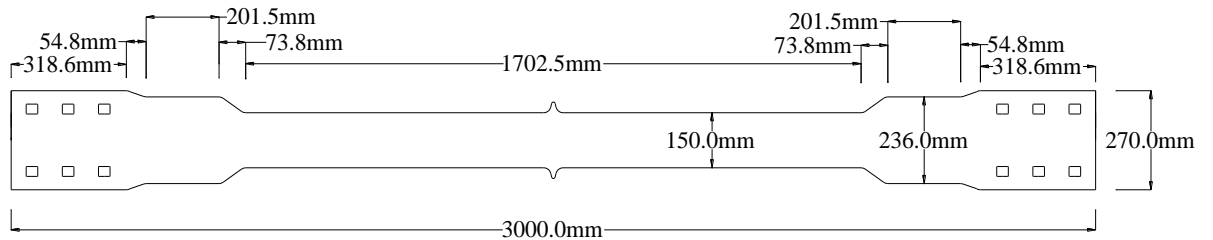
**Şekil 3.2.** Lazer kesim yapılacak çekirdek elemanın genel görünüşü

Lazer kesim tezgahları genel olarak 3 m ve 5 m olarak piyasada mevcut olmasına rağmen en çok kullanılanı 3 m'lik tezgahlardır. Özellikle projenin yürütüldüğü şehirde (Antalya) sadece 3 m'lik lazer kesim yapan makinalar mevcuttur. Dolayısı ile BEÇÇ boylarının ÇE'nin elastik ve plastik kısmının toplamı olarak 3 m olması uygun görülmüştür. ÇE'nin plastik bölgedeki alanı ise piston kapasitesi ile uyumlu olması gerekmektedir. Bu durumda ÇE en kesit alanı şu şekilde belirlenmiştir.

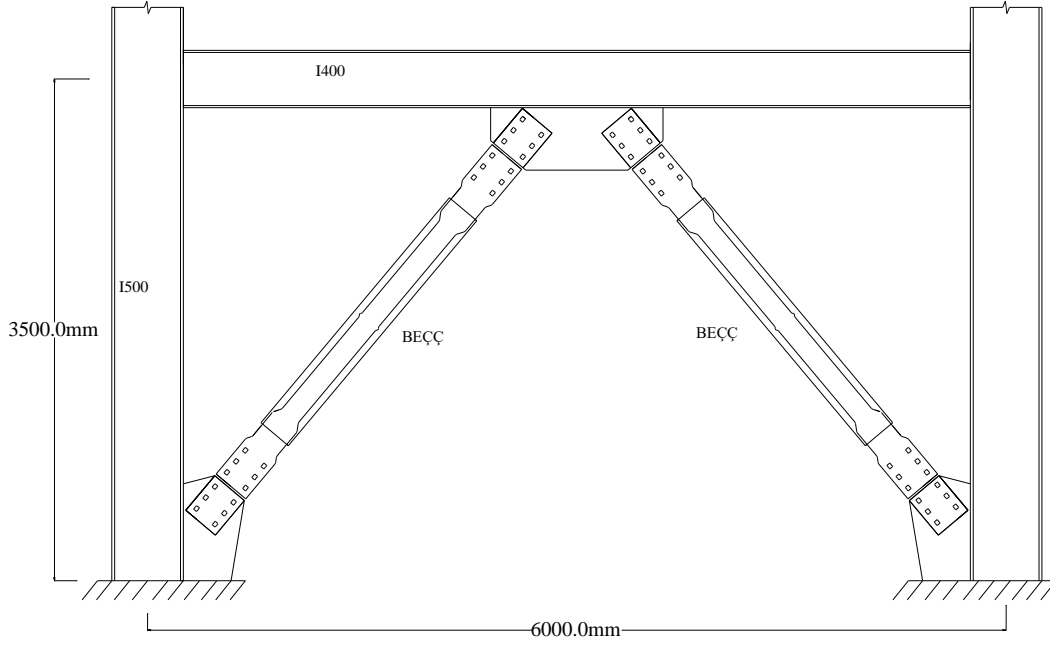
$$A_{\text{çe}} = \frac{\text{Maksimum Eksenel Yük}}{a_0 * f_y} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'de;  $f_y=235$  MPa, ÇE'nin ST37 çeliğinden üretilmesi durumunda akma gerilme kapasitesidir.  $a_0=1.4$  aşım oranı, maksimum eksenel yük 100 ton olduğundan; (Şekil 3.2) maksimum ÇE plastik alan  $A_{\text{çe}}= 3039 \text{ mm}^2$  elde edilmiştir.

Maksimum ÇE alanı yukarıda görüldüğü gibi  $3039 \text{ mm}^2$  olarak belirlenmiştir. Piyasada kullanılan çelik saçlara bakıldığı zaman 15 mm'lik sacın kolay şekilde temin edilebildiği görülmüştür. Ayrıca BEM için kullanılacak olan kutu profil kesitinin piyasada en fazla 300 mm'ye kadar mevcut olduğu görülmüştür. Bu durumda  $15 \times 150 \text{ mm}^2$  ÇE plastik bölge en kesit alanına sahip BEÇÇ'lerin bu proje kapsamında test edilmesi yukarıda belirtilen gerekçeler dikkate alındığında uygun görülmüştür.  $15 \times 150 \text{ mm}^2$  ÇE en kesitine sahip BEÇÇ'nin muhtemel akma kapasitesi kullanılan çelik saca bağlı olarak 500-750 kN arasında olması öngörülmüştür. Bu durumda da proje kapsamında test edilecek olan BEÇÇ'ler gerçek boyuttaki bir BEÇÇ olarak görülebilir. Bunun yanında proje kapsamında test edilecek olan BEÇÇ'lerin çelik çerçeve içerisine yerleştirilmesi durumunda 3.5 m yüksekliğinde ve 6 m açıklığında bir çerçeve içerisine yerleşebilir durumda olması literatürdeki test çerçeveleri ile de uyumlu olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile proje kapsamında test edilmesi planlanan, 3000 mm boyuna ve  $2250 \text{ mm}^2$  en kesit alanına sahip BEÇÇ'ler literatürde test edilmiş ve analitik çalışmalarda kullanılan BEÇÇ'lerle uyumludur.



**Şekil 3.3.** Bu tez kapsamında test edilen BEÇÇ boyu, plaka kalınlığı  $t=15$ mm



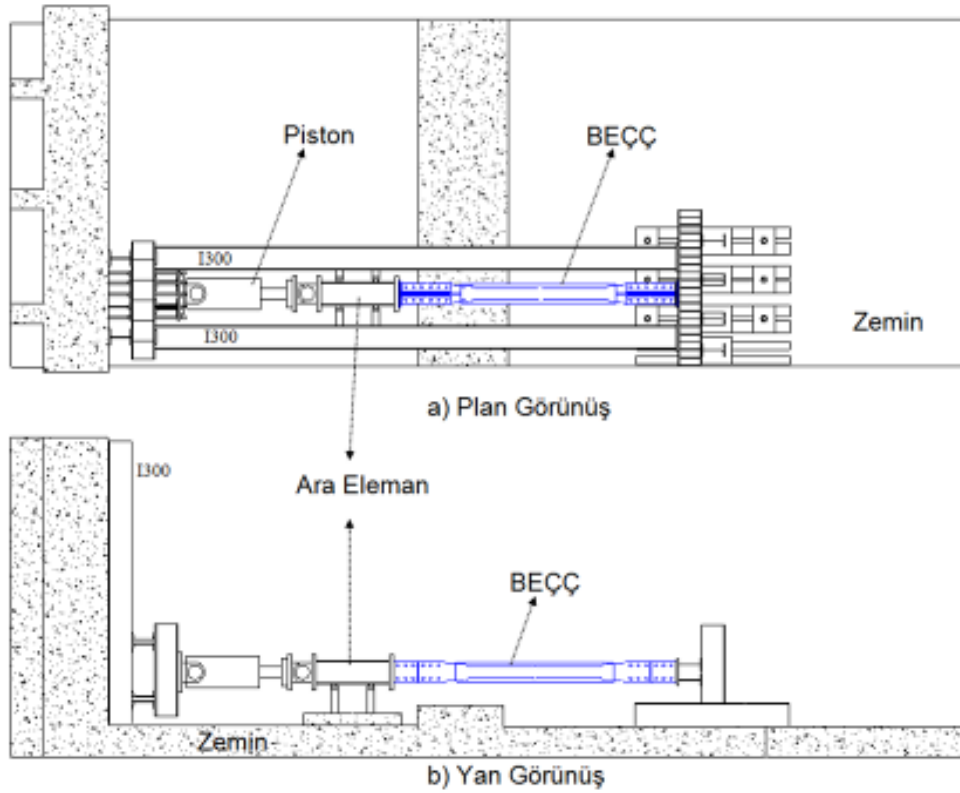
**Şekil 3.4.** Tez kapsamında test edilen BEÇÇ'nin çelik çerçeve içerisine yerleştirilmesi durumunda BEÇÇ'li çerçeve boyutları

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi BEÇÇ'nin orta noktasında en kesit alanı arttırılmıştır. Bu kısım BEM'in ÇE üzerinde göreceli hareketini engellemektedir. ÇE'nin plastik bölge uzunluğu ise Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 1700 mm civarındadır. Bu değer literatürde çalışılmış BEÇÇ'ler ile uyumludur. Burada önemli diğer bir durum ise BEÇÇ'nin bağlantısını sağlayacak olan bulonların slot olarak açılmış olmasıdır. Bu durum şantiye ortamında bağlantıyı kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır. Elastik bölge ise Şekil 3.3'de görüldüğü gibi 270 mm olup kolaylıkla 250x250 kesitindeki kutu profilin içinden geçebilecek özelliktedir. Daha detaylı bilgi ilerleyen bölümlerdeki BEÇÇ eleman detaylarında mevcuttur.

BEÇÇ boyutlarının belirlenmesinden sonra yükleme düzeneğinin hazırlanmasına başlanmıştır. Yükleme düzeneğinin hazırlanacağı Yapı Laboratuvarındaki bölge test sisteminin hazırlanmasından önceki ve sonraki hali Şekil 3.5'te görülmektedir. Detaylı çizimler ise Şekil 3.6'da görülmektedir.



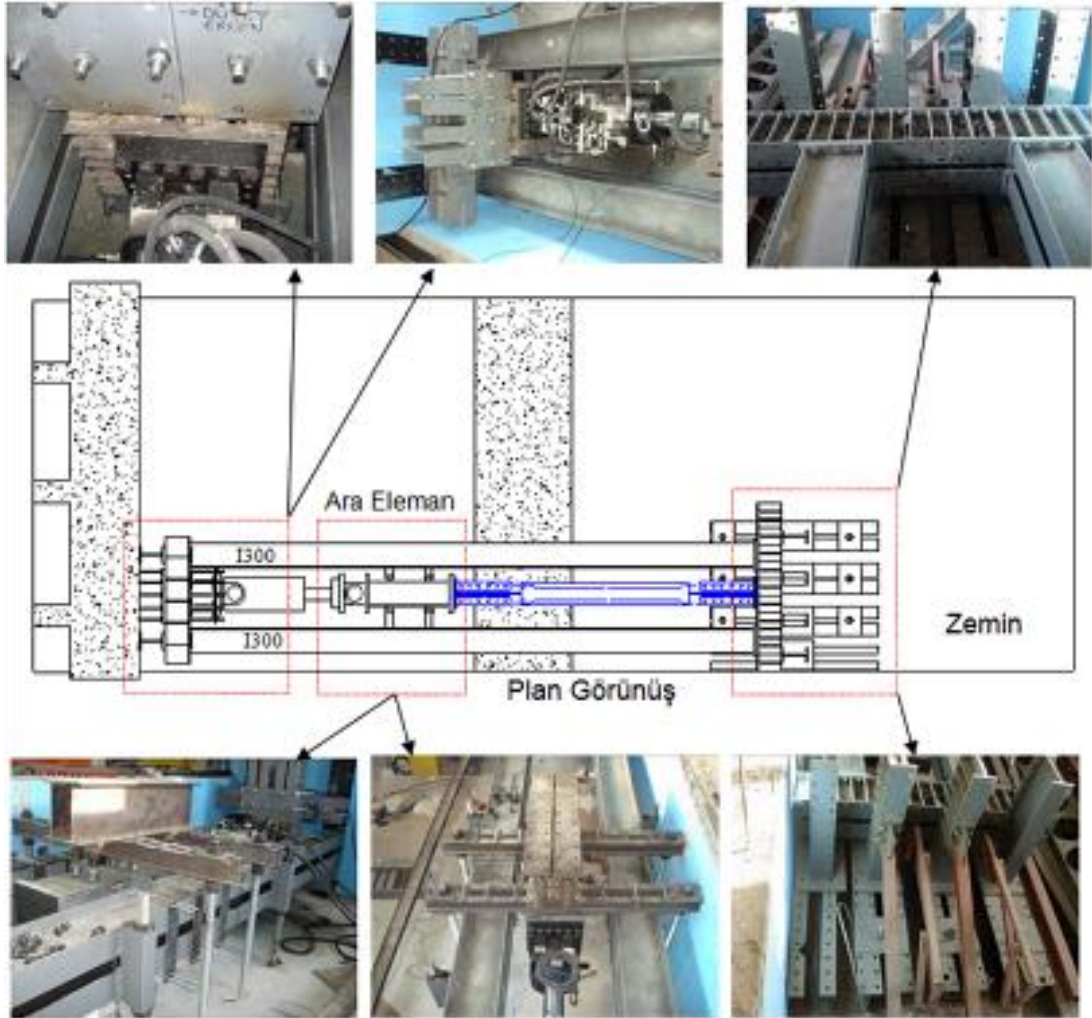
Şekil 3.5. Deneysel çalışmanın yapılacağı Yapı Laboratuvarı



Şekil 3.6. Deney düzeneğine ait detay çizimleri

Deney düzeneğine ait detay birleşimler Şekil 3.7’de görülmektedir. Yükleme düzeneğinin kendi içinde yük aktaran bir sistem olarak çalışması planlanmıştır. Bu kapsamda I 300, IPE 300, yapma I profil, U 300 profili ve muhtelif boyutlarda ve

kalınlıkta çelik plakalar kullanılmıştır. Söz konusu yapısal elemanlar gerek kaynak ve gerekse bulonlarla birleştirilmiştir. Şekil 3.6 ve 3.7’de görüldüğü gibi piston ve BEÇÇ arasında her yönden kayıcı bilyalarla tutulmuş ara eleman yerleştirilmiştir. Bu ara eleman sayesinde hem BEÇÇ’nin hem de pistonun kendi ağırlıkları taşınmış hem de pistonun düzlem dışı hareketinden kaynaklanabilecek pistonda olası hasarların oluşması önlenmiş olacaktır. Söz konusu ara elemanın BEÇÇ’nin davranışı üzerinde herhangi bir etkisi olmayacağı düşünülmüştür.



Şekil 3.7. Deney düzeneğine ait detay fotoğrafları

### 3.1.1. Birinci grup BEÇÇ (BEÇÇ\_1) elemanları

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

sarılmış sargılı betondan meydana gelmektedir. Deney elemanlarına ait parametreler Çizelge 3.1’de özetlenmiştir. Bu tip bir BEÇÇ’lerin yapı içerisinde (iç akslara bağlanması) güçlendirme amacıyla kullanılması gerek fiziksel ve gerekse ağırlık bakımından pek kolay olmayacağı düşünülmektedir (yaklaşık ağırlığı 250-500 kg civarındadır).

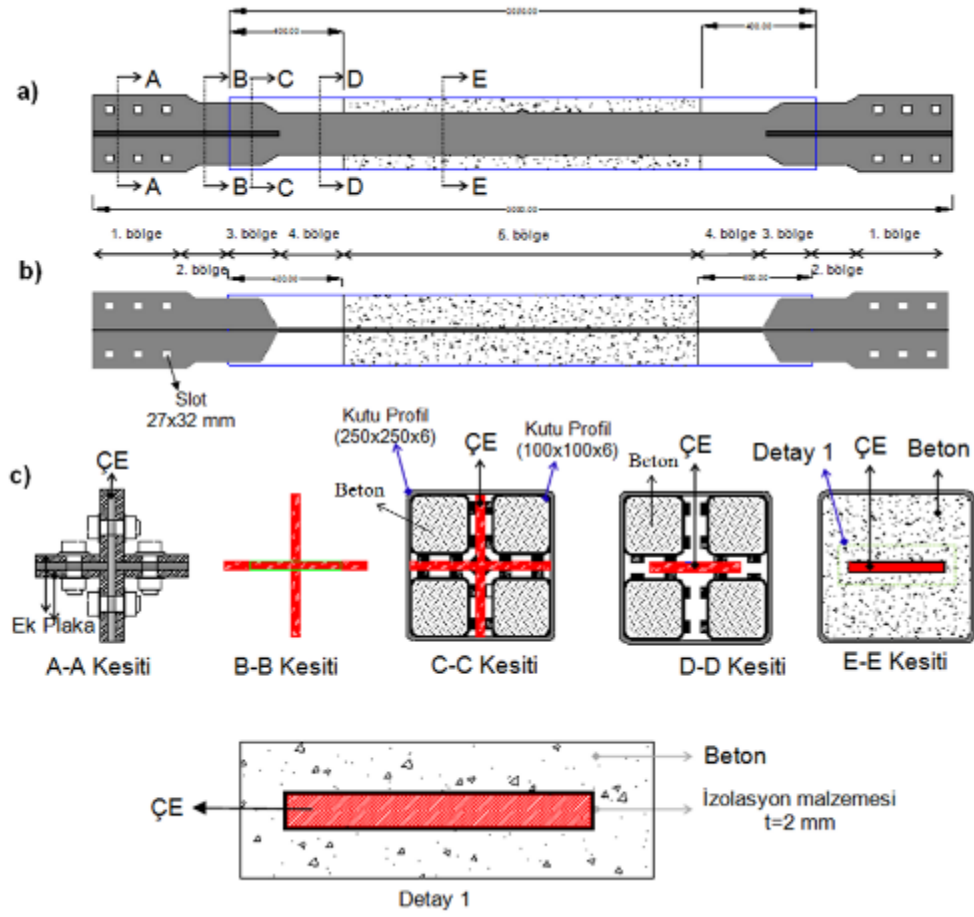
**Çizelge 3.1.** Birinci grup deney elemanları

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

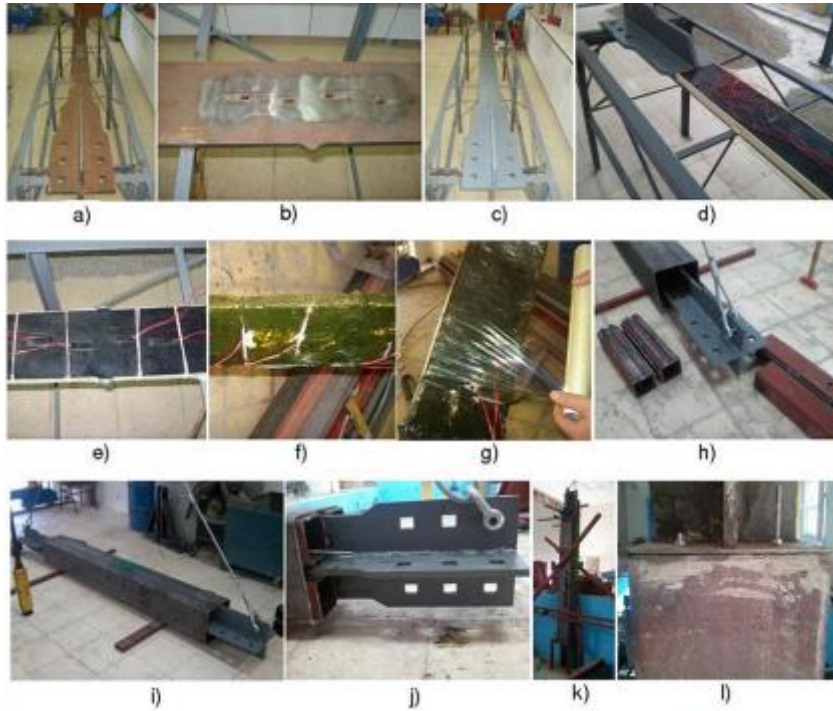
**1. BEÇÇ\_1 Elemanı:** 1. BEÇÇ\_1 modeline ait detaylar Şekil 3.8’de görülmektedir. Şekil 3.8’de gösterilen BEÇÇ’nin 3. (C-C kesiti) ve 4. (D-D kesiti) bölgesinde 4 adet 400 mm uzunluğunda 100x100x6 mm’lik kutu profil yerleştirilmiştir. Bu kutu profilin ÇE ile 2 mm civarında boşluk kalmasını sağlamak amacıyla her bir parçaya C-C kesiti ve D-D kesitinde gördüğü gibi dört adet 10x10 mm’lik lamalar kaynatılmıştır. Bu sayede ÇE’nin bu profil-lama sisteminden oluşan bölgede sürtünmesi en aza indirilmiştir. En dışta ise 250x250x6 mm’lik kutu profil burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) olarak kullanılmıştır. Ayrıca BEM 5. bölgede 20 MPa betondan ve kutu profilden oluşturulmuştur. Betonun 3. ve 4. bölgeye taşmasını engellemek için 4. ve 5. bölge arasında kapak plakaları yerleştirilmiştir. Bu elemanın imalat süreci ise ilk olarak Şekil 3.9.a, d ve j’de gösterilen ve Şekil 3.8.c’de A-A kesiti olarak verilen en kesitin elde edilmesi için ÇE’ye dik iki adet üzerinde slot açılmış plaka kaynatılmıştır. Daha sonra ÇE’nin plastik bölgesindeki birim uzamaları ölçebilmek için ÇE orta noktası civarına 4 adet birim uzama ölçer yapııştırılmıştır (Şekil 3.9.b) ve eleman antipas ile boyanmıştır (Şekil 3.9.c). Boyanın kurumamasından sonra ÇE’nin plastik bölgesi (Şekil 3.8, 4. ve 5. bölge) 2 mm lastik şeritlerle kaplanmıştır. Bu sayede BEM içerisindeki ÇE’nin poisson oranından kaynaklı hacim değişimi ve sürtünmeden kaynaklı basınç kapasite artırımının en aza indirilmesi sağlanmıştır. Bu işlemler sırasında birim uzama ölçerlerin zarar görmemesi için üzerleri örtülerek küçük bir boşluk elde edilmiştir (Şekil 3.9.e). Bunun yanında yine ÇE ile BEM arasındaki sürtünmenin en aza indirilebilmesi için ÇE üzerindeki lastik tamamen gres ile kaplanmıştır (Şekil 3.9.f). Gresin beton dökümü sırasında yıkanmasını önlemek için gres sürülmüş bölge tamamen streç naylon film ile kaplanmıştır (Şekil 3.9.g). ÇE bu işlemden sonra 250x250x6 mm olan kutu profil (Şekil 3.9.i) içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.9.h). Bu işlemden sonra Şekil 3.8.c’de gösterilen C-C kesitindeki 400 mm uzunluğundaki 100x100x6 kutu profilleri

250x250x6 mm'lik kutu profil ve ÇE arasına yerleştirilmiştir. Daha sonra Şekil 3.8.a ve b'de gösterilen 5. bölge betonun döküm işlemi yapılmıştır (Şekil 3.9.k). Son aşama olarak BEÇÇ'deki 250x250x6 mm'lik kutu profilin iki ucuna kapak plakaları monte edilmiştir (Şekil 3.9.l). Beton dökümünden sonra beton dayanımının 20 MPa olması için bekleme sürecine geçilmiştir.

Şekil 3.8.a'da görüldüğü gibi ÇE'nin en kesit alanı arttırılmıştır. Bu sayede BEM ile ÇE arasındaki göreceli hareket engellenmiştir (BEM'in ÇE üzerinde göreceli hareket etmesi durumunda literatürdeki çalışmalarda ÇE'nin yukarıda 2. ve 3. bölge olarak tanımlanan kısımda lokal burkulmalar meydana gelmiştir). Literatürde 3. ve 4. bölgede bu çalışmada önerilen BEÇÇ modeli kadar etkin BEM yoktur (Literatür özetindeki Chen vd. 2001; Aiken vd. 2002; Lopez vd. 2004; Uriz 2005; Christopulos 2005). Şekil 3.8'deki 3. ve 4. bölgede lokal burkulmaların önlenmesi için 4 adet 400 mm uzunluğunda kutu profil kullanılarak ÇE'nin elastik kısımdan plastik kısma geçtiği bu bölgede oldukça etkin bir BEM oluşturulmuştur (Literatürde bu kısımlar genelde boşluk olarak bırakılmaktadır: Chen vd. 2001; Aiken vd. 2002; Lopez vd. 2004; Uriz 2005; Christopulos 2005; Yooprasertchai; Warnitchai 2008).



Şekil 3.8. Eleman 1. BEÇÇ\_1 için detay çizimleri



Şekil 3.9. Eleman 1. BEÇÇ\_1 için üretim süreci



BEÇÇ'nin deney düzeneğine bağlantısı için öngermeli bağlantı sistemi kullanılmıştır. Bu sistemin seçilmesinde proje kapsamında geliştirilecek olan güçlendirme amaçlı BEÇÇ'lerin gerçek uygulamasında montajın kolay olabilmesi için ÇE üzerine slot açılması daha uygundur (Şekil 3.8.b). Dolayısı ile bu proje kapsamında test edilen BEÇÇ'lerin projenin devamında test edilmesi düşünülen güçlendirme amaçlı BEÇÇ'ler ile daha iyi karşılaştırma yapılabilmesi için slotlu birleşim detayı tercih edilmiştir. Bu tez kapsamında bahsedilen BEÇÇ'lerdeki slot genişliği 27x32 mm (kısa slot) American Institute of Steel Construction (AISC) 2005 referansından alınmıştır. BEÇÇ ve deney düzeneğine bağlantısının slotlu birleşim ile yapılmasından dolayı bulonlar öngermeli (Sürtünme Etkili (Kayma Kontrollü) Birleşim/slip-critical) yöntem kullanılarak plakaların sıkma işlemi yapılmıştır. Denklem 3.2 (AISC 2005) kullanılarak BEÇÇ ve deney düzeneği arasındaki bağlantı için gerekli bulon sayısı hesaplanmıştır. Denklem 3.2'de sadece bir bulonun öngörme yaparak Şekil 3.8.c'deki A-A kesitindeki plakaları sıkarak sağlayacağı ÇE çekme yükü yaklaşık olarak 144 kN'dur. Güvenlik katsayısı olarak 1.5 kullanılırsa tek bir 10.9 M24 bulonun sağlayacağı kuvvet 96 kN olmaktadır. 1000 kN'luk bir BEÇÇ yapılması durumunda bile güvenli şekilde yükün taşınabilmesi için  $(1000/96=10.4)$  11 bulona ihtiyaç duyulmaktadır. Proje kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda ise bağlantılar 12 adet 10.9 M24 bulon kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$R_n = \mu \times \Delta_u \times h_{sc} \times N_s \times T_b \quad (3.2)$$

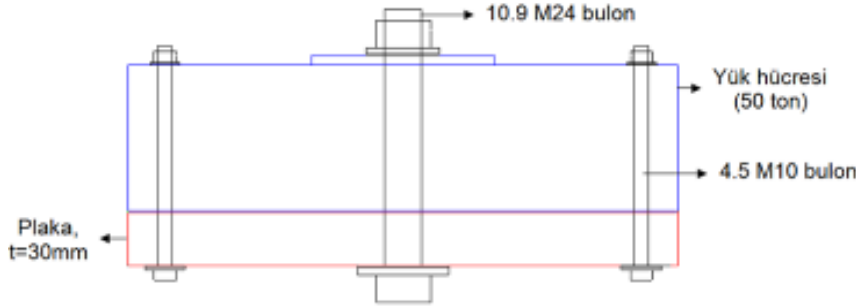
Denklem 3.2'de, yağı giderilmiş ve tel fırça ile sürtülmüş yüzeyler için  $\mu=0.35$  ve kısa slot kullanılması durumunda  $\Delta_u=1.13$  olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8.c'de A-A kesitinde de gösterilen kayma yüzeyi  $N_s=2$  ve 10.9 kalite M24 bulon için öngörme sıkıştırma yükü  $T_b=215$  kN olarak belirlenmiştir.

Denklem 3.2'de görüldüğü gibi 10.9 M24 bulonun öngörme değeri 215 kN'dur. Dolayısı ile söz konusu bulonlara belirlenen yükte öngörme uygulanması gerekmektedir. Bu işlem için en az 1100 Nm'lik bir torka ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sıkma işlemi havalı somun sıkma/sökme makinası yardım ile gerçekleştirilmiştir. Sıkma miktarından emin olmak için basit bir deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 3.10). Bu sistemde 50 ton'luk yük hücresi 30 mm kalınlığındaki bir plakaya bağlanmıştır. Plakanın orta noktasında 10.9 kalite M24 bulonun geçebileceği delik bulunmaktadır. Yük hücresinin üst kısmına kadar uzanan 10.9 kalite M24 bulon bu noktada havalı somun sıkma/sökme makinası ile sıkılmıştır. Veri toplama sistemine bağlı yük hücresi sayesinde havalı somun sıkma/sökme makinasının kademelerinin ne kadarlık bir sıkma kapasitesinde olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile havalı somun sıkma/sökme makinası 215 kN'luk sıkma yapabilmesi için gerekli kademesi elde edilmiş ve deney elemanlarının bütün bağlantılarında aynı kademe kullanılmıştır. BEÇÇ elemanının deney düzeneğine bağlantısı Şekil 3.11'de görülmektedir.

Bu tasarımlardan sonra BEM'in global burkulmasının önlenmesi gerekmektedir. BEM için kullanılan 250x250x6 mm'lik kutu profil Denklem 3.3'ü sağlamalıdır (Watanabe vd. 1988).

$$P_e/P_y \geq 1, \quad P_e = \pi^2 \times E \times I_{sc} / (l_{sc})^2, \quad P_y = \sigma_y \times A_c \quad (3.3)$$

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



Şekil 3.10. M24 10.9 kalite bulon sıkma kalibrasyonu için deney düzeneği

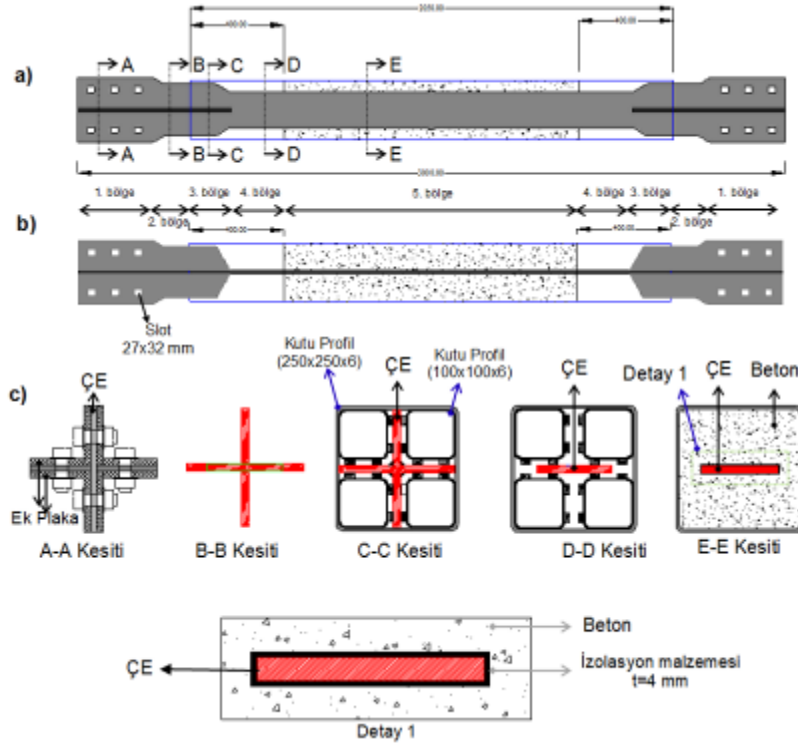


Şekil 3.11. BEÇÇ ve deney düzeneği bağlantısı

**2. BEÇÇ\_1 Elemanı:** 1. BEÇÇ\_1 modelinin test edilmesinden sonra 1. BEÇÇ\_1 modelindeki bazı tasarım parametrelerinin değiştirilmesi uygun görülmüştür. Detayları deney sonuçlarında verilecek olan 1. BEÇÇ\_1 deneyinde BEÇÇ'nin aksenal basınç kapasitesi çekme kapasitesinden fazla çıkmıştır. Dolayısı ile 1. BEÇÇ\_1 elemanı test sonuçlarından 2. BEÇÇ\_1 elemanında sürtünmenin daha da azaltılması gerektiği sonucu dikkate alınarak BEÇÇ tasarımında değişiklik yapılmıştır. 2. BEÇÇ\_1 modeli 1. BEÇÇ\_1 modeli ile hemen hemen aynı tasarım parametrelerine sahiptir. Aralarındaki farklar; 1. BEÇÇ\_1 modelinde ÇE izolasyonu için kullanılan lastik 2 mm kalınlığında olmasına karşı 2. BEÇÇ\_1 modelinde 2 kat lastik şerit kullanılmış ve toplam 4 mm'lik bir izolasyon boşluğu oluşturulmuştur (Şekil 3.8 ve Şekil 3.12, detay 1). Buna ek olarak 1. BEÇÇ\_1'de izolasyon için kullanılan lastik şeritler Şekil 2.6-a'daki 4. ve 5. bölgelerde ÇE üzerine yapıştırılmıştır ancak 2. BEÇÇ\_1'de bu şeritler sadece 5. bölgeye uygulanmıştır (Şekil 3.12 ve 13). Son olarak 1. BEÇÇ\_1 modelinde lastik şeritlerin üzerine uygulanan gres malzemesi ve streç naylon 2. BEÇÇ\_1 modelinde uygulanmamıştır. Bunun en önemli sebebi 1. BEÇÇ\_1 deneyinden sonra BEÇÇ\_1'nin içi açılmıştır ve ortamda gres malzemesine rastlanmamıştır (lastik şerit ile reaksiyona girdiği veya lastik şerit tarafından absorbe edildiği/emildiği düşünülmektedir.). Dolayısı

ile zamana bağlı olarak etkisini yitiren bir malzemenin sadece deney esnasında sürtünmeyi önlemesi uzun yıllar yapıda kalacak olan BEÇÇ'lerin davranışları hakkında yanıtıcı bilgiye sebep olacağı düşünülmüştür.

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

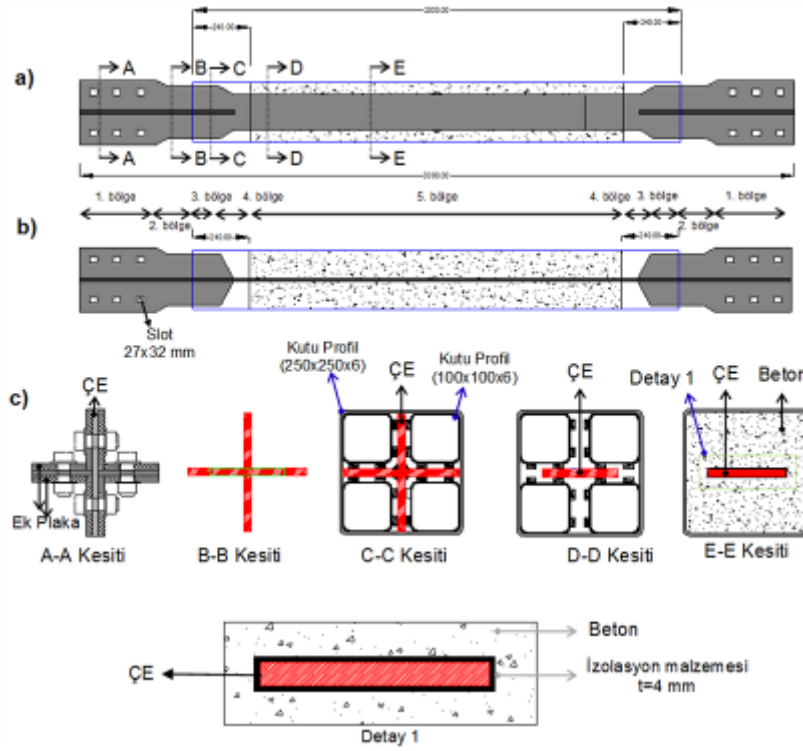


**Şekil 3.12.** Eleman 2. BEÇÇ\_1 için detay çizimleri



**Şekil 3.13.** Eleman 2. BEÇÇ\_1 için üretim aşaması

**4. BEÇÇ\_1 Elemanı:** 4. BEÇÇ\_1 eleman detayı 2. ve 3. BEÇÇ\_1 eleman detayı ile sadece bir parametre bakımından farklıdır. 4. BEÇÇ\_1 eleman detayında 3. ve 4. bölgeyi oluşturan ve 1.-3. BEÇÇ\_1 eleman detaylarında 400 mm uzunluğunda 100x100x6 mm'lik kutu profilin kullanıldığı bu kısmın uzunluğu 240 mm'ye düşürülmüştür (Şekil 3.14 ve 3.15). Sadece tek bir parça için 160 mm'lik malzeme daha az kullanılmış olmakla beraber toplamda 1.3 m'lik 100x100x6 mm'lik kutu profil, 2.5 m'lik 10x10 mm'lik lama profilden ve işçilikten tasarruf sağlanması hedeflenmiştir.

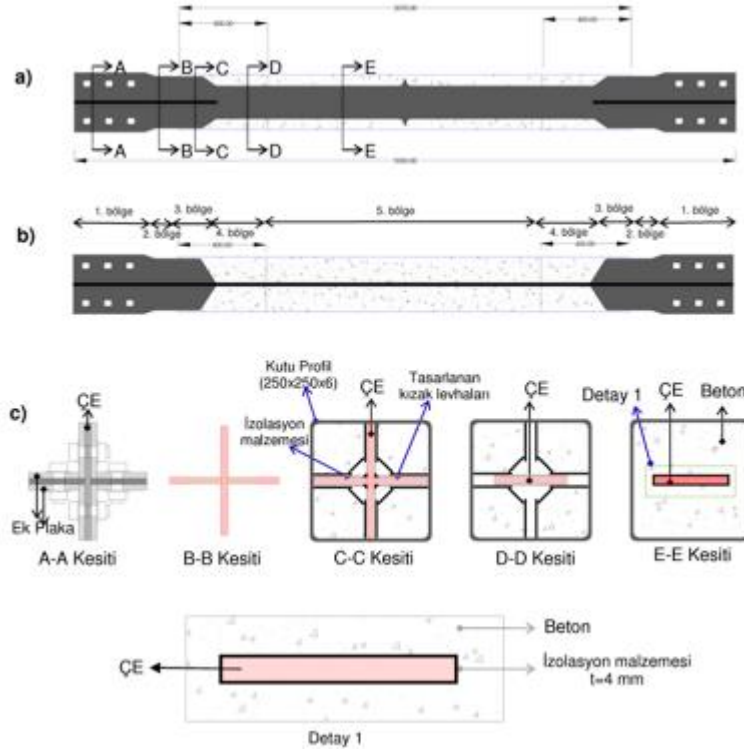


Şekil 3.14. Eleman 4. BEÇÇ\_1 için detay çizimleri



Şekil 3.15. Eleman 4. BEÇÇ\_1 için üretim aşaması

**5. BEÇÇ\_1 Elemanı:** 5. BEÇÇ\_1 eleman detayı 2. ve 3. BEÇÇ\_1 eleman detayı ile benzerdir. 5. BEÇÇ\_1 elemanında uç stabilitelerin arttırılması için 2. ve 3. BEÇÇ\_1 elemanlarında kullanılan 400 mm uzunluğundaki 100x100x6 mm'lik kutu profil yerine 400 mm uzunluğunda levhalarla dizayn edilen kızaklı sistem kullanılmıştır. 100\*100\*6 mm'lik kutu profillerin yerine kullanılan kızak levhaları ve 5. bölgeyi 4. bölgeden ayıran iç kapağın (2. ve 3. BEÇÇ\_1 elemanlarında görülebilir) kullanılmamasıdır (bu sayede malzeme tasarrufu, imalat sürecinin kolaylaştırılması ve hızlandırılması sağlanmıştır). İzolasyon malzemesi ÇE'nin BEM içerisinde kalan 3, 4 ve 5. bölgeleri boyunca ana elemana çift kat, uç kısımların yanal yüzeylerine ise tek kat olarak yapıştırılmıştır. Birim deformasyon ölçerlerin çalışma prensibini etkilememesi için uygun boşluklar çıkarılmış ve yapıştırıldıktan sonra laboratuvarın elverdiği koşullarda malzemeler ve işkencelerle sıkılarak tamamen yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.16). Yapıştırıcının kuruması için gereken süre kadar bekletildikten sonra fazla kısımları kesilerek yan yüzeylere tek kat çift taraflı bant uygulaması yapılmış ve izolabant ile kaplanarak BEM içine konurken herhangi bir zarar görmesi engellenmiştir (Şekil 3.16-17). Şekil 3.16'da 3. ve 4. bölgede oluşturulacak olan kızak sistemindeki kızakların her biri 3 adet levhanın kaynaklı birleşimi ile oluşturulmuştur (Şekil 3.17). Bu levhalar için belirlenen optimum ebatlar 400x79x4 mm ve 400x43x4 mm'dir. Bu sistemin içerisine beton girmemesi için ek plakalar sisteme kaynatılmıştır. Kızak sisteminin ÇE üzerindeki ve BEM olan 250x250x6 mm kare kutu profilin içine yerleştirilmiş hali Şekil 3.17'de görülmektedir. ÇE'nin üzerinde bulunan birim deformasyon ölçerlerin kablolarının çıkabilmesi için 250x250x6 mm kare kutu profile 14 mm çapında delik açılmıştır. 250x250x6 mm kare kutu profilin bir ucuna beton dökümünden önce diğer ucuna da beton dökümünden sonra t=8 mm kalınlığında tasarlanan kapaklar kaynatılmıştır (Şekil 3.17). Vinç yardımı ile dikey hale getirilen BEÇÇ elemanına beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Beton dökümünden sonra diğer kapak plakası 250x250x6 mm'lik kutu profile kaynatılmıştır. Bu işlemin ardından 5. BEÇÇ\_1 elemanı deneye hazır hale gelmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.16. Eleman 5. BEÇÇ\_1 için detay çizimleri



Şekil 3.17. Eleman 5. BEÇÇ\_1 için yapım detayı

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

**7. BEÇÇ\_1 Elemanı:** Bu BEÇÇ modelinde BEM tamamen değiştirilmiştir. Daha önce BEM olarak kullanılan 250x250x6 mm'lik profil yerine bu modelde donatısız beton kullanılmıştır. Bu sayede oldukça ekonomik bir BEM çözümü elde edilmesi planlanmıştır. Şekil 3.18 ve 3.19'da görüldüğü gibi 7. BEÇÇ\_1 modelinde BEM tamamen beton kesitten oluşmaktadır. BEM'i oluşturan beton kesit ise 380x380 mm'dir. Bu BEÇÇ tipinde Şekil 3.18 ve 3.19'da görüldüğü gibi 3. ve 4. bölgelerde 5. BEÇÇ\_1'dekine benzer kızak levhaları mevcuttur. Kızak levharının 3. ve 4. bölgelerde oluşturulmasından sonra BEÇÇ elemanı ahşap kalıp içerisine konularak beton dökülmüştür (Şekil 3.18 ve 3.19). Beton dökümünden 4 gün sonra numune kalıptan çıkartılmış ve kür yapılmıştır. Beton dayanımının 20 MPa değerine ulaşmasından sonra deney öncesi işlemlere başlanmıştır (deney günü beton dayanımı 23.5 MPa). 7. BEÇÇ\_1 modelinde yapılan tasarım hesapları şu şekildedir. BEM'in global burkulmasının önlenmesi gerekmektedir. BEM için kullanılan 380x380 mm'lik kesitin Denklem 3.4'ü sağlamalıdır (Watanabe vd.1988).

$$P_e/P_y \geq 2, \quad P_e = \pi^2 \times E \times I_{sc} / (l_{sc})^2, \quad P_y = \sigma_y \times A_c \quad (3.4)$$

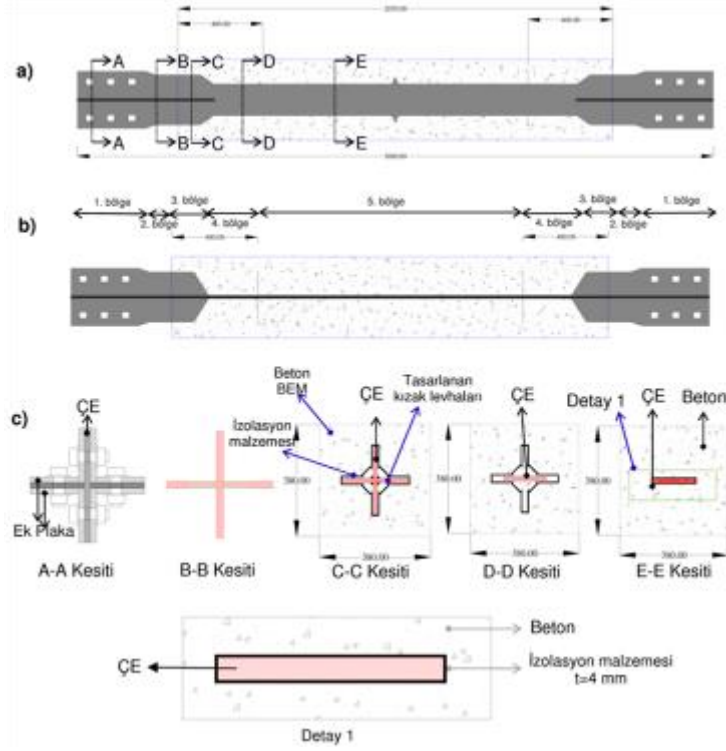
$$E = 14000 + 3250 \sqrt{f_c} = 14000 + 3250 \sqrt{20} = 28500 \text{ MPa} \quad (3.5)$$

$$I_{sc} = \frac{1}{12} \times 380 \times 380^3 = 1737613333 \text{ mm}^4 \quad (3.6)$$

$$P_e = \pi^2 \times 28500 \times 1737613333 / (2050)^2 = 121403759 \text{ N} \quad (3.7)$$

$$P_y = \sigma_y \times A_c = 2250 \times 325 = 731250 \text{ N} \quad (3.8)$$

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



Şekil 3.18. Eleman 7. BEÇÇ\_1 için detay çizimleri

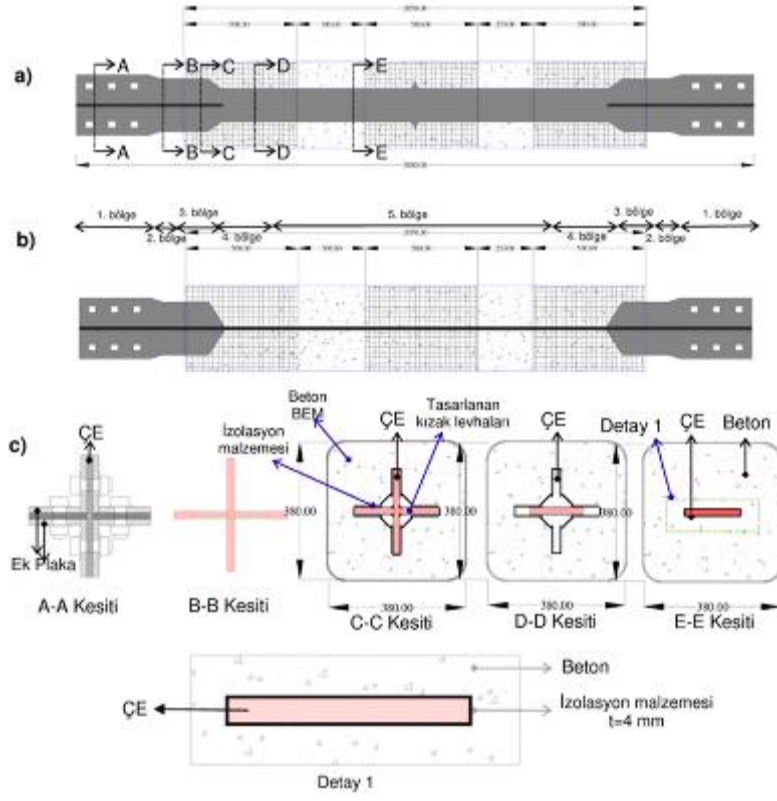


Şekil 3.19. Eleman 7. BEÇÇ\_1 için yapım detayı

**8. BEÇÇ\_1 Elemanı:** Bu BEÇÇ\_1 modelinde BEM 7. BEÇÇ\_1 modeli ile aynıdır. Ancak 7. BEÇÇ\_1 modelinde test esnasında beton BEM’de meydana gelen hasar dikkate alınarak 8. BEÇÇ\_1 modelinde beton BEM’in üç farklı bölgeden FRP ile sarılması uygun görülmüştür (Şekil 3.20 ve 3.21). Bu sayede 7. BEÇÇ\_1’den daha az ekonomik ancak yine de ekonomik bir BEM çözümü elde edilmesi planlanmıştır. Şekil 3.20’de görüldüğü gibi 8. BEÇÇ\_1 modelinde BEM tamamen beton kesitten oluşmaktadır. BEM’i oluşturan beton kesit ise 380x380 mm’dir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007’de belirtildiği üzere FRP ile sarılacak olan beton kesitlerinin köşelerinin yuvarlatılması gereklidir. Dolayısı ile



380x380 mm'lik kesitin köşelerinin yuvarlatılması için beton dökümünden önce kalıp köşelerine 100 mm çapındaki plastik boru dört parçaya bölünerek montajlanmıştır (Şekil 3.20 ve 3.21). Bu işlemden sonra kalıplara beton dökülmüştür. Beton dökümünden 4 gün sonra numune kalıptan çıkartılmış ve kür yapılmıştır. Beton dayanımının 20 MPa değerine ulaşmasından sonra deney elemanı tamamen kuramaya bırakılmıştır. Beton yüzeyinin iyice kurumasından sonra beton BEM'in iki ucuna ve ortasına 50 cm'lik FRP sarılmıştır. Bunun için ilk önce tamir harç beton üzerine sürülmüştür ve tamir harcının sertleşmesinden önce hem tamir harcının üzerine hem de FRP üzerine epoksi sürülerek FRP sarma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.21).

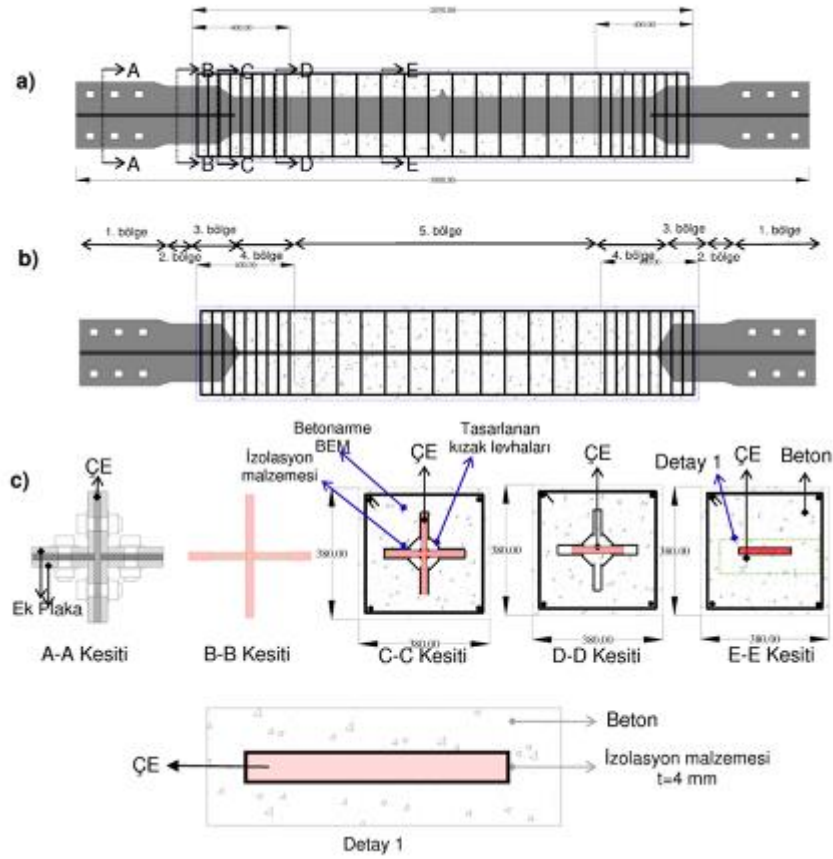


Şekil 3.20. Eleman 8. BEÇÇ\_1 için detay çizimleri



Şekil 3.21. Eleman 8. BEÇÇ\_1 için yapım detayı

**9. BEÇÇ\_1 Elemanı:** Bu BEÇÇ modelinde BEM 7. BEÇÇ\_1 modeli ile aynıdır. Ancak 7. ve 8. BEÇÇ\_1 modellerinde test esnasında beton BEM’de meydana gelen hasar dikkate alınarak 9. BEÇÇ\_1 modelinde beton BEM’in etriyeler ile sargılı beton halinde kullanılması uygun görülmüştür (Şekil 3.22 ve 3.23). Bu sayede 7. BEÇÇ\_1’den daha az ekonomik ancak 8. BEÇÇ\_1’den daha ekonomik bir BEM çözümü elde edilmesi planlanmıştır. BEM’i oluşturan beton kesite yerleştirilecek olan etriye aralıkları kızak bölgesinde yani Şekil 3.22 ve 3.23’te 3. ve 4. bölgede 5 cm 5. bölgede ise 10 cm’dir. Etriye aralıkları Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007’de belirtilen minimum ve maksimum aralıklar olup kullanılan etriye çapı yine 8 mm’dir. Etriyelerin montajını sağlamak için ise 4 adet 8 mm’lik boyuna donatı kullanılmıştır. Donatının bağlanmasından sonra BEÇÇ kalıba yerleştirilerek beton dökülmüştür (Şekil 3.22-3.23). Beton dökümünden 4 gün sonra numune kalıptan çıkartılmış ve kür yapılmıştır.



Şekil 3.22. Eleman 9. BEÇÇ\_1 için detay çizimleri



Şekil 3.23. Eleman 9. BEÇÇ\_1 için yapım detayı

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

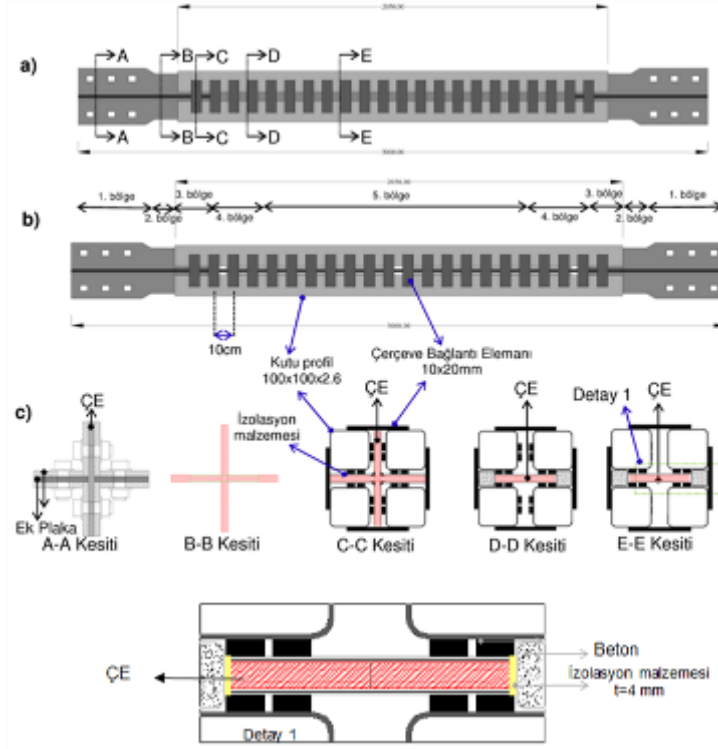
### 3.1.2. 2.Grup BEÇÇ Elemanları

Bu grup BEÇÇ'lerde BEM Çok Parçalı Basınç Çubuğu (ÇPBC) olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneysel elemanlarına ait parametreler Çizelge 3.2'de özetlenmiştir. Bu tip BEÇÇ'lerin yapı içerisinde (iç akslara bağlanması) güçlendirme amacıyla kullanılması mümkün olarak görülmektedir.

**Çizelge 3.2.** İkinci grup BEÇÇ elemanları

2. Grup BEÇÇ	BEM	İzolasyon malzemesi	ÇPBC sistemi
1.BEÇÇ_2	Çerçeve Bağlantılı ÇPBC	4 mm lastik	Kutu profil
2.BEÇÇ_2	Çerçeve Bağlantılı ÇPBC	4 mm lastik	Kutu profil+Beton
3.BEÇÇ_2	Çapraz Bağlantılı ÇPBC	4 mm lastik	Kutu profil+Beton

**1. BEÇÇ\_2 Elemanı:** Bu BEÇÇ modelinde BEM 1. Grup kapsamında test edilen bütün BEÇÇ'lerden farklıdır. Bu modelde BEM için 4 adet 100x100x2.6 mm'lik kutu profil (KP 100x2.6) kullanılmıştır (Şekil 3.24 ve 3.25). Bu kutu profiller çerçeve bağlantı elemanı kullanarak birbirine bağlanmıştır. Kutu profillerin bağlanmasında kullanılan çerçeve bağ elemanlarının tasarımı TS 648 çok parçalı basınç çubukları bölümüne göre yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda çerçeve bağ elemanlarının arası 10 cm olarak belirlenmiştir. Bağ elemanlarının en kesitleri ise 10x50 mm'dir. ÇE'nin güçlü yönde burkulmasının engellenmesi için 100x100x2.6 mm'lik kutu profillerin arasına beton doldurulmuş 760 mm boyunda 40x40x1.2 mm kare kutu profiller iki parça halinde yerleştirilmiştir. BEM'in uç kısımlarına 8 mm kalınlığında kapak plakaları kaynatılmıştır.



Şekil 3.24. Eleman 1. BEÇÇ\_2 için detay çizimleri



Şekil 3.25. Eleman 1. BEÇÇ\_2 için yapım detayı

BEÇÇ elemanın tasarımında yapılan hesaplar şu şekildedir:

$$\lambda = \frac{KL}{i} \quad (3.9)$$

$$\lambda^2 = \frac{(KL)^2}{i^2} \quad (3.10)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3.11)$$

$$\lambda^2 = \frac{(KL)^2}{I/A} \quad (3.12)$$

$$\frac{\lambda^2}{A} = \frac{(KL)^2}{I} \quad (3.13)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * A}{\lambda^2} \quad (3.14)$$

$$\frac{P_{cr}}{P_y} > 2 \quad (3.15)$$

$$P_y = 2250 \text{ mm}^2 * 250 \text{ N/mm}^2 = 56200 \text{ N} \quad (3.16)$$

$E = 210000 \text{ N/mm}^2$ ,  $A = 990 * 4 = 3960 \text{ mm}^2$  (dört kutu profilin toplam kesit alanı) ve  $S = 10 \text{ cm}$  bağ levha aralığı dikkate alınır;

$$\lambda_{1y} = \frac{S_1}{i_1} = \frac{S_1}{3.85} \cong 3, \quad S_1 = 10 \text{ cm} \quad (3.17)$$

$$\lambda_{yi} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \lambda_{1y}^2}, \quad \lambda_{xi} = \sqrt{\lambda_x^2 + \frac{m}{2} \lambda_{1x}^2} \quad (3.18)$$

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

$$I = 4 * 155 + 4 * 9,9 * (6,95)^2 = 2532,78 \text{ cm}^4 \quad (3.19)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{2532,78}{4 * 9,9}} = 7,99 \text{ cm} \quad (3.20)$$

$$\lambda = \frac{KL}{i} = \frac{2 * 205}{7,99} = 51,31, \quad k = 2 \quad (3.21)$$

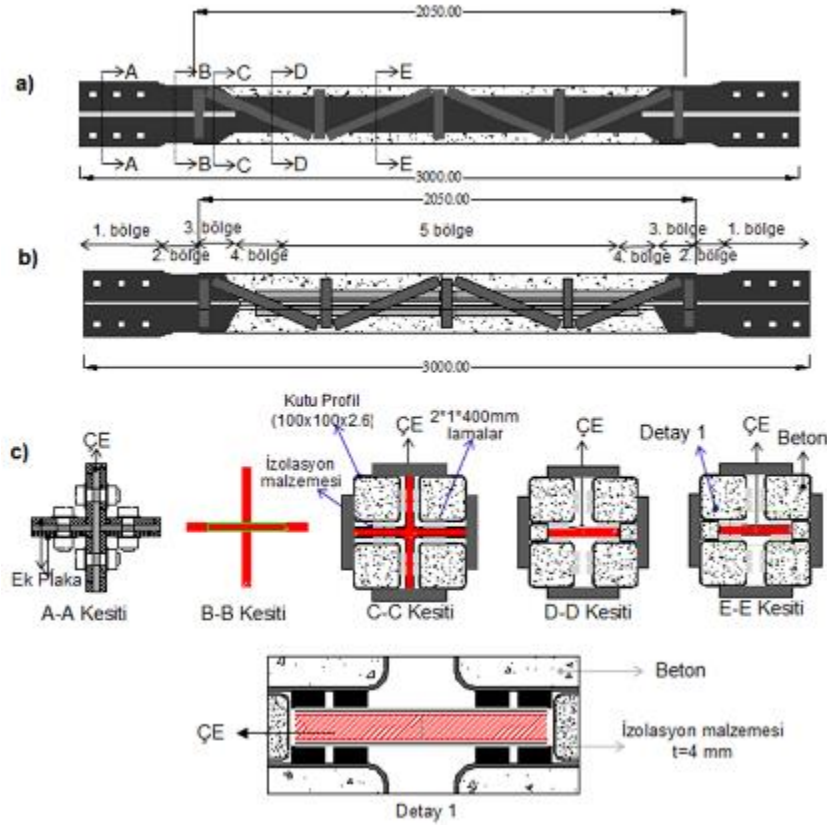
$$\lambda_{yi} = \sqrt{51,31^2 + \frac{2}{2} * 3} = 51,4 \quad (3.22)$$

$$\frac{P_{cr}}{P_y} = \frac{\pi^2 * E * A}{\lambda^2} = 5,52 \quad (3.23)$$





**3. BEÇÇ\_2 Elemanı:** Bu BEÇÇ elemanı 2. BEÇÇ\_2 elemanı ile benzerdir. Aralarındaki tek fark 3. BEÇÇ\_2’de BEM için kullanılan ÇPBC çapraz bağ elemanları kullanılarak elde edilmiştir. Bu çapraz bağ elemanları 30x30x3 mm köşebentlerden oluşmuştur (Şekil 3.28 ve 3.29).



Şekil 3.28. Eleman 3. BEÇÇ\_2 için detay çizimleri



Şekil 3.29. Eleman 3. BEÇÇ\_2 için yapım detayı

### 3.2. BAP Projesi Kapsamında Yapılan Deneysel Çalışmalar

Bu proje kapsamında yine Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarında (Şekil 3.3) eleman bazında Burkulması Engellenmiş Çelik Çapraz (BEÇÇ) deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney TÜBİTAK 112M820 projesi deneylerinde kullanılan aynı test düzeneğinde (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5) gerçekleşmiş olup, TÜBİTAK 112M820 projesi deneylerinden farkı; ÇE olarak lazer kesimli levha yerine hazır hadde lama profil kullanılarak pahalı bir kesim olan lazer kesim işlemine gerek kalmadan BEÇÇ üretiminin elde edilmiş olmasıdır. Dolayısı ile BEÇÇ'lerin lazer kesime ihtiyaç duyulmadan lama hadde çeliklerden üretilmesi ile BEÇÇ'ler için ekonomik çözüm önerisi getirilmiştir.

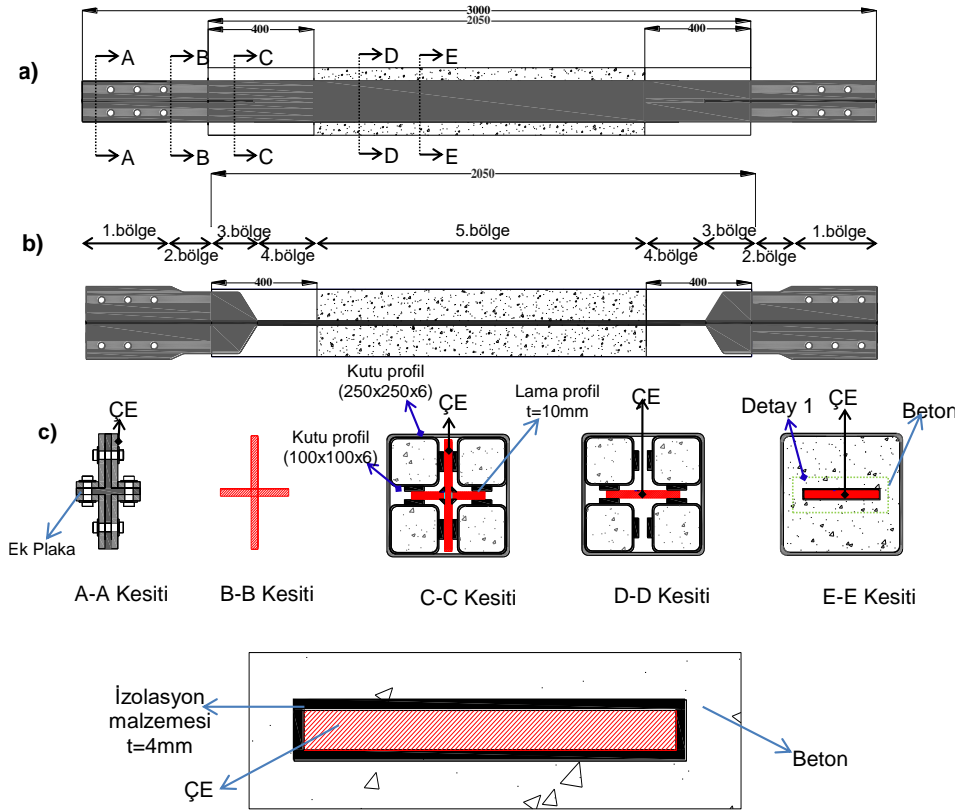
ÇE'ler genelde sac malzemeden lazer kesim ile elde edilmektedir. Bu işlem pahalı bir yöntem olmakla beraber her zaman istenilen uzunlukta kesim tezgâhı bulunamamaktadır. Yapılan piyasa araştırmasında sac kesimi yapan lazer kesim tezgahlarının genelde 3 m olduğu görülmüştür. Daha büyük ebatlarda lazer kesim yapan tezgahlar ise nadiren bulunmaktadır. Örneğin Antalya'da 3 m'den fazla uzunlukta lazer kesim yapan bir tezgah yoktur. Dolayısı ile 3 m'nin üzerindeki sac kesimleri şehir dışında yapılabilmektedir ve bu da ekonomik olarak ek maliyet yaratmaktadır. Lazer kesim tezgâhı sanayisi gelişemeyen illerde de bulunmamakla beraber, piyasada kolaylıkla 3 m'den fazla tezgah bulunmaması durumu da BEÇÇ'lerin (boy uzunluğunda) tasarımlarının değişmesine ve gelişmesine engel teşkil etmektedir. Hazır hadde lama profiller ise istenilen uzunluklarda kolaylıkla her ilde bulunabilmektedir. Kesim yapılan sac levha yerine hazır hadde lama profil kullanılması BEÇÇ'leri hem pahalı/nadir bulunan bir kesim olan lazer kesimden kurtarmakta hem de 3 m'nin üzerinde tasarım yapılabilmesi için gelişmelerine katkıda bulunmaktadır.

BAP projesi kapsamında hazır lama hadde çelikten lazer kesim yapılmadan üretilen 3 m'lik bir BEÇÇ'nin eleman bazında hem çekme hem de basma istemleri altında histeretik olarak testi yapılmıştır. ÇE olarak lama profil kullanılan bu eleman tasarım detayı olarak TÜBİTAK 112M820 projesinin 2. BEÇÇ\_1 elemanı baz alınarak üretilmiştir. 2. BEÇÇ\_1 elemanının seçilmesinin sebebi hem aynı tasarımla TÜBİTAK 112M820 projesinde deney tekrarı (3.BEÇÇ\_1) yapılmış olması hem de yapılan her iki deneyde BEÇÇ'nin oldukça kararlı histeretik davranış göstererek ÇE'nin %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar sorunsuz olarak test edilebilmiş olmasıdır. BAP projesinde aynı tasarım detaylarına sahip hazır hadde lama profil BEÇÇ ile bu testin yapılması, TÜBİTAK 112M820 nolu projede 1.grupta test edilmiş olan 2. ve 3. BEÇÇ'ler ile histeretik davranışlarının karşılaştırmasının yapılmasını sağlamıştır. Deney elemanlarına ait parametreler Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

**Çizelge 3.3.** BAP kapsamında test edilen elemanın 2. ve 3. BEÇÇ\_1 ile karşılaştırılması

Eleman	BEM	İzolasyon malzemesi	Ek BEM sistemi	Ek BEM uzunluğu	ÇE (3000 mm)
2.BEÇÇ_1 3.BEÇÇ_1	Kutu profil+Beton	4 mm lastik	Kutu profil	400 mm	Lazer kesim sac levha
BAP_BEÇÇ	Kutu profil+Beton	4 mm lastik	Kutu profil	400 mm	Hazır hadde lama profil

BAP projesinde yapılan bu deneyde BEÇÇ'nin yapım detayı bakımından farkı ÇE yerine hazır hadde lama profil kullanılmış olmasıdır. BEÇÇ elemanın tasarımında yapılan tüm hesaplar diğer deneylerle aynı olup hiçbir detayında lazer kesim kullanılmamıştır. Dolayısıyla BEÇÇ'nin deney düzeneğine bağlantısında ÇE üzerine açılan slotlar yerine dairesel delik açılmıştır, bağlantılar ise tüm deneylerde olduğu gibi 12 adet 10.9 M24 bulon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. BEÇÇ\_BAP modeline ait detaylar Şekil 3.30'da görülmektedir. Şekil 3.30'da gösterilen BEÇÇ'nin 3. (C-C kesiti) ve 4. (D-D kesiti) bölgesinde 4 adet 400 mm uzunluğunda 100x100x6 mm'lik kutu profil yerleştirilmiştir. Bu kutu profilin ÇE ile 4 mm civarında boşluk kalmasını sağlamak amacıyla her bir parçaya C-C kesiti ve D-D kesitinde görüldüğü gibi iki adet 10x40 mm'lik lamalar kaynatılmıştır. Bu sayede ÇE'nin bu profil-lama sisteminden oluşan bölgede sürtünmesi en aza indirilmiştir. En dışta ise 250x250x6 mm'lik kutu profil burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) olarak kullanılmıştır. Ayrıca BEM 5. bölgede 20 MPa betondan ve kutu profilden oluşturulmuştur. Betonun 3. ve 4. bölgeye taşmasını engellemek için 4. ve 5. bölge arasında kapak plakaları yerleştirilmiştir. ÇE bu işlemde sonra 250x250x6 mm olan kutu profil içerisine yerleştirilmiştir. İşlemden sonra C-C kesitindeki 400 mm uzunluğundaki 100x100x6 kutu profilleri 250x250x6 mm'lik kutu profil ve ÇE arasına yerleştirilmiştir. Daha sonra 5. bölge betonun döküm işlemi yapılmıştır. Son aşama olarak BEÇÇ'deki 250x250x6 mm'lik kutu profilin iki ucuna kapak plakaları monte edilmiştir. Beton dökümünden sonra beton dayanımının 20 MPa olması için bekleme sürecine geçilmiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.30 Lama profilli BEÇÇ elemanı detay çizimleri



Şekil 3.31. Lama profilli BEÇÇ eleman yapım detayları

### 3.3. Yükleme Protokolü

BEÇÇ'lerin yükleme protokolleri için literatürde kullanılmış farklı yöntemler olmakla birlikte ülkemizde kullanılan şartnamelerde BEÇÇ'ler ve bu elemanlar için uygulanması gerekli test protokolleri hakkında bilgi bulunmamaktadır. Bu tez kapsamında Eryaşar ve Topkaya (2010) tarafından daha önce yapılmış olan çalışmada kullanılan test protokolü kullanılmıştır. Bu protokole göre ÇE'nin plastik bölge uzaması

için iki farklı parametre kullanılmıştır. Bunlar ÇE'nin plastik bölgesinin akması ( $\delta_y$ ) ve 0.01 birim şekil değiştirme ( $\delta_{str\ 0.01}$ ) değerleridir. Şekil 3.32'de gösterildiği gibi her bir deplasman değerine iki kez ters çevirimli yükleme yapılmıştır. BEÇÇ'lerin plastik bölge uzunluğu 1702 mm'dir. Yükleme protokolü proje kapsamında alınan deplasman kontrollü piston sayesinde BEÇÇ elemanlarına uygulanmıştır. Yükleme protokolündeki değerler ÇE elemanı üzerindeki uzama değerleri olduğu için pistonun strokunu kontrol eden LVDT bu bölgeye yerleştirilmiştir. Dolayısı ile piston strokunun kontrol edildiği LVDT, alanı 2250 mm<sup>2</sup> uzunluğu 1702.5 mm ve alanı 6855 mm<sup>2</sup> ve uzunluğu 660 mm (2x330 mm) olan bir bölgeyi ölçmektedir.

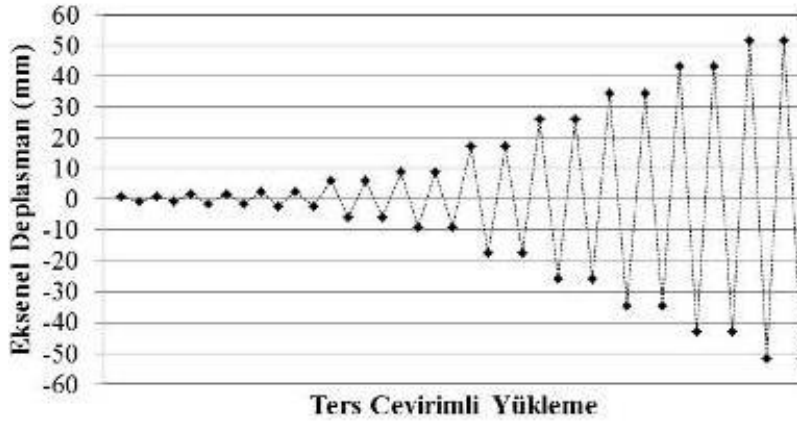
(1/3) $\delta_y$ , (2/3) $\delta_y$ , (1.0) $\delta_y$ , (1/3) $\delta_{str\ 0.01}$ , (0.5) $\delta_{str\ 0.01}$ , (1.0) $\delta_{str\ 0.01}$ , (1.5) $\delta_{str\ 0.01}$ , (2.0) $\delta_{str\ 0.01}$ , (2.5) $\delta_{str\ 0.01}$ , (3.0) $\delta_{str\ 0.01}$ , (3.5) $\delta_{str\ 0.01}$ , (4.0) $\delta_{str\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

$$\delta_y = 1702.5 * \frac{f_y}{E}, \quad E = 210\ 000 \text{ MPa ve } f_y : \text{ ÇE akma gerilmesi} \quad (3.24)$$

$$\delta_{y\ 0.01} = 1702.5 * 0.01 = 17.03 \text{ mm} \quad (3.25)$$

Protokol deplasmanları ise sadece 1702.5 mm alan için uygulanması öngörülmektedir. Söz konusu 6855 mm<sup>2</sup>'lik alanda meydana gelen uzama ise protokole eklenmesi gerekmektedir (Çizelge 3.4). Eksenel yükün 1000 kN olmasında dahi bu alan elastik kalmaktadır ve 1000 kN'luk eksenel yük altında 0.458 mm kadar uzayabilmektedir. Bu 6855 mm<sup>2</sup>'lik alandaki elastik bölge uzaması özellikle ÇE'in plastik kısmın yükleme protokolünün başlarındaki elastik ters çevirim değerlerinde ((1/3) $\delta_y$ , (2/3) $\delta_y$ , (1.0) $\delta_y$ ) önem arz etmektedir. Bu değerlerin eklenmemesinde ise yaklaşık %10'luk bir hata oluşumu söz konusu olabilmektedir. Ancak 6855 mm<sup>2</sup>'lik alandaki elastik bölge uzaması protokolün büyük deplasmanlarında ((1/3) $\delta_{str\ 0.01}$ , (0.5)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (1.0)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (1.5)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (2.0)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (2.5)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (3.0)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (3.5)  $\delta_{str\ 0.01}$ , (4.0)  $\delta_{str\ 0.01}$ ) etkisini kaybetmektedir.

Eksenel yük BEÇÇ ve piston stroku arasına yerleştirilen 1000 kN'luk yük hücresi kullanılarak elde edilmiştir. Yükleme protokolünün eleman üzerindeki ölçümleri Şekil 3.33.b'de görüldüğü gibi 5 adet LVDT kullanılarak, öngerme sistemi ile sıkılan 10.9 M24 bulonlarda kayma meydana gelip gelmediği ise yine deney elemanı üzerine yerleştirilen LVDT'ler (Şekil 3.33.a, 7, 8, 9. ve 10. LVDT) kullanılarak, ÇE'nin plastik bölgedeki birim uzamaları 4 adet birim uzama ölçer (Şekil 3.33.a, 16, 17, 18 ve 19 LVDT), BEÇÇ'deki global deformasyonları BEM üzerine yerleştirilen yatay ve düşey hareketi kontrol eden LVDT (Şekil 3.33.a, 11, 12, 13, 14, 15. LVDT ) ve birim uzama ölçerler kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerin detayları deney sonuçları kısmında verilmiştir.



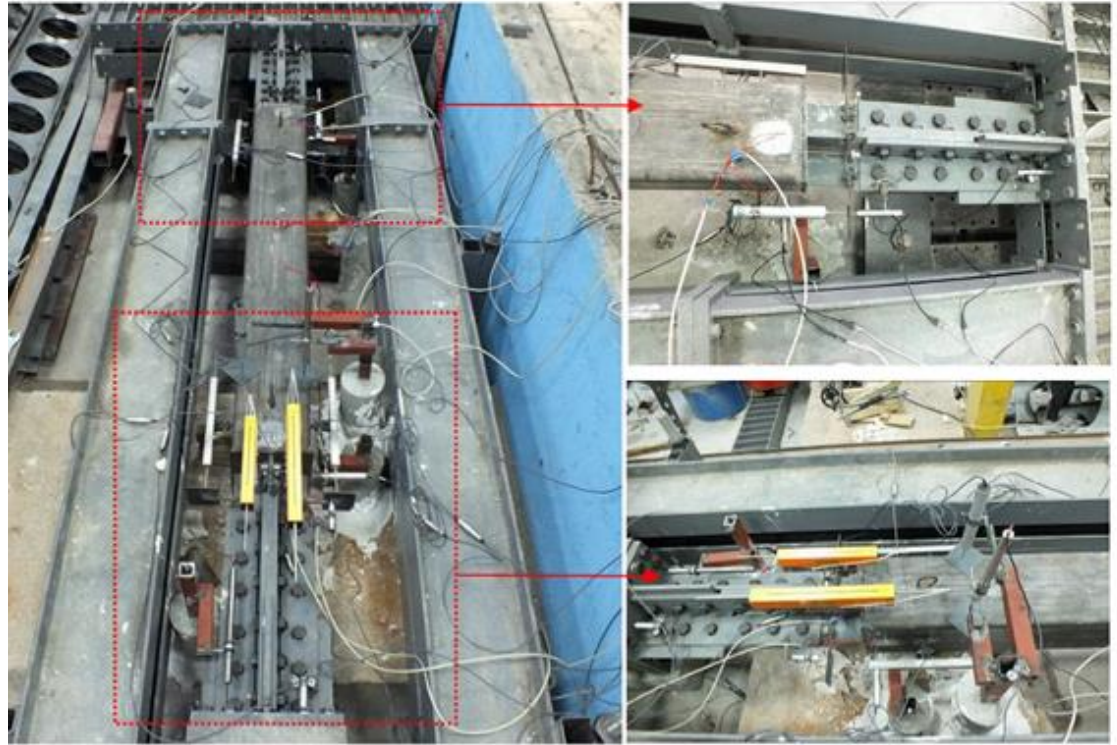
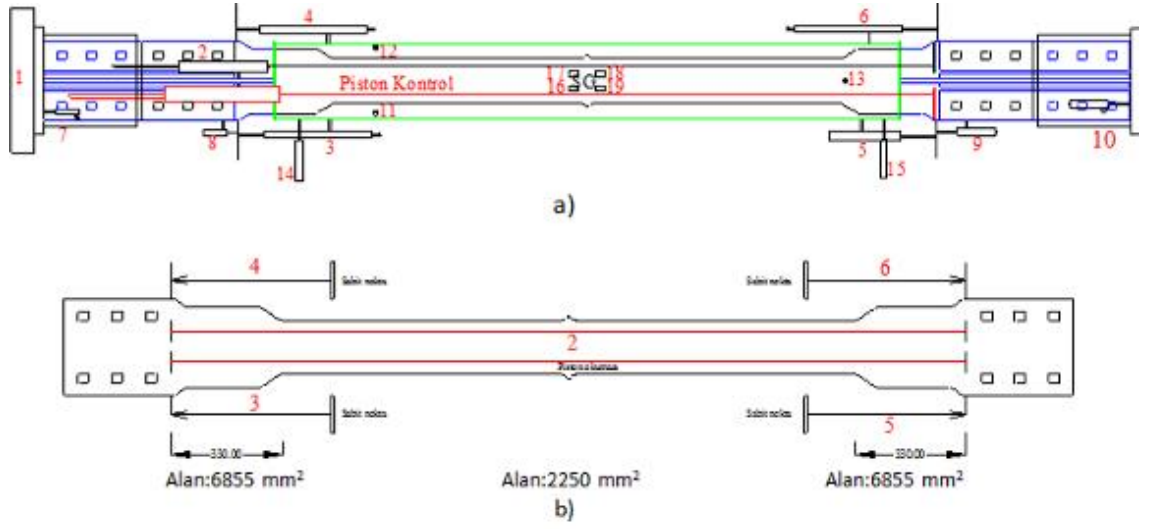
Şekil 3.32. Yükleme protokolü (2. BEÇÇ\_1)

Çizelge 3.4. Yükleme protokolü değerleri (Devam ediyor)

Protokol Parametresi	Yükleme Sayısı	Plastik Deplasman (mm)	Elastik Deplasman (mm)	Stroke Deplasman (mm)
0.33 $\delta_y$	1	0.876	0.111	0.987
	2	-0.876	-0.111	-0.987
	3	0.876	0.111	0.987
	4	-0.876	-0.111	-0.987
0.66 $\delta_y$	5	1.752	0.223	1.974
	6	-1.752	-0.223	-1.974
	7	1.752	0.223	1.974
	8	-1.752	-0.223	-1.974
1.0 $\delta_y$	9	2.627	0.334	2.962
	10	-2.627	-0.334	-2.962
	11	2.627	0.334	2.962
	12	-2.627	-0.334	-2.962
0.33 $\delta_{str0.01}$	13	5.620	0.356	5.975
	14	-5.620	-0.356	-5.975
	15	5.620	0.356	5.975
	16	-5.620	-0.356	-5.975
0.50 $\delta_{str0.01}$	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 $\delta_{str0.01}$	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 $\delta_{str0.01}$	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

Çizelge 3.4. Yükleme protokolü değerleri

2.0 $\delta_{str0.01}$	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 $\delta_{str0.01}$	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



Şekil 3.33. Ölçüm sisteminin yerleştirilmesi

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

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

##### 4.1. TÜBİTAK 112M820 Projesi Kapsamında Yapılan Testler

##### 4.1.1. Birinci grup BEÇÇ elemanlarına ait deney sonuçları ve gözlemler

1. Grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük kapasiteleri Çizelge 4.1'de görülmektedir. BEÇÇ'lerin histeretik davranışları BEÇÇ elemanlarına uygulanan eksenel yüke karşılık ÇE'nin plastik kısmı için ölçülen deplasmanların (Şekil 3.29'da 2., 3., 4., 5. ve 6. LVDT'lerden okunan değerler) birim uzama değerlerine çevrilmiş hali ile yük hücresinden elde edilen verilerin gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Ayrıca 2., 3., 6., 8. ve 9. BEÇÇ\_1 elemanlarına ait yorulma testi sonucu ise Şekil 4.2'de görülmektedir. Test elemanlarının deneyden sonraki fotoğrafları Şekil 4.3-12'de verilmiştir. Deney esnasında öngerme yöntemiyle sıkılan 10.9 M24 bulonlarda meydana gelen kayma değerleri Şekil 4.13'de gösterilmektedir. ÇE'nin plastik kısmının orta noktasındaki birim uzama değerleri (bu noktalara yapıştırılan birim uzama ölçerler sayesinde alınan ölçümler) Şekil 4.14'de verilmiştir. BEM'i oluşturan sistemlerin her iki ucunda meydana gelen deplasmanlar ise Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Eleman bazında değerlendirmeler ise aşağıda yapılmıştır.

**Çizelge 4.1.** Birinci grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük değerleri

Eleman	No	Çekme (kN)	Basınç (kN)	Pçekme / Pbasınç
BEÇÇ_1.Grup	1	671	-926	1.38
	2	865	-966	1.12
	3	882	-1020	1.16
	4	687	-685	1.00
	5	824	-894	1.08
	6	869	-1026	1.18
	7	886	-948	1.07
	8	842	-1005	1.19
	9	889	-1012	1.14
	10	864	-979	1.13
BEÇÇ_2.Grup	11	650	-584	0.90
	12	837	-901	1.08
	13	668	-759	1.14
BEÇÇ_BAP	14	685	-677	1.01

**1. BEÇÇ\_1:** Şekil 4.1 görüldüğü gibi 1. BEÇÇ\_1 modelinde eleman basınç kapasitesi çekme kapasitesinden fazla çıkmıştır. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 671 kN ve 926 kN'dur. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran 1.38



değerindedir. Bu değer AISC 2005’de verilen sınır değer olan 1.3’den fazladır. Dolayısı ile bu eleman için elde edilen test sonuçları ÇE’nin BEM içerisinde sürtünmesinin daha da azaltılması gerektiğini ortaya çıkmıştır. 1. BEÇÇ\_1 modeli basınç/çekme kapasitesinin 1.3 oranını aşması ve 1000 kN (piston kapasitesi) sınırına yaklaşmasından dolayı daha ileri deplasmanlara yüklenmemiştir. Deney sonrası eleman içerisindeki deformasyonların görülebilmesi için elemanın içi açılmıştır (Şekil 4.3). Bu şekilde ÇE elemanının plastik kısmında yüksek modda burkulmalar meydana geldiği görülmektedir. Söz konusu burkulmalar ÇE’nin plastik uç kısımlarında daha fazla orta açıklığa doğru daha azdır. ÇE’nin hem basınç hem de çekme altında plastikleştiği görülmektedir (Şekil 4.14). ÇE ve BEM’i oluşturan elemanlarda herhangi bir burkulma görülmemiştir. Ön germe işleminin başarılı şekilde yapıldığı Şekil 4.13’de görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi kayma miktarı sınırlı seviyede kalmıştır. BEM’i oluşturan kutu profil üzerinden elde edilen düzlem dışı deplasmanlar Şekil 4.15’de görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi 1.BEÇÇ\_1 elemanı düzlem dışı deplasman yapmasına rağmen BEM ve ÇE elemanlarında burkulma meydana gelmemiştir. Bunun en büyük sebebi BEM sisteminin uç bölgelerinin stabilitelerinin kutu profiller ile artırılmasıdır.

**2. BEÇÇ\_1:** Eleman detaylarında da bahsedildiği gibi 2. BEÇÇ\_1 modelinin oluşturulmasında 1. BEÇÇ\_1 modelinde meydana gelen basınç-çekme farkının azaltılması için ÇE üzerine 2 kat lastik şerit uygulanmıştır. Bu lastik şeritlerin ÇE ve BEM arasında daha fazla boşluk oluşturmuştur. Şekil 4.1 görüldüğü gibi 2. BEÇÇ\_1 modelinde eleman basınç kapasitesi çekme kapasitesine oldukça yakındır. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 865 kN ve 966 kN’dur. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran 1.12 değerindedir. Bu değer AISC 2005’de verilen sınır değer olan 1.3’den azdır. Dolayısı ile bu eleman için elde edilen test sonuçları ÇE’nin BEM içerisinde sürtünmesinin 2 kat lastik şerit kullanılmasıyla yeteri kadar önlendiğini ortaya çıkarmıştır. 2. BEÇÇ\_1 modeli ÇE’nin plastik kısmında %2.5 (0.025) birim şekil değiştirme değerine kadar yüklenmiştir (Şekil 4.1). Bu değer ilerisine gidilmesi planlanmış ancak yükün 1000 kN (yük hücresinin kapasitesi 1000 kN’dur) sınırına yaklaşması ile teste devam edilmemiştir. Literatürde BEÇÇ modelinin %2.0 birim şekil değiştirmeye kadar yüklendiği bir çok çalışma mevcuttur. 2. BEÇÇ\_1 modelinde hasar meydana gelmemesinden dolayı protokole ek yorulma testi uygulanmıştır (Şekil 4.2). Yorulma testi ÇE’nin %1.0 birim şekil değiştirmeye karşılık gelen eksenel basma ve çekme deplasmanlarına kadar ters çevirimli yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma testinde toplam 30 ters çevirimli deplasman uygulaması yapılmıştır. Yorulma testinden sonra eleman açılmış ve meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Şekil 4.4’te görüldüğü gibi ÇE’nin plastik kısmının uç bölgelerinde yüksek modda burkulma meydana gelmiştir. Burkulma mekanizması orta açıklığa doğru azalmıştır. Ayrıca BEÇÇ bağlantısında kullanılan ön germe tekniği ile sıkılan 10.9 M24 bulonların yeterli seviyede çalıştığı görülmektedir (Şekil 4.13). BEM’i oluşturan kutu profil üzerinden elde edilen düzlem dışı deplasmanlar Şekil 4.15’de görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi 2.BEÇÇ\_1 elemanı düzlem dışı deplasman (5-9mm) yapmasına rağmen BEM ve ÇE elemanlarında lokal deformasyon meydana gelmemiştir. Yukarıda da açıklandığı üzere bunun en büyük sebebi BEM sisteminin uç bölgelerinin stabiliteleri kutu profiller ile artırılmasıdır. Bu deney sonucunda elde edilen BEÇÇ’nin literatürde kullanılan ve başarılı olan diğer BEÇÇ tiplerine uygulama ve tasarım açısından bir alternatif olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

**3. BEÇÇ\_1:** Bu eleman 2.BEÇÇ\_1'in tekrarı olduğu için deney sonuçları 2.BEÇÇ\_1 ile benzerdir. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 882 kN ve 1020 kN'dur. 3. BEÇÇ\_1 modeli ÇE'nin plastik kısmında %2.5 (0.025) birim şekil değiştirme değerine kadar yüklenmiştir (Şekil 4.1). Bu değer ilerisine gidilmesi planlanmış ancak yükün 1000 kN (yük hücresinin kapasitesi 1000 kN'dur) sınırına yaklaşması ile teste devam edilmemiştir. Deney elemanında hasar meydana gelmemesinden dolayı ek yorulma testi yapılmıştır (Şekil 4.2). Diğer sonuçlar 2.BEÇÇ\_1 elemanı ile benzer olup bu model BEÇÇ'nin literatürde kullanılan ve başarılı olan diğer BEÇÇ tiplerine uygulama ve tasarım açısından bir alternatif olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

**4. BEÇÇ\_1:** Bu elemana ait eksenel yük ÇE birim uzama grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 687 kN ve 685 kN'dur. Bu BEÇÇ için yapılan test esnasında yükleme protokolünün 20. değerinden 21. değerine geçerken BEÇÇ'nin piston tarafındaki ucunda düşey yönde aşırı deplasman meydana gelmiştir (Şekil 4.6). Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi yük değeri azalmış ve deney sonlandırılmıştır. 3. BEÇÇ\_1 modelinin histeretik performansının istenilen seviyede olması bu eleman için daha ekonomik çözüme arayışına yöneltmiştir. ÇE'nin elastik ve plastik bölgeye geçişi esnasında kullanılan 100x100x6 mm'lik kutu profil boyları 2. BEÇÇ\_1 modelinde 400 mm iken 3. BEÇÇ\_1 modelinde 240 mm olarak alınmıştır. Bu kısımda 100x100x6 mm'lik kutu profilde yapılan değişikliğin söz konusu elemanın stabilitesini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Deney sonrası elemanın içi açıldığında ÇE'nin 100x100x6 mm'lik kutu profilin (Şekil 4.6) uç kısmında aşırı derecede lokal deformasyona uğradığı görülmüştür (Şekil 4.6). Ancak BEÇÇ'nin diğer ucunda herhangi bir hasar görülmemiştir. Deneyin sonlandırılmasına kadar olan kısımda ön germe tekniği başarılı olmuştur. Ancak meydana gelen lokal deformasyon en uç 10.9 M24 bulona ve birleşim plakalarına ek istem uygulamış ve kayma miktarı diğer deneylere göre bir miktar daha fazla olmuştur (Şekil 4.13).

**5. BEÇÇ\_1:** Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 5. BEÇÇ\_1 elemanı %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 5. BEÇÇ\_1 elemanı Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi sırasıyla 824 ve -894 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.08 civarında elde edilmiştir (Bu değerler AISC 2005'de verilen sınır değer olan 1.3'den küçüktür). %2.0 birim şekil değiştirmeden sonra BEÇÇ elemanında meydana gelen hasardan dolayı eksenel yük kapasitesi düşmeye başlamış ve deney sonlandırılmıştır. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi 5. BEÇÇ\_1 elemanında BEM'i oluşturan 250x250x6 mm'lik kutu profil lokal olarak eğilmiştir. Bu eğiklik çekirdek elemanın elastik kısmındaki "+" şeklinin kutu profile temas etmesi ile başlamıştır. Bu bölgedeki hasarın beton dökümünde meydana gelen beton ayrışmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ancak %2.0'lik bir birim şekil değiştirme değerine kadar histeretik davranışta bir sorun görülmemiş olması tasarımın yeterli seviyede olduğunu göstermektedir. Yüksek mukavemetli bulonların öngerme sistemi ile bağlantısının yeterli olup olmadığını kontrol etmek için deney esnasında yapılan ölçümler Şekil 4.13'de gösterilmektedir. Yapılan ölçümlerde 5. BEÇÇ\_1 modelinde Şekil 4.13'de görüldüğü gibi beklenenden fazla kayma meydana gelmiştir. Bunun sebebi kullanılan rondelanın yüksek mukavemetli olmamasıdır. Bu deney için kullanılan rondela hata sonucu normal dayanıma sahip rondela olduğu farkedilmiştir. Ancak piston hareket kontrolü Şekil 3.29'da görüldüğü gibi çekirdek elemanın

üzerinden olduğu için buradaki kayma miktarı deney sonuçlarını etkilememiştir. Bunun yanında öngerme sisteminde kullanılan malzemelerin yüksek kalitede olması gerektiği ortaya çıkmış olmaktadır. Başka bir deyişle somun, bulon ve rondela üçlüsünden oluşan öngerme sisteminin başarılı şekilde gerçekleştirilebilmesi için bu üç bileşenin de yüksek mukavemetli olması gereklidir. Şekil 3.15’de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin çekirdek eleman boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle basınç kuvveti altında çekirdek elemanın orta bölgesinde plastikleşmenin meydana gelmiş olması çekirdek elemanın plastik kısmının tamamında enerji sönmüleme yapabileceğini göstermektedir. Şekil 4.15’te BEM’in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Buradan da görüldüğü gibi BEM’in uç bölgelerinde yaklaşık 10-20 mm’lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ’nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 10-20 mm’lik dış merkezlik halinde bile lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır.

**6. BEÇÇ\_1:** Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi 6. BEÇÇ\_1 elemanı için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 869 kN ve 1026 kN’dur. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran 1.18 değerindedir. Bu değer AISC 2005’de verilen sınır değer olan 1.3’den azdır. 6. BEÇÇ\_1 modeli ÇE’nin plastik kısmında %2.5 (0.025) birim şekil değiştirme değerine kadar yüklenmiştir (Şekil 4.1). Bu değer in ilerisine gidilmesi planlanmış ancak yükün 1000 kN (yük hücresinin kapasitesi 1000 kN’dur) sınırına yaklaşması ile teste devam edilmemiştir. 6. BEÇÇ\_1 modelinde hasar meydana gelmemesinden dolayı protokole ek yorulma testi uygulanmıştır (Şekil 4.2). Yorulma testi ÇE’nin %1.0 birim şekil değiştirmeye karşılık gelen aksel basma ve çekme deplasmanlarına kadar ters çevirimli yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma testinde toplam 40 ters çevirimli deplasman uygulaması yapılmıştır. Yorulma testi sonucunda da hasar meydana gelmemesinden sonra test durdurulmuştur. Yorulma testinden sonra eleman açılmış ve meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi ÇE’nin plastik kısmının uç bölgelerinde yüksek modda burkulma meydana gelmiştir. Burkulma mekanizması orta açıklığa doğru azalmıştır. Ayrıca BEÇÇ bağlantısında kullanılan ön germe tekniği ile sıkılan 10.9 M24 bulonların yeterli seviyede çalıştığı görülmektedir (Şekil 4.13). BEM’i oluşturan kutu profil üzerinden elde edilen düzlem dışı deplasmanlar Şekil 4.15’de görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi 6. BEÇÇ\_1 elemanı düzlem dışı deplasman (3-7mm) yapmasına rağmen BEM ve ÇE elemanlarında lokal deformasyon meydana gelmemiştir. Yukarıda da açıklandığı üzere bunun en büyük sebebi BEM sisteminin uç bölgelerinin stabilitelerinin ek plakalar ile artırılmasıdır. Bu deney sonucunda elde edilen BEÇÇ’nin literatürde kullanılan ve başarılı olan diğer BEÇÇ tiplerine uygulama ve tasarım açısından bir alternatif olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

**7. BEÇÇ\_1:** Şekil 4.1’de görüldüğü gibi 7. BEÇÇ\_1 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 7. BEÇÇ\_1 elemanı Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi sırasıyla 886 ve -948 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.07 civarında elde edilmiştir. %2.0 birim şekil değiştirmeden sonra %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesinde basınç yükünde bir azalma meydana gelmiştir. Devam eden yüklemelerde elemana %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesine kadar çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu çekme kuvvetinin sıfırlanıp basma kuvvetinin artırıldığı noktada BEM’i oluşturan sargısız beton eleman ortadan yarılmıştır ve deney

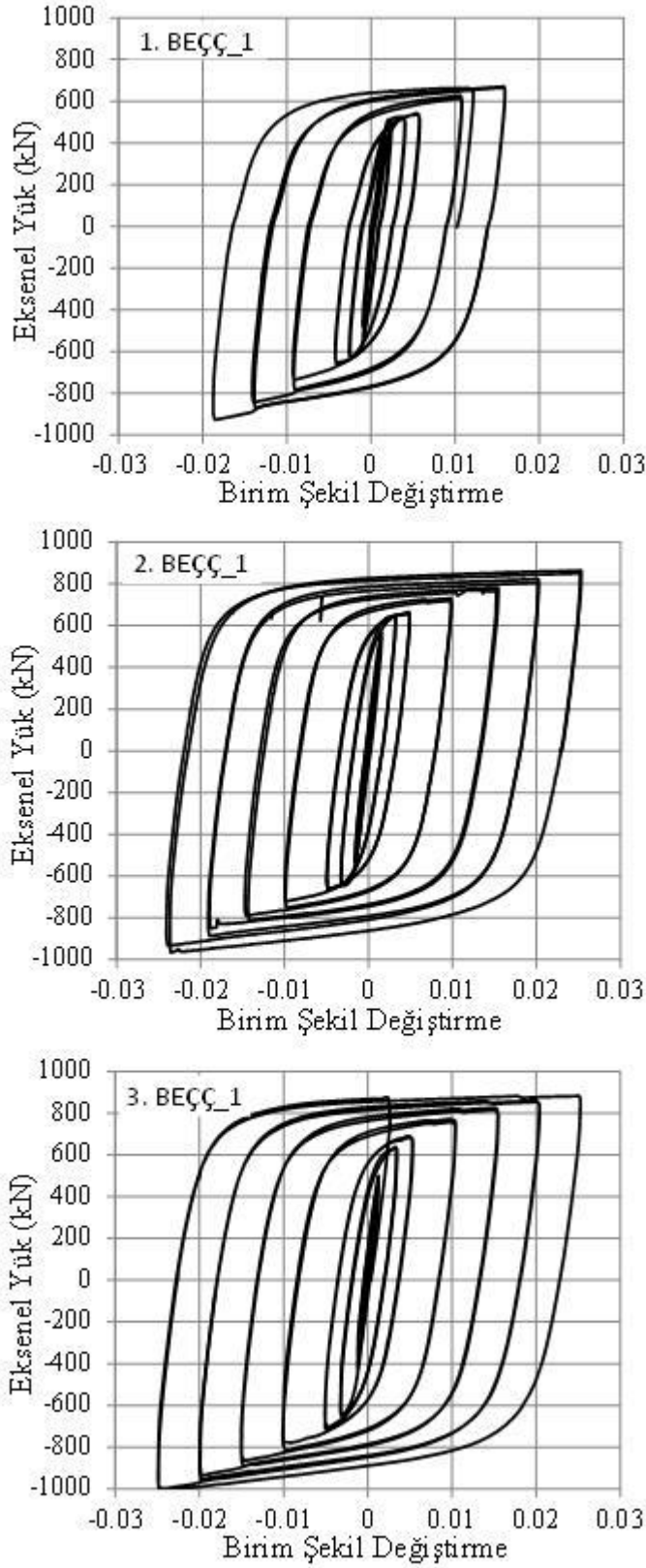
sonlandırılmıştır. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi 7. BEÇÇ\_1 elemanında BEM'i oluşturan sargısız beton ÇE'nin lokal burkulmasını kontrol edememiş ve dışı doğru genişlemeye başlamıştır. Bu genişlemeyi kontrol edecek sargı olmadığı için beton çatlamaya başlamış ve sonunda boydan boya ortadan yarılmıştır. Ancak %2.0'lik bir birim şekil değiştirme değerine kadar histeretik davranışta bir sorun görülmemiş olması sargısız olarak elde edilen beton BEM'in oldukça etkili bir sistem olabileceğini göstermiştir. Fakat betonun kontrolsüz şekilde çatlamaya başlaması ve yarılması elde edilen BEM sisteminin geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir. 7. BEÇÇ\_1 modelinde Şekil 4.13'de görüldüğü gibi yüksek mukavemetli bulonlarda kayma miktarının genel olarak oldukça düşük seviyede kaldığı görülmektedir. Şekil 4.14'de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin çekirdek eleman boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 4.15'de BEM'in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Buradan da görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde yaklaşık 5-10 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 5-10 mm'lik dış merkezlik halinde bile lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır. Bu şekillerdeki ani deplasman artışı betonun yarılması esnasında meydana gelmiştir.

**8. BEÇÇ\_1:** Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 8. BEÇÇ\_1 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %2.5 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 8. BEÇÇ\_1 elemanı Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi sırasıyla 842 ve -1005 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.19 civarında elde edilmiştir. %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesinden sonra yük hücrelerinin 1000 kN'luk kapasitesinin çok aşılacağından deneye devam edilememiştir. BEÇÇ elemanında %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesi yapılmasına rağmen hasar tespiti yapılamadığı için 8. BEÇÇ\_1 elemanına Şekil 4.2'de görüldüğü gibi yorulma testi uygulanmıştır. Yorulma testi esnasında basınç yükünde azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi 8. BEÇÇ\_1 elemanında BEM'i oluşturan kısmı sargılı betonda iki sargı bölgesinin arasında hasar meydana gelmiştir. 205 cm'lik BEM elemanında 50 cm'lik genişliğinde lifli polimer (LP veya FRP) BEM'in iki ucunda ve orta noktasında sargı olarak kullanılmıştır. Hasar ise sargının yapılmadığı ara bölgelerde meydana gelmiştir. Dolayısı ile kısmi dahi olsa sargı yapılmayan bölgelerin ÇE tarafından uygulanan genişleme istemlerini kontrol edemediği görülmüştür. 8. BEÇÇ\_1 testinden sonra sargının tam olarak yapıldığı 4. BEÇÇ'nin tasarlanması gerektiği deney sonucunda ortaya çıkmıştır. 8. BEÇÇ\_1 modelinde Şekil 4.13'de görüldüğü gibi yüksek mukavemetli bulonlarda kayma miktarının bir bölge hariç oldukça düşük seviyede kaldığını göstermektedir. Ancak sadece bir bölgede 3 mm'lik bir kayma meydana gelmesinin yüksek mukavemetli bulonların sıkma işlemi esnasında uygulama hatasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu proje kapsamında yüksek mukavemetli bulonlar havalı somun sökme sıkma makinesi ile sıkılmaktadır. Dolayısı ile hava kompresörünün tam dolu olması ve yeterli hava miktarının olmaması sıkma derecesini etkilemektedir. Bu kısmi bölgede meydana gelen kaymanın hava kompresörünün tam dolu olmadığı andaki sıkılan bulonlar olduğu düşünülmektedir. 8. BEÇÇ\_1 deneyinde çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri istenilen seviyede elde edilememiştir. Şekil 4.15'de görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde düzlem içi ve dışı yaklaşık 5-10 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında

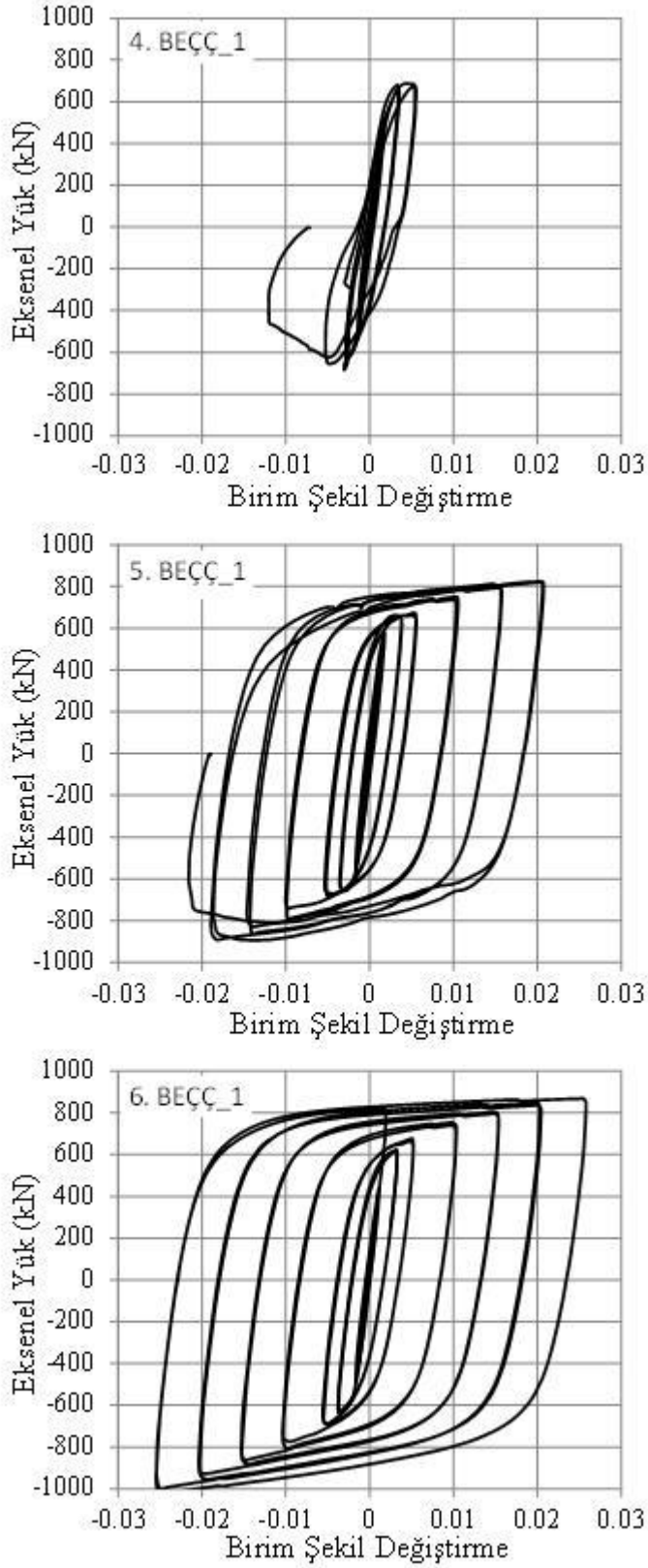
oluşturulan etkin kızak sistemi 5-10 mm'lik dış merkezlik halinde bile lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır.

**9. BEÇÇ\_1:** Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 9. BEÇÇ\_1 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 9. BEÇÇ\_1 elemanı Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi sırasıyla 889 ve -1012 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.14 civarında elde edilmiştir. %2.0 birim şekil değiştirme yüklemesinden sonra yük hücresinin 1000 kN'luk kapasitesinin çok aşılacağından deneye devam edilememiştir. BEÇÇ elemanında %2.0 birim şekil değiştirme yüklemesi yapılmasına rağmen hasar tespiti yapılamadığı için 9. BEÇÇ\_1 elemanına Şekil 4.2'de görüldüğü gibi yorulma testi uygulanmıştır. Yorulma testi esnasında toplam 40 çevirimli yük uygulaması yapılmasına rağmen elemanda herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. BEÇÇ'nin akma noktasından sonra 300 kez daha fazla plastik davranış göstermesinden sonra deney sonlandırılmıştır. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi 9. BEÇÇ\_1 elemanında herhangi bir hasar görülmemektedir. Olası lokal burkulmaların belirlenebilmesi için BEÇÇ elemanı ortandan yarılmıştır (Şekil 4.11). 9. BEÇÇ\_1 modelinde yüksek mukavemetli bulonlarda kayma miktarının oldukça düşük seviyede kaldığını Şekil 4.13'de görülmektedir. Şekil 4.14'de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin çekirdek eleman boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 4.15'de görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde düzlem içi ve dışı yaklaşık 5-25 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 5-25 mm'lik dış merkezlik halinde bile lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır.

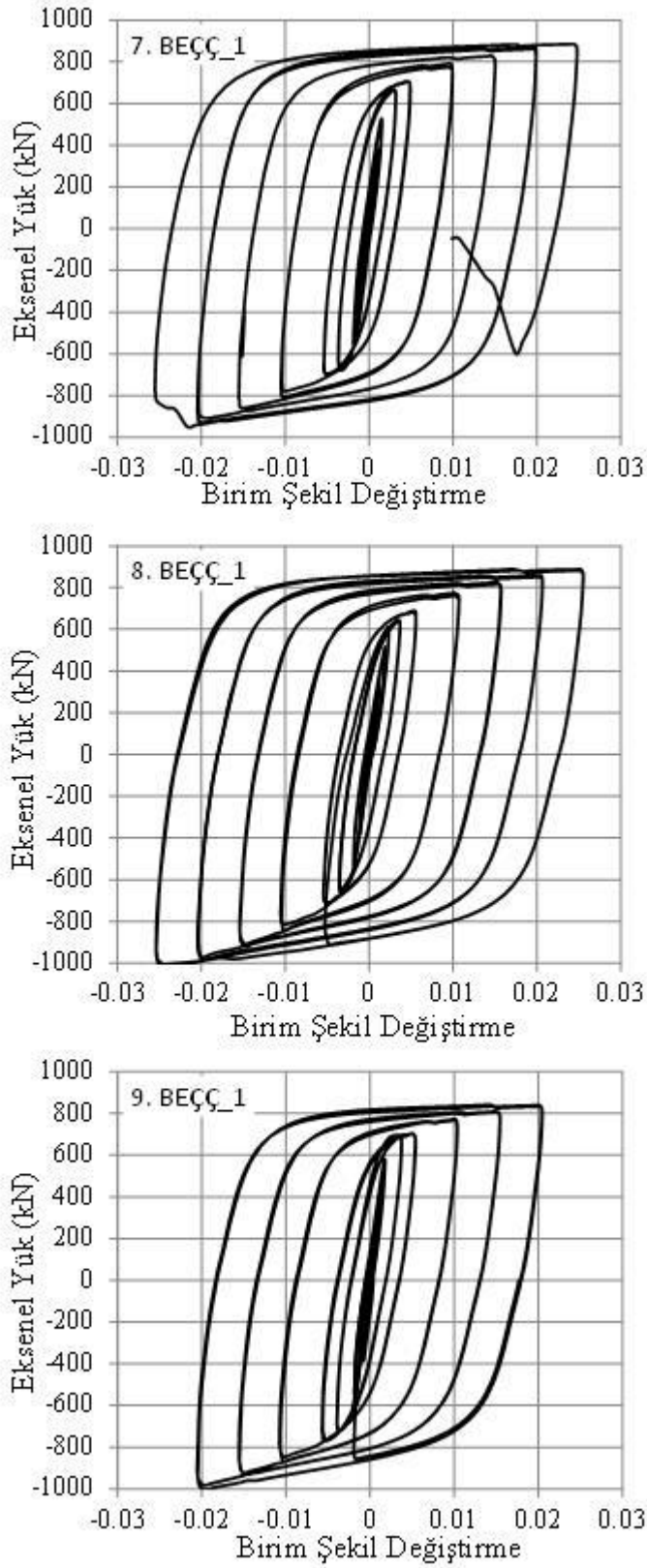
**10. BEÇÇ\_1:** Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 10. BEÇÇ\_1 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar stabil bir histeretik davranış göstermiştir. 10. BEÇÇ\_1 elemanı Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi sırasıyla 864 ve -979 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.14 civarında elde edilmiştir. %2.0 birim şekil değiştirme yüklemesinden sonra %2.5 birim şekil değiştirme yüklemesinin 2. yüklemesinde BEM'i oluşturan betonda çatlamlar meydana gelmiş ve BEM hasar almıştır (Şekil 4.12). 10. BEÇÇ\_1 modelinde yüksek mukavemetli bulonlarda kayma miktarının oldukça düşük seviyede kaldığını Şekil 4.13'de görülmektedir. Şekil 4.15'de görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde düzlem içi ve dışı yaklaşık 5-15 mm'lik bir hareket olmasına rağmen BEÇÇ'nin uç kısımlarında oluşturulan etkin kızak sistemi 5-25 mm'lik dış merkezlik halinde bile ÇE'nin %2 birim şekil değiştirmesine kadar lokal hasarların oluşmasına engel olmaktadır.



**Şekil 4.1.** Eleman 1.-10. BEÇÇ\_1 için eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği (Devam ediyor)

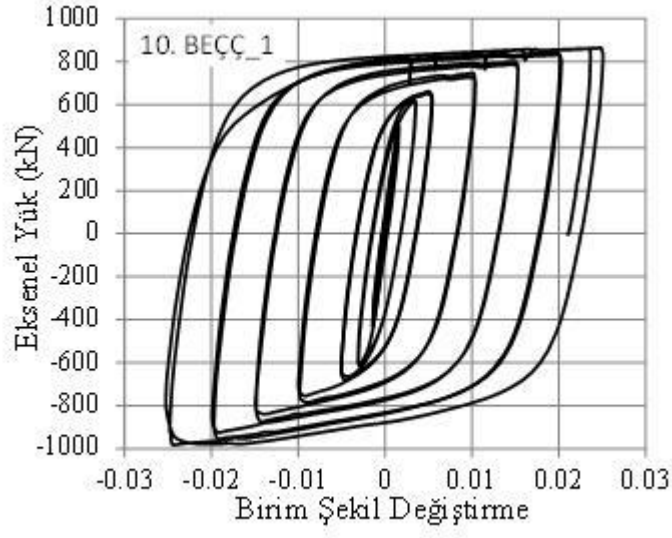


**Şekil 4.1.** Eleman 1.-10. BEÇÇ\_1 için eksenel yük-birim şekil değişirme grafiği (Devam ediyor)

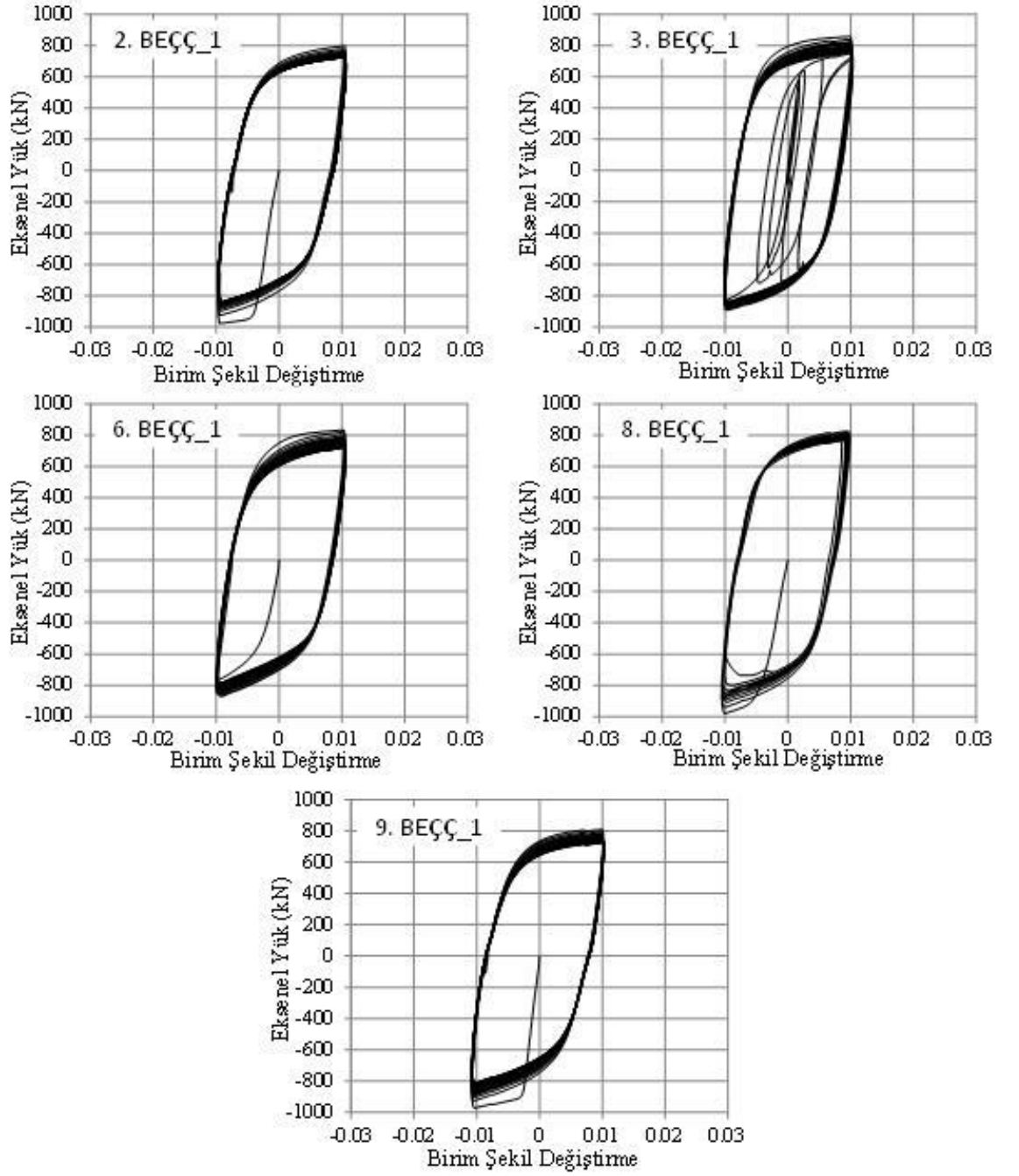


**Şekil 4.1.** Eleman 1.-10. BEÇÇ\_1 için eksenel yük-birim şekil değişirme grafiği (Devam ediyor)





**Şekil 4.1.** Eleman 1.-10. BEÇÇ\_1 için eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği



**Şekil 4.2.** Eleman 2., 3., 6., 8. ve 9. BEÇÇ\_1 için yorulma testi (8. BEÇÇ\_1 10 ters çevirim, diğerleri 40 ters çevirim)



Şekil 4.3. Eleman 1. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.4. Eleman 2. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.5. Eleman 3. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.6. Eleman 4. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.7. Eleman 5. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.8. Eleman 6. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.9. Eleman 7. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



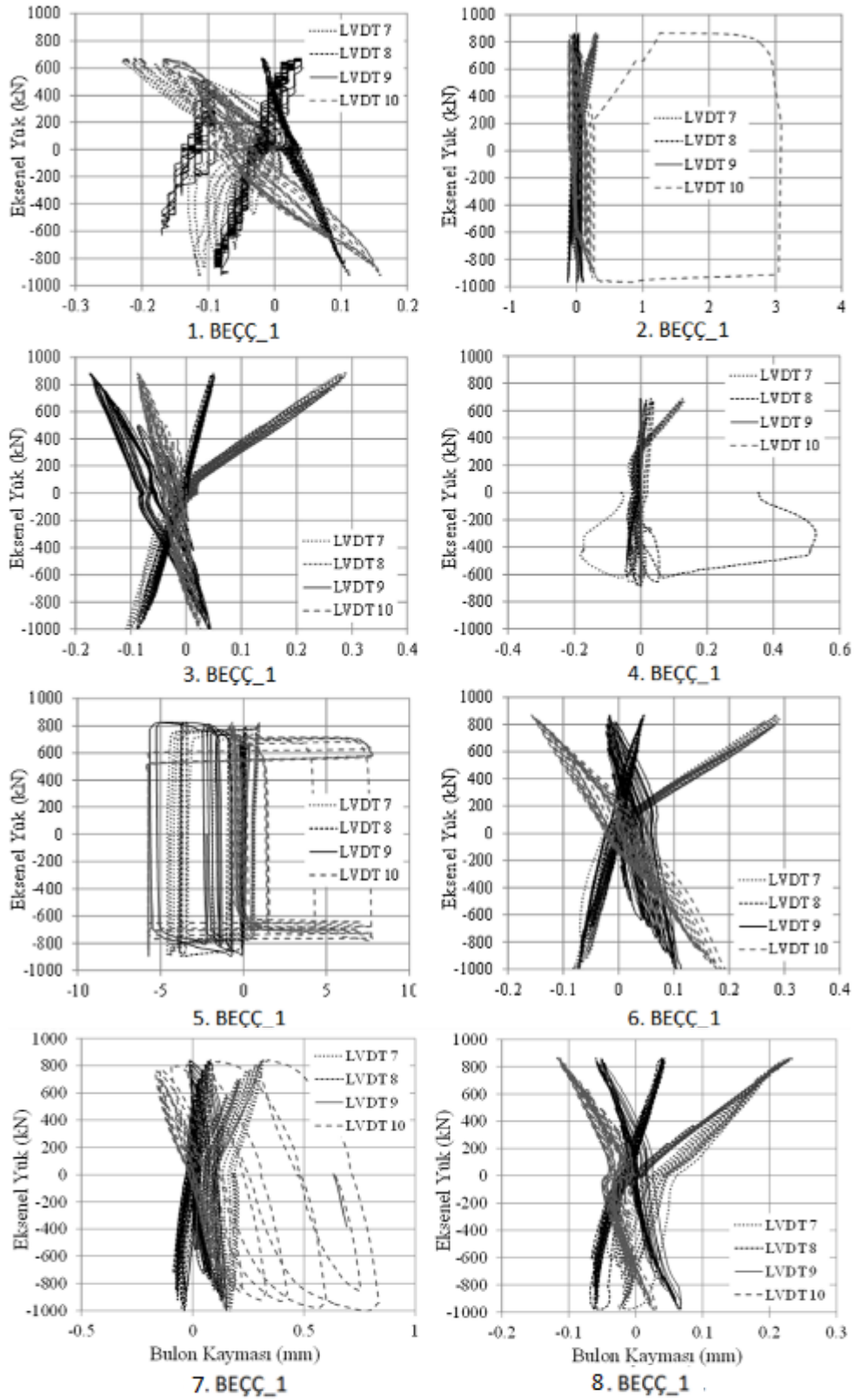
Şekil 4.10. Eleman 8. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.11. Eleman 9. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları

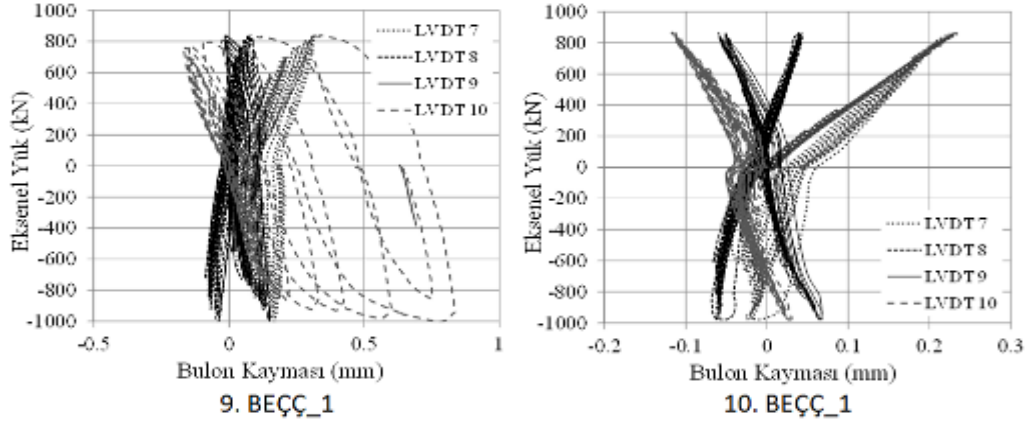


Şekil 4.12. Eleman 10. BEÇÇ\_1 deney sonrası çekilmiş fotoğrafları

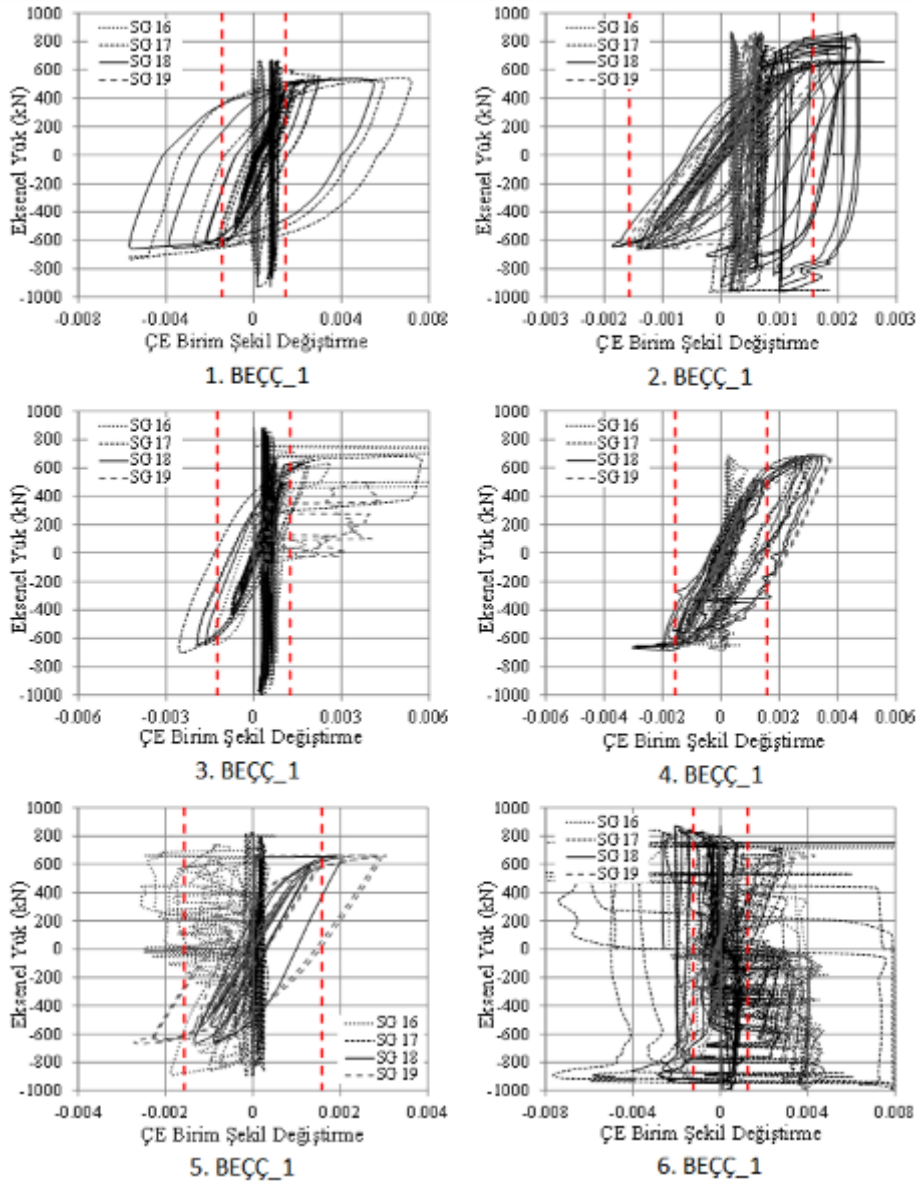


**Şekil 4.13.** Eleman 1-10. BEÇÇ\_1 için bulonlarda meydana gelen kayma miktarı (Devam ediyor)

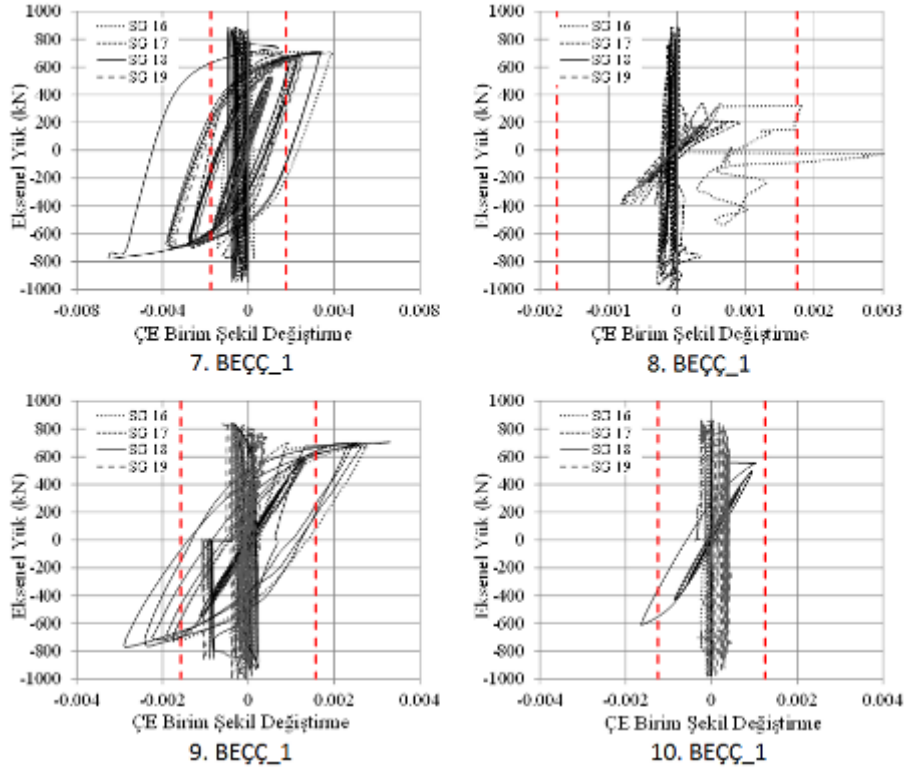




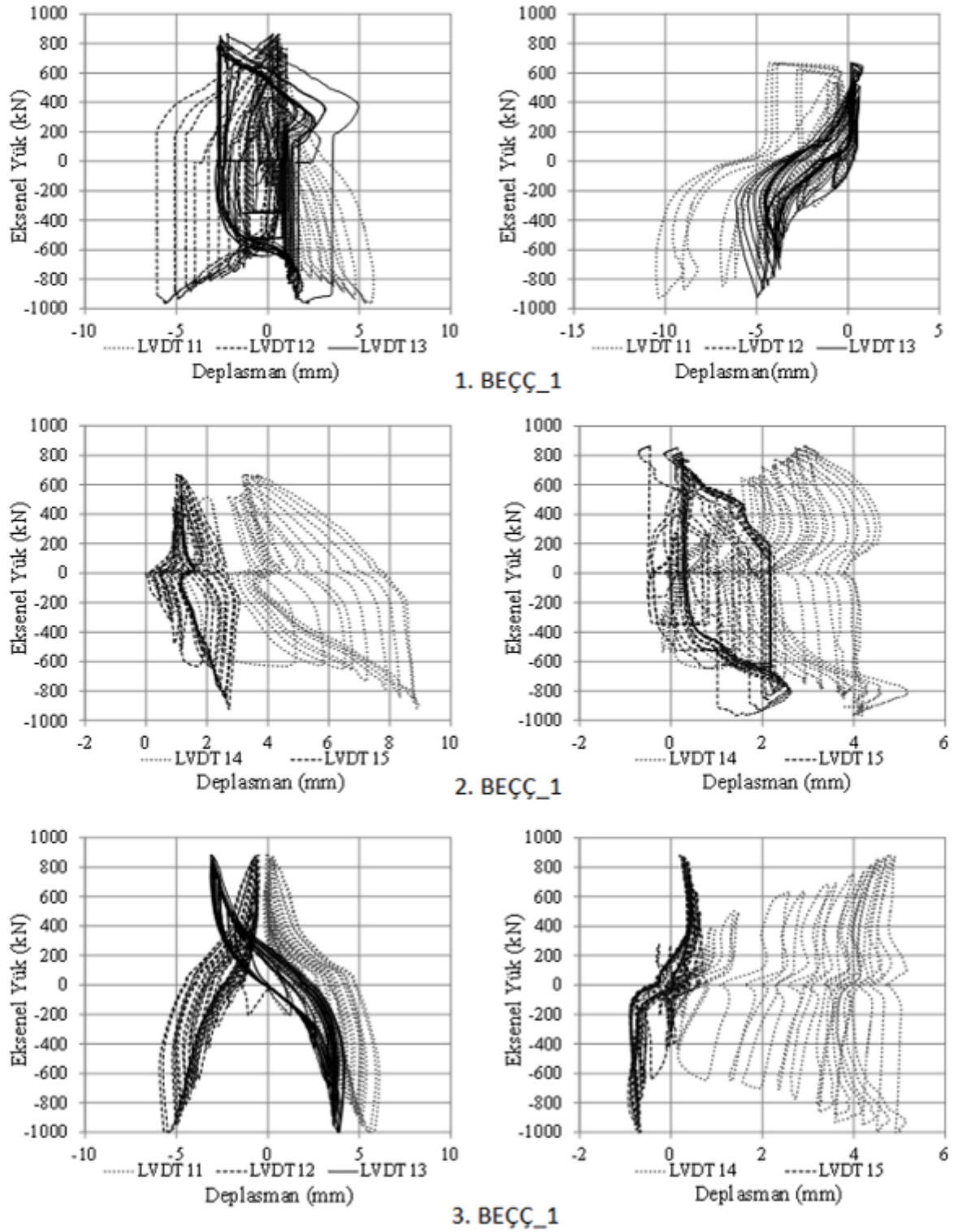
Şekil 4.13. Eleman 1-10. BEÇÇ\_1 için bulonlarda meydana gelen kayma miktarı



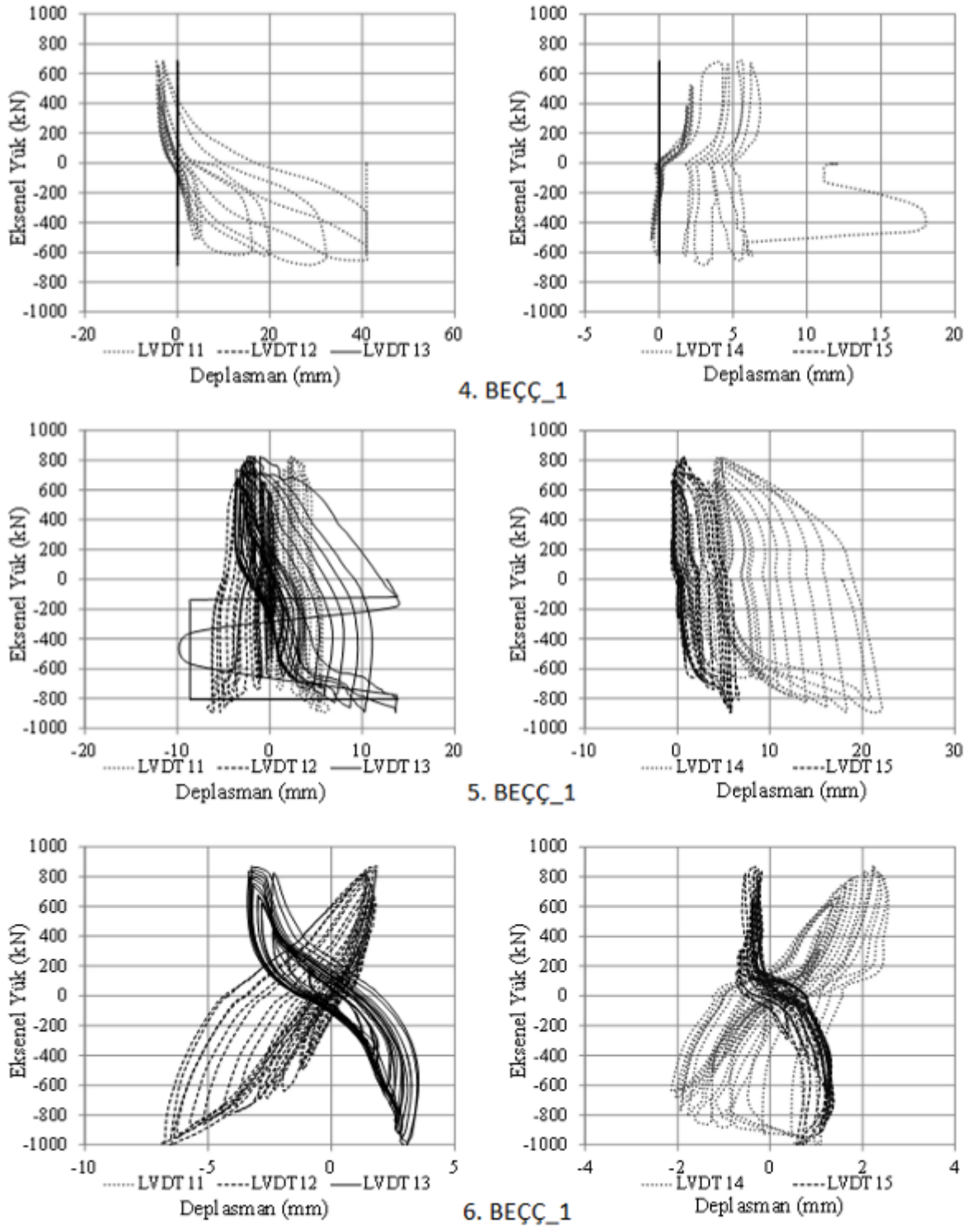
Şekil 4.14. Eleman 1-10. BEÇÇ\_1 için ÇE birim şekil değişirme (Devam ediyor)



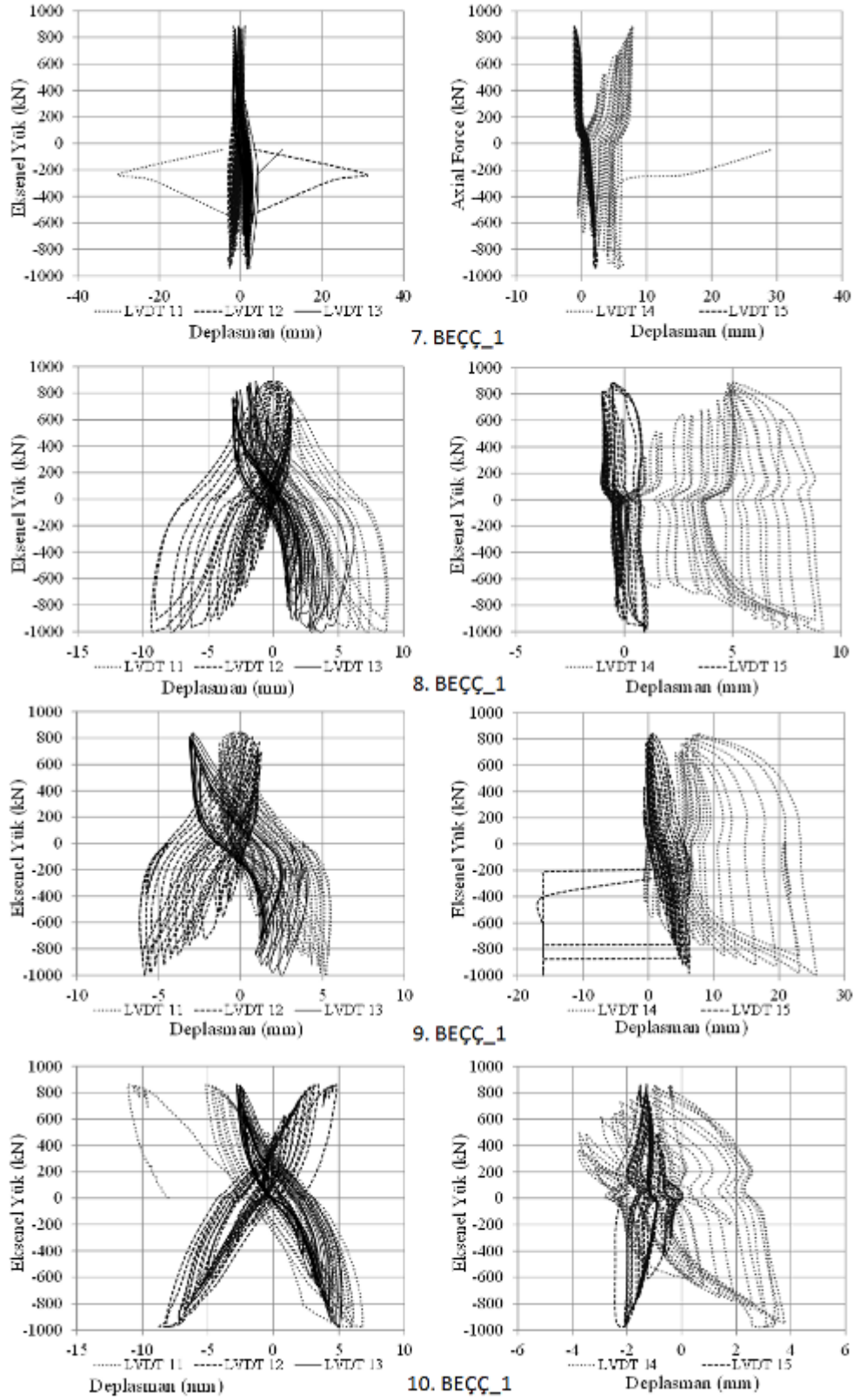
Şekil 4.14. Eleman 1-10. BEÇÇ\_1 için ÇE birim şekil değiştirme



Şekil 4.15. Eleman 1-10. BEÇÇ\_1 için yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar (Devam Ediyor)



Şekil 4.15. Eleman 1-10. BEÇÇ\_1 için yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar (Devam Ediyor)



Şekil 4.15. Eleman 1-10. BEÇÇ\_1 için yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar

#### 4.1.2. İkinci grup BEÇÇ elemanlarına ait deney sonuçları ve gözlemler

İkinci grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük kapasiteleri Çizelge 4.2’de görülmektedir. BEÇÇ’lerin histeretik davranışları Şekil 4.16’da verilmiştir. Test elemanlarının deneyden sonraki fotoğrafları Şekil 4.17-4.19’da verilmiştir. Deney esnasında öngerme yöntemiyle sıkılan 10.9 M24 bulonlarda meydana gelen kayma değerleri Şekil 4.20’de gösterilmektedir. ÇE’nin plastik kısmının orta noktasındaki birim uzama değerleri (bu noktalara yapıştırılan birim uzama ölçerler sayesinde alınan ölçümler) Şekil 4.21’de verilmiştir. BEM’i oluşturan sistemlerin her iki ucunda meydana gelen deplasmanlar ise Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Eleman bazında değerlendirilmeler ise aşağıda yapılmıştır.

**Çizelge 4.2.** İkinci grup BEÇÇ elemanlarına ait eksenel yük değerleri

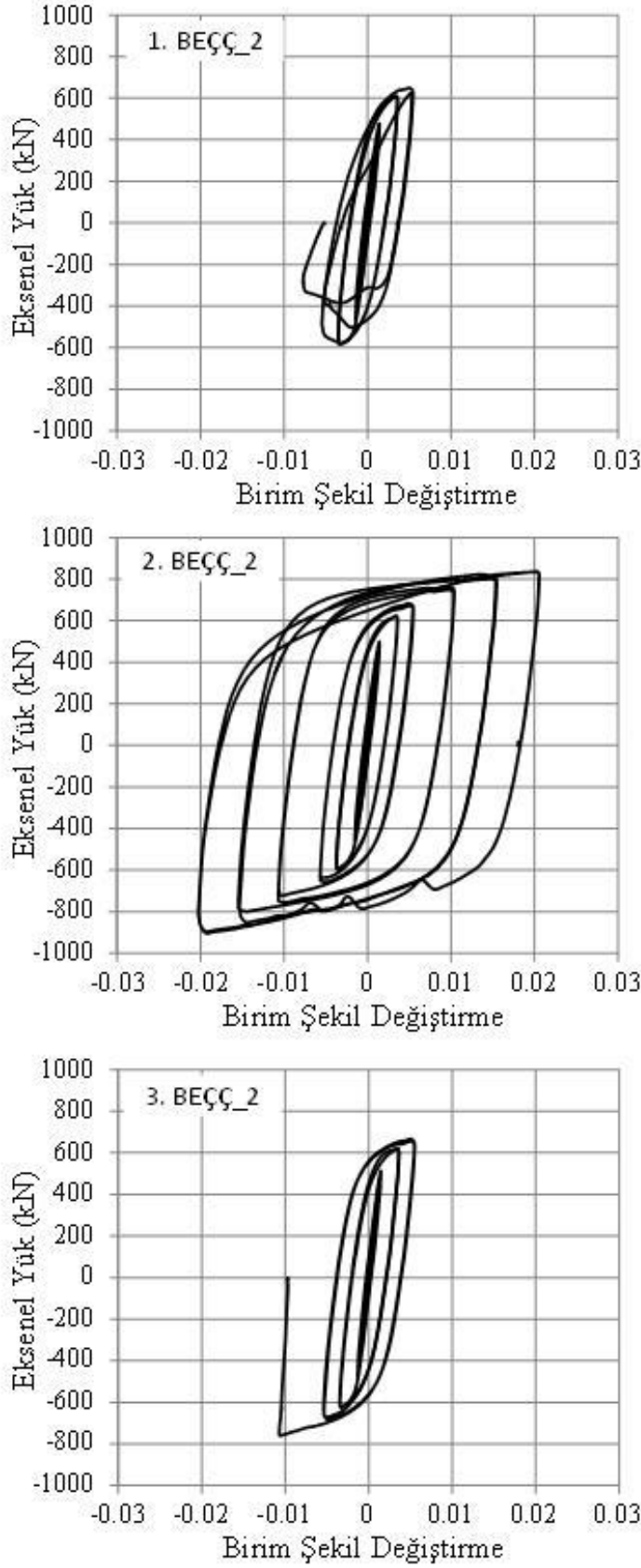
2. Grup BEÇÇ	Çekme (kN)	Basınç (kN)	Pçekme / Pbasınç
1.BEÇÇ_2	650	-584	0.90
2.BEÇÇ_2	837	-901	1.08
3.BEÇÇ_2	668	-759	1.14

**1. BEÇÇ\_2:** Şekil 4.16’da görüldüğü gibi 1. BEÇÇ\_2 elemanı (çekirdek elemanın plastik bölgesinde) %0.005 birim şekil değiştirme değerinden sonra BEÇÇ’de meydana gelen lokal hasarlardan dolayı test edilememiştir. 1. BEÇÇ\_2 elemanı Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi sırasıyla 650 ve -584 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Bu BEÇÇ tipinde ÇE elemanda plastikleşme meydana gelmiştir ancak BEM’den dolayı ileri deformasyonlara kadar sistem stabil kalamamıştır. 1. BEÇÇ\_2 elemanında Şekil 4.17’de görüldüğü gibi BEM’i oluşturan 100x100x2.6 mm’lik kutu profillerde (KP 100x2.6) lokal ezilmeler meydana gelmiştir. Söz konusu hasarın meydana gelmesinin sebebi ise KP 100x2.6 eleman et kalınlığının yeterli olmasıdır. Deneyin bu kısmına kadar çerçeve bağlantı elemanlarında herhangi bir hasar tespit edilememiştir. Yüksek mukavemetli bulonların öngerme sistemi ile bağlantısının yeterli olup olmadığını kontrol etmek için deney esnasında yapılan ölçümler Şekil 4.20’de gösterilmektedir. Şekil 4.21’de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin ÇE boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 4.22’de BEM’in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Deney sınırlı seviyede yapılabildiğinden BEM’in uç bölgelerinde düzlem dışı hareket 5 mm seviyelerinde kalmıştır.

**2. BEÇÇ\_2:** Şekil 4.16’da ve Çizelge 4.2’de görüldüğü 2. BEÇÇ\_2 elemanı sırasıyla 837 ve -901 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.08 civarında elde edilmiştir. 2. BEÇÇ\_2 modelinde % 2.0 birim şekil değiştirme değerinden sonra çerçeve bağ elemanlarında kaynak kopması meydana gelmiştir. Bu durumda BEM etkisini kaybetmiştir ve % 2.0 birim şekil değiştirmeden sonra deney sonlandırılmıştır. BEM’i oluşturan KP 100x2.6’lık profillerin arasına izolasyon için kullanılan miktarın fazla olmasından dolayı ÇE yüksek modda burkulmaya maruz kalmıştır (Şekil 4.18). Dolayısı ile BEM’i çok parçalı basınç çubuğu olan BEÇÇ’lerde izolasyon malzemesinin kalınlığının biraz daha az olması gerektiği ortaya çıkmıştır. Basınç yüklemesi altında kapasite düşüşleri yüksek mod burkulmasının bir göstergesi olarak görülebilir. Ayrıca çekme bölgesine geçildiğinde ise rijitlik kaybı

yine yüksek modda burkulunan ÇE'nin ilk olarak tam düz hale gelmesi ve sonra eksenel olarak tam yük almaya başlamasından kaynaklanmıştır. 1. BEÇÇ\_1'e göre KP 100x2.6'lık profillerin içi beton ile doldurulduğundan 2. BEÇÇ\_2'de BEM'de lokal ezilme/deformasyon meydana gelmemiştir. Yüksek mukavemetli bulonların kayma miktarı Şekil 4.20'de gösterilmektedir. Bulon kaymasının sadece bir bağlantıda ciddi seviyede meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.21'de gösterilen ve çekirdek elemanın orta noktasından elde edilen birim uzama ölçer değerleri plastikleşmenin ÇE boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 4.22 BEM'in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Bu deplasmanlar incelendiğinde içi beton doldurulmuş KP 100x2.6'lık profillerden elde edilen ve çerçeve bağ elemanları ile oluşturulan BEM sisteminin yaklaşık 10 mm'lik düzlem dışı harekette dahi global stabiliteyi sağladığı görülmektedir.

**3. BEÇÇ\_2:** Bu elemanın Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi sırasıyla 668 ve -759 kN çekme ve basınç kapasitesine ulaşmıştır. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.14 civarında elde edilmiştir. 3. BEÇÇ\_2 elemanında % 1.0 birim şekil değiştirme değerinde global burkulmadan dolayı deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.19). Çapraz bağ elemanları ile elde edilen çok parçalı basınç çubuğundan oluşan BEM mekanizması global olarak deformasyona uğraması bu yapım tekniğinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. %2.0'lik bir birim şekil değiştirme değerine kadar histeretik davranışın stabil olmaması tasarımın henüz yeterli seviyede olmadığını göstermektedir. Şekil 4.22'de BEM'in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Buradan da görüldüğü gibi BEM'in uç bölgelerinde düzlem dışı hareket global stabilitenin kaybolduğunu göstermektedir.



Şekil 4.16. Eleman 1.-3. BEÇÇ\_2 için eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği





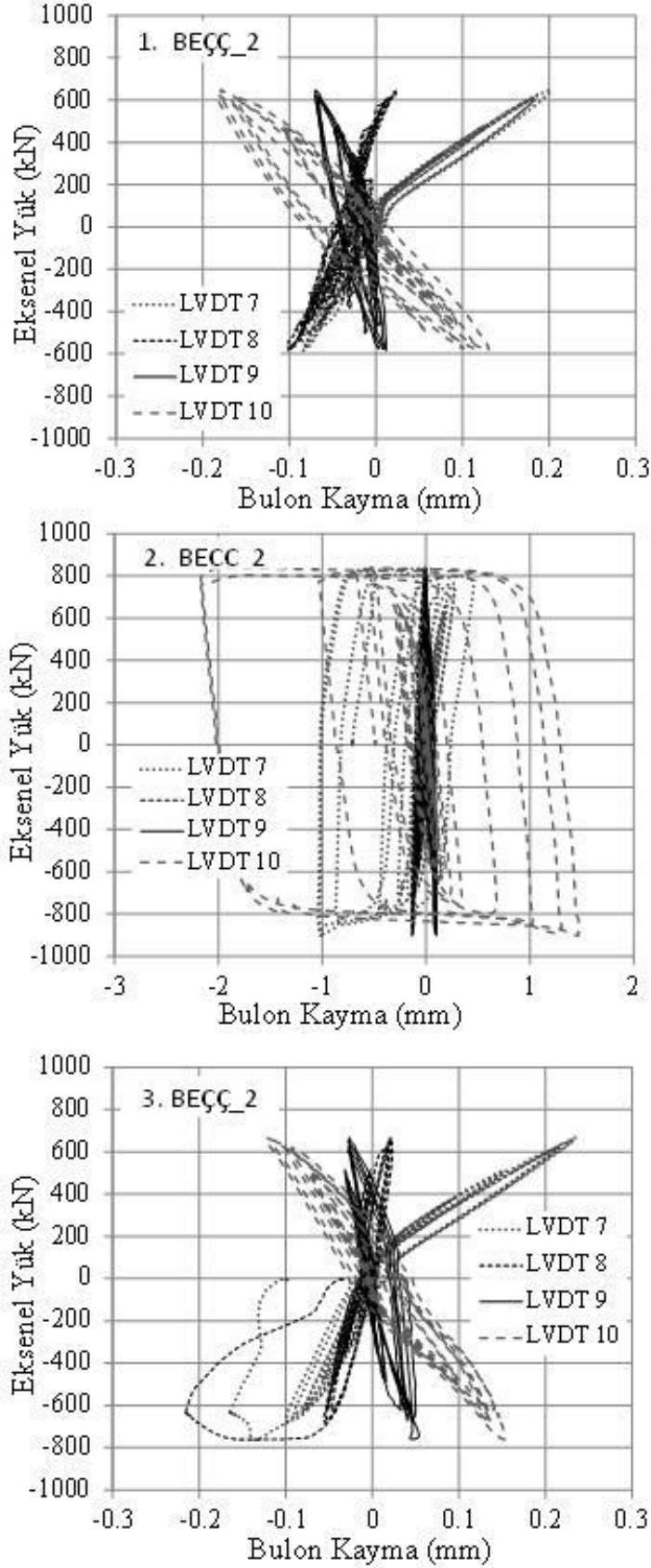
Şekil 4.17. Eleman 1. BEÇÇ\_2 için deney sonrası çekilmiş fotoğraflar



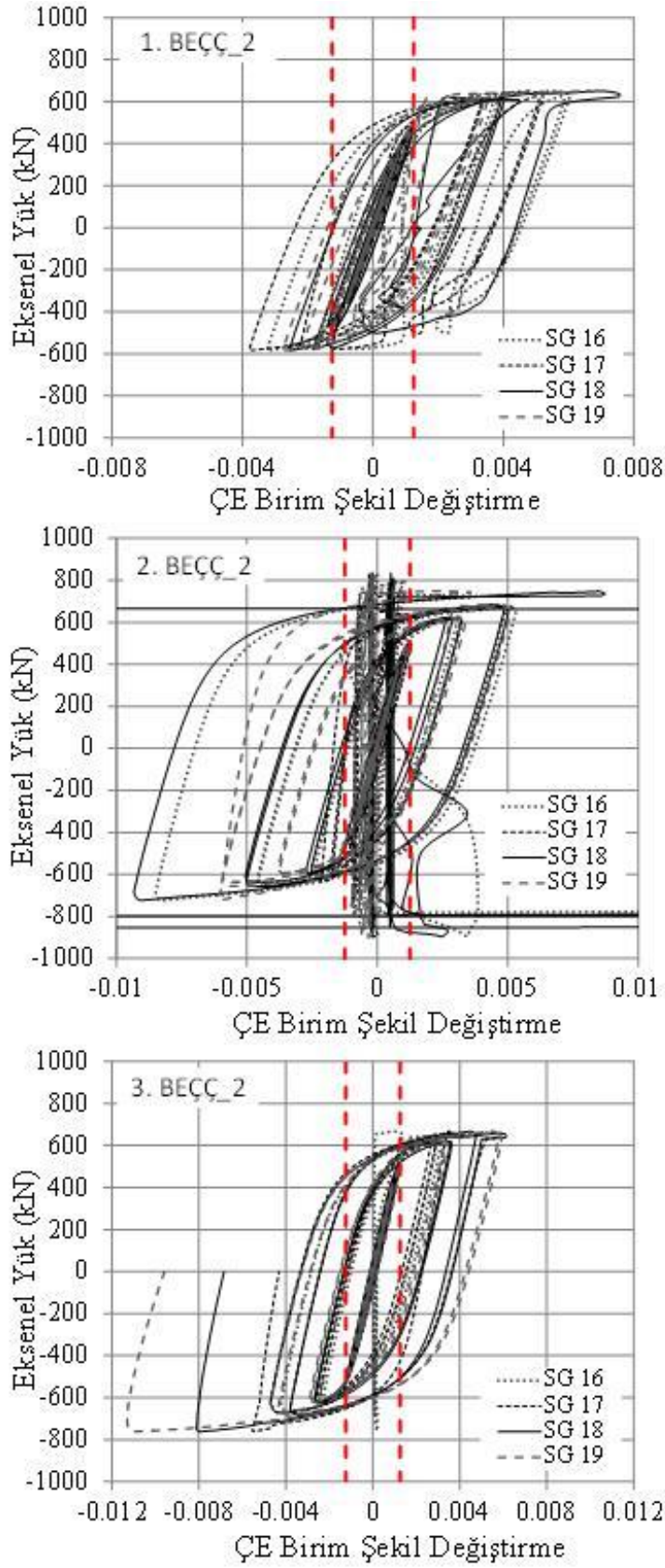
Şekil 4.18. Eleman 2. BEÇÇ\_2 için deney sonrası çekilmiş fotoğraflar



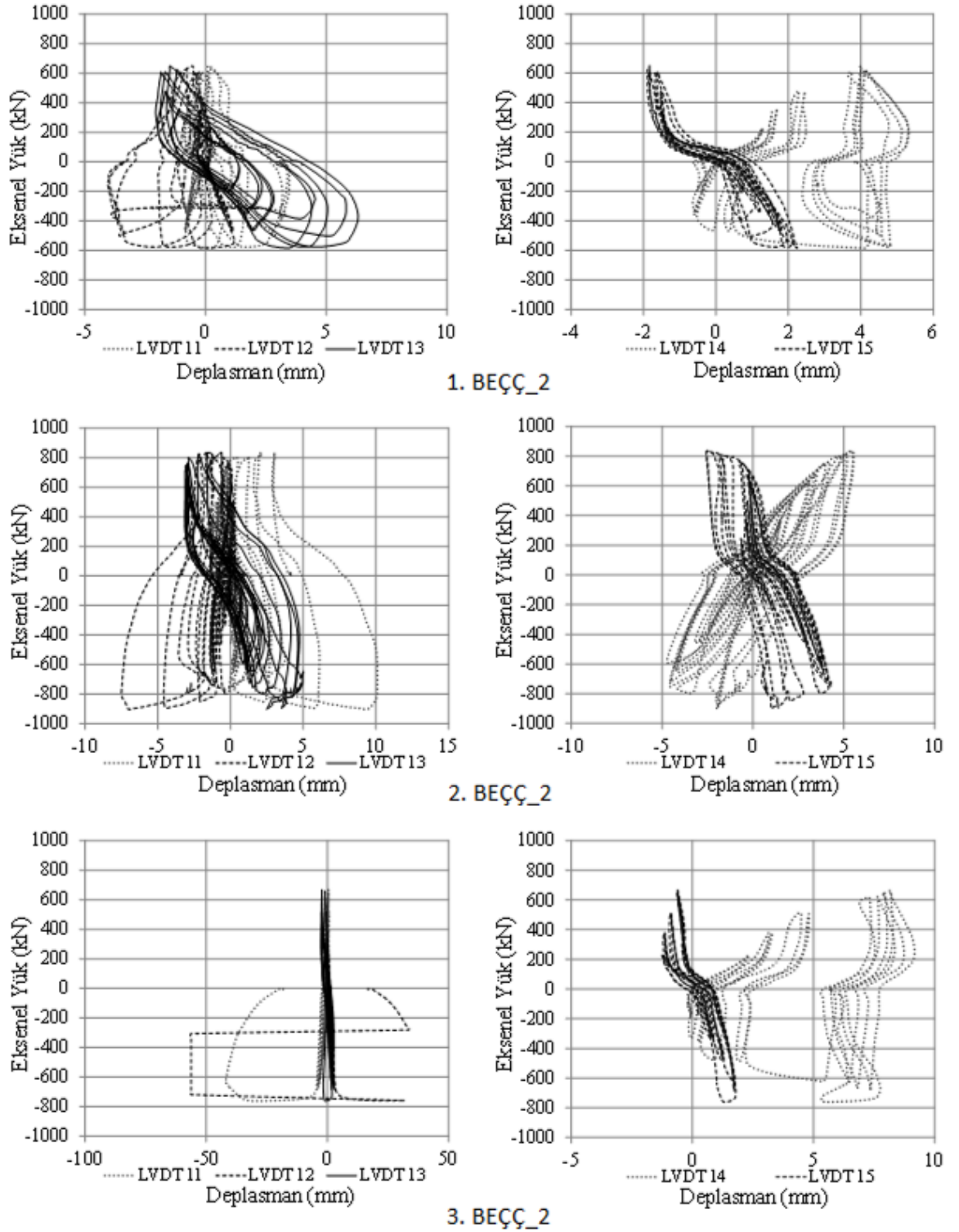
Şekil 4.19. Eleman 3. BEÇÇ\_2 için deney sonrası çekilmiş fotoğraflar



Şekil 4.20. Eleman 1-3. BEÇÇ\_2 için bulonlarda meydana gelen kayma miktarı



Şekil 4.21. Eleman 1-3. BEÇÇ\_2 için ÇE birim şekil değişirme



Şekil 4.22. Eleman 1-3.BEÇÇ\_2 için yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar

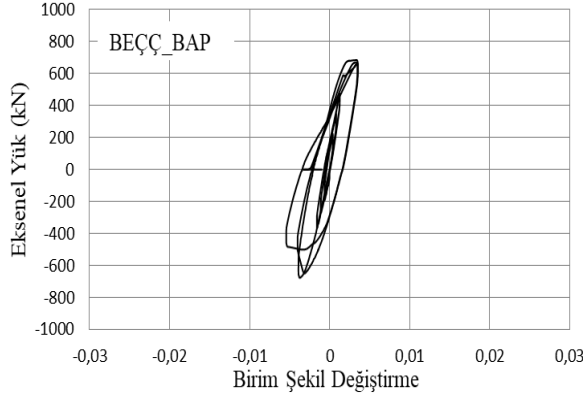
#### 4.2. BAP Projesi Kapsamında Yapılan Testler

BAP projesi kapsamında test edilen BEÇÇ elemanına ait eksenel yük kapasiteleri Çizelge 4.3’de görülmektedir. BEÇÇ’lerin histeretik davranışları BEÇÇ elemanlarına uygulanan eksenel yüke karşılık ÇE’nin plastik kısmı için ölçülen deplasmanların (Şekil 3.31’de 2., 3., 4., 5. ve 6. LVDT’lerden okunan değerler) birim uzama değerlerine çevrilmiş hali ile yük hücresinden elde edilen verilerin gösterimi Şekil 4.23’de verilmiştir. Test elemanlarının deneyden sonraki fotoğrafları Şekil 4.24’de verilmiştir. Deney esnasında öngerme yöntemiyle sıkılan 10.9 M24 bulonlarda meydana gelen kayma değerleri Şekil 4.25’de gösterilmektedir. BEM’i oluşturan sistemlerin her iki ucunda meydana gelen deplasmanlar ise Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Eleman bazında değerlendirmeler ise aşağıda yapılmıştır.

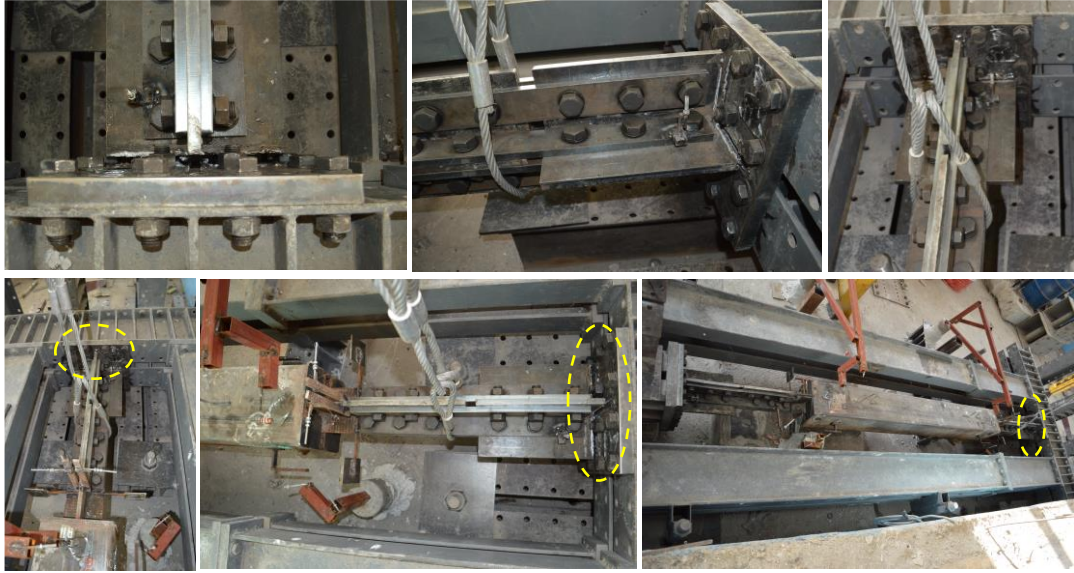
Bu elemana ait eksenel yük ÇE birim uzama grafiği Şekil 4.23’de verilmiştir. Şekil 4.23’te görüldüğü gibi bu BEÇÇ modelinde kaynakta deformasyon meydana gelene kadar eleman çekme kapasitesi basınç kapasitesinden fazla çıkmıştır. Bu eleman için maksimum çekme ve basınç kapasitesi 685 kN ve 677 kN’dur. Çekme ve basınç kapasitesi arasındaki oran ise 1.01 civarında elde edilmiştir. BEÇÇ elemanında 0,003 birim şekil değiştirme değerinden sonra elemanı deney düzeneğine bağlayan mesnette kaynak kopması meydana gelmiştir. Bu durumda BEÇÇ uç noktasından sistemden ayrılmış ve 0,003 birim şekil değiştirmeden sonra deney sonlandırılmıştır. BEÇÇ için yapılan test esnasında yükleme protokolünün 16. değerinden 17. değerine geçerken BEÇÇ’nin deney düzeneğine bağlanan ucundaki mesnet plakasında ayrılan plakalar Şekil.4.24’te işaretlenerek ayrıntılı biçimde gösterilmiştir. BEÇÇ’nin test sistemiyle bağlantısı koptuğu için Şekil 4.23’de de görüldüğü gibi yük değeri azalmış ve deney sonlandırılmıştır. Ancak BEÇÇ’nin diğer ucunda herhangi bir hasar görülmemiştir. Deneyin sonlandırılmasına kadar olan kısımda ön germe tekniği başarılı olmuştur. Ancak meydana gelen bu deformasyon (mesnet plakalarının birbirinden ayrılması) kaynakta kopmanın meydana geldiği en uç 10.9 M24 bulonlarına dolayısıyla ek istem uygulanmış ve kayma miktarı kopma sebebiyle pistonla bağlanan diğer mesnetteki bulonlara göre çok daha fazla olmuştur (Şekil 4.25 – LVDT 10). Şekil 4.26’da BEM’in düzlem içi ve dışı hareketlerini göstermektedir. Buradan da görüldüğü gibi BEM’in uç bölgelerinde düzlem dışı hareket düşeyde global stabilitenin kaybolduğunu yatayda ise global stabiliteyi sağladığını göstermektedir.

**Çizelge 4.3.** BEÇÇ\_BAP elemanına ait eksenel yük değerleri

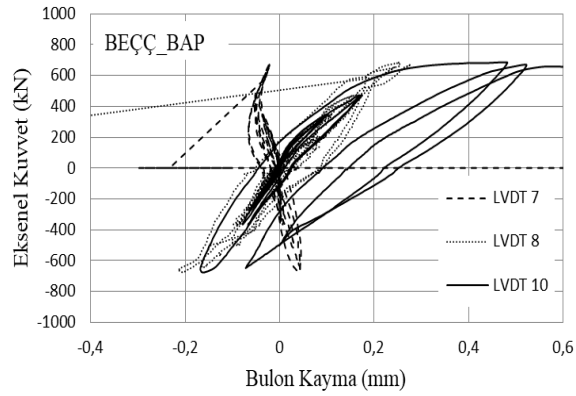
BAP	Çekme (kN)	Basınç (kN)	Pçekme / Pbasınç
BEÇÇ	685	-677	1.01



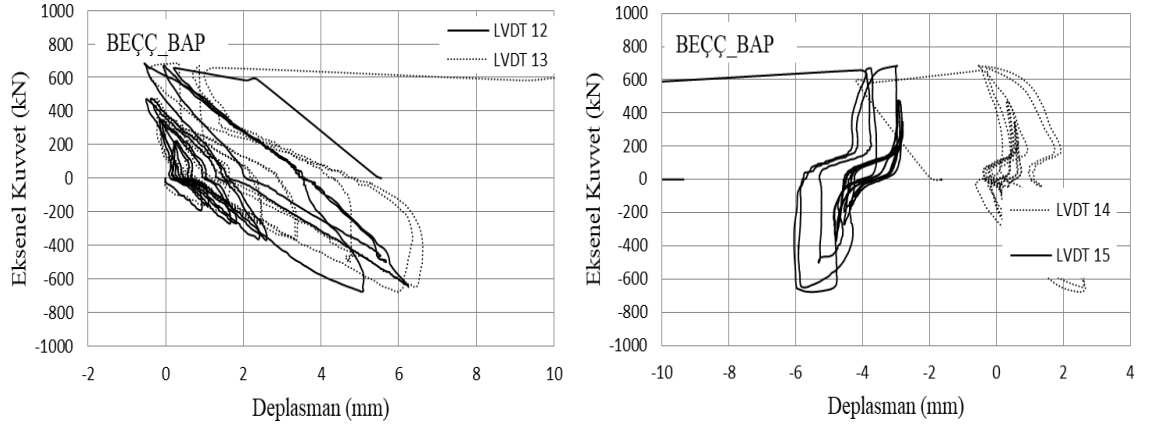
Şekil 4.23 BEÇÇ\_BAP elemanına ait eksenel yük-birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.24. BEÇÇ\_BAP deney sonrası çekilmiş fotoğrafları



Şekil 4.25. BEÇÇ\_BAP elemanındaki bulonlarda meydana gelen kayma miktarı



Şekil 4.26. BEÇÇ\_BAP elemanına ait yatay ve düşey düzlem dışı deplasmanlar



## 5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında TÜBİTAK 112M820 projesinde yeni nesil çelik çaprazlar olarak nitelendirilen burkulması engellenmiş çelik çaprazların (BEÇÇ'lerin) eleman bazında testleri gerçekleştirilmiştir. Yine bu tez kapsamında BAP projesinde lazer kesime ihtiyaç duyulmadan lama hadde çeliklerden üretilen BEÇÇ'nin eleman bazında testi gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında yapılan tüm deneysel çalışmalar Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi toplam 14 adet eleman bazında BEÇÇ test edilmiştir.

**Çizelge 5.1** Test elemanları

Test elemanları	Özelliği
1.BEÇÇ_1	BEM: Kutu profil+Betón
2.BEÇÇ_1	BEM: Kutu profil+Betón
3.BEÇÇ_1	BEM: Kutu profil+Betón
4.BEÇÇ_1	BEM: Kutu profil+Betón
5.BEÇÇ_1	BEM: Kutu profil+Betón
6.BEÇÇ_1	BEM: Kutu profil+Betón
7.BEÇÇ_1	BEM: Sargısız Beton
8.BEÇÇ_1	BEM: LP Sargılı Beton
9.BEÇÇ_1	BEM: Etriye Sargılı Beton
10.BEÇÇ_1	BEM: Etriye Sargılı Beton
1.BEÇÇ_2	BEM: Çerçeve bağlantılı ÇPBC
2.BEÇÇ_2	BEM: Çerçeve bağlantılı ÇPBC
3.BEÇÇ_2	BEM: Çapraz bağlantılı ÇPBC
BAP_BEÇÇ	BEM: Kutu profil+Betón, ÇE: Hazır hadde lama profil

BEÇÇ elemanları TÜBİTAK 112M820 projesi kapsamında 2 grupta incelenmiştir. İlk gruptaki elemanlardan Çizelge 5.1'de de görülen 2., 3., 5., 6., 9. ve 10. BEÇÇ\_1 elemanları oldukça kararlı histeretik davranışa sahiptirler. Bu elemanların genel özellikleri BEM sisteminin uç bölgelerde gerek ek kutu profil ve gerekse plakalar ile stabilitelelerinin artırılmasıdır. Ayrıca bu elemanlarda ÇE %2.0 birim şekil değiştirme değerine kadar sorunsuz olarak test edilebilmiştir. Herhangi bir yapının BEÇÇ'ler ile güçlendirilmesi durumunda yeterli performansa sahip olması için kullanılan BEÇÇ'lerin ÇE'leri yaklaşık %1.5-2.5 birim şekil değiştirme değerine kadar yüklenmektedir. Dolayısı ile bu proje kapsamında test edilen BEÇÇ'ler ise %2.0'da daha ileri seviyelere kadar yüklenmiştir. 2.grupta bulunan BEÇÇ elemanlarının tasarımda ÇE ve BEM arasındaki izolasyon miktarının tekrar gözden geçirilmesi gereklidir. Yapılan eleman bazındaki testlerde ÇE-BEM arası boşluğun daha da azaltılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca BEM'de meydana gelen lokal deformasyonlar çelik profil et kalınlığının artırılması gerektiği sonucunu vermektedir. Dolayısı ile bu durumda maliyet bakımından BEM'in artmasına sebep olacaktır. Bu tip BEÇÇ'ler için ek çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Maliyet açısından bakıldığında 1.Grup BEÇÇ'lerin bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. 1. Grup 1-2-3-4-5-6.BEÇÇ'lerde dış kutu pofil, ek iç kutu

profil, ek plaka, işçilik ve beton maliyeti belirlemektedir. Bunlardan en yüksek maliyetli olanı dış kutu profil ile işçilik olarak görülebilir. 1. Gruptaki 7-8-9-10.BEÇÇ'ler ise kalıp, enine ve boyuna kullanılan gijon, donatı, tamir harcı, lifli polimer ve işçilik maliyet kalemlerinin en önemlileridir. Ancak kalıpların tekrarlı kullanılması maliyeti düşürücü niteliktedir. Bağlantıda kullanılan slot detayı BEÇÇ'lerin montajında büyük kolaylık sağlamaktadır. Özellikle BEÇÇ ile güçlendirilen bir çerçeveye monte edilmesi için üretilen BEÇÇ'lerin çerçeveye montajı slot deliklerden dolayı kolay şekilde gerçekleşebilmektedir. Bu durumda da yüksek mukavemetli bulonlar aradığı gibi olacak şekilde bağlantı detayında kullanılabilir. Yüksek mukavemetli bulonlar ise maliyeti kısmen yüksek birleşim araçları olup teşkil edilmesi de ek ekipmana ihtiyaç duymaktadır.

Yine bu tez kapsamında BAP projesinde lazer kesime ihtiyaç duyulmadan lama hadde çeliklerden üretilen BEÇÇ'nin eleman bazında testi gerçekleştirilmiştir. Bu BEÇÇ deneyinde kaynakta deformasyon meydana gelene kadar eleman stabil bir histeretik davranış göstermiştir. Deneyin sonlandırılmasına kadar olan kısımda yeterli performans değerini sağladığından yapılabilecek ek çalışmalarla yeterli potansiyele ulaşacağı öngörülmektedir.

Maliyet açısından bakıldığında ÇE olarak lazer kesimli levha yerine hazır hadde lama profil kullanılarak pahalı bir kesim olan lazer kesim işlemine gerek kalmadan BEÇÇ üretiminin elde edilmiş olması BEÇÇ'ler için oldukça ekonomik çözüm önerisi getirmiştir. Hazır hadde lama profillerin istenilen uzunluklarda her ilde kolaylıkla bulunabilmesi ve piyasada 3m'den fazla lazer tezgahlarının çok zor bulunması durumu da göz önüne alınırsa BEÇÇ'lerin (boy uzunluğunda) tasarımlarının değişmesine ve gelişmesine katkıda bulunacağı görülmektedir.

BEÇÇ'lerin tasarımı tez kapsamında genel olarak ÇE ve BEM olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Buna göre ÇE yumuşak ve sünek bir çelikten elde edilmelidir. ÇE'de bağlantı için uç bölgelerde en kesit artımına gidilmelidir. ÇE'nin plastik bölge dışında kalan kısımları tasarıma göre uygun bağlantıyı sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. ÇE'nin plastik kısmında en kesit sabit olmalı ve herhangi bir en kesit daralması veya genişlemesi olmamalıdır. Ancak BEM'in her iki BEÇÇ ucuna göre görelî hareketinin engellenmesi için ise ÇE'nin orta açıklığında en kesit artışı yapılmalıdır. BEM'in kutu profil+beton olduğu BEÇÇ'lerde betonun kutu profil içinde kaymasını engellemek için küçük bir lama, kutu profilin içinde bir bölgeye kaynatılmalıdır. Bu tip BEÇÇ'lerde uç bölgeler gerek kutu profil ve gerekse ek plakalar ile uç stabiliteleri artırılmalıdır. BEM'in sargılı betondan meydana gelmesi durumunda BEM'i oluşturan betona yeterli sargı sağlanmalıdır. Bu sargı etriyeler veya lifli polimer ile sağlanabilir. Üretilen BEÇÇ'lerin aralarından rastgele seçilen BEÇÇ'ler eleman bazında test edilmelidir. Bu test detayları AISC 2005'de mevcuttur.

## 6. KAYNAKLAR

- Takuya, U., Haruyuki, K., Toshiaki, S., Daiki, S., Kazuaki, M. and Yukio, M. 2017. Damage Evaluation Considering Input Order Of Strain Amplitude For Buckling Restrained Braces With Cross-Shaped Core And Welded Box-Section Member. *Journal Of Structural and Construction Engineering*. Volume 82, Pages 11-738.
- Mingming, J., Xiaohui, Y., Dagang, L. and Binbin, L. 2017. Experimental Research Of Assembled Buckling-Restrained Braces Wrapped With Carbon Or Basalt Fiber. *Journal of Constructional Steel Research*. Volume 131, Pages 144-161.
- Xiaone, W. and Michel, B. 2017. Analytical Investigation Of Buckling Restrained Braces Applications In Bidirectional Ductile And Diaphragms For Seismic Performance Of Slab-On-Girder Bridge. *Engineering Structures*. Volume 141, Pages 634-650.
- Yan, L.G., Peng, Z, Mengzheng, W., YongLin, P. and Bradford, M.A. 2017. Numerical Studies Of Cyclic Behavior And Design Suggestions On Triple-Truss-Confined Buckling-Restrained Braces. *Engineering Structures*. Volume 146, Pages 1-17.
- Qu, Z., Xie, J., Wang, T. and Kishiki, S. 2017. Cyclic Loading Test Of Double K-Braced Reinforced Concrete Frame Subassemblies With Buckling Restrained Braces. *Engineering Structures*. Volume 139, Pages 1-14.
- Zhu, B., Yan, L.G., Peng, Z, Bradford, M.A. and YongLin, P. 2017. Numerical And Experimental Studies Of Corrugated-Web-Connected Buckling-Restrained Braces. *Engineering Structures*. Volume 134, Pages 107-124.
- Xie, Q., Zhou, Z., Huang, J. and Meng, S. 2016. Influence Of Tube Length Tolerance On Seismic Responses Of Multi-Storey Buildings With Dual-Tube Self-Centering Buckling-Restrained Braces. *Engineering Structures*. Volume 116, Pages 26-39.
- Guerrero, H., Ji, T., Gilmore, A. and Escobar, J. 2016. A Method For Preliminary Seismic Design And Assessment Of Low-Rise Structures Protected With Buckling-Restrained Braces. *Engineering Structures*. Volume 123, Pages 141-154.
- Ozcelik, R. 2016. Buckling restrained braces. *Journal of Engineering Science*. University of Pamukkale. 22(3): 160-170.
- Corte, G.D., Daniello, M. and Landolfo, R. 2015. Field Testing of All-Steel Buckling-Restrained Braces Applied to a Damaged Reinforced Concrete Building. *Journal of Structural Engineering*. Volume 141, Issue 1.
- Zhou, Z., Xie, Q., Lei, X.C. and He, X.T. 2015. Experimental Investigation of the Hysteretic Performance of Dual-Tube Self-Centering Buckling-Restrained Braces with Composite Tendons. *Journal of Composites for Construction*. Volume 19 Issue 6.
- Lin, P.C., Wu, A.C., Tsai, K., Hwang, S.J., Lin, R.Y. and Bhayusukma, M.B. 2015. Retrofit of reinforced concrete frames with buckling-restrained braces stoph Mahrenholtz. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. Volume 44, Issue 1. Pages 59–78.

- Anonymous: The Earthquake Engineering Online Archive Nisee library online. <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Image/CR0310> [Son erişim tarihi: 02.03.2015].
- Tsai, K., Wu, A.C., Wei, C.Y., Lin, P.C., Chuang, M.C. and Yu, Y.J. 2014. Welded end-slot connection and debonding layers for buckling-restrained braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. Volume 43, Issue 12, Pages 1785–1807.
- Zhou, Z., He, X.T., Wu, J., Wang, C.L. and Meng, S.P. 2014. Development of a novel self-centering buckling-restrained brace with BFRP composite tendons. *Steel and Composite Structures*. Volume 16, Issue 5, pp.491-506.
- Ozcelik, R., Binici, B. and Kurc, O. 2013. Pseudo dynamic test of a deficient reinforced concrete frame upgraded with internal steel frames. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 42:763–778.
- Ozcelik, R., Binici, B. and Kurc, O. 2012. Pseudo Dynamic Testing of an RC Frame Retrofitted with Chevron Braces, *Journal of Earthquake Engineering*. 16:4, 515-539.
- Eryasar, M.E. and Topkaya, C. 2010. An Experimental Study on Steel-encased Buckling-restrained Brace Hysteretic Dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 39, No. 5, pp. 561-581.
- Mazzoni, O.S., McKenna, H., Scott, M.H. and Fenves, G.L. 2010. *OpenSees Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Young, K.J., Kim, M.H., Kim, J. And Kim., S.D. 2009. Component Tests of Buckling-Restrained Braces with Unconstrained Length. *Engineering Structures*, 31, 507-516.
- Tsai, K.C. and Hsiao, P.C. 2008. Pseudo-Dynamic Test of a Full-Scale CFT/BRB Frame—Part II: Seismic Performance of Buckling-Restrained Braces and Connections”. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 37, 1099–1115.
- Tsai, K.C., Hsiao, P.C., Wang, K.J., Weng, Y.T., Lin, M.L., Lin, K.C., Chen, C.H., Lai, J.W. and Lin, S.L. 2008. Pseudo-Dynamic Tests of a Full-Scale CFT/BRB Frame Part I: Specimen Design Experiment and Analysis. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 37, 1081–1098.
- Yooprasertchai, E. and Warnitchai, P. 2008. Seismic retrofitting of low-rise nonductile reinforced concrete building by buckling-restrained braces. *Proceedings, Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October, Paper No. 05-03-0213*.
- Fahnestock, L.A., Ricles, J.M. and Sause, R. 2007. Experimental Evaluation of a Large-Scale Buckling-Restrained Braced Frame. *Journal of Structural Engineering*, 133, 1205-1214.
- American Society of Civil Engineers 2007. *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. Report No.ASCE/SEI 41-06, Reston, Virginia, United States.

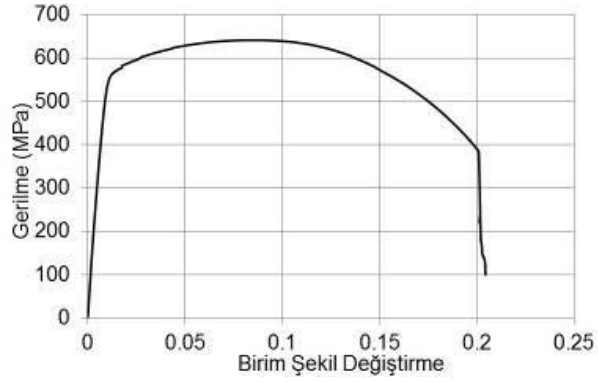
- Türk Deprem Yönetmeliği 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik.
- Lin, M.L., Tsai, K.C. and Tsai, C.Y. 2006. Bi-Directional Sub-Structural Pseudo-Dynamic Testing of a Full-Scale 2-Story BRBF, Part 2: Compressive Behavior of Gusset Plates. Proc. of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA, USA, pn.1642.
- Tsai, K.C., Weng, Y.T., Wang, K.J., Tsai, C.Y. and Lai, J.W. 2006. Bi-Directional Sub-Structural Pseudo-Dynamic Testing of a Full Scale 2-Story BRBF, Part 1: Seismic Design, Analytical and Experimental Performance Assessments. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA, USA, pn.1097.
- Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R. and DeVall, R. 2006. Seismic Testing and Performance of Buckling Restrained Bracing Systems. Can. J. Civ. Eng, 33, 183–198.
- Qiang, X. 2005. State of the Art of Buckling-Restrained Braces in Asia. Journal of Constructional Steel Research, 61, 727–748.
- Uriz, P. 2005. Towards Earthquake Resistance Design of Concentrically Braced Steel Structures. PhD Thesis, University of California, Berkeley.
- Christopoulos, A.S. 2005. Improved Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frames. MSc Thesis, University of Washington.
- Lin, M.L., Tsai, K.C., Hsiao, P.C. and Tsai, C.Y. 2005. Compressive Behavior of Buckling-Restrained Brace Gusset Connections. The First Conference on Advanced in Experimental Structural Engineering, Nagoya, Japan.
- American Institute of Steel Construction 2005. Seismic Provisions for Structural Steel Building. AISC, Chicago, IL.
- Uang, C.M. and Nakashima, M. 2004. Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. Editors: Bozorgnia Y, Bertero VV. CRC Press.
- Uang, C.M., Nakashima, M. and Tsai, K.C. 2004. Research and Application of Buckling Restrained Brace Frames. Steel Structures, 4, 301-313.
- Tsai, K.C., Lai, J.W., Lin, S.L. and Weng, C.H. 2004. Research and Application of Double-Core Cuckling Restrained Braces in Taiwan. Proc., 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, pn 2179.
- Higgins, C. and Newell, J. 2004. Confined Steel Brace for Earthquake Resistance Design. AISC Engineering Journal, Fourth Quarter, 41(4), 187-202.
- Lopez, W.A., Gwie, D.S., Lauck, T.W. and Saunders C.M. 2004. Structural Design and Experimental Verification of a Buckling Restrained Braced Frame System. AISC Engineering Journal, 4. Quarter, 177-186.
- Merritt, S., Uang, C.M. and Benzoni, G. 2003. Subassemblage Testing of Star Seismic Buckling Restrained Braces. Report no TR-2003/04, University of California, San Diego, La Jolla, CA.

- Black, C.J., Makris, N. and Aike, I.D. 2002. Component Testing, Stability Analysis and Haracterization of Buckling Restrained Braces. Rep. No. PEER 2002/08, Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Higgins, C. and Newell, J. 2002. Development of Two New Hysteretic Dampers. Proc. 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Tsai, K.C., Hwang, Y.C., Weng, C.S., Shirai, T. and Nakamura, H. 2002. Experimental Tests of Large Scale Buckling Restrained Braces and Frames. Proc., Passive Control Symposium, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.
- Aiken, I.D., Mahin, S.A. and Uriz, P. 2002. Large-Scale Testing of Buckling-Restrained Braced Frames. Proc. Japan Passive Control Symposium, Tokyo Institute of Technology, Japan, 35-44.
- López, W.A. 2001. Design Of Unbonded Braced Frames. Proceedings 70th Annual Convention, Structural Engineers Association of California, Sacramento.
- Chen, C.C., Chen, S.Y. and Liaw, J.J. 2001. Application of Low Yield Strength Steel on Controlled Plastification Ductile Concentrically Braced Frames. Can. J. Civ. Eng., 28, 823–836.
- Iwata, M., Kato, T. and Wada, A. 2000. Buckling-Restrained Braces as Hysteretic Dampers. Proc. STESSA, Quebec, PQ, pp. 33–38.
- Clark, P., Aiken, I., Kasai, K., Ko, E. and Kimura, I. 1999. Design Procedures for Buildings Incorporating Hysteretic Damping Devices. Proc. 69th Annual Convention of SEAOC, Sacramento, CA.
- Tremblay, R., Degrange, G. and Blouin, J. 1999. Seismic Rehabilitation of a Four-Story Building with a Stiffened Bracing System. Proceedings of the 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 549–554.
- Molina, F.J., Verzeletti, G., Magonette, G., Buchet, P.H. and Geradin, M. 1999. Bi-Directional pseudodynamic test of a full-size three-storey building. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28(12):1541-1566.
- Molina, F.J., Pegon, P. and Verzeletti, G. 1999. Time-domain identification from seismic pseudodynamic test results on civil engineering specimens. 2nd International Conference on Identification in Engineering Systems, University of Wales, Swansea.
- Wada, A., Saeki, E., Takeuchi, T. and Watanabe, A.C. 1998. Development of Unbonded Brace, Nippon Steel's Unbonded Braces. Nippon Steel Corporation Building Construction and Urban Development Division, Tokyo, Japan, pp. 1-16.
- Watanabe, A., Hitomi, Y., Yaeki, E., Wada, A. and Fujimoto, M. 1988. Properties of Brace Encased in Buckling-Restraining Concrete and Steel Tube. Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, IV, 19-724.
- Thornton, W.A. 1984. Bracing Connections for Heavy Construction. Engineering Journal of AISC, Vol.21.

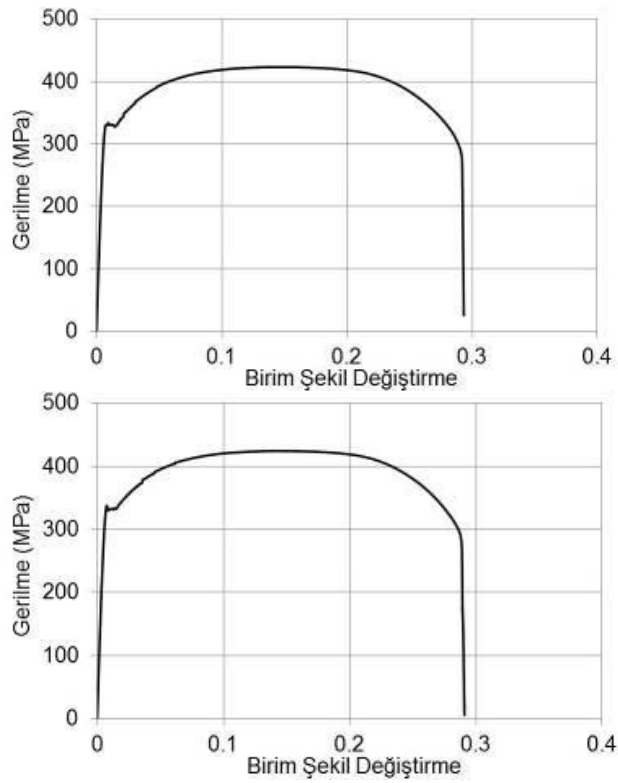
- Black, G.R., Wenger, B.A. and Popov, E.P. 1980. Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversal. Tech. Rep. UCB/EERC-80/40, EERC, Berkeley, CA.
- Kent, D.C. and Park, R. 1971. Flexural Members with Confined Concrete. Journal of Structures Division, ASCE, 97(ST7), 1969–1990.
- Whitmore, R.E. 1952. Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates. Bulletin No.16, Engineering Experiment Station, University of Tennessee.

## 7. EKLER

Burkulması engellenmiş çelik çaprazlara ait malzeme testi sonuçları aşağıda verilmiştir.

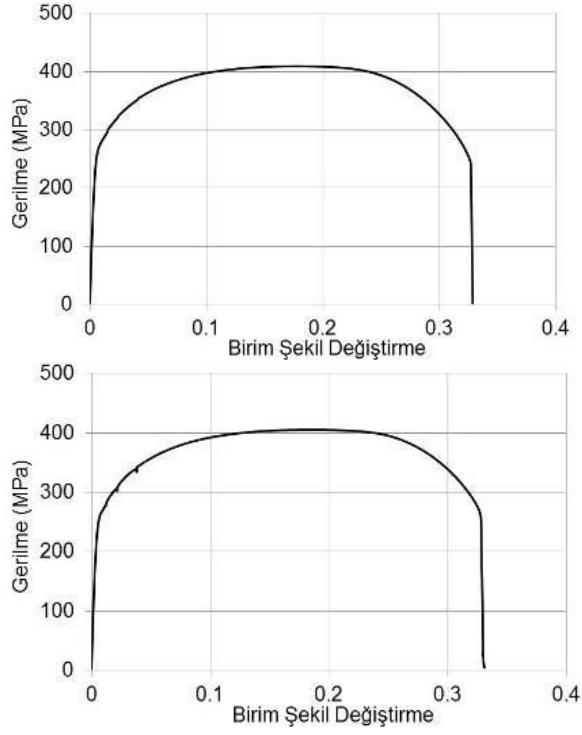


Şekil 7.1. Eleman 1. BEÇÇ\_1 için malzeme testi grafiği

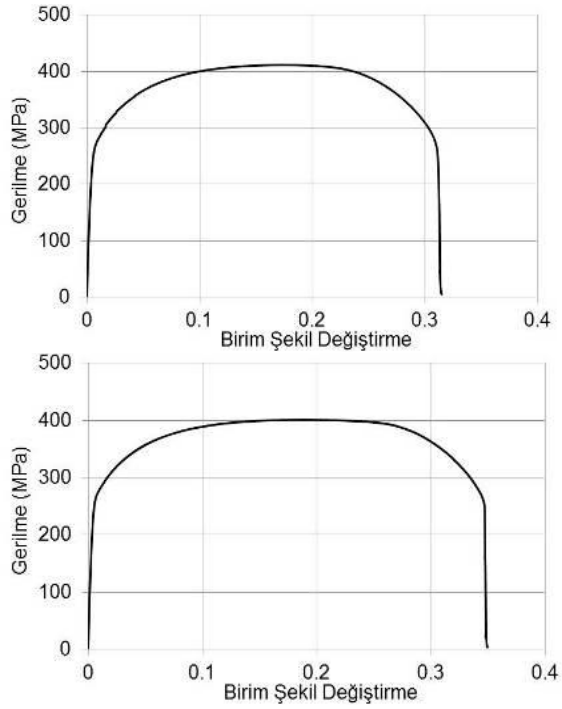


Şekil 7.2. Eleman 4. BEÇÇ\_1 için malzeme testi grafikleri

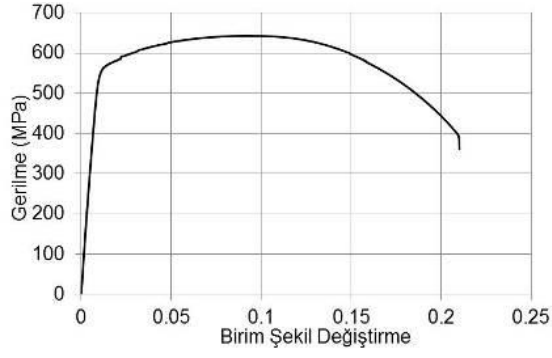




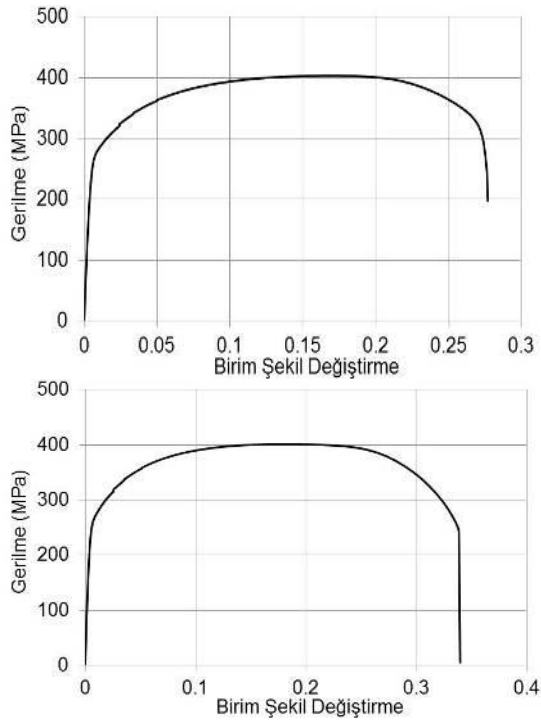
**Şekil 7.3.** Eleman 8. BEÇÇ\_1 için malzeme testi grafikleri



**Şekil 7.4.** Eleman 6. BEÇÇ\_1, 3. BEÇÇ\_1 ve 10. BEÇÇ\_1 için malzeme testi grafikleri



Şekil 7.5. Eleman 5. BEÇÇ\_1, 9. BEÇÇ\_1 ve 7. BEÇÇ\_1 için malzeme testi grafiği



Şekil 7.5. Eleman 1. BEÇÇ\_2, 3. BEÇÇ\_2 ve 2. BEÇÇ\_2 için malzeme testi grafikleri

## ÖZGEÇMİŞ

**YAĞMUR DİKİCİAŞIK**  
dyagmur@akdeniz.edu.tr



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2009-2011	Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta
Lisans 2012-2013	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2005-2009	Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta
İkinci Dal 2006-2009	Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta
Önlisans 2010-2012	Akdeniz Üniversitesi TBMYO, Yapı Denetimi Bölümü, Antalya

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Öğretim Görevlisi 2017- Devam Ediyor	AKEV Üniversitesi MYO, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Antalya
Şantiye Şefi 2015-2017	Şantiye Antalya
TÜBİTAK 112M820 Bursiyeri 2013-2015	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

## **ESERLER:**

### **Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler**

1- Özçelik R., Dikiciaşık Y. , Erdil E.F., "The development of the buckling restrained braces with new end restrains", JOURNAL OF CONSTRUCTIONAL STEEL RESEARCH, vol.138, pp.208-220, 2017

### **Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler**

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

2- 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

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., "BURKULMASI ENGELLENMİŞ ÇELİK ÇAPRAZLARIN UÇ STABİLİTELERİNİN ARTTIRILMASI", XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ, TRABZON, TÜRKİYE, 24-28 Ağustos 2015, ss.1-9

5-Dikiciaşık Y., Binici B., Topkaya C., Özçelik R., "The Development Of The Buckling Restrained Braces With New End Restrains. ", 11.International Congress on Advances in Civil Engineering , İSTANBUL, TÜRKİYE, 21-25 Ekim 2014, pp.1-6